NATIONAL ACADEMIES Sciences Engineering Medicine

NATIONAL ACADEMIES PRESS Washington, DC

This PDF is available at http://nap.nationalacademies.org/26453

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version (2022)

DETAILS

194 pages | 8.5 x 11 | PAPERBACK

ISBN 978-0-309-27657-3 | DOI 10.17226/26453

BUY THIS BOOK

FIND RELATED TITLES

CONTRIBUTORS

Committee on Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies; Nuclear and Radiation Studies Board; Division on Earth and Life Studies; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine

SUGGESTED CITATION

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2022. *Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version*. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/26453.

Visit the National Academies Press at nap.edu and login or register to get:

– Access to free PDF downloads of thousands of publications
– 10% off the price of print publications
– Email or social media notifications of new titles related to your interests
– Special offers and discounts

All downloadable National Academies titles are free to be used for personal and/or non-commercial academic use. Users may also freely post links to our titles on this website; non-commercial academic users are encouraged to link to the version on this website rather than distribute a downloaded PDF to ensure that all users are accessing the latest authoritative version of the work. All other uses require written permission. (Request Permission)

This PDF is protected by copyright and owned by the National Academy of Sciences; unless otherwise indicated, the National Academy of Sciences retains copyright to all materials in this PDF with all rights reserved.

المصادر المشعة
الاستعمالات والتقنيات البديلة

لجنة المصادر المشعة: الاستعمالات والتقنيات البديلة

مجلس الدراسات النووية والإشعاعية

قسم دراسات الأرض والحياة

تقرير الدراسة التوافقية

The National Academies of
SCIENCES • ENGINEERING • MEDICINE

THE NATIONAL ACADEMIES PRESS
Washington, DC
www.nap.edu

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

مطبعة الأكاديميات الوطنية "THE NATIONAL ACADEMIES PRESS"
وعنوانها 500 Fifth Street, NW Washington, DC 20001

تم دعم هذا النشاط بموجب المنحة رقم 2091228 مع شركة ساندیا الوطنية للتكنولوجيا والحلول الهندسية "National Technology and Engineering Solutions of Sandia، LLC". أي آراء أو نتائج أو استنتاجات أو توصيات يتم عرضها عنها في هذا المنشور لا تعكس بالضرورة وجهات نظر أي منظمة أو وكالة قدمت الدعم للمشروع.

الكتاب القياسي الدولي رقم 13: 978-0-309-44791-1
الكتاب القياسي الدولي رقم 10: 0-309-44791-7
معرف الكائن الرقمي: https://doi.org/10.17226/26121

تتوفر نسخ إضافية من هذا المنشور من مطبعة الأكاديميات الوطنية "National Academies Press"، وعنوانها 500 Fifth Street، NW، Keck 360، Washington، DC 20001؛ هاتف (800) 624-6242 أو (202) 334-3313؛ http://www.nap.edu.

حقوق الطبع والنشر 2021 للأكاديمية الوطنية للعلوم "National Academy of Sciences". جميع الحقوق محفوظة.

طُبع في الولايات المتحدة الأمريكية

الغلاف: تمثيل تخطيطي لتشغيل مصادر إشعاع غاما والحزمة الإلكترونية والأشعة السينية في التعقيم الصناعي. بإذن من توماس كروك "Thomas Kroc"، مختبر الأبحاث الوطني فيرميلاب "Fermi National Accelerator Laboratory"، باتافيا، إلينوي مستنسخة ومعدلة من ميلر، 2003، بإذن من AIP Publishing.

الاقتباس المقترح: الأكاديميات الوطنية للعلوم والهندسة والطب ."National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine" 2021. *المصادر المشعة: الاستعمالات والتقنيات البديلة*. Washington, DC: مطبعة الأكاديميات الوطنية "The National Academies Press". https://doi.org/10.17226/26121.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

The National Academies of
SCIENCES • ENGINEERING • MEDICINE

تأسست **الأكاديمية الوطنية للعلوم "National Academy of Sciences"** في عام 1863 بموجب قانون صادر عن الكونجرس وقعه الرئيس لينكولن كمؤسسة خاصة غير حكومية لتقديم المشورة للأمة بشأن القضايا المتعلقة بالعلوم والتكنولوجيا. ويتم انتخاب الأعضاء من قبل أقرانهم لمساهماتهم البارزة في البحث. الدكتورة مارسيا مكنوت "Marcia McNutt" هي الرئيس.

تأسست **الأكاديمية الوطنية للهندسة "National Academy of Engineering"** في عام 1964 بموجب ميثاق الأكاديمية الوطنية للعلوم للاستفادة من ممارسات الهندسة لتقديم المشورة للأمة. ويتم انتخاب الأعضاء من قبل أقرانهم لمساهمات غير عادية في الهندسة. الدكتور جون ل. أندرسون "John L. Anderson" هو الرئيس.

تأسست **الأكاديمية الوطنية للطب "National Academy of Medicine"** (المعروفة سابقًا باسم معهد الطب) في عام 1970 بموجب ميثاق الأكاديمية الوطنية للعلوم لتقديم المشورة للأمة بشأن القضايا الطبية والصحية. ويتم انتخاب الأعضاء من قبل أقرانهم لمساهماتهم المتميزة في الطب والصحة. الدكتور فيكتور ج. دزاو "Victor J. Dzau" هو الرئيس.

الأكاديميات الثلاثة تعمل معًا مثل **الأكاديميات الوطنية للعلوم والهندسة والطب "National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine"** لتقديم تحليل مستقل وموضوعي ومشورة للأمة والقيام بأنشطة أخرى لحل المشاكل المعقدة ولنشر قرارات السياسة العامة. وتشجع الأكاديميات الوطنية كذلك التعليم والبحث العلمي، وتقدر المساهمات البارزة في المعرفة، وتزيد من فهم الجمهور في مسائل العلوم والهندسة والطب.

تعرف على المزيد حول الأكاديميات الوطنية للعلوم والهندسة والطب من خلال الموقع **www.nationalacademies.org**.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

The National Academies of
SCIENCES • ENGINEERING • MEDICINE

تقارير الدراسات التوافقية التي نشرتها الأكاديميات الوطنية للعلوم والهندسة والطب لتوثيق التوافق القائم على الأدلة بشأن بيان مهمة الدراسة من قبل لجنة من الخبراء. حيث تتضمن التقارير عادةً النتائج والاستنتاجات والتوصيات بناءً على المعلومات التي جمعتها اللجنة ومداولات اللجنة. وقد خضع كل تقرير لعملية مراجعة دقيقة ومستقلة من قبل الأقران وهو يمثل موقف الأكاديميات الوطني من بيان المهمة.

محاضر الاجتماع التي نشرتها الأكاديميات الوطنية للعلوم والهندسة والطب تسرد العروض التقديمية والمناقشات في ورش عمل أو الندوات أو أي فعاليات أخرى تعقدها الأكاديميات الوطنية. البيانات والآراء الواردة في الجلسات هي آراء المشاركين ولا يتم اعتمادها من قبل المشاركين الآخرين أو لجنة التخطيط أو الأكاديميات الوطنية.

للحصول على معلومات حول المنتجات والأنشطة الأخرى للأكاديميات الوطنية، يُرجى زيارة الموقع الإلكتروني:
.www.nationalacademies.org/about/whatwedo

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

لجنة المصادر المشعة:
الاستعمالات والتقنيات البديلة

بوني دي جينكينز "BONNIE D. JENKINS" (*الرئيس*[1]، النساء ذوات البشرة الملونة يعززون السلام والأمن، واشنطن العاصمة
توماس ك. كروك "THOMAS K. KROC" *الرئيس*[2]، مختبر الأبحاث الوطني فيرميلاب "Fermi National Accelerator Laboratory"، باتافيا، إلينوي
روبرت إيه باري "ROBERT A. BARI"، مختبر بروكهافن الوطني "Brookhaven National Laboratory"، أبتون، نيويورك
ديبورا دبليو برونر (نام) "DEBORAH W. BRUNER (NAM)"، جامعة إيموري، أتلانتا، جورجيا
هيوبرت ك. فوي "HUBERT K. FOY"، المركز الأفريقي للعلوم والأمن الدولي، أكرا، غانا
باميلا جيه هندرسون "PAMELA J. HENDERSON"، هيئة التنظيم النووي الأمريكية (متقاعدة)، رينو، نيفادا
بي أندرو كرم "P. ANDREW KARAM"، Karam Consulting LLC، نيويورك، نيويورك
ليندا أ.كروجر "LINDA A. KROGER"، جامعة كاليفورنيا، ديفيس، ساكرامنتو
مايكل أو م سي ويليامز "MICHAEL O. McWILLIAMS"، جامعة ستانفورد (فخري)، ستانفورد، كاليفورنيا
كاتلين (كيت) إم روغان "CATHLEEN (KATE) M. ROUGHAN"، الوكالة الدولية للطاقة الذرية (متقاعدة)، فيينا، النمسا
ستيفن جي فاغنر "STEPHEN J. WAGNER"، الصليب الأحمر الأمريكي (متقاعد)، روكفيل، ماريلاند
ديفيد إل ويمر "DAVID L. WEIMER"، جامعة ويسكونسن ماديسون
جون إيه ويليامسون "JOHN A. WILLIAMSON"، وزارة الصحة في فلوريدا، أورلاندو

طاقم العمل

أورانيا كوستي "OURANIA KOSTI"، مدير الدراسة (*من أكتوبر* 2020)
تشارلز دي فيرجسون "CHARLES D. FERGUSON"، مدير مجلس الإدارة ومدير الدراسة (*حتى أكتوبر* 2020)
لورا دي لانوس "LAURA D. LLANOS"، شريك أعمال مالي
ميليسا فرانكس "MELISSA FRANKS"، مساعد برامج أول
دارلين جروس "DARLENE GROS"، مساعد برامج أول

[1] استقال من اللجنة اعتبارًا من 13 يناير 2021.
[2] شغل منصب رئيس اللجنة اعتبارًا من 21 يناير 2021.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

مجلس الدراسات النووية والإشعاعية

جورج أبوستولاكيس "GEORGE APOSTOLAKIS" (*الرئيس*، معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (فخري)، لوس أنجلوس، كاليفورنيا
جيمس إيه برينك "JAMES A. BRINK" *نائب الرئيس*، مستشفى ماساتشوستس العام، بوسطن
سالي إيه أموندسون "SALLY A. AMUNDSON"، جامعة كولومبيا، نيويورك، نيويورك
ستيفن إم بيكر "STEVEN M. BECKER"، جامعة أولد دومينيون، نورفولك، فيرجينيا
إيمي بيرينغتون دي غونز لاليز "AMY BERRINGTON DE GONZÁLEZ"، المعهد الوطني للسرطان، بيثيسدا، ماريلاند
بول تي ديكمان "PAUL T. DICKMAN"، مختبر أرجون الوطني، واشنطن العاصمة
بوني دي جينكينز "BONNIE D. JENKINS"،[1]، النساء ذوات البشرة الملونة يعززون السلام والأمن، واشنطن العاصمة
ستيبان كالميكوف "STEPAN KALMYKOV" الأكاديمية الروسية للعلوم، موسكو
أليسون إم ماكفارلين "ALLISON M. MACFARLANE"، جامعة جورج واشنطن، واشنطن العاصمة
ر. جوليان بريستون "R. JULIAN PRESTON"، وكالة حماية البيئة الأميركية، تشابل هيل، كارولاينا الشمالية
هنري دي رويال "HENRY D. ROYAL"، كلية الطب بجامعة واشنطن في سانت لويس بولاية ميسوري
وليام إتش توبي "WILLIAM H. TOBEY"، جامعة هارفارد، كامبريدج، ماساتشوستس

طاقم العمل

تشارلز د. فيرغسون "CHARLES D. FERGUSON"، المدير
جينيفر هايمبرغ "JENNIFER HEIMBERG"، مسؤول برنامج أول
أورانيا كوستي "OURANIA KOSTI"، مسؤول برنامج أول
لورا دي لانوس "LAURA D. LLANOS"، شريك أعمال مالي
ميليسا فرانكس "MELISSA FRANKS"، مساعد برامج أول
دارلين جروس "DARLENE GROS"، مساعد برامج أول

[1] استقال من مجلس الإدارة اعتبارًا من 13 يناير 2021.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

شكر وتقدير

ساهم عدد من الأشخاص والمنظمات في استكمال هذا التقرير بنجاح. تود اللجنة أن تشكر كل من:

مختبرات ساندیا الوطنية (Sandia) والإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA) لرعاية الدراسة ولتقديم معلومات عن الأنشطة المتعلقة بالأمن الإشعاعي وتعزيز التقنيات البديلة. عملت جودي ليبرمان (ساندیا) باقتدار كجهة اتصال راعية للجنة وبذلت جهد فعال في تنسيق العديد من عروض جمع المعلومات للجنة بما في ذلك جولة افتراضية في ساندیا. وساعد كل من الدكتور مايكل إيتامورا والدكتور هولي دوكري اللجنة في تلقي المعلومات التي تحتاجها فيما يتعلق بأنشطة ساندیا وتحليلاتها. قدم الدكتور لانس جاريسون، وكريستين هيرش، ومليكا تالبي معلومات إلى اللجنة حول أنشطة الإدارة الوطنية للأمن النووي المتعلقة بأمن المصادر المشعة، وتعزيز التقنيات البديلة، وإزالة المصادر المشعة المهملة والتخلص منها. كما قام الدكتور جاريسون بالتنسيق مع اللجنة مع المكاتب الأخرى داخل الإدارة الوطنية للأمن النووي والمكاتب الأخرى لوزارة الطاقة (DOE). نود أيضًا أن نشكر كريستينا هاتشر، من وزارة الطاقة، على مساعدة موظفي الأكاديميات الوطنية في وضع تصور للدراسة وخطة العمل.

استجاب موظفو **اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية**، وخاصة مارجريت سيرفيرا وجورج سميث، لطلبات اللجنة العديدة للحصول على معلومات تتعلق بعمليات الوكالة لتأمين المصادر المشعة وتتبعها.

وقدم موظفو **الوكالة الدولية للطاقة الذرية مجتمعين عدة** ساعات من الإفادات الإعلامية إلى اللجنة بشأن المسائل المتصلة بسلامة وأمن المصادر المشعة، والتكنولوجيات البديلة المستخدمة في التطبيقات الطبية والبحثية والتجارية. تود اللجنة أن تقدم شكر خاص لكل من كارين كريستاكي وإيان جوردون ومحمد عبد الخالق، وهيلير مانسو، وديبي فان دير ميروي، وجواو أوسو جونيور، ورونالد باتشيكو، وروي كاردوسو بيريرا، وريبيكا روبينز، وأليسيا ماريا رودريغيز واي باينا، وخوسيه جارسيا ساينز، وفاليريا ستاروفويتوفا، ومحمد وسيم. واستجاب أندرو باركر (متقاعد) لطلب اللجنة للحصول على معلومات حول تقنية التعقيم ضد الحشرات.

وقدمت **اللجنة الكندية للسلامة النووية (CNSC)** وتحديدا إريك ليموين وإدموند وونغ معلومات عن نظام تتبع المصادر المشعة من CNSC.

وقدم العديد من المهنيين الطبيين معلومات إلى اللجنة بشأن اعتماد التكنولوجيات البديلة في البلدان المنخفضة والمتوسطة الدخل؛ وعلى وجه التحديد الدكتور ووندماغينهو تيجينه والدكتور إسكادماس يينسو بيلاي، مستشفى بلاك ليون، **إثيوبيا؛** والدكتور إريك أديسون، مستشفى كومفو أنوكي التعليمي، **غانا؛** والدكتور إدغار رويز، والدكتور أنجيل فيلاردي، والدكتور فيكي دي فالا، والدكتور كارلوس غارسيا، والدكتور خافيير فيغيروا، وكيرك ناجيرا، ميلتون إكسكياك، وفرانكي ريس، المعهد الوطني للسرطان، **غواتيمالا؛** الدكتور توفيق أ. إيغي، مستشفى أبوجا الوطني، **نيجيريا؛** الدكتور ماغات دياغني، مستشفى أريستيد دانتيك، داكار، **السنغال؛** ومولابي كاندوزا، مستشفى أمراض السرطان، وبرودنس كاتونغو موتالي، المعهد الوطني البحوث العلمية والصناعية، **زامبيا.** كما نود أن نشكر الدكتورة أندريا بارليز ووليام ترينكا.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

جامعة واشنطن في سانت لويس تتبادل مع الأطباء ذوي الخبرة وجهات النظر حول المشروع التعاوني الذي سيتم تبنيه بشأن العلاج الإشعاعي المعدل في غواتيمالا. وهم الدكتور بن كاي، والدكتور هيرام جاي، والدكتور لورين هينكي، وإريك لوجمان، والدكتور جيف ميشالسكي، والدكتور جاكاراندا فان راينين.

وقام جون ميلر، **الرابطة الدولية لموردي المصادر ومنتجيها**، وبول وين، **الرابطة الدولية للإشعاع**، بترتيب عدة جلسات إقادة إعلامية للجنة في هذا المجال، وقدما وجهات نظرهما الخاصة.

كما قدم بيير ليغو، **المعهد العالمي للأمن النووي**، وجهات نظر للجنة ودعا مجموعة فرعية من اللجنة إلى اجتماعين للمناقشة نظمهما المعهد.

قدم تايلر برنشتاين والدكتور ستيفن كران معلومات عن الجيل التالي من نظام الطاقة للنظائر المشعة **Zeno Power System**.

قدمت سيندي توملينسون، **الجمعية الأمريكية لطب الأورام بالإشعاع**، معلومات حول تبني المعالجة الإلكترونية الموضعية في الولايات المتحدة.

قدم الدكتور راجيسواري (راجي) بيلاي راجاجوبالان، **مؤسسة أوبزرفر للأبحاث، الهند**، معلومات عن التطور في الهند واستخدام السيزيوم 137 المزجج للدم وتشعيع الطعام.

كما تشكر اللجنة المقدمين والمتحدثين الذين قدموا عروضًا عالية الجودة خلال الاجتماعات العامة كما هو مذكور في الملحق ب.

وتعرب اللجنة عن امتنانها لموظفي مجلس الدراسات النووية والإشعاعية (NRSB) التابع للأكاديميات الوطنية للعلوم والهندسة والطب (National Academies) لتنظيم هذه الدراسة وتسهيلها. نظمت مديرة الدراسة د. أورانيا كوستي ومدير مجلس الإدارة الدكتور تشارلز فيرجسون اجتماعات اللجنة وساعدا اللجنة في جمع المعلومات التي تحتاجها لكتابة تقريرها. وقامت ميليسا فرانكس ودارلين جروس بإدارة الخدمات اللوجستية للاجتماعات ومراجعة التقارير والنشر. كما ساعدت مجموعة إضافية من موظفي الأكاديميات الوطنية في إنتاج التقرير: ساعد إريك إدكين، قسم دراسات الأرض والحياة، في تصميم الأشكال، وساعدت ريبيكا مورجان ومايا توماس، مركز أبحاث الأكاديميات الوطنية، في التحقق من المراجع.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

المراجعون

تمت مراجعة تقرير دراسة التوافق في شكل مسودة من قبل أفراد تم اختيارهم لتنوع وجهات نظرهم وخبراتهم الفنية. والغرض من هذه المراجعة المستقلة هو تقديم تعليقات صريحة وناقدة تساعد الأكاديميات الوطنية للعلوم والهندسة والطب في جعل كل تقرير منشور سليمًا قدر الإمكان والتأكد من أنه يفي بالمعايير المؤسسية للجودة والموضوعية والأدلة، والاستجابة لتكليف الدراسة. وتظل تعليقات المراجعة ومخطوطة المسودة سرية لحماية سلامة التشاور.

ونشكر الأشخاص التالية أسماؤهم لمراجعتهم هذا التقرير:

ديفيد إي أسبينس "DAVID E. ASPNES" (NAS)، جامعة ولاية نورث كارولينا
أحمد بدر الزمان "AHMED BADRUZZAMAN"، باسيفيك للاستشاريين والمهندسين
سيمون بوفلر "SIMON BOUFFLER"، هيئة الصحة العامة في إنجلترا
جي ماريوس كلور "G. MARIUS CLORE" (NAS)، المعاهد الوطنية للصحة
ليو فيفيلد "LEO FIFIELD"، مختبر شمال غرب المحيط الهادئ الوطني
إيف هينون "YVES HÉNON"، الرابطة الدولية للإشعاع
إيوانا إليوبولوس "IOANNA ILIOPULOS"، مبادرة التهديد النووي
كارولين مكينزي "CAROLYN MacKENZIE"، جامعة كاليفورنيا، بيركلي (متقاعدة)
مالكولم مك إيوين " MALCOLM McEWEN"، المجلس الوطني للبحوث الكندية
ستيفن موسولينو "STEPHEN MUSOLINO"، مختبر بروكهافن الوطني
أندرو باركر "ANDREW PARKER"، الوكالة الدولية للطاقة الذرية (متقاعد)
مارك شيلتون " MARK SHILTON"، QSA Global، Inc.
إدوارد سنيدير"EDWARD SNYDER"، كلية الطب بجامعة ييل
فاليريا ستاروفويتوفا "VALERIIA STAROVOITOVA"، الوكالة الدولية للطاقة الذرية
جوزيف أ. تومبكينز "JOSEPH A. TOMPKINS"، مؤتمر مديري برامج مكافحة الإشعاع
نيها فابيوالا "NEHA VAPIWALA"، جامعة بنسلفانيا

على الرغم من أن المراجعين المذكورين أعلاه قدموا العديد من التعليقات والاقتراحات البناءة، فلم يُطلب منهم الموافقة على استنتاجات أو توصيات هذا التقرير ولم يروا المسودة النهائية قبل إصداره. أشرف على مراجعة هذا التقرير **ماريلين جيجر (NAE)**، جامعة شيكاغو و **روث إي مكبيرني**، اجتماع مديري برامج التحكم في الإشعاع. فقد كانوا مسؤولين عن التأكد من تنفيذ الفحص المستقل

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

لهذا التقرير وفقًا لمعايير الأكاديميات الوطنية وتم أخذ جميع تعليقات المراجعة بعناية في الاعتبار. وتقع المسؤولية عن المحتوى النهائي على عاتق لجنة التأليف والأكاديميات الوطنية.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

المحتويات

موجز 1

ملخص 3

1 الخلفية ومهمة الدراسة 11
1-1 طلب الدراسة، 12
1-2 نظام تصنيف المصادر المشعة، 14
1-3 النظائر المشعة الشائعة في المصادر المشعة، 16
1-4 تأثير تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008، 18
1-5 العمل ذو الصلة من قبل الآخرين، 23
1-6 خريطة طريق التقرير، 24

2 استخدامات المصدر المشع ومخاطره والسيطرة عليه 25
2-1 استعمالات المصادر المشعة، 25
2-2 خصائص المصدر المشع ومخاطر السلامة والأمان، 26
2-3 السلامة الإشعاعية ووقائع الأمان، 29
2-4 مسؤوليات السيطرة على المصادر المشعة في الولايات المتحدة، 31
2-5 تتبع حوادث المصدر المشع، 38
2-6 تتبع المصدر الإشعاعي المادي، 41
2-7 تحليل عواقب المصادر المشعة، 42
2-8 إدارة المصادر المشعة المهجورة في نهاية دورة الحياة، 44
2-9 الفصل الثاني: النتائج والتوصيات، 51

3 اعتماد التقنية البديلة وتطويرها 55
3-1 التقنيات البديلة للمصادر المشعة، 55
3-2 اعتبارات مؤسسية لاعتماد التقنيات البديلة، 58
3-3 اقتصاديات تتبنى التقنيات البديلة، 58

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

3-4 مروجو التقنيات البديلة، 59
3-5 التقدم في اعتماد التقنيات البديلة، 61
3-6 تطوير التقنية البديلة، 62
3-7 الفصل الثالث: النتائج والتوصيات، 67

4 مصادر الإشعاع والتقنيات البديلة في الطب والبحوث 69
4-1 تشعيع الدم، 69
4-2 المشعات البحثية، 76
4-3 العلاج الإشعاعي بالشعاع الخارجي، 79
الجراحة الإشعاعية التجسيمية، 89
4-5 العلاج الموضعي بمعدل جرعات عالية، 92
4-6 الفصل الثاني: النتائج والتوصيات، 95

5 المصادر المشعة والتقنيات البديلة في التعقيم 97
5-1 مبادئ التعقيم، 97
5-2 تعقيم الأجهزة الطبية، 99
5-3 إشعاع الأغذية، 104
5-4 تعقيم الحشرات، 109
5-5 الفصل الخامس النتائج، 113

6 المصادر المشعة والتقنيات البديلة في الاستعمالات الصناعية 115
6-1 التصوير الشعاعي الصناعي، 115
6-2 المقاييس الصناعية، 122
6-3 تسجيل قياسات الآبار، 125
6-4 أنظمة المعايرة، 133
6-5 المولد الكهربائي الحراري بالنظائر المشعة، 136
6-6 الفصل 6 النتائج والتوصيات، 139

المراجع 141

الملاحق
أ ملامح من السيرة الذاتية لأعضاء اللجنة 157
ب اجتماعات جمع المعلومات 163
ج الاختصارات 169
د مسرد المصطلحات 173
هـ الجدوى الاقتصادية لاعتماد التقنيات البديلة 177
و التعقيم باستخدام الإشعاع بوسائل مختلفة 181

ملاحظة: هذه ترجمة لتقرير الدراسة التوافقية للأكاديميات الوطنية للعلوم والهندسة والطب "National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine"، وعنوانها *المصادر المشعة: الاستعمالات والتقنيات البديلة* إلى اللغة العربية، من إعداد "BURG Translations". النسخة الأصلية من هذه المواد هي النسخة الإنجليزية. لا تقدم الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) وشركة "BURG Translations" أي ضمان ولا تتحمل أي مسؤولية عن دقة هذه الترجمة أو جودتها أو مصداقيتها أو صنعة هذه الترجمة ونشرها ولا تتحمل أي مسؤولية عن أي خسارة أو ضرر، سواء لاحقًا لها أو فيما عدا ذلك، مما قد ينشأ بشكل مباشر أو غير مباشر نتيجة لاستخدام هذه الترجمة.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

موجز

تلقت الأكاديميات الوطنية للعلوم والهندسة والطب (يشار إليها فيما يلي باسم الأكاديميات الوطنية) تكليفًا من مختبرات ساندیا الوطنية لتقييم حالة استعمالات المصادر المشعة والتقنيات البديلة (غير المشعة) في مجالات الطب والأبحاث والتعقيم وغيرها من الاستعمالات التجارية في الولايات المتحدة وعلى المستوى الدولي. وكان الغرض من الدراسة دعم الأنشطة الحالية والمستقبلية في إطار برنامج مكتب الأمن الإشعاعي التابع لإدارة الأمن النووي الوطني للحد من الاستخدام الحالي للمواد الإشعاعية عالية الخطورة في هذه الاستعمالات وتعزيز استعمال التقنيات البديلة. وفحصت الدراسة مصادر الفئات 1 و2 و3، وهي فئات المصادر الثلاث الأكثر خطورة في نظام الفئات الخمس الذي طورته الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA). ويصنف النظام المصادر في المقام الأول من حيث قدرتها على التسبب في آثار صحية حتمية[1] للشخص الذي يتعامل معها أو يتعرض لها إذا لم يتم إدارتها أو حمايتها بطريقة آمنة وسلمية. ولا يضع النظام في الاعتبار التأثيرات العشوائية، مثل تطور السرطان في المستقبل الذي يمكن أن يحدث نتيجة القرب من المصادر المشعة إذا لم يتم إدارتها بسلامة وأمان، أو العواقب الاجتماعية والاقتصادية للحوادث الإشعاعية التي تتضمن هذه المصادر المشعة. واعتمدت الوكالات التنظيمية الوطنية، بما في ذلك اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC) نظام تصنيف المصادر الخاص بالوكالة الدولية للطاقة الذرية لتنظيم سلامة وأمن المصادر المشعة.

عينت الأكاديميات الوطنية لجنة خبراء لإجراء الدراسة وإعداد تقرير فني. واستخدمت اللجنة تقريرًا سابقًا للأكاديميات الوطنية حول الموضوع نفسه[2] كخط أساس لتقييم التطورات في اعتماد التقنيات البديلة للمصادر المشعة.

وجدت اللجنة أن المصادر المشعة لا تزال مستخدمة على نطاق واسع على الصعيدين الوطني والدولي وأن هناك المزيد من المصادر عالية الخطورة (الفئة 1 والفئة 2) ومن المحتمل وجود مصادر مشعة من الفئة 3 أكثر في الولايات المتحدة اليوم مقارنة بما كان عليه الوضع قبل 12 عامًا. وعلى الرغم من إحراز تقدم في اعتماد تقنيات بديلة للمصادر المشعة، فقد تقدم الاعتماد بمعدلات مختلفة للاستعمالات المختلفة، ولم يتم تطوير تقنية بديلة مناسبة لبعض الاستعمالات. ولذلك، من المتوقع أن يستمر استخدام المصادر المشعة من الفئة 1 إلى الفئة 3 في المستقبل المنظور. ويمثل الأمان والتتبع والإدارة المناسبة لنهاية العمر عوامل هامة لتقليل المخاطر وزيادة المساءلة المرتبطة بهذه المصادر.

[1] يمثل التأثير الحتمي ذلك التأثير الذي يوجد مستوى حد أدنى للجرعة له، وعند تجاوزه، تزداد شدة التأثير الصحي مع زيادة الجرعة.

[2] NRC (National Research Council). 2008. *Radiation source use and replacement: Abbreviated version*. Washington, DC: The National Academies Press

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

توصيات اللجنة

- إعادة صياغة نظام تصنيف المصادر المشعة ليشمل المصادر المحتملة للتأثيرات الصحية الاحتمالية والآثار الاقتصادية والاجتماعية وإجراء تغييرات على الأمن وتتبع المصادر، حسب الاقتضاء.
- توسيع المتطلبات الحالية للضمانات المالية للتأكد من أنها تغطي بشكل كاف إدارة نهاية العمر للمصادر المشعة المرخصة حديثًا ووضع استراتيجية وطنية لإدارة نهاية العمر للمصادر المشعة المملوكة حاليًا والمهملة.
- إعطاء الأولوية لتمويل مشاريع البحث والتطوير التي تهدف إلى تطوير بدائل لاستخدام المصادر المشعة في الاستعمالات التي لا توجد فيها حاليًا تقنيات بديلة مقبولة غير مشعة.
- دعم دراسات التكافؤ لاستبدال المصادر المشعة واعتماد تقنية بديلة.
- بدء البحث عن بدائل لكلوريد السيزيوم لتطبيقات المعايرة.

وجدت اللجنة أن التقنيات البديلة لا توفر "حلًا واحدًا يناسب الجميع". ويتضح هذا بشكل خاص في الاستعمالات الطبية عبر البلدان مرتفعة ومنخفضة ومتوسطة الدخل بسبب التفاوتات الصارخة في الوصول إلى الرعاية الصحية والموارد. وكان لاعتماد تقنيات بديلة لعلاج السرطان في بعض البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل آثار سلبية غير مقصودة على رعاية المرضى بسبب الافتقار إلى الموارد والبنية التحتية المطلوبة التي تجعل هذه البدائل خيارات قابلة للتطبيق. وتوصي اللجنة بأن تكون الجهود التي تبذلها حكومة الولايات المتحدة والمنظمات الوطنية والدولية الأخرى للحد من استخدام المصادر المشعة عالية النشاط على مستوى العالم وفي البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل مدفوعة بفحص البنية التحتية والاحتياجات المحلية.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

الملخص

تلقت الأكاديميات الوطنية للعلوم والهندسة والطب (يشار إليها فيما يلي باسم الأكاديميات الوطنية) تكليفًا من مختبرات ساندیا الوطنية لتقييم حالة استعمالات المصادر المشعة والتقنيات البديلة (غير المشعة) في مجالات الطب والأبحاث والتعقيم وغيرها من الاستعمالات التجارية في الولايات المتحدة وعلى المستوى الدولي. وكان الغرض من الدراسة دعم الأنشطة الحالية والمستقبلية في إطار برنامج مكتب الأمن الإشعاعي التابع لإدارة الأمن النووي الوطني للحد من الاستخدام الحالي للمواد الإشعاعية عالية الخطورة في هذه الاستعمالات وتعزيز التقنيات البديلة. وفحصت الدراسة مصادر الفئات 1 و2 و3، وهي فئات المصادر الثلاث الأكثر خطورة في نظام الفئات الخمس الذي طورته الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA). ويصنف النظام المصادر في المقام الأول من حيث قدرتها على التسبب في آثار صحية حتمية[1] للأشخاص الذين يتعاملون معها أو يعرضون لها بطريقة أخرى إذا لم تتم إدارة هذه المصادر أو حمايتها بطريقة آمنة. واعتمدت الوكالات التنظيمية الوطنية، بما في ذلك اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC) نظام تصنيف المصادر الخاص بالوكالة الدولية للطاقة الذرية لتنظيم سلامة وأمن المصادر المشعة.

عينت الأكاديميات الوطنية لجنة خبراء لإجراء الدراسة وإعداد تقرير فني. ويحتوي هذا الملخص على القائمة الكاملة لنتائج اللجنة وتوصياتها، على النحو المبين أدناه.

مهمة الدراسة 1: (استخدام تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008 بعنوان *استخدام واستبدال مصدر الإشعاع* كخط أساس) لمراجعة الاستعمالات الصناعية والبحثية والتجارية الحالية (بما في ذلك الطبية) للمصادر المشعة، بما في ذلك مصادر الفئات 1 و2 و3 على النحو المحدد بواسطة الوكالة الدولية للطاقة الذرية "تصنيف المصادر المشعة"، IAEA-TECDOC-1344.

النتائج 1: يستمر استخدام المصادر المشعة على نطاق واسع، على الصعيدين الوطني والدولي، للاستعمالات في مجالات الطب والأبحاث والتعقيم وغيرها من الاستعمالات التجارية. ولم تظهر استعمالات جديدة للمصادر المشعة عالية الخطورة (الفئة 1 والفئة 2) ومتوسطة الخطورة (الفئة 3) خلال السنوات العشر إلى الخمس عشرة الماضية. وتم التخلص تدريجيًا من أحد استعمالات مصادر الفئة 1، وهو استخدام المولدات الكهروحرارية التي تعمل بالنظائر المشعة للطاقة الأرضية.

[1] يمثل التأثير الحتمي ذلك التأثير الذي يوجد مستوى حد أدنى للجرعة له، وعند تجاوزه، تزداد شدة التأثير الصحي مع زيادة الجرعة.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

النتائج 2: اتخذت حكومة الولايات المتحدة والمجتمع الدولي إجراءات لتعزيز أمن المصادر المشعة والمساءلة عنها. وتركز هذه الإجراءات في المقام الأول على المصادر عالية المخاطر (الفئة 1 والفئة 2) بسبب قدرتها العالية على التسبب في تأثيرات حتمية لدى الأشخاص الذين يتعاملون معها أو يتعرضون لها. ويحظى الأمن والمساءلة لمصادر الفئة 3 بأولوية أقل بسبب قدرتهما المنخفضة على التسبب في تأثيرات حتمية.

النتائج 3: في الولايات المتحدة، يتم تتبع مصادر الفئة 1 والفئة 2 بواسطة النظام الوطني لتتبع المصدر، وهو قاعدة بيانات مركزية غير عامة تديرها اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (NRC) منذ عام 2008. وزاد عدد مصادر الفئة 1 والفئة 2 على مدى 12 عامًا الماضية بنحو 30 في المائة.

النتائج 4: تجعل التدابير الأمنية الأقل صرامة والافتقار إلى التتبع الوطني والدولي لمصادر الفئة 3 هذه الفئة عرضة لمعاملات غير مصرح بها وللسرقة.

النتائج 5: خلصت تحليلات النمذجة الحديثة للأحداث الإشعاعية إلى أن إطلاق إشعاع صغير وتعرضات صغيرة للإشعاع للسكان الذين تقل أعمارهم عن المستويات التي يمكن أن تسبب تأثيرات حتمية قد يكون لها عواقب اجتماعية واقتصادية خطيرة وطويلة الأجل. وتدعم العديد من الأحداث الإشعاعية الواقعية هذا الاستنتاج. وقد يوفر نظام أمان يعتمد فقط على التأثيرات الحتمية للمصادر المشعة مستوى غير كافٍ من الحماية للمجتمع.

التوصية أ: يجب على الوكالة الدولية للطاقة الذرية ولجنة التنظيم النووي الأمريكية والمنظمات الأخرى النظر في إعادة صياغة خطط تصنيف المصادر الخاصة بهم لتضع في الاعتبار كل من (أ) الآثار الصحية الاحتمالية مثل تطور السرطان لاحقًا في الحياة و(ب) الآثار الاقتصادية والاجتماعية. وستؤدي إعادة الصياغة هذه إلى وصف أكثر شمولاً للمخاطر الكلية، بما في ذلك العواقب المحتملة إذا لم تتم إدارة المصادر بأمان أو حمايتها بشكل آمن.

التوصية ب: يجب على الوكالة الدولية للطاقة الذرية واللجنة التنظيمية النووية الأمريكية والمنظمات الأخرى إجراء تغييرات على إرشادات ولوائح الأمان وتتبع المصادر بناءً على نتيجة إعادة الصياغة في التوصية أ.

التوصية ج: بالتوازي مع ذلك، يجب على اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية أن تُدخل تدريجياً مصادر الفئة 3 في نظام التتبع الوطني للمصادر الحالي. وسوف يوفر هذا التتبع محاسبة أكثر دقة في الجرد الوطني لمصادر الفئة 3 وسيزيد من المساءلة عن امتلاك هذه المصادر وتنظيم استخدامها. ويجب على حكومة الولايات المتحدة اتخاذ قرارات مستنيرة بشأن التحسينات الأمنية المحتملة لمصادر الفئة 3 في المنشآت التي توجد بها هذه المصادر.

النتائج 6: لن يتحقق هدف الحد من المخاطر لاستبدال المصادر المشعة ببدائل غير مشعة الذي وضعته الحكومة الأمريكية إلا بعد إزالة المصادر غير المستخدمة والتخلص منها بشكل صحيح. وقد تكون التكاليف المرتفعة للتخلص ومحدودية الخيارات والموارد والتوجيهات للتخلص محليًا ودوليًا من الأمور المحظورة سواء لاعتماد البدائل أو للتخلص المناسب من المصادر المشعة عند انتهاء عمرها الافتراضي.

التوصية د: يجب أن توسع اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية متطلباتها الحالية للضمانات المالية للتأكد من أنها تغطي بشكل كافٍ إدارة نهاية العمر للمصادر المشعة المرخصة حديثًا. ويجب على حكومة الولايات المتحدة أيضًا وضع وتنفيذ إستراتيجية وطنية لإدارة نهاية العمر للمصادر المشعة المملوكة والمهملة حاليًا من الفئة 1 والفئة 2 ويجب أن تضعها الاعتبار لمصادر الفئة 3.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

مهمة الدراسة 2: تحديد الاستخدامات التي يمكن من أجلها استبدال مصدر مشع بتقنيات بديلة مكافئة (أو محسّنة) من غير النظائر المشعة المتوفرة بالفعل في السوق ويمكن أن تصبح متاحة في السوق كجيل جديد أو تقنيات ناشئة في السنوات العشر القادمة وتقييم الاستعمالات التي لا توجد لها تقنيات بديلة حاليًا، لكنها يمكن أن تخفف بشكل كبير من المخاطر المرتبطة بالتقنيات الحالية التي تستخدم النويدات المشعة عالية الخطورة.

النتائج 7: ساهمت العديد من المنظمات الحكومية وغير الحكومية الوطنية والدولية في تزايد بروز التقنيات البديلة كطريقة لتقليل المخاطر الأمنية الناجمة عن المصادر المشعة. ومع ذلك، لا توجد منظمة مجهزة حاليًا *للترويج* لمجموعة واسعة من التقنيات البديلة ومعالجة قضايا اعتمادها في سياق عالمي. وتستطيع هذه المنظمة أو شبكة المنظمات توحيد معلومات الموارد التقنية والتنظيمية والمالية والسياسية والخاصة بالبلد للتأثير على القرارات المتعلقة باعتماد تقنيات بديلة وتسهيل الانتقال إلى التقنيات البديلة للاستعمالات الطبية والبحثية والتجارية، عند الاقتضاء.

النتائج 8: كان التقدم في تطوير التقنيات البديلة متفاوتًا عبر مختلف الاستعمالات والنويدات المشعة (راجع الجدول S.1). وباستثناء تشعيع الدم، حيث تُعتبر تقنية الأشعة السينية معادلة لإشعاع السيزيوم 137 والعلاج الشعاعي الخارجي، حيث تُعتبر تقنية المسرع الخطي أفضل من العلاج عن بعد بالكوبالت 60، لا توجد تقنيات بديلة مقبولة على نطاق واسع للاستعمالات الأخرى. وفي بعض الاستعمالات، لم يتم تطوير تقنية بديلة مناسبة.

كما أوضحنا في النتيجة 12، على الرغم من التقدم التقني للاستعمالات الطبية، إلا أنه توجد تحديات في اعتماد تقنيات بديلة في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل.

النتائج 9: تستثمر العديد من الشركات الكبيرة في البحث والتطوير لتقديم حلول لتحديات محددة مرتبطة باعتماد التقنيات البديلة. وقد يستغرق انتقال فكرة إبداعية إلى منتج تجاري، إذا نجح الأمر، سنوات (غالبًا أكثر من عقد) ويتطلب ذلك استثمارات كبيرة.

النتائج 10: لدى العديد من الشركات الأصغر مشاريع تطوير تقنية بديلة قيد التنفيذ بدعم مالي من برنامجي أبحاث ابتكار الأعمال الصغيرة ونقل تقنية الأعمال الصغيرة التي تديرها الإدارة الوطنية للأمن النووي.

التوصية هـ: ينبغي أن تعطي الإدارة الوطنية للأمن النووي الأولوية لتمويل مشاريع البحث والتطوير التي تهدف إلى تطوير بدائل لاستخدام المصادر المشعة في الاستعمالات التي لا توجد فيها حاليًا تقنيات بديلة مقبولة غير مشعة.

النتائج 11: يعد أبرز تقدم في اعتماد التقنيات البديلة هو الاعتماد العالمي لتقنيات الأشعة السينية لتشعيع الدم والأبحاث. وفي الولايات المتحدة، تعد الحوافز المالية التي تقدمها الحكومة من خلال مشروع استبدال مشع السيزيوم مساهمًا رئيسيًا في الانتقال من مشعات السيزيوم إلى تقنيات الأشعة السينية والتخلص التدريجي من السيزيوم 137 في شكل كلوريد السيزيوم من الاستعمالات الطبية والبحثية. ويمكن إحراز تقدم إضافي في استبدال مشعات السيزيوم المستخدمة في الأبحاث من خلال مساعدة مجتمع البحث في تصميم وتمويل دراسات التكافؤ.

التوصية و: يجب أن تتعامل الإدارة الوطنية للأمن النووي مع الشركاء الفيدراليين مثل وزارة الصحة والخدمات الإنسانية ومؤسسة العلوم الوطنية وإدارة الغذاء والدواء لدعم دراسات التكافؤ للباحثين الذين يفكرون في استبدال مشعات أبحاث السيزيوم أو الكوبالت بتقنيات بديلة. ويجب أن تكون نتائج هذه الدراسات متاحة على نطاق واسع.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

النتائج 12: لا توفر التقنيات البديلة "حلًا واحدًا يناسب الجميع"، ويتضح هذا بشكل خاص في الاستعمالات الطبية عبر البلدان مرتفعة ومنخفضة ومتوسطة الدخل بسبب التفاوتات الصارخة في الوصول إلى الرعاية الصحية والموارد. وكان لاعتماد تقنيات بديلة لعلاج السرطان في بعض البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل آثار سلبية غير مقصودة على رعاية المرضى بسبب الافتقار إلى قوى العمل المدربة والموارد والبنية التحتية المطلوبة لجعل هذه البدائل خيارات قابلة للتطبيق.

التوصية ز: يجب أن تكون الجهود التي تبذلها حكومة الولايات المتحدة والمنظمات الوطنية والدولية الأخرى للحد من استخدام المصادر المشعة عالية النشاط على مستوى العالم وفي البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل مدفوعة بفحص الموارد والبنية التحتية والاحتياجات المحلية. وفي الحالات التي لا تستطيع فيها الموارد والبنية التحتية المحلية دعم البدائل، يجب أن تركز الجهود على تعزيز الأمن الإشعاعي للمصادر المشعة الحالية والمساعدة في بناء البنية التحتية ودعم مشاريع البحث والتطوير لتعديل التقنيات للعمل بفعالية في البيئات محدودة الموارد، على سبيل المثال، عند وجود مصدر كهرباء غير موثوق به.

النتائج 13: يحدث انتقال تدريجي إلى التقنيات البديلة في استعمالات التعقيم. وازداد استخدام تقنيات شعاع الإلكترون (e-beam) في تعقيم الأجهزة الطبية خلال السنوات العشر إلى الخمس عشرة الماضية على الصعيدين المحلي والدولي، ومن المتوقع أن تستمر في الزيادة لتلبية الطلب المتزايد على هذا الاستعمال. وأعلنت شركات عديدة أيضًا عن خطط لفتح منشآت جديدة للتعقيم بالأشعة السينية. ويتزايد قبول التقنيات البديلة لاستعمالات التعقيم الأخرى، بما في ذلك تشعيع الأغذية لأجل السلامة وعلاجات الصحة النباتية وتعقيم الحشرات، كبدائل قابلة للتطبيق للمصادر المشعة في العديد من البلدان.

النتائج 14: تم إحراز تقدم ضئيل على الصعيد المحلي في اعتماد تقنيات بديلة لبعض الاستعمالات التجارية الأخرى، لا سيما في بعض استعمالات الاختبار غير المدمر وتسجيل قياسات الآبار. ويرجع السبب في ذلك إلى عدم وجود بدائل مجدية أو فعالة من حيث التكلفة في الوقت الحالي، حيث إن البدائل إما تقوض الأداء أو لا تقدم تحسينات فيه، أو تنتج بيانات عن المواد والهياكل لا يمكن مقارنتها بشكل مباشر بتلك التي تنتجها المصادر المشعة.

التوصية ح: يجب أن تتعامل الإدارة الوطنية للأمن النووي مع المكاتب الأخرى داخل وزارة الطاقة والمؤسسة الوطنية للعلوم والجمعيات المهنية لدعم دراسات التكافؤ لمقدمي خدمات تسجيل قياسات الآبار والتصوير الشعاعي الصناعي الذين يفكرون في استبدال مصادرهم المشعة واعتماد تقنية بديلة. ويجب أن تكون نتائج هذه الدراسات متاحة على نطاق واسع.

النتائج 15: لم يتم إحراز أي تقدم على الصعيدين المحلي والدولي مع اعتماد تقنيات بديلة لأنظمة المعايرة لتحل محل مصادر السيزيوم 137 والكوبالت 60. ولا توجد بدائل واضحة غير مشعة لاستبدال مصادر كلوريد السيزيوم المستخدمة في هذه الاستعمالات، ولا يوجد بحث وتطوير مكرس حاليًا لاستكشاف البدائل. ويشكل نقص البدائل عقبة في الجهود العالمية للتخلص من السيزيوم 137 في شكل كلوريد السيزيوم.

التوصية ط: يجب أن يشارك المعهد الوطني للمواصفات القياسية والتكنولوجيا مع المجتمع البحثي ومع الشركاء الفيدراليين والصناعيين والدوليين لبدء البحث عن بدائل كلوريد السيزيوم لاستعمالات المعايرة. ويجب أن تبدأ هذه المشاركة على الفور للتحضير للتخلص المستقبلي المحتمل من استخدام السيزيوم 137 في شكل كلوريد السيزيوم.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

الجدول S.1 التقدم المحرز في اعتماد تقنيات بديلة في تطبيقات مختلفة

الطلب (تمت مناقشة الفصل)	الأجهزة الشائعة (النظائر الأولية)	التقنية البديلة	اتجاه اعتماد البديل	الدوافع الرئيسية للاعتماد (بخلاف المخاطر الأمنية)	تحديات الاستبدال الأولية	مجالات البحث والتطوير الواعدة لتسهيل الاعتماد
الحالة الطبية						
تشعيع الدم (الفصل 4)	المشعات ذاتية الحماية (السيزيوم 137 والكوبالت 60)	تقنية الأشعة السينية	الاعتماد الواسع على الصعيدين الوطني والدولي	مشروع استبدال مشع السيزيوم (CIRP) في الولايات المتحدة والمبادرات التنظيمية الحكومية الوطنية في البلدان الأخرى؛ توفير التكاليف طوال دورة حياة الجهاز؛ والفعالية	مرجعية المستخدم	منهجيات الحد من مسببات الأمراض لخلايا الدم الحمراء
علاج السرطان - العلاج الشعاعي الخارجي (الفصل 4)	العلاج عن بُعد (الكوبالت 60)	المسرّع الخطي	التخلص التدريجي شبه الكامل من المصادر المشعة في البلدان مرتفعة الدخل والعديد من البلدان متوسطة الدخل؛ وزيادة الاعتماد في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل	تعدد الاستعمالات؛ وتقديم العلاج الفائق؛ وتحسين النتائج للمرضى؛ والعلاجات الأقصر	لا توجد في البلدان ذات الدخل المرتفع؛ اقتصادية؛ والبنية التحتية؛ والموارد في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل	المسرعات الخطية ميسورة التكلفة والمقاومة لانقطاع التيار الكهربائي
علاج السرطان - الجراحة الإشعاعية التجسيمية (الفصل 4)	الجراحة الإشعاعية المعتمدة على أشعة غاما بما في ذلك تقنية Gamma Knife® (سكين غاما) (الكوبالت 60)	الجراحة الإشعاعية المعتمدة على المسرّع الخطي بما في ذلك تقنية CyberKnife®	زيادة الاعتماد في البلدان ذات الدخل المرتفع؛ انخفاض اعتماد الجراحة الإشعاعية بشكل عام في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل	تنوع موقع العلاج؛ انخفاض تكاليف الإعداد	الدقة الأقل المفترضة؛ تفضيل المستخدم	التقنيات التي تهدف إلى تقليل تكاليف الإعداد بما في ذلك الحماية
علاج السرطان - المعالجة الموضعي بمعدل جرعات عالية (الفصل 4)	المعالجة الموضعية بمعدل جرعات عالية (HDR) (إيريديوم 192)	العلاج بالأشعة الخارجية؛ المعالجة الموضعية الإلكترونية	بعض الاعتماد في البلدان ذات الدخل المرتفع	سداد التكاليف المناسب للعلاج الإشعاعي الخارجي	لا تعد المعالجة الموضعية الإلكترونية بديلاً قابلاً للتطبيق للاستعمالات الأكثر شيوعًا للمعالجة الموضعية ذات معدلات الجرعات العالية (HDR) لعلاج السرطانات النسائية	المعالجة الموضعية الإلكترونية المناسبة لعلاج السرطانات النسائية
الأبحاث (الفصل 4)	المشعات ذاتية الحماية (السيزيوم 137 والكوبالت 60)	تقنية الأشعة السينية	زيادة الاعتماد	مشروع استبدال مشع السيزيوم (CIRP) في الولايات المتحدة والمبادرات التنظيمية الحكومية الوطنية في البلدان الأخرى؛ توفير التكاليف طوال دورة حياة الجهاز	دراسات التكافؤ؛ البيانات القديمة؛ الموارد الشحيحة في المؤسسات البحثية	دراسات التكافؤ؛ تطوير أجهزة الأشعة السينية بمتوسط طاقة 600 كيلو إلكترون فولت وأعلى

تابع

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

الجدول S.1 تابع

الطلب (تمت مناقشة الفصل)	الأجهزة الشائعة (النظائر الأولية)	التقنية البديلة	اتجاه اعتماد البديل	الدوافع الرئيسية للاعتماد (بخلاف المخاطر الأمنية)	تحديات الاستبدال الأولية	مجالات البحث والتطوير الواعدة لتسهيل الاعتماد
التعقيم						
تعقيم الأجهزة الطبية (الفصل 5)	المشعات البانورامية (الكوبالت 60)	شعاع الإلكترون والأشعة السينية	زيادة الاعتماد	احتياجات السوق بسبب الطلب المتزايد؛ وتدرة توافر الكوبالت 60؛ والمخاوف التي تتعلق بالسلامة و التنظيم المحتمل الأكثر صرامة للتبخير بأكسيد الإيثيلين	التكافؤ وإعادة التحقق	تطوير المسرعات الخطية صغيرة الحجم لتقليل تكاليف رأس المال؛ وتطوير مصادر الأشعة السينية الاقتصادية
علاجات سلامة الغذاء (الفصل 5)	المشعات البانورامية أو المشعات الأخرى عالية ومنخفضة النشاط (الكوبالت 60)	شعاع الإلكترون والأشعة السينية	الركود في الولايات المتحدة؛ والتراجع في أوروبا؛ وزيادة الاعتماد في أجزاء معينة من العالم، خاصة في الصين	احتياجات السوق	القبول العام؛ عدم تنسيق اللوائح في التجارة الدولية؛ الاستعانة بمصادر خارجية للحصول على العلاج؛ متطلبات وضع الملصقات	التطوير لخفض تكاليف رأس المال؛ المزيد من تطوير مصادر الأشعة السينية الاقتصادية
معالجات الصحة النباتية (الفصل 5)	المشعات البانورامية أو المشعات الأخرى عالية ومنخفضة النشاط (الكوبالت 60)	شعاع الإلكترون والأشعة السينية	متزايدة	احتياجات السوق؛ بساطة العلاج	الاقتصاديات؛ الضغوط لتقليل استخدام التبخير بيروميد الميثيل	التطوير لخفض تكاليف رأس المال؛ المزيد من تطوير مصادر الأشعة السينية الاقتصادية
تعقيم الحشرات (الفصل 5)	المشعات البانورامية أو المشعات الأخرى عالية النشاط (الكوبالت 60)؛ (السيزيوم 137 أو الكوبالت 60)	شعاع الإلكترون والأشعة السينية والتعديل الوراثي	متزايدة	توافر ونقل مشعات الحماية الذاتية؛ زيادة الطلب على الاستعمالات خاصة لمكافحة البعوض الإقليمية؛ التصور العام السلبي تجاه التعديل الوراثي للحشرات	أول تجربة غير مواتية بسبب عدم موثوقية أجهزة الأشعة السينية المبكرة (الجيل الأول)	تطوير مصادر الأشعة السينية لتتناسب مع متطلبات الاستخدام

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

الاستعمالات الصناعية						
التصوير الشعاعي الصناعي (الفصل 6)	التصوير الشعاعي (الكوبالت 60 والإيريديوم 192 والسيلينيوم 75)	الأشعة السينية والموجات فوق الصوتية	متزايدة	التكامل مع المصادر المشعة	لا يوجد بديل واحد مقابل واحد؛ المتطلبات الفنية والتشغيلية في البيئات الصعبة؛ التكاليف؛ المستوى الأعلى من المؤهلات الفنية؛ التصوير غير المباشر مقابل التصوير المباشر	تمثيل الصورة للموجات فوق الصوتية؛ الحجم والوزن وتحسينات القوة
المقاييس الصناعية (الفصل 6)	السيزيوم 137، الكوبالت 60	الموجات فوق الصوتية والضغط التفاضلي والرادار الموجه	متزايدة	التكامل مع المصادر المشعة	المتطلبات التشغيلية في البيئات الصعبة	تحسين متانة البدائل في البيئات الصعبة
تسجيل قياسات الآبار (الفصل 6)	أميريسيوم 241 مخلوط بالبريليوم	مولدات النيوترونات	الركود	لا يوجد	انخفاض الطلب في السوق على التطبيق؛ التكافؤ والموثوقية؛ البيانات القديمة	دراسات التكافؤ؛ التحسينات في موثوقية مولد النيوترون
	السيزيوم 137 (السيراميك أو الزجاج)	صور الأشعة السينية	لا يوجد	لا يوجد		تطوير مصدر أشعة سينية صغير الحجم ومتين؛ الحاجة للإشعاع متماثل الخواص
أدوات المُعايرة (الفصل 6)	كلوريد السيزيوم 137	لا يوجد	لا يوجد	السياسة الممكنة لإزالة كلوريد السيزيوم من الاستعمالات الطبية والبحثية والتجارية	يُنظر إليه حاليًا كاستعمال يحتاج إلى الإعفاء من جهود الاستبدال	تطوير واستخدام شكل أقل تشتتًا من السيزيوم 137؛ متوسط الأشعة السينية عند 600 كيلو إلكترون فولت وأعلى
	كوبالت 60	لا يوجد	لا يوجد	لا يوجد		لا يوجد
المولدات الكهروحرارية التي تعمل بالنظائر المشعة للاستعمالات الفضائية	البلوتونيوم 238 في شكل أكسيد مضغوط	لا يوجد	لا يوجد	لا يوجد	غير معترف بها كمشكلة	لا يوجد
	السترونتيوم 90	لا يوجد	لا يوجد	لا يوجد		لا يوجد

ملاحظة: CIRP = مشروع استبدال مشع السيزيوم؛ e-beam = شعاع الإلكترون؛ EtO = أكسيد الإيثيلين؛ HDR = معدل جرعة عالية؛ keV = كيلو إلكترون فولت؛ linac = المسرع الخطي؛ LMIC = بلد منخفض ومتوسط الدخل.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

1

الخلفية ومهمة الدراسة

تُستخدم المصادر المشعة في مجموعة متنوعة من الاستعمالات الطبية والبحثية والتعقيم الأساسية والمفيدة وغيرها من الاستعمالات التجارية. وتشمل هذه الاستعمالات علاج السرطان، وتشعيع الدم لمرضى زراعة الأعضاء وحيوانات المختبر للأبحاث، وتعقيم الأجهزة الطبية، والتشعيع للحد من انتقال الأمراض المنقولة بالغذاء وحماية المحاصيل المحلية من الأنواع الغازية، والاختبار غير المدمر للهياكل والمعدات الصناعية، واستكشاف التكوينات الجيولوجية للعثور على رواسب النفط والغاز، ومعايرة الأجهزة. ويتم تخزين المصادر المشعة المستخدمة في هذه الاستعمالات في مرافق جامعية وطبية وبحثية وحكومية وتجارية وغيرها من المرافق التي يتم الوصول إليها واستخدامها بواسطة موظفين مؤهلين. وفي حالة التعامل مع هذه المصادر بشكل خاطئ، لا سيما مع وجود نية خبيثة في الحصول على سلاح إشعاعي (RDD)، فقد تتسبب في أضرار وإصابات جسيمة. ورغم أن الوفيات الفورية والتأثيرات الحتمية بسبب الإشعاع من سلاح إشعاعي (RDD) غير مرجحة، إلا أن العواقب المجتمعية قد تكون وخيمة بسبب التنظيف المطلوب وفقدان الوصول إلى المناطق المتضررة. وقد تكون الأضرار الاقتصادية الناجمة عن تحريم المنطقة وإعادة البناء كبيرة أيضًا، وقد تصل إلى مليارات الدولارات.

لم يتم نشر سلاح إشعاعي (RDD) في الولايات المتحدة أو في أي مكان آخر.[1] ومع ذلك، تبرز الهجمات الإرهابية المحلية والدولية والعديد من المحاولات لتهريب المواد المشعة أو استخدام المصادر المشعة لأغراض خبيثة الحاجة إلى التحضير لأسلحة إشعاعية (RDD). وعلى مستوى العالم، تم الإبلاغ عن حوالي 3,700 نشاط وأحداث غير مصرح بها تتضمن مواد نووية ومشعة في الفترة من 1992 إلى 2019،[2] بما في ذلك حوادث الاتجار والاستخدام الضار (راجع، على سبيل المثال، إلفرينك (Elfrink)، 2017؛ مالون وسميث (Malone and Smith)، 2016؛ شروير وروبين(Schreuer and Rubin)، 2016.

تقع مسؤولية تأمين المواد النووية والمشعة على عاتق المرخص لهم الذين يمتلكون هذه المواد. ورغم قدرة التدابير الأمنية المناسبة على الحد من المخاطر التي تشكلها المصادر المشعة، فإن النهج الأكثر مباشرة للحد من المخاطر هو التخلص من استخدام النظائر المشعة واستبدالها بتقنيات لا تشكل مثل هذه المخاطر لكنها يمكن أن تؤدي الوظيفة المقصودة للمصادر المشعة بشكل مناسب. وأدركت المستشفيات ومراكز الأبحاث والحكومات بشكل متزايد مخاطر ومسؤوليات السلامة والأمن المرتبطة بامتلاك المصادر المشعة، وتتخلص منها في بعض الحالات طواعية وتستبدلها بتقنيات بديلة.

يقدم هذا الفصل معلومات أساسية عن طلب الدراسة ونظام تصنيف مصادر الإشعاع الحالي ويناقش تنفيذ توصيات تقرير الأكاديميات الوطنية للعلوم والهندسة والطب لعام 2008 (يشار إليها فيما يلي باسم الأكاديميات الوطنية) (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008) حول الموضوع نفسه.

[1] ستيفن موسولينو، مختبر بروكهافن الوطني، عرض تقديمي للجنة في 20 نوفمبر 2020.

[2] خوسيه جارسيا ساينز، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، عرض تقديمي أمام اللجنة في 10 يونيو 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

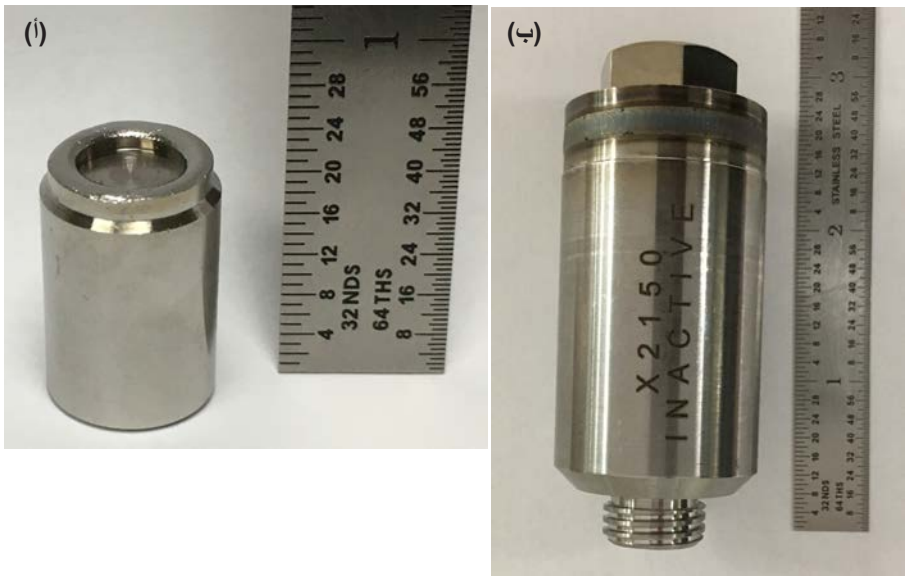
Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

1-1 طلب الدراسة

وسع مكتب الأمن الإشعاعي (ORS) داخل الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA) التابعة لوزارة الطاقة (DOE) نطاق تركيز جهوده من تشجيع تدابير الحماية المادية الطوعية لمصادر الإشعاع لتشمل تعزيز التقنيات البديلة. وتلقى مكتب الأمن الإشعاعي (ORS) تكليفًا "بالعمل مع الحكومة وسلطات إنفاذ القانون والشركات في جميع أنحاء العالم لحماية المصادر المشعة المستخدمة للأغراض الطبية والبحثية والتجارية؛ وإزالة المصادر المشعة المهملة والتخلص منها؛ وتقليل الاعتماد العالمي على المصادر المشعة عالية النشاط من خلال الترويج للتقنيات البديلة غير المشعة."[3]

طلب مكتب الأمن الإشعاعي (ORS) أن تراجع الأكاديميات الوطنية وتجري تقييمًا للتطورات في استعمالات المصادر المشعة والتقنيات البديلة العملية لاستبدال المصادر المشعة المستخدمة حاليًا في تلك الاستعمالات. وتهدف هذه الدراسة إلى توفير المعلومات الفنية والرؤى المستقلة التي يمكنها دعم الأنشطة الحالية والمستقبلية لمكتب الأمن الإشعاعي (ORS) بهدف تقليل الاستخدام الحالي للمواد الإشعاعية عالية الخطورة في هذه الاستعمالات وتعزيز التقنيات البديلة. وفوض مكتب الأمن الإشعاعي (ORS) مختبرات ساندیا الوطنية (المشار إليها باسم ساندیا في هذا التقرير) لإدارة الدراسة. وتدعم ساندیا مهمة مكتب الأمن الإشعاعي (ORS) من خلال تركيب أنظمة الأمان في المواقع التي تستخدم مصادر إشعاعية عالية النشاط في الولايات المتحدة وعلى الصعيد الدولي، وعن طريق تشجيع المستخدمين على استبدال المصادر المشعة عالية النشاط لتحل محلها تقنيات بديلة (من غير النظائر المشعة).

تعد المصادر التي نُوقشت في هذا التقرير في الأساس مصادر مشعة مُحكمة، وعادة ما تكون مادة إشعاعية ذات تغليف مزدوج في حاويات من الفولاذ المقاوم للصدأ قبل استخدامها في الأجهزة. وتمنع الكبسولة المواد المشعة من الانطلاق في ظل العمليات العادية أو في معظم الظروف العرضية. وعادة ما تكون المصادر المشعة المُحكمة في شكل قطعة معدنية صغيرة منتظمة (راجع الشكل 1-1). وفي معظم الاستعمالات، يتم تثبيت مصدر إشعاعي مُحكم في جهاز مصمم إما للسماح للمصدر بالتحرك بأمان داخل وخارج الدرع الإشعاعي حيث يتم تخزينه أو للسماح بإطلاق حزمة من الإشعاع من المصدر المحمي. وتستخدم بعض الأجهزة الإشعاعية مصادر متعددة. وتشكل المصادر المُحكمة، عندما تكون سليمة، عادة خطرًا للتعرض للإشعاع الخارجي فقط. ومع ذلك، ففي حالة اختراق المصادر أو تسربها، فقد تتسبب أيضًا في التعرض الداخلي من خلال الاستنشاق أو الابتلاع.



الشكل 1-1 المصادر المشعة المُحكمة. (أ) السيزيوم-137 (حتى 10 كوري) مصدر من الفئة 3، (ب) الأميريسيوم-البريليوم (10-15 كوري) مصدر من الفئة 2 أو 3.
المصدر: QSA Global, Inc.

[3] Office of Radiological Security, National Nuclear Security Administration, https://www.energy.gov/nnsa/office-radiological-security-ors.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

تستخدم هذه الدراسة تقرير الأكاديميات الوطنية السابق (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008؛ راجع القسم 1-4 للاطلاع على ملخص للتوصيات الرئيسية لهذا التقرير) كخط أساس لتقييم التطورات في استخدام المصادر المشعة والتقنيات البديلة. ومع ذلك، تتضمن هذه الدراسة نطاقًا موسعًا يشمل التطورات المحلية والدولية في استعمالات المصادر المشعة. علاوة على ذلك، بينما اقتصرت دراسة الأكاديميات الوطنية السابقة على مراجعة المصادر عالية النشاط (الفئة 1 والفئة 2)، فإن هذه الدراسة تستعرض أيضًا مصادر النشاط المعتدل (الفئة 3). ويتم عرض بيان المهمة الكامل للدراسة في الشريط الجانبي 1-1. وتشير التقديرات الأخيرة إلى تواجد ما يقرب من 80,000 مصدر من الفئة 1 والفئة 2 في الولايات المتحدة. ولا يوجد تقدير حالي لعدد مصادر الفئة 3. وفي حوالي عام 2008، جمعت هيئة التنظيم النووي الأمريكية (US NRC) البيانات لمرة واحدة وقدرت عدد مصادر الفئة 3 في الولايات المتحدة بحوالي 5,200.[4]

نفذت هذه الدراسة لجنة المصادر المشعة: الاستعمالات والتقنيات البديلة (المشار إليها باسم "اللجنة" في هذا التقرير)، التي عينها رئيس الأكاديمية الوطنية للعلوم. ويتم إدراج السير الذاتية الموجزة لأعضاء اللجنة والموظفين المشاركين في هذه الدراسة في الملحق أ. وتتكون اللجنة من خبراء في التخصصات ذات الصلة بطلب الدراسة وتشمل المستخدمين والمطورين والمنفذين للمصادر المشعة والتقنيات البديلة في الطب والبحث والتعقيم، وغيرها من الاستعمالات الصناعية. وتضم اللجنة خبراء في سلامة وأمن المصادر المشعة والتحليلات الاقتصادية. وعمل عضوان من اللجنة أيضًا في اللجنة التي أجرت دراسة الأكاديميات الوطنية لعام 2008 حول الموضوع نفسه.

جمعت اللجنة المعلومات اللازمة لكتابة تقريرها من يناير 2020 إلى مارس 2021. وتلقت اللجنة خلال تلك الفترة إحاطات من الخبراء الوطنيين والدوليين في الموضوع، بما في ذلك الممثلين الفيدراليين وممثلي الولايات، وخبراء المختبرات الوطنية، وممثلي الصناعة والشركات الصغيرة، وممثلين من الاتحادات المهنية. وتُنشر العروض التقديمية المقدمة إلى اللجنة على الموقع الإلكتروني للأكاديميات الوطنية.[5] وقدم موظفون من عدة أقسام في الوكالة الدولية للطاقة الذرية بشكل جماعي عدة ساعات من الإحاطات حول أنشطة الوكالة المتعلقة بالمصادر المشعة والتقنيات البديلة لجميع الاستعمالات التي جرى فحصها في هذا التقرير. ويوفر الملحق "ب" قائمة العروض التقديمية التي تلقتها اللجنة خلال اجتماعات جمع المعلومات. وتلقت اللجنة أيضًا تعليقات مكتوبة، مطلوبة وغير مطلوبة، من الوكالات الحكومية والجمعيات الصناعية والخبراء الفنيين. وكانت هذه التعليقات مفيدة في إطلاع اللجنة على وجهات النظر المتعلقة بالدراسة والكشف عن مصادر البيانات والوثائق المفيدة.

الشريط الجانبي 1-1
بيان المهمة

ستُعين الأكاديميات الوطنية لجنة مخصصة من الخبراء لتنفيذ المهام الرئيسية:

1. (استخدام تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008 *استخدام مصدر الإشعاع واستبداله* كخط أساس) لمراجعة الاستعمالات الصناعية والبحثية والتجارية الحالية (بما في ذلك الطبية) للمصادر المشعة، بما في ذلك مصادر الفئات 1 و2 و3 على النحو المحدد في "تصنيف المصادر المشعة" للوكالة الدولية للطاقة الذرية" والوثيقة التقنية للوكالة الدولية للطاقة الذرية-1344 ()؛ و
2. تحديد الاستخدامات التي يمكن من أجلها استبدال مصدر مشع بتقنيات بديلة مكافئة (أو محسّنة) من غير النظائر المشعة المتوفرة بالفعل في السوق ويمكن أن تصبح متاحة في السوق كجيل جديد أو تقنيات ناشئة في السنوات العشر القادمة وتقييم الاستعمالات التي لا توجد لها تقنيات بديلة حاليًا، لكنها يمكن أن تخفف بشكل كبير من المخاطر المرتبطة بالتقنيات الحالية التي تستخدم النويدات المشعة عالية الخطورة.

سيبحث التقييم التطورات المحلية والدولية في تطبيقات المصادر المشعة والتقنيات البديلة الممكنة. بالإضافة إلى ذلك، سيستخدم التقييم المعايير لتقييم الجدوى الفنية الشاملة ونضج تلك التقنيات، بما في ذلك مستوى الاستعداد لتكنولوجيا الطاقة (TRL). علاوة على ذلك، سوف يتولى تقييم التقنيات البديلة تقدير مدى جاذبيتها وجدواها للمنظمات بالنظر إلى تبنيها أو الانتقال إليها.

[4] رسالة من جورج سميث، هيئة التنظيم النووي الأمريكية، إلى أورانيا كوستي، الأكاديميات الوطنية، 5 فبراير 2021.
[5] يُرجى الاطلاع على https://www.nationalacademies.org/our-work/radioactive-sources-applications-and-alternative-technologies.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

نتيجة جائحة فيروس كورونا (كوفيد-19) وما ارتبط بها من قيود على السفر وإلغاء الفعاليات الكبيرة، انعقدت جميع اجتماعات اللجنة، باستثناء الاجتماع الأول في يناير 2020، عن بُعد. وتكيفت اللجنة بسرعة وبدعم من موظفي الأكاديميات الوطنية، مع التفاعلات الافتراضية للتعامل مع بيان المهام وإصدار هذا التقرير. ورغم أن اللجنة لم تستفد من الديناميكيات الشخصية بين الأعضاء أو مع الخبراء الخارجيين، إلا أن النتيجة الإيجابية للتفاعلات الافتراضية كانت إمكانية الوصول إلى عدد من الخبراء الوطنيين والدوليين الذين ربما لم يكونوا متاحين للاجتماعات الشخصية.

تؤكد اللجنة على النقاط التالية المتعلقة بنهجها في الاستجابة لبيان المهمة:

1. تتفق مع توصية تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008 بشأن التخلص من السيزيوم 137 في شكل كلوريد السيزيوم من الاستعمالات التجارية (راجع القسم 1-4-2 من هذا التقرير). ويجعل انتشار كلوريد السيزيوم ووجوده في المراكز الطبية والبحثية في جميع أنحاء الولايات المتحدة وأماكن أخرى منه مصدر قلق خاص.
2. على الرغم من النقطة (1)، لا تصدر اللجنة أحكامًا قيمة فنية تتعلق بحجم المخاطر المرتبطة بمختلف المصادر المشعة أو النظائر المشعة، ولا تحاول إعطاء الأولوية لاستبدال بعض المصادر أو النظائر المشعة على غيرها. والسبب في ذلك أن اللجنة لم تصل إلى المعلومات المتعلقة بالانتشار وغيرها من الخصائص للنظائر المشعة التي نُوقشت في هذا التقرير أو المعلومات المتعلقة بأمن المرافق التي يتم تخزين هذه المصادر فيها.
3. هي لا تتخذ موقفًا مفاده أن *أي* حيازة للمصادر المشعة من الفئة 1 و2 و3 تشكل خطرًا غير مقبول على المجتمع أو أن الحالة النهائية تحتاج إلى التخلص الكامل من مصادر الفئات 1 و2 و3. وتدرك اللجنة أن أي قرار بشأن استبدال هذه المصادر لتحل محلها بدائل ينطوي على موازنة المخاطر والفوائد بواسطة المؤسسات التي تمتلكها.
4. لا تشكل الإشارات إلى تقنيات محددة وفي بعض الحالات إلى منتجات تجارية وجهات تصنيع محددة بالضرورة أو تعني مصادقة اللجنة عليها.

2-1 نظام تصنيف المصادر المشعة

الوكالة الدولية للطاقة الذرية هي المنظمة الدولية الرائدة للتعاون العلمي والتقني الحكومي الدولي في المجال النووي والإشعاعي (IAEA). وفي عام 2004، نشرت الوكالة الدولية للطاقة الذرية مدونة قواعد السلوك بشأن سلامة وأمن المصادر المشعة (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2004). وشكلت هذه الوثيقة بداية اتجاه عالمي نحو زيادة السيطرة على المصادر المشعة والمساءلة عنها وأمنها. ومنذ ذلك الحين، أصدرت الوكالة الدولية للطاقة الذرية وثائق تتضمن إرشادات ومعايير بشأن سلامة وأمن المصادر المشعة واستعمالاتها. ورغم سعي الوكالة الدولية للطاقة الذرية إلى التوصل إلى توافق في الآراء بشأن تطوير المعايير، إلا أن هذه المعايير ليست ملزمة قانونًا للدول الأعضاء، لكنها تعمل كإرشادات لأفضل الممارسات التي يمكن أن تتبناها الحكومات والهيئات التنظيمية.

نشرت الوكالة الدولية للطاقة الذرية دليل أمان لتصنيف المصادر المشعة في عام 2005 (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2005). ويستند الدليل، الذي يهدف إلى توفير تصنيف قائم على المخاطر للمصادر المشعة من حيث قدرتها على التسبب في ضرر لصحة الإنسان، إلى نظام التصنيف المبلغ عنه في الوثيقة الفنية للوكالة الدولية للطاقة الذرية 1344 (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2003 أ) المشار إليه في بيان المهمة. ويتم قياس إمكانية تسبب مصدر ما في ضرر لصحة الإنسان كمياً من حيث القيمة الخطر، التي تُعرَّف بأنها نشاط محدد للنويدات المشعة يُعتبر المصدر المشع فوقه من النشاط أ خطيرًا لأنه يحتوي على إمكانية كبيرة للتسبب في تأثيرات حتمية شديدة إذا لم تتم إدارته بطريقة آمنة ومأمونة.

يتكون نظام التصنيف الموضح في دليل الأمان من خمس فئات، حيث تعد مصادر الفئة 1 الأكثر خطورة ومصادر الفئة 5 الأقل خطورة. ويسرد الجدول 1-1 نسب النشاط (النشاط/الخطر (A/D)) وأمثلة على الممارسات لكل فئة من الفئات الخمس في نظام التصنيف. ويُعرّف المصدر الخطير بأنه المصدر الذي يمكن أن يؤدي إلى تعرض كافٍ لإحداث تأثير حتمي شديد إذا لم تتم إدارته بطريقة آمنة ومأمونة. وتُعرَّف كمية الفئة 1 من نويدة مشعة محددة، الأخطر، بأنها كمية 1000 مرة أو أكثر (أي النشاط/الخطر > 1000) من الكمية اللازمة لإحداث إصابة بشرية دائمة. وللمقارنة، تُعرَّف كمية الفئة 3 من نويدة مشعة محددة على أنها كمية مساوية أو أقل 10 مرات (على سبيل المثال، 10 > النشاط/الخطر > 1) من الكمية اللازمة لإحداث إصابة بشرية دائمة. ويناقش دليل الأمان الخاص بالوكالة الدولية للطاقة الذرية أيضًا تجميع المصادر ويقترح نهج "مجموع الكسور" في حالة تخزين مصادر متعددة أو نويدات مشعة متعددة في الموقع نفسه. واعتمدت هيئة التنظيم النووي الأمريكية والهيئات التنظيمية الأخرى دوليًا نظام تصنيف الوكالة الدولية للطاقة الذرية في إطارها التنظيمي الخاص بالمصادر المشعة. وتستخدم هيئة التنظيم النووي الأمريكية نسبة النشاط لتحديد الفئة التي سيندرج فيها مصدر منفصل، ومجموع الكسور لتحديد الفئة التي ستندرج فيها الكميات المجمعة من المواد المشعة. ولا تحدد هيئة التنظيم النووي الأمريكية فئات المصادر بناءً على نوع الجهاز أو الممارسة.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

لا يضع نظام تصنيف الوكالة الدولية للطاقة الذرية في الاعتبار عاملين مهمين لهما صلة بعمل هذه اللجنة: (أ) التأثيرات العشوائية، مثل تطور السرطان في المستقبل الذي يمكن أن يحدث نتيجة القرب من المصادر المشعة إذا لم يتم إدارتها بسلامة وأمان؛ و(ب) العواقب الاجتماعية والاقتصادية للحوادث الإشعاعية التي تتضمن هذه المصادر المشعة.

فيما يتعلق بالعامل (أ)، ترى الوكالة الدولية للطاقة الذرية أنه نظرًا لأن مخاطر الآثار العشوائية تزداد مع التعرض، فإن مصادر الفئات الأعلى ستشكل بشكل عام مخاطر أعلى للتأثيرات العشوائية. أي أن نظام الوكالة الدولية للطاقة الذرية مسؤول بشكل غير مباشر عن التأثيرات العشوائية *فقط* للعدد الصغير المحتمل من الأفراد الذين، سيعانون أيضًا، إذا تعرضوا لمصادر الإشعاع، من تأثيرات حتمية. ومع ذلك، لا يضع النظام في الاعتبار التأثيرات العشوائية للأفراد الذين لم يعانوا من آثار حتمية لأنهم لم يتواجدوا بالقرب من المصدر، لكنهم قد يتعرضون لمستويات من الإشعاع أقل من عتبة التأثيرات الحتمية.

الجدول 1-1 فئات المصادر المشعة

الفئة	نسبة النشاط	مخاوف تتعلق بالسلامة[أ]	أمثلة للممارسات والأجهزة	أمثلة للأنشطة الحدية (TBq[ب])	
1	النشاط/الخطر > 1,000	من المحتمل أن تتسبب في إصابة دائمة للشخص الذي تعامل معها أو كان على اتصال بها لأكثر من بضع دقائق. وقد يكون من المميت أن تتواجد بالقرب من هذه الكمية من المواد غير المحمية لمدة تتراوح من بضع دقائق إلى ساعة واحدة.	المولدات الكهروحرارية التي تعمل النظائر المشعة، والمشعات البانورامية، والمشعات الكبيرة ذاتية الحماية، والعلاج عن بعد، والجراحة الإشعاعية التجسيمية المعتمدة على أشعة غاما، وأجهزة المعايرة	أميريسيوم-241 كوبالت 60 سيزيوم-137 إيريديوم 192	60 30 100 80
2	1,000 > النشاط/الخطر > 10	من الممكن أن تتسبب في إصابة دائمة للشخص الذي تعامل معها أو كان على اتصال بها لفترة قصيرة (دقائق إلى ساعات). وقد يكون من المميت أن تتواجد بالقرب من هذه الكمية من المواد المشعة غير المحمية لمدة ساعات إلى أيام.	المشعات الأصغر المحمية ذاتيًا، وأشعة غاما الصناعية، وأجهزة تسجيل قياسات الآبار، وأجهزة المعايرة	أميريسيوم-241 كاليفورنيوم 252 كوبالت 60 سيزيوم-137 إيريديوم 192	0.6 0.2 0.3 1.0 0.8
3	10 > النشاط/الخطر > 1	من الممكن أن تتسبب في إصابة دائمة للشخص الذي تعامل معها أو كان على اتصال بها لساعات. من الممكن - رغم أنه من غير المحتمل - أن يكون من المميت أن تتواجد بالقرب من هذه الكمية من المواد المشعة غير المحمية لمدة أيام إلى أسابيع.	المعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية والمتوسطة ج والمقاييس الصناعية الثابتة، وأجهزة تسجيل قياسات الآبار	أميريسيوم-241 كوبالت 60 سيزيوم-137 إيريديوم 192	0.06 0.03 0.1 0.08
4	1 > النشاط/الخطر > 0.01	من الممكن أن تتسبب في إصابة مؤقتة لشخص تعامل معها أو كان على اتصال بها أو قريبًا منها لمدة عدة أسابيع، على الرغم من أن هذا غير مرجح. من غير المحتمل جدًا أن يتعرض أي شخص لإصابة دائمة بسبب هذه الكمية من المواد المشعة.	المعالجة الموضعية منخفضة الجرعات، ومقاييس السماكة، والمقاييس المحمولة، ومقاييس كثافة العظام		
5	0.01 > النشاط/الخطر > الكمية المعفاة/الخطر	لا يمكن أن تسبب إصابة دائمة.	الأجهزة الفلورية التي تعمل بالأشعة السينية، ومزيلات الكهرباء الساكنة، وأجهزة التقاط الإلكترون		

[أ] حسب وصف اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية، https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/category-of-radioactive-sources.html.

[ب] 1 تيرابيكريل = 27 كوري.

[ج] تكون مصادر المعالجة الموضعية ذات الجرعات العالية عادة من المصادر من الفئة 2 وفقًا لنظام تصنيف الوكالة الدولية للطاقة الذرية، لكنها في الولايات المتحدة تكون مصادر من الفئة 3 ويتم تنظيمها على هذا النحو بواسطة اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية.

المصدر: معتمدة ومعدلة من الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2004.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

فيما يتعلق بالعامل (ب)، لا تضع الوكالة الدولية للطاقة الذرية بشكل عام في الاعتبار العواقب الاجتماعية والاقتصادية في نظام التصنيف الخاص بها، لأنه لم توجد منهجية لتقدير ومقارنة هذه التأثيرات وقت إنشاء النظام. ومنذ صدور تقرير الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، اتخذت حكومة الولايات المتحدة خطوات للتوصل لفهم أفضل للتكاليف الاجتماعية والاقتصادية المرتبطة بسلاح إشعاعي وقدرت أضرارًا تقدر بمليارات الدولارات عند نمذجة تأثيرات سلاح إشعاعي يتضمن مصدرًا من الفئة 1 أو الفئة 3 (راجع القسم 2-7). وبالإضافة إلى ذلك، أثبتت التجربة الواقعية من حادث محطة الطاقة النووية في فوكوشيما دايتشي وغيرها من الحوادث الإشعاعية أن إطلاقات الإشعاع والتعرضات للإشعاع على السكان التي تقل كثيرًا عن المستويات التي يمكن أن تسبب آثارًا حتمية قد تتسبب في عواقب اجتماعية واقتصادية خطيرة وطويلة المدى (راجع القسمين 2-3-2 و2-3-4).

صرح ممثلو الوكالة الدولية للطاقة الذرية الذين أطلعوا اللجنة بأنه لا توجد خطة حالية لإعادة تقييم نظام تصنيف المصادر المشعة للوكالة.[6]

3-1 النظائر المشعة الشائعة في المصادر المشعة

وضعت الحكومة الأمريكية قائمة تضم 16 نويدًا مشعًا[7] ذات أهمية كبرى لاستخدامها في سلاح إشعاعي. ومن بين هذه النظائر المشعة الستة عشر، تمثل الخمسة الأكثر شيوعًا 99 بالمائة من جميع المصادر المُحكمة من الفئة 1 والفئة 2 في الولايات المتحدة. وهذه الخمسة هي الكوبالت 60 والسيزيوم 137 والإيريديوم 192 والأميريسيوم 241 والسيلينيوم 75. وتم تلخيص الخصائص الرئيسية لهذه النظائر المشعة في الأقسام التالية وفي الجدول 1-2.

يُستخدم الكوبالت 60 بشكل أساسي في تعقيم الأجهزة الطبية (99 بالمائة من الاستعمالات)[8] لكنه يُستخدم أيضًا في الأبحاث وعلاج السرطان والتصوير الشعاعي الصناعي. ويوجد ما يقرب من 72,000 مصدر من الفئة 1 والفئة 2 للكوبالت 60 في الولايات المتحدة، وهو ما يمثل حوالي 90 بالمائة من جميع مصادر الفئة 1 والفئة 2 في الولايات المتحدة. وفي هذه المصادر، يُستخدم الكوبالت 60 في شكل معدن صلب غير قابل للذوبان وغير قابل للتشتت أو سبيكة معدنية بنصف عمر يبلغ 5.27 سنة. وينتج انحلال الكوبالت 60 شعاعي غاما بطاقة 1.17 و1.33 ميغا إلكترون فولت (MeV). ويتم إنتاج الكوبالت 60 كمنتج ثانوي في المفاعلات النووية عن طريق التنشيط النيوتروني للكوبالت 59. ويُنتج الكوبالت 60 حاليًا في 21 مفاعلاً في الأرجنتين وكندا والصين والهند وروسيا. وازدادت المخاوف بشأن إمدادات الكوبالت 60 في عام 2014 بعد الإعلان عن إنهاء مشروع REVISS المشترك بين شركة روسية مملوكة للدولة وشركة بريطانية، مما أدى إلى انخفاض شبه فوري في المعروض العالمي من الكوبالت 60. وفي الوقت نفسه تقريبًا (في عام 2016)، تم إغلاق مفاعل إمبالس الأرجنتيني لتجديده، وإزالة الكوبالت 60 الإضافي من الإمداد العالمي. ووفقًا لتقديرات حديثة، فإن المعروض من الكوبالت 60 يعد أقل من الكمية اللازمة لتلبية الطلب على تطبيقات التعقيم بحوالي 5 بالمائة (نورديون (Nordion)، 2021).

يُستخدم السيزيوم 137 بشكل رئيسي في المشعات ذاتية الحماية (مشعات السيزيوم) لتشعيع الدم والاستعمالات البحثية، وكذلك في تسجيل بيانات الآبار. ويوجد ما يقرب من 3200 مصدر من الفئة 1 والفئة 2 للسيزيوم 137 في الولايات المتحدة، وهو ما يمثل حوالي 4 في المائة من جميع مصادر الفئة 1 والفئة 2. ويوجد السيزيوم 137 في المشعات وأجهزة المعايرة في شكل مسحوق كلوريد السيزيوم المضغوط، وهو قابل للذوبان في الماء ويمكن تشتيته بسهولة نسبيًا. ويوجد السيزيوم 137 في أجهزة ومقاييس تسجيل بيانات الآبار، في صورة خزف أو زجاج، وبالتالي فهو غير قابل للتشتت أو الذوبان بسهولة. ويكون نصف عمر السيزيوم 137 هو 30.17 سنة ويبلغ انبعاث أشعة غاما الأولية 0.662 ميغا إلكترون فولت (أو 662 كيلو إلكترون فولت [keV]). ويتم إنتاج السيزيوم 137 عن طريق الانشطار النووي لليورانيوم بإنتاجية تبلغ حوالي 6 في المائة من جميع نواتج الانشطار. وحتى وقت قريب، كان السيزيوم المشع المنفصل الذي يُباع دوليًا يُنتج فقط بواسطة جمعية مايك للإنتاج (PA Mayak) في منطقة تشيليابينسك في روسيا. وفي عام 2015، أعلن مركز بهابها للبحوث الذرية (BARC) في الهند أنه بدأ إنتاج السيزيوم 137 لاستخدامه في مشعت الدم، ودرس استخدام هذه النويدات المشعة في استعمالات أخرى مثل المعالجة الموضعية وتشعيع الطعام وتعقيم الأجهزة الطبية. وكانت الهند أول دولة أبلغت عن استخدام السيزيوم المزجج على شكل قلم رصاص (مركز بهابها للبحوث الذرية (BARC)، 2017). ويعد التوافر المستقبلي للسيزيوم 137 في شكل كلوريد السيزيوم غير مؤكد لأن عددًا من البلدان يهدف إلى القضاء على المخاطر المرتبطة بهذا الشكل.

[6] رونالد باتشيكو، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، عرض أمام اللجنة في 10 يونيو 2020.

[7] يُرجى الاطلاع على https://www.nrc.gov/docs/ML0531/ML053130250.pdf.

[8] إيان داوني، نورديون، عرض تقديمي أمام اللجنة في 13 أكتوبر 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الجدول1-2 ملخص للنويدات المشعة الأكثر شيوعًا الواردة في الفئات 1 و 2 و 3 من المصادر المشعة في الولايات المتحدة

النويدة المشعة	العمر النصفيالمتحدة[أ]	النسبة المئوية للفئة 1 و2 في جرد الولايات	كبير نماذج التقديم.	النشاط النموذجي (TBq) [Ci]	النموذج المادي	انبعاثات الإشعاع والطاقات
كوبالت 60	5.27 سنة	90	المشعات البانورامية	150.000 [4 مليون]	السبائك المعدنية	غاما 1.173 و1.333 ميغا إلكترون فولت
			المشعات ذاتية			
			العلاج عن بعد	900 [24,000]	الكريات المعدنية	
				500 [14,000]	الكريات المعدنية	
			التصوير الشعاعي الصناعي	4 [100]	الكريات المعدنية	
			أدوات المُعايرة	0.74 [20]	الكريات المعدنية	
				15 [400]	الكريات المعدنية	
سيزيوم-137 (Ba-137m)	30.17 سنة	4	المشعات ذاتية	75 [2,000]	مسحوق مضغوط (كلوريد السيزيوم) أو زجاج مزجج	بيتا 518 كيلو إلكترون فولت بحد أقصى مع غاما 662 كيلو إلكترون فولت (94.4% من الانحلالات) أو بيتا 1.18 ميغا إلكترون فولت كحد أقصى
			العلاج عن بعد	50 [1,400]	مسحوق مضغوط	
			أدوات المُعايرة	15 [400]	مسحوق مضغوط	
إيريديوم 192	74 يومًا	5	التصوير الشعاعي الصناعي	4 [100]	المعادن	بيتا 1.46 ميغا إلكترون فولت بحد أقصى مع 2.3 غاما 380 كيلو إلكترون فولت في المتوسط، 1.378 ميغا إلكترون فولت بحد أقصى (0.04% من الانحلالات)
أميريسيوم-241	432.2 سنة	> 1	تسجيل قياسات الآبار	0.8–0.5 [22–13]	مسحوق مضغوط (أكسيد الأميريسيوم)	ألفا 5.64 ميغا إلكترون فولت، غاما 60 كيلو إلكترون فولت، رئيسي
سيلينيوم 75	119.8 يومًا	<< 1	التصوير الشعاعي الصناعي	3 [75]	مركب عنصري[ب] أو معدني	غاما 215 إلى 230 كيلو إلكترون فولت في المتوسط، 822 كيلو إلكترون فولت بحد أقصى (0.000134%)

[أ] بناءً على عدد الأجهزة.

[ب] يتم توفير الشكل الأولي للسيلينيوم 75 فقط من روسيا وهو غير متوفر تجاريًا أو معتمدًا للنقل في الولايات المتحدة.

المصدر: معتمد ومعدّل من اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008.

يُستخدم الإيريديوم 192 في الاختبار الصناعي غير المدمر (NDT) لتصوير الهيكل الداخلي للمسبوكات المعدنية واللحام والمكونات المصنعة. ويُستخدم كذلك في علاج السرطان لعلاج الأورام الموضعية. ويُستخدم الإيريديوم الطبي 192 على شكل أقراص أو كبسولات. ويوجد ما يقرب من 4,000 مصدر من الفئة 1 والفئة 2 للإيريديوم 192 تُستخدم في الاختبارات الصناعية غير المدمرة، وهو ما يمثل حوالي 5 بالمائة من جميع مصادر الفئة 1 والفئة 2 في الولايات المتحدة. وتنتمي مصادر الإيريديوم 192 المستخدمة في الاستعمالات الطبية إلى مصادر الفئة 3. ويبلغ نصف عمر الإيريديوم 73.83 يومًا، وتتراوح انبعاثات أشعة غاما من 0.110 إلى 1.378 ميغا إلكترون فولت مع متوسط انبعاث أشعة غاما إيريديوم 192 عند 0.375 ميغا إلكترون فولت (أو 375 كيلو إلكترون

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

فولت). ويتم إنتاج الإيريديوم 192 في مفاعل نووي عن طريق التشعيع النيوتروني للإيريديوم 191 المستقر. ويتم تصنيع الإيريديوم 192 للتصوير الشعاعي الصناعي في مفاعلات في أوروبا وروسيا وجنوب أفريقيا.

يتم خلط الأميريسيوم 241 مع البريليوم لإنشاء مصدر نيوتروني لتسجيل قياسات الآبار لاستنتاج مسامية الصخور الجوفية وكثافتها وتكوينها. ويوجد ما يقرب من 200 مصدر من الفئة 2 من الأميريسيوم 241 مرخصة للاستخدام في الولايات المتحدة، وهو ما يمثل أقل من 1 في المائة من إجمالي مصادر الفئة 1 والفئة 2 المرخصة في الولايات المتحدة. ويكون الأميريسيوم المستخدم في هذه المصادر على شكل حبيبات مضغوطة للغاية من مزيج من أكسيد الأميريسيوم ومسحوق معدن البريليوم. ويعد الأميريسيوم 241 في الأساس مصدر إشعاع لجسيمات ألفا، وتكون ذروة انبعاث جسيمات ألفا الأكثر انتشارًا عند 5.486 ميغا إلكترون فولت (حوالي 85 بالمائة من الانحلالات). وينتج عن تفاعلات ألفا مع نوى البريليوم في مصادر الأميريسيوم والبريليوم طيف طاقة نيوتروني من الطاقات الحرارية إلى حوالي 10 ميغا إلكترون فولت مع مستويات الذروة عند حوالي 3 ميغا إلكترون فولت و5 ميغا إلكترون فولت. ويبلغ انبعاث أشعة غاما للأميريسيوم 241 الأولية (حوالي 36 بالمائة من الانحلالات) 59.5 كيلو إلكترون فولت. ويبلغ عمر نصف الأميريسيوم 432.2 سنة. يتم إنتاج الأميريسيوم 241 في مفاعل نووي عن طريق الاصطياد المتتالي للنيوترونات من اليورانيوم 238 وعن طريق انحلال البلوتونيوم 241 الموجود في الأسلحة النووية التي تم إيقافها،[9] التي تتحلل بانبعاثات بيتا بنصف عمر يبلغ 14.35 سنة للأميريسيوم 241. ويتم توفير الأميريسيوم 241 عالميًا بواسطة PA Mayak. وفي مارس 2020، بعد توقف دام 16 عامًا، أعلن برنامج DOE Isotopes Program عن استئناف الإنتاج الروتيني وتوافر الأميريسيوم 241 في الولايات المتحدة.

يُستخدم السيلينيوم 75، مثل الإيريديوم 192، لإجراء الاختبارات الصناعية غير المدمرة. وهو أقل شيوعًا من الإيريديوم 192 في الولايات المتحدة، لكنه يستخدم على نطاق واسع في أماكن أخرى (CISA ،2019). ويكون السيلينيوم 75 المستخدم في هذه المصادر على شكل حبيبات أسطوانية أو شبه كروية. وتُصدر مصادر السيلينيوم 75 أشعة غاما بمتوسط طاقة من 215 إلى 230 كيلو إلكترون فولت. (تعتمد الطاقة الدقيقة للانبعاثات على حجم النقطة البؤرية.) ويوجد نوعان من أشعة غاما الأولية عند 136 كيلو إلكترون فولت و265 كيلو إلكترون فولت (كل منهما حوالي 60 بالمائة من الانحلالات) ونطاق طاقة مفيد يتراوح بين 97 إلى 401 كيلو إلكترون فولت. يبلغ نصف عمر السيلينيوم 75 حوالي 119.8 يومًا. ويتم إنتاجه في مفاعل نووي عن طريق الإشعاع النيوتروني للسيلينيوم 74 المستقر المخصب بالنظائر في المفاعلات الروسية والأمريكية والأوروبية. وتستخدم مصادر السيلينيوم 75 المصنعة في الولايات المتحدة عادةً سبيكة معدنية من السيلينيوم والفاناديوم.

تمت مناقشة تفاصيل استعمالات هذه النويدات المشعة والتقنيات البديلة المتاحة في الفصول من 4 إلى 6.

4-1 تأثير تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008

أُجريت الدراسة التي نتجت عن تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008 (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008) بناءً على طلب الكونغرس بموجب القسم 651 من قانون سياسة الطاقة لعام 2005 (يشار إليه غالبًا باسم قانون سياسة الطاقة). وكجزء من القانون، أصدر الكونغرس الأمريكي تعليماته إلى اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية لاتخاذ العديد من الإجراءات بما في ذلك تمويل دراسة الأكاديميات الوطنية لتقييم استخدامات المصادر عالية المخاطر (الفئة 1 والفئة 2) التي يمكن أن تحل محلها عملية مكافئة أو عملية قد تشكل خطرًا أقل في حالة وقوع حادث أو هجوم. وأنشأ القانون فريق عمل معني بحماية وأمن مصادر الإشعاع (يشار إليه باسم "فريق العمل")، والذي يتمثل دوره في تقديم توصيات إلى رئيس الولايات المتحدة والكونغرس فيما يتعلق بأمن المصادر المشعة. وعين قانون سياسة الطاقة رئيس اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، أو من ينوب عنه، كرئيس لفريق العمل الذي سيتكون من أعضاء من 14 وكالة فيدرالية، ومؤتمر مديري برنامج مكافحة الإشعاع (CRCPD)، ومنظمة ولايات الاتفاقية. حتى الآن، أصدر فريق العمل أربعة تقارير، كان آخرها عام 2018 (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2018). ويرتبط عمل هذه اللجنة بتوصية فريق العمل بأن تعزز حكومة الولايات المتحدة دعم البحث والتطوير لتقنيات بديلة لتحل محل استخدام المصادر المشعة عالية الخطورة وإنشاء برنامج بحوافز من الحكومة لاستبدال الأجهزة عالية الخطورة لتحل محلها بدائل فعالة (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2018).[10]

عندما صدر تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008، قدرت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية وجود ما يقرب من 54000 مصدر مدني من الفئة 1 والفئة 2 في الولايات المتحدة (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2008). وتم تسجيل البيانات الخاصة بمصادر الفئة 1 والفئة 2 في قاعدة بيانات مؤقتة، من عام 2004 إلى عام 2008، وهي بمثابة التمهيد للنظام الوطني لتتبع

[9] كان نزع الأسلحة من الخدمة جزءًا من معاهدة تخفيض الأسلحة الاستراتيجية لعام 1993 (ستارت 2) بين الولايات المتحدة وروسيا.

[10] يشير تقرير فريق العمل لعام 2018 إلى أن عضوًا واحدًا من منظمة ولايات الاتفاقية كان ممثلًا كعضو لا يتمتع بحق التصويت؛ ولم يتم تمثيل مؤتمر مديري برنامج مكافحة الإشعاع (CRCPD).

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

المصدر (راجع القسم 2-4) وصُممت قاعدة البيانات المؤقتة لجمع جرد لمرة واحدة للأجهزة والمصادر التي تحتوي على المواد. وكان إبلاغ قاعدة البيانات المؤقتة طوعيًا. وكما أشرنا في القسم السابق، يوجد حاليًا ما يقرب من 80,000 مصدر من الفئة 1 والفئة 2.[11] يعتبر مجتمع الأمن الإشعاعي تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008 بمثابة تقرير تاريخي[12] لتحديد الحاجة إلى

- إعادة النظر في ترتيب مصادر الإشعاع على أساس مخاطرها لتشمل قدرتها على التسبب في اضطراب اقتصادي واجتماعي؛
- استبدال السيزيوم 137 المستخدم في صورة كلوريد السيزيوم.

نُوقشت هذه التوصيات والتقدم المحرز في تنفيذها في الأقسام التالية.

1-4-1 التغيير المقترح لتصنيف مخاطر المصدر

سلط تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008 الضوء على أن اللجنة التنظيمية النووية تصنف مخاطر المصادر المشعة في المقام الأول على أساس احتمالية حدوث آثار صحية قطعية (الموت أو الأذى الجسدي الشديد بسبب الإشعاع) ولا تأخذ في الاعتبار احتمال تلويث أي مصدر لمساحات شاسعة من الأراضي مما يؤدي إلى تحريم المنطقة إذا لم يتم استخدام هذه المصادر بشكل آمن وآمن. وقدمت لجنة تقرير عام 2008 التوصية التالية لمعالجة هذه المسألة:

> لمنح الأولوية للجهود المبذولة للحد من المخاطر الناجمة عن الاستخدام الضار لمصادر الإشعاع، يجب على اللجنة التنظيمية النووية الامريكية النظر في احتمال تسبب مصادر الإشعاع في تلوث مناطق كبيرة مما يؤدي إلى اضطراب اقتصادي واجتماعي (تحريم المنطقة) لتحديد الإجراءات الأمنية الإضافية المطلوبة، إن وجدت.

أعادت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية تاريخيًا تقييم النظر في الأضرار التي تلحق بالممتلكات خارج الموقع من الإطلاق الإشعاعي ضمن إطارها التنظيمي، بما في ذلك النظر في الآثار الاجتماعية والاقتصادية من الإطلاق غير المقصود للإشعاع على البيئة (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 1997، 1998، 1999، 2000، 2001). وبشكل عام، لم تؤد عمليات إعادة التقييم هذه إلى تغييرات في الإطار التنظيمي للجنة التنظيمية النووية الأمريكية. وتواصل الوكالة استخدام الوفيات الفورية والآثار الصحية القطعية كمعاييرها الأساسية لقياس عواقب الإطلاق الإشعاعي.

بعد حادث محطة فوكوشيما دايتشي للطاقة النووية عام 2011، حللت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية عملياتها للنظر في العواقب الاقتصادية الناشئة عن أضرار الممتلكات خارج الموقع الناجمة عن أحداث التلوث الإشعاعي. ولم ينظر التحليل على وجه التحديد في الحوادث الإشعاعية مثل سلاح إشعاعي. وخلص موظفو اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية إلى أن الإطار التنظيمي الحالي يمتلك تأثيرًا في تقليل العواقب الاقتصادية من خلال منع الأحداث التي قد تؤدي إلى إطلاق إشعاعي أو تخفيفها. وأوصى موظفو اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية كذلك بتحسين الإرشادات لتقدير التكاليف الاقتصادية خارج الموقع بناءً على البيانات المُحدثة (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2012 أ). ووافقت اللجنة على توصية الموظفين بتقديم إرشادات محسّنة، لكنها وجدت أنه لا ينبغي النظر في العواقب الاجتماعية والاقتصادية في الإطار التنظيمي باعتبارها معادلة للحماية الكافية للصحة والسلامة العامة (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2013).

في الوقت نفسه تقريبًا (في عام 2010)، حدد فريق العمل المعني بحماية وأمن مصادر الإشعاع الحاجة لأن تعيد الحكومة الفيدرالية تقييم استراتيجيات الحماية والتخفيف مقابل تعريفات جهاز تعرض لإشعاع (RED) كبير وجهاز إشعاعي والنظر في العواقب التي تتجاوز الوفيات الفورية الناجمة عن الإشعاع والتأثيرات الصحية الحتمية (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2012 أ، ب). وفي عام 2012، ذكر موظفو اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية أن النظر في العواقب الاجتماعية والاقتصادية والتلوث سيشكل تغييرًا مهمًا في الافتراضات الأساسية المستخدمة لتحديد نتيجة سلاح إشعاعي (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2012 ب) وأنه سيحتاج إلى توجيه إضافي من اللجنة للنظر في فحص العواقب البديلة. وخلص موظفو اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية إلى أن إطار العمل الأمني الحالي يحمي بشكل كافٍ من التلوث وعواقبه الاقتصادية الناتجة. ومن المثير للاهتمام، أن توجيهات اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية تقر بأن "عددًا قليلاً من الوفيات قد يحدث بسبب الطبيعة الإشعاعية للحدث [سلاح إشعاعي]؛ ومع ذلك، يمكن أن تنتج آثار اجتماعية واجتماعية اقتصادية كبيرة عن الذعر العام وتكاليف إزالة التلوث والحرمان من الوصول إلى البنية التحتية والممتلكات لفترات طويلة من الزمن "(اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2014 أ).

اتفق الخبراء في اجتماع لمكتب مساءلة الحكومة (GAO) انعقد بدعم من الأكاديميات الوطنية بشكل عام على أن استخدام الوفيات

---

[11] رسالة من جورج سميث، المجلس النرويجي للاجئين، إلى أورانيا كوستي، الأكاديميات الوطنية، 5 فبراير 2021.

[12] كان نطاق التقرير واسعًا. واعتبارًا من فبراير 2021، تم تنزيله من موقع ويب مطبعة الأكاديميات الوطنية أكثر من 5600 مرة في 126 بلدًا.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الفورية والآثار الصحية القطعية من الإشعاع له قيمة محدودة بالنسبة للجنة التنظيمية النووية الأمريكية كمعايير لتحديد عواقب سلاح إشعاعي. وبدلاً من ذلك، نظر هؤلاء الخبراء إلى الآثار الاجتماعية والاقتصادية والوفيات الناتجة عن الإخلاء كمعايير أكثر صلة لتحديد النتائج الشاملة لسلاح إشعاعي (مكتب مساءلة الحكومة (GAO)، 2019).

2-4-1 الإزالة المقترحة للسيزيوم 137 من الاستعمالات التجارية

حدد تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008 السيزيوم 137 في شكل كلوريد السيزيوم باعتباره النظير المشع الأكثر إثارة للقلق، لأن أي سلاح إشعاعي ينشر عن عمد السيزيوم 137 بهذا الشكل ستكون له عواقب مدمرة. وتكون النظائر الأخرى التي يحتمل أن تكون خطرة في شكل معادن صلبة مشتتة كشظايا يمكن التقاطها من الأرض أو استخراجها من المباني بعد التفجير. ومع ذلك، فإن السيزيوم 137، عندما يقترن كيميائيًا بالكلور لتكوين كلوريد السيزيوم، يتحول إلى مسحوق شديد الانتشار. وقد يتعين هدم المباني التي تتعرض لكلوريد السيزيوم وإزالة الحطام ودفنه إذا لم يكن بالإمكان تطهير هذه المباني بشكل كافٍ في الموقع. ومن المحتمل أن يمنع سلاح إشعاعي يعمل بكلوريد السيزيوم الوصول إلى المنطقة الملوثة لسنوات.

عندما صدر تقرير عام 2008، كان ما يقرب من 550 جهة مرخصًا لها في الولايات المتحدة تمتلك حوالي 1,100 من مشعات كلوريد السيزيوم ذاتية الاحتواء، التي تحتوي على كميات من النشاط الإشعاعي من الفئة 2 كحد أدنى. وخلص التقرير إلى أنه بالنسبة لمعظم الاستعمالات، يمكن استبدال كلوريد السيزيوم المشع لتحل محله إما أشكال أقل خطورة من السيزيوم المشع أو الكوبالت المشع أو بدائل خالية من النويدات المشعة. وفي ذلك الوقت، كانت مشعات الأشعة السينية متاحة تجاريًا كبدائل للاستعمالات التي لا تتطلب أشعة غاما بالطاقات المحددة المنبعثة من السيزيوم 137 والكوبالت 60، لكنها كانت أقل موثوقية وتكلفة. بالإضافة إلى ذلك، فإن جدوى استخدام أنظمة الأشعة السينية في المرافق التي تتطلب إنتاجية عالية كانت أيضًا موضع تساؤل.

قدمت لجنة تقرير عام 2008 هذه التوصية بشأن كلوريد السيزيوم:

> في ضوء الالتزامات العامة لكلوريد السيزيوم المشع، يجب على حكومة الولايات المتحدة تنفيذ خيارات للقضاء على استعمال مصادر كلوريد السيزيوم من الفئة 1 و2 في الولايات المتحدة، وإلى أقصى حد ممكن، في أي مكان آخر. وتقترح اللجنة الخيارات التالية كخطوات للتنفيذ:
>
> 1. وقف ترخيص مصادر مشعاع كلوريد السيزيوم الجديدة.
> 2. وضع حوافز لإيقاف تشغيل المصادر الحالية.
> 3. حظر تصدير مصادر كلوريد السيزيوم إلى بلدان أخرى، باستثناء أغراض التخلص منها في منشأة مرخصة بشكل مناسب.

تقع مسؤولية ترخيص المصادر المشعة على عاتق اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية وولايات الاتفاقية (راجع القسم 2.4.1). وفي الوقت الذي صدر فيه تقرير الأكاديميات الوطنية وكاستجابة جزئية للتوصيات الواردة في التقرير، نفذت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية العديد من الأنشطة لتحديد أفضل مسار للسيطرة على المصادر المشعة، خاصة مصادر السيزيوم 137. وتضمنت هذه الأنشطة التحقيق في احتمالات الأشكال البديلة للسيزيوم، من وجهة نظر الإنتاج وكذلك تقييم الحد من المخاطر المحتملة التي يمكن أن توفرها هذه الأشكال البديلة. وكانت نتيجة هذا الجهد بيان السياسة الصادر عن اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية بشأن حماية مصادر كلوريد السيزيوم 137 (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2011). وأبرز بيان السياسة أن "المرخص لهم يتحملون المسؤولية الأساسية عن الإدارة الآمنة وحماية المصادر التي بحوزتهم من سوء الاستخدام والسرقة والتخريب الإشعاعي" وأن المصادر ستحظى بحماية كافية من قبل المرخص لهم وفقًا لمتطلبات اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية وولايات الاتفاقية. ومع ذلك، أشار بيان السياسة إلى أنه "يمكن إجراء تحسينات على التصميم تعزز التخفيف أو التقليل من العواقب الإشعاعية" (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2011). ولم توقف اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية ولا ولايات الاتفاقية ترخيص مصادر كلوريد السيزيوم 137. ومنذ عام 2015، تم منح أو تعديل 16 ترخيصًا لإضافة مصادر منفصلة للسيزيوم 137 عند مستويات الفئة 2 أو أعلى منها لتشعيع الدم أو الاستعمالات البحثية أو معايرة الجرعة.[13]

في عام 2014، عقب التوصية الواردة في تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008 لتقديم حوافز لإيقاف مصادر السيزيوم 137 الحالية، جربت حكومة الولايات المتحدة مشروع استبدال مشعاع السيزيوم (CIRP). ويهدف هذا المشروع، الذي تديره الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA)، إلى العمل مع المستخدمين المحليين لتسهيل الاستبدال الطوعي لمشععات الدم والمشعات البحثية التي تعمل بكلوريد السيزيوم لتحل محلها أجهزة الأشعة السينية على أساس المشاركة في التكلفة (عادةً 50 بالمائة) (راجع الشريط الجانبي 1.2 للاطلاع على وصف لمشروع استبدال مشعاع السيزيوم والشكل 1.2 للاطلاع على صورة لعملية إزالة المصدر). وتشمل الحوافز المالية الإضافية لمشروع استبدال مشعاع السيزيوم التخلص من مشعاع السيزيوم بواسطة الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA). وبالإضافة إلى مشعات السيزيوم، التي كانت محور توصية تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008، يتضمن مشروع استبدال مشعاع

[13] مارغريت سيرفيرا، هيئة التنظيم النووي الأمريكية، عرض تقديمي أمام اللجنة في 11 يونيو 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الشريط الجانبي 1-2
مشروع استبدال مشع السيزيوم (CIRP)

تدير الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA) مشروع استبدال مشع السيزيوم وتعمل مع المستخدمين المحليين لتسهيل الاستبدال الطوعي لمشعات الدم والمشعات البحثية التي تعمل بكلوريد السيزيوم والكوبالت 60 والتخلص منها لتحل محلها أجهزة الأشعة السينية على أساس المشاركة في التكلفة (عادة 50 في المائة). وتشمل الحوافز المالية الإضافية لمشروع استبدال مشع السيزيوم إزالة الأجهزة التي تعمل بكلوريد السيزيوم أو الكوبالت 60 والتخلص منها بواسطة الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA) دون أي تكلفة على المالك. ويعتبر التوفير في التكلفة الإجمالية للموقع (مستشفى، أو مورد دم، أو مركز أبحاث، أو غير ذلك)، لاستبدال أجهزة الإشعاع، كبير، في حدود 300,000 دولار لكل جهاز إشعاع.[أ] ويظل الموقع مسؤولاً عن التكلفة المتبقية للأجهزة والضمان وتكاليف الصيانة وقطع الغيار. وتطلب الإدارة الوطنية للأمن النووي انتقالًا كاملاً إلى التقنية البديلة قبل تقديم حافز تقاسم التكاليف؛ أي، يجب إزالة مصدر الإشعاع المشع وتركيب البديل والتحقق من تشغيله.

كان هناك ما يقرب من 750 مشعًا يعمل بالسيزيوم 137 (420 جهازًا لتشعيع الدم و330 جهازًا بحثيًا) و100 تعمل بالكوبالت 60 (20 للدم و80 بحثيًا) في الولايات المتحدة في بداية مشروع استبدال مشع السيزيوم في عام 2015 (إيتامورا وليبرمان(Itamura and Lieberman)، 2020) واعتبارًا من أبريل 2021، ساعد مشروع استبدال مشع السيزيوم في إزالة أكثر من 165 مشعًا تعمل بالسيزيوم 137، وكان من المقرر إزالة 150 مشعًا أخرى. وجعلت الحوافز المالية التي يقدمها مشروع استبدال مشع السيزيوم، المدعوم بالتطورات التقنية التي حسنت موثوقية أجهزة التشعيع بالأشعة السينية، البرنامج ناجحًا في استبدال مشعات السيزيوم محليًا. ودفعت المتطلبات التنظيمية المتزايدة للمصادر المشعة عالية النشاط في السنوات الأخيرة المستخدمين إلى التحول إلى مشعات الأشعة السينية.

في عام 2017، التزمت العديد من المرافق الطبية والأكاديمية داخل مدينة نيويورك (NYC) ونظام جامعة كاليفورنيا، بدعم من المبادرة المتعلقة بالتهديد النووي (NTI)، باستبدال مشعات الدم والمشعات البحثية التي تعمل بالسيزيوم والكوبالت لتحل محلها أجهزة الأشعة السينية. في ذلك الوقت، كانت مدينة نيويورك تحتوي على 34 مشعًا تعمل بالسيزيوم 137 (18 مشعًا للدم و16 مشعًا للأبحاث). وبعد ثلاث سنوات، يوجد أقل من 10 مشعات تعمل بالسيزيوم 137 في مدينة نيويورك.[ب] وكانت مستشفى ماونت سيناي في مدينة نيويورك رائدًا في هذا الجهد. ويتم تقديم تفاصيل انتقالها الناجح من المشعات المشعة في مكان آخر (كامين وآخرون (Kamen et al.)، 2019). وأطلقت المبادرة المتعلقة بالتهديد النووي أيضًا جهدًا لتعزيز إزالة واستبدال المشعات المعتمدة على المصدر مع ولاية كاليفورنيا، التي تمتلك أكبر عدد من مشعات السيزيوم 137 عالية النشاط في الولايات المتحدة، والمستخدمة بشكل أساسي للبحث. وأدت هذه المبادرة إلى إزالة واستبدال 90 في المائة من 42 جهازًا من أجهزة السيزيوم 137 التابعة لجامعة كاليفورنيا (36 مشعًا للأبحاث و6 للدم) لتحل محلها أجهزة أشعة سينية (ماكينزي وآخرون (MacKenzie et al.)، 2020). واعتبارًا من أوائل عام 2020، تم تحديد 40 مشعًا لإمكانية إزالتها وتم إزالة 18 منها. وتعد جامعة إيموري في أتلانتا وفيتالانت، وهي مورد رئيسي للدم في الولايات المتحدة، من بين المؤسسات التي التزمت باستبدال المشعات المعتمدة على أشعة غاما لتحل محلها أجهزة أشعة سينية من خلال مشروع استبدال مشع السيزيوم.

حدد الكونغرس في قانون تفويض الدفاع النووي لعام 2019 (القسم 3141) هدفًا طموحًا يتمثل في استبدال جميع مشعات الدم التي تعمل بالسيزيوم 137 لتحل محلها أجهزة أشعة سينية في الولايات المتحدة بحلول عام 2027 (الكونغرس الأمريكي، مجلس النواب (U.S. Congress, House)، 2018). ومع ذلك، أوقف اختراق عام 2019 لمصدر السيزيوم 137 مُحكم وانتشار التلوث الناتج في جامعة واشنطن (راجع القسم 2.3.4) ووباء فيروس كورونا (كوفيد 19) استرداد المشعات لأكثر من 9 أشهر. واستؤنفت عمليات الاسترداد في أكتوبر 2020 لكن بوتيرة أبطأ وفقًا لتدابير السلامة والأمن المطبقة حديثًا. وقالت الإدارة الوطنية للأمن النووي للجنة إنه على الرغم من هذه التحديات، فإن الوكالة في طريقها للوفاء بالموعد النهائي الذي حدده الكونغرس.

[أ] تفترض اللجنة أن مشع الأشعة السينية يكلف حوالي 270,000 دولار وأن الموقع يغطي نصف تكاليف الشراء. أيضًا، لا يحتاج الموقع إلى تغطية تكاليف التخلص، التي يمكن أن تتراوح من 100,000 دولار إلى 175,000 دولار (راجع المناقشة في القسم 2-8).

[ب] جاكوب كامين، كلية الطب إيكان في ماونت سيناي، عرض تقديمي للجنة في 9 سبتمبر 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الشكل 1-2 إزالة مصدر الإشعاع من مستشفى جامعة إيموري باستخدام مشروع استبدال جهاز إشعاع السيزيوم.
المصدر: من إنتاج المبادرة المتعلقة بالتهديد النووي.

السيزيوم أيضًا إزالة مشعات الدم والمشعات البحثية التي تعمل بالكوبالت 60. ولا تنطوي مصادر الكوبالت 60 على مخاوف مماثلة لتلك الخاصة بمصادر السيزيوم 137 لأن المصدر صلب وبالتالي لا يمكنه الانتشار بسهولة.

