

الفصل الثامن
أخطار الإشعاع الخارجي

obeikandi.com

الفصل الثامن

أخطار الإشعاع الخارجي

1-8 مصدر الخطر:

تأتي أخطار الإشعاع الخارجي من مصادره الموجودة خارج الجسم، وعندما تدخل المواد المشعة إلى الجسم تؤدي إلى أخطار إشعاع داخلي، وهذه تتطلب طرقاً مختلفة للتحكم فيها، ستدرس في الفصل التاسع.

قد يكون مرجع الأخطار الخارجية جسيمات بيتا أو كلاً من: الأشعة السينية وأشعة جاما، وكذلك النيوترونات، حيث بإمكانها اختراق الأعضاء الحساسة في الجسم، ولا تعد جسيمات ألفا - عادة - من مصادر الإشعاع الخارجي، حيث إنها لا تستطيع اختراق الطبقة الخارجية للجلد، ويمكن التحكم في الأخطار الخارجية بتطبيق القواعد الثلاث، وهي: الزمن والمسافة والحاجز الواقي.

2-8 الزمن:

إن مقدار الجرعة المتجمعة لشخص يعمل في منطقة إشعاع ذات معدل جرعة معين يتناسب طردياً مع الوقت المقضي في تلك المنطقة.

$$\text{الجرعة الكلية} = \text{معدل الجرعة} \times \text{الزمن}$$

مثال 1-8:

إن الجرعة المصرح بها للعاملين هي 20 ملي سيفرت في السنة، وهذه تمثل 0.4 ملي سيفرت أو 400 مايكرو سيفرت في الأسبوع على افتراض 50 أسبوع عمل في السنة. ما عدد الساعات التي يمكن أن يقضيها أحد العاملين في الأسبوع في منطقة يبلغ معدل الجرعة فيها 20 مايكرو سيفرت في الساعة؟

الحل:

$$\text{الجرعة} = \text{معدل الجرعة} \times \text{الزمن}$$

$$400 = 20 \times \text{ن}$$

$$\text{ن} = 20 \text{ ساعة}$$

مثال 8-2:

عامل عليه أن يعمل 40 ساعة كاملة أسبوعياً في منطقة معينة. ما أعلى معدل للجرعة يمكن أن يسمح به في تلك المنطقة؟

الحل:

$$\text{الجرعة} = \text{معدل الجرعة} \times \text{الزمن}$$

$$400 = \text{معدل الجرعة} \times 40$$

$$\text{معدل الجرعة} = 10 \text{ مايكرو سيفرت/ ساعة}$$

مثال 8-3:

ما الجرعة السنوية لعامل يعمل سنة عمل كاملة (2000 ساعة) في منطقة يبلغ معدل الجرعة فيها 2.5 مايكرو سيفرت/ ساعة؟

الحل:

$$\text{الجرعة} = \text{معدل الجرعة} \times \text{الزمن}$$

$$= 2.5 \times 2000$$

$$= 5000 \text{ مايكرو سيفرت (أو 5 ملي سيفرت)}$$

مثال 8-4:

إن حد الجرعة المصرح بها لعموم المواطنين في السنة هو 1 ملي سيفرت. ما أعلى معدل مسموح به للجرعة في منطقة قد تشغل بالمواطنين دائماً (أي 168 ساعة أسبوعياً)؟

الحل: 0.12 مايكرو سيفرت/ ساعة.

يمكننا من هذه الأمثلة (1-4) ملاحظة أن معدل الجرعات ذات الأهمية الخاصة، التي قد يتعرض لها عادة في المنشآت النووية كالمفاعلات أو حولها هي ما بين 0.1 مايكرو سيفرت/ ساعة حتى بضع عشرات مايكرو سيفرت/ ساعة، ولكن يمكن الاستنتاج من الأمثلة السابقة أن المتطلب الوحيد هو أن الجرعة ينبغي أن تكون أقل من الحد. وكما مر بنا في مناقشة الفصل 6، فمن المطلوب أيضاً أن تكون الجرعة أقل ما يمكن الحصول عليه بمحدود المعقول، وهذا يشمل تحليل الوضع بالنسبة إلى مصادر التعرض والوقت الذي يصرفه العاملون في المنطقة لرؤية إمكانية تقليله، ومن المطلوب أيضاً النظر في الوسائل التي تمكن من خفض الجرعة، والطرق المتوافرة لذلك هي: زيادة المسافة بين الشخص والمصدر المشع، أو وضع بعض المواد الواقية بين الشخص والمصدر المشع.

3-8 المسافة:

تأمل مصدراً للإشعاع صغير الحجم يطلق إشعاعاً من جميع الجهات بالتساوي، وقد وضح في الفصل الثالث أن الفيض (كثافة الأشعة) على مسافة (r) من مصدر صغير الحجم يتناسب عكسياً مع مربع المسافة (r^2)، وحيث إن معدل الجرعة يتناسب طردياً مع الفيض فإن معدل الجرعة هو أيضاً يتبع قانون التربيع العكسي. ويجب أن يُعلم أن هذا لا يصح تماماً إلا بالنسبة إلى المصدر النقطي فقط وكذلك الكاشف النقطي، وأن يكون امتصاص الإشعاع بين المصدر والكاشف مهملاً أيضاً، ويمكن كتابة قانون التربيع العكسي كما يلي:

$$D \propto \frac{1}{r^2}$$

أو

$$D = \frac{K}{r^2}$$

حيث إن "K" ثابت لمصدر معين

$$D_1 r_1^2 = D_2 r_2^2$$

حيث: D_1 هو معدل الجرعة على مسافة r_1 من المصدر.
 D_2 هو معدل الجرعة على مسافة r_2 من المصدر.

مثال 8-5:

إن معدل الجرعة على بعد 2م من مصدر معين لأشعة جاما هو 400 مايكرو سيفرت في الساعة. على أي مسافة يكون معدل الجرعة 25 مايكرو سيفرت/ ساعة.

$$D_1 r_1^2 = D_2 r_2^2$$

$$400 \times r_1^2 = 25 \times r_2^2$$

$$r_2 = 8 \text{ metres}$$

يمكن ملاحظة أن مضاعفة المسافة بين المصدر والشخص يخفض معدل الجرعة إلى ربع القيمة الأساسية. ومضاعفة المسافة إلى ثلاثة أضعاف ينقص معدل الجرعة إلى التسع وهلم جرأً.

8-3-1 تعبير جبري لحساب معدل الجرعة من مصدر جاما:

هناك تعبير جبري مفيد لحساب معدل الجرعة التقريبي من مصدر جاما ألا

$$D = \frac{ME}{6r^2} \text{ وهو}$$

حيث:

- "D" معدل الجرعة مقدرة بالمايكرو سيفرت/ ساعة.
- "M" شدة النشاط الإشعاعي للمصدر بالميجابيكريل.
- "E" طاقة جاما لكل تحلل بوحدات الميجا إلكترون فولتز.
- "r" هي البعد عن المصدر بالمتر.

