IAEA
تسخير الذرة من أجل السلام

المؤتمر العام

GC(60)/INF/2
٣٠ حزيران/يونيه ٢٠١٦

توزيع عام
عربي
الأصل: انكليزي

الدورة العادية الستون

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٦

تقرير من المدير العام

ملخص

- استجابة لطلبات الدول الأعضاء، تُصدر الأمانة استعراضاً شاملاً يتناول التكنولوجيا النووية في كل عام. ويرد مرفقاً بهذه الوثيقة التقرير الخاص بالعام الحالي، الذي يسلّط الضوء على أبرز المستجدَّات في عام ٢٠١٥.

- واستعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٦ يغطي المجالات المختارة التالية: تطبيقات القوى، وتطبيقات الانشطار والانصهار المتقدمة، وتطبيقات المعجلات ومفاعلات البحوث، والتقنيات النووية في مجالات الصناعة، وتصوير الجسم في مجال الصحة البشرية، والتطورات في مكافحة الأمراض التي تنقلها الحشرات، وإدارة التربة.

- وتم تعديل الوثيقة لتأخذ في الاعتبار، إلى أقصى حد ممكن، التعليقات المحددة من قِبَل مجلس المحافظين وغيرها من التعليقات الواردة من الدول الأعضاء.

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٦

تقرير من المدير العام

موجز جامع

١- كان ثمة ٤٤١ مفاعلا قيد التشغيل في نهاية عام ٢٠١٥ وفَّرت طاقتها النووية قدرة عالمية على توليد الكهرباء قوامها ٣٨٢,٩ غيغاواط (كهربائي). وأُغلِقت بشكل دائم خمسة مفاعلات، تم ربط عشرة منها بالشبكة، وهو أعلى رقم منذ عام ١٩٩٠، وبدأ تشييد ثمانية. وظلَّت آفاق النمو في الأجلين القريب والبعيد تتمركز في آسيا، لا سيما في الصين. ومن بين الـ٦٨ مفاعلاً قيد التشييد، كان ٤٥ مفاعلاً قيد التشييد في آسيا، كما كان فيها ٣٩ مفاعلاً من بين ٤٥ مفاعلاً تم توصيلها بالشبكة الكهربائية منذ عام ٢٠٠٥.

٢- وثمة ثلاثون بلدًا في الوقت الراهن تستخدم القوى النووية والعدد نفسه تقريبا من البلدان يدرس أو يخطِّط أو يعمل بهمَّة من أجل إدخال القوى النووية في مزيج الطاقة لديها. ومن أصل الـ٣٠ بلدًا التي تشغِّل محطات قوى نووية، ثمة ١٣ بلدا إما أنها تشيِّد محطات جديدة أو تستكمل بنشاط مشاريع تشييد أوقِف العمل في تنفيذها سابقًا، و١٢ بلدًا تخطِّط إما لتشييد محطات جديدة أو استكمال مشاريع تشييد أوقِف العمل في تنفيذها. وتُظهِر التوقعات التي وضعتها الوكالة في عام ٢٠١٥ فيما يخص عام ٢٠٣٠ أن القدرة النووية سوف تنمو بحوالي ٢٪ في الحالة المنخفضة وبحوالي ٧٠٪ في الحالة المرتفعة. ويجري الاعتراف على نطاق أوسع بالدور الذي تؤديه القوى النووية في الحد من انبعاثات غازات الدفيئة. وبعد أن قدمت القوى النووية بالفعل مساهمة كبيرة في التخفيف من آثار تغير المناخ عن طريق تجنب ما يقرب من ٢ بليون طن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً، يمكنها أن تساهم بشكل مباشر في تحقيق أهداف الأمم المتحدة للتنمية المستدامة.

٣- وتَوَاصل العمل على إدخال تحسينات على حالة الأمان في محطات القوى النووية في جميع أنحاء العالم. ونشرت الوكالة تقريرها عن حادث فوكوشيما داييتشي. وفي مؤتمر دبلوماسي، اعتمدت الأطراف المتعاقدة في اتفاقية الأمان النووي إعلان فيينا بشأن الأمان النووي، الذي تضمَّن عدة مبادئ للوقاية من الحوادث ذات العواقب الإشعاعية وللتخفيف من هذه الآثار في حال وقوعها.

٤- وظلَّت القدرة السنوية العالمية على الإثراء أعلى من إجمالي الطلب، في حين بقيت سائر أنشطة دورة الوقود تعمل بمستويات ثابتة نسبياً. وأُبرِم الإطار القانوني الأساسي اللازم لإنشاء مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء بالتوقيع، في آب/أغسطس ٢٠١٥، على اتفاق الدولة المضيفة والاتفاقات التقنية ذات الصلة مع كازاخستان.

٥- ووصل الوقود المستهلَك من المفاعلات النووية قيد التخزين إلى نحو ٠٠٠ ٢٦٦ طن من الفلزات الثقيلة ويتراكم بمعدل حوالي ٧٠٠٠ طن من الفلزات الثقيلة سنوياً. وتواصل الاضطلاع بإعادة معالجة الوقود المستهلَك من المفاعلات التجارية في ١٠ مرافق بخمس دول أعضاء.

٦- ومن المتوقع في السنوات القادمة القيام بأعمال هامة للإخراج من الخدمة: فثمة ١٥٧ محطة قوى نووية على نطاق العالم تم إغلاقها على نحو دائم أو تجتاز عمليات إخراج من الخدمة. وما يزيد على ٥٦٪ من جميع المفاعلات العاملة بلغ أكثر من ٣٠ عامًا من العمر التشغيلي، ومنها نحو ١٥٪ بلغ أكثر من ٤٠ عامًا من العمر التشغيلي. وبرغم أن بعضها قد يستمر تشغيله لمدة أطول، فإن العديد منها سيُسحب من الخدمة في غضون

العقدين القادمين. وبالإضافة إلى ذلك، ثمة أكثر من ٤٨٠ من مفاعلات البحوث والمجمعات الحرجة، وعدّة مئات أخرى من مرافق دورة الوقود، تم إخراجها من الخدمة أو تجتاز عمليات إخراج من الخدمة.

٧- ومُنِحت رخصة البناء الأولى إلى مرفق للتخلص الجيولوجي العميق من الوقود النووي المستهلَك هو مرفق Onkalo في فنلندا. وتنتشر في كل أنحاء العالم مرافق قيد التشغيل للتخلص من جميع فئات النفايات المشعة الأخرى. وتنظر حاليا عدّة بلدان بجدّية في خيارات للتخلُّص من المصادر المشعّة المختومة المهمَلة، من ضمنها التخلُّص المشترك مع نفايات أخرى في مرافق مناسبة، أو إعادة التدوير، أو الإعادة إلى بلد المنشأ أو التخلص داخل حُفَر مخصّصة للسبر. ونتيجة عمليات الإزالة الناجحة في عام ٢٠١٥ خضع العديد من المصادر المشعّة المختومة المهمَلة لظروف تخزين مناسبة.

٨- وواصلت عدة دول أعضاء عمليات البحث أو التطوير أو النشر المتعلقة بمفاعلات الانشطار المتقدمة. وثمة اهتمام عالمي متزايد بتطوير ونشر المفاعلات السريعة. وهناك أيضًا اهتمام متزايد بالمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو المفاعلات النمطية بسبب الحاجة لتوليد القوى بمرونة، وتعزيز أداء الأمان من خلال سمات الأمان الكامن، وتوفير قدرة أفضل على تحمل التكاليف الاقتصادية. ويوجد حوالي ٥٠ من التصاميم والمفاهيم الخاصة بمفاعلات صغيرة ومتوسطة الحجم أو مفاعلات نمطية، ثلاثة منها قيد الإنشاء.

٩- وهناك اهتمام واسع لدى عدة دول أعضاء باستخدام الطاقة النووية لأغراض التطبيقات غير الكهربائية، مثل تحلية مياه البحر، وإنتاج الهيدروجين، وتدفئة الأحياء السكنية، واستخلاص النفط الثالثي وغير ذلك من التطبيقات الصناعية.

١٠- وتمضي الجهود المبذولة لتوفير الطاقة من الاندماج النووي، وهو التحدي الهندسي الأكبر في القرن الواحد والعشرين، مع تقدم أعمال التشييد في موقع المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي.

١١- ويتزايد الطلب على المُعجِّلات البروتونية عالية القدرة أو معجِّلات الحُزم الأيونية في مجالات مثل فيزياء الجُسيمات، والفيزياء النووية، والفيزياء القائمة على النيوترونات، وفي تحويل النفايات النووية المعمّرة.

١٢- وما يقرب من نصف مفاعلات البحوث والمرافق الحرجة قيد التشغيل في ٥٥ بلداً في العالم وعددها ٢٤٦ عمرها أكثر من ٤٠ سنة. وإدارة التقادم، واستدامة إمدادات الوقود، والخيارات المتعلقة بالتصرف في الوقود المستهلَك، وتعزيز استخدام مفاعلات البحوث هي التحديات الرئيسية لمجتمع مفاعل البحوث. وتهدف مبادرات من قبيل مختبر المفاعلات على شبكة الإنترنت، ومركز الوكالة الدولي المُسَمَّى القائم على مفاعلات البحوث، وكذلك الشبكات والتحالفات الإقليمية، إلى تعزيز التعاون الدولي في مجال بناء القدرات، بما في ذلك التعليم والتدريب. وتقوم ثمانية بلدان بتشييد مفاعلات بحوث جديدة، في حين تخطط عدة بلدان أخرى أو تنظر في بناء مفاعلات جديدة، كمرافق وطنية رئيسية لتطوير البنية الأساسية والبرامج المتعلقة بالعلوم والتكنولوجيا النووية، بما في ذلك القوى النووية.

١٣- وتواصلت أنشطة الحدّ من اليورانيوم الشديد الاثراء، بما في ذلك إعادة وقود اليورانيوم الشديد الاثراء المستخدم في مفاعلات البحوث إلى بلد المنشأ. وحققت برامج استرداد وقود اليورانيوم الشديد الإثراء من أصل أمريكي وروسي نتائج جديرة بالثناء على مر السنين. ومع إضافة أوزبكستان، فإن ٢٨ من البلدان[١] التي كان لديها يورانيوم شديد الإثراء هي الآن خالية من اليورانيوم الشديد الإثراء.

---

[١] وتايوان، الصين.

١٤- وعلى الرغم من عدم وجود أي أوجه قصور رئيسية في إمدادات النظير الطبي، الموليبدينوم-٩٩، خلال عام ٢٠١٥، فما زالت تظهر تحديات تشغيلية في مرافق المعالجة وفي مفاعلات البحوث الأكثر قدما. وبسبب التغيرات في الطلب، والكفاءة المكتسبة، والتنوُّع في التوريد، أدارت الصناعة بشكل جيد حالات الانقطاع الصغيرة غير المجدولة.

١٥- وتُستخدم التقنيات النووية على نطاق واسع في العمليات الصناعية لاستقصاء الظواهر الفيزيائية والكيميائية المعقدة، بما في ذلك التلف، وانتقال الكتلة، والتآكل والتحاتّ. وعندما يتعذَّر الوصول بسهولة إلى الأسطح أو عندما تكون مخفية بسبب وجود إنشاءات تعلوها، توفر التقنية النووية المتمثلة في تنشيط الطبقات الرقيقة طريقة فعالة لقياس ورصد التلف والتآكل. ويسمح تنشيط الطبقات الرقيقة جداً بتحقيق حساسية في قياس فقدان الأسطح تصل إلى بضعة نانومترات.

١٦- ومن المتوقع استخدام المنتجات الجديدة المعالَجة إشعاعياً مثل المواد نانوية المقياس المجمَّعة إشعاعياً بأشكال وأحجام مختلفة (الجُسيمات النانوية، والألياف النانوية، والمسامّ النانوية) في تحضير مواد التغليف النشطة للأطعمة وكذلك تحضير مواد ضمادات الجروح، وأيضاً استخدامها كوسائل لإيصال العقاقير. ويجري تطوير مواد تغليف 'فعالة'، أو 'ذكية'، بخصائص فائقة لاحتجاز الغازات يمكنها أن تمنع الأكسجين من الدخول والغازات الخاملة من مغادرة مواد تغليف الأطعمة، مما يؤدي بالتالي إلى تمديد الفترة العمرية للمنتَج. ويمكن تصنيع أغشية رقيقة من هذا النوع بإدماج جُسيمات نانوية محدَّدة في الأغشية، بما يمكن أن يحتوي أيضاً على أنزيمات وعوامل مضادة للبكتيريا ومكونات أخرى تساعد في السيطرة على تحلُّل الأغذية وتلفها.

١٧- وفي صناعة الطباعة والطلاء، كانت الحاجة إلى إجراءات تقلل من التلوث وتتفادي نزوح منتجات ثانوية متدهورة إلى السلع الاستهلاكية عاملاً رئيسياً في ظهور معجلات حزم إشعاعية إلكترونية منخفضة الطاقة بطاقات أقل من ٣٠٠ كيلو إلكترون فلط لصناعة الطلاء. ويؤدي استخدام مونومرات وأوليغومرات إشعاعية قابلة للمعالجة في أنواع الطلاء، والأحبار والمواد اللاصقة المتبلمرة والمتشعبة، إلى تجنب استخدام المركّبات العضوية المتطايرة. والتطوير الأخير لجيل جديد من بواعث الشعاع الإلكتروني المدمجة للغاية، والتي يسهل تشغيلها بنطاق فلطية متسارعة من ٨٠ إلى ٢٠٠ كيلو فلط ومساحات معالجة بعرض يصل إلى ٦٠ سم يوفر القدرة على مواصلة تعزيز استخدام هذه التكنولوجيا.

١٨- وفي مجال الصحة، هناك اهتمام كبير بالتطوير المستمر لأدوات تقييم تركيب الجسم، حيث تشير الأدلة إلى أن المكونات الفردية لتركيب الجسم لها تأثير كبير على مخاطر الاصابة بأمراض مزمنة، وتطور المرض والاستجابة للعلاج. وفي الوقت الراهن، تُستخدم ثلاثة طرائق للتصوير لتقييم تركيب الجسم: قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة، والتصوير المقطعي الحاسوبي الكمي، والتصوير بالرنين المغنطيسي. وقياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة ينطوي على التصوير في وقت واحد باثنين من مستويات طاقة الأشعة السينية المتميزة ويمثل طريقة عالية الصحة والدقة لقياس الكثافة المعدنية للعظام، وكتلة العظام، والكتلة الدهنية، وكتلة الأنسجة الرَّخْوة غير الدهنية، ونسبة الدهون.

١٩- ومؤخراً، اقتُرِحت أنظمة للمسح الضوئي لسطح كامل الجسم ثنائية وثلاثية الأبعاد كمنصات جديدة لتقييم تركيب الجسم حيث إن إمكانية الوصول إليها بسهولة، وانخفاض تكلفتها وغنى بياناتها المتعلقة بمناطق الجسم يجعلها خيارات مقنعة لتقييم تركيب مناطق الجسم. وقد تبيَّن أن القياسات التي يتم الحصول عليها باستخدام الماسحات الضوئية الثلاثية الأبعاد للأسطح دقيقة للغاية، في حين يتم الحصول على قياسات شكل الجسم الثنائية الأبعاد باستخدام كاميرا رقمية قياسية. وظهر مؤخراً كيف يمكن أن يُستمَدَّ مؤشر الكتلة الدهنية ومؤشر الكتلة

الخالية من الدهون من صور ظلية بسيطة لكامل الجسم، يمكن التقاطها بسهولة باستخدام الكاميرات التقليدية مثل تلك الموجودة في الهواتف النقالة، مما يجعل قياسات تركيب الجسم الضوئية الثنائية الأبعاد مناسبة للغاية لمجموعة متنوعة من التطبيقات الميدانية.

٢٠- والاستخدام المتكامل للأساليب الإشعاعية والوراثية والقائمة على المعايشات لمكافحة البعوض الناقل للمرض قد يساعد على التقليل من عبء المرض المرتبط بذلك. وتُظهِر المشروعات التجريبية أنه يمكن دمج تقنية الحشرة العقيمة مع أساليب المكافحة الأخرى لكبح تجمعات البعوض على نحو فعال. وتتطلب تقنية الحشرة العقيمة والتدخلات الأخرى ذات الصلة بكبح التجمعات إنتاجاً مكثّفاً، ولكن من الضروري أن يتم إطلاق ذكور البعوض فقط لأن إناث البعوض هي الناقلة للمرض. وفصل الجنسين لإلغاء الإناث من خط الانتاج ممكن في نطاق ضيق باستخدام ازدواج الشكل الجنسي وخلط وجبات الدم بمواد سامة ولكن هناك حاجة إلى عمليات فعالة وقوية لفصل الجنسين وراثياً بغرض القضاء بصورة سهلة ومأمونة على إناث البعوض على نطاق التربية المكثفة. ويجري الآن بذل جهود لتحديد الواسمات الجديدة المورفولوجية أو المُهلِكة بشروط للبعوض من أنواع *Anopheles arabiensis* و *Aedes albopictus* و*Aedes aegypti* حتى يتسنى استحداث سلالات فعالة عن طريق فصل الجنسين وراثياً.

٢١- وجنباً إلى جنب مع تقنية الحشرة العقيمة التقليدية باستخدام التشعيع، يجري تقييم البكتريا فولباخيا، وهي جنس من البكتيريا التكافلية المورَّثة من الأم والتي تتوافر في الحشرات، كأداة مكملة للقيام من خلال عدم التوافق الهُيولي (تقنية الحشرة غير المتوافقة – IIT) بكبح كبرى تجمعات البعوض الناقل للأمراض في بعض المناطق. وفي غياب عمليات قوية لفصل الجنسين وراثياً، يبدو أن اقتراح الجمع بين تقنية الحشرة العقيمة مع النُهُج القائمة على البكتريا فولباخيا ينطوي على إمكانات كبيرة كنهج فعال ومأمون بيولوجياً للسيطرة على تجمعات البعوض الناقل للأمراض لأنه يقضي على المخاطر المرتبطة بإطلاق إناث مخصّبة وناقلة للأمراض. والنهج الديناميكي لكبح التجمعات، الذي يدمج أسلوب تقنية الحشرة العقيمة وغيره من الأساليب المتوافقة في برنامج لمكافحة الآفات الحشرية على نطاق المنطقة بالكامل، قد يمثل الطريقة الوحيدة لمكافحة تجمعات البعوض بشكل مستدام، وربما أيضاً الطريقة الوحيدة لمكافحة ما تنقله هذه التجمعات من أمراض عديدة.

٢٢- ويؤدي تدهور التربة الناجم عن ممارسات غير ملائمة في إدارة المزارع إلى فقدان التربة الخصبة وانخفاض غلات المحاصيل. كما أن حالات فقدان الأراضي الصالحة للزراعة والترسب وتلوث مجاري المياه والبحيرات تمثل هي أيضاً تهديداً بيئياً واجتماعياً واقتصادياً كبيراً. وهناك ما يصل إلى ١,٤ بليون شخص يمكن أن يتأثروا بتدهور الأراضي، في حين قُدِّرت خسائر خدمات النظم الإيكولوجية بـ١٠,٦ تريليون دولار سنوياً.

٢٣- ولطالما استرشدت الاستراتيجيات التي تساعد في تقييم تآكل التربة وقياس فعالية الحفاظ على التربة باستخدام النويدات المشعة المتساقطة مثل السيزيوم -١٣٧، التي نشأت من تجارب الأسلحة النووية الحرارية في الماضي، والنظائر المشعة الأرضية المنشأ التي تحدث بشكل طبيعي مثل الرصاص-٢١٠ والنظائر المشعة الكونية المنشأ مثل البريليوم-٧. وتتيح إحدى تقنيات الأدلة الجنائية المعتمدة على النظائر المستقرة التي تم تطويرها مؤخراً، والتي تستند إلى بصمات النظائر المستقرة بمركّبات معيّنة للواسمات الحيوية العضوية المتأصّلة في التربة، التمييز بين مصادر الرواسب وتحديد نسبتها. ومن خلال الربط بين بصمات النظائر المستقرة بمركّبات معيّنة المتعلقة بأصول الرواسب وبين معلومات النويدات المشعة المتساقطة المتعلقة بإعادة توزيع التربة والرواسب، يتاح للباحثين نهج دقيق وقوي لتحديد أصول الرواسب بغرض تحديد المناطق التي تكون عرضة لتآكل التربة. واستخدام هذه النُهُج النظيرية المتكاملة للمجتمعات الزراعية يمكن أن يسمح باعتماد تدابير تخفيف محددة وفعالة للحد من الخسائر المتعلقة بخصوبة التربة وإنتاجية المحاصيل وتدهور نوعية المياه.

استعراض التكنولوجيا النووية لعام ٢٠١٦

التقرير الرئيسي

ألف- تطبيقات القوى

ألف-١- القوى النووية اليوم

١- في ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٥، كان ثمة ٤٤١ مفاعل قوى نووية قيد التشغيل على نطاق العالم، يبلغ إجمالي قدرتها على توليد الكهرباء ٣٨٢,٩ غيغاواط (كهربائي)[٢] (أنظر الجدول ألف-١). ويمثّل ذلك زيادة تقدّر بنحو ٦,٦ غيغاواط (كهربائي) من إجمالي القدرة، مقارنةً بأرقام عام ٢٠١٤.

٢- ومن بين المفاعلات قيد التشغيل، يُوجد ٨١,٦٪ من المفاعلات المهدّأة والمبرّدة بالماء الخفيف؛ و١١,١٪ من المفاعلات المهدّأة والمبرَّدة بالماء الثقيل؛ و٣,٤٪ من المفاعلات المبرّدة بالماء الخفيف والمهدأة بالغرافيت؛ و٣,٢٪ من المفاعلات المبرّدة بالغاز. ويوجد اثنان من المفاعلات السريعة المبرّدة بفلز سائل.

٣- وفي ١٠ أيلول/سبتمبر ٢٠١٥، أصبح المفاعل Sendai-1 أول مفاعل للقوى النووية يستأنف التشغيل الكامل في اليابان منذ حادث فوكوشيما داييتشي، وتلاه المفاعل Sendai-2 في ١٥ تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٥. ووافقت الهيئة الرقابية النووية في اليابان على إعادة تشغيل المفاعل Ikata-3 في أيار/مايو ٢٠١٥، وهو ما وافقت عليه أيضاً الجمعية التشريعية لمقاطعة Ehime في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٥.

٤- وقد أُعلِنت خمس وحدات مفاعلات في اليابان (Genkai-1 وMihama-1 وMihama-2 وShimane-2 وTsuruga-1) والمفاعل Grafenrheinfeld في ألمانيا والمفاعل Wylfa-1 في المملكة المتحدة باعتبارها مغلقة بشكل دائم في عام ٢٠١٥.

٥- وشهد عام ٢٠١٥ ربط عشرة مفاعلات جديدة بالشبكة – وهو أعلى رقم منذ عام ١٩٩٠. وهناك ثمانية من هذه المفاعلات (Changjiang-1 وFangchenggang-1 وFangjiashan-2 وFuqing-2 وHongyanhe-3 وNingde-3 وYangjiang-2 وYangjiang-3) في الصين، وواحد (Shin-Wolsong-2) في جمهورية كوريا، وواحد (Beloyarsk-4) في الاتحاد الروسي.

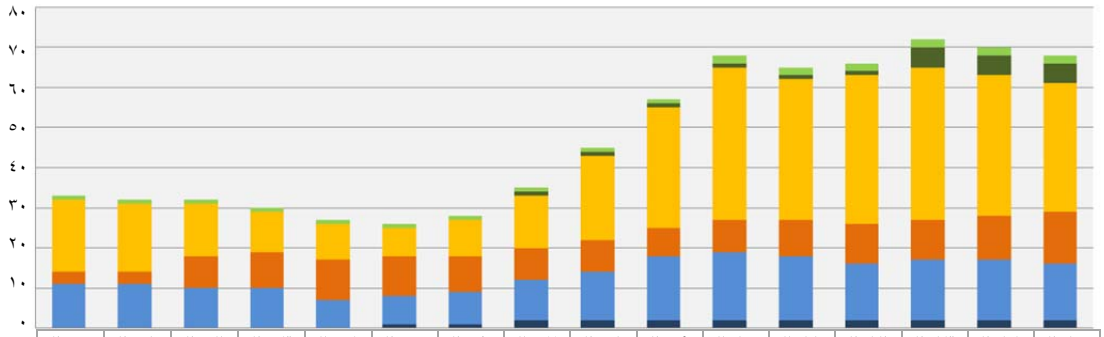
٦- وقد شهد عام ٢٠١٥ البدء في ثماني عمليات تشييد على النحو التالي: Fangchenggang-3 وFuqing-5 وFuqing-6 وHongyanhe-5 وHongyanhe-6 وTianwan-5 في الصين، وK-2 في باكستان، فضلاً عن Barakah-4 في الإمارات العربية المتحدة.

٧- وفي ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٥، كان ٦٨ مفاعلاً قيد التشييد. وظلّت حالات التوسّع وكذلك آفاق النمو في الأجلين القريب والطويل مركَّزة في آسيا (الشكل ألف-١)، ولا سيما في الصين. ومن أصل إجمالي عدد

---

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

المفاعلات قيد التشييد، ثمة ٤٥ مفاعلاً في آسيا، كما أن فيها ٣٩ مفاعلاً من أصل ٤٥ مفاعلاً جديداً تم ربطها بالشبكة منذ عام ٢٠٠٥.



	٢٠٠٠	٢٠٠١	٢٠٠٢	٢٠٠٣	٢٠٠٤	٢٠٠٥	٢٠٠٦	٢٠٠٧	٢٠٠٨	٢٠٠٩	٢٠١٠	٢٠١١	٢٠١٢	٢٠١٣	٢٠١٤	٢٠١٥
أمريكا اللاتينية	١	١	١	١	١	١	١	١	١	١	٢	٢	٢	٢	٢	٢
أمريكا الشمالية	٠	٠	٠	٠	٠	٠	٠	١	١	١	١	١	١	٥	٥	٥
آسيا – الشرق الأقصى	١٨	١٧	١٣	١٠	٩	٧	٩	١٣	٢١	٣٠	٣٨	٣٥	٣٧	٣٨	٣٥	٣٢
آسيا – الشرق الأوسط والجنوب	٣	٣	٨	٩	١٠	١٠	٩	٨	٨	٧	٨	٩	١٠	١٠	١١	١٣
أوروبا – الوسطى والشرقية	١١	١١	١٠	١٠	٧	٧	٨	١٠	١٢	١٦	١٧	١٦	١٤	١٥	١٥	١٤
أوروبا – الغربية	٠	٠	٠	٠	٠	١	١	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢	٢

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

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

الجدول ألف-١- مفاعلات القوى النووية قيد التشغيل وقيد التشييد في العالم (حتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٥)[أ]

البلد	المفاعلات قيد التشغيل		المفاعلات قيد التشييد		إمدادات الكهرباء النووية في عام ٢٠١٥			مجموع الخبرة التشغيلية حتى نهاية عام ٢٠١٥	
	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	عدد الوحدات	المجموع بالميغاواط (الكهربائي)	تيراواط-ساعة	٪ من المجموع		الأعوام	الأشهر
الاتحاد الروسي	٣٥	٢٥ ٤٤٣	٨	٦ ٥٨٢	١٨٢,٨	١٨,٦		١ ١٩١	٤
الأرجنتين	٣	١ ٦٣٢	١	٢٥	٦,٥	٤,٨		٧٦	٢
أرمينيا	١	٣٧٥			٢,٦	٣٤,٥		٤١	٨
إسبانيا	٧	٧ ١٢١			٥٤,٨	٢٠,٣		٣١٥	١
ألمانيا	٨	١٠ ٧٩٩			٨٦,٨	١٤,١		٨١٦	٧
الإمارات العربية المتحدة			٤	٥ ٣٨٠					
أوكرانيا	١٥	١٣ ١٠٧	٢	١ ٩٠٠	٨٢,٤	٥٦,٥		٤٥٨	٦
إيران (جمهورية-الإسلامية)	١	٩١٥			٣,٢	١,٣		٤	٤
باكستان	٣	٦٩٠	٣	١ ٦٤٤	٤,٣	٤,٤		٦٤	٨
البرازيل	٢	١ ٨٨٤	١	١ ٢٤٥	١٣,٩	٢,٨		٤٩	٣
بلجيكا	٧	٥ ٩١٣			٢٤,٨	٣٧,٥		٢٧٥	٧
بلغاريا	٢	١ ٩٢٦			١٤,٧	٣١,٣		١٥٩	٣
بيلاروس			٢	٢ ٢١٨					
الجمهورية التشيكية	٦	٣ ٩٣٠			٢٥,٣	٣٢,٥		١٤٦	١٠
جمهورية كوريا	٢٤	٢١ ٧٣٣	٤	٥ ٤٢٠	١٥٧,٢	٣١,٧		٤٧٤	٠
جنوب أفريقيا	٢	١ ٨٦٠			١١,٠	٤,٧		٦٢	٣

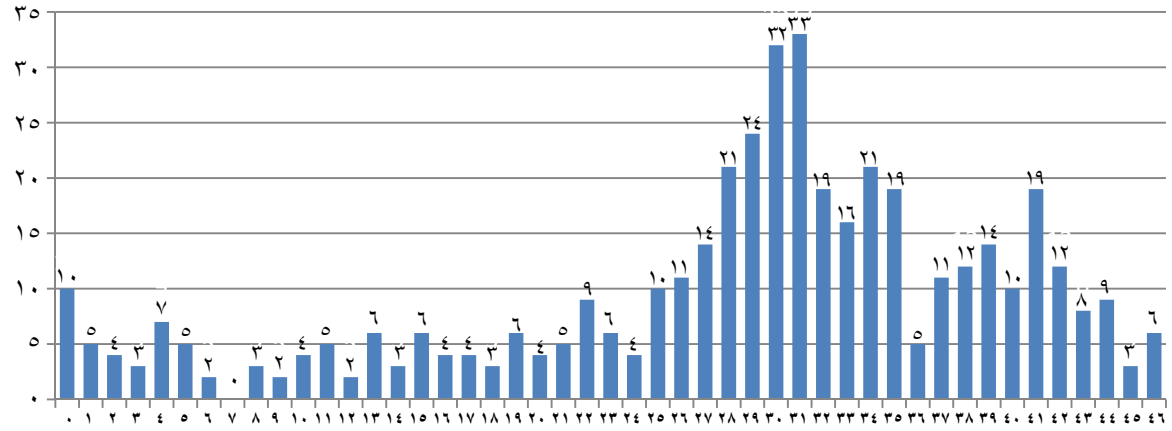
رومانيا	٢	١ ٣٠٠			١٠,٧	١٧,٣	٢٧	١١
سلوفاكيا	٤	١ ٨١٤	٢	٨٨٠	١٤,١	٥٥,٩	١٥٦	٧
سلوفينيا	١	٦٨٨			٥,٤	٣٨,٠	٣٤	٣
السويد	١٠	٩ ٦٤٨			٥٤,٥	٣٤,٣	٤٣٢	٦
سويسرا	٥	٣ ٣٣٣			٢٢,٢	٣٣,٥	٢٠٤	١١
الصين	٣١	٢٦ ٧٧٤	٢٤	٢٤ ١٢٨	١٦١,٢	٣,٠	٢٠٩	٢
فرنسا	٥٨	٦٣ ١٣٠	١	١ ٦٣٠	٤١٩,٠	٧٦,٣	٢ ٠٤٨	٤
فنلندا	٤	٢ ٧٥٢	١	١ ٦٠٠	٢٢,٣	٣٣,٧	١٤٧	٤
كندا	١٩	١٣ ٥٢٤			٩٥,٦	١٦,٦	٦٩٣	٦
المكسيك	٢	١ ٤٤٠			١١,٢	٦,٨	٤٧	١١
المملكة المتحدة	١٥	٨ ٩١٨			٦٣,٩	١٨,٩	١ ٥٥٩	٧
الهند	٢١	٥ ٣٠٨	٦	٣ ٩٠٧	٣٤,٦	٣,٥	٤٣٩	٦
هنغاريا	٤	١ ٨٨٩			١٥,٠	٥٢,٧	١٢٢	٢
هولندا	١	٤٨٢			٣,٩	٣,٧	٧١	٠
الولايات المتحدة الأمريكية	٩٩	٩٩ ١٨٥	٥	٥ ٦٣٣	٧٩٨,٠	١٩,٥	٤ ١١١	٤
اليابان	٤٣	٤٠ ٢٩٠	٢	٢ ٦٥٠	٤,٣	٠,٥	١ ٧٣٩	٠
المجموع [ب، ج]	٤٤١	٣٨٢ ٨٥٥	٦٨	٦٧ ٤٤٢	٢ ٤٤١,٣		١٦ ٥٣٦	٧

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

ب- ملحوظة: مجموع الأرقام هذا يتضمّن البيانات التالية الواردة من تايوان، الصين:
٦ وحدات، ٥٠٣٢ ميغاواط(كهربائي) قيد التشغيل؛ ووحدتان، ٢٦٠٠ ميغاواط(كهربائي) قيد التشييد؛
٤٠,٨ تيراواط-ساعة من الكهرباء المولَّدة نووياً، أي ما يمثّل ١٨,٩٪ من إجمالي حجم الكهرباء المولَّدة.

ج. يشمل إجمالي الخبرة التشغيلية أيضاً المحطات المغلقة في إيطاليا (٨٠ عاماً و٨ أشهر)؛ وكازاخستان (٢٥ عاماً و١٠ أشهر)؛ وليتوانيا (٤٣ عاماً و٦ أشهر)؛ وتايوان، الصين (٢٠٠ عاماً وشهر واحد).

٨- ومن أصل مفاعلات القوى النووية قيد التشغيل البالغ عددها ٤٤١ مفاعلاً، ثمة ٢٥٠ مفاعلاً ما زالت في الخدمة منذ ٣٠ عاماً أو أكثر. وعندما يصل مفاعل لنهاية عمره التصميمي، فإنه يخضع لاستعراض للأمان وتقييم لتقادم هياكله ونظمه ومكوناته الأساسية بغرض التحقق من صحة الترخيص له بالعمل لفترات تتجاوز مدة الخدمة المزمعة أصلاً أو تجديد ذلك الترخيص.



سنوات التشغيل

الشكل ألف-٢ - توزُّع مفاعلات القوى قيد التشغيل حسب أعمارها التشغيلية، حتى كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٥ . (المصدر: نظام المعلومات عن مفاعلات القوى http://www.iaea.org/pris)

٩- وفي الإمارات العربية المتحدة، قدمت مؤسسة الإمارات للطاقة النووية طلب رخصة تشغيل نيابةً عن شركة نواة في آذار/مارس. وسوف تكون شركة نواة هي المنظمة المشغلة وحاملة ترخيص المفاعل براكة-١. ومن المتوقع أن تصدر الهيئة الاتحادية للرقابة النووية رخصة تشغيل في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٦ للسماح بتحميل الوقود وإدخال المفاعل براكة-١ في الخدمة بالتشغيل الساخن. أما الوحدات براكة ٢، و٣ و٤، فهي جميعها قيد التشييد، ويُتوقَّع أن تكون عاملة بحلول عام ٢٠١٨، وعام ٢٠١٩ وعام ٢٠٢٠، على التوالي. وأجرت الوكالة بعثة لخدمة الاستعراضات الرقابية المتكاملة في شباط/ فبراير، وبعثة لاستعراض إجراءات التأهب للطوارئ في آذار/ مارس، وبعثة للخدمة الاستشارية الدولية المعنية بالحماية المادية في أيار/ مايو ٢٠١٥.

