

قياس جرعات الإشعاع المؤين

تتبع الآثار البيولوجية لتأثير الإشعاع المؤين على مستوى الخلايا، الأنسجة، الأعضاء، والجسم، بطاقة التأثير، ونوع الإشعاع، وبنية الجسم الهدف.

للتقدير الكمي للآثار البيولوجية، التي تنشأ تحت تأثير الإشعاع المؤين في الأجسام البيولوجية، من الضروري تعريف خصائص فيزيائية موضوعية للإشعاع، قابلة للقياس من جهة، وتعتمد على درجة تطور هذه الآثار من جهة أخرى.

1.29. الجرعات الإشعاعية

إن تأين الوسط الذي ينشأ تحت تأثير جسيمات وفوتونات الإشعاع، وكذلك امتصاص طاقتها هي الآثار الفيزيائية المستخدمة لوضع بارامترات قياس الجرعة. وهذه الآثار تظهر بشكل مختلف تبعاً لاختلاف طبيعة الإشعاع، وتنوع بنيات الأجسام، التي تخضع لتأثير الإشعاع.

1.1.29. جرعة التعرض الإشعاعي

إن أبسط وصف كمي لتأثير الإشعاع، هو التعبير عن الأثر الذي تنتجه الأشعة المؤينة في المادة وهو درجة التأين، أي مجموع شحنات التأين المتشكلة في وحدة الكتلة من المادة.

جرعة التعرض الإشعاعي X وهي نسبة الشحنة الكلية dQ للأيونات من نفس الإشارة، المتشكلة في كتلة ما من الهواء dm تحت تأثير الأشعة السينية أو أشعة γ على مقدار هذه الكتلة من الهواء:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (29.1)$$

في العلاقة (1.29) تُعتبر الكتلة dm صغيرة جداً بحيث يكون توزيع الشحنة dQ فيها منتظماً. إذا توزعت الشحنة Q بشكل منتظم في أي كتلة m فإن:

$$X = \frac{Q}{m} \quad (29.2)$$

قياس جرعات الإشعاع المؤين

نؤكد أن جرعة التعرض تُعرف فقط للهواء وللأشعة السينية وأشعة γ . وهي تصف الوضع الإشعاعي حول الجسم، أي درجة التأين بالأشعة الكهرومغناطيسية للوسط الهوائي المحيط.

يلاحظ من الصيغتين (29.1) و (29.2) أن وحدة قياس جرعة التعرض في جملة الوحدات الدولية هي C/kg (كولون/كغ).

في التطبيقات العملية تُستخدم وحدة الرونتجن (R) لقياس التعرض وهي من خارج جملة الوحدات الدولية للقياس.

الرونتجن هو جرعة الأشعة السينية أو أشعة γ التي تُسبب تشكل $2,08 \cdot 10^9$ زوج من الأيونات في $1cm^3$ من الهواء في الشرطين النظاميين.

نبين الرابطة بين هاتين الوحدتين.

$$1R = \frac{3,33 \cdot 10^{-10}}{1,29 \cdot 10^{-6}} = 2,58 \cdot 10^{-4} C/kg$$

$$\text{أو } 1C/kg = 3876R$$

إذا تم استلام جرعة التعرض X خلال الزمن t ، فإن متوسط معدل هذه الجرعة:

$$X' = \frac{X}{t} \quad (29.3)$$

إذا تغيرت جرعة التعرض مع الزمن، فإن معدل تغيرها يوصف بمعدل جرعة التعرض (X') وهي عبارة عن مشتق الجرعة X بالنسبة للزمن:

$$X' = \frac{dX}{dt} \quad (29.3a)$$

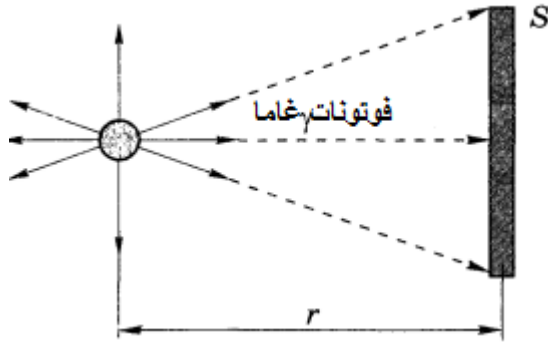
وحدة قياس معدل جرعة التعرض في جملة الوحدات الدولية هي A/kg ، ومن خارجها R/h ، mR/h و $\mu R/s$ وغيرها.

وهذه الجرعة تقاس بواسطة العديد من أجهزة قياس الجرعة، إذا كان معدل الجرعة X' ثابت فإن جرعة التعرض التي يستلمها الجسم خلال الزمن τ تتعين من حاصل الجداء: $X = X' \tau$.

