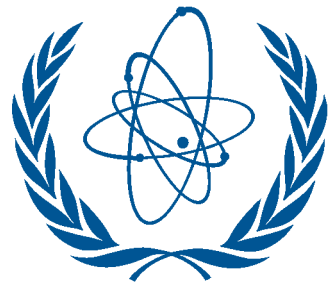


الكميات الخطرة من المواد المشعة (قيم النويدات المشعة)

تاريخ النشر: شباط/فبراير ٢٠١١

IAEA

الوكالة الدولية للطاقة الذرية



منشورات الوكالة الدولية للطاقة الذرية المتعلقة بالأمان

معايير الأمان الخاصة بالوكالة الدولية للطاقة الذرية

الوكالة المختصة، بموجب أحكام المادة الثالثة من نظامها الأساسي، بأن تضع أو تعتمد معايير أمان بقصد حماية الصحة والتقليل إلى أدنى حد من الأخطار على الأرواح والممتلكات، وأن تتخذ ترتيبات لتطبيق هذه المعايير.

وتصدر المنشورات التي تضع الوكالة بواسطتها هذه المعايير ضمن سلسلة معايير أمان الوكالة. وتشمل هذه السلسلة الأمان النووي والأمان الإشعاعي وأمان النقل وأمان النفايات. وتصنف المنشورات الصادرة ضمن هذه السلسلة إلى الفئات التالية: أساسيات الأمان، ومتطلبات الأمان، وأدلة الأمان.

ويعرض موقع شبكة الإنترنت الخاص بالوكالة الوارد أدناه معلومات عن برنامج معايير أمان الوكالة:

<http://www-ns.iaea.org/standards/>

ويتضمن الموقع نصوص معايير الأمان المنشورة ومسوداتها باللغة الانكليزية. كما تتوفر أيضاً نصوص معايير الأمان الصادرة باللغات العربية والصينية والفرنسية والروسية والأسبانية، بالإضافة إلى مسرد مصطلحات الأمان الذي وضعته الوكالة وتقرير عن حالة معايير الأمان. وللحصول على مزيد من المعلومات يُرجى الاتصال بالوكالة على العنوان التالي:

P.O. Box 100, 1400 Vienna, Austria.

والدعوة موجهة إلى جميع مستخدمي معايير أمان الوكالة لإبلاغها بالخبرة المكتسبة من استخدامها (كأساس للوائح الوطنية واستعراضات الأمان والدورات التدريبية مثلاً)، بما يكفل أن تبقى هذه المعايير قادرة على تلبية احتياجات المستخدمين ويمكن توفير المعلومات عن طريق موقع الوكالة على شبكة الإنترنت أو بالبريد، كما هو مبين أعلاه، أو بواسطة البريد الإلكتروني على العنوان التالي: Official.Mail@iaea.org.

المنشورات الأخرى المتعلقة بالأمان

تتخذ الوكالة ترتيبات لتطبيق معايير الأمان. وتوفر، بموجب أحكام المادة الثالثة والفقرة جيم من المادة الثامنة من نظامها الأساسي، معلومات بشأن الأنشطة النووية السلمية وتيسر تبادلها وتقوم لهذا الغرض بدور الوسيط بين دولها الأعضاء.

وتصدر التقارير عن الأمان والوقاية في الأنشطة النووية في هيئة تقارير الأمان التي توفر أمثلة عملية وأساليب تفصيلية يمكن استخدامها دعماً لتطبيق معايير الأمان.

وهناك منشورات أخرى تصدرها الوكالة بشأن الأمان وهي: سلسلة تقارير التقييم الإشعاعي، وسلسلة تقارير الفريق الدولي للأمان النووي، وسلسلة التقارير التقنية، وسلسلة الوثائق التقنية. كما تصدر الوكالة تقارير عن الحوادث الإشعاعية وأدلة تدريبية وأدلة عملية ومنشورات خاصة أخرى تتعلق بالأمان. وتصدر النشرات التي تتعلق بالأمن ضمن سلسلة الوكالة الخاصة بالأمن النووي.

الكميات الخطرة من
المواد المشعة
(قيم النويدات المشعة)

تاريخ النشر: شباط/فبراير ٢٠١١

قسم الوكالة الذي تولى مهمة إصدار هذا المنشور هو:

قسم الأمان الإشعاعي وأمان النقل
International Atomic Energy Agency
Wagramer Strasse 5
P.O. Box 100
A-1400 Vienna, Austria

الكميات الخطرة من المواد المشعة (قيم النويدات المشعة)

IAEA, VIENNA, 2011
IAEA-EPR-D-Values (2006)

© الوكالة الدولية للطاقة الذرية، ٢٠١١
طبع بمعرفة الوكالة الدولية للطاقة الذرية في النمسا
شباط/فبراير ٢٠١١

تصدير

تستخدم المواد المشعة على نطاق واسع في الصناعة والطب والتعليم والزراعة. وبالإضافة إلى ذلك فإنها توجد بصورة طبيعية. وتتفاوت المخاطر الصحية التي تشكلها تلك المواد تفاوتاً كبيراً تبعاً لعدة عوامل، أهمها كمية تلك المواد وتركيبها الفيزيائي والكيميائي. ولذلك لا بد من تحديد كمية ونوع المادة المشعة التي تبرر التأهب للطوارئ واتخاذ ترتيبات أخرى (مثل الترتيبات الأمنية) بسبب ما تشكله من خطر على الصحة.

والهدف من هذا المنشور هو توفير إرشادات عملية للدول الأعضاء بشأن كميات المواد المشعة التي قد تعتبر خطيرة. والكمية الخطرة هي الكمية التي يمكن، إذا خرجت عن نطاق السيطرة، أن تؤدي في الحدود المعقولة إلى سيناريو ينطوي على موت الشخص الذي يتعرض لها أو تسبب إصابة دائمة تنتقص من نوعية حياة ذلك الشخص.

وهذا المنشور الذي يصدر ضمن سلسلة وثائق الوكالة بشأن التأهب للطوارئ والتصدي لها، يدعم عدة منشورات، بما في ذلك منشور متطلبات الوكالة بشأن الأمان المعنون "التأهب للطوارئ النووية أو الإشعاعية والتصدي لها"، سلسلة معايير الأمان، رقم GS-R-2.1، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (٢٠٠٢)؛ ودليل الأمان الصادر عن الوكالة بعنوان "تصنيف المصادر المشعة"، سلسلة معايير الأمان، رقم RS-G-1.9، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (٢٠٠٥)، ودليل الأمان المعنون "ترتيبات التأهب للطوارئ النووية أو الإشعاعية"، سلسلة معايير الأمان، رقم GS-G-2.1، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (٢٠٠٦).

وقد روعيت الدقة الواجبة في إعداد الإجراءات والبيانات الواردة في هذا المنشور. على أن هذه الإجراءات والبيانات تخضع لاختبارات مستمرة لضمان جودتها في إطار عملية الاستعراض. وترحب الوكالة بأي تعليقات على هذا المنشور الذي قد تقوم بتنقيحه في إطار عملية التحسين المتواصل بعد انقضاء مدة تسمح بإجراء استعراض أشمل.

ويستخدم في هذا المنشور عدد من سيناريوهات التعرض ونماذج المخاطر وبيانات قياس الجرعات التي يمكن استخدامها في التصدي للطوارئ النووية أو الإشعاعية أو في غير ذلك من الأغراض. على أنه ينبغي عدم القيام بذلك إلا بعد استعراض مادة المنشور ومواءمتها بدقة.

وتعرب الوكالة عن امتنانها للعديد من الخبراء في الدول الأعضاء على ما قدموه من مساهمات في إعداد هذا المنشور. والوكالة ممتنة بشكل خاص لكل من V. Kutkov (معهد خورشاتوف، الاتحاد الروسي) لدوره في وضع النهج القائم على المخاطر؛ و K. Eckerman (مختبر أوك ريدج الوطني في الولايات المتحدة الأمريكية) لدوره في حساب معاملات تحويل الجرعات الخارجية في التذييل الرابع، و B. Dodd (الولايات المتحدة الأمريكية) لما قام به من مراجعة وما أبداه من تعليقات. وموظف الوكالة المسؤول عن إصدار هذا المنشور هو T. Mckenna من شعبة الأمان الإشعاعي وأمان النقل والنفايات.

ملحوظة تحريرية

استخدام مسميات معيّنة للبلدان أو للأقاليم لا ينطوي على أي حكم تقديري من جانب الناشر، أي الوكالة، فيما يخص الوضع القانوني لمثل هذه البلدان أو الأقاليم أو لسلطاتها ومؤسساتها أو لترسيم حدودها. وذكر أسماء شركات أو منتجات معيّنة (سواء أكانت مبيّنة باعتبارها مسجلة أم لا) لا ينطوي على أية نية للمساس بحقوق الملكية، كما لا ينبغي تفسيره على أنه مصادقة أو توصية من جانب الوكالة.

المحتويات

الصفحة	
١	١ - مقدمة
١	١-١ - الخلفية
١	٢-١ - الهدف
٢	٣-١ - النطاق
٢	٤-١ - هيكل المنشور
٣	٢ - قيم D الموصى بها
١٤	٣ - النظر في الآثار الصحية
١٤	٣-١ - الآثار الصحية القطعية المميّنة
١٥	٣-٢ - الآثار الصحية القطعية غير المميّنة
١٦	٤ - السيناريوهات ومسارات التعرض
١٧	٥ - خصائص المصادر المهمة
١٩	٦ - نُهج حساب قيم D
٢٣	التذييل الأول: المستويات المرجعية والعتبات الحدية للآثار القطعية
٣٩	التذييل الثاني: سيناريوهات تحديد قيم D
٥١	التذييل الثالث: حساب قيم D
٧٦	التذييل الرابع: معاملات تحويل معدل الجرعة الخارجية
٩١	التذييل الخامس: معاملات تحويل جرعة الاستنشاق والغمر والجلد المستخدمة في النهج المبني على الخبرة
	التذييل السادس: معاملات التحويل المستخدمة في النهج القائم على المخاطر للجرعات المأخوذة عن طريق الاستنشاق والابتلاع والغمر والجلد
٩٥	التذييل السابع: تقييم قيم D
١٢١	التذييل الثامن: خصائص المصادر المشعة
١٢٧	المراجع:
١٤٥	التعاريف:
١٥٣	المرفق الأول: الرموز وشكل المؤشرات القياسية
١٥٩	المرفق الثاني: الرموز النوعية
١٦٠	المساهمون في الصياغة والاستعراض
١٦٧	

١ - مقدمة

صدّق مجلس محافظي الوكالة في آذار/مارس ٢٠٠٢ على منشور متطلبات الأمان المعنون "التأهب للطوارئ النووية أو الإشعاعية والتصدي لها" [١] الذي تشاركت في رعايته سبع منظمات دولية ويرسي متطلبات الوصول إلى مستوى كاف من التأهب والتصدي للطوارئ النووية أو الإشعاعية في أي دولة من الدول الأعضاء. ويحدّد المنشور أموراً من بينها متطلبات الطوارئ التي تنطوي على مصدر خطر. وتعرّف المتطلبات المصدر الخطر بأنه "المصدر الذي يمكن، إذا ترك دون رقابة، أن يؤدي إلى تعرض يكفي للتسبب في آثار مؤكدة خطيرة". وتعرّف المتطلبات بعد ذلك الأثر بأنه يكون حتمياً عنيفاً "إذا كان مميتاً أو ينطوي على خطر مميت أو إذا كان يؤدي إلى عجز دائم يحط من نوعية الحياة".

وكان لا بد من وضع تعريف تشغيلي للمصدر الخطير حتى يمكن تطبيق المتطلبات [١]. وهذا التعريف التشغيلي للمصدر الخطير يعرف بأنه قيمة D، وهي كمية المادة المشعة التي يمكن، إذا خرجت عن نطاق السيطرة، أن تسفر عن موت الشخص الذي يتعرض لها أو تسبب إصابة دائمة تنتقص من نوعية حياة ذلك الشخص. ويتضمن المرجعان [٢] و [٣] قيم D لنحو ٦٥ نويده مشعة، ولكنهما لا يتناولان بالتفصيل الأساس الذي تستند إليه هذه القيم. وبالإضافة إلى ذلك فإن قيم D لم تحدد لكل النويدات المشعة التي قد تنطوي على ما يثير القلق. وبالنظر إلى الحاجة إلى تصنيف المصادر المشعة على أساس دورها المحتمل في إحداث آثار صحية قطعية، استخدمت قيم D أيضاً كعوامل تعبيرية للحصول على الترتيب النسبي العددي للمصادر والممارسات. ولذلك استخدمت قيم D الواردة في المرجع [٢] باعتبارها الأساس الذي يستند إليه نظام الوكالة في تصنيف المصادر المشعة [٤] الذي ترد أجزاء منه في مدونة قواعد السلوك بشأن أمان المصادر الإشعاعية وأمنها [٥].

١-١ - الخلفية

تستخدم مجموعة من سيناريوهات التعرض عند تحديد قيم D، وتراعى احتمالات ازدياد خطورة المصادر بمرور الوقت (أي في مرحلة لاحقة من عمرها) بسبب النمو الداخلي لنواتجها. على أن قيم D يعبّر عنها من حيث نشاط النويدات المشعة الأم قبل اضمحلالها، أي عند تصنيعها.

وقد ينشأ عن التحفظ الشديد في تحديد قيم D اتخاذ إجراءات واستعمال موارد دون مبرر، وقد يعطي ذلك صناع القرار وعامة الجمهور تصوراً غير واقعي عن المخاطر. ولذلك فإن حساب قيم D يستند إلى تقديرات واقعية (وليست تقديرات متحفظة أكثر مما ينبغي) للخطر الذي تشكله المادة المشعة إذا خرجت عن نطاق السيطرة.

وينبغي ملاحظة الخطر المحتمل الذي يمكن أن تنطوي عليه كميات المواد التي تقل عن قيم D المحددة في هذا التقرير. ويمكن أن يحدث ذلك في حالة ابتلاع مادة مشعة عمداً أو عندما يعرض شخص نفسه عمداً لمصدر مشع. ويتضمن المرجعان [٢] و [٤] شرحاً مبسطاً للمخاطر المرتبطة بمختلف مضاعفات قيم D.

١-٢ - الهدف

يهدف هذا المنشور إلى تقديم وصف تفصيلي للأساس الذي يستند إليه حساب قيم D الواردة في المراجع [٢] و [٣] و [٤] وتوفير مجموعة موسعة من قيم D للنويدات المشعة الأخرى التي قد تنطوي على أهمية في حالات الطوارئ النووية أو الإشعاعية.

٣-١- النطاق

يعرض المنشور قيم D للنويدات المشعة غير المشتتة (قيم D_1) وقيم D للنويدات المشعة المشتتة (قيم D_2) التي قد تهم في حالة وقوع طوارئ نووية أو إشعاعية. وهذه القائمة تشمل النويدات المشعة التي تتناولها لائحة النقل [٦] بعد توسيعها لتشمل نواتج الانشطارات المهمة والمواد الانشطارية الممكنة. ويتناول التقرير أثر التعرض الخارجي (البعيد والقريب) للمواد غير المشتتة. وفيما يتعلق بالمواد المشعة المشتتة، يتناول التقرير المخاطر التي ينطوي عليها الأخذ الداخلي لمواد مشعة مشتتة بدون قصد عن طريق شرب مياه ملوثة أو عن طريق الاستنشاق، بالإضافة إلى الأخطار الناجمة عن إصابة الجلد بالتلوث. وفيما يتعلق بالغازات الخاملة، يقتصر التقرير على تناول التعرض الخارجي عن طريق الغمر.

٤-١- هيكل المنشور

يتضمن القسم الثاني قائمة بقيم D الموصى بها. ويرد في الأقسام الثالث والرابع والخامس ملخص للأساس الذي يتحدد تبعاً له حدوث آثار صحية وسيناريوهات وخصائص المواد المشعة التي يتناولها التقرير. ويبين القسم السادس النهج المستخدمة في حساب قيم D.

وتتضمن التذييلات معلومات عن قيم D والأساس التقني الذي يستند إليه اشتقاقها. ويبين التذييل الأول المستويات المرجعية والدنيا التي يبدأ عندها حدوث الآثار القطعية. ويعرض التذييل الثاني سيناريوهات تحديد قيم D. ويتضمن التذييل الثالث وصفاً تفصيلياً للنهج المستخدمة في تحديد قيم D. وتتناول التذييلات الرابع والخامس والسادس معاملات تحويل جرعات التعرض للإشعاع الخارجي والداخلي والأساس الذي يستند إليه ذلك. ويشمل هذا التقييم مقارنة بين قيم D الموصى بها ونشاط المصادر المشعة في حالات الطوارئ الإشعاعية. ويتضمن التذييل الثامن الخصائص النووية الأساسية للنويدات المشعة، كما يتناول بالوصف النهج المستخدم في دراسة الاضمحلال الإشعاعي والنمو الداخلي للنواتج.

ويتضمن المرفقان الأول والثاني إرشادات بشأن الرموز المستخدمة في التقرير.

٢- قيم D الموصى بها

لأغراض تحديد قيم D، تنقسم سيناريوهات التعرض المستخدمة إلى مجموعتين، إحداهما للمواد غير المشتتة والأخرى للمواد المشتتة. وترد قيم عددية مختلفة لكل مجموعة من هاتين المجموعتين:

- (أ) قيمة D_1 هي نشاط^١ نويدة مشعة في مصدر قد يسفر، إذا خرج عن نطاق السيطرة ولكنه لم يتشتت (أي إذا ظل مغلفاً)، عن حالة طوارئ يمكن أن ينشأ عنها في حدود التوقعات المعقولة آثار صحية قطعية عنيفة؛
- (ب) قيمة D_2 هي نشاط^١ نويدة مشعة في مصدر قد يسفر، إذا خرج عن نطاق السيطرة وتشتت، عن حالة طوارئ يمكن أن تنشأ عنها في حدود التوقعات المعقولة آثار صحية قطعية عنيفة.
- (ج) قيمة D لنويدة مشعة هي أقل قيمة للقيمتين D_1 و D_2 .

ويتضمن الجدول ١ قيم D_1 و D_2 و D الموصى بها.

الجدول ١: قيم D الموصى بها

قيمة D_2	قيمة D_1	قيمة D	النويدة المشعة ^١
(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	
^٢ 2.E+03	UL ^٣	2.E+03	H-3
1.E+03	1.E+00	1.E+00	Be-7
3.E+01	3.E+02	3.E+01	Be-10
4.E+02	6.E-02	6.E-02	C-11
5.E+01	2.E+05	5.E+01	C-14
UL	6.E-02	6.E-02	N-13
3.E+01	6.E-02	6.E-02	F-18
2.E+01	3.E-02	3.E-02	Na-22
2.E+01	2.E-02	2.E-02	Na-24
1.E+01	2.E-02	2.E-02	Mg-28
5.E+00	3.E-02	3.E-02	Al-26
2.E+01	1.E+01	1.E+01	Si-31
7.E+00	1.E+01	7.E+00	Si-32+
2.E+01	1.E+01	1.E+01	P-32
2.E+02	7.E+03	2.E+02	P-33
6.E+01	4.E+04	6.E+01	S-35
^٢ 2.E+01	3.E+02	^٢ 2.E+01	Cl-36
1.E+01	5.E-02	5.E-02	Cl-38
^٤ UL	UL	^٤ UL	Ar-37
3.E+04	3.E+02	3.E+02	Ar-39
^٢ 3.E+00	5.E-02	5.E-02	Ar-41

١ يراعى احتمال ازدياد خطورة المصادر في وقت لاحق من عمرها (خلال مدة تصل إلى ١٠ سنوات) بسبب النمو الداخلي لنواتجها؛ على أن قيم D يعبر عنها من حيث نشاط النويدات المشعة الأم قبل اضمحلالها، أي عند تصنيعها على النحو المبين في التذييل الثامن.

قيمة D ₂	قيمة D ₁	قيمة D	النويدات المشعة ^أ
(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	
^أ UL	UL	^أ UL	K-40
1.E+01	2.E-01	2.E-01	K-42
3.E+01	7.E-02	7.E-02	K-43
^أ UL	UL	^أ UL	Ca-41
1.E+02	6.E+03	1.E+02	Ca-45
1.E+01	6.E-02	6.E-02	Ca-47+
1.E+01	3.E-02	3.E-02	Sc-44
4.E+01	3.E-02	3.E-02	Sc-46
8.E+01	7.E-01	7.E-01	Sc-47
3.E+01	2.E-02	2.E-02	Sc-48
9.E+00	3.E-02	3.E-02	Ti-44+
3.E+01	2.E-02	2.E-02	V-48
2.E+03	UL	2.E+03	V-49
5.E+03	2.E+00	2.E+00	Cr-51
2.E+01	2.E-02	2.E-02	Mn-52
^أ UL	UL	^أ UL	Mn-53
4.E+01	8.E-02	8.E-02	Mn-54
2.E+01	4.E-02	4.E-02	Mn-56
9.E+00	2.E-02	2.E-02	Fe-52+
8.E+02	UL	8.E+02	Fe-55
1.E+01	6.E-02	6.E-02	Fe-59
^ب 1.E+01	6.E-02	6.E-02	Fe-60+
2.E+02	3.E-02	3.E-02	Co-55+
2.E+01	2.E-02	2.E-02	Co-56
4.E+02	7.E-01	7.E-01	Co-57
7.E+01	7.E-02	7.E-02	Co-58
2.E+02	7.E-02	7.E-02	Co-58m+
3.E+01	3.E-02	3.E-02	Co-60
^ب 1.E+03	UL	^ب 1.E+03	Ni-59
6.E+01	UL	6.E+01	Ni-63
2.E+01	1.E-01	1.E-01	Ni-65
4.E+01	3.E-01	3.E-01	Cu-64
3.E+02	7.E-01	7.E-01	Cu-67
3.E+02	1.E-01	1.E-01	Zn-65
3.E+01	8.E+01	3.E+01	Zn-69
2.E+01	2.E-01	2.E-01	Zn-69m+
4.E+02	5.E-01	5.E-01	Ga-67
1.E+01	7.E-02	7.E-02	Ga-68
2.E+01	3.E-02	3.E-02	Ga-72
2.E+01	7.E-02	7.E-02	Ge-68+

قيمة D ₂	قيمة D ₁	قيمة D	النوييدة المشعة ^أ
(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	
1.E+03	6.E+05	1.E+03	Ge-71
1.E+01	6.E-02	6.E-02	Ge-77+
9.E+01	4.E-02	4.E-02	As-72
1.E+02	4.E+01	4.E+01	As-73
3.E+01	9.E-02	9.E-02	As-74
1.E+01	2.E-01	2.E-01	As-76
4.E+01	8.E+00	8.E+00	As-77
2.E+02	2.E-01	2.E-01	Se-75
2.E+02	UL	2.E+02	Se-79
2.E+02	3.E-02	3.E-02	Br-76
7.E+02	2.E-01	2.E-01	Br-77
7.E+01	3.E-02	3.E-02	Br-82
7.E+02	3.E+01	3.E+01	Kr-81
2.E+03	3.E+01	3.E+01	Kr-85
3.E+01	5.E-01	5.E-01	Kr-85m
4.E+00	9.E-02	9.E-02	Kr-87
2.E+03	1.E-01	1.E-01	Rb-81
5.E+01	1.E-01	1.E-01	Rb-83
2.E+01	7.E-02	7.E-02	Rb-84
2.E+01	7.E-01	7.E-01	Rb-86
^أ UL	UL	^أ UL	Rb-87
5.E+00	6.E-02	6.E-02	Sr-82
7.E+01	1.E-01	1.E-01	Sr-85
3.E+02	1.E-01	1.E-01	Sr-85m+
9.E+01	2.E-01	2.E-01	Sr-87m
2.E+01	2.E+01	2.E+01	Sr-89
1.E+00	4.E+00	1.E+00	Sr-90+
2.E+01	6.E-02	6.E-02	Sr-91+
1.E+01	4.E-02	4.E-02	Sr-92+
2.E+02	9.E-02	9.E-02	Y-87+
2.E+01	3.E-02	3.E-02	Y-88
1.E+01	5.E+00	5.E+00	Y-90
2.E+01	8.E+00	8.E+00	Y-91
2.E+02	1.E-01	1.E-01	Y-91m+
1.E+01	2.E-01	2.E-01	Y-92
1.E+01	6.E-01	6.E-01	Y-93
3.E+01	2.E-02	2.E-02	Zr-88+
^أ UL	UL	^أ UL	Zr-93+
1.E+01	4.E-02	4.E-02	Zr-95+
9.E+00	4.E-02	4.E-02	Zr-97+

قيمة D ₂	قيمة D ₁	قيمة D	النويدات المشعة ^أ
(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	
3.E+02	2.E+03	3.E+02	Nb-93m
³ 3.E+01	4.E-02	4.E-02	Nb-94
6.E+01	9.E-02	9.E-02	Nb-95
2.E+01	1.E-01	1.E-01	Nb-97
³ 3.E+02	2.E+03	³ 3.E+02	Mo-93+
2.E+01	3.E-01	3.E-01	Mo-99+
6.E+01	1.E-01	1.E-01	Tc-95m
3.E+01	3.E-02	3.E-02	Tc-96
2.E+02	3.E-02	3.E-02	Tc-96m+
^أ UL	UL	^أ UL	Tc-97
4.E+01	2.E+02	4.E+01	Tc-97m
³ 1.E+01	5.E-02	5.E-02	Tc-98
3.E+01	UL	3.E+01	Tc-99
7.E+02	7.E-01	7.E-01	Tc-99m
5.E+02	3.E-01	3.E-01	Ru-97
3.E+01	1.E-01	1.E-01	Ru-103+
2.E+01	8.E-02	8.E-02	Ru-105+
1.E+01	3.E-01	3.E-01	Ru-106+
1.E+02	1.E-01	1.E-01	Rh-99
1.E+02	3.E-01	3.E-01	Rh-101
3.E+01	3.E-02	3.E-02	Rh-102
4.E+01	1.E-01	1.E-01	Rh-102m
1.E+04	9.E+02	9.E+02	Rh-103m
8.E+01	9.E-01	9.E-01	Rh-105
1.E+02	9.E+01	9.E+01	Pd-103+
^أ UL	UL	^أ UL	Pd-107
2.E+01	2.E+01	2.E+01	Pd-109
1.E+02	1.E-01	1.E-01	Ag-105
2.E+01	4.E-02	4.E-02	Ag-108m
2.E+01	2.E-02	2.E-02	Ag-110m
3.E+01	2.E+00	2.E+00	Ag-111
3.E+01	2.E+01	2.E+01	Cd-109
4.E+01	4.E+02	4.E+01	Cd-113m
2.E+01	2.E-01	2.E-01	Cd-115+
2.E+01	3.E+00	3.E+00	Cd-115m
1.E+02	2.E-01	2.E-01	In-111
5.E+01	3.E-01	3.E-01	In-113m
1.E+00	8.E-01	8.E-01	In-114m
3.E+01	4.E-01	4.E-01	In-115m
5.E+01	3.E-01	3.E-01	Sn-113+

قيمة D ₂	قيمة D ₁	قيمة D	النويدات المشعة ^أ
(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	
4.E+01	5.E-01	5.E-01	Sn-117m
1.E+02	7.E+01	7.E+01	Sn-119m
7.E+01	1.E+02	7.E+01	Sn-121m+
2.E+01	7.E+00	7.E+00	Sn-123
8.E+00	1.E-01	1.E-01	Sn-125
^ب 7.E+00	3.E-02	3.E-02	Sn-126+
2.E+01	1.E-01	1.E-01	Sb-122
1.E+01	4.E-02	4.E-02	Sb-124
3.E+01	2.E-01	2.E-01	Sb-125+
2.E+01	2.E-02	2.E-02	Sb-126
3.E+01	1.E-01	1.E-01	Te-121
8.E+00	1.E-01	1.E-01	Te-121m+
9.E+00	6.E-01	6.E-01	Te-123m
1.E+01	2.E+01	1.E+01	Te-125m
4.E+01	1.E+01	1.E+01	Te-127
3.E+00	1.E+01	3.E+00	Te-127m+
2.E+01	1.E+00	1.E+00	Te-129
2.E+00	1.E+00	1.E+00	Te-129m+
2.E-01	4.E-02	4.E-02	Te-131m+
8.E-01	3.E-02	3.E-02	Te-132+
3.E+01	5.E-01	5.E-01	I-123
4.E-01	6.E-02	6.E-02	I-124
2.E-01	1.E+01	2.E-01	I-125
2.E-01	1.E-01	1.E-01	I-126
^ج UL	UL	^د UL	I-129
2.E-01	2.E-01	2.E-01	I-131
6.E+00	3.E-02	3.E-02	I-132
3.E-01	1.E-01	1.E-01	I-133
2.E+01	3.E-02	3.E-02	I-134
2.E+00	4.E-02	4.E-02	I-135
4.E+00	6.E-02	6.E-02	Xe-122
5.E+00	9.E-02	9.E-02	Xe-123+
2.E+01	3.E-01	3.E-01	Xe-127
7.E+02	1.E+01	1.E+01	Xe-131m
2.E+02	3.E+00	3.E+00	Xe-133
2.E+01	3.E-01	3.E-01	Xe-135
1.E+03	3.E-01	3.E-01	Cs-129
2.E+03	2.E+01	2.E+01	Cs-131
1.E+02	1.E-01	1.E-01	Cs-132
3.E+01	4.E-02	4.E-02	Cs-134

قيمة D ₂	قيمة D ₁	قيمة D	النويدات المشعة ^أ
(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	
1.E+04	4.E-02	4.E-02	Cs-134m+
^أ UL	UL	^أ UL	Cs-135
2.E+01	3.E-02	3.E-02	Cs-136
2.E+01	1.E-01	1.E-01	Cs-137+
1.E+02	2.E-01	2.E-01	Ba-131+
7.E+01	2.E-01	2.E-01	Ba-133
2.E+02	3.E-01	3.E-01	Ba-133m
1.E+01	3.E-02	3.E-02	Ba-140+
^ب 5.E+02	2.E+01	2.E+01	La-137
2.E+01	3.E-02	3.E-02	La-140
2.E+02	6.E-01	6.E-01	Ce-139
2.E+01	1.E+00	1.E+00	Ce-141
1.E+01	3.E-01	3.E-01	Ce-143+
9.E+00	9.E-01	9.E-01	Ce-144+
2.E+01	1.E+00	1.E+00	Pr-142
3.E+01	8.E+01	3.E+01	Pr-143
4.E+01	6.E-01	6.E-01	Nd-147+
1.E+01	2.E-01	2.E-01	Nd-149+
2.E+02	2.E-01	2.E-01	Pm-143
3.E+01	4.E-02	4.E-02	Pm-144
4.E+02	1.E+01	1.E+01	Pm-145
4.E+01	8.E+03	4.E+01	Pm-147
3.E+01	3.E-02	3.E-02	Pm-148m
2.E+01	6.E+00	6.E+00	Pm-149
3.E+01	2.E-01	2.E-01	Pm-151
2.E+02	4.E+00	4.E+00	Sm-145+
^أ UL	UL	^أ UL	Sm-147
5.E+02	UL	5.E+02	Sm-151
4.E+01	2.E+00	2.E+00	Sm-153
1.E+02	2.E-01	2.E-01	Eu-147
3.E+01	3.E-02	3.E-02	Eu-148
5.E+02	2.E+00	2.E+00	Eu-149
3.E+01	2.E+00	2.E+00	Eu-150b
4.E+02	5.E-02	5.E-02	Eu-150a
3.E+01	6.E-02	6.E-02	Eu-152
2.E+01	2.E-01	2.E-01	Eu-152m
2.E+01	6.E-02	6.E-02	Eu-154
1.E+02	2.E+00	2.E+00	Eu-155
3.E+01	5.E-02	5.E-02	Eu-156
8.E+00	3.E-02	3.E-02	Gd-146+

قيمة D ₂	قيمة D ₁	قيمة D	النويدات المشعة ^أ
(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	
4.E-01	UL	4.E-01	Gd-148
8.E+01	1.E+00	1.E+00	Gd-153
3.E+01	2.E+00	2.E+00	Gd-159
³ 1.E+03	1.E+02	1.E+02	Tb-157
³ 5.E+01	9.E-02	9.E-02	Tb-158
3.E+01	6.E-02	6.E-02	Tb-160
5.E+02	6.E+00	6.E+00	Dy-159
2.E+01	3.E+00	3.E+00	Dy-165
2.E+01	1.E+00	1.E+00	Dy-166+
2.E+01	2.E+00	2.E+00	Ho-166
³ 3.E+01	4.E-02	4.E-02	Ho-166m
2.E+02	2.E+03	2.E+02	Er-169
2.E+01	2.E-01	2.E-01	Er-171
2.E+02	6.E-01	6.E-01	Tm-167
2.E+01	2.E+01	2.E+01	Tm-170
4.E+02	3.E+02	3.E+02	Tm-171
3.E+01	3.E-01	3.E-01	Yb-169
1.E+02	2.E+00	2.E+00	Yb-175
6.E+01	4.E-02	4.E-02	Lu-172
2.E+02	9.E-01	9.E-01	Lu-173
1.E+02	8.E-01	8.E-01	Lu-174
6.E+01	6.E-01	6.E-01	Lu-174m+
1.E+02	2.E+00	2.E+00	Lu-177
6.E+00	4.E-02	4.E-02	Hf-172+
3.E+01	2.E-01	2.E-01	Hf-175
1.E+01	1.E-01	1.E-01	Hf-181
^أ UL	5.E-02	5.E-02	Hf-182+
4.E+03	7.E-02	7.E-02	Ta-178a
6.E+02	6.E+00	6.E+00	Ta-179
3.E+01	6.E-02	6.E-02	Ta-182
6.E+02	9.E-01	9.E-01	W-178
2.E+03	5.E+00	5.E+00	W-181
1.E+02	7.E+02	1.E+02	W-185
3.E+01	1.E-01	1.E-01	W-187
8.E+00	1.E+00	1.E+00	W-188+
3.E+01	8.E-02	8.E-02	Re-184
2.E+01	7.E-02	7.E-02	Re-184m+
1.E+01	4.E+00	4.E+00	Re-186
^أ UL	UL	^أ UL	Re-187
3.E+01	1.E+00	1.E+00	Re-188

قيمة D ₂	قيمة D ₁	قيمة D	النويدات المشعة ^أ
(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	
1.E+01	1.E+00	1.E+00	Re-189
7.E+01	1.E-01	1.E-01	Os-185
9.E+01	2.E+00	2.E+00	Os-191
7.E+02	1.E+00	1.E+00	Os-191m+
3.E+01	1.E+00	1.E+00	Os-193
9.E+00	7.E-01	7.E-01	Os-194+
2.E+02	1.E+00	1.E+00	Ir-189
6.E+01	5.E-02	5.E-02	Ir-190
2.E+01	8.E-02	8.E-02	Ir-192
2.E+01	7.E-01	7.E-01	Ir-194
9.E+01	4.E-02	4.E-02	Pt-188+
3.E+02	3.E-01	3.E-01	Pt-191
3.E+03	1.E+05	3.E+03	Pt-193
4.E+02	1.E+01	1.E+01	Pt-193m
3.E+02	2.E+00	2.E+00	Pt-195m
5.E+01	4.E+00	4.E+00	Pt-197
2.E+01	9.E-01	9.E-01	Pt-197m+
1.E+03	6.E-01	6.E-01	Au-193
4.E+02	7.E-02	7.E-02	Au-194
1.E+02	2.E+00	2.E+00	Au-195
3.E+01	2.E-01	2.E-01	Au-198
3.E+02	9.E-01	9.E-01	Au-199
9.E+00	7.E-02	7.E-02	Hg-194+
1.E+01	2.E-01	2.E-01	Hg-195m+
3.E+01	2.E+00	2.E+00	Hg-197
2.E+01	7.E-01	7.E-01	Hg-197m+
2.E+00	3.E-01	3.E-01	Hg-203
2.E+02	5.E-02	5.E-02	Tl-200
1.E+03	1.E+00	1.E+00	Tl-201
2.E+02	2.E-01	2.E-01	Tl-202
2.E+01	7.E+01	2.E+01	Tl-204
8.E+02	9.E-02	9.E-02	Pb-201+
6.E+01	2.E-01	2.E-01	Pb-202+
2.E+02	2.E-01	2.E-01	Pb-203
^أ UL	UL	^أ UL	Pb-205
3.E-01	4.E+01	3.E-01	Pb-210+
9.E+00	5.E-02	5.E-02	Pb-212+
7.E+01	4.E-02	4.E-02	Bi-205
5.E+01	2.E-02	2.E-02	Bi-206
4.E+01	5.E-02	5.E-02	Bi-207

قيمة D ₂	قيمة D ₁	قيمة D	النوييدة المشعة ^أ
(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	
8.E+00	5.E+01	8.E+00	Bi-210+
3.E-01	6.E-01	3.E-01	Bi-210m
1.E+01	5.E-02	5.E-02	Bi-212+
6.E-02	8.E+03	6.E-02	Po-210
1.E+01	5.E-01	5.E-01	At-211
⁹ 9.E+04	4.E-02	4.E-02	Rn-222
1.E-01	2.E-01	1.E-01	Ra-223+
3.E-01	5.E-02	5.E-02	Ra-224+
1.E-01	3.E-01	1.E-01	Ra-225+
7.E-02	4.E-02	4.E-02	Ra-226+
4.E-02	3.E-02	3.E-02	Ra-228+
9.E-02	3.E-01	9.E-02	Ac-225
4.E-02	2.E-01	4.E-02	Ac-227+
1.E+02	3.E-02	3.E-02	Ac-228
8.E-02	2.E-01	8.E-02	Th-227+
4.E-02	5.E-02	4.E-02	Th-228+
1.E-02	2.E-01	1.E-02	Th-229+
⁷ 7.E-02	9.E+02	⁷ 7.E-02	Th-230+
3.E+02	1.E+01	1.E+01	Th-231
^أ UL	UL	^أ UL	Th-232+
2.E+00	2.E+00	2.E+00	Th-234+
9.E-01	1.E-01	1.E-01	Pa-230+
6.E-02	8.E-01	6.E-02	Pa-231+
8.E+00	4.E-01	4.E-01	Pa-233
4.E-02	4.E+00	4.E-02	U-230+
⁶ 6.E-02	7.E-02	⁶ 6.E-02	U-232+
⁷ 7.E-02	⁷ 7.E-02	⁷ 7.E-02	U-233
¹ 1.E-01	¹ 1.E-01	¹ 1.E-01	U-234+
⁸ 8.E-05	⁸ 8.E-05	⁸ 8.E-05	U-235+
² 2.E-01	UL	² 2.E-01	U-236
^أ UL	UL	^أ UL	U-238+
^أ UL	UL	^أ UL	U Natural
^أ UL	UL	^أ UL	U Depleted
⁸ 8E-04	⁸ 8E-04	⁸ 8E-04	U Enriched 10-20%
⁸ 8E-05	⁸ 8E-05	⁸ 8E-05	U Enriched >20 %
2.E+02	1.E+02	1.E+02	Np-235
⁷ 7.E-03	⁷ 7.E-03	7.E-03	Np-236b+
7.E+00	8.E-01	8.E-01	Np-236a
⁷ 7.E-02	³ 3.E-01	7.E-02	Np-237+
6.E+01	5.E-01	5.E-01	Np-239

قيمة D ₂	قيمة D ₁	قيمة D	النوييدة المشعة ^أ
(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	(تيرا بكريل)	
1.E-01	1.E+00	1.E-01	Pu-236
6.E+01	2.E+00	2.E+00	Pu-237
6.E-02	³ 3.E+02	6.E-02	Pu-238
6.E-02	³ 1.E+00	6.E-02	Pu-239
6.E-02	³ 4.E+00	6.E-02	Pu-240
3.E+00	³ 2.E+03	3.E+00	Pu-241+
^{3, 2} 7.E-02	^{3, 2} 7.E-02	^{3, 2} 7.E-02	Pu-242
^{3, 2} 3.E-04	³ 3.E-04	^{3, 2} 3.E-04	Pu-244+
6.E-02	8.E+00	6.E-02	Am-241
3.E-01	³ 1.E+00	3.E-01	Am-242m+
2.E-01	4.E-01	2.E-01	Am-243+
9.E+01	9.E-02	9.E-02	Am-244
3.E-01	1.E+00	3.E-01	Cm-240
7.E+00	1.E-01	1.E-01	Cm-241+
4.E-02	2.E+03	4.E-02	Cm-242
2.E-01	6.E-01	2.E-01	Cm-243
5.E-02	³ 1.E+04	5.E-02	Cm-244
⁹ 9.E-02	⁹ 9.E-02	⁹ 9.E-02	Cm-245
2.E-01	³ 6.E+00	2.E-01	Cm-246
³ 1.E-03	³ 1.E-03	³ 1.E-03	Cm-247
² 7.E-02	5.E-03	5.E-03	Cm-248
³ 8.E-02	³ 8.E-02	8.E-02	Bk-247
4.E+01	1.E+01	1.E+01	Bk-249
1.E-01	³ 1.E+02	1.E-01	Cf-248+
1.E-01	2.E-01	1.E-01	Cf-249
1.E-01	4.E-01	1.E-01	Cf-250
1.E-01	7.E-01	1.E-01	Cf-251
1.E-01	2.E-02	2.E-02	Cf-252
4.E-01	1.E+01	4.E-01	Cf-253
2.E-03	3.E-04	3.E-04	Cf-254
² 6.E-02	^{3, 2} 1.E+00	² 6.E-02	²³⁹ Pu/ ⁹ Be
² 6.E-02	² 1.E+00	² 6.E-02	²⁴¹ Am/ ⁹ Be

أ أخذت نواتج النمو الداخلي المشعة في الاعتبار عند حساب قيم D لكل النويدات المشعة كما هو مبين في التذييل الثامن. وتشير علامة "+" إلى النويدات المشعة التي تشكل نواتجها مصادر ملموسة للجرعة في السيناريوهات موضوع الدراسة.

ب "UL" هي كمية غير محدودة كما هو محدد في التذييل الثاني.

ج ضعف الجزء الكسري المأخوذ من الهيدروجين-3 لمراعاة امتصاص المادة المشتتة عن طريق الجلد. واستند هذا الافتراض المتحفظ إلى البيانات الواردة في المنشور رقم ٧١ الصادر عن اللجنة الدولية للوقاية من الإشعاعات [7] التي

تشير إلى أن الامتصاص من خلال الجلد في حالة حدوث تلوث جوي بماء معالج بالترينيوم يسهم بنحو ثلث الأخذ الداخلي عن طريق الاستنشاق.

- د قد تؤدي الطوارئ التي تنطوي على هذه المقادير من النويدات المشعة إلى تركيزات عالقة في الهواء تتجاوز المستوى الذي يفترض أنه يمثل خطراً مباشراً يهدد الحياة أو الصحة. انظر التذييل الثامن لمزيد من التفاصيل.
- هـ قد تؤدي حالات الطوارئ التي تنطوي على مقادير كبيرة من تلك النويدات المشعة إلى تركيزات عالقة في الهواء تتجاوز المستوى الذي يفترض أنه يشكل خطراً مباشراً على الحياة أو الصحة. انظر التذييل الثامن لمزيد من التفاصيل.
- و أخذت حدود الحرجية في الحساب عند اشتقاق قيمة D. انظر التذييل الثامن لمزيد من التفاصيل.
- ز نشاط النويده المشعة المبعثة لأشعة ألفا، مثل البلوتونيوم-٢٣٩ أو الأميريشيوم-٢٤١.

٣- النظر في الآثار الصحية

قيمة D هي كمية المادة المشعة التي يمكن، إذا خرجت عن نطاق السيطرة، أن تسفر عن موت الشخص الذي يتعرض لها أو تسبب إصابة دائمة تنتقص من نوعية حياة ذلك الشخص. ويُشار إلى هذه الآثار الصحية بأنها آثار صحية قطعية عنيفة. وتحدث الآثار القطعية العنيفة في العادة بعد وقت قصير من التعرض. وتزداد شدة تلك الآثار كلما ازدادت الجرعة التي يتلقاها الشخص، وهناك عتبة فعالة إذا انخفضت الجرعة عنها لا تحدث تلك الآثار على الإطلاق.

وأخذ في الحسبان نوعان من الآثار الصحية القطعية العنيفة عند حساب قيم D، هما الآثار المميّنة والآثار غير المميّنة:

- (أ) الآثار المميّنة هي الآثار التي يمكن إن حدثت أن تفضي إلى الموت. وتكشف الخبرة [٨، ٩] والبحوث عن أن حالات الوفاة الناجمة عن التعرض للإشعاع تنشأ في نهاية المطاف عن فشل في عدة أعضاء في الجسم. على أن الأعضاء والأنسجة التي يتناولها التقرير اختيرت لأن الضرر الذي يصيبها يعد حرجاً في كل حالات الطوارئ الإشعاعية أو النووية، أي أن إبقاء جرعة تعرض تلك الأعضاء دون عتبة الجرعة لا بد وأن يحول دون وفاة الشخص المعرض.
- (ب) الآثار غير المميّنة هي الآثار التي تنتقص من نوعية الحياة وتحدث في عضو أو نسيج معيّن.

وبيين التذييل الأول عتبات الجرعات أو قيمها المرجعية المستخدمة للإشارة إلى الحالات التي يمكن فيها توقع حدوث آثار قطعية عنيفة، وأساليب قياس الجرعات المستخدمة في حساب الجرعة في مختلف سيناريوهات التعرض.

٣-١- الآثار الصحية القطعية المميّنة

النخاع الأحمر والقولون. تعرض النخاع الأحمر (نظام الدم) أو القولون (الجهاز الهضمي) للإشعاع يمكن أن يسفر عن آثار تشكل تهديداً للحياة أو تفضي إلى الموت. ويمكن أن ينشأ ذلك عن تعرض الجسم بأكمله للإشعاع من مصدر خارجي أو من التعرض الداخلي بعد الابتلاع أو الاستنشاق. والآثار التي تصيب النخاع الأحمر بسبب التعرض الخارجي هي الآثار الحرجة. والآثار التي تنشأ عن الإشعاع في النخاع الأحمر أو القولون بعد الابتلاع قد تكون حرجة تبعاً للنويده المشعة وشكلها الفيزيائي.

مناطق الرئة. تعرض الرئة للإشعاع من معظم النويدات المشعة يكون حرجاً بعد الاستنشاق، ولكن ذلك قد يتوقف على الشكل الفيزيائي للمادة المستنشقة (مثل قابليتها للذوبان). ويمكن أن يؤدي تعرض الرئة للإشعاع إلى أثر قاتل (التهاب الرئة) فضلاً عن آثار تنتقص من نوعية الحياة (تليف الرئة). ويفترض هنا أن الإصابة بالتليف الرئوي تفضي إلى الموت في نهاية المطاف.

مناطق الجلد. تظهر الأعراض الإكلينيكية للآثار القطعية التي تنشأ عن تعرض الجلد للإشعاع في شكل التهابات جلدية يمكن أن يعقبها تساقط للشعر وظهور قشور جافة أو رطبة وتكون بثور وتقرحات ونخر تبعاً للجرعة التي يتلقاها الشخص. ولا يعتبر التهاب الجلد أثراً قطعياً عنيفاً. وأما ظهور قشور رطبة وحدث أضرار أشد بعد ذلك في الجلد فهما من الآثار القطعية العنيفة. ولا تتوقف شدة الإصابة على الجرعة ونوع الإشعاع فحسب، بل وكذلك على مكان ومساحة المنطقة المعرضة. ويعتبر ظهور قشور رطبة في مساحة كبيرة (أكثر من ١٠٠ سم^٢) من الآثار التي يمكن أن تفضي إلى الوفاة، وبخاصة إذا اقترنت بإصابات أو بأشكال أخرى من التعرض مثلما حدث للإطفائيين في حادث تشرنوبل.

٣-٢- الآثار الصحية القطعية غير المميتة

الأنسجة الرخوة. يمكن أن يسبب التعرض الخارجي للإشعاع من مصدر يحمله الشخص في يده أو جيبه نخرًا موضعياً (موت الأنسجة)، وهو من أكثر الأسباب شيوعاً للآثار الصحية القطعية العنيفة المستحثة بالإشعاع من مصادر مشعة (مسروقة أو مفقودة) غير خاضعة للسيطرة. وفي حين أن النخر الموضعي في الأنسجة الرخوة لا يشكل في العادة تهديداً للحياة فإنه يمكن أن يتسبب في فقد وظيفة العضو (مثل اليد) أو حدوث إصابات تتطلب جراحة بنائية. وتشير التجارب الإكلينيكية السابقة في معالجة إصابات الأنسجة الرخوة إلى أن النخر الذي يصيب منطقة تتراوح مساحتها بين ٥٠ و ١٠٠ سم^٢ بعمق ٥,٥ سنتيمتر تتطلب عمليات جراحية متعددة وهو بذلك يعد أثراً صحياً قطعياً عنيفاً. وتكشف التجربة أيضاً عن أن حدوث نخر بعمق يتراوح بين ٠,٢ و ٠,١ سنتيمتر في اليد يمكن أن يفضي إلى فقد وظائفها، ولذلك يعتبر أثراً صحياً قطعياً عنيفاً.

الغدة الدرقية. تشمل أمثلة الآثار الصحية القطعية بعد تشعيع الغدة الدرقية التهاب الغدة الدرقية الإشعاعي الحاد (يتميز بالتهاب ونخر في أنسجة الغدة الدرقية) وقصور الغدة الدرقية (حالة أيضية غير طبيعية ناتجة عن عدم إفراز كميات كافية من هرمونات الغدة الدرقية اللازمة للوظائف الفسيولوجية الطبيعية). وهذه الآثار غير مميتة في العادة إذا عولجت بطريقة سليمة. على أن هذا العلاج يتطلب في كثير من الأحيان تعاطي عقاقير بديلة عن هرمون الغدة الدرقية مدى الحياة. ولذلك فإن إصابات الغدة الدرقية المستحثة بالإشعاع تعد أثراً صحياً قطعياً عنيفاً لأنها تقلص من نوعية الحياة.

عدسة العين. تتميز عدسة العين بحساسيتها الشديدة للإشعاع مما يتسبب بعد ذلك في إصابتها بالعتامة أو الماء الأبيض. وحددت حالات عتامة عدسة العين بأنها أثر صحي متأخر في الناجين من القنابل الذرية وفي الكثير من حالات التعرض العرضي للإشعاع. ويمكن أن يسفر ذلك عن الإصابة بالعمى أو ضعف البصر على أقل تقدير، ويُعد أثراً صحياً قطعياً عنيفاً.

الأجهزة التناسلية. تشمل الآثار الصحية القطعية الناجمة عن تعرض الأجهزة التناسلية للإشعاع العقم المؤقت والدائم، أو توقف التبويض وتكوين السائل المنوي. ويعتبر العقم الدائم أو التوقف الدائم عن التبويض وتكوين السائل المنوي من الآثار الصحية القطعية العنيفة لأنها تؤدي في الكثير من الحالات إلى تقليص نوعية الحياة.

الأجنة. تشمل الآثار الصحية القطعية غير المميتة التي تصيب الأجنة بسبب تعرضها للإشعاع زيادة التشوهات ونقص النمو العقلي عن معدلاته الطبيعية. ومعظم هذه الآثار لها عتبة تزيد على ما يتراوح بين ١٠٠ و ٢٠٠ ميغا بكريل. على أن تعرّض الجنين لجرعة إشعاعية قدرها ١٠٠ ميغا بكريل أو أكثر خلال الأسابيع من الثامن حتى الخامس والعشرين من الحمل قد يتسبب في انخفاض واضح في نسبة الذكاء. ومن المرجح أن المرأة الحامل قلما تتعرض لحالة طوارئ إشعاعية خلال أكثر فترات تكون الجنين حساسية. وإذا أخذت هذه الآثار في الحسبان عند تحديد قيم D_1 فإن ذلك سيسفر عن تقييد يزيد عشرة أضعاف على قيم D_1 المحسوبة على أساس كل الآثار الصحية القطعية العنيفة الأخرى. وتعد هذه القيم متحفظة بدرجة كبيرة بالنسبة للأغلبية الواسعة من حالات الطوارئ الإشعاعية المحتملة. ولذلك تقرر عدم النظر في الآثار غير المميتة الناشئة عن تعرض الأجنة للإشعاع عند تحديد قيم D .

٤- السيناريوهات ومسارات التعرض

حُدثت قيم D باستخدام عدة سيناريوهات محدّدة يمكن أن تفضي إلى تعرض البشر للإشعاع بعد فقد السيطرة على مصدر. ووضعت هذه السيناريوهات والافتراضات على أساس الخبرة السابقة^٢ والمسائل المهمة الأخرى ذات الصلة، من قبيل استخدام المواد المشعة لأغراض إيذائية (مثل استخدامها في أجهزة نشر الإشعاع). ويلخص الجدول ٢ السيناريوهات المأخوذة بعين الاعتبار، وترد تفاصيلها في التذييل الثاني.

الجدول ٢ - السيناريوهات المستخدمة في تحديد قيم D

قيمة D ₂ مادة مشتتة				قيمة D ₁ مادة غير مشتتة		
الغمر (السادس)	التلوث ^أ (الخامس)	الابتلاع (الرابع)	الاستنشاق (الثالث)	الغرفة (الثاني)	الجيب (الأول)	الأعضاء أو الأنسجة
•		•	•	•		النخاع الأحمر
•		•	•	•		القولون
•		•	•	•		مناطق الرئة
	•					مناطق الجلد
					•	الأنسجة الرخوة
•		•	•	•		الغدة الدرقية
•				•		عدسة العين
•				•		الجهاز التناسلي

أ تلوث الجلد

وروعيت السيناريوهات التالية عند حساب قيم D₁ للنويدات المشعة في المواد غير المشتتة:

- (أ) سيناريو "الجيب" (السيناريو الأول) الذي يفترض أن الشخص يحمل مصدراً غير مدرّج ينشأ عنه ضرر موضعي في النسيج الرخو؛
- (ب) سيناريو "الغرفة" (السيناريو الثاني) الذي يفترض وجود الشخص بالقرب من مصدر غير مدرّج لمدة أيام أو أسابيع مما يؤدي إلى تعرض الجسم بأكمله لإشعاع مخترق خارجي.

وروعيت السيناريوهات التالية عند حساب قيمة D₂ للنويدات المشعة في المواد المشتتة:

- (أ) سيناريو "الاستنشاق" (السيناريو الثالث) الذي يفترض فيه اندلاع حريق أو وقوع انفجار (مثل جهاز نشر الإشعاعات) مما يعرض شخصاً ما لمواد مشعة عالقة في الهواء؛
- (ب) سيناريو "الابتلاع" (السيناريو الرابع) الذي يستخدم فيه السيناريو الأكثر تقييداً من بين سيناريوهين يفترض في أولهما تسرب المصدر وملامسته، مما يسفر عن ابتلاع المادة عن غير قصد، ويفترض في الثاني وضع المصدر في إمدادات المياه العامة، مما يسفر عن تلوث المياه التي تستخدم في الشرب بعد ذلك؛

- (ج) سيناريو "التلوث" (السيناريو الخامس) الذي يفترض فيه تلوث الجلد بسبب مصدر متسرب؛
 (د) سيناريو "الغمر" (السيناريو السادس) في حالة التعرض لغازات خاملة، ويفترض فيه انطلاق النشاط في غرفة، مما يعرض الأشخاص المتواجدين فيها للإشعاع. ولا تتناول هذه الحالة سوى تعرض النخاع الأحمر لإشعاع خارجي.

ووضعت الافتراضات المستخدمة في اشتقاق قيم D للنويدات المشعة بما يسمح بدرجة معقولة من الثقة في الآتي:

- (أ) أن إمساك أو حمل مقدار أقل من هذه الكمية من المادة المشعة غير المدرّعة (في الجيب مثلاً) لا يسفر عن إصابة تنتقص من نوعية الحياة؛
 (ب) أن وجود مقدار أقل من هذه الكمية من المادة المشعة غير المدرّعة في المنزل أو في مكان العمل لا يسفر عن تعرض يشكل تهديداً للحياة أو يمكن أن يتسبب في إصابة تنتقص من نوعية الحياة؛
 (ج) أن التشتت العالق في الهواء بفعل حريق أو انفجار إذا كان ينطوي على أقل من هذه الكمية من المادة المشعة لا يسفر عن إصابات تهدد الحياة أو تنتقص من نوعية الحياة بسبب الاستنشاق؛
 (د) أن ملامسة حافظة ممزقة محتوية على أقل من هذه الكمية من المادة القابلة للتشتت لا تسفر عن ابتلاع غير مقصود أو إصابة الجلد بتلوث يشكل تهديداً للحياة أو يمكن أن يتسبب في إصابة تنتقص من نوعية الحياة؛
 (هـ) أن المصدر الذي يحتوي على أقل من هذه الكمية من المادة القابلة للتشتت في إمدادات المياه العامة لا يسفر عن أي آثار قطعية عنيفة بسبب تلوث المياه؛
 (و) أن المصدر الذي يحتوي على أقل من هذه الكمية من المادة المشعة لا يمكن أن يصل إلى حالة الحرجية.

٥- خصائص المصادر المهمة

يناقش هذا القسم خصائص مواد المصادر المهمة في تحديد قيمة D. ويتناول التذييل الثامن تلك الخصائص بمزيد من التفصيل.

الإضمحلال والنمو الداخلي. المصدر المشع له عمر يبدأ بمجرد تصنيعه وينتهي بعد وقف استعماله وتحويله إلى نفاية مشعة. وتتغير الخواص الفيزيائية للمصدر خلال تلك الفترة. ويتناقص نشاط النويدات المشعة الأم وقت التصنيع (النشاط الأولي) بسبب الإضمحلال، وإن كان من المحتمل حدوث زيادة في نشاط نويدات مشعة أخرى (يطلق عليها النواتج أو العناصر الوليدة) نتيجة للإضمحلال. وهذه الزيادة تعرف في كثير من الأحيان بالنمو الداخلي. ويقل الخطر في معظم النويدات المشعة مع تقدم عمرها بسبب تناقص النشاط الكلي. على أن النويدات المشعة الوليدة في بعض سلاسل اضمحلال النويدات المشعة (مثل البلوتونيوم-٢٤١) – الأميريشيوم-٢٤١) سامة إشعاعياً أكثر من النويدات المشعة الأم في بعض المسارات، ولذلك فإن الخطر قد يزداد بتقدم عمر المصدر. ولا يمكن التنبؤ بالوقت الذي قد تقع فيه حالة طوارئ منطوية على المصدر، وبالتالي لا يمكن التنبؤ بنشاط المصدر عند وقوع حالة طوارئ. ومراعاة لذلك، حُسبت قيم D لأخطر مجموعة من النويدات المشعة الأم والوليدة في أي مدة حتى ١٠ سنوات. على أن قيم D يعبر عنها من حيث "النشاط الأولي" (أي النشاط قبل النمو الداخلي) للنويدات الأم في المصدر. ويبين التذييل الثامن التفاصيل المتعلقة بكيفية النظر في ذلك.

الإشعاع النووي وتفاعلاته. يمكن للتحويلات النووية^٢ في النويدات المشعة أن تولد إشعاعات مؤينة مختلفة. وهناك مجموعتان من الإشعاعات المهمة في هذا التقرير، هما مجموعة الإشعاعات ذات الانتقال الخطي المرتفع للطاقة، مثل جسيمات ألفا والنيوترونات، ومجموعة الإشعاعات ذات الانتقال الخطي المنخفض للطاقة، بما فيها جسيمات بيتا والفوتونات.

(أ) تشكل النويدات المشعة المبتعثة للفوتونات خطراً داخلياً وخارجياً على السواء. والفوتونات هي أحد أكثر أنواع الإشعاع اختراقاً لأنها تستطيع المرور بدون تفاعل لمسافة عدة أمتار في الهواء وعدة سنتيمترات في جسم الإنسان. ولا يؤثر تنافر الفوتونات في الهواء (ظاهرة اللمعان السماوي) كثيراً على جرعة الإشعاع من مصدر لا يبعد سوى متر واحد عن الجسم. ولهذا السبب لم يؤخذ ذلك بعين الاعتبار عند حساب قيم D_1 . على أن التناثر المتعدد للفوتونات داخل جسم الإنسان كان محل نظر في حسابات قياس الجرعات.

(ب) تفقد النيوترونات الطاقة أساساً نتيجة لتفاعلاتها مع النوى الخفيفة. ولذلك يمكنها الانتقال عدة أمتار في الرصاص، ولكنها تتوقف فعلياً في الماء أو الأنسجة الرخوة في جسم الإنسان. ويتولد في العادة عن تفاعل النيوترونات مع المادة نوى مرتدة وفوتونات ثانوية. ولذلك تشكل المصادر المبتعثة للنيوترونات خطراً داخلياً وخارجياً على السواء. والنويدات المشعة القادرة على الانشطار التلقائي (مثل الكاليفورنيوم-٢٥٢) هي أحد مصادر النيوترونات. وبالإضافة إلى بعض الخلائط الكثيفة للنويدات المشعة المبتعثة لألفا مثل (البلوتونيوم-٢٣٩ والأميريشيوم-٢٤١) والبريليوم أو الكربون أو النتروجين أو الأكسجين أو الفلور يمكن أن تشكل مصدراً للنيوترونات نتيجة لتفاعل (ألفا - نيوترون). ويشيع استخدام المصادر المحتوية على الأميريشيوم-٢٤١/البريليوم-٩ والبلوتونيوم-٢٣٩/البريليوم-٩ كمصادر نيوترونية في التطبيقات العلمية والتجارية، ويمكن أن تشكل مصدراً مهماً للتعرض الخارجي. على أن حجم الجسيمات التي يمكن استنشاقها أو ابتلاعها نتيجة لتشتت المادة في تلك المصادر النيوترونية أصغر من أن يتسبب فعلياً في توليد انبعاثات نيوترونية نتيجة لتفاعل (ألفا - نيوترون). ولذلك فقد حُسبت قيم D_1 لمصادر الأميريشيوم-٢٤١/البريليوم-٩، والبلوتونيوم-٢٣٩/البريليوم-٩، بما في ذلك التعرض الخارجي نتيجة للنيوترونات الناشئة عن تفاعل (ألفا - نيوترون)، ولكن قيم D_2 لا تشمل أي أثر يساهم به توليد النيوترونات في الجرعة بعد الأخذ الداخلي.

(ج) يمكن لجسيمات بيتا العالية الطاقة أن تنتقل عدة أمتار في الهواء، ولكنها لا تخترق إلا الجلد وبضع ملليمترات من النسيج الرخو. ولذلك لا تشكل النويدات المشعة المبتعثة لجسيمات بيتا في العادة خطراً داخلياً بعد تناولها أو خطراً على الجلد بعد تلوثه. على أنه إذا حدث تفاعل بين جسيمات بيتا العالية الطاقة والمادة المحتوية على عدد ذري (Z) كبير، فإن جزءاً كبيراً من طاقتها قد يتحول إلى فوتونات إشعاعات صدمية. ولذلك يمكن لمصادر النويدات المشعة المحتوية على نويدات مبتعثة لكميات كبيرة من جسيمات بيتا العالية الطاقة (مثل السترنشيوم-٩٠) أن تشكل مصدراً مهماً للإشعاع المخترق الذي ينجم عنه بعد ذلك خطر التعرض الخارجي. ولذلك أخذت في الحسبان الجرعة الخارجية الناتجة عن التعرض للإشعاع الصدمي عند حساب قيم D_1 . وتتولد إشعاعات صدمية لا تذكر إذا تفاعلت جسيمات بيتا العالية الطاقة مع مادة ذات عدد ذري صغير، مثل الأنسجة الرخوة في الجسم البشري. ولذلك لم يؤخذ هذا الأثر في الاعتبار عند حساب قيم D_2 التي تميّز التعرض البشري بعد الأخذ الداخلي.

(د) جسيمات ألفا هي أقل الإشعاعات المؤينة قدرة على الاختراق. ويمكن إيقافها بالطبقات الخارجية للجلد، ولا تشكل في العادة خطراً على الصحة إلا بعد دخول المادة المبتعثة لألفا

٣ يطلق عليها أيضاً "الاضمحلال الإشعاعي".

إلى الجسم. ويمكن لجسيمات ألفا في بعض الأحوال التفاعل مع النوى الخفيفة وتولّد نيوترونات عن طريق تفاعل (ألفا - نيوترون) كما هو مبين أعلاه.