١٠- واستمر التشييد لكلٍّ من وحدتي أول محطة للقوى النووية في بيلاروس. ومن المقرر إدخال المفاعلين Ostrovets-1 and 2 في الخدمة خلال عامي ٢٠١٨ و٢٠٢٠، على التوالي.

١١- وتركيا مستمرة في تطوير البنية الأساسية لبرنامجها للقوى النووية وتقوم بوضع الصيغة الأخيرة لمسودة قانون للطاقة النووية يعالج قضايا الأمان والأمن والضمانات بطريقة شاملة.

١٢- وأسست بنغلاديش شركة محطة روبور للقوى النووية باعتبارها المشغِّل في المستقبل وبدأت مفاوضات مع الاتحاد الروسي بشأن اتفاق ائتمان وعقد لأعمال الهندسة والإنشاءات العامة. ومع وجود خطط لاختيار تكنولوجيا وموقع لأولى محطات القوى النووية في بولندا بحلول عام ٢٠١٩، والبدء في التشييد بحلول عام ٢٠٢٢ وجعل أولى وحداتها عاملة بحلول عام ٢٠٢٩، وضعت بولندا وثائق المناقصة وأجرت مفاوضات بشأن آلية للدعم الحكومي يخطَّط لاعتمادها بحلول عام ٢٠١٨. ونفّذت فييت نام مشاريع وطنية بشأن تنمية الموارد البشرية والتواصل الخارجي، واستمرت في مراجعة قانونها للطاقة الذرية، المتوقع أن يتم تقديمه للموافقة عليه في عام ٢٠١٦.

١٣- واعترفت بعثات الاستعراض المتكامل للبنية الأساسية النووية إلى نيجيريا (حزيران/يونيه)، وكينيا (آب/أغسطس)، والمغرب (تشرين الأول/أكتوبر) بالتقدم المحرز من قِبَل البلدان في تطوير بنيتها الأساسية النووية وقدمت توصيات لمزيد من الإجراءات. وفي حزيران/يونيه ٢٠١٥، وقّع الأردن عقوداً مع شركة Atomstroyexport في الاتحاد الروسي لإجراء دراسة بشأن إمدادات المياه والأنشطة الإشرافية للموقع. وتأسّست شركة القوى النووية الأردنية في تشرين الأول/ أكتوبر. ويُجرى تقييم تقني لاقتراحات تتعلق بدراسة للشبكة، وأبحاث عن سوق الكهرباء، وخدمات استشارية بشأن التطوير التقني والقانوني والمالي للمشاريع. ووقّعت مصر اتفاقاً مع الشركة الحكومية للطاقة الذرية "روزاتوم" في تشرين الثاني/نوفمبر لتشييد أربعة مفاعلات.

١٤- وفي العديد من البلدان التي تنظر في القوى النووية، ينصبّ التركيز على اتخاذ قرار مستنير، وتطوير البنية الأساسية القانونية والرقابية الشاملة اللازمة لدعم برنامج القوى النووية، وتنمية الموارد البشرية المطلوبة.

١٥- وتظل مشاركة أصحاب المصلحة مجالاً هاماً لتركيز البلدان في جميع مراحل تطوير البنية الأساسية النووية لأنها تساعد على معالجة شواغل الدول الأعضاء في وقت مبكر وتفسر المنطق المتعلق ببرنامجها للقوى النووية وخططها والتقدم المحرز بهذا الصدد. وفي عام ٢٠١٥، يَسَّرَت الوكالة بعثات للخبراء بشأن مشاركة أصحاب المصلحة في إندونيسيا وكينيا ومصر والمملكة العربية السعودية وكذلك اجتماعات دولية في فنلندا واليابان.

ألف-١-١- البلدان المتوسعة

١٦- أصدرت الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة رخصة تشغيل لمدة ٤٠ عاماً إلى شركة Tennessee Valley Authority بغرض تشغيل الوحدة ٢ من مفاعل Watts Bar حتى تشرين الأول/أكتوبر ٢٠٥٥. وموقع المفاعل Watts Bar هو أول موقع يمتثل لأوامر الهيئة الرقابية النووية المتصلة بفوكوشيما بشأن استراتيجيات التخفيف من الحوادث.

١٧- ويجري تشييد المفاعل Flamanville-3 EPR في فرنسا والموعد النهائي المقرر لذلك ولتوصيله بالشبكة هو نهاية عام ٢٠١٨. واستجابةً لطلب من الهيئة الفرنسية للأمان النووي، يجري تنفيذ سلسلة من الاختبارات للتأكد من تَوافُق الخصائص المعدنية والميكانيكية لرأس وعاء الضغط والجزء السفلي مع المتطلبات.

١٨- وأبرمت الشركة الأرجنتينية لمحطات الكهرباء النووية والشركة الوطنية النووية الصينية مفاوضات بشأن العقود التقنية والتجارية لتشييد مفاعل الأرجنتين الرابع، من نوع CANDU-type Atucha 3، الذي سيستغرق بناؤه ثماني سنوات. ويتوقّع اتفاق إطاري بين المنظمتين أيضاً تشييد مفاعل ماء مضغوط Hualong One ذي تصميم صيني باعتباره الوحدة الخامسة للأرجنتين.

١٩- وقدّمت شركة Fennovoima في فنلندا إلى وزارة التشغيل والاقتصاد طلب رخصة لتشييد مشروعها Hanhikivi. ومن المتوقع أن تستغرق معالجة الطلب سنتين على الأقل. وتهدف شركة Fennovoima إلى البدء خلال عام ٢٠١٨ في بناء المحطة على أساس مفاعل القوى المبرّد والمهدّأ بالماء ذي التصميم الروسي (WWER-1200) بقدرة ١٢٠٠ ميغاواط (كهربائي)، مع بدء التشغيل في عام ٢٠٢٤.

ألف-١-٢- البلدان المشغِّلة

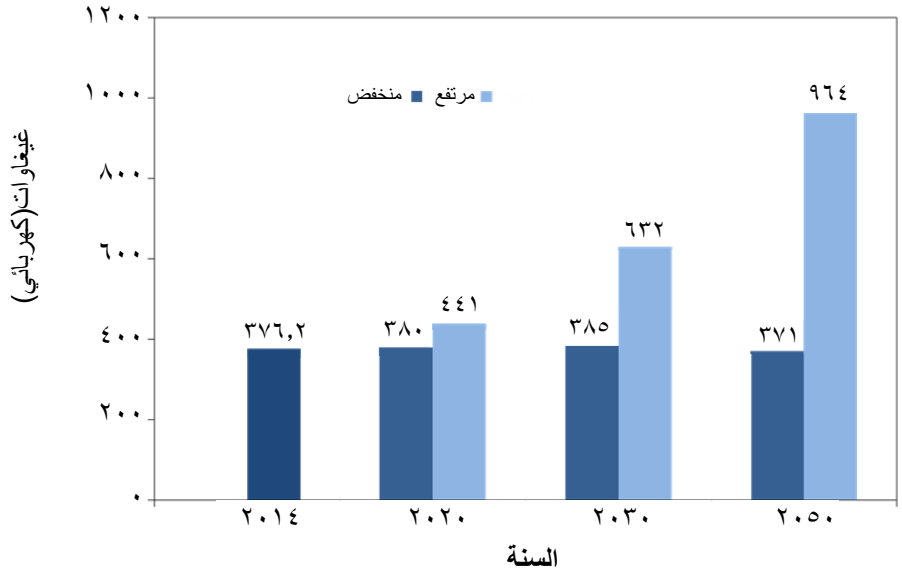
٢٠- تعتمد القرارات المتعلقة بأعمار التشغيل بشكل أساسي على ظروف سوق الكهرباء وتوقّعات تطور الأعمال، وتقترن في بعض الأحيان أيضاً بعوامل اجتماعية وسياسية. وفي السويد، سيتم إغلاق أربعة مفاعلات في وقت سابق عما كان مخططاً لها في الأصل لأنها تُعتبَر غير مربحة. وسوف تُغلَق محطة Ringhals-2 بشكل دائم في عام ٢٠١٩، وتتبعها محطة Ringhals-1 في عام ٢٠٢٠، على الرغم من أن كلاً منهما كان من المقرر في البداية إغلاقه حوالي عام ٢٠٢٥. وسيُتَّخَذ قرار نهائي بشأن موعد إغلاق محطة Oskarshamn-1 بعد أن يصبح الجدول الزمني للإخراج من الخدمة جاهزاً. ولن يعاد تشغيل محطة Oskarshamn-22، وهي خارج الخدمة منذ حزيران/يونيه ٢٠١٣ بسبب برنامج تحديث واسع النطاق.

٢١- وسوف تغلق شركة إنترجي في الولايات المتحدة الأمريكية محطتها للقوى النووية ذات الوحدة المنفردة بولاية ماساتشوستس في موعد أقصاه حزيران/يونيه ٢٠١٩. كما تعتزم إغلاق محطتها للقوى النووية FitzPatrick NPP في نيويورك، أواخر عام ٢٠١٦ أو أوائل عام ٢٠١٧، مشيرةً إلى انخفاض الجدوى الاقتصادية باعتباره السبب.

٢٢- وتمت الموافقة على أن يستمر حتى عام ٢٠١٧ تشغيل أقدم مفاعل عامل في جمهورية كوريا، Kori-1، المشغَّل منذ عام ١٩٧٨ والذي تم تجديده في عام ٢٠٠٧. ومع إعلان شركة كوريا للهيدرولوجيا والقوى النووية أنها لن تقدِّم طلباً لعملية إعادة ترخيص تمدّ عملها إلى عام ٢٠٢٧، سيكون المفاعل Kori-1 أول وحدة للقوى النووية في البلد تدخل في مرحلة الإخراج من الخدمة عند إغلاقها في حزيران/يونيه ٢٠١٧.

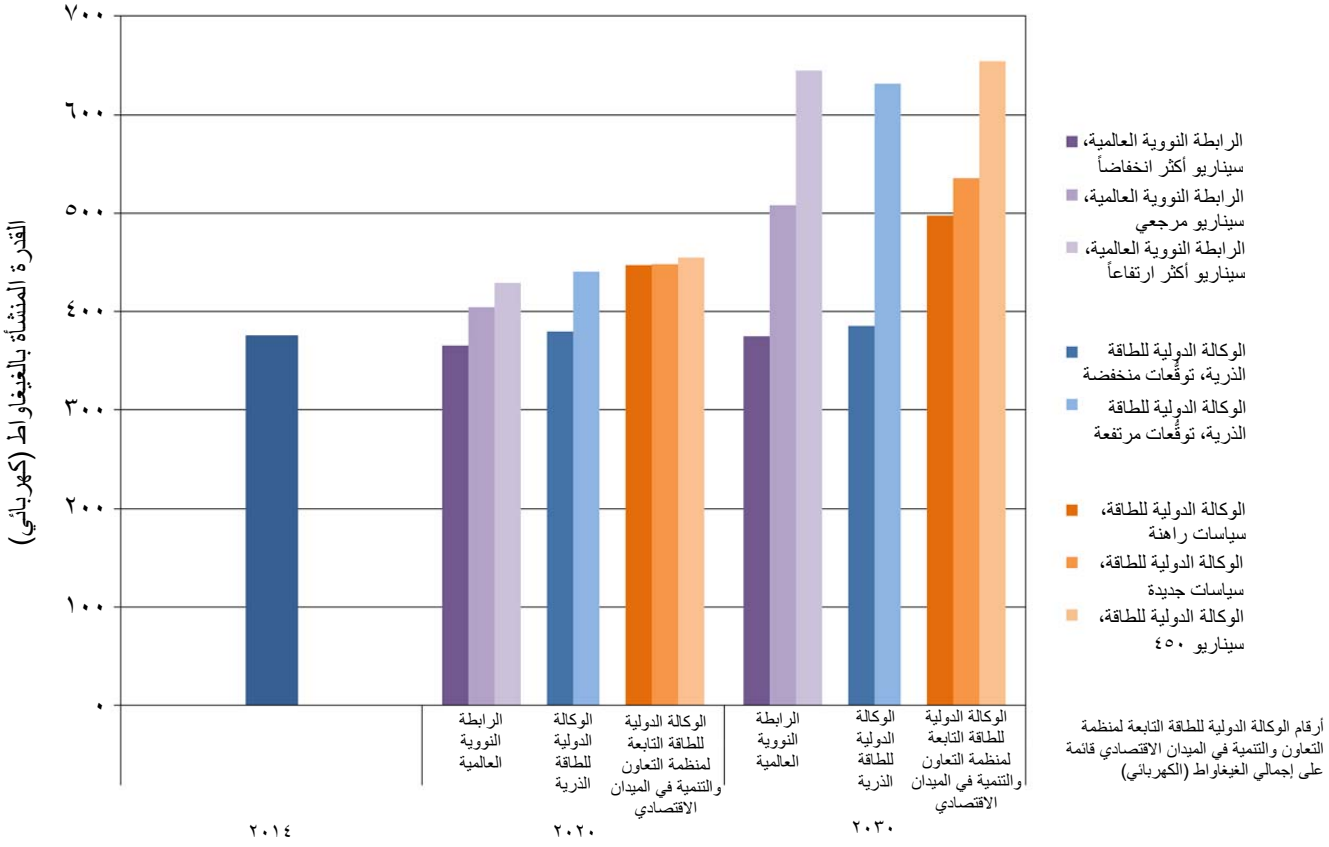
ألف-٢- التوقُّعات بشأن نمو القوى النووية

٢٣- وفقاً لتوقعات الوكالة في عام ٢٠١٥ (الشكل ألف-٣)، في الحالة المرتفعة، من المتوقع أن تنمو القدرة العالمية للقوى النووية من مستواها الحالي البالغ ٣٨١,٧ غيغاواط (كهربائي) إلى ٦٣٢ غيغاواط (كهربائي) بحلول عام ٢٠٣٠ – أي بزيادة قدرها حوالي ٧٠٪ خلال ١٥ عاماً. وفي الحالة المنخفضة، فإن القدرة النووية في عام ٢٠٣٠ ستبلغ ٣٨٥ غيغاواط (كهربائي)، أي أنها ستحافظ تقريباً على مستواها الحالي. وتحسب هذه الأرقام حالات السحب من الخدمة - أي أن القدرة الجديدة الفعلية المضافة في السنوات الـ١٥ المقبلة ستبلغ نحو ١٥٠ غيغاواط (كهربائي) في الحالة المنخفضة و٣٠٠ غيغاواط (كهربائي) في الحالة المرتفعة. ومَدّ هذه التوقعات إلى المستقبل ينتج عنه قدرة نووية متزايدة تصل إلى ٩٦٤ غيغاواط (كهربائي) في الحالة المرتفعة بحلول عام ٢٠٥٠، ونمو صافي صفري في الحالة المنخفضة.



الشكل ألف-٣- توقعات القدرات النووية العالمية (المصدر: التقديرات بشأن الطاقة والكهرباء والقوى النووية للفترة حتى عام ٢٠٥٠، سلسلة البيانات المرجعية الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية – العدد ١، ٢٠١٥).

٢٤- والسيناريوهات العالية لكلٍّ من الوكالة الدولية للطاقة الذرية، والوكالة الدولية للطاقة التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي والرابطة النووية العالمية، تُظهِر باستمرار نمواً في حدود ٦٠٠-٧٠٠ غيغاواط (كهربائي) بحلول عام ٢٠٣٠، في حين تعكس السيناريوهات المنخفضة شكوكاً أكبر بشأن النمو (الشكل ألف-٤).



الشكل ألف-٤- مقارنة بين آخر توقُّعات الوكالة الدولية للطاقة الذرية، وسيناريوهات الوكالة الدولية للطاقة التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي في عام ٢٠١٤، وتوقُّعات الرابطة النووية العالمية في عام ٢٠١٣.

٢٥- وقد ساهمت القوى النووية بشكل كبير في التخفيف من تغيّر المناخ عن طريق تجنّب ما يقرب من ٢ بليون طن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً. وكي تساعد القوى النووية في الحدّ من الاحترار العالمي إلى درجتين مئويتين بحلول عام ٢١٠٠، يلزم أن تتناسب قدرتها مع التوقّع المرتفع لتجنّب ما يقرب من ٦,٥ بليون طن من انبعاثات غاز الدفيئة بحلول عام ٢٠٥٠. وأسفر المؤتمر الـ٢١ للأطراف في اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ عن اتفاق باريس الذي لا يحدد ولا يستثني أي شكل معين من أشكال الطاقة. ويسمح ذلك للبلدان بتحديد حوافظ مشاريع للطاقة المنخفضة الكربون لموازنة انبعاثات الكربون. كما يدعم اتفاق باريس التنمية المستدامة. والقوى النووية يمكن أن تساهم بشكل مباشر في تحقيق الهدف ٧ من أهداف الأمم المتحدة للتنمية المستدامة، "ضمان حصول الجميع بتكلفة ميسورة على خدمات الطاقة الحديثة الموثوقة والمستدامة"، والهدف ١٣ "اتخاذ إجراءات عاجلة للتصدي لتغيّر المناخ وآثاره".

ألف-٣- دورة الوقود

ألف-٣-١- المرحلة الاستهلالية

موارد اليورانيوم وإنتاجه

٢٦- ظلت أسعار التسليم الفوري لليورانيوم منخفضة في عام ٢٠١٥ وتذبذبت بين ٧٧ و٨٦ دولاراً للكيلوغرام من اليورانيوم، مقارنةً مع مستوى منخفض بلغ حوالي ٦٠ دولاراً للكيلوغرام من اليورانيوم في منتصف عام ٢٠١٤. وقيَّد انخفاض الأسعار كثيراً قدرة الشركات على جمع الأموال اللازمة للاستكشاف، ودراسات الجدوى، وإطلاق مشاريع تشييد جديدة وتوسيع المشاريع القائمة.

٢٧- وتقدِّر الرابطة النووية العالمية أن حجم الإنتاج بلغ قرابة ٠٠٠ ٥٧ طن من اليورانيوم في عام ٢٠١٥، وحافظ بدرجة أكثر أو أقل على مستويات عام ٢٠١٤. ويجري إنتاج اليورانيوم حالياً في أكثر من ١٥ بلداً. وهناك عدد من المشاريع الجديدة في مراحل مختلفة من التطوير في بعض البلدان المنتجة وفي أكثر من ٢٥ من البلدان الوافدة الجديدة المحتملة، وسيعيد عدد قليل منها بدء تعدين اليورانيوم بعد توقف طويل.

٢٨- وحافظت كازاخستان على مكانتها باعتبارها منتج اليورانيوم الرائد في العالم، بالكامل تقريباً من مناجمها للنضّ الموقعي. وبعد إنتاج متزايد بسرعة بين عامي ٢٠٠٠ و ٢٠١٢، كانت الزيادات الأخيرة متواضعة ووصل الإنتاج في عام ٢٠١٥ إلى ٨٠٠ ٢٣ طن من اليورانيوم.

٢٩- واستمر ثاني أكبر منتج، أي كندا، في تلقّي نتائج مشجعة بشأن التنقيب عن اليورانيوم من حوض أثاباسكا، مثل مستودع اليورانيوم Triple R، الذي يمكن أن ينتج ما يقدَّر بـ ٧٧٠ ٣٨ طناً من اليورانيوم طوال عمر المنجم البالغ ١٤عاماً. وبدأ منجم Cigar Lake، وهو منجم اليورانيوم الأعلى مرتبةً في العالم، الإنتاج التجاري في أيار/ مايو ويتوقع أن يحقق طاقته الإنتاجية الكاملة البالغة ٦٩٠٠ طن من اليورانيوم سنوياً بحلول عام ٢٠١٧.

٣٠- ومرّ منجم هوساب لليورانيوم المشيَّد حديثاً في ناميبيا بمرحلة الإدخال في الخدمة خلال عام ٢٠١٥، ومن المخطط أن يبدأ الإنتاج الأوّلي في عام ٢٠١٦. ويمكن أن تبلغ القدرة الكاملة ٥٧٧٠ طناً من اليورانيوم سنوياً، مع عمر محتمل لأكثر من ٢٠ عاماً. وواصل منجما Rössing وLanger Heinrich لليورانيوم في ناميبيا عمليات التشغيل في عام ٢٠١٥.

٣١- وفي أستراليا، كثّف منجم Four Mile للنضّ الموقعي لليورانيوم، الذي افتُتِح في عام ٢٠١٤، إنتاجه بقدرة ١٠٠٠ طن من اليورانيوم سنوياً. وفي مشروع Ranger، عُلِّقَ العمل بشأن تمديد محتمل للتعدين تحت سطح الأرض بتوسيع الشقين المفتوحين السابقين ولن يتم المضي قُدُما في ذلك. وكان الإنتاج خلال عام ٢٠١٥ أقل من ٢٥٠٠ طن من اليورانيوم، مقارنةً مع ٤٠٠٠ إلى ٦٠٠٠ طن من اليورانيوم سنوياً بين عامي ١٩٩٧ و٢٠٠٩.

٣٢- والمرحلة الأولى من محطة تكرير تجريبية لاستخراج اليورانيوم وعناصر الأتربة النادرة من مستودع Kvanefjeld في غرينلاند، بمملكة الدنمارك، استوفت أو تجاوزت أهدافها. والتقديرات التي أُعلِنت في شباط/فبراير تشمل ١٠٠ ٢٢٨ طن من اليورانيوم و١١,١٣ مليون طن من إجمالي أكسيد عناصر الأتربة النادرة. وثمة موارد يورانيوم غير تقليدية مثل مستودعات Kvanefjeld تُوَسِّع بشكل كبير قاعدة الموارد. ويجري

استقصاء مياه البحر في الولايات المتحدة الأمريكية كمصدر غير تقليدي آخر لليورانيوم. وقد استُخدِم الثوريوم في الماضي كوقود نووي على أساس إيضاحي ولكن لا تزال هناك حاجة لقدر كبير من العمل قبل أن يمكن النظر فيه للاستخدام التجاري. وتقدَّر موارد الثوريوم في جميع أنحاء العالم بنحو ستة إلى سبعة ملايين طن.

التحويل لأغراض الإثراء

٣٣- يقوم كلٌّ من 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). وتُستخدَم عملية جافة لتطاير الفلوريد في الولايات المتحدة الأمريكية ، في حين تستخدم جهات التحويل الأخرى كلها عملية رطبة. ويبلغ مجموع قدرة التحويل السنوية العالمية حوالي ٦٠ ٠٠٠ طن من اليورانيوم على شكل سادس فلوريد اليورانيوم سنوياً. ويتراوح الطلب الحالي على خدمات التحويل (بافتراض أن نسبة إثراء المخلفات هي ٠,٢٥٪ من اليورانيوم-٢٣٥) أيضاً بين ٦٠ ٠٠٠ و٦٤ ٠٠٠ طن سنوياً.

٣٤- ويبلغ حالياً إجمالي قدرة الإثراء العالمية نحو ٦٠ مليون وحدة فصل سنوياً، مقارنةً بطلب إجمالي يبلغ حوالي ٥٠ مليون وحدة فصل سنوياً. وتضطلع بخدمات الإثراء التجارية خمس شركات، وهي: الشركة الوطنية النووية الصينية (الصين)، وشركة أريفا (فرنسا)، والشركة الحكومية للطاقة الذرية "روزاتوم" (الاتحاد الروسي)، وشركة يوسيك "شركة الولايات المتحدة للإثراء" (الولايات المتحدة الأمريكية)، وشركة يورينكو (في كل من أوروبا والولايات المتحدة الأمريكية).

٣٥- وثمة مرافق صغيرة الحجم للتحويل والإثراء قيد التشغيل في الأرجنتين وباكستان والبرازيل وجمهورية إيران الإسلامية والهند واليابان.

٣٦- وقد وافقت الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة على تعديل ترخيص يسمح لشركة URENCO بتوسيع مصنعها للإثراء Eunice في نيو مكسيكو. وتهدف الخطة إلى توسيع القدرة من المعدل الحالي البالغ ٣,٧ مليون وحدة فصل إلى ١٠ ملايين وحدة فصل. ومع ذلك، أعلنت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة خفض التمويل بنحو ٦٠٪ لبرنامجها المتعلق بإثراء اليورانيوم. وسيتم الآن قصر الأنشطة على تطوير التكنولوجيا الأمريكية الجديدة لإثراء اليورانيوم بالطرد المركزي في Oak Ridge، بولاية تنيسي.

٣٧- ويجري الاضطلاع في شكل أكثر استقراراً بإعادة تحويل سادس فلوريد اليورانيوم المستنفد إلى أكسيد اليورانيوم أو رابع فلوريد اليورانيوم لغرض الخزن الطويل الأجل لليورانيوم المستنفد. وظلَّ إجمالي القدرات العالمية الحالية على إعادة التحويل عند مستوى ٦٠ ٠٠٠ طن من سادس فلوريد اليورانيوم سنوياً تقريباً. والمرافق الرئيسية قيد التشغيل هي محطة مجموعة شركات AREVA في Tricastin، بفرنسا، ومحطتان لخدمات التخلص من اليورانيوم في Portsmouth وPaducah، بالولايات المتحدة الأمريكية، ومصنع إعادة التحويل W-ECP بالمحطة الكهروكيميائية في Zelenogorsk، بالاتحاد الروسي. وتقوم الشركة الدولية للنظائر بتشييد مصنع في نيو مكسيكو، بالولايات المتحدة الأمريكية. وقد أخّرت شركة كيمبلانتس التابعة لمجموعة يورينكو في المملكة المتحدة حتى عام ٢٠١٧ التاريخ المتوقع لبدء تشغيل مصنع إعادة التحويل في مرفق Capenhurst للتصرف في المخلفات، وهو قيد الإنشاء حالياً. وعند الانتهاء من المرفق، سوف يعالج المخزون الأوروبي لشركة URENCO من اليورانيوم المستنفَد.

٣٨- وأسّست حكومة جنوب أستراليا أول هيئة ملكية في البلد معنية بالوقود النووي، لدراسة إمكانية التوسع في أنشطة دورة الوقود.

ألف-٣-٢- صنع الوقود

٣٩- ظلَّ الطلب السنوي الحالي على خدمات تصنيع وقود مفاعلات الماء الخفيف عند مستوى ٠٠٠ ٧ طن تقريباً من اليورانيوم المثرى في مجمّعات الوقود، ولكن يُتوقَّع أن يزداد إلى نحو ٠٠٠ ٨ طن من اليورانيوم سنوياً في المستقبل القريب. وبلغت متطلبات مفاعلات الماء الثقيل المضغوط ٣٠٠٠ طن من اليورانيوم سنوياً. وثمة في الوقت الحاضر عديد من المورّدين يتنافسون على معظم أنواع الوقود. وبقي إجمالي القدرة العالمية على صنع الوقود عند مستوى يقارب ٥٠٠ ١٣ طن من اليورانيوم سنوياً (اليورانيوم المثرى) لأنواع وقود مفاعلات الماء الخفيف، وعند مستوى يقارب ٠٠٠ ٤ طن من اليورانيوم سنويا (اليورانيوم الطبيعي) لأنواع وقود مفاعلات الماء الثقيل المضغوط. ويجري تصنيع وقود مفاعلات الماء الخفيف حالياً في الاتحاد الروسي، وإسبانيا، وألمانيا، والبرازيل، وجمهورية كوريا، والسويد، والصين، وفرنسا، وكازاخستان، والمملكة المتحدة، والهند، والولايات المتحدة الأمريكية، واليابان. وفي أنواع وقود مفاعلات الماء الثقيل المضغوط المصنوع من اليورانيوم الطبيعي، فإن اليورانيوم يُنقَّى ويُحوَّل من ثم إلى ثاني أكسيد اليورانيوم في كلٍّ من الأرجنتين ورومانيا والصين وكندا والهند.

٤٠- وصرحت الهيئة الرقابية النووية في الولايات المتحدة لمحطة القوى النووية Perry NPP في ولاية أوهايو بالبدء في استخدام وقود مفاعل الماء المغلي العالي الأداء GNF 2 لشركة Global Nuclear Fuel. و يبشِّر هذا الوقود بمخرجات أعلى من الطاقة مع خفض التكاليف الكلية لدورة الوقود، والحد من الكمية الإجمالية لليورانيوم ومتوسط الإثراء في عمليات إعادة تحميل الوقود. وجعلت الشركة أيضاً مجمّعتها للوقود من الجيل المقبل GNF3 BWR متاحة في عام ٢٠١٥ (الشكل ألف-٥)، بما يتيح تحسين اقتصاديات الوقود، وزيادة الأداء والمرونة في التشغيل. وفي نيسان/أبريل ٢٠١٥، أطلقت شركة AREVA وقود ATRIUM 11 في اثنين من مفاعلات الماء المغلي في الولايات المتحدة الأمريكية. ويوفر التصميم الجديد مرونة تشغيلية أفضل، ذات قيمة خاصة للمرافق التي اختارت عمليات ارتقاء بقدرة محطات القوى النووية أو استراتيجيات تحقق المستوى الأمثل لمعامل القدرة.

الشكل ألف-٥- وقود مفاعلات الماء المغلي من الجيل القادم GNF3.
(الصورة من: شركة Global Nuclear Fuel)

٤١- وقد وقّعت شركة Arizona Public Service، بالولايات المتحدة الأمريكية، عقداً مع شركة وستينغهاوس إيليكتريك لتصنيع وتسليم وقودها من الجيل القادم لثلاث وحدات مفاعلات نووية في Palo Verde، بولاية أريزونا. والوقود الجديد، المعروف باسم CE16NGF، يتضمّن مواد متقدمة للكسوة وماصّات قابلة للحرق، فضلاً عما ينطوي عليه من تطور في التصميم الهيكلي لتحسين كفاءة وعولية الوقود مع زيادة عمره التشغيلي.

٤٢- وقدّمت مجموعة من المرافق العامة بالولايات المتحدة في أيار/مايو ٢٠١٥ بياناً رسمياً إلى الهيئة الرقابية النووية للتعبير عن اهتمامها باستعراض تصميم الوقود المعدني الجديد لشركة Lightbridge. ويتكون الوقود من خليط سبائك الزركونيوم واليورانيوم ويستخدم تركيبة فريدة من نوعها بشكل هندسي لقضيب متعدِّد الفصوص وملتوٍ حلزونياً. ويوفر التصميم خصائص محسّنة لنقل الحرارة، بما يمكِّنه من العمل بكثافة قوى أعلى من أنواع وقود أكسيد اليورانيوم المستخدمة اليوم. ومن المتوقع أن يخضع الوقود لاختبارات التشعيع بمفاعل البحوث Halden في النرويج، ابتداءً من عام ٢٠١٧.

٤٣- وهناك عدد من مختبرات البحوث الصناعية والأكاديمية التي تبحث حالياً في مختلف مفاهيم الوقود المتحمِّل للحوادث. واستحدثت شركتا توشيبا وآيبيدن تكنولوجيا جديدة لصنع مكوِّنات الوقود النووي من كربيد السيليكون في اليابان ليكون بديلاً للكسوة المصنوعة من سبائك الزركونيوم المستخدمة في مفاعلات الماء الخفيف. وسيتم اختبار غطاء مجمّعة الوقود بمفاعل للبحوث في عام ٢٠١٦ بهدف تسويقه بحلول عام ٢٠٢٥. وفي المملكة المتحدة، بدأ المختبر النووي الوطني وجامعة مانشستر مشروعاً بحثياً يتضمن العمل على مواد كسوة متقدمة بمركّبات السيراميك يمكن أن توفر إمكانات كبيرة لتحسين القدرات الحرارية للوقود النووي.

٤٤- واكتملت في هولندا اختبارات التشعيع لتأهيل عناصر وقود المفاعل الإيضاحي المرتفع الحرارة النمطي الحصوي القاع (HTR-PM)، وهو مفاعل مرتفع الحرارة مبرّد بالغاز يجري بناؤه في Shidaowan بالصين. وفي نيسان/أبريل، أعلنت جمهورية إيران الإسلامية عن افتتاح أول مرافقها لإنتاج الوقود النووي الذي سينتج وقوداً مماثلاً لذلك المستخدم في محطة بوشهر للقوى النووية.

٤٥- وتوفّر عمليات إعادة التدوير مصدراً ثانوياً للإمداد بالوقود النووي عن طريق استخدام اليورانيوم المعادة معالجته ووقود الأكسيد المختلط (موكس). ويجري حالياً إنتاج حوالي ١٠٠ طن من اليورانيوم المعادة معالجته في السنة في إيليكتروستال، بالاتحاد الروسي، لحساب شركة أريفا. ويتم في خط إنتاج واحد بالمحطة التابعة لشركة أريفا في رومان، بفرنسا، تحويل نحو ٨٠ طناً من الفلزات الثقيلة المستخلصة من اليورانيوم المثرى المعادة معالجته، إلى وقود سنوياً، لأغراض مفاعلات الماء الخفيف في فرنسا. وتبلغ القدرات العالمية الحالية على صنع وقود موكس نحو ٢٥٠ طناً من الفلزات الثقيلة، ويقع المرفق الرئيسي في فرنسا، في حين تُوجد بعض المرافق الأصغر حجماً في الاتحاد الروسي والهند واليابان.

٤٦- ويصنِّع كل من الاتحاد الروسي والهند وقود موكس لاستخدامه في المفاعلات السريعة. وفي الاتحاد الروسي، أنهى المجمع التعديني والكيميائي الاستعدادات لإطلاق دفعة من مجمّعات الوقود القياسية مع وقود موكس للمفاعل Beloyarsk-4 من النوع BN-800. واكتمل تشييد خطوط إنتاج جديدة في العام الماضي، مع قدرة إنتاج سنوية بلغت ٢٠ مجمّعة وقود في عام ٢٠١٥، وذلك بهدف إنتاج ٤٠٠ مجمّعة سنوياً بحلول عام ٢٠١٧. ويجري تشييد مرفق J-MOX في اليابان بقدرة ١٣٠ طناً من الفلزات الثقيلة سنوياً ويُتوقع أن يبدأ التشغيل التجاري في عام ٢٠١٩.

