

الحماية من الإشعاعات المؤينة في المحطات النووية

- مقدمة • الوقاية من الإشعاعات النووية • الحماية من أشعة جاما • الحماية من النيوترونات • تصاميم الدروع الإشعاعية • تمارين

(١١،١) مقدمة

يتعرض الإنسان يومياً إلى جرعات إشعاعية ناتجة عن مصادر مختلفة، أهمها المصادر الطبيعية، مثل الصخور، والمباني، والتربة، والفضاء الخارجي، وجسم الإنسان نفسه. وتمثل هذه المصادر الطبيعية حوالي (٨٥٪) من الجرعة الإشعاعية التي يتعرض لها الإنسان، أما بقية النسبة (١٥٪) فيتعرض لها من مصادر إشعاعية ناتجة عن نشاط الإنسان، مثل المصادر الإشعاعية الطبية، أو الصناعية. ولقد تعود الإنسان منذ القدم على العيش في هذا الوسط الطبيعي المشع، الذي ليس له تأثير واضح على الصحة. واكتشف الإنسان منذ عصر الذرة أن الإشعاعات المؤينة لها تأثير سلبي على الصحة كلما زادت الجرعة الإشعاعية. ولهذا عمل المختصون منذ البداية على تقليل الجرعة الإشعاعية الناتجة عن نشاط الإنسان في المجالات المختلفة وأبرزها الطب والصناعة.

تكونت منذ بداية عصر الذرة لجان ومنظمات عالمية لدراسة الإشعاعات المؤينة المختلفة وتأثيرها على صحة الإنسان والبيئة. وهكذا تم توحيد الوحدات الإشعاعية، وكيفية قياسها، ودراسة تأثيرها على الصحة واستنتاج العديد من التوصيات والقواعد الخاصة بكيفية التعامل مع الإشعاعات المؤينة.

سندرس في هذا الفصل أهم أنواع الإشعاعات المؤينة وحساب الجرعة الإشعاعية وتأثيرها على صحة الإنسان وسنتناول كذلك موضوع الوقاية من الإشعاعات الأكثر خطورة على الصحة. وسيختص الجزء الأخير من هذا الفصل بموضوع الحماية من الإشعاعات، وكيفية بناء الدروع الواقية منها في المحطات النووية.

(١١،٢) الوقاية من الإشعاعات النووية

لقد أثبتت مختلف دراسات التأثير الحيوي (البيولوجي) للإشعاعات النووية أو (المؤينة) وجود علاقة طردية تقريباً بين التأثيرات الصحية للإشعاعات والجرعة الإشعاعية الممتصة. فكلما زادت الجرعة زاد تأثيرها في الكائنات الحية وحتى في المادة بشكل عام. ويُستثنى من هذه القاعدة تأثير الجرعات الصغيرة على الصحة التي لم يتضح بعد لما في ذلك من صعوبة فصل تأثير هذه الجرعات البسيطة عن باقي المؤثرات الطبيعية؛ ولهذا أصبح من المتعارف عليه في مجال الوقاية من الإشعاعات تقليل الجرعة الممتصة قدر الإمكان والأخذ في الحسبان بميزان النفع والضرر المحتمل أثناء التعرض للإشعاعات النووية في النشاطات الإنسانية؛ ولذلك يجب تطبيق القوانين المحلية والعالمية واتباع توصيات المنظمات الدولية للوقاية من الإشعاعات النووية. وللمزيد من المعلومات في هذا المجال ينصح بالرجوع إلى كتابنا "هندسة الإشعاع النووي"، الذي يعطي نظرة تفصيلية عن قواعد الوقاية، وكيفية حساب الجرعات الإشعاعية المختلفة وقياسها.

(١, ٢, ١١) الإشعاعات النووية (المؤينة)

تُعرف الإشعاعات النووية المؤينة بقدرتها على تأيين الذرات أثناء تفاعلها مع المادة، وبمعنى آخر إنتاج أيونات سالبة (إلكترونات) وأيونات موجبة (بقية الذرة بعد فقدانها إلكترونات فأكثر). ويسبب تأيين ذرات الخلية الحية أثناء تعرضها للإشعاعات أضراراً تتناسب مع كمية الإشعاعات، مما يؤدي أحياناً إلى تعطيل أداء بعض وظائفها وربما موت الخلية ثم ظهور الأعراض الصحية. وكما سبق ذكره، فقد تعود الإنسان أن يعيش في بيئة طبيعية مشعة، لكن يكمن الخطر في زيادة الجرعات الإشعاعية الممتصة بسبب نشاط الإنسان. ولهذا؛ فإن قواعد الوقاية تركز خاصة على الجزء الناتج عن المصادر غير الطبيعية، مثل المصادر المشعة المصنعة، كالأجهزة والمواد المشعة التي يستعملها الإنسان في العديد من المجالات، مثل الطب والصناعة والزراعة إلى آخره. ومن المهم هنا التذكير بأهم أنواع الإشعاعات المؤينة وبعض خصائصها باختصار.

(١, ٢, ١١) أشعة ألفا (α)

تظهر أشعة ألفا على شكل جسيمات شبيهة بنواة الهيليوم، حيث تتكون من بروتونين اثنين ونيوترونين اثنين. تصدر المواد الثقيلة المشعة المصنعة أو الطبيعية، مثل الكيريوم، واليورانيوم، والثوريوم، والرادون جسيمات ألفا أثناء تفككها. وتتميز أشعة ألفا بكفاءة عالية للتأيين، لكن مسافة اختراقها للمواد قصيرة جداً، مما يجعلها خطرة خاصة عندما تكون داخل الجسم.

(١, ٢, ١١) أشعة بيتا (β)

تظهر أشعة بيتا على شكل إلكترونات سالبة أو موجبة ذات طاقة عالية، وتصدر هذه الجسيمات من داخل نواة المواد المشعة (غير المستقرة). تصدر هذه النظائر أثناء تفككها أشعة بيتا من النواة نتيجة تحول نيوترون إلى بروتون (β^-) أو العكس (β^+). أشعة بيتا هذه أقل كفاءة في تأيين المواد من أشعة ألفا، لكن لها قدرة أكبر على

اختراق المواد، إلا أنه من السهل الحماية منها خارجياً، وذلك بوضع حاجز بسيط أمام المصدر لا يتجاوز سمكه بضع مليمترات من الخشب أو الألومنيوم مثلاً.
(١١,٢,١,٣) أشعة جاما (٧)

تظهر أشعة جاما على شكل إشعاع كهرومغناطيسي ذي طاقة عالية وطول موجة قصير جداً. تصدر أشعة جاما من النواة خلال تفكك النظائر المشعة وأثناء بعض التفاعلات النووية، مثل الانشطار أو أسر النيوترونات. وتتميز أشعة جاما بقدرتها الفائقة على اختراق المواد؛ ولهذا فإنها تعدُّ من أخطر الإشعاعات المؤذية على الرغم من قلة كفاءتها لتأيين ذرات المادة مقارنة بالجسيمات السابقة الذكر. ولهذا يجب العمل على حماية الأشخاص والمعدات من هذه الأشعة، وذلك بوضع الدروع المناسبة أمام مصادر أشعة جاما لتخفيف الجرعة الإشعاعية في موقع العمل.

(١١,٢,١,٤) أشعة X (الأشعة السينية)

تظهر أشعة X أو الأشعة السينية على شكل فوتونات، وهي شبيهة بأشعة جاما، إلا أنها ذات طاقة أقل بالإضافة إلى أنها لا تصدر من النواة بل ناتجة عن انتقال الإلكترونات من مدار إلى مدار آخر. وتستخدم الأشعة السينية بكثرة في مجالي الطب والصناعة، وتنتج عن طريق بعض المصادر المشعة أو أنابيب أشعة أكس (X).

(١١,٢,١,٥) النيوترونات

تظهر النيوترونات السريعة والحرارية بكثرة داخل المفاعلات النووية أثناء التفاعلات النووية مثل انشطار النوى الثقيلة، وعملية التهذئة. وتعدُّ هذه النيوترونات المحرك الأساسي للمفاعل. وتتميز هذه الجسيمات بقدرتها عالية على اختراق المواد وإنتاج إشعاعات مؤينة ثانونية مختلفة أثناء تفاعلها مع المادة؛ ولهذا فإنها تعدُّ من أخطر الإشعاعات النووية على الإطلاق، مما يحتم حماية الأشخاص والمعدات من التعرض لهذا النوع من الإشعاعات باستعمال الدروع المناسبة.

(١١,٢,١,٦) الأشعة الكونية

تظهر الأشعة الكونية التي تُمطر الأرض من الفضاء الخارجي على شكل جسيمات مشحونة ذات طاقة عالية مثل البروتون. ويقلل الغلاف الجوي من خطر هذه الأشعة عادة وتزيد كميتها كلما اقتربنا من قطبي الأرض وارتفعنا عن سطح البحر. ولا يزال الغلاف الجوي الحامي الأساسي للحياة على الأرض من الأشعة الكونية؛ ولهذا على الإنسان عدم تلويث هذا الغلاف الذي لا بديل لنا عنه بغازات ملوثة تحد من كفاءته لحماية الأرض.

(١١,٢,٢) وحدات الجرعات الإشعاعية

الكمية الأساسية للجرعات الإشعاعية هي الجرعة الممتصة التي تمثل كمية الطاقة الممتصة عن طريق تفاعل الإشعاعات المؤينة مع ذرات المادة. وتُعرف الجرعة الممتصة بوحدة القراي (Gray) وبالمعادلة الرياضية الآتية:

$$(١١,١) \quad D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad ; \quad [Unit: J.Kg^{-1} = Gy (Gray)]$$

حيث إن:

$d\bar{\epsilon}$: متوسط كمية الطاقة الإشعاعية الممتصة.

dm: كتلة المادة الماصة للإشعاعات المؤينة.

