الأمم المتحدة A/AC.105/C.1/L.312

الجمعية العامة

Distr.: Limited
8 December 2010
Arabic
Original: English

لجنة استخدام الفضاء الخارجي في الأغراض السلمية
اللجنة الفرعية العلمية والتقنية
الدورة الثامنة والأربعون
فيينا، ٧-١٨ شباط/فبراير ٢٠١١
البند ١٠ من جدول الأعمال المؤقت*
استخدام مصادر القدرة النووية في الفضاء الخارجي

حلقة العمل بشأن استخدام مصادر القدرة النووية في الفضاء الخارجي: نهج الولايات المتحدة تجاه تقدير المخاطر ودوره في تنفيذ برنامج أمان فعّال من أجل تطبيقات مصادر القدرة النووية في الفضاء الخارجي

ورقة مقدَّمة من الولايات المتحدة الأمريكية**

ملخص

تُخضع الولايات المتحدة الأمريكية ما تخطّط له من تطبيقات لمصادر القدرة النووية في الفضاء الخارجي لعملية تحليلٍ للأمان وتقديرٍ للمخاطر تتّسق مع التوجيهات ذات الصلة الموصَى بها في إطار أمان تطبيقات مصادر القدرة النووية في الفضاء الخارجي، الذي تشاركت في إصداره عام ٢٠٠٩ اللجنة الفرعية العلمية والتقنية والوكالة الدولية للطاقة الذرية. وتحليل الأمان الذي تجريه الولايات المتحدة لمصادر القدرة النووية يبدأ بفهم لمركبة الإطلاق والمركبة

* A/AC.105/C.1/L.306.

** تستند هذه الوثيقة إلى ورقة غرفة الاجتماعات A/AC.105/C.1/2011/CRP.5.

280111 V.10-58377 (A)

الرجاء إعادة الاستعمال

الفضائية وتصميم البعثة وقواعد الإطلاق. وتُستخدم تلك المدخلات في توصيف طائفة من سيناريوهات الحوادث المفترَضة لخلق بيئة لدراسة حوادث الإطلاق ولتحديد احتمالات وقوعها. واختبارُ أمان مكوِّنات مصادر القدرة النووية والنمذجة باستخدام ميكانيكا الأوساط المتصلة (الميكانيكا الاستمرارية) هما أسلوبان يُستخدَمان لفهم الكيفية التي ستستجيب بها مصادر القدرة النووية والوقود النووي في مجموعة متنوِّعة من سيناريوهات الحوادث. وتُجمَعُ بيئات الحوادث واحتمالات وقوعها ونتائج اختبارات الأمان وعمليات المحاكاة الحاسوبية ضمن إطار تحليل للأمان من أجل تحديد خصائص مخاطر البعثة. ومن بعد ذلك، يَستَعرض تحليلَ الأمان فريقٌ من الخبراء الوطنيين المستقلّين عن البعثة. وتُدمَج تعليقات الاستعراض ونتائجه ضمن عملية تحليل ثانية للأمان تخضع مجدَّداً لاستعراض مستقل. وعملية تحليل الأمان النووي واستعراضه تلك تشجِّعُ على التحسين المستمر في تقدير مخاطر البعثة، وتسهِّل استبانة الجوانب الممكنة لتعزيز الأمان في تصميم البعثة والتصاميم المستقبلية لمصادر القدرة النووية.

أولا- مقدِّمة

١- تُوفِّر وزارةُ الطاقة في الولايات المتحدة نُظُمَ القدرة النووية الفضائية للإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (ناسا) بُغيةَ استخدامها في البعثات الفضائية المدنية ذات المتطلبات الخاصة من حيث تزويد المركبات الفضائية بالقدرة الكهربائية وإمكانيات التسخين الحراري. ومصادرُ الطاقة تلك تندرج ضمن فئتين رئيسيتين، إمَّا نظم قدرة تعمل بالنظائر المشعّة من أجل توليد القدرة الكهربائية، أو وحدات تسخين تعمل بالنظائر المشعّة من أجل التسخين الموضعي للمكوّنات. وتتميز نظم القدرة التي تعمل بالنظائر المشعّة بكونها مدمجة وخفيفة الوزن وذات عمر طويل وموثوقية عالية. وهي تمكّن من إرسال البعثات الفضائية إلى مواضع يتعذّر فيها الاستعانة بالطاقة الشمسية من الناحية العملية. وفي لحظة كتابة هذه السطور، كان يوجد لدى برنامج الفضاء الأمريكي نوعان من نُظُم القدرة التي تعمل بالنظائر المشعّة: المولّد الكهربائي الحراري الذي يعمل بالنظائر المشعّة، ومولّد ستيرلينغ المتقدِّم الذي يعمل بالنظائر المشعّة. وجميع البعثات الأمريكية السابقة ذات نظم القدرة التي تعمل بالنظائر المشعّة استُخدمت فيها المولّدات الكهربائية الحرارية التي تعمل بالنظائر المشعّة. ولا يزال مولّد ستيرلينغ المتقدِّم الذي يعمل بالنظائر المشعَّة قيد التطوير.