عند تطبيق هذا التعبير الجبري يجب أن يَحْتَاط في اختيار الوحدات المناسبة، ولا بد من التأكد أن في الحالات الواقعية يجب أن تتخذ الحماية بناءً على قياس معدل الجرعة عملياً.

مثال 8-6:

احسب معدل الجرعة التقريبي على بعد 2م من مصدر كوبلت-60 شدته 240 ميغابيكيريل يشع نوعين من أشعة جاما في كل تحلل: أحدهما بطاقة 1.17 ميغا إلكترون فولت، والآخر بطاقة 1.33 ميغا إلكترون فولت.

$$D = \frac{ME}{6r^2} Sv / h$$

$$D = \frac{240(1.17 + 1.33)}{6 \times 2^2}$$

$$= \frac{2.5 \times 240}{24}$$

$$D = 25 \text{ مايكرو سيفرت/ساعة}$$

مثال 8-7:

احسب نشاط مصدر صوديوم-22 يعطي معدل جرعة قدرة 64 مايكرو سيفرت/ساعة على بعد 1م علماً بأن الصوديوم-22 يطلق فوتوناً واحداً من أشعة جاما طاقته 1.28 ميغا إلكترون فولت في كل تحلل.
(الجواب: 300 ميغابيكيريل).

4-8.4 الحواجز الواقية:

إن الطريقة الثالثة للتحكم في أخطار الإشعاع الخارجي، هي الحواجز أو الدروع الواقية، وهذه هي الطريقة المفضلة عادة لأنها تؤدي فعلاً إلى مستويات عمل آمنة، في حين الاعتماد على البعد أو على زمن التعرض ربما تتطلب مراقبة إدارية مستمرة للعاملين.

تعتمد كمية الحاجر المطلوبة على نوع الإشعاع الذي يرغب في حجزه وعلى شدة المصدر المشع، وكذلك على معدل الجرعة المسموح بها خارج تلك الحواجز الواقية.

جسيمات ألفا من السهولة جدًا امتصاصها، حيث يكفي عادة وضع ورقة رقيقة لإيقافها، ولهذا فهي لا تشكل أبدًا مشكلة في حجزها.

جسيمات بيتا أكثر اختراقًا من جسيمات ألفا، ففي الطاقات التي نواجهها عادة (ما بين 1 إلى 10 ميغا إلكترون فولت) يتطلب حجز أشعة بيتا سمكًا قد يصل إلى 10 ملم من البيرسبكس (Perspex) لامتصاصها تمامًا. إن السهولة التي يمكن معها التوقي من مصادر بيتا تقود في بعض الأحيان إلى التصور الخاطئ أنها ليست بخطورة مصادر جاما أو النيوترونات، ولهذا تتداول مصادر كبيرة لبيتا بشكل مباشر، وهذا سلوك خطير جدًا، فمثلاً مقدار الجرعة المتصصة على بعد 3 ملم من مصدر بيتا شدته مليون بيكريل (1MBq) هي 1 جراي/ ساعة تقريباً.

وهناك مشكلة ملحوظة أيضاً تواجه في حجز أشعة بيتا، وهي انطلاق أشعة سينية ثانوية نتيجة التباطؤ السريع للجسيمات بيتا التي هي أشد اختراقًا من إشعاع β ، وتسمى هذه الأشعة السينية بأشعة الكبح أو التوقف، وستناقش تفصيلاً في الفصل 13. إن نسبة طاقة بيتا التي تظهر على شكل أشعة كبح تقدر بـ $(\frac{ZE}{3000})$ حيث إن Z هو الوزن الذري للحاجر و E هي طاقة بيتا بوحدة الميغا إلكترون فولت، وهذا يعني أن حواجز بيتا يجب أن تشيد من مواد منخفضة الوزن الذري (مثل الألومنيوم أو البيرسبكس) لتقليل كمية أشعة الكبح المتولدة.

إن مصدر بيتا يبعث أشعة بيتا بمدى طاقة كامل يبدأ من الصفر، وينتهي بالطاقة العظمى المميزة للمصدر (E_{max}) ومعدل الطاقة في معظم الأحيان نحو $(\frac{1}{3}E_{max})$. أما قدرة جسيمات بيتا على الاختراق فتعتمد على طاقتها، ويمكن استعمال هذه الحقيقة

لتقدير طاقة أشعة بيتا للمساعدة على تحديد نوع المصادر المجهولة، وسيناقش ذلك بتفصيل أكثر في الفصل 15.

تنخفض كل من أشعة جاما والأشعة السينية أسّيًا عند مرورها خلال أية مادة، ويمكن كتابة معدل جرعة الأشعة الناتجة عن السينية أو أشعة جاما المختزلة لحاجز كما يلي:

$$D_t = D_0 e^{-\mu t}$$

حيث:

(D_0) معدل الجرعة من دون الحاجز.

D_t معدل الجرعة بعد مرورها بالحاجز الذي سمكه t .

μ معامل الامتصاص الخطي لمادة الحاجز.

إن معامل الامتصاص الخطي μ يعتمد على نوع مادة الحاجز المستخدم وعلى طاقة الفوتونات الساقطة، ووحدته (وحدات الطول⁻¹) وتكتب عادة بوحدات م⁻¹ أو ملم⁻¹.

8-4-1 سمك نصف القيمة:

إن سمك النصف (HVL) لنوع معين من الحواجز الواقية هو السمك المطلوب لخفض كثافة الأشعة الساقطة إلى النصف. فإذا ما رمزنا إلى سمك النصف بـ $t_{\frac{1}{2}}$ تصبح المعادلة السابقة:

$$\frac{D_t}{D_0} = 0.5 = \exp\left(-\mu t_{\frac{1}{2}}\right)$$

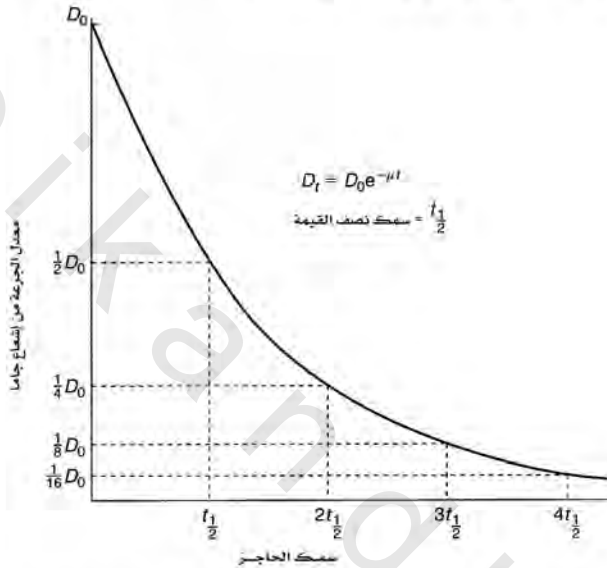
وبأخذ اللوغارتم للأس e

$$\text{Log}_e 0.5 = -\mu t_{\frac{1}{2}}$$

$$-0.693 = -\mu t_{\frac{1}{2}}$$

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\mu}$$

إن مصطلح سمك النصف مفيد جداً في إجراء الحسابات التقريبية السريعة للحواجز، فسمك النصف الواحد (1 HVL) يُخفّض الكثافة إلى النصف، وضعف سمك النصف (2 HVL) يُخفّض الكثافة إلى الربع، وثلاثة أضعاف منه (3 HVL) يُخفّضها إلى الثمن وهلم جراً كما هو موضع في الشكل (1-8).