ألف-٣-٣- ضمان الإمداد

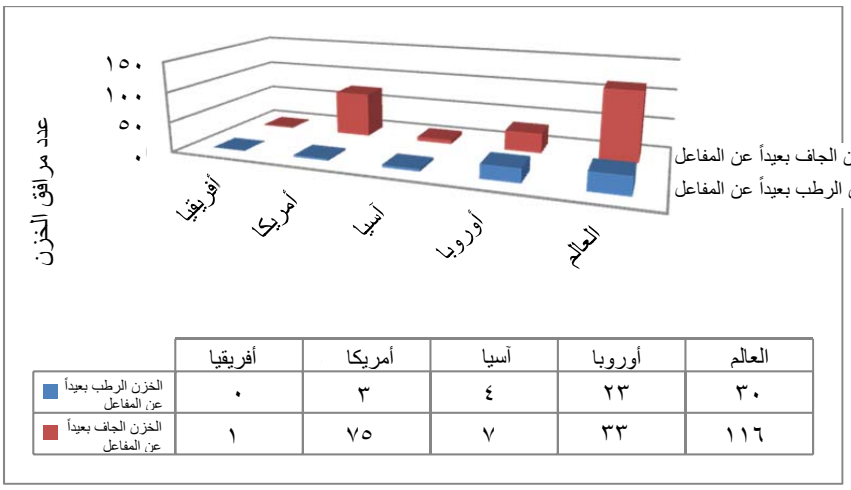
٤٧- كان إكمال الإطار القانوني المبرم في عام ٢٠١٥ مع كازاخستان علامة على انتقال مشروع مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء من التقييم ودراسات الجدوى إلى التنفيذ على نطاق كامل. وبعد موافقة مجلس المحافظين، تم توقيع اتفاق الدولة المضيفة واتفاقين تقنيين فرعيين في Astana، بكازاخستان، في ٢٧ آب/أغسطس ٢٠١٥. والاتفاق التقني الفرعي الأول هو اتفاق مشغِّل المرفق المبرم بين الوكالة ومحطة أولبا

التعدينية، التي ستكون مشغِّل مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء. أما الاتفاق التقني الفرعي الثاني فهو مبرم مع وزارة الطاقة بشأن الترتيبات المحددة المطلوب تنفيذها لإنشاء مصرف الوكالة لليورانيوم الضعيف الإثراء. وبناءً على هذا الاتفاق، تأسست لجنة تنسيق مشتركة تترأسها الوكالة وكازاخستان بالتشارك، وافقت على خطة أنشطة محددة في غضون الفترة المتوقعة البالغة ٩٠ يوماً من تاريخ التوقيع. وبموجب اتفاق الدولة المضيفة، يتم ضمان الأمان والأمن بواسطة النظام الرقابي النووي في كازاخستان، وتوفر خطة الأنشطة المحددة خريطة طريق بغرض إثبات الامتثال للأحكام المطبّقة من معايير الأمان ووثائق إرشادات الأمن الصادرة عن الوكالة كما يقضي اتفاق الدولة المضيفة. وتتواصل أعمال تقنية هامة في مجالات الأمان، والأمان الزلزالي تحديداً، والأمن. واكتملت دراسة جدوى بشأن خيارات مرافق الخزن ويجري النظر في مبنى جديد. وفي وقت سابق، في حزيران/يونيه ٢٠١٥، وأيضاً بعد موافقة مجلس المحافظين، تم التوقيع على اتفاق عبور مع الاتحاد الروسي.

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

ألف-٣-٤- المرحلة الختامية

٤٩- بحلول نهاية عام ٢٠١٥، وصل الوقود المستهلَك قيد التخزين إلى نحو ٢٦٦ ٠٠٠ طن من الفلزات الثقيلة ويتراكم بمعدل حوالي ٧٠٠٠ طن من الفلزات الثقيلة سنوياً. وفي حين يتم تخزين معظم الوقود رطباً في موقع المفاعل، هناك ١٤٧ من مرافق خزن الوقود المستهلَك بعيداً عن المفاعل في ٢٧ بلداً (الشكل ألف-٦). وكندا والولايات المتحدة الأمريكية لديهما أكبر مخزونات الوقود المستهلَك في أنظمة خزن جاف، وفي كل حالة فإن أكثر من ثلث رصيدهما الوطني مخزون في هذه المرافق. ويوجد في ألمانيا أكثر من ١٠٠٠ برميل محمَّل من براميل الخزن الجاف المزدوجة الغرض المعدنية، ومن المتوقع أن يكون كامل رصيدها من الوقود المستهلَك قيد الخزن الجاف بحلول نهاية عام ٢٠٢٢.



	أفريقيا	أمريكا	آسيا	أوروبا	العالم
الخزن الرطب بعيداً عن المفاعل	٠	٣	٤	٢٣	٣٠
الخزن الجاف بعيداً عن المفاعل	١	٧٥	٧	٣٣	١١٦

الشكل ألف-٦ - التوزيع العالمي لمرافق خزن الوقود المستهلَك بعيداً عن المفاعل.

٥٠- وهناك حالياً ١٢ بلداً إما أنها تخطط أو تشيّد أو تقوم بعملية إدخال في الخدمة لمرافق خزن جاف. وأكبر المشاريع موجودة في الاتحاد الروسي وإسبانيا وأوكرانيا واليابان. وفي Zheleznogorsk، بالاتحاد الروسي، اكتملت مؤخراً أكبر قدرة للخزن الجاف في العالم مع إضافة اثنين من مباني أقبية الخزن الجاف الجديدة (واحد

لمفاعل عالي القدرة مزود بقنوات (RBMK) وواحد لوقود المفاعلات المبرّدة والمهدّأة بالماء) إلى المفاعل الذي اكتمل في عام ٢٠١٢. ويُتوقع أن تتلقّى الأقبية الجديدة الوقود المستنفد في عام ٢٠١٦.

٥١- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، تقدّمت شركة Waste Control Specialists إلى الهيئة الرقابية النووية بطلب للحصول على ترخيص بتشغيل منشأة مستقلة لخزن الوقود المستهلَك في Andrews، بولاية تكساس. وستقوم مجموعة شركات AREVA بدور قيادي في تصميم وتشييد وتشغيل المرفق المقترح. وأعلنت شركة هولتيك إنترناشونال وشركة Eddy-Lea Energy Alliance عن مذكرة تفاهم لتصميم وتشييد مرفق مركزي لخزن الوقود المستهلَك يستوعب ما يصل إلى ٠٠٠ ٧٥ طن من الفلزات الثقيلة على أساس نظام الخزن الجاف بأقصى درجات الأمن تحت الأرض الذي وضعته شركة هولتك إنترناشونال. وسوف يقع المرفق في جنوب شرق نيو مكسيكو إذا تمت الموافقة عليه.

٥٢- وظلت الصورة العالمية لإعادة معالجة الوقود المستهلَك من المفاعلات التجارية دون تغيير في عام ٢٠١٥، مع الاضطلاع بإعادة معالجة من هذا القبيل في ١٠ مرافق في الاتحاد الروسي والصين وفرنسا والمملكة المتحدة والهند. وفرنسا والمملكة المتحدة لديهما أكبر قدرات تم نشرها وتقومان بعمليات إعادة المعالجة بمعدل ١٠٠٠ طن من الفلزات الثقيلة سنوياً. ويقدم كلٌّ من الاتحاد الروسي وفرنسا خدمات إعادة المعالجة لعملاء في الخارج. وزاد مرفق Mayak في الاتحاد الروسي قدرة المعالجة السنوية به إلى ٢٠٠ طن من الفلزات الثقيلة سنوياً، واختبر العديد من التكنولوجيات لإعادة معالجة أنواع وقود غير تقليدية مثل وقود البريليوم-اليورانيوم. وتملك الهند ثلاثة مرافق لأنواع وقود مفاعلات القوى ومرفق تجريبي بقدرة ٦٠ طناً من الفلزات الثقيلة سنوياً لوقود أكسيد الثوريوم. ولدى الصين مصنع تجريبي لإعادة المعالجة قادر على إعادة معالجة ما يصل إلى ٥٠ طناً من الفلزات الثقيلة سنوياً. وفي تشرين الثاني/نوفمبر، وقّعت الشركة الوطنية النووية الصينية ومجموعة شركات AREVA اتفاقاً لبناء مرفق لمعالجة وإعادة تدوير الوقود المستهلَك بقدرة ٨٠٠ طن من الفلزات الثقيلة سنوياً، من المتوقع أن يكون بمقاطعة Gansu في الصين. ومن المتوقع أن يبدأ التشييد في عام ٢٠٢٠ ويكتمل بحلول عام ٢٠٣٠. وسيؤوي الموقع أيضاً مرفقاً لخزن الوقود المستهلَك بقدرة ٣٠٠٠ طن من الفلزات الثقيلة. ولا يوجد حالياً أي مصنع لإعادة المعالجة التجارية في اليابان؛ ومع ذلك، فإن المصنع بقدرة ٨٠٠ طن من الفلزات الثقيلة في Rokkasho يجتاز عملية الإدخال في الخدمة الفعلية واستعراض الأمان، ومن المتوقع تشغيله بحلول آذار/مارس ٢٠١٦.

٥٣- واستناداً إلى خارطة الطريق المتوسطة والطويلة الأجل نحو إخراج الوحدات ١-٤ من الخدمة في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية التابعة لشركة طوكيو للطاقة الكهربائية، الموضوعة في حزيران/يونيه ٢٠١٣، كان من المقرر إزالة الوقود المجمّع في الوحدة ٣ من محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية في الربع الأول من عام ٢٠١٥. وحال عدد من التحديات دون الوفاء بهذا الهدف، بما في ذلك الصعوبات المتعلقة بإزالة مقصورة آلة مناولة الوقود (أزيلت في آب/أغسطس ٢٠١٥) والآلات ذات الصلة، والقدرة على تطهير أرضية التشغيل في الوحدة ٣ الى مستوى جرعة مستهدفة قدرها ١ ملي سيفرت في الساعة. وفي حزيران/يونيه ٢٠١٥، تم تنقيح خارطة الطريق لتعكس الوضع على الأرض. وأدى ذلك إلى إعادة جدولة إزالة الوقود المجمّع من الوحدتين ١ و ٣ إلى عام ٢٠٢٠ و٢٠١٧، على التوالي.

ألف-٣-٥- الإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي والتصرُّف في النفايات المشعّة

إخراج مرافق نووية من الخدمة

٥٤- بالإضافة إلى مفاعلات القوى النووية العاملة البالغ عددها ٤٤١ مفاعلاً في جميع أنحاء العالم، تم إغلاق ١٥٧ مفاعلاً آخر أو تخضع لعمليات إخراج من الخدمة، بما في ذلك ١٧ مفاعلاً أُخرِجت من الخدمة تماماً[٣].

٥٥- ويُوجد أكثر من ٣٢٠ من مرافق دورة الوقود قيد التشغيل، ونحو ١٧٠ مرفقاً تم إغلاقها أو تخضع لعمليات إخراج من الخدمة، و١٢٥ مرفقا تم إخراجها من الخدمة بشكل كامل. وهناك أيضاً ٢٤٦ من مفاعلات البحوث العاملة وأكثر من ١٨٠ مفاعلاً تم إغلاقها أو تخضع لعمليات إخراج من الخدمة. وأكثر من ٣٠٠ من مفاعلات البحوث والمجمّعات الحرجة تم إخراجها من الخدمة تماماً.

٥٦- وقد اكتُسِب قدر كبير من الخبرة في مجال الإخراج من الخدمة منذ مطلع القرن، إلى جانب إحراز أكبر قدر من التقدُّم في البلدان التي لديها برامج قوى نووية عاملة منذ أمد طويل بشكل رئيسي، ولا سيما في الاتحاد الروسي وإسبانيا وألمانيا وبلجيكا وفرنسا والمملكة المتحدة والولايات المتحدة الأمريكية. وتشمل الأمثلة على البرامج التي أحرزت تقدماً كبيراً في الإخراج من الخدمة خلال عام ٢٠١٥ تقسيم وعاء ضغط مفاعل بمحطة خوزيه كابريرا للقوى النووية في إسبانيا، وبدء المرحلة الثانية للإخراج من الخدمة بمحطة بوهيونيس للقوى النووية Bohunice V1 NPP في سلوفاكيا، والانتهاء في الاتحاد الروسي من البرنامج الاتحادي المستهدف على نطاق واسع، بعنوان "الأمان النووي والإشعاعي في عام ٢٠٠٨ وخلال الفترة حتى عام ٢٠١٥"، الذي يتضمن أنشطة ملحوظة للإخراج من الخدمة والاستصلاح البيئي.

٥٧- ويستمر التقدم المحرز في المملكة المتحدة نحو إخراج محطات القوى النووية العشر الأولى من الجيل الأول Magnox NPPs. وكان وقف عمليات التشغيل في محطة القوى النووية Wylfa NPP (Anglesey, Wales) في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٥ علامة على اكتمال عصر التوليد Magnox، الذي بدأ مع الربط الشبكي لأول محطة قوى نووية على نطاق صناعي في العالم، في Calder Hall (كومبريا، انكلترا) في آب/ أغسطس ١٩٥٦. وبدأت محطة Wylfa عمليات التشغيل في عام ١٩٧١ وتدخل الآن مرحلة تفريغ الوقود قبل الإخراج من الخدمة. ويتواصل الإخراج من الخدمة أيضاً في المفاعلين السريعين المبرّدين بالفلز القلوي بمحطة Dounreay ومفاعل اختبار المواد بها، وكذلك في مفاعلي البحوث المتبقِّيين بمحطة Winfrith.

---

[٣] البيانات من نظام الوكالة لمعلومات مفاعلات القوى (PRIS) (http://www.iaea.org/pris).

الشكل ألف-٧- أعمال الإخراج من الخدمة في Sellafield، المملكة المتحدة.
(الصورة من: الهيئة النووية المعنية بالإخراج من الخدمة /Sellafield Ltd.)

٥٨- وتمضي أيضاً المشاريع في بلغاريا وسلوفاكيا وليتوانيا، حيث أُغلِقت محطات قوى نووية قبل نهاية أعمارها التصميمية ويتم توفير الدعم المالي من خلال المصرف الأوروبي للإنشاء والتعمير.

التصرُّف في المصادر المشعّة المختومة المهمَلة

٥٩- تنظر حالياً عدّة بلدان، بما فيها غانا والفلبين وماليزيا، بجدّية في خيارات للتخلُّص من المصادر المشعّة المختومة المهمَلة، من ضمنها التخلُّص المشترك مع نفايات أخرى في مرافق مناسبة، أو زيادة عدد خيارات إعادة التدوير والإعادة إلى بلد المنشأ، أو التخلص داخل حُفَر مخصّصة للسبر. وثمة بيان لحالة أمان عامة وُضع بشأن التخلُّص داخل حفر من مصادر مندرجة في الفئات ٣ إلى ٥، وهناك بيان آخر لحالة أمان عامة يجري إعداده للتخلُّص من مصادر مندرجة في الفئتين ١ و٢. ومن خلال الوكالة، تعهّدت كندا بأموال لدعم برامج في غانا والفلبين لتنفيذ التخلص داخل حفر السبر وتم البدء في الإجراءات اللازمة لهذا المشروع.

٦٠- وأُجرِيت عدة عمليات ناجحة في عام ٢٠١٥ لإزالة مصادر مشعة مختومة مهمَلة من منشآت المستخدمين وجعلها تحت السيطرة في ظروف تخزين مناسبة. وأزيلت ثلاثة مصادر مهمَلة من الفئتين ١ و ٢ من هندوراس كما أزيل مصدر من الفئة ١ من المغرب. وتم الانتهاء في لبنان من إعادة مصدر مشع مختوم مهمل واحد فرنسي الصنع من الفئة ١ إلى بلد المنشأ. وبدأت في تونس والكاميرون ولبنان إعادة ما مجموعه أربعة مصادر إضافية مشعة مختومة مهمَلة فرنسية الصنع من الفئة ١ إلى بلد المنشأ، مع تحديد موعد عمليات الإعادة إلى بلد المنشأ في عام ٢٠١٦.

٦١- وأحرِز تقدُّم كبير في ربط الخلية الساخنة المتنقِّلة لشركة جنوب أفريقيا للطاقة النووية بتصميم التخلُّص داخل حفر مخصَّصة للسبر، بقصد التقليل إلى أدنى حدّ من مناولة المصادر والحدّ من نقلها على نحو لا ضرورة له. وبالإضافة إلى ذلك تم تصميم مجموعة من الأدوات المحمولة من أجل تسهيل عمليات تكييف مصادر مشعة مختومة مهمَلة من الفئات ٣-٥ ودعم الإعداد للتخلص منها داخل حفر سبر. وتم الانتهاء من عمليات تنطوي على تدريب العاملين المحليين والإقليميين وتكييف مصادر مشعة مختومة مهمَلة في باراغواي وبنغلاديش وبيرو وسري لانكا وشيلي والفلبين ومدغشقر.

٦٢- ووسَّعت الوكالة نطاق الوصول إلى الفهرس الدولي للمصادر والأجهزة المشعّة المختومة للعديد من الأفراد في الدول الأعضاء، الأمر الذي يسَّر تحديد هوية المصادر المشعّة المختومة المهملة التي عُثِر عليها في

الميدان. وفي عام ٢٠١٥، استُهلَّت جهود في سبيل إضافة مزيد من التفاصيل عن المصادر والأجهزة، بهدف زيادة تحسين جدوى الفهرس.

التمهيد للتخلص من النفايات المشعّة

٦٣- في المرافق الموروثة، تم إحراز تقدم ملحوظ في Sellafield، بالمملكة المتحدة، لا سيما في الحوضين التاريخيين الموجودين في العراء. وفي حوض خزن الوقود في مفاعل بايل، أدى استخراج كل الوقود المعلَّب إلى إزالة خطر الحرجية المرتبط بالحوض وتخفيض الرصيد الإشعاعي بنسبة ٥٠٪.

٦٤- وتم تشييد حوض الخزن التابع لمفاعل الجيل الأول ماغنوكس في Sellafield خلال الخمسينات لتخزين وتبريد وإعداد الوقود النووي ماغنوكس بغرض إعادة معالجته. وتوقف الحوض عن العمل في عام ١٩٩٢ ويضم الآن حوالي ١٤٠٠ متر مكعب من الحمأة المشعة، جنباً إلى جنب مع غيرها من المخزونات. وفي آذار/مارس ٢٠١٥، تم التوصل إلى مَعلَم هام مع نجاح أول عملية نقل للحمأة المشعة من حوض الخزن التابع لمفاعل الجيل الأول ماغنوكس إلى مخزن أُدخِل في الخدمة حديثاً.

٦٥- وفي المملكة المتحدة، أدى نشر استراتيجية وطنية للنفايات الصلبة الضعيفة الإشعاع إلى تطوير عدد متزايد بشكل ملحوظ من مسارات المعالجة والتخلص البديلة. ونتيجةً لذلك، في عام ٢٠١٥، تم تحويل ٨٥٪ من النفايات الضعيفة الإشعاع الناتجة عن الصناعة النووية بعيداً عن مستودع النفايات الضعيفة الإشعاع في المملكة المتحدة تجاه مجموعة من خيارات المعالجة بما في ذلك إعادة تدوير المعادن، والحرق والتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع جداً في مواقع طمر مسموح بها.

٦٦- وبدأت جورجيا التشغيل التجريبي لورشة لمعالجة النفايات من أجل التقليل من النفايات والتخفيف من الخطر الذي تشكله النفايات الموروثة. ويُستخدم لذلك جهاز لتقطيع البلازما ومرفق مخصص لإزالة التلوث بالتفجير الحصوى من أجل إزالة الملوثات المشعة الملتصقة بالسطح من أنابيب الصلب، نتيجة عملية الإخراج من الخدمة لمحطة خفيضة درجة الحرارة ولمفاعل البحوث النووي المنخفض الحرارة المبرَّد بالهليوم IRT-M.

٦٧- وتواصل العمليات التجارية للترميد وصهر المعادن في عدة بلدان مثل السويد والولايات المتحدة الأمريكية توفير فرص لخدمات معالجة النفايات المشعة عبر الحدود بصورة فعالة من حيث التكلفة. وعلى سبيل المثال، في حالات معينة، قد ترسل المرافق النووية الكندية والمختبرات النووية الكندية نفايات معينة ضعيفة الإشعاع تشغيلية/وموروثة لمقدمي الخدمات المرخص لهم في الولايات المتحدة الأمريكية، مع حجم أقل بكثير من النفايات المشعة التي يتم إرجاعها.

٦٨- وقامت محطة Novovoronezh للقوى النووية في الاتحاد الروسي بتشغيل فرن بلازما بقدرة ٢٥٠ كغ في الساعة. وسيتم استخدام الفرن لمعالجة النفايات الصلبة بعد إخراج أول وحدتين بمحطة القوى النووية من الخدمة. وبالإضافة إلى ذلك، وصل مرفق لتقييم النفايات المشعة السائلة في محطة Kalinin للقوى النووية إلى قدرته التصميمية التي تسمح بتخفيض الحجم بمعامل عشرة وتلبية احتياجات جميع محطات القوى النووية الروسية.

٦٩- والتخزين المأمون والآمن للنفايات المشعة في انتظار التخلص منها هو حتمية أساسية للدول الأعضاء التي يوجد لديها رصيد من النفايات. وفي هولندا، تلقّت الهيئة المركزية للنفايات المشعة COVRA ترخيصاً لبناء

مبنى جديد بغرض الخزن المؤقت لليورانيوم المستنفد والتوسع في الخزن المؤقت للنفايات القوية الإشعاع في البلد، HABOG.

٧٠- وبدأت ليتوانيا تجارب التشغيل البارد لأحد مرافق إدارة وتخزين النفايات المشعة الصلبة في محطة إغنالينا للقوى النووية بغرض معالجة النفايات الموروثة المتولدة أثناء عمليات تشغيل محطة القوى النووية.

٧١- وتلقّت بلجيكا أخيراً ما مجموعه ١٢٣ من براميل النفايات السائلة العالية النشاط المجمّدة في الأسمنت والناتجة عن إعادة معالجة الوقود المستخدم في المملكة المتحدة. وسيتم تخزين هذه النفايات المتوسطة الإشعاع المعمِّرة في مرفق خزن بُنِيَ لهذا الغرض في Dessel انتظاراً للتخلص منها.

٧٢- وفي مركز بهابها للبحوث الذرية بالهند أدت عملية تمزُّز جديدة تم تطويرها مؤخراً إلى فصل كميات كبيرة من السيزيوم-١٣٧ عن نفايات قوية الإشعاع لإنتاج أقلام من السيزيوم-١٣٧ المزجّج بغرض استخدامها كمشعِّعات للدم.

٧٣- وحدّدت التحقيقات بشأن الحدث الإشعاعي الذي وقع في شباط/فبراير ٢٠١٤ بالمحطة التجريبية لعزل النفايات في نيو مكسيكو، بالولايات المتحدة الأمريكية، عدم توافق النفايات (النترات في تماسّ مع المواد العضوية) باعتباره السبب الأكثر احتمالاً للحادثة. ويسلط هذا الاستنتاج الضوء على أهمية قيام جميع برامج التصرف في النفايات المشعة بوضع إجراءات توصيف شاملة وقوية من أجل ضمان الامتثال لمعايير قبول النفايات.

٧٤- وافتتحت المملكة المتحدة مرفقاً وطنياً، MIDAS، بجامعة Sheffield في شراكة مع إدارة الطاقة وتغير المناخ بالمملكة المتحدة لدعم التصرف في النفايات المشعة الناتجة عن دورة الوقود النووي. ويتيح المرفق لمطوري التكنولوجيا الوصول إلى أحدث المعدات، بما في ذلك المختبرات المخصصة للمعالجة المرتفعة الحرارة، ودراسة أداء شكل النفايات في المدى البعيد، والتحليلات الكيميائية والكيميائية الإشعاعية.

٧٥- ويتواصل إحراز تقدم بشأن التصرف في الكميات الكبيرة من المياه الملوثة ودخول المياه الجوفية إلى موقع محطة فوكوشيما للقوى النووية. وتمت معالجة أكثر من ١ مليون متر مكعب من المياه لإزالة واحد من الملوثات الرئيسية، السيزيوم، ويجري العمل على إزالة السترونتيوم لتعزيز أنظمة معالجة السوائل المتقدمة القائمة. ونجح أيضاً تشغيل نظام مجرى جانبي للمياه الجوفية مصمَّم للتحكم في دخول المياه الجوفية إلى مبنى المفاعل والتوربينات، مع تخفيض دخول المياه الجوفية إلى حوالي ٢٥٪ (أو ١٠٠ متر مكعب) في اليوم الواحد. ويستمر تشييد الجدار الجليدي الذي يحصر المناطق المحيطة بالوحدات ١-٤.

التخلص من النفايات المشعّة

٧٦- العمل جار على نطاق العالم في مرافق التخلُّص من جميع فئات النفايات المشعّة، باستثناء النفايات القوية الإشعاع و/أو الوقود المستهلك. وتشمل هذه المرافق التخلُّص من النفايات الضعيفة الإشعاع جداً في خنادق (على سبيل المثال في إسبانيا، والسويد وفرنسا والولايات المتحدة الأمريكية)، أو التخلُّص من النفايات الضعيفة الإشعاع في مناطق قاحلة (على سبيل المثال في الأرجنتين وجنوب أفريقيا والهند والولايات المتحدة الأمريكية)؛ والمرافق المصمّمة هندسياً بالقرب من سطح الأرض للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع (على سبيل المثال في إسبانيا وبولندا والجمهورية التشيكية وسلوفاكيا والصين وفرنسا والمملكة المتحدة والهند واليابان)؛ والمرافق

المصمّمة هندسياً للتخلُّص من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع التي تم اختيار مواقعها في تكوينات جيولوجية على مدى من الأعماق (على سبيل المثال، في ألمانيا والسويد وهنغاريا والولايات المتحدة الأمريكية).

٧٧- وهناك مرافق أخرى للتخلص من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع في مراحل ترخيص مختلفة مثلاً في بلجيكا (Dessel)، وبلغاريا (Radiana)، وكندا (Kincardine)، وألمانيا (Konrad) وليتوانيا (Stabatiškės)، ورومانيا (Saligny) وسلوفينيا (Vrbina, Krško).

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

٧٩- وفي فنلندا، تلقّت هيئة التصرف في النفايات Posiva رخصة تشييد مرفق التخلص الجيولوجي من الوقود النووي المستهلك في Olkiluoto. ويمكن أن تبدأ أعمال التشييد بموجب الرخصة قرب نهاية عام ٢٠١٦، ومن المتوقع أن يكون مرفق التخلص جاهزاً للتشغيل في عام ٢٠٢٣.

٨٠- وفي السويد، عند تقديم بعض النواتج الأولية المستمدّة من الاستعراض الرقابي الجاري لطلب الترخيص المقدّم من الشركة السويدية للتصرف في الوقود والنفايات النووية SKB بشأن مستودع للوقود النووي المستهلَك، ذكرت هيئة الأمان الإشعاعي أن "شركة SKB أثبتت أن هناك إمكانات لتلبية معايير الأمان النووي والوقاية من الإشعاعات الصادرة عن الهيئة".

٨١- وتعدّ الوكالة الوطنية الفرنسية للتصرف في النفايات المشعة تقريراً موجزاً عن أمان مشروعها للتخلص الجيولوجي من النفايات القوية الإشعاع Cigéo، تمهيداً لطلب الترخيص الكامل، كما هو مخطط في عام ٢٠١٧.

٨٢- وحصل مشروع كندا لتطوير مستودع جيولوجي عميق من أجل النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع لشركة Ontario Power Generation بموقع Bruce النووي في Kincardine، أونتاريو على توصية إيجابية في أيار/مايو من اللجنة الاستعراضية المشتركة، التي أُنشِئت في عام ٢٠١٢ لتقييم المرفق المقترح. والقرار الرسمي، الذي كان متوقعاً في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٥، تم تأجيله إلى عام ٢٠١٦ من قِبَل وزير البيئة وتغير المناخ، في مواجهة المعارضة الوطنية والعابرة للحدود من أصحاب المصلحة، معربين عن قلقهم إزاء قرب المرفق النسبي من بحيرة Lake Huron.

٨٣- وتتوقَّع الصين احتياجاتها من التخلُّص الجيولوجي الناشئ من إعادة معالجة ١٤٠ ٠٠٠ طن من الوقود المستهلك في مجموعة مفاعلات يبلغ عددها ٤٨ مفاعلاً. وهناك نفق تجريبي قيد التشييد في موقع Beishan، تمهيداً لبناء أول مرفق بحثي مقام تحت الأرض لدعم برنامج التخلص الجيولوجي.

٨٤- وفي ألمانيا، أعيد تخصيص مسؤوليات التخلص من النفايات المشعة، مع إنشاء هيئتين اتحاديتين جديدتين وهما: الشركة الاتحادية للتصرف في النفايات النووية والمكتب الاتحادي لمراقبة التصرف في النفايات النووية. ومن أجل توجيه التطورات المستقبلية للمستودع الجيولوجي العميق الوطني، من المتوقع في عام ٢٠١٦ أن تقوم لجنة وطنية لاختيار المواقع أُنشئت في عام ٢٠١٣ بالتوصية بمعايير اختيار الموقع، والمتطلبات اللازمة لمشاركة أصحاب المصلحة، وكذلك ما إذا كان يمكن النظر في بدائل للتخلص الجيولوجي .

٨٥- ويمضي قُدُماً تطوير المستودع القريب من سطح الأرض للنفايات الضعيفة الإشعاع بموقع Talmesi في جمهورية إيران الإسلامية. وبعد الحصول على رخصة تحديد الموقع، تم الانتهاء من تشييد مرفق التخزين المركزي في موقع التخلص.

٨٦- ووجّهت اليابان هيئة التصرف في النفايات النووية إلى إعادة النظر في نهج تحديد موقع المستودع الجيولوجي العميق للنفايات القوية الإشعاع ونظّمت مجموعة من الأحداث الإعلامية لرفع الوعي العام.

٨٧- وتم في آب/أغسطس افتتاح مستودع Wolsong الصومعي النوع المقام تحت سطح الأرض في جمهورية كوريا (الشكل ألف-٨). وبدأ التشييد في المرحلة الثانية من مرفق التخلص ومن المخطط أن يتم الانتهاء منه بحلول عام ٢٠١٩. ومن المخطط أن يؤوي مستودع Wolsong عدد ٨٠٠ ٠٠٠ أسطوانة من النفايات الضعيفة والمتوسطة الإشعاع، وأن يعمل لمدة ٦٠ عاماً.

٨٨- ويحرز الاتحاد الروسي تقدماً نحو تطوير مستودع جيولوجي عميق في Krasnoyarsk، وأذن بتشييد مرفق أبحاث تحت الأرض لمواصلة استقصاء التكوين الجيولوجي في Nizhnekamsky.

٨٩- وبدأ أول قبوين في مرفق جديد للتخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع في Dounreay شمال اسكتلندا، بالمملكة المتحدة، في تلقّي النفايات. وتم تصميم القبوين لاستيعاب كل النفايات الضعيفة الإشعاع الصلبة ونفايات الهدم الناتجة من عملية الإخراج من الخدمة للمفاعلات السريعة ومحطات إعادة المعالجة في الموقع، مما يقلل بالتالي عمليات نقل النفايات من ذلك المكان البعيد. ونجح مرفق التخلص من النفايات الضعيفة الإشعاع بموقع Drigg في تجديد تصريحه البيئي. وفي عام ٢٠١٤، أصدرت حكومة المملكة المتحدة البيان الأبيض بعنوان *تنفيذ عمليات التخلُّص الجيولوجي*، الذي يبيِّن إطارا للتصرُّف الطويل الأجل في النفايات المشعّة الأقوى إشعاعا. ويبيِّن أيضاً نهجاً لتحديد مواقع محتملة لمرفق تخلص جيولوجي يقوم على أساس العمل مع المجتمعات المحلية المهتمَّة، بدءاً بمرحلة للحوار ومشاركة أصحاب المصلحة.

الشكل ألف-٨- حاويات النفايات وأنشطة التخلص الأولى في مستودع Wolsong
(الصور من: الوكالة الكورية للنفايات المشعة)

٩٠- وأصدرت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة طلب تقديم عروض من الكيانات المهتمة بتوفير موقع للاختبارات، ومقاول للحفر، وفريق لإدارة الموقع من أجل شقّ حفرة سبر لتحديد الخصائص عمقها ٥٠٠٠ م كجزء من اختبارها الميداني المخطط لحُفَر السبر العميقة. وينطوي المفهوم على شقّ حفرة سبر (أو مجموعة من حُفَر السبر) في الصخر القاعدي البلوري على عمق نحو ٥٠٠٠ م، وزرع حاويات النفايات على عمق ٣٠٠٠ م من قاع حُفرة السبر ثم ختم حُفرة السبر إلى السطح.

ألف-٤- الأمان

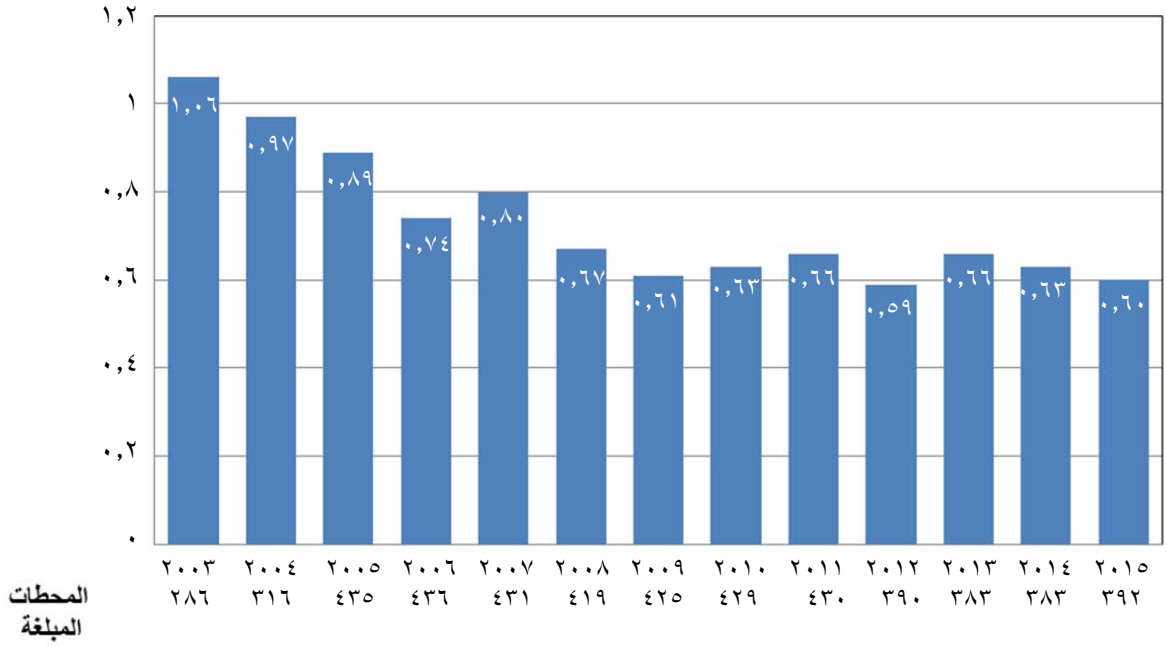
٩١- تَواصل العمل على إدخال تحسينات على حالة الأمان في محطات القوى النووية في جميع أنحاء العالم. وكان من بين هذه التحسينات تحديد وتطبيق الدروس المستفادة من حادث فوكوشيما داييتشي؛ وتحسين فعَّالية الدفاع في العمق؛ وتعزيز قدرات التأهُّب والتصدِّي للطوارئ؛ وتعهُّد وتحسين أوجه بناء القدرات؛ وحماية الناس والبيئة من الإشعاعات المؤيِّنة.