٢- إنَّ الكواكب والأقمار وأسطحها كثيراً ما تكون بعيدة ومحتجبة عن الشمس أو ذات بيئات قاسية. واستخدام المولّدات الكهربائية الحرارية التي تعمل بالنظائر المشعّة هو حالياً الوسيلة الوحيدة المتاحة للقيام بتلك العمليات الاستكشافية. بيد أنَّ النظائر المشعَّة تمثِّل خطراً. فمنذ الأيام الأولى التي عُرض فيها الجهاز SNAP-3 فوق مكتب الرئيس أيزنهاور في كانون الثاني/يناير ١٩٥٩، كان الأمان ولا يزال أحدَ الاعتبارات المحورية لبرنامج القدرة النووية الفضائية الأمريكية.[(١)] وقد سخَّرت الولايات المتحدة خلال العمليات الاستكشافية، التي أجرتها على مدى الأعوام الخمسين الماضية، تلك القدرة وقيَّمت المخاطر المحتملة وسيطرت عليها، ووسَّعت بنجاح وأمان نطاقَ معرفتها بالمجموعة الشمسية بما يتّسق مع إطار أمان تطبيقات مصادر القدرة النووية في الفضاء الخارجي (A/AC.105/934). وتُناقش هذه الورقة الكيفيةَ التي تنفِّذ بها وزارة الطاقة تحليلَ أمان الإطلاق النووي.

(1) United States of America, Department of Energy, *Atomic Power in Space: A History* (Washington, D.C., 1987), p. 17.

ثانيا- جوانب الأمان النووي

٣- تَستخدم نُظُمُ القدرة التي تعمل بالنظائر المشعّة ووحداتُ التسخين التي تعمل بالنظائر المشعّة وقودَ ثاني أكسيد البلوتونيوم (PuO_2) الذي تتولَّد فيه الحرارة أساسا بفعل اضمحلال جسيمات ألفا للبلوتونيوم-٢٣٨ (Pu-238). والطبيعةُ المشعّة لثاني أكسيد البلوتونيوم تشكِّل مخاطر محتملة أثناء إطلاق وتشغيل مَركبات الفضاء التي تستخدم تلك النظم في حالة تعرُّض البعثة إلى حادث. ولهذا السبب، فإنَّ وزارة الطاقة وناسا تتعاملان مع الأمان باعتباره جانبا أصيلا من جوانب تصميم نظم القدرة النووية في الفضاء الخارجي وتصنيعها وتطبيقها بما يتسق مع الباب ٥-٢ من إطار الأمان. وتجسِّد جوانب التصميم الاعتبارات ذات الصلة بالأمان، بما في ذلك استخدام نظير مشعّ (Pu-238) يمكن تدريعه بسهولة، وأحد أشكال وقود النظائر المشعّة (أكسيد يتميَّز بشدته واستقراره الكيميائي وعدم قابليته للذوبان وارتفاع درجة انصهاره)؛ وحواجز مستقرة كيميائيا (كسوة مَطيلية من الإيريديوم ومركّبات من الكربون-كربون مقاومة للحرارة) للتقليل إلى الحد الأدنى من احتمال المخاطر على الناس. ويبيّن الشكل ١[٢] طبقات الحماية العديدة المحيطة بالوقود. وفي نظم القدرة التي تعمل بالنظائر المشعَّة المستخدمة في الولايات المتحدة، يُعرَف قرص الوقود PuO_2 المغلَّف بالإيريديدوم باسم غلاف الوقود. ويوضَع غلافا وقود في صف واحد داخل قشرة غرافيتية مقاومة للصدمات مصنوعة من مركّب من الكربون-الكربون يُسمَّى "النسيج المثقب المحبوك" (FWPF). وتحمي القشرة الغرافيتية المقاومة للصدمات أغلفة الوقود أثناء الصدمات. وتُغلَّف القشرةُ الغرافيتية المقاومة للصدمات بمادة كربونية مقاومة للحرارة لوقاية الوقود من الحرارة عند العودة إلى الغلاف الجوي وسائر المخاطر الحرارية. وتوضَع قشرتان من الغرافيت مقاومتان للصدمات ومعزولتان حراريا داخل نميطة مصدرية حرارية عامة الغرض مصنوعة من "النسيج المثقب المحبوك". والنميطة المصدرية الحرارية العامة الغرض عبارة عن قشرة هوائية تمنع انبعاث (إفلات) الوقود أثناء العودة، كما تقي كذلك الوقود في سيناريوهات الارتطامات. ويمكن صفُّ عدّة نمائط مصدرية حرارية عامة الغرض معا ضمن نظام قدرة يعمل بالنظائر المشعّة. وتُستكمل كلُّ معالم الأمان المتأصّلة تلك باختبار أمان لتقييم استجابة النظم لسيناريوهات الحوادث المحتملة.

(2) انظر الشكل ١ في الوثيقة A/AC.105/C.1/2011/CRP.5، متاحة في www.unoosa.org/oosa/COPUOS/stsc/wgnps/index.html.