شكل (1-8) تغير معدل جرعة جاما مع سمك الحاجز.

تعتمد قيمة μ على مادة الوسط وعلى طاقة الأشعة وكذلك قيمة $x_{1/2}$ تبعاً لها. وهناك قيمة أخرى تستخدم في بعض الأحيان في عمل الحواجز الواقية وهي سمك عشر القيمة $x_{1/10}$. وبإجراء حسابات مشابهة كما ورد آنفاً يمكن إثبات أن:

$$x_{1/10} = \frac{\log_e 10}{\mu} = \frac{2.303}{\mu}$$

والجدول (1-8) يبين بعض قيم نصف السمك $x_{1/2}$ وعشر السمك $x_{1/10}$ لكل من الرصاص والماء.

جدول (8-1) قيم تقريبية لـ $t_{1/2}$ و $t_{1/10}$

طاقة أشعة جاما MeV		ملي متر رصاص		ملي متر ماء	
		$t_{1/10}$	$t_{1/2}$	$t_{1/10}$	$t_{1/2}$
0.5		12.5	4	150	500
1		35	11	190	625
1.5		50	15	200	700
2		60	19	225	750

مثال 8-8:

إذا علم أن معدل الجرعة قريباً من صمام 160 مايكروسيغرت في الساعة، فإذا كان مصدر هذه الجرعة هو الكوبلت-60 داخل هذا الصمام، فما مقدار حاجز الرصاص الذي يجب وضعه حول الصمام لخفض معدل الجرعة إلى 10 مايكروسيغرت/ ساعة، علماً بأن سمك نصف الرصاص لأشعة جاما من كوبلت-60 هو 12.5 ملم.

الحل:

المطلوب تخفيض معدل الجرعة من 160 مايكروسيغرت/ ساعة إلى 10 مايكروسيغرت/ ساعة، وهذا يعني خفضه بنسبة $16/1$ ($16 = 2 \times 2 \times 2$)، ولهذا فالمطلوب هو 12.5×4 ملم رصاص = 50 ملم من الرصاص.

مثال 8-9:

مصدر لكوبلت-60 يعطي معدل جرعة قدرها 400 مايكرو سيغرت/ ساعة على بعد 1م. ما المسافة من المصدر التي يجب أن يوضع فيها مانع، بحيث لا يزيد معدل الجرعة قرب المانع على 25 مايكروسيغرت/ ساعة؟ ما سمك الرصاص الذي يعطي الحماية لنفسها عند وضعه حول المصدر؟ (سمك نصف الرصاص لأشعة جاما من كوبلت-60 هو 12.5 ملم).

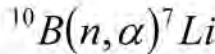
(الجواب = 4 م، 50 ملم من الرصاص).

إن حجز النيوترونات معقد بسبب التفاوت الواسع في طاقتها التي تواجه عادة، وهذا يعني أن معدات الحجز ينبغي أن تأخذ في الحسبان تفاعلات لعدد من الطاقات المختلفة. وأهم هذه التفاعلات هي:

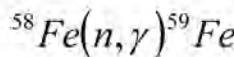
(1) **الاستطارة المرنة:** حيث يصطدم النيوترون مع نواة إحدى ذرات الهدف، ثم يرتد بطريقة تشبه تصادم كرتي لعبة البلياردو، وعند هذا التصادم يفقد النيوترون جزءاً من طاقته الابتدائية، حيث تنتقل هذه الطاقة إلى نواة الهدف، وتظهر كلها على شكل طاقة حركية. وتعد العناصر الخفيفة (ذات الوزن الذري المنخفض) هي الأمثل في تهدئة النيوترونات بواسطة الاستطارة المرنة؛ لذا تستخدم المواد التي تحتوي على نسبة عالية من الهيدروجين (مثل الشمع والماء والخرسانة).

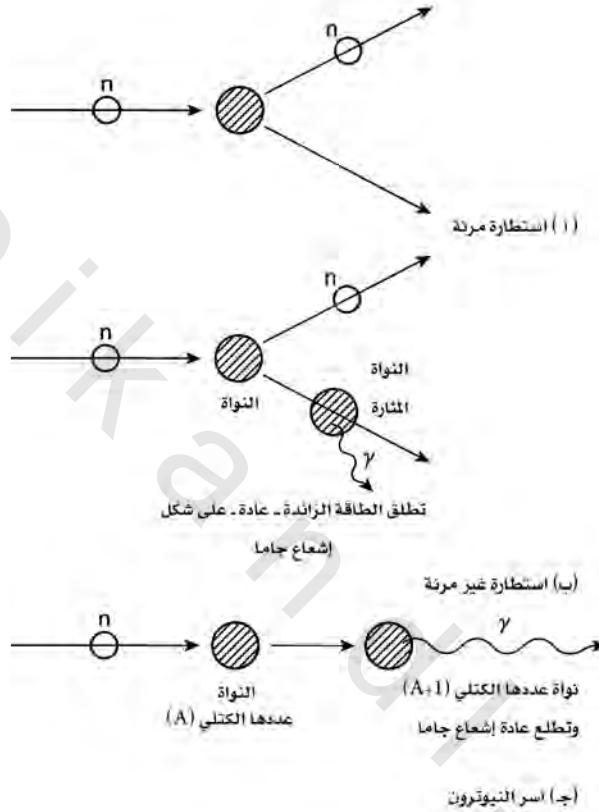
(2) **الاستطارة غير المرنة:** في هذه العملية تمتص النيوترونات الساقطة جزءاً من طاقتها إلى نوى ذرات المواد الحائزة مؤدية إلى إثارتها، فتطلق هذه النوى -عادة- أشعة جاما بعد ذلك عند رجوعها إلى مستوى الاستقرار. إن عملية الاستطارة غير المرنة مهمة جداً في حالة النوى الثقيلة.

(3) **تفاعلات متنوعة للأسر النيوتروني:** في هذه التفاعلات تؤسر النيوترونات من قبل النوى التي تفقد إثارتها بعد ذلك بإطلاق جسيم آخر أو فوتون. ومن تفاعلات الأسر النيوتروني المهمة:



وتكمن أهمية هذا التفاعل في حجز النيوترونات، وذلك أن الجسيم المنطلق (جسيم ألفا) يمكن امتصاصه بسهولة، ولهذا فإن خلط البورون-10 في الحاجز يؤدي إلى امتصاص النيوترونات، وناتج التفاعل الذي هو جسيمات ألفا لا يشكل أي مشكلة في الحجز بعد ذلك. وفي الحقيقة، فإن عامة تفاعلات الأسر النيوتروني تؤدي إلى إطلاق أشعة جاما شديدة الاختراق، مثل:



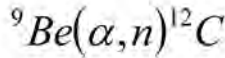


شكل (2-8) التفاعلات الرئيسية الثلاث للنيوترون

ويعدّ أسر أشعة جاما المتولدة عاملاً مهماً في تصميم الحواجز الواقية، وفي العادة تخلط مواد عالية الوزن الذري في الحاجز لامتصاص هذه الأشعة. والشكل (2-8) يمثل رسماً تخطيطياً لتفاعلات النيوترون.