يدعم مكتب الأمن الإشعاعي (ORS) أيضًا بدائل مشعاع السيزيوم دوليًا. وأشار ممثلو ساندیا إلى أن الجانب الدولي للبرنامج أكثر تعقيدًا بسبب القواعد واللوائح المختلفة داخل البلد وخطوط السلطة الغامضة فيما يتعلق بترخيص وتنظيم التقنيات البديلة وقيود البنية التحتية والتحديات مع التعاقد الدولي، من بين عوامل أخرى.[14]

فيما يتعلق بتصدير مصادر كلوريد السيزيوم، أوصى تقرير فريق العمل لعام 2010 بما يلي:

> يجب أن يكون القرار بشأن إيقاف ترخيص اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية وولايات الاتفاقية أو تصدير مصادر كلوريد السيزيوم التي تحتوي على كميات كبيرة من المخاطر من المواد المشعة متوقفًا على وجود تقنيات بديلة قابلة للاستعمال، والأخذ في الاعتبار توافر القدرة على التخلص والتغييرات في بيئة التهديد. (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2010)

يتوافق بيان سياسة اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية مع هذه التوصية (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2011). ومنذ عام 2015، تم تصدير كلوريد السيزيوم 23 مرة. وكانت إحدى هذه العمليات تتعلق بتصدير مشعاع لكلوريد السيزيوم في عام 2015؛ وكان الباقي إما حالات إرجاع لمشعات كلوريد السيزيوم أو غيرها من الأجهزة الصناعية التي تستخدم كلوريد السيزيوم إلى الشركة المصنعة.[15]

[14] عرض تقديمي من مايكل إيتامورا وجودي ليبرمان، ساندیا، أمام اللجنة في 29 أبريل 2020.
[15] مارغريت سيرفيرا، اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية، عرض تقديمي أمام اللجنة في 9 سبتمبر 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

1-5 العمل ذو الصلة من قبل الآخرين

استفادت اللجنة من مراجعة العديد من التقارير والاعتماد على عمل العديد من المنظمات التي درست قضايا الأمن والسلامة المتعلقة بالمصادر المشعة والتقدم والتحديات في اعتماد التقنيات البديلة للاستعمالات المختلفة.

كان لمكتب مساءلة الحكومة دور أساسي في تحديد الثغرات في النظام التنظيمي في الولايات المتحدة المتعلقة بالمصادر المشعة، على سبيل المثال، في استخدام المواد المشعة في الطب (مكتب مساءلة الحكومة (GAO)، 2012) والمنشآت الصناعية (مكتب مساءلة الحكومة (GAO)، 2014)، وفي الحصول على تراخيص الفئة 3 (مكتب مساءلة الحكومة (GAO)، 2016) والتحقق من التراخيص (مكتب مساءلة الحكومة (GAO)، 2018). وعقد مكتب مساءلة الحكومة أيضًا اجتماعًا للخبراء بدعم من الأكاديميات الوطنية لفحص ما إذا كان تقييم اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية للمخاطر يتضمن جميع المعايير ذات الصلة (مكتب مساءلة الحكومة (GAO)، 2019). وفي وقت كتابة هذه السطور، بعد مشروع قانون اعتمادات تنمية الطاقة والمياه في مجلس الشيوخ للعام المالي 2020 (الكونغرس الأمريكي ومجلس الشيوخ (U.S. Congress, Senate)، 2020)، كان مكتب مساءلة الحكومة يُجري مراجعة أخرى تركز على الأنشطة الفيدرالية المتعلقة بالتكنولوجيات البديلة غير المشعة. ومن المتوقع إصدار المراجعة في خريف عام 2021.

أصدرت مجموعة عمل التقنية البديلة التابعة لوزارة الأمن الوطني تقريرًا في عام 2019 يصف حالة تطوير واعتماد تقنيات بديلة للمصادر المشعة عالية الخطورة المستخدمة في الاستعمالات الصناعية والطبية والبحثية (CISA، 2019). ويفصل هذا التقرير فعالية وتكاليف دورة الحياة واستعمالات هذه التقنيات البديلة والعوائق المحتملة التي تحول دون اعتمادها.

مجموعة العمل المشتركة بين الوكالات التابعة للمجلس الوطني للعلوم والتقنية والمعنية ببدائل المصادر المشعة عالية النشاط (المعروفة باسم GARS) أصدرت دليلاً لأفضل الممارسات للوكالات الفيدرالية. حيث يوفر الدليل التدابير التي يمكن أن تدرسها الوكالات الفيدرالية لتسهيل الانتقال إلى التقنيات البديلة في تخطيطها الاستراتيجي طويل الأجل (المجلس الوطني للعلوم والتقنية (NSTC)، 2016).

أصدر مركز جيمس مارتن لدراسات عدم الانتشار بيانًا في عام 2014 وأوصى بأن تقود الولايات المتحدة جهدًا عالميًا للتخلص التدريجي من استخدام مشعات الدم التي تعمل بكلوريد السيزيوم (بومبر وآخرون (Pomper et al.)، 2014) واقترح لاحقًا خريطة طريق لاستبدال المصادر المشعة عالية الخطورة (مور وبومبر (Moore and Pomper)، 2015). ودخل مركز دراسات عدم الانتشار أيضًا في شراكة مع فيلق خبراء السرطان الدولي لتقديم أفكار لتلبية الحاجة المتزايدة لعلاج السرطان، لا سيما في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل، مع تكثيف اعتماد التقنيات البديلة مثل المسرعات الخطية (كولمان وآخرون (Coleman et al.)، 2017). بالإضافة إلى ذلك، منذ عام 2013، احتفظ مركز دراسات عدم الانتشار بقاعدة البيانات الوحيدة المتاحة للجمهور (برعاية واستضافة المبادرة المتعلقة بالتهديد النووي) حول الحوادث العالمية للمواد النووية والإشعاعية خارج الرقابة التنظيمية (راجع القسم 2.5.3).

أصدرت الوكالة الدولية للطاقة الذرية عشرات التقارير ذات الصلة المباشرة بعمل هذه اللجنة. وتغطي هذه التقارير مواضيع مختلفة تتعلق بالمصادر المشعة بما في ذلك السلامة والأمن (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2004، 2005، 2008 أ، 2011، 2014 أ، ب، 2016، 2019 د)، وجدوى اعتماد تقنيات بديلة (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2012 أ، 2014 أ، 2019 ب، ج؛ فان مارك (van Marcke)، 2019)، وبناء القدرات في المرافق الطبية للعلاج الإشعاعي والعلاجات الأخرى (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2008 ج، د، 2014 ج، 2015 أ، ب، د)، ونقل المصادر المشعة (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2008 ب، 2018 ج)، وضوابط الاستيراد والتصدير (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2012 ب) وإدارة المصادر المهملة والتخلص منها (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2013 ب، 2018 أ، د؛ يوسف (Yusuf)، 2020). وتحتفظ الوكالة الدولية للطاقة الذرية أيضًا بقواعد بيانات تتضمن معلومات ذات صلة بمهمة اللجنة بما في ذلك قاعدة بيانات الحوادث والاتجار (راجع القسم 2.5.1، ودليل مراكز العلاج الإشعاعي (راجع القسم 4.3.1)، ودليل المرافق التي تستخدم تقنية الحشرات العقيمة (راجع القسم 5.4). أخيرًا، تدعم الوكالة الدولية للطاقة الذرية كلاً من أنشطة البحث التعاونية وأنشطة نقل التقنية عبر البلدان المتقدمة والنامية من خلال مشاريع البحث المنسقة وبرنامج التعاون التقني. ويساعد برنامج التعاون التقني الدول الأعضاء في بناء القدرات والشراكات ومشاركة المعرفة ودعم الشبكات وتسهيل المشتريات. وتتلقى أيضًا الوكالة الدولية للطاقة الذرية تمويلاً من خارج الميزانية من الدول المانحة لتقديم المساعدة المباشرة مثل عمليات إزالة المصادر من الفئة 1 والفئة 2.

تحظى المبادرة المتعلقة بالتهديد النووي بالاعتراف على نطاق واسع كمورد وأداة لتتبع التقدم المحرز في الأمن النووي العالمي عن طريق نشر مؤشر المبادرة المتعلقة بالتهديد النووي (NTI)، الذي يتولى تقييم ظروف الأمن النووي في 175 دولة بالإضافة إلى تايوان. وفي سياق الأمن الإشعاعي، كان للمبادرة المتعلقة بالتهديد النووي دور أساسي في إنشاء نماذج للشبكات لزيادة الوعي بالمخاطر والمسؤوليات المتعلقة بالمصادر المشعة وتسهيل الحوارات بين قيادة مكتب الأمن الإشعاعي وممثلي الولاية والمدينة والسلطات التنظيمية وصناع القرار التشغيلي والشركات المصنعة والمستخدمين (المبادرة المتعلقة بالتهديد النووي (NTI)، 2017، 2018 أ، ب). وفي الآونة الأخيرة، نشرت المبادرة المتعلقة بالتهديد النووي أول مؤشر إشعاعي لتقييم السياسات والالتزامات الوطنية المتخذة على الصعيد العالمي لمنع سرقة المواد المشعة (المبادرة المتعلقة بالتهديد النووي(NTI)، 2020).

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

أصدر المعهد العالمي للأمن النووي (WINS) عدة تقارير تتعلق بأمن المصادر المشعة والتخلص الآمن من هذه المصادر (المعهد العالمي للأمن النووي (WINS)، 2019 أ، ب، 2020 أ، ب). ومن خلال الموائد المستديرة والأنشطة الجماعية الأخرى، أبلغ المعهد العالمي للأمن النووي أصحاب المصلحة بشأن بدائل المصادر المشعة وقدم إطارًا لمساعدة صانعي القرار حول مدى ملاءمة النظر في البدائل ووضع عملية لمساعدة المنظمات على اتخاذ قرار بشأن اعتماد تقنية بديلة (المعهد العالمي للأمن النووي (WINS)، 2018 أ، ب).

تعمل الرابطة الدولية للإشعاع (IIA) والرابطة الدولية لموردي ومنتجي المصادر على رفع مستوى الوعي حول مخاطر الأمن الإشعاعي والبيئات التنظيمية المتغيرة والتكاليف الكاملة لاستخدام المصادر المشعة. ونشرت الرابطة الدولية للإشعاع أوراقًا بيضاء تقارن بين طرق الإشعاع المختلفة (الرابطة الدولية للإشعاع (IIA)، 2017). وتتاح التقارير الصادرة عن هذه الروابط عادة للأعضاء فقط.

6-1 خريطة طريق التقرير

تم تنظيم هذا التقرير في ستة فصول تتناول بيان المهمة (راجع الشريط الجانبي 1-1) في مجمله:

- يقدم الفصل الأول (هذا الفصل) معلومات أساسية عن طلب الدراسة ويصف مهمة الدراسة.
- يقدم الفصل الثاني نظرة عامة واسعة على الاستخدامات الحالية للمصادر المشعة ويناقش العوامل التي تؤثر على مخاطر السلامة والأمن المرتبطة بهذه المصادر، والأدوار والمسؤوليات داخل الحكومة والمنظمات الأخرى للحد من هذه المخاطر، والجهود المبذولة لتتبع المصادر المشعة والتخلص منها في نهاية العمر الافتراضي.
- يصف الفصل الثالث التقنيات البديلة الأولية التي تناولها هذا التقرير والاعتبارات المؤسسية التي تؤثر على القرارات المتعلقة بتبني هذه البدائل. ويتضمن هذا الفصل أيضًا قسمًا يلخص التقدم المحرز في اعتماد تقنيات بديلة للاستعمالات المختلفة التي تم فحصها في هذا التقرير.
- يُجري الفصل الرابع تقييمًا للخيارات لبدائل المصادر المشعة المستخدمة في الاستعمالات الطبية والبحثية.
- يُجري الفصل الخامس تقييمًا للخيارات لبدائل المصادر المشعة المستخدمة في التعقيم.
- يُجري الفصل السادس تقييمًا للخيارات لبدائل المصادر المشعة المستخدمة في الاستعمالات الصناعية.

توفر الملاحق سيرًا ذاتية مختصرة للجنة والموظفين (الملحق أ)، ووصفًا لاجتماعات جمع المعلومات للدراسة (الملحق ب)، وقائمة بالمختصرات والاختصارات الأكثر شيوعًا (الملحق ج)، ومسرد (الملحق د) التي تم اقتباسها من تقرير الأكاديميات الوطنية السابق حول الموضوع نفسه (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008)، ومعلومات أساسية حول الجدوى الاقتصادية لاعتماد تقنيات بديلة (الملحق هـ)، ومعلومات أساسية عن التعقيم باستخدام الإشعاع بأنماط مختلفة (الملحق و).

تتوقع اللجنة أن يكون الجمهور الرئيسي لهذا التقرير الفني القراء الذين يمتلكون بعض المعرفة المسبقة بالقضايا العامة المتعلقة بالمصادر المشعة، وبالتالي سيكون لديهم بعض الفهم الأساسي لمبادئ وإجراءات الإشعاع. ونشجع القراء الذين يفتقرون إلى خلفية معينة على مراجعة التقارير والمواد الأخرى التي توفر هذا السياق. على سبيل المثال، توصي اللجنة بالملحق ب من تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008 (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008).

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

2

استخدامات المصدر المشع ومخاطره والسيطرة عليه

يقدم هذا الفصل نظرة عامة واسعة على الاستخدامات الحالية للمصادر المشعة ويناقش العوامل التي تؤثر على مخاطر السلامة والأمن المرتبطة باستخدام هذه المصادر، والأدوار والمسؤوليات داخل الحكومة والمنظمات الأخرى للحد من هذه المخاطر، والجهود المبذولة لتتبع المصادر المشعة والتخلص منها في نهاية العمر الافتراضي.

2-1 استعمالات المصادر المشعة

توجد استخدامات عديدة مفيدة للمصادر المشعة في مجموعة من التطبيقات الطبية والبحثية والتجارية داخل الولايات المتحدة وفي أي مكان آخر. وفي مجال الطب، تُستخدم المصادر المشعة لتشعيع الدم لمنع رفض العائل لدم المضيف وفي علاج السرطان لعلاج الأورام عن طريق تشعيعها من خارج الجسم (في العلاج بالأشعة الخارجية والجراحة الإشعاعية التجسيمية) أو داخل الجسم (في المعالجة الموضعية بجرعات عالية). وتُستخدم المصادر المشعة في الأبحاث، لعلاج الخلايا أو الأنسجة أو حيوانات التجارب الصغيرة لتعزيز المعرفة في علم الأحياء الإشعاعي وأمراض الدم وفروع الطب الأخرى. وتشمل الاستعمالات التجارية التعقيم للتخلص من الكائنات الحية الدقيقة الموجودة على الأجهزة الطبية ومنتجات الرعاية الصحية، ولإطالة العمر الافتراضي للمنتجات الغذائية والزراعية، والقضاء على البكتيريا الضارة ومجموعة متنوعة من الكائنات الدقيقة، وإدارة التكاثر في الحشرات أو الآفات. وتشمل الاستعمالات التجارية الأخرى التصوير الشعاعي الصناعي لتصور الهياكل واكتشاف العيوب، وتسجيل قياسات الآبار لاستكشاف بنية وتكوين الصخور والسوائل في باطن الأرض وقياس الخصائص البتروفيزيائية الأساسية، والمقاييس الصناعية لقياس سمك أو كثافة أو مستوى تعبئة المنتج والمولدات الكهروحرارية التي تعمل بالنظائر المشعة (RTGs) لأنظمة الطاقة التي لا يمكن الوصول إليها بسهولة. ونُوقشت هذه الاستعمالات بشيء من التفصيل في الفصول من 4 إلى 6.

تعتبر النظائر المشعة الأكثر استخدامًا في الاستعمالات الطبية والبحثية والتجارية التي نُوقشت في هذا التقرير هي الكوبالت 60 والسيزيوم 137 والإيريديوم 192 والأميريسيوم 241. ويستخدم حوالي 90 في المائة من النشاط من هذه النظائر المشعة (على وجه الخصوص الكوبالت 60 والسيزيوم 137) في مصادر من الفئة 1 والفئة 2 للعلاج الإشعاعي وتشعيع الدم والأبحاث والتعقيم والاستعمالات الصناعية الأخرى. ويُستخدم معظم النشاط المتبقي من هذه النظائر المشعة في مصادر الفئة 3 لتسجيل قياسات الآبار والمعالجة الموضعية عالية الجرعات والمقاييس الصناعية والاستعمالات الأخرى.

منذ المراجعة السابقة بواسطة الأكاديميات الوطنية لاستعمالات المصادر المشعة (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008)، لم تظهر أي استعمالات جديدة للمصادر المشعة من الفئة 1 والفئة 2. ورغم عدم فحص مصادر الفئة 3 في التقرير السابق للأكاديميات الوطنية، لم تظهر أي استعمالات جديدة لهذه المصادر أيضًا. ومع ذلك، تم التخلص التدريجي من استعمال واحد لمصادر الفئة 1، هو المولدات الكهروحرارية التي تعمل بالنظائر المشعة (RTGs) للطاقة الأرضية. ويستمر استخدام مولدات النظائر المشعة الكهروحرارية (RTGs) في الاستعمالات الفضائية (راجع القسم 6-5).

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

2-2 خصائص المصدر المشع ومخاطر السلامة والأمان

تشكل المصادر المشعة مخاطر على السلامة والأمن. وتتضمن مخاطر السلامة الفشل والضرر والخطأ البشري وغيرها من الأعمال غير المقصودة التي يمكن أن تؤدي إلى التعرض العرضي للإشعاع. وتشمل المخاطر الأمنية السرقة والتخريب والأفعال الكيدية الأخرى، بما في ذلك دمجها في سلاح إشعاعي (RDD) الذي قد يؤدي إلى التعرض للإشعاع المتعمد. ويمكن أن تؤدي الأحداث الإشعاعية التي تنطوي على أفعال غير مقصودة أو متعمدة، حسب السيناريو والحجم، إلى مجموعة من الآثار الصحية والاجتماعية والاقتصادية الضارة. ويعتمد مستوى تعرض الأشخاص على العديد من العوامل مثل الشكل الفيزيائي والكيميائي للمادة المشعة المستخدمة في سلاح إشعاعي وقرب الأشخاص من الحدث. على سبيل المثال، من الممكن أن يُقتل أو يُصاب الأشخاص الذين يتصادف تواجدهم في الجوار المباشر لسلاح إشعاعي بسبب الانفجار، ومن المحتمل أن يعاني عدد قليل فقط من الأشخاص من آثار صحية حتمية مثل مرض الإشعاع الحاد أو الحروق الإشعاعية. وقد تحدث إصابات ووفيات إضافية بسبب الفوضى أثناء عمليات إخلاء المناطق المتضررة. ومن الممكن أن تسبب الأحداث الإشعاعية في تأثيرات عشوائية مثل تطور السرطانات في المستقبل بسبب التعرض للإشعاع والآثار طويلة الأجل على الصحة العقلية بسبب التعرض للإشعاع المتصور أو الفعلي. بالإضافة إلى ذلك، سوف تتسبب الأسلحة الإشعاعية في آثار اجتماعية واقتصادية شديدة ناتجة عن تلوث الهياكل والأراضي، والتحريم اللاحق للمنطقة.

من حيث المبدأ، يمكن تقييم مخاطر السلامة والأمن باستخدام مجموعة ثلاثية من المخاطر: ما الخطأ الذي يمكن أن يحدث؟ ما احتمالية حدوث خطأ؟ وما العواقب إذا حدث خطأ؟ (كابلان وغاريك (Kaplan and Garrick)، 1981). تطرح الإجابة على هذه الأسئلة للأحداث الأمنية بشكل عام تحديات أكبر من الإجابة عليها في أحداث السلامة، لأن تحديد احتمالية وعواقب الأفعال المؤذية أمر صعب. وعلى وجه التحديد، لتوصيف وقياس احتمالية الأعمال الإرهابية، فإن عالم الأطراف المؤذية غير معروف وبالتالي يصعب تقييم دوافع هذه الأطراف ونواياها وقدراتها. بالإضافة إلى ذلك، على عكس أحداث السلامة السلبية، تنطوي احتمالات الأحداث الأمنية المختلفة على شكوك استراتيجية بمعنى أن الأطراف المؤذية يمكنها تعديل أفعالها استجابة للتدابير الدفاعية.[1]

تساعد مدونة قواعد السلوك الخاصة بالوكالة الدولية للطاقة الذرية بشأن أمان المصادر المشعة وأمنها السلطات الوطنية على إنشاء وتعزيز البنى التحتية التنظيمية بحيث تُستخدم المصادر المشعة في إطار مناسب للسلامة والأمن الإشعاعي (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2004). بالإضافة إلى ذلك، حددت الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) الحاجة إلى إجراء الدول الأعضاء لتقييم تهديدات المواد المشعة، والمرافق المرتبطة بها، والأنشطة المرتبطة بها بناءً على المعلومات المتاحة، وإنفاذ القانون، والمعلومات مفتوحة المصدر (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2019 د). ولا تناقش الوكالة الدولية للطاقة الذرية احتمال حدوث أي تهديدات لكنها تشجع الدول الأعضاء على إنشاء تهديدات تمثيلية للتحليل أو لتحديد التهديدات المتعلقة بالتصميم. وأصدرت الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) سلسلة من الوثائق عن أمن الأجهزة والمنشآت التي تستخدم النظائر المشعة.[2]

كما ذكرنا في الفصل الأول، تم إنشاء فرقة العمل المشتركة بين الوكالات المعنية بحماية وأمن مصادر الإشعاع في الولايات المتحدة لتقييم وتقديم توصيات إلى الرئيس والكونغرس فيما يتعلق بأمن المصادر المشعة من التهديدات الإرهابية المحتملة. بالإضافة إلى ذلك، تم تطوير إرشادات الاستعداد والاستجابة للطوارئ المتعلقة بالأسلحة الإشعاعية بواسطة العديد من الوكالات الفيدرالية بما في ذلك لجنة التنظيم النووية الأمريكية (لجنة التنظيم النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2020 أ)، ووزارة الأمن الداخلي (وزارة الأمن الداخلي (DHS)، 2017)، ووكالة حماية البيئة (وكالة حماية البيئة (EPA)، 2017)، ومراكز السيطرة على الأمراض والوقاية منها (مراكز السيطرة على الأمراض والوقاية منها (CDC)، 2014).

حددت اللجنة ثماني خصائص للمصادر المشعة تؤثر على احتمال تورط المصدر في حدث إشعاعي والخطورة المحتملة لعواقب هذا الحدث. وبشكل عام، تؤثر الخصائص التي تؤثر على مخاطر السلامة المتعلقة بالمصادر المشعة أيضًا على المخاطر الأمنية المرتبطة بهذه المصادر نفسها. وفيما يلي هذه الخصائص:

1. *النشاط الكلي للمصدر المشع*. تعتبر هذه الخاصية العامل الأساسي لتعريف مصادر الفئتين 1 و2 كمخاطر عالية لأنها تؤثر على قدرتها على التسبب في ضرر حتمي. وتؤثر أيضًا على احتمال تسبب المصدر في ضرر عشوائي وتلوث المنطقة وتحريمها. وتعتبر المصادر عالية النشاط التركيز الأساسي للهيئات التنظيمية لتقليل مخاطر السلامة والأمن. ومع ذلك، يتم تركيب مصادر الفئة 1، مثل المشعات البانورامية التي تحتوي على أعلى مصادر النشاط المتاحة في الاستعمالات التجارية، في أجهزة ثابتة كبيرة داخل مرافق مصممة خصيصًا، وبالتالي يصعب الوصول إليها وإزالتها. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تسبب المصادر المذكورة أعلاه ضررًا فوريًا أو على المدى القريب للشخص الذي يتعامل معها، مما يجعلها هدفًا غير محتمل للسرقة ما لم يكن المصدر محميًا بشكل كافٍ أثناء إزالته ونقله.

[1] كان تحليل المخاطر واتخاذ القرار بشأن القضايا الأمنية قيد النظر على مدى العقد الماضي. وعقدت اللجنة النووية الأمريكية اجتماعات عامة حول هذا الموضوع، ويتوفر ملخص لعرض تقديمي حديث (اللجنة النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2019 ب). وقدم غاريك نُهُجًا لتقدير أحداث الخطر الإرهابي (2008، الفصلان 2 و5).

[2] يتم توفير قائمة كاملة على موقع الوكالة الدولية للطاقة الذرية، https://www.iaea.org/publications/search/type/implementing-guides.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

2. *نصف عمر النظائر المشعة الواردة في المصدر*. يحدد نصف العمر الجدول الزمني للمخاطر. ومن الممكن أن تشكل المصادر المشعة ذات نصف العمر في حدود ساعات إلى دقائق أو أقل مخاطر جسيمة على الشخص الذي يتعامل معها أو على أي شخص يتواجد بالقرب منها، لكن نظرًا لأنها تتحلل بسرعة، فإنها لا تلوث المناطق لفترات طويلة. وتعتبر المصادر المشعة ذات النظائر المشعة طويلة العمر (على سبيل المثال، آلاف السنين) أقل نشاطًا. وتتراوح فترات نصف عمر النظائر المشعة التي يركز عليها هذا التقرير وهي أكثر مصادر الفئات 1 و2 و3 استخدامًا (الكوبالت 60، والسيزيوم 137، والإيريديوم 192، والأميريسيوم 241، والسيلينيوم 75) من 74 يومًا إلى 432.7 عامًا ما يجعلها مرشحة جذابة للاستخدام الضار لقدرتها على تلويث المناطق لفترات زمنية طويلة والتسبب في تحريم المنطقة. وتتضمن العواقب طويلة الأجل لحدث على فقدان السيطرة على السيزيوم 137 مع نصف عمر 30.17 سنة من شأنه أن يتسبب في تحريم المنطقة لفترة أطول بكثير من الإيريديوم 192 مع نصف عمر يبلغ 74 يومًا.
3. *الأشكال الفيزيائية والكيميائية وانتشار المصادر المشعة*. تعد المساحيق، وهي شكل نموذجي من السيزيوم 137، أسهل في التحلل الجوي والانتشار من الحبيبات الصلبة، وهو شكل شائع من الكوبالت 60. ويمكن أن تؤدي المصادر الأكثر انتشارًا إلى مزيد من التلوث الخارجي للأشخاص والهياكل وتحريم مناطق أكبر. وبالتالي، ستكون تكاليف المعالجة، خاصة إذا انتشرت النظائر المشعة في أسطح المباني، أعلى. بالإضافة إلى ذلك، من المرجح أن تتسبب المصادر الأكثر انتشارًا في حدوث تلوث داخلي للأفراد المعرضين من خلال التنفس أو الابتلاع. ولهذه الأسباب، حددت الحكومات في جميع أنحاء العالم شكل ملح كلوريد السيزيوم من السيزيوم 137 باعتباره تهديدًا رئيسيًا في حالة استخدامه في سلاح إشعاعي، ويتخذ الكثيرون تدابير لتقليل أو القضاء على استخدامه في المصادر المشعة المستخدمة في البحوث الطبية والاستعمالات التجارية.
4. *تجميع المصادر للفئة 1 أو الفئة 2*. رغم أن بعض المصادر الفردية قد يكون نشاطها منخفض، في حالة تجميعها على مقربة من بعضها في مكان تخزين أو استعمال واحد، فمن الممكن أن يكون نشاطها الإجمالي أعلى وبالتالي يشكل مخاطر أعلى على السلامة والأمن. ويعتبر وجود عدة مصادر في بيئات مختلفة عرضة للتجميع. وعادة ما تكون هذه المصادر قابلة للنقل ويمكن أن تشمل مصادر المعالجة الموضعية ذات الجرعات العالية، بالإضافة إلى المصادر المستخدمة في التصوير الشعاعي وتسجيل قياسات الآبار. وتدرك الوكالة الدولية للطاقة الذرية واللجنة التنظيمية النووية الأمريكية والوكالات والمؤسسات الأخرى المخاطر المتعلقة بتجميع المصادر. على سبيل المثال، توفر اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية متطلبات برنامج الحماية المادية لأي صاحب ترخيص يمتلك كمية مجمعة من الفئة 1 أو الفئة 2 من المواد المشعة في الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية الفصل 37 (راجع القسم 2-4-1).
5. *انتشار المصادر*. يؤدي الاستخدام واسع النطاق للمصادر إلى زيادة احتمالية وقوع الحوادث أو التحويل. وفي نطاق هذه الدراسة، تحتوي المصادر المشعة الأكثر شيوعًا على الكوبالت 60. وفي عام 2020، أفادت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية أن 93 في المائة من مصادر الفئة 1 و85 في المائة من مصادر الفئة 2 تحتوي على الكوبالت 60. وكلما زاد عدد المنشآت التي تستخدم المصدر، زادت مخاطر السلامة والأمن المرتبطة بهذا النوع من المصادر.
6. *قابلية نقل المصادر*. تعد المصادر المشعة التي يتم تركيبها في أجهزة ثابتة كبيرة يصعب إزالتها أكثر أمانًا من المصادر التي يتم تركيبها في الأجهزة المحمولة التي يسهل إزالتها أو في الأجهزة التي يتطلب استخدامها نقلًا متكررًا ولمسافات طويلة. ويتم تركيب كل مصادر الكوبالت 60 تقريبًا، على الرغم من انتشارها، في أجهزة ثابتة. ومع ذلك، يتم تركيب مصادر الإيريديوم 192 المستخدمة في التصوير الشعاعي الصناعي في أجهزة محمولة ويتم نقلها بشكل متكرر وتتطلب استبدالًا متكررًا نظرًا لنصف العمر الأقصر للنظائر المشعة. ووفقًا لقواعد بيانات تتبع الأحداث (راجع القسم 2-5-3)، تساهم مصادر الإيريديوم 192 المستخدمة في الاستعمالات الصناعية في معظم الحوادث التي تنطوي على تأثيرات صحية حتمية بسبب قابليتها للنقل وقابلية وضع في غير محلها أو فقدانها. ويعد الإيريديوم 192 أيضًا من النظائر المشعة التي تشارك في الغالب في معاملات المصادر الإشعاعية في الولايات المتحدة نظرًا لعمرها النصفي الأقصر (74 يومًا)، مما يستلزم استبدال المصدر كل 3 إلى 4 أشهر. ووفقًا للجنة التنظيمية النووية الأمريكية، تتضمن حوالي 97 بالمائة من معاملات مصادر الفئة 1 والفئة 2 هذا النظير المشع.[3]

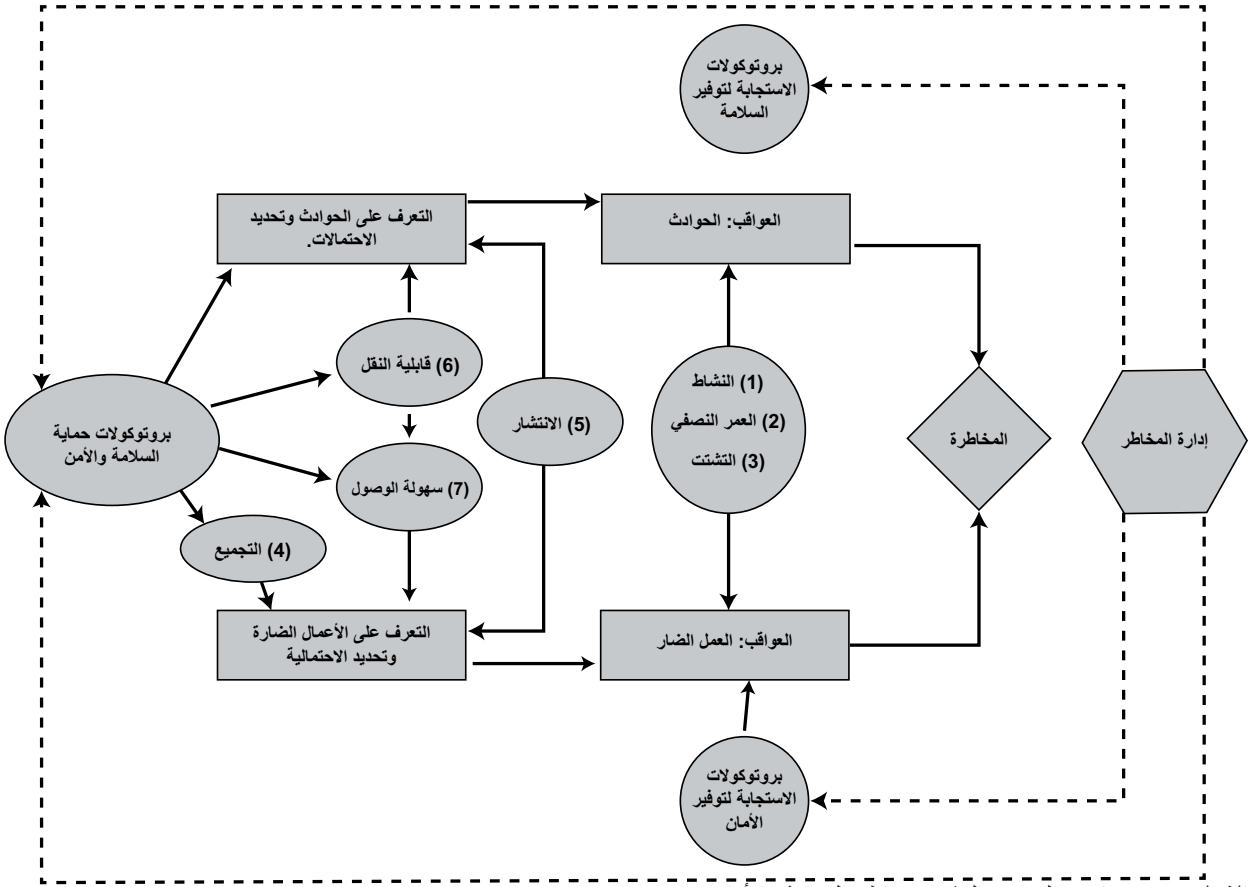
[3] مارغريت سيرفيرا، هيئة التنظيم النووي الأمريكية، عرض تقديمي أمام اللجنة في 11 يونيو 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

7. *سهولة الوصول إلى المصادر*. قد تكون المصادر في المرافق ذات الوصول المقيد أقل عرضة للخطر من المصادر الموجودة في المرافق التي يكون الوصول إليها أقل تقييدًا. على سبيل المثال، تقصر مرافق التعقيم الصناعي الوصول على الموظفين المصرح لهم فقط، بينما يستطيع الزوار الوصول إلى المرافق الطبية والبحثية.
8. *بروتوكولات السلامة والأمن*. يؤثر توافر بروتوكولات الأمن والسلامة وجودتها وفعاليتها ومستوى الالتزام بها على احتمالية وقوع أحداث إشعاعية. وتعتمد فعالية البروتوكولات عادة على الأمن المادي للموقع الذي يُستخدم ويُخزن فيه المصدر المشع بالإضافة إلى مستوى تدريب الموظفين العاملين. وبمجرد وقوع حدث إشعاعي، تؤثر قدرة الاستجابة للطوارئ المتاحة محليًا وكذلك القدرة على التخفيف التي يمكن حشدها على عواقب الحدث.

من الممكن وقوع الأحداث الإشعاعية المتعلقة بالسلامة والأمن طوال دورة حياة استخدام المصدر المشع. يعرض الشكل 2-1 الأحداث الإشعاعية المحتملة المتعلقة بالسلامة والأمن فيما يتعلق بخصائص المصدر الموصوفة أعلاه ويوفر مدخلات رئيسية لتقييم مخاطر السلامة والأمن من مصدر إشعاع. وسيتم افتراض مجموعة من حالات البدء غير الطبيعية لكل نوع حدث (من نموذج المخاطر: ما الخطأ الذي يمكن أن يقع؟) ثم سيتم تحديد أوضاع الفشل لتحديد النتائج. وسيتم إجراء التحديد الكمي لتسلسل الأحداث التي تؤدي إلى هذه النتائج (من نموذج المخاطر: ما احتمالية حدوث ذلك؟).



الشكل 2-1 خصائص المصدر المشع ومخاطر السلامة والأمان.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

3-2 السلامة الإشعاعية ووقائع الأمان

يلخص هذا القسم الأحداث الإشعاعية المتعلقة بالسلامة والأمن التي حدثت خلال السنوات العشر إلى الخمس عشرة الماضية، أي منذ صدور تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008. ونصف في مكان آخر من هذا المستند الأحداث الكبرى التي وقعت قبل عام 2008، بما في ذلك الأحداث في خواريز في المكسيك (1983)؛ وتشيرنوبيل في أوكرانيا (1986)؛ وغويانيا في البرازيل (1987)؛ وسيرينوكس في إسبانيا (1988)؛ وحقول النفط النيجيرية (2002 و2004)، وأسفرت عن الدروس المستفادة ذات الصلة (راجع، على سبيل المثال، الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 1988، 1998؛ اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008). وفيما يلي وصف موجز للأحداث التي وقعت في مايابوري في الهند (2010)؛ وفوكوشيما في اليابان (2011)؛ وتيبوخاكو في المكسيك (2013)؛ وجامعة واشنطن في الولايات المتحدة (2019).

1-3-2 مايابوري، الهند، 2010

في فبراير 2010، تم بيع جهاز إشعاع بحثي في جامعة دلهي يحتوي على حوالي 3600 كوري (Ci) أو 1.33 × 10^{14} بيكريل (Bq) من الكوبالت 60 في المزاد في سوق الخردة في مايابوري في نيودلهي. ويعود تاريخ شراء جهاز الإشعاع إلى عام 1968، لكن لم يُستخدم منذ عام 1985 وكان في المخزن في قسم الكيمياء بالجامعة. وانتهك المزاد اللوائح الوطنية للحماية من الإشعاع وسلامة المصادر المشعة.

وفي سوق الخردة، تم تفكيك المصدر بواسطة العمال الذين لم يكونوا على دراية بالطبيعة الخطرة للجهاز. وتعرض سبعة أشخاص لجرعات إشعاعية تتراوح من 0.6 إلى 6.8 غراي (Gy)، وتوفي شخص واحد. وشارك مجلس تنظيم الطاقة الذرية الهندي ووكالات الاستجابة للطوارئ الوطنية في عمليات استعادة المصدر (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2013 أ). تم استرداد كل أقلام الرصاص الستة عشر من الكوبالت 60، وتم استرداد 4 منها سليمة والباقي عبارة عن قطع متناثرة. يسلط الحدث الضوء على المخاطر المرتبطة بالتخلص غير المناسب من المصادر المشعة.

2-3-2 حادث محطة فوكوشيما دايتشي للطاقة النووية، اليابان، 2011

في 11 مارس 2011، تسبب زلزال شرق اليابان العظيم بقوة 9.0 درجات على مقياس ريختر وتلته أمواج تسونامي غير متوقعة بلغ ارتفاعها 15 مترًا في إتلاف نظام الإمداد بالطاقة والتبريد في المفاعلات الثلاثة العاملة في محطة فوكوشيما دايتشي للطاقة النووية. وأثبتت المفاعلات قوتها ضد الزلازل لكنها لم تستطع تحمل موجات التسونامي. ويعتبر حادث محطة فوكوشيما دايتشي للطاقة النووية أسوأ حادث يقع في محطة للطاقة النووية منذ كارثة تشيرنوبيل (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2015 ج).

أُجريت تقييمات للنشاط الإشعاعي الكلي المنبعث بواسطة العديد من المنظمات باستخدام نماذج مختلفة. وفي الآونة الأخيرة، أصدرت لجنة الأمم المتحدة العلمية المعنية بآثار الإشعاع الذري تقريرًا محدثًا (UNSCEAR، 2020) عن مستويات وآثار التعرض للإشعاع بسبب حادث محطة فوكوشيما دايتشي للطاقة النووية، الذي يؤكد بشكل عام النتائج والاستنتاجات الرئيسية لتقريرها المنشور سابقًا (UNSCEAR، 2014). ومع ذلك، كانت هناك مبالغة في تقدير بعض الجرعات للجمهور الموصوفة في التقرير السابق. بالإضافة إلى ذلك، كان هناك قدر كبير من المعلومات الجديدة التي أصبحت متاحة حول مستويات النويدات المشعة في البيئة، لا سيما بشأن تركيزات النويدات المشعة المنبعثة في الهواء كدالة للوقت وأشكالها الفيزيائية والكيميائية.

بشكل عام، حدث إطلاق لخليط من نواتج الانشطار والتنشيط ويقدر الآن بقيمة 120 بيتابيكريل (PBq) لليود 131 و10 بيتابيكريل للسيزيوم 137 (UNSCEAR، 2020). وتعتبر هذه التقديرات بقوة حوالي 7 و12 في المائة، على التوالي، من الإطلاقات المقابلة المقدرة لحادث تشيرنوبيل عام 1986. وانتشر الكثير (حوالي 80 في المائة) من المواد التي تم إطلاقها فوق المحيط الهادئ، لكن انتشر جزء كبير فوق البر الرئيسي الشرقي لليابان. بالإضافة إلى ذلك، كانت هناك انبعاثات وتصريفات سائلة مباشرة من محطة فوكوشيما دايتشي للطاقة النووية إلى البحر في الموقع.

لم تكن هناك آثار صحية فورية ناجمة عن الإشعاع بين عمال المصنع أو أفراد الجمهور نُسبت إلى الحادث. وكانت الجرعات التي تلقاها العمال المشاركون في الاستجابة والتنظيف على مدار 12 شهرًا الأولى بعد وقوع الحادث حوالي 13 ميللي سيفرت (mSv)، لكن تلقت نسبة صغيرة من القوى العاملة (0.8 بالمائة توافق أقل من 200 فرد) جرعات فعالة أعلى من 100 ميللي سيفرت مع جرعة فعالة قصوى تبلغ حوالي 680 ميللي سيفرت (UNSCEAR، 2020). وتنخفض الجرعات الفعالة السنوية للعمال المشاركين في التنظيف منذ أبريل 2012. وكانت الجرعات الفعالة لأفراد الجمهور منخفضة: كانت الجرعات للأشخاص الذين تم إجلاؤهم من البالغين أقل من حوالي 6 ميللي سيفرت، وكان متوسط الجرعات الممتصة للغدة الدرقية أقل من حوالي 15 ميللي سيفرت، مقارنة بحوالي 30 ميللي سيفرت و500 ملي غراي لحادث تشيرنوبيل.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

كان تعرض الأطفال للإشعاع أيضًا منخفضًا في المتوسط لأن امتصاص اليود 131 كان محدودًا بسبب الإخلاء المبكر، وإعطاء اليود المستقر للسكان، والقيود المفروضة على مياه الشرب والحليب الطازج والطعام (كيم وآخرون (.Kim et al)، 2016). وتراوحت جرعة الغدة الدرقية لعدد قليل من الأطفال من 1 إلى 15 ميللي غراي. وللمقارنة، كان متوسط جرعة الغدة الدرقية بين الأطفال الصغار الذين تعرضوا خلال حادث تشيرنوبيل 1,500 ميللي غراي (ساميت وآخرون(.Samet et al)، 2018).

بعد حادث محطة فوكوشيما دايتشي للطاقة النووية، تم تقديم فحص الموجات فوق الصوتية للغدة الدرقية للأطفال الذين تبلغ أعمارهم 18 عامًا أو أقل كوسيلة لطمأنة أفراد الجمهور بأن جرعات الإشعاع التي تم تلقيها كانت منخفضة وبالتالي كانت المخاطر الصحية منخفضة أيضًا. ومع ذلك، كشف الفحص عن وجود عدد كبير غير متوقع من سرطانات الغدة الدرقية بين الأطفال الذين تم فحصهم (200 حالة حتى عام 2019 من بين حوالي 300,000 طفل خضعوا للفحص) وأثار ذلك مخاوف بين السكان والجمهور من أن يكون سبب ذلك التعرض للإشعاع من الحادث. وأثارت نتائج الفحص أيضًا مخاوف داخل المجتمع العلمي والطبي حول التشخيص الزائد بعد فحص الغدة الدرقية الناجم عن استخدام تقنية الموجات فوق الصوتية شديدة الحساسية.

نفذت حكومة محافظة فوكوشيما استبيان إدارة الصحة في فوكوشيما لمراقبة صحة السكان المتضررين. وإلى حد بعيد، كان التأثير الصحي الأبرز الذي تم الإبلاغ عنه في الاستبيان هو الآثار النفسية بين الأشخاص الذين تم إجلاؤهم وسكان فوكوشيما بسبب فقدان الأسرة والأصدقاء، والمنازل والوظائف والشعور بالمجتمع وعمليات الترحيل الجذرية والمخاطر الصحية المتصورة بسبب التعرض للإشعاع (سوزوكي وآخرون (.Suzuki et al)، 2015، 2018). ونظرًا لمعاناة جزء من السكان من الآثار المجتمعة للكارثة الثلاثية (زلزال كبير، وتسونامي مدمر، وحادث نووي)، فمن الصعب تقييم إلى أي مدى يمكن أن تُعزى الآثار النفسية الملحوظة إلى كل منها على حدة (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2015 ج). وللمساعدة في معالجة هذه الآثار، أنشأت حكومة المحافظة مركز فوكوشيما للرعاية الصحية العقلية.

كانت العواقب الاقتصادية للكوارث الطبيعية وحادث محطة فوكوشيما دايتشي للطاقة النووية هائلة بالنسبة لمحافظة فوكوشيما بسبب الخسائر الفادحة في الزراعة والتصنيع والسياحة. وكانت العواقب الاقتصادية قاسية أيضًا على اليابان بشكل عام، لا سيما في قطاعي التصنيع والطاقة. وعلى مدى السنوات العشر الماضية، حدث تقدم تدريجي في إعادة الإعمار الاقتصادي لمدينة فوكوشيما بما في ذلك تنظيف الموقع النووي، لكنها كانت عملية صعبة ومكلفة. ولا تزال الحكومة اليابانية تواجه قرارات صعبة فيما يتعلق بتطهير المحطة، مثل مصير المياه الملوثة من أنشطة المعالجة وإزالة حطام الوقود والتخلص من المفاعلات. وفي أبريل 2021 وافقت الحكومة اليابانية على إطلاق أكثر من مليون طن من المياه الملوثة من المحطة إلى البحر. وتقدر تكلفة تنظيف الموقع النووي بما يصل إلى 35 تريليون إلى 80 تريليون ين (حوالي 350 مليار دولار إلى 800 مليار دولار) على مدار 40 عامًا (JCER، 2019). بالإضافة إلى ذلك، اعتبارًا من نوفمبر 2020، لا يزال أكثر من 40,000 من السكان الذين يعيشون بالقرب من محطة الطاقة النووية وتم إجلاؤهم بناءً على توجيه من الحكومة اليابانية بسبب هذه الكارثة الثلاثية تحت أوامر الإخلاء (FPG، 2020).

على الرغم من أن حادثة محطة فوكوشيما دايتشي للطاقة النووية لم تتضمن مصدرًا مشعًا من الأنواع التي يتناولها هذا التقرير، إلا أنها أظهرت أن الحدث الذي يتضمن إشعاعًا يمكن أن يتسبب في عواقب اجتماعية واقتصادية كبيرة حتى لو لم يتسبب في أي وفيات فورية بسبب الإشعاع.

3-3-2 تيبوخاكو، المكسيك، 2013

في ديسمبر 2013، سُرقت شاحنة تنقل مصدرًا للعلاج عن بعد بالكوبالت 60 من مستشفى في شمال غرب مدينة تيخوانا إلى مركز لتخزين النفايات المشعة في تيبوخاكو بالقرب من مكسيكو سيتي. ولم يكن الخاطفون على علم بأن الشاحنة كانت تحمل مصدرًا عالي النشاط (حوالي 1,800 كوري أو 70 تيرا بيكريل)؛ وكان هدفهم سرقة الشاحنة (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2013 أ). وبعد يومين من الحادث، استعادت سلطات إنفاذ القانون الشاحنة وآلة العلاج عن بعد. وتمت إزالة مصدر الكوبالت 60 المشع من درعه الوقائي، لكنه ظل سليمًا (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2013 أ). ويبدو أن الرجال الستة الذين اعتقلتهم السلطات للاشتباه في سرقتهم للشاحنة لم يتعرضوا لمستويات عالية من الإشعاع. ويسلط هذا الحادث الضوء على المخاطر المرتبطة بنقل المصادر المشعة.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

2-3-4 حادث إشعاع جامعة واشنطن، 2019

في 2 مايو 2019، كُلفت شركة International Isotopes (INIS) المتعاقدة من الباطن مع وزارة الطاقة (DOE) باستعادة مصدر سيزيوم 137 مُحكم بقدرة 2900 كوري (حوالي 107 تيرا بيكريل) من مرفق هاربورفيو للبحوث والتدريب في ولاية واشنطن كجزء من عمل الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA) لإزالة المصادر المشعة المهملة والتخلص منها. وأدت محاولات المتعاقد من الباطن للتخفيف من الصعوبات غير المتوقعة في التفكيك والتخلص إلى إطلاق كمية صغيرة من السيزيوم، تقدر بنحو 1 كوري (37 غيغا بيكريل)، مما أدى إلى تلوث داخلي وخارجي لعدد 13 عاملاً ومراقبًا تلقوا جرعات فعالة لا تزيد عن من 0.55 ميللي سيفرت. وتعرضت المنشأة للتلوث أيضًا، واضطر أكثر من 200 باحث وموظف في المختبر إلى الانتقال إلى أماكن أخرى أثناء عمليات التعافي، مما كان له تأثير مباشر على أكثر من 80 برنامجًا بحثيًا ممولاً بميزانيات تقدر بعشرات الملايين من الدولارات.[4]

أكمل فريق تحقيق مشترك بقيادة الإدارة الوطنية للأمن النووي وشركة Triad National Security, LLC، مراجعة لمدة 9 أشهر للحدث لتحديد الأسباب الجذرية والمساهمة (وزارة الطاقة (DOE)، 2020). وتشمل الدروس المستفادة من الحادث أهمية التدريب المناسب لموظفي العمليات وتحسين فهم أدوار ومسؤوليات العديد من المؤسسات المشاركة في عمليات التعافي الفورية وطويلة الأجل. وبعد الحادث، أعادت الإدارة الوطنية للأمن النووي تقييم المخاطر المرتبطة بجميع عمليات استرداد المصادر المشعة وتُجري تغييرات على طريقة استرداد المصادر. وبغض النظر عن مدى التعقيد، فإن تحليل المخاطر مطلوب الآن لأي عمل لاسترداد المصدر. واعتبارًا من فبراير 2021، اكتملت أنشطة الإصلاح تقريبًا، ومن المتوقع إعادة شغل المرافق في خريف 2021. وستتجاوز التكاليف المتوقعة للاستجابة والتعافي والإصلاح وإعادة الإعمار، المدفوعة بواسطة الإدارة الوطنية للأمن النووي، 100 مليون دولار.[5]

أظهر حادث المشع في جامعة واشنطن أنه حتى الإطلاقات الصغيرة من النشاط الإشعاعي، وهي في هذه الحالة 1 كوري (37 غيغا بيكريل) من السيزيوم 137 (أقل من كمية الفئة 3)، يمكن أن تتسبب في تكبد تكلفة اقتصادية كبيرة ناتجة عن تعطيل العمليات العادية للمنشآت المعنية.

2-4 مسؤوليات السيطرة على المصادر المشعة في الولايات المتحدة

تختلف الهياكل التنظيمية لترخيص المصادر المشعة وضمان استخدامها الآمن والمأمون من دولة إلى أخرى، وكانت المراجعة الشاملة لهذه الهياكل خارج نطاق عمل اللجنة. ويركز هذا القسم على الهيكل التنظيمي داخل الولايات المتحدة، الذي يشترك في بعض أوجه التشابه مع البلدان الأخرى ذات الدخل المرتفع. وعندما يكون ذلك ممكنا، تجري اللجنة مقارنات مع الدول الأخرى.

في الولايات المتحدة، تمتلك العديد من الوكالات والكيانات الحكومية مسؤوليات تنظيمية أو غيرها من المسؤوليات الرسمية لضمان الاستخدام الآمن والمأمون للمصادر المشعة في الاستعمالات الطبية والبحثية والتجارية، وحماية أفراد الجمهور والبيئة من الآثار الضارة المحتملة في حالة من أحداث السلامة أو الأمن التي تنطوي على هذه المصادر. ويتم وصف دور الوكالات والكيانات ذات الصلة بمهمة اللجنة في الأقسام التالية.

2-4-1 اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية وولايات الاتفاقية

ترخص اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC) وتنظم الاستخدام المدني للمواد المشعة وتوفر متطلبات السلامة والأمن المرتبطة باستخدامها.[6] تتضمن اللوائح الواردة في الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية الفصل 20، "معايير الحماية من الإشعاع"، الجزء الفرعي الأول، "تخزين المواد المرخصة والتحكم فيها" متطلبات الأمان لجميع المواد المشعة باستثناء تلك المستثناة تحديدًا بموجب اللوائح.[7] أصدرت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية أوامر رقابة متزايدة في نوفمبر 2005، تتطلب من المرخص لهم الذين يمتلكون مواد من الفئة 1 والفئة 2 توفير أمان إضافي لهذه المواد.[8] أُستبدلت أوامر الرقابة المتزايدة هذه في النهاية لتحل محلها اللوائح الواردة في الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية الفصل 37 بعنوان "الحماية المادية كميات المواد المشعة من الفئة 1 و2 من"، التي أصبحت سارية في مايو 2013.[9] يحدد الفصل 37 متطلبات الأمن المادي، ومراقبة المصادر، والتحقق من سجلات الموظفين، وخطة أمان المنشأة، وحماية إنفاذ القانون المحلية، والتدريب والتوثيق. وتستخدم متطلبات الأمن الواردة في الفصل

[4] لانس غارسون الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA)، عرض تقديمي أمام اللجنة في 12 يونيو 2020.

[5] لانس غارسون الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA)، عرض تقديمي أمام اللجنة في 25 فبراير 2021.

[6] كان بيان مهمة اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية الكامل على النحو التالي: "ترخص اللجنة التنظيمية النووية وتنظم الاستخدام المدني للمواد المشعة في الدولة لتوفير ضمان معقول للحماية الكافية للصحة والسلامة العامة ولتعزيز الدفاع والأمن المشتركين ولحماية البيئة." يُرجى الاطلاع على https://www.nrc.gov/about-nrc.html.

[7] يُرجى الاطلاع على https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/part020-1801.html.

[8] يُرجى الاطلاع على الأوامر الصادرة سابقًا: يمكن الاطلاع على الضوابط المتزايدة على https://www.nrc.gov/security/byproduct/orders.html.

[9] يُرجى الاطلاع https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part037/index.html.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

37 نظام تصنيف المصادر الخاص بالوكالة الدولية للطاقة الذرية كأساس وتركز على احتمال تسبب تلك المواد في وفيات فورية والتأثيرات الحتمية للإشعاع. وبالتالي، لا ينطبق الفصل 37 إلا على مصادر الفئتين 1 و2 بسبب قدرتها (وفقًا لنظام الوكالة الدولية للطاقة الذرية) على التسبب في أضرار جسيمة. ولا ينطبق الفصل 37 على مصادر الفئة 3 والفئة 4 والفئة 5 ما لم يتم تجميعها عند عتبة الفئة 2 أو أعلى منها.

بالإضافة إلى اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، تنظم ولايات الاتفاقية التسع والثلاثون أيضًا استخدام المواد المشعة وفقًا لمتطلبات التوافق الواردة في القسم 274 ب من قانون الطاقة الذرية. ويجب على ولايات الاتفاقية، كحد أدنى، تلبية لوائح اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (أن تتوافق مع لوائح اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية)، وفي بعض الحالات، تفي بمسؤوليتها من خلال إصدار لوائح أكثر صرامة من تلك الخاصة باللجنة التنظيمية النووية الأمريكية. وربما أيضًا تُفرض شروط الترخيص التي تنص عليها اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية أو ولايات الاتفاقية.

تندرج تراخيص المواد المشعة تحت فئتين رئيسيتين: التراخيص العامة والخاصة. ويوجد 19,300 ترخيص محدد و31,000 من حاملي أجهزة الترخيص العام في القطاع المدني الأمريكي لاستخدام المواد المشعة.[10] تنظم الغالبية العظمى (80 في المائة) من هذه التراخيص ولايات الاتفاقية.

وتُعرِّف اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية المرخص له بشكل عام بأنه "شخص أو مؤسسة تكتسب أو تستخدم أو تمتلك جهازًا مرخصًا بشكل عام، واستلمت الجهاز من خلال نقل مصرح به بواسطة الشركة المصنعة / موزع الجهاز، أو بواسطة تغيير ملكية الشركة حيث يظل الجهاز قيد الاستخدام في موقع معين". ويتم تحديد العناصر والمواد التي قد يمتلكها المشغلون أو يستخدمونها وفقًا للترخيص العام في اللوائح. وفي المقابل، يتطلب امتلاك ترخيص معين من المستخدم تقديم طلب ترخيص والحصول على ترخيص قبل الحصول على المواد المشعة. وتتضمن المتطلبات الإضافية للمصادر المرخصة على وجه التحديد الالتزام بشروط الترخيص، والتجديدات الدورية، وعمليات التفتيش الدورية بواسطة اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية أو ولايات الاتفاقية. ولا يمكن الحصول على مواد الفئتين 1 و2 إلا بموجب ترخيص محدد. ويمكن صرف مصادر الفئة 3 والفئة 4 والفئة 5 إما بموجب ترخيص عام أو خاص.

يجب الحصول على ترخيص محدد للسماح بتوزيع جهاز مرخص بشكل عام. ويجوز للمرخص له تحديدًا توزيع جهاز مرخص بشكل عام على من لا يمتلكون ترخيص مواد مشعة، لكن يجب على المرخص له العام الامتثال للمتطلبات التنظيمية. ولا تمتلك الغالبية العظمى، ما يقرب من 80 في المائة من حاملي أجهزة الترخيص العام، مصادر مشعة التي تعد موضوع هذا التقرير، لكن بدلاً من ذلك يمتلكون مصادر مثل علامات الخروج ذاتية الإضاءة للطرق (التي تحتوي على التريتيوم)، والمخطاط الكروماتوغرافي للغاز (التي تحتوي على النيكل 63)، أو أجهزة التخلص الاستاتيكية (التي تحتوي على البولونيوم 210).

في عام 2009، طلبت منظمة ولايات الاتفاقية من اللجنة التنظيمية النووية بالولايات المتحدة زيادة الرقابة التنظيمية على بعض المصادر المرخصة بشكل عام. ونتج عن الطلب عدم اتخاذ قرار بسبب تعادل الأصوات داخل اللجنة (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2009). ومع ذلك، أذنت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية لولايات الاتفاقية بزيادة الضوابط على المصادر المرخصة بشكل عام وفقًا لتقديرها الخاص، وسنت بعض الولايات مثل هذه الضوابط المتزايدة لبعض المرخص لهم عمومًا (منتدى النفايات المشعة منخفضة المستوى(LLRWForum)، 2014).

التتبع الوطني للمصادر

تدعو مدونة قواعد السلوك الخاصة بالوكالة الدولية للطاقة Jالذرية (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2004) الدول الأعضاء إلى إنشاء سجل وطني للمصادر المشعة يتتبع، كحد أدنى، جميع مصادر الفئة 1 والفئة 2. وتشير مدونة قواعد السلوك إلى أن الدول الأعضاء يجب أن تهدف إلى تنسيق شكل السجلات لتسهيل تبادل المعلومات المتعلقة بالمصادر الخاضعة للتتبع. ويعمل النظام الوطني لتتبع المصادر (NSTS) التابع للجنة التنظيمية النووية الأمريكية بمثابة السجل الوطني للمصادر المشعة من الفئة 1 والفئة 2.

يعد النظام الوطني لتتبع المصادر جزءًا من مجموعة أدوات تقنية المعلومات المعروفة باسم محفظة الإدارة المتكاملة للمصادر (ISMP) التي تم تطويرها لدعم أمن المواد المشعة والتحكم فيها. وتشمل الأنظمة الأخرى نظام الترخيص المستند على الويب (WBL) ونظام التحقق من التراخيص (LVS). وتؤدي الأنظمة الفردية التي تتكون منها محفظة الإدارة المتكاملة للمصادر الوظائف التالية:

- النظام الوطني لتتبع المصادر عبارة نظام تقنية معلومات يتتبع مصادر الفئتين 1 و2 من وقت تصنيعها أو استيرادها حتى وقت التخلص منها أو تصديرها أو حتى تحللها إلى ما دون عتبات الفئة 2. ويجب على جميع المرخص لهم، سواء أكانوا أعضاء في اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية أو من ولايات الاتفاقية، إبلاغ النظام الوطني لتتبع المصادر عن مصادرهم من الفئة 1 والفئة 2.

[10] مارغريت سيرفيرا، هيئة التنظيم النووي الولايات المتحدة، عرض تقديمي أمام اللجنة في 30 يناير 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

- الترخيص المستند على الويب (WBL) مستودع على الويب خاص باللجنة التنظيمية النووية الأمريكية وتراخيص ولايات الاتفاقية التي تمتلك كميات من المواد المشعة من الفئة 1 والفئة 2. ويتم الإبلاغ عن جميع تراخيص اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية في قاعدة البيانات هذه. ويجوز لولايات الاتفاقية أن تختار لنفسها ما إذا كانت ستستخدم الترخيص المستند على الويب كقاعدة بيانات الترخيص الخاصة بها. ومع ذلك، إذا لم تستخدم ولايات الاتفاقية الترخيص المستند على الويب كقاعدة بيانات خاصة بها، فلا يزال يتعين عليها تقديم النسخ الحالية من تراخيص الفئة 1 والفئة 2 إلى اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية لتضمينها في قاعدة البيانات.
- نظام التحقق من التراخيص (LVS) عبارة عن نظام تحقق وطني لتراخيص الفئتين 1 و2 بهدف ضمان حصول المرخص لهم فقط على المواد المشعة بالكميات المسموح بها. ويستخدم نظام التحقق من التراخيص المعلومات المخزنة في الترخيص المستند على الويب والنظام الوطني لتتبع المصادر.

تخضع البيانات المخزنة في النظام الوطني لتتبع المصادر للتنظيم من خلال مصادر منفصلة، وليس حسب الجهاز أو الاستخدام، ويتم تنظيم البيانات الموجودة في الترخيص المستند على الويب من خلال الحيازة الكاملة، وليس حسب الجهاز. ووفقًا للجنة التنظيمية النووية الأمريكية، عزز نشر النظام الوطني لتتبع المصادر المساءلة عن المصادر ذات المخاطر الكبيرة. وعلى وجه التحديد، عززت قدرة اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية وولايات الاتفاقية على إجراء عمليات التفتيش والتحقيقات، ونقل المعلومات إلى الوكالات الحكومية الأخرى، والتحقق من الحيازة المشروعة للمصادر الخاضعة للتتبع واستخدامها.[11] وتتطلب اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية أن يُجري المرخص لهم الذين يمتلكون مصادر من الفئة 1 والفئة 2 تحديثًا للنظام الوطني لتتبع المصادر عند نقل أو استلام مصدر من مرخص له آخر. ولا تطلب اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية من المرخص لهم الإعلان عما إذا كان المصدر قيد الاستخدام حاليًا أو في مخزن طويل الأجل. ويتتبع النظام الوطني لتتبع المصادر (NSTS) ما يقرب من 80,000 مصدر إشعاعي من الفئة 1 والفئة 2. وتشكل مصادر الفئة 1 حوالي 52 في المائة من هذه المصادر.[12]

تتطلب اللوائح الصادرة عن اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية ولوائح ولايات الاتفاقية من المرخص لهم الذين يمتلكون مصادر من الفئة 1 والفئة 2 التسوية سنويًا بين قوائم جرد المصادر المادية وجرد المصدر في النظام الوطني لتتبع المصادر.[13] تتضمن عملية التسوية التأكد من صحة البيانات الموجودة في النظام الوطني لتتبع المصادر وحل أي تباينات بين النظام الوطني لتتبع المصادر وجرد المصدر المادي.

تعتبر المعلومات المخزنة في النظام الوطني لتتبع المصادر، والترخيص المستند على الويب، ونظام التحقق من التراخيص غير متاحة للجمهور، ولا تنشر اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية البيانات المجمعة في التقارير العامة. وتشارك اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية بشكل روتيني البيانات من النظام الوطني لتتبع المصادر مع الشركاء الفيدراليين الآخرين، بما في ذلك الإدارة الوطنية للأمن النووي، ووزارة الأمن الداخلي (DHS)، ومكتب التحقيقات الفيدرالي، لدعم الوعي بالموقف.[14]

في عام 2020، أصدرت مبادرة التهديد النووي أول تقييم لأمن المصادر المشعة، والذي أجرى، بدون ترتيب أو منح نقاط للولايات، تقييمًا للسياسات والالتزامات الوطنية في 175 دولة وتايوان لمنع سرقة المواد المشعة عالية الخطورة. وأثار تقرير المبادرة المتعلقة بالتهديد النووي مخاوف بشأن أمن المصادر المشعة عالية الخطورة من خلال ملاحظة، من بين أمور أخرى، عدم وجود سجل نشط للمصادر المشعة في ما يقرب من ثلثي البلدان التي خضعت للفحص. ولاحظ واضعوا التقرير أن المنهجية المستخدمة في التحليل لم تتضمن بحثًا قطريًا متعمقًا، لكن اعتمد التقييم بدلاً من ذلك، على قواعد البيانات الموجودة والمصادر الأخرى للمعلومات الموحدة (المبادرة المتعلقة بالتهديد النووي (NTI)، 2020). ولأسباب غير واضحة للجنة، لم يتم تصنيف النظام الوطني لتتبع المصادر على أنه "سجل نشط" في هذا التحليل.[15]

دور الفئة 3

تخضع مصادر الفئة 3 على غرار جميع المواد المشعة والنووية المرخصة بشكل خاص، لمتطلبات الأمن الواردة في الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية الفصل 20 ويجب تأمينها ضد الوصول أو الإزالة غير المصرح بهما عندما تكون مخزنة وأن تكون تحت المراقبة والسيطرة المستمرة عندما لا تكون مخزنة. بالإضافة إلى ذلك، وتخضع جميع المصادر المشعة من الفئة 3

[11] يُرجى الاطلاع على https://www.nrc.gov/security/byproduct/ismp/nsts/overview.html.

[12] رسالة من جورج سميث، هيئة التنظيم النووي، إلى أورانيا كوستي، الأكاديميات الوطنية، في 5 فبراير 2021.

[13] تعتبر التسوية مطلوبة بموجب الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية القسم 20.2207 (ز)، "تقارير المعاملات التي تنطوي على مصادر خاضعة للتتبع الوطني"، وبموجب لوائح ولايات الاتفاقية المعادلة.

[14] رسالة من جورج سميث، هيئة التنظيم النووي، إلى أورانيا كوستي، الأكاديميات الوطنية، في 5 فبراير 2021.

[15] ساماثا نيكراسي، مبادرة التهديد النووي، عرض تقديمي أمام اللجنة في 6 يناير 2021.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

لضوابط خاصة باستعمالها. على سبيل المثال، تخضع المصادر المشعة المستخدمة في تسجيل قياسات الآبار (راجع القسم 6-3) أيضًا للوائح الواردة في الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية الفصل 39 التي تتضمن متطلبات صيانة الجرد ومراقبة العمليات والنقل الآمن. ويمتلك المرخص لهم الآخرين الذين يمتلكون مصادر مشعة لوائح خاصة بالاستخدامات المقصودة. ومع ذلك، وفقًا للمذكور في الأقسام السابقة، لا تنطبق لوائح الأمان ومتطلبات إعداد التقارير في الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية الفصل 37 على مصادر الفئة 3 ما لم يتم تجميعها وتفي بعتبات الفئة 2 أو تتجاوزها. وفي عدة مناسبات، نظرت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية في تغيير لوائحها المتعلقة بمصادر الفئة 3 إلى أنظمة أكثر صرامة.

في عام 2008، نظرت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية في تضمين مصادر الفئة 3 ومجموعة فرعية من مصادر الفئة 4 في النظام الوطني لتتبع المصادر الذي تم إنشاؤه للتو. وتضمنت هذه المصادر أجهزة القياس الصناعية الثابتة، وأجهزة تسجيل قياسات الآبار، والمعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية والمنخفضة، وبعض أجهزة التصوير الشعاعي. وفي ذلك الوقت، كان من المقدر أن يؤدي إدراج مصادر الفئة 3 إلى إضافة متطلبات الإبلاغ الخاصة بالنظام الوطني لتتبع المصادر إلى ما يقرب من 1,000 من المرخص لهم، أو ما يقرب من ضعف عدد المرخص لهم المطلوبين لإبلاغ النظام الوطني لتتبع المصادر. وعارضت معظم رسائل التعليق على القاعدة المقترحة هذا التوسيع للنظام الوطني لتتبع المصادر للأسباب التالية:

1. كانت القاعدة سابقة لأوانها واحتاجت إلى تأخير لإتاحة الوقت لتحليل العبء التنظيمي لإضافة هذه المصادر في النظام الوطني لتتبع المصادر باستخدام الخبرة الفعلية من النظام الوطني لتتبع المصادر التشغيلي لمصادر الفئة 1 والفئة 2.
2. يجب أن يكون النظام الوطني لتتبع المصادر جاهزًا للعمل بشكل كامل وأن يتتبع مصادر الفئة 1 والفئة 2 بنجاح قبل أن تضيف اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية عددًا من مصادر الفئة 3 والفئة 4 إلى النظام.
3. كانت هناك حاجة إلى تبرير إضافي فيما يتعلق بالمخاطر الأمنية التي تشكلها هذه المصادر قبل تكبد عبء إضافي للمحاسبة عنها في النظام الوطني لتتبع المصادر (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2009).

أعلنت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية في 30 يونيو 2009، أن اللجنة "لم تتمكن من التوصل إلى قرار بشأن توصية فريق العمل لإصدار قاعدة نهائية لتوسيع عدد ونوع المصادر المشعة" التي يغطيها النظام الوطني لتتبع المصادر (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2009).

تمت إعادة النظر في مدى ملاءمة لوائح المصدر الأكثر صرامة من الفئة 3 مرة أخرى في عام 2014، عندما كان مطلوبًا من اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، من خلال التفويض التشريعي، تقييم فعالية متطلبات الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية الفصل 37 وتحديد ما إذا كانت المتطلبات توفر الحماية الكافية. وخلصت الوكالة إلى أن نطاق الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية الفصل 37 الذي يقتصر على مصادر الفئة 1 والفئة 2 كان مناسبًا بناءً على تقييمات التهديد والضعف والنتائج في ذلك الوقت (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2014 ب). وفي الآونة الأخيرة، طلب مفوضو اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية من الموظفين تقييم مدى وجود حاجة لمراجعة اللوائح أو العمليات المتعلقة بحماية المصادر المشعة والمساءلة. وكان الدافع وراء هذا الطلب تقرير مكتب المساءلة الحكومية (GAO) بشأن ضوابط المواد الخطرة (GAO، 2016)، الذي أوصى بأن تتخذ اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية خطوات لأجل:

1. تضمين مصادر الفئة 3 في النظام الإلكتروني للجنة التنظيمية النووية الأمريكية لإدارة المعلومات المتعلقة بالمصادر.
2. مطالبة المرخص لهم الذين ينقلون كميات من الفئة 3 من المواد المشعة إلى المرخص له المستلم المحتمل بأن يؤكدوا مع الجهة التنظيمية أو مع نظام إدارة المعلومات الإلكترونية التابع للجنة التنظيمية النووية الأمريكية صلاحية ترخيص المستلم.
3. الوضع في الاعتبار طلب إجراء مراجعة أمنية في الموقع لجميع المتقدمين للحصول على تراخيص الفئة 3 الذين لا تعرفهم الجهة التنظيمية.

شكلت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية وولايات الاتفاقية استجابة لطلب المفوضين، مجموعة عمل مشتركة، وهي مجموعة عمل أمان المصادر والمساءلة للفئة 3، لتقييم ما إذا كان ينبغي على الوكالة طلب تدابير أمنية إضافية لمواد الفئة 3. وقررت مجموعة العمل أن هذه المواد لا تلبي عتبة الوفيات الفورية والآثار الصحية الحتمية التي حددتها اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية؛ وأنه لا يوجد دليل على المصلحة المعاكسة في الحصول على كميات من الفئة 3 عن طريق السرقة؛ ولم تطرأ زيادة على نقاط الضعف الأمنية في المنشآت التي تحتوي على كميات من الفئة 3 من المواد المشعة منذ أن قامت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية بتقييمها لأول مرة؛ وعواقب السلاح الإشعاعي الذي يستخدم مادة من الفئة 3 ليست كبيرة بما يكفي لتتطلب تدابير أمنية إضافية.[16]

[16] تم توثيق التحليل والتوصيات الناتجة عن هذه الجهود في SECY-17-0083 (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية، 2017).

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

قرر موظفو اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، استنادًا إلى تحليل مجموعة العمل وقابلية التأثر والنتائج، أن البيانات لا تبرر التكلفة المرتبطة بالتغييرات التنظيمية وأوصوا بأن لا تعدل اللجنة اللوائح لتطلب التحقق من ترخيص المواد المشعة من الفئة 3 أو فرض متطلبات أمنية لمنع تجميع مواد من الفئة 3 إلى كمية من الفئة 2. وأوصى التقرير بأن توافق اللجنة على متابعة وضع القواعد التي تتطلب وجود معدات السلامة والأمن قبل منح ترخيص لكيان غير معروف وتوضيح طرق التحقق من الترخيص لعمليات النقل التي تنطوي على كميات من المواد المشعة أقل من عتبة الفئة 2. ولم تكن اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية في وقت كتابة هذه السطور، قد أصدرت بعد توجيهات بشأن إعادة تقييم الموظفين المقترحة لمساءلة مصدر الفئة 3.

الاتجاهات في جرد المصادر المشعة

قدمت اللجنة العديد من الاستفسارات إلى اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية لفهم الجرد الحالي للمصادر واتجاهات الجرد على مدار السنوات العشر إلى الخمس عشرة الماضية. وعلمت اللجنة أن تحديد عدد الأجهزة المرخصة خلال فترات زمنية (على سبيل المثال، عدد مشعات السيزيوم 137 المرخصة في السنوات العشر الماضية) سيتطلب الوصول إلى كل من النظام الوطني لتتبع المصادر (NSTS) والترخيص المستند على الويب (WBL) لمطابقة المصادر المنفصلة بحدود الامتلاك والاستخدامات المصرح بها. وسيتطلب فعل مصادر كثيفة، ولن تتمكن اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية من تقديم المعلومات إلى اللجنة. وأبلغت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية اللجنة أن عدد المرخص لهم بالمواد انخفض بشكل طفيف على مدى السنوات القليلة الماضية، وتتوقع اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية وولايات الاتفاقية استمرار هذا الاتجاه العام. ويمكن تفسير بعض هذا التراجع بدمج المرافق (مثل المنشآت الطبية) وتوحيد المرخص لهم.

قبل النظام الوطني لتتبع المصادر (من 2004 إلى 2008)، احتفظت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية بقاعدة بيانات مؤقتة كانت مصممة لجمع جرد لمرة واحدة للأجهزة والمصادر. وكان إبلاغ قاعدة البيانات المؤقتة طوعيًا. وتم تسجيل حوالي 40,000 مصدر من الفئة 1 والفئة 2 في قاعدة البيانات المؤقتة (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008). وتم نقل البيانات من قاعدة البيانات المؤقتة إلى النظام الوطني لتتبع المصادر في عام 2008. وفي السنة الأولى من التنفيذ (2009)، تتبع النظام الوطني لتتبع المصادر ما يقرب من 60,000 مصدر، مما يعني أن جرد مصادر الفئة 1 والفئة 2 كانت تقديراته منخفضة في السابق بسبب الطبيعة الطوعية لقاعدة البيانات المؤقتة. وكان العامل الإضافي الذي يفسر العدد الأكبر من المصادر التي تم تتبعها في النظام الوطني لتتبع المصادر هو تضمين مصادر وزارة الطاقة التي لم تكن جزءًا من قاعدة البيانات المؤقتة. واعتبارًا من فبراير 2021، كان ما يقرب من 3 بالمائة من المصادر في القاعدة الوطنية للتتبع الوطني تحت سلطة وزارة الطاقة.[17] كما ذكرنا سابقًا، اعتبارًا من فبراير 2021، تم تتبع ما يقرب من 80,000 مصدر من الفئة 1 والفئة 2 بواسطة النظام الوطني لتتبع المصادر. ويعني هذا أن جرد مصادر الفئة 1 والفئة 2 زاد بنحو 30 في المائة من عام 2009 إلى عام 2021.

تعتبر اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية في أفضل وضع لتقديم معلومات دقيقة حول العوامل التي ساهمت في الزيادات في جرد مصادر الفئة 1 والفئة 2 في الولايات المتحدة. وقد يتطلب ذلك تحليل البيانات المخزنة في قواعد البيانات المختلفة التي تشكل محفظة الإدارة المتكاملة للمصادر (ISMP). ولم تتمكن اللجنة من تلقي معلومات من اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية حول ما يساهم في زيادة الجرد. ومع ذلك، بناءً على تحليلها الخاص لاستخدام المصادر المشعة في الاستعمالات المختلفة وتقييم الاتجاهات على مدى السنوات العشر إلى الخمس عشرة الماضية، خلصت اللجنة إلى أن أكبر مساهم في زيادة جرد المصادر المشعة هو على الأرجح استخدام الكوبالت 60 في التعقيم الصناعي وتحديداً في تعقيم الأجهزة الطبية.

كما ناقشنا في الفصل الخامس، ينمو سوق الأجهزة الطبية في الولايات المتحدة بنسبة 5 إلى 7 في المائة سنويًا[18] بسبب زيادة الطلب على الأجهزة الطبية الحالية وبسبب توفر منتجات جديدة. وينمو سوق تعقيم الأجهزة الطبية في الولايات المتحدة بمعدل سوق الأجهزة الطبية نفسه تقريبًا. وعلى الرغم من الاستخدام المتزايد للتقنيات البديلة لتعقيم الأجهزة الطبية، لا يزال استخدام الكوبالت 60 الطريقة الأكثر شيوعًا القائمة على الإشعاع لهذا الاستعمال في الولايات المتحدة وعلى الصعيد الدولي.

نظرًا لعدم وجود متطلبات إبلاغ لمصادر الفئة 3 في النظام الوطني لتتبع المصادر، لا تمتلك اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية معلومات عن عدد مصادر الفئة 3 المرخصة حاليًا في الولايات المتحدة. وقبل عام 2008، أجرت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية عملية جمع بيانات لمرة واحدة وقدرت أن عدد مصادر الفئة 3 كان حوالي 5,200 جهاز. ومن المحتمل أن يكون هذا الرقم أقل من الواقع. وفي حالة تطبيق عوامل مماثلة على مصادر الفئة 3 مقارنة بمصادر الفئة 1 والفئة 2 (على سبيل المثل، تم خفض تقديرات عدد المصادر بنسبة 50 في المائة عندما أجرت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية جمع البيانات لمرة واحدة في عام 2008، والذي كان أيضًا طوعيًا، بالإضافة إلى أن الجرد يزداد بالمعدل نفسه الخاص بمصادر الفئة 1 والفئة 2)، فمن المحتمل وجود أكثر من

[17] اتصال عبر البريد الإلكتروني بين مارغريت سيرفيرا، هيئة التنظيم النووي الأمريكية، وأورانيا كوستي، الأكاديميات الوطنية، في 24 فبراير 2021.

[18] كاتلين هوفمان، شركة سوتيرا للخدمات الصحية، عرض تقديمي أمام اللجنة في 13 أكتوبر 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

10,000 مصدر من الفئة 3 في الولايات المتحدة اليوم. وحسب الروايات المتناقلة، افترض بعض الخبراء أن عدد مصادر الفئة 3 يفوق عدد مصادر الفئة 1 أو الفئة 2. ومن الممكن أن يوضح تتبع مصادر الفئة 3 هذه المشكلة.

لم تجر اللجنة فحصًا شاملاً للاتجاهات الدولية في جرد المصادر المشعة. ومع ذلك، طلبت واستلمت معلومات من لجنة الأمان النووي الكندية (CNSC) بشأن نظام تتبع المصدر المُحكم (SSTS) في البلاد.[19] وعلى غرار النظام الوطني لتتبع المصادر، يتتبع نظام تتبع المصدر المُحكم إنشاء وحركة جميع المصادر المُحكمة من الفئة 1 والفئة 2 في كندا، وكذلك ما يتم استيراده وتصديره. وعلى غرار الولايات المتحدة أيضًا، زاد جرد مصادر الفئتين 1 و2 في كندا خلال العقد الماضي، لكن الزيادة كانت أكبر. وعلى وجه التحديد، في عام 2010، كان هناك حوالي 2,600 مصدر من الفئة 1 و22,500 مصدر من الفئة 2 تم تتبعها بواسطة نظام تتبع المصدر المُحكم، وفي عام 2019 كان هناك ما يقرب من 7,000 مصدر من الفئة 1 و65,000 مصدر من الفئة 2 تم تتبعها؛ أي أن عدد المصادر التي تم تتبعها تضاعف. ووفقًا للجنة الأمان النووي الكندية، يمكن أن تُعزى الزيادة في جرد المصدر إلى إعادة المصادر غير المستخدمة أو المستنفدة إلى الشركات المصنعة لإعادة التدوير أو التخزين طويل الأجل، وإلى تغيير فئة المصادر بسبب الانحلال، وإلى زيادة عدد المصادر المُحكمة المصنعة في كندا. تُتاح الاتجاهات في تتبع المصدر في كندا للجمهور في التقارير السنوية ويتم نشرها عبر الإنترنت على موقع ويب لجنة الأمان النووي الكندية.

لا يتم تتبع مصادر الفئة 3 بواسطة نظام تتبع المصدر المُحكم، وبالتالي لم يتم تحديد عدد مصادر الفئة 3 في كندا بدقة. ومع ذلك، تطلب لجنة الأمان النووي الكندية قوائم جرد المرخص لهم لجميع المصادر سنويًا والتي يتم تخزينها في ملف قابل للبحث. وعلى أساس هذه العملية، أبلغت لجنة الأمان النووي الكندية عن أكثر من 57,000 مصدر منالفئة 3 في عام 2019. ولا تخطط لجنة الأمان النووي الكندية لتضمين مصادر الفئة 3 في نظام تتبع المصادر الخاص بها، مع ملاحظة أن القرار "يستند إلى نهج واع بالمخاطر يضع في الاعتبار الآليات الحالية للإبلاغ عن قوائم الجرد".[20] من خلال جعل تتبع مصادر الفئة 3 إلزاميًا، حددت لجنة الأمان النووي الكندية التحديات المتعلقة بثلاث مهام أساسية:

1. تحديث قاعدة البيانات الحالية لدعم الزيادة في عدد المعاملات والمستخدمين عبر الإنترنت.
2. تعديل عدد كبير من التراخيص لتفويض تتبع مصادر الفئة 3.
3. طلب واستلام المعلومات المطلوبة من المرخص لهم خلال فترة زمنية قصيرة.

2-4-2 الإدارة الوطنية للأمن النووي

يشارك مكتب الأمن الإشعاعي (ORS) داخل وزارة الطاقة والإدارة الوطنية للأمن النووي في استراتيجية ثلاثية الأبعاد لأمن المصادر المشعة عالية النشاط:

1. حماية المصادر المشعة المستخدمة في الأغراض الطبية والبحثية والتجارية؛
2. إزالة المصادر المشعة غير المستخدمة والتخلص منها؛
3. الحد من الاعتماد العالمي على المصادر المشعة من خلال تشجيع تبني وتطوير تقنيات بديلة غير نظائر مشعة.

بالنسبة للجهد الأول، تعمل الإدارة الوطنية للأمن النووي مع اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية وحاملي رخص المواد وحكومات الولايات والحكومات المحلية والقبلية، والوكالات الفيدرالية الأخرى أن تعتمد على المتطلبات التنظيمية الحالية من خلال توفير تعزيزات أمنية طوعية. وتتضمن أمثلة هذه التعزيزات ترقيات أمنية طوعية مثل تقوية مشع كلوريد السيزيوم والتعزيزات الأمنية الخاصة بالمنشأة؛ والتدريب المتخصص لأجهزة إنفاذ القانون المحلية للاستجابة بشكل أفضل للتنبيهات في المنشآت التي تحتوي على مواد نووية ومشعة؛ والأمن، بما في ذلك اختبار تجريبي وشرح تجريبي طوعي لتشديد المراقبة على البضائع وتقييم الإنذار وتتبع الشحن. وحتى الآن، اشترك ما يقرب من 575 من المرخص لهم (يمثلون ما يقرب من 950 مبنى تحتوي على مصادر عالية المخاطر) مع الإدارة الوطنية للأمن النووي لتحديث إجراءات الأمن المادي الخاصة بهم. وتوفر هذه الترقيات حماية إضافية تتجاوز تلك المطلوبة للامتثال للمتطلبات الواردة في الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية الفصل 37. وتقدم الإدارة الوطنية للأمن النووي أيضًا تعزيزات أمنية إضافية وتقنية تتبع للمصادر المتنقلة المستخدمة في تسجيل قياسات الآبار والتصوير الشعاعي الصناعي.

[19] رسالة من إريك ليموين، لجنة الأمان النووي الكندية، إلى أورانيا كوستي، الأكاديميات الوطنية، في 25 فبراير 2021.
[20] رسالة من إريك ليموين، لجنة الأمان النووي الكندية، إلى أورانيا كوستي، الأكاديميات الوطنية، في 25 فبراير 2021.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

بالنسبة للجهد الثاني، ينفذ مكتب الأمن الإشعاعي عمليات إزالة المصدر من خلال مختبر لوس ألاموس الوطني ومختبر أيداهو الوطني. ويزيل مكتب الأمن الإشعاعي المصادر المشعة المُحكمة الزائدة أو غير المرغوب فيها أو غير المستخدمة التي تشكل خطرًا محتملاً على الأمن الوطني والصحة والسلامة (راجع القسم 2-8-5).

بالنسبة للجهد الثالث، ينفذ مكتب الأمن الإشعاعي الحد من الاعتماد على المصادر المشعة من خلال المعامل الوطنية لوزارة الطاقة والإدارة الوطنية للأمن النووي. وفي عام 2014، أطلق مكتب الأمن الإشعاعي مشروع استبدال مشع السيزيوم لتقليل عدد مصادر السيزيوم 137 والكوبالت 60 المستخدمة في الولايات المتحدة من خلال تقديم حوافز لاستبدال السيزيوم 137 والكوبالت 60 من مشعات الدم والمشعات البحثية لتحل محلها بدائل غير مشعة. ويتناول الشريط الجانبي 1.2 وصف هذا المشروع بشيء من التفصيل. ويمول مكتب الأمن الإشعاعي أيضًا البحث والتطوير في التقنيات البديلة (راجع القسم 3-6) بالإضافة إلى الدراسات المقارنة لتقييم تكافؤ التقنيات البديلة مع استعمالات المصادر المشعة (راجع القسم 5-2-3). أخيرًا، يعمل مكتب الأمن الإشعاعي مع شركاء دوليين لوضع اعتبارات التقنية البديلة من خلال المشاركة السياسية أو التواصل أو التنفيذ أو التبادل التقني. ويدعم جزء من هذا الجهد التواصل الشبكي وتبادل المعلومات من خلال الاجتماع المخصص للدول المعنية المشاركة في البدائل التقنية للمصادر المشعة عالية النشاط. ودعمت الإدارة الوطنية للأمن النووي 5 اجتماعات لمجموعات العمل حتى الآن ضمت ما يقرب من 60 مشاركًا من 26 دولة. بالإضافة إلى ذلك، تشارك الإدارة الوطنية للأمن النووي في رعاية الورش والمنشورات الناتجة عن الموضوعات المتعلقة بالتقنية البديلة.

3-4-2 الوكالات الأخرى

توجد وكالات أخرى عديدة داخل الولايات المتحدة تضطلع بأدوار ومسؤوليات تتعلق باستخدام المصادر المشعة لاستعمالات محددة.

إدارة الغذاء والدواء (FDA).

تنظم إدارة الغذاء والدواء (FDA) الشركات المصنعة للأجهزة المولدة للإشعاع (أي المنتجات الإلكترونية والأجهزة الطبية) والمنتجات المعرضة للإشعاع بما في ذلك الدم والغذاء. وتتولى المكاتب المختلفة داخل إدارة الأغذية والعقاقير مسؤولية هذه اللوائح. على سبيل المثال، ينظم مركز الأجهزة والصحة الإشعاعية ومركز التقييم والبحوث البيولوجية، مشعات الدم وإجراءات تشعيع الدم من خلال مذكرة تفاهم مشتركة. ويتشاور مركز الأجهزة والصحة الإشعاعية مع مركز التقييم والبحوث البيولوجية لتخليص السوق من مشعات الدم عبر عملية 510(k)،[21] التي تتضمن مقارنة مع مسند يتم تسويقه بشكل قانوني. وينظم مركز سلامة الأغذية والتغذية التطبيقية تشعيع المنتجات الغذائية.

وزارة النقل (DOT)

تعد كل من وزارة النقل وزارة الأمن الوطني إلى جانب اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية الجهات التنظيمية المشاركة للنقل الآمن والآمن للمصادر المشعة. وتم وصف أدوار وزارة النقل واللجنة التنظيمية النووية في لوائح نقل المواد المشعة في مذكرة تفاهم (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2015 أ). وتتضمن مذكرة التفاهم وضع معايير وأنظمة السلامة؛ ومراجعة الطرد والتفتيش والإنفاذ؛ والإبلاغ عن الحوادث والأحداث؛ وتبادل المعلومات.

يجب تعبئة جميع شحنات المواد المشعة ونقلها وفقًا للوائح وزارة النقل واللجنة التنظيمية النووية الأمريكية. وتحدد حاوية الشحن والتعبئة المشعة المطلوبة حسب طبيعة وشكل المادة المراد شحنها ومستوى نشاطها الإشعاعي. ويمكن تصنيف حاويات الشحن والتعبئة الخاصة بالمواد المشعة كعبوات مستثناة وتغليف صناعي وطرود من النوع أ وطرود من النوع ب. وتتعلق الطرود من النوع أ والنوع ب فقط بنقل أنواع المصادر المشعة (مصادر الفئة 1 أو 2 أو 3) التي فحصها هذا التقرير. ويجب شحن جميع مصادر الفئة 2 والفئة 3 إما في طرود من النوع أ والنوع ب، اعتمادًا على نشاط المصدر الذي يجري نقله. ويجب شحن جميع مصادر الفئة 1 في طرود من النوع ب. ويجب أن تجتاز الطرود من النوع أ والنوع ب اختبارات معينة لإثبات قدرتها على الحفاظ على سلامتها دون إخراج محتوياتها.[22]

[21] عملية 510(k) عبارة عن تقديم سابق على التسويق تم تقديمه إلى إدارة الغذاء والدواء لإثبات أن الجهاز الذي سيتم تسويقه آمن وفعال مثل جهاز يجري تسويقه بشكل قانوني. ويجب إجراء عملية 510(k) عند تقديم جهاز إلى التوزيع التجاري لأول مرة وعند وجود تغيير أو تعديل على جهاز تم تسويقه يمكن أن يؤثر بشكل كبير على سلامته أو فعاليته وفي بعض المواقف الأخرى.

[22] يُرجى الاطلاع على https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part071/full-text.html.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

وزارة الزراعة الأمريكية (USDA)

تنظم هيئة فحص صحة الحيوان والنبات في وزارة الزراعة الأمريكية بعض التدابير (معالجات الصحة النباتية، راجع القسم 3-5) لمنع دخول أو انتشار الآفات عن طريق الإبادة أو التعقيم بكفاءة عالية.

المعهد الوطني للمواصفات القياسية والتقنية (NIST)

يمتلك قسم الفيزياء الإشعاعية في المعهد الوطني للمواصفات القياسية والتقنية العديد من المصادر المشعة، في شكل السيزيوم 137 والكوبالت 60، للحفاظ على المعيار الوطني لكيرما الهواء (الطاقة الحركية الصادرة لكل كتلة وحدة) والجرعة الممتصة. تتمثل إحدى المهام الأساسية للمعهد الوطني للمواصفات القياسية والتقنية في نشر البيانات المعيارية لكيرما الهواء والجرعة الممتصة إلى مرافق المعايرة الثانوية والمستخدمين النهائيين (راجع القسم 4-6) لاستخدامها في معايرة أدوات اكتشاف الإشعاع.

5-2 تتبع حوادث المصدر المشع

تعرف اللجنة بوجود ثلاث قواعد بيانات تتبع حوادث المواد النووية والمصادر المشعة الموجودة في غير محلها أو المسروقة. وتهدف قواعد البيانات هذه إلى تعزيز الأمن النووي والإشعاعي من خلال تحديد الخصائص المشتركة للحوادث والاتجاهات. وتبين الحوادث التي تم الإبلاغ عنها إلى قواعد البيانات هذه أو من خلالها إلى وقوع الخسائر والأنشطة غير المصرح بها التي تنطوي على مواد مشعة مثل السرقة والاتجار غير المشروع في كثير من الأحيان. وتؤكد المعلومات المبلغ عنها أيضًا على الحاجة إلى تعزيز اللوائح التي تحكم استخدامها وتخزينها ونقلها والتخلص منها. ومن خلال فحص البيانات المبلغ عنها، تمكنت اللجنة من استخلاص الملاحظات التالية:

1. تعد الحوادث التي تنطوي على مخاطر عالية من الفئة 1 والفئة 2 نادرة نسبيًا؛
2. تعد الحوادث التي تنطوي على مصادر التصوير الشعاعي الطبية والصناعية من الفئة 4 والفئة 5 الأكثر شيوعًا؛
3. يؤدي نقل المصادر المشعة إلى ظهور نقاط ضعف؛
4. تقلل اللوائح الأمنية الأكثر صرامة مخاطر سرقة المصادر أو ضياعها؛
5. لم يتم استرداد جميع المصادر بعد الإبلاغ عن فقدها أو سرقتها؛
6. يحتمل أن تقلل قواعد البيانات من تمثيل العدد الفعلي من المصادر المسروقة أو المفقودة.

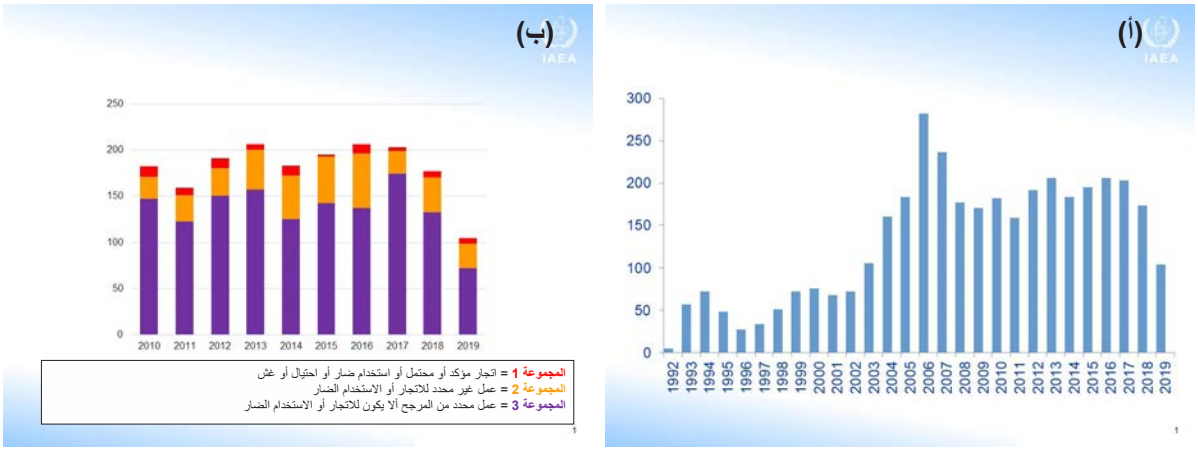
2-5-1 قاعدة بيانات الحادثات والاتجار غير المشروع التابعة للوكالة الدولية للطاقة الذرية

تحتفظ الوكالة الدولية للطاقة الذرية بقاعدة بيانات الحادثات والاتجار غير المشروع وغيرها من الأنشطة والحوادث غير المصرح بها التي تنطوي على مواد نووية ومواد مشعة أخرى خارجة عن السيطرة التنظيمية، التي تشمل المصادر المشعة المفقودة أو المسروقة. وتشارك الدول الأعضاء طواعية في نظام الإبلاغ الخاص بها وتضع معاييرها الخاصة لما يجب الإفصاح عنه للوكالة. وتتاح بيانات قاعدة بيانات الحادثات والاتجار غير المشروع المجمعة للجمهور من خلال تقارير الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، لا سيما صحيفة وقائع قاعدة بيانات الحادثات والاتجار غير المشروع. وصدرت أحدث صحيفة وقائع لقاعدة بيانات الحادثات والاتجار غير المشروع في عام 2020 وتحتوي على بيانات حتى عام 2019 (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2020 أ).

بين عامي 1992 و2019، أبلغت قاعدة بيانات الحادثات والاتجار غير المشروع عن 3,689 إدخالًا، منها 8 في المائة تتعلق بحوادث مع فعل مؤكد أو محتمل للاتجار أو الاستخدام الضار و64 في المائة غير مرتبطة بالاتجار أو الاستخدام الضار. وتم الإبلاغ عن الإدخالات المتبقية (28 بالمائة) على أنها غير محددة في طبيعتها؛ أي، لم تكن هناك معلومات كافية لتحديد ما إذا كانت الحوادث مرتبطة بالاتجار أو الاستخدام الضار (راجع الشكلين 2-2 أ و ب). وعلى مدار 27 عامًا من فترة الإبلاغ لقاعدة بيانات الحادثات والاتجار غير المشروع، كان ما يقرب من ثلثي (60 بالمائة) الحوادث متعلقة بمصادر مشعة. بشكل عام، تم الإبلاغ عن أقل من 200 مصدر مشع إلى قاعدة بيانات الحادثات والاتجار غير المشروع على أنها مسروقة أو تم الحصول عليها بقصد استخدامها للاتجار أو الاستخدام الضار - ما يقرب من 8 كل عام - مقارنة بحوالي 80 كل عام التي يبدو أنها مجرد خسائر أو حوادث أخرى غير متعلقة بالاتجار أو الاستخدام الضار.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version



الشكل 2-2 (أ) الحوادث المبلغ عنها إلى قاعدة بيانات الحوادث والاتجار غير المشروع، 1993-2019. (ب) اتجاهات الحوادث في الفترة 2010-2019.
المصدر: خوسيه غارسيا ساينز، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، عرض تقديمي للجنة في 10 يونيو 2020.

كانت غالبية السرقات والخسائر التي تم الإبلاغ عنها إلى قاعدة بيانات الحادثات والاتجار غير المشروع من مصادر الفئة 4 والفئة 5 المستخدمة في الاستعمالات الصناعية أو الطبية. وكانت معظم المصادر الصناعية التي تم الإبلاغ عن سرقتها أو فقدها هي تلك المستخدمة في الاختبارات غير التدميرية والاستعمالات في البناء وتسجيل قياسات الآبار وتحتوي على نظائر مثل الإيريديوم 192 والسيزيوم 137 والأميريسيوم 241.

يعد معدل الاسترداد للمصادر المشعة من الفئات 1 و2 و3 مرتفعًا. ولا توجد تقارير متابعة لمعظم الحوادث المتعلقة بالمصادر المشعة من الفئة 4 والفئة 5 متابعة يؤكد استردادها (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2020 أ). وفي عام 2019، تم الإبلاغ عن 189 حادثة إلى قاعدة بيانات الحادثات والاتجار غير المشروع، وشملت مصادر من الفئة 2 إلى 5.

2-5-2 قاعدة بيانات أحداث المواد النووية

تتولى اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، بدعم من مختبر أيداهو الوطني، صيانة قاعدة بيانات أحداث المواد النووية منذ عام 1990. وتحتوي قاعدة البيانات على سجلات الأحداث المتعلقة بالمواد المشعة المرخصة بما في ذلك المصادر المشعة المفقودة أو المهجورة أو المسروقة أو المواد الأخرى التي تم الإبلاغ عنها إلى اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية من قبل المرخص لهم أو دول الاتفاقية. ومنذ البداية، جمعت قاعدة البيانات ما يقرب من 25,000 من سجلات الأحداث التي تنطوي على مواد مشعة. وتتاح التقارير السنوية من عام 2007 حتى الآن للجمهور؛ ويتضمن أحدث تقرير راجعته اللجنة بيانات حتى عام 2019 (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2020 ج). وتنتمي معظم المواد المشعة التي تم الإبلاغ عنها فقدانها أو سرقتها أو عدم وجودها في محلها إلى الفئة 4 أو الفئة 5 وتتضمن مصادر وأجهزة متنقلة أو محمولة. وعند فقدان هذه المواد أو سرقتها أو وجودها في غير محلها، فإنها في الغالب لا تؤدي إلى إصابة العمال أو العامة ويتم استرداد معظمها.

أظهر تحليل الأحداث أن عدد السرقات المبلغ عنها في قاعدة بيانات أحداث المواد النووية انخفض منذ إصدار الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية الفصل 37. وعلى وجه التحديد، منذ إصدار اللوائح، لم تقع سرقات لمصادر الفئة 1 ووقعت ست سرقات لمصادر من الفئة 2 تم استرداد خمسة منها. وتحلل المصدر الذي لم تتم استعادته تحت عتبة الفئة 2 (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2018).

في عام 2017، فُقد ما يقرب من 249 مصدرًا أو تم هجرها أو سُرقت. ولم يتم استرداد ثلث هذه المصادر. ومن بين المصادر المفقودة البالغ عددها 249 مصدرًا، لم يكن أي منها من الفئة 1، وكانت سبعة من مصادر التصوير الشعاعي من الفئة 2 عبارة عن إيريديوم 192، وكان أحد مصادر العلاج الإشعاعي الموضعي من الفئة 3 عبارة عن إيريديوم 192. وتم استردادها جميعًا، باستثناء مصدر واحد من الفئة 2 (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2018).

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

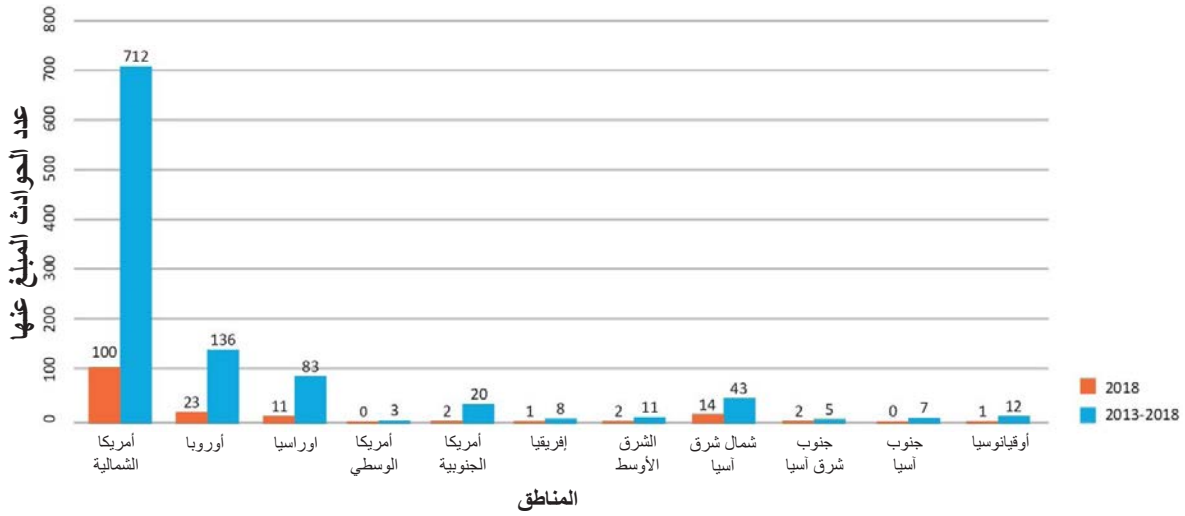
Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

3-5-2 قاعدة بيانات الحوادث والاتجار العالمية

يحتفظ مركز جيمس مارتن لدراسات عدم الانتشار بقاعدة بيانات الحوادث والاتجار العالمية بتمويل من المبادرة المتعلقة بالتهديد النووي (NTI) منذ عام 2013 (مركز جيمس مارتن لدراسات عدم الانتشار(CNS)، 2019). ومنذ إنشاء قاعدة البيانات، حدد الباحثون في مركز جيمس مارتن لدراسات عدم الانتشار أكثر من 1,000 حادث في جميع أنحاء العالم باستخدام تقارير مفتوحة المصدر وغيرها من المعلومات المتاحة للجمهور. وتم الإبلاغ عن غالبية الحوادث من أمريكا الشمالية (راجع الشكل 2-3)، لكن من المحتمل أن يكون هذا مرتبطًا بأنظمة إبلاغ أكثر شفافية في الولايات المتحدة وكندا. وتضمنت حوالي نصف هذه الحوادث مواد مشعة، حيث تم الإبلاغ في أغلب الأحيان عن فقدان أو سرقة مصادر السيزيوم 137 (راجع الجدول 2-1).

وفي عام 2018، تم تسجيل خمس حالات اتجار متعمد للمواد النووية وغيرها من المواد المشعة:

- اعتقلت أجهزة الأمن الأوكرانية ستة أفراد يُعتقد أنهم جزء من عصابة دولية لتهريب المواد المشعة. وأُلقي القبض على الأفراد بعد محاولتهم بيع كمية غير محددة من الراديوم 226 للشرطة في عملية مدبرة من الشرطة للقبض عليهم. ولم يتضح كيف حصل الأفراد على تلك المواد.
- صادرت أجهزة الأمن الأوكرانية جهازًا يحتوي على مادة مشعة من شخص كان يخطط لبيع الجهاز وإرساله بالبريد إلى دولة أوروبية لم تُذكر اسمها.
- أُلقي القبض على أربعة من تجار الخردة المعدنية في هولندا بعد أن حددت السلطات أنهم يبيعون بشكل غير قانوني خردة المعادن المشعة المستخدمة في قوالب الثقل على متن السفن.
- عثرت جمارك مطار شيريميتيفو في روسيا على "معدن أصفر مشع" في طرد قادم من إيطاليا. ومن المفترض أنه تم مصادرة المواد.
- صادر مسؤولو الجمارك في أورينبورغ، روسيا، 292 "قلادة طبية" من شاحنة يقودها مواطن كازاخستاني. وبحسب ما ورد تم تهريب القلادات إلى البلاد، وتم تسجيل إشعاع غاما بمعدل 20 ضعفًا فوق المستوى المسموح به.



الشكل 2-3 تم الإبلاغ عن حوادث المواد النووية أو الإشعاعية المفقودة حسب المنطقة في قاعدة بيانات الحوادث العالمية والاتجار غير المشروع. المصدر: مركز دراسات عدم الانتشار (CNS)، 2019. من إنتاج مركز جيمس مارتن لدراسات عدم الانتشار (CNS) للمبادرة المتعلقة بالتهديد النووي.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الجدول 2-1 الحوادث المُبلغ عنها حسب نوع المادة في قاعدة بيانات الحوادث العالمية للاتجار غير المشروع لدى مركز دراسات عدم الانتشار (CNS)

مادة السلاح الإشعاعي ذات الاهتمام الرئيسي	الحوادث، 2018	الحوادث، 2013–2018
السيزيوم 137 (Cs-137)	37	280
أميريسيوم (Am-241)	40	247
إيريديوم 192 (Ir-192)	7	60
راديوم 226 (Ra-226)	8	44
كوبالت 60 (Co-60)	4	24
سترونتيوم 90 (Sr-90) ومنتج الانحلال الخاص به، الإيتريوم 90 (Y-90)	4	29
كاليفورنيوم 252 (Cf-252)	0	5
سيلينيوم 75 (Se-75)	1	4
بلوتونيوم 238 (Pu-238)	0	2
بلوتونيوم 239 (Pu-239)	2	7
إيتربيوم 169 (Yb-169)	0	1
ثوليوم 170 (TM-170)	0	0
الإجمالي الفرعي	103	703
إجمالي الحالات الفريدة	74	502

المصدر: مركز دراسات عدم الانتشار (CNS)، 2019. من إنتاج مركز جيمس مارتن لدراسات عدم الانتشار (CNS) للمبادرة المتعلقة بالتهديد النووي.

6-2 تتبع المصدر الإشعاعي المادي

كما ذكرنا في الأقسام السابقة، فإن المصادر المشعة المحمولة والمنقولة في كثير من الأحيان معرضة للسرقة أو التحويل. وتشمل المصادر المحمولة كاميرات التصوير الشعاعي وأجهزة تسجيل قياسات آبار النفط، التي غالبا ما تكون منقولة بسبب استعمالاتها في أحواض بناء السفن ومحطات الطاقة وحقول النفط والغاز.

لا تعني الحوادث التي تنطوي على سرقة مصادر مشعة محمولة بالضرورة أن الجناة يحاولون سرقة مصادر مشعة لارتكاب الفوضى. وبدلاً من ذلك، فإنهم غالبا ما يرغبون في سرقة المركبات نفسها أو الأجهزة داخل المركبات بسبب القيمة المتصورة للأشياء المسروقة. ويمكن أن يساعد وجود وسيلة لتتبع الحركة المادية للأجهزة التي تحتوي على مصادر مشعة أثناء العبور في الاسترداد في الوقت المناسب.

في عام 2012، نشر المعهد العالمي للأمن النووي والمعهد العالمي للنقل النووي دليلاً لمساعدة مستخدمي وناقلي المصادر المشعة على اتخاذ قرارات مستنيرة بشأن تعقب المصادر (WINS وWNTI، 2012). ويصف هذا الدليل السمات العامة لنظام التتبع الذي يتألف من جهاز إلكتروني يتم توصيله بمركبة نقل تحمل مصدرًا مشعًا أو يُثبت على المعدات التي تحتوي على المصدر أو الطريقتين معًا. وسوف أُكتشف الإشارة من الجهاز الإلكتروني بواسطة الاقمار الصناعية للنظام العالمي لتحديد المواقع (GPS) (التي توفر دقة الموقع ضمن 3 أمتار) وخدمة حزمة الراديو العامة الخلوية (GRPS) (تقدم التكرار في ضمان تحديد الموقع). ويشير الدليل إلى وجود بعض الأجزاء البعيدة عن العالم التي لا تتوفر فيها تغطية نظام تحديد المواقع العالمي وتغطية نظام خدمة حزمة الردايو العامة الخلوية (GRPS) أو لا يمكن الاعتماد عليها. وتوجد اعتبارات إضافية لضمان توفر طاقة موثوقة في جهاز الإشارات مثل البطاريات طويلة العمر، وتوفير الموظفين باستمرار لمركز العمليات والتحكم، والتنسيق والتواصل بسرعة مع قوات الاستجابة.

قد يمثل ضمان استعداد قوات الاستجابة تحديًا خاصًا عندما يعبر النقل الحدود الدولية أو حتى الحدود داخل بلدان مثل الولايات المستقلة في الولايات المتحدة. ومن الممكن أن تتطلب قوات الاستجابة المختلفة متطلبات مختلفة عند إخطارها والتسليم من قوة استجابة تابعة لولاية قضائية إلى قوة استجابة أخرى. ويكون المطلب الرئيسي لنظام تعقب واستجابة تنبيه قوة الاستجابة وجعل القوة تصل إلى مكان الحادث قبل أن يتمكن المهاجمون من إنجاز مهمة إساءة استخدام المصدر.

ركزت تقنيات التتبع على وجود وسائل آمنة وموثوقة لمعرفة أماكن وجود أنواع المصادر المحمولة المذكورة أعلاه. على سبيل المثال، طورت جمهورية كوريا نظام تتبع موقع مصدر الإشعاع (RADLOT)، الذي يستخدم نظام تحديد المواقع العالمي (GPS)

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

وشبكات الوصول المتعدد بتقسيم الشفرة (CDMA)[23] وهو مصمم للمراقبة في الوقت الحقيقي لمصادر التصوير الإشعاعي الصناعي. ويحتوي نظام تتبع موقع مصدر الإشعاع على العديد من المحطات الطرفية المتنقلة ومركز تحكم مركزي وشبكة اتصالات آمنة. وبالإضافة إلى التتبع في الوقت الفعلي لمصادر التصوير الشعاعي أثناء النقل، فإنه يتضمن مراقبة إشعاع تكتشف الإشعاع من المصدر للسماح للمشغلين بمعرفة ما إذا كان جهاز الاكتشاف تم فصله عن جهاز التصوير الشعاعي (جانج (Jang)، 2019).

خلال مؤتمر قمة الأمن النووي لعام 2012 في سيول، أعلنت جمهورية كوريا عن نيتها العمل مع الوكالة الدولية للطاقة الذرية لنشر نظام تتبع موقع مصدر الإشعاع كمشروع تجريبي في فيتنام. ويوجد في فيتنام حوالي 700 مصدر متنقل قيد الاستخدام، و600 مصدر قيد التخزين، وحوالي 40 شركة أو مجموعة لديها تراخيص لامتلاك هذه المصادر (فاي وآخرون (.Phi et al)، 2018). وفي عام 2015، بدأ المعهد الكوري للسلامة النووية نقل تكنولوجيا نظام تتبع موقع مصدر الإشعاع إلى فيتنام، وفي عام 2017، تم نشر 30 جهاز كشف لنظام تتبع موقع مصدر الإشعاع إلى المرخص لهم والشركات التي تستخدم كاميرات التصوير الشعاعي للاختبار (فاي وآخرون (.Phi et al)، 2018).

في الولايات المتحدة، تولى مكتب الأمن الإشعاعي التطوير من خلال المختبر الوطني لمنطقة شمال غرب المحيط الهادئ (PNNL) لأمن عبور المصدر المتنقل (MSTS) لتتبع التصوير الشعاعي الصناعي ومصادر تسجيل قياسات الآبار. وأثناء عرض تقديمي أمام اللجنة، أوضح قادة مشروع المختبر الوطني لمنطقة شمال غرب المحيط الهادئ أن الخصائص المطلوبة لنظام التتبع هي تعزيز أمن الجهاز وفعالية التكلفة والموثوقية والقوة والتواصل الفعال لأغراض التنبيه والإنذار.[24] على غرار نظام تتبع موقع مصدر الإشعاع، يستخدم أمن عبور المصدر المتنقل شبكات اتصالات القمر الصناعي والاتصالات الخلوية الآمنة ويتضمن أجهزة استشعار إشعاعية لاكتشاف قرب المصادر العابرة من أجهزة إصدار الإشارات. وتتمثل الخطوات التالية لمشروع أمن عبور المصدر المتنقل في تشكيل شراكات تجارية وتنفيذ خطة التصنيع والتوزيع وتحديد المسؤوليات بين جهات التصنيع والموزعين والمستخدمين.

يوجد جهاز تتبع مصدر إشعاعي مادي آخر هو نظام تتبع حل NucTrack المنشور في فرنسا. ويتمتع هذا النظام بميزات مماثلة لتلك التي يتمتع بها كل من نظام تتبع موقع مصدر الإشعاع (RADLOT) وأمن عبور المصدر المتنقل (MSTS). وتهدف Nuc21، الشركة التي طورت حل NucTrack، لنشر النظام في بلدان أوروبية أخرى (مورو (Moreau)، 2019).

سوف يكون التحدي خلال السنوات القادمة هو توفير أنظمة تتبع في عشرات البلدان في جميع أنحاء العالم حيث يستخدم أكثر من 10,000 مصدر محمول. وذكر ممثلو المختبر الوطني لمنطقة شمال غرب المحيط الهادئ الذين أطلعوا اللجنة أن الحافز الذي يدفع الصناعة إلى اعتماد هذه النظم هو الفائدة التي تعود على أعمالهم في الحماية من إساءة استخدام المصادر المشعة أثناء النقل. وقد تحتاج البلدان التي تفتقر إلى موارد إلى مساعدة مالية وتقنية وقد تستفيد من التعاون التقني الذي تيسره الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، كما يتضح من مثال فيتنام.

7-2 تحليل عواقب المصادر المشعة

وُضع عدد من السيناريوهات المحتملة للأسلحة الإشعاعية من حيث المصدر المستخدم والموقع لتحديد أولوية الإجراءات الوقائية والمبادئ التوجيهية للاستجابة وتقييم التعرض الفوري والطويل الأجل المحتمل للسكان. وبالنظر إلى أن الهدف المحتمل للجماعات الإرهابية التي تستخدم سلاح إشعاعي هو إثارة الذعر الهائل والدمار الاقتصادي، فإن العديد من هذه السيناريوهات تستند إلى تفجير سلاح إشعاعي في المناطق الحضرية أو الزراعية.

وقدرت الدراسات التي أجرتها ساندیا الآثار الاقتصادية لثلاثة سيناريوهات تنطوي على حوادث سلاح إشعاعي لتقديم المعلومات إلى برامج أمن المواد الإشعاعية:

1. تفجير سلاح إشعاعي باستخدام مصدر إشعاعي من الفئة 1 في مانهاتن السفلى؛
2. تفجير سلاح إشعاعي باستخدام مصدر إشعاعي من الفئة 3 في مانهاتن السفلى؛
3. تفجير سلاح إشعاعي باستخدام مصدر إشعاعي من الفئة 1 في منطقة زراعية في كاليفورنيا.

لا تتوافر التحليلات والاستنتاجات من سيناريو السلاح الإشعاعي في ولاية كاليفورنيا للجمهور. وكذلك تحليلات سيناريوهات السلاح الإشعاعي في مانهاتن غير متاحة للجمهور، لكن تم الإبلاغ عن الاستنتاجات العامة، بما في ذلك في عرض تقديمي أمام اللجنة.[25] استخدمت هذه التحليلات النمذجة لتقييم الآثار المادية والاستجابات لحالات الطوارئ والآثار الاقتصادية لمراحل الحدث. وقُدرت الآثار

[23] تسمح شبكة CDMA لأجهزة إرسال متعددة بإرسال المعلومات في وقت واحد عبر قناة اتصال فردية.

[24] بريان هيغينز وفريدريك موس، مختبر باسيفيك نورث ويست الوطني، عرض تقديمي أمام اللجنة في 9 سبتمبر 2020.

[25] عرض لاري تروست وفانيسا فارغاس، ساندیا، أمام اللجنة في 29 أبريل 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الاقتصادية في شكل فقدان الناتج المحلي الإجمالي خلال مراحل الحدث بأكملها، ودرست الآثار المادية والنفسية والاجتماعية (راجع الجدول 2-2). وأفادت تحليلات ساندیا أن الأحداث التي تنطوي على سلاح إشعاعي يستخدم إما مصدرًا من الفئة 1 أو الفئة 3 قد تتسبب في آثار اقتصادية سلبية كبيرة وأن تلك الآثار تتجاوز المنطقة الملوثة الفعلية. وأفادت التحليلات أيضا أن الأسلحة الإشعاعية التي تستخدم مصادر إشعاع من الفئة 3 أقل تنظيمًا (سواء من حيث الأمن أو من حيث تتبع المصادر في قواعد البيانات الوطنية) قد تتسبب في آثار مماثلة لتلك الخاصة بالأسلحة الإشعاعية التي تستخدم مصادر الفئة 1. ويتوقع أن تستقطب الأسلحة الإشعاعية التي تشمل إما مصدرًا من الفئة 1 أو من الفئة 3 موارد من خارج المنطقة، مما قد يؤثر على سلاسل التوريد، ويؤثر ذلك على طلب المستهلكين على السلع من المنطقة المتضررة. ولذلك، فإن العواقب الاقتصادية تمتد داخل الاقتصاد الأكبر. وعلى وجه التحديد، خفض سلاح إشعاعي يستخدم كمية من الفئة 1 من المواد المشعة الناتج المحلي الإجمالي بنحو 30 مليار دولار. وخفض سلاح إشعاعي يستخدم كمية من الفئة 3 من المواد المشعة الناتج المحلي الإجمالي بنحو 24 مليار دولار. أي أن تخفيضًا بنسبة تزيد على 90 في المائة في نشاط المواد التي تم إطلاقها لم يسفر إلا عن انخفاض في التأثير الاقتصادي بنسبة 20 في المائة.

قدرت تحليلات ساندیا أن تفجير سلاح إشعاعي يستخدم مصدرًا من الفئة 1 أو الفئة 3 سوف ينجم عنه مستوى مماثل من الخسائر البشرية من حيث الحجم بسبب عمليات الإجلاء (مكتب المساءلة الحكومية (GAO)، 2019). وتم تقدير عدد قليل من الوفيات الناجمة عن الانفجار الأولي ولم تحدث وفيات بسبب التعرض المباشر للإشعاع في أي من السيناريوهين. ولم تقدم تحليلات ساندیا توقعات للآثار الصحية العشوائية مثل تطور السرطان في المستقبل بعد سيناريوهين يضمان سلاحًا إشعاعيًا.

استخدم مكتب المساءلة الحكومية الاستنتاجات المستخلصة من تحليلات ساندیا ليوصي اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية بالتالي

- النظر في العواقب الاجتماعية والاقتصادية والوفيات الناجمة عن عمليات الإجلاء عند تحديد متطلبات التدابير الأمنية للمواد المشعة التي يمكن استخدامها في سلاح إشعاعي.
- تنفيذ متطلبات أمنية إضافية لكميات أقل من المواد عالية الخطورة.
- مطالبة جميع المرخص لهم بتنفيذ تدابير أمنية إضافية، إذا كانوا يمتلكون مصادر معينة من الفئة 3 في منشأة واحدة يمكن أن تصل في مجموعها إلى مستويات الفئة 1 أو الفئة 2 (مكتب المساءلة الحكومية (GAO)، 2019).

لم يوافق موظفو اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية بشكل عام على التوصيات وردوا بأن "أساس توصيات مكتب المساءلة الحكومية لإجراء المزيد من التغييرات التنظيمية لم يكن جيدًا ولم يأخذ في الاعتبار جميع جوانب المخاطر (على سبيل المثال، التهديد ونقاط الضعف والعواقب)" (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2019 أ). وأشارت اللجنة التنظيمية النووية الأميركية إلى أن توصيات مكتب المساءلة الحكومية تفتقر إلى السياق من خلال تجاهل الجهود الفيدرالية وجهود الولايات والجهود المحلية للحماية من الاستخدام الضار المحتمل للمصادر المشعة وقدرات الاستجابة والتخفيف (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2019 ب).