٤- وأمانُ نُظُم القدرة النووية في الفضاء الخارجي لا يمكن فصله عن سمات الأمان المتكاملة لمركبة الإطلاق والمرحلة العليا والمركبة الفضائية ونظام إنهاء الرحلة والمخطَّط الهيكلي للبعثة. وناسا لديها برنامج موسّع لضمان موثوقية مركبات الإطلاق والمركبات الفضائية. ومن بين العناصر المهمة الإضافية لذلك النهج المتكامل لتوفير الأمان دعم الأنشطة التنظيمية المعنية بأمان المدى وأنشطة التخطيط للطوارئ ذات الصلة قبل عملية الإطلاق وأثناءها.

٥- وتجري وزارة الطاقة تقديرات للمخاطر المحتملة لتحديد الاستجابات المحتملة لتلك المعدات في حالات الحوادث وتحديد خصائص أيِّ انبعاثات محتملة للوقود من نظام القدرة العامل بالنظائر المشعّة. ويستخدم أسلوب نمذجة الانتقال والتشتّت في الغلاف الجوي لانبعاثات الوقود المحتملة لتقدير احتمال تعرّض البشر للوقود والآثار والمخاطر اللاحقة في طائفة كاملة من سيناريوهات الحوادث.

ثالثا- اختبار أمان النظم النووية

٦- تمشّيا مع الباب ٥-٢ (ج) من إطار الأمان، فإنَّ تقديرَ مخاطر الإطلاق النووي في الولايات المتحدة يستند إلى أكثر من ثلاثين عاما من اختبارات الأمان بدءاً باختبار مستوى المكوّنات وانتهاءً بأقسام المحولات الكاملة. ويركِّز اختبار الأمان على مقاومة غلاف الوقود لمختلف المخاطر. وفي العادة، تُبيَّنُ قدرةُ غلاف الوقود على المقاومة من حيث مدى التشوه الجسيم الذي قد يلحق بالغلاف، وأبعاد التشقق (إن وُجد)، وتوزيع حجم جزيئات ثاني أكسيد البلوتونيوم. وتشمل اختبارات الأمان ما يلي:

(أ) اختبارات التعرُّض للضغوط المفرطة نتيجةً للانفجارات. شمل الاختبار في مراحله الأولى اختبارات للأنابيب الصَدْمية يشار إليها أيضا باسم اختبارات الضغط المفرط الانفجاري. وقيّمت هذه السلسلة من الاختبارات التأثيرات الناتجة عن ارتطام موجة من الصدمات، إما بنميطة مصدرية حرارية عامة الغرض أو بمولّد كهربائي حراري يعمل بالنظائر المشعّة، كنتيجة لانفجار. ووُجِّهت نميطة الاختبار بحيث يكون أحد الأسطح الجانبية عموديا على اتجاه انتشار موجة الصدمات. ووُضعت كتل غرافيتية على جانبي النميطة أُعدَّت لمحاكاة مجموعة مؤلّفة من ثلاث نمائط. ومُلئت أغلفة الوقود في نميطة الاختبار بمحاكٍ لوقود ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2)؛

(ب) اختبارات الشظايا والمقذوفات. أُجريت اختبارات الشظايا لتحديد تأثيرات الشظايا والمقذوفات الصغيرة التي ترتطم بالنمائط المصدرية الحرارية العامة الغرض كنتيجة

لانفجار مركبة الإطلاق. وأجريت الاختبارات في البداية باستخدام ألواح من مادة "النسيج المثقب المحبوك" لتحديد مدى انخفاض السرعة الذي تتحمله النميطة المصدرية الحرارية العامة الغرض وحدها. وأعقبت ذلك اختبارات لأهداف نصف نمائطية باستخدام رصاصات من الألمونيوم. وعلاوة على ذلك، فحصت تلك السلسلة من الاختبارات تأثير اصطدام رصاصات التيتانيوم بالأغلفة العارية؛

(ج) اختبارات السقوط. أجريت اختبارات للسقوط من مروحية أثناء تطوير النميطة المصدرية الحرارية العامة الغرض لتحديد السرعة النهائية للنميطة وتفحّص الكيفية التي ستسقط بها على الأرض؛

(د) اختبارات حريق الوقود الدفعي الصلب. عُرِّض اثنان من مكوّنات النمائط المصدرية الحرارية العامة الغرض للنار لمدة طويلة بإشعال مكعب كبير من الوقود الدفعي (الداسر) الصلب. ووُضع هذان المكوّنان، المؤلفان من غلاف وقود عارٍ ومجموعة مقاومة للصدمات مكوّنة من قشرة غرافيتية مقاومة للصدمات مزوّدة بغلافيْ وقود، على جانبي كتلة الوقود الدفعي، وعُرِّضا للنار مباشرة. واستُخدم محاكٍ لوقود ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) في كلا المكوّنين؛