لقد عُرِّفت كمية أساسية ثانية للجرعات الإشعاعية سُميت بالجرعة المكافئة أو الفعالة. وهذه الجرعة تأخذ في حسابها اختلاف التأثير البيولوجي لأنواع الإشعاعات المؤينة المتعددة. أما وحدة الجرعة المكافئة فهي السيفرت (sv) والعلاقة بين الجرعتين الأساسيتين تُعرف بالمعادلة الآتية:

$$(١١,٢) \quad H_E = D \times W_R \quad ; \quad [Unit: J.Kg^{-1} = Sv (Sievert)]$$

حيث إن :

H_E : الجرعة المكافئة.

D : الجرعة الإشعاعية الممتصة.

W_R : معامل الوزن الإشعاعي الموضح قيمه في الجدول رقم (١١, ١).

الجدول رقم (١١, ١). قيم معامل الوزن الإشعاعي W_R .

W_R	نوع الإشعاع
١	بيتا (β) والفوتونات (γ, X)
٥	البروتونات $< 2 \text{ MeV}$
١٠-٥	النيوترونات (حسب الطاقة)
٢٠	ألفا

تجدر الإشارة إلى أن الوحدة القديمة للجرعة الممتصة تسمى الراد (Rad) علماً أن الراد يعادل امتصاص واحد غرام من المادة لمائة أرق (100 erg/g)، مما يجعل (1Gy=100 Rad)، أما الوحدة القديمة للجرعة المكافئة فهي تسمى الرام (rem) علماً أن واحد سيفرت يساوي مائة رام (1 sv = 100 rem)

(١١, ٢, ٣) التأثير البيولوجي للإشعاعات

تعتمد المعرفة الحالية للتأثيرات البيولوجية على دراسة الأعراض الصحية للأشخاص الذين تعرضوا لجرعات إشعاعية كبيرة بسبب التفجيرات النووية أو الحوادث الإشعاعية أو العلاج. وتنقسم هذه التأثيرات إلى قسمين: الأول خاص بالتأثيرات الذاتية، وهي الأعراض (مثل السرطان)، التي تظهر في الشخص نفسه، الذي تعرض للإشعاعات، أما القسم الثاني فهو خاص بالتأثيرات الوراثية (التشوه الخلقي)، التي تظهر في الأجيال اللاحقة (الأبناء)، للشخص الذي تعرض

للإشعاعات نتيجة تأثر الأعضاء التناسلية. لقد تبين من هذه الدراسات حتى اليوم أن خطورة هذه الأعراض الصحية مرتبطة بكمية الإشعاعات الممتصة ومعدل امتصاصها والفترة الزمنية لظهورها. واتضح كذلك وجود علاقة طردية لظهور التأثيرات البيولوجية بالنسبة للجرعات الكبيرة، لكن لا توجد علاقة واضحة بين الأعراض الصحية والجرعات الصغيرة. كذلك فإنه من الصعب تحديد عتبة للجرعة الممتصة، وتحديد بداية للتأثيرات البيولوجية والأعراض الصحية خاصة أنها عادة ما تظهر بعد مدة طويلة من التعرض للإشعاعات. ويوضح الجدول رقم (١١،٢) بعض قيم الجرعات الإشعاعية وأعراضها الصحية.

الجدول رقم (١١،٢). الجرعات الإشعاعية وأعراضها الصحية [٩].

ملاحظة	الأعراض الصحية	الجرعات المكافئة سنوياً
الجرعة المكافئة الطبيعية	-	mSv 10-2
الجرعة المسموح بها للعاملين في مجال الإشعاع	-	mSv 20
بداية العلاقة الطردية بين الجرعة والأعراض الصحية	-	mSv 100
زيادة ٥ ٪ من حالات السرطان	سرطان	الجرعات التراكمية = 1.0 Sv
الأعراض المباشرة: (احمرار الجلد- تقيؤ) الأعراض غير المباشرة: (السرطان بعد مدة من الزمن)	أعراض مباشرة وغير مباشرة	مرة واحدة = 1.0 Sv
موت محتم خلال أربعة أشهر	موت خلال شهر	مرة واحدة = 5.0 Sv
موت محتم خلال أسابيع	موت شبه مباشر	مرة واحدة = 10.0 Sv

لقد أكدت المنظمة العالمية للوقاية من الإشعاع (ICRP) في تقريرها الأخير (ICRP-60) أن لكل جرعة إشعاعية، مهما قلت، احتمالاً ولو ضعيفاً لظهور التأثيرات البيولوجية، وبتزايد هذا الاحتمال كلما زادت الجرعة. كذلك أوصت هذه المنظمة بحدود الجرعات المسموح بها لكل من العاملين في مجال الإشعاع والجمهور كما هو موضح في الجدول رقم (١١،٣) الآتي:

الجدول رقم (١١,٣). الجرعات المسموح بها سنوياً [٩].

نوع الجرعة	العاملين في مجال الإشعاع (msv)	عامّة الجمهور (msv)
الجرعة الفعّالة	٢٠	٢
المتوسط خلال ٥ سنوات	١٠٠	-
الجرعة المكافئة		
عدسة العين	١٥٠	١٥
الجلد	٥٠٠	٥٠
الأطراف	٥٠٠	-

تجدر الإشارة إلى أن حدود هذه الجرعات المسموح بها ليست هدفاً في حد ذاتها، بل هي حد أقصى يجب العمل على عدم تجاوزه قدر الإمكان مع الأخذ بميزان الفائدة والضرر. ولتحقيق ذلك بالنسبة للعاملين في مجال الإشعاع العمل بالتوصيات الآتية لتخفيض الجرعة الإشعاعية.

أولاً: تقليص زمن التعرض للإشعاعات قدر الإمكان.

ثانياً: زيادة المسافة بين المصدر ومكان العمل.

ثالثاً: وضع حواجز ودروع للحماية من الإشعاعات.

رابعاً: احتواء المصادر المشعة داخل أوعية مناسبة حامية للأشخاص والبيئة.

(١١,٣) الحماية من أشعة جاما

ترتكز الحماية من الإشعاعات النووية على مبدأ تخفيض شدة المصدر المشع في منطقة الشغل قدر الإمكان. وتتم هذه العملية عن طريق زيادة المسافة بين المصدر المشع والمنطقة المحددة، وخصائص الدروع اللازمة التي نحتاج إلى وضعها عادة بين المصدر المشع ومنطقة الشغل.

(١١,٣,١) مصدر نقطي

إذا كان لدينا مصدر مشع نقطي (جسمه صغير) ذو شدة إشعاعية، S (γ/sec) يصدر أشعة جاما في كل الاتجاهات، يمكن الحماية من الإشعاعات بمجرد الابتعاد عنه

إذا كان ذلك ممكناً. وعندما يتعذر ذلك لسبب أو آخر يجب إضافة الدروع اللازمة لجعل مستوى الإشعاع مقبولاً في منطقة الشغل.

(١١,٣,١,١) المسافة

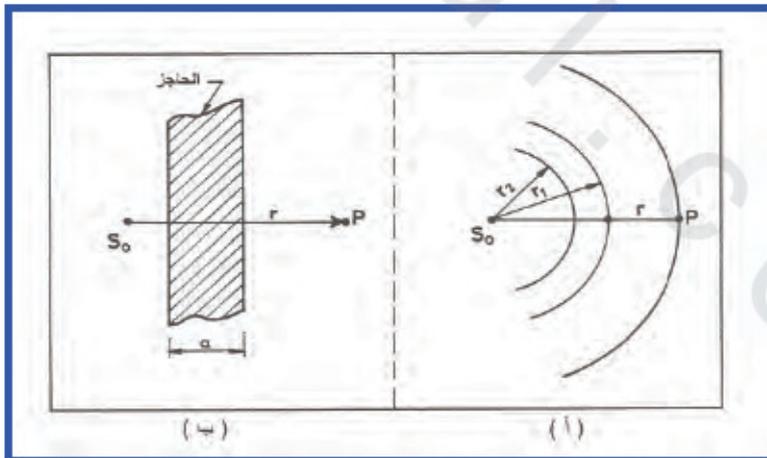
يؤدي الابتعاد، أي زيادة المسافة بين المصدر ومنطقة الشغل، إلى تخفيض مستوى الإشعاع وفق قانون عكس مربع المسافة. هذا القانون ناتج عن ثبات عدد الإشعاعات الصادرة عن سطح الكرة الافتراضية حول المصدر الموجود في المركز، وذلك عند إهمال توهين أشعة جاما في الوسط (الهواء مثلاً) كما هو موضح في الشكل رقم (١١,١ أ). وهكذا يمكن استنتاج القانون السابق من المعادلة الآتية:

$$(١١,٣) \quad 4\pi r^2 \phi_\gamma(r) = S_0 \Rightarrow \phi_\gamma(r) = \frac{S_0}{4\pi r^2}$$

حيث إن:

$\phi_\gamma(r)$: فيض أشعة جاما ($\gamma/cm^2 \cdot sec$) عند النقطة P.

r : نصف قطر الكرة أو المسافة بين المصدر ومنطقة الشغل.



الشكل رقم (١١,١). مصدر مشع نقطي.

(٢، ١، ٣، ١١) الدرّع (التوهين)

إذا كان تخفيض شدة الإشعاع بالابتعاد عن المصدر غير كافٍ في منطقة الشغل، فيجب إضافة درّع (حاجز) ليصبح مستوى الإشعاع مقبولاً، ذلك لأن تفاعل أشعة جاما مع ذرات مادة الدرّع يؤدي إلى فقدان جزء منها، مما يحد من مستوى الإشعاع في المنطقة التي تلي الدرّع بسبب توهين إشعاعات المصدر (انظر الشكل رقم (١، ١١ ب))، وتعتمد نسبة التوهين هذه على طاقة الإشعاع ونوعية مادة الدرّع وسمكه وفق المعادلة الآتية:

$$(١١، ٤) \quad d\phi_{\gamma}(r, a) = -\mu \cdot \phi_{\gamma}(r) dx \Rightarrow \phi_{\gamma}(r, a) = \phi_{\gamma}(r) e^{-\mu a}$$

حيث إن:

a: سمك الدرّع.