5-8 مصادر النيوترونات:

مفاعلات الانشطار النووي هي مصادر لفيض مرتفع من النيوترونات (انظر الفصل 10)، ولكن هناك طرقاً عدة لإنتاج مصادر النيوترونات الصغيرة نسبياً، وتعتمد الأنواع الأكثر شيوعاً على التفاعل الآتي:



ومصادر النيوترونات المعتادة من هذا النوع تتكون من كمية من عنصر البريليوم المخلوط مع نوييدة تطلق α ، وهي عادة أمريسيوم-241 (${}^{241}\text{Am}$) في قرص مغلق.

ففي مصادر ${}^{241}\text{Am}/{}^9\text{Be}$ تبلغ شدة المصدر نحو 70 نيوتروناً في الثانية للميجا بيكريل من ${}^{241}\text{Am}$. هذا وإن طيف النيوترونات المنطلقة من مصدر ألفا-بريليوم ليست لها طاقة واحدة ولكن لها قمتين بين الطاقات، في المدى من 3 إلى 6 ميجا إلكترون فولت، وبمعنى آخر فهذه المصادر تولد أساساً نيوترونات سريعة.

ومن التفاعلات الأخرى المستخدمة لإنتاج النيوترونات تفاعلات (γ, n) إذ تحتوي أكثر هذه المصادر على خليط من أحجام متساوية من الأنثيمون والبريليوم، بحيث تتفاعل أشعة جاما المنطلقة من الأنثيمون-124 مع نوى البريليوم مؤدية إلى إطلاق النيوترونات. ومن الجدير بالذكر أن النيوترونات المتولدة بواسطة عملية (γ, n) تعدّ في معظم الأغراض العملية أحادية الطاقة.

من أجل حساب الفيض على مسافة (نق) من مصدر شدته (م) تستعمل المعادلة الآتية (انظر الفصل 3):

$$\text{الفيض } (\phi) = \text{م} / (4 \pi \text{ ط نق}^2)$$

مثال 8-10:

احسب معدل الجرعة المكافئة على بعد 1م من مصدر أمريسيوم-بريليوم شدته 0.1 تيرا بيكريل. الواحد تيرا بيكريل من ${}^{241}\text{Am}/\text{Be}$ يطلق 7×10^7 نيوترونات/ ثانية.

افترض أن 10^4 نيوترونات/م²ث = 1 مايكرو سيفرت/ ساعة.
(الجواب: 56 مايكرو سيفرت/ ساعة).

6.8 التحكم في جرعات الأفراد:

إن التحكم الدوري في الجرعات التي يتعرض لها الأفراد العاملون في مجالات الإشعاع مبنية على نظام تصنيف المناطق، ويستخدم كثير من الأنظمة والمصطلحات لهذا الغرض، من أجل تصنيف المناطق بحسب أخطارها الإشعاعية. ففي المناطق التي لا يتوقع أن يزيد فيها التعرض على عشر الحد المسموح به للعاملين وهو 2 ملي سيفرت في السنة، ليس هناك من ضرورة لوضع ترتيبات خاصة، أما المناطق التي قد يزيد فيها تعرض العاملين على هذا المقدار مع عدم احتمال زيادته على ثلاثة أعشار الحد، وهي 6 ملي سيفرت في السنة، فتقترح الهيئة الدولية للوقاية الإشعاعية أن تسمى هذه المنطقة منطقة مراقبة، أما المناطق التي قد يزيد فيها التعرض على ثلاثة أعشار حد الجرعة المسموح به للعاملين فيطلق عليها مناطق متحكم فيها، إن العاملين الذين يدخلون المناطق المتحكم فيها بشكل رتيب، أو الذين يمكن أن يتعرضوا لجرعة تزيد على 6 ملي سيفرت/ سنة، يعرفون بمجموعة العاملين "أ"، أما بقية العاملين فيعرفون بمجموعة العاملين "ب"، وفي المناطق المتحكم فيها قد تكون هناك ضرورة للتأشير على أجزاء منها لتجنب التعرض الزائد للإشعاع، وفي بعض المؤسسات يطلق على المناطق الأخيرة "المناطق المقيدة".

ولهذا فإن النظام المعتاد للتصنيف يمكن أن يبنى على أربعة أنواع من المناطق:

(1) مناطق غير متحكم فيها: حيث لا يزيد معدل الجرعة على 1 مايكرو سيفرت/ ساعة، ويمكن للعاملين أن يشتغلوا فيها 40 ساعة أسبوعياً مدة 50 أسبوعياً في السنة، دون أن تزيد الجرعة على 2 ملي سيفرت في السنة.

(2) مناطق مراقبة: حيث لا يزيد معدل الجرعة عادة على 3 مايكرو سيفرت في الساعة، ولهذا فلن يزيد تعرض العاملين فيها على أكثر من ثلاثة أعشار حد الجرعة. وكما يفهم

من الاسم، فإن هذه المناطق معرضة لبعض أنواع المراقبة، والعاملون بانتظام فيها معرضون للمراقبة الشخصية الرتيبة.

(3) مناطق متحكم فيها: حيث يزيد معدل الجرعة فيها على 3 مايكرو سيفرت في الساعة، ويعرف العاملون باستمرار في مثل هذه المناطق بمجموعة العاملين "أ"، وهم معرضون للمراقبة الطبية والمراقبة الشخصية الرتيبة.

(4) مناطق مقيدة: حيث يزيد معدل الجرعة فيها على 10 مايكرو سيفرت في الساعة، والداخلون إلى هذه المناطق معرضون لتحذيرات خاصة، مثل تحديد مدة البقاء، واستخدام معدات واقية، وأجهزة مراقبة.

عند العمل بنظام تصنيف المناطق من الضروري عمل مسح للمنطقة بانتظام للتأكد من أن تصنيف المنطقة صحيح، وأن الاحتياطات اللازمة متخذة. وفي المناطق المتحكم فيها والمقيدة لا بد من حمل شارة فيلم، أو مقياس جرعات حراصوني (TLD) لقياس مقدار الجرعة المتجمعة للعامل، إضافة إلى ذلك يحمل عادة أحد الأجهزة المباشرة لقياس معدل الجرعة مثل معدل الجرعة الشخصي الإلكتروني لإعطاء قراءات آنية في أي لحظة.

7-8 مراقبة المسح الإشعاعي:

7-8-1 إجراء المراقبة بالمسح الإشعاعي:

وهذه تجري:

(1) عند البدء في تشغيل أي منشأة لاختبار كفاءة الحواجز الواقية فيها، وللتأكد من أن مستويات الإشعاع مقبولة.

(2) كلما أجريت تغيرات قد تؤثر على مستويات الإشعاع، مثل التغيرات في ترتيب (الماكينات) وفي ترتيب الحواجز.