(هـ) اختبار تأثير الصدمات على الأغلفة العارية. أُجريت اختبارات على تأثير الصدمات على الأغلفة العارية لتحديد مدى تأثر غلاف الوقود والوقود بالاصطدام بوسائط مختلفة. وصُمّمت أوضاع الاختبار لتجسد الأوضاع التي يمكن أن تنتج عن حادث على منصة الإطلاق أو أثناء بدايات الصعود. وأُجريت اختبارات الأغلفة العارية هذه باستخدام أغلفة وقود تحتوي إما على ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2) أو ثاني أكسيد البلوتونيوم (PuO_2)؛

(و) اختبار تأثير الصدمات على نمائط المصادر الحرارية العامة الغرض. صُمِّمَ اختبارٌ لتأثير الصدمات على نمائط المصادر الحرارية العامة الغرض لمحاكاة عودة نميطة مصدرية حرارية عامة الغرض إلى الغلاف الجوي واصطدامها اللاحق بالأرض في أعقاب الخروج عن المدار. وعند صنع النمائط المصدرية الحرارية العامة الغرض المستخدمة في هذه الاختبارات أُزيلَت طبقةٌ رقيقة من الغرافيت من جميع الأسطح الخارجية. واستندت الكمية المزالة إلى تقدير ضعف السُّمك المتوقع للمادة التي ستتآكل أثناء عودة عرَضية. ومُلئت جميع أغلفة الوقود داخل النمائط المصدرية الحرارية العامة الغرض بوقود ثاني أكسيد البلوتونيوم (PuO_2). وعُرِّضت النمائط إلى الوضع الحراري المتوقّع أثناء رحلة العودة قبل التأثّر بالسرعات المتوقّعة

لدى العودة إلى الغلاف الجوي. وكانت زاوية التصادم متغيّرة في تلك الاختبارات. وعُرِّضت النمائط للارتطام بحاجز من الصلب؛

(ز) اختبارات الشظايا الكبيرة. تنطوي اختبارات الشظايا الكبيرة على دراسة أثر الارتطام بشظية كبيرة من غلاف مركبة إطلاق على محاكٍ لجزء من مولّد كهربائي حراري يعمل بالنظائر المشعّة. وأجريت سلسلة من الاختبارات باستخدام المزلجة الصاروخية لمحاكاة الاصطدام بشظية كبيرة. ووُضع محاكٍ لمصدر حراري داخل الجزء الذي يحاكي المولِّد الكهربائي الحراري العامل بالنظائر المشعّة، وسُخِّن حتى درجات حرارة ما قبل الإطلاق في وقت الارتطام. وكان محاكي المولِّد الكهربائي الحراري الذي يعمل بالنظائر المشعّة مكوَّناً من ثماني نمائط مصدرية حرارية عامة الغرض، منها نميطتان تحتويان على أغلفة وقود بها محاكٍ لثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2)، وستّ نمائط مصنوعة من غرافيت سائب تحتوي على كبسولات موليبدنوم صلب تمثِّل أغلفة الوقود؛

(ح) اختبارات الصفائح الطائرة. تفحص اختبارات الصفائح الطائرة أثر ارتطام شظية رفيعة تشبه الصفيحة تسير في خط مستوٍ بغلاف وقود مملوء بمحاكٍ لوقود ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2). وكانت الصفيحة من نوعٍ من الألومنيوم صالح للاستعمال في المركبات الفضائية. وكانت أغلفة الوقود المستخدمة في الاختبارات الثلاثة الأولى من بقايا أحد اختبارات الأنابيب الصَدْمية. وسُخّنت أغلفة الوقود قبل الاختبار بهدف إيصالها إلى درجة الحرارة السابقة للإطلاق؛

(ط) اختبارات الصفائح الطائرة الحَافِّية. حاكت اختبارات الصفائح الطائرة الحافِّية أثر اصطدام شظايا كبيرة تشبه الصفائح بنمائط مصدرية حرارية عامة الغرض محمَّلة بالكامل بالوقود وكذا أغلفة الوقود العارية. واحتوت جميع الأغلفة على محاكٍ لوقود ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2). وسُرِّعت الصفائح نحو هدفها في تشكيلة ارتطام حافّي باستخدام مسار انزلاقي للمزالج؛

(ي) اختبارات آثار الصدمات الخلفية على المولّد الكهربائي الحراري الذي يعمل بالنظائر المشعّة. كان الهدفُ من اختبارات آثار الصدمات على المولّد الكهربائي الحراري الذي يعمل بالنظائر المشعّة هو إيجاد بيانات اختبارية حول التشوّه الذي يلحق بغلاف الوقود بالنسبة لوضع مجموعات نمائط المصادر الحرارية العامة الغرض في المولّد الكهربائي الحراري الذي يعمل بالنظائر المشعّة، وحول تباين التشوه في كل وضع. وتمثَّل هدفٌ ثانوي في الحصول على بيانات حول الانبعاث الجزئي لمحاكي الوقود في حالة حدوث شرخ في غلاف

الوقود. وتمّ تسخين محاكٍ لمولّد كهربائي حراري يعمل بالنظائر المشعّة به مجموعة من تسع محاكيات للنمائط المصدرية الحرارية العامة الغرض محمَّلة بأغلفة وقود ثاني أكسيد اليورانيوم (UO_2)، ورُفعت درجة حرارته إلى حرارة ما قبل الإطلاق. ولهذا الاختبار، وُضع محاكي المولّد الكهربائي الحراري الذي يعمل بالنظائر المشعّة على مزلجة صاروخية ودُفع إلى الارتطام بهدف خرساني؛