حد الحرجية. هناك بعض النويدات المشعة القادرة على دعم التفاعل المتسلسل، ويمثل ذلك مسألة تتعلق بالأمان والأمن على السواء. وإذا كانت كتلة النشاط الذي يعتبر خطيراً وفقاً للحسابات التي أجريت باستخدام أحد سيناريوهات التعرض تزيد على المستوى المحدد لمنع الحرجية، يستخدم حينئذ نشاط حد الحرجية لتحديد قيمة D.

حد السمية الكيميائية. يشكل إطلاق أي مادة عالقة في الهواء خطراً على صحة الإنسان بسبب السمية الكيميائية وغير ذلك من العوامل إذا كانت التركيزات العالقة في الهواء كبيرة بدرجة كافية. وهناك بعض النويدات المشعة التي يمكن، نتيجة لانخفاض نشاطها النوعي، أن تبلغ قيم D الخاصة بها مستوى تشكل عنده كتلة إطلاق المواد العالقة في الهواء خطراً لأسباب غير إشعاعية من قبيل السمية الكيميائية. ويخرج تقدير مخاطر التعرض بسبب الآثار غير الإشعاعية عن نطاق هذا المنشور. على أنه سترد الإشارة إلى ذلك في الحالات التي يمكن أن تنطوي فيها قيمة D لنويده مشعة معينة على ذلك الخطر.

٦- نهج حساب قيم D

حسبت قيم D باستخدام نهجين مختلفين يطلق عليهما في هذا التقرير اسم النهج المبني على الخبرة والنهج القائم على المخاطر:

- (أ) النهج المبني على الخبرة في حساب قيم D يستند إلى البيانات المتاحة والإرشادات القائمة [١٠، ١١] والتقدير المهني. وكان الغرض من ذلك هو تلبية الحاجة الملحة إلى تحديد قيم معينة من قيم D في الأجل القريب. واستخدم هذا النهج في حساب قيم D لعدد من النويدات المشعة الرئيسية [٢، ٣] المهمة.
- (ب) واستند النهج القائم على المخاطر في حساب قيم D إلى تقييم كمي لمخاطر حدوث آثار قطعية عنيفة. واستندت النماذج المستخدمة في هذا النهج إلى دراسات تناولت تلك الآثار على امتداد العمر [١٢، ١٣، ١٤] وفحص دقيق لآخر البيانات والنماذج. ويتضمن المرجع [١٥] التفاصيل الكاملة المتعلقة بوضع هذا النهج لأغراض التصدي للطوارئ. واستخدم النهج القائم على المخاطر في هذا التقرير في حساب قيم D لقائمة موسّعة من النويدات المشعة، بما في ذلك النويدات المشعة التي لا تتناولها المصادر [٢، ٣، ٤] وفي حساب مدى كفاية قيم D المحسوبة باستخدام النهج الأول المبني على الخبرة.

وبين التذييل الثالث لوغاريتمات حساب قيم D.

وحسبما جاء في التذييل السابع فقد تبين أن قيم D التي حُسبت باستخدام النهج المبني على الخبرة تتفق كثيراً مع قيم D المحسوبة لاحقاً باستخدام النهج القائم على المخاطر. ولذلك لم تكن هناك حاجة إلى تعديل قيم D الواردة في المراجع [٢، ٣، ٤]. وجمعت نتائج هذين النهجين في مجموعة واحدة من قيم D الموصى بها حسب ما هو وارد في الجدول ١.

التذييلات

التذليل الأول

المستويات المرجعية والعتبات الحدية للآثار القطعية

يطلق على الجرعة التي افترض أنها تؤدي إلى حدوث أثر قطعي عنيف المستوى المرجعي في النهج المبني على الخبرة. ويرجع ذلك إلى أن هذا المستوى استند إلى تقدير الخبراء للجرعات التي تقترب من المستوى الحدي الفعلي للجرعة ولكنها تقل عنه. وأما في النهج القائم على المخاطر فإن مستوى الجرعة الذي يفترض أنه يؤدي إلى حدوث أثر قطعي عنيف فيطلق عليه مستوى العتبة. ويُنْتِج الحسابات أن هذا المستوى يمثل الجرعة التي يتوقع أن تؤدي إلى حدوث الأثر في ٥ في المائة ممن يتعرضون لها.

ويتضمن الجدول ٣ قائمة بالأعضاء أو الأنسجة [١٥] التي تم النظر فيها عند اشتقاق قيم D. ويحدّد الجدول رقماً مرجعياً لكل نسيج، ويستخدم ذلك الرقم باستمرار في هذا المنشور للإشارة إلى العضو أو النسيج.

وهناك رقمان مرجعيان مختلفان لأنسجة الرئة (E٣ و R٣) نظراً لاختلاف مناطق الرئة المستخدمة كعضو مستهدف في النهج المبني على الخبرة والنهج القائم على المخاطر. واستخدم النهج المبني على الخبرة الجرعة الممتصة في "الرئة" حيث "جرعة الرئة" هي المجموع المرجح للجرعة الممتصة في مختلف أنسجة منطقة الصدر من الجهاز التنفسي حسب ما أوصت به اللجنة الدولية للوقاية من الإشعاعات في منشورها رقم ٦٦ [١٦] لتقدير الآثار العشوائية. وهذه المنطقة تسمى "المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي". ووفقاً لتوصيات المرجع [١٥] فقد استخدم النهج القائم على المخاطر جرعة المنطقة السنخية - الخالية (AI) من الجهاز التنفسي باعتبارها العضو المستهدف.

ويستخدم رقمان مرجعيان مختلفان لأنسجة الجلد (E٦ و R٦) نظراً لاختلاف منطقة الجلد المستخدمة كعضو مستهدف في كل من النهج المبني على الخبرة والنهج القائم على المخاطر. واستخدم النهج المبني على الخبرة الغشاء القاعدي للجلد (بعمق ٧٠ ميكرون تحت سطح الجلد) بسبب عدم سهولة الحصول على معاملات الجرعات لتلك المنطقة. وتوصي اللجنة الدولية للحماية من الإشعاعات واللجنة الدولية للوحدات والمقاييس الإشعاعية [١٧، ١٨، ١٩] بتقييم الجرعة التي تتعرض لها أدمة الجلد (بعمق يتراوح بين ٣٠٠ و ٥٠٠ ميكرون تحت سطح الجلد) عند تقييم الآثار القطعية العنيفة من قبيل تكون القشور الرطبة. وهذا هو الأسلوب المستخدم في النهج القائم على المخاطر الذي يفترض أن حدوث آثار قطعية عنيفة ينشأ بعد تشييع مساحة تزيد على ١٠٠ سم^٢ من أنسجة الجلد [١٢] على عمق ٤٠٠ ميكرون (٤٠ ملغ × سم^{-٢}).

وفي كلا النهجين، يستخدم "الجدع" في المرجع [١٥] ويستخدم هنا لتبسيط النظر في التعرض الخارجي لمجال موحد من الإشعاع القوي الاخرق من مصدر بعيد. ويشمل "الجدع" الرئة والنخاع الأحمر والأمعاء الدقيقة والغدد التناسلية والغدة الدرقية وعدسة العين. ويؤدي تعرض 'الجدع' لإشعاع من مصدر خارجي بعيد إلى تعريض كل تلك الأعضاء وبالتالي لا يلزم النظر في كل منها على حدة.

الجدول ٣: الأعضاء والأنسجة المعنية

الرقم المرجعي للنسيج		مسار التعرض	العضو أو النسيج
النهج المبني على الخبرة	النهج القائم على المخاطر		
١	١	مصدر خارجي قريب	النسيج الرخو
٢	٢	داخلي	النخاع الأحمر
R٣	E٣	داخلي	مناطق الرئة
٤	٤	داخلي	القولون أو الأمعاء الدقيقة
٥	٥	داخلي	الغدة الدرقية
R٦	E٦	الاتصال بالجلد	مناطق الجلد
٧	٧	مصدر خارجي بعيد	الجدع
انظر الملحوظة ب	انظر الملحوظة ب	مصدر خارجي بعيد	النخاع الأحمر
انظر الملحوظة ب	انظر الملحوظة ب	مصدر خارجي بعيد	الغدة الدرقية
انظر الملحوظة ب	انظر الملحوظة ب	مصدر خارجي بعيد	عدسة العين
انظر الملحوظة ب	انظر الملحوظة ب	مصدر خارجي بعيد	المبيض عند الإناث
انظر الملحوظة ب	انظر الملحوظة ب	مصدر خارجي بعيد	الخصيتان عند الذكور

أ يستخدم الجذع لتبسيط النظر في آثار التعرض الخارجي لمصدر بعيد، ويشمل ذلك النخاع الأحمر والغدة الدرقية وعدسة العين والأعضاء التناسلية.

ب عتبة الجرعة التي يبدأ عندها حدوث آثار قطعية عنيفة في هذا العضو بسبب التعرض لمصدر خارجي بعيد تقل عن المستوى المرجعي أو مستوى عتبة الجرعة في الجذع؛ ولذلك لم يتم إجراء حساب محدد للجرعة التي يتلقاها هذا العضو.

أولاً-١- قياس الكميات المستخدمة في تحديد خصائص الآثار القطعية

ترتبط الآثار البيولوجية للإشعاع بالطاقة الممتصة عن طريق تأين وإثارة وحدة كتلة النسيج (الجرعة الممتصة من الإشعاع). وتعدّل تلك الآثار بالتوزيع المكاني للطاقة المكتسبة التي تحدّد نوعية الإشعاع. ويتوقف هذا العامل على الانتقال الخطي لطاقة الإشعاع. وينظر عادة إلى نوعين من الإشعاع في سياق الآثار الصحية للإشعاع:

(أ) الإشعاع ذو الانتقال الخطي المنخفض للطاقة؛

(ب) الإشعاع ذو الانتقال الخطي المرتفع للطاقة.

وقد تتباين أيضاً الآثار البيولوجية للإشعاع تبعاً لمعدل امتصاص الطاقة (معدل الجرعة الممتصة)، وتركيز الأكسجين في النسيج، فضلاً عن عوامل أخرى تحدّد حساسية النسيج البيولوجي للإشعاع.

وتختلف كميات قياس الجرعات المستخدمة في النهج المبني على الخبرة عن كميات قياس الجرعات المستخدمة في النهج القائم على المخاطر لتقييم حالات التعرض التي يمكن أن تفضي إلى آثار صحية قطعية في أعضاء أو أنسجة الجسم المعرضة لخطر إشعاعي. وترد هذه الكميات في الجدول ٤ ويبينها الشكل ١ إلى جانب الكميات الأخرى المستخدمة عموماً في الوقاية من الإشعاع.

الجدول ٤ : كميات قياس الجرعات المستخدمة في تقييم آثار الإشعاع على الصحة

التعرض	الوحدة	الرمز ^أ	الغرض وكمية الجرعة
تقييم الآثار القطعية:			
(أ) النهج المبني على الخبرة			
خارجي	غراي	D_T^R	الجرعة الممتصة من الإشعاع R في العضو أو النسيج T ^ب
داخلي	غراي	$D_T^R(\Delta)$	الجرعة الممتصة المودعة من الإشعاع R في العضو أو النسيج T ^ب
(ب) النهج القائم على المخاطر			
خارجي	مكافئ غراي	AD_T	الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في العضو أو النسيج T
داخلي	مكافئ غراي	$AD_T(\Delta)$	الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في العضو أو النسيج T
تقييم الآثار العشوائية:			
خارجي	سيفرت	H_T	الجرعة المرجحة بالإشعاع في العضو أو النسيج T
داخلي	سيفرت	$H_T(\Delta)$	الجرعة المرجحة بالإشعاع المودعة في العضو أو النسيج T

أ يمكن الرجوع إلى وصف الرموز والمؤشرات القياسية المستخدمة في هذا المنشور في المرفقين الأول والثاني.
 ب أدخلت، لأغراض هذا التقرير، تعديلات طفيفة على تصنيف الجرعة الإشعاعية الممتصة المحددة المستخدمة في توصيات اللجنة الدولية للوقاية من الإشعاعات [٢٠].

والجرعة الممتصة في عضو أو نسيج هي الكمية الأساسية لقياس الجرعة. وتساوي الجرعة الممتصة (D_T^R) .^٤ طاقة الإشعاع المؤيّن R المنتقلة إلى وحدة من كتلة العضو أو النسيج T وتعرّف بالمعادلة التالية:

$$(١) \quad D_T^R = \frac{\Delta \epsilon_R}{m_T}$$

حيث:

m_T هي كتلة العضو أو النسيج T؛

$\Delta \epsilon_R$ هي طاقة الإشعاع المؤيّن R المنتقلة إلى كتلة العضو أو النسيج المعين.

والجرعة الممتصة المودعة $D_T(\Delta)$ في العضو أو النسيج T تعرّف بأنها التكامل الزمني لمعدل الجرعة الممتصة في العضو أو النسيج على مر الزمن Δ بعد الأخذ الداخلي للمادة المشعة، وتُحسب بالمعادلة التالية:

$$(٢) \quad D_T^R(\Delta) = \int_{t_0}^{t_0+\Delta} \dot{D}_T^R(t) dt = \sum_S I_S \times DF_{T,S}^R(\Delta)$$

٤ يتضمن المرفق الأول وصفاً كاملاً للرموز والمؤشرات القياسية المستخدمة في هذا المنشور.

حيث:

t_0 هو زمن الأخذ الداخلي؛

Δ هي فترة التكامل ويطلق عليها أيضاً فترة الإيداع؛

$\dot{D}_T^R(t)$ هو معدل الجرعة الممتصة من الإشعاع R في العضو أو النسيج T في الزمن t بعد أخذ داخلي لنوييدة مشعة، غراي/ثانية؛

I_S هو نشاط الأخذ الداخلي لنوييدة مشعة من خلال مسار يحدده السيناريو S، (بالكبريل)؛

$DF_{T,S}^R(\Delta)$ هو معامل تحويل الجرعة الذي يساوي الجرعة الممتصة من الإشعاع R في العضو أو النسيج T والمودعة وفقاً للسيناريو S خلال المدة الزمنية Δ بعد أخذ داخلي لمقدار يبلغ 1 بكريل من نوييدة مشعة، (غراي/بكريل).

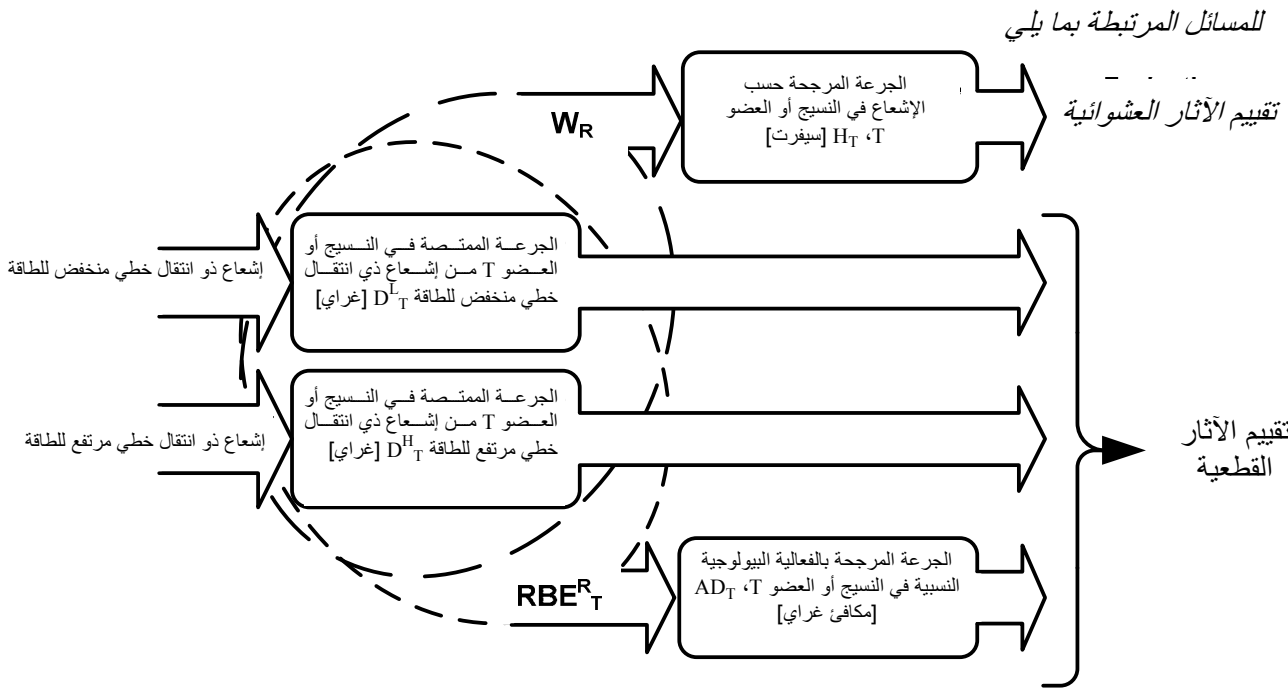
والوحدة المستخدمة في قياس الجرعة الممتصة والجرعة الممتصة المودعة هي الغراي [٢٠].

وعند تقييم التعرض الخارجي للإشعاع R (الإشعاع ذو الانتقال الخطي المنخفض للطاقة أو الإشعاع ذو الانتقال الخطي المرتفع للطاقة)، استخدم النهج المبني على الخبرة الجرعة الممتصة في العضو D_T^R . واستخدم هذا النهج عند تقييم التعرض الداخلي الجرعة الممتصة المودعة في العضو أو النسيج $D_T^R(\Delta)$. وعولمت في النهج المبني على الخبرة عناصر الجرعة الممتصة الناتجة عن الإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة والإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة بطريقة مختلفة تبعاً لمسار التعرض والعضو وخصائص المادة.

ورجح النهج القائم على المخاطر مكونات الجرعة الممتصة المتولدة عن الإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة والإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة حسب الفعالية البيولوجية النسبية ونظر فيهما معاً. وعند تقييم التعرض الخارجي، استخدم النهج القائم على المخاطر جرعة مرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في العضو أو النسيج AD_T [١٥، ٢١]. واستخدمت عند تقييم التعرض الداخلي الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في العضو أو النسيج $AD_T(\Delta)$. وتعرّف الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية (AD_T) بأنها ناتج الجرعة الممتصة في عضو أو نسيج D_T^R والفعالية البيولوجية النسبية RBE_T^R ؛ ويُحسب ذلك بالمعادلة التالية:

$$(٣) \quad AD_T = \sum_R D_T^R \times RBE_T^R$$

والفعالية البيولوجية النسبية RBE_T^R في عضو أو نسيج معين T هي النسبة بين قيمة الجرعة الممتصة من إشعاع مرجعي يوّد تأثيراً بيولوجياً محدداً والجرعة الممتصة من الإشعاع R الذي يوّد نفس التأثير البيولوجي. وتتوقف قيمة RBE_T^R على التأثير في العضو أو النسيج المعني، والحالة البيولوجية المعنية، ونوعية الإشعاع الذي تنتج عنه الطاقة الممتصة. وتتوقف نوعية الإشعاع على عوامل كثيرة، أهمها الانتقال الخطي للطاقة وقدرة الإشعاع على الاختراق. وبالنظر إلى التوزيع المجهري للنويدات المشعة التي تبتعث إشعاعات ضعيفة الاختراق فإن قيمة RBE_T^R تختلف في التعرض الداخلي والخارجي عن الإشعاع الذي له نفس قيمة الانتقال الخطي للطاقة.



الشكل ١: كميات قياس الجرعات المستخدمة في تقييم آثار الإشعاع على الصحة

واستخدمت الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية $AD_T(\Delta)$ في تقييم خطر حدوث آثار صحية قطعية عنيفة بعد دخول نويدة مشعة إلى الجسم. وتعرف الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية $AD_T(\Delta)$ في العضو أو الجسم T بأنها التكامل الزمني لمعدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في العضو أو النسيج في الزمن Δ بعد دخول المادة المشعة إلى الجسم، وتحسب بالصيغة التالية:

$$(٤) \quad AD_T(\Delta) = \int_{t_0}^{t_0+\Delta} \dot{AD}_T(t) dt = \sum_S I_S \times AF_{T,S}(\Delta)$$

حيث:

t_0 هو زمن الأخذ الداخلي؛

Δ هي فترة التكامل ويطلق عليها أيضاً فترة الإيداع؛

$\dot{AD}_T(t)$ هو معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في العضو أو النسيج T في الزمن t بعد أخذ داخلي لنويد مشعة ((مكافئ غراي/ثانية)؛

I_S هو نشاط الأخذ الداخلي للنويد المشعة من خلال مسار يحدده السيناريو S، (بالبكريل)؛

$AF_{T,S}(\Delta)$ هو معامل تحويل الجرعة الذي يساوي الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في العضو أو النسيج T المودعة خلال الزمن Δ وفقاً للسيناريو S نتيجة لأخذ داخلي مقداره ١ بكريل من نويدة مشعة، ((مكافئ غراي/بكريل)).

ويعبر عن الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية والجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية بمكافآت الغراي [١٥، ٢١، ٢٢].

وتستخدم الجرعة المرجحة حسب الإشعاع والجرعة المودعة المرجحة حسب الإشعاع في الوقاية من الإشعاع ولا تستخدمان في هذا التقرير. وتعرف الجرعة المرجحة بالإشعاع H_T بأنها ناتج الجرعة الممتصة (الخارجية والمودعة) في العضو أو النسيج والمعامل الإشعاعي الترجيحي w_R [١١، ٢٠، ٢٣] لكل أنواع الإشعاع، وتُحسب بالمعادلة التالية:

$$(٥) \quad H_T = \sum_R D_T^R \times w_R \quad \text{و} \quad H_T(\tau) = \sum_R D_T^R(\tau) \times w_R$$

حيث:

H_T هي الجرعة المرجحة بالإشعاع في العضو أو النسيج T من إشعاع خارجي؛

$H_T(\tau)$ هي الجرعة المودعة المرجحة بالإشعاع في النسيج T في زمن التكامل τ ، و w_R هو المعامل الإشعاعي الترجيحي للإشعاع R . وعندما لا يعين زمن التكامل τ فإنه يقدر بمدة ٥٠ سنة للبالغين و ٧٠ سنة للأطفال [١١، ٢٠].

والوحدة المستخدمة في الجرعة المرجحة بالإشعاع والجرعة المودعة المرجحة بالإشعاع هي سيفرت [٢٠، ٢٣].

أولاً-٢- النهج المبني على الخبرة

استخدم النهج المبني على الخبرة في حساب قيم D المستويات المرجعية للجرعة الممتصة في الأعضاء أو الأنسجة المعرضة لخطر إشعاعي لتقييم بدء حدوث آثار قطعية عنيفة:

- (أ) عند تقييم التعرض الخارجي، يعبر عن المستويات المرجعية من حيث الجرعة الممتصة في العضو D_T^R ، وترد في الجدول ٥؛
- (ب) عند تقييم التعرض الداخلي، يعبر عن المستويات المرجعية من حيث الجرعة الممتصة المودعة في العضو $D_T^R(\Delta)$ ، وترد في الجدول ٦.

والمستوى المرجعي للجرعة هو المستوى الذي لا يحدث عنده الأثر في الأشخاص المعرضين في حالة عدم تجاوزه.

الجدول ٥: المستويات المرجعية المستخدمة في النهج المبني على الخبرة لتقييم بدء ظهور الآثار القطعية العنيفة الناتجة عن التعرض الخارجي

المستوى المرجعي	القيمة	العضو أو النسيج المعرض لخطر إشعاعي	الأثر	مسار التعرض
الرمز ^أ	(غراي)			
RD_1^{L+H}	٢٥	النسيج الرخو ^ب (النسيج ١)	نخر النسيج الرخو	تعرض النسيج الرخو لمصدر قريب
RD_{6E}^{L+H}	٢٥	الغشاء القاعدي للجلد (النسيج 6E)	تقشر رطب	التعرض عن طريق ملامسة تلوث سطحي
RD_7^{L+H}	٣١	الجذع (النسيج ٧)	انظر الملحوظة ج	تعرض الجسم بكامله لمصدر بعيد أو للغمر

أ يرد بيان الرموز والمؤشرات القياسية في المرفقين الأول والثاني.

ب مساحة تتراوح بين ٥٠ و ١٠٠ سم^٢ وعلى عمق يصل إلى ٥,٥ سنتيمتر تحت سطح الجسم.

ج قيمة الجرعة المرجعية الدنيا لحدوث أي أثر قطعي عنيف نتيجة لتشعيع منتظم للجسم بكامله. وجرى اختيار المستوى المرجعي ١ غراي لأنه أقل حد للمستويات المرجعية التي يبدأ عندها ظهور آثار قطعية عنيفة في النخاع العظمي الأحمر والغدة الدرقية وعدسة العين والأعضاء التناسلية على النحو المبين في الجدول ٧.

د في مساحة تبلغ تقريباً ١٠٠ سم^٢ من الجلد. وتدخل الجرعة إلى هياكل الجلد على عمق ٧ ملغ/سم^٢ (أو ٠,٧ ملليمتر) تحت سطح الجلد، وافترض أن ذلك هو النسيج المعرض لخطر إشعاعي يؤدي إلى حدوث أثر قطعي عنيف. ويمثل ذلك افتراضاً متحفظاً حسب ما هو وارد في التذييل الخامس.

الجدول ٦: المستويات المرجعية المستخدمة في النهج المبني على الخبرة لتقييم بدء ظهور الآثار القطعية العنيفة الناتجة عن التعرض الداخلي

المستوى المرجعي		القيمة Δ	خصائص المادة المشعة	العضو أو النسيج	الأثر	مسار التعرض
الرمز ^أ	(غراي) (يوم)					
RD ₂ ^{L+H} (Δ)	٢	١	أي نويدة مشعة	النخاع الأحمر (النسيج ٢)	متلازمة تكون الدم	الاستنشاق أو الابتلاع
RD _{3E} ^{HS} (Δ)	٣٦٥	٢٥	مبتعث طويل العمر لإشعاع ذي انتقال خطي مرتفع للطاقة من النوع S ^ب	المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي (النسيج 3E)	التهاب الرئة	الاستنشاق
RD _{3E} ^{LS} (Δ)	٣٦٥	٤٠	مبتعث طويل العمر السترنشيوم - ٩٠ (أي ^{٩٠} Sr TiO ₃)			
RD _{3E} ^L (Δ)	٢	٦	مبتعثات أخرى لإشعاع ذي انتقال خطي منخفض للطاقة			
RD ₅ ^L (Δ)	٣٦٥	٥	نويدات مشعة متراكمة في الغدة الدرقية ^د	الغدة الدرقية (النسيج ٥)	قصور الغدة الدرقية	الاستنشاق أو الابتلاع

أ يمكن الرجوع إلى بيان الرموز والمؤشرات القياسية في المرفقين الأول والثاني.

ب يشير النوع S إلى امتصاص بطيء في الرئة [١١].

ج الحالة الخاصة بمركب السترنشيوم - ٩٠ غير القابل للذوبان.

د النويدات المشعة المتراكمة في الغدة الدرقية هي مبتعثات لإشعاع ذي انتقال خطي منخفض للطاقة.

واستندت المستويات المرجعية المستخدمة في النهج المبني على الخبرة، عند الاقتضاء، إلى المستويات الموجبة للتصرف الواردة في معايير الأمان الدولية، وتحديداً في الجدول الرابع-١ من المرجع [١١] الوارد هنا في الجدول ٧. وهذه هي المستويات المرجعية للجرعة الممتصة المتوقعة في العضو أو النسيج في أقل من يومين ويتوقع عندها اتخاذ إجراءات وقائية عاجلة في أي ظروف لمنع حدوث آثار صحية قطعية. ويفترض أن هذه المستويات تمثل جرعات تقترب من الجرعات التي يتوقع أن تتسبب في حدوث آثار قطعية [١٠] نتيجة للتعرض خلال فترة وجيزة. ولا يتوقع حدوث ذلك التعرض إلا من مصادر خارجية. وتختلف المستويات المرجعية للجرعة المستخدمة في النهج المبني على الخبرة عن المستويات الموجبة للتصرف المحددة في المرجع [١١] حسب ما هو مبين أدناه، وذلك في الأساس لمراعاة ما يلي:

(أ) الآثار الصحية القطعية العنيفة في الجلد والنسيج الرخو؛

(ب) الآثار الصحية القطعية العنيفة الناجمة عن حدوث تعرض في فترات أطول.

الجدول ٧: مستويات الجرعات الموجبة للتصرف في حالة الجرعة المتوقع امتصاصها في العضو أو النسيج في أقل من يومين

المستوى الموجب للتصرف (غراي)	العضو أو النسيج المستهدف
١	الجسم بأكمله (النخاع الأحمر)
٦	الرئة
٣	الجلد
٥	الغدة الدرقية
٢	عدسة العين
٣	الغدة التناسلية

وفي حالة تعرض الجسم بأكمله لإشعاع من مصدر خارجي فإن المستوى المرجعي للجذع في الجدول ٥ هو الجرعة الدنيا التي يحدث بسببها أثر قطعي عنيف نتيجة للتشعيع المنتظم للجسم بأكمله. والمستوى المرجعي المستخدم في حالة النخاع الأحمر هو ١ غراي لمدة ١٠٠ ساعة من مصدر خارجي لأن ذلك هو الحد الأدنى للمستويات المرجعية التي يبدأ عندها حدوث آثار قطعية عنيفة في النخاع العظمي الأحمر والغدة الدرقية وعدسة العين والأعضاء التناسلية كما هو مبين في الجدول الأول - ٣ من المرجع [١٥]. واستخدمت فترة أطول للتعرض مدتها ١٠٠ ساعة بدلاً من يومين لأن ذلك يعطي أقل معدلات الجرعات التي تعتبر خطراً يهدد الحياة [١٢]. وبيّنت الأعمال التي صدرت لاحقاً [١٥، ٢١] أيضاً أن جرعة مقدارها ١ غراي نتيجة لتعرض خارجي تساوي أو تقل عن مستوى عتبة الجرعة التي يتوقع عندها حدوث آثار قطعية عنيفة في أعضاء أخرى (مثل عدسة العين أو الغدة التناسلية) أو الأنسجة نتيجة لتعرض الجسم بأكمله لإشعاع من مصدر بعيد.

وحسب ما هو وارد في التذييل الثاني فإن النهج المبني على الخبرة لم ينظر صراحة في الابتلاع لأن سيناريو الاستنشاق لا بد وأن يكون هو السيناريو الغالب في الأخذ الداخلي. وعلاوة على ذلك فقد كان هناك اعتراف [١٢] بأن عتبة الجرعة التي يبدأ عندها ظهور آثار قطعية عنيفة في النخاع العظمي والرئة بعد الاستنشاق تزيد كثيراً عن جرعة التعرض الخارجي خلال فترة وجيزة حسب ما هو وارد في الجدول ٧. على أنه بعد النظر في الدراسات [١٢] المتاحة في ذلك الوقت (حينما أجريت حسابات النهج المبني على الخبرة) عن مبعثات الإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة تبين أن الأخذ الداخلي المرتبط بالمستويات الموجبة للتصرف في حالة الرئة كما هو وارد في الجدول ٧ (٦ غراي في يومين) يسفر عن معدل جرعة تقييدي بدرجة معقولة لتقدير الأخذ الداخلي الذي يعتبر خطراً يهدد الحياة. وافترض في حالة السترنشيوم - ٩٠ المركب غير القابل للذوبان $^{90}\text{SrTiO}_3$ (الامتصاص الرئوي من النوع S). وافترض في هذه الحالة الخاصة مستوى مرجعياً قدره ٤٠ غراي للجرعة المودعة في المنطقة الصدرية من الرئة لمدة ٣٦٥ يوماً. واعتمد هذا الافتراض الأكثر تحفظاً على البيانات الواردة في المرجع [٢٤] المستندة إلى دراسات أجريت على حيوانات. وهذه الخصائص يبينها رمز المستوى المرجعي $(\Delta) \text{RD}_{3\text{E}}^{\text{LS}}$ من خلال الأحرف العلوية $^{\text{LS}}$ التي ترمز للإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة من مركب ذي امتصاص رئوي من النوع s.

٥ مركب يستخدم عادة في المولدات الكهربائية الحرارية التي تعمل بالنظائر المشعة.

وفي حالة التعرض الرئوي بعد استنشاق نويدات مشعة ممتعة لإشعاع ذي انتقال خطي مرتفع للطاقة لم يعتبر المستوى الموجب للتصرف في حالة الرئة على النحو المحدد في الجدول ٧ (٦ غراي على امتداد يومين) مستوى مرجعياً ملائماً لبدء ظهور آثار قطعية عنيفة. واستخدمت في هذه الحالة جرعة قدرها ٢٥ غراي ممتصة مودعة في المنطقة الصدرية لمدة ٣٦٥ يوماً كمستوى مرجعي لبدء حدوث آثار قطعية عنيفة في الرئة. واستند ذلك إلى المرجع [٢٤] الذي يشير، استناداً إلى الدراسات التي أجريت على الحيوانات، إلى أن دخول ٢٥ غراي إلى الرئة في ٣٦٥ يوماً مؤشراً يدل على خطر الإصابة بالتهاب رئوي إشعاعي بنسبة تصل إلى ٥ في المائة بعد استنشاق البلوتونيوم-٢٣٩ المبتعث لألفا طويلة العمر. ويشار إلى تلك الخصائص في رمز المستوى المرجعي $RD_{3E}^{HS}(\Delta)$ عن طريق الأحرف العلوية ^{HS} التي ترمز للإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة المتولد عن مركب ذي امتصاص رئوي من النوع s.

ولم يعتبر المستوى الموجب للتصرف في حالة الجلد على النحو المحدد في الجدول ٧ (٣ غراي في يومين) ملائماً لأنه يتعلق باحمرار الجلد [١٠] الذي لا يعد أثراً صحياً قطعياً عنيفاً. ويتبين من التجربة [٢٥، ٢٦، ٢٧] أنه لا بد من حدوث نخر في الطبقة السطحية من النسيج الرخو في مساحة تتراوح بين ما يقرب من ٥٠ و ١٠٠ سم^٢ وبعمق يصل إلى نحو ٠,٥ سنتيمتر حتى يمكن القول بحدوث أثر قطعي عنيف نتيجة للتعرض الخارجي الموضوعي. وتمثل الجرعة الممتصة البالغة ٢٥ غراي المستوى المرجعي لتقييم هذا الأثر [١٥، ٢٥].

ويُفترض أن قصور الغدة الدرقية أثر قطعي عنيف ينتقص من نوعية الحياة في حالة حدوث تعرض داخلي في الغدة الدرقية نتيجة لأخذ داخلي لنويدات مشعة متراكمة في الغدة الدرقية. ويتضمن الجدول الرابع - ١ من المرجع [١١] جرعة ممتصة قدرها ٥ غراي تتلقاها الغدة الدرقية في يومين باعتبارها المستوى الإجرائي الذي يبرر دائماً التدخل لمنع الإصابة بقصور الغدة الدرقية. على أن المعاملات الوحيدة لتحويل الجرعة التي تسنى الحصول عليها في حالة تعرض الغدة الدرقية بعد الأخذ الداخلي تتعلق بالجرعة الممتصة المودعة على امتداد العمر في الغدة الدرقية [٢٨]، ولذلك استخدمت هذه المعاملات للجرعة. وعلى ضوء العمر النصف البيولوجي والفيزيائي للنويدات المشعة التي تسفر عن جرعة كبيرة في الغدة الدرقية (نظائر اليود والتلوريوم) فإن معاملات الجرعة كانت تتعلق في الواقع بفترة إيداع أقل كثيراً من ٣٦٥ يوماً؛ ومع ذلك فقد تم اختيار فترة إيداع (Δ) مدتها ٣٦٥ يوماً لهذا المستوى المرجعي $RD_5^L(\Delta)$ للإشارة إلى فترة إيداع تتجاوز العديد من الأعمار النصفية الفعالة.

أولاً-٣- النهج القائم على المخاطر لتقييم بدء حدوث آثار قطعية

استخدم النهج القائم على المخاطر في حساب قيم D عتبات للجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في العضو أو النسيج المعرض لخطر إشعاعي عند تقييم بدء حدوث آثار قطعية عنيفة:

- (أ) عند تقييم التعرض الخارجي، يعبر عن العتبات من حيث الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية $AD_{T,05}$. وترد هذه العتبات في الجدول ٨؛
- (ب) عند تقييم التعرض الداخلي، يعبر عن العتبات من حيث الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية $AD_{T,05}(\Delta)$. وترد هذه المستويات في الجدول ٩.

ومستوى العتبة للجرعة هو المستوى الذي يسفر نظرياً عن أثر في ٥ في المائة من الأشخاص المعرضين.

واقترح سكوت (Scott) في البداية النموذج الفيزيائي الحيوي المستخدم في النهج القائم على المخاطر لتقييم الآثار القطعية العنيفة في عام ١٩٨٠ [٢٩، ٣٠]. وتم وضع نموذج المخاطر للربط بين الآثار القطعية العنيفة والبارامترات المقترنة بها باستخدام البيانات المتاحة عن التجارب التي أجريت على الحيوانات وتحليل حالات التعرض البشري. وتشبه الصياغة الحسابية للنموذج دالة الاحتمالية المستخدمة في نظرية العولية ويرد بيانها في المرجع NUREG/CR-4214 [١٢، ١٣، ١٤]، ويبين المرجع [١٥] استخدام هذا النموذج بالتفصيل في النهج القائم على المخاطر.

الجدول ٨: عتبات الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية الناتجة عن التعرض الخارجي

الرمز ^أ	مستوى العتبة		الأثر	التعرض
	القيمة	العضو أو النسيج المعرض لخطر إشعاعي		
TD ₁	٢٥	النسيج الرخو ^ب (النسيج ١)	نخر النسيج الرخو	التعرض الموضعي من مصدر قريب
TD _{6R}	١٠ ^د	أدمة الجلد (النسيج ٦R)	التقشر الرطب	التعرض عن طريق ملامسة تلوث سطحي
TD ₇	٣١ ^ج	الجدع (النسيج ٧)	الملحوظة ج	تعرض الجسم بأكمله للإشعاع من مصدر بعيد أو عن طريق الغمر

- أ يمكن الرجوع إلى بيان الرموز والمؤشرات القياسية في المرفقين الأول والثاني.
- ب النسيج الرخو في مساحة تبلغ ١٠٠ سم^٢ بعمق يصل إلى نحو ٠,٥ سنتيمتر تحت سطح الجسم.
- ج القيمة هي عتبة الجرعة الدنيا التي ينشأ عنها أي أثر قطعي عنيف نتيجة للتشعيع المنتظم للجسم بأكمله. وتم اختيار عتبة تبلغ ١ غراي لأنه الحد الأدنى للعتبات التي يبدأ عندها حدوث آثار قطعية عنيفة في النخاع العظمي الأحمر والغدة الدرقية وعدسة العين والأعضاء التناسلية حسب ما هو وارد في الجدول الأول - ٣ من المرجع [١٥].
- د يفترض أن التعرض عند هذا المستوى في مساحة لا تقل عن ١٠٠ سم^٢ من الجلد مطلوب حتى تنشأ آثار صحية قطعية [١٢]. وهذه الجرعة تتلقاها هياكل الجلد على عمق ٤٠ ملغ/سم^٢ (أو ٠,٤ ملليمتر) تحت سطح الجلد.

الجدول ٩: عتبات الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية الناتجة عن التعرض الداخلي

الرمز ^أ	العتبة		العضو أو النسيج المستهدف	الأثر	مسار التعرض
	القيمة	Δ			
	(مكافئ غراي)	(يوم)			
TD ₂ (Δ)	٠,٢	٣٠	النخاع الأحمر ^{ب، ج} (النسيج ٢)	متلازمة تكوين الدم	الاستنشاق والابتلاع
TD _{3R} (Δ)	٣٠	٣٠	المنطقة السنخية - الخالية من الجهاز التنفسي (النسيج 3R)	التهاب الرئة	الاستنشاق
TD ₄ (Δ)	٢٠	٢٠	القولون (النسيج ٤)	متلازمة الجهاز المعدي المعوي	الاستنشاق والابتلاع
TD ₅ (Δ)	٢	٣٦٥	الغدة الدرقية (النسيج ٥)	قصور الغدة الدرقية	الاستنشاق والابتلاع

أ يمكن الرجوع إلى بيان الرموز والمؤشرات القياسية في المرفقين الأول والثاني.

ب لحالات الرعاية الطبية الداعمة.

ج تختلف العمليات الحركية الحيوية في النويدات المشعة التي يكون عددها الذري $Z \leq 90$ مقارنة بالنويدات المشعة التي يكون عددها الذري $Z \geq 89$ ، وبالتالي تختلف ديناميات تكون الجرعة في النخاع الأحمر نتيجة للتعرض الداخلي. ولذلك قسّمت النويدات المشعة إلى مجموعتين لتلافي الإفراط في التحوط عند تقييم خطر الأثر الصحي المعني.

د للنويدات المشعة التي يكون عددها الذري $Z \leq 90$.

هـ للنويدات المشعة التي يكون عددها الذري $Z \geq 89$.

و استخدمت القيمة المأخوذة من التذييل أ في المرجع [١٢].

ز بالنظر إلى العمر النصف البيولوجي والفيزيائي للنويدات المشعة التي تسفر عن جرعة كبيرة في الغدة الدرقية (نظائر اليود والتلوريوم) فإن هذه المعاملات تتعلق في الواقع بفترة إيداع أقل كثيراً من ٣٦٥ يوماً؛ ومع ذلك فقد عيّنت لهذا المستوى المرجعي فترة إيداع (Δ) مدتها ٣٦٥ يوماً.

ووفقاً لنموذج المخاطر فإن خطر حدوث آثار صحية قطعية في عضو أو نسيج T ، $R_{S,T}$ ، يتوقف على دالة الخطورة التي تميز أثراً معيناً. وتتوقف دالة الخطورة $\{T_S, AD_T(t)\}$ على تاريخ التعرض خلال فترة التعرض $(0, T_S)$ ، حسب ما هو محدد في سيناريو التعرض S . والصيغة العامة المستخدمة في التعبير عن دالة الخطورة في المرجع [١٤] هي:

$$(٦) \quad H_T \{T_S, \dot{AD}_T(t)\} = [\ln(2)] \left[\int_0^{T_S} \frac{\dot{AD}_T(t)}{\theta_T^\infty + \theta_T^1 / \dot{AD}_T(t)} dt \right]^{V_T}$$

حيث:

$\dot{AD}_T(t)$ هو معدل الجرعة الفورية المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في العضو أو النسيج T في الزمن t من بداية التعرض، ((مكافئ غراي/ساعة)؛

θ_T^∞ هو بارامتر يميّز الحساسية الإشعاعية في عضو أو نسيج معيّن، وهو يساوي القيمة المقاربة للجرعة المرجّحة بالفعالية البيولوجية النسبية التي تسفر نظرياً عن حالة تؤثر على ٥٠ في المائة من الأشخاص الذين يتعرضون لمعدل جرعة مرتفع بدرجة كبيرة (تعرض لفترة وجيزة)، (مكافئ غراي)؛

θ_T^1 هو بارامتر يميّز فعالية إصلاح الإصابة الإشعاعية، ((مكافئ غراي) / ساعة)؛

V_T هو بارامتر يحدّد شكل (انحدار) منحنى الاستجابة للجرعة التي تنشأ عنها آثار صحية قطعية في العضو T. ويعكس شكل منحنى الاستجابة للجرعة تفاوتية في الحساسية الإشعاعية البشرية والقدرة على تعويض الإصابة المستحثة بالإشعاع في العضو أو النسيج.

ويتضمن الجدول ١٠ بارامترات نموذج المخاطر [١٥] المستخدمة في النهج القائم على المخاطر.

الجدول ١٠: البارامترات المستخدمة في النهج القائم على المخاطر لمجموعة مختارة من الآثار الصحية القطعية العنيفة

العضو المعرّض للخطر الإشعاعي	التعرض ^أ	البارامتر ^ب		الفعالية البيولوجية النسبية	الأثر على الصحة
		θ_T^1 (مكافئ غراي) (ساعة) ^١	θ_T^∞ (مكافئ غراي)		
متلازمة تكوين الدم ^٢	خارجي γ	٠,١	٤,٥	١	التهاب الرئة
	خارجي n^0			٣	
	داخلي β, γ			١	
التهاب الرئة	داخلي α	٣٠	١٠	٢	التهاب الرئة ^٣
	داخلي β, γ			١	
متلازمة الجهاز المعدي المعوي	داخلي β, γ	٤	١٥	١	التهاب الرئة
	خارجي α			١	
التقشر الرطب	داخلي n^0	غير مقدر	غير مقدر	٣	التهاب الغدة الدرقية الإشعاعي الحاد
	خارجي β, γ			١	
التهاب الغدة الدرقية الإشعاعي الحاد	الأخذ الداخلي لبعض نظائر اليود ^٤	غير مقدر	٢٤٠	٠,٢	التهاب الغدة الدرقية الإشعاعي الحاد
	المواد الأخرى المتراكمة في الغدة الدرقية			١	
النخر	خارجي β, γ	غير مقدر	٢٥	١	النخر
	النسيج الرخو ^٥			١	

أ يشمل التعرض الخارجي β, γ الجرعة الناشئة عن الإشعاع الصدمي المتكون داخل مواد المصدر.

ب التقدير المركزي للقيمة.

ج الحالات التي تتلقى علاجاً طبياً داعماً. وتبلغ قيمة θ_T^∞ في الحالات التي تتلقى الحد الأدنى من العلاج ٣ من مكافئات الغراي، وأما قيمة θ_T^1 فتبلغ ٠,٠٧ (مكافئ غراي) / ساعة [١٢]

د قيم θ_T^∞ الواردة في الجدول تتعلق بتثبيح الرئة لدى الأطفال ولدى الكبار الذين يبلغ عمرهم ٤٠ عاماً أو أقل. وينبغي قسمة تلك القيم على ٢ في حالة الأشخاص الذين يزيد عمرهم عن ذلك [١٢]، و [٤١، الجدول ٢-٤].

هـ يُفترض في حالة مبعثات ألفا الموزعة توزيعاً متساوياً في محتوى القولون أن تشييع جدران الأمعاء لا يذكر.

و يتعلق ذلك بمساحة الجلد التي تبلغ ١٠٠ سم^٢ وتُعد خطراً يشكل تهديداً للحياة [١٢]. وينبغي حساب جرعة الجلد على عمق ٠,٤ ملليمتر على النحو الموصى به في المرجع [١٩] والفقرات (٣٠٥)، و(٣٠٦)، و(٣١٠) من المرجع [١٧] والقسم ٣-٤-١ من المرجع [١٨].

ز يُفترض أن احتمالات حدوث آثار صحية قطعية بسبب التشعيع المنتظم للنسيج المعرض لخطر إشعاعي في الغدة الدرقية تزيد خمسة أضعاف على احتمالات الإصابة بتلك الآثار نتيجة للتعرض لنظائر اليود المنخفضة الطاقة المبتعثة للبيتا، مثل اليود - ١٣١، واليود - ١٢٩، واليود - ١٢٥، واليود - ١٢٤، واليود - ١٢٣ [١٢]. وتنتزَع النويدات المشعة المتراكمة في الغدة الدرقية توزيعاً متغيراً في أنسجة الغدة الدرقية. وبيتعت اليود - ١٣١ جسيمات بيتا ذات طاقة منخفضة يمكن أن تفضي إلى تقليل فعالية تشعيع أنسجة الغدة الدرقية المعرضة لخطر إشعاعي بسبب تشتت طاقتها في أنسجة أخرى. وتقابل القيمة الواردة للجرعة θ_T^∞ جرعة ممتصة مودعة في الغدة الدرقية قدرها ١ ٢٠٠ غراي نتيجة لحدوث تعرض داخلي بعد الأخذ الداخلي لليود - ١٣١.

ح تنشأ آثار قطعية عنيفة عن النسيج الذي يصل عمقه إلى ٠,٥ سنتيمتر تحت سطح الجسم في مساحة تزيد على ١٠٠ سم^٢ [١٥، ٢٥].

ط تشير إلى شدة انحدار دالة الخطورة.

ولم ينظر النموذج القائم على المخاطر في حدوث أثر قطعي في وقت معيّن، مثل احتمال الوفاة في غضون أيام أو أسابيع بعد التشعيع، ولكنه حدّد قيمة $R_{S,T}$ (كنسبة مئوية) بهذه الصيغة:

$$(٧) \quad \frac{R_{S,T}}{100} = 1 - \exp\left[-H_T\{T_S, \dot{AD}_T(t)\}\right]$$

وتناولت السيناريوهات المنطوية على تعرض خارجي (التذليل الثاني، السيناريوهات الأولى والثاني والخامس والسادس) المستخدمة في حساب قيم D ، التعرض بمعدل ثابت للجرعة. ويبين المرجع [١٥] دالة الخطورة للحالة الخاصة بالتعرض للإشعاع بمعدل ثابت للجرعة:

$$(٨) \quad H_T(AD_T) = [\ln(2)] \left[\frac{\dot{AD}_T \times T_S}{AD_{T,50}} \right]^{V_T}$$

حيث:

$AD_{T,50}$ هي قيمة الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية التي تسفر نظرياً عن الحالة التي تؤثر على ٥٠ في المائة من الأشخاص المعرضين؛

$$(٩) \quad AD_{T,50} = \theta_T^\infty + \theta_T^1 \left(\dot{AD}_T \right)^{-1}$$

حيث:

\dot{AD}_T هو المعدل الثابت للجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في العضو أو النسيج T ، (مكافئ غراي/ساعة)؛

T_S هي مدة التشعيع (ساعة)، وتحدّد في السيناريو المعني وترد في الجدول ١١؛

θ_T^∞ و θ_T^1 و \dot{AD}_T هي بارامترات دالة الخطورة الواردة في الجدول ١٠.

ولأغراض النهج القائم على المخاطر، استخدمت قيمة الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المؤثرة نظرياً على ٥ في المائة من الأشخاص المعرضين، $AD_{T,0.05}$ ، باعتبارها عتبة جرعة التعرض الخارجي بمعدل ثابت للجرعة TD_T . وهذه القيمة هي حل المعادلة $[V] \text{ حيث } R = 0.05\%$.

$$(10) \quad TD_T = \left[\theta_T^\infty + \theta_T^1 \left(AD_T \right)^{-1} \right] \times \exp\left(-\frac{2.6}{V_T} \right)$$

ولم ينظر نموذج المخاطر في الشفاء وتغاير إصابة نسيج رخو. ولذلك فإن قيمة عتبة الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية لهذا الأثر TD_1 تساوي θ_1^∞ ولا تتوقف على تاريخ التعرض. ولم ينظر نموذج المخاطر في الشفاء وتغاير حدوث إصابة في الجذع والنخاع الأحمر. ولم ينظر النموذج أيضاً إلا في تغاير حدوث إصابة في الجلد. ولذلك فإن قيم عتبة الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية لتلك الآثار أقل من القيم المناظرة التي تبلغ θ_1^∞ على النحو المحدد بالمعادلة [10]. ويتضمن الجدول ٨ قيم عتبة الجرعة اللازمة للنظر في حدوث آثار قطعية.

وفي حالة التعرض الداخلي بسبب أخذ داخلي لنويد مشعة فإن معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية (AD_T) في أي عضو أو نسيج يتوقف على الزمن المحدد بالحركة الحيوية للنويد المشعة في جسم الإنسان باستخدام هذه المعادلة:

$$(11) \quad \dot{AD}_T(t) = I \times \dot{Ad}_T(t)$$

حيث:

I هو الأخذ الداخلي للنويد المشعة المعنية؛

$\dot{Ad}_T(t)$ هو معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في العضو T في الزمن t بعد أخذ ١ بكريل من هذه النويد المشعة.

ويتضمن المرجع [1٥] دالة الخطورة للحالة الخاصة التي يعبر فيها عن تاريخ التعرض بالمعادلة [1١]:

$$(12) \quad H_T(I) \cong [\ln(2)] \times (I)^{2 \times V_T} \times \left[\int_0^{\infty} \frac{\dot{Ad}_T(t)}{\left(I \times \theta_T^\infty + \left(\dot{Ad}_T(t) \right)^{-1} \theta_T^1 \right)^{-1}} dt \right]^{V_T}$$

حيث:

I هو الأخذ الداخلي للنويد المشعة المعنية؛

$\dot{Ad}_T(t)$ هو معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في العضو T في الزمن t بعد أخذ داخلي لمقدار يبلغ ١ بكريل من هذه النويد المشعة؛

θ_T^∞ ، θ_T^1 ، V_T هي بارامترات دالة الخطورة على النحو الوارد في الجدول ١٠.

ويتميز خطر حدوث آثار قطعية عنيفة بعد أخذ داخلي لنويد مشعة بعتبة للأخذ الداخلي $I_{T,05}$ تساوي الأخذ الداخلي لمادة مشعة تؤدي نظرياً إلى حدوث آثار قطعية عنيفة في العضو T في ٥ في المائة من الأشخاص المعرضين. ويمكن الحصول على قيمة $I_{T,05}$ لأي نويدة مشعة ولمسار الأخذ الداخلي من الحل العددي للمعادلة (٧) حيث $R = ٥\%$ ودالة الخطورة المحسوبة بالمعادلة (١٢). وتستند قيمة $I_{T,05}$ في مسار الدخول المعين والأثر المعين إلى الخواص الكيميائية والفيزيائية للنويد المشعة حسب ما هو مبين في المرجع [١٥]. ويتبين من حساب النموذج أن تلك القيم متفاوتة في المقادير الأسية بسبب العمر النصفي للنويد المشعة. وتقل بدرجة كبيرة، وإن كانت موجودة أيضاً، آثار الشكل الكيميائي للأيروسول (نوع الامتصاص) والحجم (قطر النشاط الحركي الهوائي الوسطي). وإجمالاً فإن قيم $I_{T,05}$ متباينة بين ثماني قيم أسية للنويدات المشعة الواردة في الجدول ١. ولذلك لم يكن ممكناً استخدام هذه الكمية كقيمة حدية عامة ملائمة لتقييم التعرض الداخلي الناجم عن دخول أي نويدة مشعة إلى الجسم. ومن الحلول العملية لهذه الصعوبة استخدام الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المحسوبة بالمعادلة (٤) بدلاً من أن يكون الأخذ الداخلي هو الأساس الذي تستند إليه معايير التصدي للطوارئ. ويمثل ذلك دالة حسابية لتحويل الأخذ الداخلي لمادة مشعة (النشاط المأخوذ إلى جسم الإنسان) إلى كمية لقياس الجرعة. وعتبة الأخذ الداخلي هي مقلوب دالة نصف عمر النويدة المشعة، ولذلك كلما تناقص نصف العمر كلما ازدادت عتبة الأخذ الداخلي. وهناك ارتباط عكسي في معامل تحويل الجرعة المودعة، إذ كلما نقص العمر النصفي، كلما انخفض معامل التحويل. وهكذا إذا كانت قيمة Δ مثالية فإن تحويل عتبة الأخذ الداخلي إلى قيمة عتبة الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية يمكن أن يؤدي إلى نقص كبير في قيم العتبات. وتبين من المرجع [١٥] أن قيمة ٣٠ يوماً للفترة Δ تعتبر مثالية. مثال ذلك أن تحويل قيمة عتبة الأخذ الداخلي إلى عتبة جرعة مرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية مدتها ٣٠ يوماً في حالة التهاب الرئة الإشعاعي يؤدي إلى انخفاض في مدى قيم العتبات من ٨ قيم أسية إلى ثلاثة أضعاف فقط.

ويتضمن الجدول ٩ مستويات العتبات للجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية نتيجة للتعرض الداخلي، وهذه المستويات مستخدمة في النهج القائم على المخاطر لحساب قيم D_2 . وقيمة عتبة الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المقابلة لقيمة عتبة الأخذ الداخلي على امتداد فترة زمنية Δ بعد الأخذ الداخلي هي:

$$(١٣) \quad TD_T(\Delta) = \int_0^{\Delta} \dot{A}D_{T,05}(t)dt = I_{T,05} \times \int_0^{\Delta} \dot{A}d_T(t)dt = I_{T,05} \times AF_{T,S}(\Delta)$$

حيث:

I_T هي قيمة عتبة الأخذ الداخلي الذي ينشأ عنه حدوث أثر صحي قطعي عنيف في العضو T (بالبكريل)؛

$\dot{A}d_T(t)$ هو معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في العضو T في الزمن t بعد أخذ ١ بكريل من النويدة المشعة المعنية؛

$AF_{T,S}(\Delta)$ هو معامل لتحويل الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية نتيجة للتعرض الداخلي في العضو T بعد أخذ داخلي لنويد مشعة من خلال مسار محدد في السيناريو S، ((مكافئ غراي)) / (بكريل).

التذييل الثاني

سيناريوهات تحديد قيم D

ثانياً- ١- التعرض لمادة غير مشتتة

يقصد في هذا التقرير بالمادة المشعة غير المشتتة مصدر مشع غير مدرّع وغير مغلف. وبالنظر إلى أن المادة المشعة تكون مختومة فإن التقرير لا يتناول سوى التعرض الخارجي من مادة مشعة غير مشتتة.

وتم النظر في سيناريوهين ينطويان على تعرض موضعي لمصدر قريب عند تحديد كمية خطيرة من مصدر:

- (أ) سيناريو "اليد" ينطوي على مصدر محمول في اليد؛
- (ب) سيناريو "الجيب" ينطوي على مصدر محمول في الجيب.

ويشير التاريخ إلى أن المدة التي من المحتمل أن يُحمل فيها المصدر على الجسم (في الجيب مثلاً) تقتصر على ١٠ ساعات تقريباً، وتقتصر مدة حمله في اليد على ساعة واحدة تقريباً. ويتبين من التحليل أن سيناريو "الجيب" أكثر تقييداً من سيناريو "اليد"، ولذلك استخدم هذا السيناريو عند حساب قيم D_1 للمصادر الصغيرة بالقدر الذي يسمح بحملها في اليد أو وضعها في الجيب.

ثانياً- ١-١- السيناريو الأول: سيناريو "الجيب"

يشار إلى السيناريو الأول باسم سيناريو "الجيب". واستخدم هذا السيناريو لتحديد مقدار المادة المشعة غير المدرّعة التي تعتبر خطيرة كمصدر للتعرض الخارجي الموضعي إذا كانت قريبة من جسم الإنسان. والتعرض الخارجي من مصدر غير مدرّع محمول في اليد أو موضوع في الجيب هو السبب الأكثر شيوعاً للإصابات الشديدة والوفيات المستحثة بالإشعاع التي تنطوي على مصادر غير خاضعة للسيطرة (مسروقة أو مفقودة) (انظر التذييل السابع).

وتشير التجربة أيضاً [٢٧] إلى أن نخر النسيج الرخو المستحث بالإشعاع في مساحة تتراوح بين ٥٠ و ١٠٠ سم^٢ وبعمق يصل إلى نحو ٠,٥ سنتيمتر في أجزاء كثيرة من الجسم (مثل الفخذ أو الصدر) نتيجة لحمل مصدر في جيب يمكن [٢٦، ٣١] أن يفضي إلى انتقاص كبير من نوعية الحياة. وتكشف التجربة أيضاً [٣٢] عن أن المصدر المحمول في الجيب يتحرك جانبياً وطولياً على مر الزمن.

وحسبت معاملات تحويل الجرعة من مصدر قريب (سيناريو الجيب) بطريقة تحاكي الجرعة التي تنشأ عن مصدر متحرك وتسفر عن نخر في الطبقة السطحية للنسيج الرخو في مساحة تتراوح بين ٥٠ و ١٠٠ سم^٢. ويرد بيان ذلك في التذييل الرابع.

ويُفترض أيضاً أنه من غير المعقول حمل كتلة قدرها ٥٠٠ غرام. ولذلك حُدّدت هذه القيمة باعتبارها حد الكتلة في سيناريو "الجيب". ويتضمن الجدول ١١ بارامترات السيناريو الأول.

ويعبّر في النهج المبني على الخبرة عن متوسط الجرعة الممتصة في النسيج الرخو وفقاً لسيناريو الجيب بالصيغة التالية:

(١٤)

$$D_{1,I}^{L+H}(A) = DF_{1,I}^{L+H} \times T_I \times A$$

حيث:

$D_{1,I}^{L+H}(A)$ هي الجرعة الممتصة (غراي) في النسيج الرخو من مصدر نشاط قريب A وفقاً لسيناريو الجيب؛

$DF_{1,I}^{L+H}$ هو معامل تحويل معدل الجرعة الممتصة في النسيج الرخو وفقاً لسيناريو الجيب (غراي/بكريل × ثانية))، وهذا المعامل محدد في حالة الإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة في الجدول ١٣، وأما في حالة الإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة فإنه يساوي عددياً معامل تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية $AF_{1,I}$ ، ويرد في الجدول ١٥؛

T_I هي مدة التعرض في السيناريو الأول (بالثانية) وتحدد في الجدول ١١؛

A هو النشاط الأولي للنوييدة المشعة المعنية في المصدر القريب (البكريل).

ويستخدم النهج القائم على المخاطر العادلة التالية لتحديد الجرعة الممتصة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية (مكافئ غراي) في النسيج الرخو وفقاً لسيناريو الجيب نتيجة للتعرض لمصدر نشاط قريب A :

(١٥)

$$AD_{1,I}(A) = AF_{1,I} \times T_I \times A$$

حيث:

$AD_{1,I}(A)$ هي الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في النسيج الرخو وفقاً للسيناريو الأول نتيجة للتعرض لمصدر نشاط قريب A ، (مكافئ غراي)؛

$AF_{1,I}$ هو معامل تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية للجرعة الممتصة (غراي) في النسيج الرخو وفقاً لسيناريو الجيب ((مكافئ غراي)/بكريل × ثانية))، ويرد في الجدولين ١٤ و ١٥؛

T_I هي مدة التعرض في السيناريو الأول (بالثانية)؛ وترد في الجدول ١١؛

A هو النشاط الأولي للنوييدة المشعة المعنية في المصدر القريب (بكريل).

ثانياً- ١-٢- السيناريو الثاني: سيناريو "الغرفة"

يشار إلى السيناريو الثاني باسم سيناريو "الغرفة". واستخدم هذا السيناريو لتحديد مقدار المادة المشعة التي تعتبر خطيرة إذا تركت غير مدرّعة في منطقة مأهولة (غرفة نوم أو مكان عمل) لفترة زمنية طويلة. ويعتبر التعرض الخارجي لإشعاع من مصدر بعيد غير مدرّع في غرفة سبباً شائعاً للإصابات الشديدة والوفيات المستحثة بالإشعاع التي تنطوي على مصادر "مسروقة أو مفقودة" غير خاضعة للسيطرة (انظر التذييل السابع). وافترض في هذا السيناريو أن الجسم بأكمله تعرض لمصدر غير مغلف وغير مدرّع من مسافة متر واحد تقريباً لمدة ١٠٠ ساعة.

وهناك ارتباط قوي بين بدء ظهور الآثار القطعية العنيفة نتيجة لتعرض الجسم بأكمله ومعدل الجرعة ومدة التعرض. وتشير التجربة [١٣، ١٥] إلى أن معدل الجرعة الذي يمكن أن يسفر عن جرعة ممتصة تزيد على المستويات المرجعية في غضون ١٠٠ ساعة (مثل ١٠ مللي غراي/ساعة في النخاع الأحمر) حد أدنى معقول للتقييم. ونحصل من ذلك على معدل التعرض الذي يمكن أن يسفر عن آثار قطعية عنيفة نتيجة للتعرض لمصدر غير خاضع للسيطرة ومحتفظ به عن غير معلم في مكان قريب (غرفة مثلاً). ومن الملائم بشكل خاص أن يكون التعرض مجزئاً. وهذه الافتراضات تؤيدها التجربة الموثقة التي أشارت إلى أن أصغر مصدر (انظر التذييل السابع) نجمت عنه إصابات قاتلة عارضة في سيناريو الغرفة أعطى معدل جرعة تراوحت بين ٢٠ و ٥٠ مللي غراي/ساعة على مسافة متر واحد، وبالتالي فإن مدة التعرض المحددة في سيناريو "الغرفة" هي ١٠٠ ساعة.