μ : معامل توهين مادة الدرّع الذي يستنتج من معامل التوهين الكتلي.

(μ / ρ) كما هو موضح في الجدول رقم (١١، ٤) على سبيل المثال.

الجدول رقم (١١، ٤). معامل التوهين لأشعة جاما: (μ / ρ) [1] (cm^2g^{-1})

الطاقة (MeV)							الكثافة g.cm ⁻³	المادة
10	5	3	2	1	0.5	0.1		
0.0219	0.0301	0.0396	0.0493	0.0706	0.0966	0.1830	1.00	الماء
0.0194	0.0270	0.0356	0.0444	0.0636	0.0870	0.1490	1.60	الكربون
0.0229	0.0280	0.0353	0.0432	0.0614	0.0840	0.1610	2.70	الأنثيموم
0.0299	0.0317	0.0363	0.0424	0.0595	0.0828	0.3440	7.86	الحديد
0.0465	0.0409	0.0405	0.0437	0.0640	0.1250	4.2100	18.9	التنقستن
0.0489	0.0426	0.0421	0.0457	0.0684	0.1450	5.2900	11.3	الرصاص
0.0511	0.0446	0.0445	0.0484	0.0757	0.1760	8.0000	18.7	اليورانيوم
0.0218	0.0287	0.0363	0.0445	0.0635	0.0870	0.1690	2.35	الخرسانة

تجدر الإشارة إلى أنه في حالة الدروع المتعددة المتتالية تصبح المعادلة السابقة كما يلي :

$$(١١,٥) \quad \phi_{\gamma}(r, a_i) = \phi_{\gamma}(r) \exp[-(\mu_1 a_1 + \mu_2 a_2 + \dots + \mu_n a_n)]$$

حيث إن :

a_i : تمثل سمك الدرع i .

μ_i : معامل توهين الدرع i .

(١١,٣, ١,٣) معامل التراكم (Bp)

تتفاعل أشعة جاما أثناء اختراقها طبقات الدرع مع إلكترونات المادة حسب طاقتها بالتأثير الكهروضوئي وتأثير كومبتون والإنتاج الزوجي ، هذه التفاعلات لا تؤدي دائماً إلى اختفاء الفوتون بل تؤدي إلى توليد فوتونات جديدة بطاقة أقل خاصة عند تأثير كومبتون بسبب التشتت. وتساهم هذه الفوتونات المولدة داخل الدرع في الجرعة الإشعاعية الحاصلة بعد الدرع. وتقدر هذه المساهمة بمعامل التراكم الذي هو مرتبط بنوع الدرع وسمكه (μa) ، وهكذا يصبح فيض الإشعاعات التراكمي الذي يستعمل في حساب الجرعة كما يلي :

$$(١١,٦) \quad \begin{aligned} \phi_{\gamma b}(P) &= \int_0^E \phi_{\gamma}(r, a) dE \approx B_p(\mu a) \phi_{\gamma}(r, a) \\ &= S_0 B_p(\mu a) \cdot \frac{e^{-\mu a}}{4\pi r^2} \end{aligned}$$

حيث إن :

$B_p(\mu a)$: معامل التراكم للمصدر النقطي الخاص بالدرع الذي له السمك a

ومعامل التوهين μ .

تجدر الإشارة إلى أن معامل التراكم $B_p(\mu a)$ قد حُصِب تجريبياً للعديد من المواد المستعملة في الدروع الإشعاعية. ويظهر الجدول رقم (١١,٥) أهم القيم لهذا المعامل وفق طاقة أشعة جاما ونوع مادة الدرع.

الجدول رقم (١١,٥). معامل التراكم لمصدر نقطي: $B_p(\mu a)$.

μa							الطاقة MeV	المادة
20	15	10	7	4	2	1		
982.0	456.0	166.0	72.9	23.0	7.14	3.09	0.255	الماء
334.0	178.0	77.6	38.8	14.3	5.14	2.52	0.5	
82.2	50.4	27.1	16.2	7.68	3.71	2.13	1.0	
27.7	1.95	12.4	8.46	4.88	2.77	1.83	2.0	
17.0	12.8	8.63	6.23	3.91	2.42	1.69	3.0	
12.9	9.97	6.94	5.13	3.34	2.17	1.58	4.0	
8.85	7.09	5.18	3.99	2.76	1.91	1.46	6.0	
141.0	80.0	38.9	21.5	9.47	4.24	2.37	0.5	الأنثيموم
58.5	47.9	21.2	13.1	6.57	3.31	2.02	1.0	
26.3	18.7	11.9	8.05	4.62	2.61	1.75	2.0	
17.7	13.0	8.65	6.14	3.78	2.32	1.64	3.0	
13.4	10.1	6.88	5.01	3.22	2.08	1.53	4.0	
10.4	7.97	5.49	4.06	2.70	1.85	1.42	6.0	
55.5	35.4	19.2	11.7	5.98	3.09	1.98	0.5	الحديد
42.7	28.3	16.2	10.2	5.39	2.89	1.87	1.0	
25.1	17.6	10.9	7.25	4.13	2.43	1.76	2.0	
19.1	13.5	8.51	5.85	3.51	2.15	1.55	3.0	
16.0	11.2	7.11	4.91	3.03	1.94	1.45	4.0	
14.7	9.89	6.02	4.14	2.58	1.72	1.34	6.0	
2.73	2.65	2.27	2.00	1.69	1.42	1.24	0.5	الرصاص
5.86	4.81	3.74	3.02	2.26	1.69	1.37	1.0	
9.00	6.87	4.84	3.66	2.51	1.76	1.39	2.0	
12.3	8.44	5.30	3.75	2.43	1.68	1.34	3.0	
16.3	9.8	5.44	3.61	2.25	1.56	1.27	4.0	
32.7	13.8	5.69	3.34	1.97	1.40	1.18	6.0	
-	2.08	1.85	1.67	1.48	1.30	1.17	0.5	اليورانيوم
-	3.67	2.97	2.50	1.98	1.56	1.31	1.0	
6.48	5.36	3.95	3.09	2.23	1.64	1.33	2.0	
9.88	6.97	4.51	3.27	2.21	1.58	1.29	3.0	
12.7	8.01	4.66	3.21	2.09	1.50	1.24	4.0	
23.0	10.8	4.80	2.96	1.85	1.36	1.16	6.0	

لقد أُستنتجت معادلة رياضية لحساب معامل التراكم $B_p(\mu a)$ تعتمد على الدوال الأسية والمعادلة الأكثر استعمالاً لها الصيغة الآتية:

$$(11,7) \quad B_p = A e^{-\alpha \mu a} + (A-1) e^{-\beta \mu a}$$

حيث إن:

a: سمك الدرغ.

A, α و β ثوابت مرتبطة بطاقة أشعة جاما الأصلية ومادة الدرغ كما هو موضح

في الجدول رقم (١١,٦) الآتي:

الجدول رقم (١١,٦). ثوابت معامل التراكم لمصدر نقطي [١٦].

β	$-\alpha$	A	الطاقة (MeV)	المادة
-0.10925	0.12687	100.845	0.5	الماء
-0.02522	0.09037	19.601	1.0	
0.01932	0.05320	12.612	2.0	
0.03206	0.03550	11.110	3.0	
0.03025	0.02543	11.163	4.0	
0.04164	0.01820	8.385	6.0	
-0.06312	0.10015	38.911	0.5	الألنيوم
-0.02973	0.06820	28.782	1.0	
0.00271	0.04588	16.981	2.0	
0.02514	0.04066	10.583	3.0	
0.03860	0.03973	7.526	4.0	
0.04347	0.03934	5.713	6.0	
-0.03742	0.06842	31.379	0.5	الحديد
-0.02463	0.06086	24.957	1.0	
-0.00526	0.04627	17.622	2.0	
-0.00087	0.04431	13.218	3.0	
0.00175	0.04698	9.624	4.0	
-0.00186	0.06150	5.867	6.0	
0.30941	0.03084	1.677	0.5	الرصاص
0.13486	0.03503	2.984	1.0	
0.04379	0.03482	5.421	2.0	
0.00611	0.05422	5.580	3.0	
-0.02383	0.08468	3.897	4.0	
-0.04635	0.17860	0.926	6.0	
-0.10579	0.14824	38.225	0.5	الخرسانة
-0.01843	0.07230	25.507	1.0	
0.00849	0.04250	18.089	2.0	
0.02022	0.03200	13.640	3.0	
0.02450	0.02600	11.460	4.0	
0.02925	0.01520	10.781	6.0	

مثال:

أوجد الفيض التراكمي $\phi_{\gamma b}(P)$ الناتج عن مصدر نقطي لأشعة جاما في منطقة الشغل التي تبعد متراً عن المصدر؛ علماً أن شدة إشعاع المصدر تساوي $S_0 = 5 \times 10^8 \gamma/sec$ بطاقة 1MeV أما سمك الدرع الحديدي فيساوي 1.0 cm عند إهمال توهين الإشعاعات في الهواء.