قياس جرعات الإشعاع المؤين

إذا لم يكن معدل الجرعة ثابت ويتبع للزمن $X' = f(t)$ ، فإن جرعة التعرض خلال الزمن τ تُعين من التكامل:

$$X = \int_0^{\tau} X'(t) dt \quad (29.4)$$



من أجل المستحضرات الإشعاعية المشعة γ -ل معدل جرعة التعرض على المسافة r من المستحضر ذو النشاط A . تنطلق فوتونات γ من المنبع النقطي باحتمال متساوي في جميع الاتجاهات (الشكل 1.29). ويتناسب العدد الكلي لهذه الفوتونات مع عدد أحداث التفكك

الشكل 1.29. توزيع فوتونات غاما لمنبع نقطي

في واحدة الزمن، أي مع نشاط المنبع، وعدد الفوتونات التي تسقط على واحدة السطوح S التي تقع على المسافة r عن المنبع، تتناسب عكساً مع مربع المسافة r :

$$X' = K_{\gamma} \frac{A}{r^2} \quad (29.5)$$

حيث K_{γ} - ثابتة γ تميز كل نظير مشع، وهذه العلاقة تُستخدم لحالة النظائر المشعة التي تعطي فقط فوتونات γ عند تفككها.

وهكذا، تصف جرعة التعرض درجة التأثير الإشعاعي للأشعة السينية ولأشعة غاما في الهواء.

2.1.29. الجرعة الممتصة

يُعين تأثير الأشعة المؤينة في الأجسام البيولوجية، الجزء من الإشعاع، الذي يمتصه الجسم. تبدي الجسيمات والفوتونات المؤينة، التي تنشأ عن تفكك النظائر المشعة، الموجودة في الجسم تأثيراً بيولوجياً محسوساً (تعرض داخلي). لذا لوصف التأثير الإشعاعي على الجسم يُعرف مقدار فيزيائي، الذي يُسمى الجرعة الممتصة من الإشعاع المؤين D ، وهي نسبة الطاقة dE التي ينقلها الإشعاع المؤين إلى كتلة dm من المادة:

قياس جرعات الإشعاع المؤين

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (29.6)$$

إذا توزعت الطاقة الممتصة بالتساوي في الكتلة m من الجسم المعرض للإشعاع، فإن:

$$D = \frac{E}{m} \quad (29.6a)$$

وحدة الجرعة الممتصة في جملة الوحدات الدولية هي الغراي (Gy): $1Gy = 1J/kg$ ، ومن خارج هذه الجملة الراد (rad)، والرابطة البسيطة بينهما $1Gy = 100rad$ (الراد- من الإنكليزية radiation absorbed dose).

نشير إلى أن جرعة واحدة مقدارها $6Gy$ تؤدي إلى موت جميع الأشخاص المعرضين، الذين لا يحصلون على العلاج الطبي الخاص (معدل الوفيات 100%).

معدل الجرعة الممتصة وتعرف بالعلاقة $D' = dD/dt$ وتقدر بـ Gy/s و rad/s أو بوحدات مشتقة منها.

متوسط معدل الجرعة D ، المحصول عليها خلال الزمن t ، تُحسب من العلاقة $D' = D/t$.

إن تعيين الجرعة الممتصة بواسطة التجربة، معقد للغاية، وغير ممكن في كثير من الحالات. ولذلك يمكن تقدير الجرعة الممتصة من خلال جرعة التعرض، التي يمكن قياسها بسهولة، ولأن الجرعة الممتصة تتناسب مع التعرض في حالة التعرض الخارجي:

$$D = f X \quad (29.7)$$

يرتبط المعامل f بعدة عوامل، أولها بنية الهدف المعرض للإشعاع، طاقة الفوتونات، ووحدة القياس المستخدمة.

القيم العددية للمعامل f مريحة للغاية، فيما إذا تم قياس الجرعة X بالرونجن (R)، و D بالراد.

في هذه الحالة يأخذ المعامل f القيم البسيطة الآتية:

$$\bullet \quad f = 0,88 rad / R \quad \text{للواء،}$$

$$\bullet \quad f = 1,0 rad / R \quad \text{للماء وللأنسجة الحيوية الرخوة،}$$

قياس جرعات الإشعاع المؤين

$$\bullet \quad f = 1 - 4,5 \text{ rad} / R \quad \text{للسيخ العظمي.}$$

يعتمد المعامل f بشدة على طاقة الفوتونات، وينخفض مع ازدياد هذه الطاقة.

يمكن بسهولة تعيين قيمة المعامل f للهواء.

ولهذا نحسب الطاقة الممتصة في 1 cm^3 من الهواء من أجل جرعة تعرض $X = 1R$.

في 1 cm^3 من الهواء ذات الكتلة $m = 1,29 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$ يتشكل $2,08 \cdot 10^9$ زوج من الأيونات. ومعلوم أن الطاقة المستهلكة لتشكيل زوج أيوني واحد (لتأيين جزيء واحد) في الهواء هي $34 \text{ eV} = 34,1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ، ومنه فجرعة التعرض:

$$D = \frac{E}{m} = \frac{(34,1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}) \times 2,08 \cdot 10^9}{1,29 \cdot 10^{-6} \text{ kg}} = 88 \cdot 10^{-4} \text{ Gy} = 0,88 \text{ rad}$$

وهكذا، من أجل جرعة التعرض $X = 1R$ الجرعة الممتصة في الهواء هي $0,88 \text{ rad}$.