وإذا كانت الكتلة المطلوبة لإحداث معدل جرعة قدره ١٠ مللي غراي/ساعة من مصدر غير مدرّج هي ١ × ٦١٠ غرام، ينبغي حينئذ اعتبار المصدر غير محدود، إذ من شبه المستحيل لتلك الكتلة أن تنتج هذا المعدل للجرعة بسبب القيود الناشئة عن التدرج أثناء التخزين. وبالتالي فقد حدّدت كتلة قدرها ١ × ٦١٠ غرام كحد للكتلة في سيناريو "الغرفة". وترد بارامترات السيناريو الثاني في الجدول ١١.

واستخدم النهج المبني على الخبرة تعرض الجذع للإشعاع من مصدر على مسافة متر واحد لتحديد قيم D_I وفقاً للسيناريو الثاني. ويُفترض لأغراض التبسيط أن الجرعة التي يتلقاها النخاع العظمي الأحمر يمكن استخدامها لتقريب الجرعة التي تتلقاها كل الأعضاء في الجذع. وتُحسب الجرعة الممتصة في الجذع نتيجة للتعرض لمصدر مشع ذي نشاط أولي A على مسافة متر واحد بالمعادلة التالية:

$$(١٦) \quad D_{7,II}^{L+H}(A) = DF_{2,II}^{L+H} \times T_{II} \times A$$

حيث:

$D_{7,II}^{L+H}(A)$ هي الجرعة الممتصة في الجذع على مسافة متر واحد من مصدر ذي نشاط A ، (غراي)؛

$DF_{2,II}^{L+H}$ هو معامل تحويل معدل الجرعة الممتصة نتيجة لتعرض النخاع الأحمر^٦ لمصدر خارجي على مسافة متر واحد من الجسم، (غراي)/(بكريل × ثانية). ويرد ذلك في الجدول ١٣ في حالة الإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة، وأما في حالة الإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة فهو يساوي عددياً معامل تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية حسب ما هو وارد في الجدول ١٥؛

T_{II} هي مدة التعرض وفقاً للسيناريو الثاني (بالثانية) وترد في الجدول ١١؛

A هو النشاط الأولي للنوييدة المشعة المعنية في المصدر البعيد، (بالبكريل).

ويستخدم النهج القائم على المخاطر تعرض الجذع للإشعاع من مصدر على مسافة متر واحد لتحديد قيم D_I وفقاً للسيناريو الثاني. ويفترض لأغراض التبسيط أن الجرعة التي يتلقاها النخاع العظمي الأحمر يمكن استخدامها لتقريب الجرعة التي تتلقاها كل الأعضاء في الجذع. وتُحسب الجرعة المرجحة بالفعالية

٦ يفترض لأغراض التبسيط أن الجرعة التي يتلقاها النخاع العظمي الأحمر يمكن استخدامها لتقريب الجرعة التي تتلقاها كل الأعضاء في الجذع.

البيولوجية النسبية في الجذع نتيجة للتعرض لمصدر ذي إشعاع أولي A على مسافة متر واحد بالمعادلة التالية:

$$AD_{7,II}(A) = AF_{2,II} \times T_{II} \times A \quad (17)$$

حيث:

$AD_{7,II}(A)$ هو معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في الجذع على مسافة متر واحد من مصدر ذي نشاط أولي A، (مكافئ غراي)؛

$AF_{2,II}$ هو معامل تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في حالة تعرض النخاع الأحمر لإشعاع خارجي¹ من مصدر على مسافة متر واحد، ((مكافئ غراي)/(بكريل × ثانية)) ويرد في الجدول ١٤ والجدول ١٥؛

T_{II} هي مدة التعرض في السيناريو الثاني (بالثانية)، وترد في الجدول ١١؛

A هو النشاط الأولي للنوييدة المشعة المعنية في المصدر البعيد، (بالبكريل).

ثانياً-٢- التعرض لمادة مشتتة

تنشأ المادة المشعة المشتتة عن التسرب أو التفكيك أو تمزق مصدر مشع مختوم على أي نحو آخر، وذلك مثلاً في حريق أو انفجار (مثل جهاز نشر الإشعاعات). ويمكن لتشتت مصدر مشع يحتوي على غاز حامل مشع أن يفضي إلى تعرض الجسم بأكمله لإشعاع خارجي نتيجة للغمر في سحابة موضعية. ويمكن لتشتت مصدر مشع لا يحتوي على غاز حامل مشعل أن يفضي إلى تلوث البيئة المحيطة. ويمكن أن يتسبب هذا التلوث بدوره في حدوث تعرض داخلي وتعرض في الجلد عن طريق التلامس.

ثانياً-٢-١- السيناريو الثالث E والثالث R: "الاستنشاق"

يشار إلى السيناريو الثالث بأنه سيناريو "الاستنشاق". واستخدم هذا السيناريو لتحديد مقدار المادة المشعة القابلة للتشتت التي تعتبر خطيرة بسبب خطر استنشاقها. ويمكن للتعرض الداخلي نتيجة لاستنشاق مادة عالقة في الهواء أن يكون السبب وراء حدوث آثار قطعية عنيفة مستحثة بالإشعاع من مادة مشعة مشتتة نتيجة لاندلاع حريق أو وقوع انفجار.

وتتوقف خصائص قياس جرعة المادة العالقة في الهواء على خواصها الكيميائية والفيزيائية. وفي حالة الاستنشاق، تعين المادة الجسيمية واحد من ثلاثة من أنواع الامتصاص الرئوي الأساسية التي حددها نموذج الجهاز التنفسي البشري الذي وضعته اللجنة الدولية للوقاية من الإشعاعات [٦ ١]. وتصنف أيضاً الغازات والأبخرة المشعة، إذا استنشقت، ضمن واحدة من ثلاث رتب استناداً إلى النمط الأولي للامتصاص في الجهاز التنفسي. وحدد النهج المبني على الخبرة (السيناريو الثالث E) والنهج القائم على المخاطر (السيناريو الثالث R) للمواد المشعة المشتتة في حالات الطوارئ أنواعاً مختلفة من الامتصاص حسب ما هو مبين بالتفصيل أدناه.

ويشار إلى مقدار المادة المشعة المستنشقة من كل مصدر بأنها "الجزء القابل للاستنشاق من الأخذ الداخلي" F_{III} . وينشأ ذلك عن عاملين اثنين: جزء الإطلاق القابل للاستنشاق من النشاط الأولي RRF، وجزء الأخذ الداخلي عن طريق الاستنشاق IF_H :

$$(18) \quad F_{III} = RRF \times IF_H$$

حيث:

(أ) الجزء الكسري القابل للاستنشاق من عملية الإطلاق في النشاط الأولي RRF هو الجزء الكسري للمادة القابلة للاستنشاق التي يمكن إطلاقها في أيروسولات يقل قطر نشاطها الحركي الهوائي الوسطي عن 10 ميكرون. وينشأ أكبر جزء كسري قابل للاستنشاق من عملية الإطلاق من الحرائق التي تنطوي على مواد متطايرة أو قابلة للاشتعال [33] أو الانفجارات التي تنطوي على مساحيق ناعمة [34]. ويبلغ الحد الأعلى المعقول للكسر الجزئي القابل للاستنشاق من عملية إطلاق هذه الأشكال من المواد 0,1 تقريباً [33، 34]. والكسر الجزئي 0,1 القابل للاستنشاق من عملية إطلاق معظم المواد التي تعتبر قابلة للتشتت يتجاوز بكثير القيمة الفعلية [33، 34]، ولذلك استخدمت هذه القيمة المتحفظة لتقييم F_{III} في المعادلة (18).

(ب) الجزء الكسري من الأخذ الداخلي عن طريق الاستنشاق IF_H هو مقدار الجزء الكسري القابل للاستنشاق الذي يفترض أن الشخص يستنشقه في أثناء حالة الطوارئ. وافترض أن قيمة IF_H هي 1×10^{-3} ، وتتفق هذه القيمة مع الجزء الكسري للهواء الذي يستنشقه الشخص في غرفة حجمها 300 م³ لمدة 0,5 ساعة [35]. وتتجاوز هذه القيمة بكثير الجزء الكسري من الأخذ الداخلي البالغ 1×10^{-1} الذي يعتبر معقولاً لشخص على مسافة 100 متر من إطلاق خارجي عالق في الهواء (مثل المواد المنطلقة من حريق أو انفجار) [33]. ويسفر التركيز العالق في الهواء الذي يمكن أن ينشأ عنه أخذ داخلي يزيد على 1×10^{-1} عن دخان كثيف وحطام [33] ويتوقع خروج الشخص من ذلك الدخان بسرعة كبيرة نسبياً. ولذلك فإن قيمة قدرها 1×10^{-1} ربما اعتبرت الحد الأعلى المتحفظ للجزء الكسري من الأخذ الداخلي واستخدمت لتقييم F_{III} في المعادلة (18).

ولذلك يفترض أن "الجزء الكسري من الأخذ الداخلي القابل للاستنشاق" F_{III} هو 1×10^{-4} من المادة المشعة الموجودة في المصدر.

وبلغ الحد الأقصى للأخذ الداخلي عن طريق الاستنشاق في أي حادث على مر التاريخ 100 غرام [33]. ولذلك حُدثت قيمة F_{III} التي تساوي 1×10^{-1} غرامات بأنها حد الكتلة لهذا السيناريو. وترد في الجدول 11 بارامترات السيناريوهين الثالث E والثالث R.

وعين النهج المبني على الخبرة (السيناريو الثالث E) لجرعة الرئة والنخاع الأحمر مادة مشتتة ومستنشقة في أي نوع من أنواع الامتصاص الرئوي الذي يمكن أن يحدث في حالة تعرض الجمهور حسب ما هو وارد في الجدول الثاني - 8 من المرجع [11]. وافترض هذا النهج أيضاً أن المادة المستنشقة تنتمي للنوع أو الشكل الذي يسفر عن أعلى جرعة في المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي. وافترضت قيمة قدرها 1 ميكرون لقطر النشاط الحركي الهوائي الوسطي في المادة الجسيمية العالقة في الهواء. وكانت المادة المستنشقة من الرتبة 'D' استناداً إلى المرجع [28]. وتحسب الجرعة الممتصة المودعة في النسيج T نتيجة لاستنشاق مادة عالقة في الهواء وفقاً للنهج المبني على الخبرة باستخدام المعادلة التالية:

(١٩)

$$D_{T,III}^R(A, \Delta) = DF_{T,III}^R(\Delta) \times F_{III} \times A$$

حيث:

هي الجرعة الممتصة المودعة من الإشعاع R في الزمن Δ بعد حدوث أخذ داخلي في العضو أو النسيج T عن طريق استنشاق مادة مشعة ناتجة عن تشتت مصدر ذي نشاط أولي A، (غراي)؛

Δ : المدة الزمنية لتحديد الجرعة المودعة، وترد في الجدول ٦؛

$DF_{T,III}^R(\Delta)$ هو معامل تحويل الجرعة الممتصة المودعة من الإشعاع R في العضو أو النسيج T نتيجة للاستنشاق؛ (غراي/بكريل)، ويرد في الجدول ١٦ والجدول ١٧؛

F_{III} : الجزء الكسري من الأخذ الداخلي القابل للاستنشاق في السيناريو الثالث، ويرد في الجدول ١١؛

A: النشاط الأولي للنوييدة المشعة المعنية في المصدر المشتت، (بالبكريل).

وافترض في النهج القائم على المخاطر (السيناريو الثالث R) أن المادة المشتتة والمستنشقة لا تتغير كيميائياً بعد تشتتها وقد توجد في أي شكل عالق في الهواء وقد تُعَيَّن لأي نوع من أنواع الاستنشاق التي تحدث في حالة التعرض المهني كما هو وارد في الجدول الثاني - ٥ والجدول الثاني - ٩ من المرجع [١١]. وافترض أيضاً أن المادة المستنشقة تنتمي للنوع أو الشكل الذي يسفر عن أعلى جرعة في العضو المعني. وافترضت قيمة قدرها ١ ميكرون لقطر النشاط الحركي الهوائي الوسطي. ويحدّد النهج القائم على المخاطر الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في النسيج T نتيجة لاستنشاق مادة عالقة في الهواء بالمعادلة التالية:

(٢٠)

$$AD_{T,III}^R(A, \Delta) = AF_{T,III}^R(\Delta) \times F_{III} \times A$$

حيث:

هي الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية عند الزمن Δ بعد الأخذ الداخلي في العضو أو النسيج T عن طريق استنشاق مادة مشعة ناتجة عن تشتت مصدر ذي نشاط أولي A، (مكافئ غراي)؛

Δ هي المدة الزمنية لتحديد الجرعة المودعة، وترد في الجدول ٩؛

$AF_{T,III}^R(\Delta)$ هو معامل تحويل الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في العضو أو النسيج T نتيجة للاستنشاق، ((مكافئ غراي)/بكريل)، ويرد في الجدول ١٨؛

F_{III} هو الجزء الكسري من الأخذ الداخلي التنفسي في السيناريو الثالث، ويرد في الجدول ١١؛

A هو النشاط الأولي للنوييدة المشعة المعنية في المصدر المشتت، (بالبكريل).

ثانياً-٢-٢- السيناريو الرابع: سيناريو "الابتلاع"

يشار إلى السيناريو الرابع باسم سيناريو "الابتلاع". واستخدم هذا السيناريو لتحديد مقدار المادة المشعة القابلة للتلوث التي تعتبر خطيرة بسبب خطر ابتلاعها. ويمكن للتعرض الداخلي لمادة مشعة عن طريق الابتلاع أن يتسبب في آثار قطعية عنيفة مستحثة بالإشعاع من مصادر نويدات مشعة متسربة أو مواد مشعة قابلة للذوبان مشتتة في مسطح مائي تستخدم مياهه في الشرب.

ويشار إلى مقدار المادة المشعة المبتلعة بالنسبة لكتلة المصدر بأنها "الجزء الكسري من الأخذ الداخلي عن طريق الابتلاع" F_{IV} . والجزء الكسري من الأخذ الداخلي عن طريق الابتلاع في حادث جوانيا هو الأكبر على مر التاريخ [٣٦]. وشهد ذلك الحادث سرقة ونشر مصدر يحتوي على ٥١ تيرا بكرييل من مسحوق السيزيوم - ١٣٧ الشديد النعومة في شكل قابل للذوبان في الماء. وأسفر ذلك عن ابتلاع طفل لما يقرب من ١ جيغا بكرييل من السيزيوم - ١٣٧ عن غير قصد. ويمثل هذا المقدار نحو ١×١٠^{-٦} من مادة المصدر. ولذلك افترض هذا السيناريو أن الأخذ الداخلي عن طريق الابتلاع غير المتعمد يبلغ ١×١٠^{-٦} من المادة المشعة الموجودة في المصدر استناداً إلى هذه التجربة.

وقدّر الجزء الكسري من الأخذ الداخلي عن طريق الابتلاع بسبب تلوث مصدر مياه الشرب استناداً إلى الاعتبارات المتحفظة التالية:

- (أ) المادة المشعة قابلة للذوبان في الماء بنسبة ١٠٠ في المائة؛
- (ب) المادة المشعة ممتزجة بالتساوي في ١×١٠^{-٦} لترات من الماء، أي أقل بكثير من الكمية التي تخرج من كل إمدادات المياه العامة في المدن تقريباً؛
- (ج) الشخص يتناول لتران من الماء الملوث يومياً لمدة ٥ أيام.

وتتوقع هذه الافتراضات دخول ما يقرب من ١×١٠^{-٦} من مادة المصدر المشتت إلى الجسم عن طريق شرب مياه ملوثة. ولذلك من المعقول استخدام جزء كسري للأخذ الداخلي عن طريق الابتلاع (F_{IV}) قدره ١×١٠^{-٦} لكل من الابتلاع غير المتعمد وابتلاع مياه ملوثة.

وحُدّدت القيمة القصوى البالغة ١×١٠^{-٦} غرامات كحد لكتلة المادة المشعة في السيناريو الرابع. وهذه هي نفس القيمة المستخدمة في السيناريو الثالث. وترد في الجدول ١١ بارامترات السيناريو الرابع.

والقيمة الأسية لمعاملات تحويل الجرعة الممتصة من الأخذ الداخلي لكل وحدة عن طريق الابتلاع هي عموماً نفس القيمة الأسية للأخذ الداخلي عن طريق الاستنشاق. وعلاوة على ذلك فإن الأخذ الداخلي المفترض للاستنشاق يزيد عشر مرات على الأخذ الداخلي عن طريق الابتلاع. ولذلك لم ينظر النهج المبني على الخبرة صراحة في الابتلاع لأن سيناريو الاستنشاق هو الغالب في الأخذ الداخلي.

وافترض النهج القائم على المخاطر أن المادة لا تتغير كيميائياً بعد تشتتها وأنها قد تعيّن لنوع الابتلاع الوارد في الجدول الثاني - ٤ من المرجع [١١] الذي ينجم عنه أعلى جرعة مودعة مرجّحة بالفعالية البيولوجية النسبية في العضو المعني. ويحدّد النهج المبني على الخبرة الجرعة الممتصة المودعة في النسيج T نتيجة لابتلاع مادة مشتتة بالمعادلة التالية:

$$(٢١) \quad AD_{T,IV}(A, \Delta) = AF_{T,IV}(\Delta) \times F_{IV} \times A$$

حيث:

$AD_{T,IV}(A, \Delta)$ هي الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في الزمن Δ بعد حدوث أخذ داخلي في العضو T عن طريق ابتلاع مادة مشعة ناتجة عن تشتت مصدر ذي نشاط أولي A، (مكافئ غراي)؛

Δ هي المدة الزمنية لتحديد الجرعة المودعة، وترد في الجدول ٩؛

$AF_{T,IV}(\Delta)$ هو معامل تحويل الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في العضو T نتيجة للابتلاع ((مكافئ غراي)/(بكريل)، ويرد في الجدول ١٩؛

F_{IV} هو الجزء الكسري من الأخذ الداخلي عن طريق الابتلاع في السيناريو الرابع، ويرد في الجدول ١١؛

A هو النشاط الأولي للنوييدة المشعة المعنية في المصدر المشتت، [بكريل].

ثانياً-٢-٣- السيناريو الخامس: سيناريو "التلوث"

يشار إلى السيناريو الخامس باسم سيناريو "التلوث". واستخدم هذا السيناريو لتحديد مقدار المادة المشعة القابلة للتشتت التي تعتبر خطيرة بسبب تشعيع منطقة موضعية في الجلد عن طريق التلامس. ويمكن لتعرض الجلد لإشعاع خارجي مباشر من مادة مشعة موزعة على منطقة موضعية في سطح الجسم أن يتسبب في آثار صحية قطعية عنيفة في الجلد. وتكشف التجربة أيضاً [٣٧] أن الآثار القطعية العنيفة في الجلد تصاحب تعرض الجسم بأكمله، ويمكن أن تؤدي إلى إصابات أخرى مستحثة بالإشعاع وتفضي إلى الموت. وفي هذا السيناريو، استخدم سيناريو تلوث الجلد نقلاً عن المرجع [٣٥] لتحديد البارامترات. ويفترض السيناريو الخامس تسرب جزء كسري قدره 1×10^{-2} (F_V في الجدول ١١) من المادة المشعة في مصدر وحدث تلوث سطحي منتظم في مساحة قدرها 1 م^2 (S_V في الجدول ١١). ويفضي هذا التلوث السطحي بعد ذلك إلى تلوث الجلد بنسبة ١٠ في المائة من القيمة السطحية (R_V في الجدول ١١). ويفترض تعرض الجلد لمدة ٥ ساعات (T_V في الجدول ١١).

وافترض أن أكبر سُمْك للتلوث غير الخاضع للسيطرة في اليد هو ٠,١ غرام/سم^٢ تقريباً. ولذلك حدّدت قيمة قدرها 1×10^{-6} غرام كحد لكتلة المادة القابلة للتشتت وأخذت في الحسبان بارامترات التعرض المباشر عن طريق ملامسة المادة المشتتة. ويتضمن الجدول ١١ بارامترات السيناريو الخامس.

واستخدم النهج المبني على الخبرة والنهج القائم على المخاطر السيناريو الخامس لتقييم الجرعة التي تتلقاها مختلف مناطق الجلد عن طريق التعرض بالتلامس حسب ما هو مبين في التذييلين الخامس والسادس.

ويحدّد النهج المبني على الخبرة الجرعة الممتصة في الغشاء القاعدي للجلد (النسيج E٦) بالمعادلة التالية:

$$(٢٢) \quad D_{6E,V}^L(A) = \frac{R_V \times T_V \times DF_{6E,V}^L \times F_V}{S_V} A$$

حيث:

$D_{6E,V}^L(A)$ هي الجرعة الممتصة في الغشاء القاعدي للجلد نتيجة لتشتت مادة مشعة في مصدر ذي نشاط أولي A ، (غراي)؛

$DF_{6E,V}^L$ هو معامل تحويل الجرعة الممتصة في الغشاء القاعدي للجلد نتيجة لتلوث الجلد، (غراي/(بكريل × ثانية/سم^٢))، ويرد في الجدول ١٦؛

S_V ، F_V ، R_V ، T_V هي بارامترات السيناريو الخامس، وترد في الجدول ١١؛

A هو النشاط الأولي للنوييدة المشعة المعنية في المصدر المشتت، (بالبكريل).

ويحدّد النهج القائم على المخاطر الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في أدمة الجلد (النسيج ٦R) بالمعادلة التالية:

$$(٢٣) \quad AD_{6R,V}(A) = \frac{R_V \times T_V \times AF_{6R,V} \times F_V}{S_V} A$$

حيث:

$AD_{6R,V}(A)$ هي الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في أدمة الجلد نتيجة لتشتت مصدر ذي نشاط أولي A ، (مكافئ غراي)؛

$AF_{6R,V}$ هو معامل تحويل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية نتيجة للتعرض المباشر في أدمة الجلد، ((مكافئ غراي)/(ثانية × بكريل/سم^٢))، ويرد في الجدول ١٩؛

S_V ، F_V ، R_V ، T_V هي بارامترات السيناريو الخامس، وترد في الجدول ١١؛

A هو النشاط الأولي للنوييدة المشعة المعنية في المصدر المشتت، (بالبكريل).

ثانياً-٢-٤- السيناريو السادس: سيناريو "الغمر"

يُشار إلى السيناريو السادس باسم سيناريو "الغمر". واستُخدم هذا السيناريو لتحديد مقدار الغاز الخامل المشع الذي يعتبر خطيراً كمصدر للتعرض الخارجي إذا انتشر في غرفة. ويشكل سيناريو التعرض الوارد في المرجع [٣٥] الأساس الذي استند إليه سيناريو "الغمر". ويفترض السيناريو السادس تشتت الغاز الخامل بالتساوي في غرفة حجمها ٣٠٠ م^٣ وتعرض شخص في الغرفة لمدة ٠,٥ ساعة. ولم يؤخذ في الاعتبار أثر تغير الهواء في تخفيف الغاز المشع. ويعتبر الغمر داخل الغرفة تقييداً لأن انتشار أي غاز خامل في المحيط الخارجي يفضي إلى انتشاره بسرعة كبيرة وتركزه بدرجة أقل بكثير.

وحَدَّدت القيمة القصوى ١ × ١٠^٦ كحد لكتلة المادة القابلة للتشتت في السيناريو السادس. وهذه القيمة هي نفسها المستخدمة في السيناريو الثالث. ويتضمن الجدول ١١ بارامترات السيناريو السادس.

ويستخدم النهج المبني على الخبرة المعادلة التالية للحصول على الجرعة الممتصة في الجذع من التعرض الخارجي الناتج عن الغمر في غاز حامل مشع:

$$(٢٤) \quad D_{7,VI}^L(A) = \frac{T_{VI} \times F_{VI} \times DF_{2,VI}^L}{V_{VI}} A$$

حيث:

$D_{7,VI}^L(A)$ هي الجرعة الممتصة من الإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة في الجذع من تعرض خارجي ناتج عن الغمر في غاز حامل مشع متولد عن انتشار مصدر ذي نشاط أولي A ، (غراي)؛

$DF_{2,VI}^L$ هو معامل تحويل معدل الجرعة الممتصة في حالة تعرض النخاع الأحمر لإشعاع خارجي^٧ بسبب الغمر في غاز حامل مشع، (غراي/بكريل × ثانية/م^٣). وفي حالة الغمر في نويدات مشعة مبتعثة لإشعاع ذي انتقال خطي منخفض للطاقة فإن قيمة معامل تحويل معدل الجرعة الممتصة $DF_{2,VI}^L$ افترض أنه متساو عددياً مع معامل تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية $AF_{2,VI}$ في نفس النويذة المشعة. وترد معاملات النويدات المشعة ذات الصلة في الجدول ٢٠؛

T_{VI} ، V_{VI} ، F_{VI} هي بارامترات السيناريو السادس، وهي واردة في الجدول ١١؛

A هو النشاط الأولي للنويذة المشعة المعنية في المصدر المشتت، (بالبكريل).

ويستخدم النهج القائم على المخاطر المعادلة التالية للحصول على الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في الجذع من تعرض خارجي ناتج عن الغمر في غاز حامل مشع:

$$(٢٥) \quad AD_{7,VI}(A) = \frac{T_{VI} \times F_{VI} \times AF_{2,VI}}{V_{VI}} A$$

حيث:

$AD_{7,VI}(A)$ هي الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في الجذع من تعرض خارجي ناتج عن الغمر في غاز حامل مشع ناتج عن انتشار مصدر ذي نشاط أولي A ، (مكافئ غراي)؛

$AF_{2,VI}$ هو معامل تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في حالة تعرض النخاع الأحمر لإشعاع خارجي^٧ نتيجة للغمر في غاز حامل مشع، ((مكافئ غراي/بكريل × ثانية/م^٣))، ويرد ذلك في الجدول ٢٠؛

T_{VI} ، V_{VI} ، F_{VI} : بارامترات السيناريو السادس، وهي واردة في الجدول ١١؛

A هو النشاط الأولي للنويذة المشعة المعنية في المصدر المشتت، (بالبكريل).

^٧ لأغراض التبسيط يفترض أن الجرعة التي يتلقاها النخاع العظمي الأحمر يمكن استخدامها لتقريب الجرعة التي تتلقاها كل الأعضاء في الجذع.

ثانياً- ٣ - ملخص بارامترات السيناريوهات

يتضمن الجدول ١١ ملخصاً لبارامترات السيناريوهات المستخدمة في تحديد قيم D.

الجدول ١١ : بارامترات السيناريوهات المستخدمة في وضع قيم D

السيناريو		البارامتر	
الاسم	الرمز	القيمة	التعريف
الأول "الجيب"	T _I	١٠×٣,٦ ^٤ ثانية	مدة التعرض
	M _I	١٠×٥ ^٦ غرام	حد الكتلة
الثاني "الغرفة"	T _{II}	١٠×٣,٦ ^٥ ثانية	مدة التعرض
	M _{II}	١٠×١ ^٦ غرام	حد الكتلة
الثالث "الاستنشاق"	F _{III}	١٠×١ ^٤ ثانية	الجزء الكسري من الأخذ الداخلي القابل للاستنشاق
	M _{III}	١٠×١ ^٦ غرام	حد الكتلة
الرابع "الابتلاع"	F _{IV}	١٠×١ ^٥	الجزء الكسري من الأخذ الداخلي عن طريق الابتلاع
	M _{IV}	١٠×١ ^٦ غرام	حد الكتلة
الخامس "تلوث الجلد"	F _V	١٠×١ ^٢	الجزء الكسري من المادة المشتتة
	S _V	١٠×١ ^٤ سم ^٢	مساحة السطح الملوث
	R _V	١٠×١ ^١	النسبة بين الجلد والتلوث السطحي
	T _V	١٠×١,٨ ^٤ ثانية	مدة التعرض
	M _V	١٠×١ ^٦ غرام	حد الكتلة
السادس "العمر"	F _{VI}	١	الجزء الكسري من المادة المنطلقة في الغرفة
	V _{VI}	١٠×٣ ^٣ م ^٣	حجم الغرفة
	T _{VI}	١٠×١,٨ ^٣ ثانية	مدة التعرض
	M _{VI}	١٠×١ ^٦ غرام	حد الكتلة

التذييل الثالث حساب قيم D

استند مخطط تحديد قيمة D لنويدة مشعة معيّنة إلى لوغاريتمات لإيجاد الحد الأدنى لنشاط نويدة في مصدر يمكن أن يتسبب في آثار قطعية عنيفة إذا خرج عن نطاق السيطرة. واستخدم النهج المبني على الخبرة والنهج القائم على المخاطر لوغاريتمات مختلفة للنظر في سيناريوهات ومعايير حدوث آثار صحية قطعية عنيفة. وتم حساب النشاط الأولي A (بالكريل) الذي يمكن أن يسفر عن آثار قطعية عنيفة في كل سيناريو وفي كل نهج. وحُدِّت عموماً قيمة D باعتبارها أقل نشاط محسوب للسيناريوهات المنطبقة. ومع ذلك فقد قيّمت أيضاً عند حساب قيم D كتلة النشاط الذي يعتبر خطيراً لتحديد ما إن كانت الكتلة أكبر من أن تشكل تهديداً حقيقياً (غير محدود) أو لتحديد ما إذا كانت الكتلة تتجاوز حداً كفيلاً بأن لا تكون الحرجية مدعاة للقلق.

ويعرض هذا القسم ملخصاً للوغاريتمات المستخدمة في حساب قيم D. ويتضمن التذييل الثاني الأساس الذي تستند إليه بارامترات وصف السيناريوهات، ويرد في التذييل الأول الأساس الذي تستند إليه معايير بدء حدوث آثار قطعية عنيفة.

ثالثاً- ١- النهج المبني على الخبرة

ثالثاً- ١-١- حساب قيمة $E D_1$

يبين الشكل ٢ مخطط حساب قيمة $E D_1$. ويشمل هذا المخطط سيناريوهين للتعرض الخارجي:

- (أ) سيناريو "الجيب" (السيناريو الأول) الذي ينطوي على تعرض موضعي من مصدر قريب؛
(ب) سيناريو "الغرفة" (السيناريو الثاني) الذي ينطوي على تعرض الجسم بأكمله لإشعاع من مصدر بعيد.

سيناريو الجيب. النشاط الأولي $E A_{1,I}$ (بالكريل) الذي يمكن، وفقاً للنهج المبني على الخبرة، أن يتسبب في آثار صحية قطعية عنيفة في النسيج ١ (النسيج الرخو) وفقاً للسيناريو الأول (سيناريو "الجيب") هو حل المعادلة [١٤] لجرعة تساوي RD_1^{L+H} ، ويعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$(٢٦) \quad E A_{1,I} = \frac{I}{T_I \times DF_{1,I}^{L+H}} RD_1^{L+H}$$

حيث:

RD_1^{L+H} هو المستوى المرجعي للجرعة الممتصة التي يبدأ عندها حدوث آثار صحية قطعية عنيفة في النسيج الرخو (غراي)، ويرد في الجدول ٥؛

$DF_{1,I}^{L+H}$ هو معامل تحويل الجرعة الممتصة في النسيج الرخو وفقاً لسيناريو الجيب ((غراي/بكريل) x ثانية))، وهذا المعامل محدّد في حالة الإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة في الجدول ١٣، وأما في حالة الإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة فإنه يساوي عددياً معامل تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية $AF_{1,I}$ ويرد في الجدول ١٥؛

T_I هي مدة التعرض في السيناريو الأول (بالثانية) وترد في الجدول ١١.

سيناريو الغرفة. يفترض في هذا السيناريو أن تشيع الجذع ناشئ عن التعرض لمصدر على مسافة متر واحد تقريباً من سطح الجسم. ولأغراض التبسيط واستناداً إلى المرجع [١١]، يفترض أن الجرعة التي يتلقاها النخاع العظمي الأحمر يمكن استخدامها لتقريب الجرعة التي تتلقاها كل أعضاء الجذع. والنشاط الأولي

$E A_{7,II}$ (بالبكريل) الذي يمكن، وفقاً للنهج المبني على الخبرة، أن يتسبب في آثار قطعية عنيفة في النسيج γ (الجدع) وفقاً للسيناريو الثاني (سيناريو "الغرفة") هو حل المعادلة (١٦) لجرعة تساوي RD_7^{L+H} ، ويحسب بالمعادلة التالية:

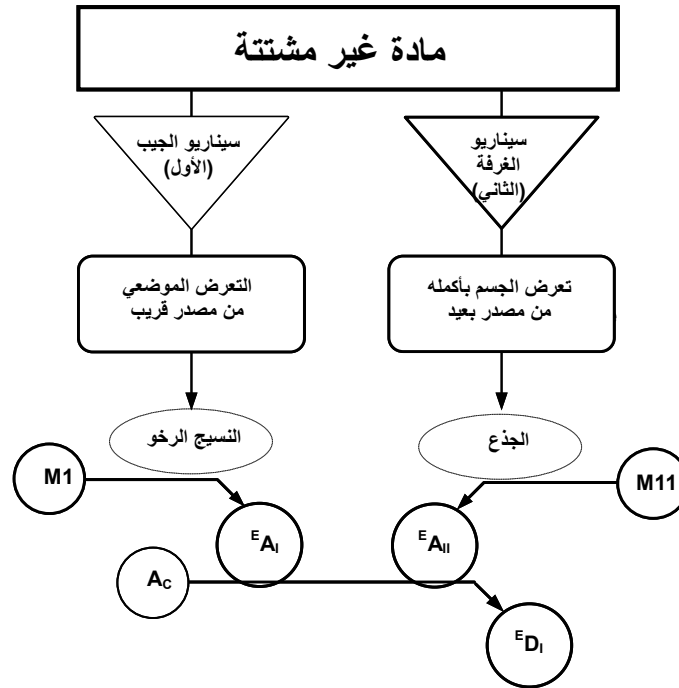
$$(٢٧) \quad E A_{7,II} = \frac{1}{T_{II} \times DF_{2,II}^{L+H}} RD_7^{L+H}$$

حيث:

RD_7^{L+H} هو المستوى المرجعي للجرعة الممتصة التي يبدأ عندها حدوث آثار قطعية عنيفة في الجذع نتيجة للتعرض الخارجي (غراي)، ويرد في الجدول ٥؛

$DF_{2,II}^{L+H}$ هو معامل تحويل معدل الجرعة الممتصة في حالة تعرض النخاع الأحمر لإشعاع خارجي A من مصدر على بُعد متر واحد من الجسم (غراي/بكريل \times ثانية)). وهذا المعامل محدد في حالة الإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة في الجدول ١٣، وأما في حالة الإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة فإنه يساوي عددياً معامل تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية $AF_{2,II}$ ويرد في الجدول ١٥؛

T_{II} هي مدة التعرض في السيناريو الثاني (بالثانية) وترد في الجدول ١١.



الشكل ٢: مخطط حساب قيمة $E D_1$

٨ لأغراض التبسيط يفترض أن الجرعة التي يتلقاها النخاع العظمي الأحمر يمكن استخدامها لتقريب الجرعة التي تتلقاها كل أعضاء الجذع.

تحديد قيمة ${}^E D_1$. قيمة ${}^E D_1$ هي أقل قيمة لثلاثة أنشطة:

$$(28) \quad {}^E D_1 = \min\{{}^E A_I, {}^E A_{II}, A_C\}$$

حيث:

A_C هو نشاط حد الحرجية (بالبكريل) ويرد في الجدول ٢٨؛

${}^E A_I$ و ${}^E A_{II}$ هما النشاطان الأوليان لنويدة مشعة تعتبر خطيرة بعد النظر في كتلتيهما على النحو المحدد في المعادلة (٢٩) والمعادلة (٣٠)، (بالبكريل):

$$(29) \quad {}^E A_I = \begin{cases} {}^E A_{I,I} & \text{if } M \leq M_I \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_I \end{cases}$$

حيث:

${}^E A_{I,I}$ هو النشاط الأولي المحدد بالمعادلة (٢٦)، (بالبكريل)؛

M هي كتلة^١ المادة ذات النشاط ${}^E A_{I,I}$ (غرام)؛

M_I هو حد الكتلة في السيناريو الأول (بالغرام) ويرد في الجدول ١١،

$$(30) \quad {}^E A_{II} = \begin{cases} {}^E A_{7,II} & \text{if } M \leq M_{II} \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_{II} \end{cases}$$

حيث:

${}^E A_{7,II}$ هو النشاط الأولي المحدد بالمعادلة (٢٧)، (بالبكريل)؛

M هي كتلة^١ المادة ذات النشاط ${}^E A_{7,II}$ (غرام)؛

M_{II} هو حد الكتلة (بالغرام) في السيناريو الثاني كما هو وارد في الجدول ١١.

والقيمة ${}^E D_1$ لنويدة مشعة تكون غير محدودة إذا كانت قيم ${}^E A_I$ ، ${}^E A_{II}$ ، A_C لهذه النويدات المشعة غير محدودة. ويتضمن الجدول ١ والجدول ٢٤ قيم ${}^E D_1$.

ثالثاً-٢-١- حساب قيمة ${}^E D_2$

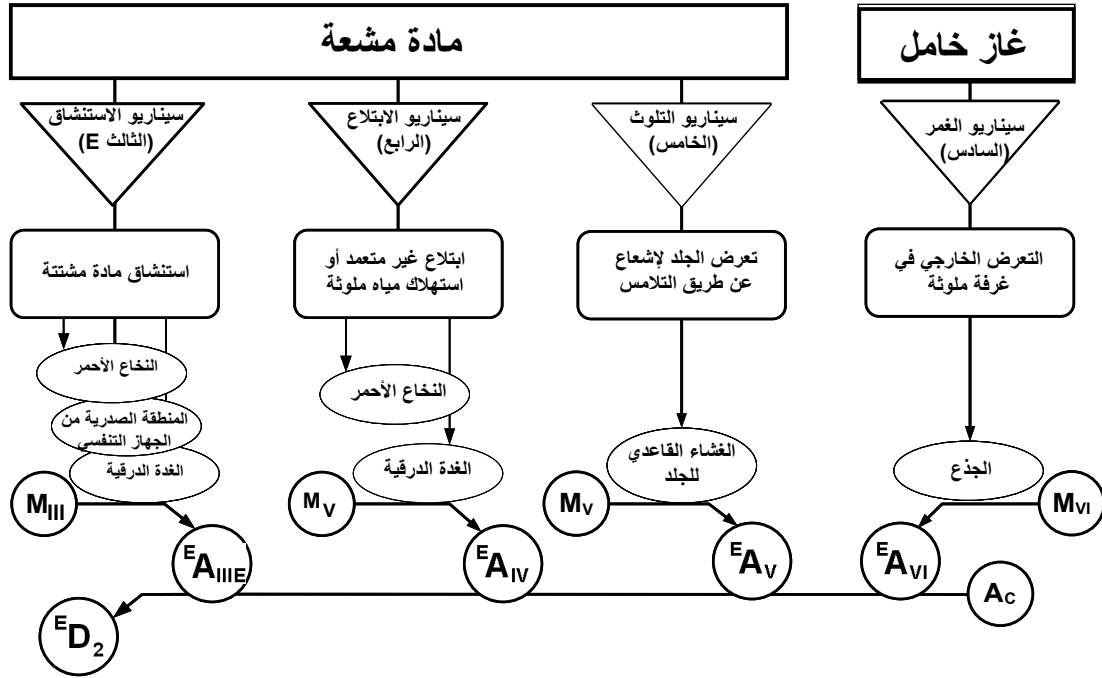
يبين الشكل ٣ مخطط حساب قيمة ${}^E D_2$. ويشمل ذلك أربعة سيناريوهات تنطوي على تعرض لمادة مشعة مشتتة:

(أ) الاستنشاق (السيناريو الثالث (E)؛

(ب) الابتلاع (السيناريو الرابع)؛

٩ كتلة المادة المشعة (بالغرام) تساوي نشاطها (بالبكريل) مقسوماً على نشاطها النوعي (بكريل/غرام) حسب ما هو وارد في الجدول ٢٦.

- (ج) تلوث الجلد (السيناريو الخامس)؛
 (د) الغمر في غاز حامل مشع (السيناريو السادس).



الشكل ٣: مخطط حساب قيمة $E D_2$

الاستنشاق. تم النظر في تعرض النخاع الأحمر (النسيج ٢) والمنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي (النسيج ٣) والغدة الدرقية (النسيج ٥) بعد الاستنشاق.

والنشاط الأولي $E A_{2,III}$ (بالكربيل) الذي يمكن، استناداً إلى النهج المبني على الخبرة، أن يتسبب في آثار صحية قطعية في النسيج ٢ (النخاع الأحمر) وفقاً للسيناريو الثالث (الاستنشاق) هو حل المعادلة (١٩) لجرعة تساوي $RD_2^{L+H}(\Delta)$ ويحدّد بالمعادلة التالية:

$$(٣١) \quad E A_{2,III} = \frac{1}{F_{III} \times DF_{2,III}^{L+H}(\Delta)} RD_2^{L+H}(\Delta)$$

حيث:

$RD_2^{L+H}(\Delta)$ هو المستوى المرجعي للجرعة الممتصة المودعة لمدة يومين وتتسبب في حدوث آثار صحية قطعية عنيفة نتيجة حدوث تعرض داخلي في النخاع الأحمر (غراي)، ويرد في الجدول ٦؛

$DF_{2,III}^{L+H}(\Delta)$ هو معامل تحويل الجرعة الممتصة المودعة لمدة يومين نتيجة حدوث تعرض داخلي في النخاع الأحمر عن طريق الاستنشاق (غراي/كربيل)، ويرد في الجدول ١٦؛

F_{III} هو الجزء الكسري من الأخذ الداخلي القابل للاستنشاق في السيناريو الثالث حسب ما هو وارد في الجدول ١١.

وتم حساب النشاط الأولي ${}^E A_{3E,III}$ (بالبكريل) الذي يمكن، استناداً إلى النهج المبني على الخبرة، أن يتسبب في آثار صحية قطعية عنيفة في النسيج $E3$ (المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي) وفقاً للسيناريو الثالث E (الاستنشاق) باستخدام مستويات مرجعية مختلفة لحدوث الآثار القطعية ومعاملات تحويل الجرعة في كل مجموعة من المجموعات الثلاث للنويدات المشعة:

- (أ) الأيروسولات من النوع 1S للمبتعثات ذات الأعمار الطويلة التي تبتعث إشعاعاً ذا انتقال خطي مرتفع للطاقة (المجموعة HS)؛
 (ب) الاسترنتشيوم - ٩٠ في شكل ${}^{90}SrTiO_3$ (المجموعة LS)؛
 (ج) المبتعثات الأخرى للإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة (المجموعة L).

والنشاط الأولي هو حل المعادلة (١٩) لجرعة تساوي $RD_{3E}^R(\Delta)$ ، ويُحسب بالمعادلة التالية:

$$(32) \quad {}^E A_{3E,III} = \frac{1}{F_{III} \times DF_{3E,III}^R(\Delta)} RD_{3E}^R(\Delta)$$

حيث:

$RD_{3E}^R(\Delta)$ هو المستوى المرجعي للجرعة الممتصة المودعة التي تتسبب في حدوث آثار صحية قطعية عنيفة في المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي نتيجة لحدوث تعرض داخلي من نويدات مشعة من المجموعة R (HS أو LS أو L)، (بالغراي). وترد قيم ذلك في الجدول ٦؛

$DF_{3E,III}^R(\Delta)$ هو معامل تحويل الجرعة الممتصة المودعة نتيجة لحدوث تعرض داخلي في المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي بسبب أخذ داخلي لنوييدة مشعة من المجموعة R (HS أو LS أو L) (غراي/بكريل) عن طريق الاستنشاق. ويتضمن الجدول ١٦ قيم المجموعات HS و L و LS؛

F_{III} هو الجزء الكسري من الأخذ الداخلي القابل للاستنشاق كما هو محدد في السيناريو الثالث، ويرد في الجدول ١١.

والنشاط الأولي ${}^E A_{5,III}$ (بالبكريل) الذي يمكن، استناداً إلى النهج المبني على الخبرة، أن يتسبب في آثار صحية قطعية عنيفة في النسيج ٥ (الغدة الدرقية) وفقاً للسيناريو الثالث E (الاستنشاق) هو حل المعادلة (١٩) لجرعة تساوي $RD_5^L(\Delta)$ ، ويُحسب بالمعادلة التالية:

$$(33) \quad {}^E A_{5,III} = \frac{1}{F_{III} \times DF_{5,III}^L(\Delta)} RD_5^L(\Delta)$$

حيث:

١٠ يشير النوع S إلى الامتصاص الرئوي البطيء [١١].

١١ يعامل استنشاق $SrTiO_3$ كحالة خاصة كما هو مبين في التذييل الثاني.

$RD_5^L(\Delta)$ هو المستوى المرجعي للجرعة الممتصة المودعة نتيجة لحدوث تعرض داخلي في الغدة الدرقية ويبدأ عنده حدوث آثار صحية قطعية عنيفة (بالغراي)، ويرد في الجدول ٦؛

$DF_{5,III}(\Delta)$ هو معامل تحويل الجرعة الممتصة المودعة نتيجة للتعرض الخارجي في الغدة الدرقية بسبب أخذ داخلي عن طريق الاستنشاق (غراي/بكريل)، ويرد في الجدول ١٧؛

F_{III} هو الجزء الكسري من الأخذ الداخلي القابل للاستنشاق كما هو محدد في السيناريو الثالث، ويرد في الجدول ١١.

الابتلاع. تناول سيناريو "الابتلاع" (السيناريو الرابع) في بديلين افترض في أولهما تسرب المصدر وحدث تلامس معه مما أسفر عن ابتلاع غير متعمد لمادة مشعة. وافترض في البديل الثاني أن المصدر المتسرب وضع في إمدادات المياه العامة مما أسفر عن تلويث المياه واستهلاكها. وعموماً فإن معاملات تحويل الجرعة الممتصة في القولون والنخاع الأحمر والغدة الدرقية لكل وحدة أخذ داخلي عن طريق الابتلاع لا تختلف عن القيمة الأسية في حالة الاستنشاق. ولذلك فإن قيم النشاط الأولي $A_{T,III}^E$ الناجم عن الاستنشاق المحسوب وفقاً لسيناريو "الاستنشاق" (السيناريو الثالث E) وبافتراض استنشاق 10^{-4} من المادة المشتتة تقل عن القيم المحسوبة بافتراض جزء كسري للأخذ الداخلي عن طريق الابتلاع قدره 10^{-6} كما هو محدد في كل من البديلين اللذين تناولهما السيناريو الرابع. واستخلص من ذلك أن قيمة D للنشاط الأولي $A_{T,III}^E$ استناداً إلى سيناريو الاستنشاق هي الحد المعقول الذي إذا انخفض الابتلاع عنه فإنه لا يعتبر خطراً يشكل تهديداً كبيراً. وبالتالي فإن حالات التعرض التي تحدث في القولون والنخاع الأحمر والغدة الدرقية بسبب الابتلاع لم يُنظر فيها على حدة.

تلوث الجلد. النشاط الأولي $A_{6E,V}^E$ (بالبكريل) الذي يمكن، استناداً إلى النهج المبني على الخبرة، أن يتسبب في آثار صحية قطعية عنيفة في النسيج E٦ (الغشاء القاعدي للجلد) وفقاً للسيناريو الخامس، هو حل المعادلة (٢٢) لجرعة تساوي RD_{6E}^{L+H} ، ويُحسب بالمعادلة التالية:

$$(٣٤) \quad A_{6E,V}^E = \frac{S_V}{F_V \times R_V \times T_V \times DF_{6E,V}^L} RD_{6E}^{L+H}$$

حيث:

RD_{6E}^{L+H} هو المستوى المرجعي للجرعة الممتصة التي يتلقاها الغشاء القاعدي للجلد ويبدأ عنده حدوث آثار صحية قطعية عنيفة (بالغراي)، ويرد في الجدول ٥؛

$DF_{6E,V}^L$ هو معامل تحويل الجرعة الممتصة نتيجة لتعرض الغشاء القاعدي للجلد بالتلامس، (غراي/بكريل × ثانية/سم^٢)، ويرد في الجدول ١٦؛

S_V هي مساحة السطح الملوث الأولي في السيناريو الخامس، (سم^٢)، ويرد في الجدول ١١؛

F_V هو الجزء الكسري من المادة المشتتة في السيناريو الخامس، ويرد في الجدول ١١؛

R_V هي نسبة الجلد إلى التلوث السطحي في السيناريو الخامس، وترد في الجدول ١١؛

T_V هي مدة التعرض في السيناريو الخامس، (بالثانية)، وترد في الجدول ١١.

الغمر. بالنظر إلى أن الكربتون -٨٥ غاز خامل فإن إطلاقه يشكل خطراً خارجياً. والنشاط الأولي ${}^E A_{7,VI}$ ، (بالكريل)، للغاز الخامل الذي يمكن، استناداً إلى النهج المبني على الخبرة، أن يتسبب في آثار صحية قطعية عنيفة في النسيج ٧ (الذرع) وفقاً للسيناريو السادس (الغمر) هو حل المعادلة (٢٤) لجرعة تساوي RD_7^{L+H} ، ويُحسب بالمعادلة التالية:

$$(٣٥) \quad {}^E A_{7,VI} = \frac{V_{VI}}{T_{VI} \times DF_{2,VI}^L} RD_7^{L+H}$$

حيث:

RD_7^{L+H} هو المستوى المرجعي للجرعة الممتصة التي تتسبب في بدء حدوث آثار صحية قطعية عنيفة في الذرع نتيجة للتعرض الخارجي (بالغراي)، ويرد في الجدول ٥؛

$DF_{2,VI}^L$ هو معامل تحويل معدل الجرعة الممتصة الناتجة عن حدوث تعرض خارجي في النخاع الأحمر^{١٢} بسبب الغمر في غاز خامل مشع (غراي/بكريل × ثانية^٣). وافترض أن هذا المعامل في حالة غاز الكربتون - ٨٥ يساوي عددياً معامل تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية $AF_{2,VI}$ للكربتون - ٨٥. وترد القيم في الجدول ٢٠؛

V_{VI} هو حجم الغرفة في السيناريو السادس (بالمتر المكعب)، ويرد في الجدول ١١؛

T_{VI} هي مدة التعرض في السيناريو السادس (بالثانية)، وترد في الجدول ١١؛

F_{VI} هو الجزء الكسري من المادة المنطلقة في الغرفة، ويرد في الجدول ١١.

تحديد قيمة ${}^E D_2$. حُسبت قيمة ${}^E D_2$ لغاز الكربتون - ٨٥ الخامل المشع بطريقة مختلفة عن النويدات المشعة الأخرى.

وتحدد قيمة ${}^E D_2$ (بالكريل) للمواد الأخرى غير الغازات الخاملة بالمعادلة التالية:

$$(٣٦) \quad {}^E D_2 = \min\{ {}^E A_{III E}, {}^E A_V, A_C \}$$

حيث:

A_C هو نشاط حد الحرجية (بالكريل)، ويرد في الجدول ٢٨؛

${}^E A_V$ ، ${}^E A_{III E}$ هما النشاطان الأوليان (بالكريل) ويتم الحصول عليهما بالمعادلة (٣٧) والمعادلة (٣٨):

١٢ لأغراض التبسيط يفترض أن الجرعة التي يتلقاها النخاع العظمي الأحمر يمكن استخدامها لتقريب الجرعة التي تتلقاها كل الأعضاء في الذرع.

$$(37) \quad {}^E A_{III} = \begin{cases} \min\{{}^E A_{2,III}, {}^E A_{3E,III}, {}^E A_{5,III}\} & \text{if } M \leq M_{III} \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_{III} \end{cases}$$

حيث:

،(33)، (32)، (31) هي الأنشطة الأولية المحسوبة بالمعادلات (33)، (32)، (31)؛
(بالكريل)؛

9M المادة التي ينتج عنها نشاط يساوي $\min\{{}^E A_{2,III}, {}^E A_{3E,III}, {}^E A_{5,III}\}$ (بالغرام)؛

M_{III} هو حد الكتلة في السيناريو الثالث (بالغرام)، ويرد في الجدول ١١؛

والمعادلة

$$(38) \quad {}^E A_V = \begin{cases} {}^E A_{6E,V} & \text{if } M \leq M_V \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_V \end{cases}$$

حيث:

${}^E A_{6E,V}$ هو النشاط الأولي المحسوب بالمعادلة (34)، (بالكريل)؛

M هي كتلة المادة التي ينتج عنها النشاط ${}^E A_{6E,V}$ (بالغرام)؛

M_V هو حد الكتلة في السيناريو الخامس (بالغرام)، ويرد في الجدول ١١ .

وتساوي قيمة ${}^E D_2$ للكربتون - ٨٥ قيمة النشاط الأولي ${}^E A_{2,VI}$ المحدد بالمعادلة (35):

$$(39) \quad {}^E D_2 \equiv {}^E A_{2,VI}$$

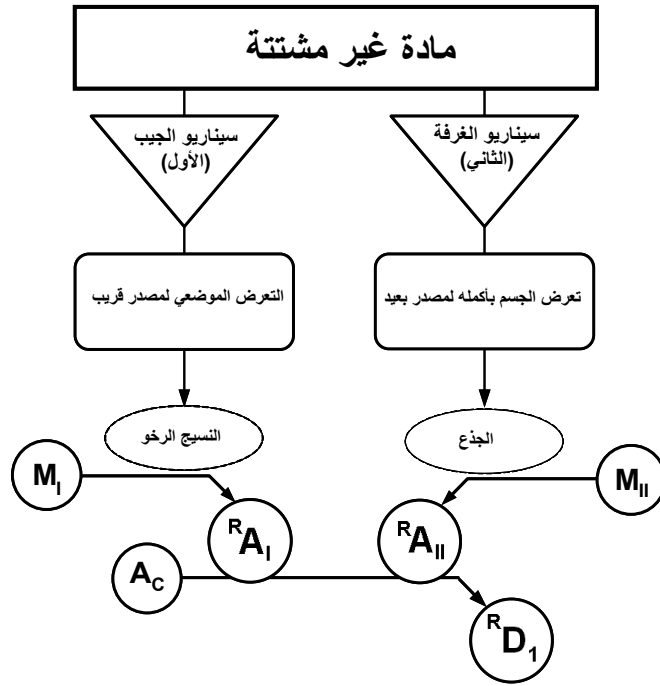
وتكون قيمة ${}^E D_2$ لمادة معينة غير الغاز الخامل غير محدودة إذا كانت القيم ${}^E A_V$ ، ${}^E A_C$ غير محدودة. وتكون أيضاً قيمة ${}^E D_2$ غير محدودة في الغاز الخامل المشع إذا كانت القيم ${}^E A_{2,VI}$ غير محدودة. ويتضمن الجدول ١ والجدول ٢٤ قيم ${}^E D_2$ التي تم الحصول عليها باستخدام النهج المبني على الخبرة.

ثالثاً-٢- النهج القائم على المخاطر

ثالثاً-٢-١- حساب قيمة ${}^R D_1$

يبين الشكل ٤ المخطط المستخدم في حساب قيمة ${}^R D_1$. ويشمل ذلك سيناريوهين للتعرض لمصدر مشع غير مشتت:

- (أ) سيناريو "الجيب" (السيناريو الأول) الذي ينطوي على تعرض موضعي لمصدر قريب؛
- (ب) سيناريو "الغرفة" (السيناريو الثاني) الذي ينطوي على تعرض الجسم بأكمله لمصدر بعيد).



الشكل ٤: مخطط تحديد قيمة $R D_1$

سيناريو الجيب. النشاط الأولي $R A_{I,I}$ (بالكريل) الذي يمكن، استناداً إلى النهج القائم على المخاطر، أن يتسبب في آثار صحية قطعية عنيفة في النسيج ١ (النسيج الرخو) وفقاً للسيناريو الأول (سيناريو "الجيب") هو حل المعادلة (١٥) لجرعة تساوي TD_1 ، ويتم الحصول عليه بالمعادلة التالية:

$$(٤٠) \quad R A_{I,I} = \frac{1}{T_1 \times AF_{I,I}} TD_1$$

حيث:

TD_1 هو مستوى لعتبة الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية التي يبدأ عندها حدوث آثار قطعية عنيفة في النسيج الرخو (مكافئ غراي)، ويرد في الجدول ٨؛

$AF_{I,I}$ هو معامل تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في النسيج الرخو وفقاً لسيناريو الجيب، ((مكافئ غراي)/(كريل × ثانية))، ويرد في الجدول ١٤ و ١٥؛

T_1 هي مدة التعرض في السيناريو الأول (بالثانية)، وترد في الجدول ١١.

سيناريو الغرفة. افترض في هذا السيناريو أن تشيع الجذع ناجم عن التعرض لمصدر على مسافة متر واحد تقريباً من سطح الجسم. ولأغراض التبسيط واستناداً إلى المرجعين [١٥، ٢١]، افترض أن الجرعة التي يتلقاها النخاع الأحمر يمكن استخدامها لتقريب الجرعة التي تتلقاها كل الأعضاء في الجذع. والنشاط الأولي $R A_{7,II}$ (بالكريل) الذي يمكن، استناداً إلى النهج القائم على المخاطر، أن يتسبب في آثار صحية قطعية عنيفة في النسيج ٧ (الجدع) وفقاً للسيناريو الثاني (سيناريو "الغرفة") هو حل المعادلة (١٧) لجرعة تساوي TD_7 ، ويتم الحصول عليه بالمعادلة التالية:

$$(٤١) \quad {}^R A_{7,II} = \frac{1}{T_{II} \times AF_{2,II}} TD_7$$

حيث:

TD_7 هو مستوى لعتبة الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية التي يبدأ عندها حدوث آثار صحية قطعية عنيفة في الجذع (مكافئ غراي)، ويرد في الجدول ٨؛

$AF_{2,II}$ هو معامل تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية نتيجة لحدوث تعرض خارجي في النخاع الأحمر^{١٣} من مصدر على مسافة متر واحد ((مكافئ غراي)/بكريل × ثانية))، ويرد في الجدول ١٤ والجدول ١٥،

T_{II} هي مدة التعرض في السيناريو الثاني (بالثانية)، وترد في الجدول ١١.

تحديد قيمة ${}^R D_I$. قيمة ${}^R D_I$ هي أقل قيمة للأنشطة الثلاثة ${}^R A_I$ ، ${}^R A_{II}$ ، و A_C ويعبّر عنها بالمعادلة التالية:

$$(٤٢) \quad {}^R D_I = \min\{{}^R A_I, {}^R A_{II}, A_C\}$$

حيث:

A_C هو نشاط حد الحرجية (بالبكريل)، ويرد في الجدول ٢٨؛

${}^R A_I$ ، ${}^R A_{II}$ هما أقل نشاطين أوليين بعد احتساب الكتلة (بالبكريل) باستخدام المعادلتين (٤٣) و(٤٤):

$$(٤٣) \quad {}^R A_I = \begin{cases} {}^R A_{I,I} & \text{if } M \leq M_I \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_I \end{cases}$$

حيث:

${}^R A_{I,I}$ هو النشاط الأولي، ويحسب بالمعادلة (٤٠)، (بالبكريل)؛

M هي كتلة^{١٤} المادة ذات النشاط ${}^R A_{I,I}$ (بالغرام)؛

M_I هو حد الكتلة (بالغرام) في السيناريو الأول حسب ما هو وارد في الجدول ١١؛

$$(٤٤) \quad {}^R A_{II} = \begin{cases} {}^R A_{7,II} & \text{if } M \leq M_{II} \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_{II} \end{cases}$$

حيث:

١٣ لأغراض التبسيط يفترض أن الجرعة التي يتلقاها النخاع العظمي الأحمر يمكن استخدامها لتقريب الجرعة التي تتلقاها كل الأعضاء في الجذع.

$^R A_{7,II}$ هو النشاط الأولي المحدد بالمعادلة (٤١)، (بالكربيل)؛

M هي كتلة المادة ذات النشاط $^R A_{7,II}$ (بالغرام)؛

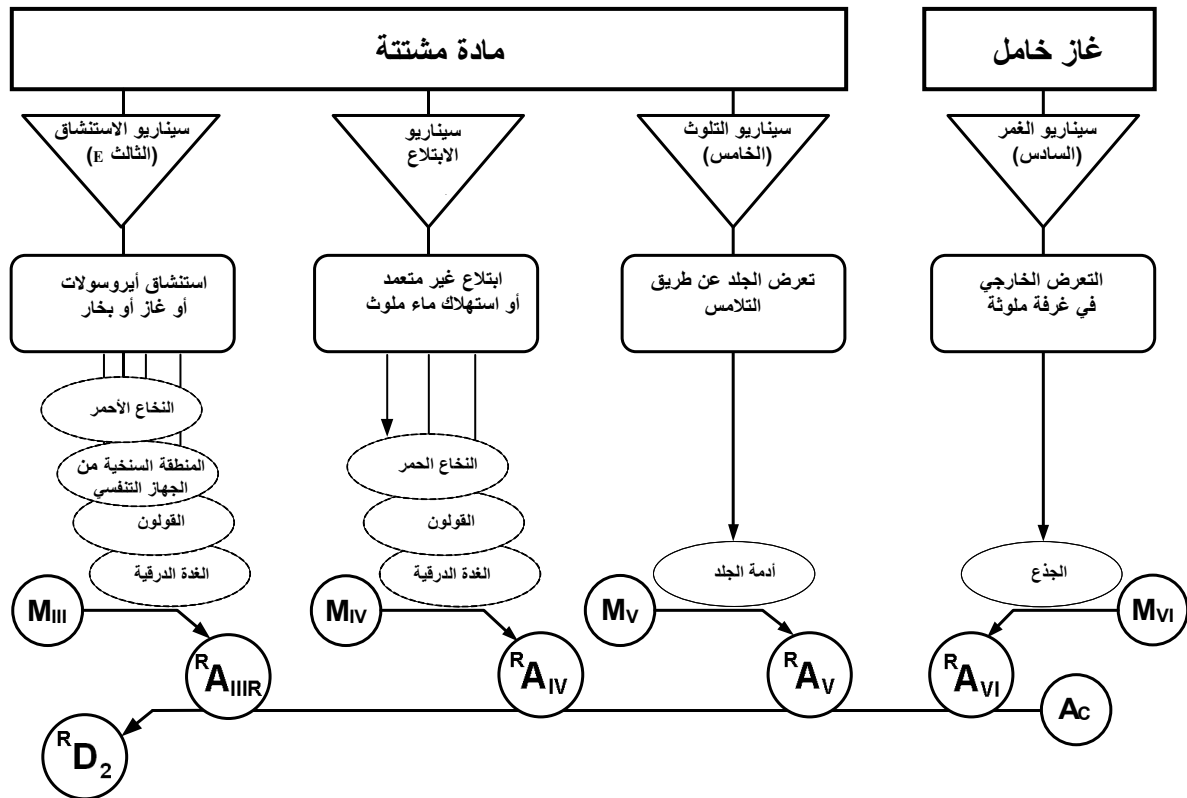
M_{II} هو حد الكتلة في السيناريو الثاني حسب ما هو محدد في الجدول ١١.

وتكون قيم $^R D_1$ لنويدة مشعة معينة غير محدودة إذا كانت القيم $^R A_I$ ، و $^R A_{II}$ ، و A_C غير محدودة. ويتضمن الجدولان ١ و ٢ قيم $^R D_1$ (لنويدات المشعة التي حُسبت قيمتها أيضا باستخدام النهج المبني على الخبرة).

ثالثاً-٢-٢- حساب قيمة $^R D_2$

يبين الشكل ٥ المخطط المستخدم في حساب قيم $^R D_2$. ويشمل ذلك أربعة سيناريوهات للتعرض لمادة مشعة مشتتة:

- (أ) الاستنشاق (السيناريو الثالث R)؛
- (ب) الابتلاع (السيناريو الرابع)؛
- (ج) تلوث الجلد (السيناريو الخامس)؛
- (د) الغمر في غاز حامل مشع (السيناريو السادس).