تخلص استنتاجات تحليلات ساندیا إلى نقطة قوية مفادها أن المصادر من الفئة 3، في حالة استخدامها في سلاح إشعاعي، قد تتسبب في عواقب اقتصادية كبيرة مماثلة لتلك التي تترتب على مصدر من الفئة 1. ومع ذلك، لا يمكن تقييم دقة التقديرات الاقتصادية المستمدة من التحليلات بشكل كامل لأن المدخلات والافتراضات غير متاحة للجمهور. ويشير استعراض اللجنة إلى وجود عدة عوامل يبدو أنها غير معروفة في هذه التحليلات. وعلى وجه التحديد، لا تتضمن تقديرات الخسائر الاقتصادية التي أعدتها ساندیا تقديرات الخسائر في الأرواح، وبالتالي فمن شبه المؤكد أنها تقلل التكاليف الاقتصادية لأنها ستُقدر في تحليل الأثر التنظيمي المطلوب لدعم القواعد الرئيسية الصادرة عن الوكالات الإدارية الفيدرالية. على سبيل المثال، تستخدم وزارة النقل قيمة للحياة الإحصائية (VSL) قدرها 9.6 مليون دولار لتحويل الوفيات إلى نقد (وزارة النقل (DOT)، 2016).

ولا يبدو أن تقديرات الخسائر الاقتصادية التي تتحملها ساندیا مسؤولة عن التكاليف الكبيرة الناجمة عن فقدان الوقت في العمل للمتواجدين في المنطقة المتضررة والخاضعين للإجلاء. على سبيل المثال، بافتراض أن من يتم إجلاؤهم يفقدون 4 أيام من العمل، ستكون هناك خسارة إضافية في الإنتاجية بقيمة 124 مليون دولار و65 مليون دولار تقريبًا، على التوالي، لسيناريوهي السلاح

الجدول 2-2 العواقب الاجتماعية والاقتصادية للأسلحة الإشعاعية باستخدام مصادر الفئة 1 والفئة 3

الفئة 1	الفئة 3
30 مليار دولار في شكل تكاليف اجتماعية واقتصادية	24 مليار دولار في شكل تكاليف اجتماعية واقتصادية
195,000 عملية إجلاء	102,000 عملية إجلاء
الوفيات الناجمة عن عمليات الإجلاء	الوفيات الناجمة عن عمليات الإجلاء
لا توجد وفيات ناجمة عن الإشعاع	لا توجد وفيات ناجمة عن الإشعاع

المصدر: ديفيد تريمبل وإدوين وودوارد وجيف بارون، مكتب المساءلة الحكومية (GAO)، عرض تقديمي أمام اللجنة في 30 يناير 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الإشعاعي.[26] علاوة على ذلك، ستكون هناك آثار نفسية فورية وطويلة الأجل يمكن تحويلها إلى نقد من خلال زيادة الحاجة إلى برامج مراقبة الصحة العقلية. ومن خلال مراعاة هذه التكاليف التي يتحملها الأفراد المتضررون، من الممكن أن تزيد بشكل كبير من تقديرات التكلفة الاجتماعية الإجمالية لأحداث السلاح الإشعاعي وفقًا لتقديرات ساندیا.

اتبعت ساندیا نهجًا بديلاً للتركيز على فقدان الناتج المحلي الإجمالي وهو مفاهيم تحليل التكاليف والفوائد المستخدمة في تحليلات الأثر التنظيمي لعمليات وضع القواعد الفيدرالية الرئيسية. وبدلاً من تقدير التغيرات في النشاط الاقتصادي عن طريق القياس بالتغيرات في الناتج المحلي الإجمالي، يلخص هذا النهج البديل التكاليف المختلفة التي يتحملها المتضررون من السلاح الإشعاعي. بالإضافة إلى تحويل تكاليف الخسائر في الأرواح والوقت إلى نقد لمن تم إجلاؤهم، فإن ذلك سيحول تكلفة تحريم المنطقة مباشرة إلى نقد، ربما في شكل القيمة الحالية للإيجار التي كانت ستُدفع لو لم يتم الحرمان من استخدام المباني.

أجرت عدة وكالات فيدرالية وآخرون (روسوف وفون وينترفيلدت (Rosoff and von Winterfeldt)، 2007) تحليلات للنمذجة الاقتصادية مماثلة لتحليلات ساندیا لتقديم معلومات عن أولويات وأطر تنظيمية محددة. ولا تتاح تفاصيل هذه التحليلات الأخرى للجمهور. ومن المرجح أن تختلف المدخلات والافتراضات وبرامج النمذجة التي يستخدمها المحللون المختلفون، وفي بعض الحالات قد يبالغون في تقدير تقييم الأثر أو يقللون من تقديره (دومبروسكي وفيشبيك (Dombroski and Fischbeck)، 2006). ومن الصعب مقارنة الاستنتاجات المتعلقة بالشدة المحتملة لسلاح إشعاعي عبر تحليلات مختلفة ما لم يتم وصف المدخلات والافتراضات ببعض التفصيل.

للحصول على تقدير مستنير لتحليلات النتائج التي أجرتها ساندیا وغيرها من الوكالات الحكومية، ستوجد حاجة لإجراء استعراض رسمي بواسطة الأقران يجريه خبراء مطلعون ومستقلون. ويستطيع هذا الاستعراض بواسطة الأقران مقارنة المدخلات والافتراضات المستخدمة في التحليلات المختلفة والتحقق بشكل مستقل والتحقق من صحة برامج النمذجة المستخدمة. بالإضافة إلى ذلك، من الممكن أن يسفر استعراض النظراء عن مجموعة من أفضل الممارسات لإجراء هذه التحليلات الاقتصادية في أعقاب سيناريوهات افتراضية للسلاح الإشعاعي تنطوي على مصادر مشعة.

8-2 إدارة المصادر المشعة المهجورة في نهاية دورة الحياة

تمثل المصادر المهجورة إما مصادر زائدة أو غير مرغوب فيها أو مستهلكة يمكن أن تخلق مشاكل تتعلق بالسلامة والأمن إذا لم يتم التصرف فيها بشكل صحيح. وقد تظل الموارد المستهلكة، حتى عندما لا يعود من الممكن استخدامها في الممارسات التي صُرح بها بسبب الاضمحلال الإشعاعي، مشعة إلى حد كبير ويحتمل أن تشكل خطرًا على صحة الإنسان والبيئة. ونظرا لوجود ما يقرب من 80,000 مصدر من الفئتين 1 و2 في الولايات المتحدة وحوالي مليوني مصدر مُحكم في المجموع، يقدر هجر عشرات الآلاف من المصادر (DSWG، 2021). ورغم أن العدد الدقيق للمصادر المهجورة في الولايات المتحدة غير معروف، لا أن إن برنامج استعادة المصادر خارج الموقع يعطي فكرة عن المقياس: من عام 1997 إلى 29 يناير 2021، تم تأمين 41,070 مصدرًا لم تعد مطلوبة من قبل المستخدمين.[27] وعلى الصعيد الدولي، قدرت الوكالة الدولية للطاقة الذرية أنه من بين ملايين المصادر المعروف أنه تم إنتاجها، يوجد ما يقرب من 20 في المائة منها مهجورًا، ولدى جميع البلدان تقريبا مخزونات من المصادر المهجورة في المخازن (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2005). وتوفر البيانات الحديثة للوكالة الدولية للطاقة الذرية المزيد من المعرفة حول حجم أعداد المصادر المهجورة. وعلى وجه التحديد، قدمت الوكالة الدولية للطاقة الذرية في الفترة من 2014 إلى 2019 خدمات مساعدة لنحو 20 دولة عضوًا في مجال استعادة وتكييف أكثر من 4,200 مصدر مهجور. وخلال تلك الفترة أيضًا، ساعدت الوكالة الدولية للطاقة الذرية في إزالة 155 مصدرًا من مصادر العلاج عن بُعد عالية النشاط في 12 بلدًا. وتنفذ الوكالة الدولية للطاقة الذرية مشاريع حالية على مصادر مهجورة في 15 بلدًا عضوًا إضافية.[28]

لا يُطلب من المرخص لهم في الولايات المتحدة ومعظم البلدان أن يعلنوا ما إذا كانت المصادر المشعة الموجودة بحوزتهم قد تم هجرها، ولا يطلب منهم كذلك الإعلان عن التخلص الفوري منها. ويمكن أن ينطوي التخلص على خيارات مختلفة تبعًا لمستوى النشاط في المصدر المهجور والمسارات المتاحة لإدارة المصادر المهجورة بسلامة وأمان. وإذا عرض موردو المصادر خيارات لإعادة التدوير، يمكن إعادة بعض المصادر المهجورة إلى الموردين والمصنعين لإعادة تدويرها. وقد يحتوي المصدر المهجور أيضًا على نشاط إشعاعي كافٍ لإعادة تعبئته لإعادة استخدامه في استعمال آخر. ومن يمكن أن تتضمن إعادة الاستخدام نقل المصدر إلى مستخدم آخر أو إعادته إلى الشركة المصنعة التي يمكنها إجراء إعادة التعبئة (WINS، 2020 أ). ونناقش خيارات إعادة التدوير وإعادة الاستخدام بمزيد من التفصيل في القسم 2-8-1.

---

[26] يقدم مكتب الإحصاء قيمًا لهذا الحساب التقديري في صحيفة حقائقه لمدينة نيويورك. يُرجى الاطلاع على https://www.census.gov/quickfacts/fact/table/newyorkcitynewyork/PST040219. ويحقق وضع دخل الفرد في مدينة نيويورك في عام 2020 عائدًا قدره 39,580 دولارًا. ويمثل التقدير التقريبي لفقدان الإنتاجية لكل شخص تم إجلاؤه 4 أيام ضائعة مقسومة على 250 يوم عمل في السنة. ويعادل هذا 633 دولارًا مضروبًا في عدد الأشخاص الذين تم إجلاؤهم، مما يعطي تقديرًا لإجمالي خسارة الإنتاجية.

[27] يُرجى الاطلاع على https://osrp.lanl.gov.

[28] إيان جوردون، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، عرض تقديمي أمام اللجنة في 9 سبتمبر 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

يمثل التخلص الخيار النهائي للتخلص من المصادر المهجورة التي لا يمكن إعادة تدويرها أو إعادة استخدامها. ومن الناحية المثالية، في نهاية دورة الحياة، يتخلص المرخص لهم بسلامة وأمان من مصادرهم المستهلكة في مستودع تجاري أو تديره الحكومة أو معتمد منها. ومع ذلك، يتسبب ارتفاع تكاليف التخلص وعدم وجود مستودعات كافية وعدم كفاية التوجيه للتخلص من النفايات، في إنشاء بيئة لا يحصل المستخدمون فيها سوى على حافز ضئيل أو لا يحصلون على حافز على الإطلاق للتخلص من المصادر المُحكمة المهجورة.

في أسوأ السيناريوهات، يتخلص البعض من المصادر عالية الخطورة خارج القنوات المنظمة بتركها أو إهمالها. وكما حدث في كثير من الأحيان، من الممكن أن ينتهي الأمر بخلط المصادر المشعة المهملة مع الخردة المعدنية. ويبلغ تجار الخردة المعدنية ومعالجوها في الولايات المتحدة عن مئات الإنذارات بشأن مواد مشبوهة كل عام. وتعد تلك مشكلة دولية، وأفادت الوكالة الدولية للطاقة الذرية بأن الوكالة على علم بمئات الأحداث التي تقع كل عام وتشمل مصادر مختلطة مع الخردة المعدنية. وتشمل الأحداث سيوداد خواريز في المكسيك في عام 1983، ومدينة غويانيا في البرازيل، في عام 1987، ومدينة ساموت براكارن، في تايلاند في عام 2000؛ ومؤخرا، في مايابوري في الهند في عام 2010 (راجع القسم 2-3-1). وأسفرت هذه الأحداث عن وفيات وتعرض أفراد الجمهور (غاسديا كوكرين، 2018؛ الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 1988، 2013 ب).

إذا لم يتم الكشف عن مصدر مفقود أو مهمل قبل إرسال مواد الجهاز المعاد تدويرها خارج الموقع، فقد يحدث التعرض لأفراد الجمهور. وخلال 40 سنة الماضية، تم العثور على أرجل طاولات وأزرار مصاعد وعلب مناديل ورقية وحديد تسليح وشبكات من الفولاذ المقاوم للصدأ ومشابك أحزمة وغيرها من المواد نتجت عن مصادر مشعة تحتوي على الكوبالت 60 مذابًا في معادن أخرى. وبالإضافة إلى مخاطر تعرض الموظفين للمصادر المشعة، من الممكن أن يؤدي الذوبان الفعلي لمصدر مشع إلى خسائر اقتصادية كبيرة. وفي الولايات المتحدة، تتراوح التكاليف النموذجية للتنظيف من 10 ملايين دولار إلى 12 مليون دولار ويمكن أن تصل إلى 30 مليون دولار (غاسديا كوكرين (Gasdia-Cochrane)، 2018).

تقدم مدونة سلوك المنظمة الدولية للطاقة الذرية بشأن سلامة وأمن المصادر المشعة ووثائق التوجيه التنفيذية الصادرة عنها - *المبادئ التوجيهية لاستيراد وتصدير المصادر المشعة* (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2012 ب) *والتوجيه بشأن إدارة المصادر المشعة المهجورة* (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2018 أ وب) - النصائح بشأن خيارات إدارة نهاية دورة الحياة للمصادر المهجورة. وتوصي الوكالة بأن تمتلك البلدان سياسة واستراتيجية لإدارة النفايات المشعة بما في ذلك المصادر المهجورة. وتشمل الخيارات المتاحة لإدارة المصادر المهجورة إعادة الاستخدام وإعادة التدوير أو الإرجاع إلى المورد أو التخزين أو التخلص. ويركز هذا القسم على كيفية التخلص؛ ونناقش الخيارات الأخرى بإيجاز فقط.

2-8-1 إعادة الاستخدام وإعادة التدوير

تمثل إعادة التدوير وسيلة فعالة لتأخير التخلص الفعلي من مصدر حتى يتوافر خيار آخر. ووفقًا للرابطة الدولية لموردي ومنتجي المصادر، التي تمثل نحو 95 في المائة من المصادر المنتجة والموزعة على الصعيد العالمي، فإن إعادة التدوير هي الخيار المفضل للصناعة لأنها تقلل كمية المواد المشعة التي تحتاج إلى إنتاج (فاستن (Fasten)، 2012). وتنطوي إعادة التدوير على تفكيك المصدر واستعادة المادة المشعة كعنصر وحيد، مثل الكوبالت 60، أو مختلطة أو مجتمعة كيميائيًا في أكثر من عنصر، على سبيل المثال، الأميسيوم 241 / البريليوم. ويتلقى الفنيون المؤهلون التدريب لتنفيذ العملية بأمان. ويمكن في كثير من الأحيان إعادة استخدام المواد المستردة كما يحدث بعد تعبئتها بالنوع نفسه من المواد من مصادر أخرى غير مستخدمة للوصول إلى مستوى النشاط اللازم لاستعمال معين. ويحتاج المصدر المعاد تدويره إلى إعادة تغليف إما عن طريق التغليف الزائد في كبسولة ثالثة جديدة أو إزالة الكبسولة الخارجية القديمة واستبدالها بكبسولة خارجية جديدة بالتصميم نفسه أو تصميم مختلف. ويوجد خيار آخر هو تدمير المصدر بالكامل وإعادة معالجة المواد المشعة وأي مكونات قيمة أخرى (فاستن (Fasten)، 2012).

تعني إعادة الاستخدام إعادة توزيع مصدر في الاستعمال نفسه أو في استعمال آخر. ولا يوجد أي تغيير فعلي في المصدر، ويتم الاحتفاظ بهويته الأصلية. ويؤجل هذا أيضًا الحاجة إلى التخلص وينتج استخدام المصدر بصورة أفضل، حيث سيخضع لضوابط أكثر مما لو وضع في التخزين.

تم تنفيذ إعادة الاستخدام وإعادة التدوير على السواء بصورة فعالة، لكنهما لا يعالجان سوى نسبة مئوية صغيرة من العدد الكبير من المصادر التي تتطلب التخلص منها. وتوجد كيانات تجارية مرخص لها بمعالجة بعض المصادر لإعادة التدوير وإعادة الاستخدام. وتستطيع منظمات مثل مؤتمر مديري برامج السيطرة على الإشعاع والكيانات التجارية أن تيسر نقل بعض المصادر وإعادة استخدامها من مرخص له إلى آخر.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

2-8-2 الإرجاع إلى المورد

يمتلك العديد من مصنعي المصادر والموردين برامج لجمع المصادر المهجورة لإعادة استخدامها أو إعادة تدويرها، أو لنقلها إلى مرخص آخر. ويتطلب إرجاع مصدر إلى الشركة المصنعة أو المورد عادة ترتيبًا مسبقًا مع المستخدم، وفي بعض الحالات تبادل "مصدر مقابل مصدر" حيث يعيد المستخدم مصدرًا غير مستخدم ويشتري في الوقت نفسه مصدرًا بديلاً. وتعد هذه الممارسة شائعة مع بعض استعمالات المصدر مثل التصوير الشعاعي الصناعي والمشعات البانورامية وغيرها من المشعات التي تستخدم الكوبالت 60 والعلاج عن بعد والعلاج الإشعاعي الموضعي. وعندما يستبدل المستخدم مصدرًا مستهلكًا بآخر جديد، لا توجد عادة تكلفة لاستعادة المصدر القديم.

لا يزال من الصعب إعادة مصدر مهجور إلى الشركة المصنعة أو المورد حتى عندما يوجد برنامج إرجاع مطبق. ويتمثل أحد التحديات في أن يقدم المستخدم وثائق عن بلد منشأ المصدر ومكان التصنيع. وينشأ تحدٍ ثان عندما توجد لدى مصنعي المصادر مرافق إنتاج في عدة بلدان وتصنع مكونات مختلفة من مصدر ما في مرافق في بلدان مختلفة، مما يجعل من الصعب تحديد مكان إعادة المصدر المهجور. ويتمثل التحدي الإضافي في محدودية توافر حاويات النقل المعتمدة، واشتراط حصول المصادر على[29] شهادة شكل خاص توضح الحاويات التي يمكنها نقل هذه المصادر (فاستن (Fasten)، 2012).

3-8-2 التخلص

في نهاية العمر الإنتاجي، سيتم تصنيف العديد من المصادر المشعة كنفايات مشعة منخفضة المستوى من الفئة أ أو ب أو ج أو أكبر من الفئة ج (GTCC) وفقًا لمعايير التصنيف في الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية القسم 61.55، حيث تعد الفئة أ الأقل خطورة والفئة ج أكثر خطورة نسبيًا (راجع الجدول 2-3 للاطلاع على الملخص). وتعد نفايات الفئة أ وب وج مناسبة "للتخلص منها بالقرب من السطح"؛ وتوجد لهذه الفئات أربعة مواقع مرخصة للتخلص من النفايات منخفضة المستوى في الولايات المتحدة (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2020 ب):

- EnergySolutions Barnwell Operations في بارنويل، ساوث كارولينا. ويقبل هذا الموقع حاليًا النفايات من ولاية كونيتيكت ونيوجيرسي وساوث كارولينا. وتم ترخيص بارنويل بواسطة ولاية ساوث كارولينا للتخلص من نفايات الفئة أ وب وج.
- علوم البيئة الأميركية "U.S. Ecology"، في ريتشلاند، واشنطن. يقبل هذا الموقع النفايات من اتفاقية الشمال الغربي وجبال روكي. وحصلت ريتشلاند على ترخيص من ولاية واشنطن للتخلص من نفايات الفئة أ وب وج.
- EnergySolutions Clive Operations في كلايف، يوتا. حيث يقبل هذا الموقع النفايات من جميع مناطق الولايات المتحدة. وتم ترخيص كلايف بواسطة ولاية يوتا للنفايات من الفئة أ فقط.
- Waste Control Specialists (WCS), LLC، بالقرب من أندروز، تكساس. يقبل هذا الموقع النفايات من مولدات اتفاقية تكساس والمولدات الخارجية بإذن من الاتفاقية. وحصلت WCS على ترخيص ولاية تكساس للتخلص من نفايات الفئة أ وب وج.

تمتلك وزارة الطاقة (DOE) المسؤولية القانونية لتطوير قدرة التخلص من النفايات أكبر من الفئة ج (GTCC)، التي لا يمكن التخلص منها في مرافق التخلص من النفايات التجارية منخفضة المستوى المرخصة حاليًا. وأحرزت وزارة الطاقة تقدمًا كبيرًا نحو إنشاء مسار للتخلص من النفايات أكبر من الفئة ج، بما في ذلك مصادر السيزيوم 137 ذات النشاط الأعلى المستخدمة في مشعات الدم والأبحاث. وأصدرت وزارة الطاقة في أكتوبر 2018، تقييم الأثر البيئي للتخلص من النفايات أكبر من الفئة ج في مرفق النفايات الفيدرالية WCS الموجود في مقاطعة أندروز في تكساس، وأعلنت تفضيلها للتخلص من المخزون الكامل من النفايات الأكبر من الفئة ج والشبيهة بالأكبر من الفئة ج في هذا المرفق (وزارة الطاقة (DOE)، 2018). وتم السماح لموقع WCS بالقرب من أندروز في تكساس، بقبول نفايات الفئة أ وب وج من 34 ولاية بدون منشأة تخلص تجارية.[30] حتى كتابة هذه السطور، لم يتم اتخاذ أي قرار بشأن التخلص من النفايات أكبر من الفئة ج.

تتيح إرشادات التخلص المحدّثة الصادرة عن اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2015 ب) للمرخص لهم بالمواد المشعة التخلص من العديد من مصادر الفئة 2 من السيزيوم 137 في منشآت التخلص من النفايات المشعة التجارية العاملة حاليًا. بصورة ملحوظة، في هذا الدليل، فيما يخص النظائر المشعة طويلة العمر مثل السيزيوم 137،

[29] المصادر المشعة ذات الشكل الخاص هي مصادر يتم إحكام النشاط الإشعاعي فيها داخل كبسولة بحيث تكون أقل عرضة للتسبب في التلوث. وتعد المصادر المُحكمة أمثلة على مواد ذات شكل خاص. ولأنها أكثر قوة وأقل عرضة للتسرب، فإن كمية النشاط التي يمكن نقلها في حزمة من النوع أ أو النوع ب أعلى بكثير بالنسبة للمصادر ذات الشكل الخاص منها بالنسبة للأشكال العادية مثل السوائل المشعة والنفايات المشعة.

[30] يُرجى الاطلاع على http://www.wcstexas.com/about-wcs/overview.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الجدول 2-3 تصنيف النفايات ومصادر المخاطر الأكثر شيوعًا

النوع	فئة النفايات وفقًا للجنة التنظيمية النووية الأمريكية عند الحدود القصوى للفئة 1	فئة النفايات وفقًا للجنة التنظيمية النووية الأمريكية (NRC) عند الحدود القصوى للفئة 2
أميريسيوم-241	أكبر من الفئة ج	أكبر من الفئة ج
سيزيوم-137	أكبر من الفئة ج	C
كوبالت 60	ب	أ
إيريديوم 192	أ	أ

ملاحظة: راجع الجدول 1-1 للتعرف على أنشطة الحدود القصوى لمصادر الفئة 1 والفئة 2 التي تحتوي على هذه النظائر المشعة.
المصدر: سارة نوريس وجون زارلينغ، الإدارة الوطنية للأمن النووي، عرض تقديمي أمام اللجنة في 9 سبتمبر 2020.

يحدد متوسط التركيز في كوري لكل متر مكعب، وليس إجمالي محتوى كوري للمصدر المهمل، ما إذا كان يمكن التخلص من هذه النظائر في منشأة تجارية. وتتيح الإرشادات أيضًا التخلص التجاري من معظم مصادر الكوبالت 60 من الفئة 1 والفئة 2 كنفايات من الفئة أ أو ب نظرًا لقصر نصف عمرها. وتضطلع اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية بدور وضع القواعد في عملية فحص إمكانية التخلص من تدفقات النفايات أكبر من الفئة ج وهي السيزيوم عالي النشاط والبلوتونيوم المتحول أو الأميريسيوم في مستودع آخر غير مخصص للنفايات الجيولوجية. ومن الممكن أن يفتح وضع القواعد هذا، الذي لا يزال في مراحله الأولى، إمكانية التخلص على عمق 30 مترًا أو أكبر، وهو قريب من السطح لكنه ليس عميقًا بحيث يمكن اعتباره تخلصًا جيولوجيًا.

لا يُسمح حاليًا بالتخلص من المصادر غير المستخدمة التي تحتوي على الأميريسيوم 241 من أصل أجنبي في الولايات المتحدة. ويسمح تصريح المحطة التجريبية لعزل النفايات (WIPP) فقط بالتخلص من مواد ما وراء اليورانيوم مثل الأميريسيوم التي يمكن تتبع انتمائها لبرامج الإنتاج الدفاعي الأمريكية مثل تلك التي تديرها الإدارة الوطنية للأمن النووي أو الوكالات السابقة. وفي عام 2004، أستنفدت مخزونات إدارة الأمن النووي الوطنية من الأميريسيوم 241، ونتيجة لذلك، سمحت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية باستيراد الأميريسيوم 241 من روسيا. ورغم أنه ليس من المعروف بالضبط مقدار ما تم استيراده من الأميريسيوم 241 من أصل روسي إلى الولايات المتحدة، فإن مكتب الأمن الإشعاعي التابع للإدارة الوطنية للأمن النووي يقدر أنه لا يمكن التخلص من حوالي 39,000 مصدر من مصادر الأميريسيوم 241 في الولايات المتحدة بسبب القيود القانونية الحالية، وأصبح حوالي 7,500 منهم في نهاية حياتها العملية، وأن عدد هذه المصادر المهملة سيرتفع على الأرجح إلى حوالي 20,000 بحلول عام 2025. وفي حالة رفع القيود عن المحطة التجريبية لعزل النفايات للتخلص من هذه المصادر غير المستخدمة، تقدر الإدارة الوطنية للأمن النووي أن التخلص لن يتطلب سوى جزء صغير (حوالي 0.003 في المائة) من مساحة التخلص المتاحة في المحطة التجريبية لعزل النفايات.[31]

2-8-4 التحديات التي تواجه التخلص

توجد تحديات عديدة تواجه التخلص من النفايات المشعة في جميع أنحاء العالم. ويحتاج المستخدمون الذين يواجهون قرارًا بتبني تقنية بديلة إلى تحديد ما يجب فعله بالمصدر المشع الذي سيتوقفوا عن استخدامه. وكما ذكرنا في الأقسام السابقة، ربما درست بعض المؤسسات دورة الحياة الكاملة للمصادر المشعة التي تمتلكها واتخذت ترتيبات للتخلص منها، لكن العديد منها لم يفعل ذلك. وقد تكون تكاليف التخلص سببًا لتردد المؤسسة في تبني تقنية بديلة.

الوصول إلى منشأة نفايات

أفادت الوكالة الدولية للطاقة الذرية (2018 أ) بوجود عدد قليل من البلدان يمكنها الوصول الكامل إلى منشآت التخلص من النفايات للمصادر المشعة غير المستخدمة. وبالنسبة للمصادر المشعة ذات نصف عمر أقل من 30 عامًا، يمكن التخلص من معظمها في منشآت قريبة من السطح، وتوجد بشكل أساسي في البلدان تمتلك صناعة طاقة نووية. وتميل البلدان التي لا تمتلك صناعات طاقة نووية إلى تخزين المصادر غير المستخدمة في مباني المستخدمين أو في منشأة مركزية معينة حتى يتم بناء منشأة نفايات في المستقبل. وبالنسبة لمصادر ما وراء اليورانيوم مثل الأميريسيوم 241 والبلوتونيوم 238، فإن المنشأة المرخصة الوحيدة في الولايات المتحدة هي المحطة التجريبية لعزل النفايات، لكن كما ناقشنا في القسم 2-8-3، فإن المحطة التجريبية لعزل النفايات مرخصة فقط لنفايات ما وراء اليورانيوم التي تنتمي في الأصل إلى برامج الدفاع الأمريكية وليست المواد ذات الأصل الأجنبي. وكما ناقشنا أيضًا في القسم

[31] سارة نوريس وجون زارلينغ، NNSA، عرض تقديمي للجنة في 9 سبتمبر 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

3-8-2، فيما يخص النفايات منخفضة المستوى من الفئات أ وب وج، يوجد في الولايات المتحدة أربعة مواقع مرخصة. وعلى عكس معظم البلدان، لا يحتوي نظام تصنيف النفايات في الولايات المتحدة على فئة نفايات "متوسطة المستوى".

تمتلك كل من جمهورية كوريا والسويد مرافق مرخصة وعاملة للتخلص الجيولوجي للنفايات قصيرة العمر منخفضة ومتوسطة المستوى. وتتوقع بعض البلدان (ألمانيا وسويسرا) التخلص من جميع النفايات ذات المستوى المنخفض والمتوسط في نهاية المطاف في منشأة جيولوجية عميقة متعددة الأغراض لم يتم بناؤها بعد.

الضمانات المالية

تنص الفقرة 22 (ب) من مدونة قواعد السلوك الخاصة بالوكالة الدولية للطاقة الذرية على أنه ينبغي للهيئات التنظيمية في الدول الأعضاء "ضمان اتخاذ الترتيبات للإدارة الآمنة والحماية الآمنة للمصادر المشعة، بما في ذلك المخصصات المالية عند الاقتضاء، بمجرد أن تصبح غير مستخدمة" (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2004). من المعروف على نطاق واسع أن من يستفيدون من استخدام المصدر يجب أن يدفعوا مقابل التخلص منه. وفي كثير من الحالات، لم يضع المستخدم في الاعتبار تكاليف دورة الحياة الكاملة لامتلاك واستخدام المصادر المشعة، التي ينبغي أن تشمل تكاليف التخلص. ويعد الضمان المالي بمثابة إقرار والتزام من المرخص له بتوافر موارد كافية في نهاية عمر المصدر لإدارة التخلص الآمن. ويهدف الضمان المالي أيضًا إلى التخفيف من المخاطر التي قد تؤدي إلى توقف المستخدمين عن العمل قبل الوفاء بالتزاماتهم لإدارة التخلص.

تعتمد تكلفة التخلص من المصادر في الولايات المتحدة بشكل أساسي، على الحجم والنشاط؛ وكلما ارتفع نشاط المصدر، ارتفع السعر. ورغم أن تكاليف التخلص من معظم المصادر تحت 1 كوري (37 غيغا بيكريل) تتراوح من 500 دولار إلى 5000 دولار، فمن الممكن أن تتراوح تكاليف التخلص من المصادر الأكبر من عشرات إلى مئات الآلاف من الدولارات. بالإضافة إلى ذلك، توجد تكاليف للتخزين المؤقت والتعبئة والتكييف والنقل المرتبطة بالتخلص من هذه المصادر (DSWG، 2012). ووفقًا لمكتب الأمن الإشعاعي، تراوحت تكلفة عمليات الإزالة المحلية للمصادر غير المستخدمة عالية النشاط من 100,000 دولار إلى 175,000 دولار.[32] وتعتبر هذه التكاليف أعلى بكثير مما يستطيع بعض المستخدمين، مثل مستشفى صغير، تحمله، ولم يتم وضعها في الاعتبار عند شراء المصدر أو استلامه كتبرع. ولرغم أن معظم البلدان تتطلب الآن اتفاقيات "استرداد" بين المشترين والموردين، إلا أنها عادة ما تكون مجرد التزام من جانب المورد لاستعادة المصدر، بدلاً من الالتزام بفعل بتكلفة محددة. وبالتالي، فإن العديد من المستخدمين غير مستعدين أو غير قادرين على تغطية تكاليف التخلص غير المتوقعة هذه.

لا تهدف متطلبات الضمان المالي الحالية الصادرة عن اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية القسم 30.35 "الضمان المالي وحفظ السجلات الخاصة بإيقاف التشغيل"، إلى معالجة التخلص من المصادر المُحكمة، لكنها تستهدف بدلاً من ذلك المرخص لهم الذين يمتلكون بعض المواد الثانوية ذات نصف عمر أكبر من 120 يومًا ومستويات نشاط أعلى من عتبات معينة لإيقاف تشغيل المرافق التي قد تتطلب إزالة التلوث قبل إطلاقها. وعلى وجه التحديد، فيما يتعلق بالمصادر المُحكمة أو الرقائق المطلية، يتطلب الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية القسم 30.35 مبلغًا ثابتًا بالدولار (113,000 دولار أمريكي) في شكل ضمان مالي أو خطة تمويل لإيقاف التشغيل للمرخص لهم الذين يمتلكون مادة ثانوية بنصف عمر يزيد عن 120 يومًا وعند مستويات نشاط أعلى من عتبات معينة. وتنطبق عتبات المواد الثانوية المُحكمة في الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية القسم 30.35 التي تتطلب ضمانًا ماليًا فقط على مجموعة فرعية من مصادر الفئة 1 والفئة 2. ويعتبر مبلغ الضمان المالي الثابت بالدولار غير كافٍ لتكاليف النقل والتخلص من العديد من مصادر الفئة 1 والفئة 2.

في عام 2016، قدم موظفو اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية إلى اللجنة دراسة استطلاعية لتحديد العوامل الرئيسية التي قد تؤثر على القرارات المتعلقة بوضع متطلبات جديدة أو معدلة وإرشادات للتخطيط المالي للمواد الثانوية. وأظهرت الدراسة الاستطلاعية أن التخطيط المالي لإدارة المصادر المشعة منتهية الصلاحية يمكن أن يضمن مراعاة التكاليف الكاملة لشراء هذه المصادر واستخدامها بشكل مناسب. ومع ذلك، سيؤدي تنفيذ المتطلبات الجديدة إلى زيادة التكاليف التنظيمية، ووفقًا للجنة التنظيمية النووية الأمريكية، فمن المحتمل أن يؤثر ذلك سلبًا على الاستخدامات المفيدة لهذه المصادر (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2016).

نفذت بعض ولايات الاتفاقية بالفعل متطلبات الضمان المالي والحدود الزمنية للتخزين. على سبيل المثال،

- نفذت تكساس حدًا زمنيًا مدته عامين لتخزين المصادر المُحكمة غير المستعملة وتجمع رسومًا من المرخص لهم لتغطية تكلفة استعادة المصادر المهملة والمتروكة؛[33]

[32] سارة نوريس وجون زارلينغ، NNSA، عرض تقديمي للجنة في 9 سبتمبر 2020.

[33] المخصصات المالية في تكساس للمصادر المهملة (قانون الصحة والسلامة، العنوان الفرعي د، المواد النووية والمشعة، الفصل 401، المواد المشعة ومصادر الإشعاع الأخرى، الفصل الفرعي ح، المخصصات المالية).

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

- نفذت إلينوي متطلبات الضمان المالي لمعظم المصادر؛[34]
- لدى ولاية فلوريدا صندوق استئماني للحماية من الإشعاع يغطي جميع التكاليف المرتبطة بإفلاس المرخص لهم والمصادر المهملة.[35]

اتبعت بعض البلدان، مثل كندا وفرنسا وألمانيا وسويسرا والمملكة المتحدة، التوجيهات الواردة في مدونة قواعد السلوك للوكالة الدولية للطاقة الذرية وتتطلب استخدام خطة ضمان مالي (فولدرز وساور (Volders and Sauer)، 2016). على سبيل المثال، يجب على المرخص لهم في كندا تقديم ضمان مالي، وهو "التزام ملموس" بامتلاك موارد مالية كافية لإنهاء استخدام مصدر الإشعاع بأمان (لجنة السلامة النووية الكندية (CNSC)، 2020). ويستطيع المرخص لهم الوفاء بالتزاماتهم الخاصة بالضمان المالي بالمشاركة في برنامج تأمين تديره لجنة السلامة النووية الكندية. وتُحسب المسؤولية الإجمالية للمرخص له عن استخدام المصدر المُحكمة وفقًا لصيغة ينتج عنها مسؤولية كلية تتناسب مع تكاليف التخلص الآمن من المصادر المشعة في نهاية عمرها النافع. وفي الوقت الحالي، تتراوح الأقساط السنوية من 25 دولارًا إلى حوالي 4,500 دولار (لجنة السلامة النووية الكندية (CNSC)، 2020).

حاويات الشحن

يتمثل التحدي التاريخي لجهود التخلص من النفايات فيما يخص المصادر عالية النشاط في التوافر المحدود للحاويات المرخصة من النوع ب (تشير إليها الوكالة الدولية للطاقة الذرية باسم العبوات) اللازمة لنقل المصادر من المرخص له إلى منشأة التخلص الآمن. وعلى مدار العقد الماضي، أكملت الإدارة الوطنية للأمن النووي تطوير واختبار واعتماد عبوتين جديدتين للنقل: العبوة 435-ب من النوع ب والعبوة 380-ب من النوع ب. تتميز العبوة 435-ب من النوع ب بأنها خفيفة الوزن وسهلة النقل وقادرة على نقل مجموعة متنوعة من الأجهزة المشعة مقارنة بالعبوات الأخرى. وتعد العبوة 380-ب قادرة على نقل الأجهزة التي تمثل تحديًا للعبوات الأخرى المتوفرة حاليًا. واكتملت أول إزالة مصدر باستخدام العبوة 435-ب من النوع ب في مارس 2018 في مستشفى استبدلت مشع السيزيوم

[34] تمتلك إلينوي متطلبات ضمان مالي صارمة للمصادر (الباب 32، فصل الطاقة الثاني: وكالة إدارة الطوارئ، الفصل الفرعي ب: الحماية من الإشعاع، الجزء 326).

الشكل 2-4 استرداد مشعع ذاتي الحماية من السيزيوم 137 باستخدام حزمة 435-B من النوع B.
المصدر: وزارة الطاقة.

[35] تمتلك فلوريدا صندوقًا ائتمانيًا للحماية من الإشعاع بنسبة 5 في المائة من رسوم الترخيص والتفتيش السنوية لتغطية تكلفة التخلي عن المواد المشعة، والتقصير في الالتزامات القانونية، والإفلاس (64E-5.206 القسم 404.122 و404.131 (2)).

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

137 من خلال مشروع استبدال مشع السيزيوم (راجع الشكل 2-4). ومن المتوقع أن يبدأ استخدام العبوة 380-ب من النوع ب في ربيع عام 2021. وتعد تكلفة هذه العبوات باهظة؛ وتشير الإدارة الوطنية للأمن النووي إلى أن سعر العبوة 380-ب من النوع ب يبلغ 1.5 مليون دولار (الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA)، 2019). وتبلغ تكلفة التأجير عشرات الآلاف من الدولارات.

أتاحت الإدارة الوطنية للأمن النووي العبوة 435-ب من النوع ب للاستخدام المحلي وقدمت واحدة للوكالة الدولية للطاقة الذرية للمساعدة في إزالة المصادر في جميع أنحاء العالم. وتوفر هذه العبوة، نظرًا لتصميمها الأصغر والأخف وزنًا، سهولة النقل في البلدان ذات الموارد الأقل. وبينما يساعد هذا في تقليل تكلفة النقل، إلا أن هذه التكلفة تظل مرتفعة وتضيف بشكل كبير إلى تكاليف التخلص الإجمالية. وتوجد حاجة إلى تحديد العديد من عبوات الشحن الأخرى المعتمدة دوليًا من النوع ب التي يمكن تطبيقها على نطاق واسع على المصادر غير المستخدمة.

2-8-5 برامج التخلص

في الولايات المتحدة، تساعد بعض البرامج التي ترعاها الحكومة، مثل برنامج استرداد المصادر خارج الموقع (OSRP)، في تحمل تكلفة التخلص من المصادر، مما يتيح للمرخص لهم تسجيل المصادر للتخلص منها بتكلفة أقل مدعومة. ويحظى برنامج استعادة المصادر خارج الموقع برعاية الإدارة الوطنية للأمن النووي ويُنفذ من خلال مختبر لوس ألاموس الوطني ومختبر أيداهو الوطني. وشمل النطاق الأولي للبرنامج مصادر مُحكمة تشتمل على نفايات مشعة أكبر من الفئة ج وتم توسيعه لاحقًا ليشمل استعادة مصادر انبعاث بيتا وغاما. وبمجرد التسجيل في البرنامج، يتم إعطاء الأولوية للمصادر للتخلص من النفايات وفقًا للنوريدات المشعة والنشاط وعوامل أخرى مثل ما إذا كان المصدر سليمًا أو يتسرب. وتحظى بعض المصادر بأولوية أعلى للإزالة بناءً على مخاوف تتعلق بالسلامة أو الأمن (مثل السيزيوم 137 والبلوتونيوم 238). وبشكل إجمالي، اعتبارًا من يناير 2021، استعاد برنامج استرداد المصادر خارج الموقع أكثر من 41,000 مصدر في الولايات المتحدة وأكثر من 3,400 دوليًا من أكثر من 1250 موقعًا.[36] ينتمي أكثر من 3,500 من هذه المصادر إلى الفئة 1 والفئة 2 (إيتامورا وآخرون، 2018). ويسهل برنامج استرداد المصادر خارج الموقع أيضًا عمليات الإزالة الدولية من خلال مشاركة الخبرات، على سبيل المثال، من خلال المجموعات الاستشارية حول تخطيط الإزالة وتدريب مقدمي الخدمات على التعبئة.

تقدم الإدارة الوطنية للأمن النووي أيضًا التمويل لبرنامج جمع المصادر والحد من التهديدات (SCATR)، الذي يديره مؤتمر مديري برامج السيطرة على الإشعاع. ويهدف برنامج جمع المصادر والحد من التهديدات إلى تقليل أثر المواد المشعة غير المستخدمة أو غير المرغوب فيها المخزنة في منشآت المرخص لهم من خلال تقديم المساعدة فيما يتعلق بالتخلص منها. ويوفر برنامج جمع المصادر والحد من التهديدات أيضًا حوافز مالية للتخلص من مصادر الفئة أ وب وج مع إمكانية الوصول إلى منشأة التخلص التجارية في شكل دعم مشترك في التكلفة للتعبئة والنقل والتخلص. وتُستخدم المصادر المؤهلة لجمع المصادر والحد من التهديدات المشتركة في الاستعمالات الطبية والصناعية، مثل المعايرة والمعالجة الموضعية والتصوير الشعاعي ومقاييس الكثافة. وتم جمع أكثر من 30,000 مصدر والتخلص منها منذ بدء عملية جمع المصادر وتقليل التهديدات والتخلص منها منذ إنشاء البرنامج في عام 2007.

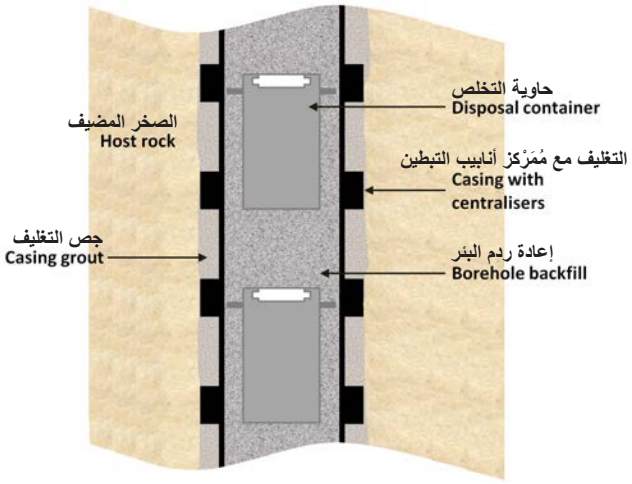
على الرغم من المساهمات الواضحة من جانب برنامج استرداد المصادر خارج الموقع وبرامج جمع المصادر والحد من التهديدات، إلا أن هناك مخاوف من أن هذه البرامج تنشئ أيضًا مثبطات غير مقصودة للمستخدمين لتحمل المسؤولية عن التكاليف المرتبطة بالتخلص من مصادرهم غير المستخدمة والاعتماد بدلاً من ذلك على الحكومة للمساهمة في التكاليف. ونظرًا لأن خيارات التخلص التجاري من المصادر المهملة من الفئة 1 والفئة 2 أصبحت متاحة على نطاق أوسع، فقد يصبح الوصول إلى التخلص المدعوم محدودًا.

على الصعيد الدولي، توجد برامج أخرى عديد لتحديد الخيارات القابلة للتطبيق للتخلص من النفايات القابلة للمصادر غير المستخدمة والتأكد من أن جميع البلدان تتمتع بإمكانية الوصول إلى التخلص من المصادر المشعة غير المستخدمة. وتتخلص بعض الدول حاليًا من المصادر غير المستخدمة جنبًا إلى جنب مع النفايات المشعة الأخرى. وطورت البلدان التي تمتلك برامج للطاقة النووية منشآت للتخلص من النفايات المشعة بالقرب من السطح للنفايات منخفضة ومتوسطة المستوى. ومع ذلك، يتجاوز النشاط المحدد للعديد من المصادر معايير قبول النفايات بالنسبة لهذه المنشآت. وتدرس البلدان التي لا تمتلك برامج للطاقة النووية التخلص من النفايات في فتحات (عادة بعمق 100 متر) كخيار إدارة محتمل للمصادر غير المستخدمة طويلة العمر وذات النشاط العالي (راجع الشكل 2-5). وينطوي مفهوم التخلص في فتحات على وضع النفايات المشعة الصلبة أو المصلدة في منشأة هندسية ذات قطر ضيق نسبيًا محفورة وتُدار مباشرة من السطح. وأظهرت تقييمات السلامة العامة بعد الإغلاق باستخدام سيناريوهات مختلفة والنويدات المشعة أن التخلص في الفتحات يوفر درجة مناسبة من الأمان على المدى الطويل. ولخصت الوكالة الدولية للطاقة الذرية (2003 ب) اعتبارات السلامة والاعتبارات الأخرى في التخلص من المصادر المشعة المُحكمة غير المستخدمة في منشآت الفتحات (2003 ب). وتوجد مبادرة جارية مع دولتين، غانا وماليزيا، لتطوير وتنفيذ منهجية التخلص من النفايات. ويعد هذا في الوقت الحالي برنامجًا تجريبيًا، ومن المتوقع

[36] يُرجى الاطلاع على https://osrp.lanl.gov/images/Maps/Recoveries_to_Date.pdf.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version



الشكل 2-5 المقطع العرضي لمنطقة التخلص داخل بئر التخلص.
المصدر: الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2020 ب. مستنسخة بإذن من الوكالة الدولية للطاقة الذرية.

تطوير المفهوم بشكل أكبر وتوحيده للاستخدام في البلدان التي لا تمتلك طاقة نووية ولن تكون لديها منشأة نفايات واسعة النطاق (فان مارك (van Marcke)، 2019).

لا تستطيع العديد من البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل إعطاء الأولوية لإدارة المصادر المهملة ذات النشاط العالي، بما في ذلك التخلص منها. وقدمت الوكالة الدولية للطاقة الذرية مساعدة تقنية ومالية لإزالة المصادر المهملة عالية النشاط في العديد من البلدان من خلال مبادرات الإعادة إلى الوطن أو إعادة التدوير. ويتم تمويل هذه الأنشطة عادة عن طريق تبرعات من البلدان ذات الدخل المرتفع إلى صندوق الأمن النووي ومن خلال برامج التعاون الفني. على سبيل المثال، في عام 2018، ساعدت الوكالة الدولية للطاقة الذرية في إزالة 27 مصدرًا عالي الإشعاع غير مستخدمة من خمسة بلدان في أمريكا الجنوبية. وكانت هذه المصادر تستخدم بشكل رئيسي للأغراض الطبية والتعقيم؛ وتوقف استخدام بعضها وتخزينها في المستشفيات لأكثر من 40 عامًا (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2018 أ). وكما ذكرنا سابقًا، يساعد برنامج استعادة المصادر خارج الموقع التابع للإدارة الوطنية للأمن النووي أيضًا البلدان في التخلص من المصادر غير المستخدمة. على سبيل المثال، سيساعد البرنامج في إيقاف تشغيل وإزالة ثلاثة مصادر للكوبالت 60 مخزنة حاليًا في مستشفى في غواتيمالا. وتقدم دول أخرى، بما في ذلك كندا وفرنسا وألمانيا، مساعدة مباشرة للبلدان منخفضة ومتوسطة الدخل لإزالة المصادر المشعة.

في إطار مشروع أقاليمي للتعاون التقني للوكالة الدولية للطاقة الذرية متعدد السنوات، بعنوان إدارة المصادر المشعة من البداية حتى النهاية، توفر الوكالة الدولية للطاقة الذرية التدريب والمساعدة على إدارة المصادر المشعة غير المستخدمة للبلدان المشاركة. وتشجع الوكالة الدولية للطاقة الذرية بشدة البلدان على وضع خيارات إدارة نهاية العمر قبل شراء مصدر جديد وقد وضعت برامج لمساعدة البلدان على فهم الخيارات المتاحة للتخلص من النفايات وتحديد الخيار الأفضل لحصر المصادر غير المستخدمة (يوسف (Yusuf)، 2020)

2-9 الفصل الثاني: النتائج والتوصيات

النتائج 1: يستمر استخدام المصادر المشعة على نطاق واسع، على الصعيدين الوطني والدولي، للاستعمالات في مجالات الطب والأبحاث والتعقيم وغيرها من الاستعمالات التجارية. ولم تظهر استعمالات جديدة للمصادر المشعة عالية الخطورة (الفئة 1 والفئة 2) ومتوسطة الخطورة (الفئة 3) خلال السنوات العشر إلى الخمس عشرة الماضية. وتم التخلص تدريجيًا من أحد استعمالات مصادر الفئة 1، وهو استخدام المولدات الكهروحرارية التي تعمل بالنظائر المشعة للطاقة الأرضية.

تعتبر النظائر المشعة المستخدمة في الغالب في الاستعمالات الطبية والبحثية والتجارية التي نُوقشت في هذا التقرير هي الكوبالت 60 والسيزيوم 137 والإيريديوم 192 والأميريسيوم 241. ويُستخدم حوالي 90 في المائة من النشاط من هذه النظائر المشعة (على وجه الخصوص، الكوبالت 60 والسيزيوم 137) في مصادر الفئة 1 والفئة 2 لتشعيع الدم والبحوث والعلاج الإشعاعي والتعقيم

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

والاستعمالات التجارية الأخرى. ويُستخدم معظم النشاط المتبقي من هذه النظائر المشعة في مصادر الفئة 3 للمعالجة الموضعية عالية الجرعات، والمقاييس الصناعية، وتسجيل قياسات الآبار، والاستعمالات الأخرى. وتم التخلص التدريجي من استخدام المصادر المشعة للمولدات الكهروحرارية التي تعمل بالنظائر المشعة للطاقة الأرضية. ومع ذلك، يستمر استخدام المولدات الكهروحرارية التي تعمل بالنظائر المشعة في استكشاف الفضاء.

النتائج 2: اتخذت حكومة الولايات المتحدة والمجتمع الدولي إجراءات لتعزيز أمن المصادر المشعة والمساءلة عنها. وتركز هذه الإجراءات في المقام الأول على المصادر عالية المخاطر (الفئة 1 والفئة 2) بسبب قدرتها العالية على التسبب في تأثيرات حتمية لدى الأشخاص الذين يتعاملون معها أو يتعرضون لها. ويحظى الأمن والمساءلة لمصادر الفئة 3 بأولوية أقل بسبب قدرتهما المنخفضة على التسبب في تأثيرات حتمية.

زادت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية من لوائحها الأمنية لمصادر الفئة 1 والفئة 2 في عام 2013 من خلال سن الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية الفصل 37، الذي يحدد متطلبات الأمن المادي ومراقبة المصادر وفحص الخلفية الجنائية للموظفين وخطة أمان المنشأة وحماية إنفاذ القانون المحلية والتدريب والتوثيق. ولا ينطبق الفصل 37 على مصادر الفئة 3، لأنها تعتبر أقل خطورة وفقًا لنظام تصنيف المصادر الصادر عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية والنظام التنظيمي للجنة التنظيمية النووية الأمريكية، واللذان يستندان إلى احتمالات تسبب المصادر في آثار صحية حتمية على الشخص الذي يتعامل معها أو يتصل بها، إذا لم تتم إدارة هذه المصادر بأمان أو حمايتها بشكل آمن. وعلى الرغم من إعادة النظر في مدى ملاءمة لوائح مصادر الفئة 3 الأكثر صرامة على الأقل ثلاث مرات في السنوات العشر إلى الخمس عشرة الماضية، إلا أن اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية تتمسك بموقفها الذي يقضي بعدم الحاجة إلى تدابير أمنية إضافية لمصادر الفئة 3.

النتائج 3: في الولايات المتحدة، يتم تتبع مصادر الفئة 1 والفئة 2 بواسطة النظام الوطني لتتبع المصادر، وهو قاعدة بيانات مركزية غير عامة تديرها اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية منذ عام 2008. وزاد عدد مصادر الفئة 1 والفئة 2 على مدى 12 عامًا الماضية بنحو 30 في المائة.

يؤدي تتبع المصادر المشعة إلى زيادة المساءلة عن هذه المصادر لكل من المرخص لهم والجهة التنظيمية. وفي الوقت الحاضر، تتعقب اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية ما يقرب من 80,000 مصدر من الفئة 1 والفئة 2 من وقت تصنيعها أو استيرادها حتى وقت التخلص منها أو تصديرها أو حتى تحللها إلى ما دون الفئة 2. وتشكل مصادر الفئة 1 حوالي 52 في المائة من هذه المصادر. وفي عام 2009 بلغ عدد مصادر الفئتين 1 و2 مجتمعين 60,000 مصدر. ونظرًا لعدم وجود متطلبات إبلاغ لمصادر الفئة 3 في النظام الوطني لتتبع المصادر، لا تمتلك اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية معلومات عن عدد هذه المصادر المرخصة في الولايات المتحدة. واستنادًا إلى جمع البيانات الطوعية لمرة واحدة قبل عام 2008 وبافتراض الاتجاهات المماثلة في الإنتاج والاستخدام كما هو الحال مع مصادر الفئة 1 والفئة 2، فمن المحتمل اليوم وجود أكثر من 10,000 مصدر من الفئة 3 في الولايات المتحدة.

النتائج 4: تجعل التدابير الأمنية الأقل صرامة والافتقار إلى التتبع الوطني والدولي لمصادر الفئة 3 هذه الفئة عرضة لمعاملات غير مصرح بها وللسرقة.

ذكرت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية أنه منذ تنفيذ الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية الفصل 37، انخفض عدد سرقات مصادر الفئة 1 والفئة 2. وذكرت الوكالة أيضًا أن تنفيذ النظام الوطني لتتبع المصادر عزز قدرة الجهات التنظيمية على إجراء عمليات التفتيش والتحقيقات والتحقق من الحيازة المشروعة للمصادر الخاضعة للتتبع واستخدامها. وفي غياب هذه التدابير الأمنية والنظام الوطني لتتبع المصادر لمصادر الفئة 3، في كل من الولايات المتحدة وعلى الصعيد الدولي، فإن مصادر الفئة 3، وكثير منها متنقلة، تكون أكثر عرضة لمعاملات غير مصرح بها والسرقة مقارنة بمصادر الفئة 1 والفئة 2.

النتائج 5: خلصت تحليلات النمذجة الحديثة للأحداث الإشعاعية إلى أن إطلاق إشعاع صغير وتعرضات صغيرة للإشعاع للسكان الذين تقل أعمارهم عن المستويات التي يمكن أن تسبب تأثيرات حتمية قد يكون لها عواقب اقتصادية خطيرة وطويلة الأجل. وتدعم العديد من الأحداث الإشعاعية الواقعية هذا الاستنتاج. وقد يوفر نظام أمان يعتمد فقط على التأثيرات الحتمية للمصادر المشعة مستوى غير كافٍ من الحماية للمجتمع.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

أفادت التحليلات التي أجرتها ساندیا أن مصادر الفئة 3، في حالة استخدامها في سلاح إشعاعي، قد تتسبب في عواقب اقتصادية كبيرة، مماثلة لتلك التي تترتب على مصدر من الفئة 1. ويعد حادث محطة فوكوشيما دايتشي للطاقة النووية عام 2011 في اليابان وحادث عام 2019 أثناء استعادة المصدر المُحكم في جامعة واشنطن في سياتل حادثين مختلفين تمامًا من حيث كميات المواد المشعة المنبعثة ومنطقة الأرض الملوثة، لكن أظهر كلاهما الآثار الاجتماعية والاقتصادية السلبية في عدم وجود وفيات فورية نتيجة التعرض للإشعاع. وأظهر استرداد المصدر المشع في جامعة واشنطن أن الاستجابة والتنظيف والمعالجة لكم قدره 1 كوري (37 غيغا بيكريل) من السيزيوم 137 (أقل من كمية الفئة 3) يمكن أن تكلف أكثر من 100 مليون دولار.

التوصية أ: يجب على الوكالة الدولية للطاقة الذرية ولجنة التنظيم النووي الأمريكية والمنظمات الأخرى النظر في إعادة صياغة خطط تصنيف المصادر الخاصة بهم لتضع في الاعتبار كل من (أ) الآثار الصحية الاحتمالية مثل تطور السرطان لاحقًا في الحياة و(ب) الآثار الاقتصادية والاجتماعية. وستؤدي إعادة الصياغة هذه إلى وصف أكثر شمولاً للمخاطر الكلية، بما في ذلك العواقب المحتملة إذا لم تتم إدارة المصادر بأمان أو حمايتها بشكل آمن.

أُحرز تقدم كبير منذ تنفيذ نظام التصنيف التابع للوكالة الدولية للطاقة الذرية في عام 2003 في فهم وقياس الآثار الصحية المحتملة والآثار الاجتماعية والاقتصادية للأحداث التي تتضمن مصادر مشعة. وفي الواقع، وضع عدد من البلدان بما في ذلك الولايات المتحدة منهجيات لتقدير هذه التأثيرات كجزء من تخطيط الاستجابة للطوارئ الإشعاعية. ورغم أن التأثيرات المتوقعة يمكن أن تختلف اختلافًا كبيرًا اعتمادًا على السيناريوهات التي تم النظر فيها والمدخلات والافتراضات الخاصة بالنمذجة، إلا أن هذا لا يجعلها أقل أهمية. ويجب على الوكالة الدولية للطاقة الذرية واللجنة التنظيمية النووية الأمريكية والمنظمات الأخرى أن تدمج التأثيرات الصحية الاحتمالية والتأثيرات الاقتصادية والاجتماعية في تحليلات مخاطر مصادرها، وبالتالي في خطط التصنيف الخاصة بها لمعالجة العواقب على المجتمع بشكل كامل إذا لم تتم إدارة المصدر المشع بأمان أو حمايته بشكل آمن. ويمكن أن توضح هذه التحليلات الأكثر شمولية الحاجة إلى تعديل الحدود العددية الحالية لنشاط المصدر تحدد الحدود الدنيا للمصادر المشعة.

التوصية ب: يجب على الوكالة الدولية للطاقة الذرية واللجنة التنظيمية النووية الأمريكية والمنظمات الأخرى إجراء تغييرات على إرشادات ولوائح الأمان وتتبع المصادر بناءً على نتيجة إعادة الصياغة في التوصية أ.

بعد إعادة صياغة نظام تصنيف المصادر المشعة وفقًا للمشار إليه في التوصية (أ)، من المرجح أن تحتاج الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، واللجنة التنظيمية النووية الأمريكية، والمنظمات الأخرى إلى إجراء تعديلات على إرشادات وأنظمة الأمان وتتبع المصادر الخاصة بهم بحيث يتم تنظيم المصادر التي تشكل مخاطر عالية من حيث التأثيرات الحتمية والعشوائية والاقتصادية والاجتماعية بصرامة.

التوصية ج: بالتوازي مع ذلك، يجب على اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية أن تُدخل تدريجياً مصادر الفئة 3 في نظام التتبع الوطني للمصادر الحالي. وسوف يوفر هذا التتبع محاسبة أكثر دقة في الجرد الوطني لمصادر الفئة 3 وسيزيد من المساءلة عن امتلاك هذه المصادر وتنظيم استخدامها. ويجب على حكومة الولايات المتحدة اتخاذ قرارات مستنيرة بشأن التحسينات الأمنية المحتملة لمصادر الفئة 3 في المنشآت التي توجد بها هذه المصادر.

سيستغرق اعتماد التوصيتين (أ) و(ب) بواسطة الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، واللجنة التنظيمية النووية الأمريكية، والمنظمات الأخرى، إذا نجحت، وقتًا طويلاً، 5 سنوات على الأقل، لأن المنظمات ستحتاج إلى الحصول على تأييد من أصحاب المصلحة المختلفين والمضي في عملياتهم لإعداد التوجيه أو وضع القواعد. ومع ذلك، ترى اللجنة وجود مبررات فورية لبعض الإجراءات لتحسين المساءلة والأمن لمصادر الفئة 3. ويعد تتبع مصادر الفئة 3 من خلال النظام الوطني لتتبع المصادر خطوة نحو تحقيق هذا الهدف.

مع أكثر من عِقد من تاريخ تشغيله، أثبت النظام الوطني لتتبع المصادر أنه يستطيع تتبع مصادر الفئة 1 والفئة 2 بنجاح. وسيضيف توسيعه ليشمل مصادر الفئة 3 بعض العبء الإداري على اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية والمرخص لهم لكن الفوائد تفوق التحديات.

النتائج 6: لن يتحقق هدف الحد من المخاطر لاستبدال المصادر المشعة ببدائل غير مشعة الذي وضعته الحكومة الأمريكية إلا بعد إزالة المصادر غير المستخدمة والتخلص منها بشكل صحيح. وقد تكون التكاليف المرتفعة للتخلص ومحدودية الخيارات والموارد

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

والتوجيهات للتخلص محليًا ودوليًا من الأمور المحظورة سواء لاعتماد البدائل أو للتخلص المناسب من المصادر المشعة عند انتهاء عمرها الافتراضي.

توجد تحديات عديدة تواجه التخلص من النفايات المشعة في جميع أنحاء العالم. وسيحتاج المستخدمون الذين يواجهون قرارًا بتبني تقنية بديلة إلى تحديد ما يجب فعله بالمصدر المشع الذي سيتوقفوا عن استخدامه. وربما درست بعض المؤسسات دورة الحياة الكاملة للمصادر المشعة التي تمتلكها واتخذت ترتيبات للتخلص منها، لكن العديد منها لم يفعل ذلك. ويتسبب ارتفاع تكاليف التخلص وعدم وجود مستودعات كافية وعدم كفاية التوجيه للتخلص من النفايات، في إنشاء بيئة لا يحصل المستخدمون فيها سوى على حافز ضئيل أو لا يحصلون على حافز على الإطلاق للتخلص من المصادر المُحكمة المهجورة. وقد تكون هذه التحديات أيضًا سببًا لتردد المؤسسة في تبني تقنية بديلة.

تشير الأدلة القولية إلى أنه لا يتم التخلص بشكل مناسب إلا من جزء بسيط من المصادر التي تم استبدالها. وتُخزن المصادر المتبقية عادة في منشآت المرخص له، لأنه لا يوجد مسار تخلص متاح أو لأن تكاليف التخلص مرتفعة ولا يمكن أن يتحملها المرخص له. وفي هذه الحالات، قد يؤدي إدخال تقنية بديلة إلى زيادة مخاطر الأمان بدلاً من الحد منها.

التوصية د: يجب أن توسع اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية متطلباتها الحالية للضمانات المالية للتأكد من أنها تغطي بشكل كافٍ إدارة نهاية العمر للمصادر المشعة المرخصة حديثًا. ويجب على حكومة الولايات المتحدة أيضًا وضع وتنفيذ إستراتيجية وطنية لإدارة نهاية العمر للمصادر المشعة المملوكة والمهملة حاليًا من الفئة 1 والفئة 2 ويجب أن تضعها الاعتبار لمصادر الفئة 3.

من المعروف على نطاق واسع أن من يستفيدون من استخدام المصدر المشع يجب أن يكونوا مسؤولين عن التخلص منه. وفي حين تتناول متطلبات الضمان المالي الحالية للجنة التنظيمية النووية الأمريكية المصادر المُحكمة، إلا أنها غير كافية لتغطية تكاليف التخلص الحالية. وتستهدف متطلبات الضمان المالي الحالية للجنة التنظيمية النووية الأمريكية إلى حد كبير المرخص لهم الذين يمتلكون بعض المواد الثانوية (غير المُحكمة) ذات نصف عمر يزيد عن 120 يومًا وعلى مستويات نشاط أعلى من حدود معينة لإيقاف تشغيل المنشآت التي قد تتطلب إزالة التلوث قبل إطلاقها. ويجب على اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية توسيع متطلبات الضمان المالي الحالية لضمان التزام المرخص لهم الذين يفكرون في شراء مصادر جديدة بتوفير موارد مالية كافية للتخلص من المصادر المشعة في نهاية عمرها الافتراضي.

على الرغم من أن تطبيق متطلبات الضمان المالي للمصادر الجديدة أمر ممكن التنفيذ، إلا أن تطبيق هذه المتطلبات بأثر رجعي أقل جدوى. وتوقعت قلة من المستخدمين ارتفاع تكاليف التخلص. ولإزالة هذه المصادر بأمان، توجد حاجة إلى المساعدة الحكومية في شكل دعم تقني وإعانات ووسائل أخرى. ويعد برنامج استعادة المصادر خارج الموقع وبرنامج جمع المصادر والحد من التهديدات مثالين على برامج إدارة نهاية العمر الناجحة للمصادر المشعة. وسيتعين على حكومة الولايات المتحدة كجزء من الاستراتيجية الوطنية الموصى بها للتخلص الآمن والمأمون من المصادر المشعة، تحديد حلول لإعادة المصادر التي لا يمكن حاليًا إعادتها إلى الوطن أو التخلص منها بسبب اللوائح الحالية والتصرف فيها.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

3

اعتماد التقنية البديلة وتطويرها

أدركت المنظمات المحلية والدولية بشكل متزايد المخاطر والمسؤوليات المتعلقة بالسلامة والأمن المرتبطة بامتلاك واستخدام المصادر المشعة من الفئة 1 والفئة 2، ويتولى البعض إزالتها طواعية واستبدالها لتحل محلها تقنيات بديلة. ومع ذلك، لا تزال هناك تحديات أمام الاعتماد الطوعي لهذه التقنيات، خاصة في حالة عدم وجود تقنيات بديلة مناسبة أو حيث تفرض البدائل تكاليف أعلى على المنظمات لتقديم خدمات مماثلة. ويبحث هذا الفصل الاعتبارات الاقتصادية وغيرها من الاعتبارات التي تؤثر على القرارات المتعلقة باعتماد بدائل للمصادر المشعة وكذلك الجهود المبذولة لتطوير تقنيات بديلة.

3-1 التقنيات البديلة للمصادر المشعة

في هذا التقرير، تعد التقنيات البديلة الأولية التي تم وضعها في الاعتبار تلك التي لا تستخدم النويدات المشعة كمصدر (البدائل غير المشعة). ولا يتم النظر بشكل عام في البدائل المشعة، على سبيل المثال، تلك التي تستخدم نفس النويدات المشعة لكن بشكل كيميائي أو فيزيائي مختلف أو تستخدم نويدات مشعة مختلفة من المحتمل أن تشكل مخاطر أمنية أقل. ويمثل استخدام السيزيوم 137 المزجج الاستثناء الوحيد كبديل محتمل لمصادر كلوريد السيزيوم وفقًا لما جرى مناقشته في القسمين 4-1-3 و4-6.

في كثير من الحالات، تعد التقنيات البديلة معيار الممارسة بالفعل. على سبيل المثال، في البلدان ذات الدخل المرتفع، أصبح العلاج بالأشعة الخارجية باستخدام مسرع خطي (linac) الآن ممارسة قياسية للعلاج الإشعاعي لعلاج السرطان والأمراض الأخرى بدلاً من العلاج عن بعد باستخدام مصادر الكوبالت 60 (راجع القسم 4-3). وبالنسبة للعلاج عن بُعد، فإن مناقشة التقنيات البديلة هي الأكثر صلة بالبلدان منخفضة ومتوسطة الدخل (LMICs)، التي ينتقل الكثير منها إلى استخدام المسرعات الخطية للعلاج الإشعاعي.

3-1-1 التقنيات البديلة غير المشعة

بشكل عام، تعد التقنيات البديلة الأكثر تقدمًا والأكثر قابلية للتطبيق تجاريًا للاستعمالات التي جرى مناقشتها في هذا التقرير هي الأجهزة التي تستخدم الكهرباء لإنتاج حزم إلكترونية تشع الأجسام بشكل مباشر أو تنتج بشكل غير مباشر أشعة سينية للإشعاع من خلال الاصطدام بأنود معدني. ويمكن تصنيف الحزم الإلكترونية، لأي من الغرضين، تقريبًا باعتبارها إلكترونات منخفضة أو عالية الطاقة. وتتراوح الإلكترونات منخفضة الطاقة من عشرات الكيلو إلكترون فولت إلى ما يقرب من 500 كيلو إلكترون فولت وتتولد بواسطة فرق جهد ثابت بين كاثود وأنود يحدد طاقة الإلكترونات. وتشمل هذه الفئة أنابيب الأشعة السينية التقليدية ومصادر الإلكترون للمعالجة السطحية للمواد. وتتولد الإلكترونات عالية الطاقة بواسطة كل من الآلات ذات الجهد الثابت والمسرعات الخطية. وتشمل الآلات ذات الإمكانات الثابتة عالية الطاقة مولدات فان دي غراف ومسرعات Dynamitron. وتتراوح طاقاتها من 1 إلى حوالي 5 ميغا إلكترون فولت (MeV). وعلى الرغم من أنها تستخدم أيضًا جهدًا ثابتًا، إلا أنها أكبر بكثير من أنابيب الأشعة السينية. وتستخدم

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

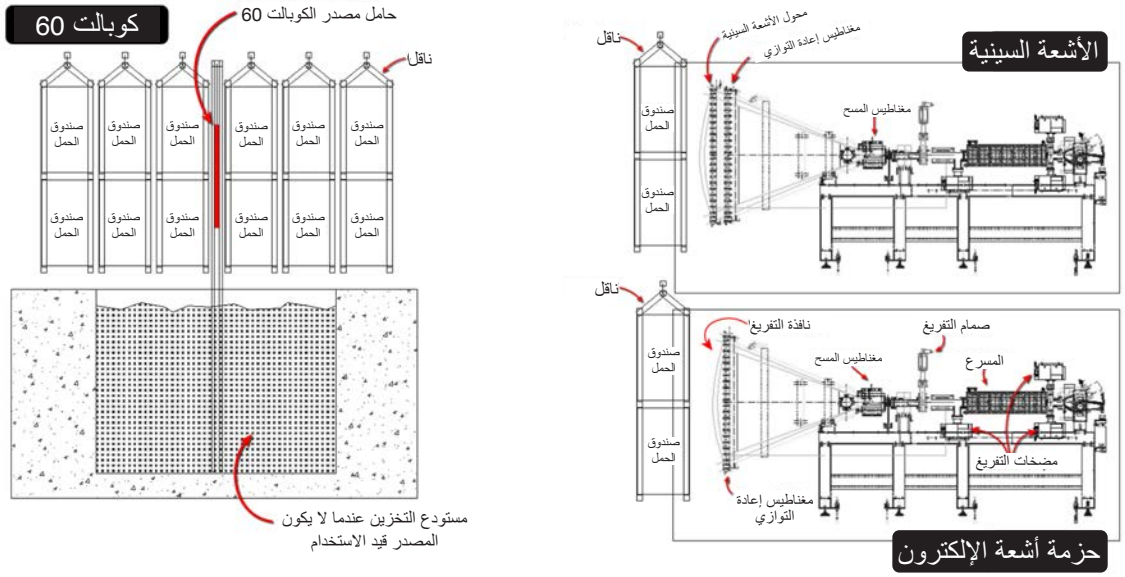
Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

المسرعات الخطية الطاقة الكهرومغناطيسية، عادة عند ترددات الميكروويف، في تجاويف الرنين لتسريع الإلكترونات دون الحاجة إلى الحفاظ على جهود كهربائية كبيرة جدًا. ونظرًا لصلتها باستبدال المصدر المشع، فإنها تُستخدم لإنشاء حزم إلكترونية تتراوح من 1 إلى أكبر من 20 ميغا إلكترون فولت. وتعد المسرعات الخطية مصدر الإلكترون لأنواع الإشعاع المشار إليها في العديد من الاستعمالات في هذا التقرير.

تبدأ جميع مصادر الإلكترون بكاثود تنبعث منه الإلكترونات. وفي مسرع خطي، يكون الكاثود جزءًا من "مدفع" إلكتروني يصدر إلكترونات يتم تسريعها بعد ذلك عبر مجال كهربائي. ولتسريع هذه الإلكترونات إلى الطاقات المطلوبة، يستخدم المسرع الخطي دليلاً موجيًا متسارعًا - المجالات الكهرومغناطيسية - لإنتاج طاقات حركية أعلى. ولإنتاج أشعة سينية، تصطدم هذه الإلكترونات عالية الطاقة بهدف معدني ثقيل وتتباطأ سرعتها بسرعة، مما يؤدي إلى توليد "إشعاع كبح" (*bremsstrahlung*) في شكل طيف طاقة واسع ومستمر من الأشعة السينية. وفي استعمالات الشعاع الإلكتروني، يوجه المغناطيس هذه الإلكترونات عالية الطاقة نحو الهدف. ويوضح الشكل 3-1 تمثيلاً تخطيطيًا لأساسيات مصادر إشعاع غاما والحزمة الإلكترونية والأشعة السينية.

لإنتاج النيوترونات، يتم تسريع أيونات الديوتيريوم (D أو ^2H) بدلاً من الإلكترونات. ويتم تسريع هذه الأيونات في حزمة عالية السرعة باستخدام مسرع خطي وتوجيهها إلى هدف يحتوي على ذرات الديوتيريوم أو التريتيوم (T أو ^3H) لتوليد النيوترونات. وتُفضل تصادمات الديوتيريوم بالتريتيوم لأن ناتجها النيوتروني أعلى من 50 إلى 100 مرة من تصادمات الديوتيريوم بالديوتيريوم؛ ومع ذلك، فإن التريتيوم نظير هيدروجين مشع بنصف عمر يبلغ 12.5 سنة، بينما يعد الديوتيريوم نظيرًا ثابت من الهيدروجين.

تختلف توزيعات الطاقة للنظائر المشعة والأشعة السينية ومصادر الحزمة الإلكترونية اختلافًا جوهريًا. وينتج انحلال النظائر المشعة عادة أطياف طاقة ذات ذروة حادة، مع وجود أشعة غاما الأولية عند طاقة واحدة أو بضع طاقات. على سبيل المثال، تكون أشعة غاما الأولية للكوبالت 60 عند 1.173 ميغا إلكترون فولت و1.333 ميغا إلكترون فولت، بينما تكون أشعة السيزيوم 137 عند 662 كيلو إلكترون فولت. وفي المقابل، تنتج الأشعة السينية طيفًا واسعًا يتضمن أشعة سينية لجميع الطاقات أقل من الطاقة القصوى ومتوسط طاقة يبلغ حوالي ثلث الطاقة القصوى. ويناقش الشريط الجانبي 3.1 ثلاث كميات - القدرة والطاقة والجرعة - ذات الصلة بمناقشات التكافؤ عبر مصادر الإشعاع الثلاثة.



الشكل 3-1 تمثيل تخطيطي لتشغيل مصادر أشعة غاما والحزم الإلكترونية والأشعة السينية في التعقيم الصناعي.
المصدر: مستنسخة ومعدلة من ميلر، 2003، بإذن من AIP Publishing.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الشريط الجانبي 3-1
إجراءات مقارنة المصادر المشعة مع التقنيات البديلة

القدرة والطاقة والجرعة عبارة عن كميات تستخدم لوصف الإشعاع. وتشير الاستعمالات المختلفة إلى بعض هذه الكميات بشكل متكرر أكثر من غيرها. وتُستخدم الجرعة في جميع الاستعمالات لوصف الطاقة التي تمتصها مادة ما. وتمثل الفعالية البيولوجية النسبية (RBE) كمية ذات صلة. وتُستخدم القدرة والطاقة كثيرًا في الاستعمالات التجارية أكثر من الطبية.

القدرة، التي يعُبر عنها بالواط (W)، أو الكيلوواط (kW)، أو الميغاواط هي معدل توصيل الطاقة. وتوفر مقارنة قدرة مصادر الإشعاع المختلفة فكرة تقريبية عن قدرة كل مصدر. ويساوي واحد ميغا كوري (MCi) من الكوبالت 60 حوالي 15 كيلوواط من الطاقة. وسيحتاج مسرع شعاع إلكترون بعد ذلك إلى توفير ما يقرب من 15 كيلوواط من قدرة الشعاع لتكافئ 1 ميغا كوري (37 وحدة نشاط إشعاعي) من الكوبالت. ونظرًا لأن إنتاج الأشعة السينية من الإلكترونات غير فعال للغاية، فهناك حاجة إلى حوالي 120 كيلوواط من طاقة الإلكترون لإنتاج 15 كيلوواط من طاقة الأشعة السينية. وباستخدام هذه التكافؤات، ستكون جميع الطرائق الثلاثة قادرة على تشعيع كمية مماثلة من المنتج (على سبيل المثال، للتعقيم).

تحدد *طاقة* الإشعاع قدرته على اختراق المواد. ويتم التعبير عن طاقة الإشعاع بإلكترون فولت وكيلو إلكترون فولت وميغا إلكترون فولت. وتوفر أشعة غاما المقترنة الناتجة عن اضمحلال الكوبالت 60 عند 1.173 ميغا إلكترون فولت و1.333 ميغا إلكترون فولت، طاقتين محددتين جيدًا لفهم قدرة الاختراق. ولا يتم إنتاج الأشعة السينية في طاقات فردية؛ وبدلاً من ذلك، تنتج عملية الإشعاع الإنكباحي طيفًا مستمرًا من الطاقات. ولكي يكون متوسط هذا الطيف مشابهًا لأشعة غاما من الكوبالت، يجب أن تكون الطاقة القصوى أكبر من طاقة أشعة غاما للكوبالت. بالإضافة إلى ذلك، تزداد كفاءة عملية الإشعاع الإنكباحي مع زيادة الطاقة. وعلى الرغم من أن الطاقة القصوى للأشعة السينية في الاستعمالات الطبية تصل إلى 20 ميغا إلكترون فولت، إلا أن الطاقة القصوى في معظم الاستعمالات التجارية هي 7.5 ميغا إلكترون فولت بسبب الحاجة إلى عدم تنشيط المنتج. وهذه الطاقة كافية ليتمتع طيف الأشعة السينية باختراق أفضل قليلاً من أشعة غاما من الكوبالت 60.

الإلكترونات هي جسيمات مشحونة، في حين أن أشعة غاما والأشعة السينية عبارة عن فوتونات. وبسبب هذا الاختلاف، فإن قدرة اختراق الإلكترونات أقل بكثير من الفوتونات ذات الطاقة المماثلة. ومع ذلك، من خلال تغيير طريقة عرض المنتجات لشعاع الإلكترون، من الممكن أن تعالج قوة الشعاع المماثل كميات مماثلة من المنتج كما هو الحال مع الطريقتين الأخريين.

يتم قياس *الجرعة* بالغراي (Gy) أو الكيلوغراي (kGy). ويساوي واحد غراي 1 جول من الطاقة الممتصة لكل كيلوغرام. وفي الاستعمالات الصناعية (على سبيل المثال، في التعقيم)، يقيس الجرعة التي يتم توصيلها إلى المنتج تعرض للإشعاع. ويجب توفير جرعة معينة لتعقيم كل منتج لضمان مستوى معين من التعقيم وفقًا للمحدد في المعايير المعمول بها. ويتم تحديد اختراق الإشعاع وإنتاجية المعالجة من خلال الطاقة والقدرة كما هو مذكور أعلاه.

في الاستعمالات الطبية، يعتبر *معدل الجرعة* مصدر القلق وليس قدرة الشعاع. ويحدد هذا مقدار الوقت المطلوب للعلاج. ويتم احتساب طاقة الشعاع في برامج تخطيط العلاج التي تحسب الجرعة المودعة في جميع مناطق الجسم في شعاع العلاج. وعند مقارنة طيف الأشعة السينية المتولد بالطاقات المنفصلة لأشعة غاما، فإن التوزيع المكاني للجرعة كدالة للأطياف سيكون مختلفًا.

يتم تحديد القدرة على مقارنة الضرر البيولوجي الناجم عن أنواع الإشعاع المختلفة بواسطة الفعالية البيولوجية النسبية لمختلف أشكال الإشعاع. وتمثل الفعالية البيولوجية النسبية مقدار الإشعاع المطلوب لتحقيق النتيجة السريرية نفسها (على سبيل المثال، القضاء على الخلايا السرطانية). ولهذا، فإن أشعة غاما من الكوبالت 60 (تُستخدم أيضًا أشعة سينية تبلغ ذروتها 250 كيلوفولت) هي المعيار للمقارنة مقابله. وتتمتع الأشعة السينية بالفعالية البيولوجية النسبية نفسها (1). وتحتوي الإلكترونات أيضًا على فعالية بيولوجية نسبية بقيمة 1. ولذلك، فإن جرعات أشعة غاما والأشعة السينية والإلكترونات متكافئة. وتتمتع الأشكال الأخرى من الإشعاع بأنواع مختلفة من الفعالية البيولوجية النسبية. وتتمتع النيوترونات بفعالية بيولوجية نسبية تتراوح من 5 إلى 20 اعتمادًا على طاقتها. وتمتع الأيونات الثقيلة (مثل الكربون أو الأكسجين) بفعالية بيولوجية نسبية تتراوح من 2 إلى 3.

3-1-2 الخصائص العامة للتقنيات البديلة

تكون الاعتبارات الأساسية للتقنيات البديلة عادة هي الأداء التقني والتكلفة. وبافتراض أن الأداء الفني في استعمال معين قابل للمقارنة، فإنه يتم النظر في إيجابيات وسلبيات المصدر المشع والتقنية البديلة، بما في ذلك عوامل مثل تكاليف رأس المال (بما في ذلك سعر الشراء وتكييف المنشأة)، وتكاليف التشغيل (بما في ذلك التدريب والصيانة) والإنتاجية والمتطلبات التنظيمية والاعتمادات

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

والمخاطر والمسؤوليات المتعلقة بالسلامة والأمن وخيارات التخلص (راجع الملحق هـ). وتتضمن التقنيات البديلة عادة عند مقارنتها بالمصادر المشعة ما يلي:

- ارتفاع تكاليف الشراء الأولية؛
- المزيد من الموظفين المدربين تدريباً عالياً لتشغيلها؛
- المزيد من حالات الفشل والإصلاحات المتكررة التي تتطلب اتفاقيات خدمة باهظة الثمن؛
- انخفاض المتطلبات التنظيمية وأنشطة الترخيص المرتبطة بالإدارة والنقل الآمنين؛
- متطلبات أمان أعلى محتملة تتعلق بالغازات المضغوطة ذات الجهد العالي والفراغ العالي المستخدمة في هذه التقنيات؛
- ارتفاع التكاليف المرتبطة بتوسيع منشآت الإنتاج؛
- زيادة الاعتماد على استقرار الشبكة الكهربائية والمائية؛
- انخفاض كبير في تكاليف إيقاف التشغيل وإرشادات ومسارات تخلص محددة بشكل أفضل؛
- مخاطر أقل للمسؤولية عن أضرار الطرف الثالث المتعلقة بسوء الاستخدام.

2-3 اعتبارات مؤسسية لاعتماد التقنيات البديلة

يتطلب الاعتماد الفعال للتقنية كلاً من الأجهزة والتنظيمات الهندسية التي تسهل اعتمادها واستخدامها بكفاءة. وتدعم البيئات المؤسسية في البلدان ذات الدخل المرتفع عادة تطوير التقنية واعتمادها. لذلك، من الممكن أن يقبل تقييم التقنيات البديلة في البلدان ذات الدخل المرتفع البيئة المؤسسية إلى حد كبير على ما هي عليه ويركز على المدى الذي يمكن أن تقدم فيه التقنيات خدمات قابلة للمقارنة وتكاليفها الإضافية، وهو موضوع يتناوله القسم التالي.

في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل، لا تدعم البيئات المؤسسية اعتماد التقنيات البديلة في كثير من الأحيان. وقد لا تمتلك الحكومات والمنظمات المحلية الأخرى موارد كافية لدعم الموظفين المطلوبين لتنفيذ التقنيات الجديدة والحفاظ عليها واستخدامها بشكل فعال في تقديم الخدمات العامة مثل الرعاية الصحية. وبالتالي، يجب أن يأخذ تقييم التقنية البديلة في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل في الاعتبار بالضرورة البيئة المؤسسية التي تهدف التقنيات إلى العمل فيها بالإضافة إلى قدرات وتكاليف التقنيات.

جرت مناقشة جدوى استخدام المسرعات الخطية كبدائل لآلات المعالجة عن بعد بالكوبالت 60 بشيء من التفصيل في القسم 3-3-4 من خلال العديد من دراسات الحالة التي توضح التحديات التي تواجه اعتماد التقنية البديلة في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل. وفي الولايات المتحدة، كان الإلغاء التدريجي شبه الكامل لأجهزة الكوبالت 60 في المعالجة عن بعد يعتمد بشكل أساسي على القدرات التقنية الفائقة للمسرعات الخطية. ومع ذلك، يتطلب تقييم جدوى تبني التقنية في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل، دراسة صريحة للموارد المؤسسية لدعمها. وغالبًا ما تعيق العديد من نقاط الضعف المؤسسية والعامة للبنية التحتية، أو حتى تمنع، الاستخدام الفعال للمسرعات الخطية: قد يكون تنسيق توقيت إنشاء وتسليم الأجهزة أمرًا صعبًا بسبب نقص الموظفين في مكاتب الجمارك؛ وقد لا يكون الإمداد بالكهرباء موثوقًا؛ وقد لا يتلقى الأطباء التدريب على الاستخدام الفعال للأجهزة؛ وقد لا يتوفر الموظفون المدربون على إصلاح الأجهزة داخل البلد. وربما لا تمتلك المؤسسة التي تفكر في استبدال آلات المعالجة عن بُعد التي تعمل بالكوبالت 60 الموارد اللازمة للتغلب على نقاط الضعف هذه لجعل بدائل المسرعات الخطية قابلة للاستعمال محل آلات المعالجة عن بعد التي تعمل بالكوبالت 60. وساعدت العديد من المنظمات، بما في ذلك الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، وصندوق الأوبك للتنمية الدولية، والوكالة الأمريكية للتنمية الدولية، في تبني التقنيات البديلة في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل من خلال توفير التدريب والمساعدة في الترتيبات التعاقدية للمسرعات الخطية أو تقاسم تكاليف اعتماد التقنيات. ومع ذلك، لا تزال هناك تحديات عديدة تؤثر سلبًا على تقديم الخدمات الصحية.

3-3 اقتصاديات تتبنى التقنيات البديلة

تعتبر القرارات التي تحدد ما إذا كان ينبغي على المؤسسات الخاصة أن تعتمد تقنيات بديلة لتحل محل المصادر المشعة ومتى يجب ذلك، معقدة. ولفهم هذه التعقيدات، استعرضت اللجنة الاقتصاديات الأساسية لقرارات الاستبدال (راجع الملحق هـ). وقدمت اللجنة في مراجعتها ادعاءين يشيران إلى أهمية السياسة العامة في تعزيز اعتماد التقنيات البديلة.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

1. تؤثر العوامل المؤسسية على الجدوى الاقتصادية للتقنيات البديلة وكذلك احتمالية الرغبة فيها من المنظور الاجتماعي. وداخل الولايات المتحدة والدول الأخرى ذات الدخل المرتفع، تؤثر اللوائح التنظيمية على التكاليف والفوائد النسبية للتقنيات البديلة. وفي البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل، تؤثر قيود البنية التحتية ورأس المال البشري بشكل أكبر في القرارات.
2. قد تؤدي العوامل الخارجية في استخدام المصادر المشعة إلى عدم اعتماد المؤسسات الخاصة للتقنيات البديلة المتاحة تجاريًا التي من شأنها أن تكون مفيدة اجتماعيًا، على سبيل المثال، لأنها تقلل من مخاطر العمل الضار مثل استخدام سلاح إشعاعي (RDD).

تعتمد جدوى أي تقنية بديلة محتملة على السياق المؤسسي لاستخدامها بالإضافة إلى خصائصها المادية. وتستطيع السياسات العامة تغيير السياقات المؤسسية. على سبيل المثال، قد تقلل اللوائح المحلية التكاليف الخارجية لاستخدام المصادر المشعة عن طريق تقليل احتمالية الاستخدام الضار. وقد تجعل الجهود الدولية لتكييف التقنيات البديلة مع السياقات في البلدان النامية هذه المصادر أكثر جدوى. ونظرًا لأن المؤسسات الخاصة لا تتحمل التكاليف الكاملة لاستخدام المصادر المشعة، فقد لا تعتمد تقنيات بديلة مفيدة اجتماعيًا حتى عندما تكون متاحة تجاريًا. وتجعل السياسات العامة، التي تستوعب المزيد من التكاليف الخارجية الحالية للمصادر المشعة، مثل طلب مساهمات أكبر لتغطية تكاليف التخلص، التقنيات البديلة أكثر جاذبية نسبيًا.

من الممكن توقع اختيار الكيانات الخاصة التقنيات التي تزيد من الفرق بين الفوائد والتكاليف المتوقعة، مع مراعاة المخاطر المتصورة. وإذا كانت هذه الفوائد والتكاليف شاملة، بمعنى أنها تشمل جميع التكاليف والفوائد التي يتحملها الآخرون في المجتمع، فإن هذا الحساب الخاص يزيد أيضًا من القيمة الاجتماعية للاختيار من حيث تخصيص الموارد لاستخداماتها الأكثر قيمة. ومع ذلك، إذا لم تكن الفوائد والتكاليف التي تتحملها الكيانات الخاصة التي تفكر في اعتماد تقنية ما شاملة، فقد لا يكون الاختيار المفيد للكيان الخاص مفيدًا للمجتمع الأوسع. وتسمى فوائد وتكاليف الخيارات التي لا يتحملها الكيان الخاص الذي يختار *العوامل الخارجية*. وعادةً ما ينطوي استخدام المصادر المشعة على تكاليف خارجية بسبب خطر وقوع حادث أو عمل ضار ينطوي على التخلص من المصدر المشع والمصدر.

وفقًا لما جرى مناقشته في الملحق هـ، قد تختلف اقتصاديات استبدال المصادر المشعة الموجودة بالفعل في الخدمة اختلافًا كبيرًا عن القرارات الجديدة التي تقارن تكاليف دورة حياتها بتكاليف البدائل. ويتم "تجاهل" التكاليف الأولية المرتفعة عادة للمصادر المشعة عند التفكير في استبدال هذه الأجهزة أثناء الخدمة بعمر مفيد طويل متبقٍ. وبالتالي، قد لا تكون التقنيات البديلة الاقتصادية في القرارات الجديدة اقتصادية من منظور مستخدم الجهاز الموجود بالفعل في الخدمة. وتعتمد معظم الأجهزة التي تحتوي على مصادر مشعة على تقنيات ناضجة كانت في الخدمة لسنوات عديدة وأثبتت بشكل عام أنها موثوقة. ويساهم هذا النضج في مزايا التكلفة الحالية. ومع ذلك، فإنه يشير أيضًا إلى أنه من غير المرجح أن تنخفض التكاليف بشكل أكبر. ونظرًا لندرة النظائر المشعة في بعض الأحيان، كما هو الحال حاليًا مع الكوبالت 60، فمن الممكن أن تزيد تكاليف الأجهزة التي تحتوي على مصادر مشعة. وفي الوقت نفسه، من المرجح أن تصبح العديد من التقنيات البديلة المتوفرة حاليًا تجاريًا لكنها لم تنضج بعد أكثر فعالية من حيث التكلفة لأنها تكتسب حصصًا أكبر في السوق، ومع تركيز جهود البحث والتطوير على جعلها أبسط وأكثر فعالية من حيث التكلفة. بالإضافة إلى ذلك، قد توفر بعض التقنيات البديلة خدمات عالية الجودة عند نضجها، كما هو الحال مع المسرعات الخطية مقارنة بالمعالجة عن بُعد باستخدام الكوبالت 60. ومن المرجح أن تجعل هذه الاتجاهات التقنيات البديلة أكثر جاذبية.

4-3 مروجو التقنيات البديلة

تستطيع الجهات التنظيمية أداء دور في تشجيع المستخدمين على التفكير في التقنيات البديلة لأن التنظيم المحسّن يمكن أن يكون بمثابة عامل مثبط للاستخدام المستمر للمصادر المشعة. ويمكن أن تشمل المثبطات زيادة المتطلبات التنظيمية لأمن المصادر، وتنفيذ الضمانات المالية لإدارة نهاية العمر (راجع القسم 2-8-4)، واشتراط أن يبرر المرخص لهم الحاجة إلى استخدام مصدر إشعاعي عالي النشاط قبل التصريح لهم بذلك. وتسبب السياسات المثبطة آثارًا على السوق والمجتمع وتتطلب هذه الآثار دراسة متأنية قبل تنفيذ السياسات.

لا تروج اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (US NRC) أو تشجع استخدام التقنيات البديلة لتقليل المخاطر الأمنية المتعلقة بالمصادر المشعة. وإذا كان بإمكان مقدم طلب للحصول على ترخيص مواد مشعة من اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية إثبات الاستخدام الآمن والمأمون للمواد، فسيتم الموافقة على الطلب، حتى إذا كان هناك بديل متاح من غير النظائر الإشعاعية. وتجري اللجنة التنظيمية

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

النووية الأمريكية فحصًا يسبق منح الترخيص لمنشأة مقدم الطلب للتأكد من أن مقدم الطلب قد نفذ متطلبات الأمان السارية قبل حيازة المواد المشعة من الفئة 1 أو الفئة 2. وانتقدت العديد من المنظمات، بما في ذلك المبادرة المتعلقة بالتهديد النووي (NTI) (إليوبولوس وآخرون، 2019) ومكتب المساءلة الحكومية (GAO) (2019)، افتقار اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية إلى دور استباقي في دعم التغييرات التنظيمية لتقييد استخدام المصادر المشعة أو لتعزيز الاستخدام الأوسع للتقنيات البديلة.

تشجع بعض الجهات التنظيمية، عبر ولايات الاتفاقية، السياسات الوقائية والاستباقية التي توفر مثبطات تنظيمية للحصول على تراخيص المصادر المشعة، بينما يتبع البعض الآخر الحد الأدنى من المتطلبات الفيدرالية وتؤدي دور منفذي القانون. على سبيل المثال، شجع فرع الصحة الإشعاعية التابع لإدارة الصحة العامة في كاليفورنيا استخدام التقنية البديلة من خلال توفير معلومات عن متطلبات ترخيص السيزيوم 137 ومتطلبات تسجيل آلة الأشعة السينية لإتاحة المعلومات بسهولة في عملية الاعتماد وبصورة أكثر شمولاً. وفي حالة استلام طلب ترخيص جهاز إشعاع جديد يعمل بالسيزيوم 137 للحصول على الموافقة التنظيمية أو التجديد، تُبلغ الجهة التنظيمية الحكومية المرخص له بالتقنيات البديلة المتاحة وتتطلب تبريرًا لاستخدام السيزيوم 137 (إليوبولوس وبويد، 2020). وعلى النقيض من اللجنة التنظيمية النووية في الولايات المتحدة، التي لا تنظم الأجهزة التي تنبعث منها إشعاعات، تنظم ولايات الاتفاقية كلاً من المصادر المشعة والأجهزة التي تنبعث منها إشعاعات.

يسرت العديد من المؤسسات اعتماد التقنيات البديلة، وحدث ذلك في المقام الأول من خلال إنشاء شبكات من أصحاب المصلحة لزيادة الوعي بالمخاطر والمسؤوليات المتعلقة بالمصادر المشعة؛ ومن خلال تسهيل الحوارات حول بيانات الأداء والتكاليف وتحديات اعتماد البدائل ومن خلال توفير أدوات لدعم اتخاذ قرارات أكثر استنارة. ونتيجة لهذه الجهود، تزايد إدراك بعض المستشفيات ومراكز الأبحاث والحكومات للمخاطر المرتبطة بالمصادر المشعة وتزيلها وتستبدلها طواعية عندما تتوفر خيارات ذات جدوى. ومع ذلك، تعتبر معظم هذه المنظمات نفسها "محايدة تقنيًا" ولا تروج لتقنيات بديلة للمصادر المشعة كجزء من مهمتها. ولا توجد أيضًا حاليًا منظمة "شاملة" توفر وصولاً سهلاً إلى المعلومات الكاملة ذات الصلة باعتماد التقنيات البديلة في الاستعمالات المختلفة.

تعد الرابطة الدولية للإشعاع والمعهد العالمي للأمن النووي مثالين على المنظمات التي تناولت الجوانب التقنية أو الإجرائية المتعلقة باعتماد التقنيات البديلة (راجع الأوصاف الموجزة لعملهما في القسم 1-5) دون أن تكونا من المروجين لتقنيات محددة. على سبيل المثال، أشارت الرابطة الدولية للإشعاع إلى دعمها للاستخدام الآمن والمفيد لجميع أشكال الإشعاع بما في ذلك إشعاع غاما (الرابطة الدولية للإشعاع (IIA)، 2018) ومشروع قانون القسم 402 من وثيقة اعتمادات تطوير الطاقة والمياه في الكونغرس للسنة المالية 2015 الذي كان سيتطلب "التخلص التدريجي" من المصادر المشعة في الطب على مدى سنوات (الرابطة الدولية للإشعاع (IIA)، 2014). بالإضافة إلى ذلك، فإن خبرة وجمهور الرابطة الدولية للإشعاع والمعهد العالمي للأمن النووي يشاركون بشكل أساسي في تقنيات الإشعاع وقضايا الأمن النووي أو الإشعاعي، على التوالي، ولا يعالجون الطرق غير المشعة التي قد تكون بدائل للمصادر المشعة، على سبيل المثال، الطرق الجينية لتحل محل تقنية الحشرة العقيمة. وتمثل المبادرة المتعلقة بالتهديد النووي منظمة أخرى لديها مساهمات قيمة في اعتماد التقنيات البديلة، لكن، كما هو الحال مع المعهد العالمي للأمن النووي، فإن تركيزها الأساسي هو الحد من المخاطر.

في عام 2016، شكلت العديد من الوكالات الأمريكية، بما في ذلك اللجنة التنظيمية النووية ووزارة الطاقة ووزارة الأمن الوطني ووكالة حماية البيئة، مجموعة العمل المشتركة بين الوكالات والمعنية ببدائل المصادر المشعة عالية النشاط (GARS). وكان نطاق المجموعة تقديم تقييم حول كيفية مشاركة الوكالات الفيدرالية في الأنشطة المتعلقة بالمصادر المشعة عالية النشاط وبدائلها؛ وإشراك الوكالات الفيدرالية ذات الصلة في وضع الأفكار المتعلقة بانتقالها المحتمل إلى التقنيات البديلة؛ ودعم عملية تعزيز البحث والتطوير للتقنيات البديلة؛ ووضع دليل لأفضل الممارسات للوكالات الفيدرالية لتبني انتقال طويل الأجل إلى التقنيات البديلة. وقدم أعضاء مجموعة العمل المشتركة بين الوكالات والمعنية ببدائل المصادر المشعة عالية النشاط مجموعة من التوصيات إلى الوكالات الفيدرالية تتعلق بأفضل الممارسات للانتقال الناجح من المصادر المشعة عالية الخطورة إلى التقنيات البديلة وكيف يمكن دمج ذلك في الخطة الاستراتيجية لكل وكالة (المجلس الوطني للعلوم والتقنية (NSTC)، 2016). غطت التوصيات أربع فئات من الإجراءات الفيدرالية المحتملة: (1) المشتريات الفيدرالية وتقديم المنح؛ و(2) أولويات الوكالة؛ و(3) التعليم والتوعية؛ و(4) البحث والتطوير. وبالإضافة إلى ذلك، قدمت مجموعة العمل العديد من التوصيات إلى الوكالات الفيدرالية، بما في ذلك أنه ينبغي عليها ما يلي:

1. تعزيز اعتماد التقنيات البديلة في البرامج والمنشآت الممولة فيدراليًا من خلال تشجيع استخدام الحوافز الطوعية والتمويل المخصص والتحويل الميسر.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

2. إشراك جميع أصحاب المصلحة الرئيسيين في اعتماد التقنيات البديلة في الانتقال والاعتراف بدور جهات التصنيع والموزعين.
3. وضع تكاليف دورة الحياة الكاملة للمصادر عالية النشاط في الاعتبار، بما في ذلك تكاليف الأمن والتخلص والمسؤولية المحتملة.
4. تحقيق التوازن بين الاحتياجات التشغيلية والتقنية الخاصة بالمستخدم.

يروج مكتب الأمن الإشعاعي (ORS) التابع الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA) لاعتماد وتطوير تقنيات بديلة غير إشعاعية كجزء من مهمته. وأشار ممثل الإدارة الوطنية للأمن النووي الذي أطلع اللجنة على[1] أن هذه المهمة أصبحت جزءًا من مهمة الوكالة بعد توصية تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008 إلى حكومة الولايات المتحدة لتبني سياسات توفر حوافز لتسهيل إدخال التقنيات البديلة. وأشار الممثل أيضًا إلى تلقي الوكالة لدعم إضافي لدمج هذه المهمة في مهمتها من قبل مجموعة العمل المعنية بحماية مصادر الإشعاع وتقارير الأمن إلى الكونغرس التي أوصت بأن تحفز حكومة الولايات المتحدة البدائل وأن تكون قدوة لغيرها (اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC)، 2010، 2014 ج، 2018).

يصف القسمان 2-4-2 و3-6 الأنشطة التي يقودها مكتب الأمن الإشعاعي محليًا ودوليًا لتحقيق مهمة التقنية البديلة. وعلى الرغم من التقدم الكبير، لا تستطيع وكالة حكومية أمريكية واحدة العمل في هذا المجال بمفردها لمعالجة المشكلة في سياق عالمي. ويمكن تمكين التأثير الأكبر في الترويج لاعتماد وتطوير التقنيات البديلة غير المشعة على الصعيد العالمي من خلال زيادة مشاركة وتعاون الوكالات الحكومية الأمريكية الإضافية والحكومات غير الأمريكية والمنظمات الدولية وأصحاب المصلحة الآخرين. وأوصى البعض بأن تضع الوكالة الدولية للطاقة الذرية برنامجًا يركز على التقنيات البديلة محددة النطاق والرسالة والجدول الزمني (روغان (Roughan)، 2018). وتوافق اللجنة على تمتع الوكالة الدولية للطاقة الذرية بالقدرات الفنية لإنشاء وإدارة برنامج ناجح. بالإضافة إلى ذلك، فإنها تستطيع الوصول إلى جهات الاتصال والبيانات من الدول الأعضاء ويمكنها استخدام هذه الموارد لتعزيز القدرة على الحصول على التقنيات البديلة وتشغيلها وصيانتها. ومع ذلك، ليس من الواضح للجنة ما إذا كان الترويج للتقنيات البديلة يندرج حاليًا ضمن مهمة الوكالة الدولية للطاقة الذرية أم لا. ورغم أن بعض أنشطة الوكالة الدولية للطاقة الذرية تشجع بشكل واضح اعتماد التقنيات البديلة، إلا أن الوكالة قد تواصل توفير مصادر عالية النشاط للاستعمالات الطبية أو الصناعية من خلال برنامجها للتعاون الفني للدول الأعضاء التي تطلب هذا الدعم، طالما أنها تفي بمعايير الأمان المطلوبة. بالإضافة إلى ذلك، تشارك الوكالة الدولية للطاقة الذرية في الأنشطة بناءً على طلب الدول الأعضاء فيها، لذلك ما لم تطلب الدول الأعضاء أن تتخذ الوكالة الدولية للطاقة الذرية إجراءات محددة فيما يتعلق بالتقنيات البديلة، فمن غير المرجح أن يتمتع مثل هذا البرنامج بأولوية لدى الوكالة.

توجد حاجة لمنظمة أو شبكة من المنظمات لأداء دور قيادي في تحفيز ترويج وتطوير تقنيات بديلة للمصادر المشعة. ومن الممكن أن تساعد هذه الكيانات في تعزيز الوصول إلى المعلومات من خلال إنشاء مراكز معلومات وطنية ودولية (مكان شامل)، وإتاحة الوصول إلى هذه المعلومات ونشرها على نطاق واسع، وتوفير وصول سهل إلى المعلومات الكاملة. وتستطيع هذه المنظمة أن تساعد في إحراز تقدم كبير في تعزيز اعتماد البدائل.

3-5 التقدم في اعتماد التقنيات البديلة

حدد المعهد العالمي للأمن النووي (WINS) مجموعة من الأسئلة التي قد تحتاج المنظمات إلى وضعها في الاعتبار عند تقييم تبني التقنيات البديلة (المعهد العالمي للأمن النووي (WINS)، 2018 أ). وهي تتضمن:

1. ما الاحتياجات التنظيمية؟
2. ما الخيارات البديلة التي ستلبي الاحتياجات على أفضل نحو؟
3. هل ستوفر التقنية الجديدة نتائج مماثلة؟
4. هل سيكون من الضروري إعادة تصميم منشأة حالية وإعادة تدريب الموظفين؟
5. ماذا عن الموثوقية والخدمة؟
6. ما هي التكاليف؟
7. ما الآثار المترتبة على التغيير في السلامة والحماية من الإشعاع؟

[1] لانس غارسون الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA)، عرض تقديمي أمام اللجنة في 26 فبراير 2021.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

8. ما الآثار المترتبة على التغيير في اللوائح التنظيمية؟
9. ما مستوى التعرض للمسئوليات المحتملة؟

تختلف الإجابات على هذه الأسئلة حسب الاستعمال وكذلك من خلال منظمة الاعتماد. وتدرس اللجنة في الفصول من 4 إلى 6 خيارات التقنية البديلة والتقدم المحرز في اعتماد هذه التقنيات البديلة في الطب والأبحاث (الفصل 4)، والتعقيم (الفصل 5)، والاستعمالات الصناعية الأخرى (الفصل 6). ويلخص الجدول 3-1 بعض النقاط الرئيسية التي جرى مناقشتها في هذه الفصول.

3-6 تطوير التقنية البديلة

تستثمر العديد من الشركات الكبيرة في البحث والتطوير لتحسين منتج حالي أو تطوير منتج جديد يوفر حلاً تجاريًا محددًا. وعلى سبيل المثال، تمتلك الشركات الكبيرة، التي تصنع الأجهزة الطبية، في الغالب ميزانيات كبيرة للبحث والتطوير، وغالبًا ما تضم أقسام بحث وتطوير داخلية تنفذ مشاريع بحث وتطوير مستمرة لتعزيز أهداف أعمالها. وتناقش اللجنة في الفصل الرابع جهدين من قبل الشركات المصنعة لأنظمة العلاج بالحزمة الخارجية لإنتاج مسرعات خطية يمكن أن تعمل بشكل موثوق في البيئات الصعبة مثل البلدان منخفضة ولمتوسطة الدخل حيث توجد انقطاعات متكررة في الإمداد الكهربائي. ولا تكشف هذه الشركات الكبرى تفاصيل المشاريع الجارية حتى تصبح في مراحل لاحقة من التطوير. وقد يستغرق انتقال فكرة إبداعية إلى منتج تجاري، إذا نجح الأمر، سنوات (غالبًا أكثر من عقد) ويتطلب ذلك استثمارات كبيرة.

وتخصص الإدارة الوطنية للأمن النووي، مثل الوكالات الفيدرالية الأخرى، جزءًا من ميزانيتها السنوية للبحث والتطوير خارج أسوارها (حوالي 3 في المائة) لتمويل الشركات الصغيرة من خلال برنامج الأبحاث الابتكارية للأعمال الصغيرة (SBIR). ويمول مكتب البحث والتطوير لمنع انتشار الأسلحة النووية الدفاعية التابع لمكتب الأمن الإشعاعي والإدارة الوطنية للأمن النووي حوالي 30 من مشروعات برنامج الأبحاث الابتكارية للأعمال الصغيرة ونقل تقنية الأعمال الصغيرة، ويتعلق حوالي ثلث تلك المشروعات بالتقنية البديلة للمصادر المشعة. وتشمل الموضوعات الأخرى الممولة من برنامج الأبحاث الابتكارية للأعمال الصغيرة، اكتشاف الإشعاع وأجهزة الاستشعار الفضائية والاكتشاف عن بعد. وتحدد مكاتب الإدارة الوطنية للأمن النووي موضوعات البحث والتطوير في طلباتها، وتُقدم المنح على أساس تنافسي بعد مراجعة الاقتراح وتقييمه بشكل مشترك من قبل مكتب البحث والتطوير لمنع انتشار الأسلحة النووية الدفاعية التابع لمكتب الأمن الإشعاعي والإدارة الوطنية للأمن النووي.

يتكون برنامج الأبحاث الابتكارية للأعمال الصغيرة من ثلاث مراحل[2]:

- تهدف المرحلة الأولى إلى تحديد الجدارة الفنية والجدوى والإمكانيات التجارية للبحث المقترح أو جهود البحث والتطوير وتقييم أداء مؤسسة الأعمال الصغيرة الحاصلة على المنحة قبل التقدم إلى المرحلة الثانية. وتتراوح منح برنامج الأبحاث الابتكارية للأعمال الصغيرة ونقل تقنية الأعمال الصغيرة من المرحلة الأولى بشكل عام ما بين 50,000 دولار إلى 250,000 دولار لمدة 6 أشهر (برنامج الأبحاث الابتكارية للأعمال الصغيرة) أو سنة واحدة (نقل تقنية الأعمال الصغيرة). وتُدار منح المرحلة الأولى بواسطة مكتب البحث والتطوير لمنع انتشار الأسلحة النووية الدفاعية التابع للإدارة الوطنية للأمن النووي.
- تهدف المرحلة الثانية إلى مواصلة البحث أو جهود البحث والتطوير التي بدأت في المرحلة الأولى. وعادةً ما يكون الحاصلون على المنح في المرحلة الأولى فقط المؤهلين للحصول على منحة المرحلة الثانية ويتقدم حوالي 50 في المائة من الحاصلين على المنح في المرحلة الأولى إلى المرحلة الثانية. وتتراوح منح برنامج الأبحاث الابتكارية للأعمال الصغيرة ونقل تقنية الأعمال الصغيرة من المرحلة الأولى بشكل عام في حدود 750,000 دولار لمدة سنتين. وتُدار منح المرحلة الثانية أيضًا بواسطة مكتب البحث والتطوير لمنع انتشار الأسلحة النووية الدفاعية التابع للإدارة الوطنية للأمن النووي.
- تهدف المرحلة الثالثة لأن تسعى الشركات الصغيرة إلى تحقيق أهداف التسويق الناتجة عن أنشطة المراحل السابقة. وتُدار منح المرحلة الثالثة لمشاريع التقنية البديلة عادة بواسطة مكتب الأمن الإشعاعي التابع للإدارة الوطنية للأمن النووي.

اعتبارًا من ديسمبر 2020، مولت الإدارة الوطنية للأمن النووي أربع مراحل أولى وستة مراحل ثانية ومشروعين من مشروعات المرحلة الثالثة حول التقنيات البديلة للمصادر المشعة (راجع الجدول 3-2). تم توجيه جزء من تمويل برنامج الأبحاث الابتكارية للأعمال الصغيرة ونقل تقنية الأعمال الصغيرة بشأن التقنيات البديلة إلى المشاريع التي توفر تحسينات محتملة للحلول الحالية، على سبيل المثال، تطوير مصادر الأشعة السينية ذات اللوحات المسطحة لاستخدامها في استعمالات تشعيع الدم والأبحاث. وتم توجيه

[2] يُرجى الاطلاع على https://www.sbir.gov/about.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

الجدول 3-1 التقدم المحرز في اعتماد تقنيات بديلة في تطبيقات مختلفة

الطلب (تمت مناقشة الفصل)	الأجهزة الشائعة (التظائر الأولية)	التقنية البديلة	تقنية الأشعة السينية	اتجاه اعتماد البدول	الدوافع الرئيسية للاعتماد (بخلاف المخاطر الأمنية)	تحديات الاستبدال الأولية	مرجعية المستخدم	مجالات البحث والتطوير الواعدة لتسهيل الاعتماد
الحالة الطبية								
تشعيع الدم (الفصل 4)	المشعات ذاتية الحماية (السيزيوم 137 والكوبالت 60)			الاعتماد الواسع على الصعيدين الوطني والدولي	مشروع استبدال مشع السيزيوم (CIRP) في الولايات المتحدة والمبادرات التنظيمية الحكومية الوطنية في البلدان الأخرى؛ توفير التكاليف طوال دورة حياة الجهاز؛ والفعالية	لا توجد في البلدان ذات الدخل المرتفع؛ اقتصادية؛ البنية التحتية؛ والموارد في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل	مستجيبات الحد من مسببات الأمراض لخلايا الدم الحمراء	منهجيات الحد من مسببات الأمراض لخلايا الدم الحمراء
علاج السرطان - العلاج الشعاعي الخارجي (الفصل 4)	العلاج عن بُعد (الكوبالت 60)		الجراحة الإشعاعية المعتمدة على أشعة غاما بما في ذلك تقنية Gamma Knife® (سكين غاما) (الكوبالت 60)	التخلص التدريجي شبه الكامل من المصادر المشعة في البلدان مرتفعة الدخل والعديد من البلدان متوسطة الدخل؛ وزيادة الاعتماد في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل	وتقديم العلاج الفائق؛ وتحسين النتائج للمرضى؛ والعلاجات الأقصر	تعدد الاستعمالات؛	تفضيل المستخدم	التقنيات التي تهدف إلى تقليل تكاليف الإعداد بما في ذلك الحماية
علاج السرطان - التجسيمية الإشعاعية (الفصل 4)	الجراحة الإشعاعية المعتمدة على أشعة غاما بما في ذلك تقنية Gamma Knife® (سكين غاما) (الكوبالت 60)	الجراحة الإشعاعية المعتمدة على المسرّع الخطي بما في ذلك تقنية CyberKnife®		زيادة الاعتماد في البلدان ذات الدخل المرتفع؛ انخفاض اعتماد الجراحة الإشعاعية بشكل عام في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل	تنوع موقع العلاج؛ انخفاض تكاليف الإعداد			
المعالجة الموضعية بمعدل جرعات عالية (HDR) (إيريديوم 192) (الفصل 4)	المعالجة الموضعية بمعدل جرعات عالية (HDR) (إيريديوم 192)	العلاج بالأشعة الخارجية؛ المعالجة الموضعية الإلكترونية		بعض الاعتماد في البلدان ذات الدخل المرتفع	سداد التكاليف المناسب للعلاج الإشعاعي الخارجي	لا تعد المعالجة الموضعية الإلكترونية بديلاً قابلاً للتطبيق للاستعمالات الأكثر شيوعًا للمعالجة الموضعية ذات معدلات الجرعات العالية (HDR) لعلاج السرطانات النسائية		المعالجة الموضعية الإلكترونية لعلاج السرطانات النسائية
الأبحاث (الفصل 4)	المشعات ذاتية الحماية (السيزيوم 137 والكوبالت 60)	تقنية الأشعة السينية		زيادة الاعتماد	مشروع استبدال مشع السيزيوم (CIRP) في الولايات المتحدة والمبادرات التنظيمية الحكومية الوطنية في البلدان الأخرى؛ توفير التكاليف طوال دورة حياة الجهاز	دراسات التكافؤ؛ البيانات القديمة؛ الموارد الشحيحة في المؤسسات البحثية	دراسات التكافؤ؛ تطوير أجهزة الأشعة السينية بمتوسط طاقة 600 كيلو إلكترون فولت وأعلى	دراسات التكافؤ؛ تطوير أجهزة الأشعة السينية بمتوسط طاقة 600 كيلو إلكترون فولت وأعلى

تابع

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

الجدول 3-1 يُتبع

الطلب (تمت مناقشة الفصل)	الأجهزة الشائعة (النظائر الأولية)	التقنية البديلة	اتجاه اعتماد البديل	الدوافع الرئيسية للاعتماد (بخلاف المخاطر الأمنية)	تحديات الإستبدال الأولية	مجالات البحث والتطوير الواعدة لتسهيل الاعتماد
التعقيم						
تعقيم الأجهزة الطبية (الفصل 5)	المشعات البانورامية (الكوبالت 60)	شعاع الإلكترون والأشعة السينية	زيادة الاعتماد	احتياجات السوق بسبب الطلب المتزايد؛ وندرة توافر الكوبالت 60؛ والمخاوف التي تتعلق بالسلامة والتنظيم المحتمل بأكثر صرامة للتبخير بأكسيد الإيثيلين	التكافؤ وإعادة التحقق	تطوير المسرعات الخطية صغيرة الحجم لتقليل تكاليف رأس المال؛ وتطوير مصادر الأشعة السينية الاقتصادية
علاجات سلامة الغذاء (الفصل 5)	المشعات البانورامية أو المشعات الأخرى عالية ومنخفضة النشاط (الكوبالت 60)	شعاع الإلكترون والأشعة السينية	الركود في الولايات المتحدة؛ والتراجع في أوروبا؛ وزيادة الاعتماد في أجزاء معينة من العالم، خاصة في الصين	احتياجات السوق	القبول العام؛ عدم تنسيق اللوائح في التجارة الدولية؛ الاستعانة بمصادر خارجية للحصول على العلاج؛ متطلبات وضع الملصقات	التطوير لخفض تكاليف رأس المال؛ المزيد من تطوير مصادر الأشعة السينية الاقتصادية
معالجات الصحة النباتية (الفصل 5)	المشعات البانورامية أو المشعات الأخرى عالية ومنخفضة النشاط (الكوبالت 60)	شعاع الإلكترون والأشعة السينية	متزايدة	احتياجات السوق؛ بساطة العلاج	الإقتصاديات؛ الضغوط لتقليل استخدام التبخير ببروميد الميثيل	التطوير لخفض تكاليف رأس المال؛ المزيد من تطوير مصادر الأشعة السينية الاقتصادية
تعقيم الحشرات (الفصل 5)	المشعات البانورامية أو المشعات الأخرى عالية النشاط (الكوبالت ذاتية الحماية (السيزيوم 137 أو الكوبالت 60)	شعاع الإلكترون والأشعة السينية والتعديل الوراثي	متزايدة	توافر ونقل مشعات الحماية الذاتية؛ زيادة الطلب على الاستعمالات خاصة لمكافحة البعوض الإقليمية؛ التصور العام السلبي تجاه التعديل الوراثي للحشرات	أول تجربة غير موثوقية بسبب عدم موثوقية أجهزة الأشعة السينية المبكرة (الجيل الأول)	تطوير مصادر الأشعة السينية لتتناسب مع متطلبات الاستخدام

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

التصوير الشعاعي الصناعي (الفصل 6)	التصوير الشعاعي (الكوبالت 60 والإيريديوم 192 والسيلينيوم 75)	الأشعة السينية والموجات فوق الصوتية	متزايدة	التكامل مع المصادر المشعة	لا يوجد بديل واحد مقابل واحد؛ المتطلبات الفنية والتشغيلية في البيئات الصعبة؛ التكاليف؛ المستوى الأعلى من المؤهلات الفنية؛ التصوير غير المباشر مقابل التصوير المباشر	تمثيل الصورة للموجات فوق الصوتية؛ الحجم والوزن وتحسينات القوة
المقاييس الصناعية (الفصل 6)	السيزيوم 137، الكوبالت 60	الموجات فوق الصوتية والضغط التفاضلي والرادار الموجه	متزايدة	التكامل مع المصادر المشعة	المتطلبات التشغيلية في البيئات الصعبة،	تحسين متانة البدائل في البيئات الصعبة
تسجيل قياسات الآبار (الفصل 6)	أميريسيوم 241 مخلوط بالبريليوم	مولدات النيوترونات	الركود	لا يوجد	انخفاض الطلب في السوق على التطبيق؛ التكافؤ والموثوقية؛ البيانات القديمة	دراسات التكافؤ؛ التحسينات في موثوقية مولد النيوترون
	السيزيوم 137 (السيراميك أو الزجاج)	صور الأشعة السينية	لا يوجد	لا يوجد		تطوير مصدر أشعة سينية صغير الحجم ومتين؛ الحاجة للإشعاع متماثل الخواص
أدوات المُعايرة (الفصل 6)	كلوريد السيزيوم 137	لا يوجد	لا يوجد	السياسة الممكنة لإزالة كلوريد السيزيوم من الاستعمالات الطبية والبحثية والتجارية	يُنظر إليه حاليًا كاستعمال يحتاج إلى الإعفاء من جهود الاستبدال	تطوير واستخدام شكل أقل تشتتًا من السيزيوم 137؛ متوسط الأشعة السينية عند 600 كيلو إلكترون فولت وأعلى
	كوبالت 60	لا يوجد	لا يوجد	لا يوجد		لا يوجد
المولدات الكهروحرارية التي تعمل بالنظائر المشعة للاستعمالات الفضائية (الفصل 6)	البلوتونيوم 238 في شكل أكسيد مضغوط	لا يوجد	لا يوجد	لا يوجد	غير معترف بها كمشكلة	لا يوجد
	السترونتيوم 90	لا يوجد	لا يوجد	لا يوجد		لا يوجد

ملاحظة: CIRP = مشروع استبدال مشع السيزيوم؛ e-beam = شعاع الإلكترون؛ EtO = أكسيد الإيثيلين؛ HDR = معدل جرعة عالية؛ keV = كيلو إلكترون فولت؛ linac = المسرع الخطي؛ LMIC = بلد منخفض ومتوسط الدخل.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الجدول 3-2 تمويل مشروعات الأبحاث الابتكارية للأعمال الصغيرة (SBIR) وقل تقنية الأعمال الصغيرة (STTR) اعتبارًا من ديسمبر 2020

مرحلة SBIR وSTTR	عنوان البرنامج	الحاصلون على المنح من الأعمال الصغيرة
المرحلة 1	• مصدر أشعة سينية فائق النقل للتصوير الشعاعي الميداني • مصدر أشعة سينية بيتاترون صغير الحجم ومحسن • مصدر أشعة سينية فائق النقل يستخدم تقنية الترددات اللاسلكية الجديدة • تطوير كاميرا تصوير نيوترون / أشعة سينية محمولة	• Radiabeam • Radiabeam • TibaRay • Advanced Research Corporation
المرحلة 2	• استبدال الأميريسيوم 241 / البريليوم بأطياف نيوترون قابلة للموالفة • مسرع طبي سلس غير مكلف • تصاميم جديدة للمسرعات الطبية منخفضة التكلفة للاستخدام في البيئات الصعبة • مشع بالأشعة السينية للحشرات العقيمة • نظام تصوير بالموجات فوق الصوتية جديد لالتقاط المصفوفة الكاملة لعمليات الفحص بدون النظائر غير المشعة • مشع آمن وعالي الإنتاجية ومكتفٍ ذاتيًا	• Starfire • Euclid • TibaRay • Stellarray • X-wave Innovations • Radiabeam
المرحلة 3	• مشع الدم المستقل باستخدام مصادر الأشعة السينية ذات اللوحة المسطحة • مشعات بحثية معيارية قابلة للعنونة باستخدام مصادر الأشعة السينية ذات اللوحة المسطحة	• Stellarray • Stellarray

ملاحظة: SBIR = الأبحاث الابتكارية للأعمال الصغيرة؛ STTR = نقل تقنية الأعمال الصغيرة.