الحل:

فيض أشعة جاما بعد متر واحد بدون الدرع الحديدي:

$$\phi_{\gamma}(100) = \frac{S_0}{4\pi r^2} = \frac{5 \times 10^8}{4\pi(100)^2} = 3.98 \times 10^3 \gamma/cm^2 sec$$

فيض أشعة جاما بعد الدرع الحديدي:

$$\begin{aligned} \phi_{\gamma}(100,1) &= \phi_{\gamma}(100) \times e^{-\mu a} \\ &= 3.98 \times 10^3 \cdot e^{-0.468 \times 1} = 2.493 \times 10^3 \gamma/cm^2 sec \end{aligned}$$

• الجدول رقم (١١،٤) معامل التوهين

$$\frac{\mu}{\rho_{Fe}} = 0.0595 \text{ cm}^2/g \Rightarrow \mu = 0.468 \text{ cm}^{-1}$$

• الجدول رقم (١١،٥) المعامل التراكمي: $B_p(0.468) \approx 1.407$

فيض أشعة جاما التراكمي:

$$\begin{aligned} \phi_{\gamma b}(100,1) &= \phi_{\gamma}(100,1) \times B_p(\mu a) \\ &= 2.493 \times 10^3 \times 1.407 = 3.508 \times 10^3 \gamma/cm^2 sec \end{aligned}$$

(١١،٣،١،٤) اتجاه الإشعاع الموحد

عندما يكون المصدر المشع يصدر إشعاعات في اتجاه واحد (محصور بالحواجز:

collimated beam) يجب إلغاء معامل المسافة $4\pi r^2$ حيث يصبح فيض أشعة جاما بعد

الدرع على النحو الآتي:

$$(11,8) \quad \phi_{\gamma}(r, a) = I_0 e^{-\mu a}$$

حيث إن :

I_0 : شدة شعاع جاما في الاتجاه المحدد عند المصدر.

a : سمك الدرع.

أما فيض أشعة جاما التراكمي في هذه الحالة فيكتب على النحو الآتي :

$$(11,9) \quad \phi_{\gamma b}(r, a) = I_0 B_m e^{-\mu a}$$

حيث إن :

B_m : المعامل التراكمي لأشعة جاما ذات الاتجاه الموحد.

تجدر الإشارة إلى أن معامل التراكم B_m يختلف عن معامل التراكم B_p

للمصدر النقطي السابق. ولقد حُددت قيمته تجريبياً ويوضح الجدول رقم (١١,٧)

الآتي بعض قيم هذا المعامل.

الجدول رقم (١١,٧). معامل التراكم لأشعة جاما ذات الاتجاه الموحد، $B_m(\mu a)$.

μa						الطاقة MeV	المادة
15	10	7	4	2	1		
74.9	35.9	20.0	9.05	4.29	2.63	0.5	الماء
30.8	18.0	11.5	6.27	3.39	2.26	1.0	
14.4	9.87	6.96	4.28	2.63	1.84	2.0	
10.8	7.48	5.51	3.57	2.31	1.69	3.0	
8.54	6.19	4.63	3.12	2.10	1.58	4.0	
6.78	4.86	3.76	2.63	1.86	1.45	6.0	
20.6	12.4	8.31	4.87	2.94	2.07	0.5	الحديد
18.9	11.6	7.81	4.57	2.74	1.92	1.0	
13.7	8.78	6.11	3.76	2.35	1.69	2.0	
11.4	7.41	5.26	3.32	2.13	1.58	3.0	
9.92	6.46	4.61	2.95	1.90	1.48	4.0	
8.39	5.35	3.81	2.48	1.71	1.35	6.0	

تابع الجدول رقم (١١,٧).

μa						الطاقة MeV	المادة
15	10	7	4	2	1		
10.5	7.19	5.18	3.40	2.24	1.65	1.0	قصدير
11.0	7.13	5.12	3.27	2.13	1.58	2.0	
-	6.30	4.31	2.69	1.80	1.39	4.0	
11.0	5.77	3.72	2.27	1.57	1.27	6.0	
-	2.08	1.87	1.63	1.39	1.24	0.5	الرصاص
4.20	3.40	2.80	2.18	1.68	1.38	1.0	
5.94	4.35	3.36	2.41	1.76	1.40	2.0	
7.18	4.82	3.55	2.42	1.71	1.36	3.0	
7.70	4.69	3.29	2.18	1.56	1.28	4.0	
9.53	4.69	2.97	1.87	1.40	1.19	6.0	
-	1.73	1.60	1.45	1.28	1.17	0.5	اليورانيوم
3.60	2.70	2.32	1.90	1.53	1.30	1.0	
4.89	3.56	2.87	2.15	1.26	1.33	2.0	
5.94	3.99	3.02	2.13	1.57	1.29	3.0	
6.47	4.06	2.94	2.02	1.49	1.25	4.0	
7.79	4.12	2.74	1.82	1.37	1.18	6.0	

(١١,٣,٢) مصدر مشع على شكل لوح أو قرص

إذا كان لدينا مصدر مشع على شكل لوح غير منتهٍ، يصدر أشعة جاما في كل الاتجاهات وبشدة تساوي S_0 (γ/sec) يمكن استعمال نظرية نقطة اللب لحساب فيض الأشعة عند نقطة تبعد مسافة r على اللوح؛ ولهذا نفترض حلقة في وسط اللوح سمكها dz ونصف قطرها z (النقاط) كما هو موضح في الشكل رقم (١١,٢) أ. تنص هذه النظرية على أن فيض الإشعاعات عند النقطة P الناتج عن المصدر المشع الموزع على مساحة شريط الحلقة الافتراضية ($A = 2\pi z dz$) يكافئ فيض الإشعاعات الناتج عن مجموعة من المصادر النقطية المشعة في هذه الحلقة. واستناداً لهذه النظرية يمكن حساب فيض أشعة جاما عند النقطة P التي تبعد المسافة a عن اللوح المشع على النحو الآتي:

$$(11,10) \quad \phi_{\gamma}(P) = \frac{S_0}{2} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\mu r}}{r^2} z dz = \frac{S_0}{2} \int_a^{\infty} \frac{e^{-\mu r}}{r^2} dr = \frac{S_0}{2} \int_{\mu a}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt$$

$$t = \mu r$$

يلاحظ تعويض المتغير z بالمتغير r ثم تعويض هذا الأخير بالمتغير t لتسهيل الحسابات، علماً أن $r^2 = a^2 + z^2$ و $r dr = z dz$. رغم ذلك لا يمكن حساب هذا التكامل لكن يمكن تعويضه بالدالة التكاملية الآتية:

$$(11, 11) \quad E_n(x) = x^{n-1} \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t^n} dt \approx e^{-x} \left[\frac{1}{x+n} + \frac{n}{(x+n)^2} \right]$$

وبالعودة إلى حساب فيض أشعة جاما (المعادلة (11, 11)) نجد أن $n=1$ ، مما يجعل فيض أشعة جاما عند النقطة P كما يلي:

$$(11, 12) \quad \phi_\gamma(P) = \frac{S_0}{2} E_1(\mu a)$$

أما حساب الفيض التراكمي عند النقطة P فيحسب بنفس الطريقة السابقة وذلك على النحو الآتي:

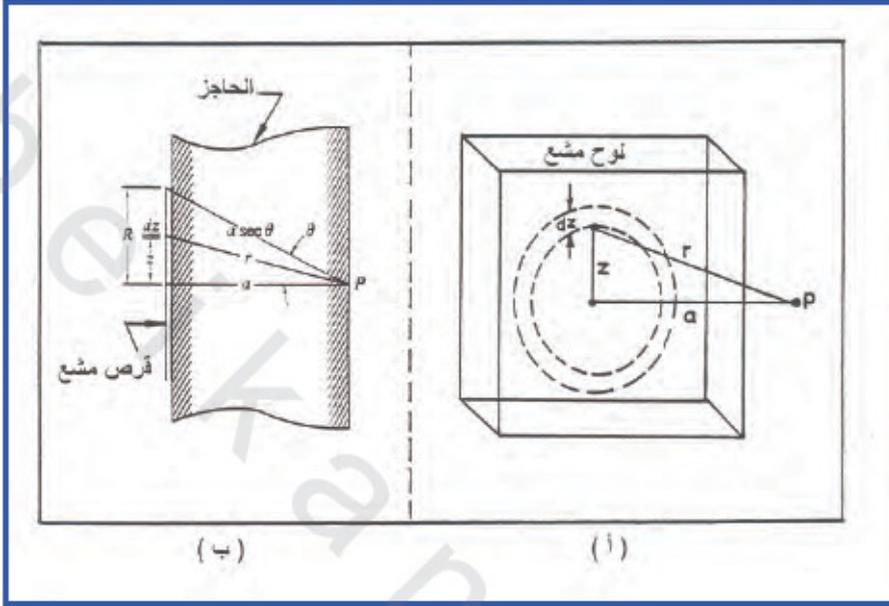
$$(11, 13) \quad d\phi_{\gamma b}(P) = \frac{S_0 \cdot B_p(\mu r)}{2 r^2} \cdot e^{-\mu r} \cdot Z \cdot dZ$$

وعند تعويض معامل التراكم بالدالة الأسية المعطاة في المعادلة (11, 7) التي يمكن كتابتها أيضاً على النحو الآتي:

$$(11, 14) \quad B_p = A_1 e^{-\alpha \mu a} + A_2 e^{-\beta \mu a} = \sum A_n \cdot e^{-\alpha_n \mu r}$$

بعد ذلك يمكن تكامل المعادلة السابقة للحصول على الفيض التراكمي كما يلي.

$$(11, 15) \quad \begin{aligned} \phi_{\gamma b}(P) &= \frac{S_0}{2} \sum A_n \int_0^\infty \frac{e^{-(1+\alpha_n)\mu r}}{r^2} \cdot Z \cdot dZ \\ &= \frac{S_0}{2} \sum A_n E_1[(1+\alpha_n)\mu a] \end{aligned}$$



الشكل رقم (١١،٢). مصدر مشع على شكل لوح ومصدر على شكل قرص.