الشكل ٥: مخطط تحديد قيمة $^R D_2$

الاستنشاق. تم النظر في تعرض النخاع الأحمر (النسيج ٢) والمنطقة السنخية - الخلالية (AI) من الجهاز التنفسي (النسيج ٣ R) والقولون (النسيج ٤) والغدة الدرقية (النسيج 5) نتيجة للاستنشاق. والنشاط الأولي $A_{T,III}^R$ (بالكريل) الذي يمكن، حسب النهج القائم على المخاطر، أن يتسبب في آثار صحية قطعية عنيفة في النسيج T^1 وفقاً للسيناريو الثالث R (الاستنشاق) هو حل المعادلة (٢٠) لجرعة تساوي $TD_T(\Delta)$ ، ويُحسب بالمعادلة التالية:

$$(٤٥) \quad A_{T,III}^R = \frac{1}{F_{III} \times AF_{T,III}(\Delta)} TD_T(\Delta)$$

حيث:

$TD_T(\Delta)$ هو مستوى لعتبة الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في النسيج T^1 نتيجة للتعرض الداخلي الذي يبدأ عنده حدوث آثار صحية قطعية عنيفة (مكافئ غراي)، ويرد في الجدول ٩؛

$AF_{T,III}(\Delta)$ هو معامل تحويل الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في حالة حدوث تعرض داخلي في النسيج T نتيجة لأخذ داخلي عن طريق الاستنشاق ((مكافئ غراي)/بكريل)، ويرد في الجدول ١٨؛

F_{III} هو الجزء الكسري من الأخذ الداخلي القابل للاستنشاق في السيناريو الثالث حسب ما هو وارد في الجدول ١١.

الابتلاع. تم النظر في تعرض النخاع الأحمر (النسيج ٢) والقولون (النسيج ٤) والغدة الدرقية (النسيج ٥) عن طريق الابتلاع. والنشاط الأولي $A_{T,IV}^R$ (بالكريل) الذي يمكن، استناداً إلى النهج القائم على المخاطر، أن يتسبب في آثار صحية قطعية عنيفة في النسيج T^1 وفقاً للسيناريو الرابع (الابتلاع) هو حل المعادلة (٢١) لجرعة تساوي $TD_T(\Delta)$ ، ويتم الحصول عليه بالمعادلة التالية:

$$(٤٦) \quad A_{T,IV}^R = \frac{1}{F_{IV} \times AF_{T,IV}(\Delta)} TD_T(\Delta)$$

حيث:

$TD_T(\Delta)$ هو مستوى عتبة الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية نتيجة للتعرض الداخلي في النسيج T^1 (مكافئ غراي)، ويرد في الجدول ٩؛

$AF_{T,IV}(\Delta)$ هو معامل تحويل الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في حالة حدوث تعرض داخلي في النسيج T نتيجة لأخذ داخلي عن طريق الابتلاع ((مكافئ بكريل)/بكريل)، ويرد في الجدول ١٩؛

١٤ تم النظر في تعرض النخاع الأحمر (النسيج ٢) والمنطقة السنخية الخلالية من الجهاز التنفسي (النسيج ٣ R) والقولون (النسيج ٤) والغدة الدرقية (النسيج ٥).

١٥ تم النظر في تشيع النخاع الأحمر (النسيج ٢) والقولون (النسيج ٤) والغدة الدرقية (النسيج ٥).

F_{IV} هو الجزء الكسري من الأخذ الداخلي عن طريق الابتلاع في السيناريو الرابع، ويرد في الجدول ١١.

تلوث الجلد. النشاط الأولي $^R A_{6R,V}$ (بالبكريل) الذي يمكن، استناداً إلى النهج القائم على المخاطر، أن يتسبب في آثار صحية قطعية عنيفة في النسيج R_6 (أدمة الجلد) وفقاً للسيناريو الخامس (تلوث الجلد) هو حل المعادلة (٢٣) لجرعة تساوي TD_{6R} ، ويُحسب بالمعادلة التالية:

$$(٤٧) \quad ^R A_{6R,V} = \frac{S_V}{F_V \times R_V \times T_V \times AF_{6R,V}} TD_{6R}$$

حيث:

TD_{6R} هو مستوى عتبة الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في أدمة الجلد الذي يبدأ عنده حدوث آثار صحية قطعية عنيفة (مكافئ بكريل)، ويرد في الجدول ٨؛

$AF_{6R,V}$ هو معامل تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في حالة تعرض أدمة الجلد عن طريق ملامسة تلوث سطحي، ((مكافئ غراي)/(ثانية × بكريل/سم^٢))، ويرد في الجدول ١٩؛

F_V هو الجزء الكسري من المادة المشعة المشتتة في السيناريو الخامس، ويرد في الجدول ١١؛

S_V هي مساحة السطح الملوث الأولي في السيناريو الخامس (سم^٢)، وترد في الجدول ١١؛

R_V هي نسبة الجلد إلى التلوث السطحي في السيناريو الخامس، وترد في الجدول ١١؛

T_V هي مدة التعرض في السيناريو الخامس (بالثانية) وترد في الجدول ١١.

الغمر. نشاط الغاز الخامل المشع $^R A_{7,VI}$ (بالبكريل) الذي يمكن، استناداً إلى النهج القائم على المخاطر، أن يتسبب في آثار صحية قطعية عنيفة في النسيج V_7 (الجذع) وفقاً للسيناريو السادس (الغمر) هو حل المعادلة (٢٥) لجرعة تساوي TD_7 ، ويُحسب بالمعادلة التالية:

$$(٤٨) \quad ^R A_{7,VI} = \frac{V_{VI}}{T_{VI} \times AF_{2,VI}} TD_7$$

حيث:

TD_7 هو مستوى عتبة الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في الجذع الذي يبدأ عنده حدوث آثار صحية قطعية عنيفة (مكافئ غراي)، ويرد في الجدول ٨؛

$AF_{2,VI}$ هو معامل تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية نتيجة في حالة حدوث تعرض خارجي في النخاع الأحمر^{١٦} نتيجة للغمر في غاز خامل مشع ((مكافئ غراي)/بكريل × ثانية/م^٣))، ويرد في الجدول ٢٠؛

V_{VI} هو حجم الغرفة في السيناريو السادس (م^٣)، ويرد في الجدول ١١؛

T_{VI} هي مدة التعرض في السيناريو السادس (بالثانية)، وترد في الجدول ١١؛

F_{VI} هو الجزء الكسري من المادة المنطلقة في الغرفة، ويرد في الجدول ١١.

تحديد قيمة ${}^R D_2$. حُسبت قيمة ${}^R D_2$ للغازات الخاملة المشعة بطريقة مختلفة عن النويدات المشعة الأخرى.

وفي حالة المواد الأخرى غير الغازات الخاملة، تمثل قيمة ${}^R D_2$ (بالبكريل) أقل قيمة للأنشطة الأولية ${}^R A_{III}$, ${}^R A_{IV}$, ${}^R A_V$, and A_C ويتم الحصول عليها بالمعادلة التالية:

$$(٤٩) \quad {}^R D_2 = \min \{ {}^R A_{III}, {}^R A_{IV}, {}^R A_V, A_C \}$$

حيث:

A_C هو نشاط حد الحرجية (بالبكريل)، ويرد في الجدول ٢٨؛

${}^R A_{III}$, ${}^R A_{IV}$, and ${}^R A_V$ هي الأنشطة الأولية الدنيا بعد احتساب الكتلة (بالبكريل)، وتُحدد بالمعادلة (٥٠)، والمعادلة (٥١)، والمعادلة (٥٢):

$$(٥٠) \quad {}^R A_{III} = \begin{cases} \min \{ {}^R A_{2,III}, {}^R A_{3R,III}, {}^R A_{4,III}, {}^R A_{5,III} \} & \text{if } M \leq M_{III} \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_{III} \end{cases}$$

حيث:

${}^R A_{T,III}$ هي الأنشطة الأولية المحددة وفقا للمعادلة (٤٥) (بالبكريل)؛

M هي كتلة^{١٦} (غرام) لمادة مشعة ذات نشاط يساوي $\{ \min \{ {}^R A_{2,III}, {}^R A_{3R,III}, {}^R A_{4,III}, {}^R A_{5,III} \} \}$ ؛

M_{III} هو حد الكتلة (غرام) في السيناريو الثالث على النحو الوارد في الجدول ١١.

$$(٥١) \quad {}^R A_{IV} = \begin{cases} \min \{ {}^R A_{2,IV}, {}^R A_{4,IV}, {}^R A_{5,IV} \} & \text{if } M \leq M_{IV} \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_{IV} \end{cases}$$

حيث:

${}^R A_{T,IV}$ هي الأنشطة الأولية المحددة وفقا للمعادلة (٤٦) (بالبكريل)؛

١٦ لأغراض التبسيط، يفترض أن الجرعة التي يتلقاها النخاع الأحمر يمكن استخدامها لتقريب الجرعة التي تتلقاها كل الأعضاء في الجذع.

M هي كتلة^١ (غرام) مادة مشعة ذات نشاط يساوي $\{ \min\{^R A_{2,IV}, ^R A_{4,IV}, ^R A_{5,IV}\}$ ؛

M_{IV} هو حد الكتلة (غرام) في السيناريو الرابع.

$$(٥٢) \quad ^R A_V = \begin{cases} ^R A_{6R,V} & \text{if } M \leq M_V \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_V \end{cases}$$

حيث

$^R A_{6R,V}$ هو النشاط الأولي المحدد وفقا للمعادلة (٤٧)، (بالبكريل)؛

M هو الكتلة^١ (بالغرام) لمادة مشعة ذات نشاط يساوي $^R A_{6R,V}$ ؛

M_V هو حد الكتلة (بالغرام) في السيناريو الخامس على النحو الوارد في الجدول ٨.

وقيمة $^R D_2$ في الغازات الخاملة هي أصغر النشاطين A_C ، و $^R A_{VI}$ ويتم الحصول عليها بالمعادلة التالية:

$$(٥٣) \quad ^R D_2 = \min\{^R A_{VI}, A_C\}$$

حيث:

A_C هو حد الحرجية (بالبكريل)، ويرد في الجدول ٢٨؛

$^R A_{VI}$ هو النشاط الأولي المحدد بالمعادلة (٥٤)؛ (بالبكريل):

$$(٥٤) \quad ^R A_{VI} = \begin{cases} ^R A_{7,VI} & \text{if } M \leq M_{VI} \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_{VI} \end{cases}$$

حيث:

$^R A_{7,VI}$ هو النشاط الأولي المحدد بالمعادلة (٤٨)، (بالبكريل)؛

M هو الكتلة^١ (بالغرام) لمادة مشعة ذات نشاط $^R A_{7,VI}$ ؛

M_{VI} هو حد الكتلة في السيناريو السادس على النحو الوارد في الجدول ١١ (بالغرام).

وتكون قيمة $^R D_2$ في مادة مشعة معينة غير الغاز الخامل غير محدودة إذا كانت قيم $^R A_{IV}$ ، و $^R A_{III}$ ، و $^R A_V$ ، و A_C غير محدودة. وتكون هذه القيمة غير محدودة في الغاز الخامل المشع إذا كانت قيم $^R A_{VI}$ ، و A_C لهذه النويذة المشعة غير محدودة. ويتضمن الجدولان ١ و ٢٤ قيم $^R D_2$ (للنويذات المشعة التي حُسبت قيمتها أيضا باستخدام النهج المبني على الخبرة).

التذييل الرابع معاملات تحويل معدل الجرعة الخارجية

يتناول هذا التذييل بالتفصيل حساب معاملات تحويل معدل الجرعة لتحديد خصائص مصادر التعرض الخارجي وفقاً للسيناريوهين الأول والثاني. واستخدم نوعان من معاملات التحويل في النهج المبني على الخبرة والنهج القائم على المخاطر عند حساب قيم D_1 :

- (أ) معاملات تحويل معدل الجرعة لتحديد خصائص المصادر التي لا تبتعث إلا إشعاعاً ذا انتقال خطي منخفض للطاقة؛
- (ب) معاملات تحويل معدل الجرعة لتحديد خصائص المصادر التي تبتعث مجموعة من الإشعاعات ذات الانتقال الخطي المنخفض للطاقة والإشعاعات ذات الانتقال الخطي المرتفع للطاقة.

ويتضمن الجدول ١٥ معاملات تحويل معدل الجرعة لمبتعثات الإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة المستخدمة في النهج المبني على الخبرة والنهج القائم على المخاطر، ويتضمن الجدولان ١٤ و ١٣ معاملات تحويل معدل الجرعة للإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة. وتتوقف المعاملات على سيناريو التعرض وطاقات وكثافات الإشعاعات المبتعثة من المصدر. وتتوقف الطاقات والكثافات المبتعثة من المصدر على انبعاثات النويد المشعة المغلفة في المصدر، إلى جانب تفاعلات هذا الإشعاع الأولي مع مادة المصدر. وأخذت طاقات وكثافات الإشعاعات التي تبتعثها النويدات المشعة من منشور اللجنة الدولية للوقاية من الإشعاعات رقم ٣٨ [٣٨]، وروعي أثر النمو الداخلي للنواتج على خصائص قياس جرعات المصدر حسب ما هو مبين في التذييل الثامن.

وافترض أن المصدر يتألف من مادة مشعة موزعة بالتساوي ومغلفة في فولاذ غير قابل للصدأ. وبالنظر إلى أن المصدر مغلف فإن جسيمات ألفا والإلكترونات المبتعثة (بيتا وإلكترونات التحول) لا تهرب من المصدر. على أن جسيمات بيتا وإلكترونات التحول تولد إشعاعاً صدمياً نظراً لتباطؤ الإلكترونات داخل مادة المصدر والفولاذ غير القابل للصدأ. وأخذ في الاعتبار تولد الإشعاع الصدمي في مادة مصدر مبتعثات بيتا. كما أخذ في الاعتبار حدوث امتصاص ذاتي في المصدر. وشملت قيم معاملات تحويل جرعة مبتعثات بيتا الإشعاع الصدمي المقدّر بالإضافة إلى الانبعاثات الجسيمية.

وافترض أن الوضع الهندسي للمصدر المغلف هو أسطوانة قائمة قطرها ٠,٥ سم وطولها ١,٥ سم. وأما الوضع الهندسي للتعرض الخارجي للمصدر غير المشتمت في الجسم البشري فقد حدّده سيناريو التعرض موضوع التقييم:

- (أ) يحسب السيناريو الأول (سيناريو "الجيب") متوسط الجرعة في كتلة قدرها ~ ٦٣ غراماً على خط الوسط، وافترض أن طول المصدر هو أسطوانة نصف قطرها ١٠ سم وارتفاعها ٠,٢ سم في وسط المصدر على مسافة ٢ سم فوقها. ويوازي الوجه الدائري للأسطوانة طول المصدر. والغرض من ذلك هو تقريب الجرعة الناشئة عن مصدر متحرك يحمله شخص لعدة ساعات على النحو المبين في التذييل الثاني.
- (ب) نظر السيناريو الثاني (سيناريو "الغرفة") في تعرض إنسان مرجعي بالغ لمصدر مغلف صغير غير مدرّج ومتجانس متعامد من مسافة متر واحد على مركز الجذع. والمادة الواقعة بين المصدر والجذع هي هواء كثافته ١,٢ × ١٠^{-٣} غم/سم^٣.

رابعاً-١- الإشعاع ذو الانتقال الخطي المنخفض للطاقة

رابعاً ١-١- معاملات الجرعة المستخدمة في النهج المبني على الخبرة

تشمل معاملات الجرعة المستخدمة في تحديد خصائص التعرض الخارجي لمصادر التي تبتعث اشعاعاً ذا انتقال خطي منخفض للطاقة^{١٧} ما يلي:

- (أ) الفوتونات الناشئة عن التحول النووي لنويد مشعة في المصدر؛
 (ب) فوتونات إشعاع الصدم الناشئة عن تفاعل جسيمات بيتا مع مادة المصدر.

ويُحسب معاملا تحويل الجرعة الخاصة بالنويدات المشعة

- (أ) $DF_{I,I}^L$ ، وهو معدل الجرعة الممتصة في النسيج الرخو وفقاً لسيناريو الجيب (السيناريو الأول) (غراي/بكريل × ثانية)؛
 (ب) $DF_{2,II}^L$ ، وهو معدل الجرعة الممتصة في النخاع الأحمر من مصدر ينبعث منه إشعاع ذو انتقال خطي منخفض للطاقة على بُعد متر واحد من الجسم (السيناريو الثاني)،

باستخدام المعادلة التالية:

$$(٥٥) \quad DF_{T,S}^L = \sum_i^n Y_i^\gamma d_{T,S}^\gamma(E_{\gamma,i}) + \sum_j^m Y_j^e \int_{E_0}^{E_{e,j}} S(E_\gamma, E_{e,j}) d_{T,S}^\gamma(E_\gamma) dE_\gamma + \int_{E_0}^{E_e^0} S_\beta(E_\gamma, E_e^0) d_{T,S}^\gamma(E_\gamma) dE_\gamma,$$

حيث:

$DF_{T,S}^L$ هو معامل تحويل الجرعة الممتصة في العضو أو النسيج T المشع بإشعاع ذي انتقال خطي منخفض للطاقة من مصدر على النحو المبين في السيناريو S، (غراي/بكريل × ثانية)؛

$d_{T,S}^\gamma(E_\gamma)$ هي دالة لاستجابة الجرعة الممتصة، وهي تساوي الجرعة الممتصة في عضو أو نسيج T مشع بفوتون من مصدر أحادي الطاقة E_γ على النحو المبين في السيناريو S، (غراي/بكريل × ثانية).

والحدود الثلاثة في المعادلة (٥٥) هي على التوالي:

- (أ) مساهمة الفوتونات المتقطعة ذات الطاقة $E_{\gamma,i}$ والكثافة Y_i^γ في كل تحول نووي؛
 (ب) مساهمة طيف الإشعاع الصدمي المستمر من النوع $S(E_\gamma, E_{e,j})$ الناشئ عن تباطؤ كل إلكترون من إلكترونات التحول الناتج Y_j^e والطاقة الحركية $E_{e,j}$ ؛

١٧ أعد المادة K.F. Eckerman من مختبر أوك ريدج الوطني بولاية تينيسي في الولايات المتحدة.

(ج) مساهمة طيف الإشعاع الصدمي المستمر $S_{\beta}(E_{\gamma}, E_e^0)$ الناشئ عن طيف بيتا ذي الطاقة القصوى E_e^0 .

والحد الأدنى للتكاملات في الحدين الثاني والثالث، E_0 ، هو ١٠ كيلو إلكترون فولط.

واستندت معالجة توليد إشعاع الصدم عند اشتقاق قيم D إلى دلمان وإيكرمان (Dilman and Eckerman) [٣٩] حسب ما هو وارد في التذييل جيم من تقرير الإرشادات الاتحادية رقم ١٢ [٤٠]. ويعرّف $S(E_{\gamma}, E_e) dE_{\gamma}$ بأنه عدد فوتونات الإشعاع الصدمي الذي تكون له طاقة تتراوح بين E_{γ} و $E_{\gamma} + dE_{\gamma}$ نتيجة لإلكترون أحادي الطاقة ذي نشاط حركي أولي E_e . ويعرّف حينئذ طيف الإشعاع الصدمي المتدرج $S'(E_{\gamma}, E_e)$ بأنه:

$$(٥٦) \quad S'(E_{\gamma}, E_e) = 100 \frac{E_{\gamma}}{E_e} S(E_{\gamma}, E_e) \text{ for } 0 \leq E_{\gamma} \leq E_e$$

ويعبر عنه بالنسبة المئوية (%). ويرد ذلك في جدول بالمرجع [٣٩] يتضمن المواد المتباينة من حيث قدرتها على الوقف. وحصيلة الإشعاع الصدمي، أي النسبة المئوية لطاقة الإلكترون المتحولة إلى إشعاع صدمي Y_{BS} ، هي:

$$(٥٧) \quad Y_{BS}(E_e) = \int_0^{E_e} S'(E_{\gamma}, E_e) dE_{\gamma}$$

ويحدد الجدول ١٢ طيف إشعاع الصدم المتدرج $S'(E_{\gamma}, E_e)$ وحصيلة إشعاع الصدم للفولاذ غير القابل للصدأ ($Z \approx 26$).

وإذا كان طيف بيتا له طاقة قصوى E_e^0 ، وكان $n_{\beta}(E_e, E_e^0) dE_e$ هو عدد جسيمات بيتا التي تحتوي على طاقة تتراوح بين E_e و $E_e + dE_e$ ، فإن طيف إشعاع الصدم الناشئ هو:

$$(٥٨) \quad S_{\beta}(E_{\gamma}, E_e^0) = \frac{1}{100 E_{\gamma}} \int_{E_{\gamma}}^{E_e^0} n_{\beta}(E_e, E_e^0) S'(E_{\gamma}, E_e) E_e dE_e$$

الجدول ١٢: الأطياف المتدرجة لإشعاع الصدم من الإلكترونات في الفولاذ غير القابل للصدأ

E_{γ}/E_e						E_e	
٠.٥٠	٠.٤٠	٠.٣٠	٠.٢٠	٠.١٠	٠.٠٥	٠	(ميغا إلكترون فولط)
٥.٧٦	٦.٩٧	٨.٣٠	٩.٩٣	١٢.٤	١٤.٥	١٧.٧	٠.٠٠١
٤.٧٩	٥.٧٥	٦.٧١	٧.٦٩	٨.٧٨	٩.٦٧	١١.٠	٠.٠٠٢٥
٤.٥٥	٥.٤٩	٦.٤٤	٧.٣٨	٨.٢٩	٨.٧٧	٩.٢٨	٠.٠٠٥
٤.٢٩	٥.٢٦	٦.٢٨	٧.٣٢	٨.٣١	٨.٧٢	٩.٠٥	٠.٠١
٣.٨٢	٤.٧٨	٥.٨٦	٧.٠٤	٨.٣٢	٨.٨٧	٩.٢٨	٠.٠٢٥
٣.٢٣	٤.١٣	٥.١٨	٦.٤٤	٧.٩٧	٨.٨٤	٩.٧٥	٠.٠٥
٢.٨٦	٣.٧١	٤.٧٣	٦.٠١	٧.٦٧	٨.٦٣	٩.٦٦	٠.٠٧٥
٢.٥٩	٣.٤٠	٤.٤٠	٥.٦٧	٧.٣٩	٨.٤٦	٩.٦٦	٠.١
١.٩٤	٢.٦٥	٣.٥٨	٤.٨١	٦.٦٢	٧.٨٨	٩.٤٩	٠.٢
١.٦١	٢.٢٥	٣.١١	٤.٣٠	٦.١١	٧.٤٥	٩.٣٠	٠.٣
١.٤٠	١.٩٩	٢.٨٠	٣.٩٥	٥.٧٤	٧.١٣	٩.١١	٠.٤

E_γ/E_e						E_e	
٠.٥٠	٠.٤٠	٠.٣٠	٠.٢٠	٠.١٠	٠.٠٥	٠	(ميغا إلكترون فولط)
١.٢٧	١.٨٢	٢.٥٩	٣.٧٠	٥.٤٧	٦.٨٧	٨.٨٧	٠.٥
١.١٧	١.٧٠	٢.٤٤	٣.٥٢	٥.٢٥	٦.٦٦	٨.٧٢	٠.٦
١.٠٦	١.٥٤	٢.٢٤	٣.٢٦	٤.٩٥	٦.٣٥	٨.٤٧	٠.٨
٠.٩٩٢	١.٤٦	٢.١٢	٣.١٠	٤.٧٥	٦.١٣	٨.٢٦	١
٠.٩٥٥	١.٤٠	٢.٠٤	٣.٠٠	٤.٦٠	٥.٩٦	٨.٠٩	١.٢
٠.٩٣٣	١.٣٧	١.٩٨	٢.٩٢	٤.٤٩	٥.٨٢	٧.٩٢	١.٤
٠.٩٢٠	١.٣٥	١.٩٥	٢.٨٦	٤.٤٠	٥.٧١	٧.٧٧	١.٦
٠.٩١٣	١.٣٣	١.٩٣	٢.٨١	٤.٣٣	٥.٦٢	٧.٦٤	١.٨
٠.٩١٠	١.٣٣	١.٩١	٢.٧٨	٤.٢٧	٥.٥٥	٧.٥٦	٢
٠.٩٠٨	١.٣٢	١.٨٨	٢.٧٣	٤.١٥	٥.٣٩	٧.٣٤	٢.٥
٠.٩١١	١.٣١	١.٨٧	٢.٦٩	٤.٠٦	٥.٢٤	٧.١٣	٣
٠.٩٢٠	١.٣١	١.٨٥	٢.٦٣	٣.٩٣	٥.٠٢	٦.٧٢	٤
٠.٩٢٨	١.٣١	١.٨٤	٢.٥٩	٣.٨٢	٤.٨٤	٦.٣٨	٥
٠.٩٣٤	١.٣١	١.٨٢	٢.٥٦	٣.٧٤	٤.٦٩	٦.١٠	٦
٠.٩٣٨	١.٣١	١.٧٩	٢.٤٩	٣.٥٨	٤.٤٤	٥.٦٦	٨
٠.٩٣٤	١.٢٩	١.٧٦	٢.٤١	٣.٤٤	٤.٢٤	٥.٣٥	١٠

تتمة الجدول ١٢

الحصيلة	E_γ/E_e					E_e
الحصيلة	E_γ/E_e					E_e
(%)	٠.٩٥	٠.٩٠	٠.٨٠	٠.٧٠	٠.٦٠	(ميغا إلكترون فولط)
٠.٠٠٦٣	٠.٥٦٧	١.١٣	٢.٢٧	٣.٤١	٤.٥٧	٠.٠٠١
٠.٠١٢٢	٠.٤٨٤	٠.٩٦٨	١.٩٣	٢.٨٨	٣.٨٤	٠.٠٠٢٥
٠.٠٢٢٩	٠.٤٣٩	٠.٨٨٣	١.٧٨	٢.٦٩	٣.٦١	٠.٠٠٥
٠.٠٤٤٣	٠.٣٩٣	٠.٧٩٣	١.٦١	٢.٤٧	٣.٣٦	٠.٠١
٠.١٠٤	٠.٣١٩	٠.٦٥٢	١.٣٥	٢.١١	٢.٩٣	٠.٠٢٥
٠.١٨٨	٠.٢٥٤	٠.٥٢٠	١.٠٩	١.٧٣	٢.٤٣	٠.٠٥
٠.٢٦٠	٠.٢١٣	٠.٤٣٩	٠.٩٣٣	١.٤٩	٢.١٣	٠.٠٧٥
٠.٣٢٥	٠.١٨٤	٠.٣٨٠	٠.٨١٥	١.٣٢	١.٩٠	٠.١
٠.٥٤٣	٠.١١٨	٠.٢٤٨	٠.٥٥٠	٠.٩٢١	١.٣٧	٠.٢
٠.٧٢٤	٠.٠٨٧	٠.١٨٥	٠.٤٢٢	٠.٧٢٤	١.١١	٠.٣
٠.٨٨٥	٠.٠٦٩	٠.١٥٠	٠.٣٤٩	٠.٦١١	٠.٩٥٢	٠.٤
١.٠٣	٠.٠٥٩	٠.١٢٨	٠.٣٠٣	٠.٥٣٨	٠.٨٥١	٠.٥
١.١٨	٠.٠٥٢	٠.١١٤	٠.٢٧٤	٠.٤٩٠	٠.٧٨٢	٠.٦
١.٤٧	٠.٠٤٤	٠.٠٩٧	٠.٢٣٩	٠.٤٣٣	٠.٦٩٨	٠.٨
١.٧٥	٠.٠٣٩	٠.٠٨٩	٠.٢٢١	٠.٤٠٤	٠.٦٥٣	١
٢.٠٣	٠.٠٣٧	٠.٠٨٤	٠.٢١١	٠.٣٨٨	٠.٦٢٨	١.٢
٢.٣١	٠.٠٣٥	٠.٠٨١	٠.٢٠٦	٠.٣٧٩	٠.٦١٥	١.٤
٢.٥٩	٠.٠٣٤	٠.٠٧٩	٠.٢٠٣	٠.٣٧٥	٠.٦٠٨	١.٦
٢.٨٨	٠.٠٣٣	٠.٠٧٨	٠.٢٠١	٠.٣٧٣	٠.٦٠٤	١.٨
٣.١٧	٠.٠٣٢	٠.٠٧٧	٠.٢٠١	٠.٣٧٣	٠.٦٠٣	٢
٣.٨٨	٠.٠٣١	٠.٠٧٦	٠.٢٠١	٠.٣٧٥	٠.٦٠٥	٢.٥
٤.٥٩	٠.٠٣٠	٠.٠٧٥	٠.٢٠٢	٠.٣٧٩	٠.٦٠٩	٣
٥.٩٨	٠.٠٣٠	٠.٠٧٦	٠.٢٠٧	٠.٣٨٧	٠.٦٢٠	٤

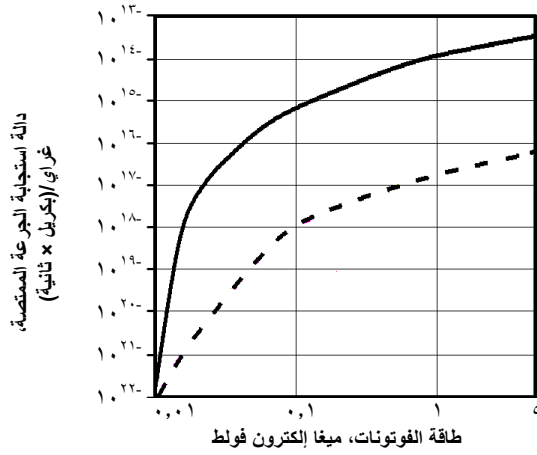
الحصيلة	$E\gamma/E_e$					E_e
الحصيلة	$E\gamma/E_e$					E_e
(%)	٠.٩٥	٠.٩٠	٠.٨٠	٠.٧٠	٠.٦٠	(ميغا إلكترون فولت)
٧.٣٥	٠.٠٣١	٠.٠٧٧	٠.٢١٢	٠.٣٩٥	٠.٦٣٠	٥
٨.٦٨	٠.٠٣١	٠.٠٧٨	٠.٢١٦	٠.٤٠٢	٠.٦٣٨	٦
١١.٣	٠.٠٣١	٠.٠٨٠	٠.٢٢٠	٠.٤١١	٠.٦٤٧	٨
١٣.٧	٠.٠٣٢	٠.٠٨١	٠.٢٢٣	٠.٤١٤	٠.٦٤٨	١٠

وعند حساب معاملات الجرعة في السيناريو الأول، حُسب معامل استجابة الجرعة الممتصة $d_{1,I}^{\gamma}(E_{\gamma})$ من الفوتونات المبتعثة في المصدر لمتوسط الأنسجة في أسطوانة نصف قطرها ١٠ سم وطولها ٠,٢ سم. وكان الغرض من ذلك هو تقريب الجرعة الناشئة عن مصادر متحركة محمولة في الجيب. وأجريت هذه الحسابات باستخدام شفرة مونت كارلو MCNP التي تفترض مسطحاً من النسيج الرخو تكوينه من النوع المحدد في منشور اللجنة الدولية للوحدات والمقاييس الإشعاعية رقم ٤٤ [٤١]. ويبين الشكل ٦ (المنحنى المتصل) دوال استجابة الجرعة الممتصة عند عمق معين كدالة لطاقة الفوتونات المبتعثة. واستندت بعض البيانات التي تقل عن ٣٠ كيلو إلكترون فولت إلى استقرارات مستنبطة من طاقات أعلى في الحالات التي اعتبرت فيها حسابات مونت كارلو لهذه الطاقات المنخفضة غير واقعية.

وعند حساب معاملات الجرعة في السيناريو الثاني، حُسبت دالة استجابة الجرعة الممتصة $d_{2,II}^{\gamma}(E_{\gamma})$ من الفوتونات المبتعثة في المصدر عندما يتعرض إنسان مرجعي بالغ لمصدر مغلف متجانس غير مدرّج صغير متعامد على مركز جذعه على مسافة متر واحد وتكون المادة الواقعة بين المصدر والجذع هي هواء كثافته $1,2 \times 10^{-3}$ غم/سم^٣. وأجريت هذه الحسابات باستخدام شفرة ALGAMP المأخوذة عن مختبر أوك ريدج الوطني [٤٠] لمصدر في نقطة محددة. واستند توزيع طاقة وكثافة فوتونات المصدر الثابت إلى حسابات مونت كارلو لانبعثات المصدر غير المدرّج. ويبين الشكل ٦ (المنحنى المتقطع) دالة استجابة الجرعة الممتصة في النخاع الأحمر كدالة لطاقة الفوتونات المبتعثة. واستندت بعض بيانات فوتونات الطاقة التي تقل عن ٣٠ كيلو إلكترون فولت إلى الاستقرارات المستنبطة من الطاقة الكبرى في الحالات التي اعتبرت فيها حسابات مونت كارلو لهذه الطاقات المنخفضة غير واقعية.

ويبلغ متوسط المسار الحر الوسطي^{١٨} للفوتونات في الهواء هو ٥٠ متراً في حالة الفوتونات التي لها طاقة تبلغ ١٠ كيلو إلكترون فولت و ٤٠٠ متر للفوتونات ذات الطاقة التي تبلغ ١ ميغا إلكترون فولت [٤٢]. ولذلك فإن التناثر المتعدد للفوتونات في الهواء في مسارها من المصدر إلى سطح جسم الإنسان (ظاهرة اللمعان السماوي) لا يُذكر ولم يؤخذ في الحسبان. ويبين منشور اللجنة الدولية للوقاية من الإشعاعات رقم ٧٤ [٤٣] أن متوسط الجرعة الممتصة من الإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة في النخاع الأحمر لا يختلف كثيراً عن متوسطها في أي عضو من الأعضاء التي تعتبر جزءاً من الجذع. ولذلك فإن معاملات تحويل معدل جرعة النخاع العظمي الأحمر تستخدم لحساب جرعة 'الجذع'.

١٨ المسار الحر الوسطي هو متوسط المسافة التي يقطعها جسيم ما أو فوتون ما بين نوع محدد (أو أنواع محددة) من التفاعل في وسط معين.



الشكل ٦: دوال استجابة الجرعة الممتصة من الفوتونات المبعثة في المصدر المغلف. ينطبق المنحنى المتصل على جرعة النسيج الرخو في السيناريو الأول، وينطبق المنحنى المتقطع على جرعة النخاع الأحمر في السيناريو الثاني.

رابعاً ١-٢- معاملات الجرعة المستخدمة في النهج القائم على المخاطر

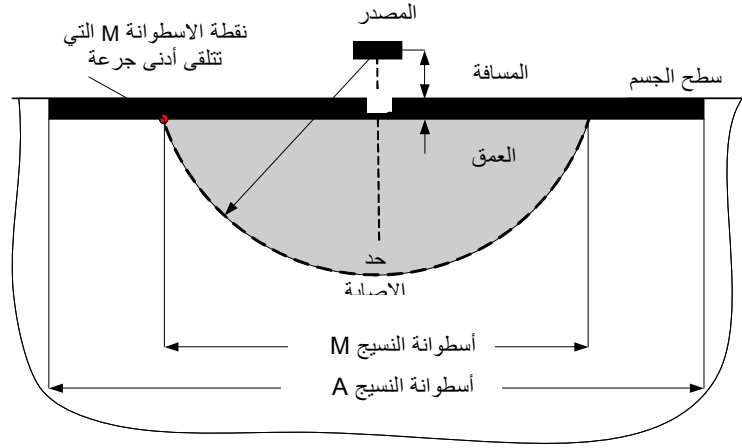
أجريت في إطار النهج القائم على المخاطر حسابات مستقلة للتأكد من أن معاملات تحويل معدل الجرعة الناجمة عن التعرض لمصادر قريبة (السيناريو الأول) معقولة. وأجريت هذه الحسابات المستقلة على مصدر قريب يبعث فوتونات ذات طاقة تزيد على ٥٠ كيلو إلكترون فولط. وحُسبت في هذه الحالة معاملات تحويل معدل الجرعة باعتبارها ناتجاً ثابتاً كبيراً للفوتونات ذات الطاقة المعيّنة والعامل الهندسي [٤٤]. وحُسب ثابت كبيراً باستخدام شفرة "RadSum 32 Code: A Win 32 version" [٤٥]. واستند العامل الهندسي المستخدم إلى بيانات النهج المبني على الخبرة حسب ما هو مبين أعلاه.

وكشفت الحسابات عن أن معاملات تحويل معدل الجرعة للفوتونات ذات الطاقة التي تزيد على ٥٠ كيلو إلكترون فولط المحسوبة للأوضاع الهندسية التالية تساوي رتبةً بنسبة ٢ في المائة تقريباً:

(أ) معدل الجرعة هو المتوسط في أسطوانة نصف قطرها ١٠ سم وطولها ٠,٢ سم؛ (هذا هو الأساس الذي استند إليه حساب معامل تحويل معدل الجرعة المستخدم في النهج المبني على الخبرة)؛

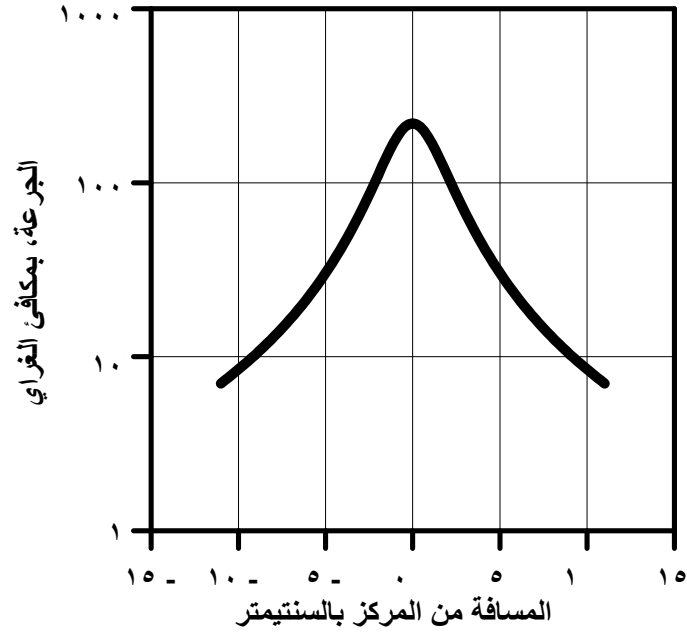
(ب) معدل الجرعة هو المتوسط في الأسطوانة A (المبيّنة في الشكل ٧) التي يبلغ نصف قطرها ١٠ سم (مساحتها ٣١٤ سم^٢) وطولها ٠,٥ سم؛

(ج) معدل الجرعة هو معدل الجرعة الأدنى في الأسطوانة M (الشكل ٧) التي تبلغ مساحتها ١٠٠ سم^٢ (نصف قطرها ٦ سم تقريباً) وعمقها ٠,٥ سم.

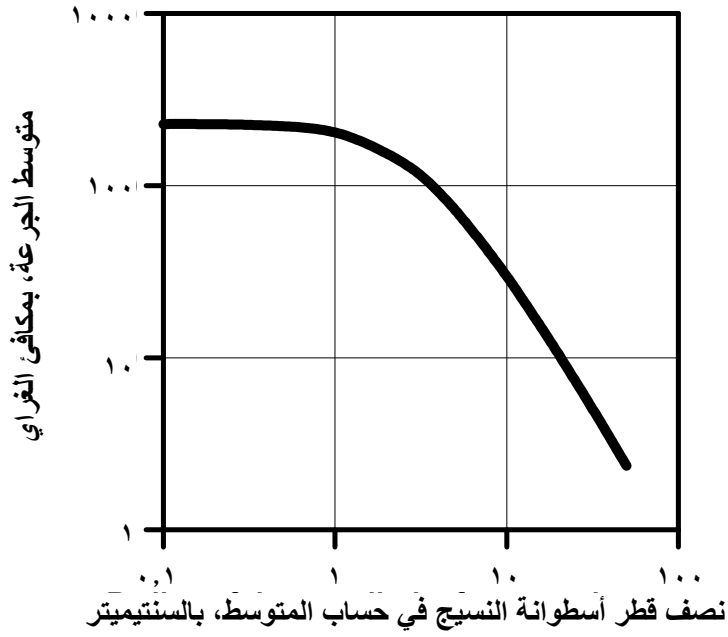


الشكل ٧: الأوضاع الهندسية للتحقق من معاملات جرعات المصادر القريبة

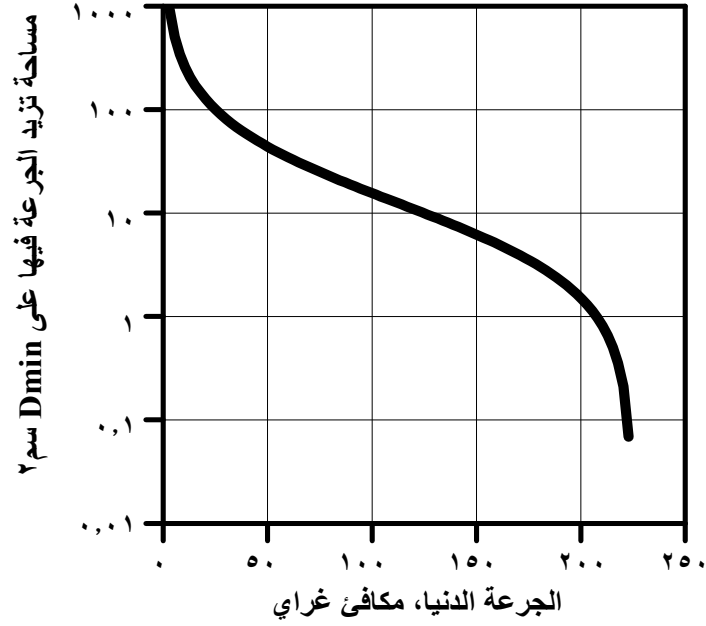
ويرتكز المصدر في الحالتين (ب) و(ج) إلى الأسطوانة على مسافة ١,٥ سم فوق سطح الأسطوانة، وتقدر الجرعة من عمق قدره ٠,٥ سم تحت السطح. وتؤدي الجرعة التي تتجاوز مستوى عتبة نخر النسيج إلى حدوث تلف في النسيج الرخو. ويظهر في الشكل ٧ حد الإصابة الناشئة عن مصدر قريب كسطح شبه كروي تساوي عنده الجرعة عتبة نخر النسيج الرخو (TD1) المحددة في الجدول ٨، وتساوي ٢٥ مكافئ غراي. وتشيع النسيج الرخو بهذا المصدر يكون غير متجانس. ويبين الشكل ٨ تحول قيمة الجرعة التقريبية داخل أسطوانة النسيج المماثلة للأسطوانة A. ويتعلق ذلك بمبعثات جاما التي يكون لها نشاط يساوي قيمة A1,I المحددة بالمعادلة (٤٦) في سيناريو التعرض الأول. وتبلغ الجرعة أقصى مستوياتها في مركز أسطوانة النسيج المشع تحت المصدر مباشرة وتقل بسرعة كلما ازدادت المسافة بين النسيج ومركز الأسطوانة. ويبين الشكل ٩ متوسط الجرعة في المنطقة الدائرية التقريبية نتيجة للتعرض لمصدر قريب ذي نشاط يساوي A1,I كدالة لنصف قطر المساحة. ويبين الشكل ١٠ مساحة الأسطوانة A التي تتجاوز فيها الجرعة من هذا المصدر ٢٥ غراي. ويدل ذلك على أن المساحة التي تزيد فيها الجرعة على ٢٥ غراي تتفق فيما يبدو بدرجة كبيرة مع التجربة المتعلقة بتكون النخر في أثناء حالات الطوارئ التي تنطوي على مصادر محمولة في الجيب.



الشكل ٨: الجرعة التقريبية لمصدر ذي نشاط من النوع $A_{1,1}$ على مسافة معيّنة من التعرض العادي لمصدر على بُعد ٢ سم فوق قاعدة أسطوانة النسيج (١,٥ سم فوق سطح الجسم).



الشكل ٩: الجرعة المتوسطة في مساحة الدائرة التقريبية من المصدر المبين في الشكل ٨ كدالة لنصف قطر المساحة



الشكل ١٠: المساحة التقريبية التي تتجاوز فيها الجرعة ٢٥ مكافئ غراي نتيجة التعرض لمصدر على مسافة ٢ سم فوق قاعدة أسطوانة النسيج (١,٥ سم فوق سطح الجسم)

وتحسب معاملات تحويل الجرعة $AF_{1,I}$ ، الناتجة عن تشعيع النسيج الرخو بمصدر قريب (السيناريو الأول) بالمعادلة التالية:

$$(٥٩) \quad AF_{1,I} = RBE^L \times DF_{1,I}^L$$

حيث:

$AF_{1,I}$ هو معامل تحويل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في النسيج الرخو المشع بمصدر قريب على النحو المبين في السيناريو الأول ((مكافئ غراي)/(بكريل × ثانية))؛

RBE^L هي الفعالية البيولوجية النسبية للإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة وتساوي واحد صحيح ((مكافئ غراي)/(غراي))؛

$DF_{1,I}^L$ هو معامل تحويل الجرعة الممتصة في النسيج الرخو المشع بإشعاع ذي انتقال خطي منخفض للطاقة من مصدر قريب على النحو المبين في السيناريو الأول (غراي)/(بكريل × ثانية)).

وتحسب معاملات تحويل الجرعة $AF_{1,II}$ نتيجة لتشعيع النخاع الأحمر من مصدر بعيد (السيناريو الثاني) بالمعادلة التالية:

$$(٦٠) \quad AF_{2,II} = RBE^L \times DF_{2,II}^L$$

حيث:

$AF_{2,II}$ هو معامل تحويل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في النخاع الأحمر المشع من مصدر بعيد على النحو المبين في السيناريو الثاني، ((مكافئ غراي)) / ((بكريل × ثانية))؛

RBE^L هي الفعالية البيولوجية النسبية للإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة وتساوي واحد صحيح ((مكافئ غراي)) / ((غراي))،

$DF_{2,II}^L$ هو معامل تحويل الجرعة الممتصة في النخاع الأحمر المشع بإشعاع ذي انتقال خطي منخفض للطاقة من مصدر بعيد على النحو المبين في السيناريو الأول، (غراي) / ((بكريل × ثانية)).

والفعالية البيولوجية النسبية للإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة تساوي واحد صحيح حسب ما هو محدد في الجدول ١٠. ولذلك فإن معامل تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في حالة مصدر لا يتبعث إلا إشعاعاً ذا انتقال خطي منخفض للطاقة يساوي عددياً معامل تحويل معدل الجرعة الممتصة.

رابعاً-٢- الإشعاع ذو الانتقال الخطي المرتفع للطاقة

الإشعاع المهم الوحيد ذو الانتقال الخطي المرتفع للطاقة في التعرض الخارجي هو النيوترونات. وهناك العديد من المصادر النيوترونية المهمة التي كان لا بد من تقييمها باعتبار أنها قد تنطوي على خطورة. ويتضمن الجدول ٢٧ الخصائص النووية لبعض المصادر النيوترونية الشائعة. وأهم مصادر النيوترونات هي المصادر التي تحتوي على الكاليفورنيوم - ٢٥٢ والخلائط الصلبة من الأميريثيوم - ٢٤١ / البريليوم - ٩ أو البلوتونيوم - ٢٣٩ / البريليوم - ٩. كما تتبعث مصادر النيوترونات فوتونات؛ ولذلك فإن معدل الجرعة من مصدر نيوتروني لا بد أن يشمل الإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة الناشئ عن الاضمحلال النووي أو الانشطار التلقائي فضلاً عن الإشعاع النيوتروني ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة.

رابعاً-٢-١- معاملات الجرعة المستخدمة في النهج المبني على الخبرة

قدّرت معاملات تحويل معدل الجرعة الممتصة من مصادر الكاليفورنيوم - ٢٥٢ المحتوية على نيوترونات باستخدام معدل الجرعة الفعالة نقلاً عن المرجع [٤٦]. وقسّم معدل الجرعة الفعالة من النيوترونات على ١٠ لتقدير معامل معدل الجرعة الممتصة للإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة^٩، $DF_{2,II}^{H+L}$ ، في النخاع الأحمر على مسافة متر واحد من المصدر (السيناريو الثاني). وافترض أن معامل معدل الجرعة الممتصة $DF_{I,I}^{H+L}$ في النخاع الأحمر وفقاً لسيناريو الجيب (السيناريو الأول) يزيد ١٠٠٠ مرة على قيمة $DF_{2,II}^{H+L}$.

وقدّرت معاملات تحويل معدل الجرعة الممتصة من مصادر نيوترونات الأميريثيوم - ٢٤١ / البريليوم - ٩ والبلوتونيوم - ٢٣٩ / البريليوم - ٩ باستخدام معدل الجرعة المكافئة المحدد في المرجع [٤٧]. ويتضمن الجدول ٣-١ من هذا المرجع صيغة لمعدل الجرعة المكافئة من مصدر نيوترونات محدد النقطة ومتجانس الاتجاهات ذي طاقة قدرها ٢ ميغا إلكترون فولط. ويساوي ذلك طاقة متوسطة من النيوترونات المبتعثة من مصدر غير مدرّج من الأميريثيوم - ٢٤١ / البريليوم - ٩ أو البلوتونيوم - ٢٣٩ / البريليوم - ٩:

١٩ مساهمة الإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة في الجرعة الفعالة من الكاليفورنيوم - ٢٥٢ لا تتجاوز ٦ في المائة [٤٦].

(٦١)

$$h_{\text{point}}^n(r) \approx 4.2 \times 10^{-10} \frac{Y_n}{4\pi r^2}$$

حيث:

$h_{\text{point}}^n(r)$ هو ثابت معدل الجرعة المكافئة لمصدر نيوترونات محدد النقطة ومتجانس الاتجاهات ذي طاقة قدرها ٢ ميغا إلكترون فولط، (سيفرت/بكريل × ثانية)؛

r هي المسافة من المصدر الموجود في نقطة محددة، (سم)؛

Y_n هي حصيلة النيوترونات من المصدر، أي عدد النيوترونات المبعثة في ثانية واحدة من مصدر لكل وحدة نشاط من نويدة مشعة مبعثة لألفا، (نيوترون/بكريل × ثانية).

ويتضمن المرجع [٤٧] في الجدول ٥-٧ حواصل مماثلة تبلغ ما يقرب من 6×10^{-10} نيوترون/بكريل × ثانية) لمصادر النيوترونات المحتوية على الأميريثيوم - ٢٤١/البريليوم - ٩ والبلوتونيوم - ٢٣٩/البريليوم - ٢٠٩. وتحدد المعادلة (٦١) لهذه الحصيلة معدل جرعة مكافئة من الإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة على مسافة ٢ سم من مصدر تبلغ طاقته تقريباً 4×10^{-16} سيفرت/بكريل × ثانية). وعندما يضاف ذلك إلى جرعة فوتونات قدرها $8,7 \times 10^{-17}$ غراي/بكريل × ثانية) للإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة المبعث من اضمحلال ألفا في الأميريثيوم - ٢٤١ وفقاً للجدول ١٥ فإن مجموع الجرعة المكافئة يبلغ تقريباً 5×10^{-16} سيفرت/بكريل × ثانية). واعتبرت قيمة $DF_{I,I}^{H+L}$ ، أي معامل تحويل الجرعة الناجمة عن التعرض لمصدر قريب على النحو المحدد في السيناريو الأول، مساوية لذلك. وافترض أيضاً أن معامل تحويل الجرعة الناجمة عن التعرض لمصدر على مسافة متر واحد $DF_{2,II}^H$ يساوي ١/١٠٠٠ من $DF_{I,I}^{H+L}$. ويتضمن الجدول ١٣ قيمة $DF_{I,I}^{L+H}$ و $DF_{2,II}^{L+H}$ لمبعثات النيوترونات التي تناولها النهج المبني على الخبرة لتقييم قيم D_1 . وتقدر هذه القيم تقريباً الجرعة الممتصة على أساس جرعة تكافئ ٢ ميغا إلكترون فولط من النيوترونات. ويؤدي ذلك إلى مبالغة كبيرة في تقدير الجرعة الممتصة ويبالغ بالتالي في تقييم الخطر الناشئ عن الإشعاع الخارجي من تلك المصادر، وهو ما يمكن أن يتضح من مقارنتها بالجرعات المحسوبة في الجدول ١٤ وفقاً للنهج القائم على المخاطر.

رابعاً ٢-٢- معاملات الجرعة المستخدمة في النهج القائم على المخاطر

يشمل معامل تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية لمصدر نيوترونات معاملين لتحويل الجرعة الجزئية يقابلان الإشعاع ذا الانتقال الخطي المنخفض للطاقة والإشعاع ذا الانتقال الخطي المرتفع للطاقة:

(٦٢)

$$AF_{T,S} = AF_{T,S}^L + AF_{T,S}^H$$

حيث:

$AF_{T,S}^L$ هو معامل تحويل معدل الجرعة الجزئية الذي يقابل الفوتونات الناشئة عن الاضمحلال النووي لألفا أو بيتا، أو الانشطار التلقائي، أو من تفاعل (ألفا - نيوترون)، وهو يساوي معدل الجرعة

المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية وفقاً للسياريو S في النسيج T من مصدر نيوترونات ذي نشاط قدره ١ بكريل، ((مكافئ غراي)/(بكريل × ثانية))؛

هو معامل تحويل معدل الجرعة الجزئية للنيوترونات، وهو يساوي معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في النسيج T وفقاً للسياريو S من مصدر نيوترونات ذي نشاط قدره ١ بكريل، ((مكافئ غراي)/(× ثانية)).

ويتضمن الجدول ١٤ قيم معاملات تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المستخدمة في النهج القائم على المخاطر لحساب قيم D_1 لمصادر النيوترونات (الإشعاع ذو الانتقال الخطي المرتفع للطاقة).

وحُسبت معاملات تحويل معدل الجرعة الجزئية للفوتونات الناشئة عن الاضمحلال النووي لألفا أو بيتا أو الانشطار التلقائي أو تفاعل (ألفا - نيوترون) $AF_{T,S}^L$ استناداً إلى البيانات النووية الأساسية المتعلقة بانبعث الإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة من مصادر النيوترونات، وهي محددة في الجدول ٢٧. وكانت دالتا الاستجابة $d_{1,I}^{\gamma}(E_{\gamma})$ و $d_{2,II}^{\gamma}(E_{\gamma})$ المستخدمتان في حساب معاملات تحويل معدل الجرعة للنويدات المشعة المبتعثة لإشعاع ذي انتقال خطي منخفض للطاقة هي نفسها المستخدمة في النهج المبني على الخبرة وتتناسب مع طاقة الفوتونات التي تزيد على ٠,١ ميغا إلكترون فولط. وعند تحليل هذه التبعيات استناداً إلى قيم $AF_{7,II}$ و $AF_{1,II}$ المحسوبة لمصادر النويدات المشعة للفوتونات الأحادية الطاقة، مثل الكاديوم-١٠٩، واليتريوم-١٦٩، والكوبلت-٥٧، والليثيوم-١٧٤، والتكنيتوم-٩٩ شبه المستقر، والزنابق-٢٠٣، والزنون-١٣٥، والكروم-٥١، والإنديوم-١١٥ شبه المستقر، واليود-١٣١، والسترنشيوم-٨٧ شبه المستقر، والإنديوم-١١٣ شبه المستقر، والذهب-١٩٨، والرؤثيوم-١٠٣، والكربتون-٨٥، والزنون-١٣٥ شبه المستقر، والزرنيخ-٧٤، والرؤديوم-١٠٦، والسيزيوم-١٣٢، والسيزيوم-١٣٧، والفضة-١١٠، والنيوبيوم-٩٥، والتولونيوم-٢١٠، والمنغنيز-٥٤، والروبيديوم-٨٦، والزنك-٦٥، والقصدير-١٢٣، والكوبلت-٦٠، والأرجون-٤١، والبوتاسيوم-٤٠، والبوتاسيوم-٤٢، فإننا نحصل على التبعيات التالية لدالات استجابة الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية:

$$(٦٣) \quad dA_{T,S}^{\gamma}(E_{\gamma}) \cong \alpha_{T,S}^{\gamma} \times Y_i^{\gamma} \times E_{\gamma}$$

حيث:

هو دالة استجابة الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المساوية للجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في العضو أو النسيج T المشع بفوتون من مصدر أحادي الطاقة E_{γ} على النحو المبين في السياريو S، ((مكافئ غراي)/(بكريل × ثانية))؛

$\alpha_{T,S}^{\gamma}$ هو معامل تعرض محدد للسياريو، ((مكافئ غراي)/(ميغا إلكترون فولط))؛

Y_i^{γ} هي حصيللة الفوتونات الأحادية الطاقة في الاضمحلال النووي، (فوتون/بكريل × ثانية)؛

E_{γ} هو طاقة الفوتون الأحادي الطاقة الناشئة في تحول نووي واحد، (ميغا إلكترون فولط/فوتون).

ولذلك فإن معاملات تحويل معدل الجرعة الجزئية المرجحة بالفعالية النسبية تساوي:

$$(٦٤) \quad AF_{T,S}^L = \alpha_{T,S}^{\gamma} \times \sum_i (Y_i^{\gamma} E_{\gamma,i})$$

حيث:

$AF_{T,S}^L$ هو معامل تحويل معدل الجرعة الجزئية المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية للإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة الناشئ عن انشطار تلقائي أو تفاعل (ألفا - نيوترون) ويساوي معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في النسيج T وفقاً للسيناريو S من مصدر نيوترونات ذي نشاط^{٢١} قدره ١ بكريل، ((مكافئ غراي)/(بكريل × ثانية))؛

هي حصة طاقة الفوتونات^{٢١} من مصدر النيوترونات، (ميغا إلكترون فولت/بكريل × ثانية))، وترد في الجدول ٢٧؛

$\alpha_{T,S}^Y$ هو عضو ومعامل تعرض محدد للسيناريو، وهو يساوي:

$$(أ) \quad \alpha_{I,I}^Y = 9,6 \times 10^{-10} \text{ (مكافئ بكريل)/ميغا إلكترون فولت لتعرض النسيج الرخو من مصدر قريب؛}$$

$$(ب) \quad \alpha_{2,II}^Y = 1,4 \times 10^{-10} \text{ (مكافئ غراي)/ميغا إلكترون فولت لتعرض النخاع الأحمر من مصدر بعيد.}$$

وحسب معامل تحويل معدل الجرعة الجزئية المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية التي يتلقاها النخاع الأحمر المشع بنيوترونات من الانشطار النووي أو تفاعل (ألفا - نيوترون) وفقاً للسيناريو الثاني $AF_{2,II}^H$ ، باستخدام بيانات قياس الجرعة الناشئة عن التشعيع النيوتروني للنخاع الأحمر في وضع هندسي دوراني حسب ما هو محدد في الجدول ألف - ٣١ من المرجع [٤٣]:

$$(٦٥) \quad AF_{2,II}^H = \frac{Y^n(S_n)}{4\pi r_{II}^2} RBE_2^H \times \int_0^\infty S_n(E_n) \times d_{FG,ROT}^n(E_n) dE_n$$

حيث:

$AF_{2,II}^H$ هو معامل تحويل معدل الجرعة الجزئية المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية للنيوترونات المتولدة عن الانشطار النووي أو التفاعل (ألفا - نيوترون) التي يتلقاها النخاع الأحمر وفقاً للسيناريو الثاني، ((مكافئ غراي)/(بكريل × ثانية))؛

$S_n(E_n)dE_n$ هو الطيف النيوتروني الذي يمثل احتمال انشطار نيوترونات ذات طاقة تتراوح بين E_n و $E_n + dE_n$ ، من مصدر النيوترونات؛

هي دالة استجابة الجرعة الممتصة التي تساوي الجرعة الممتصة من الإشعاع النيوتروني في النخاع الأحمر لكل وحدة من وحدات تدفق النيوترونات ذات الطاقة E_n الحادثة في الوضع الهندسي الدوراني على جسم الإنسان المرجعي (غرام × سم^٢) وترد في الجدول ألف - ٣١ من المرجع [٤٣]:

$$(أ) \quad \int_0^\infty S_n(E_n) \times d_{FG,ROT}^n(E_n) dE_n = 4.0 \times 10^{-11} \text{ Gy} \times \text{cm}^2 \text{ for } ^{252}\text{Cf}; \text{ and}$$

$$(ب) \quad \int_0^\infty S_n(E_n) \times d_{FG,ROT}^n(E_n) dE_n = 4.3 \times 10^{-11} \text{ Gy} \times \text{cm}^2 \text{ for } ^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$$

٢١ يعبر عن نشاط مصادر النيوترونات المعنية بعدد تحولات ألفا في كل ثانية.

حيث:

RBE_2^H هي الفعالية البيولوجية النسبية للإصابة بآثار قطعية عنيفة في النخاع الأحمر بسبب التعرض الخارجي لنيوترونات، وترد في الجدول ١٠؛

$Y^n(S_n)$ هي حصيللة النيوترونات^{٢١} من مصدر نيوترونات، (نيوترون/بكريل × ثانية))، وترد في الجدول ٢٧؛

r_{II} هي المسافة بين مصدر النيوترونات والنسيج المستهدف (سم) المحددة في السيناريو الثاني وتساوي ١٠٠ سم.

واستخدمت بيانات الأطياف غير المعدلة للنيوترونات الواردة في المرجع [٤٨] باعتبارها $S_n(E_n)$:

(أ) استخدم طيف النيوترونات الناشئة عن الانشطار التلقائي للكاليفورنيوم - ٢٥٢ كمستوى مرجعي لكل مبعثات النيوترونات الناشئة عن انشطار تلقائي؛

(ب) استخدم أيضاً طيف النيوترونات الناشئة عن مصدر الأميريثيوم - ٢٤١/البريليوم - ٩ في حالة مصدر البلوتونيوم - ٢٣٩/البريليوم - ٩.

وحُسب معامل تحويل معدل الجرعة الجزئية المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية التي يتلقاها النسيج الرخو المشع بنيوترونات ناشئة عن انشطار تلقائي أو تفاعل (ألفا - نيوترون) وفقاً للسيناريو الأول $AF_{1,I}^H$ من $AF_{2,II}^H$ مع مراعاة الأوضاع الهندسية للتعرض في حالة سيناريو الجيب (السيناريو الأول) ومعاملات التعرض $\alpha_{T,S}^\gamma$ المحددة في المعادلة [٦٤]:

$$(٦٦) \quad AF_{1,I}^H = \frac{\alpha_{1,I}^\gamma}{\alpha_{7,II}^\gamma} AF_{2,II}^H \cong 600 AF_{2,II}^H$$

رابعاً-٣- قائمة معاملات تحويل الجرعة الخارجية

الجدول ١٣: معاملات تحويل معدل الجرعة الممتصة في النسيج الرخو والنخاع العظمي من مبعثات (نيوترونات) الإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة

مصدر بعيد	مصدر قريب	النوييدة المشعة
النخاع الأحمر	النسيج الرخو	
$DF_{2,II}^{L+H}$ ب، ج	$DF_{1,I}^{L+H}$ أ، ج	
(غراي/بكريل × ثانية))	(غراي/بكريل × ثانية))	
3.0 E-17	3.0 E-14	كاليفورنيوم-٢٥٢
5.0 E-19	5.0 E-16	بلوتونيوم-٢٣٩/بريليوم-٩ ^د
5.0 E-19	5.0 E-16	أميريثيوم-٢٤١/بريليوم-٩ ^د

أ معامل تحويل معدل الجرعة الممتصة في النسيج الرخو وفقاً لسيناريو الجيب.

ب معدل الجرعة في النخاع الأحمر على مسافة متر واحد من المصدر.

ج حُسبت وجمعت جرعات الإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض الطاقة والإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة.

د نشاط النوييدة المشعة المبعثة لألفا، مثل البلوتونيوم - ٢٣٩ أو الأميريثيوم - ٢٤١.

الجدول ١٤ : معاملات تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية لمبتعثات (نيوترونات) الإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة في النسيج الرخو والنخاع العظمي

النخاع الأحمر			النسيج الرخو			مصدر النيوترونات	منشأ النيوترونات
$AF_{2,II}$	$AF_{2,II}^H$	$AF_{2,II}^L$	$AF_{I,I}$	$AF_{I,I}^H$	$AF_{I,I}^L$		
$/($ مكافئ غراي)	$/($ مكافئ غراي)	$/($ مكافئ غراي)	$/($ مكافئ غراي)	$/($ مكافئ غراي)	$/($ مكافئ غراي)		
$(($ بكريل \times ثانية)	$(($ بكريل \times ثانية)	$(($ بكريل \times ثانية)	$(($ بكريل \times ثانية)	$(($ بكريل \times ثانية)	$(($ بكريل \times ثانية)		
2.6E-16	2.4E-16	2.1E-17	1.5E-13	1.4E-13	1.2E-14	انشطار تلقائي	كوريوم-٢٤٨
2.6E-18	2.4E-18	1.8E-19	1.6E-15	1.5E-15	1.1E-16	انشطار تلقائي	كاليفورنيوم-٢٥٠
1.1E-16	1.0E-16	7.5E-18	6.4E-14	6.0E-14	4.5E-15	انشطار تلقائي	كاليفورنيوم-٢٥٢
3.8E-15	3.5E-15	2.7E-16	2.3E-12	2.1E-12	1.6E-13	انشطار تلقائي	كاليفورنيوم-٢٥٤
8.2E-20	6.7E-20	1.5E-20	4.9E-17	4.0E-17	9.0E-18	تفاعل (ألفا- نيوترون)	بلوتونيوم-٢٣٩/بريليوم-٩
1.8E-19	8.4E-20	٩.4E-20	1.4E-16	5.0E-17	٨.9E-17	تفاعل (ألفا- نيوترون)	أميريشيوم-٢٤١/بريليوم-٩

أ نشاط النويدات المشعة المبتعثة لألفا، مثل البلوتونيوم - ٢٣٩ أو الأميريسيوم - ٢٤١.