التمويل الآخر إلى المشاريع التي تهدف إلى سد الفجوات وتطوير حلول مبتكرة جديدة للمشاكل التي ليس لها حلول حاليًا، على سبيل المثال، لبناء مسرعات خطية غير مكلفة وصغيرة الحجم لتقنية الحشرة العقيمة والاستعمالات الأخرى.

دعت اللجنة الباحثين ومطوري التقنية المشاركين في مشاريع برنامج الأبحاث الابتكارية للأعمال الصغيرة هذه إلى التقديم في اجتماع جمع المعلومات في ديسمبر 2020 (راجع الملحق ب للحصول على التفاصيل)، ويوجد ملخص لحالة بعض هذه المشاريع في الفصول من الرابع إلى السادس من التقرير. ولم تسع اللجنة للحصول على عروض تقديمية من الأعمال الصغيرة الأخرى التي تطور تقنيات مماثلة ذات صلة، لكن لا تدعمها الإدارة الوطنية للأمن النووي.

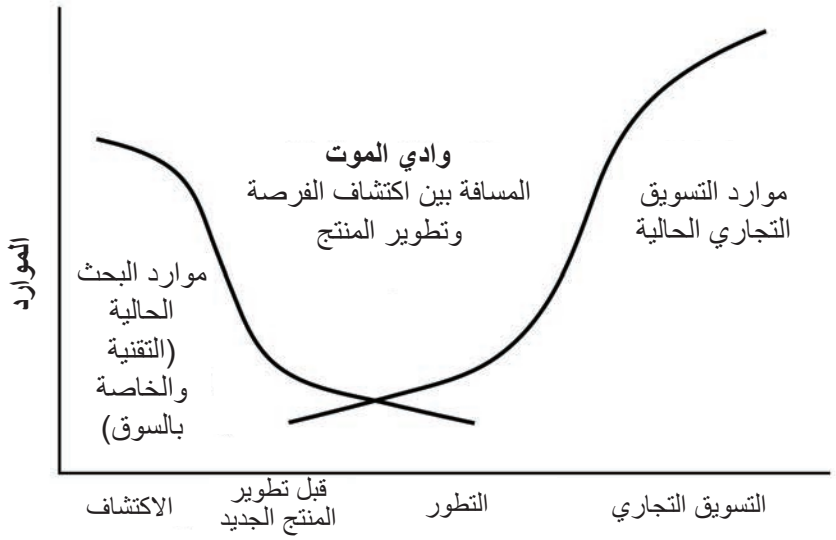
من المحتمل أن يتطلب تطوير هذه التقنيات الجديدة لاستعمالات عملية محتملة تمويلاً خاصًا وعامًا. وفي خطوات مختلفة من العملية، يتخذ الممول قرارات بشأن ما إذا كان هناك ما يبرر الاستثمار الإضافي، وإذا كان الأمر كذلك، كيف يمكن تأمينه. ويكون الدافع وراء مواصلة تطوير التقنية في الغالب هو القدرة على مواجهة التحديات المتعلقة بالفيزياء والهندسة الأساسيين. ونظرًا لأن معظم هذه المشاريع في مراحل مبكرة من التطوير، فليس من الممكن حتى الآن إجراء تقييم كامل لمدى صعوبة تحقيق هذه الأهداف. ومع ذلك، بغض النظر عن التحديات التقنية، يوجد عدد من العوامل الأخرى التي تؤثر على مواصلة تطوير التقنية بما في ذلك إيمان المستثمر بالقيمة التجارية النهائية للتقنية وبراعة المطور في البيع والإطار الزمني المتوقع لبلوغ المنتج مرحلة النضج وبراءات الاختراع ومطالبات براءات الاختراع والملكية الفكرية والتعاون بين المطورين الأوائل والمشاركين اللاحقين من القطاع الخاص والنجاح المتوقع الحقيقي أو المتصور للتقنيات البديلة المنافسة.

غالبًا ما تُجري الوكالات الفيدرالية الأمريكية تقييمات للتقنيات الجديدة من حيث مقياس مستوى جاهزية التقنية المكون من تسع نقاط: بحوث التقنية الأساسية وإثبات الجدوى، ومستوى جاهزية التقنية 1 و2 و3؛ وتطوير التقنية، ومستوى جاهزية التقنية 4 و5؛ وعرض التقنية، ومستوى جاهزية التقنية 6؛ والتكليف بتنفيذ النظام، ومستوى جاهزية التقنية 7 و8؛ وتشغيل النظم، ومستوى جاهزية التقنية 9 (وزارة الطاقة (DOE)، 2011). وعادةً ما تكون برامج الأبحاث الابتكارية للأعمال الصغيرة في المستويات المبكرة من النضج (مستوى لجاهزية التقنية 2 إلى 5)، وتقدمها للعرض التجاري غير مؤكد لأنها تخضع لعقبات جلب الأفكار والاكتشافات البحثية الواعدة إلى السوق. وستوجد حاجة إلى استثمارات كبيرة لتنضج هذه التقنيات وربما تسويقها، وهي عملية قد تستغرق سنوات أو حتى عقودًا. ومن المحتمل أن يكون هذا الجدول الزمني لتطوير تقنيات بديلة غير متوافق مع الرغبة السياسية في التخلص من المصادر المشعة عالية الخطورة في جداول زمنية أقصر بكثير.

وتوجد فترة حاسمة بين الاكتشاف والعرض التجاري، حيث قد لا يتوفر التمويل الضروري للحفاظ على عملية الابتكار. وتُعرف هذه الفترة، الموضحة في الشكل 3-2، باسم "وادي الموت" (إسلام (Islam) 2017؛ كليتسي وآخرون (Klitsie et al.)، 2019؛ نيميت وآخرون (Nemet et al.)، 2018).وبينما قد يدعم التمويل العام أو الخاص المراحل الأولى من التطوير، يُفترض عادة أن

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version



الشكل 3-2 وادي الموت.
ملاحظة: NPD = تطوير منتج جديد.
المصدر: كليتسي وآخرون (.Klitsie et al)، 2019.

يكون العرض التجاري مسؤولية القطاع الخاص. ومع ذلك، فقد تردع العديد من أوجه عدم اليقين المستثمرين من القطاع الخاص: يتقدم التطوير من خلال التجربة والخطأ وقد لا يؤدي إلى منتج تجاري ذي جدوى؛ وقد يمتد التطوير على مدى سنوات أو حتى عقود، مما يؤخر تحقيق عوائد الاستثمار؛ وقد تجعل فترة التطوير الممتدة من الصعب التنبؤ بما إذا كان هناك سوق مربح للمنتج. وبشكل عام، ستكون مصادر عدم اليقين هذه أكبر بالنسبة للمنتجات التي تتضمن تقنيات أكثر حداثة وتعقيدًا. علاوة على ذلك، مثلما لا يأخذ المتبنون من القطاع الخاص في الاعتبار العوامل الخارجية في اختياراتهم بين التقنيات المتاحة تجاريًا، فإنه لا يمكن توقع أن يأخذ المستثمرون العوامل الخارجية في الاعتبار في قراراتهم بشأن الاستثمار في تطوير تقنيات بديلة. وقد تكون المنظمات الوسيطة، مثل شبكات المستخدمين المحتملين أو الرعاة الحكوميين، ضرورية لمساعدة التقنيات المرغوبة اجتماعيًا على البقاء في وادي الموت (إسلام (Islam)، 2017).

3-7 الفصل الثالث: النتائج والتوصيات

النتائج 7: ساهمت العديد من المنظمات الحكومية وغير الحكومية الوطنية والدولية في تزايد بروز التقنيات البديلة كطريقة لتقليل المخاطر الأمنية الناجمة عن المصادر المشعة. ومع ذلك، لا توجد منظمة مجهزة حاليًا للترويج لمجموعة واسعة من التقنيات البديلة ومعالجة قضايا اعتمادها في سياق عالمي. وتستطيع هذه المنظمة أو شبكة المنظمات توحيد معلومات الموارد التقنية والتنظيمية والمالية والسياسية والخاصة بالبلد للتأثير على القرارات المتعلقة باعتماد تقنيات بديلة وتسهيل الانتقال إلى التقنيات البديلة للاستعمالات الطبية والبحثية والتجارية، عند الاقتضاء.

يسرت العديد من المؤسسات بما في ذلك الإدارة الوطنية للأمن النووي و الرابطة الدولية للإشعاع والمعهد العالمي للأمن النووي والمبادرة المتعلقة بالتهديد النووي والوكالة الدولية للطاقة الذرية اعتماد التقنيات البديلة، وحدث ذلك في المقام الأول من خلال إنشاء شبكات من أصحاب المصلحة لزيادة الوعي بالمخاطر والمسؤوليات المتعلقة بالمصادر المشعة؛ ومن خلال تسهيل الحوارات حول بيانات الأداء والتكاليف وتحديات اعتماد البدائل؛ ومن خلال توفير أدوات دعم اتخاذ القرار. وبالإضافة إلى ذلك، تمول الإدارة الوطنية للأمن النووي أيضًا دراسات البحث والتطوير والمقارنة. ونتيجة لهذه الجهود، تزايد إدراك المستشفيات ومراكز الأبحاث والحكومات للمخاطر المرتبطة بالمصادر المشعة وتزيلها وتستبدلها طواعية إذا توفرت خيارات ذات جدوى.

توجد حاجة لمنظمة أو شبكة من المنظمات لأداء دور قيادي في تحفيز ترويج وتطوير تقنيات بديلة للمصادر المشعة. ومن الممكن أن تساعد هذه المؤسسة أو الشبكة الكيانات في تعزيز الوصول إلى المعلومات من خلال إنشاء مراكز معلومات وطنية ودولية (أماكن

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

شاملة)، وإتاحة الوصول إلى هذه المعلومات ونشرها على نطاق واسع، وتوفير وصول سهل إلى المعلومات الكاملة. ويمكن إحراز تقدم كبير في اعتماد تقنيات بديلة في حالة وجود مثل هذه المؤسسة أو الشبكة.

النتائج 8: وكان التقدم في تطوير تقنيات بديلة متفاوتًا عبر مختلف الاستعمالات والنويدات المشعة المختلفة (راجع الجدول 3-1). وباستثناء تشعيع الدم، حيث تُعتبر تقنية الأشعة السينية معادلة لإشعاع السيزيوم 137 والعلاج الإشعاعي الخارجي، حيث تُعتبر تقنية المسرع الخطي أفضل من العلاج عن بُعد باستخدام الكوبالت 60، لا توجد تقنيات بديلة مقبولة على نطاق واسع للاستعمالات الأخرى. وفي بعض الاستعمالات، لم يتم تطوير تقنية بديلة مناسبة.

وكما أوضحنا في الاستنتاج 12، على الرغم من التقدم التقني للاستعمالات الطبية، إلا أنه توجد تحديات في اعتماد تقنيات بديلة في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل.

يلخص الجدول 3-1 الوضع الحالي لتطوير التكنولوجيا البديلة للتطبيقات الطبية والبحثية والتجارية. ويتراوح التقدم في اعتماد التقنيات البديلة من الاعتماد الواسع كما هو الحال مع تقنية الأشعة السينية لتشعيع الدم والمسرع الخطي للعلاج الإشعاعي الخارجي، إلى زيادة الاعتماد كما هو الحال مع تقنية الحزمة الإلكترونية لتعقيم الأجهزة الطبية، إلى عدم اعتمادها كما هو الحال مع تطوير التقنية البديلة لمصادر معايرة السيزيوم 137.

النتائج 9: تستثمر العديد من الشركات الكبيرة في البحث والتطوير لتقديم حلول لتحديات محددة مرتبطة باعتماد التقنيات البديلة. وقد يستغرق انتقال فكرة إبداعية إلى منتج تجاري، إذا نجح الأمر، سنوات (غالبًا أكثر من عقد) ويتطلب ذلك استثمارات كبيرة.

على سبيل المثال، من الممكن أن تمتلك الشركات الكبيرة، التي تصنع الأجهزة الطبية، ميزانيات كبيرة للبحث والتطوير، وغالبًا ما تضم أقسام بحث وتطوير داخلية تنفذ مشاريع مستمرة لتعزيز أهداف أعمالها. ولا تكشف هذه الشركات الكبرى تفاصيل المشاريع قيد التطوير حتى تصبح منتجات في مراحل لاحقة من التطوير.

النتائج 10: لدى العديد من الشركات الأصغر مشاريع تطوير تقنية بديلة قيد التنفيذ بدعم مالي من برنامجي أبحاث ابتكار الأعمال الصغيرة ونقل تقنية الأعمال الصغيرة التي تديرها الإدارة الوطنية للأمن النووي.

يمول مكتب الأمن الإشعاعي، بالتعاون مع قسم البحث والتطوير لمنع انتشار الأسلحة النووية الدفاعية التابع للإدارة الوطنية للأمن النووي، ما يقرب من 10 من مشاريع للأبحاث الابتكارية للأعمال الصغيرة ومشاريع نقل تقنية الأعمال الصغيرة لتطوير تقنيات بديلة للمصادر المشعة. وتحدد مكاتب الإدارة الوطنية للأمن النووي موضوعات البحث والتطوير في طلباتها، وتُقدم المنح على أساس تنافسي بعد مراجعة الاقتراح وتقييمه. وتم توجيه جزء من تمويل برنامج الأبحاث الابتكارية للأعمال الصغيرة ونقل تقنية الأعمال الصغيرة إلى المشاريع التي توفر تحسينات محتملة للحلول الحالية، على سبيل المثال، تطوير مصادر الأشعة السينية ذات اللوحات المسطحة لاستخدامها في استعمالات تشعيع الدم والأبحاث. ويتم توجيه التمويل الآخر إلى المشاريع التي تهدف إلى سد الفجوات وتطوير حلول مبتكرة جديدة للمشاكل التي ليس لها حلول حاليًا، على سبيل المثال، لبناء مسرعات خطية غير مكلفة وصغيرة الحجم لتعقيم الحشرات والاستعمالات الأخرى.

التوصية هـ: ينبغي أن تعطي الإدارة الوطنية للأمن النووي الأولوية لتمويل المشاريع التي تهدف إلى تطوير بدائل لاستخدام المصادر المشعة في الاستعمالات التي لا توجد فيها حاليًا تقنيات بديلة مقبولة غير مشعة.

في الوقت الحاضر، لا يمكن استبدال جميع المصادر المشعة بتقنية بديلة لأن مثل هذه التقنية البديلة إما غير موجودة أو لم تُثبت أنها توفر أداءً مكافئًا أو مُحسنًا مقارنة بمصدر مشع. ولدى الإدارة الوطنية للأمن النووي فرصة لتعزيز التقدم في تحديد البدائل الواعدة لهذه الاستعمالات من خلال الأبحاث الابتكارية للأعمال الصغيرة ونقل تقنية الأعمال الصغيرة. وحددت اللجنة ثلاثة استعمالات من هذا القبيل - التشعيع البحثي وتسجيل قياسات الآبار والمعايرة - وتقدم توصيات محددة إلى الإدارة الوطنية للأمن النووي والشركاء الفيدراليين الآخرين لتخصيص البحث والتطوير ودعم دراسات التكافؤ للبدائل (راجع التوصية (و) في الفصل 4 والتوصيتين (ح) و(ط) في الفصل 6).

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

4

مصادر الإشعاع والتقنيات البديلة في الطب والبحوث

يناقش هذا الفصل بعض الاستعمالات الرئيسية للمصادر المشعة في الطب والبحوث والوضع الحالي للتقنيات البديلة التي يمكن أن تحل محلها. ولا تشكل الإشارات إلى تقنيات محددة وفي بعض الحالات إلى منتجات تجارية وجهات تصنيع محددة بالضرورة أو تعني مصادقة اللجنة عليها.

4-1 تشعيع الدم

يمثل تشعيع الدم الطريقة الأكثر شيوعًا المستخدمة في الولايات المتحدة في داء الطعم حيال الثوي المرتبط بنقل الدم (TA-GvHD). ويحدث داء الطعم حيال الثوي المرتبط بنقل الدم عندما يتم نقل مكون دم خلوي يحتوي على خلايا تائية من متبرع غير مؤهل مناعيًا إلى متلقٍ غير كفء مناعيًا (المضيف). وتتفاعل خلايا المتبرع المنقولة ضد أنسجة المتلقي وتتسبب في تلف الجلد والكبد والجهاز الهضمي. والأهم من ذلك، في داء الطعم حيال الثوي المرتبط بنقل الدم، تهاجم الكريات الدم البيضاء المتبرع بها أيضًا نخاع عظم المضيف وتنتج حالة قاتلة من نقص التنسج أو فشل نخاع العظم اللاتنسجي. وغالبًا ما يموت المضيف بسبب العدوى الناتجة عن تسمم الدم. ويحدث داء الطعم حيال الثوي المرتبط بنقل الدم أيضًا عندما يكون نوع مستضد كريات الدم البيضاء البشري للمتبرع والمتلقي مشابهًا لما يمكن أن يحدث في عمليات التبرع بالدم من الأقارب من الدرجة الأولى. وفي هذه الحالات، لا يستطيع الجهاز المناعي للمتلقي تحديد الخلايا الليمفاوية المانحة كخلايا غريبة وتدميرها (باهار وتورمي (Bahar and Tormey)، 2018). ونظرًا لوجود عدد قليل من التدخلات العلاجية الفعالة، إن وجدت، بمجرد حدوث داء الطعم حيال الثوي المرتبط بنقل الدم، فإن النهج الوحيد هو منع حدوثه في المقام الأول.

يعتمد الحد من مخاطر داء الطعم حيال الثوي المرتبط بنقل الدم على منع تكاثر الخلايا التائية عن طريق معالجة منتجات الدم الخلوية قبل نقل الدم إلى مريض قابل للتأثر. وفي الولايات المتحدة وأوروبا، لا تتطلب سوى مكونات الدم المستخدمة في علاج المرضى ذوي المخاطر المحددة، علاجًا مثل التشعيع. وتم تعريض ما يقرب من 16 في المائة من الخلايا الحمراء و52 في المائة من وحدات الصفائح الدموية في الولايات المتحدة للإشعاع الوقائي بمصادر غاما أو الأشعة السينية في عام 2017 لمنع داء الطعم حيال الثوي المرتبط بنقل الدم في المتلقين المعرضين للإصابة (سابيانو وآخرون (Sapiano et al.)، 2020). وتختلف النسب المئوية لمكونات الدم المعالجة بشكل كبير حسب البلد بناءً على مخاطر داء الطعم حيال الثوي المرتبط بنقل الدم. وتكون المخاطر أعلى في المجموعات السكانية الأكثر تجانسًا وراثيًا، كما هو الحال في اليابان، مقارنة بالسكان الذين لديهم درجات أكبر من عدم التجانس، مثل تلك الموجودة في العديد من البلدان الأفريقية.

تناقش الأقسام التالية إمكانيات التقنيات المختلفة للوقاية من داء الطعم حيال الثوي المرتبط بنقل الدم. ويوجد ملخص لها أيضًا في الجدول 4-1.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الجدول 4-1 قدرات التقنيات المختلفة فيما يتعلق بالوقاية من TA-GvHD والحد من العوامل الممرضة

	تقنية النظائر		تقنية غير النظائر		
	مشع غاما (السيزيوم 137)	الأشعة السينية	الحد من العوامل الممرضة الناجمة عن الأشعة فوق البنفسجية أ (أموتوسالين)	الحد من مسببات الأمراض الناجمة عن الأشعة فوق البنفسجية ب (ريبوفلافين)	الحد من مسببات الأمراض الناجمة عن الأشعة فوق البنفسجية ج
الدم بالكامل	نعم	نعم	لا	(نعم)	لا
الصفائح الدموية	نعم	نعم	نعم	(نعم)	(نعم)
بلازما	نعم	نعم	نعم	(نعم)	لا
كرات الدم الحمراء	نعم	نعم	لا	(نعم)	لا
الأمراض المرتبطة عند حدوث رفض العائل لدم المضيف (تعطيل الخلايا التائية)	نعم	نعم	نعم	(نعم)	(نعم)
الأمراض المنقولة عن طريق نقل الدم	لا	لا	نعم	(نعم)	(نعم)
ردود الفعل السلبية المرتبطة بنقل الدم	لا	لا	نعم	(نعم)	(نعم)

ملاحظات: (نعم) تعني غير متوفر في الولايات المتحدة. TA-GvHD = الأمراض المرتبطة عند حدوث رفض العائل لدم المضيف؛ UVA = الأشعة فوق البنفسجية أ؛ UVB = الأشعة فوق البنفسجية ب.
المصدر: مُعتمد من المجلس الوطني للعلوم والتقنية (NSTC)، 2016، ومُحدَّث.

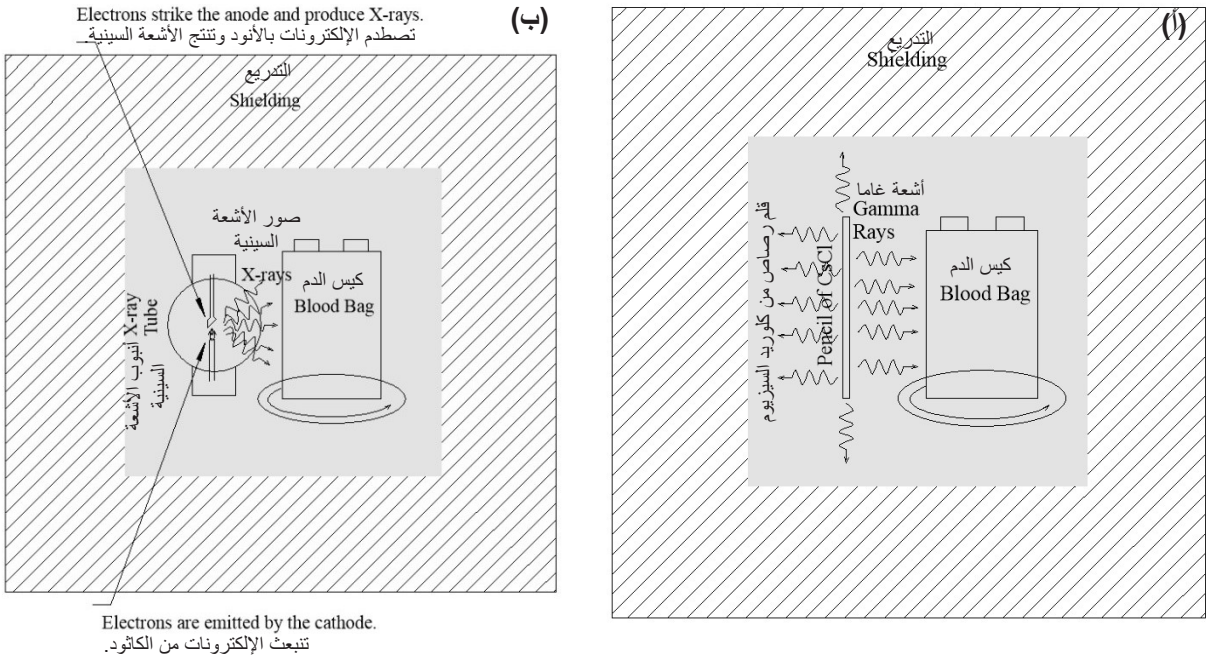
4-1-1 تقنيات النظائر المشعة

يعتبر تشعيع غاما لمكونات الدم بجرعات تحبط قدرة خلايا الدم البيضاء (WBCs) على التكاثر الطريقة السائدة لمنع داء الطعم حيال الثوي المرتبط بنقل الدم. يعتبر تشعيع غاما لمكونات الدم بجرعات تحبط قدرة خلايا الدم البيضاء (WBCs) على التكاثر الطريقة السائدة لمنع داء الطعم حيال الثوي المرتبط بنقل الدم (راجع الشكل 4-1 أ). وكانت مشعات الدم المخصصة التي تستخدم السيزيوم 137 (التي تحتوي على مسحوق كلوريد السيزيوم المضغوط (CsCl) المُحكم في كبسولات الفولاذ المقاوم للصدأ؛ ويشار إليها باسم مشعات السيزيوم في هذا الفصل) هي الطريقة القياسية لتشعيع مكونات الدم لتعطيل الخلايا الليمفاوية ومنع داء الطعم حيال الثوي المرتبط بنقل الدم لعقود. ويعد تشعيع الدم الاستعمال الأكثر شيوعًا باستخدام السيزيوم 137، يليه المشعات البحثية (راجع القسم 4-2). وتنتمي مشعات السيزيوم إلى مصادر الفئة 1 استنادًا إلى نظام التصنيف الخاص بالوكالة الدولية للطاقة الذرية وتحتوي عادةً على مصادر متعددة يبلغ مجموعها 1,000 إلى 5,000 كوري (37–185 تيرا بيكريل) من كلوريد السيزيوم المضغوط في وقت الشراء. ويستخدم حوالي 5 في المائة من مشعات الدم الكوبالت 60 عالي النشاط (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008). ويتم احتواء المصدر المشع بالكامل في دروع من الرصاص، لذلك تسمى مشعات الدم مشعات "محمية ذاتيًا". وتعد هذه المشعات ثقيلة جدًا، بما في ذلك الدروع، وتزن أكثر من طن متري. وتقدر الإدارة الوطنية للأمن النووي وجود ما يقرب من 400 مشع للدم تعمل بالسيزيوم في الولايات المتحدة (إيتامورا وآخرون (.Itamura et al)، 2018).

بالنسبة للوقاية من داء الطعم حيال الثوي المرتبط بنقل الدم، توصي التوجيهات الحالية لإدارة الغذاء والدواء بوجوب توجيه 25 غراي (Gy) إلى المستوى الأوسط لعبوة التشعيع، مع عدم وجود جرعة داخل العبوة أقل من 15 غراي (إدارة الغذاء والدواء (FDA)، 1993). وتُصمم مشعات السيزيوم بحيث يحظى المشغل بحماية تلقائية بواسطة الدروع حيث يتم نقل العبوة التي تحمل منتجات الدم إلى غرفة التشعيع. ويتم تدوير عبوة التشعيع على قرص دوار لتوحيد الجرعة. ولا تختلف الجرعات عادة داخل العبوة بأكثر من 20 في المائة، باستثناء جزء صغير في الجزء العلوي والسفلي من العبوة (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008). وبسبب التحلل الإشعاعي الطبيعي، يتم تحديد الجرعات المشعة للسيزيوم والكوبالت سنويًا ويتم إعادة حساب أوقات التعرض (موروف ولوبان (Moroff and Luban)، 1997) لضمان تطبيق الجرعة الموصى بها من قِبل إدارة الغذاء والدواء على مكونات الدم. وما لم يقترب مشع الدم من نهاية دورة حياته (أكثر من 30 عامًا تقريبًا)، أو تجاوزها، فإن أوقات التعرض تكون عادةً حوالي 5 دقائق. وتتراوح تكلفة شراء مشع السيزيوم اليوم من 200,000 دولار إلى 350,000 دولار.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version



الشكل 4-1 تكوينات من (أ) السيزيوم 137 و (ب) مشعات الدم بالأشعة السينية.

4-1-2 التقنيات البديلة

يوجد بديلان لمشعات السيزيوم: مشعات الأشعة السينية لجميع مكونات الدم وطرق الحد من مسببات الأمراض لبعض مكونات الدم. ويجري مناقشتها في الأقسام التالية.

مشعات الأشعة السينية

حصلت مشعات الدم بالأشعة السينية على الموافقة لأول مرة من قبل إدارة الغذاء والدواء كبديل لمشعات السيزيوم في عام 1999. وخلال السنوات الأولى من التنفيذ، كانت مشعات الأشعة السينية عرضة لأعطال متكررة بالمقارنة مع مشعات غاما بسبب فشل أنبوب الأشعة السينية أو مصدر الطاقة. واشترت العديد من بنوك الدم أجهزة تشعيع احتياطية للأشعة السينية أو أبرمت اتفاقيات تعاون مع مؤسسات قريبة للحد من الأعطال (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008).

في فبراير 2009، منحت إدارة الغذاء والدواء الموافقة على مشعع الدم بالأشعة السينية RS3400 من شركة Rad Source Technologies الذي يحتوي على أنبوب للأشعة السينية معاد تصميمه (إدارة الغذاء والدواء (FDA)، 2021 ب). وتم إطالة الأنبوب الجديد والاحتفاظ بمصفوفة خطية من أسلاك الكاثود محاطة بأنود هدف محوري قابل للنقل بالأشعة السينية مصنوع من الذهب (Au)، وهو مادة هدف ذات عدد ذري أعلى. وسمحت مساحة السطح الأكبر للأنود مقارنة بأنابيب الأشعة السينية التقليدية بتبديد أفضل للحرارة. وباستخدام أسلاك الكاثود القصيرة المتعددة والهدف ذي الرقم الذري الأعلى، أنتجت هذه التقنية ناتج إشعاع أكبر بمقدار 360 درجة حول السلك بجهد أقل، مما أدى إلى إطالة دورة حياة أنبوب الأشعة السينية (أوسبورن (Ausburn)، 2016). ويتم تدوير العينات بشكل محوري حول الأنبوب الواحد لتوفير إشعاع متجانس. ويمكن تجديد الأنابيب ذات الأهداف التالفة بواسطة الشركة المصنعة بدلاً من التخلص منها. ونظرًا لمتطلبات الجهد المنخفض وتبديد الحرارة بشكل أفضل، يمكن تبريد الجهاز الذي يحتوي على أنبوب الأشعة السينية المعاد تصميمه (المشار إليه باسم أنبوب الأشعة السينية من الجيل الثاني في هذا التقرير) باستخدام نظام تدوير مياه مغلق بدلاً من الاضطرار إلى توصيله بالمياه العامة، وهو مطلب من الجيل الأول من أجهزة الأشعة السينية. وتم قبول تقنية الجيل الثاني من مشعات الدم بالأشعة السينية التي تم نشرها خلال السنوات العشر الماضية على نطاق واسع كبديل موثوق وفعال من حيث التكلفة لمشعات السيزيوم. الشكل 4-1 ب هو تمثيل تخطيطي لجهاز تشعيع الدم بالأشعة السينية.

في الوقت الحالي، تُنتج أربع جهات تصنيع على الأقل أو توزع مشعات الأشعة السينية: حيث تنتج شركة Rad Source Technologies المشع RS3400؛ وتنتج شركة Hitachi المشع Sangrey؛ وتوزع شركة R3 X-Ray LLC المشع RadGil2

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

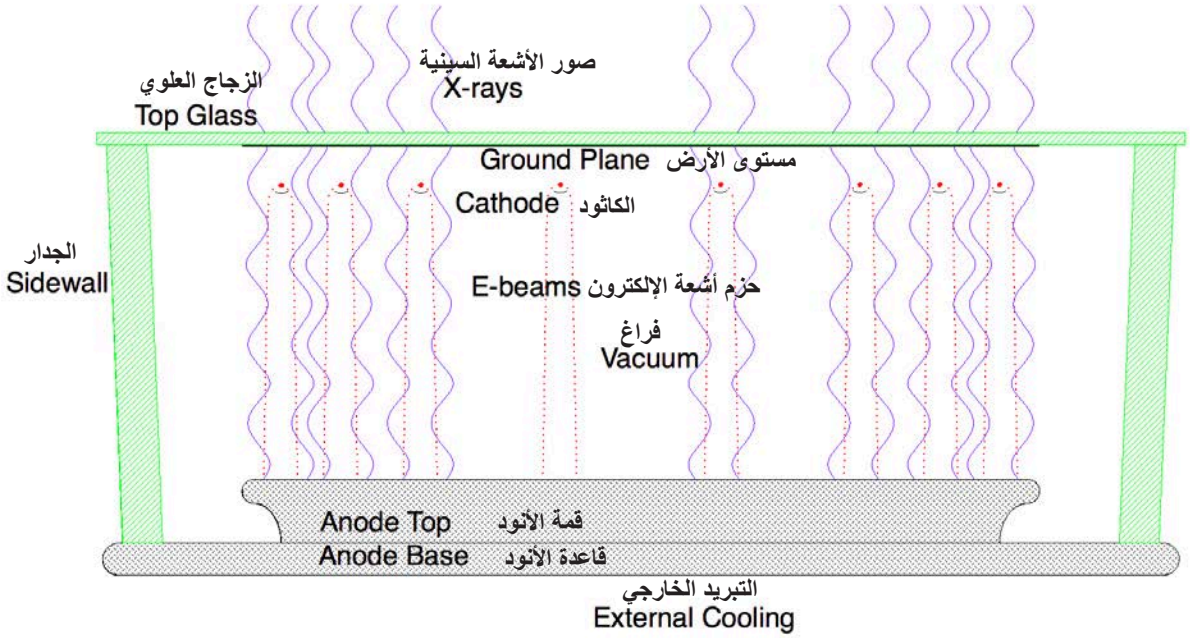
Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

في الولايات المتحدة؛ وتنتج Best Theratronics المشع Raycell MK2. ومن بين هذه المنتجات، يحتوي المشع RS3400 على أنبوب الجيل الثاني الموصوف سابقًا في هذا القسم، وتحتوي المنتجات الأخرى على أنابيب من الجيل الأول. وتختلف تكوينات الجهاز، لكن مشعات الأشعة السينية من الجيل الأول تستخدم عادة نظام أنبوب أشعة سينية تقليدي من أنبوبين مغلقين في حاوية محمية بالرصاص. ولضمان جرعة إشعاع موحدة بدون دوران الهدف، قد يستخدم الجهاز أنبوبين متقابلين للأشعة السينية، أحدهما على كل جانب من الغرفة حيث يتم وضع الحاوية الهدف، ويتم التحكم في توصيل الجرعة عن طريق ضبط وقت التشعيع ومراقبته، بناءً على معدل الجرعة المركزي.

يمكن مقارنة إنتاجية أجهزة الأشعة السينية بمشعات السيزيوم بأوقات تعرض مماثلة تبلغ حوالي 5 دقائق. وتماثل أجهزة الأشعة السينية في الحجم مشعات غاما لكنها تزن أقل قليلاً. وتشبه تكلفة شراء مشع الدم بالأشعة السينية تكلفة مشع السيزيوم، حوالي 270,000 دولار (الإدارة الوطنية للأمن النووي (NTI)، 2018 أ).

تطور Stellarray، وهي شركة صغيرة حاصلة على جوائز أبحاث ابتكار الأعمال الصغيرة وبرامج نقل تقنية الأعمال الصغيرة التابعة للإدارة الوطنية للأمن النووي، مجموعة مشعات لاستبدال النظائر بناءً على بنية مصدر أشعة سينية جديد يسمى مصدر الأشعة السينية ذا اللوحة المسطحة بما في ذلك مشع الدم المستقل. وعلى عكس أنظمة الأشعة السينية التقليدية التي يتم إنشاء الأشعة السينية فيها من بقعة صغيرة على أنود مائل أو منحني، ينتج مصدر الأشعة السينية ذو اللوحة المسطحة أشعة سينية على مساحة أوسع بكثير على سطح أنود مسطح. ويوفر تعرض أحد جوانب الأنود للبيئة الخارجية للتبريد وغياب الأثر العقبي لأنبوب الأشعة السينية والقدرة على جعل منطقة تدفق المصدر مماثلة للمنطقة المستهدفة للإشعاع مزايا من حيث القوة الكفاءة والإدارة الحرارية. يوضح الشكل 4-2 عرضًا مقطعيًا للوحة FPXS. وتم وصف تكوين التقنية بشيء من التفصيل في مكان آخر (إيتون وآخرون (.Eaton et al)، 2019).

بدأ تصميم مصدر الأشعة السينية ذي اللوحة المسطحة منذ أكثر من 10 سنوات عندما كانت مشكلات موثوقية مصادر الأشعة السينية لتشعيع الدم يُمنع استخدامها في هذا الاستعمال. وصُمم مشع الدم المستقل لتقديم جرعة موحدة من 25 غراي لأكياس الدم ومنتجات الدم الأخرى ولتحقيق ما لا يزيد عن 10 في المائة من الاختلاف في الجرعة على طول أي محور، وهو ما يتم تحقيقه عادةً باستخدام أجهزة الأشعة السينية الموجودة حاليًا في السوق. وتتمثل إحدى الميزات المحتملة لهذا النظام في أنه يتمتع بالقدرة على إشعاع الدم في أقل من 4 دقائق، مما يجعله مناسبًا تمامًا للاستخدام في بنوك الدم والمستشفيات المزدحمة. وأيضًا، يبلغ حجم صناديق هذه المشعات حوالي ربع حجم المشعات المتوفرة حاليًا التي تستخدم الأشعة السينية أو أشعة غاما. وباستثناء هذه المزايا المحتملة، لا يبدو أن تقنية شركة Stellarray توفر فائدة واضحة لأنظمة الأشعة السينية لتشعيع الدم الموجودة بالفعل في السوق، ما لم يتم



الشكل 4-2 بنية مصدر الأشعة السينية ذات اللوحة المسطحة.
المصدر: Courtesy of Stellarray, Inc.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

تسعيرها بشكل جذاب.[1] ومع ذلك، فإن هذه التقنية الجديدة، التي من المتوقع أن تدخل السوق في عام 2021، ستضيف المنافسة في سوق المنتجات. ويوجد نوعان من مشعات البحث ومشع تعقيم الحشرات قيد التطوير أيضًا باستخدام هيكل النظام الأساسي نفسه.

أُثبتت جدوى استخدام المسرعات الخطية الطبية لتشعيع مكونات الدم في عدد من الدراسات (بوتسون وآخرون (Butson et al.)، 2000؛ أوليفو وآخرون (Olivo et al.)، 2015؛ بينارو وآخرون (Pinnarò et al.)، 2011)، لكن استكشاف هذا الخيار فقط يكون منطقيًا في البيئات التي تفتقر إلى خيار لجهاز تشعيع الدم المخصص بسبب الموارد المحدودة. وكان التحدي في هذه الدراسات في المقام الأول يتمثل في إنشاء خطة قياس الجرعات لتحقيق توزيع متجانس للجرعات. وحاولت العديد من الشركات تطوير الجيل التالي من المسرعات صغيرة الحجك منخفضة الطاقة والمخصصة لاستبدال النظائر المشعة في مشعات الدم بالسيزيوم. على سبيل المثال، في عام 2010، طورت RadiaBeam Systems عملية تصنيع جديدة للمسرعات الخطية بهدف تقليل التكاليف والحجم، مما يجعلها مناسبة لهذه الاستعمالات. وتم تطوير المسرع، الذي أطلقوا عليه اسم MicroLinac، في Stanford Linear Accelerator Center (مركز المعجل الخطي في ستانفورد)، وهو قسم تابع لوزارة الطاقة (DOE). وكان هذا المسرع مدعومًا بمصدر تردد راديو مغنطروني (RF) متاح تجاريًا. وجرى بناء واختبار النموذج الأولي 2-MeV linac للمشعات المستقلة، لكنها أُعتبرت مكلفة للغاية بالنسبة للاستعمال.[2] ومنذ عام 2016، تتبع RadiaBeam نهج تصنيع مسرع خطي مُقسّم، قادر على خفض تكاليف التصنيع بشكل كبير بسبب قلة المكونات. وتتراوح أعمال التطوير بواسطة RadiaBeam في هذا المجال من مسرعات 0.2 إلى 1.0 ميغا إلكترون فولت للتصوير الشعاعي المحمول إلى أنظمة أكثر قوة بقدرة 6 ميغا إلكترون فولت لاستعمالات التشعيع.

طرق الحد من مسببات الأمراض

الحد من مسببات الأمراض (أو تعطيل مسببات الأمراض) عملية يتم من خلالها معالجة مكونات الدم بعد وقت قصير من جمعها لتعطيل أي عوامل معدية متبقية بما في ذلك الفيروسات والبكتيريا المعروفة بتلويث الصفائح الدموية،[3] والطفيليات. وبصرف النظر عن تلك الموجودة في الكريات البيض (بما في ذلك الخلايا التائية)، لا ينبغي وجود أي أحماض نووية جينومية (DNA أو RNA) في دم الإنسان لغرض نقل الدم. ويرتبط أي DNA أو RNA موجود في الدم الذي تم جمعه بمسبب الأمراض. ويتم الحد من مسببات الأمراض باستخدام طرق تعديل الأحماض النووية لمسببات الأمراض في مكونات الدم المختلفة.[4] وتختلف الحاجة إلى تصنيع مكونات الدم ذات النسب المنخفضة من مسببات الأمراض باختلاف المكونات. على سبيل المثال، تعتبر الحاجة إلى تصنيع صفائح دموية ذات نسب منخفضة من مسببات الأمراض أعلى من الحاجة إلى تصنيع بلازما ذات نسب منخفضة من مسببات الأمراض. ويرجع السبب في هذا إلى تخزين الصفائح الدموية في درجة حرارة الغرفة، وبالتالي يوجد خطر متزايد لنمو البكتيريا إذا كانت وحدة المكون معرضة للتلوث. ويتم تخزين البلازما مجمدة، ويقل احتمال حدوث التلوث البكتيري في مكون محفوظ بالتبريد.

في سياق هذا التقرير، تم التوصل إلى فعالية علاج بعض مكونات الدم بمنهجيات الحد من مسببات الأمراض ضد تكاثر الخلايا الليمفاوية وبالتالي في منع الأمراض المرتبطة عند حدوث رفض العائل لدم المضيف. ويجعل هذا طرق الحد من مسببات الأمراض بدائل أو بدائل ممكنة لمشعات السيزيوم والكوبالت 60 لعلاج بعض (وليس كل) مكونات الدم. ورغم أن بعض منهجيات الحد من مسببات الأمراض قد تكون بدائل لإشعاع غاما، فقد تم الإبلاغ عن إشعاع غاما كبديل غير فعال للحد من مسببات الأمراض (بيلو لوبيز وآخرون (Bello-López et al.)، 2016).

وافقت إدارة الغذاء والدواء (FDA) على نظامين للأشعة فوق البنفسجية (UV) من جهة تصنيع واحدة لمعالجة الصفائح الدموية والبلازما لتحقيق الحد من مسببات أمراض الدم في عام 2014. ولم تحصل أنظمة الحد من مسببات الأمراض لخلايا الدم الحمراء أو علاجات الدم الكامل بعد على تصريح من إدارة الغذاء والدواء.

تم منح ترخيص لأول طريقة للحد من مسببات الأمراض للصفائح الدموية والبلازما التي تتضمن ضوء السورالين وأموتوسالين والأشعة فوق البنفسجية (UVA) لشركة Cerus Corporation (إدارة الغذاء والدواء (FDA)، 2014) وهي تُستخدم في بعض البلدان في أوروبا منذ أوائل القرن الحادي والعشرين. ويثبط العلاج الفيروسات والبكتيريا والطفيليات والخلايا الليمفاوية بإنتاج ناتج الضم أموتوسالين في الأحماض النووية، ومنع مسببات الأمراض وتكاثر الخلايا الليمفاوية مع الاحتفاظ بالوظيفة العلاجية لمكون الدم (كاسترو وآخرون (Castro et al.)، 2018؛ غراس وآخرون (Grass et al.)، 1998) (راجع الشكل 4-3). وتكون كثافة نواتج الضم في الحمض النووي الليمفاوي المنتجة بواسطة أموتوسالين والأشعة فوق البنفسجية أ (حوالي 1 من 37 زوجًا قاعديًا) أكبر بكثير من كثافة تكسر الحمض النووي الذي يسببه 25 غراي من أشعة غاما أو الأشعة السينية (1 من 37,000 زوج قاعدي)، مما يشير إلى تثبيط أكبر للنسخ المتماثل وبالتالي زيادة تثبيط الخلايا الليمفاوية (كاسترو وآخرون (Castro et al.)، 2018).

[1] السعر المستهدف هو 175,000 دولار إلى 275,000 دولار وفقًا لـ CISA (2019).

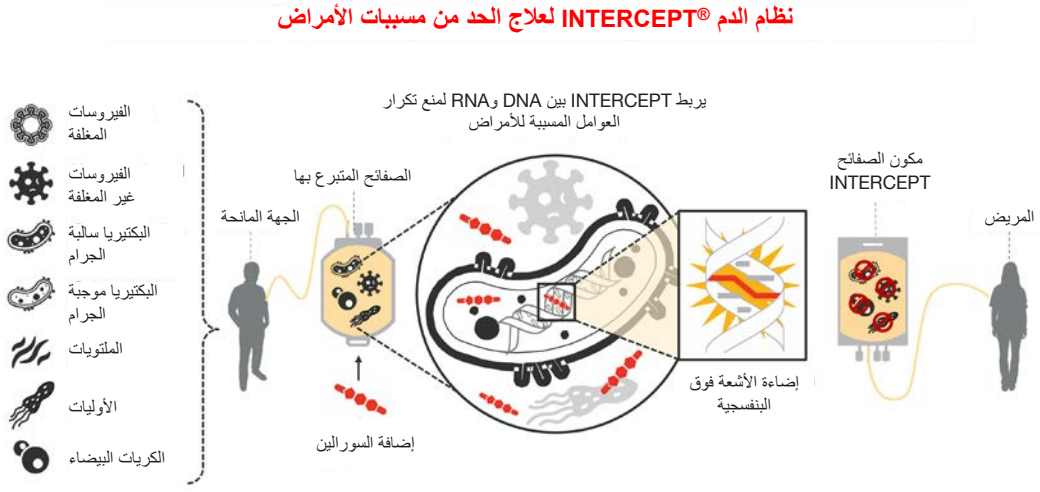
[2] سليم باوتشر، شركة راديابيام تكنولوجيز، عرض تقديمي أمام اللجنة في 17 ديسمبر 2020.

[3] قامت إدارة الغذاء والدواء (FDA) بتحديث إرشاداتها الخاصة باستراتيجيات التحكم في المخاطر البكتيرية في ديسمبر 2020. تتطلب الإرشادات الجديدة تدابير أمان إضافية، ومن المحتمل أن تؤدي إلى زيادة استخدام طرق الحد من مسببات الأمراض في الولايات المتحدة (إدارة الغذاء والدواء، 2020).

[4] لوحظ بعض الضرر في جودة الخلايا الحمراء والصفائح الدموية المعرضة للحد من مسببات الأمراض، لكن تم الحكم على الانخفاضات بأنها مقبولة بناءً على موافقات الهيئات التنظيمية.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version



الشكل 4-3 نظام الدم لعلاج الحد من مسببات الأمراض.
المصدر: Cerus Corporation.

في الصفائح الدموية، تم التعرف على علاج أموتوسالين والأشعة فوق البنفسجية أ كعلاج وقائي لتقليل مخاطر الأمراض المرتبطة عند حدوث رفض العائل لدم المضيف (TA-GvHD) وأصبح جزءًا من معايير AABB (الجمعية الأمريكية لبنوك الدم سابقًا) في عام 2016 (ريغان وماركويتز (Regan and Markowitz)، 2016) ويتم ممارستها حاليًا في العديد من مراكز الدم. واعتبارًا من أبريل 2021، جرت معالجة ما يقرب من 50 في المائة من مجموعات الصفائح الدموية لفصادة الصليب الأحمر الأمريكي باستخدام هذه التقنية بهدف الحد من مسببات الأمراض بنسبة 100 في المائة من مجموعات الصفائح الدموية باستخدام هذه التقنية بحلول عام 2023.

تمتلك Cerus نظامًا مشابهًا لتثبيط مسببات الأمراض في البلازما (إدارة الغذاء والدواء (FDA)، 2021 أ) ولصنع مركب موليد الليفين المُخفَّض للبكتيريا والمشتق من البلازما (إدارة الغذاء والدواء (FDA)، 2020)، وهو مرخص لعلاج النزيف الهائل المرتبط بنقص موليد الليفين والسيطرة عليه. ونادرًا ما يُعتبر تلوث خلايا الدم البيضاء بالخلايا التائية للبلازما المجمدة عامل خطر للإصابة بالأمراض المرتبطة عند حدوث رفض العائل لدم المضيف (TA-GvHD)، ونادرًا ما يستخدم مشع غاما؛ ومع ذلك، يمكن أن تظل بعض الخلايا التائية قابلة للحياة بعد التجميد. ولا يتم نقل البلازما السائلة التي لا يتم تجميدها أبدًا إلى بعض المرضى ونادرًا ما يتم علاجها بأشعة غاما. وتلقت تقنية الأشعة فوق البنفسجية أ والأموتوسالين الخاصة بالبلازما مؤشرًا للاستخدام المقصود من إدارة الغذاء والدواء لتقليل مخاطر العدوى المنقولة بنقل الدم وكبديل لتشعيع غاما للوقاية من الأمراض المرتبطة عند حدوث رفض العائل لدم المضيف للبلازما المجمدة والسائلة. ومع ذلك، على الرغم من موافقة إدارة الغذاء والدواء الأمريكية، إلا أن مسبب مرض البلازما الذي تم خفضه بواسطة هذه التقنية غير متوفر في الولايات المتحدة، ويرجع ذلك جزئيًا إلى صعوبات التصنيع وجزئيًا كذلك إلى قيود الموارد في مراكز الدم.

يستخدم نظام الحد من مسببات الأمراض الثاني للصفائح الدموية ضوء الريبوفلافين والأشعة فوق البنفسجية ب. وكانت الطريقة في المرحلة الثالثة من التجارب السريرية في الولايات المتحدة (NLM، 2017) حتى انتهاء التجربة لأنها لم تستطع تلبية نقاط النهاية للدراسة الأولية. ومع ذلك، كانت هذه الطريقة طريقة معتمدة للاستخدام في أوروبا منذ أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين. ويتسبب العلاج في تعديل قاعدة الحمض النووي وانقسام الخيوط (موندت وآخرون (Mundt et al.)، 2014) في مسببات الأمراض ويعطل الخلايا الليمفاوية (فاست وآخرون (Fast et al.)، 2011). وتم فحص الريبوفلافين والأشعة فوق البنفسجية أ أيضًا في تثبيط مسببات أمراض الدم الكامل في الدراسات قبل السريرية والتجارب السريرية (يونيمورا وآخرون (Yonemura et al.)، 2017). ويمكن أن ينتج عن الحد من مسببات الأمراض في الدم الكامل مكونات الدم المعطلة عن طريق الصفائح الدموية وخلايا الدم الحمراء بطرق الطرد المركزي لبنك الدم.

تم فحص ضوء الأشعة فوق البنفسجية ج وحده (بدون العامل المحسس للضوء) بنجاح للحد من مسببات الأمراض وتعطيل خلايا الدم البيضاء في مكونات الصفائح الدموية، بما في ذلك الوقاية من الأمراض المرتبطة عند حدوث رفض العائل لدم المضيف في نموذج حيواني (بوهلر وآخرون (Pohler et al.)، 2015; سيلتسام ومولر(Seltsam and Muller)، 2011). ولا تزال طريقة

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الأشعة فوق البنفسجية ج، المسمى نظام الصفائح الدموية THERAFLEX UV (ماكو فارما، موفو، فرنسا) قيد التطوير السريري وغير مرخصة حاليًا في أي سوق.

كما ذكرنا سابقًا، لم تحصل أنظمة الحد من مسببات الأمراض في خلايا الدم الحمراء حتى الآن على تصريح من إدارة الغذاء والدواء. وتعتبر طرق الأشعة فوق البنفسجية أكثر صعوبة لتطبيقها على تثبيط الخلايا الحمراء لأن الهيموجلوبين أ الموجود في خلايا الدم الحمراء يمتص الأشعة فوق البنفسجية ويخمد التشابك الذي يحدث في الخلايا الحمراء المعالجة بالسورالين. وحققت Cerus في استخدام عامل "ألكلي" قابل للشفاء مشتق من حمض نووي، وهو الأموستالين (S-303)، لتعطيل الفيروسات والبكتيريا والطفيليات والخلايا الليمفاوية في خلايا الدم الحمراء على مدار العقد الماضي (هينشلر وآخرون (Henschler et al.)، 2011؛ نورث وآخرون (North et al.)، 2011). وجرت دراسة منتجات خلايا الدم الحمراء من الأموستالين في المرحلة الثانية من التجارب السريرية في الولايات المتحدة (كانسيلاس وآخرون (Cancelas et al.)، 2017) وفي تجربتين سريريتين من المرحلة الثالثة في أوروبا (أيدينوك وآخرون (Aydinok et al.)، 2019؛ بريكسنر وآخرون (Brixner et al.)، 2018). ويخضع تسجيل علامة CE الأوروبية للمراجعة. وتجري حاليا تجربتان من المرحلة الثالثة في الولايات المتحدة لخلايا الدم الحمراء المعالجة بالأموستالين. ويمكن توقع نتائج هذه التجارب في غضون 3 إلى 4 سنوات القادمة.

3-1-4 اعتبارات اعتماد التقنية البديلة

حدث اعتماد واسع النطاق لأجهزة إشعاع الأشعة السينية لمشعات الدم بعد تنفيذ مشروع استبدال جهاز إشعاع السيزيوم (CIRP) (راجع الشريط الجانبي 1-2)، ويستمر هذا الاعتماد الواسع في الحدوث. ويوفر مشروع استبدال جهاز إشعاع السيزيوم حوافز مالية على سعر شراء جهاز جديد غير مشع، بالإضافة إلى إزالة جهاز إشعاع السيزيوم والتخلص منه. وحتى الآن، ساعد مشروع استبدال مشع السيزيوم في إزالة 165 مشعًا تعمل بالسيزيوم، ويجري حاليًا جدولة استبدال 150 مشعًا أخرى. وخارج مشروع استبدال جهاز إشعاع السيزيوم، يوجد تتبع محدود على المستوى الوطني لمعدلات اعتماد التقنيات البديلة لأجهزة إشعاع السيزيوم. وأشارت دراسة استقصائية إلى أن حوالي 75 في المائة من مكونات الدم التي تعرضت للإشعاع في عام 2017 تم إجراؤها باستخدام مشعات السيزيوم والباقي باستخدام تقنيات الأشعة السينية (سابيانو وآخرون (Sapiano et al.)، 2020).

يتم التعرف على مشعات الدم بالأشعة السينية كبديل مناسب واقتصادي لمشع غاما. وأجرى باكن وزملاؤه (2013) تحليلاً للتكلفة والعائد لمقارنة مشعات الدم بالسيزيوم والأشعة السينية. وجرت مقارنات للتكلفة على ثلاثة مستويات من استخدام جهاز الإشعاع اعتمادًا على العدد السنوي لوحدات الدم المشعة. ودرست هذه المقارنات التكاليف المتكبدة من تأمين مصادر السيزيوم والتخلص منها، وتكاليف التشغيل والصيانة، فضلاً عن التكاليف المجتمعية. وخلصت الدراسة إلى وجود فائدة، في معظم الحالات، من حيث التكلفة للتحول إلى تقنيات الأشعة السينية لهذا الاستعمال (باكن وآخرون (Bakken et al.)، 2013).

قدم ممثل من مستشفى ماونت سيناي في مدينة نيويورك، وهي مؤسسة رائدة في اعتماد تقنية الأشعة السينية لتحل محل مشعات الدم والأبحاث التي تعمل بالسيزيوم، إلى اللجنة تحليل التكلفة والعائد للمؤسسة، الذي أظهر أيضًا تحقيق وفورات مالية من خلال الانتقال إلى مشعات الأشعة السينية. واعتبارًا من يناير 2018، انتقلت مستشفى ماونت سيناي تمامًا إلى مشعات الأشعة السينية وتخلصت من مشعات السيزيوم من خلال مشروع استبدال جهاز إشعاع السيزيوم (كامين وآخرون (Kamen et al.)، 2019). واستغرق إكمال هذا الجهد 9 سنوات. وأظهر تحليل مماثل للتكلفة والعائد أجراه مركز طبي أصغر، هو مستشفى كريستوس سبون في تكساس، تحقيق وفورات مالية من خلال الانتقال إلى المشع الذي يعمل بالأشعة السينية.[5]

بدأت منظمة الصليب الأحمر الأمريكية، أكبر منظمة لعلاج الدم وإمداداته في الولايات المتحدة، في استبدال مشعات السيزيوم لتحل محلها مشعات الأشعة السينية في عام 2017. وفي ذلك الوقت، كان لدى الصليب الأحمر الأمريكي 33 مشعًا للدم. واعتبارًا من أبريل 2021، تمت إزالة 27 مشعًا تعمل بالسيزيوم. وركبت المنظمة ما مجموعه 37 مشعًا بالأشعة السينية في 34 موقعًا لتحل محل مشعات السيزيوم ومشعات الأشعة السينية القديمة. وتطلب الأمر إجراء عدد قليل جدًا من الإصلاحات الرئيسية لأجهزة الأشعة السينية على الرغم من الاستخدام اليومي المكثف.

حدث اعتماد واسع النطاق لتقنية الأشعة السينية لمشع الدم في أماكن أخرى. وبدأت اليابان في استبدال مشعات الدم التي تعلم بالسيزيوم منذ 20 عامًا، وتم استبدال 80 في المائة منها بمشعات الأشعة السينية. ووفقًا لأحد التقارير، كان عبء اللوائح والخوف من النشاط الإشعاعي من قبل الجمهور الياباني في أعقاب حادث محطة فوكوشيما دايتشي للطاقة النووية من العوامل التي أدت إلى تسريع استخدام الأشعة السينية لمشع الدم (بينياوسكي وآخرون (Bieniawski et al.)، 2017) وفي النرويج، كانت هجمات يوليو 2011 الإرهابية التي استهدفت البنى التحتية الحكومية والعامة دافعًا للسلطات النرويجية لتعزيز الأمن للمنشآت عالية الخطورة وأصدرت سياسة تقضي باستبدال جميع المستشفيات لأجهزة أشعة الدم المعتمدة على أشعة غاما لتحل محلها تقنيات الأشعة السينية (Saxebøl وØvergaard، 2013). وفي عام 2015، أكملت النرويج التخلص التدريجي من خلال استبدال جميع المشعات التي تعتمد على غاما وعددها 13 وعن طريق إعادة مصادر السيزيوم 137 إلى الشركة المصنعة.

[5] عرض تقديمي من مايكل إيتامورا وجودي ليبرمان، ساندیا، أمام اللجنة في 29 أبريل 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

في عام 2013، أجرت شبكة سلطات الحماية من الإشعاع الأوروبية استبيانًا للدول الأوروبية حول استخدامها لمشعات الدم التي تعمل بالسيزيوم وتجاربها مع تقنية الأشعة السينية فيما يتعلق بالموثوقية والتكاليف والصيانة وعوامل أخرى. وضمن الدول التسعة[6] التي استجابت للاستبيان، كان هناك ما لا يقل عن 100 جهاز مشع يعتمد على غاما وحوالي 20 مشعًا يعمل بالأشعة السينية. وذكر المشاركون في الاستبيان أن تقنية الأشعة السينية تعمل بشكل جيد بشكل عام، لكن العيوب تضمنت المزيد من الأعطال عندما تم تركيب هذا النوع من المشعات في منطقة دافئة؛ كما أن صيانة المعدات باهظة الثمن نسبيًا؛ وتحتاج إلى مصدر طاقة مستمر للجهاز بجهد وتردد ثابتين. بالإضافة إلى ذلك، لوحظ أن المشعات المعتمدة على الأشعة السينية تحتاج إلى وقت طويل نسبيًا للإشعاع مقارنة بالمشعات المعتمدة على غاما، لكن لم يتم ذكر المقدار الفعلي للوقت الإضافي (Saxebøl وØvergaard، 2013).

منذ استبيان عام 2013، أحرزت بعض الدول الأوروبية تقدمًا ملحوظًا في التخلص التدريجي من مشعات غاما واستبدالها لتحل محلها تقنية الأشعة السينية. وبحلول نهاية عام 2016، استبدلت فرنسا جميع مشعات السيزيوم التي تعتمد على غاما التي يبلغ عددها 30 مشعًا (بينياوسكي وآخرون (.Bieniawski et al)، 2017). وفي يونيو 2017، حظرت الدنمارك استخدام المشعات التي تعتمد على غاما، وشجعت فنلندا والسويد استخدام تقنية الأشعة السينية (دالنوكي فيريس وبومبر (Dalnoki-Veress and Pomper)، 2017). وتشير الوكالة الدولية للطاقة الذرية إلى أنها لم تعد تزود الدول الأعضاء النامية بمصادر السيزيوم لمشعات الدم والأبحاث (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2019 ج).

كما ذُكر في الفصل 1، كانت الهند أول دولة أبلغت عن استخدام السيزيوم المزجج في شكل قلم رصاص (مركز بهابها للبحوث الذرية (BARC)، 2017). وطور باحثو مركز بهابها للبحوث الذرية (BARC) مصفوفة زجاجية من البورسليكات لتضمين السيزيوم 137 المنقى في شكل غير قابل للتشتت ثم صب الخليط الزجاجي في أقلام رصاص مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ. واعتبارًا من ربيع عام 2021، أفاد مركز بهابها للبحوث الذرية (BARC) أنه تم إنتاج 220 قلم رصاص زجاجيًا من السيزيوم لمشعات الدم ومشعات الحبوب.[7] وكانت الأنشطة المحددة لأشكال السيزيوم المزجج هي 2.5 كوري/ غ (92.5 غيغا بيكريل/غ) و5 كوري/غ (185 غيغا بيكريل/غ)؛ وبالمقارنة، فإن النشاط المحدد لكلوريد السيزيوم 137 هو 87 كوري/غ (3220 غيغا بيكريل/غ)، مما يعني أن أقلام الرصاص الهندية المزججة لا يمكن استخدامها في مشعات الدم الموجودة، والتي يجب إعادة تصميمها لاستيعاب مواد الأنشطة المحددة الأقل بكثير.

يعد استخدام منهجيات الحد من مسببات الأمراض بديلاً آخر واعدًا لمشعات غاما لبعض مكونات الدم. وعلى الرغم من أن بنوك الدم يمكن أن تتجنب استخدام مشعات غاما والأشعة السينية للوقاية من الأمراض المرتبطة عند حدوث رفض العائل لدم المضيف من خلال استخدام طرق الحد من مسببات الأمراض لوحدات الصفائح الدموية، لم يتم اعتماد أي طريقة للحد من مسببات أمراض الخلايا الحمراء من قبل الهيئات التنظيمية. وإلى أن توجد طريقة مرخصة للحد من مسببات الأمراض للخلايا الحمراء، ستظل المستشفيات وبنوك الدم بحاجة إلى استخدام أشعة غاما أو الأشعة السينية. وحتى مع الموافقة التنظيمية على طريقة تعطيل الخلايا الحمراء، لا يمكن تقليل مسببات الأمراض لكل صفيحة فصادة لأن الوحدات يجب أن تفي بمواصفات الحجم ومحتوى الصفائح الدموية لتكون مؤهلة لاستخدامها للعلاج. ولذلك، من المرجح أن يستمر الاعتماد على أجهزة أشعة غاما أو الأشعة السينية في المستقبل القريب.

2-4 مشعات البحث

تُستخدم المشعات البحثية في مجموعة متنوعة من الدراسات التي تشمل الخلايا أو حيوانات المختبر الصغيرة وكذلك المواد غير البيولوجية. تتضمن الأمثلة:

- مشعات الخلايا المزروعة في المختبر لتوفير "خلايا مغذية" لدعم نمو أنواع معينة من الخلايا؛
- مشعات الخلايا لتوفير خلايا محفزة للتفاعلات المناعية؛
- مشعات الخلايا للبحوث الإشعاعية البيولوجية بما في ذلك تثبيط دورة الخلية؛
- مشعات حيوانات التجارب لعلاج الأورام؛
- مشعات حيوانات التجارب لاستنفاد أو استئصال نظام مكون الدم وتسهيل زراعة النخاع العظمي أو زرع الورم لأغراض البحث؛
- مشعات حيوانات التجارب لدراسة الأمراض المرتبطة بالإشعاع بعد الجرعات المختلفة ومعدلات الجرعات والطاقات من الإشعاع المطبق؛

[6] بلجيكا وجمهورية التشيك وفرنسا وألمانيا (ولاية بافاريا فقط) ولوكسمبورغ وسلوفينيا وإسبانيا والسويد وسويسرا.

[7] Kaushik, C. P. 2021. Recent Developments in Recovery of Radioisotopes by HLLW Partitioning. Indian Nuclear Society. INS Newsletter. May 2021.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

- مشعات المواد (البوليمرات والمواد البيولوجية والغذائية والإلكترونيات الدقيقة ومواد أخرى) بجرعات إجمالية مختلفة ومعدلات جرعات وطاقات لفهم تأثيرات الإشعاع على هذه المواد.

يتم إجراء الدراسات التي تستخدم المشعات البحثية في معاهد البحوث والجامعات والمختبرات الحكومية والتجارية. وعلى عكس مشعات الدم، حيث توفر إدارة الغذاء والدواء مواصفات الدم المعرض للإشعاع، قد تختلف المواصفات في البحث بشكل كبير اعتمادًا على الاحتياجات التجريبية ونقاط النهاية المدروسة.

4-2-1 تقنيات النظائر المشعة

تتشابه المشعات البحثية التي تستخدم مصادر غاما في التصميم مع مُشعات الدم. ويبلغ النشاط النموذجي لمصادر إشعاع الفئتين 1 و2 من الكوبالت 60 أو السيزيوم 137 ما يقرب من 1,200–3,000 كوري (44.4-111.0 تيرا بيكريل). ويتطلب النصف العمري الأقصر للكوبالت 60 بالمقارنة مع السيزيوم 137 استبدال المصادر بشكل متكرر. ومع ذلك، فإن أشعة غاما عالية الطاقة من الكوبالت 60 والنشاط المرتفع نسبيًا الذي يمكن تحقيقه من كمية مكافئة من النويدات المشعة تجعله نظيرًا مشعًا جذابًا لإيصال معدلات جرعة أعلى مطلوبة في بعض بروتوكولات البحث.

يوجد حوالي 300 مشع بحثي تستخدم أشعة غاما تعمل في الولايات المتحدة (CISA، 2019). وفي جميع أنحاء العالم، تم تركيب أكثر من 2,000 مشع بحثي تعمل بالسيزيوم وحوالي 500 مشع تعمل بالكوبالت 60 (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2019 ج).

4-2-2 التقنيات البديلة

يعد البديل الأكثر قابلية للاستعمال للمشعات البحثية التي تعمل بالسيزيوم 137 والكوبالت 60 هي مشعات الأشعة السينية. وتنتج مشعات الأشعة السينية المتوفرة تجاريًا والمستخدمة في الأبحاث حزمًا إشعاعية ذات هندسة مجال معقولة وتجانس شامل للجرعات (بوار وآخرون (.Poirier et al)، 2020). وتعمل هذه المشعات على نطاق واسع من الطاقات المختلفة، من 120 إلى 350 كيلو فولت، لتلبية الاحتياجات التجريبية المختلفة. بالإضافة إلى ذلك، تنتج مشعات الأشعة السينية فوتونات على طيف طاقة مستمر. ولذلك، تعتمد نتائج مشع الأشعة السينية بشكل أكبر على طاقة الذروة وتوزيع الجرعة وجرعة العمق وترشيح الحزمة والمعلمات الأخرى لمعدات الأشعة السينية المحددة المستخدمة. ويزداد سعر المشعات مع زيادة الجهد، وكذلك الحجم الكلي للمُشع.

تم الإبلاغ عن مراجعات للعمليات ونتائج التجارب التي أجريت لتقييم استبدال مشعات غاما لتحل محلها تقنيات الأشعة السينية. وبشكل عام، من المرجح أن تصنع مشعات الأشعة السينية عالية الطاقة (220-350 كيلو فولت) بدائل مناسبة لإجراء دراسات على الحيوانات، في حين أن مشعات الأشعة السينية منخفضة الطاقة (160 كيلو فولت) تعد بدائل أكثر ملاءمة لدراسات الخلايا المختبرية (ميرفي وكامين (Murphy and Kamen)، 2019). وأشارت هذه المراجعات أيضًا إلى أن تحقيق قيمة فعالية بيولوجية نسبية مماثلة (RBE) قد يكون ممكنًا في بعض الحالات وليس جميعها (ماكينزي وآخرون (.MacKenzie et al)، 2020). من الممكن أن تساعد معرفة جرعة العمق المطلوبة في تحديد مشع الأشعة السينية المناسب والإعداد المطلوب (مورفي وكامين (Murphy and Kamen)، 2019). وكان منحنى جرعة العمق للمشع بالأشعة السينية بقدرة 320 كيلو فولت متطابقًا تقريبًا مع مشع السيزيوم 137 حتى عمق الأنسجة البالغ 4 سم، لكن المشع بالأشعة السينية بقدرة 160 كيلو فولت كان قادرًا فقط على إنتاج جرعات عميقة مماثلة لتلك الخاصة بالسيزيوم 137 لعمق الأنسجة أقل من 2 سم (ماكينزي وآخرون (.MacKenzie et al)، 2020).

وتعتبر مشعات الأشعة السينية منخفضة الطاقة غير مناسبة للدراسات على الحيوانات بسبب منحنى جرعة العمق الضحل وخطر الإصابة بحروق الجلد. ونظرًا لأن استخدام مشعات الأشعة السينية عالية الطاقة ضروري لتحقيق اختراق مناسب للأنسجة، يجب استخدام ترشيح الطاقة المناسب لمنع الفوتونات منخفضة الطاقة، مما يسمح باختراق الأنسجة بشكل جيد مع تجنب الأنسجة السطحية. وكما هو مذكور في القسم 4-1، تطور Stellarray مجموعة من المشعات لاستبدال النظائر بناءً على بنية مصدر الأشعة السينية الجديدة، مصدر الأشعة السينية ذو اللوحة المسطحة. ويمكن أن يوفر هذا النظام الجديد ميزة تحسين تجانس الجرعة في البحث لكن يجب إثبات ذلك في تجارب التكافؤ.

من المتفق عليه بشكل عام أن تقنيات الأشعة السينية يمكن أن تحل محل مشعات السيزيوم مع بعض الاستثناءات، على سبيل المثال، عند الحاجة إلى جرعات عالية جدًا من الإشعاع. وتتطلب بعض استخدامات المشعات البحثية اختراقًا أعلى للأشعة السينية مع تجانس جيد للجرعة وبالتالي طاقة أعلى. وسيكون للاختراق الأقصر للأشعة السينية مقارنةً بالسيزيوم 137 تأثير على بعض الدراسات البحثية، لا سيما تلك التي تستخدم حيوانات تجريبية أكبر من الفئران. ويمكن معالجة هذه المشكلة عمليًا من خلال الجهود المبذولة لتنفيذ الأشعة السينية بأعلى طاقة ممكنة للحزمة والاختراق (بوار وآخرون (.Poirier et al)، 2020). وعلى الرغم من أن المسرّعات الخطية بديل جذاب لمشع غاما لأنه يمكن استخدامها لتوليد حقل بالطاقة المتوسطة نفسها، فإن التكلفة المضافة لبناء وتشغيل المنشأة تجعلها بديلاً غير محتمل، مما يترك مشعات الأشعة السينية كخيار أكثر عملية (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2019 ج).

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

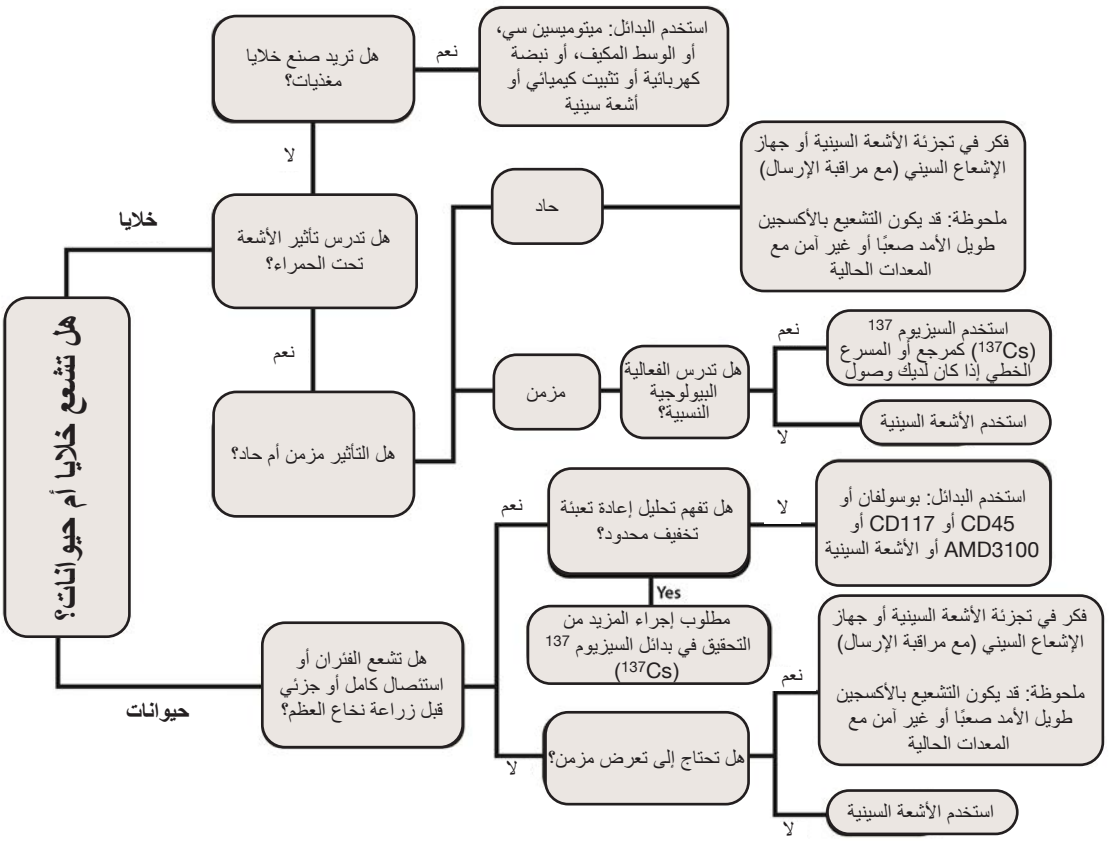
Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

4-2-3 اعتبارات اعتماد التقنية البديلة

بدأت العديد من معاهد البحوث والجامعات والمختبرات الحكومية في الانتقال من استخدام مشعات أبحاث السيزيوم 137 والكوبالت 60 إلى استخدام مشعات الأشعة السينية. وعلى غرار استبدال مشعات الدم، سهّل مشروع استبدال مشعات السيزيوم اعتماد تقنية الأشعة السينية لأغراض البحث في الولايات المتحدة. ومنذ بداية مشروع استبدال مشع السيزيوم، تم استبدال حوالي 25 في المائة من مشعات الأبحاث في الولايات المتحدة (CISA، 2019). ومع ذلك، واجهت هذه العملية عددًا من التحديات، ويرجع ذلك بشكل أساسي إلى أنه يجب على الباحثين إجراء دراسات مقارنة بشكل فردي لإثبات التكافؤ بين أشعة غاما ومشع الأشعة السينية أو معايرة المعلمات التجريبية. ويجب عليهم أيضًا إنشاء بروتوكولات وإجراءات جديدة حتى يتمكنوا، مع يقين معقول، من تحديد ما إذا كان نوع معين من مشع الأشعة السينية مكافئًا بشكل كافٍ للمشع الذي كانوا يستخدمونه سابقًا أو تحديد عامل تحويل مثل الفعالية البيولوجية النسبية لحساب الفروق في النتائج وضمان الاستمرارية بين التجارب القديمة والنتائج المستقبلية.

تعتمد الحاجة إلى تحقيق التأثير البيولوجي نفسه من الأشعة السينية والسيزيوم 137 على السؤال التجريبي. ورغم أنه من الضروري في بعض الحالات توفير استبدال جرعة واحد لواحد، ففي بعض الحالات الأخرى قد يكون عامل التحويل البسيط كافيًا (أندرسون وآخرون (.Andersen et al)، 2020). نشرت وكالة الصحة العامة في إنجلترا مؤخرًا تقريرًا شاملاً يتضمن شجرة قرارات للمساعدة في توجيه اختيار تقنية بديلة لمشعات السيزيوم للاستعمالات البحثية (والدم) (برنارد وآخرون (.Barnard et al)، 2020؛ راجع الشكل 4-4).

كان على الباحثين، طوال الوقت، معالجة القضايا المتعلقة بالنموذج البيولوجي المستخدم وطيف الطاقة. وبالإضافة إلى التحديات التقنية المذكورة أعلاه، غالبًا ما تواجه الجامعات ومراكز الأبحاث التي تفكر في استبدال مشعاتها البحثية التي تعمل بالسيزيوم 137



الشكل 4-4 شجرة القرار لاستخدام التكنولوجيا البديلة في البحث.
المصدر: مقتبس ومنقح من بارنارد وآخرون (.Barnard et al)، 2020. أُعيد إصداره بإذن من إدارة الصحة العامة في إنجلترا ومركز الأمن والمرونة المشترك بوزارة الداخلية البريطانية.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

والكوبالت 60 تحديات لوجستية ومالية، رغم الحوافز التي يقدمها مشروع استبدال مشع السيزيوم (راجع الشريط الجانبي 1-2). وتستهلك تجارب المقارنة هذه الموارد النادرة في المؤسسات البحثية.

عند تقييم التقنيات البديلة، يعتمد الباحثون إلى حد ما على دراسات المقارنة المنشورة ذات الصلة من الباحثين الآخرين والمعلومات من الشركات المصنعة. ومع ذلك، تختص معظم دراسات المقارنة هذه بنوع خلية أو نموذج حيواني (أفرو وآخرون (Afrough et al.)، 2020؛ أندرسون وآخرون(Andersen et al.)، 2020؛ بيلي وآخرون (Belley et al.)، 2015؛ جيبسون وآخرون (Gibson et al.)، 2015 غوت وآخرون (Gott et al.)، 2020)، وبالتالي يؤدي استقراء المعرفة من نوع خلية إلى نوع مختلف من الخلايا أو نموذج حيواني أو نقطة نهاية إلى عدم اليقين. وقد يكون من الصعب أيضًا إعادة إنتاج دراسات للآخرين إذا لم يتم الكشف عن التفاصيل التجريبية في وصف ظروف المشع. على سبيل المثال، أظهر العمل الذي أجراه جيبسون وزملاؤه (2015) زيادة معدلات الاعتلال في الفئران التي تعرضت لأشعة سينية منخفضة الطاقة (130 كيلو فولت في الثانية) مقارنة بالفئران التي تعرضت لجرعة مكافئة من أشعة غاما من السيزيوم 137. ومع ذلك، لم يحدد الباحثون عددًا من المعلمات التجريبية بما في ذلك الترشيح المستخدم.

أشار ممثلو نظام جامعة كاليفورنيا الذين أطلعوا اللجنة على الدرس المستفاد من اعتماد مشعات الأشعة السينية للأغراض البحثية وأهمية إشراك الإدارة العليا والباحثين في عملية صنع القرار والسماح للاستثناءات عندما يتعذر تحديد معادلة السيزيوم 137 للأشعة السينية. وأشاروا كذلك إلى ضرورة تحديد موارد تمويل إضافية من خلال الجامعة أو المستشفى لدعم دراسات المعادلة.[8]

كما ذكرنا في القسم 4-1، هدفت العديد من المبادرات الحكومية إلى القضاء على استخدام السيزيوم 137 في الاستعمالات التجارية. وحدد الكونغرس في القسم 3141 من قانون تفويض الدفاع النووي لعام 2019 هدفًا طموحًا للتخلص التدريجي من جميع مشعات الدم والمشعات البحثية التي تعمل بالسيزيوم في الولايات المتحدة بحلول عام 2027 (الكونغرس الأمريكي، مجلس النواب (U.S. Congress, House)، 2018). ومن العقبات التي تحول دون تحقيق هذا الهدف استبدال مشعات غاما المستخدمة في الأبحاث. ومع ذلك، يمكن الوصول إلى الهدف من خلال التنسيق داخل الوكالات الفيدرالية التي تمول عادة الأبحاث للمساعدة في تسهيل دراسات المعادلة.

4-3 العلاج الإشعاعي بالشعاع الخارجي

يمثل العلاج الإشعاعي الخارجي الشكل الأكثر شيوعًا للعلاج الإشعاعي لإدارة الأورام الخبيثة الصلبة وأورام الدم. وتكون مجزأة، أي يتم تقديمها عادةً كدورة من العلاجات مرة واحدة يوميًا، 5 أيام في الأسبوع، على مدار أسابيع. وتسمى أجهزة العلاج التي تتضمن مصادر انبعاث غاما (الكوبالت 60) لاستخدامها في العلاج الإشعاعي الخارجي آلات العلاج عن بعد.

يتوافر في البلدان مرتفعة الدخل بشكل عام وصول كافٍ إلى العلاج الإشعاعي، على الرغم من وجود تفاوتات إقليمية وسكانية في الوصول والنتائج. ويوجد أيضًا ابتكار وتطوير مستمر لتقنيات علاجية جديدة وتحولات في ممارسات العلاج الإشعاعي، بهدف توفير علاجات أكثر استهدافًا تزيد من السيطرة على الورم وتجنب الأنسجة الطبيعية. وأظهرت بعض هذه الابتكارات التقنية نتائج صحية محسّنة للمرضى، لكنها لا تقدم في بعض الحالات سوى مزايا قياس الجرعات التي قد لا تحسن النتائج الصحية للمرضى على المدى الطويل. وفي الولايات المتحدة، وهي دولة ذات مرتفعة الدخل لديها مزيج من شركات التأمين العامة والخاصة والهادفة للربح وغير الهادفة للربح ومقدمي الرعاية الصحية، تعتبر القرارات المتعلقة بتقديم العلاج الإشعاعي معقدة وتنطوي على اعتبارات مالية مثل مدفوعات التأمين والعائد على الاستثمار. وتعكس القرارات المتعلقة بتقديم العلاج الإشعاعي أيضًا تفضيلات المريض فيما يتعلق بالمقايضات في مكافحة السرطان مقابل الآثار الجانبية والتكاليف.

تعتبر البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل (LMICs) بشكل عام غير مجهزة بشكل كافٍ لمواجهة العبء المتزايد للسرطان. ولا يحصل أكثر من 50 في المائة من المرضى الذين يحتاجون إلى العلاج الإشعاعي على علاج، والإحصاءات أسوأ في البلدان ذات الدخل المنخفض، حيث يزيد عدد السكان الذين لا يحصلون على الخدمة عن 90 في المائة (زوبيزاريتا وآخرون (Zubizarreta et al.)، 2015). وتفتقر بعض البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل إلى معدات العلاج الإشعاعي والخبرة تمامًا.

4-3-1 تقنيات النظائر المشعة

يعتبر الكوبالت 60 حاليًا النويدات المشعة الوحيدة المتاحة تجاريًا للاستخدام السريري في العلاج عن بعد. وتم اختراع العلاج عن بعد بالكوبالت 60 في أوائل الخمسينيات من القرن الماضي، مما جعل وحدة الكوبالت في طليعة العلاج الإشعاعي لسنوات عديدة. وعادةً ما يكون مصدر المعالجة عن بعد بالكوبالت 60 عبارة عن كبسولة أسطوانية ملحومة ومُحكمة الإغلاق من الفولاذ المقاوم للصدأ تحتوي على مئات الكريات المعدنية الصغيرة عالية النشاط من الكوبالت. ويتم استخدام غلق مزدوج اللحام لمنع أي تسرب

[8] كي إيواموتو، جامعة كاليفورنيا، لوس أنجلوس، وبايرون هان، جامعة كاليفورنيا، سان فرانسيسكو، عروض تقديمية أمام اللجنة في 9 سبتمبر 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

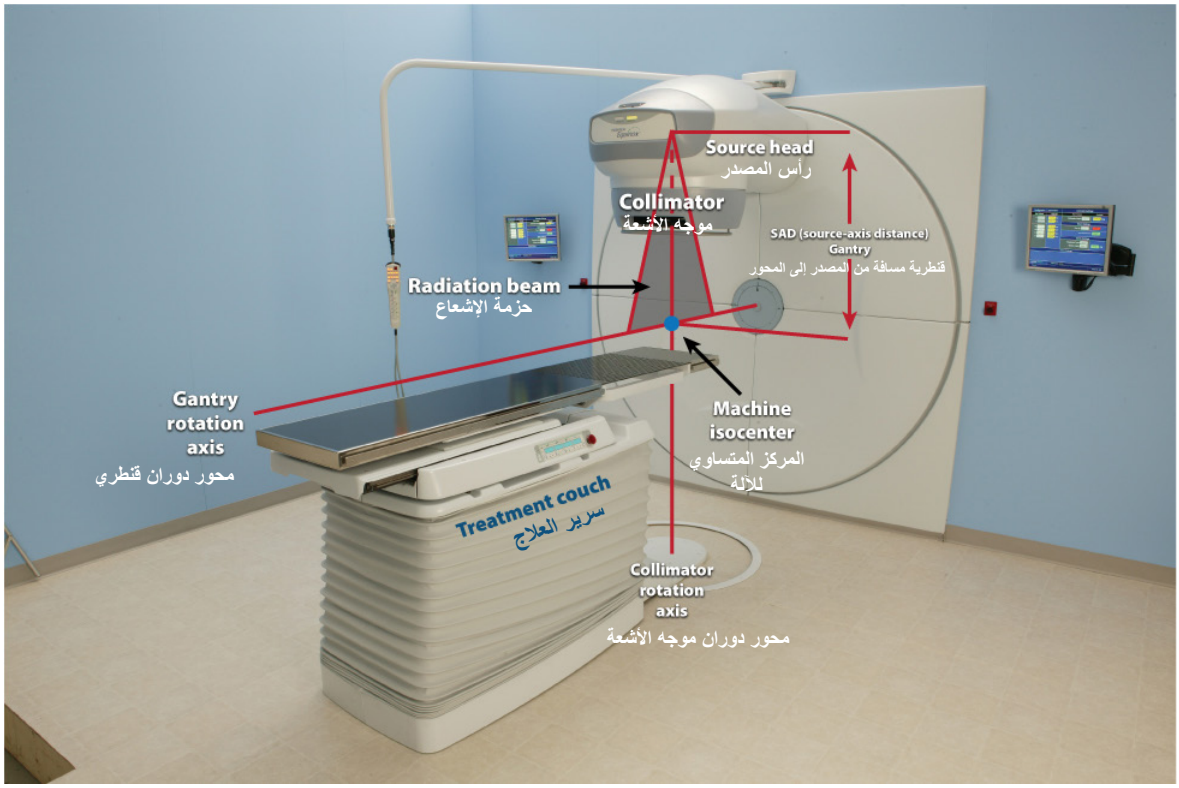
Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

للمواد المشعة من حاوية المصدر (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008). ويتراوح القطر النموذجي لمصدر المعالجة الأسطوانية عن بعد بين 1 و2 سم، ويبلغ ارتفاع الأسطوانة حوالي 2.5 سم. وتحتوي هذه الأسطوانات عادةً ما بين 5,000 و15,000 كوري (185-555 تيرابيكريل) من الكوبالت 60 في وقت الشراء، وعادةً ما تكون أعلى من حدود الفئة 1. ويوفر مصدر العلاج عن بعد بالكوبالت 60 معدل جرعة نموذجيًا في حدود 1 إلى 2 غراي/دقيقة على مسافة 80 سم من المصدر. وغالبًا ما يتم تحديد مخرجات آلة المعالجة عن بعد باستخدام RMM (روتنغن في الدقيقة عند 1 متر) كدليل تقريبي لقوة المصدر (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008). بالنسبة لمستوى نشاط معين، ينتج عن قطر مصدر أصغر حجمًا ظلال مادية أصغر، مما يجعل حافة الحزمة أكثر وضوحًا. وغالبًا ما يتم تركيب المصدر بشكل متساوٍ، مما يسمح للشعاع بالدوران حول المريض على مسافة محور مصدر ثابت (SAD). وتمتلك آلات المعالجة عن بعد الحديثة حجم مسافة محور مصدر يبلغ 80 سم أو 100 سم (راجع الشكل 4-5).

لضمان السلامة، تستخدم وحدة المعالجة عن بعد إحدى طريقتين لتحريك مصدر الجهاز من موضع "إيقاف تشغيل" الشعاع إلى "تشغيل" الشعاع والعودة: مصدر في درج منزلق ومصدر في أسطوانة دوارة. وتتضمن كلتا الطريقتين ميزة أمان تنهي الحزمة (أي، نقل المصدر إلى وضع "إيقاف التشغيل") تلقائيًا في حالة انقطاع التيار الكهربائي أو الطوارئ. وسينبعث بعض الإشعاع من الوحدة حتى عندما يكون المصدر في وضع "إيقاف التشغيل". ويصل تسرب الرأس هذا عادةً إلى أقل من 0.01 مللي زيفرت في الساعة (مللي سيفرت/ساعة) (1 مللي ريم في الساعة [مللي ريم/ساعة]) على مسافة 1 متر من المصدر. وتتطلب اللوائح الدولية أن يكون متوسط التسرب لرأس آلة العلاج عن بعد أقل من 0.02 مللي سيفرت/ساعة (2 مللي ريم/ساعة) عند 1 متر من المصدر (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008).

تعتبر أجهزة العلاج عن بعد التي تعمل بالكوبالت 60 غير مكلفة نسبيًا (بحدود 300,000 دولار) وسهلة الاستخدام. وعادة ما يتم استبدال مصادر المعالجة عن بعد خلال العمر النصفي لواحد من الكوبالت 60 (5.3 سنوات) من التركيب. ويعد استبدال المصادر أمرًا بسيطًا إلى حد ما ويتم إجراؤه بواسطة فنيين مدربين، مما يلغي الحاجة إلى نقل الآلات إلى الشركة المصنعة لتجديدها.

تم التخلص التدريجي من استخدام العلاج عن بعد بالكوبالت 60 في معظم البلدان ذات الدخل المرتفع، وكان يوجد تحول شبه كامل إلى العلاج الإشعاعي الخارجي باستخدام المسرعات الخطية الطبية. ويوجد في الولايات المتحدة ما يقرب من 3,000 مركز



الشكل 4-5 آلة المعالجة عن بعد بالكوبالت-60.
المصدر: Best Theratronics Ltd. A TeamBest Global Company.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

للعلاج الإشعاعي تخدم حوالي 325 مليون نسمة. ويعد عدد آلات العلاج عن بعد صغيرًا (حوالي 140). وبالمقارنة، يوجد أكثر من 3,400 مسرع خطي مركبة في هذه المراكز. ويوجد في أفريقيا حوالي 230 مركزًا للعلاج الإشعاعي تخدم أكثر من 1.2 مليار نسمة.[9] ويوجد ما يقرب من 410 آلة للعلاج عن بعد و350 مسرعًا خطيًا في هذه المراكز،[10] مما يشير إلى أن العلاج عن بعد بالكوبالت 60 لا يزال ضروريًا لتقديم العلاج الإشعاعي.

2-3-4 التقنيات البديلة

تعد المسرعات الخطية الطبية بديلاً واسع الاستخدام للعلاج عن بعد بالكوبالت 60. وأصبحت إمكانية استخدام المسرعات الخطية في العلاج الإشعاعي واضحة في الخمسينيات من القرن الماضي، في الوقت نفسه الذي أُخترعت فيه آلات العلاج عن بعد بالكوبالت 60. وبمرور الوقت، أصبح المسرع الخطي أكثر أشكال العلاج الإشعاعي استخدامًا. وكما ذكرنا سابقًا في هذا الفصل، يعد استخدام المسرعات الخطية ممارسة معيارية في الولايات المتحدة وغيرها من البلدان ذات الدخل المرتفع والعديد من البلدان ذات الدخل المتوسط. ويوجد ما يقرب من 3,400 مسرع خطي في الولايات المتحدة وحوالي 12,300 على مستوى العالم، وفقًا لدليل الوكالة الدولية لمراكز العلاج الإشعاعي. ويتوفر أقل من 750 في البلدان ذات الدخل المنخفض والمتوسط وفقًا للدليل نفسه. ويتنبأ فريق خبراء السرطان الدولي (ICEC) بأنه ستوجد حاجة إلى 5,000 إلى 10,000 مسرع خطي في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل خلال العقدين إلى الثلاثة عقود القادمة لتلبية احتياجات علاج السرطان الحالية والمتوقعة.[11]

على النقيض من وحدة الكوبالت 60 التي توفر شعاعي غاما فقط بطاقات 1.173 ميغا إلكترون فولت و1.333 ميغا إلكترون فولت، يُسرّع المسرع الخطي الطبي الإلكترونات إلى طاقات حركية بجهد كبير تتراوح من 4 ميغا إلكترون فولت إلى 25 ميغا إلكترون فولت ويمكن أن ينتج نوعين من الحزم الإشعاعية المفيدة في العلاج بالأشعة الخارجية: حزم الإلكترون وحزم الأشعة السينية. ويوجه العلاج الإشعاعي بحزمة الأشعة السينية شعاع إلكترون متسارعًا نحو هدف معدني، حيث يتم تحويل بعض الطاقة الحركية للإلكترون إلى فوتونات. وتتشكل هذه الفوتونات، التي يشار إليها باسم أشعة انكباح الأشعة السينية، في وقت لاحق في حزمة الأشعة السينية السريرية بمساعدة مرشح تسطيح وموجهات خاصة (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008). وتُستخدم المسرعات الخطية التي تنتج حزم أشعة سينية عالية الجهد لعلاج الآفات العميقة ويمكن أن تصل إلى مناطق معقدة مثل جذع الدماغ. وتُستخدم حزم الإلكترون ذات الفولتية الضخمة بشكل شائع لعلاج الآفات السطحية (الجلدية). ويوفر مسرع خطي معدل جرعة نموذجي في حدود 3 إلى 6 غراي/دقيقة.

بالمقارنة مع آلات المعالجة عن بعد بالكوبالت 60، تعد المسرعات الخطية معقدة بسبب القدرات متعددة الأوضاع التي تطورت وباتت متاحة في معظم الأجهزة الحديثة. وتسمح البرامج والأجهزة المعقدة بأوضاع معدل الجرعات العالية، والتوجيه متعدد الأوراق، والعلاج بالقوس الإلكتروني، وحركة الموجه الديناميكي، والجراحة الإشعاعية التجسيمية (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008) (راجع القسم 4-4).

يتم تركيب المسرعات الخطية عادة بشكل متساوي المركز، ويتم توزيع الأنظمة التشغيلية الخاصة بالماكينة على خمسة أقسام: القنطرة، وحامل أو دعامة القنطرة، وخزانة جهاز التعديل، ومجموعة دعم المريض (أريكة العلاج)، ووحدة التحكم (راجع الشكل 4-6). وتتراوح تكلفة المسرع الخطي بين 2 مليون دولار و4 ملايين دولار، وهي أعلى بكثير مقارنة بآلات العلاج عن بعد بالكوبالت 60. وتعد متطلبات البنية التحتية والصيانة أيضًا أكثر طلبًا للمسرعات الخطية بسبب المكونات الكهربائية المعقدة والمتطلبات الأعلى للتوظيف والتدريب (هيلي وآخرون (Healy et al.)، 2017).

يجري تطوير تقدمات تدريجية في استعمالات الأشعة السينية وحزم أشعة الإلكترون الخاصة بالمسرع الخطي. وتتحول تلك التي تُظهر نتائج سريرية إيجابية بسرعة إلى "حديثة". وتتضمن بعض الأمثلة العلاج الإشعاعي معدل الشدة (IMRT)، والعلاج بالقوس المعدل الحجمي (VMAT)، والعلاج الإشعاعي الموجه بالصور (IGRT). ويبدو أن كل تقدم تقني يؤدي إلى تحسين دقة تخطيط العلاج وإيصال الجرعات، لكن التأثير على النتائج الصحية للمريض كان صغيرًا وبطيئًا بينما ارتفعت تكاليف العلاج بشكل كبير. وفي بعض الحالات، كان هناك فرق ملحوظ بين التحسينات النظرية للتكلفة والعائد التي روجت لها الشركات المصنعة وتلك التي حققها الممارسون (برونر وآخرون (Bruner et al.)، 2015؛ كالي وآخرون (Kale et al.)، 2016).

[9] لا تمتلك 10 دول أفريقية على الأقل مراكز للعلاج الإشعاعي.

[10] يتم تخزين المعلومات في دليل الوكالة الدولية للطاقة الذرية لمراكز العلاج الإشعاعي (DIRAC). يرجى الرجوع إلى dirac.iaea.org.

[11] سي نورمان كولمان، الهيئة الدولية لخبراء السرطان، عرض تقديمي أمام اللجنة في 18 أغسطس 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

الشكل 4-6 أساسيات لينياك الطبية. المكونات الخارجية الرئيسية للمسرع الخطي الطبي هي سرير العلاج، ورأس العلاج، وجهاز التصوير في المدخل، والقنطرة، ونظام تصوير بالكيلو فولت، والحامل.
المصدر: الصورة مجاملة من oncologymedicalphysics.com.

المزيد من التقدم في التقنيات البديلة

يستمر التقدم في التقنيات الطبية للعلاج الإشعاعي الخارجي في التطور ويشمل تقنيات جديدة وحتى جسيمات جديدة. ويعد الوصف التفصيلي لتقنيات التطوير خارج نطاق عمل هذه اللجنة لأن هذه التقنيات لا تربط بشكل مباشر الانتقال من استخدام العلاج عن بعد بالكوبالت 60 إلى تقنيات النظائر غير المشعة. ولذلك تم وصف هذه التقنيات قيد التطور بإيجاز فقط في الفقرات التالية.

تستخدم علاجات البروتون والشعاع الأيوني أيونات موجبة عالية الطاقة (إما البروتونات أو أيونات الكربون) لعلاج السرطان. ويمكنها إيصال جرعة إشعاعية إلى الورم بشكل أكثر دقة مع انخفاض حاد في الطاقة عند حواف الورم، مما يعني تعرض الأنسجة الطبيعية للإشعاع بشكل أقل. وتختلف الفعالية البيولوجية النسبية المماثلة لحزم الجسيمات عن حزم الفوتون وتتطلب تعديلات في تخطيط العلاج (بومان وآخرون (Baumann et al.)، 2020). وتتميز علاجات البروتون والأيونات بمزايا أكثر من العلاج المعتمد على الفوتون، خاصة فيما يتعلق بخطر الإصابة بالأورام الخبيثة الثانوية، التي تتسبب في آثار مهمة على علاج العديد من أنواع السرطان بما في ذلك سرطانات الأطفال. ومع ذلك، تشبه السيطرة على الأورام لدى البالغين العلاج الإشعاعي القياسي للإجمالية المحددة نفسها، ويمكن أن تصل تكاليف العلاج إلى 10 أضعاف (بيترز وآخرون (Peeters et al.)، 2010) بسبب ارتفاع تكلفة المعدات.

يستخدم العلاج بأيون الكربون أيونات ثقيلة عالية الطاقة لقتل الخلايا السرطانية. وقد يكون لنقل الطاقة الخطية العالية (LET) والخصائص الأخرى لطريقة العلاج الإشعاعي هذه مؤشرات على الأورام التي كانت تقليديًا مقاومة للعلاج الإشعاعي الضوئي القياسي. وأدى العلاج بأيون الكربون، من حيث المبدأ، إلى تحسين الفعالية البيولوجية النسبية القابلة للمقارنة وانخفاض نسبة تعزيز الأكسجين على العلاج بحزمة البروتون. وقد يعني هذا أنه يمكن أن يحسّن نتائج الأورام المقاومة للإشعاع مثل الساركوما وسرطان الجلد الخبيث والأورام شديدة الوفاة مثل سرطان الكبد والبنكرياس. ولعل الجانب السلبي هو أن تكاليف العلاج باستخدام أيون الكربون أكبر بكثير من العلاج الإشعاعي القياسي وحوالي ضعف تكاليف العلاج بالبروتون (بومبوس وآخرون (Pompos et al.)، 2016). وتُقدَّر نسبة المرضى الذين يمكن أن يستفيدوا من التحسينات الإضافية في السيطرة على الورم التي يوفرها العلاج بأيون الكربون بحوالي 2% من المرضى المؤهلين للعلاج الإشعاعي (بلاكلي وآخرون (Blakely et al.)، 2019). وتوجد حاليًا 13 منشأة لأيون الكربون تعمل في جميع أنحاء العالم (مالوف وآخرون (Malouff et al.)، 2020).

يوجد أسلوب علاج إشعاعي في المراحل الأولى من التطور هو العلاج الإشعاعي بمعدل جرعة عالية جدًا (FLASH). وتم وصف العلاج الإشعاعي بمعدل الجرعة العالية جدًا لأول مرة في عام 2014، ويقدم العلاج الإشعاعي بمعدل الجرعة العالية جدًا (> 40 غراي/ثانية) مقارنة بالعلاج الإشعاعي التقليدي. وتشير الدراسات المختبرية المبكرة إلى أن العلاج الإشعاعي بمعدل الجرعة العالية جدًا قد يقلل بشكل أكبر من الآثار الضارة للأنسجة الطبيعية بما يتجاوز ما يُلاحظ حاليًا مع العلاجات الحالية بالفوتون (فافودون

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

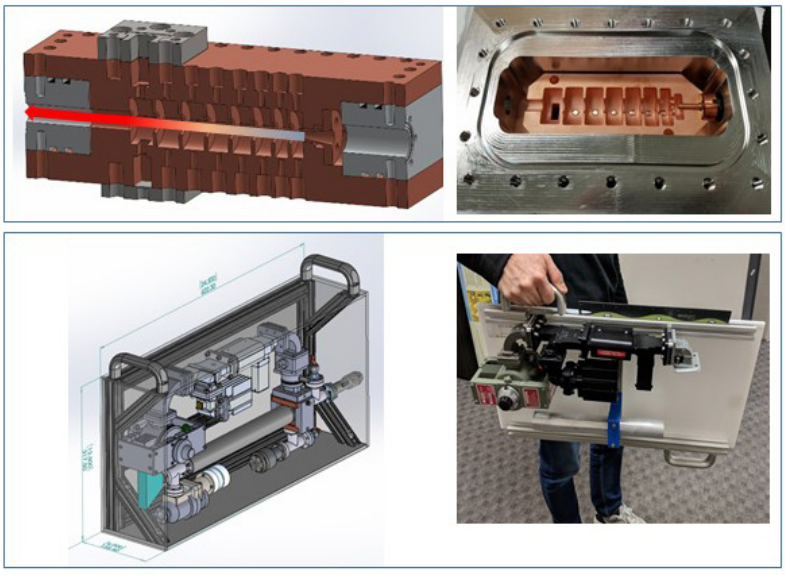
وآخرون (Favaudon et al.)، 2014). وبدأت التجارب السريرية على العلاج الإشعاعي بمعدل الجرعة العالية جدًا في أكتوبر 2020 ولا تزال في مرحلة تجنيد المرضى (NLM، 2020). ويعتبر الهدف من التجارب تقييم جدوى سير العمل للعلاج الإشعاعي بمعدل الجرعة العالية جدًا في بيئة سريرية، بالإضافة إلى السمية وتخفيف الآلام عند استخدامها لعلاج ورم خبيث في العظام. وإذا كان ذلك ممكنًا، سيتطلب تنفيذ هذه التقنية معدات مساعدة متقدمة مثل غرف التأين والأفلام المشعة وأجهزة اكتشاف أشباه الموصلات (إسبلن وآخرون (Esplen et al.)، 2020).

تطوير التقنية لمعالجة تكاليف وتعقيدات المسرعات الخطية

استثمرت شركتان كبيرتان على الأقل، وشركات مصنعة للأجهزة الطبية للعلاج بالأشعة، في أبحاث وتطوير الأجهزة التي يمكن أن تعالج تحديات البنية التحتية في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل التي غالبًا ما تمنع التشغيل الطبيعي لمسرع خطي. على سبيل المثال، أطلقت شركة Varian مؤخرًا *Halcyon*، وهو مسرع خطي تقول الشركة إنه سيزيد من الوصول العالمي إلى العلاج الإشعاعي مع تقليل التدريع والتوظيف ومتطلبات الكهرباء الموثوقة، فضلاً عن التكلفة. وتم وصف تجارب مستخدمي هذا الجهاز في نيجيريا وغواتيمالا في القسم 4-3-3.

وتطور شركة Best Automation & Robotics، وهي عضو في مجموعة شركات TeamBest، نظامًا لمواجهة تحديات تشغيل المسرع الخطي في البلدان ذات الدخل المنخفض والمتوسط. ويقال إن متطلبات الطاقة لهذا النظام أكثر مرونة وسهلة التكيُّف وبالتالي فهي تتحمل تقلبات الإمداد الكهربائي. وليس لدى اللجنة معرفة بموعد توفر هذه التقنية.

تستثمر الشركات الأصغر أيضًا في البحث والتطوير للآلات التي يمكنها معالجة تحديات البنية التحتية في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل. وتعمل شركة Euclid Techlabs LLC، الحاصلة على جائزة أبحاث الابتكار للأعمال الصغيرة من إدارة الأمن النووي الوطني، على تطوير عملية لتحسين مكونات المسرع الخطي التي من شأنها الحفاظ على الجودة وتقليل التكاليف. ويعتبر هدف الشركة هو تقليل تكاليف المسرع الخطي من خلال التخلص من خطوة اللحام بالنحاس (مزيج معقد من المعادن) واستخدام مكونات الفولاذ المقاوم للصدأ بدلاً من النحاس. بالإضافة إلى ذلك، تهدف الشركة إلى تقليل وزن وبصمة آلة المسرع الخطي (راجع الشكل 4-7). وتقدر الشركة أن تكون تكلف النظام الجهاز للعمل بقدرة 1 ميغا إلكترون فولت حوالي 100,000 دولار. ويوجد أيضًا في المراحل الأولى من التطوير مشروع ثانٍ من نفس الشركة يهدف إلى عرض مصدر أشعة سينية محمول يعتمد على مسرع عازل بقدرة 1 ميغا إلكترون فولت وأيضًا إنتاج تصميم منخفض التكلفة وصغير الحجم للطاقة المتوسطة (حوالي 4 ميغا إلكترون فولت). وتحتوي حزمة الأشعة السينية بين 4 و6 ميغا إلكترون فولت على قطاع اختراق يمكن مقارنته بمصدر الكوبالت 60. وفي حالة إتاحة هذا النظام بتكلفة مماثلة لآلة العلاج عن بعد بالكوبالت 60 وكان مزودًا بمصدر طاقة مرن وسهل التكيُّف، فقد يكون بديلاً قابلاً للتنفيذ



الشكل 4-7 لينياك مضغوط تم تطويره بواسطة شركة Euclid Techlabs LLC.
المصدر: Euclid Techlabs LLC.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

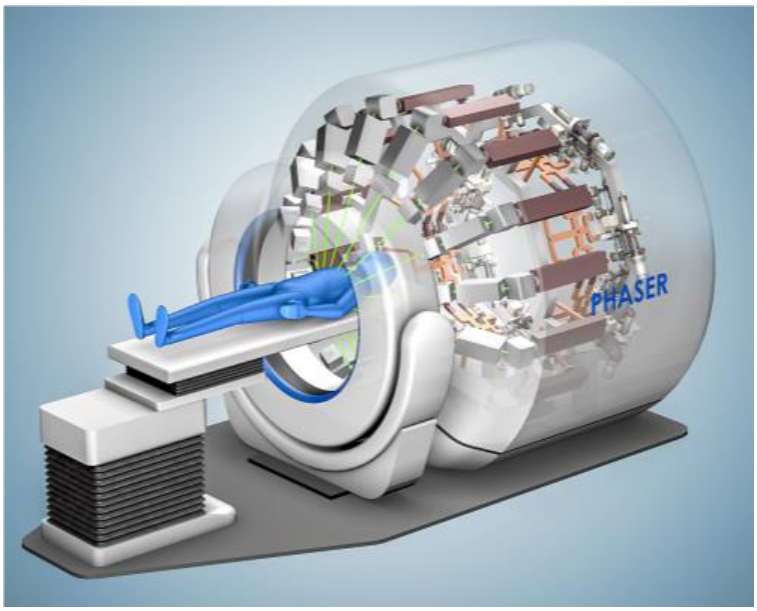
للعلاج عن بعد في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل. ويوجد مشروعان لشركة Euclid Techlabs LLC في مراحل مبكرة جدًا من التطوير ويخضعان للتحديات القياسية والشكوك المتعلقة بتقديم أفكار جديدة إلى السوق.

تهدف شركة صغيرة أخرى حاصلة على جائزة أبحاث ابتكار الأعمال الصغيرة (TibaRay) أيضًا إلى تصميم مسرع خطي بقدرة ميغا إلكترون فولت متعددة بأسعار معقولة. وتتضمن التصميمات التي طورتها هذه الشركة عدة عناصر جديدة في تصميم التجويف ومصادر الطاقة وإمدادات الطاقة وتتطلع إلى تقليل تكلفة التصنيع وكذلك تحسين مرونة النظام في بيئات التشغيل الصعبة. وتهدف TibaRay إلى جعل المسرعات الخطية منخفضة التكلفة لاعتمادها واستخدامها على نطاق واسع. ويعتبر الهدف الأساسي لشركة TibaRay هو إنتاج نظام مكون من 16 مسرعًا مصفوفة حول المريض (راجع الشكل 4-8) لتقديم العلاج للمريض بمعدل جرعة عالية جدًا، يعادل العلاج الإشعاعي بمعدل الجرعة العالية جدًا الموصوف سابقًا في هذا الفصل وتقديم ذلك بسعر يعادل أنظمة المسرع الفردي الحالية. ويعتمد التطوير والنشر الناجح لهذا الجهاز على خفض كبير في تكاليف مكونات المسرع الخطي.

بالإضافة إلى البحث والتطوير، دعمت الحكومة الأمريكية أيضًا أبحاث العلوم الأساسية. وفي عام 2019، استضاف مكتب العلوم التابع لوزارة الطاقة (DOE)، بدعم من الإدارة الوطنية للأمن النووي ووزارة الدفاع ووزارة الأمن الداخلي والمعاهد الوطنية للصحة ورشة هدفها العام النهوض تقنيات المسرع صغير الحجم ونشره في المستقبل القريب. وتم التركيز على تقنيات المسرع الواعدة التي يمكنها تحقيق مستوى جاهزية تقنية (TRL) من 5، مما يعني التحقق في البيئات ذات الصلة، خلال السنوات الخمس المقبلة (وزارة الطاقة (DOE)، 2019). حدد المشاركون في الورشة خمس أولويات بحثية رئيسية:

1. إحداث تغيير كامل في تصميم المسرع لإنتاج أنظمة معيارية وقابلة للتشغيل المتبادل وقوية؛
2. تطوير "مسرعات ذكية" تحقق النتائج المتوقعة في البيئات الصعبة؛
3. النظر بشكل يتجاوز الحدود التقنية الحالية؛
4. تأثيرات التحكم والنتائج التي تتجاوز الحدود التقنية الحالية؛
5. إحداث تغيير كامل في الحجم لتمكين الاستعمالات الجديدة والناشئة.

من الممكن أن تؤدي هذه الجهود التي يبذلها مكتب العلوم التابع لوزارة الطاقة (DOE) إلى تحسين تصميمات المسرعات الخطية ودعم اعتمادها بشكل أكبر في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل.



الشكل 4-8 نظام ذو ستة عشر مسرعًا تم تطويره بواسطة TibaRay.
المصدر: TibaRay.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

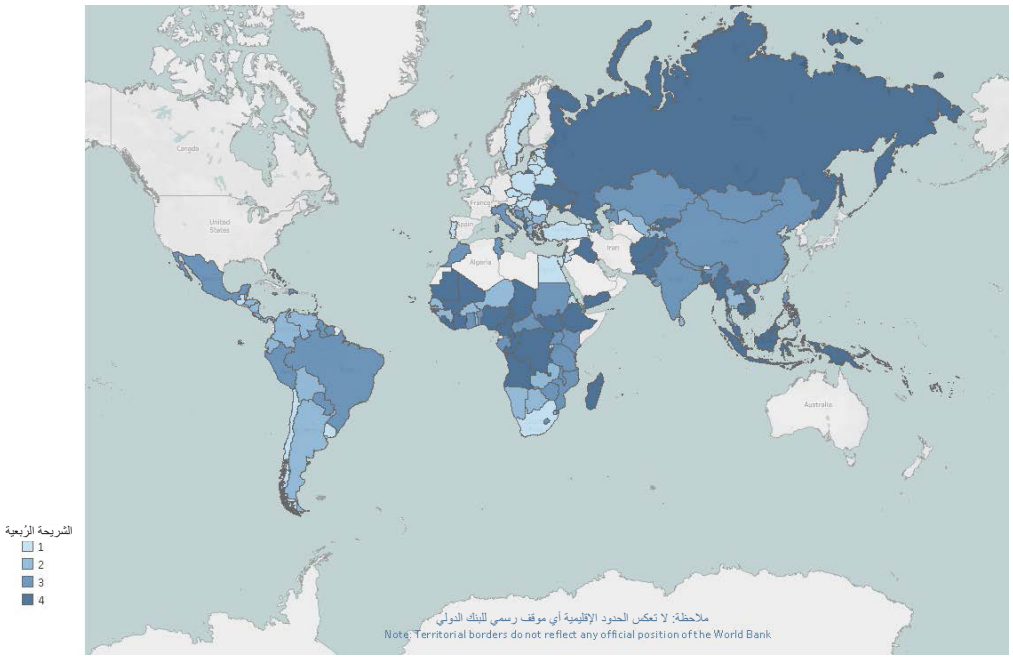
4-3-3 اعتبارات اعتماد التقنية البديلة

كما ذكرنا في بداية هذا القسم، فإن مناقشة اعتماد تقنيات بديلة للعلاج الإشعاعي بالكوبالت 60 ذات صلة بالبلدان منخفضة ومتوسطة الدخل لأن العلاج عن بعد بالكوبالت 60 قد تم التخلص منه بالكامل تقريبًا في الولايات المتحدة وغيرها من البلدان ذات الدخل المرتفع والعديد من البلدان ذات الدخل المتوسط وتم استبداله بالعلاج الإشعاعي الخارجي باستخدام المسرعات الخطية.

تعد كل من مصادر الكوبالت 60 والمسرعات الخطية مقبولة سريريًا ولديها تاريخ طويل من العلاج الناجح لمرضى السرطان؛ ومع ذلك، يعتبر العلاج الإشعاعي الخارجي باستخدام المسر الخطي أفضل من العلاج عن بعد بالكوبالت 60. وتعتبر وحدات الكوبالت 60 أبسط في الاستخدام، وأقل اعتمادًا على متطلبات موارد البنية التحتية، ويقال إن وقت تعطل الآلة أقل. ومع ذلك، تكون العلاجات التي تستخدم الكوبالت 60 عادة أطول بسبب انخفاض معدلات الجرعات مقارنة بالمسرعات الخطية. وتوفر المسرعات الخطية علاجًا موضعيًا أفضل لجرعة الإشعاع للورم وتحد من تلف الأنسجة المجاورة. وهي عمومًا آلات أكثر تكلفة وأكثر تعقيدًا، ولديها متطلبات أعلى من حيث القوى العاملة الماهرة، وارتفاع الطلب على الصيانة، مما قد يؤدي إلى فترات تعطل طويلة وتكاليف خدمة عالية. وتتطلب كذلك إمدادًا موثوقًا به من الكهرباء، وهو ما يمثل مشكلة في العديد من البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل. وأبلغ عدد من البلدان الأفريقية عن عدة ساعات من انقطاع التيار الكهربائي في أي شهر. وسجلت نيجيريا أعلى رقم (حوالي 33 ساعة في عام 2015). كما أبلغت بلدان في آسيا عن ارتفاع عدد ساعات انقطاع التيار الكهربائي. على سبيل المثال، أبلغت باكستان عن 72 ساعة في عام 2013، وأبلغت الهند عن 14 ساعة في عام 2014. وباستثناء دولة واحدة (غويانا (Guyana)، 8.5 ساعة في عام 2010)، أبلغت بلدان في أمريكا الوسطى والجنوبية عن أقل من 3 ساعات من انقطاع التيار الكهربائي (راجع الشكل 4-9).

وعلى الرغم من التطور المعترف به لأنظمة المسرع الخطي، فقد قيل إن المعالجة عن بعد بالكوبالت 60 قد تكون حلاً مناسبًا للعلاج الإشعاعي في البلدان المنخفضة والمتوسطة الدخل (هيلي وآخرون (Healy et al.)، 2017). وجادل آخرون بأنه لأسباب تتعلق بالسلامة والأمان الإشعاعي، فإن المسرعات الخطية هي الحل الأكثر فعالية لاحتياجات العلاج الإشعاعي في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل (كولمان وآخرون (Coleman et al.)، 2017).

أدى الاعتماد شبه الكامل للمسرعات الخطية في العديد من البلدان ذات الدخل المرتفع والمتوسط إلى خلق فجوات في تقدم تقنية المعالجة عن بعد باستخدام الكوبالت 60. ويمكن أيضًا تثبيت بعض ميزات المسرعات الخطية، مثل موجهات الأشعة متعددة الأوراق، والأوتاد الديناميكية، والتشغيل الديناميكي، على آلات المعالجة عن بُعد بالكوبالت 60 لتحسين العلاج. ومع ذلك، في ظل عدم وجود



الشكل 4-9 عدد حالات انقطاع التيار الكهربائي في شهر عادي.
المصدر: استبيانات مؤسسة البنك الدولي، 2021. يُرجى الاطلاع على https://www.enterprisesurveys.org/en/graphing-tool.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

سوق في البلدان ذات الدخل المرتفع والمتوسط، كان مصنعو آلات الكوبالت 60 بطيئين في تبني هذه الميزات الحديثة، معترفين بأهميتها لمصنعي المسرع الخطي حتى في أجزاء العالم التي قد تجد أنه من الأسهل والأكثر عملية تشغيل آلات المعالجة عن بعد بالكوبالت 60 (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008).

بالإضافة إلى التأخيرات التقنية، أدى الاعتماد شبه الكامل للمسرعات الخطية في البلدان ذات الدخل المرتفع وكذلك في العديد من البلدان ذات الدخل المتوسط إلى تجاهل العلاج عن بعد بالكوبالت 60 كخيار علاجي بواسطة مؤسسات علاج الأورام بالإشعاع المتخصصة التي تتولى تطوير وتحديث المبادئ التوجيهية للاستخدام و سلامة وحدات العلاج الإشعاعي. وأضر هذا التركيز على طرائق العلاج الأكثر تقدمًا والمعالجة كثيفة الاستخدام للموارد بطريقة النظر إلى العلاج عن بعد بالكوبالت 60، حتى في البلدان منخفضة الدخل حيث قد تكون طريقة العلاج الإشعاعي الوحيدة الصالحة لعلاج المصابين بالسرطان. بالإضافة إلى ذلك، يتلقى اليوم عدد قليل فقط من الأخصائيين الطبيين تدريبات على تشغيل آلات المعالجة عن بُعد، مما قد يؤدي إلى فجوة في مجموعة المهارات في المستقبل القريب.