إذا كان المصدر المشع على شكل قرص ويصدر أشعة جاما في كل الاتجاهات وبشدة S_0 (γ/sec) يمكن أيضاً استعمال نظرية نقطة اللب السابقة لحساب فيض أشعة جاما عند النقطة P كما هو موضح في الشكل رقم (١١،٢) ب. وبهذه الطريقة يصبح فيض أشعة جاما عند النقطة P بعد الدرع على النحو الآتي :

$$(11,16) \quad \phi_{\gamma}(P) = \frac{S_0}{2} \int_0^R \frac{e^{-\mu r}}{r^2} \cdot Z \, dZ$$

وعند استبدال المتغير z بالمتغير r أيضاً نحصل على المعادلة نفسها (١١،١٠) باستثناء أطراف التكامل.

$$(11,17) \quad \phi_{\gamma}(P) = \frac{S_0}{2} \int_a^{a \sec \theta} \frac{e^{-\mu r}}{r} dr$$

يجب كذلك لحل هذا التكامل تعويضه بالدالة التكاملية E_1 التي سبق شرحها فنحصل على النتيجة الآتية:

$$(11,18) \quad \phi_{\gamma}(P) = \frac{S_0}{2} [E_1(\mu a) - E_1(\mu a \sec \theta)]$$

وأخيراً، عند استعمال الدالة الأسية لمعاملة التراكم (11,14) يصبح فيض أشعة جاما التراكمي عند النقطة P بعد الدرع على النحو الآتي:

$$(11,19) \quad \phi_{\gamma b}(P) = \frac{S_0}{2} \sum A_n \{E_1[(1 + \alpha_n)\mu a] - E_1[(1 + \alpha_n)\mu a \sec \theta]\}$$

(11,3,3) مصدر مشع خطي

إذا كان المصدر المشع خطياً يصدر أشعة جاما في كل الاتجاهات بشدة طولية S_0 ($\gamma/\text{cm}.\text{sec}$) كما هو موضح في الشكل رقم (11,3 أ)، فإن فيض أشعة جاما عند النقطة P ومع إهمال التوهين في الهواء يكون حسب النظرية السابقة على النحو الآتي:

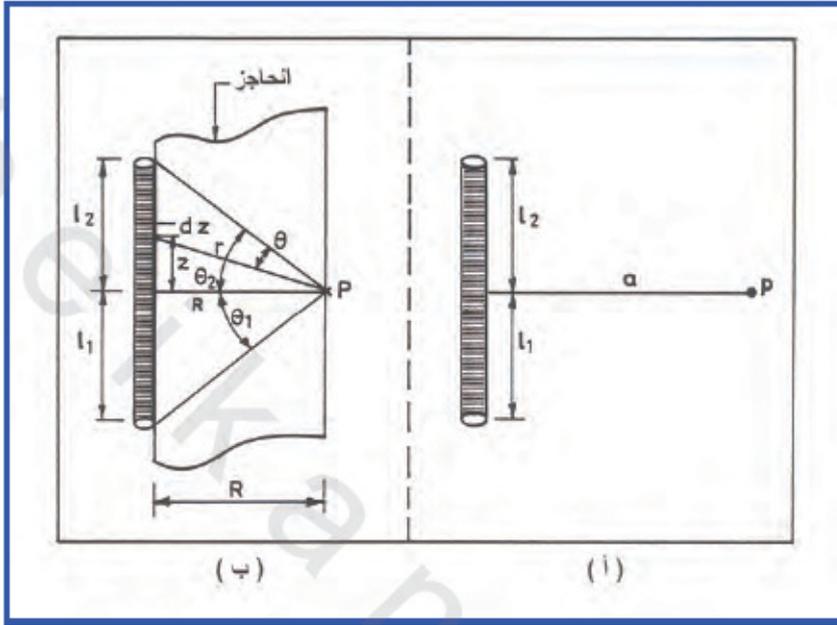
$$\phi_{\gamma}(P) = \frac{S_0}{4\pi} \int_{-l_1}^{l_2} \frac{dZ}{r^2} = \frac{S_0}{4\pi} \int_{-l_1}^{l_2} \frac{dZ}{a^2 + Z^2}$$

(11,20)

$$= \frac{S_0}{4\pi} [\tan^{-1}(\frac{l_2}{a}) + \tan^{-1}(\frac{l_1}{a})]$$

إذا كان حول المصدر المشع الخطي لأشعة جاما درع لا يمكن إهمال توهينه، كما هو الحال في الشكل رقم (11,3 ب)، فإن فيض أشعة جاما عند النقطة P يكون على النحو الآتي:

$$(11,21) \quad \phi_{\gamma}(P) = \frac{S_0}{4\pi} \int_{-l_1}^{l_2} \frac{e^{-\mu r}}{r^2} dZ$$



الشكل رقم (١١،٣). مصدر مشع خطي.

يُفضل لحل هذا التكامل استبدال المتغير z بالزاوية θ كما هو موضح في الشكل رقم (١١،٣) حيث إن:

$$(11,22) \quad \begin{aligned} r &= y \sec \theta \\ Z &= y \tan \theta \quad \Rightarrow \quad dZ = y \sec^2 \theta d\theta \end{aligned}$$

$$(11,23) \quad \phi_{\gamma}(P) = \frac{S_0}{4\pi a} \int_{-\theta_1}^{\theta_2} e^{-\mu y \sec \theta} d\theta$$

لا يمكن حل هذا التكامل مباشرة، ولهذا عادة ما يُعوض بالدالة التكاملية الآتية:

$$(11,24) \quad F(\theta, x) = \int_0^{\theta} e^{-x \sec \theta} d\theta \approx \sqrt{\frac{\pi}{2x}} \cdot e^{-x} \left(1 - \frac{5}{8x}\right) \quad ; \quad \theta \approx \frac{\pi}{2}$$

وبهذه الطريقة نحصل على معادلة فيض أشعة جاما بعد الدرع وعند النقطة P على النحو الآتي:

$$(11,25) \quad \phi_{\gamma}(P) = \frac{S_0}{4\pi a} [F(\theta_1, \mu a) + F(\theta_2, \mu a)]$$

وعند إضافة دالة التراكم (11,14) نحصل على فيض أشعة جاما التراكمي، كما هو الحال بالنسبة للمصدر المشع على شكل قرص ليصبح كما يلي:

$$(11,26) \quad \begin{aligned} \phi_{\gamma b}(P) &= \frac{S_0}{4\pi a} \cdot \sum A_n \int_{\theta_1}^{\theta_2} \exp[-(1-\alpha_n)\mu a \sec \theta] d\theta \\ &= \frac{S_0}{4\pi a} \cdot \sum A_n \{F[\theta_1, (1+\alpha_n)\mu a] + F[\theta_2, (1+\alpha_n)\mu a]\} \end{aligned}$$

(11,3,4) مصدر مشع داخلي

إذا كان المصدر المشع موزعاً داخل جسم غير منتهي الطول، كما هو موضح في الشكل رقم (11,4) أ، يصدر إشعاعات في كل الاتجاهات بشدة حجمية S_0 ($\gamma/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}$) عند النقطة P، فإن فيض أشعة جاما خارج الجسم عند النقطة P يعادل الفيض الناتج عن مصدر مشع على شكل لوح غير منتهٍ، كما سبق شرحه بحيث إن:

$$(11,27) \quad \begin{aligned} d\phi_{\gamma}(P) &= \frac{S(x)}{x} \cdot E_1[\mu(a-x)] dx \Rightarrow \\ \phi_{\gamma}(P) &= \frac{1}{2} \int_0^a S(x) E_1[\mu(a-x)] dx \end{aligned}$$

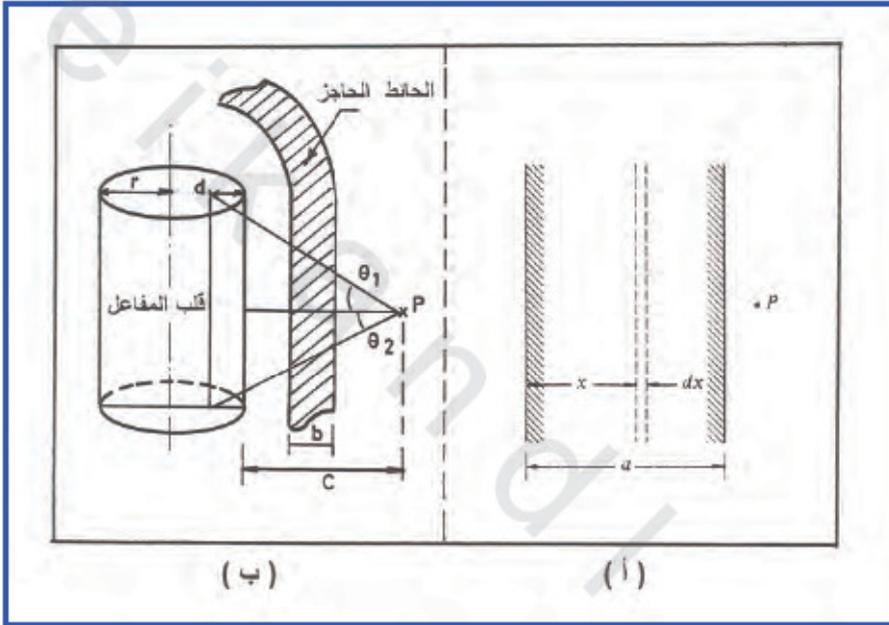
عندما يكون توزيع المواد المشعة داخل الجسم متجانساً، فإن شدة المصدر تكون ثابتة ($S(x)=S_0$) مما يسهل حساب فيض أشعة جاما عند النقطة P فيصبح كما يلي:

$$(11,28) \quad \begin{aligned} \phi_{\gamma}(P) &= \frac{S_0}{2} \int_0^a E_1[\mu_v(a-x)] dx \\ &= \frac{S_0}{2\mu_v} \int_0^{\mu a} E_1(t) dt = \frac{S_0}{2\mu_v} [1 - E_z(\mu_v, a)] \end{aligned}$$

حيث إن:

μ_v : معامل توهين الجسم المشع، أما المتغير الجديد في هذا التكامل فهو:

$$dx = -\frac{dt}{\mu_v} \text{ و } \mu_v = (a-x) = t$$



الشكل رقم (١١،٤). مصدر مشع داخلي.