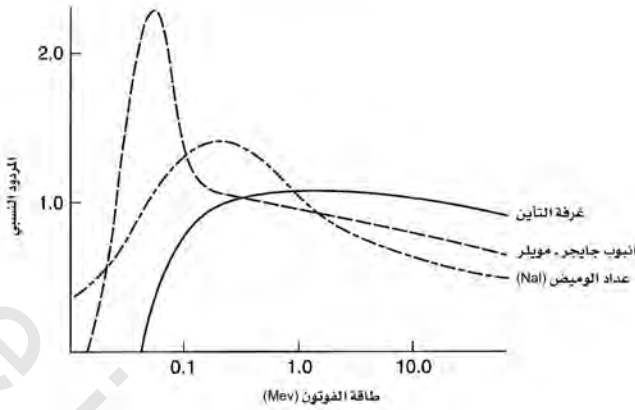
(3) تُجرى المراقبة بصورة دورية - خلال التشغيل - وذلك لتقرير مستويات الإشعاع في أثناء العمل من أجل التحكم في الجرعة المتراكمة.

يجب أن يكون المراقب المثالي للمسح الإشعاعي قادراً على مراقبة جميع أنواع الإشعاعات الاختراقية، وأن يكون خفيف الحمل، سهل الاستعمال، ويعطي معدل الجرعة المؤثرة. ولا يمكن عملياً تصميم جهاز واحد تتوافر فيه كل هذه الصفات لجميع أنواع الإشعاع، ولهذا فقد طور كثير من الأجهزة لأنواع المختلفة من الإشعاع.

8-7-2 مراقب الأشعة السينية وأشعة جاما:

من أنواع المراقب ما يمكنه قياس الأشعة السينية وأشعة جاما، بل قد تكون له القدرة كذلك في تحسس أشعة بيتا وإعطاء قيمة تقريبية لها. وتعتمد طريقة الكشف عن الإشعاع في هذا المراقب على الحساسية المطلوبة، حيث يمكن استخدام غرفة التأين فقط عند المستويات التي لا يقل الإشعاع فيها عن عشرات المايكرو سيفرت/ ساعة. أما في الحالات التي يقل فيها المستوى الإشعاعي عن ذلك، فإن غرفة التأين المطلوبة ستكون كبيرة جداً لا تصلح للاستخدام المتنقل؛ لذا يمكن زيادة الحساسية باستخدام أنبوبة جايجر-مولر أو كاشف وميض مع دائرة كهربائية لقياس معدل النبضات.

واستجابة أجهزة قياس معدل جرعة الأشعة السينية أو أشعة جاما للطاقة مهم، ويبين الشكل (8-3) استجابة مثالية لكل من غرفة التأين وأنبوبة جايجر-مولر وكاشف وميض، ويلاحظ أن غرفة التأين لها استجابة ثابتة نسبياً للطاقات من 0.3 إلى 10 ميغا إلكترون فولت، في حين لاستجابة كل من أنبوبة جايجر-مولر وكاشف الوميض قمة في مدى الطاقة المنخفضة. ويتم عادة معايرة مراقب المسح باستعمال مصدر راديوم-226 ذي طاقة فوتون مؤثرة قدرها 0.8 ميغا إلكترون فولت.



شكل (3-8) منحنيات مردود الطاقة لكواشف مختلفة

وإذا ما استخدم أحد الجهازين المذكورين في قياس إشعاعات مختلفة الطاقة فقد يكون معدل الجرعة المسجل أكثر من الواقع أو يقل كثيراً عنه. وقد أدخلت حديثاً أدوات تعويض في الأجهزة التي تستخدم كاشف وميض أو كاشف جايجر-مولير من أجل إعطاء استجابات ثابتة نسبياً في مدى الطاقات ما بين 0.1 إلى 3 ميغا إلكترون فولت.

يظهر الشكل (4-8) مرقباً حديثاً لقياس المستوى الإشعاعي لكل من بيتا والأشعة السينية وأشعة جاما، وفيه مواصفات عدة حديثة من ضمنها الاختيار الآلي لمعدلات المستوى الإشعاعي وتجهيزات إدخال المعلومات.

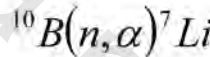


شكل (4-8) جهاز مسح إشعاعي مطور

8-7-3 مراقب النيوترونات:

النيوترونات لا تؤين الذرات مباشرة؛ لأنها لا تحمل أي شحنة، ولهذا وجب استخدام طرق غير مباشرة لإحداث التأين. ويتم الكشف عن النيوترونات السريعة يجعلها تتفاعل أولاً مع مواد تحتوي نسباً عالية من ذرات الهيدروجين، حيث تصطدم النيوترونات بالبروتونات في المواد الهيدروجينية، فيكشف عن التأين المتسبب بهذه البروتونات. وتستخدم مراقب النيوترونات السريعة عداداً تناسبياً مع بعض المواد الهيدروجينية المقحمة فيه كالبولثين. وحساسية هذه الأجهزة منخفضة جداً، ويصعب الكشف بها عن المستويات الإشعاعية التي تقل عن 50 مايكرو سيفرت في الساعة.

والتفاعل المستخدم عموماً للكشف عن النيوترونات الحرارية هو:

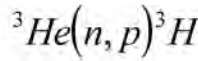


وللبورون-10 مقطع عرضي كبير في إمكانية أسر النيوترونات الحرارية، وتؤدي جسيمات ألفا المنطلقة إلى إحداث تأين يمكن كشفه بعد ذلك ومراقب النيوترونات الحرارية الأكثر شيوعاً هو غرفة تأين مغطاة بطبقة من البورون، أو عداد تناسبي مملوء بغاز فلوريد البورون الثلاثي (BF_3).

وتنخفض استجابة الأجهزة التي تستخدم تفاعل البورون كثيراً عند النيوترون الذي تزيد طاقته على عدة إلكترون فولت، في حين يبدأ القياس في الأجهزة التي تستخدم تفاعل البروتون المرتد عند الطاقات التي تزيد على 100,000 إلكترون فولت (0.1 مليون إلكترون فولت)، ولم يكن هناك جهاز يستطيع قياس النيوترونات المتوسطة الطاقة سنوات عدة، وقد أصبح معلوماً أن لهذه النيوترونات مشاركة ملحوظة في جرعة النيوترونات حول المفاعلات النووية، وتم خلال العقود القليلة الماضية تطوير أجهزة تستطيع قياسها. يجري التأكيد حالياً على الأجهزة التي تقيس الجرعة التي يتعرض لها

النسيج نتيجة للنيوترونات المختلفة الطاقة، أي ما بين النيوترونات الحرارية وحتى 15 ميغا إلكترون فولت. وأحد هذه الأجهزة مصور في (الشكل 5-8) وله أسطوانة من البوليثين تقوم بإبطاء النيوترونات السريعة بواسطة التصادم المرن، وقد ثبتت سلسلة من مرشحات الكادميوم داخل كرة البوليثين لإعطاء استجابة صحيحة للطاقة، ويتم الكشف عن النيوترونات الحرارية بواسطة عداد تناسبي مملوء بغاز الهيليوم.