٩٢- وظلَّت خطة عمل الوكالة بشأن الأمان النووي في صميم الإجراءات التي اتَّخذتها الدول الأعضاء والأمانة وسائر أصحاب المصلحة المعنيين في سبيل تعزيز إطار الأمان النووي. وواصلت الوكالة تقاسم وتعميم الدروس المستفادة من الحادث المعني من خلال تحليل الجوانب التقنية ذات الصلة. وعقدت اجتماع الخبراء الدوليين بشأن تعزيز فعالية البحث والتطوير على ضوء الحادث الذي وقع في محطة فوكوشيما داييتشي للقوى النووية بالتعاون مع وكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، كما عقدت اجتماع الخبراء الدولي بشأن عمليات التقييم والتوقُّعات في مجال التصدِّي لطارئ نووي أو إشعاعي.

٩٣- ونشرت الوكالة تقريرها عن حادث فوكوشيما داييتشي، الذي يضم خمسة مجلدات تقنية مفصّلة. وكان التقرير ثمرة جهد تعاوني دولي موسَّع بين خمسة أفرقة عاملة ضمَّت نحو ١٨٠ خبيراً من ٤٢ دولة عضواً، حائزة وغير حائزة لبرامج قوى نووية، والعديد من الهيئات الدولية.

٩٤- وفي أعقاب قرار الأطراف المتعاقدة في اتفاقية الأمان النووي خلال اجتماعها الاستعراضي السادس، عقد المدير العام مؤتمراً دبلوماسياً في شباط/فبراير للنظر في اقتراح تقدّمت به سويسرا لتعديل الاتفاقية. واعتمد المؤتمر الدبلوماسي بالإجماع إعلان فيينا بشأن الأمان النووي، الذي تضمَّن مبادئ لتوجيه الأطراف المتعاقدة في تنفيذ واحد من أهداف الاتفاقية، وهو منع وقوع الحوادث ذات العواقب الإشعاعية والتخفيف من حدة هذه العواقب في حال حدوثها.

٩٥- وما يزال أمان تشغيل محطات القوى النووية عالي المستوى، كما يتضّح من مؤشرات الأمان التي جمعتها الوكالة والرابطة العالمية للمشغِّلين النوويين. ويُظهر الشكل ألف-٩ عدد حالات الإيقاف أو الإغلاق اليدوي أو التلقائي غير المخطط لكل ٠٠٠ ٧ ساعة (زهاء عام) من التشغيل للوحدة الواحدة. وما حالات الإيقاف الفوري سوى مؤشِّر واحد يدلِّل على أداء الأمان إلا أنه من الشائع استخدام هذا النهج كمؤشر يبيِّن النجاح في تحسين أمان المحطات عن طريق الحدّ من عدد الحالات التفاعلية العابرة الحرارية الهيدروليكية غير المرغوب فيها وغير المخطط لها التي تقتضي إيقاف فوري للمفاعل.



الشكل ألف-٩ - متوسط معدل حالات الإيقاف: عدد حالات الإيقاف التلقائي واليدوي التي تحدث كل ٧٠٠٠ ساعة من التشغيل للوحدة الواحدة. (المصدر: نظام المعلومات عن مفاعلات القوى http://www.iaea.org/pris)

باء- الانشطار والاندماج المتقدّمان

باء-١- الانشطار المتقدم

باء-١-١- المفاعلات المبرَّدة بالماء

٩٦- أدت المفاعلات المبرَّدة بالماء دورًا هامًا في الصناعة النووية التجارية منذ إنشائها، مسجِّلة أكثر من ١٦ ٠٠٠ سنة من التشغيل للمفاعلات، وهي تمثِّل اليوم أكثر من ٩٥٪ من جميع مفاعلات القوى المدنية العاملة في العالم. ومن بين مفاعلات القوى قيد التشغيل البالغ عددها ٦٥ مفاعلاً، كان هناك ٦٣ مفاعلاً مبرَّدًا بالماء الخفيف أو الثقيل.

٩٧- وتشمل التطورات الرئيسية التي طرأت في قطاع المفاعلات المبرَّدة بالماء في عام ٢٠١٥ أربع عمليات جديدة من التشييد، وثماني حالات ربط جديدة بالشبكات الكهربائية، وعمليات ارتقاء بالقوى في محطات قائمة ومواصلة تحسين عوامل القدرة في جميع أنواع المفاعلات المبرَّدة بالماء، وكذلك محطات جديدة مقترحة بالنسبة للبلدان التي لا تُشغِّل بعدُ أي مفاعلات تجارية.

٩٨- وتتم أي طريقة تنافسية اقتصاديًا لرفع القدرة النووية في أي بلد بواسطة زيادة مخرجات القوى المرخص بها من المحطات القائمة. وتنتج جميع المفاعلات المتقدمة المبرَّدة بالماء مخرجات قوى متزايدة، مع

وجود عمليات تشييد في الآونة الأخيرة بقدرة تتراوح بين ١٠٠٠ (الشكل باء-١) و١٦٥٠ ميغاواط لكل وحدة. وعلاوة على ذلك، هناك اتجاه واضح نحو المواقع المتعددة الوحدات التي يوجد بها نوع واحد أو أنواع متعددة من المفاعلات، مع التشديد على تحقيق وفورات الحجم بالنسبة للمفاعلات النووية التجارية.

الشكل باء-١ مفاعل مبرد ومهدأ بالماء-محطة قوى نووية بقدرة ١٠٠٠ قيد التشييد في موقع كودانكولام النووي.
(الصورة من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

٩٩- ويتم كذلك أكثر فأكثر التفكير في الطرازات المتقدمة من المفاعلات المبرَّدة بالماء القائمة ودراستها وتنفيذها في عدة بلدان من أجل نشر دورات الوقود المتقدمة والأكثر فعالية، المغلقة جزئيًا أو بالكامل.

١٠٠- وتجري عدة دول أعضاء أنشطة بحث وتطوير بشأن المفاعلات المبرَّدة بالماء فوق الحرج. وقد استُكملت التصاميم المفاهيمية الخاصة بالمفاعل الكندي المبرد بالماء فوق الحرج، وهو مفهوم خاص بمفاعل مهدأ بالماء الثقيل ومزوّد بأنابيب ضغط، واستُكملت التصاميم المفاهيمية الخاصة بالمفاعل الصيني المبرد بالماء فوق الحرج (CSR1000). وفي أوروبا، أُطلِق مفهوم خاص بمفاعل أوروبي للماء الخفيف العالي الأداء منذ بضع سنوات. وفي الاتحاد الروسي، تجري دراسات مفاهيمية بشأن مفاعل قوى مبرّد ومهدأ بالماء يعمل بالضغط فوق الحرجي، بما في ذلك إمكانية تزويده بقلب طيفي سريع.

١٠١- وتواصل الوكالة صيانة واستيفاء نظام الوكالة للمعلومات الخاصة بالمفاعلات المتقدمة، وهو قاعدة بيانات تتضمن معلومات تقدمها الهيئات المعنية بالتصميم.

باء-١-٢- النظم النيوترونية السريعة

١٠٢- منذ عام ١٩٦٠، كان هناك سعي إلى وضع برامج كبيرة لتطوير ونشر المفاعلات السريعة في كل أنحاء العالم، مما جعل المعارف بشأن المفاعلات السريعة وتكنولوجيات دورة الوقود المرتبطة بها تبلغ مستويات عالية من التطور. وهناك اهتمام عالمي متزايد بتطوير هذه المفاعلات نظرًا لقدرتها المميزة على تقديم مصدر فعال وآمن ومستدام ونظيف من مصادر الطاقة.

١٠٣- ويجري حاليًا تطوير مفاعلات سريعة مبرّدة بالصوديوم ومفاعلات سريعة مُبرَّدة بالرصاص والرصاص-البزموث ومفاعلات سريعة مبردة بالغاز على الصعيدين الوطني والدولي، وذلك وفقًا لمعايير أعلى في مجال الأمان والاستدامة والاقتصاديات والحماية المادية ومقاومة الانتشار. وبالإضافة إلى ذلك، يجري التفكير في المفاعل السريع المبرد بالأملاح المصهورة كخيار على المدى البعيد.

١٠٤- ولدى تكنولوجيا المفاعلات السريعة الأكثر تطورًا، أي تكنولوجيا المفاعلات السريعة المبرَّدة بالصوديوم، أكثر من ٤٠٠ سنة من الخبرة في المفاعلات اكتُسبت من خلال تصميم وتشييد وتشغيل نماذج

تجريبية ووحدات توضيحية وتجارية تعمل في عدد من البلدان، بما في ذلك الاتحاد الروسي وألمانيا والصين وفرنسا والمملكة المتحدة والهند والولايات المتحدة الأمريكية واليابان.

١٠٥- وقد حقق المفاعل الروسي السريع المبرّد بالصوديوم BN-600 أداءً تشغيليًا مذهلاً بتسجيله معامل حمولة بنسبة ٨٦٪ في عام ٢٠١٤. وجرى ربط المفاعل الروسي السريع المبرّد بالصوديوم BN-800 (الشكل باء-٢) بالشبكة في عام ٢٠١٥. واستُكمل التصميم النهائي للمفاعل الابتكاري BN-1200. وفي أيار/مايو ٢٠١٥، حصل مفاعل البحوث السريع المتعدد الأغراض المبرَّد بالصوديوم على رخصة التشييد من الهيئة الرقابية واستُكملت أعمال الهندسة المدنية الأولية، ومن المقرر أن يحل محل المفاعل BOR-60 في عام ٢٠٢٠. وفيما يتعلق بتكنولوجيا الفلز السائل الثقيل، استُكملت التصاميم الهندسية بالنسبة للمفاعل السريع المأمون ضمنيًا OD-300، وهو مفهوم متقدِّم للمفاعلات السريعة المبرّدة بالرصاص، وبالنسبة للمفاعل SVBR-100، وهو مفاعل سريع نمطي مُبرّد بالرصاص والبزموث.

١٠٦- وفي الهند، كان المفاعل التجريبي السريع التوليد قيد التشغيل منذ تشرين الأول/أكتوبر ١٩٨٥؛ وقد استُكملت أعمال تشييد المفاعل النموذجي السريع التوليد بقدرة ٥٠٠ ميغاواط (كهربائي) ويجري إدخاله في الخدمة، ومن المتوقع أن يبلغ أول مرحلة حرجية في عام ٢٠١٦. وتخطِّط الهند لتشييد مفاعلين إضافيين سريعي التوليد في الموقع ذاته.

١٠٧- وتم بلوغ المرحلة الأولى من تطوير تكنولوجيا المفاعلات السريعة الصينية مع تحقيق المفاعل التجريبي الصيني السريع ١٠٠٪ من القوى في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٤. ومن المخطط أن يدخل المفاعل الابتكاري CFR-600 مرحلة التشغيل في عام ٢٠٢٣. ويجري كذلك وضع التصميم الهندسي الأولي للمفاعل الصيني CLEAR-I الذي يعمل بالرصاص.

١٠٨- وفي اليابان، يوجد المفاعل السريع التجريبي المعروف باسم JOYO ونموذج المفاعل السريع المبرّد بالصوديوم المعروف باسم Monju في حالة إغلاق طويل الأجل. وتم كذلك تعليق برنامج المرحلة الثانية من تطوير تكنولوجيا دورة المفاعلات السريعة، الذي يشمل العرض العملي للتكنولوجيات الرئيسية وكذلك التصميم المفاهيمي للمفاعل الياباني السريع المبرّد بالصوديوم.

١٠٩- وفي جمهورية كوريا، يجري وضع التصميم الأولي لمفاعل الجيل الرابع السريع النموذجي المبرد بالصوديوم، إلى جانب أنشطة البحث والتطوير الداعمة. وقُدِّمت إلى الهيئة الرقابية النووية الكورية بحلول نهاية عام ٢٠١٥ وثيقة معلومات الأمان الأولية.

١١٠- وفي أوروبا، تتمثَّل المفاهيم التي يجري صوغها فيما يلي: المفاعل التكنولوجي المتقدم المبرّد بالصوديوم لأغراض الإيضاح الصناعي (المفاعل ASTRID)، وهو النموذج الصناعي الفرنسي للمفاعل السريع المبرّد بالصوديوم من الجيل الرابع؛ ونظام ALFRED، وهو محطة العرض العملي للمفاعل السريع المبرّد بالصوديوم من الجيل الرابع؛ ونظام ALLEGRO، وهو مفاعل تجريبي سريع مبرد بالغاز؛ ونظام MYRRHA، وهو مفاعل بحوث تجريبي مبرّد بالرصاص-البزموث وقائم على نظام يعمل بالمعجلات. وسوف يبلغ المفاعل ASTRID نهاية مرحلة التصميم المفاهيمي بحلول نهاية عام ٢٠١٥. وقد بلغ نظام MYRRHA المرحلة الثانية من التصميم الهندسي الاستهلالي.

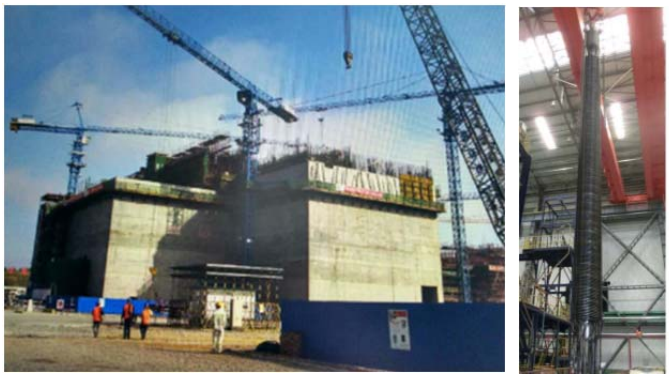
١١١- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، تركِّز الجهود في مجال المفاعلات السريعة بالأساس على بناء القدرات التقنية الأساسية وعلى بعض الخيارات التكنولوجية الابتكارية. ومع وجود مجموعة واسعة من البيانات التجريبية المستقاة من التشغيل السابق لعدد من المفاعلات التجريبية السريعة المبرّدة بالصوديوم، تدعم إدارة الطاقة أنشطة البحث والتطوير، بما في ذلك في مجالات المواد المتقدمة والأمان وأنواع الوقود الابتكارية. وتستقصي شركات خاصة أيضاً تصاميم المفاعلات السريعة.

الشكل باء-٢ - تم ربط المفاعل السريع التجاري BN-800 في محطة بيلوبارسك للقوى النووية بالاتحاد الروسي بالشبكة في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٥ . (الصورة من: هيئة Rosenergoatom)

باء-١-٣- المفاعلات المبرَّدة بالغاز

١١٢- تم بلوغ نهاية حقبة الجيل الأول من المفاعلات المبرّدة بالغاز عندما توقف المفاعل Wylfa 1، وهو آخر مفاعلات ماغنوكس المتبقية، عن العمل في نهاية عام ٢٠١٥. وتواصل المملكة المتحدة التشغيل التجاري لـ١٤ مفاعلاً من المفاعلات المتقدمة المبرّدة بالغاز. وما زالت هناك عدة دول أعضاء تعمل على تطوير مفاعلات مرتفعة الحرارة ومبرّدة بالغاز. وتستخدم مثل هذه المفاعلات وقود الجسيمات المغلَّفة، ويمكنها أن تبلغ معدلات حرق عالية، وهي تعمل عند درجات حرارة أعلى (أكبر من ٧٠٠ درجة مئوية أو يساويها) وتستخدم الهليوم كمبرّد. ويجري حاليًا النظر في التصاميم المفاهيمية للمفاعلات النمطية الأصغر المرتفعة الحرارة والمبرّدة بالغاز لكي يتسنى للمفاعل أن يعتمد على سمات الأمان المتأصلة فقط بدل الاعتماد على نظم الأمان الهندسية النشطة. ويجري التفكير في نشر المفاعلات على المدى القريب لأغراض توليد الكهرباء بكفاءة وكذلك لأغراض التوليد المشترك، من أجل خدمة سوق ضخمة للحرارة المستخدمة في المعالجة الصناعية.

١١٣- وفي الصين، تعرف أنشطة تشييد المفاعل المرتفع الحرارة النمطي الحصوي القاع (المفاعل HTR-PM)، وتصنيع أهم مكوناته، تقدمًا جيدًا (الشكل باء-٣). وتتكون محطة القوى الإيضاحية المذكورة العاملة بقدرة ٢٠٠ ميغاواط (كهربائي) من وحدتي مفاعل بقدرة ٢٥٠ ميغاواط (حراري) ومن المقرر أن تكون المحطة قيد التشغيل بحلول نهاية عام ٢٠١٧. ويجري تصميم محطة تجارية بقدرة ٦٠٠ ميغاواط (كهربائي) وتم تحديد مواقع محتملة. وقد أنشئت تكنولوجيا تصنيع الوقود على النطاق الصناعي واستُكملت في عام ٢٠١٤ الاختبارات الدولية لتشعيع كريات الوقود، وتم التخطيط لإجراء اختبارات في ظروف الحوادث. واستُكملت أعمال تشييد محطة صنع الوقود النووي الجديدة وإدخالها في الخدمة في باوتو، ومن المخطط الشروع في التصنيع في عام ٢٠١٦.



الشكل باء-٣ موقع التشييد (اليسار) ومولِّد البخار (اليمين) للمفاعل المرتفع الحرارة النمطي الحصوي القاع في خليج شيداو، بمدينة ويهاي في الصين (الصورتان من: معهد تكنولوجيا الطاقة النووية ومصادر الطاقة الجديدة)

١١٤- واستكملت الوكالة الوطنية للطاقة النووية في إندونيسيا التصميم المفاهيمي وتقرير تحليل الأمان التمهيدي لمفاعل القوى التجريبي الحصوي القاع بقدرة ١٠ ميغاوات (حراري) وقدَّمت التقييم الأولي للموقع إلى الجهة الرقابية. ويُنتظَر أن يتم النشر التجاري في المستقبل لأغراض التوليد المشترك.

١١٥- وفي اليابان، وفور استكمال الاستعراض الرقابي لإعادة تشغيل مفاعل الاختبارات الهندسية العالي الحرارة بقدرة ٣٠ ميغاواط (حراري)، من المخطط إجراء اختبارات إيضاحية إضافية للأمان وربطه بتوربين غاز الهليوم ومحطة إنتاج الهيدروجين.

١١٦- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، تواصلت أنشطة المفاعل المرتفع الحرارة المبرد بالغاز كجزء من برنامج مفاهيم المفاعلات المتقدمة التابع لوزارة الطاقة. وتركِّز هذه الأنشطة على تأهيل الوقود وتأهيل الغرافيت والمواد المرتفعة الحرارة وعلى اختبار المرافق لتوضيح خصائص الأمان الخامل وعلى وضع إطار الترخيص. وتقوم شركات خاصة أيضاً بتطوير تصاميم المفاعلات المبرَّدة بالغاز.

١١٧- وهناك بعض الأنشطة فيما يتعلق بالمفاعل المرتفع الحرارة المبرّد بالغاز تجري في كازاخستان وجنوب أفريقيا وأوكرانيا والمفوضية الأوروبية. وتتواصل الاستعدادات للتمكن من تدفئة المرفق الحرج ASTRA على درجات حرارة مختلفة في الاتحاد الروسي وقد أُجري اختبار التشعيع الأول لوقود الجسيمات المغلَّفة في جمهورية كوريا.

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

١١٨- هناك اهتمام متزايد بالمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية وتطبيقاتها. وفي العقد الماضي، كان التركيز على المفاعلات النمطية المتقدمة. فهي تمثل كل الخطوط وأنواع المبرِّدات الرئيسية، ويمكنها إنتاج ما يصل الى ٣٠٠ ميغاواط من القوى (الكهربائية)، ومكوناتها يمكن تصنيعها في المصانع ونقلها كوحدات نمطية إلى المواقع أو المرافق حسب الطلب. وتستجيب القوى الدافعة الرئيسية لتطوير المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية إلى الحاجة إلى توليد الطاقة بمرونة لفائدة طائفة أوسع من المستخدمين والتطبيقات، وتحل محل الوحدات العتيقة العاملة بالوقود الأحفوري، مما يؤدي إلى تعزيز أداء الأمان عبر سمات الأمان الخامل، ويمنح قدرة أفضل على تحمل التكاليف الاقتصادية. وهناك نحو ٥٠ تصميمًا ومفهومًا للمفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية على الصعيد العالمي. ومعظم هذه المفاعلات في مراحل متنوعة من

التطوير ويُقال إن بعضها يمكن نشرها في الأجل القريب. ولكن هناك ثلاثة مفاعلات صغيرة ومتوسطة الحجم أو نمطية قيد التشييد في الاتحاد الروسي والأرجنتين والصين.

١١٩- والعديد من المفاعلات الصغيرة والمتوسطة الحجم أو النمطية الممكن نشرها في الأجل القريب هي من طراز مفاعل الماء المضغوط المتكامل. وهناك ثلاثة مفاعلات صغيرة ومتوسطة الحجم أو نمطية في مراحل متقدمة من التشييد: في الاتحاد الروسي، ومن المتوقع أن ينتج المفاعل KLT-40S، وهو محطة قوى نووية نقّالة وقائمة على مفاعل ماء مضغوط بقدرة ٣٥ ميغاواط (كهربائي) لكل وحدة نمطية، الكهرباء وأن يتم ربطه بالشبكة بحلول عام ٢٠١٩؛ وفي الأرجنتين، من المتوقع أن يصبح مفاعل ماء مضغوط متكامل نموذجي يعمل بالدوران الطبيعي بقدرة ٣١ ميغاواط (كهربائي) ويُطلق عليه CAREM-25 جاهزًا للشروع في إدخاله في الخدمة ودراسة الحرجية في تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٨؛ وفي الصين، من المتوقع أن يكون المفاعل المرتفع الحرارة النمطي الحصوي القاع المبرّد بالغاز الذي يحتوي على مفاعلين بقدرة ٢٥٠ ميغاواط (حراري) لإنتاج ٢٠٠ ميغاواط (كهربائي) قيد التشغيل بحلول نهاية عام ٢٠١٧ باعتباره محطة قوى إيضاحية صناعية.

١٢٠- وفيما يتعلق بالمفاعلات النمطية الصغيرة القابلة للنشر على المدى القريب في جمهورية كوريا، تلقى المفاعل المتقدم النمطي المتكامل النظم (المفاعل SMART)، وهو مفاعل ماء مضغوط متكامل ينتج ١٠٠ ميغاواط (كهربائي)، في عام ٢٠١٢ موافقة على التصميم المعياري من لجنة الأمان والأمن النوويين التابعة للبلد. وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٥، تم التوقيع على اتفاق تمهيدي لهندسة مشروع من أجل نشر مفاعل متقدم نمطي متكامل النظم في المملكة العربية السعودية.

١٢١- وفي الصين، يخضع المفاعل ACP100 وهو مفاعل ماء مضغوط متكامل بقدرة ١٠٠ ميغاواط (كهربائي) للاستعراض العام لأمان المفاعلات الذي تجريه الوكالة. ومن المخطط تشييد محطة قوى اندماج إيضاحية تحتوي على وحدتين بقدرة ٣١٠ ميغاواط (حراري) في مقاطعة فوجيان.

١٢٢- ولدى الاتحاد الروسي العديد من التصاميم الأخرى للمفاعلات النمطية الصغيرة القابلة للنشر على المدى القريب لأغراض محطات القوى النووية العائمة النقّالة، بما يشمل المفاعل RITM200 لإنتاج ٥٠ ميغاواط (كهربائي)، والمفاعل ABV6-M– وهو مفاعل نمطي صغير يعمل بالدوران الطبيعي لتوليد ٦ ميغاواط (كهربائي) – والمفاعل VBER-300 بناتج قوى كهربائية ٣٠٠ ميغاواط (كهربائي).

١٢٣- وفي الولايات المتحدة الأمريكية، تُعدُّ شركة NuScale Power طلب تصديق على التصميم إلى الهيئة الرقابية النووية فيما يتعلق بتصميم المفاعل نوسكيل (المفاعل NuScale) في الربع الأخير من عام ٢٠١٦. وهو مفاعل ماء مضغوط متكامل يعمل بالدوران الطبيعي ويحتوي على ١٢ من وحدات المفاعل، وكل وحدة تنتج قوى كهربائية صافية تبلغ ٥٠ ميغاواط (كهربائي). وهناك تصميم آخر لمفاعل الماء المضغوط المتكامل وهو المفاعل ذو الوحدتين النمطيتين المزدوجتين لتوليد القوى BWX Technologies/Bechtel's Generation mPower وينتج قوى بمعدل ١٨٠ ميغاواط (كهربائي) لكل وحدة نمطية. والمفاعلان النمطيان الصغيران Westinghouse SMR لتوليد ٢٢٥ ميغاواط (كهربائي) وHoltec's SMR-160 الذي يعمل بالدوران الطبيعي لإنتاج ١٦٠ ميغاواط (كهربائي) هما أيضاً قيد التطوير.

١٢٤- وفي اليابان، هناك المفاعل 4S (’المفاعل الفائق الأمان والصغير والبسيط‘) وهو مفاعل مبرَّد بالصوديوم لا يعاد تزويده بالوقود في الموقع. ويقدِّم المفاعل 4S حصيلتين اثنين، هما: ٣٠ و١٣٥ ميغاواط (حراري) كمصدر من مصادر الطاقة الموزّعة فيما يتعلق بالتطبيقات المتعددة الأغراض. وهناك المفاعل النمطي المبسّط والمتوسط الصغير (ويشار إليه أيضاً بالمختصر DMS) وهو مفاعل نمطي صغير من طراز مفاعل الماء المغلي ويعمل بالدوران الطبيعي ويبلغ إنتاجه الكهربائي ٣٠٠ ميغاواط (كهربائي).

١٢٥- وهناك العديد من تصاميم المفاعلات النمطية الصغيرة في مراحل التصميم المفاهيمي: ففي الهند، يجري تطوير المفاعل AHWR300-LEU، وهو مفاعل ماء ثقيل مزود بأنابيب ضغط بقدرة ٣٠٤ ميغاواط (كهربائي) ونظام أوَّلي يدار طبيعياً.

١٢٦- وفي فرنسا، هناك المفاعل Flexblue النقّال، وهو مفاعل نمطي صغير يرسو في قاع البحر وله قدرة تبلغ ١٦٠ ميغاواط (كهربائي). والمفاعل Flexblue هو مفاعل مصمَّم لكي يُشَغَّل عن بعد من غرفة تحكم توجد في عرض البحر.

١٢٧- وفي كندا، يجري تطوير مفاعل الملح المصهور المتكامل وهو يمنح ثلاثة تصاميم: التصميم IMSR80 والتصميم IMSR300 والتصميم IMSR600 بقدرات كهربائية تبلغ ٣٢,٥ ميغاواط (كهربائي)، و١٤١ ميغاواط (كهربائي)، و٢٩١ ميغاواط (كهربائي) على التوالي. كما يجري تصميم مفاعلات الملح المصهور بواسطة مجموعات تجارية في عدة بلدان أخرى.

الشكل باء-٤- حالة نشر مفاعل نمطي صغير

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

١٢٨- نظراً لتزايد القلق إزاء توفر الموارد وتغير المناخ وأمن الطاقة، أُطلِق في العقود الماضية عدد من المبادرات الدولية بشأن نظم الطاقة النووية الابتكارية.

١٢٩- وأمام الاعتراف بضرورة اتخاذ إجراءات لضمان تطوير الطاقة النووية بأسلوب مستدام، استُهلَّ المشروع الدولي المعني بالمفاعلات النووية ودورات الوقود النووي الابتكارية (مشروع إنبرو) في عام ٢٠٠٠ كأحد مشاريع الوكالة. وفي عام ٢٠١٥، أصبحت تايلند العضو الحادي والأربعين في مشروع إنبرو، الذي يجمع حائزي التكنولوجيا ومستخدميها للنظر معًا في الإجراءات الدولية والوطنية اللازمة لتحقيق الابتكارات المرجوة في مفاعلات البحوث ودورات الوقود.

١٣٠- وقد نُشرت في الفترة ٢٠١٤-٢٠١٥ ثلاثة أدلة بشأن تقييم الاستدامة في مجالات الاقتصاديات والبنية الأساسية والآثار البيئية، بما في ذلك استنفاد الموارد، وذلك باعتبارها تقارير ضمن سلسلة الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة. وتجري تقييمات نظم الطاقة النووية استنادًا إلى منهجية مشروع إنبرو في إندونيسيا وأوكرانيا ورومانيا.

١٣١- والمحفل الدولي للجيل الرابع من المفاعلات هو من المساعي التعاونية الدولية التي تُنظَّم من أجل الاضطلاع بأنشطة البحث والتطوير اللازمة لتحديد جدوى وقدرات أداء الجيل القادم من المفاعلات النووية. ويركز المحفل الدولي المذكور الذي يضم ١٣ عضوًا على ستة نظم للطاقة النووية كما يرد وصفه في *خريطة طريق للتكنولوجيا المتعلقة بالجيل الرابع من نظم الطاقة النووية* الصادرة في عام ٢٠٠٢ وصيغتها المحدّثة الصادرة في عام ٢٠١٣: المفاعلات السريعة المبرّدة بالغاز، والمفاعلات الفائقة الحرارة، والمفاعلات المبردة بالماء فوق الحرج، والمفاعلات السريعة المبرّدة بالصوديوم، والمفاعلات السريعة المبرّدة بالرصاص، ومفاعلات الأملاح المصهورة.

١٣٢- وشارك أعضاء المحفل الدولي للجيل الرابع من المفاعلات المهتمّون بتنفيذ أنشطة البحث والتطوير التعاونية في واحد أو أكثر من النظم المختارة في مشاريع البحث والتطوير المشتركة، واضعين أهدافًا قابلة للتحقيق ومعالم وجداول زمنية محددة بشكل جيد، وضمن إطار تعاقدي محدد بوضوح.

١٣٣- ويعقد أعضاء المحفل الدولي المذكور ومشروع إنبرو اجتماعات تنسيقية سنوية تركِّز على منهجيات التقييم المحددة في مجالات الاقتصاديات ومقاومة الانتشار والمخاطر والأمان. كما أنهم يتبادلون المعلومات حول المشاريع الجارية بشأن ست تكنولوجيات مختارة في مجال المفاعلات.

١٣٤- ومن الأنشطة الهامة الأخرى التي استهلها المحفل الدولي المذكور في عام ٢٠١١ في مجال المفاعلات السريعة المبرّدة بالصوديوم، بالتعاون مع الوكالة، إعداد معايير التصميم المتصلة بالأمان والجهود المبذولة في سبيل تنسيق تلك المعايير مع المبادئ التوجيهية لتصميم الأمان فيما بين منظمات التصميم الممثَّلة داخل المحفل الدولي، وكذلك تحديد المستويات العليا من الأمان المتوقعة بالنسبة للجيل الرابع من نظم المفاعلات السريعة المبرّدة بالصوديوم. وقد نُشِرت نسخة أولى من معايير التصميم المتصلة بأمان المفاعل السريع المبرَّد بالصوديوم في عام ٢٠١٤. ويجري النظر في توسيع هذه الأنشطة لتشمل نظمًا أخرى من الجيل الرابع، مثل المفاعلات الفائقة الحرارة والمفاعلات السريعة المبرّدة بالرصاص.

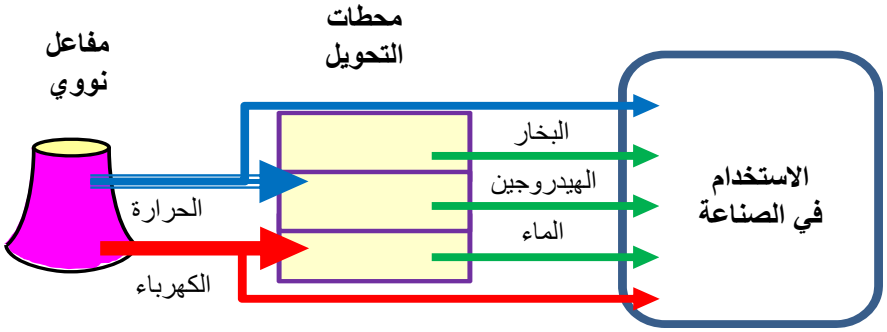
١٣٥- ويعمل منتدى تكنولوجيا الطاقة النووية المستدامة، الذي أطلقه الاتحاد الأوروبي في عام ٢٠٠٧، على ترويج أنشطة البحث والتطوير والإيضاح فيما يتعلق بتكنولوجيات الانشطار النووي اللازمة لتحقيق الخطة الأوروبية الاستراتيجية لتكنولوجيا الطاقة. وجرى مؤخرًا تحديث المخطط الاستراتيجي للبحوث والابتكارات واستراتيجية الانتشار التابعين لمنتدى تكنولوجيا الطاقة النووية المستدامة. ويضم منتدى تكنولوجيا الطاقة النووية المستدامة أكثر من ١٠٠ من الجهات المعنية الأوروبية من القطاع الصناعي والبحوث والأكاديميات والمنظمات التقنية المعنية بالأمان والمنظمات غير الحكومية والممثلين الوطنيين.

١٣٦- وفي إطار المنتدى المذكور، تتناول المبادرة الصناعية النووية المستدامة الأوروبية، التي أطلقها الاتحاد الأوروبي في عام ٢٠١٠، الحاجة الأوروبية لإيضاح الجيل الرابع من تكنولوجيات المفاعلات النيوترونية السريعة، وهياكلها الداعمة في مجال البحوث ومرافق الوقود وأعمال البحث والتطوير. وتركِّز المبادرة على تطوير نوعين متوازيين من التكنولوجيات: تكنولوجيا المفاعلات النيوترونية السريعة المبرّدة بالصوديوم كحل مرجعي، على أن يبدأ تشييد نموذج في فرنسا في عام ٢٠٢٠ تقريباً وسيُقدِّم دعمًا قويًا لهذه التكنولوجيا (المفاعل التكنولوجي المتقدم المبرّد بالصوديوم لأغراض الإيضاح الصناعي (المفاعل Astrid)؛ والتكنولوجيات البديلة المتعلقة بالمفاعلات السريعة المبرَّدة بالرصاص (المفاعل الأوروبي السريع المتقدم المبرّد بالرصاص لأغراض الإيضاح (المفاعل ALFRED)) والمتعلقة بالمفاعلات السريعة المبردة بالغاز (المفاعل الإيضاحي ALLEGRO). وبالإضافة إلى ذلك، سوف يدعم مرفق التشعيع العامل بالرصاص-البزموت (نظام MYRRHA) نشر تكنولوجيا المفاعلات السريعة، بما يشمل إعادة تدوير الأكتينيدات لأغراض التحويل.

باء-١-٦- التطبيقات غير الكهربائية للقوى النووية

١٣٧- هناك اهتمام واسع لدى عدة دول أعضاء باستخدام الطاقة النووية لأغراض التطبيقات غير الكهربائية، ولاسيما فيما يتعلق بتحلية مياه البحر، وإنتاج الهيدروجين، وتدفئة الأحياء السكنية، واستخلاص النفط الثالثي وغير ذلك من التطبيقات الصناعية.