تمتلك الوكالة الدولية للطاقة الذرية العديد من البرامج التي تهدف إلى مساعدة الدول الأعضاء ذات الدخل المنخفض والمتوسط في الوصول إلى العلاج الإشعاعي من خلال دعم القرارات في اختيار وشراء آلات العلاج الإشعاعي وإعداد الآلات والتدريب. وعلى سبيل المثال، عقدت الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) في عام 1990 الاتفاق التعاوني الإقليمي الأفريقي للبحث والتطوير والتدريب المتصل بالعلم والتكنولوجيا النووية (AFRA). ويعد الاتفاق التعاوني الإقليمي الإفريقي للبحث والتنمية والتدريب في مجال العلم والتكنولوجيا النووية (AFRA) اتفاقًا حكوميًا دوليًا أنشأته الدول الأفريقية الأعضاء لتعزيز وتوسيع مساهمة العلوم والتقنية النووية في التنمية الاجتماعية والاقتصادية في القارة الإفريقية. وأنشأت الوكالة الدولية للطاقة الذرية كذلك برنامج عمل لعلاج السرطان في عام 2004 للعمل على دمج العلاج الإشعاعي في خطط شاملة لمكافحة السرطان وللتعامل مع المنظمات الدولية الأخرى مثل منظمة الصحة العالمية (WHO) لمعالجة مكافحة السرطان بطريقة شاملة. وتعمل الوكالة الدولية للطاقة الذرية عن كثب مع منظمة الصحة العالمية والوكالة الدولية لبحوث السرطان (IARC) والاتحاد الدولي لمكافحة السرطان (UICC) والعديد من المنظمات الأخرى لمواجهة تحديات رعاية مرضى السرطان في الدول الأعضاء منخفضة ومتوسطة الدخل. وتتشاور كذلك الوكالة الدولية للطاقة الذرية بشأن السلامة الإشعاعية والأمن مع البلدان ذات الدخل المنخفض والمتوسط، رغم أن تمويل هذه الأنشطة يمثل تحديًا.

دراسات الحالة: الانتقال من العلاج عن بُعد بالكوبالت 60 إلى المسرعات الخطية في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل

تلقت اللجنة معلومات من ممثلين لدول إفريقية وأمريكية لاتينية لفهم الوضع الحالي بشكل أفضل لاعتماد المسرعات الخطية للعلاج الإشعاعي في إثيوبيا وغانا وغواتيمالا ونيجيريا والسنغال وزامبيا. ونعرض ملخصات للمعلومات المستلمة في الأقسام التالية. وتقدم دراسات الحالة هذه نظرة ثاقبة حول الصعوبات في موازنة رغبة في اعتماد تقنيات أكثر تعقيدًا لعلاج السرطان والانتقال إلى تقنيات أكثر أمانًا من حيث المخاطر الأمنية مع الحاجة إلى الحفاظ على تقنية النظائر المشعة لضمان العلاج الطبي المناسب للأشخاص المصابين بالسرطان في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل. وعلى وجه التحديد، تسلط دراسات الحالة الضوء على التحديات التالية مع اعتماد تقنيات المسرع الخطي في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل:

- يتم شراء المسرعات الخطية بشكل متكرر أو نشره قبل استكمال تعديلات المنشأة وتدريب الموظفين ويتم تخزينه دون استخدام في بعض الحالات لسنوات؛
- لا يشارك أصحاب المصلحة الأكثر صلة (أي الأخصائيون الطبيون، بما في ذلك الفيزيائيون الطبيون) دائمًا في عملية صنع القرار لضمان تلبية مواصفات الآلة للاحتياجات التشغيلية؛
- من الممكن أن يؤدي الافتقار إلى مصدر طاقة موثوق إلى فترات تعطل طويلة للمسرعات الخطية وبالتالي تأخير في علاج مرضى السرطان؛
- يؤدي عدم وجود مسار مستدام لإصلاح المعدات وصيانتها إلى فترات تعطل أطول للمسرعات الخطية؛
- لا يتم دائمًا التخلص على الفور من آلات العلاج عن بُعد بالكوبالت 60 التي حل محلها المسرعات الخطية.

بناءً على دراسات الحالة هذه، من المحتمل أن يلعب العلاج عن بعد بالكوبالت 60 على الأقل في المستقبل المنظور دورًا مهمًا في علاج السرطان في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل نظرًا لانخفاض التكلفة وبساطة التصميم والموثوقية وسهولة التشغيل.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

إثيوبيا

تمتلك إثيوبيا آلة واحدة للعلاج عن بعد تعمل بالكوبالت 60 تخدم 105 مليون نسمة. وفي عام 2009، بدأت حكومة إثيوبيا، بالتعاون مع الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، مشروعًا وطنيًا يهدف إلى توسيع خدمات العلاج الإشعاعي والطب النووي في البلاد. وكجزء من المشروع الوطني، اشترت الحكومة ستة مسرعات خطية لستة مراكز طبية مشاركة. وتم اتخاذ قرارات اختيار وشراء المسرعات الخطية بواسطة وزارة الصحة فقط، دون استشارة أطباء الأورام والفرق الطبية وغيرهم من الخبراء بما في ذلك الوكالة الدولية للطاقة الذرية. وعلى الرغم من أن القيادة الحكومية ربما تكون قد بدأت جهودًا حسنة النية لتقديم أحدث التقنيات لمواطنيها، إلا أن هذا حدث دون النظر إلى واقع القوى العاملة واحتياجات البنية التحتية للموارد الأخرى المطلوبة لتشغيل المسرعات الخطية، مثل إمدادات الكهرباء الموثوقة. وتلقت اللجنة معلومات من أحد هذه المراكز، مستشفى بلاك ليون في أديس أبابا، عاصمة إثيوبيا وأكبر مدنها. تلقى مستشفى بلاك ليون أول مسرع خطي في عام 2018، لكن محاولات تشغيله لا تزال جارية، ويرجع ذلك بشكل أساسي إلى نقص تدريب الأفراد المناسبين بانتظار تركيبه. علاوة على ذلك، كانت هناك صعوبات في بناء الخزانة التي ستؤوي الآلة بشكل آمن، ونتيجة لذلك ظلت الآلة والأجزاء في حاويات الشحن لمدة عامين قبل التركيب. بالإضافة إلى هذه التحديات، يتأثر تشغيل المسرع الخطي في إثيوبيا بانقطاع التيار الكهربائي المتكرر في البلاد. ولا تؤدي حالات الانقطاع هذه إلى تعطل الجهاز فحسب، بل تؤدي أيضًا إلى وقت إضافي كبير مطلوب لإعادة تشغيله والتحقق من خرجه. وتخطط المستشفى لشراء مولد للمساعدة في حل مشكلة انقطاع التيار الكهربائي. واشار الخبراء في إثيوبيا الذين قدموا المعلومات إلى اللجنة إلى أن الاحتفاظ بآلة العلاج عن بعد بالكوبالت 60 مهم لضمان حصول المرضى على العلاج الإشعاعي لعلاجات السرطان.

غانا

توجد في غانا خمس آلات قيد التشغيل للعلاج الإشعاعي (ثلاثة مسرعات خطية وآلتين تعملان بالكوبالت 60) في ثلاثة مراكز للعلاج الإشعاعي تخدم 29 مليون نسمة. وبدأ اعتماد المسرع الخطي في عام 2008 عندما وافق صندوق أوبك للتنمية الدولية على قرض بقيمة 14.3 مليون دولار لحكومة غانا لتوسيع مراكز العلاج الإشعاعي في مستشفى كورلي بو التعليمي (KBTH) في أكرا، ومستشفى كومفو أنوكي التعليمي (KATH) في كوماسي. وتضمنت التوسعة بناء مبنى إضافي في كل مستشفى لاستيعاب مجموعة كاملة من معدات التشخيص وعلاج السرطان الحديثة، بما في ذلك المسرعات الخطية. وتم شراء المسرعات الخطية وتسليمها في عام 2012، لكن المبنى الذي سيضم المسرعات الخطية لم يكتمل حتى عام 2016 في مستشفى كورلي بو التعليمي وعام 2019 في مستشفى كومفو أنوكي التعليمي. ونتيجة لذلك، بقيت مكونات المسرع الخطي لسنوات في صناديق في ممرات قسم الأورام. وفي مستشفى كورلي بو التعليمي، تسبب انقطاع التيار الكهربائي في فشل مكونات المسرع الخطي وتأخيرات إضافية في تشغيله. وبدأ العلاج باستخدامها أخيرًا في الربع الثالث من عام 2020 (مستشفى كورلي بو التعليمي (KBTH)، 2020).

غواتيمالا

توجد في غواتيمالا ستة مسرعات خطية في أربعة مراكز للعلاج الإشعاعي تخدم حوالي 17 مليون نسمة. وتعاونت كلية الطب بجامعة واشنطن في سانت لويس مع Liga Nacional Contra El Cancer (LIGA)/Instituto Nacional De Cancerolo-gia (INCAN) في غواتيمالا للمساعدة في تحديث العلاج الإشعاعي في البلاد. ويعالج المعهد حوالي 140 مريضًا بالسرطان يوميًا، معظمهم من سرطانات أمراض النساء. ويحتوي المركز حاليًا على ثلاثة مسرعات خطية؛ تم الحصول على اثنتين منها في عام 2014 والثالث في عام 2019. وأحدث مسرع خطي هو Varian Halcyon، وهو حاليًا الأكثر استخدامًا (يتم فحص حوالي 80 بالمائة من المرضى). وكان اعتماد Halcyon ناجحًا بسبب التزام الكيانات المختلفة المشاركة (فيلارد وآخرون (Velarde et al.)، 2020):

- الوكالة الأمريكية للتنمية الدولية/المدارس الأمريكية والمستشفيات في الخارج (USAID/ASHA) قدمت المنحة لشراء جهاز Halcyon؛
- قدمت شركة Varian الجهاز بتكلفة منخفضة ودعمت إزالة مصدر الكوبالت 60 من القبو المخصص وتركيب المسرع الخطي وتشغيله وتدريب عليه؛
- دعم LIGA/INCAN تحويل غرفة معالجة الكوبالت 60 الحالية لاستيعاب نظام المسرع الخطي وحصلت على الموافقات التنظيمية؛
- دعمت جامعة واشنطن في سانت لويس إزالة جهاز العلاج عن بعد بالكوبالت 60 وقدمت الدعم الفني والتدريب.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

تم تقديم طلب المنحة إلى الوكالة الأمريكية للتنمية الدولية / المدارس الأمريكية والمستشفيات في الخارج في مايو 2017، قبل طرح Halcyon في السوق. وقُدمت المنحة في صيف 2018، وبدأت إزالة آلة الكوبالت 60 من القبو في أبريل 2019. وبدأ العلاج باستخدام جهاز Halcyon في نوفمبر 2019 وأسفر عن زيادة قدرة العلاج وتقليل أوقات الانتظار من 3 إلى 9 أشهر إلى أسبوعين. وحتى بعد انتهاء منحة الوكالة الأمريكية للتنمية الدولية (في أكتوبر 2020) التي دعمت رسميًا التعاون بين جامعة واشنطن في سانت لويس وLIGA/INCAN، يواصل الخبراء من المؤسستين المشاركة في مكالمات أسبوعية لمناقشة التحديات المتبقية والمبادرات الجديدة.

على عكس العديد من البلدان الأفريقية، تمتلك غواتيمالا مصدر طاقة موثوقًا به. وتتمثل التحديات المتوقعة مع جهاز Halcyon وربما المسرع الخطي بشكل عام في تكاليف الصيانة بسبب الأجهزة والبرامج عالية التكلفة. وذكر المشاركون أن صيانة المسرع الخطي في البلدان منخفضة الموارد يجب أن تكون ميسورة التكلفة لتحقيق استدامة العلاج الإشعاعي عالي الجودة. وتوجد مشكلة إضافية تتمثل في التخلص من مصادر العلاج عن بُعد بالكوبالت 60 غير المستخدمة. وكان المعهد يعمل مع الإدارة الوطنية للأمن النووي لمدة 18 شهرًا تقريبًا على الأعمال الورقية اللازمة لإعادة اثنين من المصادر الثلاثة والتخلص منها عبر برنامج استعادة المصادر خارج الموقع. ومن المتوقع إزالة المصدرين في عام 2021. وسيتم التخلص من مصدر الكوبالت الثالث في نهاية المطاف في غواتيمالا. وستساعد الإدارة الوطنية للأمن النووي في إيقاف تشغيل وإزالة مصدر الكوبالت 60 هذا أيضًا.

نيجيريا

توجد في نيجيريا حاليًا تسع آلات للعلاج الإشعاعي (ستة مسرعات خطية وثلاث آلات تعملان بالكوبالت 60) في ستة مراكز للعلاج الإشعاعي تخدم 190 مليون نسمة. وطلبت اللجنة معلومات من جهة اتصال في المستشفى الوطني في أبوجا حول تجربة اعتماد Halcyon، وهو مسرع خطي يمكن (وفقًا لجهة تصنيعه، Varian) زيادة الوصول العالمي إلى العلاج الإشعاعي مع تقليل التدريع والتوظيف ومتطلبات الكهرباء والتكلفة. وتوجد آلة Halcyon في مركز NSIA-LUTH للسرطان (NLCC) في لاغوس وتم شراؤها بمساعدة من صندوق التدخل التابع للحكومة الفيدرالية لنيجيريا في عام 2018. واكتمل التركيب بعد حوالي 18 شهرًا. وكانت الدوافع الرئيسية لشراء هذه الآلة المحددة هي أنه يمكن تركيبها في المستودع الحالي لآلة العلاج عن بعد بالكوبالت 60 بالمستشفى وستوفر معالجة إشعاعية عالية الإنتاجية وموجهة بالصور. ولم يواجه المستشفى أي مشاكل كبيرة مع الجهاز ولم يتم الإبلاغ عن أي أعطال كبيرة.

السنغال

توجد في السنغال أربع آلات للعلاج الإشعاعي (أربعة مسرعات خطية) في ثلاثة مراكز للعلاج الإشعاعي تخدم 16 مليون نسمة. وكانت السنغال تعتمد على وحدة واحدة للعلاج عن بعد بالكوبالت 60 حتى عام 2016، وعندما تعطلت، تركت مجموعة كاملة من السكان بدون خيارات علاجية. وبعد هذا التعطل، أصبح النقاش العام حول عدم الوصول إلى خدمات العلاج الإشعاعي والعلاج الباهظ في الخارج قضية وطنية. وأدى هذا في النهاية إلى اتخاذ إجراء حكومي وقرار شراء ثلاثة مسرعات خطية. وتم إشراك المستخدمين النهائيين والتشاور معهم لضمان تلبية مواصفات الآلة للاحتياجات التشغيلية. وكان من بين المشاركين في عملية الانتقال وزارة الصحة والهيئة التنظيمية ووزارة المالية والمستشفى والمنظمات الدولية. وبدأ علاج المرضى باستخدام المسرعات الخطية في مارس 2018.

على الرغم من الانتقال السلس إلى المسرعات الخطية في السنغال، تواجه البلاد تحديات تمنع عملها السلس بالمثل. وتشمل هذه التكاليف الباهظة لمعدات المسرع الخطي وعقود الصيانة عالية التكلفة اللازمة للحفاظ على المسرع الخطي قيد التشغيل.

زامبيا

يوجد في زامبيا ثلاث آلات للعلاج الإشعاعي (جهاز ليناك واثنين من أجهزة العلاج عن بعد من الكوبالت-60) تقع في مركز للعلاج الإشعاعي يخدم 17 مليون نسمة. كلفت حكومة زامبيا مستشفى أمراض السرطان في لوساكا، بزامبيا، في عام 2007 واشترت آلة واحدة للعلاج عن بعد بالكوبالت 60 ومسرعًا خطيًا واحدًا. وتم تركيب آلة العلاج عن بعد بالكوبالت 60 الثانية في عام 2015. ولم تشارك في الشراء لا الوكالة الدولية للطاقة الذرية ولا الوكالات الأخرى ذات الخبرة في اعتماد تقنية المسرع الخطي والمعرفة بسوق المسرعات الخطية. ونتيجة لذلك، وفقًا لأحد الخبراء الذي قدم معلومات إلى اللجنة، ربما لم تتفاوض زامبيا بشأن أفضل عقد خدمة ممكن للمسرع الخطي. واعتمادًا على شدة المشكلة، من الممكن أن يتوقف تشغيل المسرع الخطي من أسبوعين (مشاكل بسيطة) إلى 6 إلى 8 أسابيع (مشاكل أكثر خطورة). وفي عام 2019، بلغ وقت تشغيل المسرع الخطي 80%. ويخطط المستشفى للتخلص التدريجي من العلاج عن بعد بالكوبالت 60 في حوالي 5 سنوات. تخطط زامبيا لتوسيع خدمات العلاج الإشعاعي إلى مناطق أخرى من البلاد في المستقبل القريب.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

4-4 الجراحة الإشعاعية المجسمة

على الرغم من الانتقال من العلاج عن بُعد بالكوبالت 60 إلى العلاج بالمسرع الخطي للعلاج بالأشعة الخارجية، لا تزال العديد من الأجهزة المعتمدة على النظائر المشعة قيد الاستخدام لمجموعة فرعية من العلاج الإشعاعي تُعرف باسم الجراحة الإشعاعية التجسيمية (SRS). وتعد الجراحة الإشعاعية التجسيمية شكلاً من أشكال العلاج الإشعاعي الذي يركز على طاقة عالية لعلاج الأورام الصغيرة في الدماغ وتشوهات الدماغ الأخرى، مثل تكوينات الأوعية الدموية ومجموعة متنوعة من حالات جراحة الأعصاب بما في ذلك الصرع. وعندما يتم علاج أورام أسفل العمود الفقري أو أجزاء أخرى من الجسم، يُشار إلى هذه التقنية غالبًا باسم العلاج الإشعاعي الاستئصالي التجسيمي / العلاج الإشعاعي التجسيمي على الجسد (SBRT). ولا تعد الجراحة التجسيمية جراحية بالمعنى التقليدي لأنه لا يوجد شق. وبدلاً من ذلك، يستخدم التصوير ثلاثي الأبعاد لتوجيه جرعات عالية من الإشعاع إلى المنطقة المصابة.

تقدم الجراحة التجسيمية لعلاج أورام الدماغ والنقائل نتائج بقاء مماثلة لتلك التي يقدمها العلاج الإشعاعي التقليدي، لكن توجد بعض الأدلة على تحسينات تدريجية في الوظيفة الإدراكية العصبية بعد العلاج. ومع ذلك، يُعتقد أن المضاعفات المتعلقة بالعلاج مثل نخر الإشعاع المصحوب بأعراض أعلى من العلاج الإشعاعي التقليدي (لورانس وآخرون (Lawrence et al.)، 2010؛ ميلانو وآخرون (Milano et al.)، 2020؛ ريميك وآخرون (Remic et al.)، 2020).

4-4-1 تقنيات النظائر المشعة

يعد جهاز Gamma Knife®، المصنوع بواسطة شركة Elekta، تقنية تعتمد على أشعة غاما توفر الإشعاع أثناء الجراحة التجسيمية لعلاج أورام الدماغ والتشوهات الوظيفية الأخرى. ويحتوي Gamma Knife® على حوالي 200 مصدر من الكوبالت 60. ويحتوي Gamma Knife® الذي تم تحميله حديثًا على نشاط إجمالي بقوة 6,000 كوري (222 تيرا بيكريل) ويقدم علاجًا بمعدل جرعة يبلغ حوالي 3 غراي/دقيقة بدقة 0.3 مم. وسينخفض معدل الجرعة هذا حيث تتحلل مصادر الكوبالت 60 على مدى العمر النصفي البالغ 5.26 سنة تقريبًا.

يعد جهاز Gamma Knife® بمثابة نظام مصمم بقنطرة حيث يستلقي المرضى على سرير ينزلق داخل الجهاز. وبمجرد محاذاة المريض، تعالج مصادر الكوبالت 60 التي يتم ترتيبها حول مركز متساوي واحد، المنطقة المستهدفة من زوايا متعددة في وقت واحد وتقدم توزيعات جرعة مطابقة للغاية. ويتم تزويد المرضى تقليديًا بإطار رأس مُثبَّت لإجراء العلاج للمساعدة في توجيه الحزم إلى موقع العلاج الدقيق وتجنب الأنسجة السليمة المحيطة (راجع الشكل 4-10 أ). ويقدم أحد أحدث الأنظمة، وهو Leksell Gamma Knife®، خيارات إعداد معتمدة على الإطار وبدون إطار (راجع الشكل 4-10 ب وج) مما يسمح بمرونة أكبر في العلاج. وتصنع شركة Varian Medical Systems و.Inc ،Huiheng Medical أيضًا الأجهزة التي تقدم الجراحة التجسيمية المعتمدة على أشعة غاما. وتبلغ تكلفة جهاز الجراحة التجسيمية المعتمد على أشعة غاما حوالي 3 ملايين دولار إلى 4 ملايين دولار (كابالا وآخرون (Capala et al.)، 2015) مع تكاليف إعداد إضافية تتراوح من مليون دولار إلى 2 مليون دولار تتعلق بالتدريع وإعداد الموقع. وتعد تكاليف الصيانة مرتفعة أيضًا، حوالي 10,000 دولار لكل وحدة سنويًا. ويبلغ العمر الإنتاجي المتوقع لجهاز الجراحة التجسيمية المعتمد على أشعة غاما مثل Knife® حوالي 10 سنوات.

تقدر مراجعة حديثة وجود 113 جهازًا معتمدة على أشعة غاما في الولايات المتحدة (دين وآخرون (Dean et al.)، 2019)، وحيث زادت بشكل طفيفة من حوالي 104 جهازًا منذ حوالي 10-15 عامًا (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008). وكما هو الحال مع أجهزة العلاج الإشعاعي الأخرى التي خضعت لمناقشة، توجد تفاوتات في الوصول. ويوجد جهاز واحد للجراحة التجسيمية المعتمدة على أشعة غاما متاح لكل 3 ملايين إلى 15 مليون شخص في البلدان ذات الدخل المرتفع، لكن هناك جهاز واحد فقط لكل 132 مليونًا إلى 370 مليون شخص في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل (فيزيو وآخرون (Fezeu et al.)، 2014).

تبيع شركة صينية، GammaStar® Medical Group، .Ltd، جهاز الجراحة التجسيمية باستخدام الكوبالت 60 يسمى Gyro Knife، ويحتوي على 190 مصدرًا مع نشاط إجمالي من 6,000 - 7,000 كوري (260 تيرا بيكريل). ويعد هذا الجهاز المكافئ الوظيفي للمسرع الخطي متساوي المركز المخصص للجراحة التجسيمية، الموصوف في القسم 4-4-2. وتدير رأس العلاج في جهاز Gyro Knife المصدر على محور، باستخدام أداة توجيه متعددة الصفائح لتوجيه شعاع الإشعاع إلى الورم، بينما تدير الرافعة رأس العلاج حول جسم المريض (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008). وعلى عكس جهاز Gamma Knife®، الذي يُستخدم لعلاج أورام المخ وغيرها من تشوهات وظائف الدماغ، يمكن استخدام هذا الجهاز لعلاج الأورام في أي جزء من الجسم. ويهدف جهاز آخر، هو GammaPod، الذي تصنعه Xcision Medical Systems، إلى تقديم العلاج الإشعاعي التجسيمي على الجسد لعلاج سرطان الثدي. وتستخدم GammaPod، التي حصلت على تصريح من إدارة الغذاء والدواء الأمريكية في عام 2017، الآلاف من حزم الإشعاع المركزة من 36 مصدرًا دوّارًا من الكوبالت 60 المشع.[12]

[12] يُرجى الاطلاع على https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-clears-stereotactic-radiotherapy-system-use-treating-breast-cancer.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الشكل 4-10 Gamma Knife® (أ) للتركيب بإطار رأس مثبت، (ب) Leksell Gamma Knife®، و (ج) للتركيب بإطار خفيف الوزن.
المصدر: Elekta.

4-4-2 التقنيات البديلة

توجد حاليًا ثلاثة خيارات للبدائل غير المشعة للجراحة التجسيمية المعتمدة على أشعة غاما: الجراحة التجسيمية باستخدام مسرع خطي قياسي متساوي المركز؛ والجراحة التجسيمية باستخدام مسرع خطي متساوي المركز؛ ومسرع خطي مصغر على ذراع آلية (CyberKnife®).

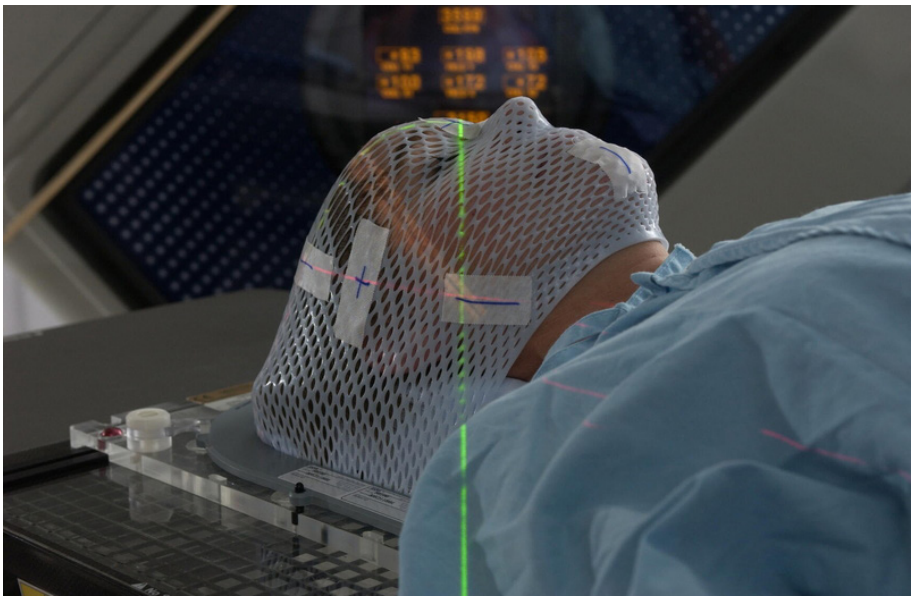
ويمكن استخدام الجراحة التجسيمية باستخدام مسرع خطي قياسي متساوي المركز لعلاج الأورام في أي مكان في الجسم. وتم وصف التعديلات المطلوبة على مسرع خطي قياسي للاستخدام في الجراحة التجسيمية بالتفصيل في مكان آخر (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008).

تقدم المسرعات الخطية المخصصة للجراحة التجسيمية نتائج سريرية مماثلة لتلك التي يقدمها جهاز Knife®. وتستخدم بعض المسرعات الخطية الإطارات التجسيمية بينما يستخدم البعض الآخر (على سبيل المثال، BrainLab، Novalis®) قناعًا للتثبيت والتصوير المباشر بالأشعة السينية للهياكل الداخلية (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008). وتستخدم هذه التقنيات المتطورة الخالية من الإطار جهاز توجيه صغيرًا للغاية متعدد الرقائق لتشكيل المجالات غير المنتظمة والسماح بالتشعيع التجسيمي داخل القحف وخارجه، مع معدات وتكاليف تشغيل مماثلة لتلك الخاصة بجهاز Gamma Knife®. ويُقدَّر سعر المسرع الخطي بقوة 15 ميغا إلكترون فولت المخصص لتقديم الجراحة التجسيمية بمليوني دولار (بانولو وآخرون (Pannullo et al.)، 2019).

يوفر نظام الجراحة التجسيمية CyberKnife® أسلوبًا مختلفًا لتوصيل الجرعة الموجهة بالصور. ويستخدم أشعة فوتونية بقوة 6 ميغا إلكترون فولت يتم إنتاجها بواسطة مسرع خطي مدمج مركب على ذراع آلية. وتتمتع الذراع الآلية بست درجات من الحرية الانتقالية والدورانية لتقديم الحزمة المكانية (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008). ويعتمد جهاز CyberKnife® الذي يستخدم التصوير التجسيمي على العلاج الإشعاعي الموجه بالصور لتتبع هدفه (أهدافه) في كل من المكان والزمان. ولذلك، يسمح جهاز CyberKnife® بالجراحة التجسيمية دون إطار، أي أنه يمكن أن يعمل بدون إطار تجسيمي صلب وتدخلي لتحسين راحة المريض (راجع الشكل 4-11). ويوجه الجهاز شعاع الإشعاع إلى الهدف من 1300 موضع مع دقة توصيل جرعة مبلغ عنها 1 مم تقريبًا. يمكن لـ CyberKnife® تقديم جرعة الجراحة الإشعاعية لأهداف خارج الجمجمة، مثل العمود الفقري والرئة والبروستات، باستخدام الهيكل العظمي للجسم أو العلامات المرجعية للمقارنة المزروعة جراحيًا كإطار مرجعي لغرض الاستهداف (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008). وتبلغ تكلفة CyberKnife® حوالي 3 إلى 4 ملايين دولار وتكاليف الإعداد حوالي 0.5 - 0.75 مليون دولار (بانولو وآخرون (Pannullo et al.)، 2019). ويبلغ العمر الإنتاجي المقدر لجهاز CyberKnife® حوالي 10 سنوات.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version



الشكل 4-11 علاج CyberKnife® بدون إطار.
المصدر: بإذن من مؤسسة مايو للتعليم والأبحاث الطبية. جميع الحقوق محفوظة.

تطور شركة واحدة على الأقل (ZAP Surgical Systems, Inc.، سان كارلوس، كاليفورنيا) نظام مسرع خطي بقوة 2.7 ميغا إلكترون فولت منخفض التكلفة مخصص للجراحة التجسيمية بهدف تقليل تكاليف الإعداد وتوسيع الوصول في البلدان منخفضة الموارد (ويدليش وآخرون (Weidlich et al.)، 2017). ويتم تسويق النظام، المسمى Zap-X، على أنه ذاتي الحجب، وبالتالي لا يتطلب عادة مستودعًا للإشعاع. ويتسم النظام بالمحدودية وفقًا للتصميم لتقديم الجراحة التجسيمية لأورام الدماغ والرأس والرقبة.

4-4-3 اعتبارات اعتماد التقنية البديلة

يوجد جدل حول المزايا النسبية لجهاز Gamma Knife® مقابل الجراحة التجسيمية المعتمدة على المسرع الخطي. وتتمثل الفوائد الواضحة للجراحة التجسيمية المعتمدة على المسرع الخطي في أنها لا تستخدم مواد مشعة؛ وهي أكثر تنوعًا ويمكن استخدامها لعلاج عدد من مواقع الورم؛ وتكون تكاليف العلاج أقل عند استخدام أنظمة مسرع خطي قياسية أو مخصصة (غريفيث وآخرون (Griffiths et al.)، 2007). ومن المرجح أن يؤدي استمرار الابتكار إلى خفض تكاليف شراء وتركيب وصيانة أنظمة الجراحة التجسيمية المعتمدة على المسرع الخطي. وعلى الرغم من هذه الفوائد، تظل دقة توصيل الإشعاع لعلاج كل من الآفات الفردية والمتعددة داخل القحف باستخدام جهاز Gamma Knife® متفوقة على أي نظام للجراحة التجسيمية معتمد على المسرع الخطي (ما وآخرون (Ma et al.)، 2014).

وجدت دراسة حديثة استعادية تبحث في أنماط ممارسة الجراحة التجسيمية المعتمدة على غاما مقابل استخدام الجراحة التجسيمية المعتمدة على المسرع الخطي في الولايات المتحدة حسب نوع المنشأة والموقع وعوامل أخرى أنه على الرغم من أن الجراحة التجسيمية المعتمدة على غاما هي الطريقة الأكثر استخدامًا للجراحة التجسيمية أحادية الجزء، إلا أن استخدام الجراحة التجسيمية المعتمدة على المسرع الخطي في ازدياد. وعزت الدراسة زيادة استخدام الجراحة التجسيمية المعتمدة على المسرع الخطي إلى التوافر (على وجه التحديد في المراكز الطبية المجتمعية على عكس المراكز الطبية الأكاديمية) والموقع (في الدول غير الغربية مقارنة بالدول الغربية). ولاحظ المؤلفون أيضًا نقصًا في البيانات للسماح بمقارنة طريقتي العلاج من حيث الفعالية والسمية. ويعتمد اختيار جهاز Gamma Knife® مقابل الجراحة التجسيمية المعتمدة على المسرع الخطي في الولايات المتحدة إلى حد ما على الحالة التي يتم علاجها، وكذلك على العوامل غير السريرية مثل تفضيل المستخدم والتوافر والتكلفة (بارك وآخرون (Park et al.)، 2016).

خلال أكثر من عقد بقليل (من 2007 إلى 2017)، كانت هناك زيادة بأكثر من أربعة أضعاف في وحدات الجراحة التجسيمية في الولايات المتحدة. وترجع هذه الزيادة في المقام الأول إلى الاعتماد الواسع لأنظمة الجراحة التجسيمية المعتمدة على المسرع الخطي. وبحلول عام 2017، كان هناك ما يقرب من 428 نظامًا مخصصًا للجراحة التجسيمية مع أنظمة معتمدة على المسرع الخطي من بين أكثر الأنظمة شيوعًا (39 في المائة)، تليها أجهزة 35) CyberKnife® في المائة) وأجهزة 26) Gamma Knife® في المائة)

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

(دين وآخرون (.Dean et al)، 2019). ولوحظت اتجاهات مماثلة في الاعتماد الأوسع لأنظمة الجراحة التجسيمية المعتمدة على المسرع الخطي مقارنة بالجراحة التجسيمية المعتمدة على غاما في أوروبا. وبشكل عام، يوجد في الولايات المتحدة تركيب واحد للجراحة التجسيمية لكل 800,000 شخص، مقارنة بواحد لكل 4.1 مليون في أوروبا، و1 لكل 35 مليون شخص في أمريكا الجنوبية (بانولو وآخرون (.Pannullo et al)، 2019). ووفقًا للشركة المصنعة، يوجد في إفريقيا خمسة أجهزة Gamma Knife® ولا توجد تركيبات للجراحة التجسيمية المعتمدة على المسرع الخطي في القارة بأكملها لسكان يبلغ عددهم 1.2 مليار نسمة.

تمثل الأعداد غير الكافية لجراحي الأعصاب وأخصائيي علاج الأورام بالإشعاع والفيزيائيين في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل والتكاليف المرتفعة لمنشآت الجراحة التجسيمية حواجز كبيرة أمام التوصل لحل لندرة تركيبات الجراحة التجسيمية بالنسبة للمرضى. ويتم تعزيز هذه الحواجز من خلال تكاليف التجديد (للجراحة التجسيمية المعتمدة على غاما) والصيانة والإصلاحات، التي تتطلب عقود صيانة باهظة الثمن مع الشركات المصنعة.

أشارت إحدى المجموعات أن الجراحة التجسيمية المعتمدة على المسرع الخطي تتسم بالقدرة على اعتمادها بسهولة أكبر من قبل البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل نظرًا للاقتصاد والسهولة النسبية في إعداد المريض وتشغيل الأجهزة مقارنةً بجهاز Gamma Knife®. ورغم أنه لا تزال هناك حاجة إلى فريق من جراحي الأعصاب وأخصائيي علاج الأورام بالإشعاع والفيزيائيين ذوي المهارات العالية، تشير المجموعة إلى أن الخبراء يمكنهم تقديم الدعم عن بُعد، مما يسمح لمقدمي الرعاية المحلية الأقل تخصصًا بتقديم الخدمات في الموقع. ويشبه هذا الترتيب نماذج أخرى من الطب عن بُعد الموجودة بالفعل (داتا وراجاسيكار (Datta and Rajasekar)، 2004).

4-5 العلاج الإشعاعي الموضعي عالي الجرعة

يمثل العلاج الموضعي شكلاً من أشكال العلاج الإشعاعي حيث يتم توصيل الإشعاع إلى مواضع الورم داخليًا، عبر قسطرة، يشار إليها أيضًا باسم أداة التطبيق. وبشكل تقليدي، يتم توصيل المعالجة الموضعية باستخدام مواد مشعة يمكن تصنيفها بأنها دائمة أو مؤقتة وكمعدل جرعة منخفض (0.4 إلى 2.0 غراي/ساعة)، أو معدل جرعة متوسطة (2 إلى 12 غراي/ساعة)، أو معدل جرعة عالية (HDR، أكبر من 12 غراي/ساعة) حسب التقنية والنويدات المشعة المختارة. ويُستخدم معدل الجرعات العالية فقط مع المحمل اللاحق؛ أي، يتم وضع القسطرة أولاً ويتم إدخال (تحميل) المصادر المشعة لاحقًا. وتعالج أنظمة الجرعات العالية المتاحة تجارياً عادةً بمعدل جرعة يتراوح من 100 إلى 300 غراي/ساعة ويجب وضعها في غرف محمية جيدًا.

أدى تنفيذ التصوير ثلاثي الأبعاد من خلال التصوير المقطعي المحوسب (CT) أو التصوير بالرنين المغناطيسي إلى تحسين التخطيط للمعالجة الموضعية وجعلها خيارًا علاجيًا عالي الدقة وموثوقًا للعديد من أنواع السرطان، خاصة السرطانات النسائية مثل سرطان عنق الرحم والمهبل (هولشنيدر وآخرون (.Holschneider et al)، 2019؛ منظمة الصحة العالمية (WHO)، 2014). بالإضافة إلى ذلك، تعد المعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية علاجًا فعالًا لسرطان الثدي عند الإشارة إلى المشع الجزئي للثدي (شاه وآخرون (.Shah et al)، 2018). وتعد الميزة الرئيسية للمعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية مقارنة بالعلاج الإشعاعي التقليدي هي تقليل مخاطر الآثار الجانبية بسبب الطبيعة المستهدفة والدقيقة لتقديم العلاج الإشعاعي من داخل الجسم.

انخفض استخدام المعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية منذ أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين (جيل وآخرون (.Gill et al)، 2014؛ هان وآخرون(.Han et al)، 2013؛ محمود وآخرون (.Mahmood et al)، 2014) في الولايات المتحدة وأماكن أخرى حيث تحل تقنيات الأشعة الخارجية مثل العلاج الإشعاعي معدل الشدة (IMRT) والعلاج الإشعاعي التجسيمي على الجسد (SBRT)، والعلاج بالبروتونات محله بشكل متزايد. ويُعزى هذا الانحراف عن إرشادات العلاج المعمول بها (تشينو وآخرون (.Chino et al)، 2020) إلى العديد من الاحتمالات بما في ذلك معدلات السداد الأعلى باستخدام العلاج الإشعاعي معدل الشدة (IMRT) والعلاج الإشعاعي التجسيمي على الجسد (SBRT)؛ وانخفاض الوصول إلى المعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية بسبب تغيير أنماط الإحالة؛ والتدريب غير الكافي الناتج للمقيمين في علاج الأورام بالإشعاع والحفاظ على مجموعات مهارات المعالجة الموضعية بسبب انخفاض الإحالات. وأثار الانخفاض في استخدام المعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية في علاج سرطان عنق الرحم مخاوف لأنه تم ربطه بتقليل معدل البقاء على قيد الحياة من هذا السرطان (ASTRO، 2019).

1-5-4 تقنيات النظائر المشعة

يُستخدم الإيريديوم 192 باعتباره أكثر النظائر المشعة شيوعًا في المعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية. واعتمادًا على نوع السرطان الذي يتم علاجه وموضعه، يتم وضع قسطرة بلاستيكية رفيعة واحدة أو أكثر خلاليًا أو داخل التجاويف بجانب الورم. ومن خلال التحكم عن طريق الكمبيوتر وبناءً على خطة علاج محددة، يتم دفع الكريات أو البذور المشعة الصغيرة عبر القسطرة إلى الورم حيث تنقل الإشعاع لفترة زمنية محددة، عادة من 5 إلى 20 دقيقة. وبمجرد اكتمال العلاج الموقوت، تتم إزالة المصادر المشعة

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

والقسطرة. ورغم أن معظم المعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية تتطلب بضع جلسات لتقديم العلاج الموصوف بالكامل، إلا أنه يتم إجراؤه عادةً في العيادة الخارجية ويغادر المريض المنشأة بين الدورات.

بالمقارنة بالكوبالت 60 والسيزيوم 137، اللذان تم استخدامهما في المعالجة الموضعية في الماضي، يمتلك الإيريديوم 192 نشاطًا محددًا عاليًا، مما يسمح بمصدر أصغر للنشاط نفسه وطاقة فوتون أقل، مما يتطلب حماية أقل. ومن عيوب الإيريديوم 192 أن عمره النصفي أقصر (74 يومًا)، مما يستلزم تجديد المصدر كل 3 إلى 4 أشهر. وفي المقابل، يمكن استخدام مصدر الكوبالت 60 لمدة تصل إلى 5 سنوات، مما يعني أنه خلال العمر الإنتاجي الموصى به لمصدر واحد من الكوبالت 60، يجب إجراء ما يقرب من 20 عملية استبدال لمصدر الإيريديوم 192 . ولا يمكن تجديد مصادر معدل الجرعات العالية إلا بواسطة أشخاص مدربين تدريبًا خاصًا. وفي بعض البلدان، يمكن أن تتسبب الأعمال الورقية الجمركية وتخليص شحنة المصدر في تأخيرات كبيرة في تجديد المصدر، مما يؤدي إلى انحلال نسبة كبيرة من النشاط المفيد للمصدر (مايلهوت فيغا وآخرون (Mailhot Vega et al.)، 2018).

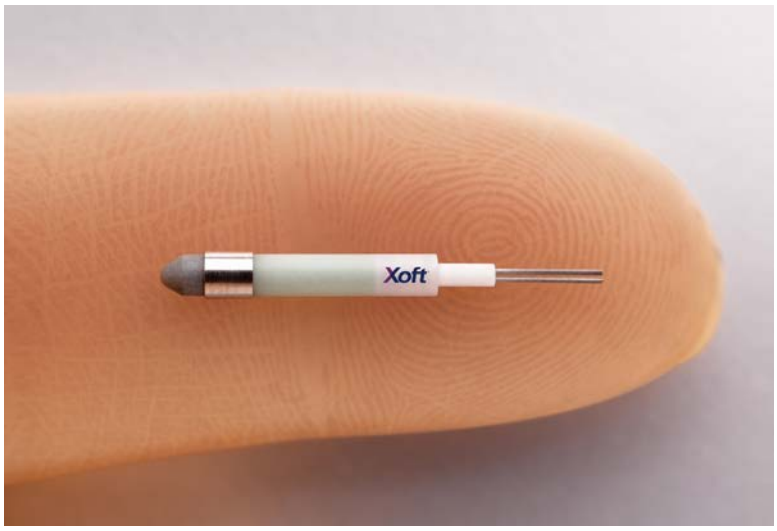
في الولايات المتحدة، تستخدم المُحملات اللاحقة النموذجية مصدر الإيريديوم 192 بقوة 10 كوري (370 غيغا بيكريل)، وبالتالي فإن مصادر المعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية تنتمي إلى مصادر الفئة 3 وفقًا للجنة التنظيمية النووية الأمريكية. ومع ذلك، في أماكن أخرى، تعتبر مصادر المعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية مصادر من الفئة 2 بناءً على نظام تصنيف الوكالة الدولية للطاقة الذرية.

2-5-4 التقنيات البديلة

توفر المعالجة الموضعية الإلكترونية العديد من الميزات الفريدة مقارنة بالمعالجة الموضعية التقليدية، بما في ذلك فوتونات طاقة أقل (عادة أقل من 120 فولت ذروي بالكيلو فولت) مقارنة بالمعالجة المعتمدة على النظائر وبالتالي تقليل احتياجات الحماية. ومع ذلك، بناءً على البيانات المتاحة، ذكرت جمعية المعالجة الموضعية الأمريكية أن "استخدام المعالجة الموضعية الإلكترونية خارج السجل المتوقع أو التجربة المستقبلية غير موصى به للمرضى المصابين بسرطان الثدي أو سرطانات الجلد غير الورمية أو المرضى الذين يعانون من سرطان بطانة الرحم أو سرطان عنق الرحم الذين يحتاجون إلى المعالجة الموضعية في المهبل" (توم وآخرون (Tom et al.)، 2019).

توجد حاليًا ثلاثة أجهزة قادرة على توليد المعالجة الموضعية داخل التجويفات إلكترونيًا؛ نظام Xoft Axxent (شركة Xoft/iCAD Inc.) ونظام INTRABEAM (شركة Carl Zeiss Meditec) ونظام Papillon (شركة Ariane Medical). وتستخدم هذه الأنظمة الأشعة السينية بدلاً من النويدات المشعة لتوليد الإشعاع العلاجي. ويتمتع كل نظام بخصائص فريدة: يُستخدم نظام Xoft للمعالجة الموضعية داخل التجاويف والسطح؛ وغالبًا ما يُستخدم جهاز INTRABEAM في المعالجة الموضعية أثناء العملية؛ ويمكن استخدام جهاز Papillon في العلاجات الشرجية والسطحية وأثناء العمليات الجراحة. وجرت مراجعة شاملة للأنظمة المختلفة بواسطة إيتون (2015).

يستخدم نظام Xoft Axxent، الذي تم طرحه لأول مرة في عام 2006، أنبوبًا مصغرًا للأشعة السينية في نهاية الكبل، يستخدم لنقل الطاقة ومياه التبريد إلى أنبوب الأشعة السينية الموضوع في المريض (راجع الشكل 4-12). ويتمتع كل نظام لأنبوب الأشعة السينية



الشكل 4-12 أنبوب الأشعة السينية Xoft لإجراء العلاج الإشعاعي الموضعي الإلكتروني.
المصدر: مجاملة من Xoft Inc.، شركة تابعة لشركة iCAD, Inc.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

بعمر محدود، يقدر بـ 12 ساعة أو 30 - 50 علاجًا، ويجب استبداله بعد ذلك. ويأتي النظام مع أدوات استعمال متنوعة تُستخدم في مناطق معالجة محددة (مثل الرحم وعنق الرحم وبطانة الرحم). وهو مصمم للاستخدام في العيادات الخارجية، مثل المعالجة الموضعية التقليدية ذات معدل الجرعات العالية. وأظهرت إحدى التجارب السريرية الصغيرة نتائج سريرية واعدة باستخدام نظام Xoft للمعالجة الموضعية الإلكترونية لعلاج السرطانات في المواضع التي قد لا يكون فيها معدل الجرعات العالية خيارًا متاحًا (لوزاريس كورديرو وآخرون (Lozares-Cordero et al.)، 2019).

يتيح العلاج الإشعاعي أثناء الجراحة (IORT) من INTRABEAM العلاج المستهدف لبعض الأورام أثناء الجراحة. وباستخدام الأشعة السينية منخفضة الطاقة، يمكن إعطاء الإشعاع أثناء العملية بجرعة عالية على وجه التحديد في الورم أو، بعد استئصال الورم، في سرير الورم المتبقي. وفي الولايات المتحدة، تمتلك INTRABEAM تصريح 510(k) من إدارة الغذاء والدواء[13] خصيصًا للعلاج الإشعاعي أثناء الجراحة للأورام في الدماغ والثدي والجهاز الهضمي ومنطقة الرأس والرقبة ونقائل العمود الفقري وبعض أنواع سرطانات الجلد.

يحتوي نظام INTRABEAM على قناة صلبة بين مسرع إلكترون والهدف الموجود في المريض. ويطلق مسدس إلكتروني إلكترونات في قسم المسرع. ويمر الشعاع (الطاقة القصوى 50 كيلو إلكترون فولت) عبر عاكس يوجهه نحو هدف من الذهب وينشئ توزيعًا كرويًا للجرعة في نهاية الخط. ويمكن استخدام نظام INTRABEAM داخل القحف ولإصابات الرأس والرقبة باستخدام قسطرة معقمة مُحكمة الغلق وأيضًا لآفات الثدي باستخدام أداة كروية. ونظرًا لأن علاج INTRABEAM يكون أثناء العملية الجراحية، فهو ليس بديلاً قابلاً للتطبيق للاستخدامات الأكثر شيوعًا للمعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية، التي تهدف إلى علاج سرطانات أمراض النساء في عيادة خارجية.

تم استخدام نظام Papillon لعلاج سرطانات المستقيم والسرطانات السطحية (الجلد) وكذلك لتقديم المعالجة الموضعية أثناء العملية. وعلى غرار نظام INTRABEAM، لا يستطيع نظام Papillon حاليًا علاج سرطانات أمراض النساء، مما يجعله بديلًا مباشرًا غير مناسب للمعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية.

3-5-4 اعتبارات اعتماد التقنية البديلة

تشكل السرطانات النسائية، بما في ذلك سرطان عنق الرحم، عبئًا صحيًا كبيرًا في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل. وينعكس عدم قدرة المرضى على تلقي العلاج في معدلات البقاء على قيد الحياة المنخفضة للغاية لمدة 5 سنوات لسرطان عنق الرحم في أفريقيا (15 إلى 30 في المائة) مقارنة بالمعدلات في البلدان ذات الدخل المرتفع (60 في المائة في أمريكا الشمالية؛ ديني وأنورلو (Denny and Anorlu)، 2012). ونظرًا للعدد المنخفض لأنظمة المعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل وارتفاع الطلب على هذه الموارد، فمن المحتمل أن تزداد احتمالية حدوث زيادات في عدد أنظمة المعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية في هذه البلدان في المستقبل القريب (غروفر وآخرون (Grover et al.)، 2015). وأقرت الوكالة الدولية للطاقة الذرية بالحاجة إلى أنظمة إضافية للمعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية في جميع أنحاء العالم (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2015 أ، د).

تنفذ بعض البلدان الأفريقية برامج علاجية موضعية جديدة، بينما توسع بلدان أخرى البنية التحتية للمعالجة الموضعية الحالية. وقدمت منظمة Radiating Hope، وهي منظمة غير ربحية مهمتها توفير معدات العلاج الإشعاعي للبلدان التي تعاني من نقص الموارد، وحدة المعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية في عام 2013 إلى مركز السرطان التابع لمعهد كوري في داكار في السنغال، مما مكّن آلاف النساء السنغاليات المصابات بسرطان عنق الرحم من تلقي العلاج (إينك وآخرون (Einck et al.)، 2014). وكان لابد من التغلب على العديد من التحديات، بما في ذلك عدم وجود مساحة مخصصة لتركيب المعدات، وعدم وجود جهاز محاكاة التصوير المقطعي المحوسب على مقربة شديدة، وعدم القدرة على إجراء التهدئة الواعية في غرفة العلاج، وعدم القدرة على جعل نظام تخطيط العلاج يعمل على البنية التحتية للكمبيوتر الحالية. وفي النهاية، من خلال التفكير الابتكاري المنسق، تم وضع سلسلة من الحلول بحيث يمكن استخدام نظام معدل الجرعات العالية.

يدرك مصنعو أنظمة المعالجة الموضعية مثل Elekta وVarian الحاجة إلى توسيع قدرة المعالجة الموضعية ووضعوا مبادرات لتحقيق هذا الهدف. وطورت Elekta برنامجًا يسمى BrachyAcademy،[14] يهدف إلى تعزيز استخدام المعالجة الموضعية في جميع أنحاء العالم. وبالمثل، تؤدي Varian دورًا نشطًا في شبكة أبحاث سرطان عنق الرحم، وهي شركة تابعة لمجموعة InterGroup للسرطان النسائي، تركز على زيادة الوصول إلى التجارب السريرية لتحسين النتائج للنساء المصابات بسرطان أمراض النساء في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل.

على الرغم من هذه الجهود، توجد تحديات مرتبطة بالمعالجة الموضعية ذات معدل الجرعات العالية. وتشمل هذه الجهود نفقات حماية الغرفة ومتطلبات التغييرات المتكررة للمصدر ومتطلبات التدريب المحدد والمعرفة بمكونات المحُملات اللاحقة. ويعد هذا مهمًا

[13] راجع وصف العملية في الفصل 2.

[14] يُرجى الاطلاع على https://www.brachyacademy.com.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

بشكل خاص في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل، حيث لا تتوفر الخبرة الفنية دائمًا. ويتمتع نظام Xoft باحتمالات أن يصبح بديلاً قابلاً للاستعمال للعلاج الإشعاعي الموضعي بجرعات عالية بالإيريديوم 192 في البلدان منخفضة الموارد، لأنه لا يتطلب مستودعًا وهو متنقل. وتتعلق التحذيرات الخاصة بنظام Xoft Axxent بالتكلفة المستمرة لاستبدال نظام أنبوب الأشعة السينية يوميًا في عيادة مزدحمة والقيود المفروضة على أنواع السرطانات النسائية التي يمكن علاجها بناءً على أدوات الاستعمال المتاحة.

6-4 الفصل الرابع: النتائج والتوصيات

النتائج 11: يعد أبرز تقدم في اعتماد التقنيات البديلة هو الاعتماد العالمي لتقنيات الأشعة السينية لمشعات الدم والأبحاث. وفي الولايات المتحدة، تعد الحوافز المالية التي تقدمها الحكومة من خلال مشروع استبدال مشع السيزيوم مساهمًا رئيسيًا في الانتقال من مشعات السيزيوم إلى تقنيات الأشعة السينية والتخلص التدريجي من السيزيوم 137 في شكل كلوريد السيزيوم من الاستعمالات الطبية والبحثية. ويمكن إحراز تقدم إضافي في استبدال مشعات السيزيوم المستخدمة في الأبحاث من خلال مساعدة مجتمع البحث في تصميم وتمويل دراسات التكافؤ.

يتم التعرف على مشعات الدم بالأشعة السينية كبديل مناسب واقتصادي لمشعات السيزيوم 137 والكوبالت 60. وحدث اعتماد واسع النطاق لأجهزة مشعات الدم بالأشعة السينية بعد تنفيذ مشروع استبدال جهاز إشعاع السيزيوم. ويوفر هذا المشروع حوافز مالية لشراء جهاز جديد غير مشع بالإضافة إلى إزالة مشع السيزيوم 137 والكوبالت 60 والتخلص منه. وحتى الآن، ساعد مشروع استبدال مشع السيزيوم في إزالة 165 من مشعات السيزيوم 137، ويجري حاليًا جدولة استبدال 150 مشعًا آخر. حدث اعتماد واسع النطاق لتقنية الأشعة السينية لمشع الدم في أماكن أخرى.

على غرار استبدال مشعات الدم، سهّل مشروع استبدال مشعات السيزيوم اعتماد تقنية الأشعة السينية لأغراض البحث في الولايات المتحدة. ومنذ بداية مشروع استبدال مشع السيزيوم، تم استبدال حوالي 25 في المائة من مشعات الأبحاث في الولايات المتحدة. ومع ذلك، واجهت هذه العملية تحديات، لأنه يجب على الباحثين في المقام الأول معايرة المعلمات التجريبية بشكل فردي وإنشاء بروتوكولات جديدة لطرق المشعات البديلة. وبهذه الطريقة، يمكنهم، مع يقين معقول، تحديد ما إذا كان نوع معين من مشع الأشعة السينية مكافئًا بدرجة كافية لجهاز الإشعاع الذي كانوا يستخدمونه سابقًا أو تحديد عامل ترجيح لوصف الاختلافات في النتيجة وضمان الاستمرارية بين التجارب القديمة والنتائج المستقبلية. وتستهلك دراسات المقارنة هذه موارد نادرة في المؤسسات البحثية.

التوصية و: يجب أن تتعامل الإدارة الوطنية للأمن النووي مع الشركاء الفيدراليين مثل وزارة الصحة والخدمات الإنسانية ومؤسسة العلوم الوطنية وإدارة الغذاء والدواء لدعم دراسات التكافؤ للباحثين الذين يفكرون في استبدال مشعات أبحاث السيزيوم أو الكوبالت بتقنيات بديلة. ويجب أن تكون نتائج هذه الدراسات متاحة على نطاق واسع.

وحدد الكونغرس في القسم 3141 من قانون تفويض الدفاع النووي لعام 2019 هدفًا طموحًا للتخلص التدريجي من جميع مشعات الدم والمشعات البحثية التي تعمل بالسيزيوم في الولايات المتحدة بحلول عام 2027 (الكونغرس الأمريكي، مجلس النواب (U.S. Congress, House)، 2018). ومن العقبات التي تحول دون تحقيق هذا الهدف استبدال مشعات السيزيوم 137 والكوبالت 60 المستخدمة في البحث. ومع ذلك، يمكن الوصول إلى الهدف من خلال التنسيق داخل الوكالات الفيدرالية التي تمول عادة الأبحاث للمساعدة في تسهيل دراسات المعادلة. وتستطيع الإدارة الوطنية للأمن النووي والشركاء الفيدراليين دعم الباحثين في اعتماد تقنيات بديلة من خلال تقديم منح لدعم دراسات التكافؤ؛ وتمويل المشاريع التعاونية بين المختبرات الوطنية والصناعة بهدف جمع بيانات المقارنة (راجع القسم 5-2-3 لمناقشة مشروع Team Nablo الذي يمكن استخدامه كنموذج لدراسات المقارنة)؛ وتحديد أدلة جوهرية لإثبات التكافؤ للمساعدة في توجيه الباحثين؛ وتبسيط عمليات تقييم الأدلة في طلب يتضمن قرار التكافؤ.

النتائج 12: لا توفر التقنيات البديلة "حلًا واحدًا يناسب الجميع"، ويتضح هذا بشكل خاص في الاستعمالات الطبية عبر البلدان مرتفعة ومنخفضة ومتوسطة الدخل بسبب التفاوتات الصارخة في الوصول إلى الرعاية الصحية والموارد. وكان لاعتماد تقنيات بديلة لعلاج السرطان في بعض البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل آثار سلبية غير مقصودة على رعاية المرضى بسبب الافتقار إلى قوى العمل المدربة والموارد والبنية التحتية المطلوبة لجعل هذه البدائل خيارات ذات جدوى.

تعتبر المسرعات الخطية الطبية بديلاً يُستخدم على نطاق واسع لوحدات المعالجة عن بعد بالكوبالت 60 وهي ممارسة قياسية في الولايات المتحدة وغيرها من البلدان ذات الدخل المرتفع والعديد من البلدان ذات الدخل المتوسط. وبالمقارنة مع آلات العلاج عن بعد

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

بالكوبالت 60، فإن المسرع الخطي معقد ويمتلك متطلبات تدريب وبنية تحتية وصيانة أعلى، مما يجعلهم خيارًا أقل ملاءمة للعلاج الإشعاعي في العديد من البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل.

بمساعدة الخبراء التقنيين من منظمات مثل الوكالة الدولية للطاقة الذرية وغيرها، تبني العديد من الحكومات في أفريقيا والبلدان منخفضة ومتوسطة الدخل أو توسع مراكز علاج السرطان. وغالبًا ما يوجد افتقار إلى التوافق بين خطط اقتناء وتشغيل المعدات للمراكز وبين البنية التحتية والموارد المتاحة، وتكون بدلاً من ذلك مدفوعة برغبة الحكومة في الحصول على أحدث المعدات. ونتيجة لذلك، غالبًا ما يتم اختيار المسرعات الخطية الأكثر تعقيدًا على آلات المعالجة عن بعد بالكوبالت 60 الأبسط. ومع الحفاظ على رغبة المجتمع الدولي في التخلص التدريجي من استخدام العلاج عن بعد بالكوبالت 60، أدى الانقطاع المتكرر للتيار الكهربائي إلى حدوث اضطرابات في تشغيل المسرع الخطي في بعض البلدان الأفريقية. بالإضافة إلى ذلك، تزيد العملية الداخلية البطيئة لطلب الدعم الفني وصيانة المسرعات الخطية، والافتقار إلى القدرات المحلية لتقديم هذا الدعم، وعدم توفر قطع الغيار من التأخير في تقديم علاج السرطان. وبناءً على دراسات الحالة الخاصة باللجنة، من المحتمل أن يلعب العلاج عن بُعد باستخدام الكوبالت 60 دورًا مهمًا في علاج السرطان في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل على الأقل في المستقبل المنظور.

التوصية ز: يجب أن تكون الجهود التي تبذلها حكومة الولايات المتحدة والمنظمات الوطنية والدولية الأخرى للحد من استخدام المصادر المشعة عالية النشاط على مستوى العالم وفي البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل مدفوعة بفحص الموارد والبنية التحتية والاحتياجات المحلية. وفي الحالات التي لا تستطيع فيها الموارد والبنية التحتية المحلية دعم البدائل، يجب أن تركز الجهود على تعزيز الأمن الإشعاعي للمصادر المشعة الحالية والمساعدة في بناء البنية التحتية ودعم مشاريع البحث والتطوير لتعديل التقنيات للعمل بفعالية في البيئات محدودة الموارد، على سبيل المثال، عند وجود مصدر كهرباء غير موثوق به.

تمتلك البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل حاجة متزايدة لقدرات وقدرات علاج السرطان. وتحتاج المساعدة التقنية الدولية إلى اتباع نهج شامل في مساعدة البلدان ذات الدخل المنخفض والمتوسط على بناء إمكانات وقدرات العلاج الإشعاعي التي تتضمن تلبية احتياجات صحية محددة؛ ودعم تدريب العاملين في المجال الطبي على استخدام تقنيات المسرع الخطي؛ وتوفير الموارد التقنية الكافية بما في ذلك إصلاح آلات المسرع الخطي وتحسين موثوقية إمدادات الكهرباء. وفي البلدان أو المراكز الطبية حيث لا يمكن استبدال العلاج عن بُعد بالكوبالت 60 لتحل محلها تقنيات المسرع الخطي، يجب أن تركز الجهود على تقديم المساعدة لتحسين سلامة وأمن المصادر المشعة.

تشير اللجنة أيضًا إلى توافر فرصة سوقية متنامية في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل لمصنعي التقنيات البديلة التي يمكن أن تعمل بفعالية دون الحاجة إلى إصلاحات متكررة والاعتماد فقط على الكهرباء من الشبكات غير المستقرة. استثمرت شركتان كبيرتان على الأقل، وشركات مصنعة للأجهزة الطبية للعلاج بالأشعة، في أبحاث وتطوير الأجهزة التي يمكن أن تعالج تحديات البنية التحتية في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل التي غالبًا ما تمنع التشغيل الطبيعي لمسرع خطي. وفي الولايات المتحدة، استثمرت الشركات الأصغر أيضًا، بدعم من الإدارة الوطنية للأمن النووي، في أبحاث ولتطوير الآلات التي يمكن أن تعالج تحديات البنية التحتية في البلدان المنخفضة والمتوسطة الدخل.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

5

المصادر المشعة والتقنيات البديلة في التعقيم

يصف هذا الفصل المبادئ (القسم 5-1) واستخدام المصادر المشعة والتقنيات البديلة في التعقيم. وتشمل الاستعمالات التي جرى مناقشتها تعقيم الأجهزة الطبية ومنتجات الرعاية الصحية للتخلص من الكائنات الحية الدقيقة (القسم 5-2)، ومشعات المنتجات الغذائية والزراعية للتخلص من البكتيريا الضارة ومجموعة متنوعة من الكائنات الدقيقة والحشرات أو لإطالة عمرها الافتراضي (القسم 5-3)، والتعقيم من الآفات لإدارة تكاثرها (القسم 5-4). ولا تشكل الإشارات إلى تقنيات محددة وفي بعض الحالات إلى منتجات تجارية وجهات تصنيع محددة بالضرورة أو تعني مصادقة اللجنة عليها.

5-1 مبادئ التعقيم

يُشتق الإشعاع لاستعمالات التعقيم عادة من أحد المصادر الثلاثة: أشعة غاما (الكوبالت 60)، ومسرعات شعاع الإلكترون (حزمة أشعة الإلكترون)، والمسرعات التي تنتج الأشعة السينية للإشعاع. ويتم عادة تعبئة المواد المراد تعقيمها على ناقل ينقلها بسرعة خاضعة للسيطرة من منطقة التحميل إلى منطقة العلاج حيث يتم إشعاعها ثم إعادتها إلى منطقة التفريغ. ويتشابه التعقيم بواسطة أشعة غاما وشعاع الإلكترون والأشعة السينية إلى حد كبير من حيث نقل الطاقة والتفاعل مع المادة (راجع الملحق و). وترتبط الاختلافات الرئيسية في الأساليب المختلفة بمعدل الجرعة ووقت التعريض وعمق الاختراق وتوافق المنتج.

تنبعث أشعة غاما من مصدر كوبالت 60 في جميع الاتجاهات، بينما يتم توجيه فوتونات الأشعة السينية ذات الطاقة العالية وأشعة الإلكترون نحو المنتج المراد تشعيعه. وبالتالي، بافتراض تدفق الإلكترونات وأشعة غاما نفسه، فإن معدلات جرعة الشعاع الإلكتروني أعلى بكثير من معدلات جرعة أشعة غاما، مما يؤدي إلى تقليل أوقات التعرض بشكل كبير (ثوانٍ مقابل دقائق أو ساعات) والسماح بإنتاجية أعلى. ويماثل اختراق الأشعة السينية عالية الطاقة المستخدمة في التعقيم اختراق أشعة غاما نفسه. وبالتالي، فإن المعالجات تتمتع باتساق مماثل، يتم التعبير عنه عادة بنسبة بين الحد الأقصى والحد الأدنى للجرعة (نسبة تجانس الجرعة أو DUR) المودعة في تكوين التشعيع. ويسهل هذا تلبية كل من الجرعة المطلوبة للتعقيم والبقاء أقل من الجرعة القصوى التي يتحملها المنتج.

وتكون قدرة اختراق الإلكترونات أقل من قدرة أشعة غاما. ومع ذلك، لا يعني هذا أن التعقيم بأشعة الإلكترون قاصر في الاستعمال على المنتجات منخفضة الكثافة أو الأصغر. ويمكن تعقيم العديد من المنتجات بشكل مُرضٍ عن طريق حزمة أشعة إلكترون باستخدام نسبة تجانس الجرعة مقبولة من خلال إعادة تغليف المنتج في صناديق فردية لتقليل الحاجة إلى عمق اختراق كبير. وهذا على عكس علاجات الأشعة السينية حيث يمكن معالجة المنتجات بشكل جماعي مباشرة على المنصات وعلاجات أشعة غاما حيث تتم معالجة المنتجات عادةً في حقائب أو ناقلات. وقد تحقق الاستراتيجيات الإضافية مثل تعريض المنتج من جانبين باستخدام حزمة أشعة إلكترون مزدوجة جرعات التعقيم المطلوبة في جميع أنحاء المنتج بجرعة قصوى مقبولة.

من الممكن أن تعمل مرافق التشعيع المستخدمة في التعقيم على أساس تعاقدي أو دمجها في خط إنتاج الشركة (مرافق داخلية). وتكون معظم مرافق التشعيع عبارة عن منشآت تعاقدية مصممة لتعقيم منتجات محددة لكنها توفر المرونة والتكيف مع احتياجات

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

العملاء. أي، يمكن استخدام مرافق التشعيع التعاقدية للتعقيم الذي يخدم أغراضًا متعددة، ويتم تعديل الجرعات اعتمادًا على المنتجات التي تتطلب العلاج (راجع الجدول 5-1 لمتطلبات الجرعة النموذجية في التعقيم). ويوجد جزء أصغر من مرافق التشعيع داخليًا؛ أي أنها مملوكة ومدارة من قبل الشركة التي تعد أيضًا مزود المنتج الذي تعرض للإشعاع. تهيمن شركتان، Steris وSterigenics، على سوق التشعيع العالمي التعاقدي، وتتحكمان معًا في حوالي 85 في المائة من سوق التعقيم. وتعد الشركة الأم لشركة Sterigenics هي Sotera Health، التيتمتلك أيضًا شركة Nordion، أكبر مورد عالمي للكوبالت 60. ويعمل سوق التعقيم، خاصة للأجهزة الطبية، بكامل طاقته أو بالقرب منها[1] لكن الصناعات التي تخدمها هذه المرافق آخذة في النمو.

تقليديًا، كان الكوبالت 60 هو النظائر المشعة الأكثر استخدامًا في التعقيم الصناعي. وتُستخدم المشعات الصناعية عالية النشاط (1-5 ميغا كوري [37–185 بيتا بيكريل]) لتعقيم الأجهزة الطبية لأنها يمكن أن توفر جرعات عالية ويمكن أن تحقق إنتاجية كبيرة من المنتج. ويمكن أيضًا استخدام المشعات عالية النشاط في استعمالات أخرى بما في ذلك إزالة التلوث من العبوات ومستحضرات التجميل والمستحضرات الصيدلانية والألعاب على شكل حيوانات أليفة، ونادرًا ما تستخدم في الصحة النباتية وتقنية الحشرات العقيمة. ويوجد تكوين خاص من المشعات الصناعية عالية النشاط هو المشع البانورامي. وتتمتع المشعات البانورامية بأعلى نشاط إجمالي لجميع المصادر المشعة. ويوجد ما يقرب من 98 في المائة من نشاط المصدر المدني في الولايات المتحدة في شكل الكوبالت 60، ويرجع ذلك في الغالب إلى هذه المشعات عالية النشاط (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008). وتُستخدم المشعات البانورامية في المقام الأول لتعقيم المنتجات والأجهزة الطبية ذات الاستخدام الواحد (حوالي 70 في المائة من استخدامها)، لكنها تُستخدم أيضًا لتعقيم المنتجات الأخرى.

داخل المشع البانورامي، تُوضع مصادر الكوبالت 60 في مصفوفة مستوية تبلغ مساحتها بضعة أمتار مربعة. ويتم وضع كريات الكوبالت الفردية في قضبان فولاذية تسمى "أقلام الرصاص" مرتبة في رف يستوعبها في شكل مسطح. ويبقى المنتج المراد تشعيعه في عبوته الأصلية ويبقى إما على منصات نقالة أو يوضع على علب كرتون يتم نقلها في حقائب. وللاستفادة من فوتونات غاما بأكبر قدر ممكن من الكفاءة ولجعل توزيع الجرعة موحدًا قدر الإمكان، يحيط نظام النقل بالمصدر على كلا الجانبين وتنتقل المنتجات على مستويات متعددة في مسارات متعددة. وعند سحبه، يتم حماية المصدر إما بالمياه (تخزين رطب) أو بواسطة درع مثل الرصاص أو مادة أخرى مناسبة (تخزين جاف). ونظرًا لأن الفوتونات تنبعث في جميع الاتجاهات، في المتوسط يترسب حوالي 30 في المائة فقط من الطاقة المنبعثة في المنتج (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، بيانات النشرة الإخبارية). ويحدث تشعيع المنتجات داخل مستودع معزول، عادة ما يكون عبارة عن حاوية ذات درع خرساني سميك، لحماية العمال من الإشعاع.

تُستخدم معظم المشعات الصناعية منخفضة النشاط (~1 ميغا كوري [37 بيتا بيكريل]) لتشعيع الطعام، لأن هذا الاستعمال يتطلب عادة جرعة أقل ومعدلات إنتاجية أقل. ويمكن أيضًا أن توفر المشعات منخفضة النشاط جرعات مناسبة لاستعمالات التعقيم الأخرى، لكن بسرعة أبطأ.

الجدول 5-1 التشعيع النموذجي ونطاق الجرعة

المنتج	الغرض من التشعيع	نطاق الجرعة النموذجية (كيلوغراي)
منتجات الرعاية الصحية	التعقيم	15–30
تقنية الحشرة العقيمة	التعقيم التناسلي لمكافحة الآفات	0.1-0.5
اللحوم والدواجن والأسماك	تأخير التلف، وقتل بعض البكتيريا المسببة للأمراض (مثل السالمونيلا)	1–7
التطهير النباتي	تعطيل الحشرات	0.1-1
البهارات والتوابل الأخرى	قتل مجموعة متنوعة من الكائنات الحية الدقيقة والحشرات	1–30

المصدر: مقتبس ومنقح بواسطة الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2006.

[1] أشارت شركة Nordion في ورقة فنية أخيرة (نورودين (Nordion)، 2021) إلى وجود مجال للنمو في سعة المعالجة، حوالي 50 في المائة، في منشآت غاما الموجودة بالفعل.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

توفر الأقسام أدناه بعض المعلومات حول التقنيات والاتجاهات المحددة لاستعمالات التعقيم المختلفة.

2-5 تعقيم الأجهزة الطبية

تبلغ قيمة سوق الأجهزة الطبية في الولايات المتحدة 156 مليار دولار وتنمو بنسبة 5-7 في المائة سنويًا[2] بسبب زيادة الطلب على الأجهزة الطبية الحالية وبسبب توفر منتجات جديدة. ويجب تعقيم العديد من الأجهزة أحادية الاستخدام بعد التصنيع. ويبلغ معدل النمو السنوي لسوق الولايات المتحدة لتعقيم الأجهزة الطبية معدل نمو سوق الأجهزة الطبية نفسه. وتشبه الاتجاهات العالمية في تعقيم الأجهزة الطبية تلك الموجودة في الولايات المتحدة. وتسارع الطلب على تعقيم المعدات الطبية أحادية الاستخدام في عام 2020 بسبب جائحة فيروس كورونا (كوفيد-19) والحاجة إلى المكونات التي تُستخدم لمرة واحدة لاختبار المستلزمات واللقاحات.

على الرغم من أن التعقيم يمثل نسبة صغيرة من تكلفة إنتاج الجهاز الطبي، إلا أنه يعتبر خطوة معالجة حيوية في تصنيع الأجهزة الطبية وله تأثيرات مباشرة على القدرة على تسويق المنتج. ويتم تطوير وتصنيع العديد من الأجهزة الطبية والمنتجات الأخرى بطريقة تعقيم مختارة. وسيتطلب أي تغيير في عملية التعقيم تعديلات في تصميم المنتج وإعادة التحقق من المنتج وتعبئته وكذلك عملية التعقيم نفسها. ويتولى كبار مصنعي المنتجات الطبية (حوالي 20 في المائة من السوق الكلي) تشغيل مرافق التعقيم الخاصة بهم بالإضافة إلى التعاقد مع مقدمي خدمات التعقيم من الأطراف الخارجية. وتتعاقد الشركات المصنعة الصغيرة معهم للحصول على خدمات التعقيم.

تتطلب إدارة الغذاء والدواء تعقيم جميع الأجهزة الطبية وأجهزة طب الأسنان الغازيَة بما في ذلك المحاقن والقفازات الجراحية والمفاصل الاصطناعية والأجهزة القابلة للزرع مثل جراحة العظام وصمامات القلب. بالإضافة إلى ذلك، يجب تعقيم العديد من المواد أحادية الاستخدام (مثل الأنابيب والأكياس والمرشحات) المستخدمة في إنتاج الأدوية واللقاحات بطريقة وعملية معتمدة. وتتطلب إدارة الغذاء والدواء بشكل عام مستوى ضمان تعقيم من 10^{-6} للمنتجات الطبية الغازية.[3] لكن مستوى ضمان تعقيم للأجهزة الطبية غير الغازية أقل، 10^{-3} أو 1 من كل 1,000 احتمال للعثور على جهاز واحد غير معقم. ويتم التعرف على جميع طرق التشعيع الثلاثة (غاما وأشعة الإلكترون والأشعة السينية) في معيار المنظمة الدولية لتوحيد المقاييس 11137 المعمول به، وبالتالي فإن نقل جرعة التعقيم بين الأساليب الثلاثة معترف به على نطاق واسع. ومع ذلك، لا تعترف إدارة الغذاء والدواء بتكافؤ الأساليب الثلاثة من حيث التوافق الحيوي.

يعد التقسيم الحالي لأساليب التعقيم التي تستخدمها الصناعة الطبية من حيث الانتشار هو 50 في المائة بالتبخير بغاز أكسيد الإيثيلين، و40 في المائة بإشعاع غاما الكوبالت 60، وإشعاع أشعة الإلكترون 10 في المائة، وأقل من 1 في المائة (بما في ذلك إشعاع الأشعة السينية). لذلك يستمر التشعيع باستخدام أشعة غاما في الهيمنة على سوق التعقيم بالإشعاع (حوالي 80 في المائة من جميع أساليب التشعيع)، تليها أشعة الإلكترون (حوالي 20 في المائة)، والأشعة السينية بنسبة صغيرة جدًا. ويوضح الجدول 5-2 بعض المزايا والعيوب العامة لهذه الأساليب المختلفة.

1-2-5 تقنيات النظائر المشعة

يُستخدم الكوبالت 60 لتعقيم الأجهزة الطبية منذ الستينيات. وتوجد معرفة كبيرة بتأثيراته على كل من الحد من الكائنات الحية الدقيقة للوقاية من الأمراض والتغيرات في خصائص المواد، فضلاً عن خبرة كبيرة في استخدامه. ويسهل استخدام المعدات المستخدمة في التعقيم باستخدام الكوبالت 60 وصيانتها وهي موثوق بها بشكل عام. الأهم من ذلك، يتمتع مصنعو الأجهزة الطبية بخبرة في المتطلبات للتحقق من صحة طريقة التعقيم هذه للمنتجات الجديدة.

يوجد ما يقرب من 200 مرفق كبير لتشعيع غاما في جميع أنحاء العالم في أكثر من 50 دولة تُستخدم في الغالب لتعقيم الأجهزة الطبية. ونعرض تمثيلاً تخطيطيًا لمرفق تعقيم غاما في الشكل 5-1. ويوجد في هذه المرافق ما يقدر بنحو 400 ميغا كوري من الكوبالت 60،[4] لكن وفقًا لبيان حديث من Nordion، تتجاوز السعة المرخصة 600 ميغا كوري، مما يعني أن هناك مجالًا للنمو في المشعات الحالية (نورديون (Nordion)، 2021). وتعترف الورقة الفنية نفسها بأن الطلب الحالي على الكوبالت 60 يتجاوز العرض بحوالي 5 في المائة نورديون (Nordion)، 2021). وتستثمر شركة Nordion في توسيع طاقتها الإنتاجية للكوبالت 60 في المفاعلات الحالية والجديدة لتلبية الطلب الحالي والمتوقع.

[2] كاثلين هوفمان، شركة سوتيرا للخدمات الصحية، عرض تقديمي أمام اللجنة في 13 أكتوبر 2020.

[3] يعني هذا احتمال 1 من مليون للعثور على وحدة غير معقمة.

[4] وتمتلك الولايات المتحدة أكثر بقليل من 50 في المائة من إجمالي قدرة التعقيم باستخدام الكوبالت 60 المُثبت الموجود في 50 مرفق تشعيع تجارية.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

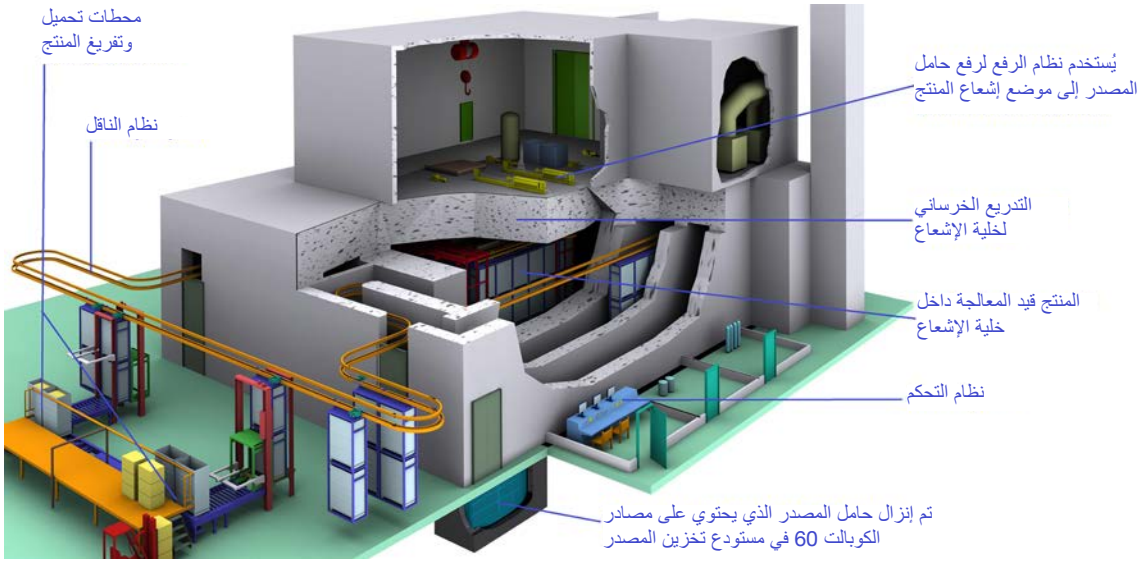
Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الجدول 5-2 مقارنة بين معظم الأساليب الشائعة في التعقيم

	التبخير بأكسيد الإيثيلين	إشعاع غاما	التشعيع بحزمة أشعة الإلكترون	التشعيع بالأشعة السينية
المنتجات النموذجية	المنتجات الحساسة للتشعيع بما في ذلك المجموعات الجراحية، ومجموعات الأنابيب، ومعدات ثقب القصبة الهوائية، والقسطرة	المحاقن والستائر وملابس الجراحة والقفازات والدباسات وضمادات الجروح والغرسات بما في ذلك الدعامات وأجهزة تنظيم ضربات القلب وأجهزة تقويم العظام والمنتجات الغذائية	الأجهزة الطبية التي تتطلب اختراقًا محدودًا، وأدوات المختبر، ومستلزمات الغرف النظيفة، والمناديل الورقية، والمنتجات الغذائية	يحتمل أن يكون مشابهًا لغاما لكن القبول الحالي محدود
تقسيم السوق	~ 50%	~ 40%	~ 10%	<1%
المزايا	القدرة على اختراق منصات المنتجات النهائية؛ خيار جيد للمنتجات الحساسة للإشعاع	أوقات المعالجة السريعة؛ اختراق جيد للمنتجات النهائية	أسرع أوقات المعالجة	أوقات المعالجة المحتملة السريعة؛ اختراق جيد للمنتجات النهائية
السلبيات	أوقات معالجة أطول؛ بقايا أكسيد الإيثيلين؛ استخدام غازات خطرة	لا يمكن معالجة المنتجات الحساسة للإشعاع؛ استخدام مادة الكوبالت 60 المشعة	لا يمكن معالجة المنتجات الحساسة للإشعاع؛ اختراق محدود للمنتج	لا يمكن معالجة المنتجات الحساسة للإشعاع؛ التوافر الحالي؛ قبول محدود؛ عدم كفاءة الطاقة

المصدر: تم التعديل من عرض تقديمي بواسطة كاثلين هوفمان، Sotera Health Services, LLC، 13 أكتوبر 2020.

يمكن تحقيق توسيع القدرة الإنتاجية لمنشأة تضم مصادر مشعة مثل مرفق تعقيم غاما باستخدام الكوبالت 60 ببساطة عن طريق إضافة عناصر مصدر إلى تلك الموجودة بالفعل في المرفق. وهذه ميزة على عملية التوسعة لمرفقات أشعة الإلكترون والأشعة السينية، التي يتم تصميمها عادة للعمل بسعة محددة بناءً على التقنية المثبتة بها. وقد تتطلب السعة المتزايدة إضافة خطوط إنتاج وتوسيع المرفق أو إضافة مرافق جديدة لاستيعاب حزمة أشعة إلكترون أو جهاز أشعة سينية مثبت آخر.



الشكل 5-1 جهاز تشعيع غاما النموذجي.
المصدر: الصورة مجاملة من شركة SQHL Radiation Engineering Technology Co., Ltd.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

تحث عدة عوامل الصناعة والمستخدمين على البحث عن بدائل لتشعيع غاما في التعقيم. وتشمل هذه العوامل تقليل الاعتماد على طريقة واحدة وندرة إمدادات الكوبالت 60 واللوائح المتزايدة التي تحكم نقل الكوبالت 60 والاستخدام التجاري وزيادة سعر الكوبالت 60.

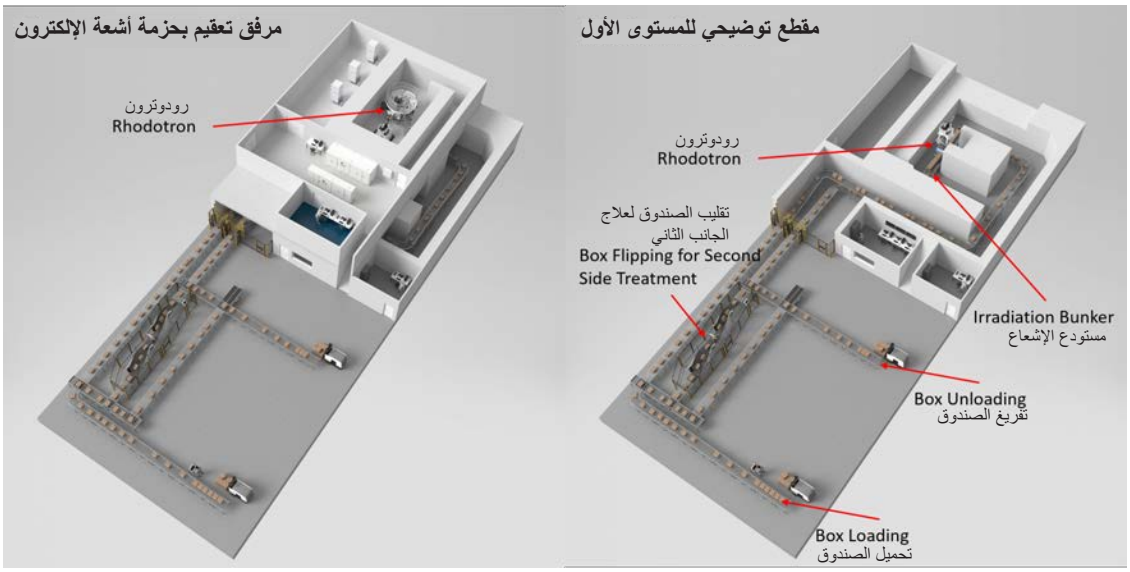
2-2-5 التقنيات البديلة

كما ذكرنا سابقًا، يعد التشعيع بحزمة أشعة الإلكترون والتشعيع بالأشعة السينية والتبخير بغاز أكسيد الإيثيلين من الأساليب المستخدمة حاليًا لتعقيم الأجهزة الطبية. وليست هذه الأساليب بالضرورة بديلاً مباشرًا لبعضها البعض. ويلخص الجدول 5-2 ويناقش إيجابيات وسلبيات هذه الأساليب المختلفة في الأقسام التالية.

التشعيع بحزمة أشعة الإلكترون

يوجد اليوم حوالي 75 من مرافق أشعة الإلكترون عالية الطاقة الموجودة على مستوى العالم في 12 دولة وحوالي 15-20 من مرافق حزمة أشعة الإلكترون المخصصة لتعقيم الأجهزة الطبية (الرابطة الدولية للإشعاع (IIA)، 2017) في الولايات المتحدة. ويوضح الشكل 5-2 تمثيلًا تخطيطيًا لمرفق تشعيع بحزمة أشعة الإلكترون. ويتم إجراء حوالي 10 في المائة من تعقيم الأجهزة الطبية أحادية الاستخدام باستخدام حزمة أشعة الإلكترون. ومن المحتمل أن يكون هذا النقص في الاستخدام بسبب الاستثمار الرأسمالي الكبير اللازم للانتقال إلى هذه التقنية ودراسات التكافؤ المطلوبة التي يجب إجراؤها حتى تعترف إدارة الغذاء والدواء والجهات التنظيمية في البلدان الأخرى بالتكافؤ مع تعقيم غاما من حيث التوافق البيولوجي.

نما استخدام حزمة أشعة الإلكترون في التعقيم على مدار العقد الماضي بوتيرة سريعة (سوغدن (Sugden)، 2019). ووفقًا لأحد المصادر، شهدت الفترة من عام 2005 إلى عام 2015 تركيب 4 أنظمة حزمة أشعة إلكترون في المتوسط سنويًا، ومن 2016 إلى 2019، ارتفع العدد إلى حوالي 12 نظامًا سنويًا. وبناءً على سيناريوهات التوقع المختلفة، من الممكن تركيب 200 إلى 400 نظام إضافي تعمل بحزمة أشعة الإلكترون خلال السنوات العشر القادمة.[5] ومن المتوقع أن يستمر استخدام حزمة أشعة الإلكترون في التعقيم في النمو بسبب الضغط لاستبدال الإشعاع باستخدام الكوبالت 60 أو أكسيد الإيثيلين، وكذلك بسبب التحسينات في تقنية المسرعات.



الشكل 5-2 مرفق مسرع التشعيع بحزمة أشعة الإلكترون Rhodotron®.
المصدر: IBA Industrial.

[5] اتصال عبر البريد الإلكتروني بين كريستوف ماليس، IBA، وأورانيا كوستي، الأكاديميات الوطنية، في 1 فبراير 2021.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

تعمل المسرعات الخطية التقليدية المستخدمة في التعقيم الصناعي في درجات الحرارة المحيطة العادية. وتحفز طاقة الترددات اللاسلكية التي تستخدمها هذه المسرعات تيارات كهربائية في سطح التجاويف المتسارعة، التي تولد الحرارة وتبدد بعض الطاقة المقدمة إلى التجويف. ويؤدي توليد الحرارة هذا إلى إجبار المسرّعات على العمل في وضع نبضي بطاقة فورية عالية عند ترددات نبضية من 100 إلى 500 هرتز، لكن بمتوسط طاقة منخفض. ويعني تبديد الطاقة أن الكفاءة الكلية للطاقة بشكل عام أقل من 50 في المائة.

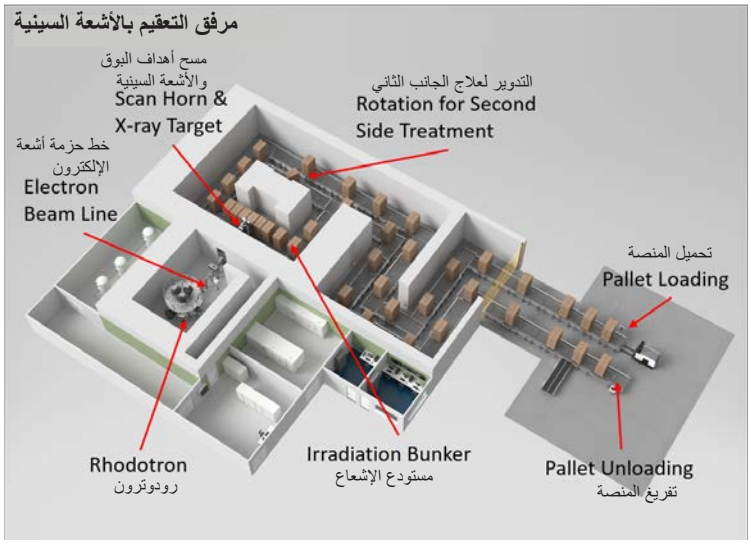
تُستخدم المسرعات الخطية فائقة التوصيل في علم الاكتشاف في أماكن مثل المختبرات الوطنية. وتبدد هذه المسرعات القليل جدًا من مدخلات الطاقة كحرارة. ونتيجة لذلك، يمكن أن تصل الكفاءات الإجمالية إلى 80 في المائة أو أكثر. بالإضافة إلى ذلك، من الممكن أن تكون الأشعة الناتجة مستمرة. ويتيح هذا حزم أشعة ذات قدرة متوسطة أعلى من المسرعات الخطية التقليدية ويمكنه التغلب على عدم كفاءة عملية الأشعة الانكباحيه لإنتاج حزمة أشعة سينية مفيدة. وتتواجد المسرعات الخطية فائقة التوصيل حاليًا في مستوى الجاهزية التقنية 4 لكن يتم تطويرها للاستعمالات التجارية.

تمثل كل من Mevex وIBA Industrial المورّدين الرئيسيين لمسرعات التعقيم. وتنتج Mevex المسرعات الخطية التقليدية. ومن الممكن أن ينتج المسرع الخطي حزمة أشعة إلكترون أو يمكن استخدامه مع نظام محول الأشعة السينية الموجود في نهاية نظام المسح لتحويل الإلكترونات إلى أشعة سينية. وطورت IBA مسرعًا باسم Rhodotron®، الذي يعيد تدوير الأشعة عدة مرات عبر قطر تجويف التسارع الحلقي. وبعد كل تقاطع، يثني المغناطيس حزمة الأشعة خلال 190 درجة تقريبًا لتقاطع آخر، مما يخلق مسارًا على شكل بتلة زهرة. وعندما تصل الحزمة إلى 7.5 أو 10 ميغا إلكترون فولت، تخرج الأشعة من المسرع وتستمر في تشعيع المنتج. ويمثل كل موقع من مواقع المغناطيس العكسي فرصة لمنفذ خروج حزمة أشعة. وطورت IBA أيضًا نظام Rhodotron® Duo الذي يستفيد من الحدود التنظيمية للأشعة السينية (7.5 ميغا إلكترون فولت) والإلكترونات (10 ميغا إلكترون فولت). ويحتوي نظام Rhodotron® Duo على منفذ خروج عند كل من هذه الطاقات من خلال خطوط أشعة منفصلة، وبالتالي يسمح لمسرع واحد بتوفير كل من الأشعة السينية وحزمة أشعة الإلكترون في وقت واحد.

تقنية الأشعة السينية

من الممكن أن تكون المسرعات المستخدمة كمصادر فوتونية عالية الطاقة (1-10 ميغا إلكترون فولت) البديل الأكثر مباشرة لتشعيع غاما لأن اختراق الإشعاع في الطريقتين مماثل. ومع ذلك، كما ناقشنا في الملحق (و)، فإن التعقيم باستخدام الأشعة السينية غير فعال. ولتوليد 15 كيلوواط من طاقة الأشعة السينية، يلزم ما لا يقل عن 120 كيلو واط من طاقة حزمة أشعة الإلكترون. وكانت الحاجة إلى حزمة أشعة إلكترون قوية ويمكن الاعتماد عليها وعالية القدرة عاملاً أساسيًا في تأخير اعتماد الأشعة السينية للتعقيم.

وتتوافر أنظمة التعقيم بالأشعة السينية تجاريًا، لكنها محدودة الاستخدام. ونعرض تمثيلاً تخطيطيًا لمرفق تعقيم بالأشعة السينية في الشكل 5-3. وتمثل تقنية الأشعة السينية حاليًا أقل من 1 في المائة من حجم تعقيم الأجهزة الطبية. وحلل مستند تقني صدر في عام 2016 نشرته IBA، إحدى شركات التوريد الرئيسية للمسرعات، الاختلافات بين التشعيع بالأشعة السينية وأشعة غاما لأغراض التعقيم



الشكل 5-3 مرفق الأشعة السينية Rhodotron® TT1000.
المصدر: IBA Industrial.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

(ديثير (Dethier)، 2016). وكان تقييم IBA أن معضلة "الدجاجة والبيضة" قد أعاقت اعتماد التشعيع بالأشعة السينية، لأن مصنعي الأجهزة الطبية وقفوا ضد الالتزام بهذه التقنية بسبب الافتقار إلى مرافق الأشعة السينية التشغيلية في حين أن مقدمي خدمات التعقيم لم يستثمروا في مرافق الأشعة السينية بسبب عدم وجود التزام من مصنعي الأجهزة الطبية، مما أدى إلى ركود السوق. وأشار تحليل IBA إلى أن التشعيع بالأشعة السينية قد يكون منافسًا من حيث التكلفة لتشعيع غاما، خاصة لمستويات النشاط الأكبر من 1.4 ميغا كوري (51.8 بيتا بيكريل) (ديثير (Dethier)، 2016). وأظهر تحليل حديث لاستثمارات الميزانية وتكاليف التشغيل لمرفق تشعيع بأشعة غاما والأشعة السينية مخصص لتعقيم الأجهزة الطبية أن التكاليف (الاستثمار الأولي وتكاليف التشغيل في السنة الأولى) لمرفق الأشعة السينية كانت حوالي 17 مليون دولار، والتي تكون 2.5 مرة أقل من تلك الخاصة بمرافق التعقيم بغاما.[6] ولم تتحقق اللجنة من دقة أي من هذين التحليلين. وإذا كانا دقيقين، فقد نقلت التكلفة الحالية للكوبالت 60 نقطة التكلفة التنافسية إلى 1 ميغا كوري. ومن الفوائد التشغيلية المحتملة الإضافية لمرافق حزمة أشعة الإلكترون إمكانية نشر حزمة أشعة الإلكترون بما يتماشى مع إنتاج المنتج قبل تعبئة المنتجات. وسيوفر هذا ميزة محتملة كبيرة لاستخدام حزمة أشعة الإلكترون غير الممكنة مع التشعيع بغاما.

يعمل مرفق التعقيم بالأشعة السينية في دانيكن، بسويسرا منذ عام 2012. وفي هذا المرفق، يحتوي جهاز حزمة أشعة الإلكترون Rhodotron® بقدرة 700 كيلو وات على هدف ثابت من التنتالوم المبرد بالماء لتحويل الإلكترونات المتسارعة إلى أشعة سينية. ومع ذلك، فإن وجود مرفق واحد فقط للأشعة السينية تسبب في مشاكل مع العملاء المتراكمين بسبب مخاوف تتعلق باستمرارية العمل في حالة انقطاع العملية. وفي الآونة الأخيرة، أعلن مقدمو خدمات التعقيم عن نيتهم الاستثمار في مرافق الأشعة السينية. وفي عامي 2019 و2020، أعلنت شركة Steris AST، التي تمتلك وتدير مرفق دانيكن، عزمها فتح مرافق إضافية للأشعة السينية في ألمانيا وماليزيا وهولندا وتايلاند وثلاثة في الولايات المتحدة. وبالإضافة إلى ذلك، أضافت شركة Steri-Tek الأشعة السينية إلى خدمات حزمة أشعة الإلكترون الحالية في فريمونت بكاليفورنيا، في عام 2019. وأعلنت الشركة أيضًا عن مرفق جديد يتضمن الأشعة السينية في دالاس في تكساس. وسيعتمد ما إذا كانت تقنية الأشعة السينية ستستحوذ على حصة كبيرة في السوق من تقنيات أشعة غاما أو حزمة أشعة الإلكترون لتعقيم الأجهزة الطبية، على عدد من العوامل، بما في ذلك نمو السوق.

التبخير بغاز أكسيد الإيثيلين وطرق أخرى

في أمريكا الشمالية، يتم إجراء حوالي 50 في المائة من تعقيم الأجهزة الطبية أحادية الاستخدام باستخدام التبخير بغاز أكسيد الإيثيلين. ويتضمن التبخير بغاز أكسيد الإيثيلين تعريض المنتج المعبأ على منصات داخل حجرة مُحكمة الإغلاق ومرطبة تتنوع في الحجم لكن يمكن أن تصل إلى 70 م^3. ويعتبر غاز أكسيد الإيثيلين مناسبًا لتعقيم الأجهزة الطبية والمنتجات الأخرى التي لا يمكن معالجتها بالإشعاعات الأيونية أو أي طرق أخرى نظرًا لحجمها أو شكلها أو تعقيدها أو تركيبها المادي. وتشمل هذه المنتجات القسطرة وأنابيب الحقن في الوريد والبالونات داخل القصبة الهوائية وتصوير الأوعية. ومع ذلك، توجد ضغوط لتقليل مستويات الانبعاث والغاز المتبقي على المنتجات المعقمة الناتجة عن عمليات التبخير بغاز أكسيد الإيثيلين. ومن المتوقع أن تصدر وكالة حماية البيئة مقترحًا بشأن معايير الانبعاثات لعمليات التعقيم التجاري بغاز أكسيد الإيثيلين في عام 2021. ومن الممكن أن يؤدي هذا الاقتراح إلى تعقيم المزيد من المنتجات التي يتم تعقيمها حاليًا باستخدام غاز أكسيد الإيثيلين بطرق أخرى بما في ذلك التشعيع.

توجد خيارات أخرى لتعقيم الأجهزة الطبية. على سبيل المثال، تم استخدام البخار والحرارة الجافة في تعقيم المنتجات لعقود من الزمن، لكن درجات الحرارة المرتفعة المستخدمة في هذه الأساليب تحول دون معالجة العديد من المواد الحساسة للحرارة. ويظهر بيروكسيد الهيدروجين وثاني أكسيد النيتروجين المتبخّرين كبدائل لغاز أكسيد الإيثيلين، وبدأت بعض الشركات التجارية في تقديم هذه الأساليب كجزء من خدمات التعقيم.

3-2-5 اعتبارات اعتماد التقنية البديلة

أدت المخاوف المتزايدة بشأن توفر مصدر الكوبالت 60 ومستويات انبعاثات غاز أكسيد الإيثيلين والبقايا، إلى جانب عوامل أخرى، إلى الضغط على موردي الأجهزة الطبية للبحث عن تقنيات بديلة لتلبية الطلب على تعقيم الأجهزة. ويتوقع العديد من ممثلي الصناعة الذين تحدثوا إلى اللجنة، بالإضافة إلى خبراء آخرين، أن استخدام التعقيم بحزمة إشعاع الإلكترون والأشعة السينية سيزداد لتغطية طلب السوق الذي قد لا يتم تغطيته بأشعة غاما. وتتفق اللجنة مع الاستنتاج العام الذي خلص إليه تقرير سابق مفاده أن تركيبات حزمة أشعة الإلكترون ستستمر، بالإضافة إلى أنه سيتم أيضًا تركيب العديد من أجهزة الإشعاع بالأشعة السينية في المستقبل القريب (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2019 أ). ولا تتوقع اللجنة انتقالاً كاملاً إلى التقنيات البديلة للتعقيم في العقد المقبل. وبدلاً

[6] الاتصالات بين شيرينكوف للاستشارات .S.C وأورانيا كوستي، الأكاديميات الوطنية، في 10 مارس 2021.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

من ذلك، من المتوقع أن تساهم جميع طرق تعقيم الأجهزة الطبية الرئيسية - غاما، وحزمة أشعة الإلكترون والأشعة السينية وغاز أكسيد الإيثيلين - في موثوقية السوق.

يعد الانتقال من تشعيع غاما إلى حزمة أشعة الإلكترون والأشعة السينية للتعقيم أمرًا سهلاً من الناحية النظرية لأن جميع طرق التعقيم المعتمدة معترف بها وفقًا لمعيار محدد (ISO 11137). ومع ذلك، فإن التعقيم باستخدام أشعة غاما من الكوبالت 60 أدى على مدى عقود إلى اكتساب خبرة والحصول على بيانات واسعة حول أداء المواد. ويوجد شح في هذه المعلومات بالنسبة لأداء المواد نفسها بعد التعقيم بحزمة أشعة الإلكترون والأشعة السينية. وسيحتاج المصنّعون الذين يفكرون في اعتماد تقنية بديلة إلى تحديد توافق المواد ومدى ملاءمة التقنيات البديلة والخضوع لدراسات إعادة التحقق لضمان معادلة التعقيم وعدم وجود تغيير في المواد. وقد يتطلب ذلك تقديم نموذج (k) 510 جديد لاستعمالات ما قبل التسويق أو ملاحق استعمال ما قبل التسويق، اعتمادًا على التصنيف التنظيمي للمنتج وتصميم المنتج أو التغييرات الأخرى المطلوبة. أيضًا، نظرًا لأنه يتم بيع العديد من المنتجات على مستوى العالم، فمن اللازم الحصول على موافقات متعددة. ولا يوجد توحيد في التنظيم الدولي، أو بالضرورة، في دراية الهيئات التنظيمية المختلفة بالطرق البديلة للتعقيم. وتعتبر إعادة التحقق عملية طويلة قد تستغرق سنوات ويمكن أن تشكل مخاطرة تجارية كبيرة. وتتجنب أسواق الرعاية الصحية المجازفة عمومًا نظرًا للعواقب المباشرة المحتملة على صحة الإنسان نتيجة للتغيرات في العمليات المطبقة.

للمساعدة في معالجة مشكلة فجوة المعلومات الموضحة أعلاه، نسقت مختبرات شمال غرب المحيط الهادئ الوطنية، بدعم من الإدارة الوطنية للأمن النووي، مشروعًا تعاونيًا مع مشاركة صناعة تعقيم الأجهزة الطبية بهدف جمع البيانات حول أداء أشعة غاما والتشعيع بحزمة أشعة الإلكترون والأشعة السينية لمجموعة واسعة من الأجهزة الطبية (فيفيلد وآخرون (.Fifield et al)، 2019). واستخدم الفريق، المعروف باسم Team Nablo،[7] جهازين تجاريين نموذجيين تم تعقيمهما حاليًا باستخدام إشعاع غاما بالكوبالت 60 وتعريضهما للإشعاع بأربع جرعات ذات صلة بالتعقيم. وتضمنت الأجهزة المختارة للتحليل مكونات تتكون من ستة مواد بوليمر مميزة شائعة الاستخدام في صناعة الأجهزة الطبية وتم اختبارها من حيث حدوث تغيير في الوظيفة واللون. وخلص الفريق إلى أن أساليب حزمة أشعة الإلكترون والأشعة السينية تعد بدائل قابلة للتطبيق لإشعاع غاما بالكوبالت 60 (فيفيلد وآخرون (Fifield et al.)، 2021). وسيوفر هذا التعاون الناجح والجهود المستمرة الأخرى التي يبذلها الفريق، بيانات خضعت للمراجعة بواسطة الأقران ومطلوبة لتقديم التقارير التنظيمية وهي نموذج لدراسات المقارنة المستقبلية.

يتطلب الانتقال من تشعيع غاما إلى التقنيات البديلة أيضًا تعديلات جوهرية في المرافق مع تكاليف انتقال من المتوقع أن تكون كبيرة. وتختلف هذه التكاليف اعتمادًا على ما إذا كان المرفق الذي يستخدم الكوبالت 60 الحالي ينتقل إلى تقنية بديلة، أو مرفق كوبالت 60 جديد أو مرفق تشعيع بتقنية بديلة أو تطوير عملية موازية عن طريق إضافة تقنية بديلة في مرفق حالي للتشعيع بالكوبالت 60. وكلفت الإدارة الوطنية للأمن النووي مختبرات ساندیا الوطنية (ساندیا) بفحص التكاليف والفوائد والتحديات المرتبطة بتشغيل مرفق تشعيع بانورامي صناعي بأشعة غاما مقارنة باستبدال مشع غير إشعاعي. وتجري الدراسة على مراحل ومن المتوقع أن تنتهي في صيف 2021. وفي ختام الدراسة، ستقدم ساندیا تقريرًا إلى الإدارة الوطنية للأمن النووي مع استراتيجية قرار للسماح للمنشأة بتحليل ما إذا كانت التقنية البديلة قد تكون خيارًا قابلاً للتطبيق. وسيتضمن التقرير أيضًا الدروس المستفادة للمشاركة المستقبلية في تبني التقنية البديلة.[8]

3-5 تشعيع الطعام

يمكن تعريض الطعام للإشعاع إما لأغراض السلامة أو الصحة النباتية. وتحتوي تلك العمليات والأهداف المميزة على بعض العناصر المشتركة، ولهذا السبب جرى مناقشتها معًا في هذا القسم.

تهدف معالجات سلامة الغذاء إلى تقليل انتقال الأمراض التي تنتقل عن طريق الأغذية وإطالة العمر الافتراضي للمنتجات ومنع الإنبات وإبطاء عملية النضج. ويهدف التطهير النباتي إلى حماية المحاصيل المحلية من الأنواع الغازية التي تنقلها الفواكه والخضروات والمنتجات الغذائية الأخرى عبر الحدود. ومكن أن تؤوي الفواكه والخضروات الطازجة مجموعة واسعة من الآفات، والتي ما لم يتم السيطرة عليها بشكل صحيح قد تنتشر على نطاق واسع، مما يؤدي إلى خسارة اقتصادية. ويمثل ذباب الفاكهة والفراشات والعث والبق الحشرات الأكثر شيوعًا التي تثير القلق في نقل المنتجات الطازجة. ولا يهدف التطهير النباتي إلى القتل، بل إلى وقف تطور أو تكاثر أي آفات قد تحملها المنتجات. ونظرًا لأن القتل ليس دائمًا هدف العلاج، فقد يتم العثور على آفات مستهدفة حية. ولذلك، من الضروري أن يضمن العلاج عدم قدرتها على التكاثر. ويمكن تطبيق معالجة المنتجات لأغراض الصحة النباتية في بلد المنشأ أو في ميناء الدخول أو أثناء العبور.

[7] إحياءً لذكرى صموئيل في نابلو، المعروف لدى الكثيرين في صناعة المعالجة بالإشعاع.

[8] جودي ليبرمان، مختبرات ساندیا الوطنية، عرض تقديمي أمام اللجنة في 25 فبراير 2021.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

ولعل الطريقة الأكثر شيوعًا لمعالجة الأغذية لأغراض السلامة هي الحرارة (البسترة). وتشمل الأساليب الأخرى المعالجة بالضغط العالي والتقنيات الناشئة بما في ذلك المجال النبضي والمعالجة فوق البنفسجية. وتمت الموافقة على استخدام التشعيع لسلامة الأغذية في 40 دولة، لكنه لا يزال محدودًا للغاية مع وجود تباين كبير بين البلدان فيما يتعلق بمقبوليته. وتعتبر الصين أكبر مستهلك للأغذية المعالجة بالإشعاع حيث تتم معالجة أكثر من مليون طن من المواد الغذائية حاليًا عن طريق الإشعاع سنويًا، بزيادة من 600,000 طن في عام 2015 (ميكسو (MeiXu)، 2021). ومع ذلك، حتى في الصين حيث يتم قبول تشعيع الطعام، فإنه لا يزال يستخدم فقط في عدد قليل من الاستعمالات المتخصصة، على سبيل المثال، لمعالجة منتجات الدجاج المخلل والتوابل والخضروات المجففة.

وافقت إدارة الغذاء والدواء على مجموعة متنوعة من الأطعمة لتعرضها للإشعاع في الولايات المتحدة بما في ذلك لحوم البقر ولحم الخنزير والدواجن والقشريات والفواكه والخضروات الطازجة والبيض السليم والتوابل والبهارات. ومع ذلك، يتم حاليًا تعريض القليل جدًا من الطعام للإشعاع في الولايات المتحدة لسلامة الأغذية ويرجع ذلك أساسًا إلى عدم قبول الجمهور للأغذية المعالجة بالإشعاع (راجع المناقشة في القسم 5-3-3). وينطبق الشيء نفسه على أوروبا حيث انخفض الإشعاع الغذائي في العقدين الماضيين. وتعد التوابل أكبر فئة من الأطعمة التي يتم تشعيعها في الولايات المتحدة. ويتم أيضًا تقديم الأطعمة المعالجة بالإشعاع للمرضى في المستشفى الذين يعانون من نقص المناعة بسبب المرض أو العلاج ولرواد الفضاء لتجنب الإصابة بالأمراض المنقولة عن طريق الغذاء في الفضاء.

تعد الطريقة الأكثر شيوعًا للتعقيم النباتي في الولايات المتحدة هي التبخير بالمواد الكيميائية، على سبيل المثال، بروميد الميثيل (حوالي 95 في المائة). وتمثل الأساليب الأخرى مثل الحرارة (44-48 درجة مئوية)، والبرودة (0-2 درجة مئوية)، والإشعاع مجتمعة تمثل 5 في المائة المتبقية. ويتم تطبيق المعالجة الحرارية والإشعاع والتبخير قبل شحن المنتجات الغذائية أو عند الوصول وعادة ما يتم ذلك خلال ساعات أو أقل. ويتم تطبيق العلاجات الباردة عادة أثناء النقل، حيث تستغرق من 12 إلى 22 يومًا لتصبح فعالة. وتعتمد طريقة التطهير النباتي المناسبة والبروتوكول الخاص بهذه الطريقة على الآفة ونوع المنتج الغذائي. التشعيع يوقف تطور الآفات؛ الطرق الأخرى لقتل الآفات (هالمان (Hallman)، 2007).

بغض النظر عن المنتج أو الاستعمال الغذائي، تنظم إدارة الغذاء والدواء استخدام الإشعاع على الأطعمة، كإضافات غذائية (على عكس العملية الفيزيائية) مع الإشراف على استخدامها المشترك مع وزارة الزراعة الأمريكية. وقررت إدارة الغذاء والدواء أن تشعيع غاما (باستخدام الكوبالت 60 أو السيزيوم 137) والأشعة السينية وحزمة أشعة الإلكترون آمنة وفعالة بالقدر نفسه لعلاجات تشعيع الأغذية المعتمدة، بما في ذلك الحد من مسببات الأمراض واستعمالات الصحة النباتية (وزارة الزراعة الأمريكية (USDA)، 2016). وتحدد إدارة الغذاء والدواء أيضًا متطلبات الملصقات الخاصة بالأغذية المعالجة بالإشعاع برمز رادورا (Radura) الدولي للإشعاع، إلى جانب البيان المناسب على الملصق الغذائي. ويجب وضع علامة على الأطعمة السائبة مثل اللحوم والبيض والفواكه والخضروات باستخدام رمز رادورا. ومع ذلك، لا تتطلب إدارة الغذاء والدواء أن تكون المكونات الفردية في الأطعمة متعددة المكونات مثل التوابل، موصوفة على هذا النحو.

يتم تحديد متطلبات الصحة النباتية لواردات الولايات المتحدة والشحنات الإقليمية من قبل وزارة الزراعة الأمريكية ويتم فرضها بواسطة هيئة فحص صحة الحيوان والنبات التابعة لوزارة الزراعة الأمريكية بالتعاون مع شركائها في الولايات. ويوجد أكثر من 150 مرفقًا محليًا لمعالجة الصحة النباتية معتمدًا من وزارة الزراعة الأمريكية في الولايات المتحدة وخارجها. ومن بين هذه المرافق، تستخدم ثلاثة مرافق استيراد فقط (مرفقان للتشعيع بحزمة أشعة الإلكتروني وواحد بالكوبالت 60) الإشعاع لأغراض الصحة النباتية. ويوجد أيضًا مرفق واحد يستخدم الكوبالت 60 ومرفق واحد يستخدم الأشعة السينية لمعالجة الشحنات الإقليمية. وعلى الصعيد الدولي، تمتلك وزارة الزراعة الأمريكية ثمانية مرافق تستخدم الكوبالت 60 ومرفقًا واحدًا يستخدم حزمة أشعة الإلكترون. وكانت البلدان الأخرى غير الولايات المتحدة التي استوردت سلعًا طازجة مطهرة عن طريق التشعيع هي أستراليا وإندونيسيا وماليزيا والمكسيك ونيوزيلندا وفيتنام.

تتحدد متطلبات الصحة النباتية لصادرات الولايات المتحدة عادة من خلال الاتفاقيات الثنائية بين الولايات المتحدة والدول المستوردة أو اتفاقيات التجارة متعددة الأطراف. ولدى كل بلد جرعات معتمدة فعالة مختلفة، رغم أن معظمها يتبع المبادئ التوجيهية الصادرة عن المعايير الدولية لتدابير الصحة النباتية (المعيار الدولي لتدابير الصحة النباتية 18 و28) (منظمة الأغذية والزراعة والاتفاقية الدولية لوقاية النباتات (FAO and IPPC)، 2019).

5-3-1 تقنيات النظائر المشعة

بالنسبة لتشعيع الطعام، يجب أن تكون الجرعة الممتصة الدنيا كافية لتحقيق الغرض من الاستعمال (سلامة الأغذية أو الصحة النباتية) ويجب ألا تؤثر الجرعة الممتصة القصوى على الصحة والسلامة الهيكلية والرائحة أو الذوق. وتحدد المواصفة القياسية ISO 14470 (2011) متطلبات التطوير والتحقق من الصحة والتحكم الروتيني في معالجات الأغذية باستخدام الإشعاع الأيوني. وتكون الجرعات المستخدمة في تشعيع سلامة الأغذية أكبر من الجرعات المستخدمة في أغراض الصحة النباتية. وتُستخدم جرعة أقل من 2 كيلوغراي (kGy) لتأخير إنبات الخضراوات وشيخوخة الفاكهة. وتستخدم جرعات تتراوح بين 1 و10 كيلوغراي لتقليل مستويات

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الكائنات المسببة للأمراض، على غرار البسترة. وتُستخدم الجرعات التي تزيد عن 10 كيلوغراي لتحقيق التعقيم (مثل التعليب) أو لتطهير بعض المكونات الغذائية مثل التوابل.

في التطعيم النباتي، تعتبر الجرعة العامة الأكثر شيوعًا هي 400 غراي، لكن المؤشرات تشير إلى أن هذا أعلى من اللازم لخدمة الغرض (هالمان وبلاكبيرن (Hallman and Blackburn)، 2016). وتُستخدم هذه الجرعة العامة في فئة الحشرات (على سبيل المثال، ذباب الفاكهة) لكنها غير خاصة بالمنتج الغذائي، مما يبسط البروتوكول المطبق عند مقارنته بعلاجات الصحة النباتية الأخرى.

وتتم معالجة معظم المنتجات الغذائية والزراعية المعالجة بالإشعاع في مرافق تستخدم أشعة غاما من الكوبالت 60.[9] وهذه المرافق عادة ليست مرافق مخصصة، لكنها بدلاً من ذلك مرافق متعددة الأغراض تستخدم بشكل أساسي لتعقيم الأجهزة الطبية. وذُكر في ندوة،[10] عقدت مؤخرًا أن استخدام تشعيع غاما للأغذية يشكل تحديات تتعلق بالأمن والاقتصاد والتوافر؛ وأن المرافق متعددة الأغراض يتم تحسينها عادة لتعقيم الأجهزة الطبية؛ وأن التقنية ليست مناسبة تمامًا للبلدان التي لا يزال الأمن الغذائي فيها يمثل مشكلة. ونتيجة لذلك، يتم بناء عدد أقل من مرافق الكوبالت 60 لتشعيع الأغذية. على سبيل المثال، في الصين، كان هناك حوالي 130 مرفقًا تعمل تستخدم الكوبالت 60 في عام 2019 مسؤولة عن 70 إلى 80 في المائة من الأغذية المعالجة بالإشعاع (ميكسو (MeiXu)، 2021). ولم يتم بناء مرافق جديدة في السنوات الخمس الماضية. وبدلاً من ذلك، كما هو مذكور في القسم 5-3-2، تستثمر الصين في مرافق حزمة أشعة الإلكترون، وتم بناء 5 إلى 10 مرافق جديدة كل عام على مدار السنوات الخمس الماضية. ومع ذلك، تم الانتهاء مؤخرًا من مرافق غاما الجديدة في فيتنام[11] والهند.[12]

5-3-2 التقنيات البديلة

تُستخدم المعالجات الحرارية والإضافات الكيميائية غالبًا لأغراض سلامة الأغذية والصحة النباتية، ويُستخدم البخار وغاز أكسيد الإيثيلين للتوابل وبعض المنتجات الغذائية. على سبيل المثال، يتم تعقيم الأطعمة المعلبة تجاريًا باستخدام التبخير المضغوط والمشبع للمنتجات المعبأة في غرفة بخار. ويحدث الموت الميكروبي بناءً على عوامل عديدة بما في ذلك وقت ودرجة حرارة العلاج وخصائص المقاومة الحرارية للكائن المستهدف.

يعد التبخير ببروميد الميثيل أكثر طرق معالجة الصحة النباتية شيوعًا في الولايات المتحدة. ورغم التكاليف التنظيمية المتزايدة على مدى العقود العديدة الماضية، تظل الطريقة فعالة من حيث التكلفة ويمكن تنفيذها في مرافق بسيطة. ويتمثل العيب الرئيسي للتبخير ببروميد الميثيل في أنه تم التعرف على المادة الكيميائية منذ فترة طويلة كمادة مستنفدة للأوزون بصورة كبيرة، وتم التخلص التدريجي من استخدامها في الاستعمالات غير الحرجة نتيجة للاتفاقات الدولية. ورغم أن استخدامات الصحة النباتية بعد الحصاد جرى إعفاؤها إلى أجل غير مسمى من هذه القيود، إلا أنه لا يزال هناك ضغط محلي ودولي لتقليل استخدامها لأسباب تتعلق بالصحة أو البيئة أو السلامة المهنية. ونتيجة لذلك، تشجع وزارة الزراعة الأمريكية بنشاط استخدام البدائل بما في ذلك الإشعاع الأيوني، لعلاجات الصحة النباتية عندما يكون ذلك ممكنًا (بيلاي وآخرون (Pillai et al.)، 2014). ولم يغير التوافر التجاري لأنظمة الاستعادة وتطوير العمليات لاحتواء أو تدمير أو إعادة استخدام بروميد الميثيل بعد الاستخدام لتقليل الآثار السلبية، من موقف وزارة الزراعة الأمريكية من المعالجة.

يعتبر العيب الرئيسي للمعالجات الباردة لأغراض الصحة النباتية هو المعالجات الطويلة المطلوبة التي يتم تطبيقها عادة بعد التعبئة أثناء النقل الذي يستغرق فترات طويلة. وقد تشكل فترات المعالجة الطويلة نسبيًا أيضًا مخاطر تجارية في حالة انقطاع التيار الكهربائي أو تعطل المعدات. وبالنسبة لبعض المنتجات، قد توجد حاجه إلى إعادة العملية في حالة انقطاع المعالجة الذي يؤدي إلى زيادة في درجة الحرارة أقل من 1° مئوية، حتى لفترة قصيرة من الوقت. تختلف سرعة معالجات الصحة النباتية بالهواء الساخن باختلاف مجموعة واسعة من العوامل، بما في ذلك المنتج وتغليف المنتج وحجم المرفق وتصميمه والرطوبة الموجودة في الهواء في موقع المرفق. وتُعد معالجة الهواء الساخن أحد أصعب معالجات الصحة النباتية التي يجب إدارتها لأن العديد من المتغيرات يمكن أن تؤثر على فعاليتها. على سبيل المثال، قد تؤدي المعالجات السريعة بالهواء المكيف إلى إتلاف السلع الخاضعة للمعالجة، بينما قد تفشل الاستعمالات الأبطأ إذا كانت الآفات قادرة على التأقلم مع درجة الحرارة المتزايدة من خلال "بروتينات الصدمة الحرارية".