يؤدي أسر النيوترون إلى إطلاق بروتون حسب المعادلة الآتية:



حيث يرمز ${}^3\text{H}$ إلى نظير للهيدروجين يسمى تريتيوم، ومرة أخرى يحدث التأين بواسطة البروتون. ويفضل هذا الجهاز عادة على الأجهزة التي تستخدم تفاعل البورون-10 لأن الجهاز الأول أقل حساسية لأشعة جاما.



شكل (5-8) مراقب نيوتروني

8-8 معدات المراقبة الشخصية:

8-8-1 الجرعات الشخصية:

تستخدم مراقب المسح الإشعاعي للتعرف على مستويات الإشعاع في مناطق المختبرات المختلفة أو حول المفاعلات، وهي ليست طريقة دقيقة لتقييم الجرعة المتجمعة التي يتعرض لها العاملون في هذه المناطق، وذلك للأسباب الآتية:

(أ) من المتوقع تغير معدل الجرعة بصورة كبيرة مع الزمن اعتماداً على نوع التشغيل الجاري.

(ب) يتحرك العاملون عادة في أثناء أدائهم لأعمالهم هنا وهناك فينتقلون من مستوى إشعاعي إلى مستوى آخر.

وللتغلب على هذه الصعوبات، يعلق العاملون في العادة عند دخولهم المناطق الإشعاعية مقياساً للجرع الشخصية، وهو أداة تقيس الجرعة المتراكمة عند حاملها، وهناك أنواع عدة من مقاييس الجرعات الشخصية مستخدمة حالياً.

8-8-2 شارة الفيلم:

هذا النوع من مقاييس الجرعات الشخصية هو الأكثر شيوعاً، ويحوي قطعة من فيلم فوتوغرافي موضوع في حامل خاص. وشارة الفيلم هي إحدى الطرق المقبولة في مراقبة الجرعة الإشعاعية لكل الجسم، وذلك من أجل السجل الدائم، حيث يمكن حفظ الفيلم المحمض، والقيام بفحصه ثانية إذا ما دعت الضرورة لذلك.

وتحوي شارة الفيلم المستخدمة في المملكة المتحدة أفلام كوداك (RM Radiation Monitoring) في حامل خاص. ويتكون الفيلم من طبقتين من المستحلب الفوتوغرافي⁽¹⁾: أحدها عالي الحسية على جهة والآخر منخفض الحسية على الجهة الأخرى. وتقدر

(1) المستحلب الفوتوغرافي: هو الطبقة الحساسة التي تغطي بها سطوح الأفلام.

درجة الاسوداد على الفيلم الحمض باستخدام مقياس الكثافة الضوئية حيث ترتبط الدرجة بمقدار التعرض الإشعاعي للفيلم. واستخدام طبقتين من المستحلب يسمح بقياس مدى واسع من الجرعات، فالمستحلب السريع يسمح بقياس الجرعات من 50 مايكرو سيفرت إلى نحو 50 ملي سيفرت، فإذا ما كانت الجرعات المتعرض لها تزيد على 50 ملي سيفرت، فإن جزءاً من المستحلب السريع ينقشع من الفيلم، فيسمح للمستحلب البطيء بقياس الجرعات حتى 10 سيفرت.

والحامل المذكور مصور في الشكل (8-6) وتظهر فيه مرشحات عدة تمكن من قياس جرعات β و γ و x والنيوترونات الحرارية. تقاس بيتا أساساً في قطعة الشباك المفتوح، أما جاما فتقاس أسفل الرصاص، والنيوترونات الحرارية تقاس بأخذ الفرق بين مرشحات (الرصاص + الكاديوم) و(الرصاص + القصدير)، فالنيوترونات الحرارية تتفاعل مع الكاديوم (n, γ) فتعطي أشعة جاما المنطلقة في هذا التفاعل زيادة في الاسوداد أسفل مرشح الكاديوم، ويقوم المرشحان 300 ملغم/سم² و 50 ملغم/سم² بالتصحيح المطلوب للطاقة لكل من جرعات β و γ . أما إطار الرصاص الذي حول الحامل فقد وضع للتقليل من تأثير الحافات على حدود المرشحات المختلفة. وتعمل رقيقة الأنديوم (بوصفها مؤشراً للتعرض) للحوادث الحرجة، فالجرعة التي تزيد على 10 ملي سيفرت من النيوترونات الحرارية تؤدي إلى تنشيط الأنديوم إلى درجة تسمح بقياس نشاطه باستخدام أنبوبة جايجر - مويلر.

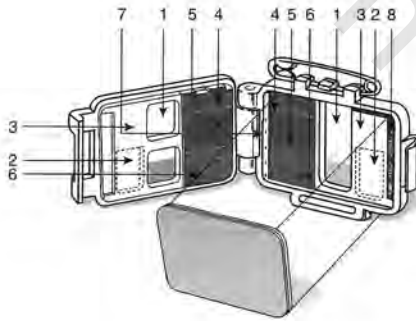
8-3-8 مقاييس الجرعات الحراضوية:

توفر المواد الحراضوية وسيلة دقيقة وسريعة لقياس الجرعات اليومية، وصار لها تطبيقات لمراقبة كل الجسم أو الأطراف. إن تأثير الأشعة المؤينة على المواد الحراضوية وطريقة قراءتها قد فصلت في الفصل السابع، ومن مساوئ هذه التقنية أن عملية قراءة الجرعة تسمح المعلومات، ولهذا فهي تختلف عن إشارة الفيلم حيث لا يمكن قياس الجرعة

فيها إلا مرة واحدة فقط. وإن المقاييس الحراضوية تعطي معلومات أقل عن نوعية الإشعاع أيضاً.

هناك مادتان حراضويتان مستخدمتان حالياً، وهما فلورات الليثيوم وفلورات الكالسيوم، فالأخيرة حساسة جداً ولكن استجابتها للطاقة ضعيفة، في حين فلورات الليثيوم أقل حساسية منها، ولكن استجابتها للطاقة ممتازة. وفي الأجهزة العملية لقياس الجرعات تستخدم مواد حراضوية على شكل مسحوق أو أقراص.

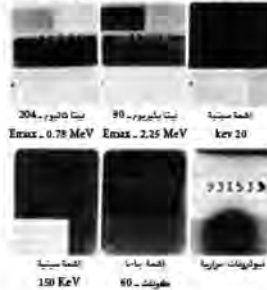
لقد حلت مقاييس الجرعات الحراضوية في بعض المؤسسات بدل شارة الفيلم بوصفها طريقة رئيسة لقياس الجرعات الشخصية. وفي معظم الأحيان، تستخدم مقاييس الجرعات الحراضوية بوصفها مكمل لشارة الفيلم، حيث تقوم بإعطاء طريقة سهلة ودقيقة لقياس الجرعات على المدى القصير. الشكل (8-7) يوضح مقياس جرعة حراضوي.