ب تبتعث النويدات المشعة فوتونات ذات طاقة تبلغ ٦٠ كيلو إلكترون فولت تقريباً ولا تتضمن المعادلة (٦٤) سوى تقديرات تقريبية بدرجة كبيرة لها بسبب التدرج الذاتي الكبير. ولذلك فإن القيمة الواردة في هذا الجدول هي حاصل مجموع معامل تحويل الجرعة للأميريسيوم - ٢٤١ نقلاً عن الجدول ١٥ (الذي لا يسمح بتدرج ذاتي) والمعامل المحسوب باستخدام المعادلة (٦٤) للنيوترونات الناشئة في إنتاج النيوترونات.

الجدول ١٥ : معاملات تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية الناشئة عن التعرض الخارجي لمبتعثات إشعاعات ذات انتقال خطي منخفض للطاقة

مصدر قريب	مصدر بعيد	النويدات المشعة ^أ
النسيج الرخو	النخاع الأحمر	
$AF_{I,I}^B$	$AF_{2,II}^C$	
$(($ مكافئ غراي) $/($ بكريل \times ثانية)	$(($ مكافئ غراي) $/($ بكريل \times ثانية)	
7.6E-27	2.9E-29	H-3
5.2E-16	8.3E-19	Be-7
2.4E-18	3.6E-21	Be-10
1.1E-14	1.8E-17	C-11
1.6E-20	1.8E-23	C-14
1.1E-14	1.8E-17	N-13
1.1E-14	1.8E-17	F-18
2.2E-14	3.7E-17	Na-22
3.6E-14	6.3E-17	Na-24
3.0E-14	5.1E-17	Mg-28
2.6E-14	4.3E-17	Al-26
5.2E-17	8.2E-20	Si-31
5.2E-17	8.3E-20	Si-32 +
5.2E-17	8.3E-20	P-32
9.3E-20	1.2E-22	P-33
1.9E-20	2.1E-23	S-35
6.4E-18	9.7E-21	Cl-36
1.4E-14	2.4E-17	Cl-38

مصدر بعيد	مصدر قريب	النويدات المشعة ^أ
النخاع الأحمر	النسيج الرخو	
^{٢٤} AF _{2,II}	^{٢٤} AF _{1,II}	
((مكافئ غراي)) / ((بكريل × ثانية))	((مكافئ غراي)) / ((بكريل × ثانية))	
0.0E+00	0.0E+00	Ar-37
3.0E-21	2.0E-18	Ar-39
2.1E-17	1.3E-14	Ar-41
2.6E-18	1.5E-15	K-40
5.3E-18	3.1E-15	K-42
1.7E-17	1.0E-14	K-43
0.0E+00	0.0E+00	Ca-41
1.3E-22	1.1E-19	Ca-45
1.9E-17	1.1E-14	Ca-47 +
3.6E-17	2.2E-14	Sc-44
3.4E-17	2.0E-14	Sc-46
1.4E-18	9.7E-16	Sc-47
5.6E-17	3.3E-14	Sc-48
3.7E-17	2.3E-14	Ti-44 +
4.9E-17	2.9E-14	V-48
0.0E+00	0.0E+00	V-49
5.1E-19	3.3E-16	Cr-51
5.8E-17	3.4E-14	Mn-52
0.0E+00	0.0E+00	Mn-53
1.4E-17	8.6E-15	Mn-54
2.8E-17	1.6E-14	Mn-56
5.3E-17	3.2E-14	Fe-52 +
0.0E+00	0.0E+00	Fe-55
2.0E-17	1.2E-14	Fe-59
1.9E-17	1.1E-14	Fe-60 +
3.3E-17	2.0E-14	Co-55 +
5.8E-17	3.4E-14	Co-56
1.4E-18	9.6E-16	Co-57
1.7E-17	1.0E-14	Co-58
1.7E-17	1.0E-14	Co-58m +
4.1E-17	2.4E-14	Co-60
0.0E+00	0.0E+00	Ni-59
1.2E-25	2.3E-22	Ni-63
9.1E-18	5.4E-15	Ni-65
3.2E-18	2.0E-15	Cu-64
1.6E-18	1.0E-15	Cu-67
9.8E-18	5.8E-15	Zn-65
1.2E-20	8.3E-18	Zn-69
7.0E-18	4.4E-15	Zn-69m+
2.1E-18	1.4E-15	Ga-67
1.7E-17	1.0E-14	Ga-68

مصدر بعيد	مصدر قريب	النويدات المشعة ^أ
النخاع الأحمر	النسيج الرخو	
^{٢٢٨} Ac	^{٢٣٥} Am	
((مكافئ غراي)) / (بكريل × ثانية))	((مكافئ غراي)) / (بكريل × ثانية))	
4.3E-17	2.6E-14	Ga-72
1.7E-17	1.0E-14	Ge-68 +
4.9E-24	1.9E-23	Ge-71
1.8E-17	1.1E-14	Ge-77 +
3.1E-17	1.9E-14	As-72
1.8E-20	1.9E-17	As-73
1.3E-17	8.0E-15	As-74
7.7E-18	4.7E-15	As-76
1.4E-19	9.2E-17	As-77
5.8E-18	3.7E-15	Se-75
2.4E-23	2.2E-20	Se-79
4.2E-17	2.5E-14	Br-76
5.2E-18	3.3E-15	Br-77
4.4E-17	2.7E-14	Br-82
8.7E-20	5.6E-17	Kr-81
4.3E-20	2.7E-17	Kr-85
2.2E-18	1.5E-15	Kr-85m
1.3E-17	7.9E-15	Kr-87
1.0E-17	6.4E-15	Rb-81
8.4E-18	5.2E-15	Rb-83
1.6E-17	9.4E-15	Rb-84
1.7E-18	1.0E-15	Rb-86
2.9E-22	2.2E-19	Rb-87
1.9E-17	1.2E-14	Sr-82
8.6E-18	5.3E-15	Sr-85
1.1E-17	6.8E-15	Sr-85m +
5.2E-18	3.4E-15	Sr-87m
6.8E-20	4.3E-17	Sr-89
2.4E-19	1.5E-16	Sr-90 +
1.8E-17	1.1E-14	Sr-91 +
2.7E-17	1.6E-14	Sr-92 +
1.3E-17	8.1E-15	Y-87 +
4.3E-17	2.5E-14	Y-88
2.4E-19	1.5E-16	Y-90
1.3E-19	8.2E-17	Y-91
9.1E-18	5.7E-15	Y-91m +
5.1E-18	3.1E-15	Y-92
1.9E-18	1.2E-15	Y-93
5.0E-17	2.9E-14	Zr-88 +
4.0E-23	6.0E-20	Zr-93 +
2.6E-17	1.6E-14	Zr-95 +

مصدر بعيد	مصدر قريب	النويدات المشعة ^أ
النخاع الأحمر	النسيج الرخو	
^{٢٢٨} Ac	^{٢٣٥} Am	
((مكافئ غراي)) / ((بكريل × ثانية))	((مكافئ غراي)) / ((بكريل × ثانية))	
2.6E-17	1.6E-14	Zr-97 +
1.9E-22	2.8E-19	Nb-93m
2.7E-17	1.6E-14	Nb-94
1.3E-17	7.9E-15	Nb-95
1.1E-17	6.9E-15	Nb-97
1.1E-21	1.6E-18	Mo-93 +
3.9E-18	2.5E-15	Mo-99 +
1.1E-17	7.1E-15	Tc-95m
4.2E-17	2.6E-14	Tc-96
4.2E-17	2.6E-14	Tc-96m +
1.3E-21	2.3E-18	Tc-97
4.2E-21	4.6E-18	Tc-97m
2.4E-17	1.5E-14	Tc-98
2.8E-22	2.1E-19	Tc-99
1.6E-18	1.1E-15	Tc-99m
3.4E-18	2.2E-15	Ru-97
7.9E-18	5.0E-15	Ru-103 +
1.4E-17	9.0E-15	Ru-105 +
4.3E-18	2.6E-15	Ru-106 +
9.4E-18	5.9E-15	Rh-99
3.6E-18	2.3E-15	Rh-101
3.6E-17	2.2E-14	Rh-102
9.7E-18	6.0E-15	Rh-102m
3.4E-22	7.5E-19	Rh-103m
1.2E-18	8.0E-16	Rh-105
4.8E-21	8.0E-18	Pd-103 +
2.3E-27	3.9E-24	Pd-107
5.8E-20	4.3E-17	Pd-109
8.3E-18	5.2E-15	Ag-105
2.8E-17	1.7E-14	Ag-108m
4.7E-17	2.8E-14	Ag-110m
4.4E-19	2.8E-16	Ag-111
3.3E-20	3.4E-17	Cd-109
2.3E-21	1.6E-18	Cd-113m
6.4E-18	4.0E-15	Cd-115 +
4.4E-19	2.7E-16	Cd-115m
5.7E-18	3.7E-15	In-111
4.1E-18	2.7E-15	In-113m
1.4E-18	9.1E-16	In-114m
2.4E-18	1.6E-15	In-115m
4.2E-18	2.7E-15	Sn-113 +

مصدر بعيد	مصدر قريب	النويدات المشعة ^أ
النخاع الأحمر	النسيج الرخو	
^{٢٤} AF _{٢١١}	^{٢٤} AF _{١١١}	
((مكافئ غراي)) / (بكريل × ثانية))	((مكافئ غراي)) / (بكريل × ثانية))	
1.9E-18	1.3E-15	Sn-117m
3.9E-21	9.4E-18	Sn-119m
3.0E-21	5.9E-18	Sn-121m +
1.7E-19	1.0E-16	Sn-123
1.2E-17	7.3E-15	Sn-125
3.3E-17	2.1E-14	Sn-126 +
7.6E-18	4.7E-15	Sb-122
3.0E-17	1.8E-14	Sb-124
7.0E-18	4.4E-15	Sb-125 +
4.8E-17	3.0E-14	Sb-126
9.4E-18	5.9E-15	Te-121
1.1E-17	7.2E-15	Te-121m +
1.8E-18	1.2E-15	Te-123m
2.1E-20	4.3E-17	Te-125m
8.4E-20	5.4E-17	Te-127
9.1E-20	6.7E-17	Te-127m +
9.8E-19	6.1E-16	Te-129
1.1E-18	7.2E-16	Te-129m +
3.1E-17	1.9E-14	Te-131m +
4.2E-17	2.6E-14	Te-132 +
2.1E-18	1.4E-15	I-123
1.8E-17	1.1E-14	I-124
2.1E-20	4.9E-17	I-125
7.4E-18	4.7E-15	I-126
1.7E-20	3.5E-17	I-129
6.2E-18	4.0E-15	I-131
3.9E-17	2.3E-14	I-132
1.1E-17	6.6E-15	I-133
4.4E-17	2.7E-14	I-134
3.1E-17	1.8E-14	I-135
1.7E-17	1.1E-14	Xe-122
1.2E-17	7.4E-15	Xe-123 +
3.8E-18	2.5E-15	Xe-127
5.3E-20	5.1E-17	Xe-131m
2.4E-19	2.0E-16	Xe-133
3.9E-18	2.5E-15	Xe-135
4.1E-18	2.6E-15	Cs-129
1.3E-20	3.1E-17	Cs-131
1.1E-17	7.2E-15	Cs-132
2.7E-17	1.6E-14	Cs-134
2.6E-17	1.6E-14	Cs-134m +

مصدر بعيد	مصدر قريب	النويدات المشعة ^أ
النخاع الأحمر	النسيج الرخو	
^ع AF _{2,II}	^ب AF _{I,II}	
((مكافئ غراي)) / (بكريل × ثانية))	((مكافئ غراي)) / (بكريل × ثانية))	
6.4E-23	5.2E-20	Cs-135
3.6E-17	2.2E-14	Cs-136
9.6E-18	5.9E-15	Cs-137 +
6.9E-18	4.4E-15	Ba-131 +
5.7E-18	3.7E-15	Ba-133
3.4E-18	2.3E-15	Ba-133m
4.1E-17	2.4E-14	Ba-140 +
1.9E-20	3.8E-17	La-137
3.8E-17	2.2E-14	La-140
1.8E-18	1.2E-15	Ce-139
9.2E-19	6.1E-16	Ce-141
4.2E-18	2.7E-15	Ce-143 +
1.2E-18	7.6E-16	Ce-144 +
1.1E-18	6.6E-16	Pr-142
1.2E-20	8.2E-18	Pr-143
1.9E-18	1.2E-15	Nd-147 +
6.0E-18	3.9E-15	Nd-149 +
4.9E-18	3.0E-15	Pm-143
2.6E-17	1.6E-14	Pm-144
4.8E-20	6.8E-17	Pm-145
1.1E-22	8.5E-20	Pm-147
3.4E-17	2.1E-14	Pm-148m
1.9E-19	1.2E-16	Pm-149
5.0E-18	3.2E-15	Pm-151
1.2E-19	1.7E-16	Sm-145 +
0.0E+00	0.0E+00	Sm-147
1.7E-24	3.6E-21	Sm-151
4.0E-19	3.1E-16	Sm-153
7.4E-18	4.6E-15	Eu-147
3.7E-17	2.2E-14	Eu-148
5.4E-19	3.9E-16	Eu-149
7.3E-19	4.6E-16	Eu-150b
2.4E-17	1.5E-14	Eu-150a
1.9E-17	1.1E-14	Eu-152
4.8E-18	2.9E-15	Eu-152m
2.0E-17	1.2E-14	Eu-154
4.8E-19	3.5E-16	Eu-155
2.1E-17	1.3E-14	Eu-156
4.3E-17	2.7E-14	Gd-146 +
0.0E+00	0.0E+00	Gd-148
6.0E-19	4.9E-16	Gd-153

مصدر بعيد	مصدر قريب	النويدات المشعة ^أ
النخاع الأحمر	النسيج الرخو	
^ع AF _{2,II}	^ب AF _{I,II}	
((مكافئ غراي)) / ((بكريل × ثانية))	((مكافئ غراي)) / ((بكريل × ثانية))	
6.8E-19	4.5E-16	Gd-159
4.7E-21	6.4E-18	Tb-157
1.3E-17	7.7E-15	Tb-158
1.9E-17	1.1E-14	Tb-160
9.3E-20	1.2E-16	Dy-159
3.8E-19	2.4E-16	Dy-165
6.8E-19	4.7E-16	Dy-166 +
4.7E-19	2.9E-16	Ho-166
2.9E-17	1.8E-14	Ho-166m
3.9E-22	2.8E-19	Er-169
5.7E-18	3.7E-15	Er-171
1.6E-18	1.1E-15	Tm-167
4.3E-20	3.4E-17	Tm-170
2.2E-21	2.2E-18	Tm-171
3.0E-18	2.1E-15	Yb-169
6.1E-19	3.9E-16	Yb-175
3.1E-17	1.8E-14	Lu-172
1.1E-18	8.0E-16	Lu-173
1.4E-18	9.1E-16	Lu-174
1.6E-18	1.1E-15	Lu-174m +
4.6E-19	3.0E-16	Lu-177
3.1E-17	1.9E-14	Hf-172 +
5.3E-18	3.5E-15	Hf-175
8.8E-18	5.6E-15	Hf-181
2.3E-17	1.4E-14	Hf-182 +
1.4E-17	9.7E-15	Ta-178a
1.2E-19	1.1E-16	Ta-179
2.1E-17	1.2E-14	Ta-182
1.1E-18	7.7E-16	W-178
1.6E-19	1.5E-16	W-181
1.3E-21	9.5E-19	W-185
7.8E-18	4.8E-15	W-187
1.0E-18	6.5E-16	W-188 +
1.4E-17	8.7E-15	Re-184
1.7E-17	1.0E-14	Re-184m +
2.2E-19	1.6E-16	Re-186
0.0E+00	0.0E+00	Re-187
1.0E-18	6.4E-16	Re-188
9.7E-19	6.3E-16	Re-189
1.1E-17	7.2E-15	Os-185
6.3E-19	4.6E-16	Os-191

مصدر بعيد	مصدر قريب	النويدات المشعة ^أ
النخاع الأحمر	النسيج الرخو	
^{٢٣} AF _{٢١١}	^{٢٣} AF _{١١١}	
((مكافئ غراي)) / ((بكريل × ثانية))	((مكافئ غراي)) / ((بكريل × ثانية))	
6.7E-19	5.0E-16	Os-191m +
1.1E-18	6.9E-16	Os-193
1.7E-18	1.0E-15	Os-194 +
6.3E-19	4.7E-16	Ir-189
2.3E-17	1.5E-14	Ir-190
1.3E-17	8.5E-15	Ir-192
1.7E-18	1.0E-15	Ir-194
2.7E-17	1.6E-14	Pt-188 +
3.8E-18	2.5E-15	Pt-191
2.3E-23	1.8E-21	Pt-193
6.1E-20	5.0E-17	Pt-193m
4.7E-19	3.7E-16	Pt-195m
2.2E-19	1.6E-16	Pt-197
1.1E-18	7.8E-16	Pt-197m+
1.7E-18	1.2E-15	Au-193
1.7E-17	1.0E-14	Au-194
5.1E-19	4.0E-16	Au-195
6.7E-18	4.3E-15	Au-198
1.1E-18	7.5E-16	Au-199
1.7E-17	1.0E-14	Hg-194 +
4.9E-18	3.2E-15	Hg-195m +
4.2E-19	3.3E-16	Hg-197
1.3E-18	9.8E-16	Hg-197m +
3.7E-18	2.4E-15	Hg-203
2.1E-17	1.3E-14	Tl-200
7.2E-19	5.3E-16	Tl-201
7.2E-18	4.6E-15	Tl-202
1.3E-20	9.4E-18	Tl-204
1.2E-17	7.9E-15	Pb-201 +
7.1E-18	4.6E-15	Pb-202 +
4.3E-18	2.8E-15	Pb-203
3.0E-23	2.6E-21	Pb-205
2.4E-20	1.8E-17	Pb-210 +
2.3E-17	1.4E-14	Pb-212 +
2.7E-17	1.6E-14	Bi-205
5.3E-17	3.3E-14	Bi-206
2.6E-17	1.5E-14	Bi-207
2.0E-20	1.3E-17	Bi-210 +
4.0E-18	2.6E-15	Bi-210m
2.2E-17	1.3E-14	Bi-212 +
1.4E-22	8.8E-20	Po-210

مصدر بعيد	مصدر قريب	النويدات المشعة ^أ
النخاع الأحمر	النسيج الرخو	
${}^c\text{AF}_{2\text{II}}$	${}^b\text{AF}_{1\text{I}}$	
((مكافئ غراي)) / ((بكريل × ثانية))	((مكافئ غراي)) / ((بكريل × ثانية))	
2.1E-18	1.3E-15	At-211
2.9E-17	1.7E-14	Rn-222
4.3E-18	2.8E-15	Ra-223 +
2.4E-17	1.4E-14	Ra-224 +
3.6E-18	2.3E-15	Ra-225 +
2.9E-17	1.7E-14	Ra-226
3.6E-17	2.1E-14	Ra-228 +
3.6E-18	2.2E-15	Ac-225
5.8E-18	3.7E-15	Ac-227 +
3.9E-17	2.3E-14	Ac-228
5.8E-18	3.8E-15	Th-227 +
2.4E-17	1.4E-14	Th-228 +
4.4E-18	2.9E-15	Th-229 +
3.1E-21	2.3E-18	Th-230 +
9.4E-20	7.1E-17	Th-231
1.3E-17	7.7E-15	Th-232 +
4.4E-19	2.8E-16	Th-234 +
1.0E-17	6.4E-15	Pa-230 +
1.3E-18	8.9E-16	Pa-231 +
2.9E-18	1.9E-15	Pa-233
2.8E-19	1.8E-16	U-230 +
1.8E-17	1.0E-14	U-232 +
3.9E-21	2.7E-18	U-233
9.8E-22	8.2E-19	U-234 +
2.2E-18	1.5E-15	U-235 +
4.9E-22	4.5E-19	U-236
4.4E-19	2.8E-16	U-238 +
8.4E-21	6.5E-18	Np-235
6.2E-19	4.1E-16	Np-236b +
1.3E-18	8.8E-16	Np-236a
3.1E-18	2.0E-15	Np-237 +
2.1E-18	1.4E-15	Np-239
9.9E-19	5.8E-16	Pu-236
4.4E-19	3.1E-16	Pu-237
3.0E-22	3.7E-19	Pu-238
7.9E-22	5.9E-19	Pu-239
2.9E-22	3.6E-19	Pu-240
1.7E-23	1.1E-20	Pu-241 +
2.6E-22	3.1E-19	Pu-242
5.7E-18	3.5E-15	Pu-244 +
9.1E-20	8.7E-17	Am-241

مصدر بعيد	مصدر قريب	النويدات المشعة ^أ
النخاع الأحمر	النسيج الرخو	
^{٢٣} AF _{٢١١}	^{٢٣} AF _{١١١}	
((مكافئ غراي)) / ((بكريل × ثانية))	((مكافئ غراي)) / ((بكريل × ثانية))	
1.4E-19	1.0E-16	Am-242m +
2.6E-18	1.7E-15	Am-243 +
1.3E-17	8.1E-15	Am-244
8.9E-19	5.2E-16	Cm-240
7.6E-18	4.8E-15	Cm-241 +
3.3E-22	4.7E-19	Cm-242
1.7E-18	1.1E-15	Cm-243
2.0E-22	3.5E-19	Cm-244
9.6E-19	6.5E-16	Cm-245
1.9E-22	3.2E-19	Cm-246
5.3E-18	3.4E-15	Cm-247
1.2E-18	8.2E-16	Bk-247
9.2E-20	5.9E-17	Bk-249
2.4E-22	4.7E-19	Cf-248 +
5.3E-18	3.4E-15	Cf-249
1.6E-18	1.0E-15	Cf-251
9.6E-20	6.1E-17	Cf-253

- أ روعي النمو الداخلي للنواتج المشعة عند حساب معاملات جرعة كل النويدات المشعة على النحو المبين في التذييل الثامن. وتشير علامة "+" إلى النويدات المشعة التي تمثل نواتجها مصادر ملموسة للجرعة في السيناريوهات موضوع النظر.
- ب معامل تحويل معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في النسيج الرخو وفقاً لسيناريو الجيب.
- ج معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في النخاع الأحمر على مسافة متر واحد من المصدر.

التذييل الخامس معاملات تحويل جرعة الاستنشاق والغمر والجلد المستخدمة في النهج المبني على الخبرة

شملت معاملات تحويل الجرعة المستخدمة في حساب قيم $E D_2$ معاملات للاستنشاق وتلوث الجلد والغمر.

خامساً- ١- الاستنشاق

افترض أن استنشاق مادة مشعة مشتتة يمثل مساراً رئيسياً عند حساب قيم $E D_2$. ويتناول التذييل الثاني تفاصيل الخواص الكيميائية والفيزيائية للمادة المشعة و"سيناريو الاستنشاق" (السيناريو الثالث E). ويتضمن الجدولان ١٦ و ١٧ قيم معاملات تحويل الجرعة المستخدمة في حساب قيم $E D_2$. واستندت معاملات الجرعة التي يتلقها النخاع الأحمر والجهاز التنفسي إلى قاعدة بيانات معدل الجرعة الممتصة في الرئة الواردة في المرجع [٤٩] ما لم يرد ما يشير إلى خلاف ذلك. وتعرض قاعدة البيانات معاملات الجرعة لكل أنواع الامتصاصات الجسيمية الرئوية الثلاثة على النحو المحدد في نموذج الجهاز التنفسي البشري الذي وضعته اللجنة الدولية للوقاية من الإشعاعات [١١، ١٦] (أي S، M، F) الذي يفترض أن قطر النشاط الحركي الهوائي الوسطي يبلغ ١ ميكرون. وأخذت في الحسبان أيضاً الأشكال الفيزيائية الأخرى (مثل الغاز والبخار). وينبغي ملاحظة أن "جرعة الرئة" في المرجع [٤٩] هي الحاصل المرجح للجرعة الممتصة في مختلف أنسجة المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي. ويشبه ذلك الجرعة الفعالة ويعبر عن تعرض داخلي غير متسق في أنسجة الجهاز التنفسي. وتختلف هذه الأنسجة في حساسيتها للإشعاع من حيث ظهور آثار صحية عشوائية. وتلافياً للالتباس، أطلقت تسمية "المنطقة الصدرية" على عضو الجسم المعرض لخطر إشعاعي افتراض أنه يتسبب في إصابة خطيرة في الرئة. وكما جاء في المرجع [١٥]، كان من الأنسب استخدام الجرعة التي تتلقاها المنطقة السنخية في الجهاز التنفسي لتقييم التهاب الرئة على النحو الذي سار عليه النهج القائم على المخاطر.

وتختلف معاملات جرعة المواد المحتوية على نفس النوييدة المشعة ولكنها معينة لمعدلات امتصاص رئوي مختلفة. واستخدم النهج المبني على الخبرة في حالة النخاع الأحمر والجهاز التنفسي ومعامل الجرعة لنوع أو شكل الامتصاص الذي أعطى أعلى جرعة مودعة في العضو. ويحدد الجدول ١٧ لكل نوييدة مشعة قيم معامل تحويل الجرعة القصوى لعضو أو نسيج معين. وأخذت من الجدول الثاني - ٨ في المرجع [١١] أنواع المواد التي روعيت عند حساب قيم $E D_2$ في السيناريو الثالث - E. وتتعلق معاملات التحويل وبارامترات السيناريو المستخدمة بتعرض فرد مرجعي بالغ من الجمهور. وسوف يفضي استخدام تلك المعاملات مع الفئات العمرية الأخرى إلى مبالغة في تقدير الجرعة المودعة. وحُسبت قيم الجرعة المودعة لمدة ٣٦٥ يوماً نتيجة للتعرض لإشعاع ذي انتقال خطي مرتفع للطاقة في المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي بضرب الجرعة الممتصة المودعة لمدة ٣٠ يوماً المأخوذة من المرجع [٤٩] في ٤ استناداً إلى تقدير الخبراء. ولم يتضمن المرجع [٤٩] معامل تحويل الجرعة للكاليفورنيوم - ٢٥٢، ولذلك حُسب بضرب معامل تحويل جرعة الأميريثيوم - ٢٤١ في نسبة الجرعة الفعالة من الكاليفورنيوم - ٢٥٢ والجرعة الفعالة من الأميريثيوم - ٢٤١ المأخوذتين من المرجع [١١]. وتبلغ هذه النسبة نحو ٠,٥.

واستُخدمت معاملات الجرعة الممتصة المأخوذة من المرجع [٢٨] في حالة تعرض الغدة الدرقية بعد الاستنشاق. وتتعلق هذه المعاملات بإيداع الجرعة مدى الحياة، ولكن بالنظر إلى العمر النصف البيولوجي والفيزيائي للنويدات المشعة التي تسفر عن جرعة ملموسة في الغدة الدرقية (نظائر اليود والتلوريوم) فإن معاملات هذه الجرعات تتعلق في الواقع بفترة إيداع تقل كثيراً عن ٣٦٥ يوماً؛ ومع ذلك فقد اختيرت فترة إيداع (Δ) مدتها ٣٦٥ يوماً.

خامساً-٢- تلوث الجلد

استُخدمت معاملات تحويل الجرعة من المرجع [٣٥] في النهج المبني على الخبرة لتقدير تعرض الجلد عن طريق ملامسة تلوث سطحي. وتتعلق هذه المعاملات بالطبقة القاعدية للجلد على مسافة ٧٠ ميكرون (٧ ملغ/سم^٢) تحت سطح الجلد. على أن الآثار القطعية الطويلة الأجل التي تحدث في الجلد بسبب التعرض تنشأ أساساً على عمق يتراوح بين ٣٠٠ و ٥٠٠ ميكرون [١٧، ١٨]. وبالتالي فإن الحسابات المستندة إلى هذه المعاملات المأخوذة من المرجع [٣٥] لا بد وأن تكون متحفظة عند استخدامها للإشارة إلى حدوث آثار صحية قطعية عنيفة. ويتضمن الجدول ١٦ معاملات تحويل الجرعة المستخدمة في النهج المبني على الخبرة لتقييم تعرض الجلد عن طريق التلامس.

الجدول ١٦: معاملات تحويل الجرعة الممتصة المودعة عن طريق الاستنشاق والتلوث

التلوث	الاستنشاق			النويد المشعة ^أ
	الإشعاع ذو الانتقال الخطي المنخفض للطاقة في الجهاز التنفسي	الإشعاع ذو الانتقال الخطي المرتفع للطاقة في الجهاز التنفسي	النخاع الأحمر	
الغشاء القاعدي للجلد	$DF_{3E,III}^{HS}(\Delta)$	$DF_{3E,III}^L(\Delta)$	$DF_{2,III}^{L+H}(\Delta)$	
$DF_{6E,V}^L$	(غراي/بكريل)	(غراي/بكريل)	(غراي/بكريل)	
0.0E+00	NG	5.4E-12	2.2E-12	H-3
8.8E-11	NG	1.1E-09	6.5E-12	C-14
4.7E-10	NG	3.6E-09	2.5E-10	P-32
9.4E-11	NG	1.1E-09	1.7E-11	S-35
4.4E-10	NG	2.8E-09	3.5E-11	Cl-36
2.8E-13	NG	1.1E-11	2.2E-12	Cr-51
2.8E-13	NG	5.6E-12	1.3E-11	Fe-55
2.1E-11	NG	1.6E-10	7.4E-12	Co-57
2.9E-10	NG	2.4E-09	1.3E-10	Co-60
2.8E-13	NG	1.1E-09	2.8E-12	Ni-63
6.7E-12	NG	1.5E-10	3.6E-11	Zn-65
4.2E-10	NG	3.4E-08	9.4E-11	Ge-68
2.8E-11	NG	2.9E-10	2.4E-11	Se-75
4.6E-10	NG	3.4E-09	2.5E-10	Sr-89
8.8E-10	NG	() ^ج	1.8E-10	Sr-90+
4.7E-10	NG	3.5E-09	3.4E-10	Y-90
4.6E-10	NG	3.5E-09	2.9E-10	Y-91
3.3E-10	NG	2.3E-09	1.2E-10	Zr-95+
4.0E-10	NG	1.1E-09	5.9E-11	Nb-95
^د ND	NG	2.0E-09	6.0E-11	Nb-95m+
5.1E-10	NG	2.7E-09	7.7E-11	Mo-99+
6.5E-11	NG	8.4E-11	1.7E-12	Tc-99m
1.8E-10	NG	2.0E-09	9.0E-11	Ru-103+
4.9E-10	NG	5.7E-09	2.9E-10	Ru-106+
2.8E-13	NG	4.5E-10	4.9E-13	Pd-103+
1.4E-10	NG	2.1E-09	5.2E-12	Cd-109
6.6E-10	NG	4.4E-09	3.3E-10	Te-132+
2.8E-13	NG	1.0E-10	2.9E-12	I-125
ND	NG	1.2E-09	5.2E-12	I-129
4.0E-10	NG	2.4E-09	3.3E-11	I-131
3.0E-10	NG	2.3E-09	1.1E-10	Cs-134

التلوث	الاستنشاق			النوييدة المشعة ^أ
	الإشعاع ذو الانتقال الخطي المرتفع للطاقة في الجهاز التنفسي	الإشعاع ذو الانتقال الخطي المنخفض للطاقة في الجهاز التنفسي	النخاع الأحمر	
الغشاء القاعدي للجلد	$DF_{3E,III}^{HS}(\Delta)$	$DF_{3E,III}^L(\Delta)$	$DF_{2,III}^{L+H}(\Delta)$	
$DF_{6E,V}^L$	(غراي/بكريل)	(غراي/بكريل)	(غراي/بكريل)	
4.4E-10	NG	2.9E-09	6.5E-11	Cs-137+
2.7E-11	NG	8.9E-10	5.4E-11	Ba-133
4.8E-10	NG	2.9E-09	5.7E-11	Ce-141
7.3E-10	NG	7.4E-09	3.4E-10	Ce-144+
1.6E-10	NG	1.4E-09	2.7E-11	Pm-147
2.1E-10	NG	1.9E-09	1.4E-10	Eu-152
5.0E-10	NG	4.0E-09	2.0E-10	Eu-154
3.1E-11	NG	7.9E-10	2.9E-11	Gd-153
4.5E-10	NG	3.2E-09	2.0E-10	Tm-170
2.7E-10	NG	2.3E-09	8.6E-11	Yb-169
5.2E-10	NG	2.3E-09	3.4E-11	Re-188
4.5E-10	NG	3.0E-09	5.9E-11	Ir-192
4.6E-10	NG	2.4E-09	3.7E-11	Au-198
2.5E-10	NG	2.8E-08	3.3E-11	Hg-203
2.8E-13	3.9E-06	NG	2.1E-09	Po-210
1.0E-09	3.8E-06	NG	3.9E-09	Ra-226+
ND	3.4E-06	NG	2.3E-09	Th-230
ND	2.5E-06	NG	2.0E-09	Th-232
1.5E-12	4.4E-06	NG	9.2E-10	U-232
ND	3.2E-06	NG	8.2E-10	U-234
ND	3.2E-06	NG	2.8E-09	U-235+
ND	NG	3.6E-09	3.8E-11	U-237
ND	2.8E-06	NG	7.3E-10	U-238
ND	2.8E-06	NG	ND	U natural
ND	2.8E-06	NG	ND	U depleted
ND	3.2E-06	NG	ND	U enriched
ND	3.5E-06	NG	1.8E-09	Np-237+
2.8E-13	4.4E-06	NG	1.7E-09	Pu-238
ND	3.9E-06	NG	1.6E-09	Pu-239
ND	3.9E-06	NG	1.6E-09	Pu-240
2.8E-13	8.9 E-08	NG	2.1E-11	Pu-241+
ND	3.6E-06	NG	1.5E-09	Pu-242
7.4E-13	4.4E-06	NG	1.6E-09	Am-241
2.8E-13	5.2E-06	NG	1.7E-09	Cm-242
2.8E-13	4.8E-06	NG	1.7E-09	Cm-244
ND	^ط 2.2E-06	2.3E-10	ND	Cf-252

أ روعي النمو الداخلي للنواتج المشعة قبل الأخذ الداخلي عند حساب معاملات الجرعة لكل النويدات المشعة على النحو المبين في التذييل الثامن. وتشير علامة "+" إلى النويدات المشعة التي تمثل نواتجها مصادر ملموسة للجرعة في السيناريوهات موضوع النظر.

ب معامل تحويل الجرعة المودعة لمدة يومين في النسيج ٢ (النخاع الأحمر) بسبب استنشاق ١ بكريل من نوييدة مشعة مبنعثة لأي مجموعة من الإشعاعات ذات الانتقال الخطي المنخفض الطاقة والانتقال الخطي المرتفع للطاقة نقلا عن المرجع [٤٩].

- ج معامل تحويل الجرعة الممتصة المودعة لمدة يومين في النسيج E³ (المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي) بسبب استنشاق ١ بكريل من نويدة مشعة مبعثة لإشعاع ذي انتقال خطي منخفض للطاقة نقلاً عن المرجع [٤٩].
- د معامل تحويل الجرعة الممتصة المودعة لمدة ٣٦٥ في النسيج E³ (المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي) بسبب استنشاق ١ بكريل من أيروسول من النوع S لنويدة مشعة مبعثة لإشعاع ذي انتقال خطي مرتفع للطاقة. وافترض أن الجرعة المودعة لمدة ٣٦٥ يوماً تساوي ٤ أمثال الجرعة المودعة لمدة ٣٠ يوماً المأخوذة من المرجع [٤٩].
- هـ معامل تحويل معدل الجرعة الممتصة في النسيج E⁶ (الغشاء القاعدي للجلد) بسبب وحدة نشاط سطحي لنويدة مشعة مبعثة لإشعاع ذي انتقال خطي منخفض للطاقة.
- و "NG" تعني "لا يذكر".
- ز فيما يتعلق بالحالة الخاصة لمركب ⁹⁰SrTiO₃ غير القابل للذوبان، كما هو مبين في التذييل الأول، استخدم معامل تحويل الجرعة الممتصة المودعة لمدة ٣٦٥ يوماً في النسيج E³ (المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي) وهو $DF_{3E,III}^{LS}(\Delta)$ يساوي E³,٧-٧ غراي/بكريل.
- ح "ND" تعني "لا توجد أي بيانات".
- ط فُدر معامل تحويل جرعة الكاليفورنيوم - ٢٥٢ بضرب معامل تحويل جرعة الأثيريشيوم - ٢٤١ في نسبة الجرعة الفعالة للكاليفورنيوم - ٢٥٢ والجرعة الفعالة للأثيريشيوم - ٢٤١ نقلاً عن المرجع [١١]. وهذه النسبة هي ٠,٥.

الجدول ١٧: معاملات الجرعة الممتصة المودعة في الغدة الدرقية عن طريق الاستنشاق

الغدة الدرقية	النويدة المشعة ^أ
$DF_{5,III}^L(\Delta)$ ^ب	
(غراي/بكريل)	
5.8E-08	Te-132+
2.2E-07	I-125
1.6E-06	I-129
2.9E-07	I-131

- أ الجرعة التي تتلقاها الغدة الدرقية من كل النويدات المشعة الأخرى التي يتناولها النهج المبني على الخبرة لا تذكر.
- ب معامل تحويل الجرعة الممتصة المودعة لمدة ٣٦٥ يوماً في النسيج ٥ (الغدة الدرقية) الناتجة عن أخذ داخلي لمقدار يبلغ ١ بكريل من نويدة مشعة متراكمة في الغدة الدرقية تبتعث إشعاعاً ذا انتقال خطي منخفض للطاقة. ويفترض أن ذلك يساوي الجرعة المودعة مدى الحياة استناداً إلى المرجع [٢٨].

خامساً-٣- الغمر

استخدم النهج المبني على الخبرة معاملات جرعة الغمر المأخوذة عن المرجع [٤٠]. وافترض حدوث غمر في سحابة شبه لا متناهية من الغاز الخامل المشع، وهو ما يباليغ في تقدير الغمر في غرفة حجمها ٣٠٠ متر مكعب وفقاً للسياريو الرابع. ولم يتناول النهج المبني على الخبرة سوى غاز الكريبتون-٨٥ كمصدر للغمر. وتبتعث هذه النويدة المشعة إشعاعاً ذا انتقال خطي منخفض للطاقة، ولذلك افترض أن معامل تحويل معدل جرعتها الممتصة $DF_{2,VI}^L$ يساوي عددياً معامل تحويل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية $AF_{2,VI}$ المحدد لغاز الكريبتون - ٨٥ في الجدول ٢٠.

التذييل السادس

معاملات التحويل المستخدمة في النهج القائم على المخاطر للجرعات المأخوذة عن طريق الاستنشاق والابتلاع والغمر والجلد

تشمل معاملات تحويل الجرعات المستخدمة لحساب قيم D_2^R معاملات تتعلق بالاستنشاق والابتلاع وتلوث الجلد والغمر. وترد هذه المعاملات في الجداول ١٨ و ١٩ و ٢٠.

سادساً-١- الاستنشاق والابتلاع

قاعدة بيانات قياسات الجرعات التابعة لمختبر أوك ريدج الوطني [٤٩] هي المصدر الرئيسي للبيانات المستخدمة في حساب معاملات تحويل جرعات المواد المشعة المشتتة المأخوذة عن طريق الاستنشاق والابتلاع. والمصدر الإضافي لبيانات قياسات الجرعات المستخدمة في حساب قيم D_2^R هي قاعدة بيانات قياسات جرعات اللجنة الدولية للوقاية من الإشعاعات [٥٠]. واستُخدمت البيانات المأخوذة من هذا المصدر مع النويدات المشعة التي لم تكن موجودة في قاعدة بيانات قياسات الجرعات التابعة لمختبر أوك ريدج الوطني. ويشار في الجدولين ١٨ و ١٩ إلى تلك البيانات بعلامة النجمة (*). ويعبّر استخدام تلك المعاملات للبارامترات عن تعرض أحد أفراد الجمهور البالغين المرجعيين. وسوف يفضي استخدام تلك المعاملات مع الفئات العمرية الأخرى إلى مبالغة في تقدير الجرعة المودعة. وروعت مساهمة النواتج العالقة الهواء المستنشقة عند حساب معامل الجرعة على النحو المبين في التذييل الثامن. وتوضع علامة (+) في الجدولين إذا كانت هذه المساهمة تتجاوز النويذة المشعة الأم بعدة نقاط مئوية.

واستخدم النهج القائم على المخاطر جرعة مودعة مرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية نتيجة لحدوث تعرض داخلي في عضو أو نسيج T من خلال مسار (مسار التعرض) S، $AF_{T,S}(\Delta)$ لتحديد خصائص الأخذ الداخلي للنويذة المشعة. وتحدّد هذه الكمية في المعادلة (٤). وتعيّن اللجنة الدولية للوقاية من الإشعاعات في حالة الاستنشاق أو الابتلاع مادة مشعة لواحد من عدة أنواع من الاستنشاق أو الابتلاع^{٢٢} [١١، ١٦]. وتختلف معاملات جرعات المواد المحتوية على نفس النويذة المشعة المحددة لأنواع مختلفة. وتتضمن الجداول معاملات تحويل الجرعة القصوى لكل نويذة مشعة في عضو أو نسيج معيّن. وأخذت من الجدول الثاني - ٥، والجدول الثاني - ٩ والجدول الثاني - ٦ في المرجع [١١] أنواع المواد التي أخذت في الاعتبار عند حساب قيم D_2^R في السيناريو الثالث R والسيناريو الرابع. واستُخدمت معاملات تحويل الجرعة المودعة التالية:

- (أ) $AF_{2,HIR}(\Delta)$ هو معامل تحويل الجرعة الذي يساوي جرعة مودعة مرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية لمدة ٣٠ يوماً وفقاً للسيناريو الثالث R في النسيج ٢ (النخاع الأحمر) نتيجة لاستنشاق ١ بكريل من نويذة مشعة (مكافئ غراي)/بكريل؛
- (ب) $AF_{3R,HIR}(\Delta)$ هو معامل تحويل الجرعة الذي يساوي الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية لمدة ٣٠ يوماً وفقاً للسيناريو الثالث R في النسيج ٣ (المنطقة السنخية الخالية من الجهاز التنفسي) نتيجة لاستنشاق ١ بكريل من نويذة مشعة، (مكافئ غراي)/بكريل؛

٢٢ أنواع الابتلاع مطلوبة بسبب اختلاف معاملات الامتصاص في الجهاز الهضمي.

- (ج) $AF_{4,III}(\Delta)$ هو معامل تحويل الجرعة الذي يساوي الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية لمدة ٣٠ يوماً وفقاً للسيناريو الثالث R في النسيج ٤ (القولون)^{٢٣} نتيجة لاستنشاق ١ بكريل من نويده مشعة، (مكافئ غراي/بكريل)؛
- (د) $AF_{5,III}(\Delta)$ هو معامل تحويل الجرعة الذي يساوي جرعة مودعة مرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية لمدة ٣٦٥ يوماً وفقاً للسيناريو الثالث R في النسيج ٥ (الغدة الدرقية بسبب استنشاق ١ بكريل من نويده مشعة، (مكافئ غراي/بكريل)؛
- (هـ) $AF_{2,IV}(\Delta)$ هو معامل تحويل الجرعة الذي يساوي الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية لمدة ٣٠ يوماً وفقاً للسيناريو الرابع في النسيج ٢ (النخاع الأحمر) نتيجة لابتلاع ١ بكريل من نويده مشعة، (مكافئ غراي/بكريل)؛
- (و) $AF_{4,IV}(\Delta)$ هو معامل تحويل الجرعة الذي يساوي الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية لمدة ٣٠ يوماً وفقاً للسيناريو الرابع في النسيج ٤ (القولون)^{٢٣} نتيجة لابتلاع ١ بكريل من نويده مشعة، (مكافئ غراي/بكريل)؛
- (ز) $AF_{5,IV}(\Delta)$ هو معامل تحويل الجرعة الذي يساوي الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية لمدة ٣٦٥ يوماً وفقاً للسيناريو الرابع في النسيج ٥ (الغدة الدرقية) نتيجة لابتلاع ١ بكريل من نويده مشعة، (مكافئ غراي/بكريل).

وفيما يتعلق بالاستنشاق والابتلاع، يتضمن ملحق قاعدة بيانات قياسات الجرعات التابعة لمختبر أوك ريدج الوطني [٤٩] وبيانات قياسات الجرعات الواردة في المرجع [٥١] قيم معدلات جرعات الإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة والإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة في ٢٩ عضواً أو نسيجاً لدى بشر في مراحل عمرية مختلفة (أفراد مرجعيون في ٦ فئات عمرية). وفيما يتعلق بالاستنشاق، لا تتاح إلا البيانات المتعلقة بالأيروسولات التي يبلغ قطر نشاطها الحركي الهوائي الوسطي ١ ميكرون. وترد قائمة بمعدلات الجرعة الممتصة في كل عضو أو نسيج في ١٢٨ نقطة زمنية من الصفر حتى ٢٧ ٥٠٠ يوم بعد الأخذ الداخلي. وعندما استخدمت قواعد هذه البيانات لحساب معاملات تحويل الجرعة المودعة، حُسبت قيمة $AF_{T,S}(\Delta)$ بالتكامل العددي لمعدل الجرعة الممتصة:

$$(٦٧) \quad AF_{T,S}(\Delta) = \int_0^{\Delta} \left[RBE_T^L \times \dot{d}_{T,S}^L(t) + RBE_T^H \times \dot{d}_{T,S}^H(t) \right] dt$$

حيث:

$\dot{d}_{T,S}^L(t)$ و $\dot{d}_{T,S}^H(t)$ هما معدل الجرعة الممتصة في عضو أو نسيج T بعد أخذ داخلي لمقدار يبلغ ١ بكريل من نويده مشعة معيّنة للمسار S، (غراي/بكريل × ثانية)، ويردان في المرجعين [٤٩، ٥١]؛

RBE_T^L و RBE_T^H هما المعاملان للفعالية البيولوجية النسبية للإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة والإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة اللذان يتسببان في حدوث آثار قطعية عنيفة في العضو أو النسيج T، ((مكافئ غراي/غراي)، ويردان في الجدول ١٠؛

Δ هو الحد الأعلى لزمان التكامل، (D)، ويرد في الجدول ١٠.

٢٣ حُسبت الجرعة التي يتلقاها القولون باعتبارها متوسط الجرعة في كتلة الأمعاء الغليظة وفقاً لتوصية اللجنة الدولية للوقاية من الإشعاعات في المرجع [٢٠].

وتتضمن قاعدة بيانات قياسات الجرعات التابعة للجنة الدولية للوقاية للإشعاعات [٥٠] قيم معاملات تحويل الجرعة $HF_{T,S}(\Delta)$ التي تساوي الجرعة المودعة المرجحة بالإشعاع كدالة للزمن (Δ) بعد قيام الجمهور (الأفراد المرجعيون في ٦ فئات عمرية) والعمال بابتلاع أو استنشاق ١ بكريل من نويده مشعة مرة واحدة. وفيما يتعلق بالنويدات المشعة التي لا تتبع سوى إشعاع ذي انتقال خطي منخفض للطاقة، فإن قيم $HF_{T,S}(\Delta)$ ، (Sv) ، و $AF_{T,S}(\Delta)$ ، (مكافئ غراي)، تكون متساوية عددياً وتحدّد بالمعادلة التالية:

$$(٦٨) \quad AF_{T,S}(\Delta) = \frac{RBE_T^L}{w_L} HF_{T,S}(\Delta)$$

حيث:

RBE_T^L هي الفعالية البيولوجية النسبية للإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة، ((مكافئ غراي)/(غراي)، وترد في الجدول ١٠؛

w_L هو المعامل الإشعاعي المرجح للإشعاع ذي الانتقال الخطي المنخفض للطاقة الذي يساوي ١ سيفرت/غراي [٢٠].

والإشعاع ذو الانتقال الخطي المرتفع للطاقة هو العامل الرئيسي الذي يساهم في الجرعة الممتصة في العضو أو النسيج المعرض لخطر إشعاعي [١٥] من معظم النويدات المشعة المبتعثة لألفا والنويدات المشعة التي ترتفع احتمالات انشطارها التلقائي (الواردة في الجدول ٢٧). وفي هذه الحالة المعيّنة:

$$(٦٩) \quad AF_{T,S}(\Delta) = \frac{RBE_T^H}{w_H} HF_{T,S}(\Delta)$$

حيث:

RBE_T^H هي الفعالية البيولوجية النسبية الخاصة بأثر الإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة، ((مكافئ غراي)/(غراي)، وترد في الجدول ١٠؛

w_H هو المعامل الترجيحي للإشعاع ذي الانتقال الخطي المرتفع للطاقة الذي يساوي ٢٠ سيفرت/غراي لجسيمات ألفا على النحو الذي حددته اللجنة الدولية للوقاية من الإشعاعات [٢٠] ويساوي ١٢ سيفرت/غراي لأطياف الإشعاع النيوتروني المهمة.

وتنطبق المعادلتان (٦٨) و(٦٩) على كل النويدات المشعة التي يقل عددها الذري عن ٨٠، ومعظم النويدات المشعة التي يزيد عددها الذري على ٨١ الواردة في الجدول ١. والاستثناءات الوحيدة هي النويدات المشعة الثماني التالية: الرصاص-٢١٠، والبزموت-٢١٠، والبزموت-٢١٠ شبه المستقر، والراديوم-٢٢٨، والبروتكتينيوم-٢٣٠، والنيبتونيوم-٢٣٦، والبلوتونيوم-٢٤١، والأميريثيوم-٢٤٢ شبه المستقر. وهذه النويدات المشعة لها سلاسل اضمحلالية مشعة معقدة ونواتج تتبع إشعاعات متباينة من حيث الانتقال الخطي للطاقة. وتساهم هذه النويدات المشعة بدور ملموس في الجرعة المرجحة بالإشعاع.

ويتضمن الجدول ١٨ معاملات تحويل الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية عن طريق الاستنشاق المستخدمة في النهج القائم على المخاطر.

الجدول ١٨ : معاملات تحويل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المودعة عن طريق الاستنشاق

الاستنشاق				
الغدة الدرقية	القولون	المنطقة السنخية الخلالية	النخاع الأحمر	النويذة المشعة ^أ
^د AF _{5, IIR} (Δ)	^د AF _{4, IIR} (Δ)	^ج AF _{3R, IIR} (Δ)	^ب AF _{2, IIR} (Δ)	
(مكافئ غراي/بكريل)	(مكافئ غراي/بكريل)	(مكافئ غراي/بكريل)	(مكافئ غراي/بكريل)	
NA	2.1E-11	2.1E-11	2.1E-11	H-3
NA	2.4E-11	1.0E-10	1.5E-11	Be-7
NA	1.9E-09	1.0E-08	7.1E-11	Be-10
NA	2.2E-12	2.1E-12	2.0E-12	C-11
NA	2.8E-12	2.8E-12	2.8E-12	C-14
NA	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	N-13
NA	2.9E-12	5.3E-11	2.7E-11	F-18 (*)
NA	8.7E-10	7.5E-10	1.2E-09	Na-22
NA	1.1E-10	1.2E-10	1.5E-10	Na-24 (*)
NA	2.4E-09	2.6E-09	5.5E-10	Mg-28 (*)
NA	4.4E-09	2.0E-08	4.4E-09	Al-26
NA	1.2E-10	1.4E-10	4.3E-12	Si-31 (*)
NA	2.5E-09	2.8E-08	2.9E-09	Si-32 +
NA	1.2E-09	1.3E-08	2.6E-09	P-32
NA	1.4E-10	1.8E-09	1.3E-10	P-33
NA	3.1E-10	1.5E-09	2.2E-10	S-35
NA	2.7E-10	9.3E-09	2.4E-10	Cl-36
NA	4.3E-12	8.2E-11	4.1E-12	Cl-38 (*)
NA	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	Ar-37(*)
NA	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	Ar-39 (*)
NA	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	Ar-41 (*)
NA	2.3E-09	8.5E-10	8.4E-10	K-40
NA	1.2E-10	9.6E-11	7.6E-11	K-42 (*)
NA	9.5E-11	7.0E-11	6.7E-11	K-43 (*)
NA	1.9E-11	9.2E-11	3.2E-12	Ca-41
NA	5.2E-10	2.4E-09	8.3E-11	Ca-45
NA	2.3E-09	4.5E-09	2.6E-10	Ca-47 +
NA	3.1E-10	2.6E-10	1.7E-11	Sc-44 (*)
NA	1.7E-09	8.1E-09	5.5E-10	Sc-46
NA	8.7E-10	1.2E-09	9.9E-12	Sc-47
NA	1.8E-09	1.6E-09	1.8E-10	Sc-48
NA	5.6E-09	3.0E-08	2.1E-09	Ti-44 +
NA	2.2E-09	6.2E-09	7.5E-10	V-48
NA	3.3E-11	1.5E-10	5.5E-12	V-49
NA	4.7E-11	2.0E-10	1.0E-11	Cr-51
NA	1.5E-09	2.7E-09	8.3E-10	Mn-52
NA	3.7E-11	1.8E-10	2.7E-11	Mn-53
NA	5.5E-10	1.9E-09	5.6E-10	Mn-54

الاستنشاق

الغدة الدرقية	القولون	المنطقة السنخية الخلالية	النخاع الأحمر	النويدات المشعة ^أ
^د AF _{5,IIIR} (Δ)	^د AF _{4,IIIR} (Δ)	^ج AF _{3R,IIIR} (Δ)	^ب AF _{2,IIIR} (Δ)	
((مكافئ غراي/بيكريل)	((مكافئ غراي/بيكريل)	((مكافئ غراي/بيكريل)	((مكافئ غراي/بيكريل)	
NA	1.8E-10	1.9E-10	2.1E-11	Mn-56 (*)
NA	1.6E-09	1.0E-09	8.8E-10	Fe-52 +
NA	3.8E-11	2.0E-10	4.7E-11	Fe-55
NA	1.3E-09	5.1E-09	1.5E-09	Fe-59
NA	2.1E-09	1.1E-08	1.4E-09	Fe-60 +
NA	1.3E-09	8.5E-10	6.1E-11	Co-55 +(*)
NA	2.4E-09	1.1E-08	9.0E-10	Co-56
NA	2.3E-10	1.2E-09	3.8E-11	Co-57
NA	7.1E-10	3.3E-09	2.7E-10	Co-58
NA	3.4E-11	3.7E-11	1.5E-12	Co-58m +
NA	1.8E-09	9.3E-09	7.2E-10	Co-60
NA	4.7E-11	2.3E-10	1.8E-11	Ni-59
NA	1.2E-10	5.7E-10	4.4E-11	Ni-63
NA	1.2E-10	1.3E-10	2.6E-10	Ni-65 (*)
NA	1.3E-10	1.5E-10	9.1E-12	Cu-64 (*)
NA	4.2E-10	8.7E-10	3.8E-11	Cu-67
NA	3.4E-10	1.6E-09	1.7E-10	Zn-65
NA	7.5E-12	2.4E-11	1.1E-13	Zn-69 (*)
NA	6.4E-10	4.0E-10	1.7E-11	Zn-69m +(*)
NA	2.5E-10	3.0E-10	4.5E-11	Ga-67
NA	3.2E-11	7.4E-11	5.6E-12	Ga-68 (*)
NA	1.2E-09	7.3E-10	1.3E-10	Ga-72 (*)
NA	2.3E-09	2.6E-08	2.9E-10	Ge-68 +
NA	2.1E-11	1.5E-10	5.9E-13	Ge-71
NA	2.4E-10	8.5E-10	3.5E-11	Ge-77 +
NA	2.3E-09	2.3E-09	9.1E-11	As-72
NA	3.9E-10	2.1E-09	1.1E-11	As-73
NA	1.6E-09	6.5E-09	1.9E-10	As-74
NA	2.2E-09	2.2E-09	3.8E-11	As-76
NA	5.8E-10	6.9E-10	6.5E-12	As-77
NA	3.1E-10	1.4E-09	2.3E-10	Se-75
NA	3.7E-10	1.9E-09	5.6E-11	Se-79
NA	1.4E-10	1.1E-09	1.1E-10	Br-76 (*)
NA	4.7E-11	1.7E-10	2.9E-11	Br-77
NA	2.6E-10	9.2E-10	1.6E-10	Br-82
NA	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	Kr-81
NA	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	Kr-85
NA	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	Kr-85m
NA	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	Kr-87
NA	9.0E-12	1.2E-11	1.0E-11	Rb-81 (*)

الاستنشاق

الغدة الدرقية	القولون	المنطقة السنخية الخلالية	النخاع الأحمر	النويدات المشعة ^أ
^د AF _{5,IIIR} (Δ)	^د AF _{4,IIIR} (Δ)	^ج AF _{3R,IIIR} (Δ)	^ب AF _{2,IIIR} (Δ)	
((مكافئ غراي/بيكريل)	((مكافئ غراي/بيكريل)	((مكافئ غراي/بيكريل)	((مكافئ غراي/بيكريل)	
NA	3.6E-10	2.8E-10	4.1E-10	Rb-83
NA	7.4E-10	5.4E-10	8.4E-10	Rb-84
NA	1.0E-09	6.0E-10	1.1E-09	Rb-86
NA	2.6E-10	1.5E-10	2.9E-10	Rb-87
NA	1.0E-08	4.1E-08	4.3E-09	Sr-82
NA	3.2E-10	1.7E-09	2.8E-10	Sr-85
NA	2.2E-12	4.2E-12	8.5E-13	Sr-85m +
NA	2.3E-11	2.3E-11	3.9E-12	Sr-87m (*)
NA	4.2E-09	1.9E-08	1.9E-09	Sr-89
NA	8.4E-09	4.5E-08	3.7E-09	Sr-90 +
NA	4.2E-09	1.7E-08	5.3E-10	Sr-91 +
NA	6.5E-10	4.1E-10	6.1E-11	Sr-92 +(*)
NA	6.4E-10	9.1E-10	8.6E-11	Y-87 +
NA	1.2E-09	5.7E-09	8.7E-10	Y-88
NA	4.4E-09	5.1E-09	1.0E-10	Y-90
NA	4.3E-09	2.0E-08	5.6E-10	Y-91
NA	5.1E-12	1.7E-11	1.3E-12	Y-91m +
NA	4.9E-10	4.5E-10	5.8E-12	Y-92 (*)
NA	1.6E-09	1.0E-09	1.6E-11	Y-93 (*)
NA	5.5E-10	2.8E-09	6.5E-10	Zr-88 +
NA	2.3E-10	1.3E-09	1.7E-10	Zr-93 +
NA	1.2E-09	6.3E-09	1.7E-09	Zr-95 +
NA	2.9E-09	1.9E-09	3.5E-10	Zr-97 +(*)
NA	2.2E-10	1.2E-09	6.6E-12	Nb-93m
NA	2.0E-09	1.0E-08	5.7E-10	Nb-94
NA	6.5E-10	2.8E-09	2.1E-10	Nb-95
NA	2.4E-11	5.4E-11	1.9E-12	Nb-97 (*)
NA	1.5E-10	1.0E-09	1.8E-11	Mo-93 +
NA	2.0E-09	2.4E-09	2.0E-10	Mo-99 +
3.3E-10	4.5E-10	1.9E-09	1.8E-10	Tc-95m
6.8E-10	8.5E-10	1.3E-09	2.4E-10	Tc-96
1.2E-11	7.7E-12	1.3E-11	2.0E-12	Tc-96m +
7.0E-11	6.8E-11	4.6E-10	2.1E-12	Tc-97
5.8E-10	6.3E-10	2.8E-09	1.8E-11	Tc-97m
1.4E-09	1.8E-09	8.2E-09	4.1E-10	Tc-98
6.5E-10	7.3E-10	3.4E-09	2.1E-11	Tc-99
4.0E-11	7.9E-12	1.2E-11	1.7E-12	Tc-99m (*)
NA	4.2E-10	2.2E-10	3.8E-11	Ru-97
NA	2.8E-09	4.5E-09	4.1E-10	Ru-103 +
NA	7.7E-10	2.4E-10	2.4E-11	Ru-105 +

الاستنشاق

الغدة الدرقية	القولون	المنطقة السنخية الخلالية	النخاع الأحمر	النويذة المشعة ^أ
^د AF _{5,IIIIR} (Δ)	^د AF _{4,IIIIR} (Δ)	^ج AF _{3R,IIIIR} (Δ)	^ب AF _{2,IIIIR} (Δ)	
((مكافئ غراي/بيكريل)	((مكافئ غراي/بيكريل)	((مكافئ غراي/بيكريل)	((مكافئ غراي/بيكريل)	
NA	2.7E-08	5.5E-08	2.6E-09	Ru-106 +
NA	5.6E-10	2.0E-09	1.6E-10	Rh-99
NA	4.0E-10	2.3E-09	1.2E-10	Rh-101
NA	1.5E-09	5.9E-09	7.5E-10	Rh-102
NA	1.5E-09	7.7E-09	3.0E-10	Rh-102m
NA	9.3E-13	3.2E-12	9.1E-14	Rh-103m (*)
NA	5.6E-10	4.8E-10	1.7E-11	Rh-105
NA	3.3E-10	1.2E-09	8.3E-12	Pd-103 +
NA	6.9E-11	3.7E-10	2.1E-12	Pd-107
NA	8.1E-10	5.1E-10	1.7E-12	Pd-109 (*)
NA	4.8E-10	1.9E-09	1.9E-10	Ag-105
NA	1.7E-09	7.1E-09	7.5E-10	Ag-108m
NA	2.5E-09	9.5E-09	1.2E-09	Ag-110m
NA	2.2E-09	4.9E-09	8.6E-11	Ag-111
NA	6.4E-10	3.7E-09	6.1E-11	Cd-109
NA	1.3E-09	7.3E-09	1.2E-10	Cd-113m
NA	2.1E-09	2.3E-09	7.3E-11	Cd-115 +
NA	4.1E-09	1.9E-08	3.2E-10	Cd-115m
NA	3.0E-10	3.6E-10	1.6E-10	In-111
NA	1.4E-11	2.1E-11	3.2E-12	In-113m (*)
NA	6.0E-09	2.5E-08	1.5E-08	In-114m
NA	8.6E-11	6.6E-11	1.6E-11	In-115m (*)
NA	1.2E-09	5.1E-09	3.1E-10	Sn-113 +
NA	1.1E-09	3.2E-09	4.5E-10	Sn-117m
NA	5.9E-10	2.7E-09	1.2E-10	Sn-119m
NA	9.2E-10	4.2E-09	2.0E-10	Sn-121m +
NA	3.7E-09	1.6E-08	7.0E-10	Sn-123
NA	5.1E-09	1.2E-08	1.7E-09	Sn-125
NA	9.4E-09	3.8E-08	3.0E-09	Sn-126 +
NA	2.7E-09	2.9E-09	4.1E-10	Sb-122
NA	3.4E-09	1.4E-08	1.4E-09	Sb-124
5.8E-10	1.5E-09	6.8E-09	7.5E-10	Sb-125 +
NA	2.9E-09	7.8E-09	1.1E-09	Sb-126
6.7E-10	5.6E-10	1.1E-09	2.7E-10	Te-121
2.4E-09	1.2E-09	3.9E-09	6.8E-10	Te-121m +
2.2E-09	8.4E-10	3.5E-09	5.2E-10	Te-123m
2.1E-09	7.8E-10	3.5E-09	4.7E-10	Te-125m
5.9E-11	2.3E-10	1.5E-10	2.6E-11	Te-127 (*)
5.8E-09	2.0E-09	9.2E-09	1.3E-09	Te-127m +
7.5E-12	2.0E-11	5.1E-11	3.0E-11	Te-129 (*)