[9] يُرجى الاطلاع على http://www-naweb.iaea.org/nafa/fep/crp/fep-xray-application-food-irradiation.html.

[10] الندوة الدولية لإشعاع الغذاء، 11-9 مارس 2021.

[11] يُرجى الاطلاع على https://iiaglobal.com/news/offer-irradiation-services-expanding-vietnam.

[12] يُرجى الاطلاع على https://iiaglobal.com/news/more-gamma-irradiators-in-india.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

يمكن استخدام أساليب أشعة الإلكترون والأشعة السينية بشكل فعال لكل من سلامة الأغذية وأغراض الصحة النباتية. وفي الولايات المتحدة، يبلغ الحد الأعلى للمعالجة بحزمة أشعة الإلكترون المستخدمة في الأطعمة 10 ميغا إلكترون فولت والمعالجة بالأشعة السينية 7.5 ميغا إلكترون فولت. وخارج الولايات المتحدة، يبلغ الحد الأقصى للمعالجة بخزمة أشعة الإلكترون أيضًا 10 ميغا إلكترون فولت، لكن بالنسبة لمعظم البلدان، فإن الحد الأقصى للطاقة المسموح بها للمعالجة بالأشعة السينية هو 5 ميغا إلكترون فولت. ويسمح عدد قليل من البلدان الأخرى، على سبيل المثال، كندا والهند وإندونيسيا وجمهورية كوريا باستخدام 7.5 ميغا إلكترون فولت من الأشعة السينية لتشعيع المنتجات الغذائية. وتجعل الزيادة من 5 إلى 7.5 ميغا إلكترون فولت، استخدام تقنية الأشعة السينية أكثر اقتصادًا وتتيح أيضًا زيادة في الإنتاجية.

يمكن تقسيم استعمالات معالجة الأغذية لتقنية حزمة أشعة الإلكترون إلى ثلاثة استعمالات: استعمالات منخفضة الطاقة (أقل من 1 ميغا إلكترون فولت)، ومتوسطة الطاقة (من 1 إلى 8 ميغا إلكترون فولت)، وعالية الطاقة (من 8 إلى 10 ميغا إلكترون فولت). وتشمل الاستعمالات الحالية منخفضة الطاقة، التعقيم الداخلي لمواد التعبئة والتغليف والتطهير المباشر وتعقيم أسطح البذور. وتشمل الاستعمالات متوسطة الطاقة معالجة الصحة النباتية للفواكه والخضروات المعبأة. وتشمل الاستعمالات عالية الطاقة التشعيع لأغراض سلامة الأغذية للتوابل واللحوم المعبأة والمأكولات البحرية والأطعمة الأخرى.

في عام 2014، بدأت منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة والوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، مشروعًا بحثيًا منسقًا بهدف تسريع تطوير وتسهيل تنفيذ التقنيات العملية لتشعيع الأغذية والمنتجات الزراعية باستخدام حزمة أشعة الإلكترون والأشعة السينية. ومن المتوقع ظهور نتائج المشروع في يونيو 2021.[13] بالإضافة إلى ذلك، أطلق القسم المشترك بين منظمة الأغذية والزراعة والوكالة الدولية للطاقة الذرية لاستخدام التقنيات النووية في الأغذية والزراعة، بالتعاون مع قسم العلوم الفيزيائية والكيميائية في الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، خطة بحثية مشتركة جديدة على مدى 5 سنوات (2020-2025) بعنوان ابتكار المعالجة الإشعاعية للأغذية باستخدام الأشعة منخفضة الطاقة من مصادر الآلة. وفي سبتمبر 2020، بموجب اتفاقية التعاون الإقليمي لآسيا والمحيط الهادئ التي تضم 22 طرفًا حكوميًا، أطلقت الوكالة أيضًا مشروعًا بعنوان تعزيز تشعيع الأغذية باستخدام حزمة أشعة الإلكترون وتقنية الأشعة السينية لتعزيز سلامة الأغذية والأمن والتجارة. ويهدف هذا المشروع إلى معالجة اعتماد تشعيع الأغذية على مرافق غاما باستخدام الكوبالت 60 وتعزيز تقنيات التشعيع البديلة.

5-3-3 اعتبارات اعتماد التقنية البديلة

لا يحتل التشعيع حتى الآن مكانة بارزة بين العمليات الغذائية. ولا يزال يُنظر إلى قبول المستهلك له على أنه التحدي الرئيسي في اعتماد هذه الطريقة في سلامة الأغذية. وبالتالي، فإن إمكانات التقنية للحد من الأمراض التي تنتقل عن طريق الأغذية وخسائر ما بعد الحصاد تظل في الغالب غير مستغلة. ويعد استخدام التشعيع لمنع انتشار الآفات الحشرية الغازية التطور الأخير الوحيد نحو التوسع في تشعيع الأغذية.

بشكل عام، زادت التجارة العالمية للمنتجات الغذائية المعالجة بالإشعاع لأغراض الصحة النباتية من حوالي 5,000 طن من الأغذية في عام 2007 إلى أكثر من 45,000 في عام 2019 (هيون (Hénon)، 2021). وكانت غالبية الزيادة في السنوات الأخيرة في البلدان التي تحتاج إلى منتجات مشعة لسوقها المحلي أو ترى فرصة لتطوير الأسواق في الخارج. وتشمل الأمثلة أستراليا والهند وتايلاند وفيتنام. ومن المحتمل أن يستمر زيادة التشعيع لأغراض الصحة النباتية في هذه البلدان وغيرها في السنوات القادمة.

على الرغم من أن حدوث الأمراض المنقولة عن طريق الأغذية يؤثر بشكل غير متناسب على السكان في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل، فمن غير المرجح تم تنفيذ التشعيع الغذائي في العديد من هذه البلدان. على سبيل المثال، في إفريقيا، باستثناء مصر وجنوب أفريقيا، لا يمكن أن يدعم الافتقار إلى الموارد والبنية التحتية الأساسية، تقنيات تشعيع الأغذية على النطاق اللازم لتكون فعالة. وتعد الإجراءات الأخرى أكثر إلحاحًا من التشعيع لتعزيز سلامة الأغذية في البلدان الأفريقية، بما في ذلك تحسين المناولة والنقل وظروف تخزين الأغذية.

أظهر تشعيع الأغذية فوائد عملية عند استخدامه لأغراض سلامة الأغذية والصحة النباتية. وفي التطهير النباتي، تخضع الطريقة التي يستخدمها المنتجون لمنتج معين لعدة قيود: يجب أن تقضي بشكل فعال على الآفة المستهدفة أو تُحيدها بينما يكون لها تأثير سلبي ضئيل على المنتج نفسه، ويجب أن تكون فعالة من حيث التكلفة، ويجب أن تكون مقبولة بيئيًا، ويجب أن تفي بالمتطلبات المحددة للمنتج في موقع المستهلك (هالمان (Hallman)، 2007). ويتمتع الإشعاع بمزايا عديدة مقارنة بمعالجات الصحة النباتية الأخرى. وفي حين أن تطوير بروتوكولات الحرارة والبرودة والتبخير يتضمن دراسة كل مجموعة من آفات الفاكهة، فإنه من الممكن تطوير علاجات إشعاع عامة لأنواع الآفات بغض النظر عن السلعة (هالمان (Hallman)، 2011). وتشمل العيوب الاختناقات اللوجيستية

[13] يُرجى الاطلاع على https://www.iaea.org/projects/crp/d61024.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

بسبب التوافر الحالي المحدود للتقنية وعدم وجود تحقق مستقل من فعالية العلاج لأن الآفات يمكن العثور عليها حية بعد المعالجة أثناء فحص السلع.

مع تزايد القيود المفروضة على استخدام المبخرات الكيميائية من قبل البلدان المستوردة، يتزايد استخدام التشعيع لأغراض الصحة النباتية في جميع أنحاء العالم.[14] وفي الولايات المتحدة، من المسلم به وجود حاجة لبدائل بروميد الميثيل لاستخدامها كتدابير للصحة النباتية، خاصة لأنه قد تُوضع قيود مستقبلية على استخدام بروميد الميثيل. وتوجد خطط أولية للتكليف بإنشاء أربعة مرافق تشعيع في الولايات المتحدة لأغراض الصحة النباتية: اثنان في تكساس (مرفق يستخدم حزمة أشعة الإلكترون، ومرفق يستخدم الأشعة السينية) ومرفق في جنوب فلوريدا (يستخدم الأشعة السينية)، ومرفق في نيو جيرسي (يستخدم الأشعة السينية) أو ربما الكوبالت 60). وقد يتم تشغيل بعض هذه المرافق في السنوات الثلاث المقبلة.[15] وفي أستراليا، افتتحت Steritech مؤخرًا مرفقًا هجينًا مخصصًا لحزمة أشعة الإلكترون / الأشعة السينية معتمدًا للعديد من سلع المنتجات الطازجة وأسواق التصدير.

تعتبر الصين أكبر مستثمر في العالم حتى الآن في مجال تشعيع الأغذية. وتستثمر الدولة في حزمة أشعة الإلكترون لتشعيع الأغذية لأغراض السلامة، حيث تم تركيب 5 إلى 10 آلات جديدة كل عام خلال السنوات الخمس الماضية. وفي عام 2019، كان هناك حوالي 78 مسرّع حزمة أشعة إلكترون في البلاد. لا يوجد تقدم في اعتماد تشعيع الأغذية لأغراض السلامة في أجزاء كثيرة من العالم بما في ذلك الولايات المتحدة واليابان، كما أنه ينخفض في أوروبا. وتم تقديم عدة أسباب لشرح هذه الاتجاهات.

أولاً، أحد العوامل الرئيسية التي تؤثر على اعتماد المعالجة بالإشعاع هو الفهم العام للعملية وقبولها. ورغم اتفاق الخبراء في الغالب على أن التشعيع وسيلة فعالة لتوفير منتجات أكثر أمانًا للمستهلك (منظمة الصحة العالمية وآخرون (.WHO et al)، 1981)، إلا أن مصنعي الأغذية والموزعين يترددون في تقديم منتج يوجد قلق لدى المستهلك العام منه وتصورات سلبية حياله. وتتضمن هذه التصورات مخاوف من أن يؤدي الطعام المعالج بالإشعاع إلى جعل الطعام مشعًا وبالتالي يمكن أن يسبب السرطان وأن الإشعاع يغير التركيب الكيميائي للغذاء أو يقلل من القيمة الغذائية للمنتج الغذائي (كاستيل بيريز و موريرا (Castell-Perez and Moreira)، 2021). وأصدرت إدارة الغذاء والدواء بيانات تشير إلى أن هذه التصورات السلبية خاطئة.[16] وتوجد بعض الأدلة على أنه كلما زاد فهم المستهلكين لاستخدام الإشعاع كوسيلة فعالة للوقاية من الأمراض التي تنتقل عن طريق الأغذية، زادت احتمالية قبول الطعام المعالج بالإشعاع وشرائه (كاستيل بيريز و موريرا (Castell-Perez and Moreira)، 2021).

ثانيًا، يوجد نقص في التنسيق والمواءمة بين اللوائح في التجارة الدولية. وأوصت هيئة Codex Alimentarius (أو دستور الغذاء) (Codex 1984) بمعايير منسقة للأغذية المعالجة بالإشعاع ومدونة دولية للممارسات لتشغيل مرافق الإشعاع المستخدمة في معالجة الأغذية. وتنص هذه المعايير على أنه يجب أن تكون الأطعمة المعالجة بالإشعاع مصحوبة بوثائق الشحن التي تحدد جهاز الإشعاع وتاريخ المعالجة ورقم تعريف الدفعة والجرعة وتفاصيل أخرى عن العلاج. عملت المجموعة الاستشارية الدولية المعنية بإشعاع الأغذية (ICGFI)، التي أُنشئت تحت رعاية منظمة الأغذية والزراعة ومنظمة الصحة العالمية والوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، من عام 1982 إلى عام 2004 لتوحيد معايير تشعيع الأغذية في جميع أنحاء العالم. ومن بين أنشطتها، جمعت المجموعة اللوائح الوطنية، وأصدرت مدونة الممارسة لتشعيع الأطعمة المختلفة واقترحت إذنًا بالإشعاع حسب فئة الطعام، وهي موافقة عامة تبسط التجارة.

ثالثًا، يتم الاستعانة بمصادر خارجية في الوقت الحالي لإشعاع الأغذية في المقام الأول، مع وجود مراكز معالجة إشعاعية متعددة الأغراض في مواقع يمكن أن تخدم عددًا كبيرًا من العملاء المحتملين وتقدم خدماتهم على أساس تعاقدي لمجموعة واسعة من الشركات. ويعتبر هذا النموذج لخدمة تشعيع الأغذية بشكل عام غير موات لتوسيع هذا الاستعمال بسبب التكاليف المرتبطة بنقل المنتجات الغذائية إلى المرفق والفترة الزمنية الطويلة (حوالي 4 أيام)، التي قد يكون لها آثار سلبية على بعض المنتجات. وأُشير إلى أن الاستثمارات الخاصة في أجهزة حزمة أشعة الإلكترون والأشعة السينية التي تدمجها في التصنيع أو التغليف قد تغير وجهات نظر الصناعة بشأن تشعيع الأغذية (بيلاي (Pillai)، 2021).

رابعًا، يُعتقد أن وضع ملصقات تعريفية على الأغذية المعالجة بالإشعاع يتسبب في تأثير سلبي على قبول الأطعمة المعالجة بالإشعاع. وكان تشعيع الأغذية في أوروبا نشطًا، لا سيما في بلجيكا وفرنسا وهولندا، لكنه انخفض بسرعة بعد إنفاذ لائحة الاتحاد الأوروبي في عام 1999 التي تتطلب وضع ملصقات صارمة على الأطعمة المعالجة بالإشعاع.[17] على وجه التحديد، بلغ التشعيع التجاري للأغذية في فرنسا 20,000 طن في عام 1998 لكنه انخفض إلى 3,000 طن في عام 2005 (كومي وآخرون (Kume et al.)، 2009). وفي عام 2018، بدأ الاتحاد الأوروبي، في إطار التنظيم الأفضل، تقييمًا لما إذا كان توجيه 1999 يظل ذا صلة وفعالية.

[14] لورا جيفرز، وزارة الزراعة الأمريكية (USDA)، عرض تقديمي أمام اللجنة في 6 يناير 2021.

[15] بريد إلكتروني بين لورا جيفرز، وزارة الزراعة الأمريكية، وأورانيا كوستي، الأكاديميات الوطنية، في 26 يناير 2021.

[16] يُرجى الاطلاع على https://www.fda.gov/food/buy-store-serve-safe-food/food-irradiation-what-you-need-know.

[17] ويغطي التوجيه الإطاري 1999/2/EC العملية ووضع الملصقات وشروط الترخيص بتشعيع الأغذية، كما يسرد التوجيه التنفيذي 1999/3/EC الأطعمة والمكونات المسموح معالجتها بالإشعاع الأيوني.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

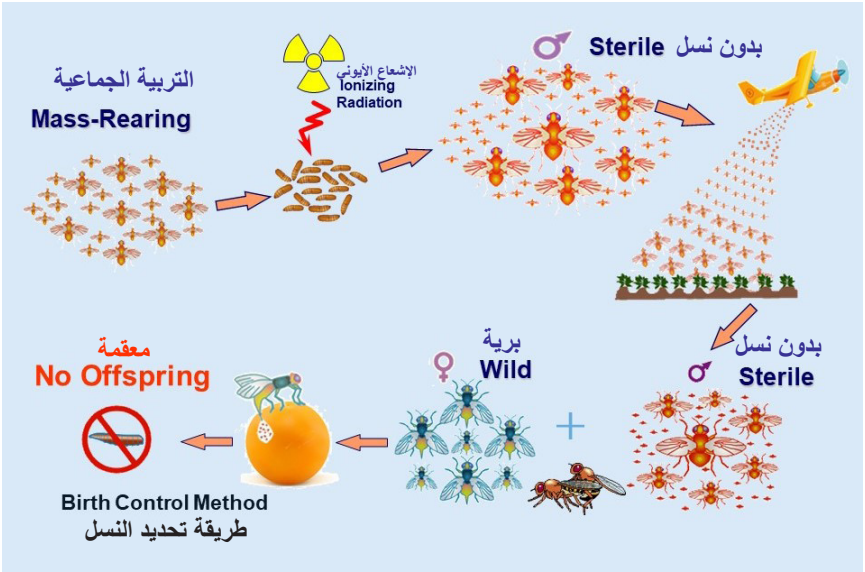
Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

4-5 تعقيم الحشرات

تهدف تقنية الحشرة العقيمة إلى مكافحة الآفات التي يمكن أن تلحق الضرر بالمحاصيل والنباتات الأخرى عن طريق تعقيم ذكور الحشرات. وتستخدم تلك التقنية جرعات إشعاعية كافية لجعلها عقيمة، لكن دون إضعافها حتى تظل قادرة على منافسة الذكور البرية للتزاوج. وفي حالة إطلاق ذكور الحشرات بأعداد كافية، فإنها تقلل من التكاثر عن طريق التزاوج مع الإناث التي لا تنجب (راجع الشكل 5-4). ويمكن شحن الحشرات العقيمة من المرفق إلى بلدان أخرى بغرض إدارة مكافحة الآفات.

يُفضل عمومًا استخدام مرحلة الشرنقة المتأخرة للإشعاع لأنها أكثر عملية للتعامل مع الخوادر وشحنها وأسهل لتحقيق توازن مقبول بين القدرة التنافسية والعقم. وعند الوصول إلى الوجهة النهائية، تحتاج الخوادر أو الحشرات البالغة المعالجة بالإشعاع إلى الحصول على تصريح من السلطات الوطنية للصحة النباتية والجمارك. ويجب أن تتوافق الحشرات العقيمة مع معايير مراقبة الجودة وإجراءات التشغيل المقبولة دوليًا (منظمة الأغذية والزراعة وآخرون (FAO et al.)، 2019). وقبل إطلاقها، تخرج الحشرات العقيمة من طور العذراء، وتتغذى وتنضج، ثم يتم تحميلها في وسائل توصيل للإطلاق الجوي أو الأرضي. ويتم استخدام أنظمة التبريد والحرمان من الأكسجين كوسيلة لإطالة وقت تخزين الخوادر المعالجة بالإشعاع والبالغين أثناء النقل دون تقليل طول العمر وقدرة الذكور على الأداء في الميدان.

وتم استخدام تقنية الحشرة العقيمة ضد عدد قليل نسبيًا من أنواع الحشرات بما في ذلك الدودة الحلزونية للعالم الجديد وذباب "تسي تسي" ومجموعة متنوعة من ذباب الفاكهة وبعض العث. والجدير بالذكر أن تقنية الحشرة العقيمة لا تُستخدم على نطاق واسع لمكافحة البعوض للمساعدة في القضاء على الأمراض التي ينقلها البعوض مثل حمى الضنك والملاريا بسبب صعوبة تشعيع الذكور دون التقليل من تنافسية التزاوج والبقاء على قيد الحياة (ليس وآخرون (Lees et al.)، 2015). بالإضافة إلى ذلك، تعد مرحلة الخادرة في البعوض قصيرة وبالتالي لا يمكن شحنها لمسافات طويلة. وبدلاً من ذلك، يحتاج البعوض إلى الخضوع للعلاج وإطلاقه محليًا. وحدث تكثيف للتعاون العالمي لتطوير تقنية الحشرة العقيمة لمكافحة البعوض في أعقاب وباء زيكا في 2015-2016. وتتضمن تقنية جديدة، تدعمها الوكالة الدولية للطاقة الذرية بالتعاون مع منظمة الأغذية والزراعة، مزيجًا من تقنية الحشرة العقيمة وأسلوب الحشرة غير المتوافقة[18] لكبح تجمعات البعوض. وتم نشر النتائج الناجحة في مكان آخر (زينجغ وآخرون (Zheng et al.)، 2019).



الشكل 4-5 مكافحة الآفات الحشرية باستخدام تقنية الحشرات المعقمة.
المصدر: روي كاردوسو بيريرا، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، عرض تقديمي أمام اللجنة في 28 يناير 2021.

[18] في هذه الطريقة، يُصاب الذكور الذي يتم إطلاقهم ببكتيريا *الولبخية* الموروثة من الأم، مما يؤدي إلى تزاوجات عقيمة مع إناث الحقل غير المصابات بنفس سلالة *الولبخية*، وهي ظاهرة تُعرف باسم عدم التوافق السيتوبلازمي.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

فيما يخص تقنية الحشرة العقيمة، لا يُقصد بالعقم (عدم إنتاج الأمشاج) أو يُستخدم لأنه من الهام إنتاج الحيوانات المنوية في الواقع. وإذا كان الذكور العقيمون غير قادرين على إنتاج الحيوانات المنوية، فمن المحتمل أن تؤدي المنافسة في الإناث المتعافية إلى قبول الحيوانات المنوية (غير الموجودة) من الذكور العقيمين. وقد يؤدي هذا إلى إخصاب معظم أو كل البويضات من الإناث التي تتزاوج أكثر من مرة بواسطة حيوانات منوية غير معدلة وبالتالي تكون قابلة للحياة، ما لم يكن جميع أقرانها عقيمين (ألفي وآخرون (Alphey et al.)، 2006).

يوجد نوعان من التحديات الرئيسية في تقنية الحشرة العقيمة (SIT): (أ) انخفاض الأداء الناجم عن الإشعاع و(ب) الفصل بين الجنسين. وبالنسبة للنقطة (أ)، يحدث الضرر الإشعاعي لكل من الخلايا الجسدية وخلايا السلالة الجرثومية، وبالتالي تقلل جرعة الإشعاع المطلوبة للتعقيم أيضًا من أداء ذكور الحشرات المعقمة، مما يجعلها أقل قوة (باركر وميهتا (Parker and Mehta)، 2007). وللتعويض عن هذا النقص في الفعالية، يجب تربية وإطلاق المزيد من الحشرات العقيمة، وهي أغلى ثمنًا (ألفي (Alphey)، 2016). بالنسبة للنقطة (ب)، لمعظم حشرات الآفات، لا توجد وسيلة عملية متاحة للفصل بين الجنسين على نطاق واسع، ومع ذلك فإن إطلاق مجموعة الذكور فقط أمر مرغوب فيه لسببين. أولاً، قد تتلف الإناث الفاكهة، حتى لو تم تعقيمها، مما يتسبب بشكل مباشر في بعض الضرر الذي يهدف برنامج المكافحة إلى تقليله. ثانيًا، في حالة إطلاق الذكور والإناث معًا، قد يغازل الذكور الإناث العقيمة، وبالتالي لا يبحثون عن الإناث البرية بشكل فعال كما لو تم إطلاق سراحهم دون إناث عقيمة (ألفي وآخرون (Alphey et al.)، 2006). أدى إطلاق الذكور العقيمة فقط من ذبابة فاكهة البحر الأبيض المتوسط إلى زيادة فعالية قمع العدد بمقدار ثلاثة إلى خمسة أضعاف مقابل إطلاق الذكور والإناث خلال التجارب الميدانية واسعة النطاق (ريندون وآخرون (Rendón et al.)، 2004).

تعمل أشعة غاما والأشعة السينية وحزم أشعة الإلكترون بطريقة مشابهة إلى حد كبير لتحقيق تعقيم الحشرات: يعطل الإشعاع المؤين الوظيفة الخلوية الطبيعية في الآفات بواسطة كسر الروابط الكيميائية داخل الحمض النووي والجزيئات الحيوية الأخرى (باركاي غولان وفوليت (Barkai-Golan and Follett)، 2017؛ فوليت (Follett)، 2014؛ هالمان وبلاكبيرن (Hallman and Blackburn)، 2016). وربما يكون هذا الضرر مباشرًا، حيث تتم إزالة الإلكترونات من الجزيئات البيولوجية، مثل الحمض النووي، أو الحمض النووي الريبي، أو البروتينات، أو غير مباشر، من الجذور الحرة التي تشكلت أثناء تأين جزيئات الماء داخل الأنظمة البيولوجية.

اعتبارًا من فبراير 2021، أدرج دليل الوكالة الدولية للطاقة الذرية لبرامج تقنية الحشرة العقيمة (DIR-SIT)[19] أكثر من 50 برنامجًا لتقنية الحشرة العقيمة في 26 دولة، ومن المتوقع تحديثه في وقت لاحق من العام. وتستخدم معظم برامج تقنية الحشرة العقيمة أشعة غاما بالكوبالت 60. ويمكن أن تحدث تقنية الحشرات العقيمة القائمة على غاما في منشآت التعقيم باستخدام مشعات بانورامية أو باستخدام مشعات تخزين جافة صغيرة قائمة بذاتها؛ ومعظم هذه المنشآت عبارة عن منشآت مخصصة تستخدم لأغراض تقنية الحشرة العقيمة فقط.[20] ويعد أكبر برنامج يستخدم مشعات غاما موجود في غواتيمالا ويمكن أن ينتج 3 مليارات من الذكور العقيمة أسبوعيًا للاستخدام بشكل أساسي في الولايات المتحدة (كاليفورنيا وفلوريدا) وغواتيمالا والمكسيك. وتعتبر معظم منشآت غاما أصغر بكثير وتشعع أقل من 200 مليون حشرة في الأسبوع. وتستخدم إحدى المنشآت في إسبانيا حزمة أشعة إلكترون، ويمكنها تشعيع 500 مليون حشرة أسبوعيًا. وتوجد حوالي 10 أجهزة إشعاع بالأشعة السينية قيد الاستخدام، معظمها لبرامج البعوض المنشأة حديثًا. وكان عددها أربعة مشعات تعمل بالأشعة السينية منذ 4 سنوات. ويوضح تحليل النشاط (الكوبالت 60) أو الطاقة (حزمة أشعة الإلكترون والأشعة السينية) في منشآت المعالجة المدرجة في قاعدة بيانات دليل الوكالة الدولية للطاقة الذرية لتقنية الحشرة العقيمة وكمية الحشرات التي تعالجها هذه المنشآت (أي حجم البرنامج)، أنه يمكن استخدام التقنيات البديلة من قبل أي برنامج لتقنية الحشرة العقيمة، بغض النظر عن الحجم.

1-4-5 تقنيات النظائر المشعة

تستخدم التقنية القياسية لتقنية الحشرة العقيمة أشعة غاما، التي يتم الحصول عليها بشكل شائع من الكوبالت 60. وتستخدم بعض البرامج السيزيوم 137 أيضًا. وفي المشعات التقليدية ذاتية الحماية، تُحاط حجرة العينة بعدة قضبان أو "أقلام رصاص" من النظائر المشعة. ويتم تحديد معدل جرعة الخلية من خلال نشاط المصدر ويتم التحكم في الجرعة الممتصة التي يتم توصيلها للحشرات عن طريق ضبط وقت التعرض. وأشار ممثل الوكالة الدولية للطاقة الذرية الذي تحدث إلى اللجنة على أن استخدام الكوبالت 60 لتقنية الحشرة العقيمة طريقة موثوقة، لكنها تواجه تحديين.[21] أولًا، في عام 2008، أوقفت شركة Nordion إنتاجها من الغاماسيل 220، المصدر الأكثر استخدامًا لتشعيع الحشرات لأغراض التعقيم، مما أثار مخاوف بشأن التوفر المستقبلي للمُشعات صغيرة الحجم التي تدعم عددًا من مشاريع تقنية الحشرة العقيمة. واليوم، توجد شركتان على الأقل، هما Foss Therapy Services وInstitute of

[19] يُرجى الاطلاع على https://nucleus.iaea.org/sites/naipc/dirsit/SitePages/World-Wide%20Directory%20of%20SIT%20Facilities%20(DIR-SIT).aspx.

[20] على حد علم اللجنة، البرنامج الوحيد الذي يستخدم حاليًا منشأة إشعاع تعاقدية هو برنامج ذبابة الفاكهة الإسباني.

[21] روي كاردوسو بيريرا، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، عرض تقديمي أمام اللجنة في 28 يناير 2021.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

Isotopes Company، تنتجان مشعات غاما مناسبة لتقنية الحشرة العقيمة. وطورت Foss Therapy Services أيضًا الإجراءات والأدوات اللازمة لإجراء عمليات إعادة التحميل الميدانية للغاماسيل 220 الخاص بشركة Nordion. ثانيًا، تجعل التعقيدات اللوجستية المتزايدة لشحن النظائر المشعة عبر الحدود الدولية إعادة تحميل المصادر الحالية وشراء مصادر جديدة أمرًا صعبًا بشكل متزايد.

5-4-2 التقنيات البديلة

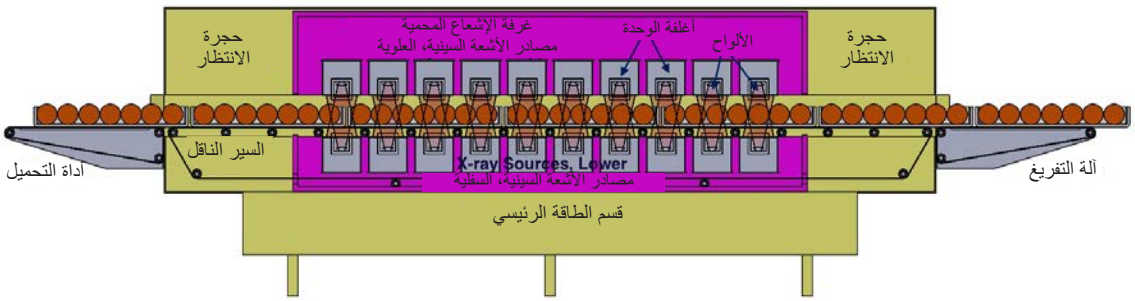
ومن الممكن أن تكون الأشعة السينية (تتراوح الطاقة من 150 كيلو فولت إلى 250 كيلو فولت) بدائل مناسبة للمصادر المشعة لبرامج تقنية الحشرة العقيمة الأصغر التي تتولى تشعيع أقل من 100 مليون حشرة في الأسبوع. وكشف اختبار آلات الأشعة السينية في عام 2008 في مختبر مكافحة الآفات الحشرية التابع لمختبرات الزراعة والتقنية الحيوية التابع لمنظمة الأغذية والزراعة / الوكالة الدولية للطاقة الذرية في زايبرسدورف في النمسا، عن مشكلات تتعلق بموثوقية أنبوب الأشعة السينية (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2012 أ). ولم يتم اختبار أنبوب الأشعة السينية الأحدث من الجيل الثاني (راجع المناقشة في القسم 4-1-2) بواسطة المختبر. ووفقًا لأحد الخبراء، من المحتمل أن تنعكس التحسينات الملحوظة في مشعات الدم باستخدام أنبوب الأشعة السينية من الجيل الثاني أيضًا في تقنية الحشرة العقيمة، لأن مبدأ المشعات في الاستعمالين متشابه.[22] ولا توجد سوى خبرة ميدانية قليلة متاحة لاستنتاج موثوقية أجهزة الأشعة السينية التي تم نشرها مؤخرًا. ومع ذلك، يُعتقد بشكل عام أن الموثوقية لا تزال تمثل مشكلة، وتتطلب أجهزة الأشعة السينية صيانة وخدمة متكررة. ووفقًا للمذكور في الفصل الرابع، تم تصميم مصدر الأشعة السينية ذو اللوحة المسطحة من Stellarray أيضًا لاستعمالات تقنية الحشرة العقيمة (راجع الشكل 5-5). ويمكن أن تزيد هذه التقنية الجديدة الإنتاجية وتحسن توزيع الجرعات، مما يجعل تقنية الأشعة السينية بديلاً مناسبًا لتقنية الحشرة العقيمة القائمة على غاما.

على الرغم من أن الإلكترونات عالية الطاقة (من 5 إلى 10 ميغا إلكترون فولت) يمكن استخدامها لتعقيم الحشرات، إلا أنها ليست بديلاً مناسبًا لمعظم برامج تقنية الحشرة العقيمة، التي تميل لأن تكون صغيرة، بسبب التكلفة العالية والحجم الكبير لمنشأة حزمة أشعة الإلكترون. وتبني شركة RadiaBeam Systems، وهي شركة صغيرة تمولها الإدارة الوطنية للأمن النووي من خلال برنامج أبحاث ابتكار الأعمال الصغيرة، مسرعًا خطيًا بقدرة 3 ميغا إلكترون فولت غير مكلف وصغير الحجم كمصدر إشعاع لمشع قائم بذاته لتقنية الحشرة العقيمة والتطبيقات الأخرى. وتهدف الشركة إلى إنتاج مسرع خطي أصغر حجمًا وأقل تكلفة يمكن أن يعمل في بيئات ذات طاقة كهربائية غير مستقرة. وتبني الشركة حاليًا نموذجًا أوليًا يخطط لاختباره في مختبر الوكالة الدولية للطاقة الذرية لمكافحة الآفات الحشرية. وتهدف شركتان أخريان على الأقل، Mevex وNuctech (الصين)، إلى إنتاج أنظمة تسريع مضغوطة مماثلة لتقنية الحشرة العقيمة.

الطرق الجينية

تعتبر الطرق الجينية الحديثة طريقة بديلة لتقنية الحشرة العقيمة. وتنقسم هذه الطرق عادةً إلى فئتين متميزتين: (أ) كبح العدد أو احتوائه أو استئصاله؛ و(ب) تحويل العدد أو استبداله. وتتشابه أهداف الفئة الأولى مع أهداف تقنية الحشرة العقيمة وهي الوحيدة التي جرى مناقشتها في هذا القسم. وتهدف الفئة الثانية إلى تقليل أو منع قدرة الحشرة على نقل المرض، وتجنب ظهور منطقة إيكولوجية فارغة. ولأن الهدف من هذه الطريقة الجينية يختلف عن هدف تقنية الحشرات العقيمة، لم تجر مناقشته هنا.

يهدف قمع أو احتواء أو استئصال العدد إلى تقليل أنواع معينة من الحشرات أو حتى القضاء عليها من خلال تطوير جينات (بطريقة



الشكل 5-5 مصدر الأشعة السينية باللوحة المسطحة لتقنية الحشرات المعقمة.
المصدر: **Courtesy of Stellarray, Inc.**

[22] اتصالات بين أندرو باركر، الوكالة الدولية للطاقة الذرية (متقاعد)، وأورانيا كوستي، الأكاديميات الوطنية، في 19 فبراير 2021.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

شرطية) قاتلة أو تجعل الحشرة غير قادرة على التكاثر. ويتم البحث عن مجموعة متنوعة من الأنظمة والجينات المحتملة لهذه الأغراض. ويعمل نظام واحد، يُشار إليه باسم إطلاق الحشرات التي تحمل سائدًا مميتًا (RIDL)، عن طريق نقل مجموعة جينات محورة تتسبب في حدوث فتك خاص بالجنين في النسل (ألفي وآخرون (.Alphey et al)، 2006). ويتم إنشاء الحشرات العقيمة القوية، مع قدرة الذكور العقيمين على إنتاج ونقل الحيوانات المنوية التنافسية. ويمكن قمع هذه القدرة المميتة السائدة عن طريق إضافة التتراسيكلين في غذاء اليرقات، مما يسمح بتربية مثل هذه السلالات. ويسمح هذا بتوليد حشرات عقيمة قادرة على المنافسة قادرة على نقل الحيوانات المنوية المنافسة التي تحمل الجين المحول إلى الإناث البرية. وتحمل الأجنة التي تنتجها الإناث الجين المهيمن، وفي حالة عدم وجود مادة التتراسيكلين المضافة، تموت الأجنة (شتيليغ وآخرون (.Schetelig et al)، 2007). وتم تطوير إطلاق الحشرات التي تحمل سائدًا مميتًا (RIDL) بواسطة Oxitec (فرع من جامعة أكسفورد) وتم اعتماده لمعالجة مرض حمى الضنك. وأجرى علماء Oxitec التعديل الوراثي على *الزاعجة المصرية*، وهي ناقل لمرض حمى الضنك، وأنشأوا براءة اختراع إطلاق الحشرات التي تحمل سائدًا مميتًا (RIDL) من سلالة *الزاعجة المصرية* OX513A. وعلى الرغم من الجدل بشأن النهج (جين ووتش المملكة المتحدة (Gene Watch UK)، 2012)، أُجريت تجارب ميدانية في جزر كايمان وماليزيا والبرازيل (سيرفيك (Servick)، 2016).وسوف يطلق برنامج تجريبي 750 مليون بعوضة معدلة وراثيًا في جزر فلوريدا كيز في عام 2021 (ويلكوكس (Wilcox)، 2021).

تم تحقيق تحديد الجنس (تحديد الجنس الجيني) من خلال نظام جيني سائد مميت مماثل للتتراسيكلين قابل للقمع يعمل عن طريق قتل الأفراد (الإناث) التي تحمل الجهاز المميت، ما لم يتم إيقاف تشغيله بواسطة مثبط التتراسيكلين (توماس وآخرون (Thomas et .al)، 2000) ونجحت الدراسات المختبرية لتحديد جنس المولود باستخدام هذه التقنية، بما في ذلك دراسة مع الديدان الحلزونية في العالم الجديد. وبالإضافة إلى ذلك، تمت إضافة الترميز لجين واسم يحتوي على بروتينات فلورية. ويسمح هذا للحشرة المعدلة وراثيًا بأن تكون مرئية بسهولة من النوع البري. وتحمل السلالة الرئيسية في هذه الدراسة إدخالاً جينيًا يقتل الإناث بكفاءة عالية إذا كانت موجودة في نسختين، وتتم تربية السلالة بدون الجين القامع. وفي حالة تربية السلالة بدون الجين القامع، لا يبقى سوى الذكور على قيد الحياة (كونشا وآخرون (.Concha et al)، 2016).

يمتلك استخدام الأنظمة القاتلة القابلة للقمع القدرة على التأثير في الاحتواء الجيني أيضًا. وفي الوقت الحاضر، تعمل مرافق التربية الجماعية لتقنية الحشرة العقيمة على تربية أعداد كبيرة من حشرات الآفات، التي تصبح مفيدة فقط بمجرد تعقيمها. ويمكن أن يؤدي إطلاق هذه الحشرات على نطاق واسع قبل التعقيم، أو الحشرات التي لم يتم إخضاعها للتشعيع إلى المستوى المناسب، إلى خسائر اقتصادية كبيرة. ويمكن التخفيف من ذلك باستخدام النظام الجيني القاتل القابل للقمع، لأن الحشرات يتم تزويدها بالمواد الكيميائية المثبطة فقط في منشأة التربية (ألفي وآخرون (.Alphey et al)، 2006).

3-4-5 اعتبارات اعتماد التقنية البديلة

توجد حاجة إلى الانتقال من إشعاع غاما إلى طرق أخرى لتقنية الحشرة العقيمة بسبب التحديات في الحصول على المصادر المشعة ونقلها لتعقيم الحشرات، كما هو موضح في القسم 5-4-1. ومنذ أكثر من 10 سنوات، توقع الخبراء أنه لهذه الأسباب يقترب عصر مشعات غاما صغيرة الحجم لبرامج تقنية الحشرة العقيمة من نهايته وسيتم استبدال هذه المشعات لتحل محلها آلات الأشعة السينية (ماسترانجيلو وآخرون (.Mastrangelo et al)، 2010). وعلى الرغم من أن هذا لم يحدث حتى الآن، خلصت اللجنة إلى أنه من الممكن تقنيًا استخدام حزمة أشعة الإلكترون أو الأشعة السينية لتقنية الحشرة العقيمة. ومع ذلك، سيتطلب الاعتماد الكامل لهذه التقنيات في برامج تقنية الحشرة العقيمة الكبيرة تحسينات من حيث الموثوقية والتكلفة وتوحيد الجرعة.

من المحتمل أن تستمر معظم المشعات البانورامية في العمل وتقديم الخدمات لبرامج تقنية الحشرة العقيمة الكبيرة في المستقبل المنظور. ومع ذلك، من المرجح أن يزيد الاهتمام المتزايد والطلب على تطوير واستعمال تقنية الحشرات العقيمة ضد نواقل البعوض الطلب على مزيد من تطوير مصادر الأشعة السينية التي يمكن استخدامها بواسطة برامج تقنية الحشرات العقيمة المحلية الأصغر.

يعد استخدام الحشرات المعدلة وراثيًا لمكافحة الآفات موضوعًا معقدًا أثار جدلاً عامًا شديدًا. وفي سياق الهندسة الجينية للبعوض لمكافحة الأمراض، وجدت الدراسات أن حوالي 60 إلى 70 في المائة من البالغين في الولايات المتحدة يفضلون إطلاق البعوض المعدّل (فونك وهيفيرون (Funk and Hefferon)، 2018؛ وينيغ وآخرون (.Winneg et al)، 2018). وفي عام 2016، أجرت منطقة فلوريدا كيز لمكافحة البعوض استفتاءً غير ملزم بين سكان مقاطعة مونرو كجزء من إصدار تجريبي مقترح لبعوض *الزاعجة المصرية* المعدّل وراثيًا طورته Oxitec. وصوت 57 في المائة من السكان لصالح التجربة، لكن عارضه 65 في المائة من سكان الضاحية التي كان من المقرر إطلاقه فيها (سيرفيك (Servick)، 2016). وتضمنت العديد من التعليقات المتكررة حول هذا الموضوع الإشارة إلى البعوض المعدل وراثيًا قد يحمل مسببات أمراض جديدة ضارة بالإنسان والحيوان، وسيتم إضافة نوع جديد من البعوض إلى البيئة، وهناك نتائج اختبار محدودة موثقة. ومن المحتمل لأجل بناء ثقة الجمهور وقبول استخدام البعوض المعدل جينيًا، أن يستلزم الأمر معالجة كل هذه المخاوف بواسطة السلطات العامة والهيئات التنظيمية والمسؤولين المنتخبين.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

5-5 الفصل الخامس النتائج

النتائج 13: يحدث انتقال تدريجي إلى التقنيات البديلة في استعمالات التعقيم. وازداد استخدام تقنيات شعاع الإلكترون في تعقيم الأجهزة الطبية خلال السنوات العشر إلى الخمس عشرة الماضية على الصعيدين المحلي والدولي، ومن المتوقع أن تستمر في الزيادة لتلبية الطلب المتزايد على هذا الاستعمال. وأعلنت شركات عديدة أيضًا عن خطط لفتح منشآت جديدة للتعقيم بالأشعة السينية. ويتزايد قبول التقنيات البديلة لاستعمالات التعقيم الأخرى، بما في ذلك تشعيع الأغذية لأجل السلامة وعلاجات الصحة النباتية وتعقيم الحشرات، كبدائل قابلة للتطبيق للمصادر المشعة في العديد من البلدان.

ينمو سوق تعقيم الأجهزة الطبية في الولايات المتحدة بحوالي 5 إلى 7 في المائة سنويًا. ويمثل الانتشار الحالي لأساليب التعقيم التي تستخدمها الصناعة الطبية في 50 بالمائة بالتبخير بغاز أكسيد الإيثيلين، و40 في المائة بالتشعيع بالكوبالت 60، و10 في المائة بحزمة أشعة الإلكترون، وأقل من 1 في المائة أساليب أخرى (بما في ذلك التشعيع بالبخار والأشعة السينية). وليست هذه الأساليب بالضرورة بديلاً مباشرًا لبعضها البعض. وزاد استخدام حزمة أشعة الإلكترون في التعقيم على مدار العقد الماضي بوتيرة سريعة ومن المتوقع أن يواصل الزيادة بسبب الضغط لاستبدال التشعيع بالكوبالت 60 أو التبخير بغاز أكسيد الإيثيلين وكذلك أيضًا بسبب التحسينات في تقنية المسرع. وشهدت الفترة من عام 2005 إلى عام 2015 تركيب 4 أنظمة حزمة أشعة إلكترون في المتوسط سنويًا، ومن 2016 إلى 2019، ارتفع العدد إلى حوالي 12 نظامًا سنويًا. وبناءً على سيناريوهات التوقع المختلفة، من الممكن تركيب 200 إلى 400 نظام إضافي تعمل بحزمة أشعة الإلكترون خلال السنوات العشر القادمة. تتوافر أنظمة التعقيم بالأشعة السينية تجاريًا، لكنها محدودة الاستخدام. وأعلنت شركتان على الأقل عن خطط لفتح منشآت جديدة للتعقيم بالأشعة السينية.

على الرغم من التصور العام والتحديات الأخرى المتعلقة بتشعيع الأغذية لأغراض سلامة الأغذية والصحة النباتية في الولايات المتحدة وأوروبا، يتم اعتماد تقنيات بديلة بشكل متزايد في أماكن أخرى. تعتبر الصين أكبر مستثمر في العالم حتى الآن في مجال تشعيع الأغذية. وتستثمر الدولة في حزمة أشعة الإلكترون لتشعيع الأغذية لأغراض السلامة، حيث يتم بناء 5 إلى 10 آلات جديدة كل عام خلال السنوات الخمس الماضية. وعلى الرغم من أن حدوث الأمراض المنقولة عن طريق الأغذية يؤثر بشكل غير متناسب على السكان في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل، فمن غير المرجح أن يتم تنفيذ التشعيع الغذائي في العديد من هذه البلدان. على سبيل المثال، في إفريقيا، باستثناء مصر وجنوب أفريقيا، لا يمكن أن يدعم الافتقار إلى الموارد والبنية التحتية الأساسية، تقنيات تشعيع الأغذية على النطاق اللازم لتكون فعالة.

أصبحت تقنيات الأشعة السينية بدائل مقبولة بشكل متزايد لإشعاع غاما لتقنية الحشرة العقيمة، مع وجود العديد من المشاريع حول العالم التي تعتمد التقنية للسيطرة على مجموعات البعوض الإقليمية.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

6

المصادر المشعة والتقنيات البديلة في الاستعمالات الصناعية

يتعلق هذا الفصل بالاستعمالات الصناعية التي تستخدم مصادر مشعة أو تقنيات بديلة بخلاف استعمالات التعقيم، التي تم وصفها في الفصل الخامس. وهذه الاستعمالات هي التصوير الشعاعي الصناعي، والمقاييس الصناعية، وتسجيل قياسات الآبار، وأنظمة المعايرة، والمولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة (RTGs). والجدير بالذكر، أن هذا الفصل لا يناقش تعديل المواد، الذي يستخدم الإشعاع من المصادر المشعة، أو الأشعة السينية، أو حزم أشعة الإلكترون لتغيير خصائص المواد للاستعمالات التجارية المختلفة مع الاستعمال الرئيسي وهو الربط المتقاطع لسلاسل البوليمر لمنتجات مثل عزل الأسلاك وإطارات السيارات والقفازات المطاطية.[1]ويرجع ذلك إلى أن جزءًا صغيرًا فقط (يُقدر بأنه أقل من 10 في المائة) من الإمداد العالمي من الكوبالت 60 يُستخدم لهذا الاستعمال[2] وبالتالي فهو ليس دافعًا في قرارات اعتماد التقنيات البديلة.

6-1 التصوير الشعاعي الصناعي

أُستخدم التصوير الشعاعي الصناعي لأكثر من 50 عامًا وهو أداة أساسية للاختبار غير المدمر (NDT) لتقييم السلامة وضوابط الجودة في العديد من الصناعات. ووفقًا لممثل الصناعة الذي تحدث أمام اللجنة، يوجد أكثر من 10,000 مصدر للتصوير الشعاعي يتم بيعها على مستوى العالم سنويًا، ويتم بيع حوالي 4,000 منها في السوق الأمريكية. ويوجد أكثر من 1,000 جهة حاصلة على ترخيص باستخدام كاميرات التصوير الشعاعي في الولايات المتحدة.[3]

يعتمد التصوير الشعاعي الصناعي على نقل وامتصاص / تخفيف الطاقة الكهرومغناطيسية قصيرة الموجة (فوتونات أشعة غاما والأشعة السينية) لتصوير الهياكل مثل اللحامات والمسبوكات لاكتشاف العيوب الداخلية أو المسامية؛ وأنابيب الغاز والنفط لاكتشاف الانسداد والتآكل وسماكة جدار الأنابيب؛ والهياكل الصناعية لضمان عدم وجود شقوق أو انسداد؛ وقطع غيار الطائرات والسيارات لاكتشاف العيوب. وتوجه كاميرا التصوير الشعاعي بغاما أو أنبوب الأشعة السينية شعاعًا من أشعة غاما أو الأشعة السينية إلى العنصر الذي يجري اختباره، وكاشف (فيلم أو إلكتروني) يصطف مع الشعاع على الجانب الآخر من العنصر يسجل أشعة غاما أو الأشعة السينية التي تمر عبر المادة. ويتناسب عدد الفوتونات التي تمر عبر المادة مع سمكها وكثافتها. ونظرًا لأن المادة أرق أو أقل كثافة حيث يوجد صدع أو عيب، فإن المزيد من الفوتونات تمر عبر تلك المساحة. وينشئ الكاشف صورة من الأشعة التي تمر عبره، تسمى صورة الأشعة، التي تُظهر الشقوق أو العيوب. ويُظهر التصوير الشعاعي أيضًا اختلافات في كثافة المواد. على سبيل المثال، يتم التعرف على وجود شوائب معدنية في عينة بلاستيكية، من خلال التصوير الشعاعي سواء كانت المادة ذات سماكة مختلفة أم لا عند تلك النقطة. أيضًا، قد لا ينتج عن شق أو عيب داخل مادة اختلاف سمك قابل للقياس في المادة، لكن قد ينتج عنه اختلاف في امتصاص

[1] راجع الوكالة الدولية للطاقة الذرية، تعديل المواد على https://www.iaea.org/topics/material-modification.

[2] إيان داوني، نورديون، عرض تقديمي أمام اللجنة في 13 أكتوبر 2020.

[3] مايك فولر ومارك شيلتون، QSA Global، Inc.، عرض تقديمي أمام اللجنة في 13 أكتوبر 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الفوتون والتشتت بالنسبة للمادة السليمة التي يتم الكشف عنه باستخدام التصوير الشعاعي. ومن الضروري أن يُصدر المصدر طاقة يمكنها اختراق المواد المختبرة وتؤدي إلى صورة ذات تباين وتعريف مناسبين للفيلم المُعالَج أو لصورة رقمية.

يتم إجراء بعض التصوير الشعاعي في حاويات أو خزانات محمية لحماية المشغل والجمهور من التعرض للإشعاع. وفي أغلب الأحيان، يتم إجراء التصوير الشعاعي في مواقع ميدانية نائية، مما يتطلب نقل المصدر والكاشف / الفيلم إلى الموقع، وهو ما يحدث عادة في شاحنة غرفة مظلمة متنقلة. على سبيل المثال، لفحص أنابيب النفط أو الغاز الجديدة، يتم لصق فيلم حساس فوق اللحام حول الجزء الخارجي من الأنبوب. ويتم وضع كاميرا التصوير الشعاعي إما خارجيًا أو داخليًا (عبر زحافة أنبوب) على الأنبوب، وينتقل مصدر لمشع إلى موضع اللحام. وعندما يصل إلى الموضع، يصبح المصدر المشع مكشوفًا عن بُعد ويتم إنتاج صورة إشعاعية للحام على الفيلم، والتي يتم إظهارها وفحصها لاحقًا بحثًا عن علامات على وجود عيوب. وتشمل الأمثلة الأخرى التي يتم إجراء التصوير الشعاعي الصناعي فيها من خلال هذا المجال مصافي النفط والمصانع الكيماوية والمنصات البحرية وصنادل مد الأنابيب وخزانات التخزين وأوعية الضغط وخطوط الأنابيب والجسور والمباني.

6-1-1 تقنيات النظائر المشعة

تستخدم معظم كاميرات التصوير الشعاعي الإيريديوم 192، لكن عددًا كبيرًا من أجهزة التصوير الشعاعي تستخدم الكوبالت 60 أو السيلينيوم 75. وتعتمد النظائر المشعة المختارة على المادة المراد تصويرها بالأشعة وسمكها. وتُستخدم أشعة غاما عالية الطاقة من الكوبالت 60 عادةً للأجزاء السميكة من الفولاذ، من بوصة واحدة إلى عدة بوصات. ويُستخدم الإيريديوم 192 للصلب حتى سمك 2.5 سم، ويُستخدم السيلينيوم 75 للمعادن الأخف وزنًا والأرق. وعادةً ما تندرج مصادر التصوير الإشعاعي ضمن مصادر الفئة 2 في نظام الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA). ويوضح الجدول 1-2 العمر النصفي والانبعاثات المشعة وطاقات هذه النظائر المشعة، ويلخص الجدول 6-1 الخصائص الأساسية لكاميرات التصوير الشعاعي الصناعية بناءً على النظائر المشعة المعينة.

تُصنع كاميرات تصوير أشعة غاما من غلاف فولاذي، يكون عادة ملحومًا ومغلقًا، والذي يغلف اليورانيوم المستنفد أو التنغستين أو درع الرصاص. ويُستخدم اليورانيوم المستنفد (DU) عادةً كدرع للإيريديوم 192 نظرًا لكثافة اليورانيوم المستنفد وقدرته على حماية المصادر عالية النشاط بأمان مع معدلات الجرعة الخارجية التي تلبي المتطلبات التنظيمية. ويستخدم التنغستين عادة لحماية مصادر السيلينيوم 75. ويتم توصيل المصدر بسلك قصير أو كبل مرن قصير غالبًا ما يسمى "سلك التوصيل" (راجع الشكل 6-1) الذي يضع المصدر في الوضع المحمي ويسمح بإغلاق المصدر بشكل آمن في الوضع المخزن.

من الممكن أن تكون كاميرا تصوير أشعة غاما إما على غرار جهاز الإسقاط أو بالنمط الاتجاهي (راجع الشكل 6-2 أ-ج). وفي الكاميرا بنمط جهاز الإسقاط، يُسقط المصدر من الموضع المحمي للكاميرا وينتقل في أنبوب توجيه إلى الموضع المطلوب ثم يُعاد إلى الوضع المحمي في نهاية وقت التعريض. وفي الكاميرا ذات النمط التوجيهي، لا يغادر المصدر الجهاز، لكن يتم نقله من موضع التخزين المحمي إلى نقطة حيث يمكن للمصدر أن يكشف كائنًا في اتجاه محدود.

الجدول 6-1 الخصائص الأساسية لكاميرات التصوير الإشعاعي الصناعية القائمة على النظائر المشعة

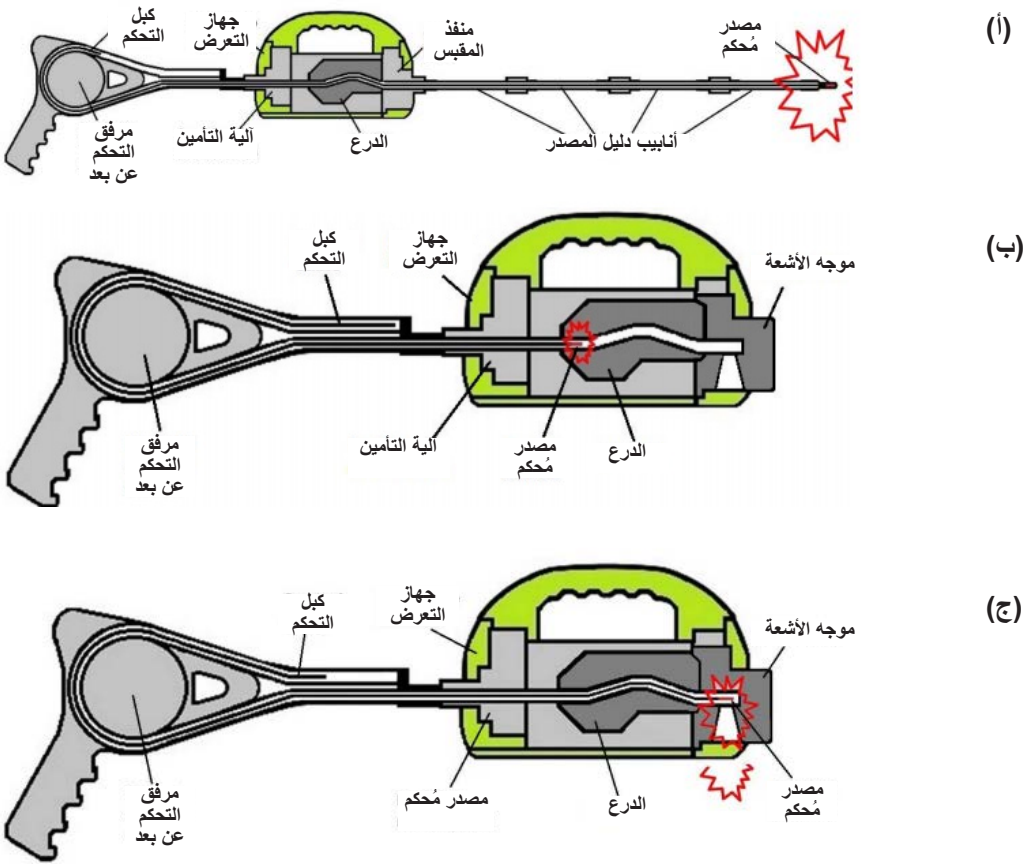
النظائر المشعة	نطاق عمل مفيد في النحاس والنيكل وسبائك الفولاذ [1]	وزن الجهاز وأبعاده
إيريديوم 192	1.2 - 6.3 سم	23.6 كجم 33 × 20.3 × 22.9 سم
سيلينيوم 75	0.3 - 2.9 سم	ما يصل إلى حوالي 19 كجم؛ يمكن استخدام أجهزة أصغر وأخف وزنًا لإجراء نشاط أقل
كوبالت 60	5-15 سم	270 كجم وما فوق؛ 48.3 × 48.3 × 48.3 سم^3

[1] من ASNT،2019.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الشكل 6-1 مصادر التصوير الإشعاعي على أطراف السلاسل أو الكابلات. مصدر الكوبالت-60 على الأسلاك (الصورة في الأعلى)؛ مصدر إيريديوم-192 على الأسلاك (الصورة في الوسط); ومصدر السيلينيوم-75 على التنغستن الخلفية المحمية كابل (الصورة في الأسفل). جميع المصادر من الفئة 2 إلى الفئة 3.
المصدر: QSA Global, Inc.



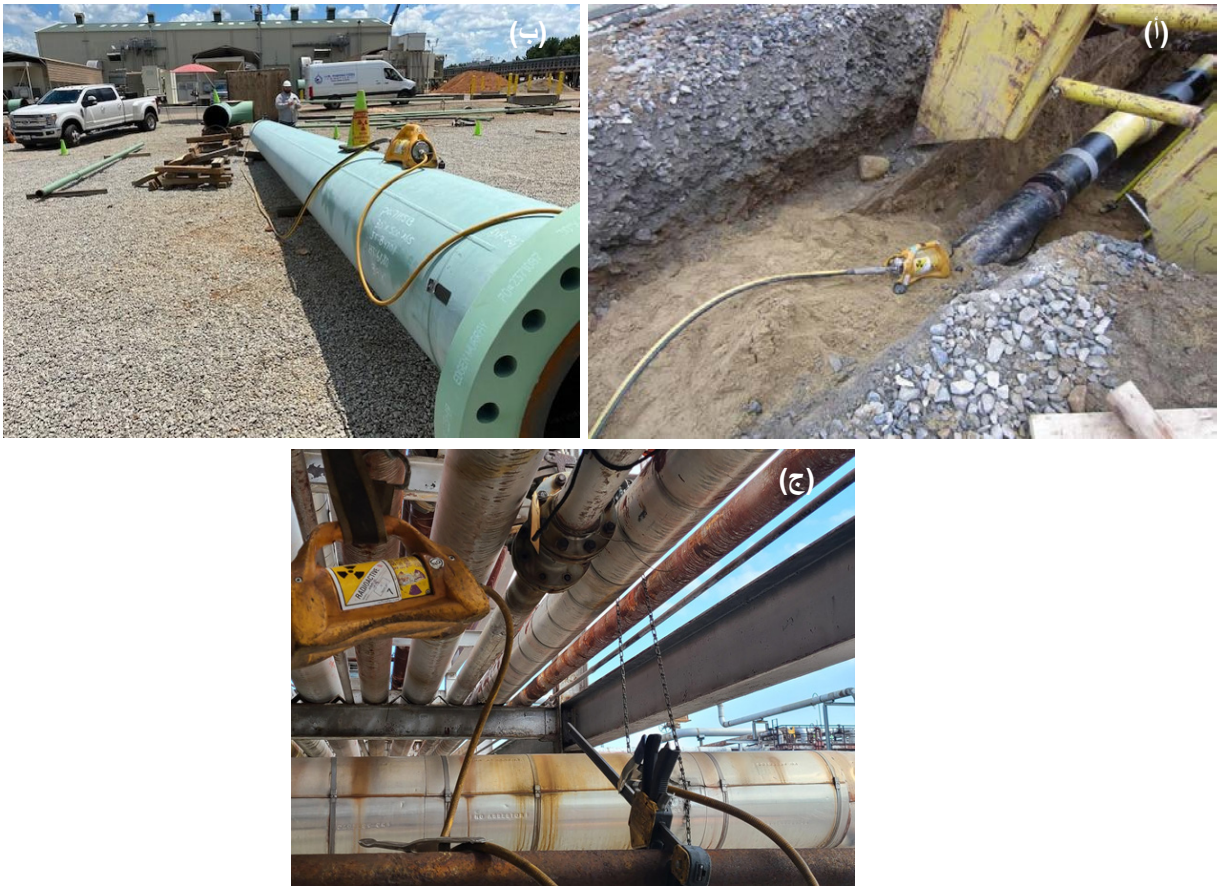
الشكل 6-2 (أ) كاميرا تصوير إشعاعي من طراز جهاز العرض و(ب) إيقاف تشغيل كاميرا التصوير الشعاعي الاتجاهية و(ج) تشغيلها.
المصدر: QSA Global, Inc.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

تحتوي كاميرات التصوير الشعاعي التقليدية على غلاف مادي مضغوط لمصادر الإيريديوم 192 والسيلينيوم 75 التي تتطلب تدريعًا أقل وبالتالي فهي أخف وزنًا من كاميرات مصدر الكوبالت 60. ولا تتطلب كاميرات التصوير الشعاعي أيضًا أي طاقة كهربائية، مما يجعلها جذابة للعديد من الصناعات لأن معظم عمليات الفحص تحدث في مواقع ميدانية خارجية نائية. ويمكن أن تعمل كاميرات تصوير أشعة غاما في ظل الظروف المناخية والمادية الصعبة. وتم تصميم معظم كاميرات التصوير الشعاعي الصناعية لتحمل الظروف العادية وظروف الحوادث أثناء الاستخدام وفقًا للمعيار المعمول به (ISO 3999) وأثناء النقل بناءً على إرشادات الوكالة الدولية للطاقة الذرية (2018 ج). وبموجب هذا التوجيه، يجب أن تفي الكاميرات بمتطلبات الاختبار الصارمة مثل اختبار السقوط من ارتفاع 9 أمتار والاختبار الحراري عند 800 ° مئوية. وتجعل هذه المتطلبات كاميرا تصوير أشعة غاما قوية ومناسبة تمامًا للاستخدام في الاستعمالات الميدانية.

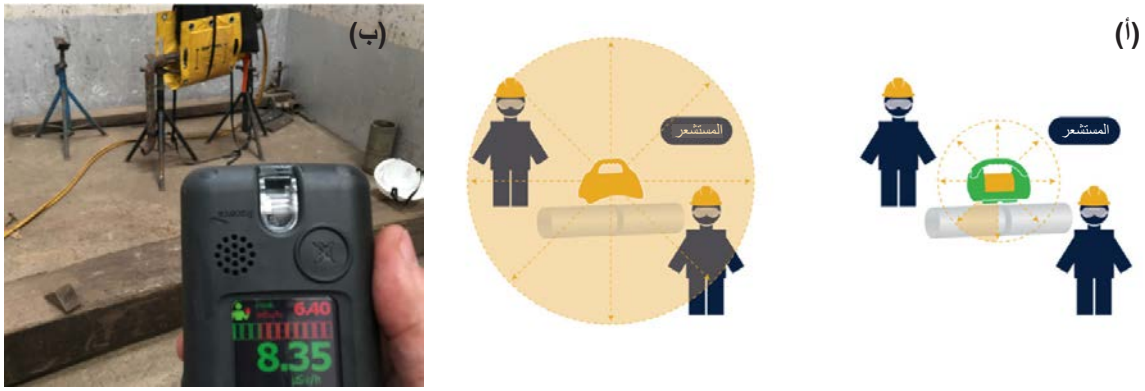
يوفر الحجم الصغير لكاميرات التصوير الشعاعي التقليدية بأشعة غاما (خاصة تلك التي تستخدم مصادر الإيريديوم 192 والسيلينيوم 75) سهولة نقلها والتعامل معها في مواقع العمل (راجع الشكل 6-3 أ-ج) التي تواجه تحديات مادية مثل العمل في المرتفعات، والظروف الموحلة أو المتربة، ودرجات الحرارة القصوى. ويمكن المناورة بها بسهولة حول المنشآت، ويمكنها التنقل عبر الأنابيب صغيرة الأقطار للحصول على صور بالأشعة دون صعوبة. ومع ذلك، فإنها تنطوي على عيوب تتعلق بالسلامة والأمن لأن الكاميرات تحتوي على نويدات مشعة عالية النشاط من الفئة 2، وكثيرًا ما يتم نقلها وغالبًا ما تستخدم في مواقع نائية بدون تدابير أمان خاصة في بعض البلدان. وعندما تكون كمية المواد المشعة كبيرة، كما هو الحال مع مصادر التصوير الشعاعي الصناعي، من الممكن أن تتسبب الحوادث في عواقب وخيمة أو حتى مميتة (كويتوكس وآخرون (Coeytaux et al.)، 2015؛ الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 1998). ويوجد عدد يُقدر بالآلاف من هذه الكاميرات قيد الاستخدام أو قيد النقل حول العالم في أي وقت.



الشكل 6-3 تصوير المواقع الميدانية حيث يتم إجراء فحوصات التصوير الشعاعي عادةً: (أ) كاميرا التصوير الشعاعي (في وسط الصورة وبملصق ثلاثي الفصوص الإشعاعي) الموضوعة للفحص غير المتلف للأنبوب؛ (ب) كاميرا التصوير الشعاعي (الجزء الأيمن العلوي من الصورة) المستخدمة لفحص أنبوب؛ (ج) كاميرا تصوير إشعاعي معلقة من أنبوب لوضع أنبوب التوجيه في موقع التعرض الصحيح لصورة شعاعية للحام الأنبوب.
المصدر: QSA Global, Inc.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version



الشكل 6-4 (أ) منطقة التصوير الإشعاعي بجهاز SCAR وبدونه. مطلوب مساحة إشعاع أصغر يتم التحكم فيها عند استخدام جهاز SCAR (اللوحة اليمنى) مقارنة بالتصوير الشعاعي التقليدي (اللوحة اليسرى)؛ (ب) الجرعات تظهر ذروة القراءة من 8.35 ميكرون سيفرت/ساعة (معدل جرعة منخفضة نسبيا) لقياس حدود منطقة الحظر السلامة من الإشعاع للجهاز SCAR في العملية، وهو ما يقرب من بضعة أمتار من مقياس الجرعات. المصدر: QSA Global, Inc.

لم يتغير شيء يذكر في التصوير بأشعة غاما خلال السنوات العشر الماضية؛ ومع ذلك، أدت بعض التغييرات في تصميم المعدات إلى تحسين سلامة التشغيل. ويمثل نظام التصوير الشعاعي للمنطقة الصغيرة الخاضعة للرقابة (SCAR) نظام تصوير بأشعة غاما توجيهيًا يستخدم مصدرًا إشعاعيًا منخفض النشاط (السيليتيوم 75) داخل جهاز تعريض صغير الحجم مع توجيه مدمج لتعزيز القدرة على الفحص الشعاعي مع جرعة جسم بالكامل أقل احتمالية ولتقليل منطقة استبعاد السلامة الإشعاعية إلى بضعة أمتار بدلاً من 100 متر (راجع الشكل 6-4 أ-ب). ويسمح كذلك بإجراء أعمال أخرى في الموقع لأن تشتت الإشعاع أقل. ويستخدم التصوير الشعاعي للمنطقة الصغيرة الخاضعة للرقابة (SCAR) في المواقع التي تكون فيها منطقة إجراء التصوير الشعاعي صغيرة نسبيًا، مثل منصات البترول. وتعتبر تقنية التصوير الشعاعي للمنطقة الصغيرة الخاضعة للرقابة (SCAR) أكثر شيوعًا في البلدان الأخرى عنها في الولايات المتحدة. ويرجع هذا على الأرجح إلى استخدام بلدان أخرى، تاريخيًا، مصادر ذات نشاط أقل لإجراء التصوير الشعاعي الصناعي مقارنة بالولايات المتحدة لأن الحد الأقصى للجرعة السنوية للعامل هو 2 ريم (20 مللي سيفرت) مقابل حد الولايات المتحدة البالغ 5 ريم (50 مللي سيفرت). وتبلغ أنشطة المصادر شائعة الاستخدام في الولايات المتحدة 100-150 كوري (3.7-5.6 تيرا بيكريل) من الإيريديوم 192، في حين أن أنشطة المصادر المستخدمة في معظم البلدان الأخرى تتراوح من 20 إلى 50 كوري (740 جيجا بيكريل) إلى 1.85 تيرا بيكريل) للحد من تعرض الأفراد.

6-1-2 التقنيات البديلة

في حين أن كلاً من فوتونات الأشعة السينية وأشعة غاما يمكن أن تنتج جودة صورة مماثلة على صورة شعاعية يتطلبها الكود الصناعي، فإن المعدات نفسها مختلفة تمامًا. وعلى عكس النويدات المشعة، تولد أجهزة الأشعة السينية نطاقًا مستمرًا من طاقات الفوتون يصل إلى حد أقصى معين اعتمادًا على جهد التشغيل. وتتطلب أجهزة الأشعة السينية التقليدية عمومًا طاقة 220 فولت، والتي قد يكون من الصعب توفيرها في الميدان. وتتطلب كذلك نظام تبريد، وهي كبيرة جدًا بحيث لا يمكن نقلها عبر وحول الأنابيب والبنية التحتية الأخرى. وتعد معظم أنظمة الأشعة السينية أكثر ملاءمة لأعمال التركيب الدائمة ولا يمكن استخدامها في معظم مواقع العمل المؤقتة اقتصاديًا بسبب حجمها ووزنها وإمكانية الوصول إليها ومتطلبات الطاقة الكهربائية، وعادة ما تتطلب سقالات باهظة الثمن. وبالمقارنة، يمكن إدخال أنابيب دليل المصدر المستخدمة في كاميرات التصوير بأشعة غاما في مناطق صغيرة للغاية ومحصورة لإنتاج صور إشعاعية.

لا تتمتع أنظمة الأشعة السينية عادة بالقوة في البيئات المادية الصعبة مثل كاميرات التصوير الصناعي بأشعة غاما. ومن المرجح أن يتعرض أنبوب الأشعة السينية للضرر في البيئة الميدانية. ولذلك، في حين أن مصادر الأشعة السينية مناسبة للاستخدام في منشأة ثابتة، إلا أنها لم تكن الخيار المفضل للتصوير الشعاعي في المواقع الميدانية. ومع ذلك، أدت التطورات في تصميم الأشعة السينية إلى تطوير مصادر الأشعة السينية النبضية التي تعمل باستخدام طاقة البطارية وذات حجم مادي قريب من علب المصدر المشع (لايت (Light)، 2008). وتحسنت وحدات الأشعة السينية النبضية بشكل كبير من حيث قابلية النقل والصلابة على مر السنين ويمكن أن تكون بديلاً قابلاً للتطبيق في بعض المواقع النائية (غولدن (Golden)، 2014). وتتمتع ببعض المزايا على التصوير التقليدي بأشعة

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الجدول 6-2 مقارنة الأداء بين الاختبار الآلي بالموجات فوق الصوتية (AUT) والتصوير الشعاعي بأشعة غاما لأنواع مختلفة من العيوب

نوع العيب	الاختبار الآلي بالموجات فوق الصوتية (AUT)	أشعة غاما	الأشعة السينية
صدع ضيق يتماشى مع الموجة الصوتية	ضعيف	قوي	قوي
صدع رأسي ضيق	قوي	قوي	قوي
صدع أفقي ضيق	قوي	ضعيف	ضعيف
عيب سطح محدود العمق	ضعيف	قوي	قوي
سمك الحائط	قوي	ضعيف	ضعيف
المساميّة	ضعيف	قوي	قوي

المصدر: تم التعديل من العرض التقديمي لمايك فولر ومارك شيلتون، QSA Global، Inc. إلى اللجنة في 13 أكتوبر 2020، ليشمل الأشعة السينية.

غاما، مثل تقليل أوقات التعريض والحاجة إلى مناطق أصغر خاضعة للسيطرة. ومع ذلك، لا تزال الحاجة إلى الاستبدال المتكرر المكلف للأنابيب والاستخدام المتكرر تجعل التصوير بأشعة غاما الخيار الأكثر موثوقية والمفضل.

كما ذكرنا في الفصل الرابع، طورت شركة RadiaBeam، وهي شركة صغيرة مستفيدة من برنامج أبحا ابتكار الأعمال الصغيرة (SBIR)، التابع للإدارة الوطنية للأمن النووي مسرعًا خطيًا صغيرًا درسته الشركة كبديل محتمل لمصادر الإيريديوم 192 للتصوير الشعاعي الصناعي. وتم اعتبار هذه الآلات باهظة الثمن للغاية ولا يمكنها منافسة التكلفة المنخفضة نسبيًا لمصادر الإيريديوم 192. وتعتبر RadiaBeam في مراحل البحث الأولية لتطوير مسرع خطي صغير الحجم بقدرة 1 ميغا إلكترون فولت يعمل بالبطارية والذي، إذا نجح، سينتج أشعة سينية أعلى طاقة من أنبوب الأشعة السينية وبالتالي سيمتلك طاقات مماثلة لتلك الموجودة في الإيريديوم 192. ونظرًا لانخفاض استخدام الطاقة، لن تتطلب هذه التقنية التبريد بالمياه. ويتطلب هذا المفهوم المقترح عملاً إضافيًا كبيرًا لإنشاء نموذج عمل يمكن اختباره ميدانيًا. وأقر ممثل RadiaBeam الذي تحدث للجنة أنه من غير المحتمل أن تتناسب هذه التقنية الجديدة مع السعر المنخفض لاستخدام النظائر المشعة المتاحة بسهولة التي أثبتت جدواها، على الرغم من الحاجة إلى الاستبدال الروتيني لمصادر الإيريديوم 192.[4]

يُصدر الاختبار الآلي بالموجات فوق الصوتية (AUT)، كبديل للتصوير الشعاعي الصناعي، موجات فوق صوتية إلى مادة تخضع للفحص. وتعكس هذه الموجات أو تكشف العيوب أو الشوائب في المادة وكذلك الأسطح الخارجية للمادة. ويقيس الكاشف الفوارق الزمنية في عودة هذه الموجات الصوتية من العيوب والأسطح الخارجية لتحديد أشكال ومواقع العيوب. ويتعين فحص عمليات المسح وتفسيرها بمهارة بواسطة فنيين مدربين ومعتمدين، ويمكن أن يكون تفسير الصور ذاتيًا بناءً على خبرة المشغل (موران وآخرون (Moran et al.)، 2015). وعلى الرغم من أن طرق التصوير الشعاعي بالنظائر المشعة والأشعة السينية يمكن أن تكتشف مجموعة واسعة من العيوب التي قد تترتب عن اللحام، فإن الاختلافات في الفيزياء تجعل كل طريقة حساسة لنوع معين من العيوب - التصوير الشعاعي مناسب لاكتشاف العيوب الحجمية مثل الخبث والمسامية، في حين أن الموجات فوق الصوتية أكثر ملاءمة لاكتشاف العيوب المستوية مثل الشقوق ونقص الانصهار. ويعرض الجدول 6-2 مقارنة لاستجابة القياس بين التصوير الصناعي باستخدام بأشعة غاما والاختبار الآلي بالموجات فوق الصوتية.

في عام 2009، مولت اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية مختبر شمال غرب المحيط الهادئ الوطني (PNNL) لإجراء مراجعة للأبحاث (موران وآخرون (Moran et al.)، 2010) للمساعدة في فهم القضايا المتعلقة بإمكانية التبادل للاختبار الآلي بالموجات فوق الصوتية مع التصوير الشعاعي الصناعي. واستهدفت مراجعة مختبر شمال غرب المحيط الهادئ الوطني استبدال التصوير الشعاعي بالاختبار الآلي بالموجات فوق الصوتية على وجه التحديد أثناء بناء مفاعلات الطاقة النووية؛ ومع ذلك، فمن المحتمل استقراء النتائج للاستخدامات الحالية الأخرى للتصوير الشعاعي والاختبار الآلي بالموجات فوق الصوتية. وخلصت المراجعة إلى أن الاختبار الآلي بالموجات فوق الصوتية كان ممكنًا للتصوير الشعاعي في بعض الحالات؛ ومع ذلك، فإن أساليب استخدام الاختبار الآلي بالموجات فوق الصوتية غير محددة حاليًا بشكل كافٍ وستحتاج إلى تحديد أو يلزم تحديد معيار أداء.

6-1-3 اعتبارات اعتماد التقنية البديلة

لا تزال المصادر المشعة الطريقة المفضلة للاختبار الصناعي غير التدميري في العمليات الميدانية النائية لأن البدائل ليست متساوية أو متفوقة حتى الآن من حيث قدرتها على اكتشاف الأعطال، حيث توفر صورًا لا يمكن تفسيرها بسهولة، وهي أعلى تكلفة

[4] سليم باوتشر، شركة راديابيام تكنولوجيز، عرض تقديمي أمام اللجنة في 17 ديسمبر 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

وليست قوية. ولهذه الأسباب، كان اعتماد بدائل مثل الأشعة السينية والاختبار الآلي بالموجات فوق الصوتية للاختبار الصناعي غير التدميري بطيئًا.

كما هو الحال في الاستعمالات الطبية، مع التقدم المحرز في الموارد الحاسوبية والبرامج التحليلية المتطورة، يزيد التصوير الشعاعي الصناعي من استخدامه للتصوير الشعاعي الرقمي ليحل محل صور الأفلام التقليدية في بعض الاستعمالات. ويتم التقاط الصورة على ألواح الفوسفور وترقيمها، والتي يمكن بعد ذلك تفسيرها وتخزينها بسهولة. ويمكن تحسين الصورة الرقمية باستخدام البرامج، مما يجعل الصورة أسهل في التفسير. ونظرًا لأن ألواح الفوسفور تتطلب طاقة أقل لإنتاج صورة، فمن الممكن تقليل وقت التعريض ومنطقة استبعاد الإشعاع. وبالإضافة إلى ذلك، تسمح باستخدام مصادر مشعة منخفضة النشاط.

توجد حاليًا بعض عيوب استخدام التصوير الشعاعي الرقمي مقابل الفيلم، مثل ارتفاع تكاليف رأس المال الأولية، والقيود المفروضة على استخدام لوحات الفوسفور في المواقع الميدانية، ولوحات الفوسفور المسطحة التي لا يمكن ثنيها حاليًا حول الأنابيب، ومتطلبات التدريب الإضافية. ومع ذلك، عند تناول هذه الأمور، من المتوقع أن يزداد استخدام التصوير الشعاعي الرقمي. ويعرض مستند تقني من عام 2017 صادر عن SGS، وهي شركة رائدة في خدمات فحص الاختبارات، تقديرات تشير إلى أن استخدام التصوير الشعاعي الرقمي تمثل حوالي 10 في المائة من جميع التصوير الشعاعي ومن المرجح أن يزداد في المستقبل (مونتيس وتايلور Montes and Taylor)، 2017).

كما هو الحال مع التصوير الشعاعي مقابل الاختبار الآلي بالموجات فوق الصوتية، من المرجح أن تكمل تقنيات المسرع التصوير الشعاعي، بدلاً من أن تحل محله. ومن المحتمل استخدام التقنيات الأحدث مع المصادر المشعة ما لم تحظر اللوائح النظائر المشعة أو كانت هناك تحديات تتعلق بتوافر النظائر المشعة. وتنطبق المبادئ الفيزيائية المختلفة على أنواع وخصائص مختلفة من الأيونات وأشعة الإلكترون، لذا فإنها تقيس جميعًا عوامل مختلفة وكلها ذات قيمة. وخلصت ورشة في عام 2019 حول المسرعات نظمتها وزارة الطاقة (2019) إلى وجود حاجة إلى تحسينات تقنية أساسية إضافية لتصغير وتثبيت (أي زيادة العمر التشغيلي والصلابة)، وخفض تكلفة توليد حزم أشعة عالية الطاقة من الأيونات والإلكترونات.

تستخدم الدول النامية أيضًا تقنيات النظائر المشعة في الاختبارات غير المدمرة. وتجدر الإشارة إلى أن الوكالة الدولية للطاقة الذرية تقدم المساعدة التقنية بشأن مجموعة متنوعة من تقنيات الإشعاع للاختبار غير المدمر للدول الأعضاء التي تطلب مثل هذا التدريب والتوجيه. على سبيل المثال، في عام 2009 بمساعدة الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، بدأ مركز الاختبارات غير المدمرة التابع لمعهد الطاقة الذرية الفيتنامي في اعتماد التصوير الشعاعي الرقمي ليحل محل أفلام الأشعة السينية التقليدية، وقام بعد 10 سنوات بتشغيل 15 آلة تصوير إشعاعي رقمية (ماريه (Marais)، 2019).

تعتبر معدات التصوير الشعاعي الصناعية قوية للغاية ويمكن استخدامها لعقود مع حاجتها إلى الحد الأدنى من الصيانة. وينتج عن هذا عدم لجوء الشركات إلى استبدال المعدات العاملة وتأجيل تكاليف رأس المال لشراء أنظمة أكثر تطورًا وباهظة الثمن. وليس من الصعب تعلم أو تنفيذ تشغيل كاميرا تصوير إشعاعي صناعية. ورغم أنه لا يلزم سوى حوالي 160 ساعة من التدريب للحصول على شهادة لتشغيل هذا الجهاز، فإن المتطلبات الإلزامية تشمل مبادئ الإشعاع والتصوير الشعاعي، والتدريب على السلامة، وتفسير الأفلام الشعاعية ومعالجتها، بالإضافة إلى التدريب أثناء العمل كمساعد لمصور الأشعة.[5] ومع سهولة التشغيل وانخفاض تكلفة التشغيل والقدرة على استخدامها في المواقع البعيدة بدون طاقة خارجية، ستواصل العديد من البلدان النامية استخدام معدات غاما بدلاً من أنظمة الأشعة السينية.

تدرك اللجنة العمل الكبير الذي يجري تنفيذه في فرنسا لتحديد التقنيات البديلة لكاميرات التصوير بأشعة غاما. وتنسق مجموعة عمل تعاونية في فرنسا، من اتحاد فرنسا للاختبارات غير المدمرة والجمعية الفرنسية للحماية من الإشعاع، التحقيق في تحسين أداء السلامة في التصوير الشعاعي الصناعي والبدائل الممكنة لاستخدام مصادر غاما. وأقر مقدمو العروض في المؤتمرات التي نظمتها الوكالة الدولية للطاقة الذرية (مارتن (Martin)، 2013) وآخرون،[6] بأن استبدال التصوير بأشعة غاما ليحل ملحها اختبار الموجات فوق الصوتية الآلية أو بدائل أخرى لا يزال أمامه بضع سنوات. ويرجع ذلك إلى القيود الفنية للتقنية الجديدة والوقت اللازم لإجراء عمليات التحقق وتطوير المعايير. ومع ذلك، من المسلم به أن تظل هذه التقنيات الجديدة مكملة في المقام الأول للتصوير بأشعة غاما.

يرجع أحد أسباب استمرار استخدام التصوير الشعاعي الصناعي على نطاق واسع في المستقبل القريب إلى عدم تطوير بدائل لبعض الاستعمالات، على سبيل المثال، الحصول على صورة شعاعية لجسم صمام لتحديد ما إذا كان الصمام مغلقًا تمامًا. وسيستمر تطوير معدات وتقنيات الموجات فوق الصوتية المتقدمة؛ ومع ذلك، لا يزال معظم المستخدمين غير مستعدين لقبول النتائج أو تفسيرها، ويريد العديد من المستخدمين رؤية صورة مباشرة لا تتطلب تفسيرًا.[7] ويعني المستوى الأعلى للمعدات والمستوى الأعلى من المؤهلات الفنية تكلفة أعلى. ولا يرغب المستخدمون في دفع تكاليف أعلى للتقنيات البديلة عندما تعمل الأساليب الأساسية المثبتة بتكلفة أقل.

[5] يُرجى الاطلاع على https://atslab.com/training/rt-certification.

[6] الاجتماع المخصص للدول صاحبة المصلحة المشاركة في البدائل التقنية للمصادر المشعة عالية النشاط، الوكالة الدولية للطاقة الذرية. فيينا، النمسا، من 23 إلى 24 مايو 2019.

[7] ديفيد تيبو، .Team Inc، عرض تقديمي أمام اللجنة في 12 يونيو 2020.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

وبشكل عام، يوفر التصوير الشعاعي بالنظائر المشعة تكاليف تشغيل أقل بكثير لتحقيق نتائج فحص جيدة. وبالإضافة إلى ذلك، قد تكون بعض طرق الاختبار غير المدمرة غير ذات صلة كطريقة فحص صالحة. ويزن معظم مهندسي الاختبار غير المدمر طرق الفحص لاكتشاف العيوب، ونوع العيب في المادة موضوع البحث، وإمكانية الوصول، واقتصاديات الطريقة المستخدمة.

2-6 المقاييس الصناعية

تم استخدام المقاييس الصناعية المشعة الثابتة في كل أرجاء الصناعة لمدة 70 عامًا لقياس السماكة أو الكثافة أو مستوى التعبئة لمنتج أثناء تصنيعه أو معالجته دون ملامسة المادة نفسها. وتُستخدم مقاييس السُمك في المعالجة للتأكد من أن المنتج أو المادة بأكملها بالسُمك نفسه في جميع الأجزاء، أو للتأكد من تساوي الطلاء على المادة. وتُستخدم مقاييس الكثافة في إنتاج الإسمنت والبترول والطرق للتأكد من تناسق كثافة المادة. وتتحقق مقاييس مستوى الملء من كمية المواد داخل الوعاء، وتوفر مراقبة مستمرة أثناء الإنتاج، ويمكن العثور عليها في العديد من الصناعات بما في ذلك مصانع التعبئة.

يتم تركيب المقاييس الصناعية المشعة الثابتة بشكل دائم في مكان معين. وتمر الأشياء الخاضعة للفحص عادة عبر مقياس ثابت يحتوي على مصدر إشعاعي على سير ناقل أو خط أنابيب أو في وعاء للفحص. ويتم وضع كاشف إشعاع على الجانب الآخر من الجسم من المصدر. وعندما يتعرض المصدر المشع، ينبعث الإشعاع من المقياس ويمر بعض الإشعاع عبر المادة الصلبة أو السائلة التي تخضع للاختبار. ويمتص الجسم بقية الإشعاع. وسيتم قياس أي إشعاع يمكن أن يمر بالكامل عبر الجسم عند الكاشف وتحويله إلى إشارة كهربائية تسمح بالتحليل.

تتولى مقاييس أنابيب الدوران تقييم أطوال الأنابيب الفولاذية المستخدمة التي يُراد إعادة استخدامها. ويسمح ذلك بتحديد التآكل أو الانحلال أو أي عيوب أخرى في الأنبوب قبل وضعه في نظام قد يتسبب في حدوث مشكلات اقتصادية وبيئية وصحية مدمرة، حتى لو تعطل أنبوب واحد.

في مقاييس الناقل، تقيس أدوات قياس معدل التدفق كمية المادة التي تتدفق عبر مقطع عرضي في الأنبوب لكل وحدة زمنية. ويتم إخراج الكمية المقاسة في شكل كتلة أو حجم. وتقيس استعمالات معدل التدفق القياسية الغازات والأبخرة والسوائل التفاعلية أو اللزجة في خطوط الأنابيب. وتقيس أيضًا المواد الصلبة السائبة على سيور النقل في العديد من الصناعات، مثل التعدين ومواد البناء وتوليد الطاقة وصناعة اللُب والورق.

تُستخدم مقاييس الأفران العالية في صناعة الصلب، وتُستخدم مصادر الكوبالت 60 لقياس تآكل البطانة المقاومة للصهر من خلال مراقبة سماكة البطانة في هذه الأوعية المُحكمة. ومن الممكن أن توفر هذه المقاييس بيانات عن تدفقات الغاز والمواد، ومعلومات مفيدة للتحكم الدقيق في الفرن العالي.

في صناعة التعدين، يتم إطلاق المعادن مثل الذهب والنحاس والزنك من سوائل التعدين باستخدام وعاء مُحكم الغلق ذي قطر كبير مع جدران خزان سميكة. ويتم استخدام المقياس داخل الوعاء مُحكم الغلق لقياس مستوى والسائل مستوى نقطته ويعمل تحت ظروف كاشطة ودرجة حرارة وضغط عاليين.

في صناعة النفط والغاز، تحدث عملية إزالة فحم الكوك من الخام الثقيل تحت درجات حرارة قصوى تصل إلى 930° فهرنهايت. وتستخدم المقاييس الصناعية لقياس مستوى فحم الكوك في الخزان. وتفشل أساليب القياس الأخرى أو لا يمكن الاعتماد عليها على الإطلاق.

تستخدم صناعة البتروكيماويات مقاييس المستوى في عمليات مختلفة لفصل المنتجات في الخزانات الكبيرة ذات جدران الأوعية السميكة. وتتعرض عمليات الفصل عادة إلى مواد شديدة الكشط أو التآكل. ولا يمكن استخدام تقنية قياس غازية داخل الخزان بسبب هذه الظروف.

تستخدم أعمال التكرير مقياسًا لقياس كثافة ومعدل تدفق المادة المجروفة وهي طريقة راسخة في صناعة التجريف. ويوفر نظام قياس الكثافة، المثبت على الجدار الخارجي لخط الأنابيب، قراءات ثابتة في ظل الاهتزاز الشديد. وتُستخدم أنظمة قياس الكثافة في استعمالات التكرير للتحكم المستمر في العملية على خطوط الأنابيب. وأثناء القياس، لا تتأثر خصائص تدفق المادة بطريقة عدم الاتصال هذه.

يعد مقياس الكثافة أو المستوى، في جميع هذه الاستعمالات، تقنية راسخة توفر نتائج دقيقة وقابلة للتكرار، وقياسًا في الوقت الفعلي أثناء التشغيل، واستقرارًا عاليًا للقياس. وليس له كذلك أي تأثير على المواد التي تخضع للقياس، لأن القياس غير ملامس، مع تركيب مباشر خارج الوعاء.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

6-2-1 المصادر المشعة

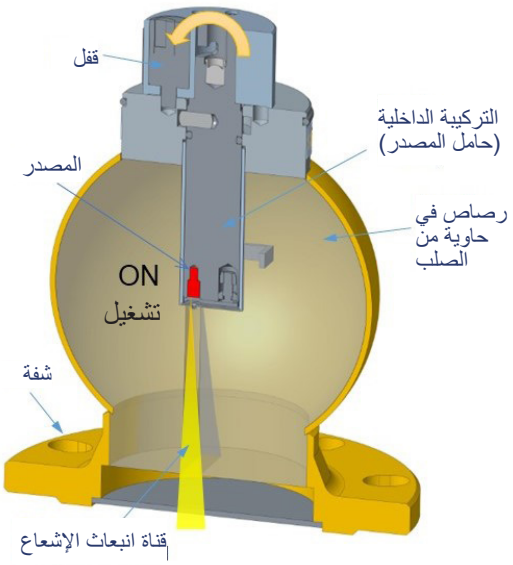
يمثل السيزيوم 137 والكوبالت 60 النويدات المشعة الأولية المستخدمة في المقاييس الصناعية الثابتة. تتراوح الأنشطة من 0.05 كوري إلى 5 كوري (1.85–185 غيغا بيكريل) للسيزيوم 137 و0.25 كوري إلى 10 كوري (9.75-370 غيغا بيكريل) للكوبالت 60 وتُصنف ضمن مصادر الفئة 3 والفئة 4 بناءً على نظام تصنيف الوكالة الدولية للطاقة الذرية.

تتمتع المقاييس ببنية بسيطة صلبة تتكون من غلاف فولاذي مملوء بالرصاص أو التنغستين أو الصلب كدرع (راجع الشكل 6-5). وتلبي المصادر المشعة المستخدمة في الجهاز متطلبات الشكل الخاص ومعايير الأداء العالي لمعيار ISO 2919 لقياس المصادر. ويتم تشغيل المقاييس عن طريق تدوير المصدر إلى الوضع المكشوف لأخذ القياس ثم العودة إلى الوضع المخزن المحمي في نهاية القياس. ولا تتطلب الأجهزة سوى قدر قليل من الصيانة وتعمل بشكل موثوق لسنوات مع حاجتها لأدنى حد من الدعم.

تُستخدم المقاييس عادة في البيئات القاسية مثل درجات الحرارة والضغط العاليين، داخل وحول مواد مسببة للتآكل ومواد كاشطة، وتحت اهتزاز مفرط. وعادة ما تكون المنشآت التي تتطلب الاختبار عبارة عن أوعية كبيرة ذات جدران سميكة وغالبًا ما تكون في مواقع يصعب الوصول إليها. ويتم تثبيت مصادر القياس بشكل دائم خارج الوعاء وتتطلب طاقة عالية لاختراق الجدران.

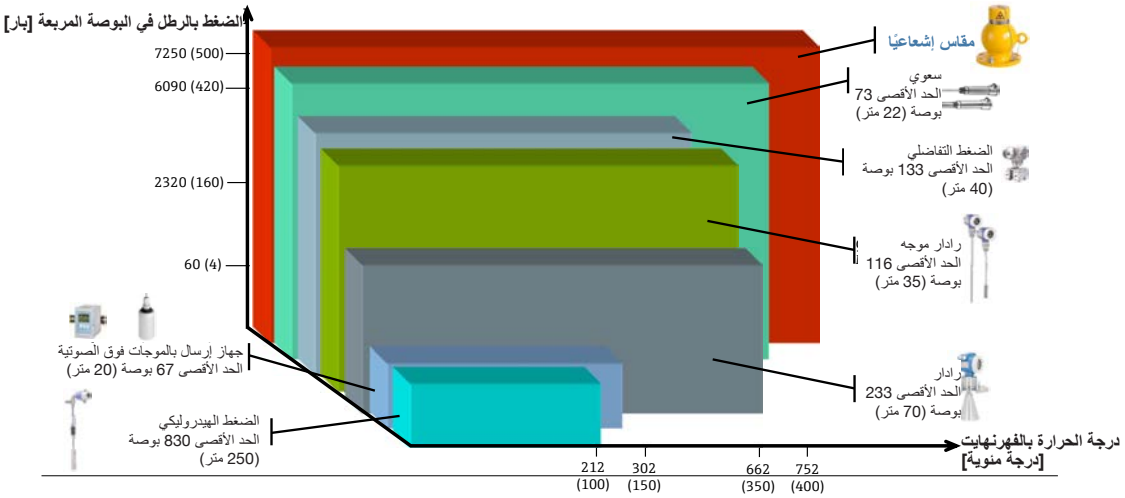
6-2-2 التقنيات البديلة

كما هو مذكور أعلاه، تُستخدم أنظمة القياس الإشعاعي، أي تلك التي تستخدم المصادر المشعة، عادة عند وجود ظروف معالجة قاسية، مثل درجات الحرارة العالية، والضغوط العالية، والبيئات الصناعية المسببة للتآكل، لأن القياسات الإشعاعية لا تتطلب التلامس مع المادة التي يجري قياسها. وفي حالة عدم وجود هذه الأنواع من الظروف، غالبًا ما تفضل الصناعة استخدام تقنيات بديلة بدون نظائر مشعة. وتستخدم هذه التقنيات (راجع الشكل 6-6) الرادار والرادار الموجه والموجات فوق الصوتية والضغط التفاضلي، وتتطلب الوصول إلى المواد الموجودة داخل الخزان أو الأنبوب.



الشكل 6-5 المقياس الصناعي. يتم تثبيت مصدر المقياس (الموضح باللون الأحمر) في حاوية واقية مزودة بواقي رصاص كافٍ لضمان ألا تتجاوز جرعة الإشعاع 7.5 ميكرون سيفرت/ساعة عند 1 متر من السطح. يُسمح للإشعاع المنبعث من مصدر النظائر المشعة بالخروج من قناة الانبعاث فقط عندما يتحول الإدخال إلى وضع "التشغيل".
المصدر: رالف ماتيس، إندرس + هاوزر، عرض تقديمي أمام اللجنة في 18 فبراير 2021.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.



الشكل 6-6 القيود المفروضة على قياسات المستويات على مخطط درجة الحرارة والضغط لمختلف أجهزة قياس المستوى الشائعة الاستخدام.
المصدر: رالف ماتيس، إندرس + هاوزر، عرض تقديمي أمام اللجنة في 18 فبراير 2021.

يُستخدم الرادار لقياسات المستوى. وتُركب أنظمة الموجات الراديوية هذه عادةً أعلى خزان مملوء بسائل أو مادة صلبة. ويرسل النظام إشارة رادار إلى المنتج ويستقبل انعكاس الإشارة مرة أخرى. وبناءً على الوقت المستغرق لعودة الإشارة، يحلل النظام مستوى التعبئة الحالي للخزان. ويتمتع الرادار بدقة قياس عالية ولا يتأثر بدرجة الحرارة أو الضغط.

يعمل القياس بالموجات فوق الصوتية عن طريق تركيب محول طاقة بالموجات فوق الصوتية في الجزء العلوي من حاوية تحتوي على سائل. ويرسل محول الطاقة نبضة فوق صوتية تنعكس مرة أخرى من سطح السائل. ويحسب الحساس بعد ذلك مستوى التعبئة بناءً على الوقت بين الإشارات المرسلة والمستقبلة.

يستطيع قياس الضغط التفاضلي قياس المستوى والكثافة ومعدل التدفق. ويعمل عن طريق قياس الضغوط المختلفة داخل وخارج الوعاء. ويتم تحويل التفاضل إلى إشارة إلكترونية وتحليلها. ويمكن أن تغطي هذه التقنية نطاقًا كبيرًا من الاستعمالات المختلفة ويمكنها اكتشاف اختلافات تبلغ بضعة ملليبارات.

6-2-3 اعتبارات اعتماد التقنية البديلة

يعتبر العامل الرئيسي الذي يجب وضعه في الاعتبار لاعتماد تقنيات بديلة لاستبدال المقاييس التي تستخدم المصادر المشعة هو القدرة على العمل في بيئات عملية قاسية حيث لا يكون نظام القياس على اتصال مباشر مع المادة التي يتم قياسها، كما ذكر سابقًا. وتكون قياسات الإشعاع مفيدة لظروف عدم الاتصال هذه. ويبدو أن نظام الأشعة السينية يوفر هذه الإمكانية، ويصنع معظم مصنعي أجهزة القياس بعض أنظمة الأشعة السينية. ومع ذلك، لا تتمتع أنظمة الأشعة السينية هذه بالمتانة نفسها التي تتمتع بها أنظمة القياس بالمصدر المشع.

علاوة على ذلك، يجري استخدام العديد من المقاييس مع مصادر الفئة 3 في أنظمة التحكم في العمليات شديدة القسوة مثل درجات الحرارة و/أو الضغوط العالية، والوسائط الكاشطة أو اللزجة، والمواقع التي تتعرض فيها للاهتزاز أو التحريك المفرط، وغيرها من بيئات التشغيل القاسية التي لا تستطيع التقنيات الأخرى تحملها حاليًا. ولهذه الأسباب، من غير المحتمل وجود بديل باستخدام أي تقنية أخرى في المستقبل القريب للمقاييس التي تستخدم مصادر الفئة 3.

على الرغم من استخدام الضغط التفاضلي (DP) بشكل متكرر، حيثما أمكن، إلا أن القيود هنا قد تكون درجة الحرارة، أو التراكم، أو الوسائط اللاصقة، أو الوسائط الكاشطة، أو كثافة الوسيط المتغيرة. وفي كثير من الأحيان يطلب المستخدمون قياسين أساسيين فيزيائيين مستقلين بحيث يمكن الجمع بين قياسات الضغط التفاضلي والقياسات الإشعاعية لتحقيق التكرار في النتائج. وفي استعمالات التعدين والبتروكيماويات، يمكن استخدام الضغط التفاضلي، لكن لم يثبت أنه محل ثقة مثل المقاييس الإشعاعية بسبب القراءات غير الدقيقة عندما تتغير كثافة الوسائط وقصر عمر الحساس. لذلك، لم يكن بديلاً مجديًا.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

بالنسبة لعمليات التكرير، يتم استخدام أنظمة الموجات فوق الصوتية كبديل للمقاييس الراديومترية، لكنها تتطلب جهدًا عاليًا في التركيب، ويصعب معايرتها، وحساسة جدًا للاهتزاز.

في صناعة النفط والغاز خاصة في "فحم الكوك"، لا يوجد بديل مناسب بسبب درجات الحرارة العالية للغاية اللازمة في هذه الأوعية.

مع كل هذه التقنيات والاستعمالات غير المشعة، ربما يوجد بعض التحسن في المستقبل القريب، لكن الحدود المادية هي العوامل المقيدة، ويجب التغلب عليها للحصول على بدائل قابلة للاستعمال.

بشكل عام، مع زيادة حساسية أجهزة الكشف، يوجد اتجاه لاستخدام مصادر ذات نشاط أقل، وفي كثير من الحالات يمكن استبدال مصادر الفئة 3 المستخدمة حاليًا لتحل محلها مصادر من الفئة 4. ومع زيادة الحساسية، يمكن استخدام مصادر الفئة 3 لفترات زمنية أطول حتى عندما يتحلل المصدر إلى نشاط أقل، لذلك لا يلزم استبدالها كثيرًا، مما يؤدي إلى تأخير الحاجة إلى التخلص منها. ونتيجة لذلك، في المستقبل القريب، ستستخدم العديد من هذه الاستعمالات مصادر الفئة 4 وبالتالي ستقلل من مخاطر الأمان.

فيما يخص بعض الاستعمالات، لا توجد تقنية بديلة قابلة للاستعمال يمكنها حاليًا أن تحل محل استخدام أجهزة القياس بالمصادر المشعة. وكما هو الحال مع التصوير الشعاعي الصناعي، أصبح استخدام التقنيات البديلة الآن مكملاً لاستخدام المقاييس بالمصادر المشعة، ومن المحتمل أن تستمر هذه الحالة في المستقبل القريب.

3-6 تسجيل قياسات الآبار

تُستخدم تسجيل قياسات الآبار منذ أكثر من 90 عامًا لاستكشاف بنية وتكوين الصخور والسوائل في باطن الأرض، ولقياس الخصائص الفيزيائية البتروفيزيائية الأساسية للخزانات، ولتقدير إمكانات الموارد. ويعد التطبيق الأكثر شيوعًا لتسجيل قياسات الآبار هو البحث عن احتياطيات الهيدروكربون القابلة للاسترداد بواسطة صناعة البترول. ويعد تسجيل قياسات الآبار أيضًا أسلوبًا مهمًا يستخدم في البحث عن الموارد المعدنية والحرارة الجوفية والمياه الجوفية.

يوجد أكثر من 900,000 بئر نفط وغاز نشطة في الولايات المتحدة وملايين أخرى حول العالم. ومن عام 2014 إلى عام 2018، تم حفر أكثر من 19,000 بئر نفط وغاز سنويًا في الولايات المتحدة. وقبل جائحة فيروس كورونا (كوفيد-19)، كان من المتوقع اكتمال ما يقرب من 21500 بئر نفط[8] سنويًا من 2020 إلى 2022 (غارسايد (Garside)، 2019). وأدى التراجع الناجم عن الجائحة في النشاط الاقتصادي واستهلاك البترول إلى انخفاض ملحوظ في أسعار النفط والغاز وما يصاحب ذلك من انخفاض في عمليات الحفر والاستكشاف. (راجع المناقشة الإضافية في القسم 6-3-3.)

تجري عمليات تسجيل قياسات الآبار الحديثة إما في الوقت نفسه أثناء الحفر (تسجيل القياسات أثناء الحفر [LWD]) أو بعد حفر البئر عن طريق إنزال حبل سلكي يتضمن أدوات مخصصة في حفرة بئر مفتوحة أو مغطاة. ويتضمن كل أسلوب مزايا محددة. باختصار، يوفر تسجيل القياسات أثناء الحفر معلومات سريعة عن الوضع تحت السطح يمكن أن تساعد في توجيه الحفر في الوقت الفعلي تقريبًا، لكن الضغط الشديد ودرجة الحرارة والظروف الميكانيكية لبيئة الحفر، جنبًا إلى جنب مع الحاجة إلى تشغيل أداة تسجيل صغيرة نسبيًا واستعادة بيانات السجل، تقيد نوع الجهاز الذي يمكن استعماله وكمية البيانات التي يمكن نقلها بشكل موثوق إلى السطح أثناء الحفر. وفي المقابل، يسمح تسجيل القياسات عن طريق الحبل السلكي باستخدام مجموعة واسعة من أدوات التسجيل، لكن نظرًا لأن البيانات تصبح متاحة فقط بعد حفر البئر، لا يمكن استخدام هذه المعلومات لاتخاذ القرارات أثناء الحفر. ويعد حفر بئر للتنقيب عن البترول نشاطًا مكلفًا ومحفوفًا بالمخاطر حيث يكلف الشركة ما متوسطه 200,000 دولار إلى 300,000 دولار يوميًا في حالة استخدام منصة حفر بحرية (IHSMarkit، 2020). ويعتبر التنقيب عن المعادن أو التنقيب عن المياه الجوفية وإنتاجها أقل تكلفة، لكنه لا يزال مكلفًا.

يعد تسجيل قياسات الآبار نشاطًا متخصصًا للغاية. ويتعاقد المشغل، الذي يكون عادة شركة نفط دولية كبرى تعمل بمفردها أو كقائد لتجمع من الشركات، مع مزود خدمة لتصميم ونشر مجموعة من أدوات تسجيل القياسات المناسبة، وجمع بيانات السجل، وتوفير سجلات الآبار المشروحة. ثم يتم استخدام هذه السجلات بواسطة المشغل لاستنتاج المعلمات البتروفيزيائية الجوفية التي يمكن استخدامها لتقدير الموارد المحتملة وتكلفة الإنتاج ومخاطر المشروع المصاحبة. ويوجد أكثر من 200 من مزودي خدمات تسجيل قياسات الآبار في الولايات المتحدة. وتوفر جميع الشركات، وهي تقريبًا صغيرة إلى متوسطة الحجم، ما يقدر بنحو 60 إلى 70 في المائة من وحدات تسجيل القياسات في الولايات المتحدة. ومع ذلك، لا يتساوى عدد وحدات تسجيل القياسات لشركة تسجيل قياسات مع حجم أعمال تسجيل القياسات التي توفرها أي شركة. وتمتلك شركات تسجيل القياسات الدولية المتكاملة الكبرى حجم أعمال عالمي أكبر بكثير من 200 شركة تسجيل قياسات صغيرة إلى متوسطة الحجم مجتمعة. ومن بين أكبر أربع شركات دولية للتسجيل، توجد شركتان (Halliburton وBaker-Hughes) من أصل أمريكي، وشركة Schlumberger، وهي شركة فرنسية الأصل، لها مقرات

[8] يتضمن إتمام حفر البئر الخطوات المتخذة لتحويل البئر المحفور إلى بئر منتج. وتتضمن هذه الخطوات التغليف والتدعيم والتثقيب والدعم بالحصى، وتركيب شجرة إنتاج، وكلها تتم بشكل عام بعد تسجيل قياسات البئر.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

رئيسية في الولايات المتحدة وفرنسا. والشركة الرابعة، Weatherford، تم تشكيلها من مجموعة من عدة شركات مقرها المملكة المتحدة والولايات المتحدة وخرجت من السوق الأمريكية. ومن غير المؤكد كيف ستكون المنافسة في السنوات إلى العقود القادمة نظرًا لعوامل مختلفة تؤثر على الطلب على تسجيل قياسات الآبار (راجع المناقشة في القسم 6-3-3). وتمتلك شركات تسجيل القياسات الكبرى الموارد التقنية والمالية لتطوير بدائل لتسجيل قياسات الآبار المعتمد على النظائر المشعة. واستثمرت هذه الشركات في البحث عن البدائل، وأطلق البعض منها أساليب بديلة تجارية أو تجريبية تعتمد على أساس نووي.

تم تطوير ونشر مجموعة واسعة من تقنيات تسجيل القياسات، التي يمكن، لأغراض هذا التقرير، تصنيفها إلى ثلاث فئات عامة (راجع الجدول 6-3):

1. الأساليب غير النووية التي لا تتضمن مصدرًا للإشعاع المؤين (راجع المناقشة الموجزة أدناه حول جوانب بعض هذه الأساليب)؛
2. أساليب النظائر المشعة التقليدية التي تتضمن مصدرًا مغلقًا للإشعاع المؤين (راجع القسم 6-3-1 للاطلاع على مناقشة مفصلة)؛
3. أساليب مصادر النيوترون البديلة التي تستخدم مسرعات الديوتيريوم و/أو التريتيوم (راجع القسم 6-3-2 للحصول على مناقشة مفصلة).

تتضمن الأساليب غير النووية مصفوفات صوتية وحساسات كهربائية وكهرومغناطيسية وأجهزة قياس مغناطيسية وأدوات رنين مغناطيسي نووية وحساسات لدرجة الحرارة والضغط والأبعاد. وتميل هذه الأساليب إلى استكمال الأساليب المعتمدة على النظائر المشعة، وفقًا لما جرى مناقشته بمزيد من التفصيل في القسم 6-3-3. وتشمل الجوانب الفنية لهذه الأساليب غير النووية المفاهيم التالية حول ما يتم قياسه، وكيفية إجراء القياسات، والسجلات التي يجري تسجيلها (راجع الشريط الجانبي 6-1 حول أهمية سجلات قياسات الآبار في التنقيب عن البترول).

يقيس الكمون الذاتي (SP)، فرق الجهد الكهربي بين الأقطاب الكهربائية في أداة لقاع البئر. وبإضافة مصدر للتيار الكهربائي في المسبار، يمكن قياس المقاومة بين الأقطاب الكهربائية أو أجهزة الإرسال والاستقبال. ويؤثر التركيب المادي للصخور في الطبقة الجيولوجية التي يجري فحصها على المقاومة المقاسة. ويمكن استخدام سجل قياسات المقاومة (راجع الشكل 6-7) لتقدير مسامية الطبقة ومحتوى السوائل في المسام. وتُستخدم ملفات الحث الكهرومغناطيسي عادة لقياس المقاومة. وعلى وجه التحديد، يرسل ملف

الجدول 6-3 تقنيات تسجيل الآبار

التقنية	الطريقة	مصدر الإشارة	البحث عن المعلمة الجيولوجية
غير نووي			
المقاومة النوعية	LWD، خط سلكي	التيار الكهربائي الاصطناعي	تشبع ماء التكوين
إمكانات عفوية	خط سلكي	الإمكانات الكهربائية الطبيعية	مكونات التشكيل، محتوى الماء
الحث	LWD، خط سلكي	لفائف كهرومغناطيسية	مكونات التشكيل، محتوى الماء
عازل RF	خط سلكي	هوائي RF	مكونات التشكيل، محتوى الماء
الضغط	خط سلكي	الضغط في التشكيل	محتوى السائل
صوتي	خط سلكي	جهاز الإرسال والاستقبال الصوتي	محتوى السوائل والمسامية
الرنين المغناطيسي النووي	خط سلكي	الوسائط في المجال المغناطيسي	محتوى السوائل والمسامية
مصادر النظائر المشعة التقليدية			
أشعة غاما - كثافة غاما	LWD، خط سلكي	سيزيوم-137	كثافة التكوين، محتوى الصخر الزيتي
التكوين الأساسي للعناصر	LWD، خط سلكي	AmBe	مكونات التشكيل
الاعتدال النيوتروني	LWD، خط سلكي	AmBe	محتوى الهيدروجين
مصادر نيوترونية بديلة			
المقطع العرضي للنيوترون	LWD، خط سلكي	مسرع الديوتيريوم-التريتيوم (D-T)	كثافة التشكيل، المسامية
التكوين الأساسي للعناصر	LWD، خط سلكي	مسرع الديوتيريوم-التريتيوم (D-T)	مكونات التشكيل
الاعتدال النيوتروني	LWD، خط سلكي	مسرع الديوتيريوم-التريتيوم (D-T)	محتوى الهيدروجين

ملاحظة: AmBe = أميريسيوم-241/بريليوم ؛ D-T = ديوتيريوم-تريتيوم؛ LWD = التسجيل أثناء الحفر؛ RF = تردد الراديو.
المصدر: هيئة التنظيم النووي (NRC)، 2008.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الشريط الجانبي 6-1
سجلات قياسات الآبار في التنقيب عن البترول

يعد استكشاف الموارد نشاطًا مكلفًا وعالي الخطورة وعالي المكاسب تنتهجه كيانات تجارية محافظة إلى حد ما. ونتيجة لذلك، تعد الدقة في تسجيل قياسات الآبار عاملاً حيويًا لتقليل المخاطر المالية للتنقيب عن الموارد البترولية والمعدنية واستخراجها وإنتاجها. وتستند قرارات نفقات الاستكشاف في جزء كبير منها إلى المعلومات الجيولوجية والبتروفيزيائية الجوفية. وفي سياق استكشاف الموارد ومخاطر الإنتاج، لا يمكن التقليل من أهمية بيانات سجل قياسات الآبار الدقيقة والمحددة والموثوقة. على سبيل المثال، تعد *المسامية* من أهم المعلمات البتروفيزيائية في التنقيب عن البترول، وهي الجزء الحجمي من صخر الخزان المسامي الذي يمكن أن يحتوي على النفط والغاز الطبيعي و/أو الماء. وتتراوح مسامية الأحجار الرملية (صخور الخزان النموذجية) بين 15 و50 في المائة، بينما تتراوح مسامية الصخر الزيتي من 1 إلى 10 في المائة والمسامية في صخور الكربونات (على سبيل المثال، الحجر الجيري) من 5 إلى 55 في المائة.

لوضع المسامية (وخاصة عدم اليقين في المسامية، وهي مسألة رئيسية في تسجيل قياسات الآبار) في السياق الاقتصادي، يمكنك التفكير في صخور إيغل فورد في تكساس، وهي حاليًا واحدة من أكثر الخزانات البترولية نشاطًا وأهمية في الولايات المتحدة. تشير التقديرات إلى أن إيغل فورد تحتوي على 4.4 إلى 11.4 مليار برميل من احتياطيات النفط غير المكتشفة لكن القابلة للاسترداد تقنيًا. وبلغ متوسط تقدير 7.4 مليار برميل حوالي 300 مليار دولار في نوفمبر 2020 لأسعار خام غرب تكساس الوسيط. وإذا كان متوسط مسامية إيغل فورد المستخدم في إجراء هذا التقدير يُفترض بشكل غير صحيح أنه 3 في المائة لكنه في الواقع كان 2 في المائة، فسيكون النفط القابل للاستخراج أقل بحوالي الثلث تقنيًا، وهو فرق يبلغ حوالي 100 مليار دولار بأسعار اليوم.

الإرسال الإشارة الكهرومغناطيسية إلى التكوين الجيولوجي، ويتم جمع الإشارات المستحثة من التكوين بواسطة جهاز الاستقبال لقياس المقاومة الظاهرة. وبالإضافة إلى ذلك، تُستخدم أداة ثابت العزل أحيانًا للمساعدة في قياس محتوى الماء وأنواع الصخور في التكوين. ويقيس ثابت العزل قدرة المادة على تخزين الطاقة الكهربائية عند تطبيق مجال كهربائي، وفي هذه الحالة بالذات، تستخدم الأداة ترددات الموجات الدقيقة في نطاق من بضعة ميغا هرتز إلى 1.1 جيجا هرتز.

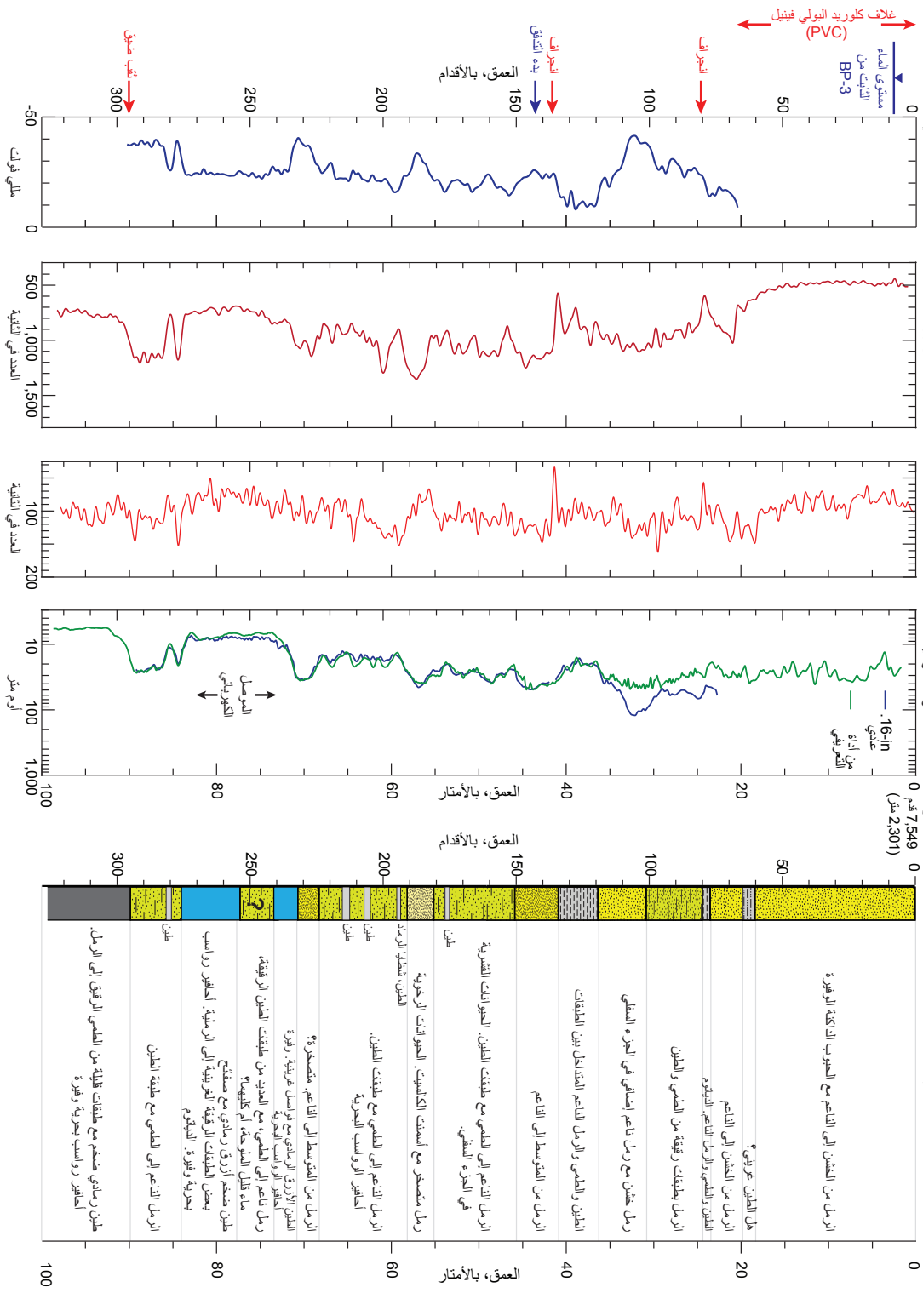
يُعد القياس المباشر لضغط التكوين مفيدًا لمعايرة القياسات الأخرى ولمقارنة النتائج المرتبطة بشكل مباشر أو غير مباشر بضغط التكوين. وتشمل هذه المعايرات والمقارنات مسابير المقاوم الحرارية (الثرمستور) التي تقيس درجة حرارة البئر، وآلات القياس الفكية للبئر التي تقيس الأقطار، وأجهزة مشاهدة قاع البئر التي تقيس الأشكال.

يتم تنفيذ تسجيل القياسات الصوتي بواسطة قياس سرعة الموجات الصوتية في التكوين بين المصدر والمستقبل في المسبار. وتكون سرعة الموجة الصوتية مؤشرًا على المسامية ومحتوى السوائل لنوع معين من الصخور. ويمكن جمع معلومات أكثر تعقيدًا من المصفوفات التي تقيس سرعات الموجات الانضغاطية (P) والقص (S) وحتى الموجات الموجهة (ستونيلي).

يتم إجراء القياسات المغناطيسية بواسطة خفض أنواع مختلفة من أجهزة قياس المغناطيسية في البئر، والأكثر شيوعًا في استكشاف المعادن لتحديد الاختلافات في الخصائص المغناطيسية للتكوين مثل قابلية التأثر والبقاء (الحث المغناطيسي المتبقي في مادة بعد إزالة المجال المغناطيسي الخارجي المطبق). واعتمادًا على الاستعمال، يجري تسجيل الاختلافات في إجمالي المجال المغناطيسي، ومكونات القوة الموجهة، و/أو تدرجات التوتر الخاصة به.