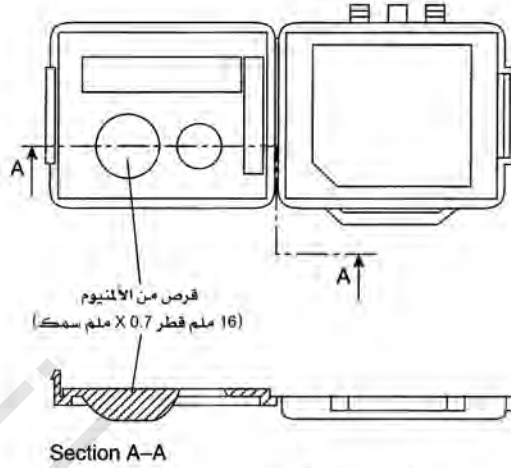
أنواع الترشحات:

- 1- 221-1 نافذة.
- 2- 50 ملغم/سم² بلاستيك.
- 3- 300 ملغم/سم² بلاستيك.
- 4- بوصة مادة الدورانيون.
- 5- 0.028 بوصة هكاديميوم و 0.012 بوصة رصاص.
- 6- 0.028 بوصة قصدير و 0.012 بوصة رصاص.
- 7- 0.012 بوصة رصاص إطار حاجز.
- 8- 0.4 سم من الاديوم.

فيلم تعرض لأنواع مختلفة من الإشعاع وهو في حامله



شكل (8-6) شارة الفيلم



شكل (8-7) مجراع حراضوني

8-8-4 مقياس الجرعات الإلكتروني:

تتوافر أنواع عدة من مقياس الجرعات الإلكتروني منذ عقود عدة ومعظمها مصنع من أنابيب صغيرة جايير - مويلر تعرض قراءة مباشرة إما لمعدل الجرعة أو للجرعة المتراكمة، وتحتوي هذه المقاييس في معظم الأحيان على جرس يعطي إنذاراً في حال معدل الجرعات المرتفعة أو إذا وصلت الجرعة إلى جرعة محددة مسبقاً، واستخدام هذه الأجهزة الرئيس هو لإعطاء مقياس للجرعة وللتحكم في موقع العمل.

وهناك جيل جديد من مقياس الجرعات الإلكتروني متوافر حالياً يستخدم كواشف الحالة الصلبة مستفيداً من التطور في تقنية المعلومات وهذه الأجهزة ذاكرة يمكن برمجتها لأداء أعمال متنوعة مثل إدخال الجرعات لمهمة معينة أو تخزين المعلومات حول صفات مجال إشعاعي، ويمكن استخدامها بوصفها أحد أشكال مراقبة الدخول الذي يعطي دخولاً مسجلاً للمناطق المتحكم فيها. لهذا، فإن هذه الأجهزة ميزة الجمع بين التحكم في جرعات التشغيل ومهام قياس الجرعات طويلة الأمد للأغراض النظامية. والشكل (8-8) يظهر مقياس جرعات إلكتروني حديث.

ومن مساوئ هذه الأجهزة مقارنة بشاردة الفيلم أو المقاييس الحراضونية أنها عالية الثمن نسبياً في البداية، وكبيرة الحجم، وعرضة للتأثر بالمجالات الكهرومغناطيسية.



شكل (8-8) مجراع إلكتروني متوافر تجارياً

8-8-5 مقياس جرعات النيوترونات السريعة:

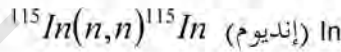
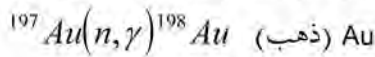
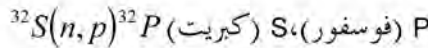
إن لوحة أثر النيوترون السريع تحتوي على فيلم خاص مدمج في حامل يشبه في الظاهر شارة الفيلم. تتفاعل النيوترونات السريعة مع المادة الأساسية للفيلم مؤدية إلى إطلاق بروتونات مرتدة، وهذه من ثم تولد آثار تأين في المستحلب يمكن رؤيتها بعد تحميض الفيلم، وبحساب هذه الآثار تحت المجهر يمكن اعتبار عدد الآثار بالاستيمتر المربع مقياساً للجرعة النيوترونية.

لوحات الآثار لها مدى جرعة يتراوح بين 1 ملي سيفرت وحتى 1 سيفرت، وما يعيبها أن القياس فيها ممل ومكلف، إضافة إلى أنها حساسة لأشعة جاما، فجرعة 100 ملي سيفرت تقريباً من أشعة جاما تجعل عملية عد الآثار مستحيلة⁽¹⁾.

8-8-6 مدلاة الخطر:

(1) تستخدم كواشف الآثار النووية (NTDs) حديثاً لقياس جرعات كل من النيوترونات السريعة والحرارية في بعض المراكز. ومن مميزات أنها غير حساسة لأشعة جاما.

تلبس مدلاة (قلادة) الخطر إضافة إلى شارة الفيلم حيثما تتداول المواد الانشطارية (القابلة للانشطار مثل قضبان الوقود و برك التبريد والمفاعلات) وهي مصممة لقياس الجرعات النيوترونية العالية جداً التي قد تواجه في أثناء الحوادث الخطرة. إن مدلاة الخطر تحتوي على مركبات تنشط بالنيوترونات المختلفة الطاقة، فالتفاعلات المستخدمة في هذا المقياس هي:



كل هذه المركبات المنشطة تطلق جسيمات بيتا يمكن عدّها في جهاز كشف محجوز بشكل مناسب. ومن هذا العد يمكن تقدير جرعات كل من النيوترونات السريعة والمتوسطة والحرارية.

8-7-8 كاشفات ألياف الكوارتز الكهربائي:

كاشفات ألياف الكوارتز الكهربائي هي مقاييس للجرعات يحمل الواحد منها في الجيب، ويعطي باستمرار قراءة مشاهدة لجرعة جاما المتراكمة. ويتركب هذا الكاشف من مجموعة من الخيوط الزجاجية في غرفة تأين صغيرة ومكبس ملقم بنابض لشحن الكاشف الكهربائي وعدسة مجهر ترى من خلالها الخيوط الزجاجية ومقياس مدرج بالمللي سيفرت. يشحن الكاشف الكهربائي بتسليط جهد إلى القطب المركزي، فيؤدي بخيوط الكوارتز إلى الانفراج. وعند التعرض لأشعة جاما، يتأين الغاز داخل الغرفة، فتقل الشحنة على القطب، ولهذا يقل انفراج خيوط الكوارتز، فيعطي التغير في الانفراج مقدار الجرعة.

إن كاشفات خيوط الكوارتز الكهربائية متوافرة بحساسية تتراوح من 1 ملي سيفرت للانفراج الكامل وحتى 100 سيفرت.

ولقد وفر هذا الجهاز - سنوات عدة - وسيلة رخيصة وبسيطة ومعتمدة للتحكم في جرعة التشغيل، ولكن حل محلها الآن جيل جديد من مقاييس معدلات الجرعة الشخصية الإلكترونية نوقشت في مبحث (8-8-4).