وعند استعمال دالة التراكم (١١،١٤) نحصل على فيض أشعة جاما التراكمي

على النحو الآتي:

$$(١١،٢٩) \quad \phi_{\gamma b}(P) = \frac{S_0}{2\mu_v} \sum A_n \left\{ 1 - E_2 \left[\frac{(1+\alpha_n)}{(1+\alpha_n)} \mu_v a \right] \right\}$$

لنفرض الآن وجود جسم أسطواني ذي أبعاد منتهية (محددة) أكثر واقعية مثل قلب مفاعل نووي، كما هو موضح في الشكل رقم (١١،٤ ب)، فيمكن حساب فيض الإشعاعات خارج المفاعل وفي النقطة P أيضاً بحساب أن المصدر المشع مثل لوح منتهي (محدد) الأبعاد كما سبق شرحه. وبالطريقة الحسابية نفسها نحصل على فيض أشعة جاما عند النقطة P على النحو الآتي:

$$(١١,٣٠) \quad \phi_{\gamma}(d,b) = \frac{S_0 r^2}{4(d+c)} [F(\theta_1, \mu b + \mu_v c) + F(\theta_2, \mu b + \mu_v c)]$$

حيث إن:

μ : معامل توهين الدرع الخارجي.

μ_v : معامل توهين الجسم المشع.

(١١،٤) الحماية من النيوترونات

تستند حسابات الحماية من النيوترونات إلى القوانين نفسها التي سُرحت بالنسبة لأشعة جاما مثل علاقة عكس مربع المسافة، والعلاقة الأسية للتوهين. لكن قانون التراكم السابق لا يتناسب مع النيوترونات بسبب عمليات التشتت والتهديئة والانتشار الأكثر تعقيداً بالإضافة إلى توليد إشعاعات جديدة. ولهذا لقد تم العمل على إيجاد طريقة مبدئية بسيطة لحساب توهين النيوترونات داخل طبقات الحواجز (الدروع) تعتمد على ما يسمى بالمقطع العرضي لإزالة النيوترونات. وتؤدي هذه الطريقة عادة إلى نتائج مقبولة عند تحقق بعض الشروط. وأهم هذه الشروط أن يكون الحاجز يحتوي على كمية كبيرة من الهيدروجين أو يولي الدرع طبقة كافية من الماء لأسر جميع النيوترونات المشتتة والصادرة عن سطح الدرع وحجبها عن الكاشف أو النقطة التي تجب حمايتها.

أما الحسابات الأكثر واقعية للحماية من النيوترونات والأكثر تعقيداً أيضاً فتعتمد على طريقة زمر الانتشار وإزالة النيوترونات، أو الحسابات الاحتمالية (مونت كارلو) لتتبع مصير النيوترونات داخل الدروع الواقعية.

(١١، ٤، ١) المقطع العرضي لإزالة النيوترونات

يُشبه المقطع العرضي لإزالة النيوترونات Σ_r معامل التوهين لأشعة جاما μ ، ويختلف هذا المقطع قليلاً عن المقطع العرضي الميكروسكوبي الإجمالي للنيوترونات Σ_t .

ويساوي هذا المقطع العرضي لإزالة النيوترونات حوالي ثلثي المقطع العرضي الإجمالي للنيوترونات، وذلك بسبب تشتت النيوترونات التي عادة ما تكون طاقتها بين 6 و 8 MeV.

وتُستعمل، بشكل عام، لحساب هذا المقطع العرضي المعادلة الآتية:

$$(١١، ٣١) \quad \Sigma_r = \Sigma_t - \Sigma_s \overline{\cos \theta} = \frac{1}{\lambda_r}$$

حيث إن:

$$\Sigma_a + \Sigma_s = \Sigma_t$$

$$\Sigma_a \text{ و } \Sigma_s : \text{المقطع العرضي للتشتت وامتصاص النيوترونات.}$$

$$\cos \theta : \text{متوسط جيب زاوية تشتت النيوترونات.}$$

λ_r : طول مسافة الاسترخاء (المسافة التي يصبح بعدها فيض النيوترونات مقسوماً على القيمة $e = 2.718$).

تجدر الإشارة إلى أن المقطع العرضي لإزالة النيوترونات بالنسبة للعناصر التي عددها الكتلي $A < 10$ يمكن حسابه وفق المعادلة الآتية:

$$(١١، ٣٢) \quad \Sigma_r = N\sigma_r \approx N \times 0.35 \times A^{0.42}$$

حيث إن :

N : الكثافة الذرية لمادة الدرع.

A : العدد الكتلي لمادة الدرع.

أما أكثر قيم المقاطع العرضية لإزالة النيوترونات استعمالاً فهي ناتجة عن التجارب العملية التي تحقق شرط وجود طبقة كافية من الماء خلف الحاجز لأسر النيوترونات المشتتة. ويوضح الجدول رقم (١١,٨) قيم المقاطع العرضية لإزالة النيوترونات لأكثر المواد استخداماً لحجب النيوترونات في العديد من المجالات.

الجدول رقم (١١,٨). المقطع العرضي لإزالة النيوترونات [٩].

المسار الحر	المقطع العرضي لإزالة النيوترونات		الكثافة	المادة
	λ (cm)	$\Sigma / \rho (\text{cm}^2 \text{g}^{-1})$	$\Sigma (\text{cm}^{-1})$	
10.2	0.0978	0.0978	1.00	الماء
12.5	0.0502	0.0803	1.60	الكربون
12.6	0.0293	0.0791	2.70	الألمنيوم
6.43	0.0198	0.156	7.86	الحديد
4.81	0.0110	0.208	18.9	التنغستان
8.51	0.0104	0.118	11.3	الرصاص
5.51	0.0097	0.181	18.7	اليورانيوم
11.4	0.0374	0.0879	2.35	الخرسانة

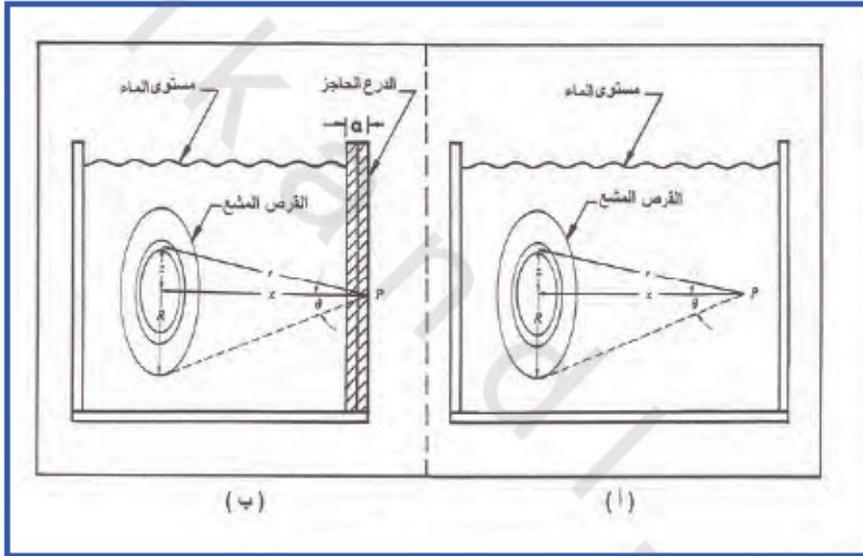
(١١,٤,٢) الطريقة المبسطة لحساب الحماية من النيوترونات

يُمكن حساب فيض النيوترونات عند نقطة معينة تبعد مسافة r عن قرص مشع يصدر إشعاعات في كل الاتجاهات بالطريقة نفسها التي أُستعملت سابقاً لحساب فيض أشعة جاما. يستعمل هنا أيضاً نظرية نقطة اللب. فإذا كان لدينا قرص مشع قطره R

داخل خزان من الماء، كما هو موضح في الشكل رقم (١١,٥) أ) يصدر نيوترونات انشطارية شدتها S_0 (n/cm².sec) يمكن حساب فيض النيوترونات عند النقطة P التي تبعد مسافة r عن مركز القرص وفق المعادلة الآتية:

$$\phi_n(x) = 2\pi S_0 \int_0^R G(r) Z dZ = 2\pi S_0 \int_x^{x \sec \theta} G(r) r dr \quad (11,33)$$

$$Z dZ = r dr \quad ; \quad r^2 = x^2 + Z^2$$



الشكل رقم (١١,٥). قرص مشع يصدر نيوترونات انشطارية.

لقد وجد قياسياً وحسابياً أن الدالة $G(r)$ تحتوي على جزء أسي وجزء يُعبر عن عكس مربع المسافة، كما هو الحال بالنسبة لأشعة جاما، وبالإضافة إلى ذلك، فإن هذه الدالة تصبح تقريباً خطية بعد مسافة حوالي ٤٠ سم من الماء؛ ولهذا يُمكن كتابة هذه الدالة على النحو الآتي:

$$(11,34) \quad G(r) = \frac{e^{-\sum w \cdot r}}{4\pi r^2}$$

حيث إن :

r : المسافة بين النقطة المعينة والمصدر.

$\sum w$: المقطع العرضي لإزالة النيوترونات بالماء.

وعند إدخال هذه الدالة في المعادلة السابقة (11,33) نحصل على فيض

النيوترونات عند النقطة P على النحو الآتي :

$$(11,35) \quad \begin{aligned} \phi_n(P) &= \frac{S_0}{2} \int_x^{x \sec \theta} \frac{e^{-\sum w \cdot r}}{r} dr \\ &= \frac{S_0}{2} [E_1(\sum w x) - E_1(\sum w x \cdot \sec \theta)] \end{aligned}$$

عندما يوضع درع إضافي من الحديد مثلاً بين مصدر النيوترونات والنقطة P ، كما هو موضح في الشكل رقم (11,5 ب)، يجب إضافة دالة أسية تحتوي على المقطع العرضي لإزالة النيوترونات لتلك المادة الإضافية. وهكذا يصبح فيض النيوترونات عند النقطة P كما يلي :

$$(11,36) \quad \phi_n(P) = 2\pi S_0 \int_x^{x \sec \theta} e^{-\sum Fe \cdot r_s} G(r) \cdot r dr$$

حيث إن :

$a \frac{r}{x} = r_s$: السمك الفعلي لدرع الحديد الإضافي.

a : السمك الحقيقي لذلك الدرع.