(ك) اختبار مَطيلية الإيريديوم. تُصنع أغلفة الوقود المستخدمة لتغليف ثاني أكسيد البلوتونيوم (PuO_2) من الإيريديوم. ومن أجل فهم أفضل لخواص مادة التغليف، أُجريت اختبارات قوة الشد عند درجات حرارة مختلفة لتحديد خصائص استجابة الإيريديوم مثل درجة الحرارة الوظيفية ومعدل الإجهاد؛

(ل) اختبارات تحديد خواص بيئات احتراق الوقود الدفعي الصلب. أُجريت سلسلة من الاختبارات لفحص وتحديد خواص البيئات السفلى والقريبة من مواضع احتراق أنواع مختلفة من الوقود الدفعي الصلب في ظروف الغلاف الجوي ولقياس استجابة مختلف النظائر أو بدائلها لتلك البيئات.

رابعا- تحليلات الأمان النووي

٧- في الولايات المتحدة، تخضع نظم القدرة النووية في الفضاء إلى أنواع مختلفة من الاستعراضات الأمانية والبيئية أثناء إعدادها وتطبيقها، على غرار النظم المذكورة في الباب ٥-٣ من إطار الأمان. وتركّز الاستعراضات على تقرير تحليل الأمان والوثائق ذات الصلة المعدة كجزء من إجراءات إقرار عمليات الإطلاق. وتشمل عناصر تلك الوثائق المهمة في عمليات الاستعراض ما يلي:

(أ) دفتر بيانات مركبة الإطلاق. تُعِدُّ ناسا دفتر بيانات لمركبة الإطلاق خاص بكل بعثة كي تستخدمه وزارة الطاقة في إجراء التحليلات وتقارير تحليل الأمان التي تعدّها من أجل إقرار عملية الإطلاق. ويورد دفتر البيانات معلومات مرجعية تفصيلية بشأن التصميم فيما يخصّ البعثة ومركبة الإطلاق والمركبة الفضائية ومجمّع الإطلاق والجدول الزمني للبعثة ومسارها. وعلاوة على ذلك، يحدّد دفتر البيانات طائفة الحوادث المحتملة وبيئات الحوادث ذات الصلة (الضغط المفرط الانفجاري، والكرة النارية والشظايا والارتطامات والعودة) واحتمالاتها؛

(ب) تقرير تحليل الأمان. تقوم وزارة الطاقة بإجراء تحليل رسمي لكل بعثة يُستخدم فيها نظام للقدرة النووية في الفضاء الخارجي لتقدير الأمان النووي والمخاطر المحتملة للبعثة. ويتم توثيق تحليلات الأمان في تقارير تحليل الأمان عند ثلاثة مستويات متكرّرة كجزء من إجراءات الموافقة على الإطلاق. وتتضمّن التقارير تقرير تحليل الأمان الأولي، ومشروع تقرير تحليل الأمان وتقرير تحليل الأمان النهائي؛

(ج) تقرير تقييم الأمان. يقوم فريقٌ خارجي يُطلَق عليه اسم الفريق المشترك بين الوكالات لاستعراض الأمان النووي، كجزء من إجراءات الموافقة على الإطلاق، باستعراض دفتر بيانات ناسا وتقرير تحليل الأمان الخاص بوزارة الطاقة، ويجري تقييم أمان مستقل للبعثة. ويتولى فريقُ الاستعراض توثيقَ الاستعراض والتقييم المستقل في تقرير تقييم الأمان. وأثناء تلك العملية، توفِّر ناسا ووزارة الطاقة ما قد يطلبه فريق الاستعراض من معلومات إضافية في معالجة المسائل التقنية المحتملة. ويمكن دمج المشاريع الأولى من تقرير تقييم الأمان وتعليقات فريق الاستعراض في نسخ لاحقة من تقرير تحليل الأمان لتعزيز تحليلات الأمان.

خامسا- لمحة حسابية عامة عن تحليل الأمان

٨- يُجرَى تحليلُ أمان الإطلاق باستخدام مجموعة من الشفرات الحاسوبية لنمذجة مراحل وظواهر مختلفة لتسلسل الحوادث وانبعاث النظائر المشعّة ("حد الإفلات") وانتقال النظائر المشعّة ونتائجه.[٣] وتعدُّ ناسا دفتر البيانات لمركبة الإطلاق واحتمالات الحوادث وبيئاتها. ويمكن استخدام هذه البيانات كمدخلات في العمليات الحسابية. وتحدِّد شفرات ظواهرية استجابة معدات نظام القدرة العامل بالنظائر المشعّة للانفجارات والصدمات والحرائق والعودة. وتنتج الشفرات عن مجموعة من جداول البحث التي تُستخدم كمدخلات لتعيين حد الإفلات الخاص بسيناريو حادث معيّن. وفي العادة، تمنع سمات أمان نظام القدرة العامل بالنظائر المشعّة انبعاث المواد. وفي حال وقوع انبعاث، فإنّ حدّ الإفلات يتحوّل إلى مجموعة شفرات تصور العواقب لتحديد مدى إمكانية انتقال أيِّ مواد منبعثة والتأثيرات الصحية أو البيئية التي قد تنتج. والمنتَج النهائي لتقدير المخاطر هو توزيع لاحتمالات الحوادث واحتمال الانبعاث والنتائج الممكنة ومتوسطات القيم وتقدير للمخاطر.