١٣٨- وقد تم بالفعل إيضاح وإثبات التكنولوجيات اللازمة للتوليد المشترك (أي إنتاج الكهرباء والحرارة المستخدمة في المعالجة الصناعية، انظر الشكل باء-٥). وفيما يتعلق بالتوليد المشترك للقوى النووية، توجد خبرة هائلة في مجالات تدفئة الأحياء السكنية وتحلية مياه البحر وتتجاوز الخبرة الإجمالية المتراكمة ٧٥٠ سنة من التشغيل اكتُسبت من ٧٤ مفاعلًا نوويًا. وبإمكان محطات القوى النووية الحالية العاملة وفق نمط التوليد المشترك للقوى النووية أن تحقِّق زيادة في الكفاءة الحرارية الإجمالية بنسبة تفوق ٣٠٪، وانخفاضًا في تكاليف توليد القوى بنسبة تصل إلى ٢٠٪، ومرونة أفضل في الشبكات الكهربائية. وعندما تصبح نظم الطاقة المتقدمة الابتكارية المصممة لدرجات حرارة جد مرتفعة عند مخارج التبريد متاحة، فإنَّ عددًا من العمليات الصناعية، مثل إنتاج الهيدروجين، الذي يتطلَّب درجات عالية من الحرارة أو البخار، سيستفيد من مصدر للطاقة موثوق جدًا وفياض ومستدام.



الشكل باء-٥- المخطط العام لربط مفاعل نووي بمحطة صناعية داخل الموقع

١٣٩- ووقَّع الاتحاد الروسي مؤخرًا على اتفاقات مع الأردن والجزائر ومصر، وهو يجري مناقشات مع المملكة العربية السعودية لاستخدام القوى النووية لأغراض تحلية مياه البحر. ووقعت المملكة العربية السعودية مذكرة تفاهم مع جمهورية كوريا تتعلق بمفاعلين من مفاعلات الماء المضغوط من طراز المفاعل SMART بقدرة تبلغ ٣٣٠ ميغاواط (حراري) لاستخدامهما لأغراض التوليد المشترك، بما في ذلك تحلية مياه البحر، وهي تجري مناقشات مع فرنسا بشأن خطط مستقبلية لتحلية مياه البحر باستخدام الطاقة النووية. وبإمكان مفاعلي الماء المضغوط المزدوجين، التابعين لمحطة القوى النووية ديابلو كانيون في كاليفورنيا بالولايات المتحدة الأمريكية، أن ينتجا نحو ١,٥ مليون غالون في اليوم من مياه الشرب، ولكنهما لا يستخدمان سوى ٤٠٪ من هذه القدرة لأغراض الاستهلاك داخل الموقع. وبعد أن حصل المشغِّل على تمديد لتراخيصه الخاصة بالتشغيل حتى العامين ٢٠٢٤ و٢٠٢٥، ونظرا للجفاف الحاد الأخير، فقد اتفق في أيار/مايو ٢٠١٥ على تزويد البلد المضيف بالماء لمكافحة الحرائق الهائلة. ويجري كذلك التفكير في إدراج مياه الشرب هذه ضمن نظم المياه العمومية.

١٤٠- ويعتبر إنتاج الهيدروجين موضوعًا من مواضيع مجموعة واسعة من الأنشطة، ولا سيما في الولايات المتحدة الأمريكية والاتحاد الأوروبي. والهدف من وراء ذلك هو فتح تطبيقات الطاقة النووية أمام قطاع النقل وتقليص الاعتماد الحالي على أنواع الوقود الأحفوري مع تقلُّب الأسعار والإمدادات المحدودة وانبعاثات غازات الدفيئة المرتبط بذلك. وهناك برامج جارية في مجال البحث والتطوير في عدة بلدان وهناك بعض الخبرات المتاحة في التطبيقات المرتفعة الحرارة للطاقة النووية على نطاق مختبري، والمكتسبة كذلك من اختبارات المكوِّنات في البرامج السابقة للمفاعل المرتفع الحرارة المبرد بالغاز. وبعد أن طوَّرت اليابان وشغَّلت بنجاح مفاعل الاختبارات الهندسية العالي الحرارة بقدرة تبلغ ٣٠ ميغاواط (حراري)، فإنها بصدد تشييد مفاعل الاختبارات الهندسية العالي الحرارة من خلال مشروع لإيضاح التوليد المشترك للكهرباء بواسطة توربين غازي وللهيدروجين باستخدام عملية التكسير الحراري الكيميائي لجزيئات الماء. ومن المتوقع أن يبدأ تشغيل هذا النظام في عام ٢٠٢٢. ويهدف المشروع إلى تطوير تكنولوجيا النظم، بما في ذلك وضع قاعدة بيانات خاصة بالترخيص مطلوبة لعملية تشييد المحطة التجارية GT-HTR300 المخطط لها لعام ٢٠٣٠ لأغراض التوليد المشترك للهيدروجين وتحلية المياه. ويمكن استخدام المفاعل المرتفع الحرارة النمطي الحصوي القاع (HTR–PM)، الذي يجري تشييده في الصين، لأغراض المعالجة بالبخار أو إنتاج الهيدروجين. وهناك أعمال أخرى في مجال البحث والتطوير تجري بمشاركة الصناعة في كندا والهند وجمهورية كوريا وغيرها.

١٤١- ويمكن لسياسة الاتحاد الأوروبي في مجال الطاقة وهدفها الرئيسي المتعلق بإزالة الكربون بحلول عام ٢٠٥٠ أن يجعل أوروبا أول مكان ينفِّذ التوليد المشترك للقوى النووية على نطاق واسع. وتكشف أوروبا، بسوقها الصناعية الضخمة، اهتمامًا متزايدًا باستخدام التوليد المشترك للقوى النووية في معامل التكرير ومحطات المواد الكيميائية وغير ذلك من الصناعات، حيث يمكن الاستعاضة مباشرة عن محطات التوليد المشترك بالوقود الأحفوري باستخدام مفاعلات نووية تقدِّم كميات هائلة من المعالجة بالبخار والكهرباء في وقت واحد. وأوضحت دراسة أُجرِيت في فرنسا أنه يمكن بسهولة تعديل المفاعلات النووية العاملة في الوقت الحاضر لكي تسُدَّ بكفاءة حاجة شبكات التدفئة على نطاق واسع. ولعل هذه الخطوة تفتح منظورًا جديدًا في إدارة الطاقة وتمهِّد الطريق لتحقيق وفورات هائلة في الطاقة.

باء-٢- الاندماج

١٤٢- هناك طائفة واسعة تعتبر أنَّ توفير الطاقة من الاندماج النووي هو التحدي الهندسي الكبير للقرن الحادي والعشرين. ومع إنشاء مشروع المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي في عام ٢٠٠٦، انضم الاتحاد الأوروبي والاتحاد الروسي وجمهورية كوريا والصين والهند والولايات المتحدة الأمريكية واليابان إلى الجهود المبذولة لإيضاح الجدوى العلمية والتكنولوجية وسمات الأمان لإنتاج طاقة الاندماج بقدرة تفوق ٥٠٠ ميغاواط للأغراض السلمية.

١٤٣- وها هي سنوات من العمل الشاق الذي بذله أطراف المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي تؤتي أكلها لأن معالم المرفق بدأت تظهر وأصبح يحرز تقدمًا على جميع الجبهات. فاستكمال الطابق الأول من مجمع توكاماك (بمساحة تبلغ ٦٠٠ ٩ متر مربع وسمك يبلغ ١,٥ أمتار من الخرسانة المسلّحة تضم أربع طبقات، اثنان منها يبلغان ٥٠ سم، وواحدة تبلغ ٣٠ سم، وواحدة تبلغ ٢٠ سم) في الربع الأخير من عام ٢٠١٤ قد سجَّل نهاية عقد الأعمال المدنية الرئيسية وبداية مرحلة التشييد (الشكل باء-٦).

الشكل باء-٦ - منظر جوي لموقع تشييد المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي في آب/أغسطس ٢٠١٥ (اليسار). في ٢١ تشرين الأول/أكتوبر (اليمين)، تم تشييد القطاع ٢٠٠ من الدرع الحيوي للمفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي، والحلقة التي يبلغ سمكها ٣,٢ متر التي ستحيط بالآلة (الصورتان من: المفاعل التجريبي الحراري النووي الدولي)

١٤٤- ومع امتثال البنية الأساسية للمفاعل المذكور للمتطلبات الفرنسية في مجال الأمان النووي، فإن هذا المفاعل سيكون أكبر مرفق نووي في فرنسا وأول مرفق اندماج نووي على الإطلاق في العالم. وفي أيار/مايو ٢٠١٥، بلغ المشروع نقطة بارزة في أنشطة التشييد مع تركيب أول مكوِّنين للمحطة، اثنان من أصل أربعة محوِّلات كهربائية ستربط الشبكة البالغة ٤٠٠ كيلو فولطي بنظام توزيع القوى الحالي التناوبي، في موضعهما الدائم.

١٤٥- وحتى في الوقت الذي يدرس فيه الشركاء التحديات الكبيرة التي يثيرها المفاعل ITER، فإنه يجري تقدير الحاجة لفهم القضايا العلمية والتقنية للذهاب إلى أبعد من المفاعل ITER، والحاجة للشروع في معالجة تلك التحديات اليوم. وتشمل الأنشطة التي تجري جماعيًا لوضع حلول من أجل تسخير طاقة الاندماج 'برنامج محطة قوى الاندماج الإيضاحية' (المحطة DEMO).

١٤٦- وقد عُقدت حلقة العمل الثالثة الخاصة بالوكالة بشأن محطة القوى الإيضاحية في الفترة من ١١ إلى ١٥ أيار/مايو ٢٠١٥ في المجمع التابع للجامعة الصينية للعلوم والتكنولوجيا في هيفاي بالصين، بهدف مناقشة مجموعة القضايا الرئيسية العلمية والتقنية والبرنامجية لمحطة قوى الاندماج الإيضاحية وتحديد المرافق وأنشطة البرامج التي يمكن أن تفضي إلى تسوية تلك القضايا. ومن الأهداف ذات الصلة تحديد الفرص التي تتيح إحراز تقدم أكبر عبر التعاون الدولي.

١٤٧- وأشارت نتائج حلقة العمل إلى أنَّ المساهمة الرئيسية للمفاعل ITER في برنامج الاندماج ستتمثَّل في تحسين الفهم الفيزيائي للبلازما المحترقة. وبالإضافة إلى ذلك، من شأن المفاعل ITER أن يحرز تقدمًا كبيرًا بشأن الاعتراض على استقرار البلازما وقضايا التحكم فيها، بما في ذلك التنبؤ بالاختلالات الكبرى في البلازما وتفاديها أو التخفيف من حدتها والتحكم في الأنماط الطرفية الموضعية.

١٤٨- وفي تكنولوجيا تفريغ القوى من البلازما، سيساعد المفاعل ITER على تحديد آثار تعرض البلازما على المدى البعيد أمام مكوِّنات البلازما، مثل تضرر الأيونات أمام مواد البطانة الأولى والمحرِّف. وبقدر ما ستستخدم محطة قوى الاندماج الإيضاحية نظم التدفئة ونظم الدفع الحالية الشبيهة بالمفاعل ITER، فإن هذا المفاعل سيقدِّم إيضاحات مباشرة للجدوى التقنية فيما يتعلق بعدة مكوِّنات رئيسية. وأخيرًا، سيساهم المفاعل ITER في تكنولوجيا الدثار من خلال برنامج الوحدة النمطية لدثار الاختبار. وتبيِّن التجربة أن التصميم التقني وتحليل التكامل ينبغي أن يتم بأكبر قدر من التفصيل وينبغي وضع جميع أشكال التصديق والتأهيل قبل إصدار تحليل الأمان الأولي إلى الجهة الرقابية. وسوف يقدِّم المفاعل ITER قاعدة بيانات شاملة للفيزياء والتكنولوجيا لكي يستخدمها مصممو محطة قوى الاندماج الإيضاحية ومن شأنها أن تدعم التحليل اللازم لتلبية الحاجة للتفاصيل اللازمة في تحليل الأمان الأولي.

١٤٩- وقد حوَّل عدة أطراف في المفاعل ITER اهتمامهم نحو الدراسات المتعلقة بالأجهزة المتكاملة الرامية إلى الانتقال إلى ما بعد المفاعل ITER. وعلى عكس المفاعل ITER، فإنَّ هذه الدراسات تجري على الصعيد الوطني وهي حاليا في مرحلة التمهيد للتصميم المفاهيمي فقط. ويقدم الجدول باء-١ موجزًا للمعلومات المتعلقة بأربعة أجهزة، مثلما تم عرضه في حلقة العمل.

	المحطة EU DEMO	**المحطة JA DEMO**	**المحطة K-DEMO**	**المحطة CFETR (المرحلة الأولى)**
البعثة	صافي الكهرباء ($Q_{eng} > 1$) اكتفاء ذاتي من التريتيوم	صافي الكهرباء ($Q_{eng} > 1$) اكتفاء ذاتي من التريتيوم	صافي الكهرباء ($Q_{eng} > 1$) اكتفاء ذاتي من التريتيوم اختبار المواد والمكوِّنات في بيئة الاندماج	اختبار المواد والمكوِّنات في بيئة الاندماج دورة وقود التريتيوم الكاملة
القوى P_{fus}	٢٠٠٠ ميغاواط	١٥٠٠ ميغاواط	≤ ٣٠٠ ميغاواط	٥٠-٢٠٠ ميغاواط
القوى TBR	< ١,٠	< ١,٠٥	< ١,٠	≤ ١,٠
مدة النبضة	ساعتان	ساعتان إلى وضع مستقر	وضع مستقر	١٠٠٠ ثانية إلى وضع مستقر
عامل التشغيل	~ ٧٠٪			٣٠-٥٠٪
القوى P_{elec}	٥٠٠ ميغاواط	٢٠٠-٣٠٠ ميغاواط (صافية)	≤ ١٥٠ ميغاواط (صافية)	غير منطبق
استيلاد التريتيوم	لم يُحدَّد بعدُ ـــ يجري النظر في المُفاعل المُوَلِّد الصلب والعامل بالليثيوم-الرصاص	مُفاعل مُوَلِّد، تكنولوجيا مفاعل الماء المضغوط	مُفاعل مُوَلِّد، تكنولوجيا مفاعل الماء المضغوط	مُفاعل مُوَلِّد صلب، تكنولوجيا مفاعل الماء المضغوط، دورة التريتيوم المغلقة على نطاق ١٠/١ محطة DEMO
نسق مترابط مغنطيسي	توكاماك	توكاماك	توكاماك	توكاماك
الصيانة	المناولة عن بعد	المناولة عن بعد	المناولة عن بعد	المناولة عن بعد

الجدول باء-١ - البعثة الحالية وأهداف الأداء لأجهزة الاندماج المتكامل في الخطوة المقبلة بعد المفاعل ITER. المحطة EU DEMO (أوروبا)؛ المحطة JA DEMO (اليابان)؛ المحطة K-DEMO (جمهورية كوريا)؛ المحطة CFETR (الصين)؛ P_{elec} = القوى الكهربائية؛ P_{fus} = قوى الاندماج؛ Q_{eng} = معامل تضخيم القوى الهندسية؛ TBR = معدل استيلاد التريتيوم.

١٥٠- ولهذه الدراسات إمكانات للدفع بالمحطة DEMO خطوات هائلة إلى الأمام بحلول منتصف القرن، ولكنَّ الحاجة تدعو إلى اتخاذ تدابير كمية فيما يتعلق بالتقدم المتوقع مقارنة بمجموعة كاملة من مقاييس استعداد المحطة DEMO من أجل تقييم الفجوات التي قد تظل قائمة حتى لو تم الاضطلاع بجميع هذه المشاريع بنجاح. وتجدر ملاحظة أن هناك فجوات عامة قائمة فيما يتعلق بهذه الآلات في حد ذاتها، ولا سيما في مراحلها الأخيرة، حيث تكون أنشطة البحث والتطوير ضرورية في الأجل القريب.

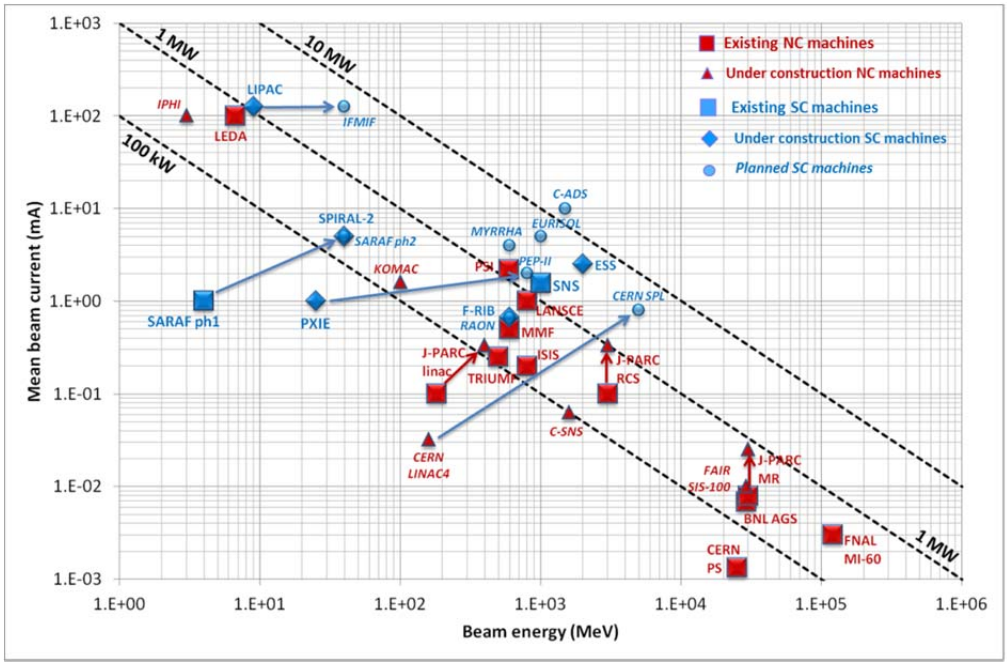
١٥١- وهناك أسئلة مفتوحة بشأن بعض القضايا الرئيسية، ومنها فيزياء البلازما المحروقة والتحكم فيها، وتكنولوجيات المواد والمكوِّنات، وتوافر الآلات، وخيارات الأنساق المترابطة المغنطيسية. وقد تم الاعتراف على العموم بأنه لا يوجد أي جهاز منفرد يُرجَّح أن يسوي جميع قضايا المحطة DEMO في وقت واحد ولكن ليس من الواضح في الوقت ذاته العدد اللازم من الآلات، ولا مدى التنوع اللازم أن تتميز به المجموعة المثالية من هذه الآلات. وبناء على ذلك، قد يبدو أنَّ هناك ميزة كبيرة في تنفيذ استراتيجية دولية لتخطيط وتنسيق العمل من أجل تحسين تغطية الاحتياجات الخاصة بالمحطة DEMO والتي لا تتم تلبيتها حاليًا بشكل مناسب، ومن أجل تقليص ازدواجية الجهود، والصمود أكثر أمام العقبات وحالات التأخر.

جيم- التطبيقات الخاصة بالمُعجِّلات ومفاعلات البحوث

جيم-١- المُعجِّلات

جيم-١-١- المُعجِّلات البروتونية عالية القدرة

١٥٢- يتزايد الطلب على المُعجِّلات البروتونية عالية القدرة أو معجِّلات الحُزم الأيونية في مجالات متعددة، مثل فيزياء الجُسيمات، والفيزياء النووية، والفيزياء النيوترونية، وفي تحويل النفايات النووية المعمّرة. وفي العادة تتطلب هذه التطبيقات حُزماً إشعاعية بقوى وطاقة عالية المتوسط ضمن نطاق غيغا إلكترون فلط، وهو ما يتجاوز بكثير قدرات أغلب المرافق الحالية. يُظهر الشكل جيم-١ المشاريع الجارية والمزمعة التي تدفع قوى الحُزم نحو ١٠ ميغاواط.

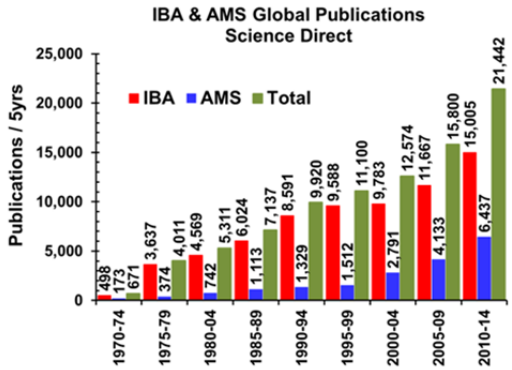


الشكل جيم-١: مشاريع الحُزم البروتونية/النيوترونية عالية القدرة حول العالم. المصدر: جان-لوك بيارو، معهد الفيزياء النووية، أورسيه، فرنسا؛ مستنسخة من: بيارو، جان-لوك، "المُعجِّلات البروتونية/الديوتيرونية عالية القدرة"، وقائع المؤتمر الدولي السادس عشر عن الموصلية الفائقة للترددات اللاسلكية، باريس، فرنسا، ٢٠١٣، موقع الويب المشترك لمؤتمرات المعجِّلات (٢٠١٤) ٣٥-٤١.

١٥٣- والنُّظم التي تعمل بالمُعَجِّلات من الحلول المحتملة لمرافق التحويل المخصصة بالاستناد إلى مُعجِّلات خطية بروتونية فائقة التوصيل متعددة الميغاواطية بقدرات موثوقية معزَّزة. ويمثل المشروع البلجيكي للنظام الذي يعمل بالمُعجِّلات من طراز MYRRHA، الممولَّ من جهات منها الاتحاد الأوروبي والمشروع الصيني للنُّظم التي تعمل بالمُعجِّلات، فرصاً لعرض تكنولوجيا النُّظم التي تعمل بالمُعجِّلات عالية القدرة خلال فترة ١٠-١٥ سنة.

جيم-١-٢- خريطة طريق تقنيات الحُزَم الأيونية

١٥٤- تشمل تقنيات الحُزَم الأيونية القائمة على المُعجِّلات حُزمة من التقنيات التحليلية والتعديلية يتم من خلالها توجيه حُزَم شعاعية نشطة (١٠٠-٠,١ ميغا إلكترون فولت) من الجسيمات المشحونة (حيث Z = 1, 2 أو أعلى) نحو مادة يُرادُ تحليلها أو تعديلها. وتُستخدم مثل هذه التقنيات منذ أكثر من ٥٠ عاماً، وبات جُلُّ الفيزياء والبيانات والآلات التي تقوم عليها مثل تلك التقنيات راسخة. وقادت أوجه التقدُّم في تقنيات الحُزَم الأيونية نحو مساهمات في مجالات عدة (الشكل جيم-٢)، ويتمثل ذلك في الدراسات المناخية، على سبيل المثال، في استخدام النظائر المشعة الكونية، وتطوير مواد معزَّزة، وفهم تقادُم مكونات المفاعلات، وتطوير المعالجة الهادرونيَّة، التي من المرجح أن تترتب عليها تبعات هائلة بالنسبة للصحة البشرية.



الشكل جيم-٢ - تزايد عدد المنشورات التي تدور حول استخدام تقنيات الحُزَم الأيونية. (الصورة مقدمة من ديفيد كوهين، المنظمة الأسترالية للعلوم والتكنولوجيا النووية) (IBA: التحليل بحُزَم الأيونات؛ AMS: قياس الطيف الكتلي باستخدام المعجلات)

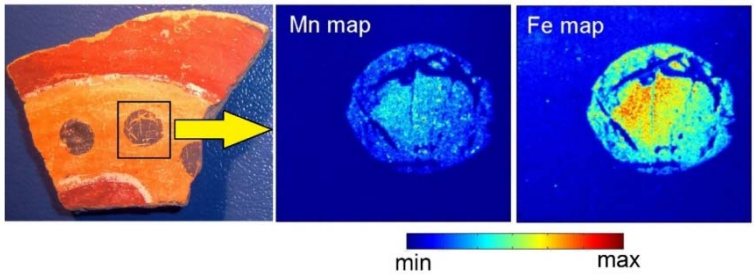
١٥٥- وأخذت الوكالة بزمام المبادرة في تنسيق وضع خريطة طريق تقنيات الحُزَم الأيونية، ستشمل جوانب من التخطيط الاستراتيجي متوسط الأجل (٥-١٥ سنة) لعلوم المُعجِّلات والتكنولوجيات ذات الصلة. وقد أفضت المناقشات المكثفة التي أجراها خبراء دوليون إلى أول مسودة قامت بتحديد أولويات التطورات التكنولوجية والمقاييس المقابلة. ومن المتوقع الانتهاء من خريطة طريق تقنيات الحُزَم الأيونية في عام ٢٠١٦. وتتوافر الوثائق ذات الصلة عبر بوابة الوكالة للمعرفة المتعلقة بالمُعجِّلات: https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/default.aspx.

جيم-١-٣- تقنيات الأشعة السينية لتحديد خصائص المواد وتصويرها

١٥٦- يُستخدم الإشعاع السنكروتروني منذ ما يربو على ثلاثين عاماً لإثراء المعارف الأساسية في مجال العلوم متعددة التخصصات ولتعزيز التطبيقات التكنولوجية. وسيقود الجيل الرابع من المصادر الضوئية السنكروترونية العلماء نحو آفاق جديدة. وتشمل المشاريع الراهنة مشروع المختبر MAX IV في لوند، السويد (من المتوقع أن يبدأ التشغيل الكامل من عام ٢٠١٦) ومشروع Sirius في البرازيل (من المتوقع أن يدخل الخدمة في عام ٢٠١٨). ويتيح التقدم الذي أُحرز مؤخراً في مجال تكنولوجيا المُعجِّلات إشعاعات متدنية الانبعاثات، ومن ثم درجة سطوع أكبر واتساقية أفضل. ومن المتوقع حدوث إنجازات كبرى في مضمار التصوير بالأشعة السينية عالي الدقة، مثل التصوير المجهري الطبقي الذي أتاح إعادة تركيب الصور بدقة تحديد مكانية تفوق بكثير تلك المتاحة عبر التقنيات التقليدية. وتعزز هذه المصادر السنكروترونية الجديدة التطوير على نحو موازٍ لأجهزة كشف الأشعة السينية المُبَكْسَلَة المشتتة للطاقة المتقدمة أو أحادية العدد.

١٥٧- ومن الأمثلة الجيدة هنا الكاشف "مايا" ٣٨٤ مصفوفة سليكونية-ثنائية الذي يعمل بقياس الطيف القائم على تألُّق الأشعة السينية والذي أظهر بالفعل أنه يوفر تصويراً تنوعياً سريعاً، للعناصر والحالة الكيميائية، عند خطوط حُزم إشعاعية سنكروترونية مختلفة. ووُجد للتصوير الكلي بقياس الطيف القائم على تألُّق الأشعة السينية، مع استبانة حيزية متوائمة مع حجم الحُزم الإشعاعية السنكروترونية للحادثة، تطبيقٌ بارز في فحص النظم البيولوجية والأعمال الفنية (الشكل جيم-٣). ويمكن أن توفر التطبيقات الموازية في بصريات الأشعة السينية والمنهجيات ذات الصلة تحليلاً ذا استبانة حيزية للعينات كبيرة المساحة عند تشعيعها بحُزم أشعة سينية عريضة نسبياً. وظهر مفهوم كاميرات الأشعة السينية مكتملة المجال بسرعة كمنهجية تحليلية واعدة يمكن تكييفها للمصادر السنكروترونية، أو خطوط حُزم انبعاث الأشعة السينية المستحثّ بالجُسيمات، أو المطياف المحمول الذي يعمل بقياس الطيف القائم على تألُّق الأشعة السينية (الشكل جيم-٤).

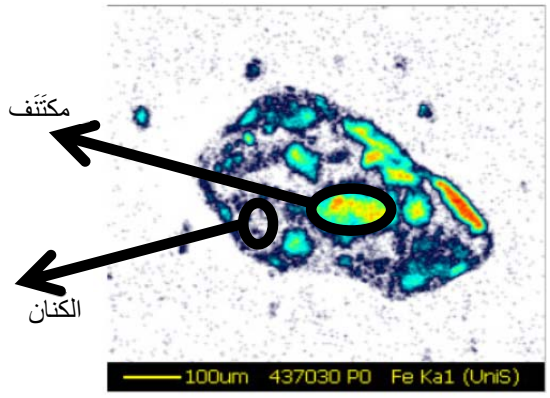
الشكل جيم-٣ نسخة بتصرُّف من: مونيكو، إل. وآخرون، "التصوير كامل الطيف لبنى قرب الحافة بامتصاص الأشعة السينية باستخدام مصفوفة الكاشف "مايا" كأداة جديدة لدراسة عملية تعديل أصباغ الأصفر الكرومي في لوحات فينسنت فان غوخ"، الدورية Journal of Analytical Atomic Spectrometry، العدد ٣٠ (٢٠١٥)، ٦١٣-٦٢٦.



الشكل جيم-٤- تحليل انبعاث الأشعة السينية المستحث بالجُسيمات مكتمل المجال لزخرفة سوداء منغنيزية في خزفيات متعددة الألوان من حضارة نازكا (بيرو) في المعهد الوطني للفيزياء النووية، إيطاليا.

جيم-١-٤- تقنيات الحُزم الأيونية والنيوترونية المجمَّعة مع العناصر النَّزْرة والبصمة الجزيئية

١٥٨- استخدام تقنيات الحُزم الأيونية والنيوترونية في تحليل العنصر النَّزْرة ممارسة راسخة، وتتوافر مثل هذه الخدمات عبر مختبرات معتمدة في عدد من الدول الأعضاء المشغِّلة لمعجِّلاتٍ أو مفاعلات بحوث. وتشمل التطبيقات: تحليل الشعر والأظافر والجلد والمادة النباتية والحيوانية لأغراض طبية أو طبية حيوية؛ واستكشاف منشأ الزجاج والمنتجات النباتية/الغذائية والقطع الأثرية الثقافية؛ وتحديد مصادر الذخيرة، وبقايا الطَّلَق الناري، والطلقات، والتفجيرات النووية؛ وتحديد وتتبُّع التلوث البيئي.



الشكل جيم-٥- صورة عنصر ثنائية الأبعاد لعينة كوارتز مقاسَة بحُزم الأشعة الأيونية المركَّزة. يمكن أن تُفصل المُكتنفات الحديدية بشكل جيد عن الكنان من خلال التحديد المكاني الانتقائي للقياس الكيميائي، وهو مفيد إلى حد بعيد لأغراض تحديد المنشأ. (الصورة مهداة من ميلين بيلي، جامعة سَري، المملكة المتحدة).

١٥٩- وتساعد الوكالة في تطوير نهج تحليلي متعدِّد بالاستفادة من العلاقة التآزرية بين أساليب الحُزم الأيونية والحُزم النيوترونية للتحليل فائق الدقة للعنصر النَّزْر والتحليل الجزيئي. إضافة إلى ذلك سيتم تطوير طريقة رسم خرائط فائقة الاستبانة ثنائية/ثلاثية الأبعاد للعناصر النَّزْرة في قطع "حقيقية" (على سبيل المثال أجسام بخشونة سطحية أو عينات رطبة) لتحديد منشأ المواد (الشكل جيم-٥).

جيم-٢- مفاعلات البحوث

١٦٠- تستخدم مفاعلات البحوث أساساً كمصدر نيوتروني للبحوث ومختلف التطبيقات، وترِد في الجدول جيم-١ أكثر التطبيقات تواتراً. ويمكن أن تتراوح قدرة هذه المفاعلات بين الصفر (على سبيل المثال، المجمعات الحرجة أو دون الحرجة) وما يقرب من ٢٠٠ ميغاواط (حراري)، وهي قدرة تظل صغيرة مقارنة بالقدرة البالغة ٣ ٠٠٠ ميغاواط (حراري) لمحطة القوى النووية النمطية. وتصميم مفاعلات البحوث أكثر تنوعًا بكثير من تنوع مفاعلات القوى، ولها أيضاً أوضاع تشغيل مختلفة، يمكن أن تكون مستمرة أو نبضية.

الجدول جيم-١ - الاستخدامات الشائعة لمفاعلات البحوث على نطاق العالم[٤].

نوع التطبيقات (أ)	عدد مفاعلات البحوث المشمولة (ب)	عدد الدول الأعضاء التي توجد بها مرافق مستخدمة
التدريس/التدريب	١٧٣	٥٤
التحليل بالتنشيط النيوتروني	١٢٤	٥٤
إنتاج النظائر المشعّة	٨٩	٤٤
تشعيع المواد/الوقود	٧٣	٢٨
التصوير الشعاعي النيوتروني	٧١	٤٠
التشتت النيوتروني	٤٨	٣٢
التحويل (معالجة السليكون)	٢٦	١٧
علم التقويم الجيولوجي	٢٧	٢٣
التحويل (الأحجار الكريمة)	١٨	١٠
العلاج النيوتروني، أساساً البحوث والتطوير	١٨	١٢
استخدامات أخرى (ج)	١٢٨	٣٦

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

(ب) من بين ٢٦٥ مفاعل بحوث تمت دراستها (٢٤٦ عاملة، و١٩ في حالة إغلاق مؤقت؛ حتى تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٥).

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

١٦١- وحتى اليوم، تم تشييد ٧٥٤ مفاعلاً بحثياً في ٦٧ بلداً، منها ٢٤٦ مفاعلاً عاملاً في ٥٥ بلداً حتى ٣١ كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٥. لدى الاتحاد الروسي أكبر عدد من مفاعلات البحوث العاملة حيث تمتلك ٦٣ مفاعلاً، تليه الولايات المتحدة الأمريكية (٤٢)، والصين (١٧) وفرنسا (١٠). ولدى العديد من البلدان النامية مفاعلات بحوث أيضًا (على سبيل المثال، هناك ثمانية مرافق تعمل في أفريقيا). وعلى نطاق العالم، يعمل ٥٨ مفاعل بحوث على مستويات قدرة أعلى من ٥ ميغاواط، وبذلك توفر تدفقات نيوترونية عالية تدعم التطبيقات التي تحتاج إلى سعة عالية.

١٦٢- وما زال معامل استخدام العديد من مفاعلات البحوث العاملة متدنياً، ويتجاوز عُمر نصف تلك المفاعلات ٤٠ عاماً. وعليهِ، تتطلب أغلبية تلك المفاعلات اهتماماً متواصلاً من أجل تخطيط استراتيجي مفصَّل على صعيد الاستخدام وإدارة التقادم والتحديث والتجديد. ومازالت تتزايد الجهود المبذولة لتعزيز استخدامها وتحقيق إيرادات إضافية. وفي العامين الماضيين، قام ٣٣ مِرفقاً من مرافق مفاعلات البحوث بإعداد خطط استراتيجية وتقديمها إلى الوكالة لاستعراضها. كذلك قامت الوكالة بتنقيح مبادئها التوجيهية بشأن التخطيط

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

الاستراتيجي لمفاعلات البحوث من خلال تضمين جوانب مفاعلات البحوث الجديدة أو مشاريع التجديد الكبرى، وتبادُل تجارب المرافق المُدارة على نحو جيِّد بالاستعانة بأمثلة متعددة. ويواصل التعاون الدولي تشجيع وتعزيز استخدام مفاعلات البحوث لأغراض التعليم والتدريب بين مجالات أخرى. ومن الأمثلة على ذلك مشروع مختبر المفاعلات على شبكة الإنترنت في أمريكا اللاتينية وأوروبا، الذي يهدف إلى ربط الجامعات بمفاعلات البحوث العاملة المخصصة للتعليم والتدريب. وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٥، انطلق المشروع في أمريكا اللاتينية (الأرجنتين كبلد مضيف) وفي تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٥ في أوروبا وأفريقيا (فرنسا كبلد مضيف).