وأخيراً، عند تعويض الدالة $G(r)$ و r_s بقيمهما السابقة نحصل على فيض

النيوترونات عند النقطة P على النحو الآتي :

$$\begin{aligned} \phi_n(P) &= \frac{S_0}{2} \int_x^{x \cdot \sec \theta} \frac{\exp[-(\Sigma_w + \Sigma_{Fe} \cdot a/x)r]}{r} dr \\ (11,37) \quad &= \frac{S_0}{2} [E_1(\Sigma_w x + \Sigma_{Fe} a) \\ &\quad - E_1(\Sigma_w x \sec \theta + \Sigma_{Fe} \cdot a \sec \theta)] \end{aligned}$$

(١١,٤,٣) طريقة حساب زمر الانتشار وإزالة النيوترونات

تميز حسابات الحماية من النيوترونات عن طريق زمر الانتشار وإزالة النيوترونات بنتائج أكثر دقة لتغير فيض النيوترونات داخل طبقات الدرع وفي أي نقطة حول مصدر النيوترونات. لكن تُعرف هذه الحسابات بكثرة التعقيد، مما يُحتم استخدام الحاسب الآلي. ولقد كُتبت عدة برمجيات لحساب الحماية من النيوترونات باستعمال طريق الانتشار وإزالة النيوترونات، وكذلك استعمال طريقة الاحتمالات. وتستخدم هذه البرمجيات لتصميم الدروع في الأماكن الحساسة داخل المحطات النووية. كذلك تستخدم هذه البرمجيات لحساب فيض أشعة جاما الثانوي الناتج عن تفاعل النيوترونات مع طبقات الدرع الذي يساهم بشكل فعّال في الجرعة الإشعاعية الإجمالية.

تعتمد طريقة الانتشار وإزالة النيوترونات على تقسيم فيض نيوترونات المصدر إلى زمر ذات طاقات متعددة ومحددة. وأثناء تفاعل كل زمرة من النيوترونات مع ذرات الدرع تفقد تلك الزمرة بعض النيوترونات بالامتصاص وتنخفض طاقة بعضها بالتشتت ولا يتفاعل بعضها الآخر فيخترق الدرع. وهكذا فإن فيض النيوترونات المزال عن طريق التشتت ينتقل إلى الزمر الأقل طاقة ويصبح مصدراً محلياً للنيوترونات. وبهذه الطريقة يتزايد عدد النيوترونات في الزمر الأقل طاقة نتيجة النيوترونات المزالة من الزمر الأعلى طاقة. أما عدد النيوترونات في كل زمرة نتيجة التفاعلات والإضافات فيتغير مع الزمن والموقع. ويمكن ترجمة هذه العملية المعقدة رياضياً بالمعادلات الآتية:

(١١,٤,٣,١) فيض النيوترونات المزالة

$$(١١,٣٨) \quad \phi_n^0(r) = \frac{S_0 \cdot \exp(-\Sigma \cdot r)}{4\pi r^2}$$

حيث إن:

 S_0 : شدة مصدر النيوترونات الأصلية. Σ : مجموع المقاطع العرضية لإزالة النيوترونات بمواد الدرع. r : المسافة بين المصدر والنقطة المحددة.

(١١,٤,٣,٢) المصدر المحلي للنيوترونات الداخلة إلى الزمرة (المزالة)

$$(١١,٣٩) \quad S(r) = \phi_n^0(r) \cdot \Sigma \cdot r = \frac{S_0 \cdot \Sigma \cdot \exp(-\Sigma \cdot r)}{4\pi r^2}$$

(١١,٤,٣,٣) نظام معادلة الانتشار والإزالة

$$(١١,٤٠) \quad \left\{ \begin{array}{l} \{\nabla^2 \phi_1(r) - L_1^2 \phi_1(r) + \frac{\Sigma_{a1}}{D_1} \phi_1(r) + \frac{S(r)}{D_1} = 0 \quad ; \quad (i=1)\} \\ \{\nabla^2 \phi_i(r) - L_i^2 \phi_i(r) - \frac{\Sigma_{ai}}{D_i} \phi_i(r) \\ + \frac{D(i-1) \cdot L^2(i-1) \phi(i-1)(r)}{D_i} = 0; \quad (i > 1)\} \end{array} \right.$$

حيث إن:

 $\phi_i(r)$: فيض نيوترونات الزمرة i . Σ_{ai} : متوسط المقطع العرضي لامتناس نيوترونات الزمرة i . D_i : متوسط معامل الانتشار لنيوترونات الزمرة i . L_i^{-1} : متوسط المسار الحر لتهديّة نيوترونات الزمرة i ، علماً أن متوسط هذا

المسار يحسب وفق نظرية عمر فرمي، وذلك وفق المعادلة الآتية:

$$(١١,٤١) \quad \left(\frac{1}{L_i}\right)^2 = \int_{E_{i-1}}^{E_i} \frac{dE}{3\xi(E) \cdot \sum_s(E) \sum_{tr}(E) \cdot E}$$

$$\frac{2}{A + \frac{2}{3}} \approx 1 - \left(\frac{A-1}{2A}\right)^2 \cdot \text{Ln}\left[\frac{A+1}{A-1}\right] = \xi(E)$$

حيث إن :

$$\text{متوسط تغير الطاقة "لترجي" : } \frac{2}{A + \frac{2}{3}} \approx 1 - \left(\frac{A-1}{2A}\right)^2 \cdot \text{Ln}\left[\frac{A+1}{A-1}\right] = \xi(E)$$

لاصطدام النيوترونات ذات الطاقة E بذرات العدد الكتلي A تجدر الإشارة إلى أنه من الصعب القيام بهذه الحسابات يدوياً عندما يفوق عدد زمر النيوترونات الزمرتين، لكن للحصول على نتائج دقيقة، يمكن أن تصل زمر النيوترونات إلى المائة؛ ولهذا توجد برمجيات لحساب الحماية من النيوترونات وأشعة جاما في الوقت نفسه.

(١١,٥) تصاميم الدروع الإشعاعية

تُقسم المواد التي تستعمل لتصنيع الدروع الإشعاعية بشكل عام إلى ثلاثة أنواع: المواد الثقيلة والمتوسطة، والمواد الخفيفة التي تحتوي على كميات كبيرة من الهيدروجين والمواد المركبة.

أولاً: المواد الثقيلة والمتوسطة

تُستعمل المواد الثقيلة مثل الرصاص؛ والمواد المتوسطة مثل الحديد في صناعة الدروع الخاص بأشعة جاما وأحياناً أيضاً لتهدئة النيوترونات السريعة من خلال التفاعلات غير المرنة. وتتميز هذه المواد بقدرة عالية على توهين أشعة جاما بسبب كثافتها الكبيرة، كما أنها تؤدي دوراً عند خلطها بالمواد الخفيفة لتهدئة النيوترونات وحجب أشعة جاما في وقت واحد.

ثانياً: المواد الخفيفة

تُستعمل المواد الخفيفة التي تحتوي على كميات كبيرة من الهيدروجين مثل الماء وغيره من المواد الخفيفة في صناعة الدروع، مثل الخرسانة لحجب النيوترونات، وذلك لأن جل تفاعلات النيوترونات؛ مع هذه المواد هي تفاعلات مرنة تفقد النيوترونات جزءاً كبيراً من طاقتها. وعلى الرغم من أن هذه المواد الخفيفة غير فعّالة لحجب أشعة جاما، إلا أنها تتميز بوفرتها وسهولة تشكيلها وإمكانية زيادة كثافتها بخلطها مع مواد ثقيلة. وتختص أيضاً هذه المواد الخفيفة بمواصفات جيدة لنقل الحرارة، كما هو الحال بالنسبة للماء الذي يُستعمل بكثرة في محطات القدرة النووية؛ لأنه من أفضل وأوفر المواد على الإطلاق لحجب النيوترونات.

ثالثاً: المواد المركبة

تُستعمل المواد المركبة التي تحتوي على عناصر لها قدرة كبيرة جداً لامتصاص النيوترونات، مثل البورون، والليثيوم، والكاديوم، لتصنيع الدروع الخاصة بحجب النيوترونات. وتتميز هذه المواد أيضاً بإنتاج أشعة جاما الثانوية ذات طاقة منخفضة تسهل الحماية منها، لكن عيب هذه المواد أنها عالية التكلفة؛ ولهذا فإنها لا تستخدم إلا في بعض الحالات والأماكن الخاصة سواء لحماية الأشخاص، أو المعدات الحساسة. تجدر الإشارة إلى أن الحماية من الإشعاعات في المحطات النووية تحتاج في الكثير من الحالات إلى استخدام دروع متتالية مصنعة من مواد مختلفة وأشكال متنوعة؛ وذلك لوجود أنواع مختلفة من الإشعاعات في هذه المحطات عادةً مما يستوجب البحث على أفضل الدروع تكلفةً، وأسهلها تشكيلاً.