الاستنشاق

الغدة الدرقية	القولون	المنطقة السنخية الخلالية	النخاع الأحمر	النويدات المشعة ^أ
^د AF _{5,IIIR} (Δ)	^د AF _{4,IIIR} (Δ)	^ج AF _{3R,IIIR} (Δ)	^ب AF _{2,IIIR} (Δ)	
(مكافئ غراي/بكريل)	(مكافئ غراي/بكريل)	(مكافئ غراي/بكريل)	(مكافئ غراي/بكريل)	
1.0E-08	3.9E-09	1.6E-08	2.2E-09	Te-129m +
1.1E-07	1.5E-09	1.5E-09	2.8E-10	Te-131m +
7.4E-10	3.4E-09	4.5E-09	5.4E-10	Te-132 +
4.6E-08	7.2E-12	6.2E-12	7.4E-12	I-123 (*)
2.4E-08	7.8E-11	1.3E-10	1.4E-10	I-124
8.8E-08	1.5E-11	1.2E-11	1.5E-11	I-125
6.6E-08	7.2E-11	1.3E-10	1.3E-10	I-126
7.4E-10	3.3E-11	1.9E-11	2.1E-11	I-129
7.4E-08	6.1E-11	8.8E-11	9.1E-11	I-131
3.6E-09	3.0E-11	2.7E-11	3.1E-11	I-132 (*)
7.6E-08	5.3E-11	4.4E-11	4.5E-11	I-133 (*)
7.0E-10	1.4E-11	1.5E-11	1.9E-11	I-134 (*)
1.3E-08	3.0E-11	2.8E-11	2.7E-11	I-135 (*)
NA	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	Xe-122
4.1E-10	8.0E-13	6.9E-13	8.3E-13	Xe-123 +
NA	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	Xe-127
NA	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	Xe-131m
NA	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	Xe-133
NA	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	Xe-135
NA	2.1E-11	1.9E-11	1.8E-11	Cs-129
NA	2.0E-11	2.0E-11	1.2E-11	Cs-131
NA	1.8E-10	1.5E-10	1.6E-10	Cs-132
NA	1.5E-09	1.2E-09	1.3E-09	Cs-134
NA	1.9E-12	3.2E-12	1.5E-12	Cs-134m +
NA	1.5E-10	1.2E-10	1.1E-10	Cs-135
NA	9.7E-10	7.9E-10	8.3E-10	Cs-136
NA	9.7E-10	7.6E-10	7.9E-10	Cs-137 +
NA	6.7E-10	3.0E-11	1.6E-10	Ba-131 +
NA	8.2E-10	4.0E-11	2.5E-10	Ba-133
NA	1.0E-09	8.6E-12	8.7E-11	Ba-133m
NA	6.2E-09	1.6E-09	1.3E-09	Ba-140 +
NA	8.6E-11	4.5E-10	4.5E-11	La-137
NA	2.5E-09	2.1E-09	3.0E-10	La-140
NA	3.7E-10	1.9E-09	8.0E-11	Ce-139
NA	1.2E-09	5.2E-09	1.1E-10	Ce-141
NA	1.7E-09	1.9E-09	4.0E-11	Ce-143 +
NA	9.7E-09	5.0E-08	8.9E-10	Ce-144 +
NA	2.0E-09	1.3E-09	1.3E-11	Pr-142 (*)
NA	2.1E-09	6.5E-09	8.3E-11	Pr-143
NA	1.8E-09	5.2E-09	1.4E-10	Nd-147 +

الاستنشاق

الغدة الدرقية	القولون	المنطقة السنخية الخلالية	النخاع الأحمر	النويدات المشعة ^أ
^د AF _{5,IIIR} (Δ)	^د AF _{4,IIIR} (Δ)	^ج AF _{3R,IIIR} (Δ)	^ب AF _{2,IIIR} (Δ)	
((مكافئ غراي/بكريل)	((مكافئ غراي/بكريل)	((مكافئ غراي/بكريل)	((مكافئ غراي/بكريل)	
NA	1.1E-10	1.4E-10	2.9E-12	Nd-149 +
NA	2.4E-10	1.3E-09	1.3E-10	Pm-143
NA	9.5E-10	4.6E-09	6.3E-10	Pm-144
NA	1.5E-10	8.3E-10	2.7E-11	Pm-145
NA	4.6E-10	2.4E-09	6.0E-11	Pm-147
NA	2.2E-09	1.0E-08	8.0E-10	Pm-148m
NA	1.6E-09	1.7E-09	3.0E-11	Pm-149
NA	1.1E-09	8.1E-10	2.7E-11	Pm-151
NA	3.1E-10	1.5E-09	5.8E-11	Sm-145 +
NA	0.0E+00	5.3E-07	4.4E-09	Sm-147 (*)
NA	1.4E-10	6.6E-10	2.0E-11	Sm-151
NA	1.1E-09	1.0E-09	2.3E-11	Sm-153
NA	5.3E-10	1.8E-09	1.6E-10	Eu-147
NA	1.2E-09	4.6E-09	7.2E-10	Eu-148
NA	1.4E-10	6.1E-10	3.2E-11	Eu-149
NA	1.1E-09	4.8E-09	6.2E-10	Eu-150b
NA	5.2E-10	3.1E-10	5.1E-12	Eu-150a (*)
NA	1.6E-09	7.1E-09	5.4E-10	Eu-152
NA	6.4E-10	3.9E-10	9.8E-12	Eu-152m
NA	2.7E-09	1.2E-08	7.0E-10	Eu-154
NA	4.9E-10	2.3E-09	8.0E-11	Eu-155
NA	3.2E-09	9.4E-09	4.6E-10	Eu-156
NA	2.1E-09	8.9E-09	2.6E-09	Gd-146 +
NA	0.0E+00	7.7E-07	4.7E-08	Gd-148 (*)
NA	4.1E-10	1.9E-09	4.3E-10	Gd-153
NA	7.2E-10	4.4E-10	7.0E-11	Gd-159 (*)
NA	4.7E-11	2.2E-10	8.0E-12	Tb-157
NA	1.3E-09	5.7E-09	4.4E-10	Tb-158
NA	2.3E-09	9.5E-09	6.2E-10	Tb-160
NA	1.4E-10	6.5E-10	3.6E-11	Dy-159
NA	7.1E-11	8.3E-11	9.0E-13	Dy-165 (*)
NA	3.1E-09	5.2E-09	1.6E-10	Dy-166 +
NA	2.1E-09	1.4E-09	2.4E-11	Ho-166
NA	1.8E-09	8.2E-09	7.9E-10	Ho-166m
NA	6.3E-10	1.5E-09	5.0E-11	Er-169
NA	4.3E-10	2.7E-10	1.0E-11	Er-171
NA	8.6E-10	2.0E-09	9.7E-11	Tm-167
NA	2.3E-09	1.0E-08	4.4E-10	Tm-170
NA	1.8E-10	8.4E-10	3.7E-11	Tm-171
NA	1.1E-09	4.5E-09	2.0E-10	Yb-169

الاستنشاق

الغدة الدرقية	القولون	المنطقة السنخية الخلالية	النخاع الأحمر	النويذة المشعة ^أ
^د AF _{5,IIIR} (Δ)	^د AF _{4,IIIR} (Δ)	^ج AF _{3R,IIIR} (Δ)	^ب AF _{2,IIIR} (Δ)	
((مكافئ غراي/بيكريل)	((مكافئ غراي/بيكريل)	((مكافئ غراي/بيكريل)	((مكافئ غراي/بيكريل)	
NA	7.2E-10	1.1E-09	2.8E-11	Yb-175
NA	1.4E-09	3.0E-09	3.2E-10	Lu-172
NA	3.7E-10	2.0E-09	1.1E-10	Lu-173
NA	4.0E-10	2.1E-09	1.1E-10	Lu-174
NA	9.2E-10	4.7E-09	1.7E-10	Lu-174m +
NA	9.7E-10	1.8E-09	5.7E-11	Lu-177 (*)
NA	2.8E-09	1.2E-08	3.2E-09	Hf-172 +
NA	5.3E-10	2.1E-09	6.6E-10	Hf-175
NA	1.7E-09	6.4E-09	1.8E-09	Hf-181
NA	3.0E-09	1.5E-08	1.6E-09	Hf-182 +
NA	4.1E-11	4.6E-11	5.1E-12	Ta-178a (*)
NA	9.4E-11	5.1E-10	1.4E-11	Ta-179
NA	2.2E-09	1.1E-08	4.4E-10	Ta-182
NA	3.3E-10	5.2E-12	1.3E-11	W-178
NA	1.0E-10	2.1E-12	5.3E-12	W-181
NA	8.0E-10	4.3E-12	1.4E-11	W-185
NA	9.2E-10	1.6E-11	2.4E-11	W-187 (*)
2.7E-09	4.5E-09	9.6E-10	1.2E-10	W-188 +
6.3E-10	6.7E-10	3.0E-09	2.3E-10	Re-184
1.1E-09	1.1E-09	6.2E-09	2.3E-10	Re-184m +
1.9E-09	1.1E-09	2.3E-09	4.0E-11	Re-186
4.2E-12	3.9E-12	2.2E-11	1.4E-13	Re-187
2.8E-09	6.7E-10	1.0E-09	3.3E-11	Re-188 (*)
1.4E-09	4.4E-10	6.7E-10	2.1E-11	Re-189
NA	5.6E-10	2.4E-09	2.7E-10	Os-185
NA	9.5E-10	3.2E-09	7.3E-11	Os-191
NA	1.5E-10	1.9E-10	4.4E-12	Os-191m +
NA	1.3E-09	9.8E-10	2.4E-11	Os-193
NA	6.3E-09	3.4E-08	6.2E-10	Os-194 +
NA	3.9E-10	1.3E-09	3.8E-11	Ir-189
NA	1.5E-09	4.4E-09	3.6E-10	Ir-190
NA	2.0E-09	9.4E-09	4.3E-10	Ir-192
NA	2.0E-09	1.4E-09	3.3E-11	Ir-194 (*)
NA	1.2E-09	5.1E-10	2.2E-10	Pt-188 +
NA	3.1E-10	2.7E-11	3.1E-11	Pt-191
NA	5.3E-11	3.4E-12	2.8E-12	Pt-193
NA	5.6E-10	2.2E-11	2.0E-11	Pt-193m
NA	7.6E-10	3.4E-11	3.1E-11	Pt-195m
NA	3.9E-10	1.3E-11	9.8E-12	Pt-197 (*)
NA	5.1E-11	6.7E-12	2.3E-12	Pt-197m +(*)

الاستنشاق

الغدة الدرقية	القولون	المنطقة السنخية الخلالية	النخاع الأحمر	النويذة المشعة ^أ
^د AF _{5,IIIR} (Δ)	^د AF _{4,IIIR} (Δ)	^ج AF _{3R,IIIR} (Δ)	^ب AF _{2,IIIR} (Δ)	
((مكافئ غراي/بكريل)	((مكافئ غراي/بكريل)	((مكافئ غراي/بكريل)	((مكافئ غراي/بكريل)	
NA	1.7E-10	1.3E-10	7.2E-12	Au-193
NA	3.9E-10	3.8E-10	5.4E-11	Au-194
NA	4.0E-10	2.4E-09	2.7E-11	Au-195
NA	1.5E-09	2.0E-09	5.7E-11	Au-198
NA	6.8E-10	9.6E-10	2.1E-11	Au-199
NA	2.7E-09	4.0E-09	2.3E-09	Hg-194 +
NA	7.9E-10	1.2E-09	1.5E-09	Hg-195m +
NA	3.3E-10	3.8E-10	6.7E-10	Hg-197
NA	6.8E-10	5.5E-10	1.2E-09	Hg-197m +
NA	8.4E-10	3.1E-09	1.9E-09	Hg-203
NA	9.0E-11	5.5E-11	5.8E-11	Tl-200
NA	7.3E-11	2.2E-11	2.0E-11	Tl-201
NA	2.7E-10	1.1E-10	1.2E-10	Tl-202
NA	1.3E-09	2.0E-10	2.0E-10	Tl-204
NA	8.2E-11	1.6E-11	2.4E-11	Pb-201 +
NA	4.4E-10	2.4E-10	3.6E-10	Pb-202 +
NA	1.6E-10	2.8E-11	4.8E-11	Pb-203
NA	3.0E-11	6.0E-12	2.6E-11	Pb-205
NA	2.8E-09	1.2E-06	6.0E-08	Pb-210 +
NA	0.0E+00	4.6E-09	1.1E-09	Pb-212 +(*)
NA	8.7E-10	2.5E-09	2.8E-10	Bi-205
NA	1.9E-09	3.6E-09	3.8E-10	Bi-206
NA	1.6E-09	7.1E-09	4.2E-10	Bi-207
NA	2.1E-09	4.0E-08	1.8E-09	Bi-210 +
NA	4.5E-09	1.2E-06	5.7E-10	Bi-210m
NA	0.0E+00	4.6E-09	1.8E-11	Bi-212 +(*)
NA	6.4E-15	1.2E-06	5.7E-08	Po-210
NA	1.1E-12	2.8E-08	3.8E-10	At-211
NA	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	Rn-222
NA	7.1E-09	3.0E-06	7.4E-09	Ra-223 +
NA	3.9E-09	1.2E-06	4.3E-09	Ra-224 +
NA	2.6E-09	2.8E-06	5.7E-08	Ra-225 +
NA	1.7E-09	1.1E-06	2.2E-09	Ra-226
NA	1.1E-08	8.4E-06	4.6E-08	Ra-228 +
NA	4.3E-09	3.4E-06	1.2E-07	Ac-225
NA	1.0E-08	8.5E-06	6.5E-08	Ac-227 +
NA	4.2E-10	2.9E-09	9.9E-11	Ac-228
NA	4.2E-09	3.8E-06	1.8E-08	Th-227 +
NA	6.5E-09	8.1E-06	4.4E-08	Th-228 +
NA	6.9E-09	8.7E-06	1.5E-07	Th-229 +

الاستنشاق

الغدة الدرقية	القولون	المنطقة السنخية الخلالية	النخاع الأحمر	النويدات المشعة ^أ
^د AF _{5,IIIR} (Δ)	^د AF _{4,IIIR} (Δ)	^ج AF _{3R,IIIR} (Δ)	^ب AF _{2,IIIR} (Δ)	
((مكافئ غراي/بكريل)	((مكافئ غراي/بكريل)	((مكافئ غراي/بكريل)	((مكافئ غراي/بكريل)	
NA	1.2E-10	1.3E-06	1.4E-08	Th-230 +
NA	5.2E-10	3.9E-10	7.5E-12	Th-231
NA	7.8E-09	7.0E-06	4.4E-08	Th-232 +
NA	6.1E-09	2.4E-08	8.4E-10	Th-234 +
NA	7.5E-10	2.9E-07	2.2E-09	Pa-230 +
NA	3.3E-09	3.8E-06	3.3E-08	Pa-231 +
NA	1.5E-09	6.0E-09	2.6E-10	Pa-233
NA	3.1E-10	6.1E-06	5.2E-08	U-230 +
NA	6.2E-09	8.9E-06	5.1E-08	U-232 +
NA	4.9E-11	1.4E-06	1.0E-08	U-233
NA	1.0E-10	1.3E-06	1.0E-08	U-234 +
NA	1.7E-09	1.3E-06	9.6E-09	U-235 +
NA	8.8E-11	1.3E-06	9.4E-09	U-236
NA	6.7E-09	1.2E-06	1.0E-08	U-238 +
NA	5.5E-10	1.2E-06	9.3E-09	Depleted U
NA	8.7E-11	5.2E-10	1.3E-11	Np-235
NA	2.6E-10	1.3E-07	1.2E-09	Np-236b +
NA	1.6E-09	8.9E-09	2.9E-10	Np-236a
NA	2.1E-09	1.2E-06	1.1E-08	Np-237 +
NA	1.2E-09	1.2E-09	3.4E-11	Np-239
NA	1.1E-10	1.6E-06	1.4E-08	Pu-236
NA	1.5E-10	8.7E-10	3.3E-11	Pu-237
NA	8.3E-11	1.6E-06	1.4E-08	Pu-238
NA	5.2E-11	1.5E-06	1.3E-08	Pu-239
NA	8.3E-11	1.5E-06	1.3E-08	Pu-240
NA	3.9E-11	1.7E-08	9.9E-11	Pu-241 +
NA	6.8E-11	1.4E-06	1.2E-08	Pu-242
NA	6.4E-09	1.3E-06	1.3E-08	Pu-244 +
NA	4.1E-10	1.3E-06	7.4E-09	Am-241
NA	1.7E-09	1.2E-06	7.0E-09	Am-242m +
NA	2.1E-09	1.3E-06	7.4E-09	Am-243 +
NA	5.4E-10	4.1E-10	1.9E-11	Am-244
NA	7.5E-11	1.1E-06	5.7E-09	Cm-240
NA	1.2E-09	1.5E-08	2.7E-10	Cm-241 +
NA	7.0E-11	1.4E-06	7.7E-09	Cm-242
NA	1.1E-09	1.4E-06	8.0E-09	Cm-243
NA	6.4E-11	1.4E-06	7.8E-09	Cm-244
NA	5.3E-10	1.3E-06	7.3E-09	Cm-245
NA	5.9E-11	1.3E-06	7.3E-09	Cm-246
NA	1.5E-09	1.2E-06	6.9E-09	Cm-247

الاستنشاق

النوع الأحمر	المنطقة السنخية الخلالية	القولون	الغدة الدرقية	النوييدة المشعة ^أ
AF _{2,IIIIR} (Δ) ^ب	AF _{3R,IIIIR} (Δ) ^ج	AF _{4,IIIIR} (Δ) ^د	AF _{5,IIIIR} (Δ) ^{هـ}	
(مكافئ) غراي/يكريل)	(مكافئ) غراي/يكريل)	(مكافئ) غراي/يكريل)	(مكافئ) غراي/يكريل)	
2.7E-08	4.6E-06	ND	NA	Cm-248 (*)
1.6E-08	1.3E-06	5.0E-10	NA	Bk-247
4.7E-11	1.2E-09	2.3E-10	NA	Bk-249
1.7E-08	1.4E-06	4.5E-11	NA	Cf-248 +
1.7E-08	1.4E-06	5.0E-10	NA	Cf-249
1.7E-08	1.4E-06	4.3E-11	NA	Cf-250 ^ز
1.7E-08	1.4E-06	1.5E-09	NA	Cf-251
3.3E-08	2.5E-06	ND	NA	Cf-252 (*)
5.1E-09	3.9E-07	5.2E-10	NA	Cf-253
1.1E-06	2.5E-05	1.2E-07	NA	Cf-254 (*)
1.3E-08	1.5E-06	5.2E-11	NA	²³⁹ Pu/ ⁹ Be ^ح
7.4E-09	1.3E-06	4.1E-10	NA	²⁴¹ Am/ ⁹ Be ^ح

أ روعي النمو الداخلي للنواتج المشعة عند حساب قيم D لكل النويدات المشعة على النحو المبين في التذييل الثامن. وتشير علامة "+" إلى النويدات المشعة التي تمثل نواتجها مصادر ملموسة للجرعة في السيناريوهات موضوع النظر. وتستند المعاملات إلى البيانات المأخوذة من المرجع [٤٩] ما لم ترد علامة "*" للإشارة إلى أنها تستند إلى بيانات من المرجع [٥٠].

ب الجرعة المودعة المرحجة بالفعالية البيولوجية النسبية لمدة ٣٠ يوماً (Δ) في النخاع الأحمر نتيجة لاستنشاق النوييدة المشعة.

ج الجرعة المودعة المرحجة بالفعالية البيولوجية النسبية لمدة ٣٠ يوماً (Δ) في المنطقة السنخية الخلالية للجهاز التنفسي نتيجة لاستنشاق النوييدة المشعة.

د الجرعة المودعة المرحجة بالفعالية البيولوجية النسبية لمدة ٣٠ يوماً (Δ) في القولون نتيجة لاستنشاق النوييدة المشعة.

هـ الجرعة المودعة المرحجة بالفعالية البيولوجية النسبية لمدة ٣٦٥ يوماً في الغدة الدرقية نتيجة لاستنشاق النوييدة المشعة.

و "NA" تعني "غير منطبق".

ز هو نشاط النوييدة المشعة المبتعثة لألفا، مثل البلوتونيوم-٢٣٩ أو الأميريشيوم-٢٤١.

ح لم تحتسب جرعة النيوترونات كما هو وارد في القسم ٥.

الجدول ١٩: الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية عن طريق الابتلاع ومعاملات تحويل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية للتلوث

التلوث	الابتلاع			النويدات المشعة ^أ
	أدمة الجلد	الغدة الدرقية	القولون	
^د AF _{6R.V}	^د AF _{5.IV} (Δ)	^د AF _{4.IV} (Δ)	^د AF _{2.IV} (Δ)	
(مكافئ غراي)/ثانية × (بكريل/سم ^٢)	(مكافئ غراي)/بكريل	(مكافئ غراي)/بكريل	(مكافئ غراي)/بكريل	
0.0E+00	^د NA	2.2E-11	2.1E-11	H-3
7.1E-13	NA	9.6E-11	1.1E-11	Be-7
1.7E-10	NA	8.1E-09	1.1E-11	Be-10
1.4E-11	NA	3.4E-12	1.8E-12	C-11
0.0E+00	NA	2.5E-10	2.3E-10	C-14
0.0E+00	NA	0.0E+00	0.0E+00	N-13
1.8E-10	NA	1.5E-11	6.5E-11	F-18 (*)
9.0E-11	NA	2.6E-09	3.5E-09	Na-22
3.6E-10	NA	4.0E-10	3.9E-10	Na-24 (*)
5.3E-10	NA	1.2E-08	9.7E-10	Mg-28 (*)
3.4E-10	NA	1.9E-08	6.6E-10	Al-26
3.3E-10	NA	6.5E-10	8.4E-14	Si-31 (*)
3.6E-10	NA	9.1E-09	6.4E-09	Si-32 +
3.6E-10	NA	5.5E-09	6.4E-09	P-32
1.3E-12	NA	6.5E-10	3.2E-10	P-33
0.0E+00	NA	2.8E-10	2.4E-10	S-35
2.1E-10	NA	8.7E-10	7.1E-10	Cl-36
4.3E-10	NA	1.5E-11	8.1E-12	Cl-38 (*)
0.0E+00	NA	0.0E+00	0.0E+00	Ar-37(*)
0.0E+00	NA	0.0E+00	0.0E+00	Ar-39 (*)
0.0E+00	NA	0.0E+00	0.0E+00	Ar-41 (*)
2.7E-10	NA	6.8E-09	2.5E-09	K-40
4.5E-10	NA	4.5E-10	2.1E-10	K-42 (*)
2.1E-10	NA	3.1E-10	1.8E-10	K-43 (*)
1.0E-12	NA	7.0E-11	1.8E-11	Ca-41
1.8E-12	NA	1.9E-09	4.7E-10	Ca-45
4.6E-10	NA	8.9E-09	1.1E-09	Ca-47 +
4.1E-10	NA	1.6E-09	4.7E-11	Sc-44 (*)
4.2E-11	NA	7.2E-09	3.8E-10	Sc-46
7.4E-11	NA	4.1E-09	1.9E-11	Sc-47
1.7E-10	NA	8.5E-09	4.1E-10	Sc-48
4.1E-10	NA	2.4E-08	5.4E-10	Ti-44 +
1.6E-10	NA	9.5E-09	5.5E-10	V-48
2.7E-12	NA	1.4E-10	2.2E-13	V-49
3.9E-12	NA	2.0E-10	9.6E-12	Cr-51
7.9E-11	NA	6.9E-09	8.0E-10	Mn-52
^د ND	NA	1.6E-10	1.1E-11	Mn-53
1.3E-11	NA	1.7E-09	3.6E-10	Mn-54

التلوث	الابتلاع			النويدات المشعة ^أ
	أدمة الجلد	الغدة الدرقية	القولون	
^د AF _{6R,V}	^د AF _{5,IV} (Δ)	^د AF _{4,IV} (Δ)	^د AF _{2,IV} (Δ)	
((مكافئ غراي/ثانية × بكريل/سم ^٢))	((مكافئ غراي/بكريل))	((مكافئ غراي/بكريل))	((مكافئ غراي/بكريل))	
3.6E-10	NA	1.0E-09	2.4E-11	Mn-56 (*)
6.5E-10	NA	8.4E-09	3.8E-10	Fe-52 +
4.1E-12	NA	1.7E-10	1.8E-11	Fe-55
4.5E-11	NA	5.5E-09	7.7E-10	Fe-59
3.4E-11	NA	8.3E-09	7.7E-10	Fe-60 +
ND	NA	6.2E-09	1.6E-10	Co-55 +(*)
1.1E-10	NA	9.3E-09	7.8E-10	Co-56
1.1E-11	NA	9.0E-10	3.5E-11	Co-57
1.9E-11	NA	2.8E-09	2.4E-10	Co-58
2.3E-11	NA	1.6E-10	1.3E-12	Co-58m +
3.4E-11	NA	7.0E-09	5.8E-10	Co-60
4.7E-12	NA	2.1E-10	6.4E-13	Ni-59
0.0E+00	NA	5.3E-10	1.6E-12	Ni-63
3.0E-10	NA	6.8E-10	7.1E-12	Ni-65 (*)
1.5E-10	NA	6.8E-10	1.9E-11	Cu-64 (*)
ND	NA	2.0E-09	7.0E-11	Cu-67
1.0E-11	NA	1.3E-09	7.3E-10	Zn-65
2.1E-10	NA	3.9E-11	5.6E-13	Zn-69 (*)
2.4E-10	NA	2.0E-09	9.6E-11	Zn-69m +(*)
9.2E-12	NA	1.2E-09	2.6E-11	Ga-67
3.9E-10	NA	2.0E-10	5.8E-12	Ga-68 (*)
2.7E-10	NA	6.3E-09	1.7E-10	Ga-72 (*)
4.0E-10	NA	7.0E-09	2.9E-10	Ge-68 +
4.8E-12	NA	6.2E-11	1.7E-12	Ge-71
4.8E-10	NA	7.5E-10	9.1E-11	Ge-77 +
ND	NA	1.1E-08	2.5E-10	As-72
1.0E-11	NA	1.7E-09	3.5E-11	As-73
2.0E-10	NA	7.0E-09	3.3E-10	As-74
4.0E-10	NA	1.1E-08	1.3E-10	As-76
1.4E-10	NA	2.8E-09	2.5E-11	As-77
1.3E-11	NA	9.7E-10	5.8E-10	Se-75
0.0E+00	NA	6.6E-10	1.4E-10	Se-79
0.0E+00	NA	6.5E-10	2.9E-10	Br-76 (*)
0.0E+00	NA	1.5E-10	7.8E-11	Br-77
7.8E-11	NA	8.1E-10	4.3E-10	Br-82
0.0E+00	NA	0.0E+00	0.0E+00	Kr-81
0.0E+00	NA	0.0E+00	0.0E+00	Kr-85
0.0E+00	NA	0.0E+00	0.0E+00	Kr-85m
0.0E+00	NA	0.0E+00	0.0E+00	Kr-87
ND	NA	3.4E-11	2.6E-11	Rb-81 (*)
ND	NA	1.1E-09	1.2E-09	Rb-83

التلوث	الابتلاع			النويدات المشعة ^أ
	أدمة الجلد	الغدة الدرقية	القولون	
^د AF _{6R,V}	^د AF _{5,IV} (Δ)	^د AF _{4,IV} (Δ)	^د AF _{2,IV} (Δ)	
((مكافئ غراي/ثانية × بكريل/سم ^٢))	((مكافئ غراي/بكريل))	((مكافئ غراي/بكريل))	((مكافئ غراي/بكريل))	
1.1E-10	NA	2.2E-09	2.5E-09	Rb-84
3.3E-10	NA	3.1E-09	3.3E-09	Rb-86
3.0E-12	NA	7.9E-10	8.6E-10	Rb-87
3.9E-12	NA	3.5E-08	4.8E-09	Sr-82
1.3E-11	NA	1.1E-09	3.7E-10	Sr-85
2.0E-11	NA	1.1E-11	1.6E-12	Sr-85m +
6.4E-11	NA	1.2E-10	6.2E-12	Sr-87m (*)
3.2E-10	NA	1.4E-08	2.0E-09	Sr-89
5.0E-10	NA	3.3E-08	4.0E-09	Sr-90 +
3.2E-10	NA	1.8E-08	1.3E-10	Sr-91 +
5.5E-10	NA	3.4E-09	6.4E-11	Sr-92 +(*)
ND	NA	3.0E-09	1.2E-10	Y-87 +
2.7E-11	NA	4.7E-09	4.7E-10	Y-88
3.9E-10	NA	2.1E-08	3.7E-13	Y-90
3.2E-10	NA	1.9E-08	2.4E-12	Y-91
2.6E-11	NA	2.7E-11	2.3E-12	Y-91m +
4.4E-10	NA	2.6E-09	4.8E-12	Y-92 (*)
4.2E-10	NA	8.3E-09	4.4E-12	Y-93 (*)
3.7E-11	NA	2.1E-09	1.9E-10	Zr-88 +
5.4E-13	NA	1.0E-09	7.7E-12	Zr-93 +
4.7E-11	NA	5.1E-09	2.3E-10	Zr-95 +
6.3E-10	NA	1.5E-08	1.2E-10	Zr-97 +(*)
5.4E-13	NA	9.3E-10	1.9E-12	Nb-93m
8.8E-11	NA	8.3E-09	3.6E-10	Nb-94
9.3E-12	NA	2.8E-09	1.6E-10	Nb-95
2.9E-10	NA	1.4E-10	4.1E-12	Nb-97 (*)
3.6E-12	NA	4.3E-10	4.7E-11	Mo-93 +
2.3E-10	6.7E-11	4.9E-10	6.1E-10	Mo-99 +
ND	5.1E-10	1.5E-09	1.9E-10	Tc-95m
3.1E-11	1.0E-09	3.0E-09	4.5E-10	Tc-96
3.3E-11	1.1E-11	2.8E-11	3.9E-12	Tc-96m +
2.9E-12	1.1E-10	2.3E-10	3.5E-12	Tc-97
4.9E-12	9.1E-10	2.2E-09	2.9E-11	Tc-97m
5.0E-11	2.2E-09	6.1E-09	4.6E-10	Tc-98
8.7E-12	1.0E-09	2.5E-09	3.3E-11	Tc-99
2.5E-12	8.5E-11	3.7E-11	4.2E-12	Tc-99m (*)
1.1E-11	NA	7.2E-10	3.9E-11	Ru-97
1.0E-11	NA	4.3E-09	1.3E-10	Ru-103 +
2.6E-10	NA	1.5E-09	2.2E-11	Ru-105 +
4.5E-10	NA	4.4E-08	2.9E-10	Ru-106 +
2.4E-11	NA	2.5E-09	1.4E-10	Rh-99

التلوث	الابتلاع			النويدات المشعة ^أ
	أدمة الجلد	الغدة الدرقية	القولون	
^د AF _{6R,V}	^د AF _{5,IV} (Δ)	^د AF _{4,IV} (Δ)	^د AF _{2,IV} (Δ)	
((مكافئ غراي/ثانية × بكريل/سم ^٢))	((مكافئ غراي/بكريل))	((مكافئ غراي/بكريل))	((مكافئ غراي/بكريل))	
8.4E-12	NA	1.7E-09	7.7E-11	Rh-101
8.6E-11	NA	4.5E-09	5.5E-10	Rh-102
1.5E-10	NA	6.2E-09	1.5E-10	Rh-102m
4.3E-13	NA	5.7E-12	5.0E-15	Rh-103m (*)
7.3E-11	NA	2.8E-09	1.2E-11	Rh-105
2.6E-12	NA	1.5E-09	1.5E-12	Pd-103 +
0.0E+00	NA	3.0E-10	4.2E-14	Pd-107
2.3E-10	NA	4.1E-09	8.0E-13	Pd-109 (*)
1.5E-11	NA	1.7E-09	1.4E-10	Ag-105
3.5E-10	NA	5.5E-09	4.7E-10	Ag-108m
5.9E-11	NA	7.9E-09	7.3E-10	Ag-110m
2.2E-10	NA	9.7E-09	2.2E-11	Ag-111
3.6E-12	NA	2.8E-09	1.5E-11	Cd-109
0.0E+00	NA	5.7E-09	2.3E-11	Cd-113m
3.5E-10	NA	1.0E-08	6.5E-11	Cd-115 +
2.9E-10	NA	1.8E-08	6.8E-11	Cd-115m
1.5E-11	NA	1.5E-09	7.4E-11	In-111
1.2E-10	NA	8.1E-11	2.4E-12	In-113m (*)
6.2E-12	NA	2.8E-08	1.2E-09	In-114m
2.2E-10	NA	4.8E-10	4.9E-12	In-115m (*)
1.2E-10	NA	5.1E-09	8.1E-11	Sn-113 +
4.2E-12	NA	5.2E-09	6.7E-11	Sn-117m
2.2E-12	NA	2.6E-09	1.1E-11	Sn-119m
3.5E-11	NA	4.0E-09	1.7E-11	Sn-121m +
2.9E-10	NA	1.6E-08	5.8E-11	Sn-123
6.7E-10	NA	2.4E-08	1.9E-10	Sn-125
3.3E-10	NA	4.0E-08	1.4E-09	Sn-126 +
3.1E-10	NA	1.2E-08	2.1E-10	Sb-122
2.0E-10	NA	1.4E-08	8.4E-10	Sb-124
3.7E-11	6.5E-10	5.7E-09	6.4E-10	Sb-125 +
2.2E-10	NA	1.2E-08	8.9E-10	Sb-126
1.1E-11	2.4E-10	1.2E-09	3.3E-10	Te-121
1.7E-11	8.6E-10	2.9E-09	8.1E-10	Te-121m +
3.5E-12	7.8E-10	2.7E-09	5.9E-10	Te-123m
3.8E-12	7.7E-10	2.8E-09	5.2E-10	Te-125m
1.3E-10	1.7E-11	1.1E-09	1.0E-11	Te-127 (*)
5.3E-12	2.1E-09	7.1E-09	1.5E-09	Te-127m +
3.0E-10	7.5E-13	1.2E-10	9.4E-13	Te-129 (*)
1.1E-10	3.7E-09	1.4E-08	2.5E-09	Te-129m +
4.3E-10	9.3E-08	6.0E-09	3.4E-10	Te-131m +
3.0E-10	3.2E-08	1.3E-08	5.4E-10	Te-132 +

التلوث	الابتلاع			النويدات المشعة ^أ
	أدمة الجلد	الغدة الدرقية	القولون	
^د AF _{6R,V}	^د AF _{5,IV} (Δ)	^ج AF _{4,IV} (Δ)	^ب AF _{2,IV} (Δ)	
((مكافئ غراي/ثانية × بكريل/سم ^٢))	((مكافئ غراي/بكريل))	((مكافئ غراي/بكريل))	((مكافئ غراي/بكريل))	
4.4E-12	7.8E-10	1.2E-11	6.5E-12	I-123 (*)
ND	5.1E-08	1.4E-10	1.4E-10	I-124
4.3E-12	2.6E-08	2.4E-11	1.3E-11	I-125
1.0E-10	9.6E-08	1.2E-10	1.4E-10	I-126
2.2E-12	7.3E-08	5.4E-11	2.1E-11	I-129
1.1E-10	8.1E-08	1.2E-10	9.6E-11	I-131
2.9E-10	3.4E-09	4.6E-11	2.6E-11	I-132 (*)
2.6E-10	8.2E-08	1.1E-10	4.7E-11	I-133 (*)
3.5E-10	5.4E-10	2.1E-11	1.1E-11	I-134 (*)
2.3E-10	1.6E-08	7.3E-11	4.0E-11	I-135 (*)
0.0E+00	NA	0.0E+00	0.0E+00	Xe-122
0.0E+00	4.4E-10	1.3E-12	7.3E-13	Xe-123 +
0.0E+00	NA	0.0E+00	0.0E+00	Xe-127
0.0E+00	NA	0.0E+00	0.0E+00	Xe-131m
0.0E+00	NA	0.0E+00	0.0E+00	Xe-133
0.0E+00	NA	0.0E+00	0.0E+00	Xe-135
0.0E+00	NA	6.8E-11	4.7E-11	Cs-129
2.3E-12	NA	6.0E-11	3.4E-11	Cs-131
0.0E+00	NA	5.4E-10	4.5E-10	Cs-132
1.1E-10	NA	4.4E-09	3.7E-09	Cs-134
0.0E+00	NA	7.4E-12	4.0E-12	Cs-134m +
2.0E-14	NA	4.6E-10	3.4E-10	Cs-135
4.6E-11	NA	2.9E-09	2.4E-09	Cs-136
1.4E-10	NA	2.9E-09	2.3E-09	Cs-137 +
1.4E-11	NA	2.3E-09	1.8E-10	Ba-131 +
1.5E-11	NA	2.7E-09	2.5E-10	Ba-133
ND	NA	4.0E-09	6.8E-11	Ba-133m
4.9E-10	NA	2.3E-08	1.1E-09	Ba-140 +
ND	NA	3.9E-10	5.1E-12	La-137
3.2E-10	NA	1.3E-08	2.6E-10	La-140
5.1E-12	NA	1.6E-09	3.5E-11	Ce-139
5.6E-11	NA	5.5E-09	1.8E-11	Ce-141
4.5E-10	NA	8.4E-09	3.5E-11	Ce-143 +
4.3E-10	NA	4.2E-08	2.4E-11	Ce-144 +
3.6E-10	NA	1.0E-08	4.5E-12	Pr-142 (*)
2.0E-10	NA	9.4E-09	1.4E-12	Pr-143
1.3E-10	NA	8.3E-09	3.0E-11	Nd-147 +
5.1E-10	NA	5.5E-10	3.8E-12	Nd-149 +
ND	NA	9.9E-10	6.5E-11	Pm-143
ND	NA	3.7E-09	3.3E-10	Pm-144
ND	NA	6.4E-10	7.1E-12	Pm-145

التلوث	الابتلاع			النويدات المشعة ^أ
	أدمة الجلد	الغدة الدرقية	القولون	
^د AF _{6R,V}	^د AF _{5,IV} (Δ)	^ج AF _{4,IV} (Δ)	^ب AF _{2,IV} (Δ)	
((مكافئ غراي/ثانية × بكريل/سم ^٢))	((مكافئ غراي/بكريل))	((مكافئ غراي/بكريل))	((مكافئ غراي/بكريل))	
2.1E-13	NA	2.0E-09	9.4E-13	Pm-147
9.9E-11	NA	9.3E-09	4.1E-10	Pm-148m
2.3E-10	NA	7.9E-09	2.1E-12	Pm-149
1.8E-10	NA	5.3E-09	3.7E-11	Pm-151
ND	NA	1.4E-09	1.5E-11	Sm-145 +
0.0E+00	NA	0.0E+00	6.8E-11	Sm-147 (*)
1.6E-14	NA	6.4E-10	3.0E-13	Sm-151
1.4E-10	NA	5.7E-09	9.5E-12	Sm-153
ND	NA	2.4E-09	9.8E-11	Eu-147
ND	NA	4.9E-09	4.4E-10	Eu-148
ND	NA	6.1E-10	1.4E-11	Eu-149
ND	NA	4.4E-09	3.1E-10	Eu-150b
ND	NA	2.8E-09	3.1E-12	Eu-150a (*)
6.9E-11	NA	6.7E-09	2.3E-10	Eu-152
2.5E-10	NA	3.4E-09	1.5E-11	Eu-152m
1.3E-10	NA	1.2E-08	2.5E-10	Eu-154
2.0E-12	NA	2.2E-09	1.5E-11	Eu-155
1.8E-10	NA	1.5E-08	2.3E-10	Eu-156
ND	NA	8.9E-09	4.4E-10	Gd-146 +
0.0E+00	NA	0.0E+00	9.7E-11	Gd-148 (*)
5.0E-12	NA	1.8E-09	2.5E-11	Gd-153
2.0E-10	NA	3.7E-09	4.6E-12	Gd-159 (*)
ND	NA	2.1E-10	7.0E-13	Tb-157
ND	NA	5.4E-09	1.6E-10	Tb-158
1.3E-10	NA	1.0E-08	2.2E-10	Tb-160
3.4E-12	NA	6.3E-10	1.1E-11	Dy-159
2.7E-10	NA	4.1E-10	3.5E-13	Dy-165 (*)
3.6E-10	NA	1.5E-08	1.2E-11	Dy-166 +
3.3E-10	NA	1.1E-08	3.3E-12	Ho-166
2.9E-11	NA	7.7E-09	3.7E-10	Ho-166m
1.6E-11	NA	3.0E-09	8.4E-13	Er-169
2.4E-10	NA	2.3E-09	1.7E-11	Er-171
2.0E-11	NA	4.1E-09	3.1E-11	Tm-167
2.1E-10	NA	1.1E-08	8.1E-12	Tm-170
5.2E-14	NA	8.2E-10	7.2E-13	Tm-171
1.2E-11	NA	4.7E-09	7.0E-11	Yb-169
4.7E-11	NA	3.4E-09	7.4E-12	Yb-175
ND	NA	6.5E-09	3.2E-10	Lu-172
ND	NA	1.6E-09	3.1E-11	Lu-173
ND	NA	1.7E-09	2.7E-11	Lu-174
ND	NA	4.0E-09	1.6E-11	Lu-174m +

التلوث	الابتلاع			النويدات المشعة ^أ
	أدمة الجلد	الغدة الدرقية	القولون	
^د AF _{6R,V}	^د AF _{5,IV} (Δ)	^د AF _{4,IV} (Δ)	^د AF _{2,IV} (Δ)	
((مكافئ غراي/ثانية × بكريل/سم ^٢))	((مكافئ غراي/بكريل))	((مكافئ غراي/بكريل))	((مكافئ غراي/بكريل))	
5.2E-11	NA	4.2E-09	7.6E-12	Lu-177 (*)
ND	NA	1.1E-08	4.0E-10	Hf-172 +
3.4E-11	NA	2.3E-09	8.5E-11	Hf-175
6.3E-11	NA	7.5E-09	1.3E-10	Hf-181
6.6E-11	NA	1.3E-08	3.1E-10	Hf-182 +
ND	NA	2.3E-10	1.3E-11	Ta-178a (*)
ND	NA	4.1E-10	7.7E-12	Ta-179
6.2E-11	NA	9.3E-09	2.5E-10	Ta-182
ND	NA	1.4E-09	2.9E-11	W-178
3.0E-12	NA	4.4E-10	1.1E-11	W-181
4.0E-11	NA	3.4E-09	1.6E-11	W-185
1.7E-10	NA	4.9E-09	5.4E-11	W-187 (*)
3.7E-10	6.3E-09	1.9E-08	1.8E-10	W-188 +
1.6E-11	1.6E-09	2.2E-09	2.9E-10	Re-184
1.6E-11	2.8E-09	3.7E-09	3.0E-10	Re-184m +
2.2E-10	4.8E-09	4.2E-09	9.9E-11	Re-186
0.0E+00	1.1E-11	1.3E-11	3.5E-13	Re-187
3.6E-10	6.6E-09	3.1E-09	8.0E-11	Re-188 (*)
ND	3.5E-09	1.9E-09	5.2E-11	Re-189
1.6E-11	NA	2.1E-09	1.6E-10	Os-185
5.2E-12	NA	4.3E-09	1.9E-11	Os-191
7.5E-12	NA	7.1E-10	1.1E-12	Os-191m +
2.2E-10	NA	6.2E-09	9.5E-12	Os-193
3.7E-10	NA	2.7E-08	4.4E-11	Os-194 +
ND	NA	1.8E-09	1.8E-11	Ir-189
4.0E-11	NA	6.5E-09	2.9E-10	Ir-190
1.3E-10	NA	8.5E-09	1.9E-10	Ir-192
3.7E-10	NA	1.0E-08	8.9E-12	Ir-194 (*)
2.2E-11	NA	5.4E-09	2.3E-10	Pt-188 +
2.1E-11	NA	2.1E-09	5.0E-11	Pt-191
2.0E-12	NA	2.5E-10	1.2E-13	Pt-193
4.5E-12	NA	3.6E-09	2.8E-12	Pt-193m
7.5E-12	NA	4.9E-09	1.4E-11	Pt-195m
1.1E-10	NA	3.0E-09	2.4E-12	Pt-197 (*)
3.4E-10	NA	4.1E-10	9.2E-13	Pt-197m +(*)
ND	NA	8.5E-10	1.5E-11	Au-193
1.4E-11	NA	1.9E-09	1.3E-10	Au-194
6.0E-12	NA	1.8E-09	2.4E-11	Au-195
2.1E-10	NA	7.3E-09	7.6E-11	Au-198
1.2E-11	NA	3.3E-09	2.1E-11	Au-199
1.6E-11	NA	4.1E-09	2.1E-09	Hg-194 +

التلوث	الابتلاع			النويدات المشعة ^أ
	أدمة الجلد	الغدة الدرقية	القولون	
^د AF _{6R,V}	^د AF _{5,IV} (Δ)	^ج AF _{4,IV} (Δ)	^ب AF _{2,IV} (Δ)	
((مكافئ غراي/ثانية × بكريل/سم ^٢))	((مكافئ غراي/بكريل))	((مكافئ غراي/بكريل))	((مكافئ غراي/بكريل))	
1.6E-11	NA	4.0E-09	1.4E-10	Hg-195m +
5.1E-12	NA	1.7E-09	5.9E-11	Hg-197
1.1E-11	NA	3.5E-09	7.8E-11	Hg-197m +
1.8E-11	NA	3.5E-09	7.3E-10	Hg-203
3.8E-11	NA	2.8E-10	1.5E-10	Tl-200
4.8E-12	NA	2.3E-10	5.6E-11	Tl-201
2.1E-11	NA	7.9E-10	3.5E-10	Tl-202
1.5E-10	NA	3.9E-09	5.9E-10	Tl-204
4.8E-12	NA	7.1E-10	4.7E-11	Pb-201 +
2.1E-11	NA	1.2E-09	5.4E-10	Pb-202 +
2.3E-11	NA	1.3E-09	6.8E-11	Pb-203
2.0E-12	NA	1.9E-10	1.9E-11	Pb-205
1.9E-10	NA	1.3E-08	2.5E-08	Pb-210 +
6.1E-10	NA	1.9E-08	6.6E-09	Pb-212 +(*)
2.8E-11	NA	3.7E-09	3.0E-10	Bi-205
9.8E-11	NA	8.8E-09	5.6E-10	Bi-206
7.0E-11	NA	6.5E-09	3.1E-10	Bi-207
1.9E-10	NA	1.0E-08	7.3E-10	Bi-210 +
ND	NA	1.9E-08	1.7E-10	Bi-210m
5.7E-10	NA	0.0E+00	1.3E-12	Bi-212 +(*)
9.3E-17	NA	1.9E-14	2.3E-08	Po-210
7.2E-11	NA	3.7E-12	1.1E-09	At-211
8.6E-15	NA	0.0E+00	0.0E+00	Rn-222
1.3E-11	NA	3.0E-08	2.9E-08	Ra-223 +
9.2E-13	NA	2.7E-08	1.9E-08	Ra-224 +
1.5E-11	NA	1.1E-08	2.7E-08	Ra-225 +
4.9E-10	NA	6.9E-09	7.7E-09	Ra-226
2.4E-10	NA	5.8E-08	2.7E-08	Ra-228 +
1.3E-12	NA	2.0E-08	1.1E-09	Ac-225
8.1E-12	NA	3.5E-08	2.9E-08	Ac-227 +
2.3E-10	NA	2.2E-09	3.3E-11	Ac-228
2.1E-11	NA	1.6E-08	1.4E-08	Th-227 +
1.5E-12	NA	4.0E-08	2.4E-08	Th-228 +
2.2E-11	NA	2.9E-08	2.9E-08	Th-229 +
5.1E-13	NA	5.1E-10	2.5E-10	Th-230 +
9.0E-12	NA	2.6E-09	1.8E-12	Th-231
5.1E-13	NA	4.1E-08	1.9E-08	Th-232 +
1.2E-10	NA	2.7E-08	1.8E-11	Th-234 +
2.5E-11	NA	3.3E-09	2.0E-10	Pa-230 +
6.5E-12	NA	1.2E-08	8.2E-09	Pa-231 +
4.4E-11	NA	6.5E-09	4.5E-11	Pa-233

التلوث	الابتلاع			النويدات المشعة ^أ
	أدمة الجلد	الغدة الدرقية	القولون	
^د AF _{6R,V}	^د AF _{5,IV} (Δ)	^د AF _{4,IV} (Δ)	^د AF _{2,IV} (Δ)	
((مكافئ غراي/ثانية × بكريل/سم ^٢))	((مكافئ غراي/بكريل))	((مكافئ غراي/بكريل))	((مكافئ غراي/بكريل))	
7.3E-13	NA	1.4E-09	4.3E-09	U-230 +
1.3E-12	NA	3.8E-08	2.4E-08	U-232 +
7.0E-12	NA	2.1E-10	8.3E-10	U-233
1.1E-12	NA	4.3E-10	8.2E-10	U-234 +
1.3E-11	NA	7.3E-09	8.2E-10	U-235 +
1.1E-12	NA	3.7E-10	7.7E-10	U-236
1.4E-12	NA	2.9E-08	7.8E-10	U-238 +
7.1E-13	NA	1.5E-09	7.7E-10	Depleted U
ND	NA	4.0E-10	6.4E-13	Np-235
ND	NA	1.3E-09	2.3E-11	Np-236b +
ND	NA	7.1E-09	3.1E-11	Np-236a
4.7E-11	NA	9.2E-09	2.1E-10	Np-237 +
5.2E-11	NA	6.0E-09	2.6E-11	Np-239
ND	NA	4.5E-10	2.2E-10	Pu-236
ND	NA	6.7E-10	1.1E-11	Pu-237
6.0E-13	NA	3.6E-10	2.1E-10	Pu-238
2.3E-13	NA	2.3E-10	2.0E-10	Pu-239
5.7E-13	NA	3.6E-10	2.0E-10	Pu-240
1.7E-14	NA	1.7E-10	1.6E-12	Pu-241 +
4.9E-13	NA	3.0E-10	1.9E-10	Pu-242
4.9E-12	NA	2.7E-08	2.7E-10	Pu-244 +
3.7E-12	NA	1.9E-09	1.2E-10	Am-241
1.3E-12	NA	7.6E-09	1.1E-10	Am-242m +
3.9E-13	NA	9.7E-09	1.6E-10	Am-243 +
6.0E-11	NA	2.9E-09	4.3E-11	Am-244
ND	NA	3.6E-10	9.2E-11	Cm-240
ND	NA	5.2E-09	1.1E-10	Cm-241 +
5.4E-13	NA	3.3E-10	1.2E-10	Cm-242
1.8E-11	NA	4.8E-09	1.5E-10	Cm-243
5.1E-13	NA	2.9E-10	1.2E-10	Cm-244
4.5E-12	NA	2.4E-09	1.3E-10	Cm-245
1.7E-12	NA	2.7E-10	1.1E-10	Cm-246
1.1E-11	NA	6.4E-09	1.8E-10	Cm-247
2.8E-10	NA	ND	6.9E-10	Cm-248 (*)
ND	NA	2.2E-09	2.7E-10	Bk-247
1.3E-11	NA	1.1E-09	7.3E-13	Bk-249
ND	NA	2.0E-10	2.7E-10	Cf-248 +
1.7E-11	NA	2.1E-09	3.3E-10	Cf-249
3.5E-12	NA	1.9E-10	2.7E-10	^ج Cf-250
3.6E-11	NA	6.8E-09	2.9E-10	Cf-251
3.7E-10	NA	ND	6.4E-10	Cf-252 (*)

التلوث	الابتلاع			النويدات المشعة ^أ
	أدمة الجلد	الغدة الدرقية	القولون	
$AF_{6R,V}$ ^د	$AF_{5,IV}(\Delta)$ ^د	$AF_{4,IV}(\Delta)$ ^د	$AF_{2,IV}(\Delta)$ ^د	
((مكافئ غراي)/ثانية × (بكريل/سم ^٢))	((مكافئ) غراي/بكريل))	((مكافئ) غراي/بكريل))	((مكافئ) غراي/بكريل))	
3.8E-12	NA	2.4E-09	7.7E-11	Cf-253
3.5E-09	NA	5.0E-07	2.8E-08	Cf-254 (*)
2.3E-13	NA	2.3E-10	2.0E-10	²³⁹ Pu/ ⁹ Be ^ح
3.7E-12	NA	1.9E-09	1.2E-10	²⁴¹ Am/ ⁹ Be ^ح

أ روعي النمو الداخلي للنواتج المشعة عند حساب قيم D لكل النويدات المشعة على النحو المبين في التذييل الثامن. وتشير علامة "+" إلى النويدات المشعة التي تمثل نواتجها مصادر ملموسة للجرعة في السيناريوهات موضوع النظر. وتستند المعاملات إلى البيانات المأخوذة من المرجع "٤٩" ما لم ترد علامة "*" للإشارة إلى أنها تستند إلى بيانات من المرجع [٥٠].

- ب الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية لمدة ٣٠ يوماً (Δ) في النخاع الأحمر بسبب الابتلاع.
ج الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية لمدة ٣٠ يوماً (Δ) في القولون بسبب الابتلاع.
د الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية لمدة ٣٦٥ يوماً (Δ) في الغدة الدرقية بسبب الابتلاع.
هـ معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في أدمة الجلد.
و تعني "NA" غير منطبق، وتعني "ND" لا توجد أي بيانات.
ز نشاط النويدات المشعة المبتعثة لألفا، مثل البلوتونيوم-٢٣٩ والأميريثيوم-٢٤١.
ح لم تحتسب جرعة النيوترونات كما هو وارد في القسم ٥.

سادساً-٢ - تلوث الجلد

استخدم النهج القائم على المخاطر معاملات تحويل الجرعة $AF_{6R,V}$ التي تساوي معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في النسيج R٦ (أدمة الجلد) لكل وحدة نشاط سطحي للنويدات المشعة وفقاً للسيناريو الخامس. وحُسبت قيم معاملات تحويل الجرعة المأخوذة من النويدات كحاصل ثلاثة حدود كما هو وارد في المعادلة (٧٠). والحد الأول في الجانب الأيمن من المعادلة (γ) هو الطاقة $E_{\gamma,i}$ ، والحصيلة Y_i^γ التي تساهم بها الفوتونات المتقطعة في كل تحول نووي. والحد الثاني هو الحصيلة Y_j^e والطاقة الحركية $E_{e,j}$ التي تساهم بها إلكترونات التحويل، والحد الأخير هو مساهمة طيف بيتا ذي الطاقة القصوى E_e^0 .

$$AF_{6R,V} = \sum_i^n Y_i^\gamma \times d_{6R,V}^\gamma(E_{\gamma,i}) + \sum_j^m Y_j^e \times d_{6R,V}^e(E_{e,j}) + \int_0^{E_e^0} n_\beta(E_e, E_e^0) d_{6R,V}^e(E_e) dE_e \quad (٧٠)$$

حيث:

$AF_{6R,V}$ هو معامل تحويل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في أدمة الجلد (النسيج R٦) من تلوث غير موزع بالتساوي على سطح الجلد حسب ما هو مبين في السيناريو الخامس، ((مكافئ غراي)/ثانية × بكريل/سم^٢)؛

هو متوسط عدد الإلكترونات التي لها طاقة تتراوح بين E_e و $E_e + dE_e$ نتيجة لاضمحلال بيتا في نويدة مشعة ذات طاقة قصوى لاضمحلال بيتا E_e^0 (ميغا إلكترون فولط) نقلاً عن المرجع [٥٢]؛

هي دالة الاستجابة المساوية للجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية التي تتلقاها أدمة الجلد على عمق ٤٠ ملغ \times سم^{-٢} (٠,٤ مم أو ٤٠٠ ميكرون) تحت سطح الجلد من مصدر فوتونات له طاقة E_γ ، موزعة بالتساوي على سطح الجلد، ((مكافئ غراي) \times سم^{-٢})؛

هي دالة الاستجابة المساوية للجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية التي تتلقاها أدمة الجلد من مصدر إلكترونات ذي طاقة E_e ، موزعة بالتساوي على سطح الجلد ((مكافئ غراي) \times سم^{-٢}).

وحاصل الحد الأول في الجانب الأيمن من المعادلة (٧٠) هو الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية نتيجة لتشعيع أدمة الجلد بفوتونات مبعثة من النويدة المشعة المعنية. واستخدمت قيم هذه الكمية، حسب ما أشار إليه هاينزلمان ورولوف (Heinzelmann and Rohloff) [٥٣]، في حساب معاملات تحويل الجرعة. واستخدمت المعادلة التجريبية التي وضعها فو (Faw) [٥٤] لحساب دالة الاستجابة للجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في أدمة الجلد نتيجة التعرض لمصدر إلكترونات ذي طاقة E_e موزعة بالتساوي على سطح الجلد، ((مكافئ غراي) \times سم^{-٢}):

$$(٧١) \quad d_{6R,V}^e(E_e) = 1.602 \times 10^{-10} \frac{2.7767 + y(8.5167 + y(8.1517 + 2.3104y))}{1 + y(2.5806 + y(1.6233 - 0.2723y))}$$

حيث: $y = \log_{10} E_e$ و E_e هي طاقة الإلكترونات (ميغا إلكترون فولط). وهذه المعادلة تنطبق على الإلكترونات التي لها طاقة دنيا E_{min} تزيد على ٠,١٨ ميغا إلكترون فولط. وتساوي $d_{6R,V}^e(E_e)$ صفراً إذا كانت الطاقة الدنيا في الإلكترونات تقل عن ذلك.

وينبغي تقييم الجرعة التي يتراوح عمقها بين ٣٠٠ و ٥٠٠ ميكرون [١٥] لأغراض تقدير الآثار القطعية العنيفة، من قبيل التقشر الرطب. وهذا هو الأسلوب الذي استخدمه النهج القائم على المخاطر في الحالات التي افترض فيها حدوث آثار قطعية عنيفة بعد تشعيع أكثر من ١٠٠ سم^٢ من نسيج الجلد [١٢] على عمق ٤٠٠ ميكرون (٤٠ ملغ \times سم^{-٢}).

وتكشف مقارنة النتائج المحسوبة مع البيانات القائمة المنشورة [٥٤، ٥٥، ٥٦، ٥٧، ٥٨] عن عدم وجود اختلاف كبير بينها. ويتضمن الجدول ١٩ قيم معامل تحويل الجرعة $AF_{6R,V}$.

سادساً-٣- الغمر

استخدم النهج القائم على المخاطر معاملات تحويل الجرعة $AF_{2,VI}$ المساوية لمعدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في النسيج ٢ (النخاع الأحمر) نتيجة للغمر في غاز حامل مشع. وتقرب بيانات السحابة شبه اللامتناهية المأخوذة من المرجع [٤٠] المستخدمة في حساب $AF_{2,VI}$ بطريقة صحيحة حالة الغمر الهوائي [٤٠]. ونتج عن استخدام هذه المعاملات مع التعرض الخارجي للإشعاع γ نتيجة للغمر في غرفة حجمها ٣٠٠ م^٣ (السيناريو السادس) تقديرات متحفظة للإشعاع بسبب حجم الغرفة مقارنة بسحابة متناهية. ويتضمن الجدول ٢٠ قيم معامل تحويل الجرعة $AF_{2,VI}$.

الجدول ٢٠: معاملات تحويل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية نتيجة للغمر في غاز مشع

النخاع الأحمر		النخاع الأحمر	
$AF_{2,VI}$	النوية المشعة	$AF_{2,VI}$	النوية المشعة
(مكافئ غراي)/(بكريل × ثانية/م ^٣)		(مكافئ غراي)/(بكريل × ثانية/م ^٣)	
4.00E-14	Kr-87	4.60E-14	N-13
4.50E-14	Xe-122	0.00E+00	Ar-37
3.50E-14	Xe-123	6.60E-18	Ar-39
1.10E-14	Xe-127	6.30E-14	Ar-41
2.30E-16	Xe-131m	2.40E-16	Kr-81
1.10E-15	Xe-133	1.10E-16	Kr-85
1.10E-14	Xe-135	6.40E-15	Kr-85m

التذييل السابع تقييم قيم D

يحدد هذا القسم الخصائص العامة لقيم D الموصى بها في الجدول ١ ويتضمن تقييماً لها

سابعاً-١- تحديد الخصائص العامة لقيم D الموصى بها

يبين الجدول ٢١ الشروط المقيدة لقيم D_1 . ويحدّد التعرض لمصدر قريب في معظم الحالات (٣١٢ من بين ٣٦٩ حالة تم تحليلها) النشاط الخطر للمادة المشعة غير المشتتة. وأما التعرض لمصدر بعيد فيقيّد نشاط ١٣ نويدة مشعة. وهذه النويدات المشعة لها نشاط نوعي منخفض بدرجة كبيرة ولا تجتاز اختبار "الجيب" بسبب تعذر حملها في الجيب. وقيمة D_1 مقيدة بالحرارية في ١٩ حالة وغير مقيدة في ٢٥ حالة.

الجدول ٢١: الشروط المقيدة لقيم D_1

السيناريو		مقيدة بحدوث آثار قطعية عنيفة في العضو أو النسيج:
الثاني	الأول	
	٣١٢	النسيج الرخو
		النخاع الأحمر
		المنطقة السنخية الخلالية من الجهاز التنفسي
		القولون
		الغدة الدرقية
		أدمة الجلد
	١٣	الجذع
	١٩	محدودة بالحرارية
	٢٥	غير محدودة
	٣٦٩	المجموع

ويبين الجدول ٢٢ الشروط المقيدة لقيم D_2 . ويحدّد التعرض عن طريق الاستنشاق وعن طريق ملامسة أدمة الجلد في معظم الحالات (٣١٤ من بين ٣٦٩ حالة تم تحليلها) النشاط الخطر للمادة المشعة المشتتة. والنخاع الأحمر والمنطقة السنخية من الجهاز التنفسي وأدمة الجلد هي الأعضاء الحرجة التي تحدد قيم D_2 . كما يبين الجدول ٢٢ أن الأخذ الداخلي عن طريق الابتلاع المرتبط بالابتلاع غير المتعمد أو استهلاك مياه ملوثة غير مهم إلا في حالة الكربون-١٤. وقيمة D_2 مقيدة بالحرارية في عشر حالات وغير مقيدة في ١٧ حالة.

الجدول ٢٢ الشروط المقيدة لقيم D_2

السيناريو				مقيّدة بحدوث آثار قطعية عنيفة في العضو أو النسيج:
السادس	الخامس	الرابع	الثالث R	
				النسيج الرخو
١٢		١	١١٩	النخاع الأحمر
			٧٦	المنطقة السنخية الخلالية من الجهاز التنفسي
		صفر	١٠	القولون
		صفر	٢٨	الغدة الدرقية
	٩٦			أدمة الجلد
				الجذع
		١٠		مقيّدة بالحرجية
		١٧		غير مقيدة
		٣٦٩		المجموع

ويبين الجدول ٢٣ الشروط المقيدة لقيمة D (أقل قيمة لكل من D_1 و D_2). ويحدّد التعرض لمصدر قريب في معظم الحالات (٢٦٦ من بين ٣٦٩ حالة من الحالات التي تم تحليلها) النشاط الخطر للمادة المشعة. وقيمة D في ٦ حالات فقط (التكنيتيوم-٩٧ شبه المستقر، والتكنيتيوم-٩٩، والتلورיום-١٢٥ شبه المستقر، والتلورיום-١٢٧ شبه المستقر، واليود-١٢٥، واليود-١٢٦) مقيّدة بتعرض الغدة الدرقية لمادة مشتتة محتوية على نويدات متراكمة في الغدة الدرقية. ولأغراض المقارنة فإن هذا الأثر يقيد قيمة D_2 في كل حالات الاستنشاق التي تحتوي فيها المادة المشتتة على نويدات مشعة متراكمة في الغدة الدرقية. وقيم D مقيّدة بالحرجية في تسع حالات وغير مقيدة في ١٥ حالة.