١٦٣- وهناك عدة بلدان تمر بمراحل مختلفة من بناء مفاعلات بحوث جديدة باعتبارها مرافق وطنية رئيسية لتطوير البنية التحتية للعلوم والتكنولوجيا النووية وبرامجها، بما في ذلك القوى النووية. ويجري تشييد مفاعلات بحوث جديدة في الاتحاد الروسي والأرجنتين والأردن والبرازيل وجمهورية كوريا وفرنسا والمملكة العربية السعودية والهند. ولدى العديد من الدول الأعضاء خطط رسمية لتشييد مفاعلات بحوث جديدة، منها بلجيكا، وبيلاروس، ودولة بوليفيا المتعددة القوميات، وفييت نام، وهولندا، والولايات المتحدة الأمريكية. وتنظر دول أعضاء أخرى، مثل إثيوبيا، وأذربيجان، وبنغلاديش، وتايلند، وتونس، وجمهورية تنزانيا المتحدة، وجنوب أفريقيا، والسودان، وطاجيكستان، وغانا، والكويت، ولبنان، وماليزيا، ومنغوليا، وميانمار، ونيجيريا، في بناء مفاعلات بحوث جديدة[٥]. وتم تأسيس تعاون دولي لتشييد مفاعلات بحوث متعددة الأغراض مثل المفاعل Jules Horowitz Reactor في فرنسا والمفاعل MBIR في الاتحاد الروسي.

١٦٤- وتساعد الشبكات والائتلافات الإقليمية المعنية بمفاعلات البحوث، التي تيسِّرها الوكالة[٦]، في تعزيز التعاون الدولي، وتمكِّن مفاعلات البحوث من توسيع نطاق أوساط أصحاب المصلحة فيها ومستخدميها. وعلاوة على ذلك، استهلت الوكالة في عام ٢٠١٤ مخطط تعاون جديداً، هو "المركز الدولي القائم على مفاعلات البحوث حسب تصنيف الوكالة) (ICERR). وفي عام ٢٠١٥، سُمِّيت المفوضية الفرنسية للطاقة الذرية والطاقات البديلة في المركزين البحثيين التابعين لها في ساكليه وكاداراش كأول جهة تحصل على تصنيف "المركز الدولي القائم على مفاعلات البحوث حسب تصنيف الوكالة" (ICERR)، ومن المتوقع تلقِّي طلبات إضافية من منظمات أخرى في عام ٢٠١٦ للحصول على التصنيف.

١٦٥- وطوال عام ٢٠١٥ واصل مكتب إدارة المواد وتقليصها في وزارة الطاقة في الولايات المتحدة، الذي خلف المبادرة العالمية لتقليص التهديدات، تحقيق رسالته بتقليص استخدام اليورانيوم الشديد الإثراء في القطاع النووي المدني. وبحلول نهاية عام ٢٠١٥ كان قد تم تحويل ٩٤ مفاعل بحوث في نطاق تنفيذ المكتب إلى استخدام وقود اليورانيوم الضعيف الإثراء أو تمّ تأكيد إغلاقها، بما في ذلك مِرفق واحد لإنتاج الموليبدينوم-٩٩ يستخدم اليورانيوم الشديد الإثراء. وتشمل النجاحات الكبرى في هذا الصدد قيام جامايكا بتحميل قلب المفاعل الذي يعمل بوقود اليورانيوم المنخفض في المفاعل "سلوبوك-٢"، وتصريف وقود اليورانيوم الشديد الإثراء من التصميم الأولي من المفاعل المصدري النيوتروني المصغَّر في الصين استعداداً للتحويل، وحقن مجمعات اختبار الرصاص لوقود اليورانيوم-الموليبدنوم المحتوي على يورانيوم ضعيف الإثراء في مفاعل MIR في

---

[٥] الهدف المنشود من منشور الوكالة *Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project* (العدد NP-T-5.1 من سلسلة منشورات الطاقة النووية الصادرة عن الوكالة، فيينا ٢٠١٢) ومجموعة من الوثائق الداعمة هو مساعدة الدول الأعضاء في هذا المجال.

[٦] تدعم الوكالة عدَّة ائتلافات مختلفة لمفاعلات البحوث في منطقة البلطيق، ومنطقة الكاريبي، ووسط أفريقيا، وآسيا الوسطى، وأوروبا الشرقية، ومنطقة البحر الأبيض المتوسط، وكذلك في رابطة الدول المستقلة، إلى جانب الشبكة العالمية لمفاعلات بحوث تريغا.

ديميتروفغراد من أجل التشعيع. وواصلت الوكالة دعم غانا في جهودها الرامية إلى تحويل ونقل قلب مفاعلها المصدري النيوتروني المصغَّر الذي يعمل بيورانيوم شديد الاثراء، ومن المتوقع القيام بذلك في عام ٢٠١٦.

١٦٦- وتشمل أنشطة الحدّ من اليورانيوم الشديد الاثراء إعادة وقود اليورانيوم الشديد الاثراء المستخدم في مفاعلات البحوث إلى بلد المنشأ الذي تم إثراؤه فيه. وبنهاية عام ٢٠١٥ كان برنامج استرداد وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الناشئ في الولايات المتحدة قد أنجز ٧٦٪ من أهدافه بإزالة ما يقرب من ١ ٣٠٠ كغم من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء الطازج والمستهلك المستخدم في مفاعلات البحوث. واكتمل بنسبة ٨٦٪ برنامج استرداد وقود اليورانيوم الروسي المنشأ، بإزالة ٢١٦٥ كغ من وقود اليورانيوم الشديد الإثراء المستخدم في مفاعلات البحوث. وتمت إزالة اليورانيوم الشديد الاثراء غير المشعَّع الروسي المنشأ من مِرفق المصادر النيوترونية Breeder-1 في تبليسي، جورجيا، في كانون الأول/ديسمبر ٢٠١٥. وبإزالة وقود اليورانيوم الشديد الإثراء المشعَّع من المفاعل IIN-3M FOTON في أوزبكستان (الشكل جيم-٦) يصبح ٢٨ بلداً[٧] امتلكت اليورانيوم الشديد الإثراء في السابق خاليةً من اليورانيوم الشديد الاثراء.

الشكل جيم-٦ - علبة نقل معبأة بوقود اليورانيوم الشديد الإثراء السائل المشعَّع (يساراً). الشاحنة التي تحمل شحنة حاوية وقود اليورانيوم الشديد الإثراء السائل تصعد إلى طائرة الشحن التي أعادت الوقود من مفاعل IIN-3M FOTON في أوزبكستان إلى الاتحاد الروسي (يمين).

١٦٧- والأنواع المتقدِّمة ذات الكثافة العالية للغاية من وقود اليورانيوم-المولبيدينوم قيد التطوير في الوقت الراهن مطلوبة لتحويل مفاعلات البحوث العالية الأداء والعالية الفيض. ورغم إحراز تقدُّم كبير في هذا المضمار، من الضروري بذل المزيد من الجهود وإجراء المزيد من الاختبارات، لاسيما في سياق برامج فحوص التشعيع وما بعد التشعيع، وكذلك في مجال تقنيات الصنع، لتحقيق التوافر التجاري لأنواع وقود اليورانيوم ضعيفة الإثراء وعالية الكثافة المعتمدة.

١٦٨- وفي حين لم تكن هناك أي حالات عجز كبرى في توافر المولبيدينوم-٩٩ خلال عام ٢٠١٥، مازالت توجد تحديات تشغيلية في مرافق المعالجة وفي مفاعلات البحوث القديمة. وبسبب التغيرات في الطلب، والكفاءة المكتسبة، والتنوُّع في التوريد، أدارت الصناعة بشكل جيد حالات الانقطاع الصغيرة غير المجدولة. ويتواصل تحويل عمليات إنتاج النظائر الطبية من استخدام اليورانيوم الشديد الاثراء إلى استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء، والمنظمة الأسترالية للعلوم والتكنولوجيا النوويتين وشركة NTP للنظائر المشعة في جنوب أفريقيا هُما المورِّدان الرئيسان للمولبيدنوم-٩٩ القائم على اليورانيوم ضعيف الإثراء. وتتوقع المنظمة الأسترالية للعلوم والتكنولوجيا النوويتين اكتمال المِرفق الجديد لإنتاج المولبيدنوم-٩٩ في أواخر ٢٠١٦، الأمر الذي سيزيد الإنتاج إلى ٣٥٠٠ كوري، معايراً بعد ٦ أيام من مغادرة المِرفق. وتواصل شركة NTP للنظائر المشعة تحويل عملياتها

[٧] وتايوان، الصين.

إلى استخدام اليورانيوم الضعيف الإثراء حصرا. ويواصل معهد العناصر الإشعاعية في بلجيكا وشركة مالينكرودت الدوائية في هولندا تحقيق تقدُّم في جهود التحويل. ورغم أن المختبرات النووية تسعى إلى تمديد تشغيل مفاعل البحوث الوطنية الشامل (NRU) حتى ٣١ آذار/مارس ٢٠١٨، غير أن كندا تعتزم إنهاء الإنتاج الروتيني من الموليبدينوم-٩٩ من مفاعل البحوث الوطنية الشامل في ٣١ تشرين الأول/أكتوبر ٢٠١٦. وتمَّ إغلاق مفاعل BR2 في بلجيكا، وهو أحد أجهزة التشعيع الرئيسية للموليبدينوم-٩٩ في شباط/فبراير ٢٠١٥ للقيام بأنشطة صيانة وتحديث ممتدة لإعداد المرفق لتمديد رخصة تشغيله لمدة ١٠ سنوات إلى ما بعد عام ٢٠١٦. ومن المتوقع استئناف العمليات الطبيعية في تموز/يوليو ٢٠١٦. ونجح مجتمع الموليبدينوم-٩٩ الدولي في تكييف جدول تخطيط الإنتاج بحيث يأخذ في الحسبان فترة الانقطاع الممتدة. كما زاد الاتحاد الروسي إنتاجه من الموليبدينوم-٩٩ في عام ٢٠١٥.

دال- التطبيقات الصناعية الناشئة للتكنولوجيات الإشعاعية

١٦٩- تُكيَّف التكنولوجيات الإشعاعية باستمرار لاستخدامها في تطبيقات صناعية، سواء حل المشاكل في منشأة تصنيعية، أو تحقيق جودة متطورة في إنتاج مواد عالية القيمة، أو التخفيف من الملوثات في الدوافق الصناعية. وسوف يبيِّن هذا القسم التكنولوجيات الإشعاعية التي كان لها تأثير واضح في الأعوام الأخيرة ومكَّنت تطبيقات على النطاق الصناعي.

دال-١- التكنولوجيات الإشعاعية في الصناعة والهندسة

١٧٠- تنشيط الطبقات الرقيقة تقنية نووية تتيح إمكانية الاستقصاءات الإلكترونية عن التلف أو التآكل على مستوى يتراوح من ميكرومتر إلى نانومتر في قطاعات متقدمة تقنياً مثل صناعة السيارات، وصناعة الطاقة، والتعدين. وفي سياق غير صناعي نجد أن السواحل وقيعان البحار عرضة لعمليات التآكل والنقل والترسُّب والتجمُّع. وفي العادة ظهرت المقتفيات القائمة على نظائر مشعة والمصادر المغلقة كأدواتٍ لا بديلَ عنها في دراسات نقل الرواسب في البيئات البحرية، فهي توفر بارامترات مهمة تتيح تعزيز فاعلية تصاميم الإنشاءات الهندسية المدنية وصيانتها وبلوغ مستوياتها المُثلى، ويمكنها تعزيز حماية المصادر الساحلية وإدارتها.

دال-١-١- تنشيط الطبقات الرقيقة لقياس تلف المواد وتحاتّها وتآكلها

١٧١- تُستخدم التقنيات النووية على نطاق واسع لاستقصاء الظواهر الفيزيائية والكيميائية المعقدة، بما في ذلك التلف وانتقال الكتلة والتآكل والتحاتّ. ومن المعروف تماماً أن موثوقية المعدات الصناعية، ونظم النقل، ومحطات القوى النووية والتقليدية، والأنابيب على سبيل المثال، إنما تتأثر بشكل كبير بعمليات التدهور مثل التلف والتآكل والتحاتّ. وعليهِ، ثمة أهمية بالغة لتطوير أساليب فعالة للكشف عن العمليات آنفة الذكر وقياسها ورصدها. وقد تحُول أساليب الرصد الملائمة دون وقوع حوادث خطيرة خلال تشغيل المنشآت الصناعية ومركبات النقل، وتجنّب حدوث خسائر إنتاجية بسبب أعطال الآلات.

١٧٢- وعندما يتعذَّر الوصول بسهولة إلى الأسطح أو عندما تكون مخفية بسبب وجود إنشاءات تعلوها، توفر التقنيات النووية أكثر الطرق فاعلية لقياس ورصد التلف والتآكل. ويوفر تنشيط الطبقات الرقيقة، ويُقصد بذلك أن الطبقات السطحية من الأجهزة المرغوبة من الآلات هي فقط التي يتم تنشيطها بجُسيمات مشحونة، وسيلةً لرصد

المكونات الرئيسية رغم صعوبة الوصول إليها. وتتيح مستويات النشاط المنخفضة لهذه العملية التعامل مع العينة بسهولة، كما أن حساسية القياس التي يمكن بلوغها عالية.

١٧٣- وهناك تقدُّم متواصل في تطبيق تقنيات المقتفيات في فروع عدة من الصناعة الحديثة من أجل تقييم تلف الآلات وتآكلها، ويعود ذلك في المقام الأول إلى أوجه التقدُّم في الأساليب المستخدمة في الوسم الإشعاعي للأجزاء قيد الاستقصاء. وتم تطوير أساليب وسم مختلفة لقياس فقدان المادة على مستوى نانومتري وبنشاطٍ متدنٍ نسبياً، مثل تنشيط الطبقات فائقة الرقة، والتي تعتمد على الزرع الارتدادي للنوى المشعة الثقيلة الناجمة عن التفاعلات النووية وتتيح تحقيق حساسية قياس التلف السطحي على مستوى بضعة نانومترات.

دال-١-٢- التكنولوجيات الإشعاعية لأغراض استقصاء نقل الرواسب

١٧٤- استقصاء نقل الرواسب في البحار والأنهار مسألة بالغة الأهمية على صعيد الهندسة المدنية وحماية المناطق الساحلية وإدارتها. إنَّ السواحل وقيعان البحر هي مناطق ديناميكية تحتوي على رواسب تمرُّ عبر فترات من التآكل والنقل والترسُّب والتجمع. وتشمل الأسباب الرئيسة لتآكُل الشواطئ العواصف والأنشطة البشرية، مثل تشييد الأسوار البحرية، وأرصفة الموانئ، وكذلك تجريف مصبَّات الأنهار. حيث يعوق كلّ نشاط منها التدفق الطبيعي للرواسب. واليوم يتفاقم على نحو متزايد أثر العوامل التي هي من صُنع الإنسان بسبب تأثير التغيُّر المناخي. وثمة العديد من السياسات والممارسات الراهنة التي قد تسرِّع عملية تآكل الشواطئ، غير أن هناك خيارات مجدية للتخفيف من مثل تلك الأضرار وتوفير سواحل مستدامة.

١٧٥- ويمكن أن تساعد التقنيات النووية في استقصاء ديناميات الرواسب وفي تحديد البارامترات المهمة التي تتيح تحسين تصاميم الإنشاءات الهندسية المدنية وصيانتها وبلوغ مستوياتها المُثلى. وقد ثبتت على وجه الخصوص الأهمية القيِّمة لاستخدام النظائر المشعة في المقتفيات والمصادر المغلقة في الدراسات حول نقل الرواسب.

١٧٦- والمقتفيات الإشعاعية أكثر حساسية ودقّة من المقتفيات التقليدية، وتمثل الطريقة البيِّنة الوحيدة للتقييم المباشر في الزمن الحقيقي لمسارات نقل الرواسب. وطوَّرت فِرق بحثية في بلدان عدة تقنيات مختلفة لاقتفاء الرواسب ورصدها باستخدام المقتفيات الإشعاعية.

١٧٧- وإلى جانب المقتفيات الإشعاعية، يمكن أن توفر تقنيات المصادر المختومة معلومات عن كثافة الرواسب المترسبة في القنوات الملاحية أو أحواض الموانئ، وكذلك تركيز الرواسب العالقة.

١٧٨- وهناك مجالان نموذجيان ينطويان على مشاكل يمكن أن تسهم فيهما المقتفيات الإشعاعية وتقنيات المصادر المختومة إسهاماً مهماً: إدارة المناطق الساحلية التي هي عُرضة للتحاتّ والخطوط الساحلية التي تتعرض لتراجع بعيد الأمد، يترتب عليه في العادة فقدان الشاطئ؛ والتعامل مع الاختيار غير الملائم لمواقع المكبَّات لعمليات التجريف في الموانئ، الأمر الذي قد يتسبَّب بعودة المادة التي تم تفريغها إلى القناة التي تم تجريفها.

١٧٩- وثمة فوائد بيئية واقتصادية واجتماعية جمَّة من تطبيق المُقتفيات الإشعاعية وتقنيات المصادر المختومة على صعيد اقتفاء ورصد الرواسب، وعليهِ تسهِّل الوكالة نقل التكنولوجيا وتوفر التدريب للدول الأعضاء فيها في نطاق من تلك التقنيات.

١٨٠- واليوم أصبحت نمذّجة الديناميات الحسابية للموائع (النمذجة الهيدروديناميةٍ) أداة شائعة الاستخدام لإدارة النظم الطبيعية، وتُستخدَم على نحو متزايد لدراسة مصير وسلوكيات الجُسيمات والملوِّثات. وتُستخدم تقنيات المقتفيات الإشعاعية في العادة للتحقُّق من النماذج الهيدروديناميةٍ لتعزيز الثقة في القيمة التنبؤيَّة للنماذج. والاقتفاء التجريبي والنمذجة الرقمية أسلوبان متمِّمان لدراسة النظم المعقدة. وبيانات المقتفيات مبنيَّة على الملاحظة المباشرة، غير أنها تنحصر في الجزء الموسوم من النظام، وفي نطاق زماني مكاني مقيَّد. ومن الناحية النظرية يمكن أن تستوعب النماذج الرقمية جميع البارامترات المهمة، غير أن ما يقيِّدها الافتراضات المنطوية والقوى الحاسوبية المتاحة. ولكل نهج من النهجين المذكورين على حدة ما يقيِّده، لكنهما يوفران معاً أسلوباً قوياً جداً لاستقصاء النظم المعقدة. وخلال الأعوام القليلة الماضية ظهر جلياً أن الاستخدامات التآزرية للنمذجة ودراسات المقتفيات الإشعاعية في الميدان يمكن أن تسهم إسهاماً مهماً في معالجة مشكلات معقدة في النظم الطبيعية.

دال-٢- التكنولوجيات الإشعاعية لتطوير منتجات وعمليات 'خضراء'

١٨١- تسعى قطاعات صناعية مختلفة جاهدة لأن تصبح صديقة للبيئة بشكل أفضل من خلال إنتاج منتجات عالية الأداء على نحو أكبر وبطاقة مستهلَكة أقل. ولتقنيات المعالجة الإشعاعية سجّلٌ ناجح في المساهمة في تطوير منتجات وعمليات "خضراء" مبتكرة. ويركِّز هذا القسم الفرعي على المنتجات الجديدة المعالَجة إشعاعياً مثل المواد نانوية المقياس المجمَّعة إشعاعياً بأشكال وأحجام مختلفة (الجُسيمات الإشعاعية، والألياف النانوية، والمسامّ النانوية) التي من المتوقع استخدامها في تحضير مواد التغليف النشطة للأطعمة وكذلك تحضير مواد ضمادات الجروح، وأيضاً استخدامها كوسائل لإيصال العقاقير. وتمثل الشواغل بشأن تلوث البيئة الناجم عن المواد الكيميائية المستخدمة تقليدياً في صناعة التغليف والمعالجة الحافظة الدافع الأهم وراء الجهود المبذولة لتسخير إشعاع حُزم الأشعة الإلكترونية المنخفضة الطاقة من أجل تصنيع تلك المنتجات.

دال-٢-١- المواد المهندَسة إشعاعياً على المستوى النانوي

١٨٢- استهلال التفاعلات إشعاعياً (البلمرة، والربط المتصالب، وعملية التدهور الخاضعة للمراقبة، والتطعيم) أداة قوية لتجميع و/أو تعديل المواد على المستوى النانوي، لأن هذه الطريقة تمكِّن من خلق سمات جديدة عند أي درجة حرارة ودون المواد المضافة السامَّة أو المخلَّفات التي ستكون بحاجة إلى إزالتها لاحقاً بعناء وبتكلفة عالية. وتزداد أهمية هذه الميزة عندما يكون المنتَج مخصَّص للتطبيقات الطبية. يُضاف إلى ذلك أن مثل هذه المواد يمكن تحضيرها من المخلَّفات: على سبيل المثال، الأنابيب النانوية الكربونية أُنتجت بنجاح من حقائب بلاستيكية مهملة.

دال-٢-١-١- التطبيقات الطبية

١٨٣- أثمرت أوجه التقدُّم في مجال تحضير ومواءمة الجُسيمات النانوية عن نطاق من المنتجات التي يُمكن أن تُستخدم على نطاق واسع في مجال الرعاية الصحية والتي هناك طلب كبير عليها. وثمة العديد من الأنظمة النانومترية التي تم اقتراحها للتطبيقات الطبية، مثل النقاط الكمومية، والمجالات النانوية العضوية وغير العضوية، وجزيئات الديندريمر، والجسيمات الشحمية، والجُسيمات النانوية البوليمرية. وتتسم الهُلامات النانوية – شبكات بوليمرية ذات ربط متصالب بأبعاد نانوية المقياس – بمزايا فريدة من حيث الشكل المَرِن، والأسطح الكبيرة مع نقاط التقاء متعددة، والمساحة الداخلية أو الجيوب لحمل الأدوية التي يمكن إطلاقها استجابة لمحفزات معينة، وإمكانية الاستيعاب داخلياً باستخدام خلايا بشرية. وتم ابتكار التوليفة الإشعاعية لمثل هذه الهُلامات

النانوية في بولندا، وسرعان ما اعتمدَ هذه الطريقة العديد من الباحثين ببلدان حول العالم منها الأرجنتين وإيطاليا والبرازيل وتايلند وتركيا. ويمكن تحضير مثل هذه الهُلامات النانوية باستخدام بوليمرات طبيعية أو صناعية، وكذلك جزيئات بيولوجية مثل البروتينات والببتيدات. وتُستخدم الجُسيمات النانوية كناقلةٍ لحمولة دوائية محدَّدة تُطلق موضعياً لمحاربة أمراض مختلفة، وإلى جانب ذلك تُدمج في ضمادات الجروح لتسريع الشفاء ومحاربة العدوى. ويُستخدم بنجاح التحلُّل الإشعاعي الموجَّه في تحضير أغشية بوليمرية نانوية المسام، ويمكن أن يوظَّف أيضاً لتحضير أغشية يمكن أن تقوم بترشيح الجُزيئات البيولوجية المختلفة وفصلها عن بعضها البعض وذلك بطريقة انتقائية.

دال-٢-١-٢- مواد التغليف والتعبئة المتقدمة الخاصة بالأغذية

١٨٤- أظهرت دراسةٌ استقصائيةٌ أُجريت مؤخراً أن أولويات المستهلكين تشمل فترة صلاحية الأغذية وطزاجتها وجودتها.[٨] ولتلبية مثل تلك الحاجات يتم في الوقت الراهن تطوير أغلفة "نشطة" أو "ذكية". فعلى سبيل المثال، هناك الأغشية الرقيقة التي من سماتها العزل الفائق للغازات، الأمر يحُول دون دخول الأكسجين إلى أغلفة الأطعمة وأيضاً يحُول دون خروج الغازات الخاملة منها، وقد ثبت أن مثل هذه الأغشية الرقيقة فعَّالة في تمديد فترة صلاحية المنتَج دون فقدان طزاجته. ويمكن تصنيع أغشية رقيقة من هذا النوع بإدماج جُسيمات نانوية محدَّدة في الأغشية، بما يمكن أن يحتوي أيضاً على أنزيمات وعوامل مضادة للبكتيريا ومكونات أخرى تساعد في السيطرة على تحلُّل الأغذية وتلفها. وأُعِدَّت مواد التغليف النشطة بيولوجياً الخاصة بالأغذية في مصر من خلات السليلوز بإدماج جُسيمات نانوية فضية، فيما صُنع التغليف ذو الأكسجين المنقوص ونفاذية بخار الماء من بوليكابرولاكتون وأغشية كيتوزان مع إضافة أكسيد الغرافين. كذلك يعمل علماء مصريون على إنتاج حلول تغليف ذكية للمأكولات البحرية بإدماج ألياف نانوية في أغشية بوليكابرولاكتون. ويتغيَّر لون مثل هذا التغليف عند التفاعل مع البخار المنبعث من المأكولات البحرية الفاسدة، وبذلك بأنه يؤشر بوضوح إلى طزاجة الأطعمة من عدمها. وفي كندا، يُضاف السليلوز النانوي إلى التغليف المصَّنع من مواد عضوية المصدر من أجل تقويتها، ولجعل المادة طيِّعة لتعديلات كيميائية لاحقة بما يتلاءم مع احتياجات التغليف.

دال-٢-٢- المعالجة الإشعاعية

١٨٥- تبحث صناعة الطباعة والتغليف حول العالم عن إجراءات مأمونة بيئياً بشكل أفضل تستخدم مذيبات أقلّ أو لا مذيبات على الإطلاق لتجنُّب التلوث، وكذلك انتقال النواتج السامة المنحلَّة إلى السِّلع الاستهلاكية. ويُعَد توجيه المفوضية الأوروبية 2007/19/EC لعام ٢٠٠٧ – وهو التعديل الرابع على التوجيه 2002/72/EC، الذي يُشار إليه في العادة باسم "توجيه المواد البلاستيكية – الذي أرسى مستوى أقصى هو ١٠ أجزاء لكل مليار لانتقال المواد غير المصرَّح بها إلى الأغذية، من أمثلة التطورات التي حدث مؤخراً ودفعت صناعة التغليف إلى البحث عن تكنولوجيات جديدة. وكان الطلب المتزايد على عمليات مواد صديقة للبيئة يمكن أن تحلّ محلَّ المواد الضارة في طليعة العوامل التي كانت وراء ظهور استخدام معجِّلات حُزم الأشعة الإلكترونية المنخفضة الطاقة بطاقة تقلُّ عن ٣٠٠ كيلو الكترون فلط لصناعة التغليف. وباستخدام المونومرات والأوليغمرات القابلة للمعالجة الإشعاعية في الأغلفة والأحبار والمواد اللاصقة والتي تتبلمر وتترابط تصالبياً فإننا نتجنَّب استخدام مركبات عضوية متقلبة للمعالجة، الأمر الذي يمكِّن صناعة التغليف والصناعات ذات الصلة من الامتثال لمتطلبات الهواء النظيف من خلال تحقيق انبعاثات أقل بشكل كبير من ملوثات الهواء السامة خلال الإنتاج، وتحقيق مستويات أقل

[٨] برنامج عمل المخلَّفات والموارد، مواقف المستهلكين إزاء فضلات الطعام وتغليف الأغذية، بانبيري (٢٠١٣).

بكثير من المواد الكيميائية السامة في المنتَج. وفضلاً عن هذه المزايا فإن المنتجات والعمليات المعالجة بالأشعة الإلكترونية توفر الطاقة والمساحة، وتزيد في الوقت نفسه الجودة والإنتاجية.

١٨٦- ويستلزم التطبيق الأوسع نطاقاً لتكنولوجيا المعالجة الإشعاعية في صناعَتي الطباعة والتغليف تطويرات مستمرة في تكنولوجيا المعجِّلات من أجل جعل استخدام تكنولوجيا الحُزم الإلكترونية مجدياً تجارياً على النطاق الصناعي. ومؤخراً طُوِّر جيل جديد من باعثات الحُزم الإلكترونية والتي تتسم بأنها مضغوطة الحجم إلى حد بعيد وسهلة التشغيل وبنطاق فلطية متسارع من ٨٠ إلى ٢٠٠ كيلوفلط وبعرض معالجة يصل إلى ٦٠ سم، الأمر الذي يمكِّن تعزيز استخدام هذه التكنولوجيا أكثر فأكثر لأنها ستتيح تطوير منتجات وعمليات جديدة والارتقاء بها والاستمرار في تطويرها على امتداد نطاق عريض من التطبيقات، مثل المعالجة وتطوير المواد من خلال الربط المتصالب.

هاء- أوجه التقدم في تكنولوجيا التصوير الطبي

١٨٧- تتيح أوجه التقدُّم في تكنولوجيا التصوير الطبي لتقييم تركيب الجسم إجراء تقديرات كمية لبارامتراتٍ مثل الكتلة الدهنية، والكتلة الخالية من الدهون، والكثافة المعدنية للعظام، وكذلك كتل أعضاء وأنسجة محددة، مثل الكتلة الشحمية والعضلية والحشوية. ويُستعان بتقييم تكوين الجسم في عدد من التطبيقات، بدءاً من مراقبة اللياقة ووصولاً إلى حالة الأمراض وإدارة مخاطرها. وثمة أدلة متزايدة على أن المكونات الفردية لتركيب الجسم تؤثر تأثيراً كبيراً في خطر الإصابة بالأمراض المزمنة، وتطور المرض، والاستجابة العلاجية، والنواتج الصحية. ومن هذا المنطلق هناك اهتمام كبير في التطوير المستمر لأدوات تقييم تركيب الجسم ونماذج تقييم المخاطر للتنبؤ بالنواتج السلبية. وفي الوقت الراهن هناك ثلاثة طرائق للتصوير تُستخدم على نطاق واسع لتقييم تركيب الجسم: قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة، والتصوير المقطعي الحاسوبي الكمي، والتصوير بالرنين المغناطيسي.

هاء-١- أوجه التقدم الحديثة في تكنولوجيا التصوير لأغراض تقييم تركيب الجسم

هاء-١-١- تركيب الجسم كمؤشر على الصحة

١٨٨- ارتفعت معدلات انتشار زيادة الوزن والسمنة حول العالم وبلغت معدلات مقلقة خلال بضعة العقود الماضية. وحسب تقديرات منظمة الصحة العالمية فإن هناك قرابة ٢ مليار بالغ مصاب بزيادة الوزن حول العالم، من بينهم أكثر من ٦٠٠ مليون شخص مصاب بالبدانة، وهو الرقم الذي تضاعف منذ عام ١٩٨٠.[٩] ومنذئذ بلغت هذه الحالات المرضيَّة الأيضية مستويات وبائية بين الكبار والصغار على السواء. وثمة صلة مباشرة بين السمنة والعديد من الأمراض المزمنة مثل السكري البولي، والأمراض القلبية الوعائية، والفُصال العظمي، والسرطان، وتؤثر تلك الأمراض تأثيراً شديداً في جودة حياة الإنسان ومتوسط عمره. ومن المتوقع أن تتضاعف التكلفة الاقتصادية لزيادة الوزن والسمنة مرة كل عشر سنوات، وأن تتسبب في زيادة كبيرة في إجمالي الإنفاق على الرعاية الصحية.

---

[٩] منظمة الصحة العالمية، السمنة وزيادة الوزن، صحيفة وقائع رقم ٣١١، http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/ar، تم التحديث في كانون الثاني/يناير ٢٠١٥.

١٨٩- وثمة تركيز كبير على الأدوات المتاحة لتقييم المخاطر الصحية المرتبطة بالسمنة. وهذه في معظمها طرائق غير طرائق التصوير وهي غير مكلفة وسهلة الاستعمال، من بينها طرائق الحصول على مؤشرات السمنة بالاستناد إلى توليفات مختلفة تجمع بين الطول والوزن، مثل مؤشر كتلة الجسم، ومؤشر شكل الجسم، ومؤشر استدارة الجسم، ومؤشرات القياسات البشرية للسمنة، مثل محيط الخصر ومعدل الخصر-إلى-الورك. لكن من أجل توضيح الآليات السببية الكامنة بين تركيب الجسم والمرض لا استغناء في العادة عن مقاييس الجسم الأكثر تعقيداً. وعلى سبيل المثال، تصنّف منظمة الصحة العالمية زيادة الوزن والبدانة بالاعتماد على مؤشر كتلة الجسم، غير أن هذا التدبير لا يجمع المعلومات المتعلقة بالكمية النسبية للأنسجة الدهنية والأنسجة النحيلة، مثلما لا يقدِّم معلومات عن توزيع الدهون في أنحاء الجسم، وقد تبيَّن أن هذين الأمرين مرتبطان على نحو مستقل بالمتلازمة الأيضية. والخطوة اللاحقة في قياس تركيب الجسم تتمثل في استخدام طرائق قادرة على قياس حيِّز الجسم ككل من الكتلة الدهنية والكتلة غير الدهنية، مثل تحليل المقاومة الكهروحيوية وتخطيط التحجُّم بإزاحة الهواء. غير أن هذه غير قادرة على عزل حيِّزات الأنسجة الفردية. وهناك تكون طرائق التصوير ثنائية الأبعاد وثلاثية الأبعاد ضرورية من أجل تقسيم الجسم تقسيماً فرعياً إلى أنواع الأنسجة والمناطق المكانية، واستقصاء الصلة بالمرض والحالة المرضيَّة والوفاة. ويُستخدم قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة، والتصوير المقطعي الحاسوبي الكمي، والتصوير بالرنين المغناطيسي على نطاق واسع حول العالم من أجل الحصول على تقييم مفصَّل لتركيب الجسم. وفي الآونة الأخيرة، ظهر المسح السطحي البصري ثلاثي الأبعاد كأداة جديدة لتحليل تركيب الجسم.[١٠]

هاء-١-٢- أوجه التقدم في مجال قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة

١٩٠- يمثل قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة طريقة عالية الصحة والدقة لقياس الكثافة المعدنية للعظام، وكتلة العظام، والكتلة الدهنية، وكتلة الأنسجة الرَّخْوة غير الدهنية، ونسبة الدهون. وتشمل هذه الطريقة التصوير المتزامن عند مستويي طاقة أشعة سينية مختلفين. وبالاستفادة من سمات التوهين الفريدة لكل نوع من أنواع الأنسجة المختلفة، يُستخدم مسح قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة لحساب صفات الكثافة المساحية من الصور ثنائية الأبعاد. وفي نماذج قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة فإن الكثافة المعدنية للعظام هي الكتلة المعدنية للعظام مقسومة على مساحة العظم المعروضة بقياس غرام/سم^{٢}. وأما الكتلة الدهنية فهي الكتلة الشحمية (الشحوم الثلاثية والأغشية الشحمية الفسفورية ... إلخ) حيث أن لجميع الشحوم سمات توهين أشعة سينية متشابهة. وحتى وقت قريب لم تكن قياسات الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة تميِّز بين أنواع الأنسجة مثل الجلد والعظم والكبد والأنسجة تحت الجلدية والأنسجة الشحمية الحشوية (النسيج الشحمي تحت الجلدي البطني والنسيج الشحمي تحت الجلدي الحشوي) ومازال الأمر كذلك في معظم الأحوال، غير أن النسيج الشحمي تحت الجلدي البطني والنسيج الشحمي تحت الجلدي الحشوي يحدَّدان لمنطقة أسفل البطن باستخدام خوارزمية تقدير متخصصة. علاوة على ذلك، ظهر أن قياس محتوى الحديد في الكبد باستخدام قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة دقيق مقارنةً بالمعايير المرجعية.[١١] يُظهر الشكل هاء-١ تقريراً نمطياً لقياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة.