(١١،٥،١) محطات تخصيب الوقود

تنقسم محطات تخصيب الوقود إلى أنواع كثيرة حسب طاقتها الإنتاجية، ونوعية الوقود المصنع، ونسبة خصوبة الوقود. وإذا كانت المادة الأولية من اليورانيوم الطبيعي،

وكذلك الوقود المصنع، فإن من السهل الحصول على مستوى إشعاع مقبول في هذه المحطات بدون عناء وتكلفة باهظة؛ لأن شدة أشعة جاما والنيوترونات الصادرة عن اليورانيوم الطبيعي ضعيفة، ومن السهل الحماية منها بوضع الدروع اللازمة حول أماكن تخزين المواد، وأماكن تصنيع الوقود. أما إذا كانت المواد الأولية منتجة في محطات تكرير الوقود، والوقود المطلوب إنتاجه مخصباً، كما هو الحال غالباً، فيكون مستوى الإشعاع أكبر؛ ولهذا تحتاج هذه المحطات النووية إلى تصميم جيد لكل وحداتها وعناية كبيرة في اختبار الآلات وأماكن التخزين والتصنيع. وعادة ما يتكون خط الإنتاج في هذه المحطات من مجموعة من الآلات الأوتوماتيكية التي يُتحكم فيها عن بُعد، وتُستعمل الدروع المتنوعة والشفافة مثل البلور المطعم بالرصااص لمراقبة عملية التصنيع. كذلك يجب وضع الدروع اللازمة حول تخزين المواد الأولية والمعدات، بحيث تتحقق قواعد الوقاية من الإشعاعات، وحماية العاملين في هذه المحطات، وحماية البيئة أيضاً؛ ولهذا يُخصص في هذه المحطات قسم إداري وفني خاص لمراقبة مستوى الإشعاع والوقاية من الإشعاعات.

(١١,٥,٢) محطات القدرة النووية (المفاعلات)

تنحصر جل المصادر الإشعاعية في محطات القدرة النووية داخل قلب المفاعل، الذي هو مركز التفاعلات الانشطارية المولدة لأعداد هائلة من النيوترونات وكميات كبيرة من النظائر المشعة؛ ولهذا يكون التركيز على وضع الدرع والحواجز اللازمة حول قلب المفاعل خاصة لحماية الأشخاص والمعدات والبيئة بشكل عام. وبما أن قلب المفاعل يصدر كميات كبيرة من النيوترونات وأشعة جاما اللتين هما من أخطر الإشعاعات، فيجب تصميم الدروع والحواجز الإشعاعية بعناية وبمساعدة برمجيات الحماية من الإشعاعات، لأن هذه البرمجيات تتمتع بقدرة عالية على اختيار أفضل المواد لحجب الإشعاعات وأكثرها وفرة وأقلها تكلفة لتصنيع الدروع الإشعاعية.

تُوضع عادة طبقات متتالية من الحواجز حول قلب المفاعلات الحرارية، ابتداءً من الماء، على سبيل المثال، لتعمل كعاكس ومهدئ للنيوترونات السريعة ثم بعد ذلك تأتي طبقة الوعاء المصنوع من الحديد غير القابل للصدأ الذي يعمل كدرع للنيوترونات وأشعة جاما في وقت واحد. وأخيراً حائط من الخرسانة المسلحة يفوق سمكه المتر ليعمل كوعاء خارجي لإزالة وتوهين ما تبقى من النيوترونات وأشعة جاما. تُستعمل الدروع المصنعة من المواد المركبة التي تحتوي على مواد ذات قدرة عالية على امتصاص النيوترونات، مثل البورون لحماية المعدات وبعض الأماكن الخاصة، وقفل قنوات الكبلات وأجهزة القياس حول قلب المفاعل، وغرفة التحكم في المحطة.

(١١,٥,٣) محطات معالجة الوقود

تكثر المصادر المشعة بأنواعها المختلفة في محطات معالجة الوقود، فتكون صلبة وسائلة وغازية. يصل الوقود المستهلك عادة على شكل قضبان صلبة، وبعد فترة من التخزين تبدأ عملية المعالجة فتقطع تلك القضبان آلياً في بداية خط الإنتاج. وبعد هذه العملية تُفصل قطع الغلاف ثم توصل قطع الوقود رحلتها إلى حوض حامض النيتريك، حيث تتحول إلى سائل بعد إذابتها. وتنفرد بعد ذلك خطوط الإنتاج فتبدأ عملية فصل النظائر المشعة (شظايا الانشطار) عن النظائر الثقيلة (اليورانيوم وما فوق) كيميائياً، ثم تتواصل عملية الفصل والتكرير حتى الحصول على نظائر نقية من اليورانيوم والبلوتونيوم، التي تُعاد إلى محطات تصنيع الوقود أو التخزين. أما النظائر المشعة الأخرى فتفصل عن بعضها ثم تخزن لمدة محددة؛ لتخفيف شدة الإشعاع بالتفكك. وبعد ذلك تُوزع حسب نوعية نشاطها الإشعاعي وتوضع داخل قوالب من الأسمنت أو تُحرق وتُمزج داخل قوالب زجاجية؛ لدفنها وقتياً أو نهائياً في مقابر جيولوجية في باطن الأرض.

ما يزيد هذه العمليات تعقيداً هو مستوى الإشعاع العالي، الذي يحتم أن تكون كل غرف خط الإنتاج معزولة عن بعضها ومحاطة بالدروع الإشعاعية اللازمة

للمحافظة على حماية الأشخاص والمعدات والبيئة من تسرب الغازات أو السوائل المشعة ؛ ولهذا فإن جميع خطوات عملية تكرير الوقود تقوم بها آلات أوتوماتيكية، ويعمل الإنسان عن بُعد في غرف التحكم المحصنة. وتعمل إدارة السلامة والوقاية من الإشعاعات في هذه المحطات على التطبيق الصارم للقوانين واللوائح التي تحد من تعرض العاملين والبيئة إلى الإشعاعات.

نذكر هنا مسئولية إدارة السلامة والوقاية من الإشعاعات التي يجب أن تقوم بقياس المستوى الإشعاعي دورياً في كل أماكن العمل وحول المحطات النووية وتطبيق اللوائح والقوانين الخاصة بالحماية. وتقوم كذلك هذه الإدارة بمعايرة أجهزة المسح الإشعاعي دورياً وقياس الجرعات الإشعاعية التي يتعرض لها العاملون في المحطة ومتابعة السجلات الفردية للجرعات ووضع الدروع والحواجز اللازمة. وكذلك من مهامها تدريب العاملين في المحطة على خطط الطوارئ والحوادث الإشعاعية المحتملة. ولا يجب بشكل عام السماح لأي شخص أن يعمل في أماكن تعرضه إلى جرعات إشعاعية أكثر من المسموح بها، كما هو موضح في الجدول رقم (١١،٣).

(١١،٦) تمارين

- ١- اذكر أنواع الإشعاعات المؤينة موضحاً أخطرها على الكائنات الحية والبيئة.
- ٢- عرّف الجرعة الممتصة والجرعة المكافئة للإشعاعات موضحاً وحدة كل منهما والفرق الأساسي بينهما.
- ٣- اشرح أهم التأثيرات البيولوجية للإشعاعات المؤينة على الكائنات الحية.
- ٤- اذكر التدابير الأساسية للحماية من أشعة جاما والنيوترونات، وما أهم خصائص الدروع الواقية من هذه الإشعاعات.
- ٥- ما أهم التدابير الأساسية للوقاية من الإشعاعات في مختلف المحطات النووية لحماية العاملين فيها وحماية البيئة أيضاً؟

٦- مصدر نقطي مشع من الكوبلت ^{60}Co يصدر إشعاعات في كل الاتجاهات، ونشاطه الإشعاعي يساوي $A = 2 \times 10^{10} \text{Bq}$. إذا كان هذا المصدر يبعد مسافة مترين عن مكان الشغل، فاحسب ما يلي:

(أ) شدة الإشعاع في مكان الشغل.

(ب) شدة الإشعاع في مكان الشغل عند وضع درع واقٍ من الرصاص سمكه 5 سم بين المصدر ومكان الشغل.

٧- مصدر مشع خطي طوله متر واحد يصدر أشعة جاما في كل الاتجاهات شدته $S_0 = 5 \times 10^{10} \text{ } \gamma/\text{Sec}$ وبمتوسط طاقة تساوي 1.0 MeV. إذا كان هذا المصدر خلف جدار من الأسمنت سمكه متر واحد، فاحسب ما يلي:

(أ) شدة الإشعاع في نقطة تبعد 1.5 متر على مستوى نصف المصدر.

(ب) ما السمك اللازم للجدار الذي يجعل شدة الإشعاع في منطقة الشغل المحددة لا يتجاوز $1/10$ و $1/20$ من شدة المصدر الأصلية.

٨- إذا كان فيض النيوترونات في نهايته إحدى قنوات مفاعل نووي تجريبي يساوي $5 \times 10^7 \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ ، علماً أن متوسط طاقة النيوترونات الصادرة تساوي 0.5 MeV، فأوجد ما يلي:

(أ) فيض النيوترونات عند النقطة التي تبعد 20 سم عن نهاية القناة.

(ب) فيض النيوترونات في نهاية القناة عند وضع حاجز سمكه 10 سم من الجرافيت داخل القناة.

٩- وضع مصدر للنيوترونات على شكل قرص نصف قطره 3 سم داخل خزان من الماء. إذا كانت شدة المصدر تساوي $2 \times 10^6 \text{ n/sec}$ ومتوسط طاقة نيوترونات هذا المصدر تساوي 1.0 MeV فاحسب ما يلي:

(أ) فيض النيوترونات عن بعد 10 , 50 سم داخل خزان الماء.

ب) فيض النيوترونات عن بعد 50 سم عند إضافة حاجز سمكه 5 سم داخل الخزان بين المصدر والنقطة المحددة.

١٠- إذا كانت شدة النيوترونات وأشعة جاما عند أطراف قلب المفاعل تساوي

2×10^8 n/sec , 2×10^7 γ /sec تتالياً. علماً أن متوسط طاقة النيوترونات حوالي 0.5 MeV

ومتوسط طاقة أشعة جاما حوالي 1.0 MeV فاحسب ما يلي :

أ) فيض النيوترونات بعد الحواجز الطبيعية للمفاعل والملوثة من 40 سم من الماء

و5 سم من الحديد وجدار من الأسمنت سمكه 50 سم.

ب) فيض أشعة جاما بعد تلك الدروع الثلاثة.

ج) الشدة الإشعاعية الإجمالية خارج مبنى المفاعل.