تعتمد مسامية ونفاذية التكوينات الجيولوجية على محتوى السوائل ومساحات المسام التي تحتوي على السوائل. ومن خلال تطبيق مجال مغناطيسي قوي، ستعمل ذرات الهيدروجين في السائل (عادةً الماء والهيدروكربونات) على محاذاة عزمها المغناطيسي. وتسمى هذه التقنية بالرنين المغناطيسي النووي (NMR)، وهي طريقة تصوير طبي معروفة (رغم أنها تُعرف في الطب باسم التصوير بالرنين المغناطيسي [MRI]). وعندما ينخفض المجال المغناطيسي، تتحرر نوى الهيدروجين إلى حالتها الأصلية وتنبعث منها إشارات يمكن اكتشافها. يمكن استخدام الإشارات المقاسة لقياس موقع وتركيز وكثافة ذرات الهيدروجين وبالتالي استنتاج مسامية ونفاذية التكوين. ونظرًا لأن شدة المجال المغناطيسي تتناقص بشكل حاد مع المسافة، والوسائط الجيولوجية مثل الطين على جدران البئر تخفف المجال المغناطيسي، فإن الرنين المغناطيسي النووي مفيد لقياس المسامية ومحتوى الماء في الصخور القريبة من حفرة البئر.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.



الشكل 6-7 نماذج السجلات الجيوفيزيائية التي تُظهر (من اليسار إلى اليمين) الإمكانات الذاتية (SP)، والنيوترون، وغاما، والمقاومة، والسجل الصخري للبئر رقم 3 حسب مقياس الضغط الجوي التابع للمسح الجيولوجي الأمريكي داخل حدود حديقة ومحمية Great Sand Dunes National Park.
المصدر: U.S. Geological Survey.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

6-3-1 تقنيات النظائر المشعة

تستخدم تقنيتا النظائر المشعة الأكثر شيوعًا المستخدمة في تسجيل قياسات آبار البترول مصادر السيزيوم 137 ومصادر نيوترون الأميريسيوم 241 والبيريليوم (AmBe)، وغالبًا ما يتم تعبئتها في أداة قاع البئر نفسها. وتتميز كلتا التقنيتين بانبعاثات إشعاعية مستقرة، على عكس العديد من التقنيات البديلة المرشحة، ولا تتأثر بالظروف البيئية القاسية في قاع البئر مثل الصدمات والاهتزازات الميكانيكية المستمرة والمكثفة ودرجات الحرارة المرتفعة والضغوط العالية. ويحتوي كلا نوعي المصدر على نظائر مشعة محفوظة في أكاسيد مقاومة للصهر صلبة أو سيراميك زجاجي مُحكم الإغلاق باستخدام حاويات معدنية مزدوجة أو ثلاثية الجدران.

تتمتع مصادر النظائر المشعة بمزايا مناسبة تمامًا لاستعمالات قاع البئر في الظروف القاسية: الحجم الصغير؛ وناتج إشعاعي مستقر على مدار مهمة تسجيل قياسات البئر؛ والتشغيل البسيط؛ والتكلفة المنخفضة نسبيًا؛ ولا توجد متطلبات للطاقة؛ والإشعاع موحد الخواص، وهي الأمثل للاستعمال في البئر. بالإضافة إلى ذلك، تتمتع مصادر السيزيوم 137 بعمر خدمة طويل نسبيًا يبلغ حوالي 15 عامًا. علاوة على ذلك، عادة ما يكون نطاق النشاط لهذه المصادر عند 1 - 3 كوري (37 - 111 غيغا بيكريل) وبكميات من الفئة 4 (CISA، 2019). وتتمثل عيوب المصادر المُحكمة في أنه لا يمكن إيقاف تشغيلها أو ذبذبتها، ولا يمكن تغيير طاقات غاما أو النيوترونات الخاصة بها، كما أنها تمثل خطرًا محتملاً على الأمن والسلامة الإشعاعية في حالة فقدها أو سرقتها أو إساءة استخدامها (CISA، 2019).

أشار تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008 إلى أنه في حين يمكن استبدال مصدر إشعاعي من الفئة 3 يعمل بالسيزيوم 137 لتحل محله آلة أشعة سينية بديلة مثل المسرع الخطي، إلا أن هناك عقبات كبيرة في تطوير أداة عملية (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008). وشملت هذه المشاكل حجم الآلة، وطيف طاقتها الواسع، وثباتها، وإشعاعها متباين الخواص. وبالنظر إلى هذه المشاكل، لم يتم إنجاز سوى القليل من أعمال التطوير منذ عام 1987. ورأت لجنة عام 2008 أن استبدال هذه المصادر لم يكن أولوية، ويبدو أنه لم يكن هناك تقدم ملموس في تقنيات تسجيل السيزيوم 137 منذ ذلك الوقت.

ومصادر نيوترون الأميريسيوم والبريليوم (AmBe) عبارة عن خليط من أكسيد $^{241}AmO_2$ (ثاني أكسيد الأميريسيوم 241) ومساحيق معدنية من ^{9}Be (البريليوم 9). ويتم ضغطها بإحكام في شكل أسطواني لزيادة احتمالية حدوث تفاعل جسيم ألفا مع البريليوم وعادة ما يتم تغليفها في وعاء ملحوم أو ثلاثي الجدران من الفولاذ المقاوم للصدأ (راجع الشكل 6-8).

ينتج عن الانحلال الإشعاعي للأميرسيوم 241 جسيمات ألفا، والتي تتفاعل مع ذرات البريليوم 9 لإنتاج ذرات النبتونيوم 237، وذرات الكربون 12، ونيوترونات حرة، وأشعة غاما بقدرة 4.4 ميغا إلكترون فولت. وتخضع قوة مصدر النيوترون لنشاط الأميريسيوم 241، الذي يمكن أن يصل إلى 16 كوري بالنسبة لمصادر التسجيل، وهو أقصى نشاط مسموح به لمصدر من الفئة 3. ويتحلل النبتونيوم 237 إلى البروتكتينيوم 233 (بعمر نصفي 2.1 مليون سنة)؛ وبالتالي، فإن نشاط ألفا الرئيسي ينتج عن انحلال الأميريسيوم 241.

الشكل 6-8 تصميم مصدر نموذجي لنيوترونات الأميريسيوم والبريليوم.
المصدر: QSA Global, Inc.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

توجد ثلاث فئات على الأقل من المخاطر الأمنية المرتبطة بمصادر نيوترون الأميريسيوم البريليوم النشطة (أي المستخدمة بانتظام) أو التي توقف استخدامها: (1) فقدان السيطرة على مصدر نشط أثناء عمليات تسجيل القياسات؛ و(2) فقدان السيطرة على مصدر نشط أثناء النقل إلى/من موقع تسجيل القياسات أو أثناء التخزين المؤقت؛ و(3) فقدان السيطرة على مصدر توقف استخدامه أثناء التخزين الدائم. ومن الممكن أن تؤدي أي من حوادث فقدان السيطرة هذه إلى إصابة إشعاعية و/أو تلوث بالموقع و/أو الحرمان من المنطقة عن طريق التشتت العرضي أو الاستخدام المتعمد لسلاح إشعاعي (RDD).

6-3-2 التقنيات البديلة

يحتوي تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008 (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008) على نظرة عامة على تقنيات المصادر النيوترونية البديلة التي يمكن استخدامها في تسجيل قياسات الآبار لأنه في ذلك الوقت كانت العديد من مصادر الأميريسيوم والبريليوم في الفئة 2 وبالتالي ضمن نطاق تقرير عام 2008 لكن، كما هو مذكور في الجدول 6-4، تندرج جميع المصادر الجديدة في الفئة 3. وتضمنت هذه البدائل مصادر نيوترونية معتمدة على معجل تشتمل على الديوتيريوم و/أو التريتيوم ومصادر نيوترون كاليفورنيوم 252 مُحكمة. ويركز هذا القسم على التقنيات البديلة التي تستخدم الديوتيريوم و/أو التريتيوم نظرًا لأن الكاليفورنيوم 252 مصدر للنظائر المشعة. وينتج الكاليفورنيوم 252 نيوترونات عبر الانشطار التلقائي ويمكن أن يكون مصدرًا موثوقًا للنيوترونات؛ ومع ذلك، نظرًا لعمره النصفي القصير نسبيًا الذي يبلغ حوالي 2.6 سنة، يجب تجديده بشكل متكرر أكثر من مصادر الأميريسيوم والبريليوم. لكن مصادر الكاليفورنيوم ذات عائد نيوترون أعلى من مصادر الأميريسيوم والبريليوم، وسيكون توليد النيوترونات المكافئ بين النوعين بقدرة 27 ميغا كوري (1 غيغا بيكريل) للكاليفورنيوم 252 مقابل 16 كوري (592 غيغا بيكريل) لمصدر الأميريسيوم والبريليوم النموذجي (CISA، 2019) ويلخص الجدول 6-5 بعض فوائد وقيود التقنيات البديلة التي تستخدم الديوتيريوم و/أو التريتيوم مقابل الأميريسيوم والبريليوم لمصادر النيوترون.

منذ نشر تقرير الأكاديمية الوطنية للعلوم لعام 2008، تم إنجاز قدر كبير من العمل في أبحاث تسريع الديوتيريوم -الديوتيريوم والديوتيريوم -التريتيوم و التريتيوم -التريتيوم. على سبيل المثال، بدعم من برنامج أبحاث ابتكار الأعمال الصغيرة (SBIR) التابع للإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA)، طورت Starfire Industries مولد النيوترون المحمول nGen® D-D ونشرjه في أداة QL-40 Compensated Neutron Logger، مما يدل على استجابات تكوين مماثلة (لكن ليست متطابقة) مع مصادر الأميريسيوم والبريليوم التقليدية. وأصبح تسجيل القياسات النيوتروني النبضي الذي يكون مصدره المسرع متاحًا الآن من مجموعة واسعة بشكل متزايد من مقدمي الخدمات. لكن في الوقت الذي يتزايد فيه توافر أدوات تسجيل قياسات النيوترون المعتمدة على المسرع القابلة للتحويل، يظل تقييم التكوين باستخدام مصادر نيوترون الأميريسيوم والبريليوم المُحكمة خيارًا مفضلاً. وتوجد مناقشة لأسباب هذا التفضيل في القسم التالي.

الجدول 6-4 تقنيات المصدر المُحكم ومعلمات التسجيل

تكنولوجيا المصدر	فئة المصدر	قياس المعلمة (المعاملات)	استنتاج الملكية البتروفيزيائية / الجيوكيميائية
مصفوفة السيراميك الزجاجي للسيزيوم 137	مستويات نشاط الفئة 4 التي تصنفها الوكالة الدولية للطاقة ضمن الفئة 3	أشعة غاما المشتتة	الكثافة المسامية القائمة على الكثافة تصوير كثافة الآبار تحديد الغاز، مع مسامية النيوترونات
^{241} خليط Am-Be	جميع مصادر Am Be الجديدة بين < 16.2 كوري (0.6 تيرابيكريل) والفئة 3	مجموع عدد النيوترونات نسبة عدد النيوترونات	المسامية الظاهرة تمايز الصخر الزيتي/الرمل إذا كانت أشعة غاما طبيعية غير صالحة للاستعمال الليثولوجيا، كمدخل للمسامية والتشبع
^{241}خليط Am-Be	جميع مصادر Am Be الجديدة بين < 16.2 كوري (0.6 تيرابيكريل) والفئة 3	أطياف التقاط النيوترون	تحليل العناصر علم الليثولوجيا/علم المعادن

المصدر: CISA، 2019.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الجدول 6-5 مزايا وعيوب النظائر المشعة والتقنيات البديلة لتسجيل الآبار

مصادر نيوترونية Am Be	مصادر نيوترونية بديلة
المزايا • صغيرة، ذاتية الطاقة، متينة • عمر عمل طويل (حوالي 15 سنة) • سرعة تسجيل أسرع بشكل عام • انبعاثات أكثر استقرارًا • 2× ناتج نيوتروني أعلى مقابل D-D • المزيد من البيانات المرجعية لتسجيل السجلات • تكلفة أقل	المزايا • يتيح الوضع النبضي مزيدًا من أنواع القياس • يمكن إيقاف تشغيله (يجب استخدامه شهريًا لصيانة الأنبوب) • اختبارات التسرب غير مطلوبة لـ D-D ولكنها مطلوبة لـ D-T • تقليل مخاطر التريتيوم على السلامة والأمان • معامل صفري للجرعة عند إيقاف التشغيل
المساوئ • الوضع النبضي غير ممكن • لا يمكن إيقاف تشغيله • 2× ناتج نيوتروني أقل مقابل D-T • أكثر صعوبة في الشحن والترخيص • اختبارات التسرب مطلوبة • مخاطر السلامة والأمان للنظائر المشعة	المساوئ • أكبر، يتطلب طاقة • عمر عمل أقصر • سرعة تسجيل أبطأ • انبعاثات أقل استقرارًا • تكلفة أعلى، يلزم توفر قطع غيار بالموقع

ملاحظة: D-D = الديوتيريوم-الديوتيريوم ؛ D-T = الديوتيريوم-التريتيوم.
المصدر: تم التعديل من العرض التقديمي الذي قدمه مايك فولر ومارك شيلتون، QSA Global، Inc.، إلى اللجنة في 13 أكتوبر 2020، ليشمل الأشعة السينية.

6-3-3 اعتبارات اعتماد التقنية البديلة

وفقًا للموضح في القسم السابق، لم يكن الاستبدال البديل للمصادر المشعة للسيزيوم 137 من الفئة 3 مثل تلك المستخدمة في تسجيل قياسات الآبار أولوية بسبب انخفاض النشاط، ولم يتم إحراز تقدم في اعتماد البدائل. ويركز هذا القسم على اعتبارات اعتماد التقنية البديلة المرتبطة بمصادر نيوترون الأميريسيوم والبريليوم

بدافع من مخاوف السلامة والأمن، حققت صناعة البترول في استخدام مصادر نيوترونية بديلة لتسجيل قياسات الآبار لعدد من السنوات (بوند وآخرون (Bond et al.)، 2011). وتمتلك شركات تسجيل القياسات الكبيرة متعددة الجنسيات ميزانيات بحث وتطوير تقدر بملايين الدولارات للتقنيات البديلة. ولا يجري تطوير التقنية الجديدة في الشركات الصغيرة التي تفتقر إلى رأس المال الكافي وميزانيات البحث والتطوير وحوافز السوق. ونتيجة لذلك، يجب أن يعتمد مقدمو الخدمات الأصغر على أدوات تسجيل القياس المثبتة الموجودة ويمكن توقع مقاومة التغييرات التقنية التي تتمتع بالقدرة على التأثير بشكل كبير على أعمالهم (بدر الزمان وآخرون (Badruzzaman et al.)، 2015).

بشكل عام، تواجه الجهود المبذولة لاستبدال المصادر المشعة الحالية عددًا من التحديات الفنية واللوجستية والمالية. ويتمثل أحد التحديات في الاعتقاد بأن الأدوات البديلة (المعتمدة على المسرع) أقل دقة من أجهزة المصدر المشع في تحديد المسامية (راجع، على سبيل المثال، بدر الزمان (Badruzzaman)، 2014؛ بدر الزمان وآخرون(Badruzzaman et al.)، 2019). بالإضافة إلى ذلك، يكمل الرنين المغناطيسي النووي والقياسات الصوتية تقنيات المصادر المشعة وليست بديلاً عنها (بدر الزمان وآخرون (Badruzzaman et al.)، 2015). وعلى وجه الخصوص، يستطيع قياس الرنين المغناطيسي النووي تصنيف السوائل ويمكن أن يشير إلى النفاذية، لكن لا يمكن أن يوفر الرنين المغناطيسي النووي المعلومات الخاصة بالتعدين. بالإضافة إلى ذلك، من الممكن أن تشير القياسات الصوتية إلى تباين خواص الصخور لكنها لا توفر المعلومات الخاصة بالتعدين (CISA، 2019). وبالنسبة للتعدين، يجري بالفعل استبدال أدوات التحليل الطيفي التي تعمل بمصدر الأميريسيوم والبريليوم بأدوات التحليل الطيفي لنيوترون الديوتيريوم -التريتيوم (بيمبر وآخرون (Pemper et al.)، 2006؛ رادتكه وآخرون (Radtke et al.)، 2012). ومع ذلك، تتضمن بعض مصادر النيوترونات المعتمدة على المسرع تقنيات مزدوجة الاستخدام حساسة للأمان[9] والتي يمكن أن تعقد البناء والاستخدام، خاصة في المناطق غير المستقرة سياسيًا.

سيحتاج أي مستخدم لأداة بديلة إلى وضع بروتوكولات معايرة جديدة وربما تطوير طرق ارتباط جديدة لمقارنة استجابات أداة بديلة باستجابات مصدر مشع تقليدي باستخدام تكوينات مرجعية قياسية. ويرجع السبب في ذلك إلى أن تحليل سجل قياسات الآبار الحديث يعتمد على كميات كبيرة من البيانات القديمة التي جرى قياسها من الخزانات على مدى عقود عديدة باستخدام طرق تسجيل

[9] تنطوي التقنية ذات الاستخدام المزدوج على استعمالات في المنتجات التجارية وأنظمة الأسلحة. ويعد مولد نيوترونات الديوتيريوم-التريتيوم (D-T) تقنية ذات استخدام مزدوج وتخضع هذه المولدات للوائح التصدير.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

القياسات التقليدية (خاصة تلك التي استخدمت المصادر التقليدية لنيوترونات السيزيوم 137 والأميريسيوم والبريليوم). ونظرًا لاختلاف خصائص الطاقة الطيفية لمصادر الأميريسيوم والبريليوم عن تلك الخاصة بمصادر الديوتيريوم-التريتيوم والتريتيوم-التريتيوم، ولأن هذه الاختلافات يمكن أن تؤدي إلى عدم يقين إضافي (لكن لا يمكن التغلب عليه) في قرارات الاستكشاف، كان اعتماد التقنيات البديلة المعتمدة على المسرع تدريجيًا وكان كذلك يعتمد بشكل حاسم على التحقق من صحة التقنية فيما يتعلق بالبيانات القديمة. ويمثل هذا فرصة يمكن معالجتها من خلال الإجراءات الجماعية للرابطات الصناعية وربما الوكالات الحكومية.

وأشار تقرير الأكاديميات الوطنية لعام 2008 إلى أن مصادر الأميريسيوم والبريليوم المستخدمة في سجلات تحليل العناصر يمكن أن تحل محها مسرعات ديوتيريوم-تريتيوم قابلة للتحويل (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008). والجدير بالذكر أن مسرعات التريتيوم-التريتيوم ليست مفيدة مثل مسرعات الديوتيريوم -التريتيوم بسبب انخفاض إنتاجية النيوترونات بمقدار 100 ضعف تقريبًا ولأن التريتيوم (نويدة مشعة) يُستخدم لكل من النوى المتسارعة ونوى الهدف. علاوة على ذلك، في حين أن استبدال أداة المسامية التي تعمل بالأميريسيوم والبريليوم سيكون أكثر صعوبة، إلا أن أحد مزودي الخدمة الرئيسيين قام بحلول عام 2008 بتسويق أداتي مسرع يعمل بالديوتيريوم-التريتيوم، واحدة لتسجيل المسامية النووية والأخرى للتسجيل باستخدام حبل سلكي أثناء الحفر. ونتيجة لذلك، أوصى التقرير بتكليف مجموعة عمل صناعية بمهمة حل العقبات الفنية التي تحول دون تنفيذ عمليات الاستبدال المعتمدة على المسرع لمصادر تسجيل قياسات الآبار التي تستخدم الأميريسيوم والبريليوم (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008). أحرزت مجموعة المصالح الخاصة النووية التابعة لجمعية علماء فيزياء البترول ومحللي سجلات الآبار تقدمًا كبيرًا في معالجة هذه التوصية، وفي الوقت الحالي يقدم معظم مقدمي الخدمات الرئيسيين وبعض مقدمي الخدمات من الحجم الصغير والمتوسط مصادر معتمدة على مسرع نابض لتسجيل قياسات الآبار المعتمدة على النيوترون كجزء من مجموعات منتجاتهم.

وناقش المشاركون في ورشة عمل وزارة الطاقة في عام 2019 (وزارة الطاقة (DOE)، 2019) ما يلي:

- حدثت بعض التطورات الأخيرة البارزة: (1) جهاز أشعة سينية منخفض الطاقة (< 300 كيلو إلكترون فولت) و(2) مولدات نيوترون بخلاف مسرعات الديوتيريوم-التريتيوم (بدر الزمان وآخرون (Badruzzaman et al.)، 2019؛ بوندارينكو وكوليك (Bondarenko and Kulyk)، 2017؛ جورتشيك (Jurczyk)، 2018؛ سيمون وآخرون (Simon et al.)، 2018
- بالنسبة لمسامية النيوترون المعتمدة على مولد الديوتيريوم-التريتيوم، بالرغم من تسويق إحدى الشركات أدوات لكل من تسجيل القياسات باستخدام الحبل السلكي وتسجيل قياسات الآبار أثناء الحفر، لم تقدم الشركات الأخرى هذه الأدوات إلى السوق بسبب العوامل الاقتصادية. وبالإضافة إلى ذلك، أظهرت أداة التسجيل أثناء الحفر أداءً جيدًا، لكن أداة الخط السلكي واجهت أداءً ضعيفًا بسبب الظروف البيئية لحفر الآبار.
- رغم أن تطوير أداة كثافة الأشعة السينية الحديثة يعتمد على الاختبارات الميدانية الواعدة للبحث والتطوير الذي يعود إلى حقبة ثمانينيات القرن العشرين في أداة كثافة الأشعة السينية لمسرع خطي بقدرة 3.5 ميغا إلكترون فولت (كينغ (King)، 1987)، إلا الأداة الجديدة أصغر وأبسط وواعدة في الاختبارات الميدانية. لكنها لا تزال تواجه تحديات في الاستعمال في الظروف البيئية الأكثر قسوة لتسجيل القياسات أثناء الحفر.

بالإضافة إلى ذلك، تستخدم تقنية الكثافة، المعروفة باسم كثافة نيوترون-غاما غير المرنة، أشعة غاما التي يتم إنتاجها أثناء التشتت غير المرن للنيوترونات عالية الطاقة. تم الإبلاغ عن كثافة نيوترون-غاما غير المرنة لأول مرة في منتصف التسعينيات لاستعمالات الفتحات المغلفة؛ وتم دمجها في أداة القياس أثناء الحفر المعتمدة على مولد الديوتيريوم-التريتيوم في عام 2000 (إيفانز وآخرون (Evans et al.)، 2000) وتم تسويقها في عام 2012 (رايشل وآخرون (Reichel et al.)، 2012). ومع ذلك، نظرًا لفيزياء النيوترون والفوتون المختلطة، فإن تقنية كثافة نيوترون-غاما غير المرنة ليست دقيقة مثل كثافة غاما-غاما، لكن يمكن استخدامها في ظروف خاصة. علاوة على ذلك، لقياس الكثافة البديل بناءً على فيزياء الفوتون، فإن استخدام الأشعة السينية الانكباحيه سيوفر نظيرًا أقرب بكثير لأشعة غاما المعتمدة على السيزيوم 137. وتعتبر الآلية الفيزيائية الأساسية لكل من الأشعة السينية وأشعة غاما هي تشتت الكومبتون. وبالتالي، من الممكن أن تحل آلية معتمدة على مولد الأشعة السينية محل الطريقة المعتمدة على السيزيوم 137. وفي المقابل، تقدم طريقة نيوترون-غاما "كثافة زائفة" مفيدة فقط عندما تكون كثافة غاما "إما غير متوفرة أو لا يمكن الحصول عليها" وتعتمد على الظروف المفصلة بواسطة بدر الزمان وآخرون (Badruzzaman et al.)، (2014).

توجد تقنية أخرى تعتمد على المسرع هي مسرع جسيمات ألفا بتركيز البلازما الكثيف (DPF). وباستخدام تفاعل (ألفا-البريليوم)، يستطيع تركيز البلازما الكثيف توليد طيف نيوترون يطابق بشكل كبير طيف مصدر الأميريسيوم والبريليوم. ولذا أثبتت هذه التقنية أنها تكرر استجابة مسامية النيوترون بشكل شبه دقيق. ومع ذلك، سيتطلب مسرّع تركيز البلازما الكثيف (ألفا-البريليوم) بحثًا وتطويرًا على المدى الطويل قبل دمجه في أداة تسجيل قياسات تجارية (بدر الزمان وآخرون (Badruzzaman et al.)، 2019).

تعد صناعة البترول مشروعًا دوريًا بشكل ملحوظ. وفي الوقت الحالي، مع انخفاض أسعار النفط والغاز، تواجه شركات تسجيل قياسات الآبار تحديات كبيرة ومستدامة في الإيرادات واستخدام المعدات. وانخفض استخدام البنية التحتية لتسجيل القياسات بنسبة 50

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

إلى 60 في المائة، ويؤدي ضغط الأسعار إلى خصم كبير وتناقص الإيرادات المصاحبة. وكان لتسريح الموظفين بنسبة تتراوح من 50 إلى 60 في المائة، بسبب جائحة فيروس كورونا (كوفيد19-) وانخفاض أسعار النفط، آثارًا شديدة، كما انتشرت حالات الإفلاس في الصناعة في هذا الوقت. نتيجة لذلك، يعيد مقدمو الخدمات الرئيسيون تقييم احتياجات السوق. ولن تكون عمليات شراء رأس المال الكبيرة أو التغييرات في التقنية مجدية للعديد من الشركات في بيئة السوق الحالية.[10] ونتيجة لتقليل الاستخدام، قد تكون العديد من مصادر نيوترون السيزيوم 137 والأميريسيوم والبريليوم "عالقة" في الشركات الصغيرة والكبيرة لتسجيل قياسات الآبار التي لا حافز لديها للتحول إلى تقنية بديلة، لأن هذه المصادر أصول رأسمالية كبيرة يمكن أن يكون استبدالها مكلفًا. علاوة على ذلك، بالنسبة لشركة تسجيل قياسات تعاني من ضائقة مالية، ربما ينبغي تفادي التكاليف المطلوبة للتخلص الآمن من مصدر غير مستخدم. وبالتالي، فإن هذه المصادر التي تقطعت بها السبل تشكل خطرًا أمنيًا كبيرًا، خاصةً إذا أدى انخفاض الميزانيات الإجمالية للشركة إلى تقليل الإنفاق والتركيز على أمان تخزين المصدر.

إن الطلب المستقبلي على تسجيل قياسات الآبار في التنقيب عن البترول وإنتاجه والاستعمالات الأخرى غير مؤكد. وتدرك معظم الدول الآن أهمية اتخاذ إجراءات للحد بشكل فوري وحاد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري لإبطاء وحتى عكس آثار تغير المناخ. وسيكون لهذه الإجراءات آثار جسيمة على توليد الطاقة وتوزيعها. على سبيل المثال، أدت الجهود العالمية للحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري بالفعل إلى انخفاض الطلب على الفحم[11] لتوليد الكهرباء، مع ما يصاحب ذلك من زيادة في نشر تقنيات الطاقة المتجددة بما في ذلك الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية.

من شبه المؤكد أن صناعة البترول العالمية ستتأثر بشكل كبير بالإجراءات الدولية التي تم اتخاذها للحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. وبعض هذه التغييرات جارية بالفعل (كراوس (Krauss)، 2020). وسيكون أحد التغييرات الأكثر احتمالا هو انخفاض الطلب على الوقود السائل للنقل حيث يتزايد تحول أساطيل السيارات والشاحنات إلى الكهرباء.[12] ويؤدي انخفاض الطلب إلى انخفاض أسعار النفط، مما يؤدي إلى انخفاض الإنفاق على الاستكشاف، الذي من المتوقع بدوره أن يؤدي إلى انخفاض الإنفاق على خدمات تسجيل قياسات الآبار.

توجد نقطتان ذاتا صلة بهذه الدراسة في سيناريو السعر المنخفض هذا. أولاً، قد يعني انخفاض الإنفاق على خدمات تسجيل قياسات الآبار أن العديد من مصادر السيزيوم 137 والأميريسيوم والبريليوم التقليدية الموجودة ستصبح فائضة وسيتم تخزينها بواسطة مقاول تسجيل قياسات الآبار أو التخلص منها أو التخلي عنها. واعتمادًا على التكلفة ومدى توفر مسار التخلص الآمن، قد يؤدي ذلك إما إلى زيادة المخاطر الأمان أو تقليل مخاطر الأمان.

ثانيًا، تتمثل إحدى النتائج المحتملة لانخفاض الإنفاق على خدمات تسجيل قياسات الآبار في انخفاض جهود البحث والتطوير لبناء مصادر بديلة لتسجيل قياسات الآبار. وكما ذكرنا أعلاه، يمتلك عدد قليل من مقدمي الخدمات الرئيسيين فقط القدرة على البحث والتطوير لوضع بدائل للمصادر المشعة. وبدون سوق مستقبلي كبير، لن يكون لدى هذه الشركات حافز مالي لتنفيذ مثل هذه الاستثمارات.

بينما من المرجح أن ينخفض الطلب الإجمالي على النفط والغاز في العقود القادمة، ستظل هناك حاجة للوقود البترولي في الاستعمالات الرئيسية، مثل الوقود السائل للطيران والغاز الطبيعي كوقود انتقالي لتوليد الكهرباء. وسيستمر التنقيب عن هذه الموارد في طلب خدمات تسجيل قياسات الآبار الدقيقة والموثوقة، سواء باستخدام مصادر تقليدية أو بديلة.

تشمل المناطق التي من المتوقع أن ينمو فيها سوق تسجيل قياسات الآبار التنقيب عن المعادن وإنتاجها واستكشاف المياه الجوفية واستكشاف الطاقة الحرارية الأرضية. على سبيل المثال، من المتوقع أن ينمو الطلب على النحاس بمعامل من 4 إلى 5 من 2015 إلى 2100، مدفوعًا بالنمو السكاني وأنظمة الطاقة المتجددة (شيبر وآخرون (.Schipper et al)، 2018). لكن ربما يكون أهم قطاع سوقي مستقبلي للنمو المستقبلي في خدمات تسجيل قياسات الآبار هو التقاط وتخزين الكربون تحت سطح الأرض، حيث سيتم استخدام العديد من الأساليب المستخدمة نفسها في التنقيب عن النفط والغاز التقليدي وإنتاجه لاختيار مكامن تخزين ثاني أكسيد الكربون والتحقق منها ومراقبتها (NETL، 2017 أ، ب، بدون تاريخ نشر).

4-6 أنظمة المعايرة

تنتج أنظمة المعايرة مجالات إشعاعية ذات طاقة وكثافة معروفة لمعايرة معدات مراقبة الإشعاع ومقاييس الجرعات لضمان تشغيلها بدقة والأجهزة الصناعية والمعالجة عن بعد التي تستخدم الكوبالت 60. وتستخدم أنظمة المعايرة مصادر مشعة عالية النشاط (حوالي 400 إلى 2,200 كوري [15 إلى 82 تيرا بيكريل]). وهذه مصادر من الفئة 2 تستند إلى نظام تصنيف الوكالة الدولية للطاقة

[10] كيني جوردان، اتحاد شركات خدمات الطاقة، عرض تقديمي أمام اللجنة في 13 أكتوبر 2020.

[11] في كثير من الحالات، حلت محطات الغاز الطبيعي محل محطات الطاقة التي تعمل بالفحم. ووفر الانتقال من الفحم إلى الغاز حوالي 500 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون منذ عام 2010 (وكالة الطاقة الذرية، 2019).

[12] على سبيل المثال، أعلنت شركة General Motors مؤخرًا أنها ستقدم 30 سيارة كهربائية عالمية جديدة بحلول عام 2025 وستتخلص تدريجياً من المركبات التي تعمل بمحركات البنزين والديزل بحلول عام 2035. أيضًا، تمثل السيارات الكهربائية الآن 54 في المائة من حصة السوق في النرويج (كلستي، 2021)، متجاوزة تلك التي تعمل بالبنزين والديزل والمحركات الهجينة (التي سيتم التخلص منها تمامًا بحلول عام 2025).

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الذرية. وتستخدم مرافق المعايرة مصادر السيزيوم 137 والكوبالت 60. وكان مشع workhorse المستخدم في معايرة الكوبالت 60 هو Gammacell 220 المنتج بواسطة Nordion، الذي تم إيقافه في عام 2008،[13] لكن العديد من هذه المشعات لا تزال تعمل في بعض المرافق في جميع أنحاء العالم (الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، 2019 ج)؛ ابتكرت Hopewell Designs مشعًا بديلًا (روشتون وآخرون (.Rushton et al)، 2016). ويركز الجزء المتبقي من هذا القسم بالكامل على أنظمة معايرة السيزيوم 137 نظرًا لمخاطر الأمان التي يمثلها مسحوق كلوريد السيزيوم، وهو شديد التشتت مقارنة بمصادر الكوبالت 60 المعدنية الصلبة.

تنتج مصادر المعايرة المشعة معدلات جرعات مُقاسة بدقة يمكن تتبعها وفقًا للمعايير المقبولة. وفي الولايات المتحدة، يعمل المعهد الوطني للمعايير والتقنية كمختبر أساسي لقياس جرعات الإشعاع، ويتولى بالتالي صيانة معايير القياس الوطنية ويعاير أدوات المختبرات الثانوية. وتضمن شبكة مرافق ثانية وثالثة أن تُجري كل أداة اكتشاف للإشعاع القياسات بدقة ويمكن تتبعها وفقًا لمعيار المعهد الوطني للمعايير والتقنية. وعلى الصعيد الدولي، يوضح علم القياس تكافؤ القياسات في مختلف البلدان ويسهل اتخاذ تدابير تجارية دقيقة. وبغض النظر عن مصدر الإشعاع للاستعمالات الطبية وغيرها، لا تزال هناك حاجة إلى المعيار وأجهزة المعايرة.

تكون المعايرة مطلوبة للاستعمالات المتعددة للمصدر المشع. ولإعطاء فكرة عن حجم المعايرة المطلوبة في الولايات المتحدة، هناك أكثر من 19,000 ترخيص خاص بالنويدات المشعة. وتشمل هذه التراخيص المستشفيات ومرافق علاج السرطان وعيادات الطب النووي ومرافق البحث والجامعات ومرافق التدريب والمرافق الصناعية بما في ذلك شركات التنقيب عن النفط. ويتم استخدام الأجهزة لضمان الامتثال لقواعد السلامة والصحة المرتبطة بالترخيص. ويتألف المستخدمون الآخرون من الوكالات الحكومية الفيدرالية، وهي وكالة حماية البيئة ووزارة الطاقة، التي تشمل المختبرات الوطنية وبرنامج المساعدة الإشعاعية والمركز الفيدرالي للرصد والتقييم الإشعاعي ومركز المساعدة في حالات الطوارئ الإشعاعية / موقع التدريب وفريق البحث في حالات الطوارئ النووية ومجموعة الاستجابة للحوادث، وكذلك كيانات حكومية ومحلية. وتعتمد كل هذه الوكالات والبرامج على أدوات مُعايرة، مما يزيد من أهمية ضمان احتفاظ الولايات المتحدة بقدرة وطنية على معايرة أدوات الإشعاع بشكل صحيح. وتتطلب هذه الأدوات معايرة دورية للتأكد من أنها توفر معلومات دقيقة لمجموعة واسعة من أصحاب المصلحة الذين يستخدمونها.

6-4-1 تقنيات النظائر المشعة

تم اختيار السيزيوم 137 منذ أكثر من 50 عامًا كأساس للمعايرة الوطنية والدولية بسبب طيف الطاقة الأحادي الأمثل (661.7 كيلو إلكترون فولت)، وعمره النصفي الطويل، ومتطلبات التدريع المعتدلة بالنسبة للنويدات المشعة الأخرى. بالإضافة إلى ذلك، يوفر السيزيوم 137 طاقة الفوتون في منتصف المنطقة الممتدة لأنابيب الأشعة السينية والكوبالت 60 والمسرعات الخطية، وبالتالي يغطي الطاقات التي تتراوح من 10 كيلو إلكترون فولت إلى 10 ميغا إلكترون فولت. وفي المعهد الوطني للمعايير والتقنية، يُستخدم جهاز معايرة السيزيوم 137 لتحديد معيار جرعة الإشعاع في الهواء أو كيرما الهواء. ومصدر السيزيوم 137 المستخدم هو كلوريد السيزيوم. ونظرًا لسهولة تشتت كلوريد السيزيوم، فإنه يثير مخاوف تتعلق بالأمان.

تُستخدم الملايين من أجهزة اكتشاف الإشعاع التي يتم معايرتها سنويًا باستخدام السيزيوم 137 في الولايات المتحدة وعلى مستوى العالم، بما في ذلك في موانئ الدخول لقياس النشاط الإشعاعي للبضائع وفي محطات الطاقة النووية لمراقبة المناطق المحيطة وفي المرافق الطبية لضمان سلامة المرضى والأطقم الطبية، وحيثما كان هناك إطلاق أو اشتباه في إطلاق إشعاع.

تتمتع أجهزة معايرة السيزيوم 137 (راجع الشكل 6-9) بإمكانية استعادة رائعة (حوالي 0.1 في المائة على مدى فترات من أشهر إلى سنوات) وتتيح قياسات عدم اليقين المنخفضة المطلوبة للتوحيد القياسي في المعهد الوطني للمعايير والتقنية ومن ثم في نقل المعايير إلى مرافق المعايرة والمستخدمين النهائيين.

أشار خبير تحدث أمام اللجنة إلى أن المعرفة والإجراءات الهامة مبنية على افتراض توافر حقول إشعاع السيزيوم 137.[14] وتعتمد العديد من اللوائح والتوصيات ومعايير التوثيق الوطنية والدولية، بما في ذلك تلك الصادرة عن المعهد الأمريكي للمعايير الوطنية والمجلس الوطني للحماية من الإشعاع والقياسات والمنظمة الدولية لتوحيد المقاييس والوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، على أجهزة معايرة السيزيوم 137. بالإضافة إلى ذلك، تحتاج مرافق المعايرة التي تستخدم أجهزة معايرة السيزيوم 137 إلى إثبات قدرتها على نقل المعيار الوطني لكي يتم اعتمادها من خلال برامج الاعتماد والبرامج التنظيمية الأخرى.

تشير التقديرات إلى أن العدد الحالي من مشعات السيزيوم 137 المستخدمة في الاستعمالات قياسات الإشعاعات الأيونية يشكل 1 إلى 2 في المائة فقط من إجمالي عدد مشعات السيزيوم 137 المستخدمة في الولايات المتحدة (CIRMS، 2019).

[13] يُرجى الاطلاع على https://www.nordion.com/products/irradiation-systems.

[14] مالكولم ماكوين، المجلس القومي للبحوث في كندا، عرض تقديمي أمام اللجنة في 28 يناير 2021.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

الشكل 6-9 مصدر السيزيوم 137 مستخدم في معاير القياس (اليسار) وفي جهاز معايرة أداة معدل جرعة الإشعاع CDV-794 (اليمين).
المصادر: المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا لمعاير المقاييس ووزارة الصحة في فلوريدا لمعاير أداة معدل جرعة الإشعاع.

6-4-2 التقنيات البديلة

لا توجد بدائل واضحة لمشعات السيزيوم 137 كمجال إشعاع مرجعي لقياس الإشعاعات الأيونية. ويعتبر تفرد استخدام السيزيوم 137 للقياس هو الدقة التي توفرها خصائصه (راجع الجدول 6-6). علاوة على ذلك، فإن طاقة انبعاث 661.7 كيلو إلكترون فولت من السيزيوم 137 قريبة من طاقات انبعاثات بيتا وغاما للمواد المشعة التي يحتاج الباحثون ومسؤولو الصحة العامة عادة إلى قياسها.

تعتبر أشعة غاما من السيزيوم 137 والكوبالت 60 أحادية الطاقة، مما يتيح إمكانية التنبؤ باختراقها والجرعة المتلقاة ويسهل حسابها. وتتمتع الأشعة السينية المنتجة صناعيًا، من حزمة أشعة الإلكترون التي تضرب هدفًا معدنيًا (الأشعة الإنكباحية) بطيف واسع يتراوح من طاقة حزمة الأشعة الإلكترون حتى كيلو إلكترون فولت أو مئات من نطاق الإلكترون فولت. ومن المتصور إمكانية حساب الطيف الواسع للأشعة السينية عند وضع معايير معايرة جديدة. ومع ذلك، لمطابقة دقة المعايير الحالية، يتطلب الجهد الكهربي وتيار

الجدول 6-6 النظر في البدائل التكنولوجية للسيزيوم 137 لتوحيد الجرعة ومعايرة الأدوات واختبارها

	مشعات السيزيوم 137	أنابيب الأشعة السينية
طيف شبيه بطيف Cs^{137} بطاقة حوالي 662 كيلو إلكترون فولت	نعم	300 كيلو إلكترون فولت هو الحد الأقصى حتى الآن
إمكانية إعادة إنتاج مخرجات الماكينة بمرور الوقت إلى مستوى 0.1 بالمائة (على مدى فترات من أشهر إلى سنوات)	نعم	ليس بنفس الجودة
انخفاض عدم اليقين في نقل المعايرة إلى المرافق الثانوية (0.5 في المائة أو أفضل)	نعم	شكوك أكبر
مجموعة واسعة من معدلات كيرما الهواء	نعم	نعم (لكنها باهظة الثمن وفي بعض النطاقات غير مستقرة)
أداة أساسية لتحقيق كيرما الهواء لتحديد إمكانية التتبع	غرف التجويف	تحتاج إلى التعامل معها (بسبب التغيرات في الأطياف)

المصدر: رونالدو مينيتي، المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا، عرض تقديمي أمام اللجنة في 28 يناير 2021.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

مصدر التسارع تنظيمًا دقيقًا للغاية. بالإضافة إلى ذلك، يجب تشكيل هدف الأشعة الإنكباحية بدقة، وسيتعين توجيه حزمة أشعة إلكترون بدقة إلى هذا الهدف. وتجعل هذه المتطلبات مطابقة المعلمات الطبيعية لهذه النظائر المشعة غير قابلة للتحقيق عمليًا في هذا الوقت.

قد يكون من المقبول أن تحل محل كلوريد السيزيوم المشع أشكال أخرى راسخة وأقل تشتتًا من السيزيوم 137، مثل المصادر المزججة والبوليوسيت، التي تم استخدامها في القياس باستخدام السيزيوم 137 ومصادر تسجيل قياسات الآبار منذ الثمانينيات، لاستعمالات المعايرة حيث سيتم الحفاظ على طيف السيزيوم 137. ويجب زيادة حجم المصدر لاستيعاب النشاط النوعي الأدنى لتركيبات الزجاج. ووفقًا للمذكور في القسم 1-3، تم تطوير مثل هذه الأشكال الأقل ذوبانًا والأقل تشتتًا من السيزيوم 137 في الهند وتستخدم في مشعات الدم. وبعد تجربة طرق مختلفة، طور الباحثون في مركز بهابها للأبحاث الذرية في عام 2015 تقنية صب السيزيوم 137 المزجج بدقة في أقلام الرصاص المصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ التي يتم تحميلها بعد ذلك في مشعات الدم. وعلى حد علم اللجنة، لا توجد أبحاث مستمرة من هذا القبيل في مدى ملاءمة أشكال أخرى من السيزيوم لاستعمالات المعايرة.

منذ عام 2015، دخلت شركة ATRON Metrology الفرنسية في شراكة مع المختبر الوطني الفرنسي للقياس لتطوير طريقة بديلة لمعايرة عدادات الإشعاع. وتستخدم هذه الطريقة مسرعًا إلكتروستاتيكيًا يوجه شعاع إلكترون إلى هدف من التنتالوم لإنتاج الأشعة السينية. ويتم ضبط المسرع لإنتاج أشعة سينية في مجال الطاقة بين طاقات غاما السيزيوم 137 والكوبالت 60 (بوردي وآخرون (Bordy et al.)، 2019). وبينما تعلن ATRON أن هذه الطريقة واقعية لنوع الطيف الذي تتم مواجهته في محطات الطاقة النووية، فإنه لا يعتبر نوع من مصادر الإشعاع المنفصلة. أيضًا، يبلغ انحراف الجهاز 0.3 في المائة على مدار 11 شهرًا، وعدم اليقين في معايرة عدادات المسح الإشعاعي أقل من 7 في المائة، وكلاهما أكبر بكثير من دقة معايرة السيزيوم 137. بالإضافة إلى ذلك، يُشار إلى العمر التشغيلي للأنبوب عند حوالي 4,000 ساعة، وهو عمر خدمة أقصر بكثير من جهاز معايرة السيزيوم 137، مما قد يؤدي إلى تكاليف صيانة أعلى لتقنية ATRON قيد المقارنة. علاوة على ذلك، لا يزال مرجع المعايرة هو مرفق القياس الوطني الفرنسي، الذي لا يزال يستخدم السيزيوم 137 (تشابون وآخرون (Chapon et al.)، 2016).

6-4-3 اعتبارات اعتماد التقنية البديلة

يتمثل موقف المعهد القومي للمعايير والتقنية في أن التخلص من كلوريد السيزيوم من الاستخدام في أجهزة المعايرة قد يكون ضارًا بقدرات الاستجابة للطوارئ في الدولة. ومع ذلك، نظرت الولايات المتحدة وحكومات أخرى في تغييرات السياسة لإزالة كلوريد السيزيوم من الاستخدام في المصادر المشعة، ويمكن إعادة النظر في هذه السياسة في المستقبل القريب. ووجدت اللجنة أن المعهد الوطني للمعايير والتقنية لا يتخذ خطوات للتحضير لحدوث تغيير محتمل في السياسة من خلال استكشاف تقنيات بديلة وإجراء اختبارات التكافؤ لضمان عدم وجود آثار سلبية على قدرات المعايرة والاختبار الحالية.

إذا أصبح بديل لأجهزة معايرة السيزيوم 137 متاحًا في المستقبل يمكنه أن يلبي جميع متطلبات القياس، فإن جميع المعايير الوثائقية المنشورة حتى الآن، واللوائح من الهيئات التنظيمية المختلفة (مثل اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية) ووكالات الاعتماد على المستوى الوطني و على المستويات الدولية، يجب إعادة تطويرها بحيث لا يتأثر أمن وسلامة العاملين في مجال الإشعاع والجمهور. وإلى أن يتم توفير مشعات السيزيوم المعتمدة على شكل جديد من السيزيوم (بخلاف كلوريد السيزيوم) أو نوع آخر من المصادر، ستحتاج مرافق المعايرة إلى الاعتماد على مشعات السيزيوم 137 الحالية. وبدون بديل مناسب، سيكون للتخلص من مصادر السيزيوم 137 من الفئة 2 منخفضة إلى متوسطة المدى في مرافق المعايرة تأثير سلبي على البنية التحتية للمعايرة في الولايات المتحدة وفي جميع أنحاء العالم، مما يؤثر بشكل مباشر على سلامة وأمن الجمهور.[15]

6-5 المولدات الكهروحرارية للنظائر المشعة

المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة (RTGs) نوع من البطاريات النووية التي تستخدم المزدوجات الحرارية لتحويل الحرارة المنبعثة من اضمحلال النظائر المشعة إلى كهرباء. وتعد المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة بسيطة في التصميم ولا تحتوي على أجزاء متحركة. وقد أُستخدمت كمصادر للطاقة في الحالات التي لا يمكن فيها الوصول بسهولة إلى الأنظمة التي تستخدمها، وتحتاج إلى مواصلة العمل دون تدخل بشري لفترات طويلة من الزمن، وغير القادرة على توليد الطاقة الشمسية بكفاءة. وبناءً على هذه الظروف، تم استخدام المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة كمصادر للطاقة في الأقمار الصناعية والمسابر الفضائية والهياكل البعيدة غير المأهولة مثل المنارات التي بناها الاتحاد السوفيتي السابق داخل الدائرة القطبية الشمالية والمحطات الروسية في القارة القطبية الجنوبية ومواقع المراقبة القطبية التي تديرها الولايات المتحدة.

[15] رسالة من رونالدو مينيتي ومايكل ميتش، نيست، إلى تشارلز فيرجسون، الأكاديميات الوطنية، في 21 مايو 2020 ؛ مالكولم ماكوين، المجلس القومي للبحوث في كندا، عرض تقديمي أمام اللجنة في 28 يناير 2021.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

6-5-1 تقنيات النظائر المشعة

يجب أن تتوافق النظائر المشعة المستخدمة في المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة مع ثلاثة معايير رئيسية: ذات عمر نصفي طويل نسبيًا حتى تتمكن من إنتاج مستويات مستدامة من الطاقة؛ وذات كثافة طاقة عالية (القدرة لكل وحدة كتلة من النظائر المشعة)، وينبعث منها إشعاع يمكن حمايته. ويعد البلوتونيوم 238[16] والسترونشيوم 90 أكثر النظائر المشعة استخدامًا لوقود المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة. ويتمتع كلاهما بعمر نصفي طويل، 87.7 سنة و28.8 سنة، على التوالي. وتعد كثافة الطاقة لكل من النظائر المشعة كبيرة نسبيًا، حيث تبلغ 0.57 واط/غرام للبلوتونيوم 238 و0.46 واط / غرام للسترونشيوم 90. يتضمن الاختلاف الكبير بين النظيرين المشعين الإشعاع الناتج: ألفا للبلوتونيوم 238 وبيتا للسسترونشيوم 90. نظرًا لقدرته المحدودة على الاختراق، فإن إشعاع ألفا المنبعث من البلوتونيوم 238 يمنح هذا النظائر المشعة ميزة على إشعاع بيتا الأكثر اختراقًا من السترونتيوم 90 لأنه يقلل من الحماية المطلوبة.

كان البلوتونيوم 238 هو النظير المشع المفضل للمولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة للمهام الفضائية بسبب انخفاض متطلبات الحماية وبالتالي الوزن الأخف. ويعتبر عمر النصف الأطول للبلوتونيوم 238 أيضًا ميزة للمهام الفضائية لأن التزود بالوقود غير ممكن. وبدءًا من ستينيات القرن العشرين، شغلت مجموعات المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة المعتمدة على البلوتونيوم 238 أكثر من دزينتين من المهام الفضائية الأمريكية. وفي الآونة الأخيرة، كان المولد الكهروحراري بالنظائر المشعة متعدد المهام هو مصدر الطاقة لمركبة Perseverance الفضائية، التي هبطت على سطح المريخ في 18 فبراير 2021. يحتوي على حوالي 4.2 كجم من البلوتونيوم 238 (ناسا (NASA)، 2020)، أو حوالي 73,000 كوري (2.7 بيتا بيكريل) من النشاط الأولي، مما يجعله مصدرًا من الفئة 1. ويوفر المولد الكهروحراري بالنظائر المشعة متعدد المهام ما يقرب من 110 واط من الطاقة الكهربائية عند التزود بالوقود حديثًا. وقبل يومين فقط من الهبوط، أعلن باحثو مختبر أيداهو الوطني أنهم يعملون على نظام الطاقة من الجيل التالي المصمم ليكون أكثر كفاءة بثلاث مرات من نظام طاقة Perseverance باستخدام تحويل الطاقة الديناميكي مع دورة ستيرلينغ أو برايتون الحرارية (ANS، 2021).

يتمثل أكبر قيد لاستخدام البلوتونيوم 238 في صعوبة تصنيعه بكميات كافية. وبعد إغلاق عام 1988 لآخر مفاعل محلي لإنتاج البلوتونيوم في موقع نهر سافانا (سميث وآخرون (.Smith et al)، 2019)، كان من المتوقع أن تُستنفد مخزونات الوقود في عام 2018. وفي عام 2015، عالجت وزارة الطاقة النقص الوشيك من خلال إعادة بناء إنتاج البلوتونيوم 238 في مختبر أوك ريدج الوطني (ORNL) لبعثات الادارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء المستقبلية (والي (Walli)، 2015). واعتبارًا من فبراير 2021، أنتج مفاعل النظائر عالية التدفق في مختبر أوك ريدج الوطني ما يقرب من 1 كجم من البلوتونيوم 238، ولديه القدرة على إنتاج ما يصل إلى 700 جرام سنويًا. وللمساعدة في تحقيق هدف ناسا لإنتاج 1.5 كيلوجرام سنويًا بحلول عام 2026، أعلنت وزارة الطاقة الأمريكية في 16 فبراير 2021، أن مختبر أيداهو الوطني سيزيد من استخدام مفاعل الاختبار المتقدم لإنتاج البلوتونيوم 238؛ ومن المتوقع أن تنتج أول حملتين للإشعاع في مفاعل الاختبار المتقدم 30 جم في ربيع عام 2021 (وزارة الطاقة (DOE)، 2021).

بالنسبة للاستعمالات الأرضية، بدأ استخدام المولد الكهروحراري بالنظائر المشعة أيضًا في ستينيات القرن العشرين. وفي الاتحاد السوفياتي السابق، تم نشر أكثر من 1,000 مولد كهروحراري بالنظائر المشعة مدعومة من بالسترونتيوم 90 عالي النشاط من الفئة 1. وكان أكبر مولد كهروحراري بالنظائر المشعة هو IEU-1 مع نشاط أولي قدره 465,000 كوري (17.2 بيتا بيكريل)، وأصغر مولد كهروحراري بالنظائر المشعة Beta-M/S المخصص، وكان نشاطه الأولي قدره 35,700 كوري (1.32 بيتا بيكريل) (بورتر (Porter)، 2015). وبحلول أوائل عام 2000، تجاوزت جميع المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة السوفيتية والروسية العمر الافتراضي للخدمة. وبالتنسيق مع الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، قدمت العديد من الدول المساعدة المالية والتقنية التي ساعدت روسيا في القضاء على استخدام جميع مجموعات المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة الخاصة بها تقريبًا. على سبيل المثال، خصصت النرويج 20 مليون يورو (حوالي 24 مليون دولار) لمساعدة روسيا في إزالة وتأمين 180 مولدًا كهروحراريًا بالنظائر المشعة في المناطق الساحلية في شمال غرب روسيا على طول بحار بارنتس ووايت وكارا. وقدمت النرويج أيضًا منشآت شمسية كمصادر طاقة بديلة لتحل محل المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة التي تعمل في المنارات (ديغز (Digges)، 2015). ومنذ نهاية عام 2019، تم إيقاف تشغيل ما يقرب من 1,000 مولد كهروحراري بالنظائر المشعة في شمال روسيا و4 كانت منشورة في القارة القطبية الجنوبية وتفكيكها مع مصادر السترونشيوم 90 المخزنة في Mayak Production Association، الواقعة في منطقة تشيليابينسك في روسيا. وتبقى فقط 12 مولدًا كهروحراريًا بالنظائر المشعة في كامشاتكا، لكن من المقرر إزالتها أيضا في المستقبل القريب (الأكاديميات الوطنية للعلوم والهندسة والطب (NASEM)، 2020).

[16] على عكس البلوتونيوم 239، فإن البلوتونيوم 238 غير انشطاري، لذلك لا يمكن استخدامه في محطات الطاقة النووية أو الأسلحة النووية.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

نشرت الولايات المتحدة عددًا أقل بكثير من المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة مقارنة بروسيا، وبحلول أغسطس 2015، تمت إزالة 10 مولدات كهروحرارية بالنظائر المشعة المتبقية المستخدمة من جبل بيرنت في ألاسكا، من قبل سلاح الجو الأمريكي. وتمت إزالة مصادر السترونشيوم 90 والتخلص منها في موقع نيفادا للأمن الوطني، والمصرح له بأخذ وتأمين المصادر التي توقف استخدامها المملوكة للحكومة الأمريكية (رومانو (Romano)، 2015). وأدت هذه الجهود الوطنية والدولية المتضافرة وجهود استبدال المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة المستخدمة على الأرض إلى القضاء عمليا على فئة كاملة من المصادر المشعة عالية النشاط.

يجري تصميم أجهزة جديدة في الولايات المتحدة وربما في أماكن آخر. على سبيل المثال، تطور شركة Zeno Power Systems، ومقرها الولايات المتحدة، نظام طاقة يعمل بالنظائر المشعة من الجيل التالي يحول الحرارة من تحليل السترونشيوم 90 إلى الطاقة الكهربائية المقصودة في المقام الأول للاستعمالات الفضائية الحكومية والتجارية. ويهدف هذا التصميم الجديد من الجيل الجديد من قبل Zeno إلى زيادة الطاقة المحددة للنظام وأن يكون وزنه أخف الوزن مما يجعله مناسبًا لاستكشاف الفضاء. ووفقًا للمطورين، فإن مستوى الاستعداد للتقنية (TRL) الحالي للمولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة هو مستوى الاستعداد للتقنية 3، مع خطط التقدم إلى مستوى الاستعداد للتقنية 4 في الأشهر المقبلة. وتشير تقديراتهم إلى نشر التقنية بحلول عام 2025. وتبرهن التحديات التقنية الأولية المتبقية في تطوير التقنية أنها فعالة من حيث التكلفة وقابلة التكرار وأن تصنيع كبسولات الوقود عالية الجودة وإجراء الاختبارات الصارمة لازم لتأهل أي من المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة للرحلات الفضائية. واعترف المطورون أيضًا بمخاطر السوق، بالنظر إلى مستوى عدم اليقين في الصناعات النووية والفضائية.[17]

6-5-2 التقنيات البديلة

كما ذكر أعلاه، تم القضاء على الاستخدام الأرضي للمولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة. وكان أكبر التحديات الخاصة بالتقنية البديلة هي مصدر الطاقة البديل العام الذي يعمل في المنطقة القطبية لتحمل درجات الحرارة أقل من 0° مئوية وتوفير طاقة موثوقة خلال أشعة الشمس المحدودة المتوفرة في أشهر الخريف والشتاء. ونُفذ برنامج ملحوظ لتطوير تقنية بديلة في أوائل عام 2000 إلى عام 2007، وتضمن بذل جهد تعاوني بين مبادرة الحد من التهديدات العالمية التابعة للإدارة الوطنية للأمن النووي وبين القوات البحرية لروسيا الاتحادية ومختبرات ساندیا الوطنية والمعهد الجنوب الغربي لتطوير تقنية المعلومات ومعهد جامعة ولاية نيو مكسيكو للطاقة والبيئة ومعهد كورشاتوف واللجنة النرويجية للمنارات التابعة للإدارة الساحلية النرويجية. واختبر هذا التعاون نظامًا كهروضوئيًا (PV) وبطارية في موقعين، ومنشأة Honnigsvag في النرويج ومنارة كيب شافور في الاتحاد الروسي. وقام معهد كورشاتوف بتركيب نظام في موقع ثالث في كارباس، في الاتحاد الروسي - نظام توربينات رياح صغيرة بالإضافة إلى نظام كهروضوئي وبطارية. وتعتبر أنظمة الطاقة الكهربائية هذه الشيء المطلوب لتشغيل منارة إشارة بصمام ثنائي مشع للضوء بمقدار 10 واط، التي تنتجها شركة Nav-dals في سانت بطرسبرغ في روسيا. ويتألف النظام الكهروضوئي من خمس وحدات بسعة 40 واط ذروي وبطارية كادميوم نيكل بقدرة 950 أمبير في الساعة تعمل بقدرة 12 فولت.

خلال فترة الصيف المشمس، احتفظ مخزن البطارية بشحن كامل. ومن الاعتدال الخريفي حتى الفترة الشتوية المبكرة، دخلت البطارية في وضع التفريغ المستمر، لكن كانت هناك طاقة كافية متاحة لتشغيل إشارة الضوء. وكان الحد الأقصى لتفريغ البطارية حوالي 65 في المائة من الإجمالي. وبالمقارنة، فإن النظام الهجين مع توربينات الرياح الصغيرة، لكن مع نفس الوحدات الكهروضوئية والبطارية كان تفريغه الإجمالي 45 في المائة. وخلص الباحثون إلى أن أيًا من النظامين كان كافيا، لكن توربينات الرياح قدمت موثوقية إضافية (هاوزر وآخرون (Hauser et al.)، 2007).

6-5-3 اعتبارات اعتماد التقنية البديلة

بالنسبة إلى البعثات الفضائية إلى المريخ وخارجه، فإن الطاقة الشمسية المتاحة غير كافية لمسابير ومركبات الفضاء. وبالتالي ستستمر الولايات المتحدة والدول الأخرى المرتادة للفضاء في استخدام المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة بطريقة آمنة ومأمونة كما هو موضح أدناه. وقدمت المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة التابعة لناسا طاقة آمنة وموثوقة لأكثر من 50 عامًا وأكثر من 25 بعثة. وتتضمن ميزات السلامة دفاعًا متعدد الطبقات مع وقود قوي وتصميم معياري وحواجز مادية متعددة. وعلى وجه الخصوص، يتكون الوقود من ثاني أكسيد البلوتونيوم في كريات خزفية مقاومة للحريق لتقليل احتمالية التشتت في حالة وقوع حادث. وإذا كُسر الخزف، فسوف ينكسر إلى قطع كبيرة نسبيًا بدلاً من جزيئات مجهرية قابلة للاستنشاق. بالإضافة إلى ذلك، يغلف الإيريديوم كل كريات الوقود ويوفر طبقة حماية مقاومة للتآكل ودرجة حرارة انصهار عالية للغاية. علاوة على ذلك، يشكل الغرافيت المقاوم

[17] تايلر برنشتاين، زينو باور سيستمز، رسالة إلى أورانيا كوستي، الأكاديميات الوطنية، في 31 يناير 2021.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

للحرارة أغلفة مقاومة للصدمات لتوفير حماية إضافية حول الوقود. وتتحمل وزارة الطاقة مسئولية إنتاج المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة وتسليمها إلى ناسا وتجري تحليلاً للسلامة قبل كل بعثة (ناسا (NASA)، 2005).

في عام 2009، بسبب المخاوف بشأن موثوقية إمدادات البلوتونيوم 238، قررت وكالة الفضاء الأوروبية التحقيق في النظائر المشعة البديلة لتشغيل مجموعات المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة الفضائية الخاصة بها. واختارت الوكالة الأميريسيوم 241 لأنه كان ميسور التكلفة من الناحية الاقتصادية بنقاء نظائري عالٍ ومتاح بسهولة من إعادة المعالجة الأوروبية للوقود النووي التجاري المستنفد، على الرغم من أن كثافة طاقته تبلغ حوالي خمس البلوتونيوم 238. وفي عام 2013، أعلن اتحاد تقني أوروبي أنه تم اختبار نموذج أولي من المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة يعمل بوقود الأميريسيوم 241 وأن المعمل النووي الوطني في المملكة المتحدة أنتج الأميريسيوم 241 (أمبروسي وآخرون (.Ambrosi et al)، 2013). وفي عام 2019، توقع الاتحاد الأوروبي أنه بحلول النصف الثاني من عام 2020، سيكون برنامج المولدات الكهروحرارية بالنظائر المشعة جاهزًا لتقديم نظام طاقة للبعثات الفضائية (أمبروسي وآخرون (.Ambrosi et al)، 2019).

6-6 الفصل السادس: النتائج والتوصيات

النتائج 14: تم إحراز تقدم ضئيل على الصعيد المحلي في اعتماد تقنيات بديلة لبعض الاستعمالات التجارية الأخرى، لا سيما في بعض استعمالات الاختبار غير المدمر وتسجيل قياسات الآبار. ويرجع السبب في ذلك إلى عدم وجود بدائل مجدية أو فعالة من حيث التكلفة في الوقت الحالي، حيث إن البدائل إما تقوض الأداء أو لا تقدم تحسينات فيه، أو تنتج بيانات عن المواد والهياكل لا يمكن مقارنتها بشكل مباشر بتلك التي تنتجها المصادر المشعة.

غالبا ما تنطوي الاختبارات غير المدمرة على عمليات فحص للمواد في المواقع البعيدة في الهواء الطلق حيث يمكن أن تكون هناك ظروف بيئية وصناعية قاسية. وعند اتخاذ قرار بشأن طريقة الاختبارات غير المدمرة المراد استخدامها، تأخذ الاختبارات غير المدمرة في الاعتبار القدرة على اكتشاف العيوب وأنواع العيوب في مادة الموضوع وإمكانية الوصول إلى المواد التي جرى فحصها واقتصاديات الطريقة. وعلى الرغم من أن طرق الأشعة السينية يمكن أن توفر نتائج تصوير شعاعية مماثلة لتلك الناتجة عن النويدات المشعة الباعثة لغاما، إلا أن أنظمة الأشعة السينية تتطلب كهرباء موثوقة وأنظمة تبريد وتميل لأن تكون أكبر وأقل قوة من كاميرات التصوير الشعاعي بغاما. ومع ذلك، أدت التطورات في تصميم الأشعة السينية إلى تطوير مصادر الأشعة السينية النبضية التي تعمل باستخدام طاقة البطارية وذات حجم مادي قريب من كاميرا التصوير الشعاعي بغاما. ومع ذلك، فإن الحاجة إلى الاستبدال المكلف المتكرر لأنابيب الأشعة السينية وعدم القدرة المتكررة عن العمل لا يزالان يجعلان التصوير الشعاعي بأشعة غاما الخيار الأكثر موثوقية والمفضل. وتم استكشاف مسرعات خطية صغيرة لكنها أغلى من كاميرات التصوير الشعاعي. وتتطلب عمليات المسح بالموجات فوق الصوتية فحصًا وتفسيرًا مفصلين من قبل فنيين مدربين ومعتمدين. وفي حين أن طرق التصوير الشعاعي بالنظائر المشعة والأشعة السينية يمكن أن تكتشف مجموعة واسعة من العيوب، فإن الاختلافات في الفيزياء بين تقنيات التصوير الشعاعي والموجات فوق الصوتية تجعل كل طريقة حساسة لنوع معين من العيوب - التصوير الشعاعي مناسب لاكتشاف العيوب الحجمية مثل الخبث والمسامية، بينما الموجات فوق الصوتية أكثر ملاءمة لاكتشاف العيوب المستوية مثل التشققات ونقص الانصهار.

لتسجيل قياسات الآبار، تواجه التقنيات البديلة للمصادر المشعة العديد من التحديات التقنية واللوجستية والمالية. وعلى الرغم من أنه يمكن استبدال مصدر السيزيوم 137 ليحل محله مصدر بديل بالأشعة السينية مثل المسرع الخطي، إلا أن العوائق الكبيرة تشمل حجم مصدر الأشعة السينية وطيف طاقتها الواسع واستقرار المصدر والإشعاع متباين الخواص. ولم يتم سوى إنجاز القليل من أعمال التطوير منذ عام 1987. ولاستبدال مصادر نيوترون الأميريسيوم والبريليوم، فإن الأدوات البديلة (المعتمدة على المسرع) أقل دقة من مصدر الأميريسيوم والبريليوم في تحديد المسامية. وبسبب الاختلافات في الفيزياء، يمكن أن يؤدي استبدال الأساليب الحالية إلى مشاكل في التفسير، بما في ذلك المسامية المتغيرة والحساسية الصخرية. علاوة على ذلك، تتضمن بعض مصادر النيوترون المعتمدة على المسرع تقنيات مزدوجة الاستخدام حساسة للأمان يمكن أن تعرقل الاستخدام، خاصة في المناطق الحساسة سياسيًا.

التوصية ح: يجب أن تتعامل الإدارة الوطنية للأمن النووي مع المكاتب الأخرى داخل وزارة الطاقة والمؤسسة الوطنية للعلوم والجمعيات المهنية لدعم دراسات التكافؤ لمقدمي خدمات تسجيل قياسات الآبار والتصوير الشعاعي الصناعي الذين يفكرون في استبدال مصادرهم المشعة واعتماد تقنية بديلة. ويجب أن تكون نتائج هذه الدراسات متاحة على نطاق واسع.

كان الافتقار إلى استخدام أدوات تسجيل قياسات الفتحات المعتمدة على المسرّع بطيئًا لثلاثة أسباب رئيسية. أولاً، لم تقدم البدائل المقترحة في الغالب النتائج المماثلة بالضبط لما توفره الأدوات المشعة. ثانيًا، لا توجد محركات أعمال قوية حاليًا لإجراء الانتقال حتى بالنسبة للشركات الكبرى العاملة في مجال تسجيل القياسات، رغم أن هذه الشركات الكبرى تمتلك الإمكانيات التقنية والمالية وأجرت

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

أبحاثًا حول البدائل. ثالثًا، لن تمتلك الشركات الصغيرة والمتوسطة العاملة في تسجيل القياسات، القدرة التقنية أو التمويل اللازم لتطوير واختبار ونشر التقنية المعتمدة على المسرع. وبالتالي، حتى لو كانت التقنية مطابقة تمامًا لخصائص الاستجابة، فلن تتمكن الشركات الصغيرة إلى المتوسطة العاملة في مجال تسجيل القياسات من الانتقال بسهولة. وفي حالة الضغط عليها لإجراء تحول، يزعم معظمهم أنهم ربما يخرجون من سوق العمل.

توجد فرصة يمكن معالجتها من خلال الإجراءات الجماعية للرابطات الصناعية من خلال شراكة ودعم الوكالات الحكومية.

فيما يتعلق بمواصلة تطوير واعتماد تقنيات بديلة للتصوير الشعاعي بأشعة غاما، أدرك الخبراء الذين عرضوا في مؤتمرات الوكالة الدولية للطاقة الذرية في عامي 2013 و2019 أن اللجوء إلى اختبار الموجات فوق الصوتية كبديل لا يزال بعيدًا لعدة سنوات على الأقل. وشددوا على القيود الفنية للتقنية البديلة ولفتوا الانتباه إلى الحاجة إلى إجراء عمليات التحقق وتطوير المعايير. وحتى مع عمليات التحقق هذه، من المرجح أن يستمر اختبار الموجات فوق الصوتية كجزء تكميلي للتصوير الشعاعي بغاما. ومع ذلك، يمكن أن تساعد دراسات التكافؤ في تمهيد الطريق لمزيد من الدراسة واعتماد البدائل. وسيساعد كذلك على تطوير تقنيات لإظهار صور بالموجات فوق الصوتية يمكن مقارنتها بما اعتاد المستخدمون رؤيته باستخدام الصور الشعاعية والتي لن تتطلب تفسيرًا كما هو الحال مع تقنيات الموجات فوق الصوتية الحالية.

النتائج 15: لم يتم إحراز أي تقدم على الصعيدين المحلي والدولي مع اعتماد تقنيات بديلة لأنظمة المعايرة لتحل محل مصادر السيزيوم 137 والكوبالت 60. ولا توجد بدائل واضحة غير مشعة لاستبدال مصادر كلوريد السيزيوم المستخدمة في هذه الاستعمالات، ولا يوجد بحث وتطوير مكرس حاليًا لاستكشاف البدائل. ويشكل نقص البدائل عقبة في الجهود العالمية للتخلص من السيزيوم 137 في شكل كلوريد السيزيوم.

منذ أكثر من 50 عامًا، تم اختيار السيزيوم 137 كأساس للمعايرة الوطنية والدولية نظرًا لإشعاع غاما أحادي الطاقة الخاص به في منتصف الطيف المقاس للطاقات ودقته العالية وقابلية استعادته في منشآت المعايرة. ويُستخدم معيار السيزيوم 137 لمعايرة ملايين أجهزة الكشف عن الإشعاع سنويًا في الولايات المتحدة وعلى مستوى العالم. ويشمل نشر أجهزة الكشف محطات الطاقة النووية لمراقبة المناطق المحيطة، ومنافذ الدخول لقياس النشاط الإشعاعي للبضائع، والمنشآت الطبية لضمان سلامة المرضى والعاملين في المجال الطبي، وحيثما يوجد إطلاق مشبوه للإشعاع. ويتمثل الشاغل المتعلق بالأمان في أن أنظمة المعايرة تستخدم السيزيوم 137 في شكل كلوريد السيزيوم، مما يشكل مخاطر تشتت محتملة. ومع ذلك، لم تكن هناك جهود محلية أو دولية لتطوير تقنيات بديلة.

التوصية ط: يجب أن يشارك المعهد الوطني للمواصفات القياسية والتكنولوجيا مع المجتمع البحثي ومع الشركاء الفيدراليين والصناعيين والدوليين لبدء البحث عن بدائل كلوريد السيزيوم لاستعمالات المعايرة. ويجب أن تبدأ هذه المشاركة على الفور للتحضير للتخلص المستقبلي المحتمل من استخدام السيزيوم 137 في شكل كلوريد السيزيوم.

يتبنى المعهد الوطني للمعايير والتقنية موقفًا يشير إلى أن التخلص من كلوريد السيزيوم في أجهزة المعايرة سيكون له آثار سلبية مثل قدرات الاستجابة للطوارئ في الدولة. ونظرت الولايات المتحدة وحكومات أخرى في إجراء تغييرات على السياسة التي من شأنها القضاء على كلوريد السيزيوم في المصادر المشعة مثل مشعات الدم والأبحاث. وللتحضير للتغييرات المحتملة في السياسة التي تهدف إلى التخلص من كلوريد السيزيوم من جميع المصادر المشعة عالية النشاط، يجب أن يبدأ المعهد الوطني للمعايير والتقنية في استكشاف خيارات أخرى لبدائل السيزيوم 137 مثل تقنيات الأشعة السينية عالية الطاقة أو مختلف الأشكال الكيميائية لهذه النويدات المشعة مثل البوليوسيت أو السيزيوم المزجج. ويُستخدم الشكل المزجج من السيزيوم في الهند في مشعات الدم. ويمكن أن يكون استبدال كلوريد السيزيوم المشع لتحل محله هذه الأشكال الأخرى الأقل تشتتًا من السيزيوم 137 مقبولاً لاستعمالات المعايرة لأنه سيتم الحفاظ على طيف السيزيوم 137. وتشمل الخطوات المفيدة للمعهد الوطني للمعايير والتقنية التشاور والعمل مع مجتمع البحث والشركاء في الوكالات الفيدرالية وداخل الولايات والصناعة وكذلك الشركاء الدوليين وإجراء اختبارات التكافؤ لضمان عدم وجود آثار سلبية على قدرات المعايرة والاختبار الحالية.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

المراجع

Afrough, B., J. Eakins, S. Durley-White, S. Dowall, S. Findlay-Wilson, V. Graham, K. Lewandowski, D. P. Carter, and R. Hewson. 2020. X-ray inactivation of RNA viruses without loss of biological characteristics. *Scientific Reports* 10(1):21431. https://www.nature.com/articles/s41598-020-77972-5.pdf.

Alphey, L. 2016. SIT 2.0: 21st century genetic technology for the screwworm sterile-insect program. *BMC Biology* 14:80. https://bmcbiol.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s12915-016-0310-1.pdf.

Alphey, L., P. Baker, G. C. Condon, K. C. Condon, T. H. Dafa'alla, G. Fu, L. Jin, G. Labbe, N. M. Morrison, D. D. Nimmo, S. O'Connell, C. E. Phillips, A. Plackett, S. Scaife, A. Woods, R. S. Burton, M. J. Epton, and P. Gong. 2006. Genetic technologies to enhance the sterile insect technique (SIT). Paper presented at the 7th International Symposium on Fruit Flies of Economic Importance: From Basic to Applied Knowledge, Brazil. http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:42109336.

Ambrosi, R., H. Williams, and P. Samara-Ratna. 2013. Americium-241 radioisotope thermoelectric generator development for space applications. Paper presented at the INAC 2013: International Nuclear Atlantic Conference, Brazil. http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:45066049.

Ambrosi, R. M., H. Williams, E. J. Watkinson, A. Barco, R. Mesalam, T. Crawford, C. Bicknell, P. Samara-Ratna, D. Vernon, N. Bannister, D. Ross, J. Sykes, M.-C. Perkinson, C. Burgess, C. Stroud, S. Gibson, A. Godfrey, R. G. Slater, M. J. Reece, K. Chen, K. Simpson, R. Tuley, M. Sarsfield, T. P. Tinsley, K. Stephenson, D. Freis, J.-F. Vigier, R. J. M. Konings, C. Fongarland, M. Libessart, J. Merrifield, D. P. Kramer, J. Byrne, and B. Foxcroft. 2019. European radioisotope thermoelectric generators (RTGs) and radioisotope heater units (RHUs) for space science and exploration. *Space Science Reviews* 215(8):55. https://doi.org/10.1007/s11214-019-0623-9.

Andersen, A. H. F., S. S. F. Nielsen, R. Olesen, J. L. F. Harslund, O. S. Søgaard, L. Østergaard, P. W. Denton, and M. Tolstrup. 2020. Comparable human reconstitution following cesium-137 versus x-ray irradiation preconditioning in immunodeficient NOG mice. *PLoS One* 15(10):e0241375. https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0241375.

ANS (American Nuclear Society). 2021. INL seeks efficiency boost for radioisotope-powered spacecraft. *Nuclear Newswire.* https://www.ans.org/news/article-2635/inl-seeks-efficiency-boost-for-radioisotopepowered-spacecraft.

ASNT (American Society for Nondestructive Testing). 2019. Radiation sources and exposure devices. Chapter 3 in *NDT Handbook*, 4th ed., Vol. 3: *Radiographic testing.* Columbus, OH: ASNT.

ASTRO (American Society for Radiation Oncology). 2019. Brachytherapy: Taking it forward. *ASTROnews* 22(1). https://www.astro.org/ASTRO/media/ASTRO/News%20and%20Publications/ASTROnews/PDFs/2019_Spring_ASTROnews.pdf.

Ausburn, P. K. 2016. Longitudinal high dose output, through transmission target x-ray system and methods of use. U.S. Patent 9,484,177 B2, filed April 14, 2015, and issued November 1, 2016. https://patentimages.storage.googleapis.com/f0/86/73/2bb4dd2b550496/US9484177.pdf.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

Aydinok, Y., A. Piga, R. Origa, N. Mufti, A. Erickson, A. North, K. Waldhaus, C. Ernst, J. S. Lin, N. Huang, R. J. Benjamin, and L. Corash. 2019. Amustaline-glutathione pathogen-reduced red blood cell concentrates for transfusion-dependent thalassaemia. *British Journal of Haematology* 186(4):625–636.

Badruzzaman, A. 2014. An assessment of fundamentals of nuclear-based alternatives to conventional chemical source bulk density measurement. *Petrophysics* 55(5):415–434. https://onepetro.org/SPWLAALS/proceedings-abstract/SPWLA17/4-SPWLA17/D043S010R008/28682.

Badruzzaman, A., F. Dowla, H.-T. Chien, A. Antolak, A. Schmidt. and S. Bakhtiari. 2015. *Scoping study on developing alternatives to radionuclide-based logging technologies.* Technical Report LLNL-TR-67901, October 30. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory.

Badruzzaman, A., A. Schmidt, and A. Antolak. 2019. Neutron generators as alternatives to Am-Be neutron sources in well logging: An assessment of fundamentals. *Petrophysics* 60(1):136–170.

Bahar, B., and C. A. Tormey. 2018. Prevention of transfusion-associated graft-versus-host disease with blood product irradiation: The past, present, and future. *Archives of Pathology & Laboratory Medicine* 142(5):662–667.

Bakken, E., K. Cary, A. Derrick, E. Hildebrand, K. Schroeckenthaler, and M. Taalbi. 2013. *Cost-benefit analysis of switching from cesium-chloride to x-ray blood irradiators.* National Nuclear Security Administration Global Threat Reduction Initiative. https://lafollette.wisc.edu/images/publications/cba/2013-irradiators.pdf.

BARC (Bhabha Atomic Research Centre, Department of Atomic Energy, Government of India). 2017. *Recovery of cesium from high level liquid radioactive waste for societal application: An important milestone*. http://barc.gov.in/clip/cesium_pencil.html.

Barkai-Golan, R., and P. Follett. 2017. *Irradiation for quality improvement, microbial safety and phytosanitation of fresh produce*, 2nd ed. Amsterdam, the Netherlands: Academic Press/Elsevier. https://www.sciencedirect.com/book/9780128110256/irradiation-for-quality-improvement-microbial-safety-and-phytosanitation-of-fresh-produce.

Barnard, S., E. A. Ainsbury, T. Daniels, J. Eakins, R. Tanner, and S. D. Bouffler. 2020. *Alternatives to caesium irradiators for biological sciences and blood transfusion services.* London, UK: Public Health England. https://www.phe-protectionservices.org.uk/cms/assets/gfx/content/resource_4633cs96c974552b.pdf.

Baumann, M., N. Ebert, I. Kurth, C. Bacchus, and J. Overgaard. 2020. What will radiation oncology look like in 2050? A look at a changing professional landscape in Europe and beyond. *Molecular Oncology* 14(7):1577–1585. https://febs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1878-0261.12731.

Belley, M. D., K. A. Ashcraft, C. T. Lee, M. R. Cornwall-Brady, J. J. Chen, R. Gunasingha, M. Burkhart, M. Dewhirst, T. T. Yoshizumi, and J. D. Down. 2015. Microdosimetric and biological effects of photon irradiation at different energies in bone marrow. *Radiation Research* 184(4):378–391. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26401594.

Bello-López, J. M., F. Hernández-Rodríguez, and J. Rojo-Medina. 2016. Bactericidal effect of γ-radiation with (137) cesium in platelet concentrates. *Transfusion and Apheresis Science* 55(3):347–352. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1473050216301392?via%3Dihub.

Bieniawski, A. J., I. Iliopulos, and M. Nalabandian. 2017. *Case study: An analysis of several national approaches to alternative technologies for radioactive sources.* Washington, DC: Nuclear Threat Initiative. https://media.nti.org/documents/NTI_INMM_Alternative_Technology_Paper_Jul2017_oDGeMET.pdf.

Blakely, E. A., B. Faddegon, C. Tinkle, C. Bloch, M. Dominello, R. J. Griffin, M. C. Joiner, and J. Burmeister. 2019. Three discipline collaborative radiation therapy (3DCRT) special debate: The United States needs at least one carbon ion facility. *Journal of Applied Clinical Medical Physics* 20(11):6–13. https://aapm.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/acm2.12727.

Boardman, A. E., D. H. Greenberg, A. R. Vining, and D. L. Weimer. 2018. *Cost-benefit analysis: Concepts and practice*, 5th ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press. https://www.cambridge.org/core/books/costbenefit-analysis/484720E57798B7E7A29C7156407CD4A1.

Bond, L., J. Griffin, R. Harris, K. Denslow, and T. Moran. 2011. *Evaluation of non-nuclear techniques for well logging: Final report.* Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory, U.S. Department of Energy. https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-20831.pdf.

Bondarenko, M., and V. Kulyk. 2017. Radioactive logging tool with D-D neutron source for investigation of oil and gas reservoirs in both cased wells and logging-while-drilling. Workshop on Radioactive Well Logging Source Risk Mitigation, Kazakhstan.

Bordy, J.-M., V. Blideanu, A. Chapon, G. Dupont, D. Dusciac, J. Gouriou, F. Laine, and M. Le Roy. 2019. Primary reference in terms of air kerma for ionizing radiation fields produced by an electrostatic electron accelerator. Presented at the 19th International Congress of Metrology, 15003. https://cfmetrologie.edpsciences.org/articles/metrology/pdf/2019/01/metrology_cim2019_15003.pdf.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

Brixner, V., A. H. Kiessling, K. Madlener, M. M. Müller, J. Leibacher, S. Dombos, I. Weber, H. U. Pfeiffer, C. Geisen, M. Schmidt, R. Henschler, A. North, N. Huang, N. Mufti, A. Erickson, C. Ernst, S. Rico, R. J. Benjamin, L. M. Corash, and E. Seifried. 2018. Red blood cells treated with the amustaline (S-303) pathogen reduction system: A transfusion study in cardiac surgery. *Transfusion* 58(4):905–916. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/trf.14528.

Bruner, D. W., D. Hunt, J. M. Michalski, W. R. Bosch, J. M. Galvin, M. Amin, C. Xiao, J. P. Bahary, M. Patel, S. Chafe, G. Rodrigues, H. Lau, M. Duclos, M. Baikadi, S. Deshmukh, and H. M. Sandler. 2015. Preliminary patient-reported outcomes analysis of 3-dimensional radiation therapy versus intensity-modulated radiation therapy on the high-dose arm of the Radiation Therapy Oncology Group (RTOG) 0126 prostate cancer trial. *Cancer* 121(14):2422–2430. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4490066/pdf/nihms670539.pdf.

Butson, M. J., T. Cheung, P. K. N. Yu, and M. J. Stokes. 2000. Blood irradiation with accelerator produced electron beams. *Physics in Medicine and Biology* 45(11):N139–N142. http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/45/11/401.

Cancelas, J. A., J. L. Gottschall, N. Rugg, S. Graminske, M. A. Schott, A. North, N. Huang, N. Mufti, A. Erickson, S. Rico, and L. Corash. 2017. Red blood cell concentrates treated with the amustaline (S-303) pathogen reduction system and stored for 35 days retain post-transfusion viability: Results of a two-centre study. *Vox Sanguinis* 112(3):210–218.

Capala, J., S. J. Goetsch, and C. G. Orton. 2015. Point/counterpoint. Medical use of all high activity sources should be eliminated for security concerns. *Medical Physics* 42(12):6773–6775. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5148163.

Castell-Perez, M. E., and R. G. Moreira. 2021. Irradiation and consumers acceptance. Pp. 122–135 in *Innovative food processing technologies: A comprehensive review*, K. Knoerzer and K. Muthukumarappan (eds.). Amsterdam, the Netherlands: Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-815781-7.00015-9.

Castro, G., P. A. Merkel, H. E. Giclas, A. Gibula, G. E. Andersen, L. M. Corash, J. S. Lin, J. Green, V. Knight, and A. Stassinopoulos 2018. Amotosalen/UVA treatment inactivates T cells more effectively than the recommended gamma dose for prevention of transfusion-associated graft-versus-host disease. *Transfusion* 58(6):1506–1515.

CDC (Centers for Disease Control and Prevention). 2014. *Population monitoring in radiation emergencies: A guide for state and local public health planners*. Atlanta, GA: CDC. https://www.cdc.gov/nceh/radiation/emergencies/pdf/population-monitoring-guide.pdf.

Chapon, A., G. Dupont, and J.-M. Bordy. 2016. Verification of calibration of radiation meters without a radioactive source [in French]. *La Revue Génèrale Nuclèaire* (6):48–52. https://www.atron.fr/assets/files/article_sfen.pdf.

Chino, J., C. M. Annunziata, S. Beriwal, L. Bradfield, B. A. Erickson, E. C. Fields, K. Fitch, M. M. Harkenrider, C. H. Holschneider, M. Kamrava, E. Leung, L. L. Lin, J. S. Mayadev, M. Morcos, C. Nwachukwu, D. Petereit, and A. N. Viswanathan. 2020. Radiation therapy for cervical cancer: Executive summary of an ASTRO clinical practice guideline. *Practical Radiation Oncology* 10(4):220–234. https://www.practicalradonc.org/action/showPdf?pii=S1879-8500%2820%2930094-1.

CIRMS (Council on Ionizing Radiation Measurements and Standards). 2019. 27th annual meeting of the council on ionizing radiation measurements and standards. Presented at the Strengthening the Economy and Homeland Security with Radiation Measurements and Standards Meeting, Gaithersburg, MD. http://www.cirms.org/pdf/cirms2019/CIRMS2019_Program.pdf.

CISA (Cybersecurity and Infrastructure Security Agency). 2019. *Non-radioiosotopic alternative technologies white paper: Non-isotopic alternative technologies working group*. Washington, DC: Department of Homeland Security. https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/19_1211_cisa_non_radioisotopic_alternative_technologies-white_paper.pdf.

CNS (James Martin Center for Nonproliferation Studies). 2019. *CNS global incidents and trafficking database: Tracking publicly reported incidents involving nuclear and other radioactive materials, 2018 annual report*. https://media.nti.org/documents/global_incidents_trafficking_2018.pdf.

CNSC (Canadian Nuclear Safety Commission). 2020. *Financial guarantees for nuclear substances and radiation devices*. https://nuclearsafety.gc.ca/eng/nuclear-substances/licensing-nuclear-substances-and-radiation-devices/licensing-process/financial-guarantees/index.cfm.

Coeytaux, K., E. Bey, D. Christensen, E. S. Glassman, B. Murdock, and C. Doucet. 2015. Reported radiation overexposure accidents worldwide, 1980–2013: A systematic review. *PLoS One* 10(3):e0118709. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4366065.

Coleman, C. N., M. A. Pomper, N. Chao, F. Dalnoki-Veress, and D. A. Pistenmaa. 2017. Treatment, not terror: Time for unique problem-solving partnerships for cancer care in resource-challenged environments. *Journal of Global Oncology* 3(6):687–691. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5735972/pdf/JGO.2016.007591.pdf.

Concha, C., A. Palavesam, F. D. Guerrero, A. Sagel, F. Li, J. A. Osborne, Y. Hernandez, T. Pardo, G. Quintero, M. Vasquez, G. P. Keller, P. L. Phillips, J. B. Welch, W. O. McMillan, S. R. Skoda, and M. J. Scott. 2016. A transgenic male-only strain of the new world screwworm for an improved control program using the sterile insect technique. *BMC Biology* 14(1):72. https://bmcbiol.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s12915-016-0296-8.pdf.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

Dalnoki-Veress, F., and M. Pomper. 2017. Nuclear Threat Initiative. *Dealing with the double-edged sword of cesium blood irradiation*. https://www.nti.org/analysis/articles/dealing-double-edged-sword-cesium-blood-irradiation.

Datta, N. R., and D. Rajasekar. 2004. Improvement of radiotherapy facilities in developing countries: A three-tier system with a teleradiotherapy network. *Lancet Oncology* 5(11):695–698. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470204504016134?via%3Dihub.

Dean, M. K., A. A. Ahmed, P. Johnson, and N. Elsayyad. 2019. Distribution of dedicated stereotactic radiosurgery systems in the United States. *Applied Radiation Oncology* 8(1):26–30. https://cdn.agilitycms.com/applied-radiation-oncology/PDFs/issues/ARO_03-19_Dean.pdf.

Denny, L., and R. Anorlu. 2012. Cervical cancer in Africa. *Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention* 21(9):1434–1438. http://cebp.aacrjournals.org/content/21/9/1434.abstract.

Dethier, P. 2016. Industrial gamma and x-ray: "same but different." White Paper. IBA. http://iiaglobal.com/uploads/documents/IBA.white_paper_-_x-ray_vs_gamma.pdf.

DHS (Department of Homeland Security). 2017. *Radiological dispersal device (RDD) response guidance: Planning for the first 100 minutes.* Washington, DC: DHS. https://www.dhs.gov/sites/default/files/publications/NUSTL_RDD-Response PlanningGuidance-Public_171215-508.pdf.

Digges, C. 2015. *Foreign funds have almost entirely rid Russia of orphaned radioactive power generators*. Bellona. https://bellona.org/news/nuclear-issues.

DOE (Department of Energy). 2011. *Technology readiness assessment guide.* DOE G 413.3-4A. Washington, DC. https://www2.lbl.gov/DIR/assets/docs/TRL%20guide.pdf.

DOE. 2018. *Environmental assessment for the disposal of greater-than-class C (GTCC) low-level radioactive waste and GTCC-like waste at waste control specialists, Andrews County, Texas.* Washington, DC. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/11/f57/final-ea-2082-disposal-of-gtcc-llw-2018-10.pdf.

DOE. 2019. *Basic research needs workshop on compact accelerators for security and medicine.* Washington, DC: Office of Science. https://www.osti.gov/servlets/purl/1631121.

DOE. 2020. *Sealed source recovery at the University of Washington Harborview training and research facility results in release of cesium-137.* Washington, DC: Office of Environment, Health, Safety & Security.

DOE. 2021. *Idaho National Lab starts second plutonium target campaign for NASA space missions*. Washington, DC: Office of Nuclear Energy. https://www.energy.gov/ne/articles/idaho-national-lab-starts-second-plutonium-target-campaign-nasa-space-missions.

Dombroski, M., and P. S. Fischbeck. 2006. An integrated physical dispersion and behavioral response model for risk assessment of radiological dispersion device (RDD) events. *Risk Analysis* 26*(*2):501–514.

DOT (Department of Transportation). 2016. *Revised departmental guidance on valuation of a statistical life in economic analysis*. https://www.transportation.gov/office-policy/transportation-policy/revised-departmental-guidance-on-valuation-of-a-statistical-life-in-economic-analysis.

DSWG (Disused Sources Working Group). 2012. DSWG brochure to prospective licensees. Fort Lauderdale, FL. http://www.swllrwcc.org/datafiles/DSWG%20Brochure%20to%20Prospective%20Licensees%20FINAL%2012.16.16%20(2).pdf.

DSWG. 2021. *Disused sources: The need for proper management and disposition about this project*. http://www.disused-sources.org/#:~:text=A%20disused%20source%20is%20any,sources%20in%20the%20United%20States.

Eaton, D. J. 2015. Electronic brachytherapy—current status and future directions. *British Journal of Radiology* 88(1049):20150002. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4628482/pdf/bjr.20150002.pdf.

Eaton, D. J., R. Hellmer, Z. Su, and S. Cheng. 2019. Alternative x-ray sources as substitutes for radioactive isotopes in irradiation applications. *Transactions of the American Nuclear Society* 121(1):1085–1088. https://www.ans.org/pubs/transactions/article-47764.

Einck, J. P., A. Hudson, A. C. Shulman, C. M. Yashar, M. M. Dieng, M. Diagne, L. Gueye, F. Gningue, P. M. Gaye, B. J. Fisher, A. J. Mundt, and D. W. Brown. 2014. Implementation of a high-dose-rate brachytherapy program for carcinoma of the cervix in Senegal: A pragmatic model for the developing world. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics* 89(3):462–467. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360301613036614?via%3Dihub.

Elfrink, T. 2017. Neo-nazi national guardsman busted in Florida Keys had "radioactive material," bombs. *Miami New Times*. May 23. https://www.miaminewtimes.com/news/brandon-russell-neo-nazi-florida-national-guardsman-had-radioactive-material-bombs-9366836.

EPA (Environmental Protection Agency). 2017. *EPA radiological emergency response plan.* https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/rerp-1-00.pdf.

Esplen, N., M. S. Mendonca, and M. Bazalova-Carter. 2020. Physics and biology of ultrahigh dose-rate (FLASH) radiotherapy: A topical review. *Physics in Medicine and Biology* 65(23):23tr03. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32721941.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

Evans, M., R. Adolph, L. Vilde, C. Morriss, P. Fisseler, W. Sloan, J. Grau, A. Liberman, W. Ziegler, W. A. Loomis, T. Yonezawa, Y. Sugimura, H. Seki, R. M. Misawa, J. Holenka, N. Borkowski, T. Dasgupta, and D. Borkowski. 2000. A sourceless alternative to conventional LWD nuclear logging. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, October 3–4, 2000. https://doi.org/10.2118/62982-MS.

FAO and IPPC (Food and Agriculture Organization of the United Nations and International Plant Protection Convention). 2019. *Guidelines for the use of irradiation as a phytosanitary measure.* Secretariat of the International Plant Protection Convention. http://www.fao.org/3/y4835e/y4835e.pdf.

Fast, L. D., G. DiLeone, and S. Marschner. 2011. Inactivation of human white blood cells in platelet products after pathogen reduction technology treatment in comparison to gamma irradiation. *Transfusion* 51(7):1397–1404. https://doi.org/10.1111/j.1537-2995.2010.02984.x.

Fasten, W. 2012. Manufacturers' role in long term management of disused sources. Presented at the International Source Suppliers and Producers Association conference. http://www.isspa.com/uploads/documents/members/2012/WASSC34-DisuedSourcesISSPA.pdf.

Favaudon, V., L. Caplier, V. Monceau, F. Pouzoulet, M. Sayarath, C. Fouillade, M. F. Poupon, I. Brito, P. Hupé, J. Bourhis, J. Hall, J. J. Fontaine, and M. C. Vozenin. 2014. Ultrahigh dose-rate FLASH irradiation increases the differential response between normal and tumor tissue in mice. *Science Translational Medicine* 6(245):245ra293. https://stm.sciencemag.org/content/scitransmed/6/245/245ra93.full.pdf.

FDA (Food and Drug Administration). 1993. *Recommendations regarding license amendments and procedures for gamma irradiation of blood products*. Technical report, Food and Drug Administration. Department of Health and Human Services, Bethesda, MD, EUA.

FDA. 2014. *INTERCEPT blood system for platelets*. Premarket Approval BP140143. https://www.fda.gov/vaccines-blood-biologics/approved-blood-products/intercept-blood-system-platelets.

FDA. 2020. *Bacterial risk control strategies for blood collection establishments and transfusion services to enhance the safety and availability of platelets for transfusion.* Silver Spring, MD: Center for Biologics Evaluation and Research. https://www.fda.gov/media/123448/download.

FDA. 2021a. *INTERCEPT blood system for cryoprecipitation package insert: For the manufacturing of pathogen reduced plasma, cryoprecipitate reduced*. https://www.fda.gov/media/90594/download.

FDA. 2021b. *Irradiator, blood to prevent graft versus host disease*. https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfPMN/pmn.cfm?ID=K082921.

Fezeu, F., A. J. Awad, C. J. Przybylowski, R. M. Starke, Y. Grober, D. Schlesinger, C. Lee, Z. Xu, and J. Sheehan. 2014. Access to stereotactic radiosurgery: Identification of existing disparities and a modest proposal to reduce them. *Cureus* 6(1):e157. https://www.cureus.com/articles/2384-access-to-stereotactic-radiosurgery-identification-of-existing-disparities-and-a-modest-proposal-to-reduce-them.

Fifield, L., M. Hasan, M. Huang, M. Murphy, M. Pharr, and D. Staack. 2019. *Transitioning from cobalt-60 to x-ray or e-beam for medical sterilization: Filling data and education gaps*. https://ans.org/pubs/transactions/a_47765.

Fifield, L. S., M. Pharr, D. Staack, S. D. Pillai, L. Nichols, J. McCoy, T. Faucette, T. T. Bisel, M. Huang, M. K. Hasan, L. Perkins, S. K. Cooley, and M. K. Murphy. 2021. Direct comparison of gamma, electron beam and x-ray irradiation effects on single-use blood collection devices with plastic components. *Radiation Physics and Chemistry* 180:109282. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969806X20313736.

Follett, P. 2014. Phytosanitary irradiation for fresh horticultural commodities: Generic treatments, current issues, and next steps. *Stewart Postharvest Review* 10(3). https://www.researchgate.net/profile/Peter-Follett/publication/269765053_Phytosanitary_irradiation_for_fresh_horticultural_commodities_generic_treatments_current_issues_and_next_steps/links/5e4dbdd192851c7f7f48ae8c/Phytosanitary-irradiation-for-fresh-horticultural-commodities-generic-treatments-current-issues-and-next-steps.pdf.

FPG (Fukushima Prefectural Government). 2020. Fukushima today: Steps for reconstruction and revitalization in Fukushima prefecture. http://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal-english/ayumi-en-15.html.

Funk, C., and M. Hefferon. 2018. Most Americans accept genetic engineering of animals that benefits human health, but many oppose other uses. Pew Research Center. https://www.pewresearch.org/science/2018/08/16/most-americans-accept-genetic-engineering-of-animals-that-benefits-human-health-but-many-oppose-other-uses.

GAO (Government Accountability Office). 2012. *Nuclear nonproliferation: Additional actions needed to improve security of radiological sources at U.S. medical facilities*. GAO-12-925. https://www.gao.gov//assets/650/647931.pdf.

GAO. 2014. *Nuclear nonproliferation: Additional actions needed to increase the security of U.S. industrial radiological sources*. GAO-14-293. https://www.gao.gov//assets/670/663917.pdf.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

GAO. 2016. *Nuclear security: NRC has enhanced the controls of dangerous radioactive materials, but vulnerabilities remain*. GAO-16-330. https://www.gao.gov//assets/680/678170.pdf.

GAO. 2018. *Nuclear security: CBP needs to take action to ensure imported radiological material is properly licensed*. GAO-18-214. https://www.gao.gov//assets/690/689393.pdf.

GAO. 2019. *Combating nuclear terrorism: NRC needs to take additional actions to ensure the security of high-risk radioactive material*. GAO-19-468. https://www.gao.gov/products/GAO-19-468.

Garrick, B. J. 2008. *Quantifying and controlling catastrophic risks*, Vol. 30, *Risk analysis*. Amsterdam, the Netherlands: Academic Press, Elsevier Inc. https://www.sciencedirect.com/book/9780123746016/quantifying-and-controlling-catastrophic-risks.

Garside, M. 2019. Oil production in selected countries 2008 and 2018. *Statista*, June 25. https://www.statista.com/statistics/273504/oil-production-in-selected-countries-since-2000.

Gasdia-Cochrane, M. 2018. Reasons why metal scrap yards need to monitor for radiation. Thermo Fisher Scientific. https://www.thermofisher.com/blog/metals/reasons-why-metal-scrap-yards-need-to-monitor-for-radiation.

Gene Watch UK. 2012. *Oxitec's genetically modified mosquitoes: Ongoing concerns*. http://www.genewatch.org/uploads/f03c6d66a9b354535738483c1c3d49e4/Oxitec_unansweredQs_fin.pdf.

Gibson, B. W., N. C. Boles, G. P. Souroullas, A. J. Herron, J. K. Fraley, R. S. Schwiebert, J. J. Sharp, and M. A. Goodell. 2015. Comparison of cesium-137 and x-ray irradiators by using bone marrow transplant reconstitution in C57BL/6J mice. *Comparative Medicine* 65(3):165–172. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4485625/pdf/cm2015000165.pdf.

Gill, B. S., J. F. Lin, T. C. Krivak, P. Sukumvanich, R. A. Laskey, M. S. Ross, J. L. Lesnock, and S. Beriwal. 2014. National cancer data base analysis of radiation therapy consolidation modality for cervical cancer: The impact of new technological advancements. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics* 90(5):1083–1090. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25216857.

Golden, R. 2014. Pulsed x-ray technology: Truths and myths. Presented at the 2014 Non-Destructive Testing Management Association meeting. https://www.ndtma.org/wp-content/uploads/2014/02/Golden.pdf.

Gott, K. M., C. A. Potter, M. Doyle-Eisele, Y. Lin, J. Wilder, and B. R. Scott. 2020. A comparison of Cs-137 γ rays and 320-kV x-rays in a mouse bone marrow transplantation model. *Dose Response* 18(2):1559325820916572. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/p mc/articles/PMC7139189/pdf/10.1177_1559325820916572.pdf.

Grass, J. A., D. J. Hei, K. Metchette, G. D. Cimino, G. P. Wiesehahn, L. Corash, and L. Lin. 1998. Inactivation of leukocytes in platelet concentrates by photochemical treatment with psoralen plus UVA. *Blood* 91(6):2180–2188.

Griffiths, A., L. Marinovich, M. B. Barton, and S. J. Lord. 2007. Cost analysis of Gamma Knife stereotactic radiosurgery. *International Journal of Technology Assessment in Health Care* 23(4):488–494.

Grover, S., M. J. Xu, A. Yeager, L. Rosman, R. S. Groen, S. Chackungal, D. Rodin, M. Mangaali, S. Nurkic, A. Fernandes, L. L. Lin, G. Thomas, and A. I. Tergas. 2015. A systematic review of radiotherapy capacity in low- and middle-income countries. *Frontiers in Oncology* 4:380. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4302829/pdf/fonc-04-00380.pdf.

Hallman, G. 2007. Phytosanitary measures to prevent the introduction of invasive species. Pp. 367–384 in *Biological Invasions*, W. Nentwig (ed.). Berlin, Heidelburg: Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-36920-2_21.

Hallman, G. 2011. Phytosanitary applications of irradiation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 10(2):143–151. https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00144.x.

Hallman, G., and C. Blackburn. 2016. Phytosanitary irradiation. *Foods* 5:8. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5224571/pdf/foods-05-00008.pdf.

Han, K., M. Milosevic, A. Fyles, M. Pintilie, and A. N. Viswanathan. 2013. Trends in the utilization of brachytherapy in cervical cancer in the United States. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics* 87(1):111–119. https://www.redjournal.org/action/showPdf?pii=S0360-3016%2813%2900751-7.

Hauser, G. C., E. Luis, and R. Andrew. 2007. *Operational results of Russian-built photovoltaic alternative energy powered lighthouses in extreme climates.* SAND2007-6346C. 520996. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories. https://www.osti.gov/servlets/purl/1146588.

Healy, B. J., D. van der Merwe, K. E. Christaki, and A. Meghzifene. 2017. Cobalt-60 machines and medical linear accelerators: Competing technologies for external beam radiotherapy. *Clinical Oncology (Royal College of Radiologists)* 29(2):110–115. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27908503.

Hénon, Y. 2021. Session introduction by the chairman. International Irradiators Association, presentation at the International Food Irradiation Symposium, on March 9–11, 2021.

Henschler, R., E. Seifried, and N. Mufti. 2011. Development of the S-303 pathogen inactivation technology for red blood cell concentrates. *Transfusion Medicine Hemotherapy* 38(1):33–42. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3132978.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

Holschneider, C. H., D. G. Petereit, C. Chu, I. C. Hsu, Y. J. Ioffe, A. H. Klopp, B. Pothuri, L. M. Chen, and C. Yashar. 2019. Brachytherapy: A critical component of primary radiation therapy for cervical cancer: From the Society of Gynecologic Oncology (SGO) and the American Brachytherapy Society (ABS). *Brachytherapy* 18(2):123–132. https://www.americanbrachytherapy.org/ABS/document-server/?cfp=ABS/assets/File/public/consensus-statements/Brachy1.pdf.

IAEA (International Atomic Energy Agency). 1988. *The radiological accident in Goiânia*. https://www.iaea.org/publications/3684/the-radiological-accident-in-goiania.

IAEA. 1998. *Lessons learned from accidents in industrial radiography*. Vienna, Austria: IAEA. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/STIPUB1058-14815945.pdf.

IAEA. 2003a. *Categorization of radioactive sources*. IAEA TECDOC 1344. Vienna, Austria: IAEA. https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/pdf/te_1344_web.pdf.

IAEA. 2003b. *Safety considerations in the disposal of disused sealed radioactive sources in borehole facilities*. Vienna, Austria: IAEA. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1368_web.pdf.

IAEA. 2004. *Code of conduct on the safety and security of radioactive sources*. Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/topics/codes-of-conduct.

IAEA. 2005. *Categorization of radioactive sources safety guide*, *IAEA safety standard series*. Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/publications/7237/categorization-of-radioactive-sources.

IAEA. 2006. *Gamma irradiators for radiation processing.* Vienna, Austria: IAEA. http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:37081743.

IAEA. 2008a. *Combating illicit trafficking in nuclear and other radioactive material*. Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/publications/7806/combating-illicit-trafficking-in-nuclear-and-other-radioactive-material.

IAEA. 2008b. *Security in the transport of radioactive material*. Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/publications/7987/security-in-the-transport-of-radioactive-material.

IAEA. 2008c. *Setting up a radiotherapy programme*. Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/publications/7694/setting-up-a-radiotherapy-programme.

IAEA. 2011. *Nuclear security recommendations on radioactive material and associated facilities*. Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/publications/8616/nuclear-security-recommendations-on-radioactive-material-and-associated-facilities.

IAEA. 2012a. *Developing alternatives to gamma irradiation for the sterile insect technique.* Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc56inf-3-att1_en.pdf.

IAEA. 2012b. *Guidance on the import and export of radioactive sources.* Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/publications/8901/guidance-on-the-import-and-export-of-radioactive-sources.

IAEA. 2013a. *Mexico safely recovers abandoned radioactive source*. https://www.iaea.org/newscenter/news/mexico-safely-recovers-abandoned-radioactive-source.

IAEA. 2013b. *Safety and security of radioactive sources: Maintaining continuous global control of sources throughout their life cycle. Proceedings of a Conference, Abu Dhabi, United Arab Emirates. 27–31 October 2013*. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1667_web.pdf.

IAEA. 2014a. *Development of new applications of machine generated food irradiation technologies: Report of the consultants meeting.* Vienna, Austria: IAEA. http://www-naweb.iaea.org/nafa/fep/crp/Development-Electron-Beam-Report-Consultants-Meeting.pdf.

IAEA. 2014b. *Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards*. Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/publications/8930/radiation-protection-and-safety-of-radiation-sources-international-basic-safety-standards.

IAEA. 2014c. *Radiotherapy facilities: Master planning and concept design considerations*. Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/publications/10561/radiotherapy-facilities-master-planning-and-concept-design-considerations.

IAEA. 2015a. *Implementation of high dose rate brachytherapy in limited resource settings*. Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/publications/10355/implementation-of-high-dose-rate-brachytherapy-in-limited-resource-settings.

IAEA. 2015b. *Staffing in radiotherapy: An activity based approach*. Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/publications/10800/staffing-in-radiotherapy-an-activity-based-approach.

IAEA. 2015c. *The Fukushima Daiichi Accident*. Vienna, Austria: IAEA. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1710-ReportByTheDG-Web.pdf.

IAEA. 2015d. *The transition from 2-D brachytherapy to 3-D high dose rate brachytherapy*. Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/publications/10705/the-transition-from-2-d-brachytherapy-to-3-d-high-dose-rate-brachytherapy.

IAEA. 2016. *Governmental, legal and regulatory framework for safety*. Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/publications/10883/governmental-legal-and-regulatory-framework-for-safety.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

IAEA. 2018a. *Guidance on the management of disused radioactive sources*. Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/zh/publications/13380/guidance-on-the-management-of-disused-radioactive-sources.

IAEA. 2018b. *IAEA helps remove highly radioactive material from five South American countries.* Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-helps-remove-highly-radioactive-material-from-five-south-american-countries.

IAEA. 2018c. *Regulations for the safe transport of radioactive material*. Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/publications/12288/regulations-for-the-safe-transport-of-radioactive-material.

IAEA. 2018d. *Status and trends in spent fuel and radioactive waste management*. Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/publications/11173/status-and-trends-in-spent-fuel-and-radioactive-waste-management.

IAEA. 2019a. *Economical feasibility of transitioning from gamma sterilization to accelerator-based sterilization: Report of a consultants meeting.* Vienna, Austria: IAEA. http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/working_materials/Report%20Eco%20Feas%20Ster.pdf.

IAEA. 2019b. *Radiation effects on polymer materials: Report of a consultants meeting.* Vienna, Austria: IAEA. http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/working_materials/IAEA%20Consultancy%20Meeting%20Final%20Report.pdf.

IAEA. 2019c. *Recent achievements on irradiation facilities: Report of a consultants meeting.* Vienna, Austria: IAEA. http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/working_materials/Report%20IF.pdf.

IAEA. 2019d. *Security of radioactive material in use and storage and of associated facilities: Implementing guide*. Vol. 11-G, *IAEA nuclear security series*. Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/publications/12360/security-of-radioactive-material-in-use-and-storage-and-of-associated-facilities.

IAEA. 2020a. *Incidents of nuclear and other radioactive material out of regulatory control: 2020 fact sheet.* Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/sites/default/files/20/02/itdb-factsheet-2020.pdf.

IAEA. 2020b. *Underground disposal concepts for small inventories of intermediate and high level radioactive waste.* TECDOC 1934. Vienna, Austria: IAEA. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1934_web.pdf.

IAEA. n.d. *Gamma irradiators for radiation processing.* http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/Brochgammairradd.pdf.

IEA (International Energy Agency). 2019. *The role of gas in today's energy transitions.* Paris, France: IEA. https://www.iea.org/reports/the-role-of-gas-in-todays-energy-transitions.

IHSMarkit. 2020. Produced water from onshore US oil and gas activities to decline to nearly 20 billion barrels annually; reach $28 billion in value by 2022, IHS Markit says. https://news.ihsmarkit.com/prviewer/release_only/slug/2020-04-02-produced-water-from-onshore-us-oil-and-gas-activities-to-decline-to-nearly-20-billion-barrels-annually-reach-28-billion-in-value-by-2022-ihs-markit-says.

IIA (International Irradiation Association). 2014. IIA letter to appropriations committee chair Feinstein, U.S. Senate. http://www.sourcesecurityworkinggroup.org/wp-content/uploads/2015/12/IIA-letter-to-Appropriations.pdf.

IIA. 2017. *A comparison of gamma, e-beam, x-ray and ethylene oxide technologies for the industrial sterilization of medical devices and healthcare products.* United Kingdom: International Irradiation Association. http://iiaglobal.com/wp-content/uploads/2018/01/White-Paper-Comparison-Gamma-Eb-Xray-and-EO-for-Sterilisation.pdf.

IIA. 2018. Beneficial uses of cobalt-60, Factsheet. http://iiaglobal.com/wp-content/uploads/2018/01/Factsheet_Cobalt_60.pdf.

Iliopulos, I., and C. Boyd. 2020. Preventing a dirty bomb: Case studies and lessons learned. Presented at the International Conference on Nuclear Security 2020, Vienna, Austria. https://conferences.iaea.org/event/181/contributions/15759/attachments/8672/11544/CN278_Paper_366_Preventing_a_Dirty_Bomb.pdf.

Iliopulos, I., C. Boyd, and L. S. H. Holgate. 2019. *Preventing a dirty bomb: Case studies and lessons learned.* Nuclear Threat Initiative. http://www.jstor.org/stable/resrep19982.1.

Islam, N. 2017. Crossing the valley of death—an integrated framework and a value chain for emerging technologies. *IEEE Transactions on Engineering Management* 64(3):389–399. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7900378.

Itamura, M., and J. Lieberman. 2020. What are "alternative technologies"? Presented at the International Conference on Nuclear Security 2020, Vienna, Austria. https://conferences.iaea.org/event/181/contributions/15597/attachments/8684/11572/SNL_Poster_-_CIRP_Successes_to_date_and_efforts_to_engage_U.S._sites_FINAL.pdf.

Itamura, M. T., M. J. Baumann, and L. J. Gilbert. 2018. Radiological security through cesium irradiator replacement in the United States, 2018-10-01, United States. SAND2018-12478C668865. https://www.osti.gov/biblio/1592558.

Jang, K.-W. 2019. Introduction of RASIS and RADLOT: The system for the safety and security of radioactive materials and radiation sources in Korea. Presented at the KINS-IAEA Workshop on Radiation Safety and Emergency Response in the Medical or Industrial Use of Radiation, Seoul, Republic of Korea. https://ansn.iaea.org/Common/topics/OpenTopic.aspx?ID=18402.

JCER (Japan Center for Economic Research). 2019. *Follow up report of public financial burden of the Fukushima nuclear accident.* Tokyo: Japan Center for Economic Research. https://www.jcer.or.jp/english/accident-cleanup-costs-rising-to-35-80-trillion-yen-in-40-years.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

Jurczyk, B. J. 2018. Compensated neutron logging tool using neutron DD generator for AmBe replacement. Presented at the 25th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry (CAARI),

Kale, M. S., G. Mhango, M. Bonomi, A. Federman, K. Sigel, K. E. Rosenzweig, and J. P. Wisnivesky. 2016. Cost of intensity-modulated radiation therapy for older patients with stage III lung cancer. *Annals of the American Thoracic Society* 13(9):1593–1599. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5059502.

Kamen, J., W.-Y. Hsu, B. Boswell, and C. Hill. 2019. Successful migration from radioactive irradiators to x-ray irradiators in one of the largest medical centers in the U.S. *Health Physics* 117(5):558–570. https://journals.lww.com/health-physics/Fulltext/2019/11000/Successful_Migration_from_Radioactive_Irradiators.9.aspx.

Kaplan, S., and B. J. Garrick. 1981. On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis* 1(1):11–27. https://www.nrc.gov/docs/ML1216/ML12167A133.pdf.

KBTH (Korle Bu Teaching Hospital). 2020. *Korle Bu begins radiation therapy treatment for prostate cancer*. https://kbth.gov.gh/korle-bu-begins-radiation-therapy-treatment-for-prostate-cancer.

Kim, E., O. Kurihara, N. Kunishima, T. Momose, T. Ishikawa, and M. Akashi. 2016. Internal thyroid doses to Fukushima residents—estimation and issues remaining. *Journal of Radiation Research* 57(Suppl 1):i118–i126. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27538842.

King, G., III, R. L. Bramblett, A. J. Becker, G. W. Corris, and J. R. Boyce. 1987. Density logging using an electron linear accelerator as the x-ray source. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 24/25(pt. 2):990–994.

Klesty, V. 2021. Electric cars rise to record 54% market share in Norway. *Reuters*, January 5. https://www.reuters.com/journalists/victoria-klesty.

Klitsie, J. B., R. A. Price, and C. H. S. De Lille. 2019. Overcoming the Valley of Death: A design innovation perspective. *Design Management Journal* 14(1):28–41. https://doi.org/10.1111/dmj.12052.

Krauss, C. 2020. *Is Exxon a survivor? The New York Times*, December 10.

Kume, T., M. Furuta, S. Todoriki, N. Uenoyama, and Y. Kobayashi. 2009. Status of food irradiation in the world. *Radiation Physics and Chemistry* 78:222–226.

Lawrence, Y. R., X. A. Li, I. el Naqa, C. A. Hahn, L. B. Marks, T. E. Merchant, and A. P. Dicker. 2010. Radiation dose-volume effects in the brain. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics* 76(3 Suppl):S20–S27. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3554255.

Lees, R. S., J. R. Gilles, J. Hendrichs, M. J. Vreysen, and K. Bourtzis. 2015. Back to the future: The sterile insect technique against mosquito disease vectors. *Current Opinion in Insect Science* 10:156–162.

Light, G. 2008. Comparison of pulsed x-ray source digital radiography with isotopic radiography on pipe. Presented at the 4th Middle East NDT Conference and Exhibition, Kingdom of Bahrain. https://www.ndt.net/article/mendt2007/papers/light1.pdf.

LLRW (Low-Level Radioactive Waste) Forum. 2014. Disused sources: Management and disposition, edited by Low-Level Radioactive Waste Forum, Inc. http://www.disusedsources.org/wp-content/uploads/2015/01/Poster-DSWG-August-2014.pdf.

Lozares-Cordero, S., J. A. Font-Gómez, A. Gandía-Martínez, A. Miranda-Burgos, A. Méndez-Villamón, D. Villa-Gazulla, V. Alba-Escorihuela, S. Jiménez-Puertas, and V. González-Pérez. 2019. Treatment of cervical cancer with electronic brachytherapy. *Journal of Applied Clinical Medical Physics* 20(7):78–86. https://aapm.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/acm2.12657.

Ma, L., A. Nichol, S. Hossain, B. Wang, P. Petti, R. Vellani, C. Higby, S. Ahmad, I. Barani, D. C. Shrieve, D. A. Larson, and A. Sahgal. 2014. Variable dose interplay effects across radiosurgical apparatus in treating multiple brain metastases. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 9:1079–1086.

MacKenzie, C., K. S. Iwamoto, and K. Smith. 2020. University of California replacement of cesium irradiators with alternative technologies. *Health Physics* 118(2):209–214. https://journals.lww.com/health-physics/Abstract/2020/02000/University_of_California_Replacement_of_Cesium.9.aspx.

Mahmood, U., T. Pugh, S. Frank, L. Levy, G. Walker, W. Haque, M. Koshy, W. Graber, D. Swanson, K. Hoffman, D. Kuban, and A. Lee. 2014. Declining use of brachytherapy for the treatment of prostate cancer. *Brachytherapy* 13(2):157–162. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1538472113003140?via%3Dihub.

Mailhot Vega, R. B., Jr., D. Barbee, W. Talcott, T. Duckworth, B. A. Shah, O. F. Ishaq, C. Small, A. R. Yeung, C. A. Perez, P. B. Schiff, O. Ginsburg, W. Small, M. Abdel-Wahab, G. S. Bardales, and M. Harkenrider. 2018. Cost in perspective: Direct assessment of American market acceptability of Co-60 in gynecologic high-dose-rate brachytherapy and contrast with experience abroad. *Journal of Contemporary Brachytherapy* 10(6):503–509. doi: 10.5114/jcb.2018.79928.

Malone, P., and R. J. Smith. 2016. *A terrorist group's plot to create a radioactive "dirty bomb."* Center for Public Integrity. https://publicintegrity.org/national-security/a-terrorist-groups-plot-to-create-a-radioactive-dirty-bomb.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

Malouff, T. D., A. Mahajan, S. Krishnan, C. Beltran, D. S. Seneviratne, and D. M. Trifiletti. 2020. Carbon ion therapy: A modern review of an emerging technology. *Frontiers in Oncology* 10:82. https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fonc.2020.00082.

Marais, E. 2019. *Ensuring safe structures: A decade of using digital technology in industrial radiography in Viet Nam.* IAEA. https://www.iaea.org/newscenter/news/ensuring-safe-structures-a-decade-of-using-digital-technology-in-industrial-radiography-in-viet-nam.

Martin, E. 2013. *Controlling the risk due to the use of gamma sources for NDT: First feedback from the deployment of replacement NDT techniques.* IAEA. https://gnssn.iaea.org/CSN/Abu%20Dhabi%20Conference/Shared%20Documents/Session%205%20presentations/INV-15%20Martin.pdf.

Mastrangelo, T., A. G. Parker, A. Jessup, R. Pereira, D. Orozco-Dávila, A. Islam, T. Dammalage, and J. M. Walder. 2010. A new generation of x ray irradiators for insect sterilization. *Journal of Economic Entomology* 103(1):85–94. https://bioone.org/journals/journal-of-economic-entomology/volume-103/issue-1/EC09139/A-New-Generation-of-X-Ray-Irradiators-for-Insect-Sterilization/10.1603/EC09139.full.