---

(3) للاطلاع على تسلسل العمليات الحسابية المستخدمة لتحليل الأمان للموافقة على الإطلاق، انظر الشكل ٢ في الوثيقة A/AC.105/C.1/2011/CRP.5، وهي متاحة في: www.unoosa.org/oosa/COPUOS/stsc/wgnps/index.html.

ألف- الانفجارات والارتطامات

٩- إنَّ سيناريوهات الحوادث المحتملة التي يمكن الحصول عليها تفوق بكثير ما يمكن اختباره. ولذلك، فإنَّ تحليلَ الأمان يعتمد على النمذجة العددية لتعزيز قاعدة بيانات اختبارات الأمان القائمة. والبيئات الضارة المحتملة التي يجب نمذجتها هي الانفجار الناشئ من حادث دمار عند الإطلاق، وارتطام معدات نظام القدرة العامل بالنظائر المشعّة بالأرض، وارتطام الحطام وشظايا الوقود الدفعي الصلب بمعدات نظام القدرة العامل بالنظائر المشعّة. وتُستخدَم شفرات ميكانيكا الأوساط المتصلة من أجل النمذجة الواضحة لبيئات الحوادث المحدَّدة داخل دفتر البيانات. وتتضمّن البرامجُ نماذج تكوينية غير خطية، وتحلِّل بدقة التشوهات الكبيرة التي يمكن أن تؤدّي إلى حالات من انعدام الخطية الهندسية. وتوفِّر عمليات المحاكاة العددية لتلك الأضرار الميكانيكية الناشئة بسبب ظروف الانفجار والارتطامات تقديرا للضرر اللاحق بمصدر القدرة (ومكوّناته)، وخصوصا الضرر اللاحق بأغلفة الوقود داخل مصدر القدرة. وتحدَّد تقديرات انكشاف غلاف الوقود وخرقه وتشوّهه من عمليات المحاكاة العددية ويوضع التقدير على أساس كل غلاف على حدة في كل حادث، وتدرج النتائج في نموذج لحالات الانبعاث مدمج في شفرة تحليل حدّ الإفلات. ويحدِّد نموذج الانبعاث كمية ثاني أكسيد البلوتونيوم (PuO_2) وتوزيع حجم جزيئاته في أيِّ مواد منبعثة على أساس المعلومات المتوفّرة من عمليات المحاكاة العددية عن الأضرار التي لحقت بالغلاف.

١٠- وتفحص عملياتُ المحاكاة العددية تلك ظروفَ التحميل الميكانيكي مثل الانفجارات والارتطامات الأرضية والارتطام بشظايا من المركبات الفضائية وكذلك، بالنسبة إلى بعض البعثات، الارتطام بحطام مركبة فضاء متماسكة. ويُعزَى الضررُ الميكانيكي في معظم الحالات إلى سلسلة معقّدة من الأحداث. وتُفكِّك عمليات المحاكاة العددية سلسلة الأحداث المعقّدة، وتقدِّم معلومات يستعان بها في شفرة تحليل حدّ الإفلات بشأن حوادث منفردة ويمكن عندئذ استخدامها لتفسير التسلسل المطّرد للأحداث. وتوفِّر شفرةُ تحليل حدّ الإفلات تفاصيل عن انكشاف غلاف الوقود وتشوّهه وخرقه داخل مصفوفات لحوادث الارتطام الأرضية والارتطام بالشظايا وبحطام المركبات الفضائية والانفجارات. ويمكن عندئذ تجميعُ تلك النتائج المنفردة للحصول على تقدير للانبعاث الناتج بسبب التحميل الميكانيكي.

باء- الحريق والتحليل الحراري

١١- يمكن أن تشهد بيئة حوادث الإطلاق حرائق ناشئة من الوقود الدفعي السائل والصلب. وقد قامت الولايات المتحدة ببناء عدّة طبقات حماية داخل معداتها للمساعدة على

منع انبعاث الوقود من نظام القدرة العامل بالنظائر المشعّة في حال وقوع حادث بمنطقة الإطلاق. فعلى سبيل المثال، من غير المتوقع أن تكون حرائق الوقود الدفعي السائل من الشدّة بما يكفي لإذابة غلاف الإيريديوم الذي يحتوي وقود نظام القدرة العامل بالنظائر المشعّة. وهناك العديد من الشفرات المستخدمة لنمذجة حرائق الوقود الدفعي السائل وحرائق الوقود الدفعي الصلب والصدمات الحرارية-الميكانيكية وتأثيرات بيئات التبخّر على معدات ووقود نظام القدرة العامل بالنظائر المشعّة.