الجدول ٢٣ الشرود المقيدة لقيم D

السيناريو						مقيّدة بظهور آثار قطعية عنيفة في العضو أو النسيج:
السادس	الخامس	الرابع	الثالث R	الثاني	الأول	
					٢٦٦	النسيج الرخو
		١	٢٧			النخاع الأحمر
صفر			٣٢			المنطقة السنخية الخلالية من الجهاز التنفسي
		صفر	صفر			القولون
		صفر	٦			الغدة الدرقية
	٨					أدمة الجلد
				٥		الجذع
			٩			مقيدة بالحرجية
			١٥			غير مقيدة
			٣٦٩			المجموع

سابعاً-٢- التثبت من قيم D الموصى بها

يعترف منشور الوكالة TECDOC-1432 "وضع إطار موسّع لمعايير الاستجابة للطوارئ" [١٥] بعدم إمكانية تجنّب أوجه الزبيرة عند تقدير الجرعة، ويتضمن المرجع إرشادات بشأن تحديد المستويات المرجعية العامة للاستجابة للطوارئ. ويشوب وضع قيم D قدر كبير من الزبيرة، وتشير التقديرات إلى إمكانية تباين البيانات، استناداً إلى البيانات والافتراضات، بمقدار عشرة أضعاف أو أكثر. وأجريت مقارنتان للتثبت إلى حد ما من قيم D الموصى بها في الجدول ١. وكان الغرض من المقارنة الأولى هو مقارنة القيم المحسوبة باستخدام

النهج المبني على الخبرة مع القيم المحسوبة باستخدام النهج القائم على المخاطر. وتناولت المقارنة الثانية طريقة مقارنة قيم D المحسوبة مع المصادر التي انطوت عليها حالات الطوارئ الإشعاعية من أجل تحديد ما إذا كانت القيم متفقة مع التجربة الفعلية هنا.

واختلفت بدرجة كبيرة بيانات ومعايير قياس الجرعات المستخدمة في النهج المبني على الخبرة والنهج القائم على المخاطر لتحديد قيم D₂. واستخدمت قيم D المستندة إلى النهج القائم على المخاطر كخط أساس لأنها وضعت باستخدام آخر أساليب تقدير حدوث الآثار القطعية الواردة في المرجع [١٥].

وعند مقارنة قيم D المحددة على أساس النهج المبني على الخبرة والنهج القائم على المخاطر، وبعد النظر في أوجه الشبه في معاملات الجرعات ومعايير الجرعات وبارامترات السيناريوهات، يبدو من الملائم اعتبار الفرق الذي يقل عن خمسة أضعاف بين قيم D فرقا لا يذكر.

ويعرض الجدول ٢٤ قيم D المحسوبة باستخدام كل من النهج المبني على الخبرة والنهج القائم على المخاطر للنويدات المشعة المحددة في النهج المبني على الخبرة. وتكشف مقارنة قيم D المحددة على أساس النهج المبني على الخبرة مع القيم التي تم الحصول عليها باستخدام النهج القائم على المخاطر الذي تم التثبيت منه عن عدم وجود فرق كبير بينهما. ويثبت ذلك كفاية بيانات ومعايير قياس الجرعات المستخدمة في هذين النهجين. ويتضح من البيانات الواردة في الجدول ٢٤ أن النهج المبني على الخبرة يسفر دائما عن تقديرات (متحفظة) أقل لقيم D₂. والقيمة الوسطية للنسبة ${}^E D_2 / {}^R D_2$ تبلغ $1,1 \pm 0,3$ (بمستوى ثقة نسبته ٩٩%). وتقل فيها قيم D₂ المحسوبة باستخدام النهج المبني على الخبرة عن القيم المحسوبة باستخدام النهج القائم على المخاطر بأكثر من ضعفين في ثلاث حالات فقط، ولا تقل بأكثر من خمسة أضعاف إلا في حالة واحدة فقط. وقورنت بالإضافة إلى ذلك قيم D مع القيم التي حسبت بطريقة مستقلة تماما باستخدام القواعد الأساسية ومعاملات الجرعة من مصادر أخرى. وتبين أيضاً أن هذه النتائج تتفق مع قيم D المحسوبة هنا.

الجدول ٢٤ مقارنة قيم D المشتقة وفقاً للنهج المبني على الخبرة مع قيم D المشتقة وفقاً للنهج القائم على المخاطر

E/R	قيمة D ₂		E/R	قيمة D ₁		E/R	قيمة D		النوية المشعة ١
	(تيرا بكريل)			(تيرا بكريل)			(تيرا بكريل)		
	R	E		R	E		R	E	
2.	1.E+3	2.E+3	1.	UL	UL	2.	1.E+3	2.E+3	H-3
0.06	9.E+2	5.E+1	2.	1.E+5	2.E+5	0.06	9.E+2	5.E+1	C-14
3.	8.E+0	2.E+1	1.	1.E+1	1.E+1	1.	8.E+0	1.E+1	P-32
0.7	9.E+1	6.E+1	1.	4.E+4	4.E+4	0.7	9.E+1	6.E+1	S-35
0.7	3.E+1	2.E+1	2.	2.E+2	3.E+2	0.7	3.E+1	2.E+1	Cl-36
5.	1.E+3	5.E+3	1.	2.E+0	2.E+0	1.	2.E+0	2.E+0	Cr-51
2.	4.E+2	8.E+2	1.	UL	UL	2.	4.E+2	8.E+2	Fe-55
1.	3.E+2	4.E+2	1.	7.E-1	7.E-1	1.	7.E-1	7.E-1	Co-57
1.	3.E+1	3.E+1	1.	3.E-2	3.E-2	1.	3.E-2	3.E-2	Co-60
0.1	5.E+2	6.E+1	1.	UL	UL	0.1	5.E+2	6.E+1	Ni-63
3.	1.E+2	3.E+2	1.	1.E-1	1.E-1	1.	1.E-1	1.E-1	Zn-65
2.	1.E+1	2.E+1	1.	7.E-2	7.E-2	1.	7.E-2	7.E-2	Ge-68+
2.	9.E+1	2.E+2	1.	2.E-1	2.E-1	1.	2.E-1	2.E-1	Se-75
1.	2.E+3	2.E+3	1.	3.E+1	3.E+1	1.	3.E+1	3.E+1	Kr-85
2.	1.E+1	2.E+1	1.	2.E+1	2.E+1	2.	1.E+1	2.E+1	Sr-89

قيمة D ₂			قيمة D ₁			قيمة D			النوية المشعة ١
E/R	(تيرا بكريل)		E/R	(تيرا بكريل)		E/R	(تيرا بكريل)		
	R	E		R	E		R	E	
0.2	5.E+0	1.E+0	0.8	5.E+0	4.E+0	0.2	5.E+0	1.E+0	Sr-90+
1.	1.E+1	1.E+1	1.	5.E+0	5.E+0	1.	5.E+0	5.E+0	Y-90
1.	2.E+1	2.E+1	0.9	9.E+0	8.E+0	0.9	9.E+0	8.E+0	Y-91
1.	1.E+1	1.E+1	1.	4.E-2	4.E-2	1.	4.E-2	4.E-2	Zr-95+
0.7	9.E+1	6.E+1	1.	9.E-2	9.E-2	1.	9.E-2	9.E-2	Nb-95
1.	2.E+1	2.E+1	1.	3.E-1	3.E-1	1.	3.E-1	3.E-1	Mo-99+
1.	5.E+2	7.E+2	1.	6.E-1	7.E-1	1.	6.E-1	7.E-1	Tc-99m
0.6	5.E+1	3.E+1	1.	1.E-1	1.E-1	1.	1.E-1	1.E-1	Ru-103+
2.	5.E+0	1.E+1	1.	3.E-1	3.E-1	1.	3.E-1	3.E-1	Ru-106+
0.5	2.E+2	1.E+2	1.	9.E+1	9.E+1	1.	9.E+1	9.E+1	Pd-103+
0.4	8.E+1	3.E+1	1.	2.E+1	2.E+1	1.	2.E+1	2.E+1	Cd-109
3.	3.E-1	8.E-1	1.	3.E-2	3.E-2	1.	3.E-2	3.E-2	Te-132+
0.3	8.E-1	2.E-1	1.	1.E+1	1.E+1	1.	2.E-1	2.E-1	I-125
	UL	UL		UL	UL		UL	^c UL	I-129
0.7	3.E-1	2.E-1	1.	2.E-1	2.E-1	1.	2.E-1	2.E-1	I-131
2.	2.E+1	3.E+1	1.	4.E-2	4.E-2	1.	4.E-2	4.E-2	Cs-134
0.7	3.E+1	2.E+1	1.	1.E-1	1.E-1	1.	1.E-1	1.E-1	Cs-137+
0.9	8.E+1	7.E+1	1.	2.E-1	2.E-1	1.	2.E-1	2.E-1	Ba-133
0.3	6.E+1	2.E+1	1.	1.E+0	1.E+0	1.	1.E+0	1.E+0	Ce-141
2.	6.E+0	9.E+0	1.	9.E-1	9.E-1	1.	9.E-1	9.E-1	Ce-144+
0.4	1.E+2	4.E+1	1.	8.E+3	8.E+3	0.4	1.E+2	4.E+1	Pm-147
0.8	4.E+1	3.E+1	1.	6.E-2	6.E-2	1.	6.E-2	6.E-2	Eu-152
0.7	3.E+1	2.E+1	1.	6.E-2	6.E-2	1.	6.E-2	6.E-2	Eu-154
2.	5.E+1	8.E+1	1.	1.E+0	1.E+0	1.	1.E+0	1.E+0	Gd-153
0.7	3.E+1	2.E+1	1.	2.E+1	2.E+1	1.	2.E+1	2.E+1	Tm-170
0.4	7.E+1	3.E+1	1.	3.E-1	3.E-1	1.	3.E-1	3.E-1	Yb-169
4.	7.E+0	3.E+1	1.	1.E+0	1.E+0	1.	1.E+0	1.E+0	Re-188
0.7	3.E+1	2.E+1	1.	8.E-2	8.E-2	1.	8.E-2	8.E-2	Ir-192
1.	3.E+1	3.E+1	1.	2.E-1	2.E-1	1.	2.E-1	2.E-1	Au-198
0.2	1.E+1	2.E+0	1.	3.E-1	3.E-1	1.	3.E-1	3.E-1	Hg-203
0.5	4.E+1	2.E+1	1.	7.E+1	7.E+1	0.5	4.E+1	2.E+1	Tl-204
0.2	3.E-1	6.E-2	1.	8.E+3	8.E+3	0.2	3.E-1	6.E-2	Po-210
0.2	3.E-1	7.E-2	1.	4.E-2	4.E-2	1.	4.E-2	4.E-2	Ra-226+
0.7	1.E-1	7.E-2	1.	7.E+2	9.E+2	0.7	1.E-1	7.E-2	Th-230
1.	UL	UL	1.	UL	UL	1.	UL	^u UL	Th-232
2.	3.E-2	6.E-2 ^f	1.	7.E-2	7.E-2	2.	3.E-2	6.E-2	U-232
1.	8.E-5	8.E-5	1.	8.E-5	8.E-5	1.	8.E-5	8.E-5	U-235+
1.	UL	UL	1.	UL	UL	1.	UL	UL	U-238
-	ND	UL	-	ND	UL	-	ND ^c	UL	U Natural
-	ND	UL	-	ND	UL	-	ND	UL	U Depleted

قيمة D ₂			قيمة D ₁			قيمة D			النويدات المشعة ^أ
E/R	(تيرا بكريل)		E/R	(تيرا بكريل)		E/R ^ب	(تيرا بكريل)		
	R	E		R	E		R	E	
-	ND	8E-5	-	ND	8E-5 ^ج	-	ND	8E-5	U Enriched > 20 %
-	ND	8E-4	-	ND	8E-4 ^ج	-	ND	8E-4	U Enriched 10 % - 20%
0.4	2.E-1	7.E-2	1.	3.E-1	3.E-1	0.4	2.E-1	7.E-2	Np-237+
0.3	2.E-1	6.E-2	1.	3.E+2	3.E+2	0.3	2.E-1	6.E-2	Pu-238
0.3	2.E-1	6.E-2	1.	1.E+0	1.E+0	0.3	2.E-1	6.E-2	Pu-239
0.3	2.E-1	6.E-2	1.	4.E+0	4.E+0	0.3	2.E-1	6.E-2	Pu-240
0.2	2.E+1	3.E+0	1.	2.E+3	2.E+3	0.2	2.E+1	3.E+0	Pu-241+
1.	7.E-2	7.E-2 ^د	1.	7.E-2	7.E-2	1.	7.E-2	7.E-2	Pu-242
0.3	2.E-1	6.E-2	1.	8.E+0	8.E+0	0.3	2.E-1	6.E-2	Am-241
0.2	2.E-1	4.E-2	1.	2.E+3	2.E+3	0.2	2.E-1	4.E-2	Cm-242
0.3	2.E-1	5.E-2	3.	3.E+3	1.E+4	0.3	2.E-1	5.E-2	Cm-244
2.	6.E-2	1.E-1	2.	9.E-3	2.E-2	2.	9.E-3	2.E-2	Cf-252
0.3	2.E-1	6.E-2	1.	1.E+0	1.E+0 ^{هـ}	0.3	2.E-1	6.E-2	²³⁹ Pu/ ⁹ Be
0.3	2.E-1	6.E-2	0.2	5.E+0	1.E+0	0.3	2.E-1	6.E-2	²⁴¹ Am/ ⁹ Be

أ روعي النمو الداخلي للنواتج المشعة عند حساب قيم D لكل النويدات المشعة على النحو المبين في التذييل الثامن. وتشير علامة "4" إلى النويدات المشعة التي تمثل نواتجها مصادر ملموسة للجرعة في السيناريوهات موضوع النظر.

ب تشير "E" و "R" إلى النهج المبني على الخبرة والنهج القائم على المخاطر؛ و "E/R" هي النسبة بين قيم D المحسوبة وفقاً للنهج المبني على الخبرة و قيم D المحسوبة وفقاً للنهج القائم على المخاطر.

ج تشير "UL" إلى "كمية غير محدودة" على النحو المحدد في التذييل الثاني. وتعني ND "لا توجد أي بيانات".

د مولد نيتروجين. ويتعلق النشاط الوارد هنا بنشاط النويدات المشعة المبتعثة لألفا، مثل البلوتونيوم-239 والأميريسيوم-241.

سابعاً-3- تجربة الطوارئ

يتضمن الجدول ٢٥ ملخصاً للحقائق الأساسية التي وردت فيما نشر من تقارير عن مصادر مفقودة أو مسروقة. ويبين الجدول أيضاً نسبة النشاط الذي تنطوي عليه تلك المصادر وقيمة D₁، و A/D₁ للنويدات المشعة. ولم يشر الجدول إلى الحدث الذي انطوى على ترك ٠,١٣ تيرا بكريل من مصدر الإيريديوم - ١٩٢ ونجم عنه تشعيع داخلي في مريضة لمدة أربعة أيام مما أسفر عن وفاتها [٥٩]. ولعل أصغر مصدر خرج عن نطاق السيطرة وأسفر عن إصابة انتقصت من نوعية الحياة هو السيزيوم-١٣٧ الذي تركه أب عن غير قصد في فراش ابنه وفي سماعات أذنه لمدة تراوحت بين أسابيع وأشهر. وأسفر ذلك عن إصابات تطلبت تدخلاً جراحياً وتسببت في ضمور الخصيتين [٦٤]. وكان الأبُ مرخصاً بحيازة ٤ كوري [١٤ تيرا بكريل] من السيزيوم-١٣٧ وإن كان من المتعذر تحديد مقدار المادة المستخدمة بدقة. وأصغر مصدر تسبب في حدوث إصابات شديدة عرضية بسبب التعرض الخارجي تراوح بين ٠,١٢ و ٠,١٦ تيرا بكريل من السيزيوم - ١٣٧ [٢٧]. ويزيد ذلك قليلاً على قيمة D₁ التي تبلغ ٠,١٠ تيرا بكريل من السيزيوم - ١٣٧ في الجدول ١. وأصغر مصدر خرج عن نطاق السيطرة وأسفر عن تعرض مميت بين الجمهور هو ١,٢ تيرا بكريل من الإيريديوم - ١٩٢ [٦٠]. ويزيد ذلك بنحو عشرة أضعاف على قيمة D₁. ووقعت حالة الوفاة الوحيدة جراء أخذ داخلي لمقدار بلغ ١٠⁻ من المادة الشديدة التشتت في مصدر السيزيوم - ١٣٧ [٣٦]. ويمثل ذلك الجزء الكسري من الأخذ الداخلي المفترض في حساب قيم D₂. وكشف فحص حالات الطوارئ التي انطوت على وفيات بسبب تعرض عموم الجسم عن أن معدل الجرعة التي وصلت إلى النخاع الأحمر من مسافة متر واحد (سيناريو "الغرفة") ربما تراوحت بين ١٠ و ٥٠ مللي غراي/ساعة خلال فترة التعرض. وأخذ ذلك بعين

الاعتبار في المعايير المستخدمة في هذا السيناريو (السيناريو الثاني). ولذلك يبدو أن معايير تحديد المصادر الخطيرة تتفق مع التجربة التشغيلية وتتراوح بين جزء من عشرة وجزء من مائة من مستوى الجرعات المميتة في حالات الطوارئ الحقيقية التي انطوت على مصادر مشعة خارجة عن نطاق السيطرة.

الجدول ٢٥: ملخص حالات الطوارئ التي انطوت على مصادر مفقودة أو مسروقة

الأثار الصحية	A/D ₁	D ₁ ^أ		حالات الطوارئ	
		تيرا بركريل	تيرا بركريل	المصدر	حالة الطوارئ
إصابة شديدة وتعرض شكّل تهديداً للحياة	٧٨٣	٠.٠٣	٢٣.٥	كوبلت -٦٠	اسطنبول [٦١]
وفاة ٣ أشخاص	٥٠٠	٠.٠٣	١٥	كوبلت -٦٠	ساموت براكارن [٦٢]
وفاة ٤ أشخاص	٥٠٠	٠.١	٥٠	سيزيوم -١٣٧	جوانيا [٣٦]
وفاة شخص واحد، وإصابة شديدة وتعرض شكّل تهديداً للحياة	٢٠٠	٥	١٠٠٠	سترنثيوم -٩٠	مولدات كهربائية حرارية تعمل بالانطائر المشعة، جورجيا ^ج
وفاة شخص واحد	٧٤	٠.١	٧.٤	سيزيوم -١٣٧	تاميكو [٦٣]
إصابة شديدة وتعرض شكّل تهديداً للحياة	١٧	٠.٠٨	١.٣٧	إيريديوم -١٩٢	يانانغو [٣١، ٢٦]
وفاة ٨ أشخاص ^د	١٣.٨	٠.٠٨	١.٢	إيريديوم -١٩٢	الحالة ٢٠ [٦٠]
وفاة شخصين ^{هـ}	١٢	٠.٠٣	٠.٣٧	كوبلت -٦٠	الصين [٦٤]
تعرض شكّل تهديداً للحياة ^و	١١	٠.٠٨	٠.٩٧	إيريديوم -٩٢	الجزائر [٦٤]
إصابة شديدة	١١	٠.٠٨	١	إيريديوم -١٩٢	الولايات المتحدة الأمريكية [٦٤]
إصابة شديدة	١١	٠.٠٨	١	إيريديوم -١٩٢	الجزائر [٦٤]
إصابة شديدة	٣.٨	٠.٠٨	٠.٣	إيريديوم -١٩٢	الحالة ٤٣ [٦٠]
إصابة شديدة	٢.٣	٠.٠٨	٠.١٨٥	إيريديوم -١٩٢	جبلان [٣٢]
إصابة شديدة	٣.٣	٠.٠٨	٠.٢٦	إيريديوم -١٩٢	الحالة ٣٧ [٦٠]
تعرض شكّل تهديداً للحياة ^ز	٢.٣	٠.٠٨	٠.١٩	إيريديوم -١٩٢	اليابان [٦٤]
إصابة شديدة	١.٢-	٠.١	٠.١٢-	سيزيوم -١٣٧	ليلو [٢٧]
	١.٦		٠.١٦		

- أ قيمة D₁ للنويد المشعة المعنية استناداً إلى الجدول ١.
- ب النشاط (تيرا بركريل) الذي انطوت عليه حالة الطوارئ.
- ج تعرض شخصان، توفي أحدهما بعد سنة ونصف السنة من تعرضه.
- د ربما كان المصدر في الغرفة لمدة وصلت إلى أربعة أشهر ويرجح أن معدل الجرعة تراوح بين ٢٠ و ٥٠ مللي سيفرت/ساعة على مسافة متر واحد من المصدر.
- هـ ترك المصدر في الغرفة لمدة أسبوعين، مما أسفر عن تعرض مميت بمعدل جرعة بلغ نحو ٥٠ مللي غراي/ساعة على مسافة متر واحد من المصدر.
- و ترك المصدر في الغرفة لمدة خمسة أسابيع، ولكن ذلك لم يسفر عن وقوع حالات وفاة. وبلغ معدل الجرعة نحو ١٠ مللي غراي/ساعة على مسافة متر واحد من المصدر.
- ز ظل المصدر في الغرفة لمدة ستة أيام وحدث تلامس معه في أثناء ذلك.

التذييل الثامن خصائص المصادر المشعة

يبين هذا التذييل الخصائص النووية الأساسية للنويدات المشعة قيد النظر. ويشمل ذلك نصف عمر النويده، وثوابت الاضمحلال، والأنشطة النوعية، وإنتاج النيوترونات، والبارامترات النووية لمبتعثات النيوترونات الإشعاعية، وسلاسل الاضمحلال الإشعاعية، والحرجية، وقيم حد الحرجية، والسُمية الكيميائية. ويشمل ذلك أيضاً وصفاً للنهج المستخدم في النظر في الاضمحلال الإشعاعي، والنمو الداخلي للنواتج، والحرجية.

ثامناً- ١ - العمر النصفى والنشاط النوعي

يتضمن الجدول ٢٦ العمر النصفى ($T_{1/2}$) والنشاط النوعي (SA) لكل النويدات المشعة المعنية. وأخذت قيم الأعمار النصفية من منشور اللجنة الدولية للوقاية من الإشعاعات ٣٨ [٣٨].

الجدول ٢٦: العمر النصفى وثوابت الاضمحلال والأنشطة النوعية للنويدات المشعة

النشاط النوعي (بكريل/غرام)	العمر النصفى (ثانية)	العمر النصفى أ	النويده المشعة
3.59E+14	3.88E+08	12.3 a	H-3
1.29E+16	4.61E+06	53.3 d	Be-7
8.27E+08	5.05E+13	1.60E+6 a	Be-10
3.10E+19	1.22E+03	20.38 min	C-11
1.65E+11	1.81E+11	5.73E+3 a	C-14
5.37E+19	5.98E+02	9.965 min	N-13
3.52E+18	6.59E+03	109.77 min	F-18
2.31E+14	8.20E+07	2.60 a	Na-22
3.22E+17	5.40E+04	15.00 h	Na-24
1.98E+17	7.53E+04	20.91 h	Mg-28
7.11E+08	2.26E+13	7.16E+5 a	Al-26
1.43E+18	9.44E+03	157.3 min	Si-31
9.19E+11	1.42E+10	4.50E+2 a	Si-32
1.06E+16	1.24E+06	14.3 d	P-32
5.76E+15	2.19E+06	25.4 d	P-33
1.58E+15	7.55E+06	87.4 d	S-35
1.22E+09	9.49E+12	3.01E+5 a	Cl-36
4.92E+18	2.23E+03	37.21 min	Cl-38
3.73E+15	3.03E+06	35.02d	Ar-37
1.26E+12	8.48E+09	269 a	Ar-39
1.55E+18	6.58E+03	1.827 h	Ar-41
2.58E+05	4.04E+16	1.28E+9 a	K-40
2.23E+17	4.45E+04	12.36 h	K-42
1.19E+17	8.14E+04	22.6 h	K-43
2.31E+09	4.42E+12	1.40E+5 a	Ca-41
6.58E+14	1.41E+07	163 d	Ca-45

النشاط النوعي	العمر النصفى	العمر النصفى أ	النوية المشعة
(بكريل/غرام)	(ثانية)		
2.27E+16	3.91E+05	4.53 d	Ca-47
6.71E+17	1.41E+04	3.927 h	Sc-44
1.25E+15	7.24E+06	83.8 d	Sc-46
3.07E+16	2.89E+05	3.35 d	Sc-47
5.53E+16	1.57E+05	1.82 d	Sc-48
6.36E+12	1.49E+09	47.3 a	Ti-44
6.21E+15	1.40E+06	16.2 d	V-48
2.99E+14	2.85E+07	330 d	V-49
3.42E+15	2.39E+06	27.7 d	Cr-51
1.66E+16	4.83E+05	5.59 d	Mn-52
6.75E+07	1.17E+14	3.70E+6 a	Mn-53
2.87E+14	2.70E+07	312 d	Mn-54
8.03E+17	9.28E+03	2.5785 h	Mn-56
2.69E+17	2.98E+04	8.28 h	Fe-52
8.91E+13	8.51E+07	2.70 a	Fe-55
1.84E+15	3.84E+06	44.5 d	Fe-59
2.21E+09	3.15E+12	1.00E+5 a	Fe-60
1.20E+17	6.31E+04	17.54 h	Co-55
1.10E+15	6.80E+06	78.7 d	Co-56
3.13E+14	2.34E+07	271 d	Co-57
1.18E+15	6.12E+06	70.8 d	Co-58
2.18E+17	3.29E+04	9.15 h	Co-58m
4.18E+13	1.66E+08	5.27 a	Co-60
2.99E+09	2.37E+12	7.50E+4 a	Ni-59
2.19E+12	3.03E+09	96.0 a	Ni-63
7.08E+17	9.07E+03	2.520 h	Ni-65
1.43E+17	4.57E+04	12.701 h	Cu-64
2.79E+16	2.23E+05	2.58 d	Cu-67
3.05E+14	2.11E+07	244 d	Zn-65
1.77E+18	3.42E+03	57 min	Zn-69
1.22E+17	4.95E+04	13.76 h	Zn-69m
2.21E+16	2.82E+05	3.26 d	Ga-67
1.50E+18	4.08E+03	68.0 min	Ga-68
1.14E+17	5.08E+04	14.1 h	Ga-72
2.47E+14	2.49E+07	288 d	Ge-68
5.76E+15	1.02E+06	11.8 d	Ge-71
1.33E+17	4.07E+04	11.3 h	Ge-77
6.21E+16	9.33E+04	1.08 d	As-72
8.24E+14	6.94E+06	80.3 d	As-73
3.67E+15	1.54E+06	17.8 d	As-74
5.78E+16	9.50E+04	1.10 d	As-76
3.87E+16	1.40E+05	1.62 d	As-77
5.37E+14	1.04E+07	120 d	Se-75

النشاط النوعي	العمر النصفى	العمر النصفى ^أ	النوية المشعة
(بكريل/غرام)	(ثانية)		
2.58E+09	2.05E+12	6.50E+4 a	Se-79
9.41E+16	5.83E+04	16.2 h	Br-76
2.69E+16	2.01E+05	2.33 d	Br-77
4.01E+16	1.27E+05	1.47 d	Br-82
7.78E+08	6.62E+12	2.1E5 a	Kr-81
1.45E+13	3.38E+08	10.72 a	Kr-85
3.04E+17	1.61E+04	4.48 h	Kr-85m
1.05E+18	4.58E+03	76.3 min	Kr-87
3.12E+17	1.65E+04	4.58 h	Rb-81
6.75E+14	7.45E+06	86.2 d	Rb-83
1.75E+15	2.83E+06	32.8 d	Rb-84
3.02E+15	1.61E+06	18.6 d	Rb-86
3.24E+03	1.48E+18	4.7E+10 a	Rb-87
2.36E+15	2.16E+06	25.0 d	Sr-82
8.77E+14	5.60E+06	64.8 d	Sr-85
1.18E+18	4.18E+03	1.16 h	Sr-85m
4.75E+17	1.01E+04	2.805 h	Sr-87m
1.07E+15	4.36E+06	50.5 d	Sr-89
5.05E+12	9.18E+08	29.1 a	Sr-90
1.34E+17	3.42E+04	9.50 h	Sr-91
4.65E+17	9.76E+03	2.71 h	Sr-92
1.66E+16	2.89E+05	3.35 d	Y-87
5.13E+14	9.24E+06	107 d	Y-88
2.01E+16	2.31E+05	2.67 d	Y-90
9.07E+14	5.05E+06	58.5 d	Y-91
1.54E+18	2.98E+03	0.828 h	Y-91m
3.56E+17	1.27E+04	3.54 h	Y-92
1.23E+17	3.64E+04	10.1 h	Y-93
6.58E+14	7.21E+06	83.4 d	Zr-88
9.30E+07	4.83E+13	1.53E+6 a	Zr-93
7.94E+14	5.53E+06	64.0 d	Zr-95
7.07E+16	6.08E+04	16.90 h	Zr-97
1.05E+13	4.29E+08	13.6 a	Nb-93m
6.93E+09	6.40E+11	2.03E+4 a	Nb-94
1.45E+15	3.03E+06	35.1 d	Nb-95
9.94E+17	4.33E+03	72.1 min	Nb-97
4.07E+10	1.10E+11	3.50E+3 a	Mo-93
1.77E+16	2.38E+05	2.75 d	Mo-99
8.33E+14	5.27E+06	61.0 d	Tc-95m
1.18E+16	3.70E+05	4.28 d	Tc-96
1.41E+18	3.09E+03	0.858 h	Tc-96m
5.25E+07	8.20E+13	2.60E+6 a	Tc-97
5.72E+14	7.52E+06	87.0 d	Tc-97m

النشاط النوعي	العمر النصفى	العمر النصفى ^أ	النوية المشعة
(بكريل/غرام)	(ثانية)		
3.21E+07	1.32E+14	4.20E+6 a	Tc-98
6.27E+08	6.72E+12	2.13E+5 a	Tc-99
1.94E+17	2.17E+04	6.02 h	Tc-99m
1.72E+16	2.51E+05	2.90 d	Ru-97
1.19E+15	3.40E+06	39.3 d	Ru-103
2.49E+17	1.60E+04	4.44 h	Ru-105
1.24E+14	3.19E+07	1.01 a	Ru-106
3.05E+15	1.38E+06	16.0 d	Rh-99
4.09E+13	1.01E+08	3.20 a	Rh-101
4.47E+13	9.15E+07	2.90 a	Rh-102
2.29E+14	1.79E+07	207 d	Rh-102m
1.20E+18	3.37E+03	56.12 min	Rh-103m
3.13E+16	1.27E+05	1.47 d	Rh-105
2.76E+15	1.47E+06	17.0 d	Pd-103
1.90E+07	2.05E+14	6.50E+6 a	Pd-107
7.92E+16	4.83E+04	13.427 h	Pd-109
1.12E+15	3.54E+06	41.0 d	Ag-105
9.65E+11	4.01E+09	1.27E+2 a	Ag-108m
1.76E+14	2.16E+07	250 d	Ag-110m
5.84E+15	6.44E+05	7.45 d	Ag-111
9.56E+13	4.01E+07	1.27 a	Cd-109
8.61E+12	4.29E+08	13.6 a	Cd-113m
1.88E+16	1.93E+05	2.23 d	Cd-115
9.42E+14	3.85E+06	44.6 d	Cd-115m
1.54E+16	2.45E+05	2.83 d	In-111
6.19E+17	5.97E+03	1.658 h	In-113m
8.56E+14	4.28E+06	49.5 d	In-114m
2.25E+17	1.61E+04	4.486 h	In-115m
3.72E+14	9.94E+06	115 d	Sn-113
3.04E+15	1.18E+06	13.6 d	Sn-117m
1.39E+14	2.53E+07	293 d	Sn-119m
1.99E+12	1.73E+09	55.0 a	Sn-121m
3.04E+14	1.11E+07	129 d	Sn-123
4.01E+15	8.33E+05	9.64 d	Sn-125
1.05E+09	3.15E+12	1.00E+5 a	Sn-126
1.47E+16	2.33E+05	2.70 d	Sb-122
6.47E+14	5.20E+06	60.2 d	Sb-124
3.82E+13	8.74E+07	2.77 a	Sb-125
3.09E+15	1.07E+06	12.4 d	Sb-126
2.35E+15	1.47E+06	17.0 d	Te-121
2.59E+14	1.33E+07	154 d	Te-121m
3.27E+14	1.04E+07	120 d	Te-123m
6.66E+14	5.01E+06	58.0 d	Te-125m

النشاط النوعي	العمر النصفى	العمر النصفى ^أ	النويذة المشعة
(بكريل/غرام)	(ثانية)		
9.76E+16	3.37E+04	9.35 h	Te-127
3.49E+14	9.42E+06	109 d	Te-127m
7.75E+17	4.18E+03	69.6 min	Te-129
1.11E+15	2.90E+06	33.6 d	Te-129m
2.95E+16	1.08E+05	1.25 d	Te-131m
1.12E+16	2.82E+05	3.26 d	Te-132
7.14E+16	4.75E+04	13.2 h	I-123
9.32E+15	3.61E+05	4.18 d	I-124
6.43E+14	5.19E+06	60.1 d	I-125
2.95E+15	1.12E+06	13.0 d	I-126
6.53E+06	4.95E+14	1.57E+7 a	I-129
4.59E+15	6.95E+05	8.04 d	I-131
3.82E+17	8.28E+03	2.30 h	I-132
4.19E+16	7.49E+04	20.8 h	I-133
9.87E+17	3.16E+03	52.6 min	I-134
1.30E+17	2.38E+04	6.61 h	I-135
4.73E+16	7.24E+04	20.1 h	Xe-122
4.53E+17	7.49E+03	2.08 h	Xe-123
1.04E+15	3.15E+06	36.41d	Xe-127
3.10E+15	1.03E+06	11.9d	Xe-131m
6.92E+15	4.53E+05	5.245d	Xe-133
9.45E+16	3.27E+04	9.09 h	Xe-135
2.79E+16	1.16E+05	1.34 d	Cs-129
3.80E+15	8.37E+05	9.69 d	Cs-131
5.65E+15	5.60E+05	6.48 d	Cs-132
4.79E+13	6.50E+07	2.06 a	Cs-134
2.98E+17	1.04E+04	2.90 h	Cs-134m
4.26E+07	7.25E+13	2.30E+6 a	Cs-135
2.71E+15	1.13E+06	13.1 d	Cs-136
3.22E+12	9.46E+08	30.0 a	Cs-137
3.12E+15	1.02E+06	11.8 d	Ba-131
9.30E+12	3.37E+08	10.7 a	Ba-133
2.24E+16	1.40E+05	1.62 d	Ba-133m
2.72E+15	1.10E+06	12.7 d	Ba-140
1.61E+09	1.89E+12	6.00E+4 a	La-137
2.05E+16	1.45E+05	1.68 d	La-140
2.52E+14	1.19E+07	138 d	Ce-139
1.05E+15	2.81E+06	32.5 d	Ce-141
2.45E+16	1.19E+05	1.38 d	Ce-143
1.18E+14	2.45E+07	284 d	Ce-144
4.27E+16	6.89E+04	19.13 h	Pr-142
2.48E+15	1.18E+06	13.6 d	Pr-143
2.99E+15	9.50E+05	11.0 d	Nd-147

النشاط النوعي	العمر النصفى	العمر النصفى ^أ	النوية المشعة
(بكريل/غرام)	(ثانية)		
4.50E+17	6.23E+03	1.73 h	Nd-149
1.27E+14	2.29E+07	265 d	Pm-143
9.24E+13	3.14E+07	363 d	Pm-144
5.16E+12	5.58E+08	17.7 a	Pm-145
3.44E+13	8.26E+07	2.62 a	Pm-147
7.90E+14	3.57E+06	41.3 d	Pm-148m
1.47E+16	1.91E+05	2.21 d	Pm-149
2.71E+16	1.02E+05	1.18 d	Pm-151
9.80E+13	2.94E+07	340 d	Sm-145
8.49E+02	3.34E+18	1.1E+11 a	Sm-147
9.74E+11	2.84E+09	90.0 a	Sm-151
1.62E+16	1.68E+05	1.95 d	Sm-153
1.37E+15	2.07E+06	24.0 d	Eu-147
5.99E+14	4.71E+06	54.5 d	Eu-148
3.48E+14	8.04E+06	93.1 d	Eu-149
6.12E+16	4.54E+04	12.62 h	Eu-150a
2.58E+12	1.08E+09	34.2 a	Eu-150b
6.55E+12	4.19E+08	13.3 a	Eu-152
8.18E+16	3.36E+04	9.32 h	Eu-152m
9.76E+12	2.78E+08	8.80 a	Eu-154
1.72E+13	1.56E+08	4.96 a	Eu-155
2.04E+15	1.31E+06	15.2 d	Eu-156
6.85E+14	4.17E+06	48.3 d	Gd-146
9.61E+11	2.93E+09	93.0 a	Gd-148
1.30E+14	2.09E+07	242 d	Gd-153
3.93E+16	6.68E+04	18.56 h	Gd-159
5.62E+11	4.73E+09	1.50E+2 a	Tb-157
5.58E+11	4.73E+09	1.50E+2 a	Tb-158
4.17E+14	6.25E+06	72.3 d	Tb-160
2.11E+14	1.24E+07	144 d	Dy-159
3.01E+17	8.40E+03	2.334 h	Dy-165
8.56E+15	2.94E+05	3.40 d	Dy-166
2.60E+16	9.68E+04	1.12 d	Ho-166
6.64E+10	3.78E+10	1.20E+3 a	Ho-166m
3.07E+15	8.04E+05	9.30 d	Er-169
9.01E+16	2.71E+04	7.52 h	Er-171
3.13E+15	7.98E+05	9.24 d	Tm-167
2.20E+14	1.11E+07	129 d	Tm-170
4.03E+13	6.05E+07	1.92 a	Tm-171
8.93E+14	2.76E+06	32.0 d	Yb-169
6.59E+15	3.62E+05	4.19 d	Yb-175
4.19E+15	5.79E+05	6.70 d	Lu-172
5.58E+13	4.32E+07	1.37 a	Lu-173

النشاط النوعي	العمر النصفى	العمر النصفى ^أ	النوية المشعة
(بكريل/غرام)	(ثانية)		
2.30E+13	1.04E+08	3.31 a	Lu-174
1.95E+14	1.23E+07	142 d	Lu-174m
4.07E+15	5.80E+05	6.71 d	Lu-177
4.11E+13	5.90E+07	1.87 a	Hf-172
3.94E+14	6.05E+06	70.0 d	Hf-175
6.29E+14	3.66E+06	42.4 d	Hf-181
8.08E+06	2.84E+14	9.00E+6 a	Hf-182
2.96E+17	7.92E+03	2.2 h	Ta-178b
4.06E+13	5.74E+07	1.82 a	Ta-179
2.31E+14	9.94E+06	115 d	Ta-182
1.25E+15	1.87E+06	21.7 d	W-178
2.21E+14	1.05E+07	121 d	W-181
3.48E+14	6.49E+06	75.1 d	W-185
2.59E+16	8.60E+04	23.9 h	W-187
3.70E+14	6.00E+06	69.4 d	W-188
6.91E+14	3.28E+06	38.0 d	Re-184
1.59E+14	1.43E+07	165 d	Re-184m
6.87E+15	3.27E+05	3.78 d	Re-186
1.42E+03	1.58E+18	5.0E+10 a	Re-187
3.63E+16	6.11E+04	16.98 h	Re-188
2.53E+16	8.73E+04	1.01 d	Re-189
2.78E+14	8.12E+06	94.0 d	Os-185
1.64E+15	1.33E+06	15.4 d	Os-191
4.67E+16	4.68E+04	13.0 h	Os-191m
2.00E+16	1.08E+05	1.25 d	Os-193
1.14E+13	1.89E+08	6.00 a	Os-194
1.92E+15	1.15E+06	13.3 d	Ir-189
2.10E+15	1.05E+06	12.1 d	Ir-190
3.40E+14	6.39E+06	74.0 d	Ir-192
3.12E+16	6.89E+04	19.15 h	Ir-194
2.52E+15	8.81E+05	10.2 d	Pt-188
9.03E+15	2.42E+05	2.80 d	Pt-191
1.37E+12	1.58E+09	50.0 a	Pt-193
5.78E+15	3.74E+05	4.33 d	Pt-193m
6.16E+15	3.47E+05	4.02 d	Pt-195m
3.22E+16	6.59E+04	18.3 h	Pt-197
3.74E+17	5.66E+03	94.4 min	Pt-197m
3.41E+16	6.34E+04	17.6 h	Au-193
1.52E+16	1.42E+05	1.64 d	Au-194
1.35E+14	1.58E+07	183 d	Au-195
9.07E+15	2.32E+05	2.69 d	Au-198
7.73E+15	2.71E+05	3.14 d	Au-199
2.62E+11	8.20E+09	2.60E+2 a	Hg-194

النشاط النوعي	العمر النصفى	العمر النصفى ^أ	النويذة المشعة
(بكريل/غرام)	(ثانية)		
1.43E+16	1.49E+05	1.73 d	Hg-195m
9.18E+15	2.31E+05	2.67 d	Hg-197
2.47E+16	8.57E+04	23.8 h	Hg-197m
5.11E+14	4.03E+06	46.6 d	Hg-203
2.22E+16	9.42E+04	1.09 d	Tl-200
7.90E+15	2.63E+05	3.04 d	Tl-201
1.96E+15	1.05E+06	12.2 d	Tl-202
1.72E+13	1.19E+08	3.78 a	Tl-204
6.13E+16	3.38E+04	9.40 h	Pb-201
2.18E+08	9.46E+12	3.00E+5 a	Pb-202
1.10E+16	1.87E+05	2.17 d	Pb-203
4.51E+06	4.51E+14	1.43E+7 a	Pb-205
2.83E+12	7.03E+08	22.3 a	Pb-210
5.14E+16	3.83E+04	10.64 h	Pb-212
1.54E+15	1.32E+06	15.3 d	Bi-205
3.76E+15	5.39E+05	6.24 d	Bi-206
1.68E+12	1.20E+09	38.0 a	Bi-207
4.59E+15	4.33E+05	5.01 d	Bi-210
2.10E+07	9.46E+13	3.00E+6 a	Bi-210m
5.42E+17	3.63E+03	60.55 min	Bi-212
1.67E+14	1.19E+07	138 d	Po-210
7.62E+16	2.60E+04	7.21 h	At-211
5.69E+15	3.30E+05	3.8235d	Rn-222
1.90E+15	9.85E+05	11.4 d	Ra-223
5.89E+15	3.16E+05	3.66 d	Ra-224
1.45E+15	1.28E+06	14.8 d	Ra-225
3.66E+10	5.05E+10	1.60E+3 a	Ra-226
1.01E+13	1.81E+08	5.75 a	Ra-228
2.15E+15	8.64E+05	10.0 d	Ac-225
2.67E+12	6.87E+08	21.8 a	Ac-227
8.29E+16	2.21E+04	6.13 h	Ac-228
1.14E+15	1.62E+06	18.7 d	Th-227
3.04E+13	6.02E+07	1.91 a	Th-228
7.87E+09	2.31E+11	7.34E+3 a	Th-229
7.47E+08	2.43E+12	7.70E+4 a	Th-230
1.97E+16	9.16E+04	1.06 d	Th-231
4.07E+03	4.42E+17	1.4E+10 a	Th-232
8.56E+14	2.08E+06	24.1 d	Th-234
1.21E+15	1.50E+06	17.4 d	Pa-230
1.75E+09	1.03E+12	3.27E+4 a	Pa-231
7.68E+14	2.33E+06	27.0 d	Pa-233
1.01E+15	1.80E+06	20.8 d	U-230
7.92E+11	2.27E+09	72.0 a	U-232

النشاط النوعي	العمر النصفى	العمر النصفى ^أ	النويذة المشعة
(بكريل/غرام)	(ثانية)		
3.59E+08	4.98E+12	1.58E+5 a	U-233
2.32E+08	7.69E+12	2.44E+5 a	U-234
8.00E+04	2.22E+16	7.04E+8 a	U-235
2.40E+06	7.38E+14	2.34E+7 a	U-236
1.24E+04	1.41E+17	4.47E+9 a	U-238
5.21E+13	3.41E+07	1.08 a	Np-235
4.88E+08	3.63E+12	1.15E+5 a	Np-236b
2.18E+16	8.10E+04	22.5 h	Np-236a
2.61E+07	6.75E+13	2.14E+6 a	Np-237
8.56E+15	2.04E+05	2.36 d	Np-239
1.97E+13	8.99E+07	2.85 a	Pu-236
4.50E+14	3.91E+06	45.3 d	Pu-237
6.34E+11	2.77E+09	87.7 a	Pu-238
2.30E+09	7.60E+11	2.41E+4 a	Pu-239
8.43E+09	2.06E+11	6.54E+3 a	Pu-240
3.81E+12	4.54E+08	14.4 a	Pu-241
1.45E+08	1.19E+13	3.76E+5 a	Pu-242
6.57E+05	2.60E+15	8.26E+7 a	Pu-244
1.27E+11	1.36E+10	4.32E+2 a	Am-241
3.60E+11	4.79E+09	1.52E+2 a	Am-242m
7.38E+09	2.33E+11	7.38E+3 a	Am-243
4.70E+16	3.64E+04	10.1 h	Am-244
7.45E+14	2.33E+06	27.0 d	Cm-240
6.11E+14	2.83E+06	32.8 d	Cm-241
1.22E+14	1.41E+07	163 d	Cm-242
1.91E+12	8.99E+08	28.5 a	Cm-243
3.00E+12	5.71E+08	18.1 a	Cm-244
6.35E+09	2.68E+11	8.50E+3 a	Cm-245
1.14E+10	1.49E+11	4.73E+3 a	Cm-246
3.43E+06	4.92E+14	1.56E+7 a	Cm-247
1.57E+08	1.07E+13	3.39E+5 a	Cm-248
3.88E+10	4.35E+10	1.38E+3 a	Bk-247
6.06E+13	2.76E+07	320 d	Bk-249
5.83E+13	2.89E+07	334 d	Cf-248
1.52E+11	1.10E+10	3.50E+2 a	Cf-249
4.04E+12	4.13E+08	13.1 a	Cf-250
5.87E+10	2.83E+10	8.98E+2 a	Cf-251
1.99E+13	8.33E+07	2.64 a	Cf-252
1.07E+15	1.54E+06	17.8 d	Cf-253
3.14E+14	5.23E+06	60.5 d	Cf-254

أ بالسنوات (a)، والأيام (d)، والساعات (h) والدقائق (min)

ثامناً- ٢- إنتاج النيوترونات

تنبعث النيوترونات في العادة من المواد المشعة نتيجة للانشطار التلقائي أو تفاعل (ألفا - نيوترون). ويمكن أن تنطوي مبعثات النيوترونات على خطر داخلي وخارجي على السواء. وفي حالة الأخذ الداخلي لمادة مشتتة محتوية على نويدات مشعة منشطرة تلقائياً، استخدمت معاملات تحويل الجرعة المأخوذة من المرجعين [٤٩، و ٥٠] وأخذت في الحسبان الجرعة الداخلية الناتجة عن النيوترونات والفوتونات الفورية والمتأخرة وجسيمات بيتا الناشئة عن الانشطار. وتتوقف حصيلة نيوترونات مصادر تفاعل (ألفا - نيوترون) على شكلها وتركيبها الفيزيائي. وتبلغ الحصيلة أعلى مستوى لها في المواد الصلبة ولا تُذكر في المصادر المشتتة. ولذلك تتحول تلك المصادر بعد تشتتها إلى خليط من الحبيبات المبعثة لجسيمات ألفا بدون حصيلة نيوترونية تُذكر. ويشكل المصدر بعد ذلك نفس الخطر الداخلي الذي يشكله الجزء المشتت المبعث لألفا من مادة المصدر. وينظر النهج المبني على الخبرة والنهج القائم على المخاطر على السواء في المواد المشعة المبعثة للنيوترونات كمصدر خاص من مصادر التعرض الخارجي.

واقترض في النهج المبني على الخبرة أن حصيلة نيوترونات خليط البلوتونيوم - ٢٣٩/البريليوم - ٩ والأميريثيوم - ٢٤١/البريليوم - ٩ (النيوترونات الناشئة عن تفاعل (ألفا - نيوترون)) تساوي 6×10^{-10} نيوترون/(بكريل × ثانية) [٤٧] وحسبت معاملات تحويل الجرعة على النحو المبين في التذييل الرابع. وفيما يتعلق بالكاليفورنيوم - ٢٥٢ (الانشطار التلقائي) استخدم معامل تحويل معدل الجرعة الخارجية نقلاً عن المرجع [٤٦].

ويتضمن الجدول ٢٧ حصائل مصادر النيوترونات المستخدمة في النهج القائم على المخاطر. وتناول هذا النهج نويدات الكوريوم - ٢٤٨، والكاليفورنيوم - ٢٥٠، والكاليفورنيوم - ٢٥٢، والكاليفورنيوم ٢٥٤ المنشطرة تلقائياً. وتختلف أطياف طاقة نيوترونات الانشطار باختلاف النوى، ولكن هذه الفروق أصغر من أن تقضي إلى فروق ملموسة في معاملات تحويل الجرعة في حالة الكوريوم - ٢٤٨ والكاليفورنيوم - ٢٥٠ والكاليفورنيوم - ٢٥٢ والكاليفورنيوم ٢٥٤. ولذلك استخدم طيف الطاقة غير المعدل للنيوترونات الناتجة عن انشطار الكاليفورنيوم - ٢٥٢ نقلاً عن المرجع [٤٨] لتقدير معاملات تحويل جرعة جميع النويدات المشعة المنشطرة تلقائياً. ويحدث أيضاً ابتعاث للفوتونات الفورية والمتأخرة وكذلك جسيمات بيتا بعد الانشطار التلقائي على النحو المبين في المرجع [٦٥]. وتحمل هذه الإشعاعات جزءاً كبيراً من طاقة الانشطار التلقائي وتشكل هي الأخرى خطراً خارجياً. وتنبعث مصادر البلوتونيوم - ٢٣٩/البريليوم - ٩ والأميريثيوم - ٢٤١/البريليوم - ٩ نيوترونات ناتجة عن تفاعل (ألفا - نيوترون) مع البريليوم. ويؤدي هذا التفاعل في البريليوم - ٩ إلى انشطار ٤,٤ ميغا إلكترون فولط من الفوتونات، وتبلغ النسبة بين الفوتونات والنيوترونات ما يقرب من ٠,٦ إلى ١ [٦٦]. ويتوقف طيف الطاقة للنيوترونات المتولدة في تفاعل (ألفا - نيوترون) على طاقة جسيمة ألفا التفاعلية. على أن الفرق بين طاقة جسيمات ألفا في البلوتونيوم - ٢٣٩ ($E_{\alpha} = ٥,١٥$ ميغا إلكترون فولط) وطاقة جسيمات ألفا في الأميريثيوم - ٢٤١ ($E_{\alpha} = ٥,٤٥$ ميغا إلكترون فولط) صغير بالقدر الذي لا ينجم عنه سوى فروق ضئيلة بين طيف إلكترونات البلوتونيوم - ٢٣٩/البريليوم - ٩ والأميريثيوم - ٢٤١/البريليوم - ٩. ولذلك استخدم طيف الطاقة غير المعدل للنيوترونات الناتجة عن مصدر الأميريثيوم - ٢٤١/البريليوم - ٩ حسب ما هو وارد في المرجع [٤٨] لحساب معاملات تحويل جرعة هذين المصدرين.

الجدول ٢٧: البارامترات النووية لمبتعثات النيوترونات المشعة

البارامتر النووي		منشأ النيوترونات	مصدر النيوترونات
حصيلة النيوترونات (نيوترون/بكريل × ثانية)	حصيلة طاقة الفوتونات ^أ ميغا إلكترون فولت/(بكريل/ثانية)		
1.3E+00 [38, 65]	2.6E-01 [38]	انشطار تلقائي	كوريوم - ٢٤٨
1.1E-02 [38, 65]	2.7E-03 [38]	انشطار تلقائي	كاليفورنيوم - ٢٥٠
4.7E-01 [38, 65]	1.1E-01 [38]	انشطار تلقائي	كاليفورنيوم - ٢٥٢
1.7E+01 [38, 65]	3.9E+00 [38]	انشطار تلقائي	كاليفورنيوم - ٢٥٤
9.4E-04 [38, 65]	6.0E-05 [67]	تفاعل (ألفا - نيوترون)	بلوتونيوم - ٢٣٩/بريليوم-٣٩
3.2E-02 [38, 65]	7.5E-05 [38]	تفاعل (ألفا - نيوترون)	أميريشيوم - ٢٤١/بريليوم-٣٩

أ يشمل هذا البارامتر الفوتونات الناشئة عن اضمحلال ألفا وبيتا والناشئة أيضاً عن الانشطار التلقائي أو تفاعل (ألفا - نيوترون).

ب النشاط المشار إليه في الجدول هو نشاط النويدات المشعة المبتعثة لألفا، مثل البلوتونيوم - ٢٣٩ أو الأميريشيوم - ٢٤١.

ثامناً - ٣ - سلاسل الاضمحلال المشع

تحدّد جميع قيم D من حيث نشاط المصدر عند تصنيعه. ويشار إلى ذلك بأنه النشاط الأولي للنويدات المشعة الأم في المصدر أو يشار إليه اختصاراً بأنه النشاط الأولي للمصدر. ومراعاة للتغيرات التي تحدث في الخواص الإشعاعية للنويدات المشعة في المصدر بمرور الوقت فقد حسبت قيم D لأخطر خليط من النويدات المشعة الأم ونواتجها الوليدة حتى الحد الأقصى للعمر البالغ ١٠ سنوات.

ثامناً-٣-١ - النهج المبني على الخبرة

يتناول النهج المبني على الخبر الاضمحلال والنمو الداخلي بطريقة مبسّطة ومتحفظة حيث افترض أن كل النواتج الوليدة كانت في حالة توازن مع النشاط الأولي للنويدات الأم في أثناء التعرض البشري في حالة الطوارئ. وكان الاستثناء من ذلك هو الاضمحلال المتسلسل للبلوتونيوم - ٢٤١/الأميريشيوم - ٢٤١. وأضيف ببساطة النمو الداخلي للأميريشيوم - ٢٤١ على امتداد ١٠ سنوات إلى الكمية الأولية من البلوتونيوم - ٢٤١. ولذلك افترض عند حساب قيم D وجود ٠,٠٢ بكريل من الأميريشيوم - ٢٤١ أيضاً مع كل بكريل من البلوتونيوم - ٢٤١ في بداية التعرض.

ثامناً-٣-٢ - النهج القائم على المخاطر

يحسب النهج القائم على المخاطر الاضمحلال والنمو الداخلي عن طريق استخدام معامل تحويل الجرعة المعدّل على النحو المبين أدناه. وأسندت قيمة معامل تحويل الجرعة المعدّلة للنشاط الأولي وأخذ في الحسبان اضمحلال النويدات المشعة الأم والنمو الداخلي للنواتج وخواصها النووية. وافترض حدوث تعرض من المصدر عندما احتوى على أخطر خليط من النويدات المشعة المتولدة عن اضمحلال النويدات المشعة الأم. مثال ذلك أن مصدر الراديوم - ٢٢٥ له أعلى معامل لتحويل الجرعة المعدّلة لتشيع المنطقة السنخية من الجهاز التنفسي (النسيج R٣) بعد تسعة أيام وتشيع النخاع الأحمر (النسيج ٢) بعد ١٦ يوماً. والبلوتونيوم - ٢٤١ هو الأخطر بعد ١٠ سنوات عندما يفترض وجود ٠,٦٢ بكريل من البلوتونيوم - ٢٤١ و ٠,٠١٢ بكريل من الأميريشيوم - ٢٤١ لكل بكريل من النشاط الأولي للبلوتونيوم - ٢٤١. وفيما يلي وصف تفصيلي للأسلوب المستخدم في حساب الاضمحلال المتسلسل وفقاً للنهج القائم على المخاطر.

وتنتج النويدة المشعة الأم نواتج وليدة في أثناء الاضمحلال المشع. وإذا كانت النواتج مشعة فإنها تشكّل مع النويدة المشعة الأم سلسلة اضمحلال مشع. وقد يعبر عن هذه السلسلة على النحو التالي:



حيث:

“P” و “D” هما نواتا النويدة المشعة الأم و الوليدة (النتيجة)؛

λ_p و λ_D هما ثابتا الاضمحلال للنويدة المشعة الأم والوليدة، s^{-1} .

ويبدأ اضمحلال النويدة المشعة الأوليّة (الأم) عندما يكون t صفراً في الوقت الذي يصنّع فيه المصدر ويكون عدد نوى النويدة المشعة الوليدة صفراً، $N_D(0) = 0$. وعندما يكون العمر $t < \infty$ فإن المصدر يحتوي على خليط من نوى الاضمحلال المتسلسل. وتعتبر أنشطة النويدة المشعة الأم والوليدة في المصدر دالة للزمن:

$$(٧٣) \quad A_p(t) = A_p(0) \times \exp(-\lambda_p t)$$

$$(٧٤) \quad A_D(t) = A_p(0) \frac{\lambda_D}{\lambda_D - \lambda_p} [\exp(-\lambda_p t) - \exp(-\lambda_D t)]$$

حيث:

$A_p(t)$ هو نشاط النويدة المشعة الأم عند الزمن t ، بكريل؛

$A_D(t)$ هو نشاط النويدة المشعة الأم عند الزمن t ، بكريل؛

$A_p(0)$ هو النشاط الأولي للنويدة المشعة الأم عند $t = 0$ ، بكريل؛

λ_p و λ_D هما ثابتا اضمحلال النويدة المشعة الأم والوليدة على التوالي، s^{-1} .

وعندما يكون العمر $t < \infty$ فإن المصدر يسبب تعرضاً يسفر عن جرعة $D(t)$ تبعاً لإشعاعية النويدات المشعة المتسلسلة:

$$(٧٥) \quad D(t) = [A_p(t) \times CF_p + A_D(t) \times CF_D] \times F$$

حيث:

CF_p و CF_D هما معاملات تحويل جرعة النويدة المشعة الأم والوليدة (معاملات تحويل الجرعة الممتصة، والجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية، إلخ)؛

F هو ناتج عوامل التعرض وفقاً للسيناريو المعين؛

λ_p و λ_D هما ثابتا اضمحلال النويدات المشعة الأم والوليدة على التوالي، s^{-1} .

وإذا كانت الجرعة $D(t)$ منمّطة بالنشاط الأولي للمصدر $A_p(0)$ فيمكن التعبير عنها بالمعادلة التالية:

$$(٧٦) \quad D(t) = A_p(0) \times CF_{P+D}(t) \times F$$

حيث:

$A_p(0)$ هو النشاط الأولي للنويذة المشعة الأم عند $t=0$ صفر، بكريل؛

F هو ناتج معاملات التعرض وفقاً للسيناريو المعين؛

$CF_{P+D}(t)$ هو معامل تحويل الجرعة المعدلة لوحدة النشاط الأولي للنويذة المشعة الأم عند العمر t عندما يخرج المصدر عن نطاق السيطرة). وبعد أخذ المعادلات (٧٣)، و(٧٤)، و(٧٥)، و(٧٦) في الحسبان، يمكن كتابة ذلك بالصيغة التالية:

$$(٧٧) \quad CF_{P+D}(t) = CF_p \times \exp(-\lambda_p t) + CF_D \frac{\lambda_D}{\lambda_D - \lambda_p} [\exp(-\lambda_p t) - \exp(-\lambda_D t)]$$

وتبلغ قيمة $D(t)$ حداً أقصى عندما يكون $t = t_{\max}$ وتبلغ أيضاً قيمة $CF_{P+D}(t)$ حداً أقصى. وتتوقف قيمة t_{\max} على خواص النويدات المتسلسلة وتتقيد بالحد الأقصى للعمر البالغ ١٠ سنوات للمصدر:

$$(٧٨) \quad t_{\max} = \begin{cases} 0, & \text{if } \tau \leq 0; \\ \tau, & \text{if } 0 < \tau < 10 \text{ years}; \\ 10 \text{ years}, & \text{if } 10 \text{ years} < \tau, \end{cases}$$

و

$$(٧٩) \quad \tau = \begin{cases} 0, & \text{if } CF_D \lambda_D \leq CF_p \lambda_p; \\ \frac{1}{\lambda_p - \lambda_D} \ln \left[\left(\frac{CF_p}{CF_D} + 1 \right) \frac{\lambda_p}{\lambda_D} - \frac{CF_p}{CF_D} \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_D} \right)^2 \right], & \text{if } CF_D \lambda_D > CF_p \lambda_p. \end{cases}$$

وتحدد القيمة القصوى لمعامل تحويل الجرعة المعدلة للنشاط الأولي لنويذة مشعة أم في مصدر CF_{P+} عن طريق المعادلة التالية:

$$(٨٠) \quad CF_{P+} = \max_{t>0} CF_{P+D}(t) = \begin{cases} CF_p, & \text{if } CF_D \lambda_D \leq CF_p \lambda_p; \\ CF_{P+D}(t_{\max}), & \text{if } CF_D \lambda_D > CF_p \lambda_p, \end{cases}$$

حيث قيمة $CF_{P+D}(t_{\max})$ تحدها المعادلة (٧٧) لقيمة $t = t_{\max}$ المحددة بالمعادلة (٧٨).

وينشأ عن بعض النويدات المشعة الواردة في الجدول ٢٦ أكثر من ناتج. وتنطبق اللوغاريتمات المبيّنة أعلاه لقطاع من سلسلة مشعة بسيطة أيضاً على الحالة الأعم وفقاً للعلاقة التالية:

$$(٨١) \quad A_n(t) = A_p(0) \frac{\lambda_n}{\lambda_p} \sum_{i=0}^n q_{n,i} \exp(-\lambda_i t), \quad n=0, 1, \dots$$

حيث:

$q_{n,i}$ هي المعاملات المرتبطة من خلال معادلة متكررة

$$(٨٢) \quad q_{n,i} = -\frac{\lambda_{n-1}}{\lambda_i - \lambda_n} q_{n-1,i}, \quad i = 0, \dots, n-1, \text{ and } q_{0,0} = 1;$$

$$(٨٣) \quad q_{n,n} = -\sum_{i=0}^{n-1} q_{n,i}$$

λ_i هو ثابت اضمحلال عدد النواتج i في السلسلة التي يكون فيها المؤشر القياسي للنويدات المشعة الأم صفرًا.

واستخدم اللوغاريتم الممتد لتقييم معاملات تحويل الجرعة للتورانيوم - ١٣١ شبه المستقر، والراديووم - ٢٢٤، والراديووم - ٢٢٥، والراديووم - ٢٢٨، والأكتينيوم - ٢٢٧، والثوريوم - ٢٢٧، والثوريوم - ٢٢٨، والثوريوم - ٢٢٩، والثوريوم - ٢٣٢، والبروتكتينيوم - ٢٣٠، والبروتكتينيوم - ٢٣١، واليورانيوم - ٢٣٢، واليورانيوم - ٢٣٤، واليورانيوم - ٢٣٨، والأميريثيوم - ٢٤٢ شبه المستقر.

ثامناً-٤ - الحرجية

تم أيضاً عند تحديد قيم D تقييم النشاط الأولي الذي يعتبر خطيراً في مختلف سيناريوهات التعرض استناداً إلى معيار لكفالة عدم وجود ما يدعو إلى القلق من حدوث حرجية، وذلك بوضع حد لنشاط الحرجية (A_c). ويمكن للكثير من النويدات المشعة التي يزيد عددها الذري (Z) على ٨٧ أن تدعم تفاعلاً انشطاريًا متسلسلاً. وتضع المراجع [٦٨ و ٦٩ و ٧٠] حدوداً للكتلة دون الحرجية التي يمكن عندها استخدام النظائر بأمان دون التعرض لخطر الحرجية. ويتضمن الجدول ٢٨ تلك الحدود بالإضافة إلى حد الحرجية بعد تحويله إلى نشاط A_c . وبالإضافة إلى ذلك، يمكن لأي فريق يتمتع بكفاءة تقنية كبيرة أن يستخدم البلوتونيوم الشديد الإثراء في بناء جهاز تفجير نووي. واعترافاً بإمكانية القيام بذلك، تتضمن الوثيقة INFCIRC/225/Rev.4 المعنونة "الحماية المادية للمواد النووية والمرافق النووية" [٧١] توصيات بشأن الحماية المادية للمواد النووية من السحب دون إذن وحماية المواد أو المرافق النووية من التخريب. ووضع هذا المنشور الصادر عن الوكالة [٧١] إرشادات بشأن ثلاث فئات من المواد النووية. ويرتبط بكل فئة من هذه الفئات الثلاث مستوى موصى به لتدابير الحماية النووية على أساس الخطر المحتمل لتلك المواد المستخدمة في التفجير النووي. ووفقاً للمرجع [٧١] فإن "فئة المواد النووية الثانية" هي أقل مستوى يتطلب اتخاذ تدابير أمنية صارمة ويقضي استجابة فورية لاستعادة السيطرة فوراً على المواد المفقودة أو المسروقة. ويبين الجدول ٢٨ أيضاً المعايير التي تستند إليها "فئة المواد النووية الثانية".