MeiXu, G. 2021. A deep insight on the regulations around food irradiation in Asia and specifically China. Presentation at the International Food Irradiation Symposium on March 9–11, 2021.

Milano, M. T., J. Grimm, A. Niemierko, S. G. Soltys, V. Moiseenko, K. J. Redmond, E. Yorke, A. Sahgal, J. Xue, A. Mahadevan, A. Muacevic, L. B. Marks, and L. R. Kleinberg. 2020. Single- and multifraction stereotactic radiosurgery dose/volume tolerances of the brain. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics* 110(1):68–86. https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2020.08.013.

Miller, R. B. 2003. A description of SureBeam food irradiation facilities. https://doi.org/10.1063/1.1619847.

Montes, A., and J. Taylor. 2017. *Understanding the current capabilities and limitations of digital industrial radiography.* SGS White Paper. https://www.sgs.com/-/media/global/documents/white-papers/sgs-ind-digital-radiography-white-paper-en.pdf.

Moore, G. M., and M. A. Pomper. 2015. *Permanent risk reduction a roadmap for replacing high-risk radioactive sources and materials.* James Martin Center for Nonproliferation Studies (CNS). http://www.nonproliferation.org/wp-content/uploads/2015/07/permanent_risk_reduction.pdf.

Moore, M., A. Vining, and A. Boardman. 2013. More appropriate discounting: The rate of social time preference and the value of the social discount rate. *Journal of Benefit Cost Analysis* 4:1–16. https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/S219458880000052X.

Moran, T. L., P. Ramuhalli, A. Pardini, M. T. Anderson, and S. Doctor. 2010. *Replacement of radiography with ultrasonics for the nondestructive inspection of welds—evaluation of technical gaps—an interim report.* Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory, Department of Energy. https://www.nrc.gov/docs/ML1010/ML101031254.pdf.

Moran, T. L., M. Prowant, C. A. Nove, A. F. Pardini, S. L. Crawford, A. D. Cinson, and M. T. Anderson. 2015. *Applying ultrasonic testing in lieu of radiography for volumetric examination of carbon steel piping.* Rockville, MD: U.S. Nuclear Regulatory Commission.

Moreau, J.-F. 2019. *Nuctrack solution*. Presented at the WINS International Workshop: Security of Radioactive Sources, Mexico City, Mexico. https://wins.org/wp-content/uploads/2019/09/Session-III-Nuc-Track.pdf.

Moroff, G., and N. L. C. Luban. 1997. The irradiation of blood and blood components to prevent graft-versus-host disease: Technical issues and guidelines. *Transfusion Medicine Reviews* 11(1):15–26. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0887796397800065.

Mundt, J. M., L. Rouse, J. Van den Bossche, and R. P. Goodrich. 2014. Chemical and biological mechanisms of pathogen reduction technologies. *Photochemistry and Photobiology* 90(5):957-964. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/php.12311.

Murphy, M. K., and J. Kamen. 2019. Deciding between an x-ray and ^{137}Cs irradiator—it's not just about energy spectra. *Radiation Research* 192(5):493–506. https://meridian.allenpress.com/radiation-research/article-abstract/192/5/493/434519/Deciding-between-an-X-Ray-and-137Cs-Irradiator-It?redirectedFrom=fulltext.

NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2005. *Spacecraft power for new horizons.* NASA Fact Sheet. https://rps.nasa.gov/missions/7/new-horizons.

NASA. 2020. Multi-mission radioisotope thermoelectric generator (MMRTG). *NASAfacts*. https://mars.nasa.gov/internal_resources/788.

NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine). 2020. *Scientific aspects of violent extremism, terrorism, and radiological security: Proceedings of a workshop—in brief.* Washington, DC: The National Academies Press. https://www.nap.edu/catalog/25874.

Nemet, G. F., V. Zipperer, and M. Kraus. 2018. The valley of death, the technology pork barrel, and public support for large demonstration projects. *Energy Policy* 119:154–167. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421518302258.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

NETL (National Energy Technology Laboratory). 2017a. *Best practices: Operations for geologic storage projects*. DOE/NETL-2017/1848. Department of Energy. https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2019-02/BPM_Operations_GeologicStorageClassification.pdf.

NETL. 2017b. *Best practices: Site screening, site selection, and site characterization for geologic storage projects*. DOE/NETL-2017/1844. Department of Energy. https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2018-10/BPM-SiteScreening.pdf.

NETL. n.d. *How do we know that CO_2 storage is safe?* Department of Energy. https://netl.doe.gov/coal/carbon-storage/faqs/permanence-safety.

NLM (National Library of Medicine), Biomedical Advanced Research and Development Authority. 2017. Efficacy of mirasol-treated apheresis platelets in patients with hypoproliferative thrombocytopenia (miplate). *ClinicalTrials.gov*. https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT02964325.

NLM, Varian Medical. 2020. Feasibility study of FLASH radiotherapy for the treatment of symptomatic bone metastases (fast-01). *ClinicalTrials.gov.* https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT04592887.

NNSA (National Nuclear Security Administration). 2019. *NNSA donates container to IAEA for shipping radioactive sources*. https://www.energy.gov/nnsa/articles/nnsa-donates-container-iaea-shipping-radioactive-sources.

Nordion. 2021. *Gamma: The heart of radiation sterilization past, present and future*. White Paper. https://sterigenics.com/white-paper/gamma-the-heart-of-radiation-sterilization-past-present-and-future.

North, A., V. Ciaravino, N. Mufti, and L. Corash. 2011. Preclinical pharmacokinetic and toxicology assessment of red blood cells prepared with S-303 pathogen inactivation treatment. *Transfusion* 51(10):2208–2218. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1537-2995.2011.03132.x.

NRC (National Research Council). 2008. *Radiation source use and replacement: Abbreviated version*. Washington, DC: The National Academies Press. https://www.nap.edu/catalog/11976.

NSTC (National Science and Technology Council). 2016. *Transitioning from high-activity radioactive sources to non-radioisotopic (alternative) technologies: A best practices guide for federal agencies*. Washington, DC: NSTC. https://www.hsdl.org/?abstract&did=797521.

NTI (Nuclear Threat Initiative). 2017. *NTI and state of California partner to reduce radiological "dirty bomb" risks*. https://www.nti.org/newsroom/news/nti-and-state-california-partner-reduce-radiological-dirty-bomb-risks.

NTI. 2018a. *Replacing cesium-137 blood irradiators*. https://www.nti.org/analysis/articles/cesium-137-blood-irradiator-replacement.

NTI. 2018b. *Replacing cesium-137 irradiators: Leaders taking steps*. https://www.nti.org/analysis/articles/leaders-field.

NTI. 2020. *Losing focus in a disordered world.* Washington, DC: NTI. https://www.ntiindex.org/wp-content/uploads/2020/07/2020_NTI-Index_Report_Final.pdf.

Olivo, R. A., M. V. da Silva, F. B. Garcia, S. Soares, V. Rodrigues, Jr., and H. Moraes-Souza. 2015. Evaluation of the effectiveness of packed red blood cell irradiation by a linear accelerator. *Revista Brasileira de Hematologia e Hemoterapia* 37(3):153–159. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4459437.

Pannullo, S. C., D. A. R. Julie, S. Chidambaram, O. D. Balogun, S. C. Formenti, M. L. J. Apuzzo, and J. P. S. Knisely. 2019. Worldwide access to stereotactic radiosurgery. *World Neurosurgery* 130:608–614. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S187887501931023X?via%3Dihub.

Park, H. S., E. H. Wang, C. E. Rutter, C. D. Corso, V. L. Chiang, and J. B. Yu. 2016. Changing practice patterns of Gamma Knife versus linear accelerator-based stereotactic radiosurgery for brain metastases in the US. *Journal of Neurosurgery* 124(4):1018–1024. https://thejns.org/view/journals/j-neurosurg/124/4/article-p1018.xml.

Parker, A., and K. Mehta. 2007. Sterile insect technique: A model for dose optimization for improved sterile insect quality. *Florida Entomologist* 90(1):88–95. https://doi.org/10.1653/0015-4040(2007)90[88:SITAMF]2.0.CO;2.

Peeters, A., J. P. Grutters, M. Pijls-Johannesma, S. Reimoser, D. De Ruysscher, J. L. Severens, M. A. Joore, and P. Lambin. 2010. How costly is particle therapy? Cost analysis of external beam radiotherapy with carbon-ions, protons and photons. *Radiotherapy and Oncology* 95(1):45–53. doi: 10.1016/j.radonc.2009.12.002.

Pemper, R., A. Sommer, P. Guo, D. Jacobi, J. Longo, S. Bliven, E. Rodriguez, F. Mendez, and X. Han. 2006. A new pulsed neutron sonde for derivation of formation lithology and mineralogy. SPE 102770. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, September 24–27. https://doi.org/10.2118/102770-MS.

Phi, V., M. Tran, N. Luu, and T. Bui. 2018. A practical sharing experience for pilot project in on-line tracking of mobile radioactive sources in Vietnam. Presented at the International Conference on the Security of Radioactive Material: The Way Forward for Prevention and Detection, Vienna, Austria. https://www.iaea.org/sites/default/files/18/12/cn-269-synopses.pdf.

Pillai, S. 2021. Current situation in the USA and South America. Presentation at the International Food Irradiation Symposium, on March 9–11, 2021.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

Pillai, S., C. Bogran, and C. Blackburn. 2014. Ionizing irradiation for phytosanitary applications and fresh produce safety. Pp. 221–232 in *Global safety of fresh produce*, J. Hoorfar (ed.). Cambridge, UK: Woodhead. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782420187500161.

Pinnarò, P., A. Soriani, D. D'Alessio, C. Giordano, M. L. Foddai, V. Pinzi, and L. Strigari. 2011. Implementation of a new cost efficacy method for blood irradiation using a non dedicated device. *Journal of Experimental & Clinical Cancer Research* 30(1):7. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3031252.

Pohler, P., M. Müller, C. Winkler, D. Schaudien, K. Sewald, T. H. Müller, and A. Seltsam. 2015. Pathogen reduction by ultraviolet C light effectively inactivates human white blood cells in platelet products. *Transfusion* 55:337–347.

Poirier, Y., M. D. Belley, M. W. Dewhirst, T. T. Yoshizumic, and J. D. Down. 2020. Transitioning from gamma rays to x rays for comparable biomedical research irradiations: Energy matters. *Radiation Research* 193(6):506–511. doi: 10.1667/RADE-20-00039.1.

Pomper, M., E. Murauskaite, and T. Coppen. 2014. *Promoting alternatives to high-risk radiological sources the case of cesium chloride in blood irradiation.* James Martin Center for Nonproliferation Studies (CNS). https://nonproliferation.org/wp-content/uploads/2014/03/140312_alternative_high_risk_radiological_sources_cesium_chloride_blood.pdf.

Pompos, A., M. Durante, and H. Choy. 2016. Heavy ions in cancer therapy. *JAMA Oncology* 2(12):1539–1540. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5894097/pdf/nihms949973.pdf.

Porter, S. 2015. *Antarctica radiological source removals—complex US-Russian cooperative effort.* Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory. https://www.osti.gov/servlets/purl/1241969.

Radtke, R. J., M. Lorente, B. Adolph, M. Berheide, S. Fricke, J. Grau, S. Herron, J. Horkowitz, B. Jorion, D. Madio, D. May, J. Miles, L. Perkins, O. Philip, B. Roscoe, D. Rose, and C. Stoller. 2012. A capture and inelastic spectroscopy tool takes geochemical logging to next level. Presented at the 53rd SPWLA Annual Symposium, Cartagena, Colombia, June 16–20. SPWLA-2012-103. https://onepetro.org/SPWLAALS/proceedings-abstract/SPWLA12/All-SPWLA12/SPWLA-2012-103/28250.

Regan, D., and M. A. Markowitz. 2016. Changes to the 30th edition of standards for blood banks and transfusion services. *AABB Association Bulletin* 16-05, March 17. https://pdf4pro.com/fullscreen/association-bulletin-16-05-aabb-48661.html.

Reichel, N., M. Evans, F. Allioli, M.-L. Mauborgne, L. Nicoletti, F. Haranger, N. Laporte, C. Stoller, V. Cretoiu, E. El Hehiawy, and R. Rabrei. 2012. Neutron-gamma density (NGD): Principles, field test results and log quality control of a radioisotope-free bulk density measurement. SPWLA-2012-082. Presented at the SPWLA 53rd Annual Symposium, Cartagena, Colombia, June 16–20. https://onepetro.org/SPWLAALS/proceedings-abstract/SPWLA12/All-SPWLA12/SPWLA-2012-082/28188.

Remick, J. S., E. Kowalski, R. Khairnar, K. Sun, E. Morse, H. R. Cherng, Y. Poirier, N. Lamichhane, S. J. Becker, S. Chen, A. N. Patel, Y. Kwok, E. Nichols, P. Mohindra, G. F. Woodworth, W. F. Regine, and M. V. Mishra. 2020. A multi-center analysis of single-fraction versus hypofractionated stereotactic radiosurgery for the treatment of brain metastasis. *Radiation Oncology* 15(1):128.

Romano, S. A. 2015. *Air Force removes nuclear excess from Alaska.* U.S. Air Combat Command. https://www.acc.af.mil/News.

Rosoff, H., and D. von Winterfeldt. 2007. A risk and economic analysis of dirty bomb attacks on the ports of Los Angeles and Long Beach. *Risk Analysis* 27(3):533–546.

Roughan, K. 2018. End of life management of radioactive sources. Presented at the WINS Session on Alternative Technologies to High Activity Radioactive Sources. https://wins.org/wp-content/uploads/2018/03/08-WINS-Alt-Tech-March-2018-USDoE-meeting.pdf.

Rushton, R., M. Shannon, R. Howell, S. Mickum, and Z. Hope. 2016. A new high dose research irradiator. Presented at the 2016 Council on Ionizing Radiation Measurements and Standards Conference, Gaithersburg, MD. http://cirms.org/pdf/cirms2016/CIRMS-2016-SpencerMickum.pdf.

Samet, J. M., A. B. de González, L. T. Dauer, M. Hatch, O. Kosti, F. A. Mettler, Jr., and M. M. Satyamitra. 2018. Gilbert W. Beebe Symposium on 30 years after the Chernobyl accident: Current and future studies on radiation health effects. *Radiation Research* 189(1):5–18. doi: 10.1667/RR14791.1.

Sapiano, M. R. P., J. M. Jones, A. A. Savinkina, K. A. Haass, J. J. Berger, and S. V. Basavaraju. 2020. Supplemental findings of the 2017 national blood collection and utilization survey. *Transfusion* 60(S2):S17–S37. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/trf.15715.

Saxebøl, G., and S. Øvergaard. 2013. *ERPAN survey 2013—Norway, topic: Blood irradiators*, Paris, France: Norwegian Radiation Protection Authority. https://www.eu-alara.net/index.php/activities/ean-documents-and-publications/docman-menu/erpan-2013/193-blood-irradiators-survey-g-saxebol-norway/file.html.

Schetelig, M. F., C. Horn, A. Handler, and E. A. Wimmer. 2007. Development of an embryonic lethality system in Mediterranean fruit fly *Ceratitis capitata*. Pp. 85–93 in *Area-Wide Control of Insect Pests,* M. J. B. Vreysen, A. S. Robinson, and J. Hendrichs (eds). Dordrecht, the Netherlands: Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-6059-5_6.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Schipper, H.-C. L., M. A. Meloni, K. Wansleeben, R. Heijungs, and E. van der Voet. 2018. Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics. *Resources, Conservation and Recycling* 132:28–36. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.004.

Schreuer, M., and A. J. Rubin. 2016. Video found in Belgium of nuclear official may point to bigger plot. *The New York Times,* February 18. https://www.nytimes.com/2016/02/19/world/europe/belgium-nuclearofficial-video-paris-attacks.html.

Seltsam, A., and T. H. Müller. 2011. UVC irradiation for pathogen reduction of platelet concentrates and plasma. *Transfusion Medicine and Hemotherapy* 38:43–54.

Servick, K. 2016. Winged warriors. *Science* 354(6309):164–167. https://science.sciencemag.org/content/sci/354/6309/164.full.pdf.

Shah, C., F. Vicini, S. F. Shaitelman, J. Hepel, M. Keisch, D. Arthur, A. J. Khan, R. Kuske, R. Patel, and D. E. Wazer. 2018. The American Brachytherapy Society consensus statement for accelerated partial-breast irradiation. *Brachytherapy* 17(1):154–170. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1538472117304622?via%3Dihub.

Simon, M., A. Tkabladze, S. Beekman, T. Atobatele, M.-A. De Looz, R. Grover, F. Hamichi, J. Jundt, K. McFarland, J. Mlcak, J. Reijonen, A. Revol, R. Stewart, J. Yeboah, and Y. Zhang. 2018. A novel x-ray tool for true sourceless density logging. *Petrophysics* 50(5):565–587.

Smith, R. B., F. Romero, and R. Vicente. 2019. Plutonium-238: The fuel crisis. Presented at the 2019 International Nuclear Atlantic Conference, Santos, SP, Brazil. http://repositorio.ipen.br/bitstream/handle/123456789/30625/26274.pdf?sequence=1.

Sugden, S. 2019. Use of gamma radiation for sterilisation and other industrial applications. Presented at the Panel on Gamma and Electron Irradiation, Vienna, Austria. http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/working_materials/Side%20Event%20on%20Recent%20Advances%20in%20Radiation%20Technologies.pdf.

Suzuki, Y., H. Yabe, S. Yasumura, T. Ohira, S.-I. Niwa, A. Ohtsuru, H. Mashiko, M. Maeda, and M. Abe. 2015. Psychological distress and the perception of radiation risks: The Fukushima health management survey. *Bulletin of the World Health Organization* 93(9):598–605. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26478623.

Suzuki, Y., Y. Takebayashi, S. Yasumura, M. Murakami, M. Harigane, H. Yabe, T. Ohira, A. Ohtsuru, S. Nakajima, and M. Maeda. 2018. Changes in risk perception of the health effects of radiation and mental health status: The Fukushima health management survey. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15(6):1219. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29890768.

Thomas, D. D., C. A. Donnelly, R. J. Wood, and L. S. Alphey. 2000. Insect population control using a dominant, repressible, lethal genetic system. *Science* 287(5462):2474–2476. https://science.sciencemag.org/content/sci/287/5462/2474.full.pdf.

Tom, M. C., J. T. Hepel, R. Patel, M. Kamrava, S. N. Badiyan, G. N. Cohen, and C. Shah. 2019. The American Brachytherapy Society consensus statement for electronic brachytherapy. *Brachytherapy* 18(3):292–298. https://www.americanbrachytherapy.org/ABS/document-server/?cfp=ABS/assets/File/public/consensus-statements/Brachy4.pdf.

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). 2014. *Sources, effects and risks of ionizing radiation, Vol. I: Report to the General Assembly and Scientific Annex A*. UNSCEAR 2013 Report. E.14.IX.1. United Nations, New York.

UNSCEAR. 2020. *Levels and effects of radiation exposure due to the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: Implications of information published since the UNSCEAR 2013 Report.* https://www.unscear.org/docs/publications/2020/UNSCEAR_2020_AnnexB_AdvanceCopy.pdf.

U.S. Congress, House. 2018. *John S. McCain National Defense Authorization Act for fiscal year 2019*. H.R. 5515. https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/5515/text. Government Printing Office.

U.S. Congress, Senate. 2020. *Energy and Water Development Appropriations Bill, 2020, to accompany S. 2470. S. Rept. 116-102.* Washington, DC: Government Printing Office. https://www.congress.gov/116/crpt/srpt102/CRPT-116srpt102.pdf.

U.S. NRC (U.S. Nuclear Regulatory Commission). 1997. *Elevation of the core damage frequency objective to a fundamental commission safety goal.* Rockville, MD: U.S. NRC. https://www.nrc.gov/docs/ML9929/ML992930056.pdf.

U.S. NRC. 1998. *Modifications to the safety goal policy statement (SECY-98-101).* Rockville, MD: U.S. NRC. https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/secys/1998/secy1998-101/1998-101scy.pdf.

U.S. NRC. 1999. *Modifications to the safety goal policy statement (SECY-99-191).* Rockville, MD: U.S. NRC. https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/secys/1999/secy1999-191/1999-191scy.pdf.

U.S. NRC. 2000. *Modifications to the reactor safety goal policy statement (SECY-00-0077).* Rockville, MD: U.S. NRC. https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/secys/2000/secy2000-0077/2000-0077scy.pdf.

U.S. NRC. 2001. *Modified reactor safety goal policy statement (SECY-01-0009).* Rockville, MD: U.S. NRC. https://www.nrc.gov/docs/ml0037/ML003779058.pdf.

U.S. NRC. 2009. *NRC commission split 2-2 on expansion of national radioactive source tracking system.* Rockville, MD: U.S. NRC. https://www.nrc.gov/docs/ML0918/ML091811216.pdf.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

U.S. NRC. 2010. *The 2010 Radiation Source Protection and Security Task Force report: Report to the president and U.S. Congress under Public Law 109-58, the Energy Policy Act of 2005.* Rockville, MD: U.S. NRC. https://www.nrc.gov/security/byproduct/2010-task-force-report.pdf.

U.S. NRC. 2011. Policy statement of the U.S. Nuclear Regulatory Commission on the protection of cesium-137 chloride sources. *Federal Register* 76(142):44378–44383. https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2011-07-25/pdf/2011-18767.pdf.

U.S. NRC. 2012a. *Consideration of economic consequences within the U.S. Nuclear Regulatory Commission's regulatory framework.* Rockville, MD: U.S. NRC. https://www.nrc.gov/docs/ML1217/ML12173A479.pdf.

U.S. NRC. 2012b. Policy Issue (Information) statement from Mark A. Satorius, Director, Office of Federal and State Materials, and Environmental Management Programs to the Commissioners. The U.S. Nuclear Regulatory Commission Implementation Plan for the Radiation Source Protection and Security Task Force report. SECY-12-0165. December 7. https://www.nrc.gov/docs/ML1233/ML12333A364.pdf.

U.S. NRC. 2013. Memo to executive director for operations. Rockville, MD: U.S. NRC. https://www.nrc.gov/docs/ML1307/ML13079A055.pdf.

U.S. NRC. 2014a. *Physical security best practices for the protection of risk-significant radioactive material*. https://www.nrc.gov/docs/ML1415/ML14150A382.pdf.

U.S. NRC. 2014b. Summary of NRC staff program review of 10 CFR part 37. Rockville, MD: U.S. NRC. https://www.nrc.gov/docs/ML1701/ML17019A411.pdf.

U.S. NRC. 2014c. *The 2014 Radiation Source Protection and Security Task Force report: Report to the president and the U.S. Congress under Public Law 109-58, the Energy Policy Act of 2005.* Rockville, MD: U.S. NRC. https://www.nrc.gov/security/byproduct/2014-task-force-report.pdf.

U.S. NRC. 2015a. Memorandum of understanding among the Department of Homeland Security, the Department of Transportation, and the Nuclear Regulatory Commission concerning cooperation on radioactive materials transportation security. 2015-17274. Rockville, MD: U.S. NRC. https://www.balch.com/files/upload/ML13240A354%20without%20banners%20and%20with%20signatures%202-26-15.pdf.

U.S. NRC. 2015b. *Concentration averaging and encapsulation branch technical position, revision 1.* Rockville, MD: U.S. NRC. https://www.nrc.gov/docs/ML1225/ML12254B065.pdf.

U.S. NRC. 2016. *Radioactive byproduct material financial scoping study: Financial planning for radioactive byproduct material—scoping report.* SECY-16-0046. Rockville, MD: U.S. NRC. https://www.nrc.gov/docs/ML1606/ML16068A202.pdf.

U.S. NRC. 2017. Re-evaluation of category 3 source security and accountability in response to SRM-COMJMB-16-0001. SECY-17-0083. Rockville, MD: U.S. NRC. https://adamswebsearch2.nrc.gov/webSearch2/main.jsp?AccessionNumber=ML17188A255.

U.S. NRC. 2018. *The 2018 Radiation Source Protection and Security Task Force report: Report to the president and the U.S. Congress under Public Law 109-58, the Energy Policy Act of 2005.* Rockville, MD: U.S. NRC. https://www.nrc.gov/docs/ML1827/ML18276A155.pdf.

U.S. NRC. 2019a. Response to 2019 GAO materials security audit. https://www.nrc.gov/security/byproduct/faq-response-2019-gao-audit.html#a3.

U.S. NRC. 2019b. Risk-informing security. March. Rockville, MD: U.S. NRC. https://www.nrc.gov/docs/ML1904/ML19046A195.pdf.

U.S. NRC. 2020a. Backgrounder on dirty bombs. https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/fs-dirty-bombs.html.

U.S. NRC. 2020b. Locations of low level waste disposal facilities. https://www.nrc.gov/waste/llw-disposal/licensing/locations.html.

U.S. NRC. 2020c. *Nuclear Material Events Database: Annual report.* Rockville, MD: U.S. NRC. https://nmed.inl.gov/ShowPDFs?Default=true&path=AnnualReports&file=NMEDFY19%20Annual.pdf.

USDA (U.S. Department of Agriculture) Animal and Plant Health Inspection Service. 2016. *Treatment manual.* Riverdale, MD: USDA. https://www.aphis.usda.gov/import_export/plants/manuals/ports/downloads/treatment.pdf.

van Marcke, P. 2019. *New CRP: Developing a framework for the effective implementation of a borehole disposal system (T22002)*. International Atomic Energy Agency. https://www.iaea.org/newscenter/news/new-crp-developing-a-framework-for-the-effective-implementation-of-a-borehole-disposal-system-t22002.

Velarde, A., K. D. Najera, H. Gay, W. G. Powderly, S. Mutic, J. Green, J. M. Michalski, L. Henke, V. de Falla, E. Laugeman, M. Catu, G. D. Hugo, B. Cai, and J. van Rheenen. 2020. Taking Guatemala from cobalt to IMRT: A tale of US agency collaboration with academic institutions and industry. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics* 107(5):867–872. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036030162030986X.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

Volders, B., and T. Sauer. 2016. *Nuclear terrorism: Countering the threat*. Oxfordshire, UK: Routledge. https://www.routledge.com/Nuclear-Terrorism-Countering-the-Threat/Volders-Sauer/p/book/9781138309210.

Walli, R. 2015. *ORNL achieves milestone with plutonium-238 sample*. https://www.ornl.gov/news/ornl-achieves-milestone-plutonium-238-sample.

Weidlich, G., M. Schneider, and J. Adler. 2017. Self-shielding analysis of the Zap-X system. *Cureus* 11(5):c22. https://www.cureus.com/articles/9924-self-shielding-analysis-of-the-zap-x-system.

WHO (World Health Organization). 2014. *Comprehensive cervical cancer control: A guide to essential practice*. Geneva, Switzerland: World Health Organization. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/144785/9789241548953_eng.pdf?sequence=1.

WHO, FAO, and IAEA (World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations, and International Atomic Energy Agency). 1981. *Wholesomeness of irradiated food: Report of a joint FAO/IAEA/WHO expert committee.* https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/41508/WHO_TRS_659.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Wilcox, C. 2021. First US field test of GM mosquitoes begins in Florida. *The Scientist,* May 4. https://www.the-scientist.com/news-opinion/750-million-gm-mosquitoes-will-be-released-in-the-florida-keys-67855.

Winneg, K. M., J. E. Stryker, D. Romer, and K. H. Jamieson. 2018. Differences between Florida and the rest of the United States in response to local transmission of the Zika virus: Implications for future communication campaigns. *Risk Analysis* 38:2546–2560.

WINS (World Institute for Nuclear Security). 2018a. *Considerations for the adoption of alternative technologies to replace high activity radioactive sources.* Vienna, Austria: WINS. https://wins.org/radioactive-sources-dossier/alternative-technologies-to-radioactive-sources.

WINS. 2018b. Session on alternative technologies to high activity radioactive sources. Presented at the 6th Regional Review Meeting on Radiological Security, 2018, Colombo, Sri Lanka, March 7. https://wins.org/radioactive-sources-dossier/alternative-technologies-to-radioactive-sources.

WINS. 2019a. *5.1 Security of high activity radioactive sources in use and storage.* Vienna, Austria: WINS. https://wins.org/document/5-1-security-of-high-activity-radioactive-sources.

WINS. 2019b. *5.4 Security of radioactive sources used in medical applications.* Vienna, Austria: WINS. https://wins.org/document/5-4-security-of-radioactive-source-used-in-medical-applications.

WINS. 2020a. *5.5 Security management of disused radioactive sources.* Vienna, Austria: WINS. https://wins.org/document/5-5-security-management-of-disused-radioactive-sources-2.

WINS. 2020b. *BPG 5.8 Security of radioactive sources used in industrial radiation processing.* Vienna, Austria: WINS. https://wins.org/document/bpg-5-8-security-of-radioactive-sources-used-in-industrial-radiation-processing.

WINS and WNTI (World Institute for Nuclear Security and World Nuclear Transport Institute). 2012. *Electronic tracking for the transport of nuclear and other radioactive materials: WINS/WNTI international good practice guide.* https://www.wnti.co.uk/media/44363/GPG4_EN_MAR13_V1.pdf.

Yonemura, S., S. Doane, S. Keil, R. Goodrich, H. Pidcoke, and M. Cardoso. 2017. Improving the safety of whole blood-derived transfusion products with a riboflavin-based pathogen reduction technology. *Bloodtransfusion* 15(4):357–364. doi: 10.2450/2017.0320-16. PMID: 28665269; PMCID: PMC5490732.

Yusuf, O. 2020. *Fostering cradle-to-grave management of radioactive sources: Interregional project concludes, paving the way for future activities.* Vienna, Austria: IAEA. https://www.iaea.org/newscenter/news/fostering-cradle-to-grave-management-of-radioactive-sources-interregional-project-concludes-paving-the-way-for-future-activities.

Zheng, X., D. Zhang, Y. Li, C. Yang, Y. Wu, X. Liang, Y. Liang, X. Pan, L. Hu, Q. Sun, X. Wang, Y. Wei, J. Zhu, W. Qian, Z. Yan, A. G. Parker, J. R. L. Gilles, K. Bourtzis, J. Bouyer, M. Tang, B. Zheng, J. Yu, J. Liu, J. Zhuang, Z. Hu, M. Zhang, J.-T. Gong, X.-Y. Hong, Z. Zhang, L. Lin, Q. Liu, Z. Hu, Z. Wu, L. A. Baton, A. A. Hoffmann, and Z. Xi. 2019. Incompatible and sterile insect techniques combined eliminate mosquitoes. *Nature* 572(7767):56–61. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1407-9.

Zubizarreta, E. H., E. Fidarova, B. Healy, and E. Rosenblatt. 2015. Need for radiotherapy in low and middle income countries—the silent crisis continues. *Clinical Oncology (Royal College of Radiologists)* 27(2):107–114.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

الملحق أ

ملامح من السيرة الذاتية لأعضاء اللجنة وفريق العالمين

توماس كيه كروك، دكتوراه. (*الرئيس*)، هو عالم فيزياء التطبيقات الثالث في مختبر الأبحاث الوطني فيرمي للمسرعات (Fermilab). قدم عرضًا حول تعقيم الشعاع الإلكتروني والأشعة السينية للأجهزة الطبية في المستشفى العام لإدارة الغذاء والدواء ولوحة أجهزة الاستخدام الشخصي في اجتماع اللجنة الاستشارية للأجهزة الطبية في نوفمبر 2019. نظم ورشتي عمل حول تعقيم الأجهزة الطبية للترويج لاستخدام الأشعة الإلكترونية والأشعة السينية في عامي 2019 و 2020. كان عضوًا في مجموعة عمل التقنيات البديلة غير النظيرية التي أصدرت ورقة بحثية بيضاء حول التقنيات البديلة غير النظيرية في عام 2019. كان المؤلف الرئيسي للورقة البحثية البيضاء حول *التعقيم الطبي المعتمد على المسرع لاستبدال مصادر الكوبالت*-60 الذي كتبه للإدارة الوطنية للأمن النووي في عام 2017. كان عضوًا في اللجنة المنظمة لورشة عمل مشتركة بين وزارة الطاقة والمعهد الوطني للسرطان حول العلاج بالشعاع الأيوني في يناير 2013. لمدة 20 عامًا، عمل مع مرفق العلاج بالنيوترونات في Fermilab، والذي قدم العلاج الإشعاعي بالحزمة الخارجية للسرطان باستخدام النيوترونات السريعة. تولى قيادة هذا البرنامج من عام 2008 حتى إغلاقه في عام 2013. تشمل اهتماماته تطوير تقنيات المسرعات وتطبيقات المسرعات وتقنيات التسريع وتعقيم الأجهزة الطبية وتفاعلات المواد الإشعاعية والفيزياء الطبية. الدكتور كروك حاصل على درجة الدكتوراه في الفيزياء (1989) من جامعة إلينوي في أوربانا شامبين. حصل على شهادته الجامعية في الفيزياء الهندسية (1981) من جامعة ولاية أوهايو.

روبرت أ. باري، دكتوراه، هو أحد كبار العلماء الفخريين في مختبر بروكهافن الوطني. وقد شارك في تقييمات التصميم والسلامة والأمن للمرافق المعقدة عالية التقنية منذ انضمامه إلى البرامج التطبيقية في المختبر في عام 1974. وعمل في مشاريع وقضايا تتعلق بالسلامة النووية والأمن وتقنيات منع انتشار الأسلحة النووية. إدارة النفايات النووية؛ وتطوير مفاعلات نووية متطورة وأصدر العديد من الدراسات لمفاهيم الطاقة النووية المتقدمة. له أكثر من 150 مطبوعة وألقى محاضرات واسعة في هذه الموضوعات. الدكتور باري هو الرئيس المشارك الدولي السابق (2002-2017) لمجموعة العمل التي طورت منهجية شاملة لتقييم مقاومة الانتشار والحماية المادية لجميع مفاهيم الطاقة النووية الجديدة المقترحة في المنتدى الدولي متعدد الجنسيات من الجيل الرابع. حصل على درجة الدكتوراه في الفيزياء من جامعة براندیز وشهادة البكالوريوس في الفيزياء من جامعة روتجرز. عمل الدكتور باري كعضو هيئة تدريس مساعد ومستشارًا للعديد من الجامعات الكبرى في مجال التكنولوجيا النووية وكذلك في مجلس إدارة الجمعية النووية الأمريكية (ANS). وهو الرئيس السابق للجمعية الدولية لتقييم وإدارة السلامة الاحتمالية والرئيس السابق للجنة معايير توافق الجمعية النووية الأمريكية لتقييم المخاطر الاحتمالية. وهو الآن عضو متجول في مجلس معايير الجمعية النووية الأمريكية وعضو في لجنة الإجماع على معايير المرافق النووية غير المفاعلة. وكان عضوًا في لجنة الأكاديميات الوطنية للدروس المستفادة من حادث فوكوشيما النووي لتحسين سلامة وأمن المحطات النووية الأمريكية. وتقديرًا لإنجازاته في مجال السلامة النووية، حصل الدكتور باري على جائزة Theo J. حصل على جائزة "Tommy" Thompson عام 2003 من الجمعية النووية الأمريكية. في عام 2004، حصل على جائزة

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

مختبر بروكهافن الوطني للإنجاز المتميز في العلوم والتكنولوجيا. حصل الدكتور باري على عضوية شرفية في جمعيات فاي بيتا كابا "Phi Beta Kappa"، وسيغما شي "Sigma Xi"، وسيغما باي سيغما "Sigma Pi Sigma"، وهو زميل منتخب في الجمعية النووية الأمريكية والجمعية الفيزيائية الأمريكية.

ديبورا دبليو برونر (NAM)، دكتوراه، RN، FAAN، هي نائب الرئيس الأول للأبحاث في جامعة إيموري. الدكتورة برونر هي أيضًا أستاذ ورئيس كرسي روبرت دبليو وودروف للتمريض، وأستاذ علاج الأورام بالإشعاع، وعضو في معهد وينشيب للسرطان. وهي باحثة مشهورة عالميًا وخبيرة في التجارب السريرية مع التركيز على النتائج التي يبلغ عنها المريض وإدارة الأعراض والفعالية النسبية لطرق العلاج الإشعاعي. ويشمل عملها العالمي حاليًا قيادة مشروع للمساعدة في التحضير لافتتاح أول علاج إشعاعي حديث في إثيوبيا من خلال تخطيط العلاج ثلاثي الأبعاد وضمان الجودة. كما إن قيادة الدكتور برونر، وخاصة في شبكة التجارب السريرية الوطنية التي يرعاها المعهد الوطني للسرطان (NCI)، تتجاوز التخصصات وأدت إلى تحسين الصحة ونوعية الحياة وخفض نتائج التكلفة لأولئك الذين عولجوا من السرطان. وهي عضو في الأكاديمية الوطنية للطب وفازت بالعديد من الجوائز في مجال البحث والإرشاد. وتم تمويل الدكتور برونر باستمرار منذ عام 1998 من الرعاة بما في ذلك جمعية السرطان الأمريكية، ووزارة الدفاع، وجمعية تمريض الأورام، وكومنولث بنسلفانيا، والمعهد الوطني لأبحاث التمريض، والمعاهد الوطنية للسرطان، والمعاهد الوطنية للصحة. وحصلت على درجة الدكتوراه في أبحاث التمريض، مع التركيز على نتائج البحث، من جامعة بنسلفانيا.

هوبير كيه فوي، ماجستير العلوم المدير المؤسس وأحد كبار علماء المركز الأفريقي للعلوم والأمن الدولي، ومقره في أكرا، غانا. كما إن السيد فوي هو مستشار في قضايا الأمن النووي والإشعاعي في أفريقيا للوكالة الدولية للطاقة الذرية (الوكالة الدولية للطاقة الذرية) ووزارة الطاقة. وبالإضافة إلى ذلك، فإن السيد فوي هو عضو في هيئة التحرير ومسؤول اتصال متخصص في المراجعة لـ *المجلة الدولية للأمن النووي*. على مدى عقد من الزمان، نشر السيد فوي وتحدث على نطاق واسع حول منع الانتشار النووي ونزع السلاح، والأمن النووي والإشعاعي، وسلامة الفضاء وأمنه، والعلوم والتكنولوجيا ذات الاستخدام المزدوج. ونشرت مجلة Bulletin of the Atomic Scientists بعض تحليلاته حول الأمن النووي، مثل "استدامة التقدم في الأمن النووي بدون مؤتمرات القمة - وجهة نظر أفريقية." كما نشرت مجلة Space Safety Magazine بعض مقالاته، مثل "إنشاء أول متتبع آلي للحطام الفضائي في العالم". في عام 2012، كان زميلًا للأمن النووي في المدرسة الدولية للأمن النووي في تريست. وفي عام 2011، في الهيئة النرويجية للحماية من الإشعاع، كان زميلًا تقنيًا لمنع الانتشار ونزع السلاح في مبادرة المملكة المتحدة والنرويج. وهو عضو في مجموعة العمل الخاصة بالمواد الانشطارية ونائب رئيس مجموعة العمل III بشبكة تعليم الأمن النووي الدولية التابعة للوكالة الدولية للطاقة الذرية. وهو عضو في فريق الخبراء الدولي لمؤشر الأمن النووي *مبادرة التهديد النووي*. وهو حاصل على درجة الماجستير في دراسات الفضاء من جامعة الفضاء الدولية في فرنسا، ودرجة الماجستير في دراسات السياسة الدولية من معهد ميدلبري للدراسات الدولية في مونتيري، وبكالوريوس في الفيزياء وعلوم الكمبيوتر من جامعة بويا في الكاميرون.

تقاعدت **باميلا جيه هندرسون، (M.S.)** من اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية (U.S. NRC) في مارس 2017 بعد 25 عامًا من الخدمة. وانضمت إلى اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية عام 1991 بصفتها عالمة فيزياء صحية في مكتب المنطقة الأولى. حيث شغلت عددًا من حيث المناصب المسؤولة بشكل تدريجي في المكتب الإقليمي، بما في ذلك رئيس الفرع في قسم أمان المواد النووية ورئيس الفرع في قسم أمان المفاعلات. وفي نوفمبر 2009، أكملت برنامج تطوير المرشحين للخدمة التنفيذية العليا في هيئة التنظيم النووي وحصلت على شهادة المؤهلات التنفيذية في مارس 2010. في يوليو 2012، انتقلت إلى مكتب مقر اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية وتولت منصب نائب المدير في قسم سلامة المواد واتفاقيات الدولة في مكتب برامج إدارة المواد والبيئة الفيدرالية والولائية. قبل عملها في اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية، كانت مسؤولة السلامة من الإشعاع في المركز الطبي بجامعة كاليفورنيا في إيرفين لمدة 9 سنوات. وقد حصلت على درجة البكالوريوس في عام 1976 في علم الأحياء والدراسات البيئية من كلية سيدار كريست (ألنتاون، بنسلفانيا)، ودرجة البكالوريوس الثانية عام 1979 في الكيمياء والطب النووي من كلية فاغنر (جزيرة ستاتن، نيويورك)، ودرجة الماجستير في عام 1982. في الفيزياء الصحية من معهد جورجيا للتكنولوجيا (أتلانتا).

د/ بوني دي جنكينز، (Ph.D., LL.M., M.P.A., J.D.) هي المؤسس والمدير التنفيذي لمنظمة "نساء ملونات" للعمل على تعزيز السلام والأمن وتحول النزاعات وزميلة أولى غير مقيمة في معهد بروكينغز. وهي أستاذة مساعدة في كلية الخدمة الخارجية بجامعة جورج تاون وكلية إليوت للشؤون الدولية بجامعة جورج واشنطن. في الفترة من يونيو 2009 إلى يناير 2017 عملت، برتبة سفير، كمنسق لبرامج الحد من التهديدات في وزارة الخارجية (DOS) حيث كانت ممثلة الولايات المتحدة في قمة G7 العالمية وقادت وزارة الخارجية الأمريكية في عدد من القمم المتعلقة بالأمن النووي. قبل خدمتها في وزارة الخارجية الأمريكية، كانت الدكتورة جينكينز

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

مسؤولة في مؤسسة فورد للسياسة الخارجية والأمنية الأمريكية، ومستشارة في اللجنة الوطنية للهجمات الإرهابية على الولايات المتحدة (لجنة 11 سبتمبر)، ومستشارة للأسلحة وكالة الرقابة ونزع السلاح. وهي ضابط احتياط بحري متقاعد. وكانت أيضًا زميلة في مركز بلفر في كلية جون إف كينيدي للإدارة الحكومية بجامعة هارفارد. وهي حاصلة على دكتوراه. من جامعة فيرجينيا؛ ماجستير في القانون. من جامعة جورج تاون؛ ماجستير في إدارة الأعمال من جامعة ولاية نيويورك في ألباني، والدكتوراه في القانون من كلية ألباني للحقوق ؛ وشهادة البكالوريوس من كلية أمهيرست. وتعمل د. جنكينز في مجلس الدراسات النووية والإشعاعية في الأكاديميات الوطنية.

بي أندرو كرم، دكتوراه، يعمل في جوانب مختلفة من الأمان الإشعاعي منذ انضمامه إلى برنامج الطاقة النووية التابع للبحرية الأمريكية في عام 1981. حيث تتنوع خبرته في العمل في هذا المجال، بما في ذلك إرشاد طلاب البحرية في عمليات المفاعلات ومحطات الدفع، والتدريس في معهد روتشستر للتكنولوجيا، وإدارة برنامج السلامة الإشعاعية في جامعة روتشستر ومستشفى سترونج ميموريال، والمساعدة في تصميم وتشغيل نظام الحظر الإشعاعي والنووي في مدينة نيويورك، وتقييم برامج الأمان الإشعاعي والسلامة الحرجة في مصنع تخصيب اليورانيوم، وتقديم الاستشارات والتدريب لمجموعة متنوعة من العملاء. وفيما يتعلق بشكل مباشر بأهداف هذه الدراسة، شارك الدكتور كرم في تدقيق على مستوى المدينة لأمن المواد المشعة في مدينة نيويورك، وشارك في تمرين "الخلية الحمراء" في شرطة نيويورك حول أمن المواد المشعة، وأدار المسائل المتعلقة بالأمن للعديد من المصادر المشعة عالية النشاط في جامعة روتشستر ومستشفى سترونج ميموريال. ساعد الدكتور كرم في تدريس دورة الانتربول حول تهريب المواد المشعة والنووية عبر الحدود. كما شارك في تأليف كتيب عن الجوانب العملية لأمن المواد المشعة لإدارة الصحة بمدينة نيويورك، وشارك في ثلاث بعثات للوكالة الدولية للطاقة الذرية تضمنت تقييمات لأمن المواد المشعة في الدول التي تمت زيارتها. وهو حاصل على درجة الدكتوراه. في العلوم البيئية من جامعة ولاية أوهايو.

ليندا أ. كروجر، ماجستير، أستاذ مساعد في الطب الإشعاعي في جامعة كاليفورنيا (UC)، ديفيس، كلية الطب، وعملت كمسؤولة عن السلامة الإشعاعية في نظام UC Davis الصحي على مدار الثمانية عشر عامًا الماضية. وقبل وصولها إلى جامعة كاليفورنيا في ديفيس، عملت السيدة كروجر في القطاع الخاص في مجال أبحاث الأدوية الحيوية وتطوير الأدوية. ثم انتقلت إلى أبحاث السرطان عندما انضمت إلى جامعة كاليفورنيا في ديفيس في عام 1988. ومن عام 1988 حتى عام 2000، ركزت أبحاثها على تطوير أدوية إشعاعية جديدة لكل من التصوير التشخيصي وعلاج ليمفوما اللاهودجكين وسرطان الثدي. ومنذ أن تولت منصبها كموظفة السلامة من الإشعاع في عام 2003، ركزت على المسائل المتعلقة بالامتثال التنظيمي، وضمان الجودة، وتعليم طلاب الطب والمقيمين والزملاء بهدف عام يتمثل في تحسين السلامة الإشعاعية في مكان العمل. حيث تشرف السيدة كروجر على الجوانب غير الإكلينيكية للتدريب على الطب النووي لبرنامج الإقامة الإشعاعية في جامعة كاليفورنيا في ديفيس. بالإضافة إلى ذلك، فقد اهتمت بالتأهب للطوارئ الإشعاعية. كما ألفت السيدة كروجر أو شاركت في تأليف أكثر من 50 مقالاً في المجلات العلمية التي راجعها النظراء وقدمت في العديد من المؤتمرات العلمية. وهي ناشطة في جمعية الفيزياء الصحية بما في ذلك العمل كرئيسة للقسم الطبي بالإضافة إلى كونها مشاركًا نشطًا في لجان المجلس الوطني للحماية من الإشعاع والقياسات (NCRP) منذ عام 2005، وشاركت في تأليف تقريري NCRP، وفي عضوية مجلس NCRP الاستشاري منذ عام 2016. وقد حصلت السيدة كروجر على درجة البكالوريوس ودرجة الماجستير من جامعة روتجرز وتعمل مع جامعة كاليفورنيا في ديفيس لمدة 33 عامًا.

مايكل أو. ماكويليامز، دكتوراه، ماجستير، أستاذ فخري في العلوم الجيولوجية والبيئية بجامعة ستانفورد. بدأ حياته المهنية في جامعة ستانفورد عام 1977 كعالم ما بعد الدكتوراه والتحق بهيئة التدريس بجامعة ستانفورد عام 1980. وتركزت تخصصاته البحثية في مجالات الجيوفيزياء والجيوكيمياء مع تطبيقاتها في علوم الأرض، ولا سيما التكتونية العالمية وموارد الأرض وعلوم النظائر. وإلى جانب القيادة البحثية في ستانفورد، فقد عمل في مجموعة متنوعة من الأدوار الأكاديمية والقيادية الحكومية والحوكمة، بما في ذلك منصب الرئيس التنفيذي لـ GNS Science (نيوزيلندا)، ورئيس منظمة الكومنولث للبحوث العلمية والصناعية (CSIRO) وهيئة علوم الأرض وهندسة الموارد (أستراليا)، ومدير مركز جون ديلايتر لعلوم النظائر. في الآونة الأخيرة، أنشأ الدكتور ماكويليامز منصة علوم المستقبل لتصوير الأرض العميقة من خلال منظمة الكومنولث للبحوث العلمية والصناعية، والتي تهدف إلى المساعدة في اكتشاف المعادن المستقبلية وموارد الطاقة والمياه باستخدام الأساليب الجيوفيزيائية الجديدة، وتحليلات البيانات المتقدمة، والتقنيات الرياضية لتوفير صور أفضل تحت السطح بدراسة البيانات المتفرقة وغير الكاملة، والمشوشة. حصل الدكتور ماكويليامز على درجة البكالوريوس في الفيزياء من جامعة سانت لورانس، وماجستير في العلوم. في الجيوفيزياء من جامعة تورنتو، ودكتوراه. في الجيوفيزياء من الجامعة الوطنية الأسترالية.

كاثلين (كيت) إم روغان، ماجستير، كانت قائدة الفريق، في إدارة المصادر المشعة المُحكمة المهجورة (DSRS)، قسم دورة الوقود

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

النووي وتكنولوجيا النفايات، الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، وكانت مسؤولة عن الإشراف على فريق من المهنيين ومساعدة الدول الأعضاء في الوكالة الدولية للطاقة الذرية إدارة آمنة ومستدامة للمصادر المشعة المُحكمة المهجورة حتى تقاعدها في عام 2020. ما عملت في إعداد الوثائق الإرشادية والدورات التدريبية وبعثات الخبراء وقامت بتطوير وتنفيذ أدوات وتقنيات لدعم خيارات نهاية العمر المناسبة لإدارة المصادر المشعة المُحكمة المهجورة (إعادة الاستخدام، وإعادة التدوير، والإزالة، والتخزين، والتخلص، والتقنيات البديلة). وعملت سابقًا كمدير الشؤون التنظيمية وضمان الجودة، لشركة QSA Global، Inc.، في بيرلينجتون، ماساتشوستس (1983-2013)، حيث نفذت برنامج الامتثال التنظيمي العالمي لتصنيع المصادر والأجهزة المُحكمة المستخدمة في التصوير الشعاعي الصناعي، والمقاييس والتطبيقات الطبية. وشمل ذلك ترتيبات الحصول والحفاظ على جميع التراخيص والتصاريح اللازمة لتصنيع واستخدام ونقل والتخلص من المصادر والأجهزة المشعة تحت مظلة برامج السلامة وضمان الجودة والأمن. وقد حصلت السيدة روغان على درجة البكالوريوس في علم الأحياء من جامعة جنوب شرق ماساتشوستس في دارتموث، ماساتشوستس، ودرجة الماجستير في الصحة الإشعاعية من جامعة لويل في لويل، ماساتشوستس.

ستيفن جيه فاغنر، دكتوراه، ماجستير، كان المدير الأول لقسم ابتكارات نقل الدم في مختبر الصليب الأحمر الأمريكي الهولندي للعلوم الطبية الحيوية في روكفيل، ماريلاند، حتى تقاعده في عام 2020. وقد حصل الدكتور فاغنر على منحة زمالة Daymon Runyon-Walter Winchell من المعهد الوطني للسرطان وجائزتي تيفاني الوطنيتين من الصليب الأحمر الأمريكي على الإنجاز التقني المتميز والإدارة. وقام الدكتور فاغنر بالتدريس في جامعة بولينج جرين ستيت وكان عضوًا في الجمعية الأمريكية لعلم الأحياء الدقيقة، والجمعية الأمريكية لعلم الأحياء الضوئية، والجمعية الأمريكية لبنوك الدم، والجمعية الدولية لنقل الدم، والجمعية الأمريكية لأمراض الدم. واشترك في لجنة تأليف تقرير دراسة إجماع الأكاديميات الوطنية لعام 2008 حول *استخدام مصدر الإشعاع واستبداله*. وحصل الدكتور فاغنر على درجة البكالوريوس في الكيمياء من جامعة ماريلاند، كوليدج بارك، والماجستير والدكتوراه. في الفيزياء الحيوية من جامعة ولاية بنسلفانيا.

ديفيد ل. فايمر، دكتوراه، ماجستير، وهو أستاذ في دراسات إدوين إي ويت للاقتصاد السياسي في جامعة ويسكونسن ماديسون. ويركز بحثه بشكل عام على صياغة السياسات والتصميم المؤسسي. وعلى الرغم من أن معظم أبحاثه الحديثة قد تناولت قضايا في السياسة الصحية، فقد أجرى أبحاثًا ذات صلة بالسياسات في مجالات أمن الطاقة وسياسة الموارد الطبيعية والتعليم والعدالة الجنائية وأساليب البحث. في عام 2006، شغل الدكتور فايمر منصب رئيس جمعية تحليل السياسات العامة وإدارتها. وفي عام 2008، تم انتخابه زميلًا في الأكاديمية الوطنية للإدارة العامة، وفي عام 2013، شغل منصب رئيس جمعية تحليل الفوائد والتكاليف. كما اشترك الدكتور فايمر في لجنة تأليف تقرير دراسة إجماع الأكاديميات الوطنية لعام 2008 بعنوان *استخدام مصدر الإشعاع واستبداله*. وقد حصل على بكالوريوس في الهندسة والعلوم التطبيقية من جامعة روتشستر. وهو يحمل شهادة الماجستير في الإحصاء والماجستير في السياسة العامة، والدكتوراه في السياسة العامة، وحصل عليها جميعها في جامعة كاليفورنيا، بيركلي.

جون إيه ويليامسون، ماجستير، هو المسؤول عن برامج الإشعاع البيئي التابعة لمكتب التحكم في الإشعاع بوزارة الصحة بولاية فلوريدا. وهو عضو في مؤتمر مديري برنامج مكافحة الإشعاع (CRCPD)، ويعمل كرئيس لفريق العمل المعني بالأنشطة المشتركة بين المنظمات ويعمل في مجلس تنسيق الحكومة النووية التابع لوزارة الأمن الداخلي، ممثلاً لمؤتمر مديري برنامج مكافحة الإشعاع. وهو أيضًا واحد من اثنين من مفوضي فلوريدا في اتفاقية النفايات المشعة منخفضة المستوى في الجنوب الشرقي، ويشغل حاليًا منصب رئيس الميثاق. ويعمل السيد ويليامسون كممثل مفوض لحاكم فلوريدا للإخطارات وفقًا للجزء 71، والجزء 73، والجزء 37 من قواعد شحنات المواد المشعة.

وتشمل اهتماماته تطوير فيلق المتطوعين للاستجابة للإشعاع، وتحسين أمن شحنات المواد المشعة، وتحسين الاستجابة للطوارئ الإشعاعية.

وهو يعمل في المكتب منذ عام 1992. السيد ويليامسون حاصل على ماجستير في الكيمياء من جامعة ساوث كارولينا (1989) وحصل على درجة البكالوريوس في الكيمياء من جامعة تامبا في تامبا، فلوريدا، في 1986.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

طاقم العمل

أورانيا كوستي، دكتوراه، ماجستير. (*مديرة الدراسة*)، هي أحد كبار مسؤولي البرامج في الأكاديميات الوطنية للعلوم والهندسة والطب في مجلس الدراسات النووية والإشعاعية (NRSB). وتتركز اهتمامات الدكتورة كوستي داخل مجلس الدراسات النووية والإشعاعية على الآثار الصحية للإشعاع، وهي الباحث الرئيسي في البرنامج التأسيسي لبحوث تأثيرات الإشعاع التابع للأكاديميات الوطنية والذي يدعم دراسات الناجين من القصف الذري في اليابان. وقبل تعيينها في المنصب الحالي، كانت زميلة ما بعد الدكتوراه في مركز لومباردي الشامل للسرطان في مستشفى جامعة جورج تاون، حيث أجرت بحثًا حول تطوير العلامات الحيوية للكشف المبكر عن السرطان باستخدام تصاميم الدراسات الوبائية للتحكم في الحالات. وركزت في المقام الأول على سرطان البروستاتا والثدي والكبد ومحاولة تحديد الأفراد المعرضين لخطر الإصابة بالأورام الخبيثة. كما تدرب الدكتور كوستي في المعهد الوطني للسرطان (2005-2007). وفي عام 2019، أنشأت الدكتور كوستي، جنبًا إلى جنب مع مجموعة من الخبراء العالميين في علم الأوبئة الإشعاعية وقياس الجرعات، أول جمعية دولية لعلم الأوبئة الإشعاعية وقياس الجرعات (ISoRED). وحصلت على بكالوريوس العلوم. في الكيمياء الحيوية من جامعة سوري، المملكة المتحدة، كما حصلت على الماجستير في الطب الجزيئي من كلية لندن الجامعية، والدكتوراه في علم الغدد الصماء الجزيئي من مستشفى سانت بارثولوميو في لندن، المملكة المتحدة.

تشارلز دي فيرجسون، دكتوراه، ماجستير، هو مدير مجلس الدراسات النووية والإشعاعية في قسم دراسات الأرض والحياة في الأكاديميات الوطنية للعلوم والهندسة والطب. وفي السابق، كان رئيس اتحاد العلماء الأمريكيين (FAS). قبل انضمامه إلى اتحاد العلماء الأمريكيين، عمل كزميل أول لفيليب دي ريد للعلوم والتكنولوجيا في مجلس العلاقات الخارجية (CFR)، حيث تخصص في القضايا النووية، وشغل منصب مدير المشروع لفريق العمل المستقل المعني بسياسية الأسلحة النووية الأمريكية. التي يرأسها ويليام جي بيري وبرنت سكوكروفت. قبل العمل في مجلس العلاقات الخارجية، كان العالم المقيم في مركز دراسات منع الانتشار التابع لمعهد مونتيري، حيث شارك في تأليف كتاب *الوجوه الأربعة للإرهاب النووي* (روتليدج، 2005) وكان المؤلف الرئيسي لكتاب تقرير يناير 2003 *المصادر المشعة التجارية: استقصاء حول المخاطر الأمنية*. لعمله في مجال أمن المصادر المشعة، حصل على جائزة روبرت إس لانداور التذكارية من جمعية فيزياء الصحة في عام 2003. وهو أيضًا مؤلف كتاب *الطاقة النووية: ما يحتاج الجميع إلى معرفته* (مطبعة جامعة أكسفورد، 2011). بالإضافة إلى ذلك، فقد عمل كعالم فيزيائي في مكتب الأمان النووي في وزارة الخارجية، وعمل ضابطًا في الهندسة النووية وضابطًا للغواصات في البحرية الأمريكية. وهو زميل منتخب في الجمعية الفيزيائية الأمريكية تقديراً لخدمته للسياسة العامة والتعليم العام بشأن القضايا النووية. وحصل الدكتور فيرجسون على بكالوريوس في الفيزياء بامتياز من الأكاديمية البحرية الأمريكية وشهادة ماجستير ودكتوراه. في الفيزياء من جامعة بوسطن.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

الملحق ب

اجتماعات جمع المعلومات

30-31 يناير 2020، واشنطن العاصمة

المصادر المشعة: اجتماع انطلاق التطبيقات والتقنيات البديلة
جودي ليبرمان، رئيس المشروع، البرنامج الهندسي، الأمن النووي/الإشعاعي الدولي
مايك إيتامورا، العضو الرئيسي للطاقم الفني، مختبرات ساندیا الوطنية

مكتب منظور الأمن الإشعاعي على التكنولوجيا البديلة
لانس جاريسون، مدير مجموعة مشاريع التقنيات البديلة المحلية
مليكة تالبي، مديرة مجموعة مشاريع التكنولوجيا البديلة الدولية، مكتب الأمن الإشعاعي، الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA)

هيئة التنظيم النووي الأمريكية: الوظيفة، الإطار، التقنيات البديلة
مارغريت سيرفيرا، فرع إدارة وحماية المصادر، قسم سلامة المواد، الأمن، البرامج الحكومية والقبلية، مكتب سلامة المواد النووية والضمانات، هيئة التنظيم النووي الأمريكية (US NRC)

دور إدارة الغذاء والدواء في تنظيم أجهزة توليد الإشعاع والمنتجات الطبية المشعة
دونالد ميلر، كبير المسؤولين الطبيين للصحة الإشعاعية، مكتب التشخيص المختبري والصحة الإشعاعية، مركز الأجهزة والصحة الإشعاعية، إدارة الغذاء والدواء (FDA)

جهود مبادرة التهديد النووي لتشجيع أبحاث استبدال مشعات السيزيوم 137 *في الدم بتقنيات بديلة فعالة*
إيوانا إليوبولوس، مستشار أول، مبادرة التهديد النووي (NTI)

المستند التعريفي التمهيدي الخاص بالتكنولوجيات البديلة غير الإشعاعية
رايان بكتل، فيزيائي صحي، القسم النووي، وكالة الأمن السيبراني وأمن البنية التحتية، وزارة الأمن الداخلي

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

المواد المشعة: الأمان والعواقب المحتملة لسوء الاستخدام
ديفيد تريمبل، مدير الموارد الطبيعية والبيئة في مكتب المساءلة الحكومية (GAO's)
إدوين وودوارد، نائب المدير المساعد، مكتب محاسبة الموارد الطبيعية والبيئة
جيف بارون، محلل، الموارد الطبيعية والبيئة في مكتب المحاسبة الحكومي

الحد الدائم من المخاطر: خارطة طريق لاستبدال المصادر والمواد المشعة عالية الخطورة
مايلز بومبر، زميل أول، مركز جيمس مارتن لدراسات عدم الانتشار، معهد ميدلبري للدراسات الدولية في مونتيري

30-29 أبريل 2020، اجتماع عبر الإنترنت فقط

من الأسلحة إلى أمن المواد الإشعاعية وتحليل المخاطر: لا يتعلق الأمر بالنتائج فقط
مارك لاد، R&D S&E، مدير مختبرات ساندیا الوطنية

جولة افتراضية في مرافق مختبرات ساندیا الوطنية
لوك جيلبرت، R&D S&E، هندسة النظم
هيذر بنينجتون، R&D S&E، الهندسة الميكانيكية

دراسة التحديد العكسي للنويدات المشعة
أليكس سولودوف، R&D S&E، بحث وتحليل النظم، مختبرات ساندیا الوطنية

تهديدات RED/RDD: دوافع الخصم وقدراته
مات طومسون، برنامج تكامل/تنفيذ النظم الهندسية، مختبرات ساندیا الوطنية

الأثر الاقتصادي لأحداث RDD
لاري تروست، R&D S&E، أنظمة البحث والتحليل، مختبرات ساندیا الوطنية
فانيسا فارغاس، R&D S&E، بحث وتحليل النظم، مختبرات ساندیا الوطنية

تطوير معيار صناعي لحماية المعدات الطبية التي تحتوي على مصادر مشعة عالية النشاط
ميشال كوكا، البرنامج الهندسي/رئيس المشروع، مختبرات ساندیا الوطنية

دمج استجابة إنفاذ القانون في أنظمة الحماية المادية التقليدية
مات طومسون، برنامج تكامل/تنفيذ النظم الهندسية، مختبرات ساندیا الوطنية

مشروع استبدال مشع السيزيوم (CIRP) والتخفيض الدولي: خبرة ساندیا في دعم مشاريع مكتب الأمن الإشعاعي (ORS)
مايكل إيتامورا، البرنامج الهندسي/رئيس المشروع، مختبرات ساندیا الوطنية
جودي ليبرمان، البرنامج الهندسي/رئيس المشروع، مختبرات ساندیا الوطنية

نظرة عامة على برنامج استعادة المصدر خارج الموقع (OSRP)
فرانك كوتشينا، مختبر لوس ألاموس الوطني

12-10 يونيو 2020، اجتماع عبر الإنترنت فقط

تصنيف المصادر المشعة واعتبارات السلامة
رونالد باتشيكو، رئيس وحدة التحكم في مصادر الإشعاع، الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

أمن المواد المشعة في الاستخدام والتخزين
محمد وسيم، قسم الأمن النووي، الوكالة الدولية للطاقة الذرية

قاعدة بيانات الحوادث والاتجار
خوسيه جارسيا ساينز، مسؤول معلومات الأمن النووي، قسم الأمن النووي، الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)

فيزياء قياس الجرعات والإشعاع الطبي: أنشطة الوكالة في دعم التكنولوجيات البديلة في الطب
كارين كريستاكي، رئيس مختبر قياس الجرعات، Seibersdorf، قسم قياس الجرعات والفيزياء الإشعاعية الطبية، الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)

الأنشطة الداعمة لتقنيات الشعاع الإلكتروني والأشعة السينية
فاليريا ستاروفويتوفا، مسؤولة تنسيق تكنولوجيا الإشعاع، قسم منتجات النظائر المشعة وتكنولوجيا الإشعاع، الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)

عروض وملاحظات اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية
مارغريت سيرفيرا، فرع إدارة وحماية المصادر، قسم سلامة المواد، الأمن، البرامج الحكومية والقبلية، مكتب سلامة المواد النووية والضمانات، اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية

حادثة استرداد المصادر المُحكمة لعام 2019 في جامعة واشنطن والدروس المستفادة من الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA)
لانس جاريسون، مكتب الأمن الإشعاعي، الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA)

بدائل لتقنيات تسجيل الآبار القائمة على النويدات المشعة
أحمد بدر الزمان، مستشار، باسيفيك استشاريون ومهندسون، هايوارد، كاليفورنيا؛ الكلية المعاونة، جامعة كاليفورنيا، بيركلي

استخدام النظائر المشعة في أداء التصوير الشعاعي الصناعي
ديفيد تيبو، مدير/مسؤول تعاوني للسلامة الإشعاعية، Team Inc.

26 يونيو 2020، اجتماع عبر الإنترنت فقط

وجهات نظر حول التقنيات البديلة من المعهد العالمي للأمن النووي (WINS)
بيير ليجو، رئيس البرامج، المعهد العالمي للأمن النووي (WINS)

وجهات نظر حول التقنيات البديلة من الرابطة الدولية للإشعاع (IIA)
بول وين، رئيس مجلس الإدارة والمدير العام لمعهد المدققين الداخليين الدولي (IIA)

18 أغسطس 2020، اجتماع عبر الإنترنت فقط

تحسين علاج السرطان في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل: ماذا يعني ذلك بالنسبة لمصادر الإشعاع والتقنيات البديلة؟
نورمان كولمان، كبير المستشارين العلميين، هيئة خبراء السرطان الدولية

وجهات نظر حول التقنيات البديلة من الرابطة الدولية لموردي ومنتجي المصادر (ISSPA)
جون ميلر، مسؤول السلامة من الإشعاع، الرابطة الدولية لموردي ومنتجي المصادر (ISSPA)

9 سبتمبر 2020، اجتماع عبر الإنترنت فقط

برامج الوكالة الدولية للطاقة الذرية للتخلص من المصادر المشعة
إيان جوردون، رئيس قسم تكنولوجيا النفايات، الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

برامج الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA) لإدارة نهاية العمر للمصادر المشعة
سارة نوريس، مسؤولة إقليمية ومنسقة إزالة دولية
جون زارلينج، برنامج استعادة المصادر خارج الموقع، مكتب الأمن الإشعاعي (ORS)/الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA)

برنامج جمع المصادر والحد من التهديدات
تشارلز ماير، مساعد تقني، مؤتمر مديري برنامج التحكم في الإشعاع

برنامج تتبع المصدر المادي
بريان هيغينز، مدير العمليات
فريدريك موس، مختبر شمال غرب المحيط الهادئ الوطني

استبدال مشعات السيزيوم 137 *بجبل سيناء*
جاكوب كامين، مدير أول، كبير مسؤولي السلامة من الإشعاع والليزر، نظام ماونتن ساياناي الصحي

استبدال مشعات السيزيوم 137 *في جامعة كاليفورنيا، لوس أنجلوس (UCLA)*
كي إيواموتو، المدير، علم الأورام الإشعاعي النواة الحيوانية، جامعة كاليفورنيا في لوس أنجلوس

استبدال مشعات السيزيوم 137 *في جامعة كاليفورنيا، سان فرانسيسكو (UCSF)*
بايرون هان، باحث، مدير المختبر، مركز العلاج قبل السريري بجامعة كاليفورنيا في سان فرانسيسكو

13 أكتوبر 2020، اجتماع عبر الإنترنت فقط

آراء نورديون حول المصادر المشعة والتقنيات البديلة
إيان داوني، نائب رئيس تطوير الأعمال والإمداد الاستراتيجي، نورديون

آراء سوتيرا الصحية حول المصادر المشعة والتقنيات البديلة
كاثلين هوفمان، نائب الرئيس الأول، البيئة العالمية والصحة والسلامة، سوتيرا هيلث

النظائر المشعة والبدائل - منظور الصناعة
مايك فولر، مدير الشؤون التنظيمية وضمان الجودة، QSA Global، Inc.

تسجيل الآبار - منظور الصناعة
مارك شيلتون، نائب الرئيس، التكنولوجيا الجديدة والابتكار العالمي للأعمال، QSA Global، Inc.

نظرة عامة على سوق تسجيل الآبار خاصة بشركات تسجيل الآبار المستقلة
كيني جوردان، المدير التنفيذي لجمعية شركات خدمات الطاقة

20 نوفمبر 2020، اجتماع عبر الإنترنت فقط

استخدام الأميريسيوم والمخاطر الأمنية
تشارلز "جوس" بوتر، مختبرات ساندیا الوطنية

دراسة تعليق/إعادة تعليق الأميريسيوم البديل
أندرو جلين، العضو الرئيسي في الطاقم الفني، مختبرات ساندیا الوطنية

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

بواعث ألفا: سياسة وكمية الإسقاط
ستيف موسولينو، مختبر بروكهافن الوطني

من 16 إلى 17 ديسمبر 2020، اجتماع عبر الإنترنت فقط

معالجة الحد من مسببات الأمراض المستهدفة من الحمض النووي لمكونات الدم للوقاية من الكسب غير المشروع المرتبط بنقل الدم مقابل مرض المضيف
لورانس كوراش، كبير المسؤولين العلميين، شركة سيروس وأستاذ، الطب المختبري، جامعة كاليفورنيا بسان فرانسيسكو

تقنية التشعيع بالأشعة السينية من شركة Precision *للأبحاث وتعقيم الحشرات*
بيل ماكلولين، رئيس شركة Precision X-Ray Irradiation

Xstrahl's Irradiation Technology *للأبحاث والعلاج الإشعاعي الموضعي*
أدريان تريفرتون، الرئيس التنفيذي لشركة Xstrahl
أماندا تولك، كبير مسؤولي العلوم، Xstrahl

حل التعقيم المعتمد على المعجل من IBA
كودي ويلسون، مدير المنتجات ومدير تطوير الأعمال، IBA

ميفكس: مراجعة لحلول الأشعة السينية للبحث والتطوير والصناعة
فيليب ديثير، تطوير الأعمال، ميفكس

تقنيات التعقيم الصناعي لـ Steri-Tek
لاري نيكولز، الرئيس التنفيذي لشركة Steri-Tek

أنظمة العلاج الإشعاعي LINAC *من فاريان*
ساسا موتيك، نائب أول للرئيس، حلول العلاج الإشعاعي، شركة فاريان
أندرو ويتمان، نائب الرئيس الأول للشؤون الحكومية، شركة فاريان

تقنيات التعقيم الصناعي من BD
جيمس ماكوي، مدير البرنامج، البحث والتطوير في مجال التعقيم، BD

مكتب دعم العلوم التابع لوزارة الطاقة الأمريكية للبحوث الأساسية حول التقنيات البديلة
إريك آر كولبي، مكتب فيزياء الطاقة العالية ومكتب البحث والتطوير والإنتاج للمسرعات، DOE-SC

*التعريف بمشاريع البحث والتطوير في مجال التكنولوجيا البديلة التابعة للإدارة الوطنية للأمن النووي (*NNSA*)*
لانس جاريسون، مكتب الأمن الإشعاعي، الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA)
دونالد هورنباك، مكتب الدفاع والبحث والتطوير لمنع انتشار الأسلحة النووية، الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA)

مشاريع Stellarray *حول التقنيات البديلة للأبحاث الطبية وتعقيم الحشرات*
مارك إيتون، الرئيس والمدير التنفيذي لشركة Stellarray

Team Nablo - *تعاون صناعي لسد فجوات التعليم والبيانات التي تتضمن تعقيم الأشعة الإلكترونية والأشعة السينية*
مارك مورفي، مختبر شمال غرب المحيط الهادئ الوطني

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

استبدال Starfire's AmBe *بأطياف نيوترونية قابلة للضبط لتطبيقات قاع البئر*
بريان إي جورتشيك، رئيس شركة Starfire Industries LLC

المسرع الطبي النحاسي غير المكلف من إقليدس
تشونغوانغ جينغ، نائب الرئيس الأول والرئيس التنفيذي للتكنولوجيا، Euclid Techlabs LLC

مشاريع طية في التقنيات البديلة للتطبيقات الطبية والصناعية
فينود بارادواج، رئيس ومؤسس شركة TibaRay, Inc.

نظام تصوير بالموجات فوق الصوتية جديد لالتقاط المصفوفة الكاملة لعمليات الفحص بدون النظائر غير المشعة X-Wave's Novel
أرناب جوبتا، كبير مهندسي البحث والتطوير، شركة X-wave Innovations، Inc.

مشاريع RadiaBeam *حول التقنيات البديلة للتطبيقات الطبية والصناعية*
سالم باوتشر، الرئيس التنفيذي، RadiaBeam Technologies، LLC

6 يناير 2021، اجتماع عبر الإنترنت فقط

*تقييم أمن المصادر المشعة، المبادرة المتعلقة بالتهديد النووي (*NTI*)*
سامانثا نيكراز، مدير أول، إدارة مخاطر المواد، المبادرة المتعلقة بالتهديد النووي (NTI)

التشعيع الصحي النباتي USDA-APHIS-PPQ
لورا جيفرز، مديرة العمليات الوطنية لعلاجات الصحة النباتية، العمليات الميدانية لـ USDA-APHIS-PPQ

28 يناير 2021، الاجتماع عبر الإنترنت فقط

تقنيات الحشرات المعقمة: استخدام المصادر المشعة والتقنيات البديلة
روي كاردوسو بيريرا، الوكالة الدولية للطاقة الذرية

علاجات التشعيع والسلامة الغذائية في الولايات المتحدة
لين هايبارغر، مكتب سلامة المضافات الغذائية ومركز سلامة الأغذية والتغذية التطبيقية، ادارة الاغذية والأدوية (FDA)

استخدام Cs-137 *في علم القياس والمعايرة في المعهد الوطني للمعايير والتقنية (*NIST*)*
رونالدو مينيتي، المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا

دور Cs-137 *في قياس الإشعاع المؤين الدولي*
مالكوم ماكوين، المجلس القومي للبحوث في كندا

18 فبراير 2021، اجتماع عبر الإنترنت فقط

لماذا لا تزال تجد تطبيقات المصادر من الفئة الثالثة في الصناعة
رالف ماتايس، إندريس + مستوى هاوزر + الضغط

25 فبراير 2021، اجتماع عبر الإنترنت فقط

تصريحات من الإدارة الوطنية للأمن النووي
لايس غارسون الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA)

*سلسلة التوريد ودراسة السوق للكوبالت-*60
جودي ليبرمان، مايكل إيتامورا، فانيسا فارغاس، جوزيف أدوسي، ماثيو كسكولا، مختبرات ساندیا الوطنية

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

الملحق ج

المختصرات

ASTRO	الجمعية الأمريكية لعلاج الأورام بالإشعاع
AUT	الاختبار الآلي بالموجات فوق الصوتية
CDRH	مركز الأجهزة والصحة الإشعاعية
CIRP	مشروع استبدال مشع السيزيوم
CNS	مركز جيمس مارتن لدراسات عدم الانتشار
CNSC	لجنة السلامة النووية الكندية
CRCPD	مؤتمر مديري برامج مراقبة الاشعاع
CRP	مشروع البحث المنسق
DHS	وزارة الأمن الداخلي
DOE	وزارة الطاقة
DOT	وزارة النقل
EPA	هيئة حماية البيئة
EtO	أكسيد الإيثيلين
FAO	منظمة الأمم المتحدة للأغذية والزراعة
FDA	إدارة الأغذية والأدوية الأمريكية
FPXS	مصدر الأشعة السينية باللوحة المسطحة
GAO	مكتب المساءلة الحكومية
GARS	مجموعة بدائل المصادر المشعة عالية النشاط
GDP	إجمالي الناتج المحلي
GTCC	أكبر من الفئة ج
HDR	معدل جرعة عالية

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

IAEA	الوكالة الدولية للطاقة الذرية
IGRT	العلاج الإشعاعي الموجه بالصور
IMRT	العلاج الإشعاعي المعدل
ITDB	قاعدة بيانات الحوادث والتعقب
kerma	الطاقة الحركية التي يتم إطلاقها لكل كتلة وحدة
LANL	مختبر لوس ألاموس الوطني
linac	المسرع الخطي
LMIC	الدول منخفضة ومتوسطة الدخل
LVS	نظام التحقق من الترخيص
LWD	تسجيل قياسات الآبار أثناء الحفر
NDT	اختبار غير تدميري
NIST	المعهد الوطني للمواصفات القياسية والتقنية
NMR	الرنين المغناطيسي النووي
NNSA	الإدارة الوطنية للأمن النووي
NRC	المجلس الوطني للبحوث
NSTC	المجلس الوطني للعلوم والتقنية
NSTS	نظام تتبع المصدر الوطني
NTI	مبادرة التهديد النووي
ORNL	مختبر أوك ريدج الوطني
ORS	مكتب الأمن الإشعاعي
OSRP	برنامج استعادة المصدر خارج الموقع
PNNL	مختبر شمال غرب المحيط الهادئ الوطني
R&D	البحث والتطوير
RADLOT	تتبع موقع مصدر الإشعاع
RBE	الفعالية البيولوجية النسبية
RDD	السلاح الإشعاعي
RIDL	إطلاق الحشرات التي تحمل سائدًا مميتًا
RTG	المولد الكهربائي الحراري بالنظائر المشعة
SAL	مستوى ضمان العقم
SBIR	بحوث ابتكار الأعمال الصغيرة
SCAR	التصوير الشعاعي لمنطقة صغيرة خاضعة للرقابة
SCATR	برنامج جمع المصادر والحد من التهديدات
SIT	تقنية الحشرات العقيمة
SPWLA	جمعية علماء الفيزياء البترولية ومحللي سجلات الآبار
SRS	الجراحة الإشعاعية التجسيمية
SSTS	نظام تتبع المصدر المُحكم
STTR	نقل تقنية الأعمال الصغيرة

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

TA-GvHD	الأمراض المرتبطة عند حدوث رفض العائل لدم المضيف
TRL	مستوى الجاهزية التقنية
UNSCEAR	لجنة الأمم المتحدة العلمية المعنية بآثار الإشعاع الذري
U.S. NRC	اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية
USDA	وزارة الزراعة الأمريكية
VSL	قيمة الحياة الإحصائية
WBL	الترخيص المستند إلى الويب
WHO	منظمة الصحة العالمية
WINS	المعهد العالمي للأمن النووي
WIPP	محطة عزل النفايات التجريبية

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

الملحق د

مسرد المصطلحات

ملاحظة: اعتمدت اللجنة التعريفات المستخدمة في التقرير السابق للأكاديميات الوطنية (اللجنة التنظيمية النووية (NRC)، 2008) حول الموضوع نفسه.

نسبة النشاط / الخطر (A/D): نسبة نشاط مصدر إشعاع إلى النشاط المحدد لتحديد المستوى الحدي للخطر (D) في نظام تصنيف مصادر الإشعاع الخاص بالوكالة الدولية للطاقة الذرية.

الجرعة الممتصة: كمية الإشعاع المؤين المترسب في مادة، بما في ذلك عضو أو أنسجة، معبرًا عنها من حيث الطاقة الممتصة لكل وحدة كتلة من المادة. وتعد الوحدة الأساسية لقياس الجرعة الممتصة هي الراد أو ما يعادلها في النظام الدولي للوحدات، غراي (Gy).

المسرع: جهاز مهمته تسريع الجسيمات دون الذرية المشحونة، ويُطلق عليه أيضًا مسرع الجسيمات. وفي سياق هذا التقرير، تُستخدم هذه الأجهزة لتوليد حزم نشطة من الإلكترونات التي يمكن توجيهها إلى جسم يريد شخص تشعيعه أو إلى هدف من التنغستين أو التنتالوم أو الذهب، مما يؤدي إلى تحويل طاقة الإلكترون إلى أشعة سينية تشعع جسمًا ما.

النشاط: معدل انحلال النويدة المشعة. وبطابع أكثر رسمية هو عدد الانحلالات لكل وحدة زمنية. وتستخدم لقياسه وحدة النظام الدولي بيكريل (Bq) المقابلة لانحلال إشعاعي واحد (تفكك) في الثانية؛ وتم تعريف وحدته القديمة، كوري (Ci)، في الأصل بأنها نشاط 1 جرام من الراديوم 226 أو 3.7×10^{10} تفكك في الثانية.

التأثير الحاد: التأثيرات في الكائنات الحية التي تظهر بعد فترة وجيزة من التعرض للإشعاع وتتسم بالالتهاب والوذمة والتعرية ونضوب الأنسجة الظهارية والمتعلقة بتكون كرات الدم والنزيف.

المصادر المجمعة: عُرفت في الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية الفصل 37 بأنها "يمكن الوصول إليها عن طريق خرق حاجز مادي واحد سيسمح بالوصول إلى المادة المشعة بأي شكل، بما في ذلك أي أجهزة تحتوي على مادة مشعة، عندما يساوي إجمالي النشاط أو يتجاوز كمية من الفئة 2 من المادة المشعة."

دولة الاتفاقية: الدول التي تولت السلطة بموجب المادة 274 ب من قانون الطاقة الذرية لترخيص وتنظيم مواد النتاج الثانوي (النظائر المشعة)، والمواد المصدر (اليورانيوم والثوريوم)، وكميات معينة من المواد النووية الخاصة. وتمنح هذه الاتفاقية للدولة السلطة التنظيمية على المواد المشعة المستخدمة داخل تلك الدولة.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

بيكريل (Bq): وحدة قياس للنشاط. وتعني بيكريل واحد تفككًا واحدًا (انحلال إشعاعي) في الثانية. أما جيجابيكريل (GBq) فهي 10^9 بيكريل (1 مليار بيكريل) وتيرابيكريل (TBq) هي 10^{12} بيكريل (مليون بيكريل).

إشعاع الكبح: الإشعاع المنبعث من تباطؤ الجسيمات المشحونة بالضوء، مثل الأشعة السينية التي تنتج عندما تتوقف إلكترونات من مسرع في هدف معدني.

مادة النتاج الثانوي: تُعرَّف في قانون الطاقة الذرية بأنها مادة مشعة (باستثناء المواد النووية الخاصة) أُنتجت أو أصبحت مشعة من خلال التعرض لحادث الإشعاع من خلال عملية إنتاج أو استخدام مواد نووية خاصة؛ والمخلفات أو النفايات الناتجة عن استخراج أو تركيز اليورانيوم أو الثوريوم من أي خام معالج بشكل أساسي لمحتوى مواد المصدر الخاصة به.

مصدر الفئة 1: مصدر إشعاع، قد يؤدي في حالة عدم إدارته بشكل آمن أو مؤمن، إلى وفاة أو إصابة دائمة للأفراد خلال فترة زمنية قصيرة.

مصدر الفئة 2: مصدر إشعاع، قد يؤدي في حالة عدم إدارته بشكل آمن أو مؤمن، إلى الوفاة أو الإصابة الدائمة للأفراد الذين قد يكونوا على مقربة شديدة من المصدر المشع لفترة زمنية أطول من مصادر الفئة 1.

مصدر الفئة 3: مصدر إشعاع، قد يؤدي في حالة عدم إدارته بشكل آمن أو مؤمن، إلى إصابة دائمة للأفراد الذين قد يكونوا على مقربة شديدة من المصدر لفترة زمنية أطول من مصادر الفئة 2. ومن الممكن أن تؤدي مصادر الفئة 3 إلى وفيات، لكن هذا غير مرجح.

كوري (Ci): وحدة قياس للنشاط تساوي 3.7×10^{10} (37 مليار) تفكك (انحلال إشعاعي) في الثانية.

التأثير الصحي الحتمي: تفاعل أنسجة تزداد شدته مع زيادة الجرعة، ويتجاوز عادة الجرعة الحدية، لدى الأفراد المصابين (خلل في الأعضاء وتليف وعتامة العدسة وتغيرات في الدم وانخفاض في عدد الحيوانات المنوية). وتنجم هذه الأحداث عن الأضرار التي تلحق بمجموعات الخلايا، وبالتالي وجود جرعة حدية.

الجرعة الفعالة: مجموع الجرعات الممتصة بواسطة الأعضاء المختلفة من أنواع الإشعاع المختلفة مضروبة في عوامل وزن الأعضاء وعوامل وزن الإشعاع، على النحو المحدد بواسطة اللجنة الدولية للوقاية من الإشعاعات. الوحدة 1 سيفرت = 1 جول/كجم = 100 ريم.

التكلفة الخارجية: التكلفة الناجمة عن إجراء أو معاملة اقتصادية لم يتم تضمينها في التكلفة النقدية للنشاط أو المعاملة وبالتالي تتحملها الأطراف غير المشاركة مباشرة في المعاملة.

أشعة غاما: إشعاع كهرومغناطيسي عالي الطاقة. ويُشار دائمًا في هذا التقرير إلى الإشعاع المنبعث من انحلال النويدة المشعة باسم إشعاع غاما لتمييزه عن الإشعاع الصادر عن مولد الأشعة السينية.

نفايات أكبر من الفئة ج: النفايات المشعة التي تحتوي على تركيزات معينة من النويدات المشعة أعلى من حدود الفئة ج في الباب العاشر من قانون اللوائح الفيدرالية **المادة** 61.55.

العمر النصفي: الوقت الذي تخضع خلاله نصف كمية معينة من النويدة المشعة للانحلال الإشعاعي.

الضوابط المتزايدة: مجموعة تدابير أمنية تطلبها اللجنة التنظيمية النووية الأمريكية من الفئة 1 و2 لمصادر الإشعاع أو حاملي تراخيص الأجهزة.

الإشعاع الأيوني: إشعاع ذو طاقة كافية لتأين المادة (على سبيل المثال، إزالة الإلكترونات من الذرات) التي تتحرك من خلالها.

التشعيع: التعرض للإشعاع.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

اختبار غير تدميري (NDT): اختبار لا يدمر الشيء الخاضع للفحص.

مشروع استعادة المصدر خارج الموقع: مسعى من الإدارة الوطنية للأمن النووي (NNSA) لاستعادة وتأمين مصادر الإشعاع التي قد تشكل خطراً على الصحة العامة والسلامة والأمن. ويدير المشروع مختبر لوس ألاموس الوطني.

المشعع البانورامي: جهاز تشعيع لا يحتوي على واقي مدمج في الجهاز. وعند وضع المصادر في هذه الأجهزة، يجب وضعها في هياكل سميكة مدرعة.

جرعة الإشعاع: كمية الطاقة الإشعاعية المترسبة في جسم أو وسيط مقسومة على كتلة الجسم أو الوسيط. ويمثل الإشعاع المؤين جرعة الإشعاع محل الاهتمام في هذا التقرير. ويمكن التعبير عن جرعات الإشعاع المؤين كجرعة ممتصة أو جرعة مكافئة أو جرعة فعالة. ويتم تعريف وحدة النظام الدولي الخاصة بها، غراي، بأنها 1 جول (J) من الطاقة الممتصة لكل كيلوغرام (كجم) من متوسط الامتصاص؛ ووحدتها القديمة هي "راد" التي تُعرَّف بأنها 100 إرغ من الطاقة الممتصة لكل جرام (جم) من متوسط الامتصاص.

نسبة جرعة الإشعاع: كمية الإشعاع المؤين الممتص بواسطة وسيط لكل وحدة كتلة من الوسيط لكل وحدة زمنية.

التعرض للإشعاع: فعل التعرض للإشعاع. يشار إليه أيضًا باسم *الإشعاع*. وبشكل رسمي في الكشف عن الإشعاع وقياسه، يرتبط التعرض للإشعاع بقدرة الفوتونات على تأين الهواء.

إشعاعي: العناصر غير المستقرة وتتحول ذاتيًا (أي الانحلال) من خلال انبعاث الإشعاع المؤين، وهي عملية تعرف باسم الانحلال الإشعاعي.

المصدر المشع: مادة مشعة معبأة لاستخدام الإشعاع المنبعث منها.

التصوير الإشعاعي: استخدام الإشعاع لإنشاء صور لشيء ما، خاصة السمات الداخلية للشيء. ويعد التصوير الإشعاعي الطبي مألوفًا من فحوصات الأسنان الروتينية. ويعتبر التصوير الإشعاعي الصناعي أحد أشكال الاختبارات غير المدمرة لأجنحة الطائرات والأنابيب والتوربينات وهياكل الخرسانة المسلحة والاستعمالات الأخرى.

السلاح الإشعاعي (RDD): سلاح يستخدم لنشر المواد المشعة لأغراض خبيثة. ويتضمن السلاح الإشعاعي أو "القنبلة القذرة" استخدام المتفجرات التقليدية مثل الديناميت لنشر المواد المشعة، لكنها لا تستخدم تلك المادة لإنتاج تفاعل نووي متسلسل يؤدي إلى انفجار، كما هو الحال مع سلاح نووي. وقد يكون الهدف من هذا السلاح هو إحداث اضطراب اجتماعي (ذعر، إخلاء)، وضرر جسدي حاد، واحتمال حدوث ضرر جسدي من التعرض المزمن، والضرر الاقتصادي أو أي مما سبق. ويهدف السلاح الإشعاعي لتحريم المنطقة إلى التسبب في تلوث يمنع شغل المنطقة الملوثة لفترة طويلة من الزمن.

جهاز التعرض الإشعاعي (RED): جهاز يستخدم للتسبب في التعرض المباشر للإشعاع لأغراض خبيثة.

النويدة المشعة: ذرة ذات نواة غير مستقرة تخضع للانحلال الإشعاعي.

الجراحة الإشعاعية: أساليب إشعاعية مركزة تستخدم حزمًا إشعاعية متعددة مختلفة المستوى لتوصيل جرعة محددة من الإشعاع إلى آفة، في المقام الأول في الدماغ.

العلاج الإشعاعي علاج المرض بالإشعاع المؤين.

المخاطر: يعني وفقًا للمستخدم في هذا التقرير احتمال حدوث تأثير سلبي ينجم عن سوء الاستخدام العرضي أو المتعمد لمصدر إشعاع. ويمكن تقدير هذا الاحتمال من الناحية الكمية إذا أمكن الحصول على إجابات للأسئلة الثلاثة التالية: (1) ما الخطأ الذي يمكن أن

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

يحدث؟ (2) ما مدى احتمالية حدوث خطأ؟ (3) ما العواقب؟ ويمكن التعبير عن المخاطر بمصطلحات مطلقة أو بالمقارنة مع أنواع أخرى من المخاطر.

السلامة: في سياق هذا التقرير، تتعلق بمنع الفشل والضرر والخطأ البشري والأفعال الأخرى غير المقصودة التي تنطوي على مصادر إشعاعية يمكن أن تؤدي إلى تعرضات إشعاعية عرضية.

مخاطر السلامة: في سياق هذا التقرير، المخاطر التي تنشأ من تعرض الناس للإشعاع كنتيجة مباشرة للحوادث التي تنطوي على مصادر إشعاعية.

الأمان في سياق هذا التقرير، يتعلق بالحماية من السرقة والتخريب وغيرها من الأعمال الشريرة التي تنطوي على مصادر إشعاع.

المشع الذاتي: "مشع يتم فيه احتواء المصدر (المصادر) المُحكمة بالكامل في حاوية جافة مصنعة من مواد صلبة، ويكون المصدر (المصادر) المُحكمة محمية في جميع الأوقات، ولا يمكن ماديًا وصول الإنسان إلى المصدر (المصادر) المُحكمة والحجم (الأحجام) التي تخضع للإشعاع في التكوين المصمم،" وفقًا للمعيار N433.1 الصادر عن المعهد الأمريكي للمعايير الوطنية (ANSI)،" التصميم الآمن واستخدام مشعات جاما ذات تخزين المصدر الجاف ذاتية الاحتواء (الفئة الأولى)." ويسمى أيضًا المشع ذاتي الحماية.

التكلفة الاجتماعية:التكاليف التي يتكبدها المجتمع، بما في ذلك التكاليف المباشرة وغير المباشرة المدفوعة في صورة أموال والآثار غير المرغوب فيها التي لا يتم تحويلها إلى أموال بسهولة.

المخاطر المجتمعية:جميع المخاطر التي تؤثر على المجتمع، بما في ذلك مخاطر الصحة والسلامة والمخاطر الاجتماعية التي ناقشها هذا التقرير.

التأثير العشوائي: حالة تزداد فيها احتمال الحدوث مع زيادة الجرعة، لكن لا تعتمد شدتها لدى الأفراد المتأثرين على الجرعة (التسرطن بالإشعاع والآثار الجينية). ولا توجد جرعة حدية للتأثيرات العشوائية حقًا، لأن هذه التأثيرات تظهر في خلايا فردية، ومن المفترض أنه يوجد دائمًا احتمال ضئيل لحدوث التأثير مهما كانت جرعة الإشعاع صغيرة.

نفايات ما بعد اليورانيوم: نفايات مشعة تحتوي على عناصر ما بعد اليورانيوم المشعة طويلة العمر (عناصر ذات أعداد ذرية أكبر من 92، مثل البلوتونيوم) بتركيزات أكبر من 100 نانوكوري لكل جرام.

الموجات فوق الصوتية: استخدام الطاقة الصوتية عالية الكثافة لفحص المواد.

التزجيج: عملية تجميد المواد المشعة داخل مصفوفة زجاجية.

تسجيل قياسات الآبار: ممارسة قياسات خصائص الطبقات الجيولوجية التي تم من خلالها حفر بئر وتسجيل النتائج كدالة للعمق.

الأشعة السينية إشعاع كهرومغناطيسي عالي الطاقة. ويُشار دائمًا في هذا التقرير إلى الإشعاع المنبعث من آلة مثل أنبوب أشعة سينية أو مسرع إلكترون ذي هدف عالي المقاومة باسم إشعاع الأشعة السينية لتمييزه عن الإشعاع من انحلال نويدة مشعة.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

الملحق هـ

الجدوى الاقتصادية لاعتماد التقنيات البديلة

هـ.1 اختيار التقنية الجديدة ذات الخدمة المماثلة

تتمتع معظم المصادر المشعة بعمر متعدد السنوات. على سبيل المثال، تكون مشعات الدم التي تعمل بالسيزيوم 137 قابلة للتشغيل بشكل عام لمدة 30 عامًا على عكس أجهزة الأشعة السينية، التي يمكن تشغيلها بشكل عام لنصف هذا الوقت. ويتطلب تقييم المصادر المشعة وبدائلها المحتملة حسابًا شاملاً للتكاليف والفوائد على مدار دورات حياتها التشغيلية: من الشراء والتركيب، مرورًا بالتشغيل على مدار العمر الإنتاجي للتقنية، وانتهاءً بالتخلص منها. وللتوضيح، فكر في مصدر مشع تم شراؤه في الوقت صفر (اليوم)، ويعمل خلال السنوات T التالية، ويتم التخلص منه في نهاية السنوات T. ويتم إعطاء القيمة الحالية للتكلفة الاجتماعية لاستخدام هذا الجهاز على مدار عمره الإنتاجي بالمعادلة التالية:

$$PVSC_{rs} = CC_0^{rs} + EX_0^{rs} + \sum_{t=0}^{T} \frac{OC_t^{rs} + EX_t^{rs}}{(1+d)^{t+0.5}} + \frac{PC_D^{rs} + EX_D^{rs}}{(1+d)^T} \quad \text{(مكافئ 1)}$$

حيث $PVSC_{rs}$ هي القيمة الحالية للتكلفة الاجتماعية لاستخدام تقنية مصدر الإشعاع على مدى عمرها الإنتاجي T سنة؛ وCC^{rs}_0 هي تكلفة الشراء والتركيب الخاص؛ وEX^{rs}_0 هي أي تكلفة خارجية مرتبطة بتصنيع التقنية ونقلها وتركيبها؛ وOC^{rs}_t هي تكلفة تشغيل التقنية خلال العام t بما في ذلك العمالة والصيانة وتكلفة الفرصة البديلة للمساحة المستخدمة وأي تكاليف أخرى مطلوبة للحفاظ على تشغيل التقنية؛ وEX^{rs}_t هي التكلفة الخارجية المرتبطة باستخدام التقنية خلال العام t، بما في ذلك مخاطر الحوادث محولة إلى نقد والاستخدام غير المشروع؛ وPC^{rs}_D هي تكاليف التخلص من التقنية التي يتحملها مالك التقنية؛ وEX^{rs}_D هي تكاليف التخلص التي لا يتحملها المالك؛ وd هو معدل الخصم الاجتماعي.

ومع ذلك، من منظور الكيان الخاص، يتم إعطاء القيمة الحالية للتكلفة الخاصة للتقنية بالمعادلة التالية:

$$PVPC_{rs} = CC_0^{rs} + EX_0^{rs} + \sum_{t=0}^{T} \frac{OC_t^{rs}}{(1+i)^{t+0.5}} + \frac{PC_D^{rs}}{(1+i)^T} \quad \text{(مكافئ 2)}$$

حيث i هو معدل الفائدة الذي يمكن للمنشأة الاقتراض به أو المعدل الذي تُقيّم به استثمارات رأس المال الممولة داخليًا من مصادر إيراداتها الخاصة.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

بالنسبة لتقنية بديلة لا تستخدم نظيرًا مشعًا، ولها عمر إنتاجي يبلغ M سنة، وتوفر خدمة مماثلة للمصدر المشع، ولا تفرض عوامل خارجية على المجتمع الأوسع، يتم إعطاء التكلفة الاجتماعية من خلال المعادلة التالية:

$$PVSC_{ns} = CC_0^{ns} + EX_0^{rs} + \sum_{m=0}^{M} \frac{OC_m^{ns}}{(1+d)^{m+0.5}} + \frac{PC_D^{ns}}{(1+d)^M} \quad \text{(مكافئ 3)}$$

حيث $PVSC_{ns}$ هي القيمة الحالية للتكلفة الاجتماعية لاستخدام تقنية الاستبدال على مدار عمرها الإنتاجي البالغ M سنة؛ وCC^{ns}_o هي تكلفة الشراء والتركيب الخاص؛ وOC^{ns}_m هي تكلفة تشغيل التقنية خلال العام m بما في ذلك العمالة والصيانة وتكلفة الفرصة البديلة للمساحة المستخدمة وأي تكاليف أخرى مطلوبة للحفاظ على تشغيل التقنية؛ وPC^{ns}_D هي تكلفة التخلص من التقنية التي يتحملها مالك التقنية. وتحل القيمة الحالية للتكلفة الخاصة للتقنية البديلة محل معدل الخصم الاجتماعي (d) بمعدل اقتراض المتبني (t) في المعادلة 3.

من المنظور الاجتماعي، يجب على الكيان اختيار التقنية البديلة إذا كان

$$PVSC_{ns} / a_d^M < PVSC_{rs} / a_d^T \quad \text{(مكافئ 4)}$$

حيث a^M_d و a^T_d هي عوامل الأقساط السنوية المعنية إلى سنوية[1] كل قيمة موجودة بحيث تكون المقارنة صالحة إذا كانت $T \neq M$ (راجع كتاب Boardman et al.، 2018، الفصل 9). على سبيل المثال، بمعدل خصم 5 بالمائة، تكون عوامل الأقساط السنوية 7.72 و 12.46 للأجهزة ذات 10 أعوام و 20 عامًا، على التوالي.

مع ذلك، من المرجح أن يعتمد الكيان الخاص التقنية البديلة إذا كان

$$PVPC_{ns} / a_i^M < PVPC_{rs} / a_i^T \quad \text{(مكافئ 5)}$$

كلما زادت التكاليف الخارجية للمصدر المشع، زاد احتمال استيفاء عدم المساواة في المعادلة 4، لكن عدم المساواة في المعادلة 5 لن يتم استيفاؤه. أي أن اختيار التقنية البديلة أمر مرغوب اجتماعيًا لكن الكيان سيختار تقنية المصدر المشع لتقليل تكاليفه الداخلية. واعتمادًا على الأنماط الزمنية للتكاليف، يمكن أن يحدث هذا الاختلاف بين تعظيم المنفعة الخاص والاجتماعي أيضًا في غياب العوامل الخارجية في حالة $d \neq i$. وتشير التشوهات الضريبية المختلفة وعيوب السوق الأخرى إلى أن معدل الخصم الاجتماعي قد يكون أقل من معدل الفائدة في السوق (راجع، على سبيل المثال، مور وآخرون، 2013).

تناقش الأقسام التالية بعض الملاحظات العامة حول العوامل الخارجية ذات الصلة.

هـ.1-1 العوامل الخارجية قبل وأثناء التركيب (EX^{rs}_0)

بالنسبة لمعظم التقنيات التي لا تتضمن مصادر مشعة، تميل اللوائح والضرائب وأقساط التأمين إلى استيعاب التكاليف الاجتماعية في سعر التركيب. وستعمل العوامل المماثلة أيضًا على استيعاب الكثير من التكلفة الاجتماعية للمصادر المشعة في أسعار تركيبها بحيث من المحتمل أن تكون أي تكاليف خارجية متبقية صغيرة. ومع ذلك، قد تكون بعض التكاليف خارجية لأن التأمين ومسؤولية المزود قد لا تغطي التكاليف الاجتماعية الكاملة، بما في ذلك تلك التي يتحملها العمال والمستجيبون الأوائل والجمهور. على سبيل المثال، قد يعاني المستجيبون الأوائل والجمهور من تكاليف غير معوضة في حالة اختراق جهاز يحتوي على مصدر إشعاعي أثناء النقل إلى موقع التركيب.

[1] $a^n_i = 1 - (1+i)^{-n}/i$، حيث n هي عدد السنوات و i هو معدل الخصم.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

هـ.1-2 العوامل الخارجية أثناء التشغيل (EX^{rs}_t)

تحفز مخاطر الحوادث وتحويل المصادر المشعة بواسطة إرهابي أو جماعة إجرامية السياسات العامة لتعزيز السلامة والأمن، بما في ذلك استبدال هذه المصادر بتقنيات بديلة. وتنظم الهيئات التنظيمية استخدام *المواد المشعة* لأجل *حماية* الناس والبيئة وتقليل مخاطر السلامة والأمن. وربما لا يتم استيعاب المخاطر المتبقية، خاصة تلك المرتبطة بحادث يتسبب في إصابات أو وفاة أو رفض استخدام المنشأة بالكامل. وقد تتجنب الكيانات الخاصة المسؤولية من خلال الإفلاس، وقد لا تُجري المنظمات غير الربحية والعامة الكبيرة مثل المستشفيات والجامعات تقييمًا للمخاطر بشكل كامل في السماح للوحدات الفرعية التنظيمية، مثل قسم معين داخل مستشفى أو مجموعة بحثية داخل الجامعة، باتخاذ قرارات بشأن استخدام المصادر المشعة أو التقنيات البديلة. ورغم أن العديد من وسائل الحماية التنظيمية والقانونية التي تسعى إلى تقليل مخاطر وقوع الحوادث تقلل أيضًا من مخاطر الاستخدام الشريرة، فإن احتمال أن يسعى إرهابي أو جماعة إجرامية إلى طرق للتحايل على هذه الحماية يعني أن بعض المخاطر الخارجية (لكن غير المعروفة بشكل عام) لا تزال قائمة. وفيما يلي تصور بسيط لهذه المخاطر:

$$Risk_j = OR_j pL \qquad \text{(مكافئ 6)}$$

حيث $Risk_j$ هي الخطر السنوي المرتبط باستخدام مصدر مشع j، وp هو متوسط الاحتمال الإجمالي عبر جميع المصادر المشعة لعمل إرهابي تمثيلي يفرض القيمة الحالية للتكلفة على المجتمع من L، وOR_j هي نسبة الأرجحية التي تلتقط تعديلاً على p ليعكس الخطر النسبي الناجم عن j. ووفقًا لما جرت مناقشته في الفصل الثاني، فإن الأحداث الإشعاعية والسيناريوهات الافتراضية التي تنطوي على تفجير سلاح إشعاعي (RDD) تشير إلى أن L قد يكون كبيرًا جدًا، ربما بمليارات الدولارات أو حتى بالتريليونات. وتتمثل المشكلة التحليلية في عدم وجود طريقة معقولة لتقدير p. ومع ذلك، فإن تفسير pL كمتوسط خسارة متوقعة، فإن OR_j يمكن اعتباره كتعديل للاحتمال غير المعروف، وبالتالي للمخاطر، التي تنتج عن مراعاة جميع العوامل التي تجعل المصدر j أكثر أو أقل عرضة للمساهمة في متوسط المخاطر. على سبيل المثال، من المحتمل أن تشكل مشعات الدم التي تعمل بالسيزيوم 137 خطرًا نسبيًا أكبر من مشعات الدم التي تعمل بالكوبالت 60 لأنها تحتوي على كلوريد السيزيوم في شكل مسحوق شديد التشتت، مما يجعله جذابًا للاستخدام في سلاح إشعاعي. وفي حين أن تقييم OR_j لا يسمح بتحويل المخاطر المرتبطة بالجهاز j، إلى نقود، فإنه يوفر أساسًا لتحديد المصادر المشعة التي تشكل أكبر خطر نسبي وبالتالي أكبر التكاليف الخارجية النسبية. تمت مناقشة خصائص المصدر المشعة التي تساهم في المخاطر في القسم 2-2 من هذا التقرير.

هـ.1-3 العوامل الخارجية للتخلص (EX^{rs}_D)

قد ينطوي التخلص من المصادر المشعة على عاملين خارجيين. أولاً، قد لا تتطلب الترتيبات المؤسسية التخلص من المصدر المشع، الأمر الذي يزيد بحد ذاته من مخاطر السلامة والأمان، إذا لم تحصل المصادر على مستوى الحماية والمراقبة نفسه الممنوح للمصادر المستخدمة. ثانيًا، قد لا يدفع الكيان الذي يقوم بالتخلص (عادةً مالك ومستخدم المصادر المشعة) التكاليف الكاملة للتخلص. هذا هو الحال غالبًا في الولايات المتحدة وأماكن أخرى كما تمت مناقشته في القسم 2-8.

هـ.2 الآثار المترتبة على تكاليف الاستبدال

كما ذكرنا سابقًا، تسمح العديد من المصادر المشعة للأجهزة بالعمل لعدة سنوات بعد التركيب. ولذلك، في أي عام معين، سيكون عدد قليل فقط من هذه الأجهزة قد وصل إلى نهاية عمره الإنتاجي. ولن تقوم الكيانات التي تشغل هذه الأجهزة حاليًا بتقييم القيمة الحالية للاستخدام المستمر بناءً على المعادلة 2 لأن تكلفة تركيب الجهاز CC^{rs}_0، عبارة عن تكلفة متناقصة لا علاقة لها بالقرار بشأن مواصلة استخدام المصدر المشع أو استبداله لتحل محله تقنية بديلة. ويؤدي هذا إلى تقليل الجانب الأيمن من المعادلة 5، مما يقلل من احتمالية استيفاء عدم المساواة. وبالتالي، عندما تكون الأشياء الأخرى متساوية، سيكون من غير المرجح يتم تبني التقنية البديلة.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies: Arabic Version

قد تؤثر تكاليف المتناقصة أيضًا على القرارات عندما يكون الجهاز الذي يحتوي على مصدر إشعاعي في نهاية عمره الإنتاجي. وقد ينتقل التدريب والخبرة ذات الصلة بالجهاز إلى مصدر إشعاعي جديد لكنها قد لا يكون ذات صلة بتقنية بديلة. وبالتالي، ستكون التكاليف الخاصة المرتبطة بجهاز جديد يحتوي على مصدر إشعاعي أقل مما ستكون عليه في اختيار جديد حقًا للتقنية ولذا فإن عدم المساواة في المعادلة 5 أقل احتمالًا.

هـ.3 الخدمات غير الطبية: القيود في البلدان منخفضة الدخل ومتوسطة الدخل

افترض تقييم التقنية البديلة حتى الآن أنها تقدم الخدمات نفسها التي يقدمها المصدر المشع. وعندما يمتلك الكيان مرونة في استخدام الموارد، فمن المحتمل أن يكون هذا الافتراض معقولاً بالنسبة للتقنيات التي تقدم خدمات متشابهة لكنها ليست متطابقة لأنه يمكن تعويض الاختلافات عن طريق إجراء تعديلات تشغيلية، مثل استخدام التقنية بشكل أكثر كثافة، أو شراء تقنيات بديلة مؤقتًا أثناء أوقات التعطل. ويمكن أخذ هذه التعديلات في الاعتبار في تكلفة التشغيل، OC_m^{ns}، لتسهيل إجراء مقارنة صحيحة. ومع ذلك، عندما يكون لدى الكيان القليل من المرونة في استخدام الموارد، كما هو الحال في البلدان منخفضة ومتوسطة الدخل، فقد لا يكون من الممكن تعديل تكلفة التشغيل لتحقيق الخدمة المماثلة. في مثل هذه الحالات، يجب تعديل المعادلة 3 لمراعاة الخدمات السابقة. على سبيل المثال، قد يؤدي استبدال آلة المعالجة عن بعد التي تعمل بالكوبالت 60 ليحل محها مسرع خطي إلى فترات من عدم توفر المسرع الخطي بسبب الصيانة أو الإصلاحات أو لأسباب أخرى لا يمكن استبدالها مؤقتًا لتحل محها خدمات تستخدم آلة مختلفة يمكنها توفير الخدمة نفسها (آلة العلاج عن بعد التي تستخدم الكوبالت 60 أو مسرع خطي مختلف) في المستشفى نفسه أو في مستشفى آخر. وكما هو موضح في دراسات الحالة (راجع القسم 4-3-3)، تنجم عن فترات التوقف هذه عواقب مباشرة فيما يتعلق بالمرضى الذين لا يتلقون العلاج. وبالتالي، سيكون عنصر آخر من تكلفة التشغيل هو قيمة الخدمات الضائعة، على سبيل المثال، القيمة النقدية المقدرة لزيادة معدل الوفيات أو خطر الإصابة بالمرض بالنسبة للمرضى الذين لا يتلقون العلاج في الوقت المناسب.

هـ.4 سهولة الاستبدال

في الأنظمة الاقتصادية التي تختار الكيانات فيها التقنيات التي ستستخدمها، تكون التقنية البديلة مجدية إذا كانت تفي بالمعادلة 5. وكما ذكرنا سابقًا، ضمن هذا الإطار، تتضمن الجدوى محددات مؤسسية وتقنية. على سبيل المثال، تستوعب لوائح الأمان الأكثر صرامة بعض العوامل الخارجية (نقل بعض التكلفة من EX_i^{rs} إلى OC_t^{rs}) وتقليل حجم العوامل الخارجية عن طريق تقليل نسبة الأرجحية (OR_j). وقد تفعل التقنيات البديلة التي لا تلبي المعادلة 5 حاليًا ذلك إذا أمكن تحقيق وفورات الحجم في التصنيع لتقليل التركيب (CC_o^{ns}). وقد يؤدي الاستخدام الواسع أيضًا إلى زيادة توافر الخبرة التي تقلل تكاليف التشغيل (OC_m^{ns}). وقد تساهم السياسة العامة في زيادة جدوى اعتماد تقنيات بديلة من خلال التأثير على تكاليف استبدال المصادر المشعة أو الحصول على التقنية البديلة، من خلال التأثير على السياسات المؤسسية، ومن خلال الاستثمار في البحث والتطوير. ووفقًا لما جرت مناقشته في الشريط الجانبي 1-2 والقسم 3-6، تزيد حكومة الولايات المتحدة من جدوى اعتماد تقنيات بديلة من خلال تنفيذ كل ما سبق.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.

الملحق و

التعقيم باستخدام الإشعاع بوسائل مختلفة

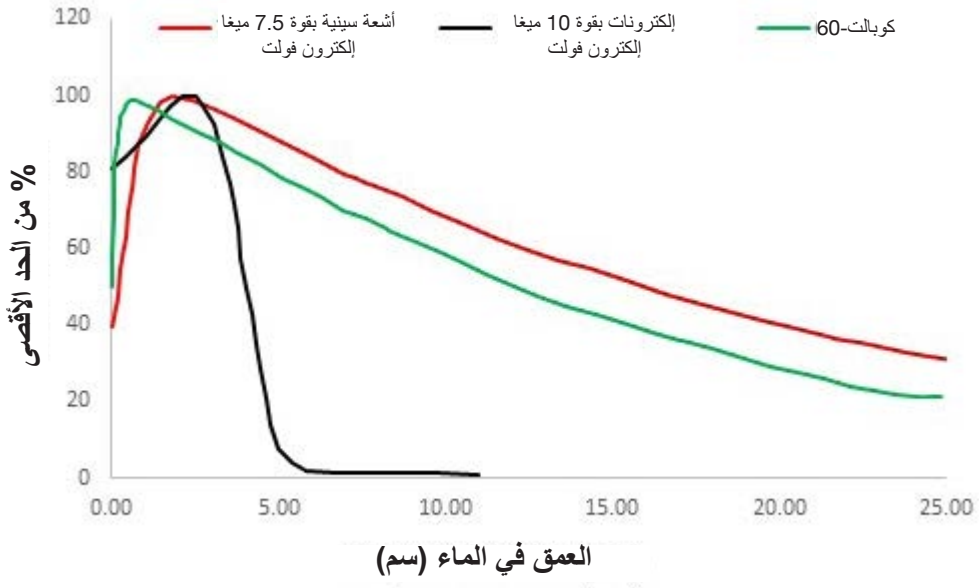
تتشابه عملية التعقيم باستخدام أشعة غاما والأشعة السينية وحزمة أشعة الإلكترون إلى حد كبير من حيث نقل الطاقة والتفاعل. وتتضمن كل من أشعة غاما والأشعة السينية عملية فوتونات من خطوتين تتفاعل مع المادة، بشكل أساسي من خلال تأثير الكومبتون، ثم تودع الإلكترونات الثانوية الناتجة الجرعة وتسبب الضرر للبنية البيولوجية للحمل الحيوي. وفي حالة حزمة أشعة الإلكترون، يتم حذف التفاعل الأولي للفوتونات مع المادة، وبدلاً من ذلك، تتفاعل الإلكترونات مباشرة مع المادة. وأي أن حزمة أشعة الإلكترون هي أكثر طرق التعقيم مباشرة. ويرجع هذا الاختلاف بين مصادر حزمة أشعة الإلكترون وأشعة غاما أو الأشعة السينية إلى أنه يؤدي إلى توزيعات مختلفة للجرعات في المنتج.

تتمتع الأشعة السينية باختراق أفضل قليلاً من أشعة غاما من الكوبالت 60 (راجع الشكل و.1). وكما هو الحال مع أشعة غاما، تولد الأشعة السينية إلكترونات، وهي العامل النشط عند التفاعل مع المنتج المراد تعقيمه. وتولد عملية الإشعاع الإنكباحي أشعة سينية يتم إنشاؤها لغرض التعقيم. وفي العادة يتم توجيه إلكترونات بقدرة 7.5 ميغا إلكترون فولت إلى مادة كثيفة ذات رقم ذري عالٍ مثل التنتالوم. ونظرًا لتشتت الإلكترونات بواسطة ذرات المواد المستهدفة، يتم إنتاج طيف واسع من الأشعة السينية (راجع الشكل و.2). وتكون عملية الإشعاع الإنكباحي غير فعالة للغاية عند قدرة 7.5 ميغا إلكترون فولت؛ ويتم تحويل 10-15 بالمائة فقط من طاقة الإلكترون إلى أشعة سينية. ويتم تبديد الباقي كحرارة في الهدف. ولذلك، لتوليد 15 كيلو واط من طاقة الأشعة السينية، يلزم ما يقرب من 120 كيلو واط من طاقة حزمة أشعة الإلكترون. وتطلق ميغا كوري من الكوبالت 60 ما يقرب من 15 كيلو وات من طاقة الفوتون.

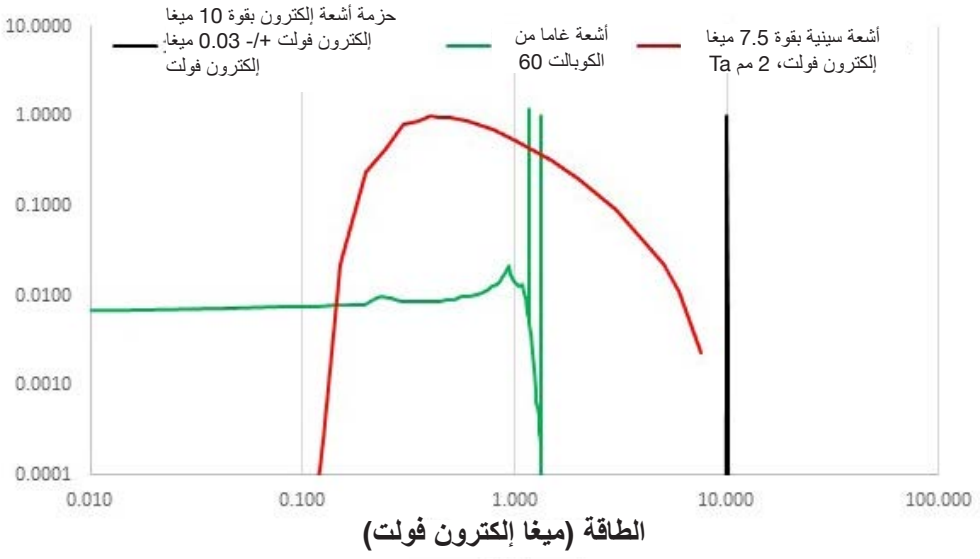
تكون مسرعات حزمة أشعة الإلكترون المستخدمة في التعقيم عادة في نطاق 50 إلى 80 كيلو واط، وهو ما يعادل 3 إلى 5 ميغا كوري (111 إلى 185 غيغا بيكريل) من الكوبالت 60. ومن الممكن أن يصل معدل جرعة حزمة أشعة الإلكترون إلى 20 مللي غراي/ساعة مما يسمح بمعالجة صندوق أو كرتونة المنتج في غضون عشرات الثواني. ويمكن تصميم إنتاجية منشأة حزمة أشعة الإلكترون بحيث تكون قابلة للمقارنة مع منشأة غاما.

يعد معدل الجرعة أحد المعلمات التي قد تسبب اختلافًا في استجابة المادة لأساليب الإشعاع الثلاثة. وتوفر منشأة غاما عادةً ما يقرب من 10 كيلو غراي/ساعة. وبالنسبة لوصفة التعقيم النموذجية (25 كيلو غراي) فإن يعني أن الجهاز يجب أن يبقى في غرفة المشع لمدة 2.5 إلى 3 ساعات. ويمكن أن يكون معدل الجرعة لنظام الأشعة السينية ستة أضعاف معدل غاما، مما ينتج عنه وقت إشعاع يتراوح من 20 إلى 30 دقيقة. ويمكن أن توفر حزم أشعة الإلكترون حوالي 20 مللي غراي/ساعة، ويمكن تشعيع المنتجات هنا خلال ثوانٍ. ويمكن أن يكون هذا الاختلاف في معدل الجرعة مفيدًا أو غير ملائم اعتمادًا على المادة التي يتم تعقيمها. وقد لا يكون لدى بعض التفاعلات غير المرغوب فيها في المواد وقت للتطور بمعدلات جرعات أعلى، مما يحسن من قدرتها على تحمل التشعيع. ومع ذلك، يتسبب وجود 25 كيلو غراي في الماء في زيادة درجة الحرارة بمقدار °6 مئوية. وقد يكون هذا أعلى في مناطق معينة من المنتج اعتمادًا على الاختلافات في الكثافة والعوامل الهندسية الأخرى. ويمكن أن تكون الزيادة الحادة في درجة الحرارة في فترة زمنية قصيرة مصدر قلق أو قد تكون أكثر احتمالًا من قضاء 2 إلى 3 ساعات في بيئة درجة الحرارة المرتفعة لجهاز تشعيع نموذجي يعمل بالكوبالت 60.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.



الشكل و1 رسم بياني لعمق الاختراق لطرق إشعاع التعقيم الثلاثة.
ملاحظات: البيانات الخاصة بالمياه (1 جم/سم^3). بيانات الأشعة السينية لإلكترونات بقدرة 7.5 ميغا إلكترون فولت على هدف الإشعاع الانكباحي.
المصدر: مختبر الأبحاث الوطني فيرمي للمسرعات.



الشكل و2 أطياف الطاقة لطرق إشعاع التعقيم الثلاثة.
ملاحظات: يشتمل منحنى حزمة أشعة الإلكترون على عرض من 30 كيلو إلكترون فولت، والذي يمكن تحقيقه بسهولة من خلال مصادر التسريع. وبعد ذلك تم تخفيف الطيف من ذلك بمقدار 2 مم من التنتالوم لتمثيل الامتصاص الذاتي في هدف الإشعاع الانكباحي.
المصدر: مختبر الأبحاث الوطني فيرمي للمسرعات.

Copyright National Academy of Sciences. All rights reserved.