١٢- وتحدِّد المدخلاتُ المدرجة في الشفرة خصائصَ الحريق الأرضي للوقود الدفعي الصلب والسحابة التي ترتفع في أثره وتحدّد توزيع أيٍّ من كتل ثاني أكسيد البلوتونيوم (PuO_2) المنبعثة، من جراء ارتطام متزامن أو شبه متزامن، في فئات حجمية مختلفة للجسيمات. ومن نقطة البدء تلك، تتنبّأ مجموعة الشفرات بتركيب وتوزيع حجم جسيمات الهباء الذي يحتوي على ثاني أكسيد البلوتونيوم (PuO_2) في السحابة السابحة. وفي الواقع، فإنَّ الشفرة تحوِّل حدّ الإفلات (الكتلة بحسب فئة الحجم) لجسيمات ثاني أكسيد البلوتونيوم (PuO_2) المنبعثة من جرّاء خلل ميكانيكي إلى حدّ إفلات آخر يتضمّن تأثيرات التبخّر والتكثّف وتجمّع الجسيمات.

جيم- تحليل العودة

١٣- إنَّ مركبة الفضاء المزودة بنظام قدرة عامل بالنظائر المشعّة يمكن أن تكون عرضة لسيناريوهات عودة غير متعمّدة. والنميطة المصدرية الحرارية العامة الغرض مصمّمة بحيث تتحمّل ظروف العودة، وهناك مجموعة من الشفرات التي تُستخدم لتقييم وتأكيد صلاحية تصميم النميطة. وتُستخدم عدة شفرات معا لتوفير حلٍّ متكامل لما قد يواجه عند العودة من مشكلات فيزيائية تتابعية بشأن الحركة والسخونة والاستجابة الحرارية والكيمياء ومجالات تدفق الموائع غير اللزجة. ويتطلّب تقييم فضاء العودة البارامتري إيجاد آلاف الحلول من أجل تحديد ديناميات رحلة العودة ومدى سخونة الأسطح الحركية الهوائية وتحات النمائط المصدرية الحرارية العامة الغرض واستجابتها الحرارية. ويُنفَّذ هذا التحليل لكل بعثة نظرا لأن لكل بعثة خصائصها المدارية الفريدة. ويؤخذ بالنتائج الحرارية والطبيعية والنتائج المتعلقة بالسرعة لهذا التحليل في تحليل حدّ الإفلات.

دال- تحليل حدّ الإفلات

١٤- حدّ الإفلات (source term) هو كمية وشكل وقود نظام القدرة العامل بالنظائر المشعّة، إن وُجد، الذي يمكن أن ينبعث. وبما أنَّ المعدات مصمّمة بحيث تحتوي الوقود، فقد يكون حدّ الإفلات معدوم القيمة. ويستخلص حدّ الإفلات من أجل تحليل أمان الإطلاق باستخدام شفرة مونت كارلو التي تولِّد الملايين من النتائج المحتملة لتحليل كل بعثة واحدة. وهي تسعى إلى تحديد خصائص جميع عناصر التهديد لبيئة حوادث الإطلاق.

١٥- وتبدأ كل محاكاة بتحديد مكان وقوع الحادث من خلال أخذ عينة عشوائية لدالة توزيع الاحتمالات من مركبة الإطلاق. ثم تطبَّق شفرة حد الإفلات على جميع جوانب الخلل التي ستقع في ذلك الحادث: بما فيها الانفجار الأولي والارتطام بالشظايا في الجو وارتطام نظام القدرة العامل بالنظائر المشعّة بالأرض وارتطام شظايا الوقود الدفعي الصلب أو شظايا كبيرة أخرى بنظام القدرة العامل بالنظائر المشعّة ومطر الحطام وحرائق الوقود الدفعي السائل والصلب. ويتم أخذ عيّنات توزيع مختلفة طوال عملية المحاكاة مما ينتج عنه الملايين من الحلول الفريدة.

١٦- والنتيجة النهائية لتحليل حد الإفلات هي توزيع الانبعاثات المحتملة من وقود ثاني أكسيد البلوتونيوم (PuO_2) ليؤخذ منها عينة لتحليل العواقب. وتفاصيل الانبعاثات النهائية تشمل الكتلة المنبعثة وتوزيع حجم الجزيئات وموقع الانبعاث وبارامترات بيئة الحريق. كما تحدِّد النتائج احتمالات الانبعاثات في حال وقوع حادث معيّن، ومن شأن هذا، بالاقتران مع تحديد احتمالات وقوع الحادث، أن يتيح إمكانية وضع سيناريو كامل لما يمكن أن يحدث.