8-9 سجلات الإشعاع:

الغرض من قياس الجرعات الشخصية، هو التأكد من عدم تعرض العاملين في المجالات الإشعاعية لجرعات تزيد عن تلك المنصوص عليها في التشريعات المعنية أو في قواعد العمل، وتجهز هذه المقاييس في معظم البلدان من قبل مختبرات موثقة ماعدا المقاييس السريعة للجرعات.

والمختبر المصرح له بقياس الجرعات يقوم بالمهام الآتية:

(1) إصدار شارات الأفلام ومقاييس الجرعات الحراضونية وكذلك أي مقاييس أخرى للجرعة الشخصية (مثل لوحات أثر النيوترون السريع) التي قد تكون ضرورية.

(2) معاملة هذه الأفلام وتقييمها بعد إعادتها.

(3) إصدار تقارير الجرعات والمحافظة على السجلات.

لقد أنشأ بعض أصحاب العمل الذين يشتغل لديهم عدد كبير من العاملين الحاملين لمقاييس الجرعات الشخصية مختبراتهم الخاصة لمعاملة الأفلام، أما غيرهم فيعتمدون على الهيئات المتخصصة كالمجلس الوطني للحماية الإشعاعية في المملكة المتحدة.

إن شارات الفيلم والمقاييس الحراضونية هي الطريقة المقبولة على نطاق واسع في الوقت الحاضر للأغراض القانونية بين طرق عدة لقياس الجرعات الشخصية، وتعامل عادة كل شهر، ثم تسجل النتائج في سجل الجرعات الشخصية للعامل. إضافة إلى ذلك،

يصدر ملخص ربع سنوي لكل مستخدم تلخص فيه الجرعة الإشعاعية الكلية المتراكمة له خلال حياته العملية.

وكما ناقشنا في المبحث 4-8-8 فإن مقاييس الجرعات الإلكترونية طورت إلى درجة يصلح معها استخدامها في نظام للجرعات المصرح بها، ولكنها إلى الآن لا تستخدم لهذا الغرض على نطاق واسع.

خلاصة الفصل:

أخطار الإشعاع الخارجي: تأتي من المواد المشعة الموجودة خارج الجسم.

التحكم في الأخطار الخارجية: الزمن والمسافة والحاجز الواقي.

الزمن: الجرعة = معدل الجرعة $\times$ الزمن.

المسافة: قانون التربيع العكسي

$$D_1 r_1^2 = D_2 r_2^2$$

معدل الجرعة من مصدر جاما: $D = \frac{ME}{6r^2}$ بالمايكرو سيفرت/ ساعة

حيث M بوحدة الميغابيكيريل (MBq)، E بوحدة الميجا إلكترون فولت (MeV) و r بوحدة المتر (م).

الحجز: جسيمات ألفا: من السهل جدًا امتصاصها.

أشعة بيتا: تستخدم مواد واطئة الوزن الذري للتقليل من أشعة الكبح.

أشعة جاما: تنخفض أسياً حسب المعادلة

$$D_t = D_o e^{-\mu t}$$

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\mu}$$

سمك نصف القيمة:

حجز النيوترونات: استطارة مرنة واستطارة غير مرنة وأسر النيوترون.

مصادر النيوترونات: تعتمد إما على تفاعلات (α, n) أو على تفاعلات (γ, n) .

تصنيف المناطق: منطقة غير متحكم فيها وأخرى مراقبة وثالثة متحكم فيها ورابعة مقيدة.

مراقب المسح الإشعاعي: مراقب الأشعة السينية وأشعة جاما تستخدم غرف التأين أو أنابيب جايجر-مولر أو كاشفات الوميض.

مراقب النيوترونات: تغطي الطاقات الحرارية حتى 15 ميغا إلكترون فولت، ويستخدم التفاعل $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ لإعطاء تمييز جيد عن جاما.

مقاييس الجرعات الشخصية:

شارة الفيلم: فيلم خاص بطبقتين من المستحلب الفوتوغرافي تغطي الجرعات من 50 مايكرو سيفرت وحتى 10 ملي سيفرت، والفيلم موضوع في حامل مع مرشحات تسمح بقياس بيتا وجاما والأشعة السينية والنيوترونات الحرارية.

مقاييس الجرعات الحراضية: حيث تخزن طاقة الأشعة، ويمكن بعد ذلك إطلاقها بالتسخين. وبقياس الضوء المتحرر باستخدام أنبوب المضاعفة الضوئي، والإشارة الكهربائية الخارجة من الأنبوب تمثل قياساً للجرعة الإشعاعية.

مقاييس الجرعات النيوتروني: مبني على كواشف الحالة الصلبة، وتعطي قياساً مباشراً قصيراً وطويل الأمد.

لوحة أثر النيوترون السريع: فيلم خاص في حامل. تطلق النيوترونات السريعة بروتونات ارتدادية تؤدي إلى آثار في المستحلب يمكن إظهارها بالتحميص. عيبه الرئيس كلفة تقييم لوحات الأثر.

مدلاة الخطر: تقلد عند مداولة مواد انشطارية ومركباتها المتنوعة، تنشيط بالنيوترونات المختلفة الطاقة، ويمكن بعدها معرفة النشاط الإشعاعي باستخدام قلعة بيتا.

كاشف خيوط الكوارتز الكهربائي: غرفة تأين جيبي يعطي قراءة مستمرة للجرعة المتجمعة من جاما.

أسئلة للمراجعة:

- (1) ما الوسائل الثلاث التي يمكن عن طريقها التحكم في أخطار الإشعاع الخارجي؟
- (2) يتحتم على عامل أن يعمل في منطقة معدل الجرعة فيها 10 مايكرو سيفرت/ ساعة وذلك لإتجاز مهمة معينة. كم عدد الساعات التي يستطيع أن يشتغلها هو أو هي في المنطقة نفسها أسبوعياً بشرط ألا تزيد الجرعة المتجمعة على 100 مايكرو سيفرت في الأسبوع؟ إلى أي حد يجب أن يكون معدل الجرعة كي يسمح للعامل أن يشتغل في المنطقة 40 ساعة أسبوعياً؟
- (3) احسب معدل الجرعة المكافئة على بعد 1م من مصدر كوبلت - 60 شدته 540 مليون بيكريل. على أي بعد يكون معدل الجرعة المكافئة 25 ملي سيفرت/ ساعة؟
- (4) إذا علم أن معدل الجرعة على بعد 1م من مصدر معين لأشعة جاما هو 360 مايكرو سيفرت/ ساعة، على أي بعد من المصدر يكون معدل الجرعة 10 مايكرو سيفرت/ ساعة؟
- (5) احسب معدل الجرعة التقريبي على بعد 2م من مصدر جاما شدته 3000 مليون بيكريل ويشع فوتوناً واحداً طاقته 1.6 مليون إلكترون فولت في كل تحلل.
- (6) ناقش مشكلة الكشف عن النيوترونات، مبيناً كيفية التغلب عليها في حالة مراقب النيوترونات الحديثة.
- (7) اذكر الأنواع الرئيسة لمقاييس الجرعات الشخصية، ثم ناقش مزايا ومساوئ كل من: شارة الفيلم، ومقياس الجرع الحراضولي، ومقياس الجرع الإلكتروني.