---

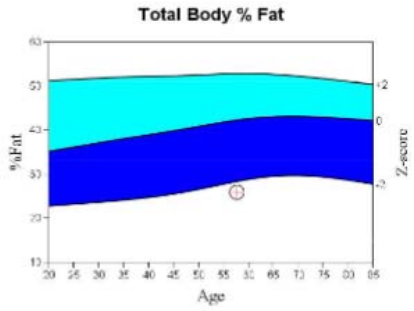
[10] LEE, S.Y., GALLAGHER, D., Assessment methods in human body composition, Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care **11** (2008) 566–572.

[11] SHEPHERD, J.A., et al., Dual-energy X-ray absorptiometry with serum ferritin predicts liver iron concentration and changes in concentration better than ferritin alone, J. Clin. Densitom. **13** (2010) 399–406.

HOLOGIC TEST
4776 S W 8TH Street
Bedford, MA 01730

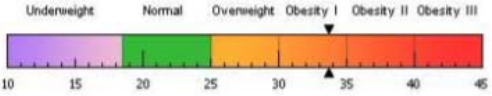
Telephone: 781-999-7300 Fax: 781-260-0671

Name: sample, patient	Sex: Female	Height: 54.0 in
Patient ID: 987654	Ethnicity: White	Weight: 140.0 lb
DOB: February 13, 1957	Menopause Age: 50	Age: 57



Source: 2008 NHANES White Female

World Health Organization Body Mass Index Classification
BMI = 33.8 WHO Classification Obesity I



BMI has some limitations and an actual diagnosis of overweight or obesity should be made by a health professional. Obesity is associated with heart disease, certain types of cancer, type 2 diabetes, and other health risks. The higher a person's BMI is above 25, the greater their weight-related risks.

Body Composition Results

Region	Fat Mass (g)	Lean + BMC (g)	Total Mass (g)	% Fat	%Fat Percentile YN	%Fat Percentile AM
L Arm	984	2066	3050	32.3	20	5
R Arm	1094	2123	3217	34.0	28	8
Trunk	6750	20123	26874	25.1	20	4
L Leg	2354	7055	9409	25.0	1	1
R Leg	2525	7258	9783	25.8	1	1
Subtotal	13707	38625	52333	26.2	7	1
Head	886	3091	3978	22.3		
Total	**14593**	**41717**	**56310**	**25.9**	**7**	**1**
Android (A)	1119	2853	3972	28.2		
Gynoid (G)	2626	6327	8953	29.3		

Scan Date: October 16, 2014 ID: A10161401
Scan Type: a Whole Body
Analysis: October 16, 2014 15:28 Version 13.5.1
Auto Whole Body Fan Beam
Operator: mkl
Model: QDR Workstation (S/N 061263)
Comment:

Adipose Indices

Measure	Result	Percentile YN	Percentile AM
Total Body % Fat	**25.9**	**7**	**1**
Fat Mass/Height² (kg/m²)	7.76	37	13
Android/Gynoid Ratio	0.96		
% Fat Trunk/% Fat Legs	0.99	88	70
Trunk/Limb Fat Mass Ratio	0.97	78	47
Est. VAT Mass (g)	145		
Est. VAT Volume (cm³)	156		
Est. VAT Area (cm²)	30.0		

Lean Indices

Measure	Result	Percentile YN	Percentile AM
Lean/Height² (kg/m²)	20.9	97	96
Appen. Lean/Height² (kg/m²)	9.21	97	96

Est. VAT = Estimated Visceral Adipose Tissue
YN = Young Normal
AM = Age Matched

TBAR1058 - NHANES BCA calibration

HOLOGIC®

الشكل هاء-١ - يظهر هنا تقرير نمطي عن تركيب الجسم من جهاز قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة من "هولوجيك" وتُعَدُّ تقارير تبيِّن نتائج تركيب الجسم لمناطق فرعية منه، تشمل الذراعين والساقين والبدن. وتشمل أوجه التقدم الحديثة إعداد تقارير عن منطقة النسيج الشحمي تحت الجلدي الحشوي، والكمية والكتلة في أسفل البطن، وكذلك مؤشرات غير دهنية عدة أخرى، بما في ذلك مؤشر الكتلة غير الدهنية الزائدية. (الصورة مهداة من هولوجيك)

١٩١- وتكون الجرعة الإشعاعية في قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة متدنية جداً، مقارنة بالجرعة المتأتية من يوم واحد من الإشعاعات الخلفية (~٨ ميكروسيفرت) غير أن وجود تكنولوجيين مدرَّبين تدريباً ملائماً يجعل دقة الاختبارات والاختبارات المعادة لقياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة مرتفعة جداً. ١,٠٪ معامل الانحراف أو أفضل لنسبة دهون الجسم لعمليات المسح المعادة للفرد ذاته.[١٢،١٣] وإلى جانب كامل الجسم، يمكن أن يكشف قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة عن الدهون، والأنسجة الرَّخْوَة غير الدهنية، وحيِّزات الكتلة المعدنية للعظام للمناطق الفرعية التشريحية مثل الذراعين والساقين والبدن. وهذا أمرٌ لا يمكن تحقيقه بأساليب غير التصوير أكثر بساطة (تحليل المقاومة الكهروحيوية، تحليل التحجُّم بإزاحة الهواء، إلخ). غير أن هناك قيود تحدُّ من قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة. أولها أن النموذج ثلاثي النطاقات لا يعزل بشكل واضح الماء عن الكتلة البروتونية الوظيفية غير الدهنية. رغم أن افتراضات الإماهة لا تُستخدم بشكل واضح من جانب قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة لتفسير كُتل تركيب الجسم، غير أن التغيرات في حالة الإماطة تُفسَّر على أنها تغيُّر في كتلة الأنسجة غير الدهنية. وحيث أن الشحوم أيضاً تحتوي على نحو ١٥٪ ماء حسب الوزن، فإن رصد التغيُّر في الكتلة العضلية قد يشوبه ارتباكٌ في حال تغيَّرت الشحومة أيضاً. قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة طريقة تصوير متخصصة لا تتوافر في العادة على نُظم الأشعة السينية المخصصة للاستخدام العام بسبب الحاجة إلى تصفية حُزمية خاصة وتسجيل مكاني شبه مثالي لمعيارَي التهوين.

١٩٢- ويُستخدم قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة على نطاق أوسع للتجارب الإكلينيكية بشكل يفوق أساليب تقييم تركيب الجسم الأخرى. فهو ذو جرعة متدنية مقارنة بالتصوير المقطعي الحاسوبي لكامل الجسم، وهو غير مكلف مقارنة بالتصوير بالرنين المغناطيسي. وقياسات نسبة دهون الجسم من قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة مترابطة على نحو كبير مع تلك المأخوذة من التصوير المقطعي الحاسوبي والتصوير بالرنين المغناطيسي (أكبر من ٠,٩٩)[١٤]، غير أنها أكثر دقة. وتتراوح مدة المسح لكامل الجسم من ٣ إلى ١٠ دقائق إذ يعتمد ذلك على طراز الماسحة وحجم المريض. نُظم قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة من ذات النوع والطراز يمكن بسهولة إجراء معايرة متطابقة عليها في الميدان باستخدام مواد مكافئة للنسيج معيارية ذات مقايَسَة حيوية مثل حَمْض الستياريك والماء. وأما المعايرة المتطابقة بين الأنواع المختلفة فيمكن إجراؤها في الوقت الراهن فقط باستخدام معادلات المعيارية لإبعاد التحيُّز النظامي. وباستخدام توليفة من المواد المكافئة للنسيج ومعادلات المعيارية يصبح تجميع البيانات على امتداد المركز الإكلينيكية أمراً ممكناً. وأخيراً تم الاضطلاع بجهود موسَّعة لتقديم عينات تمثيلية لكل بلد بعينه عن الصحة الأيضية والتغذية، بما في ذلك "استقصاء الصحة الوطنية وفحص التغذية" في الولايات المتحدة الأمريكية، و"استقصاء الصحة الوطنية وفحص التغذية- كوريا" في جمهورية كوريا.

---

[12] POWERS, C., FAN, B., BORRUD, L.G., LOOKER, A.C., SHEPHERD, J.A., Long-term precision of dual-energy X-ray absorptiometry body composition measurements and association with their covariates, J. Clin. Densitom. **18** (2013).

[13] TOOMBS, R.J., DUCHER, G., SHEPHERD, J.A., DE SOUZA, M.J., The impact of recent technological advances on the trueness and precision of DXA to assess body composition, Obesity **20** (2012) 30–39.

[14] KULLBERG, J., et al., Whole-body adipose tissue analysis: comparison of MRI, CT and dual energy X-ray absorptiometry, Br. J. Radiol. **82** (2009) 123–130.

هاء-١-٢-١- مناطق خاصة مهمة في قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة

١٩٣- منذ بداية قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة، كانت المناطق الفرعية المحدَّدة على مسح كامل الجسم هي الذراعان والساقان والبدن والرأس لأغراض إعداد تقرير عن الأنسجة الرَّخْوَة. لكن شهدت الأعوام القليلة الماضية جهوداً تدريجية لإعداد تقارير عن مناطق خاصة تتجاوز تلك المناطق التشريحية من الجسم. وباستطاعة نُظم قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة أن تقدِّر الدهون الشحمية الحشوية كمنطقة مقطعية عرضية أو كمساحة أنسجة.[١٥،١٦] وتُحسب تقديرات النسيج الشحمي تحت الجلدي الحشوي بطرح التقديرات الخاصة بالدهون تحت الجلدية التي تعلوها. والارتباط بين قياسات النسيج الشحمي تحت الجلدي الحشوي المأخوذة من نظام قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة وتلك المأخوذة من التصوير المقطعي الحاسوبي مرتفع جداً (أكبر من ٠,٩٠).

هاء-١-٢-٢- مَسْح المرضى البدناء بنظام قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة (DXA)

١٩٤- مَسْح المرضى البدناء بالاستعانة بنظام قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة (DXA) لم يكن بالأمر الهيِّن في السابق بسبب حدود الوزن التي تقبلها الماسحة وأبعاد الطاولة. غير أن حدود الوزن لطاولات الماسحات التي تعمل بنظام قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة زيدت مؤخراً إلى ٢٢٧ كغ في بعض الطرازات. كما تتوافر طرازات ماسحات متخصِّصة بجرعة أعلى قليلاً مخصصة للمرضى البدناء. وفي الحالات التي يصعب فيها وضع المريض البدين ضمن منطقة المسح، يمكن الاستعانة ببروتوكولي التحليل "المسح النصفي" أو "المسح الانعكاسي" مع وضعية معاوضة أفقية للمريض على الطاولة. ومن ثم يُقدَّر تكوين الذراع أو الساق الخارجة عن حدود الطاولة بالاستعانة بالطرف المقابل الذي تم مسحه بشكل كامل.

١٩٥- وهناك أهمية قُصوى لمراعاة الجودة خلال عملية المسح والتحليل والتفسير من أجل تحقيق نتائج دقيقة عن تركيب الجسم. وتتوافر اليوم تجارياً نماذج مصمَّمة خصيصاً لرصد معايَرة أنظمة قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة. وتُستخدم هذه النماذج لتصويبات المعايَرة الطولية والمعايَرة المتصالبة فيما بين النظم المتشابهة. بَيْدَ أنه لم يتبيَّن أن أياً من النماذج التي طُوِّرت حتى هذا اليوم ملائم للمعايَرة المتصالبة فيما بين النظم من أنواع أو طرازات مختلفة.

---

[15] MICKLESFIELD, L.K., GOEDECKE, J.H., PUNYANITYA, M., WILSON, K.E., KELLY, T.L., Dual-energy X-ray performs as well as clinical computed tomography for the measurement of visceral fat, Obesity **20** (2012) 1109–1114.

[16] KAUL, S., et al., Dual-energy X-ray absorptiometry for quantification of visceral fat, Obesity **20** (2012) 1313–1318.

هاء-١-٣- أوجه التقدم في مجالي التصوير المقطعي الحاسوبي الكمي والتصوير بالرنين المغنطيسي

١٩٦- هنالك حاجة إلى أسلوب تصوير ثلاثي الأبعاد في حال يكون من الضروري توافر بيانات بشأن تركيب عضو ما أو حجمه بصرف النظر عن النسيج المحيط به. والتصوير المقطعي الحاسوبي والتصوير بالرنين المغنطيسي هما من الوسائل الشائعة المتاحة إكلينيكيًا التي بإمكانها عزل الأعضاء مثل العضلات الفردية والقلب والدماغ والكبد وما إلى ذلك. ويتم عزل الأعضاء، شريحة بعد الأخرى عبر الجسم، انطلاقًا من الأنسجة المحيطة بها. وتتمثل القيود الرئيسية للتصوير المقطعي الحاسوبي والتصوير بالرنين المغنطيسي في قلة فرص الوصول إليها في المناطق المنخفضة الموارد، وارتفاع تكاليفها مقارنة بغيرها من الوسائل، وفي تعرض المرضى إلى جرعات كبيرة في حالة التصوير المقطعي الحاسوبي. ومع ذلك، بإمكان النظم الإكلينيكية القادرة على مسح كامل الجسم مسح أي جزء من الجسم واستيعاب طائفة واسعة من أحجام الجسم. وبالإمكان القيام بقياس كمي للأنسجة الدهنية والعضلية باستخدام عدة تقنيات بما في ذلك قياس الامتصاص (التصوير المقطعي الحاسوبي)، أو نمط التشبع (التصوير بالرنين المغنطيسي) أو تجزئة الأنسجة (التصوير المقطعي الحاسوبي والتصوير بالرنين المغنطيسي).

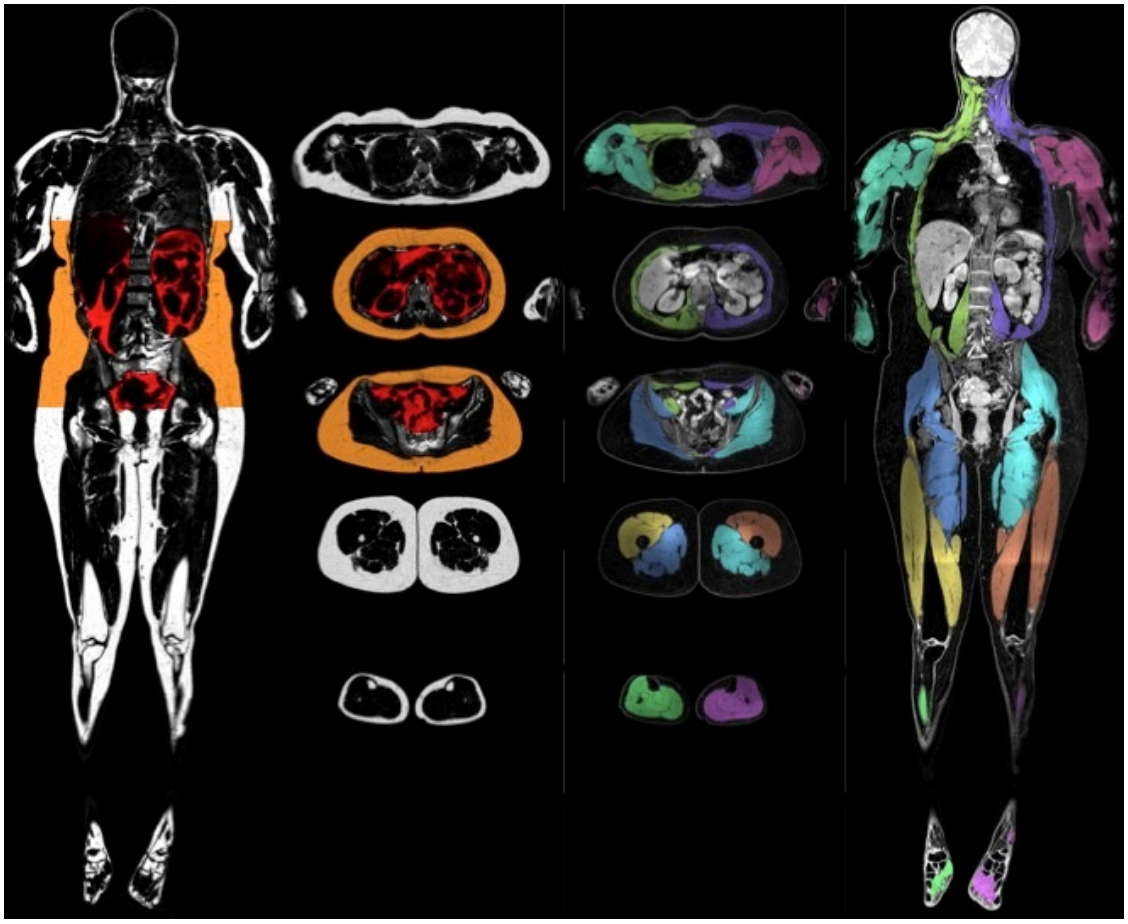
١٩٧- ويُعدّ التصوير المقطعي الحاسوبي التقنية الرائدة لدراسة ترسبات دهنية موضعية محددة. ويتمثل التطبيق البحثي الأكثر شيوعًا لتقييم تركيب الجسم في القياس الكمي للدهون تحت الجلدية والحشوية والكبدية. ودقة التصوير المقطعي الحاسوبي في التنبؤ بمستويات الدهون الحشوية وإجمالي دهون البطن جيدة جداً. وإمكانية استنساخ هذه التقنية هي الأخرى ممتازة، بنسبة تباين <١٪ بين القياسات المتكررة.

١٩٨- وبالنسبة إلى الدراسات المتعلقة بالكبار، فإن تقنية التصوير المقطعي الحاسوبي هي التقنية المفضلة لأسباب تتعلق بالسرعة، وبتوافر وسهولة تنفيذ البروتوكولات والتحليل عبر المسح. كما تتم مُعايرة التصوير المقطعي الحاسوبي إلى معايير تهوين مطلقة. وبالنسبة إلى الدراسات المتعلقة بالصغار والمراهقين التي تكون فيها الاعتبارات المتصلة بالجرعات مهمة، يُفضل استخدام تقنية التصوير بالرنين المغنطيسي.[١٧] ولقد تم في الآونة الأخيرة إثبات خوارزميات متطورة تستخدم لتحليل التجزؤ الآلي لعمليات مسح كامل الجسم بالتصوير بالرنين المغنطيسي[١٨] وتم اعتمادها من قبل العديد من الشركات. ويرد في الشكل هاء-٢ مثال عن ذلك. ولقد تم الحصول على المسح بالتصوير بالرنين المغنطيسي الوارد في هذا الشكل في أقل من ١٠ دقائق وذلك باستخدام بروتوكول مسح ديكسون ذي ثلاث نقاط (الدهن والماء مفصولان) وهو يُظهر تجزئة ملونة لجميع مجموعات العضلات الرئيسة، والدهون الحشوية، والدهون تحت الجلدية. ويسمح هذا الأمر بتقديم تقارير بشأن أحجام الأعضاء، والكتلة المائية والكتلة الدهنية.

---

[17] OWENS, S., et al., Visceral adipose tissue and cardiovascular risk factors in obese children, J. Pediatr. **133** (1998) 41–45.

[18] KARLSSON, A., et al., Automatic and quantitative assessment of regional muscle volume by multi-atlas segmentation using whole-body water–fat MRI, J. Magn. Reson. Imaging **41** (2015) 1558–1569.



الشكل هاء-٢ . مثال على تجزؤ آلي لصورة تم الحصول عليها عن طريق التصوير بالرنين المغنطيسي باستخدام كلٍّ من صورتي الدهون-وحدها (يسارًا) والماء-وحده (يمينًا) اللتين تم الحصول عليهما بالتصوير بالرنين المغنطيسي. ويُرمز إلى النسيج الشحمي تحت الجلدي البطني والنسيج الشحمي تحت الجلدي الحشوي، على التوالي، باللون البرتقالي واللون الأحمر وهما متطابقان مع صورة الدهون-وحدها. وتمت مطابقة عشر مجموعات عضلات رئيسية يُرمز إليها بألوان مختلفة مع صورة الدهون-وحدها. ولقد تم إجراء التجزئة تلقائياً. واستغرقت عملية الحصول على صورة كامل-الجسم ست دقائق. (الصورة مهداة من أولوف دالكفيست لاينهارد، جامعة لينشوبينغ، السويد.)

هاء-١-٤- التكنولوجيات الناشئة: مسح سطح كامل الجسم الثنائي والثلاثي الأبعاد

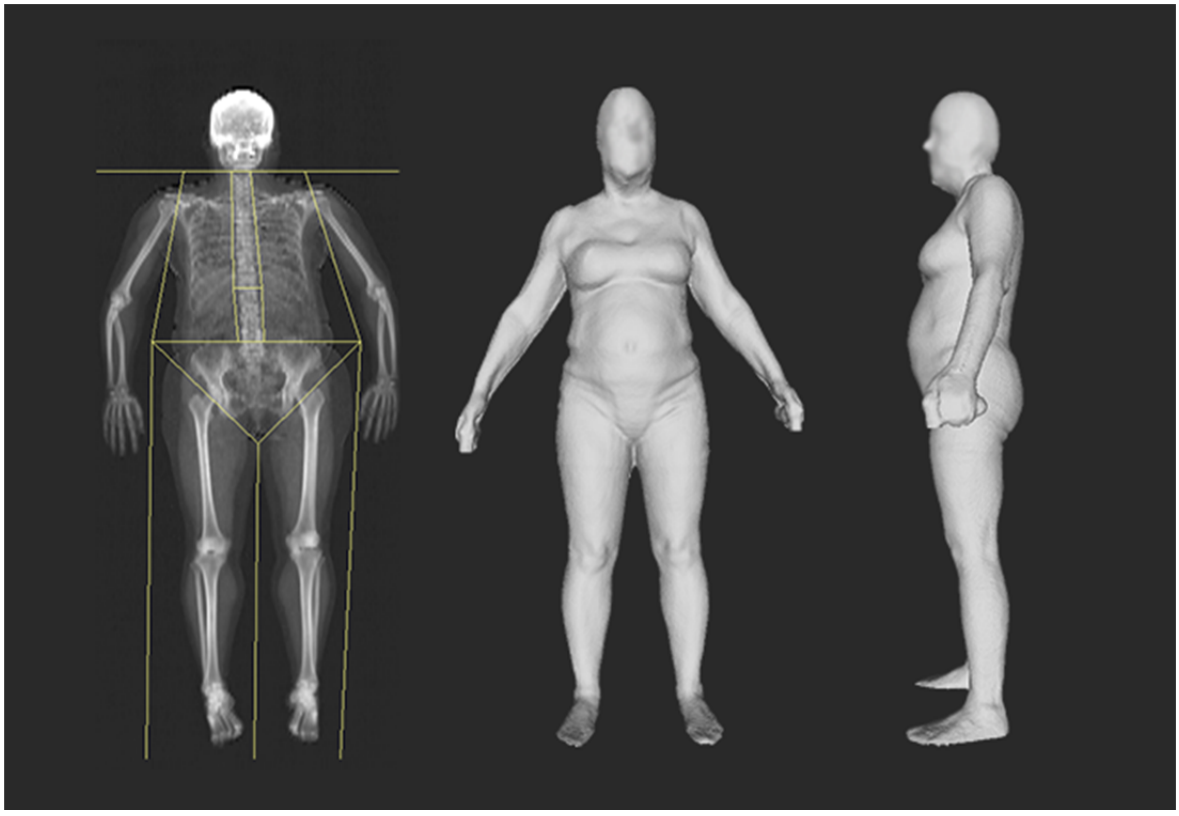
١٩٩- لطالما استخدم شكل الجسم بمثابة مؤشر على الصحة. كما أن محيط الخصر ومعدل الخصر-إلى-الورك مستخدمان على نطاق واسع لهذا الغرض. وبالإضافة إلى ذلك، فإن العضالة أو الشحومة المرتفعتين تظهران بوضوح حتى للمراقب العادي. وفي الآونة الأخيرة، تم اقتراح نظم مسح سطح كامل الجسم الثنائي والثلاثي الأبعاد باعتبارها منصات جديدة لتقييم تركيب الجسم. وسهولة الوصول إلى هذه الطرائق، وانخفاض تكلفتها وثراء ما تقدمه من بيانات للمناطق، عوامل تجعل منها خيارات استثنائية لتقييم تركيب مناطق الجسم.

٢٠٠- ويتم الحصول على قياسات ثنائية الأبعاد لشكل الجسم باستخدام كاميرا رقمية معيارية. وقد تم مؤخرًا إثبات الكيفية التي يمكن بها استخلاص مؤشر كتلة الدهون ومؤشر الكتلة الخالية من الدهون من خلال صور ظلية بسيطة لكامل الجسم.[19] ويمكن التقاط هذه الصور الظلية باستخدام الكاميرات التقليدية من قبيل تلك

[19] XIE, B., et al., Accurate body composition measures from whole-body silhouettes, Med. Phys. **42** (2015) 4668–4677.

الموجودة في الهواتف المحمولة بما يجعل قياسات تركيب الجسم البصرية الثنائية الأبعاد مناسبة جداً لمجموعة متنوعة من التطبيقات الميدانية. وتقدم أجهزة المسح السطحي الثلاثي الأبعاد وما يصاحبها من خوارزميات لمعالجة المسح حلاً سريعاً، وغير اقتحامي وقابلاً للتوسع لأغراض قياس شكل الجسم. ولقد تبيَّن أن القياسات التي يتم الحصول عليها باستخدام أجهزة المسح السطحي الثلاثي الأبعاد عاليةُ الدقة. وبإمكان خوارزميات المسح الحالية استخلاص أكثر من ٤٠٠ قياس من قياسات الطول والمساحة والحجم انطلاقاً من مسح لكامل الجسم.

٢٠١- ولقد تبين مؤخراً أنه يمكن استخدام قياسات المناطق للحجم والطول المستخلصة بواسطة جهاز مسح سطحي ثلاثي الأبعاد منظم الإضاءة مجهز بثماني كاميرات للتنبؤ على نحو دقيق بقياسات تكوين الجسم المستخلصة من خلال قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة.[٢٠] ويرد في الشكل هاء-٣ مثال عن مطابقة لمسح سطحي ثلاثي الأبعاد ومسح سطحي من خلال قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة. وتم استخدام قياسات مناطق عديدة ثلاثية الأبعاد لأحجام وعمق الجسم للتنبؤ بالنسبة المئوية للكتلة الدهنية ولدهون الجسم في الجسم كله ($R2$ = ٠,٩٥ و٠,٨٩، على التوالي)، وكذلك في المناطق الفرعية حول البطن، والفخذين، والجذع والساقين. ومع ذلك، هنالك حاجة إلى مزيد من التحقق من صحة الطرق المرجعية (قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة وتخفيف النظائر).



الشكل هاء-٣- مطابقة مسح بقياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة لكامل-الجسم (يسارًا) مع مسح سطحي بصري ثلاثي الأبعاد، مبينة في العرضين الإكليلي (وسطًا) والسهمي (يمينًا). ويمكن استخدام قياسات شكل الجسم المستخلصة من عمليات المسح السطحي الثلاثي الأبعاد، مثل عرض الجذع وعمقه وكذلك أحجام مناطق الساقين والجذع، للحصول على تقديرات دقيقة لتركيب الجسم المستخلص من قياس الامتصاص بالأشعة السينية المزدوجة الطاقة بالنسبة للأجسام البدينة والنحيلة. (الصورة مهداة من ج.أ. شيبرد، جامعة كاليفورنيا، سان فرانسيسكو، الولايات المتحدة الأمريكية.)

[20] LEE, J.J., FREELAND-GRAVES, J.H., PEPPER, M.R., YU, W., XU, B., Efficacy of thigh volume ratios assessed via stereovision body imaging as a predictor of visceral adipose tissue measured by magnetic resonance imaging, Am. J. Human Biol. **27** (2015) 445–457.

٢٠٢- وبالإضافة إلى الحصول على تقديرات دقيقة لتركيب الجسم، يمكن استخدام أجهزة المسح الثلاثي الأبعاد لسطح الجسم للحصول على قياسات عدة أخرى مجدية إكلينيكياً. ويشمل ذلك القياسات المباشرة من قبيل محيط الخصر وكذلك المؤشرات المستخلصة البسيطة مثل نسبة الخصر-إلى-الورك ونسبة الخصر-إلى-الطول. وتمثل أجهزة المسح هذه الأسلوب الأسهل منالاً للقياس المباشر لمنطقة سطح الجسم. وبالمثل، فإن هذه الوسيلة هي الأداة الأنسب لقياس حجم المناطق، ويمكن استخدامها لحساب نسبة الجذع إلى الساق — وهو قياس تبين أنه يمثل عامل خطر كبير بالنسبة إلى مرض السكري، وارتفاع ضغط الدم، والمتلازمة الأيضية والوفيات.[٢١]

واو- الاستخدام المتكامل للأساليب الإشعاعية والجينية والمستندة للكائنات المعايِشة من أجل مكافحة البعوض الناقل للأمراض

واو-١- البعوض والأمراض التي ينقلها البعوض

٢٠٣- تمثل الأمراض التي ينقلها البعوض تهديدا عالميا للصحة والرفاه البشريين. وينقل البعوض من نوع *Anopheles* (الشكل واو-١) الملاريا التي تتسبب في أكثر من ٦٠٠٠٠٠ حالة وفاة سنوياً، في حين أن بعوض Aedine من نوعي *Aedes aegypti* و*Aedes albopictus* ينقل أمراضاً مثل الحمى الدنجية، التي تشكل تهديداً لأكثر من ٢,٥ مليار شخص في أكثر من ١٠٠ بلد.[٢٢] وفي السنوات الأخيرة، أخذت الأمراض العديدة التي ينقلها البعوض تنتشر في مناطق لم تصلها العدوى سابقاً، لا سيما الأمراض التي ينقلها بعوض *Aedes albopictus* الغازي بدرجة عالية.

الشكل واو-١ - أنثى بعوض Anopheles arabiensis المتغذية بالدم
(الصورة من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

[21] WILSON, J.P., KANAYA, A.M., FAN, B., SHEPHERD, J.A., Ratio of trunk to leg volume as a new body shape metric for diabetes and mortality, PLoS One **8** 7 (2013).

[22] WORLD HEALTH ORGANIZATION, Vector-borne diseases, Factsheet No. 387, WHO, Geneva (2014).

٢٠٤- ويمكن معالجة الملاريا باستخدام العلاج الكيميائي، على سبيل المثال من خلال عقاقير الأرتيميسينين الذي نال مطوِّرها بشكل مشترك جائزة نوبل للطب لعام ٢٠١٥[٢٣]. وإلى حد الآن، لا يوجد لقاح لمكافحة حمّى تشيكونغونيا، أو الحمى الدنجية، أو الفيروس زيكا الذي ظهر حديثاً، كما أن استخدام العقاقير المضادة للفيروسات غير فعال تماماً. لذا من الضروري مكافحة البعوض الناقل للأمراض بغية الحد من عبء الأمراض، وهو ما تجري محاولة القيام به حالياً، بالأساس من خلال تطبيق المواد المعالَجة بالمبيدات الحشرية ورش المبيدات ذات الأثر الباقي في الأماكن المغلقة، واستخدام مبيدات اليرقات.

٢٠٥- وكما تقر منظمة الصحة العالمية، هنالك ضرورة ملحة إلى إيجاد أساليب إضافية لمكافحة البعوض نظرا إلى أن المكاسب التي تحققت في هذا المجال حتى الآن مهددة بسبب عدم الاستقرار في توافر الموارد ومقاومة البعوض المتزايدة للأدوات المتاحة والتغيرات التي تطرأ على سلوك البعوض الناقل، وجميع هذه العوامل تجعل استهداف البعوض أكثر صعوبة. وتمثل تقنية الحشرة العقيمة أحد الأساليب الإضافية الواعدة، ويمكن دمج هذه التقنية مع أساليب المكافحة الأخرى لكبح تجمعات البعوض على نحو فعال.[٢٤]

واو-٢- تقنية الحشرة العقيمة باعتبارها أداة لمكافحة تجمعات البعوض

واو-٢-١- تطوير تقنية الحشرة العقيمة لاستخدامها في مكافحة البعوض

٢٠٦- خلال العقد الماضي، تم إحراز تقدم كبير في تطوير 'مجموعة أدوات تقنية الحشرة العقيمة' التي تخص أربعة أنواع من البعوض الناقل للأمراض وهي (*Anopheles arabiensis* و*Anopheles gambiae* و*Aedes aegypt* و*Aedes albopictus*). وتتضمن مجموعة الأدوات هذه معدات للتربية المكثفة، ونظماً غذائية اصطناعية، وأساليب تعقيم باستخدام كلٍّ من أشعة غاما والأشعة السينية، وأساليب لمراقبة الجودة وإجراءات عمل نمطية لإجراء دراسات جدوى حول استخدام تقنية الحشرة العقيمة لمكافحة تجمعات البعوض. ويتوافر الآن نظام غذائي عام لليرقات، مناسب ليرقات بعوض *Anopheles* و*Aedes* ومؤلف من مكونات متوافرة على نطاق واسع وبسهولة.[٢٥،٢٦] واستخدام هذا النظام الغذائي السائل لليرقات وإجراءات العمل النمطية ذات الصلة يُمكّن من التربية المكثفة ليرقات *Anopheles* و*Aedes* على نحو فعال في صواني كبيرة مدرجة في نظام رفوف مستحدث قابل للإمالة[٢٧،٢٨] (الشكل واو-٢). ولقد صممت الأقفاص لتيسير التغذية بالدم وإيصال السكَّر وجمع البيض والتنظيف.[٢٩] وبالإضافة إلى مصدر السكر بنسبة ١٠٪ الذي يتم تقديمه بحسب الرغبة، يستخدم غشاء تغذية من

---

[23] CALLAWAY, E., CYRANOSKI, D., Anti-parasite drugs sweep Nobel prize in medicine 2015, Nature **526** (2015) 174–175.

[24] LEES, R.S., GILLES, J.R.L., HENDRICHS, J., VREYSEN, M.J.B., BOURTZIS, K., Back to the future: The sterile insect technique against mosquito disease vectors, Curr. Op. Inse. Sci. **10** (2015) 156–162.

[25] DAMIENS, D., BENEDICT, M.Q., WILLE, M., GILLES, J.R., An inexpensive and effective larval diet for *Anopheles arabiensis* (Diptera: Culicidae): Eat like a horse, a bird, or a fish? J. Med. Entomol. **49** (2012) 1001–1011.