هاء- تحليل العواقب

١٧- مجموعةُ العواقب هي مجموعةٌ من الشفرات التي تحسب انتقالَ وقود نظام القدرة العامل بالنظائر المشعّة المنبعث في الغلاف الجوي والعواقب اللاحقة من حيث التأثيرات على الصحة والجرعات وتلوث الأرض. وتعرَّف التأثيرات الصحية بعدد حالات الوفاة من إصابات السرطان الكامنة على مدى السنوات الخمسين اللاحقة. ويُستخدَم في هذا الشأن النموذج الخطي للجرعة بدون حد أدنى إلى جانب خيار آخر لاستخدام قيمة دنيا. وتُدار مجموعة الشفرات عشوائيا للحصول على سيناريوهات متعددة تُسمّى "الملاحظات". ويُختار حدّ الإفلات المحدد والأحوال المناخية وزمن الإطلاق عشوائيا لكل عملية ملاحظة. ويُستخدم أسلوب معاينة الأهمية لضمان أن تؤخذ مجموعات المتغيرات التي تؤدّي إلى أحداث منخفضة الاحتمال وعالية العواقب في الاعتبار في التحليل.

١٨- وتتحقّق دراسة الانتقال في الغلاف الجوي باستخدام مسار لاغرانج، أي باستخدام نموذج النفثات الغاوسية (Gaussian puff model) مع الاستعانة بقدرات للتعامل مع حدود إفلات الجسيمات المتعددة الأحجام. وانتقال المادة وانتشارها في شكل نفثة سحابية أمر تتحكم فيه أحوال جوية يمكن أن تتباين من حيث المكان والزمان. وتشمل تلك الأحوال مكوّنات الرياح عند النقاط الشبكية وفئة الاستقرار وارتفاع طبقة الامتزاج وخشونة السطح الأسفل. ويتم تعقّب كل سحابة من المواد المفلتة يجري تحديدها وفق خصائص معيّنة، مثل حجم الجسيمات والأبعاد الأولية للسحابة والإحداثيات الأولية، في إطار خطوات زمنية من خلال دراسة مجال ريحي رباعي الأبعاد (ثلاثة أبعاد فضائية زائدا الزمن).

١٩- وعندما تتفاعل النفثات مع الأرض، يبدأ حساب التركيزات الهوائية والأرضية عند نقاط شبكية محدّدة. وعقب حساب الانتقال والتركيز، يتم تقييم الجرعات المحتملة والتأثيرات الصحية لدى المجتمع المعرَّض. وتقوم نميطة منفصلة بحساب الجرعات المحتملة على أساس عوامل تحويل الجرعات بالنسبة لمسارات الجرعات المختلفة. وبما أنَّ حدود الإفلات قد تنطوي على أحجام مختلفة للجسيمات، وأنَّ مستوى الدقّة قد يتغيّر من تطبيق إلى آخر، فإنَّ هذه النميطة المتضمَّنة لا تقصر قيم عوامل تحويل الجرعات على قائمة ثابتة بأحجام الجسيمات. وتضمّ حسابات الجرعات والتأثيرات الصحية كذلك بيانات أخرى ترتبط بمناطق قد تكون ملوَّثة، مثل الكثافة السكانية واستخدام الأرض وإنتاج الغذاء واستهلاكه.

٢٠- وتُجمَّع نتائج مجموعة العواقب في جداول بمتوسطات العواقب والعواقب المئينية المختلفة والخطر (متوسط العواقب مضروباً في احتمالات الانبعاث). كما تُعَدُّ كذلك رسومات بيانية تكميلية لدالات التوزيع التراكمية. وتبين تلك الرسومات البيانية احتمال حدوث مستوى معين من العواقب أو حدوث ما هو أخطر منه. وتوفِّر تلك النتائج القاعدة التقنية لصانع القرار كي يقدِّر الخطر الذي يستتبعه إجراء تطبيق لنظام قدرة يعمل بالنظائر المشعّة في الفضاء الخارجي.

سادسا- الخلاصة

٢١- أتاحت نُظُمُ القدرة العاملة بالنظائر المشعّة استكشافَ أغوار المجموعة الشمسية، من الشمس إلى بلوتو، والوصول إلى مدارات الكواكب الخارجية ورصد أقمارها، وكل واحد منها أغرب من التالي له، والسفر إلى الأطراف الخارجية للمجموعة الشمسية وما بعدها. وبينما تنطوي تطبيقات نظم القدرة العاملة بالنظائر المشعّة في كثير من الأحيان على استخدام كميات كبيرة من مواد النظائر المشعّة، فإنَّ الولايات المتحدة وضعت برنامج أمان

واسع النطاق تدعمه عملية صارمة لتقدير المخاطر وذلك لأجل تقدير المخاطر المحتملة في البعثات وضمان تنفيذ البعثات بأمان. وتمشّيا مع إطار الأمان، فإنَّ تقدير المخاطر الذي تطبّقه الولايات المتحدة يؤدي وظيفة أساسية في عمليتي تصميم وتطوير نظم القدرة العاملة بالنظائر المشعّة وجميع المراحل التطويرية لتطبيقات نظام القدرة العاملة بالنظائر المشعّة، ويتيح مسوّغات تدعم محاولات تبرير استخدام تطبيقات نظام القدرة العاملة بالنظائر المشعّة، ويوفِّر الأساس التقني لإجراءات الإذن بالإطلاق بعد التأكّد من الأمان النووي.