وعند تحديد قيمة حد نشاط الحرجية A_c ، أعطيت الأولوية للمعايير المعتمدة من المجتمع الدولي في المرجع [٧١]. ويتبين من الجدول ٢٨ أن معايير الإدراج في "فئة المواد النووية الثانية"، باستثناء البلوتونيوم - ٢٤١، أقل من حدود الحرجية الواردة في المرجعين [٦٨ و ٦٩]. ويتعلق حد حرجية البلوتونيوم - ٢٤١ الوارد في المرجع [٦٩] بمحلول مائي ولا ينطبق ذلك إلا في حالة تحديد قيمة D_2 (المادة المشتتة). ويُتوقع أن يزيد حد الحرجية للحالة الصلبة المستخدمة في تحديد الكمية الخطرة من مادة غير مشتتة (قيم D_1) عن حد الحرجية للمحلول المائي بمقدار خمسة أضعاف أو أكثر. ومن شأن ذلك أن يجعل حد حرجية الشكل الصلب يتجاوز معيار الإدراج في "فئة المواد النووية الثانية". ولذلك فقد استخدمت معايير إدراج البلوتونيوم أو اليورانيوم الشديد الإثراء أو اليورانيوم - ٢٣٥ في "فئة المواد النووية الثانية" عند تحديد قيم D . واستخدمت القيم الدنيا المأخوذة من المراجع [٦٨ و ٦٩ و ٧٠] كمعايير لخطر الحرجية في حالة النويدات المشعة التي لم تتناولها الوثيقة INFCIRC/225/Rev.4. وافترض أن أي مقدار من النويدات المشعة التي يقل عددها الذري Z عن ٨٧

الواردة في الجدول ٢٦ يكون غير محدود بالنسبة لخطر الحرجية باستثناء الرادون - ٢٢٢ الذي ترد قيمة حد نشاط حرجيته A_C في الجدول ٢٨.

الجدول ٢٨: قيم حدود الحرجية

معايير الحرجية المستخدمة في قيم D		معايير فئة المواد النووية	تقديرات حد الحرجية			النويدات المشعة
A_C	M_C	الثانية [٧١]	المرجع [٧٠]	المرجع [٦٩]	المرجع [٦٨]	
(تيرا بكريل)	(غرام)	(غرام)	(غرام)	(غرام)	(غرام)	
8.5E+04	1.5E+01		1.5E+01			Rn-222
2.9E+04	1.5E+01		1.5E+01			Ra-223
8.8E+04	1.5E+01		1.5E+01			Ra-224
2.2E+04	1.5E+01		1.5E+01			Ra-225
غير محدود	غير محدود		غير محدود			Ra-226
1.5E+02	1.5E+01		^٢ 1.5E+01			Ra-228
غير محدود	غير محدود		غير محدود			Ac-227
4.0E+01	1.5E+01		1.5E+01			Ac-225
1.2E+06	1.5E+01		^٢ 1.5E+01			Ac-228
1.7E+04	1.5E+01		^٢ 1.5E+01			Th-227
غير محدود	غير محدود		غير محدود			Th-228
غير محدود	غير محدود		غير محدود			Th-229
غير محدود	غير محدود		غير محدود			Th-230
3.0E+05	1.5E+01		^٢ 1.5E+01			Th-231
غير محدود	غير محدود		غير محدود			Th-232
1.3E+04	1.5E+01		^٢ 1.5E+01			Th-234
1.8E+04	1.5E+01		^٢ 1.5E+01			Pa-230
1.8E+01	1.0E+04		1.0E+04			Pa-231
1.2E+04	1.5E+01		^٢ 1.5E+01			Pa-233
1.5E+04	1.5E+01		^٢ 1.5E+01			U-230
4.0E+02	5.0E+02		5.0E+02			U-232
7.0E-02	2.0E+02		1.95E+02		^٢ 5.5E+02	U-233
					^٢ 6.7E+02	
1.2E-01	5.0E+02		5.0E+02			U-234
8.0E-05	1.E+03	1.E+03	2.9E+02		^٢ 7.6E+02	U-235
					^٢ 2.0E+04	
^٢ 8.0E-05	1.E+03	1.E+03				²³⁵ U > 20%
^٢ 8.0E-04	1.E+04	1.E+04				²³⁵ U 10% - 20%
غير محدود	غير محدود		غير محدود			U-236
غير محدود	غير محدود		غير محدود			U-238
2.6E+04	5.0E+02		5.0E+02			Np-235
7.3E-03	1.5E+01		^٢ 1.5E+01			Np-236b
3.3E+05	1.5E+01		^٢ 1.5E+01			Np-236a
2.6E-01	1.0E+04		1.0E+04	^٢ 2.0E+04		Np-237
				^٢ 3.0E+04		

معايير الحرجية المستخدمة في قيم D		معايير فئة المواد النووية	تقديرات حد الحرجية			النويذة المشعة
A _C	M _C	الثانية [٧١] ^أ	المرجع [٧٠]	المرجع [٦٩]	المرجع [٦٨]	
(تيرا بكريل)	(غرام)	(غرام)	(غرام)	(غرام)	(غرام)	
غير محدود	غير محدود		غير محدود			Np-239
9.9E+03	5.0E+02	5.E+02	5.0E+02			Pu-236
6.8E+03	1.5E+01	5.E+02	^ب 1.5E+01			Pu-237
3.0E+02	5.E+02	5.E+02	1.0E+03	^ج 3.0E+03		Pu-238
				^د 4.0E+03		
1.0E+00	5.E+02	5.E+02	1.45E+02	^{هـ} 4.5E+02	^و 5.1E+02	Pu-239
					^ز 5.0E+03	
4.0E+00	5.E+02	5.E+02	1.0E+04	^ح 1.5E+04		Pu-240
				^ط 2.0E+04		
2.0E+03	5.E+02	5.E+02	6.0E+01	^ي 2.0E+02		Pu-241
7.0E-02	5.E+02	5.E+02	1.8E+04	^ك 4.0E+04		Pu-242
				^ل 6.0E+04		
3.3E-04	5.0E+02	5.E+02	5.0E+02			Pu-244
1.3E+03	1.0E+04		1.0E+04	^م 1.6E+04		Am-241
				^ن 2.4E+04		
1.4E+00	4.0E+00		4.0E+00	^س 1.3E+01		Am-242m
7.4E+01	1.0E+04		1.0E+04	^ع 2.5E+04		Am-243
				^ف 3.5E+04		
9.4E+04	2.0E+00		^ق 2.0E+00			Am-244
1.5E+03	2.0E+00		^ص 2.0E+00			Cm-240
1.2E+03	2.0E+00		^ض 2.0E+00			Cm-241
6.1E+04	5.0E+02		5.0E+02			Cm-242
6.7E+01	3.5E+01		3.5E+01	^ط 9.0E+01		Cm-243
3.0E+03	1.0E+03		1.0E+03	^ي 3.0E+03		Cm-244
				^ك 5.0E+03		
8.9E-02	1.4E+01		1.4E+01	^ل 3.0E+01		Cm-245
5.7E+00	5.0E+02		5.0E+02			Cm-246
1.0E-03	3.0E+02		3.0E+02	^م 9.0E+02		Cm-247
7.9E-02	5.0E+02		5.0E+02			Cm-248
7.8E-02	2.0E+00		^ن 2.0E+00			Bk-247
3.0E+04	5.0E+02		5.0E+02			Bk-249
1.2E+02	2.0E+00		^س 2.0E+00			Cf-248
6.1E-01	4.0E+00		4.0E+00	^ع 1.0E+01		Cf-249
8.1E+00	2.0E+00		2.0E+00	^ف 5.0E+00		Cf-251
2.9E+01	5.0E+02		5.0E+02			Cf-250
1.0E+04	5.0E+02		5.0E+02			Cf-252
2.1E+03	2.0E+00		^ق 2.0E+00			Cf-253
6.3E+02	2.0E+00		^ص 2.0E+00			Cf-254

أ فئة المواد النووية الثانية.

ب القيمة المحددة مقدماً للنظائر التي يكون عددها الذري $88 \leq Z < 95$.

ج بيانات المحاليل المائية الواردة في الجدول ١ من المرجع [٦٨].

- د بيانات الفلزات الواردة في الجدول ٢ من المرجع [٦٨].
- هـ يعبر عن حد نشاط الحرجية A_C من حيث نشاط اليورانيوم - ٢٣٥. ومجموع نشاط كل وحدة من كتلة اليورانيوم المثري يشمل اليورانيوم - ٢٣٤ الذي يتم تركيزه في أثناء عملية الإثراء، فضلاً عن نشاط اليورانيوم - ٢٣٨ على النحو المبين في المرجع [٣٥].
- و بيانات الفلزات الواردة في الجدول ١ من المرجع [٦٩].
- ز بيانات المحاليل المائية لنويدات الأكتينيدات غير الانشطارية الواردة في الجدول ١ من المرجع [٦٩].
- ح بيانات المحاليل المائية لنويدات الأكتينيدات الانشطارية الواردة في الجدول ٢ من المرجع [٦٩].
- ط القيمة المحددة مقدماً للنظائر التي يكون عددها الذري $90 \leq Z < 99$.

ثامناً-٥- السمية الكيميائية

بُحِثت السمية الكيميائية للمصادر المشتتة بمقارنة التركيزات التي تشكل خطراً مباشراً يحدق بالحياة أو الصحة [٧٢] مع التركيزات العالقة في الهواء الناجمة عن إطلاق مادة تعادل كتلتها قيمة D_2 في غرفة وتُحسب قيمتها باستعمال المعادلة التالية:

$$C = \frac{D_2 \times RRF}{SA \times V} \quad (٨٤)$$

حيث:

C التركيز العالق في الهواء من المادة المشتتة، غم/م^٣؛

D_2 هي قيمة D_2 بالبكريل وترد في الجدول ١؛

SA هو النشاط النوعي للنوييدة المشعة (بكريل/غرام)، ويرد في الجدول ٢٦؛

V هو حجم الغرفة التي انطلقت فيها المادة، ١٠٠٠ م^٣؛

RRF هو الجزء الكسري من الإطلاق القابل للاستنشاق من النشاط الأولي في مصدر ويساوي ٠,١ على النحو المبين في السيناريو الثالث (التذييل الثاني).

وتعتبر التركيزات التي تشكل خطراً مباشراً يحدق بالصحة أو الحياة (أو التركيزات التي حددها المعهد الوطني للأمان والصحة المهنية بأنها تشكل خطراً مباشراً يحدق بالحياة أو الصحة) الحد الذي لا يقدر الفرد بعده على تلافي الوفاة أو حدوث إصابة دائمة بدون الحصول على مساعدة في أقل من ثلاثين دقيقة. وحيثما تعذر الحصول على التركيزات التي تشكل خطراً مباشراً يحدق بالحياة أو الصحة من المرجع [٧٢]، افترض أن تلك التركيزات تبلغ ١٠ ملغ/م^٣، ويمثل ذلك أقل حد للتركيزات التي تشكل خطراً مباشراً يحدق بالحياة أو الصحة. وتبين أن التركيزات العالقة في الهواء C المشتقة من قيم D_2 لكل النويدات المشعة تقريباً على النحو المبين في المعادلة (٨٤) تقل ١٠ أضعاف عن التركيزات التي تشكل خطراً مباشراً يحدق بالحياة أو الصحة وتقل في معظم الحالات بمقدار ١٠٠٠ ضعف أو أكثر عن التركيزات التي تشكل خطراً مباشراً يحدق بالحياة أو الصحة. وفي حالة النويدات المشعة لليورانيوم (وربما الثوريوم) التي لها قيم D_2 غير محدودة فإن السمية الكيميائية الناجمة عن التشتت يمكن أن تشكل مصدراً للقلق. وأضيفت ملاحظات احترازية في قائمة قيم D في الجدول ١ للنويدات المشعة التي تقارب أو تتجاوز تركيزاتها العالقة في الهواء المحسوبة بالمعادلة [٨٤] التركيزات التي تشكل خطراً مباشراً يحدق بالحياة أو الصحة أو ١٠ ملغ/م^٣ (عند الاقتضاء).

المراجع

- [١] منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة، والوكالة الدولية للطاقة الذرية، ومنظمة العمل الدولية، ووكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، ومنظمة الصحة للبلدان الأمريكية، ومكتب الأمم المتحدة لتنسيق الشؤون الإنسانية، ومنظمة الصحة العالمية، التأهب للطوارئ النووية أو الإشعاعية والتصدي لها، متطلبات الأمان، سلسلة معايير الأمان، رقم GS-R-2، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (٢٠٠٢).
- http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1133a_web.pdf
- [٢] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، طريقة لوضع ترتيبات التصدي للطوارئ النووية أو الإشعاعية، EPR-METHOD، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (٢٠٠٩).
- http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Method2003_a_web.pdf
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Arrangements for Preparedness for a Nuclear or Radiological Emergency. Safety Standards Series No GS-G-2.1, IAEA, Vienna, (2006).
- http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1265_web.pdf
- [٤] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، تصنيف المصادر المشعة، سلسلة معايير الأمان، رقم RS-G-1.9، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا، (٢٠٠٩)
- http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1227a_web.pdf
- [٥] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، مدونة قواعد السلوك بشأن أمان المصادر الإشعاعية وأمنها، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا، (٢٠٠٤)
- http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Code-2004_web.pdf
- [٦] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، لائحة النقل المأمون للمواد المشعة: طبعة ٢٠٠٩، - سلسلة معايير الأمان، رقم TS-R-1، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا (٢٠٠٩).
- http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1384a_web.pdf
- [7] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Age-dependent Doses to member of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4 Inhalation Dose Coefficients. Annals of the ICRP, v. 25 no. 3-4. ICRP publication 71. Pergamon Press, Oxford: ICRP, 1995
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The radiological accident at the irradiation facility in Nesvizh. IAEA, Vienna (1996).
- http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1010_web.pdf
- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Report on the preliminary fact finding mission following the accident at the nuclear fuel processing facility in Tokaimura, Japan. IAEA, Vienna (1999).
- http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TOAC_web.pdf
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Intervention Criteria in a Nuclear or Radiation Emergency, Safety Series No. 109. IAEA, Vienna (1994).

[١١] منظمة الأمم المتحدة للأغذية والزراعة، والوكالة الدولية للطاقة الذرية، ومنظمة العمل الدولية، ووكالة الطاقة النووية التابعة لمنظمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، ومنظمة الصحة للبلدان الأمريكية، ومنظمة الصحة العالمية، معايير الأمان الأساسية الدولية للوقاية من الإشعاعات المؤينة ولأمان المصادر الإشعاعية، سلسلة وثائق الأمان – العدد رقم ١١٥، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا، (١٩٩٦).

http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/SS-115a-Web/Pub996a_web-1.pdf

- [12] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Abrahamson, S., Bender, M., Book, S., Buncher, C., Denniston, C., Gilbert, E., Hahn, F., Hertzberg, V., Maxon, H., Scott, B., Schull, W., and Thomas, S. Health Effects Models for Nuclear Power Plant Accident Consequence Analysis, Low LET Radiation, NUREG/CR-4214, Rev.1, Part II SAND85-7185 (1989).
- [13] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Evans, J.S., Abrahamson, S., Bender, M.A., Boecker, B.B., Gilbert, E.S. and Scott, B.R. Health Effects Models for Nuclear Power Accident Consequence Analysis. Part I: Introduction, Integration, and Summary. NUREG/CR-4214 Rev. 2, Part I ITRI-141 (1993).
- [14] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Abrahamson, S., Bender, M.A., Boecker, B.B., Gilbert, E.S. and Scott, B.R. Health Effects Models for Nuclear Power Accident Consequence Analysis. Modification of Models Resulting From Addition of Effects of Exposure to Alpha-Emitting Radionuclides. Part II: Scientific Bases for Health Effects Models. NUREG/CR-4214 Rev. 1, Part II Addendum 2 LFM-136 (1993).
- [15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, WORLD HEALTH ORGANIZATION, Development of extended framework for emergency response criteria. Interim report for comments, IAEA TECDOC-1432, IAEA, Vienna (2004).
- http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE_1432_web.pdf
- [16] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66, Ann ICRP Vol. 24, No 1-3. Pergamon Press, Oxford, UK (1994).
- [17] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, The Biological Basis for Dose Limitation in the Skin. ICRP Publication 59, Ann ICRP Vol. 22, No 2. Pergamon Press, Oxford, UK (1991).
- [18] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS, Dosimetry of External Beta Rays for Radiation Protection, ICRU Report 56, ICRU, Bethesda (1996).
- [19] Hopewell, J.W. Biological Effects of Irradiation on Skin and Recommendation Dose Limits, Radiation Protection Dosimetry, Vol 39, No. 1/3 pp 11-24 (1991).
- [20] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication No 60. Ann ICRP Vol. 21 No. 1-3. Pergamon Press, Oxford, UK (1991).

- [21] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, WORLD HEALTH ORGANIZATION, Generic procedures for medical response during nuclear and radiological emergency. EPR-MEDICAL, IAEA, Vienna (2005).
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/EPR-MEDICAL-2005_web.pdf
- [22] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q) and Radiation Weighting Factor (w_R). ICRP Publication 92. Ann ICRP Vol.33 No.4. Pergamon Press, Oxford, UK (2003).
- [23] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. MEMORANDUM. The evolution of the system of radiological protection: the justification for new ICRP recommendations. J. Radiol. Prot. 23 (2003) 129–142.
- [24] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, RBE for Deterministic Effects, Publication No. 58, Pergamon Press, Oxford, New York (1989).
- [25] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Diagnosis and Treatment of Radiation Injuries, Safety Reports Series, No. 2, IAEA, Vienna (1998)
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P040_scr.pdf
- [26] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Follow-up of Delayed Health Consequences of Acute Accidental Radiation Exposure. Lessons to be Learned from Their Medical Management, IAEA-TECDOC 1300, IAEA, Vienna (2002).
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1300_web.pdf
- [27] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Lilo, IAEA, Vienna (2000). http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1097_web.pdf
- [28] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Federal Guidance Report 11 Limiting-values of radionuclide intake and air concentration and dose conversion factors for inhalation, submersion, and ingestion. Eckerman, K. F., Wolbarst, A. B. and Richardson, A. C.B. EPA-520/1-88-020. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN; U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. (1988).
- [29] Scott B. R. Proposed estimates of the probability of inducing pulmonary injury sufficient to cause death from radiation pneumonitis and pulmonary fibrosis after briefly inhaling a mixture of insoluble β -emitting particles. Health Phys 38: 635-642 (1980).
- [30] Scott B. R., and Hahn F. F. A model that leads to the Weibull distribution function to characterize early radiation response probabilities. Health Phys 39:521-530 (1980).
- [31] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Yanango, IAEA, Vienna (2000).
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1101_web.pdf
- [32] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Gilan, IAEA, Vienna (2002)
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1123_scr.pdf

- [33] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, A Regulatory Analysis on Emergency Preparedness for Fuel Cycle and Other Radioactive Material Licensees, US Nuclear Power Plants, NUREG-1140, USNRC, Washington, DC (1988)
- [34] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, DOE Handbook, Airborne Release Fractions/Rates and Respirable Fractions for Non-reactor Nuclear Facilities, DOE-HDBK-3010-94 (1994)
- [35] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials, Safety Standards Series No. TS-G-1.1, (ST-2) IAEA, Vienna (2002)
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1109_scr.pdf
- [36] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Goiânia, IAEA, Vienna (1988)
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub815_web.pdf
- [37] Gus'kova, A.K., Nadezhina, N.M., Barabanova, A.V., et al. Acute effects of radiation exposure following the Chernobyl accident: immediate results of radiation sickness and outcome of treatment. In Medical aspects of the Chernobyl accident (Proceedings of the conference in Kiev 11-13 May, 1988) IAEA-TECDOC-516: 233-256. Vienna, IAEA (1989).
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_516_web.pdf
- [38] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Radionuclide Transformations. Energy and Intensity of Emission. ICRP Publication 38, Ann ICRP Ann ICRP Vol. 11-13. Pergamon Press, Oxford, UK (1984).
- [39] Dillman, L.T., and Eckerman, K.F. Electron External and Internal Bremsstrahlung Spectra, ORNL/TM-12451 (1994) (unpublished).
- [40] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Federal Guidance Report 12 External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil. Keith F. Eckerman and Jeffrey C. EPA-402-R-93-081. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN; U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. (1993).
- [41] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS, Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurement. ICRU Report 44, Bethesda, MD (1989).
- [42] U.S. SECRETARY OF COMMERCE, Hubbell, J. H. and Seltzer, S. M. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients. Ionizing Radiation Division, Physics Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD. NISTIR 5632. U.S. Secretary of Commerce on behalf of the United States of America. (1996) (www/physics.nist.gov/PhysData/XrayMassCoef/cover.html Online: May 1996 Last update: July 2004).
- [43] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication No 74. Ann ICRP Vol. 26, No. 3/4, Pergamon Press, Oxford, UK (1996).
- [44] Shults, J.K., Faw, R.E., Radiation shielding. Prentice Hall PTR, NJ, USA (1996).

- [45] Eckerman, K.F. RADiation SUMmary Code - RadSum 32 Code: A Win 32 version. In package ICRP38 v. 1.0 (3/25/2003). Free download provided by Centre for Biokinetic and Dosimetric Research, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831. Available at: <http://ordose.ornl.gov/downloads.html>. Accessed 01 March 2006.
- [46] Eckerman, K.F., Rawl, R., Hughes, J.S. and Bolgona, L. Type A package limits of spontaneous fission radionuclides. In PATRAM-2001. Proceedings of the 13th International symposium on packaging and transportation of radioactive materials (Chicago, IL USA, September 3-7 2001), U.S. DOE (2002).
- [47] Shleien, B. The Health Physics and Radiation Protection Health Handbook, Scinta Inc., Silver Spring MD, USA, 1992.
- [48] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes. Supplement to Technical Reports Series No. 318. Technical Reports Series No 403. IAEA, Vienna, 2001.
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS403_scr.pdf
- [49] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Federal Guidance Report 13 Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides: CD Supplement, EPA 402-C-99-001 Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN; U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC (1999).
- [50] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, The ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public, version 1.0. An extension of ICRP Publications 68 and 72, developed by Task Group on Dose Calculations on Committee 2 of the International Commission on Radiological Protection. CDROM. Pergamon Press, Oxford, UK (1998).
- [51] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY Eckerman, K. F., Sjoreen A. L. Radiological Toolbox User's Manual, ORNL/TM-2004/27 Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN (2004). The "Radiological Toolbox" can be download from official ORNL Web site <http://ordose.ornl.gov/downloads.html>
- [52] Aleksankin V.G., Rodichev S.V., Rubtsov P.M., Hezhansky G.A., and Chukreev F.E. Beta- and antineutrino radiation of radioactive nuclei. Energoatomizdat: Moscow (1989).
- [53] Rohlogg F., Heinzelmann M. Dose rate by photons radiation to the basal layer of the dermis in case of skin contamination. Rad. Prot. Dosim. 63: 15-28 (1996).
- [54] Faw, R.E. Absorbed doses to skin from radionuclide sources on the body surface. Health Phys., 63: 442-448 (1992).
- [55] Delacroix D., Guerre J. P., Leblanc P., and Hickman C. Radionuclide and radiation protection data handbook. 2nd Edition (2002). Rad. Prot. Dosim. 98: 1-168 (2002).
- [56] Kocher D.C., and Eckerman K.F., Electron dose-rate conversion factors for external exposure of the skin from uniformly deposited activity on the body surface. Health Phys. 53: 135-141 (1987).

- [57] Cross W.G., Freedman N.O., and Wong P.Y. Beta ray dose distributions from skin contamination. Rad. Prot. Dosim. 40: 149-168 (1992).
- [58] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION Durham, J. S. VARSKIN MOD2 and SADDE MOD2: Computer Codes for Assessing Skin Dose from Skin Contamination NUREG/CR-5873. U.S. NRC, Washington (1992).
- [59] U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Loss of an Iridium-192 Source and Therapy Misadministration at Indiana, Pennsylvania, on November 16, 1992, NUREG-1480, USNRC, Washington, DC (1992).
- [60] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Lessons Learned from Accidents in Industrial Radiography, Safety Report Series, No 7, IAEA, Vienna (1998).
- [61] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Istanbul, IAEA, Vienna (2000).
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1102_web.pdf
- [62] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Samut Prakarn, IAEA, Vienna (2002).
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1124_scr.pdf
- [63] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The radiological accident in Tammiku, IAEA, Vienna (1998).
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1053_web.pdf
- [64] Hübner, K.F; Fry, S.A, The Medical Basis for Radiation Accident Preparedness Elsevier/North Holland. NY, (1980).
- [65] Dillman, L., T., Jones, T., D. Internal dosimetry of spontaneously fissioning radionuclides. Health Physics 29: 111-123 (1975).
- [66] Croft, S. The use of neutron intensity calibrated $^9\text{Be}(\alpha,n)$ sources as 4438 keV gamma-ray reference standards. Nucl. Instr. Meth. A281: 103-116 (1989).
- [67] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Tables of recommended standard data: neutron yields from alpha particle induced reactions on lithium, beryllium, boron, carbon, oxygen and fluorine nuclei for energies up to 10 MeV. Vukolov, V.A. and Chukreev, F.E. International Nuclear Data Committee Report INDC(CCP)-331, IAEA, Vienna (1991).
<http://www-nds.iaea.org/reports-new/indc-reports/indc-ccp/indc-ccp-0331.pdf>
- [68] AMERICAN NATIONAL STANDARD, Nuclear criticality safety in operations with fissionable materials outside reactors, ANSI N16.1-1975, Hinsdale, USA (1975).
- [69] AMERICAN NUCLEAR SOCIETY, Nuclear criticality control of special actinide elements, an American national standard, ANSI/ANS-8.15-1981, La Grange, USA (1981).
- [70] Criticality Safety. Document 20.6. Environment, Safety and Health manual Vol. II: Health & Safety – Controls and Hazards. Part 20: Ionizing Radiation/Nonionizing Radiation. University of California Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-AM-133867. (2005).
- [٧١] الوكالة الدولية للطاقة الذرية، الحماية المادية للمواد النووية والمرافق النووية، الوثيقة INFCIRC/225/Rev.4، الوكالة الدولية للطاقة الذرية، فيينا، (١٩٩٩).

- [72] UNITED STATES CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC), National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Oct 2002, web site: www.cdc.gov/niosh/idlh/intridl4.html
- [73] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference-values. ICRP Publication 89. Annals of the ICRP 32 No. 3-4. Pergamon Press, Oxford, UK (2002).

التعاريف

<p>الكمية الأساسية لقياس الجرعة D، وتعرّف بأنها:</p> $D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$ <p>حيث $d\bar{\epsilon}$ هي الطاقة المنقولة من الإشعاع المؤين للمادة في عنصر حجمي، و dm هي كتلة المادة في هذا العنصر الحجمي. ووحدة قياس الجرعة الممتصة هي جول/كيلوغرام، وتسمى غراي (Gy).</p>	<p>absorbed dose, D.</p>	<p>جرعة ممتصة</p>
<p>تعرض يحدث خلال فترة وجيزة.</p> <p>(أ) يستخدم في العادة للإشارة إلى تعرض خلال مدة قصيرة بما يكفي للتعامل مع الجرعات الناشئة باعتبارها فورية (أقل من ساعة مثلاً).</p>	<p>acute exposure</p>	<p>تعرض حاد</p>
<p>أخذ داخلي يحدث في غضون فترة زمنية قصيرة بما يكفي للتعامل معه باعتباره أخذاً داخلياً فورياً لأغراض تقييم الجرعة المودعة الناتجة.</p>	<p>acute intake</p>	<p>أخذ داخلي حاد</p>
<p>الكم $D_T(\Delta)$ يميز التعرض الداخلي ويعرّف بأنه:</p> $D_T^R(\Delta) = \int_{t_0}^{t_0+\Delta} \dot{D}_T^R(t) dt$ <p>حيث t_0 هو زمن الأخذ الداخلي، و $\dot{D}_T(t)$ هو معدل جرعة العضو عند الزمن t، في عضو أو نسيج T، و Δ هو الزمن المنقضي بعد حدوث أخذ داخلي للمادة المشعة.</p> <p>(أ) الجرعة الممتصة المودعة نتيجة لأخذ داخلي لمادة مشعة يتسبب في تشعيع داخلي لأعضاء وأنسجة الشخص تبعاً لتوزيعها في جسم الإنسان المرجعي، ويحدث ذلك بعد نفس الأخذ الداخلي.</p>	<p>committed absorbed dose, $D_T(\Delta)$</p>	<p>جرعة ممتصة مودعة</p>
<p>الكمية $AD_T(\Delta)$ تميّز التعرض الداخلي وتعرّف على النحو التالي:</p> $AD_T(\Delta) = \int_{t_0}^{t_0+\Delta} \dot{AD}_T(t) dt$ <p>حيث t_0 هو زمن الأخذ الداخلي، و $\dot{AD}_T(t)$ هو معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية عند الزمن t، في عضو أو نسيج T، و Δ هو المدة الزمنية المنقضية بعد حدوث أخذ داخلي للمادة المشعة.</p> <p>(أ) في حالة حدوث أخذ داخلي لمادة مشعة فإن الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية تسبب تشعيعاً داخلياً لأعضاء وأنسجة الشخص تبعاً لكمية الإشعاع وتوزيعها في جسم الإنسان المرجعي، ويحدث ذلك بعد نفس الأخذ الداخلي.</p>	<p>committed RBE-weighted dose, $AD_T(\Delta)$</p>	<p>الجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية</p>
<p>كمية المادة المشعة التي يمكن، إذا خرجت عن نطاق السيطرة، أن تسفر عن موت الشخص الذي يتعرض لها أو تسبب إصابة دائمة تنتقص من نوعية حياة ذلك الشخص. ولأغراض تحديد قيم D، تنقسم سيناريوهات التعرض</p>	<p>D-value</p>	<p>القيمة D</p>

المستخدمة إلى مجموعتين، إحداهما للمواد غير المشتتة والأخرى للمواد المشتتة. وترد قيم عددية مختلفة لكل مجموعة من هاتين المجموعتين:

(أ) قيمة D_1 هي نشاط 24 نويدة مشعة في مصدر قد يسفر، إذا خرج عن نطاق السيطرة ولكنه لم يتشتت (أي إذا ظل مغلقاً)، عن حالة طوارئ يمكن أن ينشأ في حدود التوقعات المعقولة آثار صحية قطعية عنيفة؛

(ب) قيمة D_2 هي نشاط 24 نويدة مشعة في مصدر قد يتسبب، إذا خرج عن نطاق السيطرة وتشتت، في حدوث حالة طوارئ يمكن أن تنشأ عنها في حدود التوقعات المعقولة آثار صحية قطعية عنيفة.

(ج) قيمة D لنويدة مشعة هي أقل قيمة للقيمتين D_1 و D_2 .

مصدر يمكن، إذا كان دون رقابة، أن يؤدي إلى تعرض يكفي للتسبب في آثار صحية قطعية عنيفة. وهذا التصنيف يستخدم في تحديد مدى الحاجة إلى ترتيبات التصدي للطوارئ وينبغي عدم الخلط بينه وبين تصنيف المصادر لأغراض أخرى.

أثر صحي إشعاعي توجد له عموماً عتبة حدية لمستوى الجرعة تزداد حدته إذا تجاوزتها الجرعة. ويوصف هذا الأثر بأنه "أثر قطعي عنيف" إذا كان مميتاً أو يتهدد الحياة أو إذا كان يسبب إصابة دائمة تنتقص من نوعية الحياة.

(١) مقياس للطاقة المودعة في هدف عن طريق الإشعاع. (٢) مصطلح عام يستخدم لتعيين كميات من قبيل الجرعة المودعة، والجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية، والجرعة المرجحة بالإشعاع، والجرعة الفعالة.

الفعل أو الظرف المؤدي إلى التعرض لإشعاع. والتعرض يمكن أن يكون خارجياً من مصدر خارج الجسم) أو تعرضاً داخلياً (من مادة مشعة داخل الجسم).

مسلك يمكن من خلاله للإشعاعات أو النويدات المشعة أن تصل إلى البشر وتسبب تعرضهم. وقد يكون مسار التعرض بسيطاً جداً، مثل التعرض الخارجي الناجم عن نويدات محمولة في الهواء، أو يكون سلسلة أكثر تعقيداً، مثل التعرض الداخلي من جراء شرب حليب أبقار أكلت عشباً ملوثاً بنويدات مشعة مترسبة.

اسم وحدة قياس الجرعة الممتصة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية.

(١) ابتلاع أو استنشاق مادة مشعة. (٢) مقدار المادة المشعة (النشاط بالبيكريل) الذي يدخل الجسم عن طريق الاستنشاق أو الابتلاع أو عبر الجلد أو عن طريق الحقن أو من خلال جرح.

تعرض للإشعاع من مصدر داخل الجسم (بسبب ترسب نويدات مشعة في أنسجة الجسم).

طارئ يتضمن، أو من المتصور أنه يتضمن، مخاطر تعزى إلى ما يلي:

(أ) الطاقة الناتجة عن تفاعل متسلسل نووي أو عن اضمحلال نواتج تفاعل متسلسل؛

(ب) أو تعرض إشعاعي.

متوسط الجرعة الممتصة في عضو أو نسيج T في جسم الإنسان، ويتم

dangerous source

مصدر خطير

deterministic effect

أثر قطعي

dose

جرعة

exposure

تعرض

exposure pathway

مسار تعرض

gray-equivalent, Gy-Eq

مكافئ غراي

intake

أخذ داخلي

internal exposure

تعرض داخلي

nuclear or radiological emergency

طارئ نووي أو إشعاعي

organ dose, D_T^R

جرعة العضو

٢٤ يراعى احتمال ازدياد خطورة المصادر في وقت لاحق من عمرها (خلال مدة تصل إلى ١٠ سنوات) بسبب النمو الداخلي لنواتجها؛ على أن قيم D يعبر عنها من حيث نشاط النويدات المشعة الأم قبل اضمحلالها، أي عند تصنيعها على النحو المبين في التذييل الثامن.

الحصول عليه بالمعادلة التالية:

$$D_T^R = \frac{\Delta \epsilon_R}{m_T}$$

حيث m_T هي كتلة العضو أو النسيج T، و $\Delta \epsilon_R$ هي طاقة الإشعاع المؤين R المنقول إلى كتلة العضو أو النسيج المعين. ولا تؤخذ نوعية الإشعاع في الاعتبار عند تقييم الجرعة الممتصة في العضو.

ناتج من الجرعة الممتصة في عضو أو نسيج والفعالية البيولوجية النسبية للإشعاع الناقل للجرعة:

$$AD_T = \sum_R D_T^R \times RBE_T^R$$

حيث D_T^R هي جرعة العضو من الإشعاع R في النسيج T، و RBE_T^R هي الفعالية البيولوجية النسبية للإشعاع R عند إحداث أثر محدد في عضو أو نسيج معين T. ووحدة قياس الجرعة الممتصة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية هي جول \times كيلو غرام⁻¹، وتسمى مكافئ الغراي (Gy-Eq).

(أ) يقصد بالجرعة الممتصة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية حساب الفروق في الفعالية البيولوجية في إحداث آثار صحية قطعية في أعضاء أو أنسجة الإنسان المرجعي بسبب نوعية الإشعاع.

RBE-weighted dose,
AD_T

الجرعة المرجحة
بالفعالية
البيولوجية
النسبية

RDD

جهاز نشر
إشعاعات

إنسان بالغ له خصائص تشريحية وفسولوجية محددة في تقرير فريق العمل المعني بالإنسان المرجعي [٧٣].

reference man

إنسان مرجعي

عامل بالغ له خصائص تشريحية وفسولوجية محددة في تقرير فريق العمل المعني بالإنسان المرجعي [٧٣].

reference worker

عامل مرجعي

الفعالية البيولوجية النسبية في عضو أو نسيج معين T هي نسبة الجرعة الممتصة من إشعاع مرجعي بسبب أثرا بيولوجيا معيناً بالنسبة للجرعة الممتصة من الإشعاع المعني (R) الذي يتسبب في إحداث نفس الأثر البيولوجي. وتتوقف عموماً قيمة الفعالية البيولوجية النسبية للأثار البيولوجية للإشعاع على عوامل من قبيل نوعية الإشعاع والعضو أو النسيج المشع والأثر الذي يسببه ومعدل الجرعة. وترد في الجدولين ٨ و ٩ القيم المستخدمة في هذا الدليل للفعالية البيولوجية النسبية التي تنشأ عنها آثار صحية قطعية عنيفة.

relative biological ef-
fectiveness, RBE_T^R

فعالية بيولوجية
نسبية

أثر إشعاعي صحي مميت أو يهدد الحياة أو يؤدي إلى إصابة دائمة تنتقص من نوعية الحياة.

severe deterministic
effect

أثر قطعي عنيف

أثر صحي مستحث إشعاعياً يزداد احتمال حدوثه مع ازدياد الجرعة الإشعاعية ولا تتوقف حدته (إذا حدث) على مقدار الجرعة. وقد تكون الآثار العشوائية جسدية أو وراثية، وهي تحدث عموماً دون وجود عتبة لمستوى الجرعة. ومن أمثلتها سرطان الغدة الدرقية وبيضاض الدم (اللوكيميا).

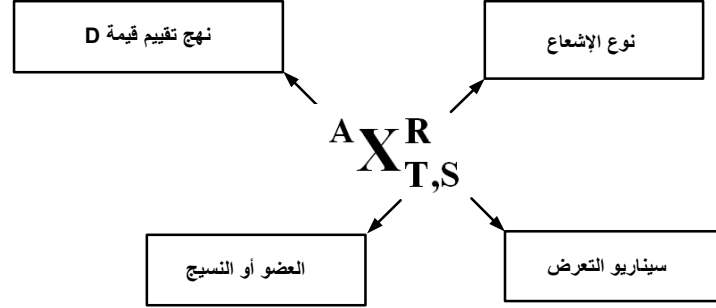
stochastic effect (of
radiation)

أثر عشوائي
(مترتب على
الإشعاع)

المرفقات

المرفق الأول الرموز وشكل المؤشرات القياسية

يتبين من الشكل ١١ أن الرموز وكميات قياس الجرعة المستخدمة في كل من النهج المبني على الخبرة والنهج القائم على المخاطر قد يكون لها عموماً أربعة مؤشرات قياسية.



الشكل ١١: تحديد المؤشرات القياسية لكميات قياس الجرعات

المؤشرات القياسية هي:

- “A” تشير إلى النهج المستخدم:
- (أ) “E” - النهج المبني على الخبرة؛
(ب) “R” - النهج القائم على المخاطر.
- “R” تشير إلى نوع الإشعاع:
- (أ) “L” - إشعاع ذو انتقال خطي منخفض للطاقة؛
(ب) “H” - إشعاع ذو انتقال خطي مرتفع للطاقة؛
(ج) “H + L” - إي إشعاع؛
(د) “S” - قد تدرج للإشارة إلى مركب ذي امتصاص رئوي من النوع s.
- “S” تشير إلى سيناريو التعرض:
- (أ) “I” (الأول) - سيناريو “الجيب”؛
(ب) “II” (الثاني) - سيناريو “الغرفة”؛
(ج) “III” (الثالث) - سيناريو “الاستنشاق”؛
(د) “IV” (الرابع) - سيناريو “الابتلاع”؛
(هـ) “V” (الخامس) - سيناريو “تلوث الجلد”؛
(و) “VI” (السادس) - سيناريو “الغمر”.

يشير الرمز “T” إلى عضو أو نسيج على النحو الوارد في الجدول أدناه:

الرقم المرجعي للنسيج		العضو أو النسيج	
النهج القائم على المخاطر	النهج المبني على الخبرة	مسار التعرض	
1	1	مصدر خارجي قريب	النسيج الرخو
2	2	داخلي	النخاع الأحمر
3R	3E	داخلي	مناطق الرئة
4	4	داخلي	القولون أو الأمعاء الدقيقة
5	5	داخلي	الغدة الدرقية
6R	6E	ملامسة الجلد	مناطق الجلد
7	7	مصدر خارجي بعيد	الجدع

المرفق الثاني الرموز النوعية

يبين الشكل ١٠ القاعدة العامة لتحديد المؤشرات القياسية لكميات قياس الجرعات المستخدمة في هذا التقرير.

الرمز	الوحدة	الوصف
A_C	بكريل	حد نشاط نويدة مشعة معينة استناداً إلى اعتبارات الحرجية.
AD_T	مكافئ غراي	الجرعة (المتصلة) المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في عضو أو نسيج T.
$AD_T(\Delta)$	مكافئ غراي	الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية التي تودع في عضو أو نسيج T في الزمن Δ بعد أخذ داخلي لنويدة مشعة.
$AF_{T,S}$	(مكافئ غراي) / (بكريل × ثانية)	معامل لتحويل الجرعة يساوي معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية التي يتلقاها النسيج T من ١ بكريل من نويدة مشعة وفقاً للسيناريو S.
$AF_{T,S}(\Delta)$	(مكافئ غراي) / (بكريل)	معامل لتحويل الجرعة يساوي الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المودعة في عضو أو نسيج T في الزمن Δ بعد أخذ داخلي قدره ١ بكريل من نويدة مشعة وفقاً للسيناريو S.
$AF_{I,I}$	(مكافئ غراي) / (بكريل × ثانية)	معامل لتحويل الجرعة يساوي معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية التي يتلقاها النسيج ١ (النسيج الرخو) من ١ بكريل من نويدة مشعة وفقاً للسيناريو الأول.
$AF_{7,II}$	(مكافئ غراي) / (بكريل × ثانية)	معامل لتحويل الجرعة يساوي معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية التي يتلقاها النسيج ٧ (الذرع) من ١ بكريل من نويدة مشعة وفقاً للسيناريو الثاني.
$AF_{2,III}(\Delta)$	(مكافئ غراي) / بكريل	معامل لتحويل الجرعة يساوي الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المودعة لمدة ٣٠ يوماً في النسيج ٢ (النخاع الأحمر) نتيجة لأخذ داخلي بسبب استنشاق ١ بكريل من نويدة مشعة وفقاً للسيناريو الثالث R.
$AF_{3R,III}(\Delta)$	مكافئ غراي) / بكريل	معامل لتحويل الجرعة يساوي الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المودعة لمدة ٣٠ يوماً في النسيج R٣ (المنطقة السنخية من الجهاز التنفسي) بسبب أخذ داخلي ناتج عن استنشاق ١ بكريل من نويدة مشعة وفقاً للسيناريو الثالث R.
$AF_{4,III}(\Delta)$	(مكافئ غراي) / بكريل	معامل لتحويل الجرعة يساوي الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المودعة لمدة ٣٠ يوماً في النسيج ٤ (القولون) بسبب أخذ داخلي ناتج عن استنشاق ١ بكريل من نويدة مشعة وفقاً للسيناريو الثالث R.
$AF_{5,III}(\Delta)$	(مكافئ غراي) / بكريل	معامل لتحويل الجرعة يساوي الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المودعة لمدة ٣٦٥ يوماً في النسيج ٥ (الغدة الدرقية) بسبب أخذ داخلي ناتج عن استنشاق ١ بكريل من نويدة مشعة وفقاً للسيناريو الثالث R.
$AF_{2,IV}(\Delta)$	(مكافئ غراي) / بكريل	معامل لتحويل الجرعة يساوي الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المودعة لمدة ٣٠ يوماً في النسيج ٢ (النخاع الأحمر) بسبب أخذ داخلي ناتج عن ابتلاع ١ بكريل من نويدة مشعة وفقاً للسيناريو الرابع.
$AF_{4,IV}(\Delta)$	(مكافئ غراي) / بكريل	معامل لتحويل الجرعة يساوي الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المودعة لمدة ٣٠ يوماً في النسيج ٤ (القولون) بسبب أخذ داخلي ناتج عن ابتلاع ١ بكريل من نويدة مشعة وفقاً للسيناريو الرابع.
$AF_{5,IV}(\Delta)$	(مكافئ غراي) / بكريل	معامل لتحويل الجرعة يساوي الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المودعة لمدة ٣٦٥ يوماً في النسيج ٥ (الغدة الدرقية) بسبب أخذ داخلي ناتج عن ابتلاع ١ بكريل من نويدة مشعة وفقاً للسيناريو الرابع.

الوصف	الوحدة	الرمز
معامل لتحويل الجرعة يساوي معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في النسيج R ₆ (أدمة الجلد) نتيجة لوحدة نشاط سطحي من نويدة مشعة وفقاً للسيناريو الخامس.	(مكافئ غراي)/ (بكريل × ثانية/ ² م) (سم ²)	AF _{6R,V}
معامل لتحويل الجرعة يساوي معدل الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في النسيج ٢ (النخاع الأحمر) بسبب الغمر في غاز حامل مشع ذي وحدة تركيز.	(مكافئ غراي)/ (بكريل × ثانية/ ² م)	AF _{2,VI}
النشاط الأولي لنويدة مشعة في مصدر غير مشتت يعتبر، وفقاً للنهج المبني على الخبرة، خطيراً إذا تعرض له شخص في السيناريو الأول.	بكريل	^E A _I
النشاط الأولي لنويدة مشعة في مصدر غير مشتت يعتبر، وفقاً للنهج المبني على الخبرة، خطيراً إذا تعرض له شخص في السيناريو الثاني.	بكريل	^E A _{II}
النشاط الأولي المعين لغاز حامل مشع في مصدر مشتت يعتقد، وفقاً للنهج المبني على الخبرة، بأنه يسبب آثاراً صحية قطعية عنيفة في النسيج ٧ (الذرع) إذا تعرض له شخص في السيناريو السادس.	بكريل	^E A _{7,VI}
النشاط الأولي لنويدة مشعة في مصدر مشتت يعتبر، وفقاً للنهج المبني على الخبرة، خطيراً إذا تعرض له شخص في السيناريو الثالث E.	بكريل	^E A _{III E}
النشاط الأولي المعين لنويدة مشعة في مصدر مشتت يعتقد، وفقاً للنهج المبني على الخبرة، أنه يسبب آثاراً صحية قطعية عنيفة في النسيج ٢ (النخاع الأحمر) إذا تعرض له شخص في السيناريو الثالث E.	بكريل	^E A _{2,III E}
النشاط الأولي المعين لنويدة مشعة في مصدر مشتت يعتقد، وفقاً للنهج المبني على الخبرة، أنه يسبب آثاراً صحية قطعية عنيفة في النسيج E٣ (المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي) إذا تعرض له شخص في السيناريو الثالث E.	بكريل	^E A _{3E,III E}
النشاط الأولي المعين لنويدة مشعة في مصدر مشتت يعتقد، وفقاً للنهج المبني على الخبرة، أنه يسبب آثاراً صحية قطعية عنيفة في النسيج ٥ (الغدة الدرقية) إذا تعرض له شخص في السيناريو الثالث E.	بكريل	^E A _{5,III E}
النشاط الأولي المعين لنويدة مشعة في مصدر مشتت يعتقد، وفقاً للنهج المبني على الخبرة، أنه يسبب آثاراً صحية قطعية عنيفة في النسيج E٦ (العشاء القاعدي للجلد) إذا تعرض له شخص في السيناريو الخامس.	بكريل	^E A _{6E,V}
النشاط الأولي لنويدة مشعة في مصدر غير مشتت يعتبر، وفقاً للنهج القائم على المخاطر، خطيراً إذا تعرض له شخص في السيناريو الأول.	بكريل	^R A _I
النشاط الأولي لنويدة مشعة في مصدر غير مشتت يعتبر، حسب النهج القائم على المخاطر، خطيراً إذا تعرض له شخص في السيناريو الثاني.	بكريل	^R A _{II}
النشاط الأولي لنويدة مشعة في مصدر مشتت يعتبر، وفقاً للنهج القائم على المخاطر، خطيراً إذا تعرض له شخص في السيناريو الثالث R.	بكريل	^R A _{III R}
النشاط الأولي المعين لنويدة مشعة في مصدر مشتت يعتقد، وفقاً للنهج القائم على المخاطر، أنه يسبب آثاراً صحية قطعية عنيفة في النسيج T إذا تعرض له شخص في السيناريو الثالث R.	بكريل	^R A _{T,III R}
النشاط الأولي لنويدة مشعة في مصدر مشتت يعتبر، وفقاً للنهج القائم على المخاطر، خطيراً إذا تعرض له شخص في السيناريو الرابع.	بكريل	^R A _{IV}
النشاط الأولي المعين لنويدة مشعة في مصدر مشتت يعتقد، وفقاً للنهج القائم على المخاطر، أنه يسبب آثاراً صحية قطعية عنيفة في النسيج T إذا تعرض له شخص في السيناريو الرابع.	بكريل	^R A _{T,IV}
النشاط الأولي لنويدة مشعة في مصدر مشتت يعتبر، وفقاً للنهج القائم على المخاطر خطيراً إذا تعرض له شخص في السيناريو الخامس.	بكريل	^R A _V

الوصف	الوحدة	الرمز
النشاط الأولي المعين لنويدة مشعة في مصدر مشتت يعتقد، وفقاً للنهج القائم على المخاطر، أنه يسبب آثاراً صحية قطعية عنيفة في النسيج R ₆ (أدمة الجلد) إذا تعرض له شخص في السيناريو الخامس.	بكريل	$A_{6R,V}^R$
النشاط الأولي لغاز حامل مشع في مصدر مشتت يعتبر، وفقاً للنهج القائم على المخاطر، خطيراً إذا تعرض له شخص في السيناريو السادس.	بكريل	A_{VI}^R
النشاط الأولي المعين لغاز حامل مشع في مصدر مشتت يعتقد، وفقاً للنهج القائم على المخاطر، أنه يسبب آثار صحية قطعية عنيفة في النسيج ٧ (الذرع) إذا تعرض له شخص في السيناريو السادس.	بكريل	$A_{7,VI}^R$
القطر الذي يتساوى فوقه وتحتة مجموع حجم النشاط في التوزيع الحركي الهوائي لأحجام الجسيمات. ويفترض في العادة توزيع لوغاريتمي طبيعي لأحجام الجسيمات. ويقترن ٥٠ في المائة من نشاط الهباء الجوي (الأيروسول) بجسيمات يزيد قطرها الحركي الهوائي على قيمة قطر النشاط الحركي الهوائي الوسطي (AMAD).	ميكرون	قطر النشاط الحركي الهوائي الوسطي (AMAD)
الجرعة الممتصة من الإشعاع R في عضو أو نسيج T.	غراي	D_T^R
الجرعة الممتصة من الإشعاع R في عضو أو نسيج T والمودعة خلال فترة زمنية Δ بعد حدوث أخذ داخلي لمقدار يبلغ ١ بكريل من نويدة مشعة.	غراي	$D_T^R(\Delta)$
مدة التكامل الزمني بعد أخذ داخلي لمادة مشعة، ويستخدم في حساب الجرعة الممتصة المودعة والجرعة المودعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية، والجرعة المودعة المرجحة بالإشعاع.	يوم	Δ
معامل لتحويل الجرعة يساوي معدل الجرعة الممتصة من الإشعاع R الذي يترسب في النسيج T من ١ بكريل من نويدة مشعة وفقاً للسيناريو S.	غراي/(بكريل×ثانية)	$DF_{T,S}^R$
معامل لتحويل الجرعة يساوي معدل الجرعة الممتصة من أي مجموعة من الإشعاعات ذات الانتقال الخطي المنخفض للطاقة والانتقال الخطي المرتفع للطاقة.	غراي/(بكريل×ثانية)	$DF_{1,I}^{L+H}$
معامل لتحويل الجرعة يساوي معدل الجرعة الممتصة من أي مجموعة من الإشعاعات ذات الانتقال الخطي المنخفض للطاقة والانتقال الخطي المرتفع للطاقة التي يتلقاها النسيج ٢ (النخاع الأحمر) من ١ بكريل من نويدة مشعة وفقاً للسيناريو الثاني.	غراي/(بكريل×ثانية)	$DF_{2,II}^{L+H}$
معامل لتحويل الجرعة يساوي الجرعة الممتصة من الإشعاع R التي تودع في العضو أو النسيج T في الزمن Δ بعد أخذ داخلي لمقدار يبلغ ١ بكريل من نويدة مشعة وفقاً للسيناريو S.	غراي/بكريل	$DF_{T,S}^R(\Delta)$
معامل لتحويل الجرعة يساوي الجرعة الممتصة المودعة لمدة يومين من أي مجموعة من الإشعاعات ذات الانتقال الخطي المنخفض للطاقة والانتقال الخطي المرتفع للطاقة في العضو أو النسيج ٢ (النخاع الأحمر) بسبب أخذ داخلي ناتج عن استنشاق ١ بكريل من نويدة مشعة وفقاً للسيناريو الثالث E.	غراي/بكريل	$DF_{2,III}^{L+H}(\Delta)$
معامل لتحويل الجرعة يساوي الجرعة الممتصة المودعة لمدة ٣٦٥ يوماً من إشعاع ذي انتقال خطي مرتفع للطاقة في العضو أو النسيج E ₃ (المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي) بسبب أخذ داخلي لمقدار يبلغ ١ بكريل من هباء (أيروسول) نويدة مشعة طويلة العمر معيَّنة للاستنشاق من النوع S وفقاً للسيناريو الثالث E.	غراي/بكريل	$DF_{3E,III}^{HS}(\Delta)$
معامل لتحويل الجرعة يساوي الجرعة الممتصة المودعة لمدة يومين من إشعاع ذي انتقال خطي منخفض للطاقة في النسيج E ₃ (المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي) بسبب أخذ داخلي لمقدار يبلغ ١ بكريل من أيروسول نويدة مشعة لم يكن بالإمكان تعيينه للاستنشاق من النوع S وفقاً للسيناريو الثالث E.	غراي/بكريل	$DF_{3E,III}^L(\Delta)$

الوصف	الوحدة	الرمز
معامل لتحويل الجرعة يساوي الجرعة الممتصة المودعة لمدة ٣٦٥ يوماً من إشعاع ذي انتقال خطي منخفض للطاقة في النسيج E٣ (المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي) بسبب أخذ داخلي لمقدار يبلغ ١ بكريل من أيروسول غير قابل للذوبان من نويدة مشعة طويلة العمر وفقاً للسيناريو الثالث E.	غراي/بكريل	$DF_{3E,III}^{LS}(\Delta)$
معامل لتحويل الجرعة يساوي الجرعة الممتصة المودعة لمدة ٣٦٥ يوماً من إشعاع ذي انتقال خطي منخفض للطاقة في النسيج ٥ (الغدة الدرقية) بسبب أخذ داخلي لمقدار يبلغ ١ بكريل من نويدة مشعة مترسبة في الغدة الدرقية وفقاً للسيناريو الثالث E.	غراي/بكريل	$DF_{5,III}^L(\Delta)$
معامل لتحويل الجرعة يساوي معدل الجرعة الممتصة من إشعاع ذي انتقال خطي منخفض للطاقة في النسيج E٦ (الغشاء القاعدي للجلد) وفقاً للسيناريو الخامس بسبب وحدة تلوث سطحي من نويدة مشعة.	غراي/(بكريل × ثانية/م ^٢)	$DF_{6E,V}^L$
معامل لتحويل الجرعة يساوي معدل الجرعة الممتصة من إشعاع ذي انتقال خطي منخفض للطاقة في النسيج ٢ (النخاع الأحمر) بسبب الغمر في وحدة تركيز من غاز خامل مشع وفقاً للسيناريو السادس.	غراي/(بكريل × ثانية/م ^٣)	$DF_{2,VI}^L$
معامل لتحويل الجرعة يساوي الجرعة الممتصة المودعة من الإشعاع R في عضو أو نسيج T بسبب أخذ داخلي لمقدار يبلغ ١ بكريل من نويدة مشعة وفقاً للسيناريو S.	غراي/بكريل	$DF_{T,S}^R(\Delta)$
القيمة D ₁ لنويدة مشعة محسوبة باستخدام النهج المبني على الخبرة.	بكريل	$E D_1$
القيمة D ₂ لنويدة مشعة محسوبة باستخدام النهج المبني على الخبرة.	بكريل	$E D_2$
القيمة D ₁ لنويدة مشعة محسوبة باستخدام النهج القائم على المخاطر.	بكريل	$R D_1$
القيمة D ₂ لنويدة مشعة محسوبة باستخدام النهج القائم على المخاطر.	بكريل	$R D_2$
الجرعة الفعالة.	سيفرت	E
الجزء الكسري المستنشق من المادة المشعة المشتتة وفقاً للسيناريو الثالث.		F _{III}
الجزء الكسري المبتلع من المادة المشعة المشتتة وفقاً للسيناريو الرابع.		F _{IV}
الجزء الكسري المشتت من المادة المشعة وفقاً للسيناريو الخامس.		F _V
الجزء الكسري المشتت من المادة المشعة وفقاً للسيناريو السادس.		F _{VI}
الجرعة (المتصلة) المرجحة بالإشعاع في عضو أو نسيج.	سيفرت	H _T
الجرعة المرجحة بالإشعاع المودعة في عضو أو نسيج T بعد أخذ داخلي لنويدة مشعة.	سيفرت	H _T (τ)
كمية الأخذ الداخلي من نويدة مشعة.	بكريل	I
مجموع متوسط انتقال الطاقة الخطي للإشعاع المؤيّن في الماء السائل.	كيلو إلكترون فولط/ميكرون	LET
حد لكتلة المادة المشعة في السيناريو S. وإذا تجاوزت كتلة المادة ذات النشاط المعين هذا الحد، تعتبر النويدة المشعة غير محدودة.	غرام (غم)	M _S
نسبة تلوث الجلد والتلوث الأولي لشيء أو سطح وفقاً للسيناريو الخامس.		R _V
معامل الفعالية البيولوجية النسبية، وهو نسبة الجرعة الممتصة من إشعاع مرجعي ينتج أثراً بيولوجياً محدداً في عضو أو نسيج معين T بالنسبة للجرعة الممتصة من الإشعاع المعني (R) الذي يتولد عنه نفس الأثر البيولوجي.	(مكافئ غراي)/غراي	RBE _T ^R
مستوى مرجعي للجرعة الممتصة من أي إشعاع في النسيج ١ (النسيج الرخو) الذي ينشأ عنها ظهور آثار صحية قطعية عنيفة بسبب التعرض الموضعي الخارجي.	غراي	RD ₁ ^{L+H}

الوصف	الوحدة	الرمز
مستوى مرجعي للجرعة الممتصة من أي إشعاع في النسيج ٧ (الجدع) لحدوث آثار صحية قطعية عنيفة من تعرض الجسم بأكمله لمصدر خارجي بعيد.	غراي	RD ₇ ^{L+H}
مستوى مرجعي للجرعة الممتصة المودعة لمدة يومين من أي إشعاع في النسيج ٢ (النخاع الأحمر) لحدوث آثار صحية قطعية عنيفة بسبب تعرض داخلي.	غراي	RD ₂ ^{L+H} (Δ)
مستوى مرجعي للجرعة الممتصة المودعة في النسيج E ₃ (المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي) لحدوث آثار صحية قطعية عنيفة بسبب أخذ داخلي ناتج عن استنشاق نويدة مشعة طويلة العمر تبتعث إشعاعاً ذا انتقال خطي مرتفع للطاقة وخروج بطيء من الرئة.	غراي	RD _{3E} ^{HS} (Δ)
مستوى مرجعي للجرعة الممتصة المودعة لمدة يومين في النسيج E ₃ (المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي) لحدوث آثار صحية قطعية عنيفة بسبب أخذ داخلي ناتج عن استنشاق نويدة مشعة مبتعثة لإشعاع ذي انتقال خطي منخفض للطاقة لا يمكن تعيينه لمجموعة الخروج البطيء.	غراي	RD _{3E} ^L (Δ)
مستوى مرجعي للجرعة الممتصة المودعة لمدة ٣٦٥ يوماً في النسيج E ₃ (المنطقة الصدرية من الجهاز التنفسي) لحدوث آثار صحية قطعية عنيفة بسبب أخذ داخلي ناتج عن استنشاق نويدة مشعة طويلة العمر تبتعث إشعاعاً ذا انتقال خطي منخفض للطاقة وخروج بطيء من الرئة.	غراي	RD _{3E} ^{LS} (Δ)
مستوى مرجعي للجرعة الممتصة المودعة لمدة ٣٦٥ يوماً في النسيج ٥ (الغدة الدرقية) لحدوث آثار صحية قطعية عنيفة بسبب أخذ داخلي ناتج عن استنشاق نويدة مشعة مترسبة في الغدة الدرقية وتبتعث إشعاعاً ذا انتقال خطي منخفض للطاقة.	غراي	RD ₅ ^L (Δ)
مستوى مرجعي للجرعة الممتصة من إشعاع ذي انتقال خطي منخفض للطاقة في النسيج E ₆ (الغشاء القاعدي للجلد) لحدوث آثار صحية قطعية عنيفة نتيجة لتلوث الجلد.	غراي	RD _{6E} ^L
مساحة التلوث الأولي بسبب تشتت مادة مشعة وفقاً للسيناريو الخامس.	م ^٢	S _V
مستوى عتبة الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في النسيج ١ (النسيج الرخو) لحدوث آثار صحية قطعية عنيفة بسبب التعرض الموضعي الخارجي في النسيج الرخو.	مكافئ غراي	TD ₁
مستوى عتبة الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في النسيج ٧ (الجدع) لحدوث آثار صحية قطعية عنيفة نتيجة لتعرض الجسم بأكمله لمصدر خارجي بعيد.	مكافئ غراي	TD ₇
مستوى عتبة الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المودعة لمدة ٣٠ يوماً في النسيج ٢ (النخاع الأحمر) والتي تحدث عندها آثار صحية قطعية عنيفة بسبب أخذ داخلي لنويد مشعة.	مكافئ غراي	TD ₂ (Δ)
مستوى عتبة الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المودعة لمدة ٣٠ يوماً في النسيج R ₃ (المنطقة السنخية من الجهاز التنفسي) التي تحدث عندها آثار صحية قطعية عنيفة بسبب أخذ داخلي لنويد مشعة.	مكافئ غراي	TD _{3R} (Δ)
مستوى عتبة الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المودعة لمدة ٣٠ يوماً في النسيج ٤ (القولون) وتحدث عندها آثار صحية قطعية عنيفة بسبب أخذ داخلي لنويد مشعة.	مكافئ غراي	TD ₄ (Δ)
مستوى عتبة الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية المودعة لمدة ٣٦٥ يوماً في النسيج ٥ (الغدة الدرقية) وتحدث عندها آثار صحية قطعية عنيفة بسبب أخذ داخلي لنويد مشعة.	مكافئ غراي	TD ₅ (Δ)

الوصف	الوحدة	الرمز
مستوى عتبة الجرعة المرجحة بالفعالية البيولوجية النسبية في النسيج R ₆ (أدمة الجلد) وتحدث عندها آثار صحية قطعية عنيفة نتيجة لتلوث الجلد عن طريق تعرضه بالتلامس.	مكافئ غراي	TD _{6R}
زمن التعرض الذي يساوي فترة التشعيع المحددة في السيناريو S. حجم الغرفة التي ينطلق فيها الغاز الخامل المشع وفقاً للسيناريو السادس. المعامل الإشعاعي الترجيحي.	ثانية (ث) متر مكعب (م ³) سيفرت/غراي	T _S V _{VI} W _R

المساهمون في الصياغة والاستعراض

Buglova, E.	International Atomic Energy Agency
Dodd, B.	BD Consulting, Las Vegas, NV, United States of America
Eckerman, K.	Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, United States of America
Koukhta, B.	State Research Centre “Institute of Biophysics”, Moscow, Russian Federation
Kutkov, V.	Russian Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russian Federation
McKenna T.	International Atomic Energy Agency
Wheatley, J.	International Atomic Energy Agency

EPR-D-
VALUES

2006

الوكالة الدولية للطاقة الذرية
فيينا