[26] PUGGIOLI, A., et al., Efficiency of three diets for larval development in mass rearing *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae), J. Med. Entomol. **50** (2013) 819–825.

[27] BALESTRINO, F., BENEDICT, M.Q., GILLES, J.R., A new larval tray and rack system for improved mosquito mass rearing, J. Med. Entomol. **49** (2012) 595–605.

[28] BALESTRINO, F., PUGGIOLI, A., GILLES, J.R., BELLINI, R., Validation of a new larval rearing unit for *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) Mass Rearing, PLoS One **19** (2014).

[29] BALESTRINO, F., PUGGIOLI, A., BELLINI, R., PETRIC D., GILLES, J.R., Mass production cage for *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae), J. Med. Entomol. **51** (2014) 155–163.

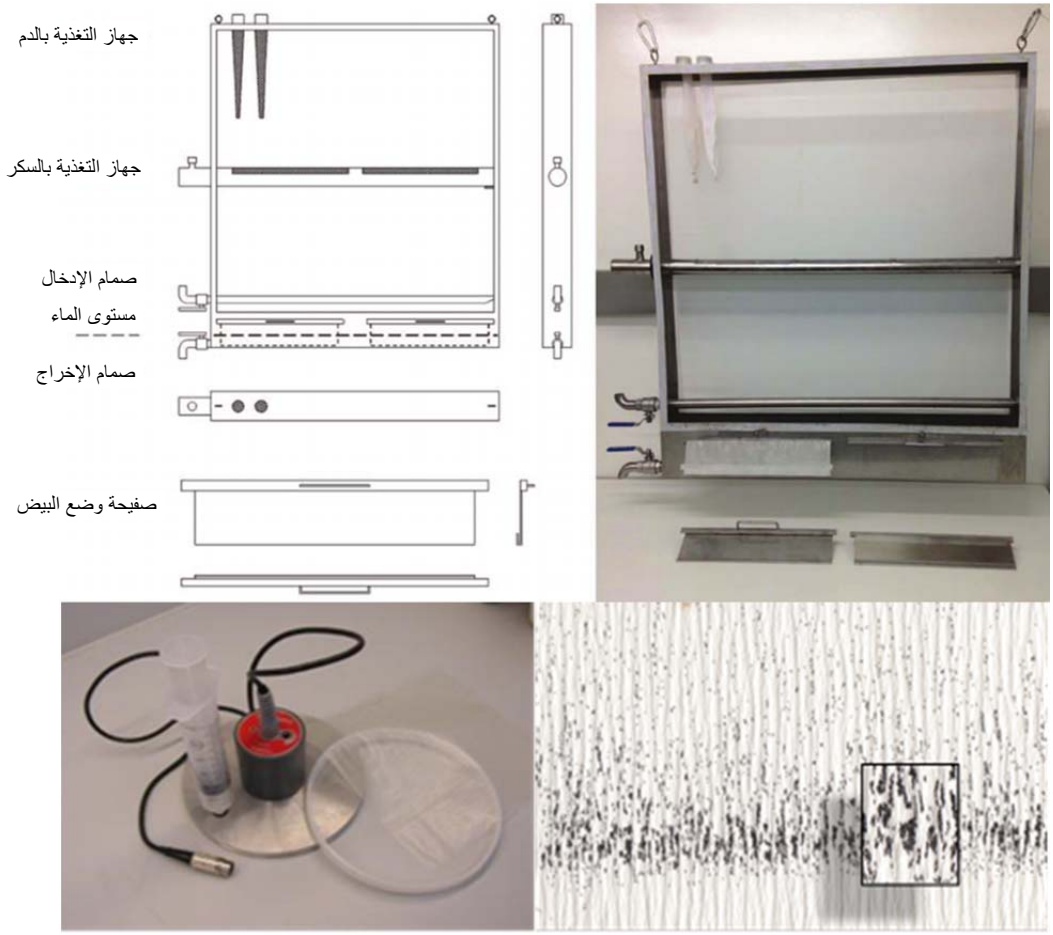
شركة Hemotek مُعَدَّل لتقديم وجبات الدم إلى إناث البعوض وتتم إتاحة المياه فوق أرضية القفص لأغراض وضع البيض.[٣٠] ويتم جمع البيض عبر شطف قاع القفص، ثم يتم تجفيف هذا البيض وقياسه كمياً على نحو موثوق بهدف تحقيق كثافة يرقية في صواني التربية يمكن التنبؤ بها بالنسبة لدورة الإنتاج المقبلة (الشكل واو-٣). وبالإمكان تعقيم ذكور البعوض في طور الخادرات المتأخر قبل طوري الخروج والإطلاق باستخدام أجهزة التشعيع بأشعة غاما أو الأشعة السينية (الشكل واو-٤). ولقد تم وضع منحنيات الاستجابة للجرعات بالنسبة لواحد من أكثر أنواع البعوض المستهدفة أهميةً، *Anopheles arabiensis*،[٣١،٣٢] من أجل اختيار الجرعة الأمثل التي تتيح نسبة العقم المناسبة ولكنها تسمح كذلك للذكور بالتنافس مع الذكور البرية على نحو فعال.

الشكل واو-٢ - نظام غذائي يرقي سائل وصواني ورفوف تم تطويرها للتربية المكثفة للبعوض في الطور اليرقي.
(الصورة من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

[30] DAMIENS, D., et al., Different blood and sugar feeding regimes affect the productivity of *Anopheles arabiensis* colonies (Diptera: Culicidae), J. Med. Entomol. **50** (2013) 336-343.

[31] NDO, C., et al., X-ray sterilization of the *An. arabiensis* genetic sexing strain 'ANO IPCL1' at pupal and adult stages, Acta Trop. **131** (2014) 124–128.

[32] YAMADA, H., VREYSEN, M.J., GILLES, J.R., MUNHENGA, G., DAMIENS, D.D., The effects of genetic manipulation, dieldrin treatment and irradiation on the mating competitiveness of male *Anopheles arabiensis* in field cages, Malar. J. **13** (2014) 318.



الشكل واو-٣- قفص للتربية المكثفة لبعوض Aedes البالغ، جهاز تغذية بالدم، وبيض تم جمعه فوق ورق مرشِّح.
(الصورة من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

الشكل واو-٤- تُستخدَم أجهزة تشعيع بأشعة غاما (يسارًا) أو الأشعة السينية (يميناً) لتعقيم ذكور البعوض.
(الصورة من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

٢٠٧- وبما أنّ ذكور البعوض تتعرض إلى ضغوط عمليات عدة، بما في ذلك التربية المكثفة والتعقيم والنقل والإطلاق، فإن ضمان توافر حشرات ذات جودة جيدة يشكل شاغلا رئيسيا. وبالإضافة إلى بارامترات مراقبة الجودة التي تسجل خلال مرحلة الإنتاج، تجرى دراسات على القدرة التنافسية في ظروف شبه ميدانية بغية تقييم جودة الحشرات. وتحاكي الأقفاص الميدانية الظروف شبه الميدانية وهي تتيح بديلاً جيداً للبيئة الطبيعية من أجل إجراء تجارب من ذلك القبيل، وكذلك دراسات سلوكية، بما يشمل التحقيقات بشأن الاحتشاد والتوافق التناسلي. ولقد استخدمت الأقفاص الميدانية لاختبار تأثير نسب مختلفة بين عدد الذكور العقيمة وعدد الذكور البريَّة وتأثير عمر الذكور العقيمة في نجاحها في التزاوج. ولقد كان للبيانات الأولية التي تم الحصول عليها بشأن بعوض *Anopheles arabiensis* من السودان، و*Anopheles gambiae* من بوركينا فاسو، و*Aedes albopictus* من الصين وإيطاليا دور فعال في تحسين عمليات الإنتاج وبالتالي القدرة التنافسية للذكور العقيمة، التي تمثل عاملا حاسما لنجاح برنامج متكامل لمكافحة الآفات على نطاق واسع يشمل مكونا من مكونات تقنية الحشرة العقيمة.

واو-٢-٢- المتطلبات التكنولوجية الإضافية

٢٠٨- في حالة تقنية الحشرة العقيمة بالنسبة للبعوض، كما هي الحال بالنسبة لغيرها من النهج القائمة على أسس بيولوجية، من المهم للغاية أن تطلَق ذكور البعوض فقط بما أن إناث البعوض هي الناقلة للأمراض، في حين أن ذكور البعوض لا تلسع البشر للحصول على الدم وبالتالي فهي لا تنقل الأمراض. وفصل الجنسين من أجل إلغاء الإناث من خط الإنتاج ممكن على نطاق ضيق باستخدام مثنوية الشكل الجنسية لبعوض Aedes [٣٣،٣٤] أو عبر خلط وجبات الدم بمواد كيميائية من قبيل الإيفرمكتين ivermectin، وهي مواد سامة بالنسبة لإناث بعوض *Anopheles arabiensis*.[٣٥] والتحدي الرئيسي الذي يتعين التصدي له هو استحداث سلالات فعالة وقوية عن طريق فصل الجنسين وراثياً تتيح القضاء السهل والمأمون على إناث البعوض في نطاق التربية المكثفة.[٣٦] وتوجد سلالة تم استحداثها عن طريق فصل الجنسين وراثياً لبعوض *Anopheles arabiensis* مستندة إلى طفرة مقاومة للمبيدات الحشرية (من شأن المعالجة بالدلدرين إبادة جميع إناث البعوض القابلة للتأثر دون ذكور البعوض المقاومة) متاحة منذ عدة سنوات، وتم مؤخراً تقييم إمكاناتها فيما يخص عمليات الإطلاق الميداني. ولقد اتسمت هذه السلالة بإنتاجية منخفضة وبعدم استقرار جيني، كما تبيّن أن الذكور البالغة منها، والتي تفقست عن بيض تمت معالجته بالدلدرين، تحتوي على كميات صغيرة من مخلفات المبيدات الحشرية. ولذلك، لم يوص باستخدام هذه السلالة في التطبيقات العملية الواسعة النطاق.[٣٧] ويجري الآن بذل جهود لتحديد الواسمات الجديدة المورفولوجية أو المُهلِكة بشروط للبعوض من نوع *Anopheles arabiensis* وكذلك من نوعي *Aedes albopictus* و*Aedes aegypti* حتى يتسنى استحداث سلالات فعالة عن طريق فصل الجنسين وراثياً.

---

[33] FOCKS, D.A., An improved separator for the developmental stages, sexes, and species of mosquitoes (Diptera: Culicidae), J. Med. Entomol. **17** (1980) 567–568.

[34] CARVALHO, D.O., et al., Mass production of genetically modified *Aedes aegypti* for field releases in Brazil, J. Vis. Exp. **83** (2014) 3579.

[35] YAMADA, H., SOLIBAN, S.M., VREYSEN, M.J., CHADEE, D.D., GILLES, J.R., Eliminating female *Anopheles arabiensis* by spiking blood meals with toxicants as a sex separation method in the context of the sterile insect technique, Parasit. Vectors **6** (2013) 197.

[36] GILLES, J.R., et al., Towards mosquito sterile insect technique programmes: exploring genetic, molecular, mechanical and behavioural methods of sex separation in mosquitoes, Acta Trop. **132** Suppl (2014) S178–S187.

[37] YAMADA, H., et al., The *Anopheles arabiensis* genetic sexing strain ANO IPCL1 and its application potential for the sterile insect technique in integrated vector management programmes, Acta Trop. **142** (2015) 138–144.

٢٠٩- وبالإضافة إلى مجموعة أدوات تقنية الحشرة العقيمة لمكافحة البعوض التي يجري تطويرها، يجب توسيع نطاق هذه التكنولوجيات لكي يتسنى تطبيقها على مستوى تشغيلي. ويواصل استخدام تقنية الحشرة العقيمة على نطاق واسع في مكافحة آفات حشرية أخرى الكشف عن مجالات يمكن فيها للتكنولوجيات الجديدة تعزيز تحسين الكفاءة وهو ما يفضي بالتالي إلى برامج أكثر نجاحاً لمكافحة الحشرات. وتتمثل القضايا الرئيسية التي يلزم البت فيها في معالجة الذكور العقيمة ونقلها إلى المناطق المستهدفة وإطلاقها الفعلي، وجميعها خطوات يجب تحقيقها دون التسبب في تأثير كبير على بقاء هذه الذكور العقيمة أو أدائها التزاوجي بعد إطلاقها.

واو-٣- الأساليب التكميلية ودمجها مع تقنية الحشرة العقيمة لمكافحة تجمعات البعوض

واو-٣-١- النُهُج الوراثية التكميلية لمكافحة البعوض

٢١٠- بالإضافة إلى تقنية الحشرة العقيمة، تم وضع عدة نهج أخرى لمكافحة تجمعات البعوض الناقل للأمراض. وعموماً، يمكن تصنيف هذه المنصات التكنولوجية إلى مجموعتين اثنتين. وتشمل المجموعة الأولى النُهج 'المحدودة ذاتياً' التي تعرف بأنها الأساليب التي لا يمكن لتأثيرها أن يدوم في البيئة مع مرور الوقت. وبالتالي، هنالك حاجة إلى عمليات إطلاق مستمرة لتحقيق الأثر المطلوب من كبح التجمعات. وتعد جميع أساليب كبح التجمعات من قبيل تقنية الحشرة العقيمة، ونهج إطلاق حشرات حاملة لقاتلة مهيمنة (RIDL) القائم على التحوير الوراثي، وتقنية الحشرة غير المتوافقة المستندة للكائنات المعايشة، أمثلة على النُهج المحدودة ذاتياً. وتشمل المجموعة الثانية نُهج 'الاكتفاء الذاتي' التي تُعرَف بأنها أساليب 'غازية' يمكن أن يدوم تأثيرها في البيئة عبر الزمن من خلال الانتقاء الإيجابي. ويمكن أن تستخدم هذه النُهج للاستعاضة عن تجمع بعوض مستهدف بآخر غير قادر على نقل الأمراض. كما اقتُرحت عدة أساليب لتحقيق هذا الأمر، وذلك باستخدام تكنولوجيات التحوير الوراثي أو باستخدام البكتيريا التكافلية.

٢١١- ويستند نهج إطلاق حشرات حاملة لقاتلة مهيمنة (RIDL) القائم على التحوير الوراثي على استخدام نظام وراثي حامل لجين قاتل.[٣٨] ولا يمكن تربية سلالات متماثلة الجينات حاملة لنظام RIDL في المختبر إلا بوجود كاظمة وهي عادةً ما تكون المضاد الحيوي التتراسيكلين. وغياب هذه الكاظمة يقتل النسل. ولقد تم تقييم سلالة *Aedes aegypti* OX513A الحاملة لهذه المجموعة الجينية في تجارب الكبح التي تم الاضطلاع بها على جزيرة كايمان الكبرى، وفي البرازيل وفي بنما. ويرث كلٌّ من ذكور وإناث النسل المتأتي من التزاوج بين الذكور OX513A التي تم إطلاقها والإناث البرية نسخة واحدة من الشريط الجيني القاتل كما أنها تموت في المرحلة الأولى من تحولها إلى خادرات. كما تم على نطاق ضيّق إجراء تجارب الكبح التي تستخدم عمليات إطلاق متعاقبة لذكور محورة وراثياً وأفيد بأن نسب مستويات الكبح بلغت في المتوسط ٧٠-٨٠٪.[٣٩،٤٠] ومن بين المشاكل المقترنة بهذا النهج غياب نظام تزاوج فعال وقوي، وهو أمر مطلوب جداً من أجل القضاء على فرصة إطلاق إناث ناقلة لمسببات أمراض، وإمكانية تطور المقاومة في ظل ظروف تربية مكثفة، وكذلك المسائل المتصلة بحقوق الملكية الفكرية، وبتصور الجمهور السلبي في بعض المناطق وبالموافقة الرقابية.

---

[38] ALPHEY, L., Genetic control of mosquitoes, An. Rev. Entomol. **59** (2014) 205–224.

[39] CARVALHO, D.O., et al., Suppression of a field population of *Aedes aegypti* in Brazil by sustained release of transgenic male mosquitoes, PLoS Negl. Trop. Dis. **9** (2015).

[40] HARRIS, A.F., et al., Successful suppression of a field mosquito population by sustained release of engineered male mosquitoes, Nat. Biotech. **30** (2012) 828-830.

واو-٣-٢- النهج المستندة للكائنات المعايِشة

٢١٢- يعتمد الأسلوبان الآخران، وهما تقنية الحشرة غير المتوافقة ونهج استبدال التجمعات، على البكتيريا فولباخيا، وهي نوع من البكتيريا التكافلية تورث عن الأم. ولقد ارتبطت هذه البكتيريا بالحث على ظهور عدة تشوهات إنجابية وأكثرها شيوعاً هو عدم التوافق الهُيولي الذي يتجلى، في أبسط أشكاله، في الوفيات الجنينية لدى الهجائن الناتجة عن التزاوج بين ذكور مصابة وإناث غير مصابة.[٤١]

٢١٣- ولقد تم استغلال هذا الكائن المعايش كأداة إما لكبح الحشرة غير المتوافقة أو استبدال تجمعات كبرى أنواع البعوض الناقلة للأمراض. كما تم اختبار نهج كبح تجمعات الحشرة غير المتوافقة هذه خلال تجارب ريادية صغيرة ضد الأنواع *Culex pipiens*، و*Culex pipiens quinquefasciatu*، و*Aedes polynesiensis*، و*Aedes albopictus*.[٤٢،٤٣] وتتمثل المشكلة الرئيسة التي يطرحها هذا النهج في أنه يتطلب أيضاً نظام تزاوج مثالي، وهو أمر غير متوافر حالياً، حتى تتسنى إزالة المخاطر المرتبطة بإطلاق إناث مخصبة وناقلة لمسببات أمراض. وهنالك بعض سلالات البكتيريا فولباخيا قادرة أيضاً على منع انتقال مسببات الأمراض البشرية الرئيسية، بما في ذلك البلازموديوم والحمى الدنجية، وحمّى تشيكونغونيا.[٤٤] وعلى إثر عمليات إطلاق خط من بعوض *Aedes aegypti* مصاب عبر النقل بسلالة البكتيريا فولباخيا *w*Mel، التي ينتج عنها عدم توافق هُيولي كبير والتي تتيح أيضاً حماية ضد الحمى الدنجية، حَلَّ هذا الخط محل التجمعات غير المصابة بالقرب من كيرنز، كوينزلاند، أستراليا. ومع ذلك، فإن للإصابة بالبكتيريا فولباخيا *w*Mel تأثيراً سلبياً على الخصوبة والإنتاج اليرقي، ثم إن تواتر الإصابة لا يبلغ، بشكل عام، نسبة ١٠٠٪، وهو ما يشير إلى أن بعوض *Aedes aegypti* المصاب بالبكتيريا فولباخيا *w*Mel قد لا يغزو بسرعة التجمعات المجاورة.[٤٥] ومن بين الشواغل الإضافية بشأن الاستدامة والأمن البيولوجي لاستراتيجية استبدال التجمعات احتمال تطور المقاومة أو إمكانية أن يكون تعويق الميكروب المُمرِض جزئياً أو حتى غائباً في بعض الروابط التكافلية. وبالفعل، فإن الإصابة بالبكتيريا فولباخيا قد تعزز الإصابة بمسببات أمراض أخرى، بما في ذلك الفيروسات المنقولة بالمفصليات [الشكل-٢٤].[٤٦]

واو-٣-٣- المتطلبات الإضافية لتطبيق أساليب المكافحة الوراثية بنجاح

٢١٤- يعتمد التطبيق الواسع النطاق لأي برنامج لكبح التجمعات (قائم على تقنية الحشرة العقيمة أو التحوير الوراثي أو الكائنات المعايشة) بشكل حاسم على توافر أساليب فعالة وقوية لفصل الجنسين، لأن من شأن عمليات إطلاق الإناث أن تشكل خطراً كبيراً لانتقال مسببات الأمراض. وفي غياب وسيلة فعالة لفصل الجنسين فإن وضع استراتيجية مأمونة وفعالة يتطلب الجمع بين نهج تقنية الحشرة العقيمة والنهج القائم على الكائنات المعايشة

---

[41] WERREN, J.H., BALDO, L., CLARK, M.E., *Wolbachia*: master manipulators of invertebrate biology, Nat. Rev. Microbiol. **6** (2008) 741–751.

[42] LAVEN, H., Eradication of Culex pipiens fatigans through cytoplasmic incompatibility, Nature **216** (1967) 383-384.

[43] LEES, R.S., GILLES, J.R.L., HENDRICHS, J., VREYSEN, M.J.B., BOURTZIS, K., Back to the future: The sterile insect technique against mosquito disease vectors, Curr. Op. Inse. Sci. **10** (2015) 156–162.

[44] MOREIRA, L.A., et al., A *Wolbachia* symbiont in *Aedes aegypti* limits infection with dengue, Chikungunya, and Plasmodium, Cell **139** (2009) 1268–1278.

[45] HOFFMAN, A.A., et al., Stability of the wMel *Wolbachia* infection following invasion into *Aedes aegypti* populations, PLoS Negl. Trop. Dis. **8** (2014).

[46] DODSON, B.L., et al., *Wolbachia* enhances West Nile virus (WNV) infection in the mosquito *Culex tarsalis*, PLoS Negl. Trop. Dis. **8** (2014).

لمكافحة تجمعات البعوض الناقل للأمراض. ولقد تم تطوير اختبار التحقق من المفهوم بالنسبة لهذا النهج المشترك ضد نوع البعوض *Aedes albopictus*.[٤٧،٤٨]

٢١٥- وسواء أكانت الوسيلة الأكثر فعاليةً ضد نوع معين من البعوض الناقل للأمراض في إقليم ما أسلوباً أم مزيج أساليب، ستكون هنالك حاجة إلى الدعم الحكومي ومشاركة الجمهور لضمان النجاح التشغيلي. ومن المرجح أن يشكل هذا الأمر تحدياً أكبر إذا تعلق الأمر بنُهُج قائمة على التحوير الوراثي، إذ غالباً ما تكون معارضة الجمهور في هذه الحالة أكبر وشروط الحصول على الموافقة الرقابية أكثر صرامةً، مقارنةً بالنُهُج القائمة على استخدام الكائنات المعايِشة. ومن جهة أخرى، فإنَّ تقنية الحشرة العقيمة مقبولة بسهولة من قبل السكان المحليين ولا تتطلب موافقة رقابية. وهنالك أيضًا قضايا تحيط بالملكية الفكرية في استخدام السلالات المحورة وراثيا والنهج القائمة على الكائنات المعايشة يجب تخطيها إذا ما تقرر تطبيق مثل هذه التقنيات على مستوى تشغيلي. ومع ذلك، سيتعين الدفاع عن الأساليب الجديدة، لأن من المؤكد أن القوى التطوريّة سوف تزيد من مقاومتها إزاء وسائل مكافحة البعوض التقليدية، وفي نهاية المطاف حتى إزاء الأساليب الجديدة للحماية من مسببات الأمراض القائمة على التحوير الوراثي والبكتيريا فولباخيا. وفي المقابل، ليس بالإمكان تطوير مقاومة ضد نهج تقنية الحشرة العقيمة لأن التشعيع يستحث طفرات قاتلة مهيمنة لدى الحشرة المستهدفة على نحو عشوائي. والنهج الديناميكي لكبح التجمعات، الذي يدمج أسلوب تقنية الحشرة العقيمة وغيره من الأساليب المتوافقة في برنامج لمكافحة الآفات الحشرية على نطاق المنطقة بالكامل، قد يمثل الطريقة الوحيدة لمكافحة تجمعات البعوض، وربما أيضاً الطريقة الوحيدة لمكافحة ما تنقله هذه التجمعات من أمراض عديدة.

زاي- استخدام تقنيات النظائر بغرض وضع تدابير فعالة للحفاظ على التربة

زاي-١- الاستخدام المشترك لتقنيات النويدات المشعة المتساقطة والنظائر المستقرة المحددة المركّبات بغرض وضع تدابير فعالة للحفاظ على التربة

٢١٦- يؤدي تدهور التربة الناجم عن ممارسات غير ملائمة في إدارة المزارع إلى فقدان التربة الخصبة وانخفاض غلات المحاصيل، ويسهم بالتالي في انعدام الأمن الغذائي. كما أن حالات فقدان الأراضي الصالحة للزراعة والترسب وتلوث مجاري المياه والبحيرات تمثل هي أيضاً تهديداً بيئياً واجتماعياً واقتصادياً كبيراً.

٢١٧- وفي أيلول/سبتمبر ٢٠١٥، نشرت مبادرة اقتصاديات تدهور الأراضي خلال الدورة السبعين للجمعية العامة للأمم المتحدة تقريراً ذكرت فيه أن كلفة الخسائر التي تتكبدها خدمات النظم الإيكولوجية تصل إلى ١٠,٦ تريليون دولار كل سنة وأن تدهور الأراضي يؤثر تأثيراً مباشراً على ١,٤ بليون نسمة في جميع أنحاء العالم.[٤٩]

---

[47] ZHANG, D., ZHENG, X., XI, Z., BOURTZIS, K., GILLES, J.R.L., Combining the sterile insect technique with the incompatible insect technique: I – Impact of *Wolbachia* infection on the fitness of triple- and double-infected strains of *Aedes albopictus*, PLoS One **10** (2015).

[48] ZHANG, D., LEES, R.S., XI, Z., GILLES, J.R.L., BOURTZIS, K., Combining the sterile insect technique with *Wolbachia*-based approaches: II – A safer approach to *Aedes albopictus* population suppression programmes, designed to minimize the consequences of inadvertent female release, PLoS One **10** (2015a).

[49] ECONOMICS OF LAND DEGRADATION INITIATIVE, The Value of Land: Prosperous Lands and Positive Rewards through Sustainable Land Management, Report, ELD Initiative, Bonn (2015).

٢١٨- ومن أجل التشجيع على استخدام وإدارة الموارد الزراعية على نحو أكثر استدامة، ثمة حاجة ملحة إلى الحصول على بيانات كميّة موثوقة بشأن حجم إعادة توزيع التربة ومداها المكاني (التآكل/الترسُّب)، وإلى فهم أفضل للعوامل الرئيسية المحفزة لعمليات التآكل والترسُّب. وسيساعد هذا الفهم الأفضل على الإرشاد إلى المواضع التي ينبغي فيها تطبيق تدابير ملائمة للحفاظ على التربة بغية السيطرة على الخسائر الناجمة عن تآكل التربة، وبالتالي تقليص ما له من آثار اقتصادية واجتماعية وبيئية.

زاي-١-١- استخدام النويدات المشعة المتساقطة بغرض القياس الكمي لمعدلات التآكل والترسب

٢١٩- إن استخدام النويدات المشعة المتساقطة مثل السيزيوم-١٣٧ الناشئة عن تجارب لأسلحة نووية حرارية تم القيام بها في الفترة الممتدة من خمسينات إلى ستينات القرن الماضي، وكذلك النظائر المشعة الأرضية المنشأ الموجودة في البيئة الطبيعية مثل الرصاص-٢١٠ والنظائر المشعة الكونية المنشأ مثل البريليوم-٧، يمكن أن يساعد على تقييم تآكل التربة والقياس الكمي لفعالية استراتيجيات الحفاظ على التربة.

٢٢٠- فبعد ترسب النويدات المشعة المتساقطة على الأرض عبر الأمطار، ترتبط بجسيمات التربة الدقيقة بشدة وتشكل بالتالي مقتفيات تربة مفيدة جداً يمكن أن تساعد على تحديد معدلات تآكل التربة وترسبها، كما يمكن استخدامها لاحقاً لتقييم فعالية تدابير الحفاظ على التربة من أجل السيطرة على تآكل التربة وبالتالي منع حصول الترسب المفرط المرتبط بتآكل التربة. ونظراً لاختلاف المنشأ والعمر النصفي لكلٍّ من الرصاص-٢١٠ والسيزيوم-١٣٧، يمكن أن يوفرا أساساً متيناً لتحديد تاريخ تآكل التربة على مستويات أحواض الصرف الكبيرة على مدى فترات بعيدة الأجل ومتوسطة، تباعاً. وبإدراج البريليوم-٧، تسمح النويدات المشعة المتساقطة أيضاً بتقييم الخسائر الناجمة عن التآكل على المدى القصير (الجدول زاي-١). وعلى الرغم من أن العديد من الدراسات قد اقتصرت على استخدام نويدة مشعة متساقطة واحدة، فإن استخدام اثنتين أو حتى ثلاث من النويدات المشعة المتساقطة يمكن أن يقدم معلومات أكثر قيمة عن تاريخ تآكل التربة وذلك من خلال توليد مجموعات بيانات تتعلق بفترات زمنية مختلفة.[٥٠]

٢٢١- والاستخدام المتزايد في جميع أنحاء العالم للنويدات المشعة المتساقطة بهدف القياس الكمي لمعدلات تآكل وترسب التربة الخاصة بطائفة واسعة من البيئات الزراعية، بدايةً من حقل منفرد وصولاً إلى نطاق مستجمعات الماء، قد برهن بوضوح على صحة تقنيات النظائر هذه وما لها من إمكانات.[٥١]

[50] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidelines for Using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil Conservation Strategies, IAEA-TECDOC-1741, IAEA, Vienna (2014).

[51] MABIT, L., et al., Fallout ^{210}Pb as a soil and sediment tracer in catchment sediment budget investigations: A review, Earth-Science Reviews **138** (2014) 335–351.

الجدول زاي-١- المزايا النسبية والقيود الخاصة باستخدام السيزيوم-١٣٧، والرصاص-٢١٠، والبريليوم-٧ في القياس الكمي لمعدلات إعادة توزيع التربة بعد عمليات التآكل و/أو الترسب.[٥٢]

النويدات المشعة المتساقطة	المنشأ	الطاقة (كيلو إلكترون فلط)	العمر		أخذ العينات	الحجم	كاشف	القياس		تأريخ الرواسب
			نصف العمر	المدة الزمنية				مختبري	في الموقع	
السيزيوم-١٣٧	اصطناعي من صنع الإنسان	٦٦٢	٣٠,٢ سنة	٥٠ سنة (الأجل المتوسط)†	بسيط	من قطعة أرض إلى مستجمع ماء كبير	جرمانيوم فائق النقاء γ عادي	سهل	سهل	مُجدٍ
الرصاص-٢١٠	طبيعي أرضي المنشأ	٤٦	٢٢,٨ سنة	١٠٠ سنة (الأجل الطويل)†	بسيط	من قطعة أرض إلى مستجمع ماء	جرمانيوم فائق النقاء γ ذو نطاق طاقة واسع	أصعب	محدود وغير موثوق	مُجدٍ
البريليوم-٧	طبيعي كوني المنشأ	٤٧٧	٥٣,٣ يوماً	≥ ٦ أشهُر (الأجل القصير)*	تراكمي على أعماق طفيفة	من قطعة أرض محلية إلى حقل	جرمانيوم فائق النقاء γ عادي	سهل	وقت عدّ أطول مقارنةً بالسيزيوم-١٣٧	مُجدٍ

زاي-١-٢- استخدام تقنيات النظائر المستقرة المحدّدة المركّبات لتحديد مصادر الرواسب

٢٢٢- تتيح إحدى تقنيات الأدلة الجنائية المعتمدة على النظائر المستقرة التي تم تطويرها مؤخراً، والتي تستند إلى بصمات النظائر المستقرة المحدّدة المركّبات للواسمات الحيوية العضوية المتأصّلة في التربة، التمييز بين مصادر الرواسب وتحديد نسبتها. وبالتالي، يمكن استخدام بصمات النظائر المستقرة المحدّدة المركّبات المتأتية من مختلف استعمالات الأراضي لاستكمال المعلومات التي تقدمها بيانات النويدات المشعة المتساقطة.

٢٢٣- وهذا الأمر ممكن لأن غالبية المجموعات النباتية تنتج طائفة من المركّبات العضوية التي تتسرب إلى التربة من جذورها وترتبط بجسيمات التربة، واسمةً بذلك استخداماً معيّناً للأراضي بواسطة الواسمات الحيوية الخاصة بهذه المجموعات. وعلى الرغم من أن جميع النباتات تنتج واسمات حيوية مماثلة، فإن العلامة النظيرية المستقرة للكربون-١٣ الخاصة بتلك الواسمات الحيوية عادةً ما تختلف بالنسبة إلى كل صنف من أصناف النباتات. وتستند تقنية النظائر المستقرة المحدّدة المركّبات إلى قياس العلامة النظيرية المستقرة للكربون-١٣ الخاصة بالسلسلة المستقيمة (الكربون-١٤ – الكربون-٢٤) المتأتية من الأحماض الدهنية النباتية المنشأ الموجودة في التربة. ومن خلال ربط بصمات النظائر المستقرة المحدّدة المركّبات الخاصة باستخدام الأراضي بالنويدات المشعة المتساقطة المرتبطة بالرواسب في مناطق الترسب، يتاح للباحثين نهج دقيق وقوي لتحديد أصول الرواسب بغرض تحديد المناطق التي تكون عرضة لتآكل التربة.

٢٢٤- وتعد تقنيات النظائر المستقرة المحدّدة المركّبات وتقنيات النويدات المشعة المتساقطة أساليب متكاملة لدراسة إعادة توزيع ومنشأ رواسب الأرض. وتقدم النويدات المشعة المتساقطة معلومات بشأن حجم إعادة توزيع التربة داخل النظم الزراعية (أو بشأن الترسُّب في منافذها) في حين تقدم بصمات النظائر المستقرة المحدّدة المركّبات معلومات بشأن منشأ تلك الرواسب.

---

[52] TAYLOR, A., BLAKE, WH., SMITH, H.G., MABIT, L., KEITH-ROACH, M.J., Assumptions and challenges in the use of fallout beryllium-7 as a soil and sediment tracer in river basins, Earth-Science Reviews **126** (2013) 85–95.

٢٢٥- وتحسين فهم كيفية التقليص من تآكل التربة وما يلحق ذلك من مشاكل زراعية بيئية متصلة-بالترسّب هي متطلبات رئيسية لمكافحة تدهور التربة بنجاح وكذلك للتخفيف من العديد من الآثار المتوقعة لتغيّر المناخ. ومن شأن استخدام هذه النهج النظيرية المتكاملة أن يسمح للمجتمعات الزراعية باعتماد تدابير تخفيف محددة وفعالة من قبيل إبقاء الحراثة عند حدها الأدنى، وزراعة الفرشات الواقية، ومحاصيل التغطية، واستخدام المصاطب، والزراعة الكنتورية وبناء جدران وأسوار حجرية صغيرة، وجميع هذه التدابير تقلل من الخسائر في خصوبة التربة وإنتاجية المحاصيل وتدهور نوعية المياه وترسبات السدود (الشكلان زاي-١ وزاي-٢).

الشكل زاي-١ - استخدام المصاطب والزراعة الكنتورية لتعزيز الحفاظ على التربة في مزرعة شاي في مقاطعة لام دونغ، فييت نام. (الصورة من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)

الشكل زاي-٢ - نقل الرواسب بسبب التآكل من حوض صرف إلى سد مائي في سري لانكا. (الصورة من: الوكالة الدولية للطاقة الذرية)