وبالتالي، المعامل $f = 0,88 \text{ rad} / R$.

3.1.29. الجرعة المكافئة

إن الأثر البيولوجي لتأثير الأشعة المؤينة لا يعتمد فقط على مقدار الطاقة الممتصة في المادة، حيث يؤثر نوع الإشعاع على درجة الضرر الإشعاعي، فمن أجل نفس الجرعة الممتصة يكون للأشعة α ، β و γ مقدرة تأيين مختلفة.

ولذلك من أجل نفس الجرعة الممتصة تختلف درجة ضرر الجسم تبعاً لنوع الإشعاع المؤين المؤثر.

من أجل المقارنة بين التأثيرات البيولوجية، التي تُسببها الأشعة مختلفة الأنواع، يُستخدم مفهوم الفعالية البيولوجية النسبية للإشعاع (relative biological efficiency of radiation) (RBE) .

لإيجاد RBE يتم اختيار إشعاع مؤين من نوع ما مرجعياً، وتُعين الجرعة الممتصة التي تسبب تأثير بيولوجي معين في جسم ما. ومن ثم التأثير على نفس الجسم بنوع آخر من الإشعاع المؤين، الذي يُحدث نفس الأثر البيولوجي كما هو في حالة الإشعاع المرجعي.

قياس جرعات الإشعاع المؤين

تم اختيار الأشعة السينية بالطاقة $180-200\text{keV}$ إشعاعاً مرجعياً. ومع اختيار الأثر البيولوجي وتقديره الكمي يتعقد الأمر. ولأجل ذلك يُستخدم، مثلاً، معيار الجرعة نصف القاتلة للحيوانات $LD_{50/30}$ criterion of a semi-lethal dose for animals. وهي الجرعة التي تُسبب موت نصف (50%) الحيوانات (من نوع معين) المعرضة للإشعاع خلال 30 يوماً بعد التعرض.

وفضلاً عن ذلك يمكن اختيار تأثيرات بيولوجية إشعاعية أخرى: الانحرافات الكروموسومية، ظهور اللوكيميا المتكرر، عدم انتظام الصيغة الدموية، وما شابه ذلك.

وهكذا، يتم تعيين الفعالية البيولوجية النسبية للإشعاع من العلاقة:

$$RBE = \frac{C}{C'}$$

حيث: C - جرعة الأشعة السينية الممتصة ($180-200\text{keV}$) التي تسبب الأثر البيولوجي،
 C' - جرعة الأشعة الممتصة من نوع آخر للإشعاع المؤين التي تسبب نفس الأثر البيولوجي.
مثال:

نفترض، تعرض عدد معين من الحيوانات التجريبية لأشعة سينية مرجعية، التي تسبب جرعة قاتلة لنصف عدد الحيوانات خلال 30 يوماً من أجل جرعة ممتصة 5Gy . وبالتأثير على نفس العدد من الحيوانات المشابهة بجسيمات α ، فإن نفس الأثر البيولوجي (موت نصف العدد من الحيوانات خلال نفس الزمن) يحدث في حالة الجرعة $0,25\text{Gy}$.

ومنه RBE لجسيمات α يساوي $5/0,25 = 20$.

إن القيم المقترحة لـ RBE هي معامل النوعية (k) للإشعاع، الذي يأخذ بالاعتبار اختلاف درجة التأثير الإشعاعي للأشعة بمختلف أنواعها.

يأخذ معامل النوعية للإشعاع المؤين بمختلف أنواعه القيم الآتية:

- $k = 1$ للأشعة السينية ولأشعة γ و β ،
- $k = 20$ لجسيمات α بطاقة أقل من 10MeV ،
- $k = 10$ للبروتونات،

قياس جرعات الإشعاع المؤين

- $k = 3-10$ للنترونات بطاقة $0,1-5 MeV$ ،

للأخذ في الاعتبار الكفاءة البيولوجية النسبية للإشعاع، تُعرف الجرعة المكافئة. من أجل نفس الجرعة المكافئة التي يستلمها الكائن الحي، فإن التأثير البيولوجي للتعرض سيكون نفسه بغض النظر عن نوع الإشعاع المؤين.

الجرعة المكافئة H للإشعاع المؤين هي جداء الجرعة الممتصة D بمعامل النوعية للإشعاع:

$$H = kD \quad (29.8)$$

تقدر الجرعة المكافئة في جملة الوحدات الدولية بوحدة السيفرت (Sv)، والسيفرت هو الجرعة المكافئة التي من أجلها يساوي جداء الجرعة الممتصة في النسيج الحي بمعامل النوعية القيمة $1J/kg$.

يتبع من تعريف الجرعة المكافئة أن السيفرت والغراي لهما نفس الأبعاد (J/kg)، ولكن يمثلان جرعتين مختلفتين.

إذا تم تعويض الجرعة الممتصة بالغراي في الصيغة (29.8)، فبعد الضرب بـ k نحصل على الجرعة المكافئة بوحدة السيفرت.

إذا تم قياس الجرعة الممتصة بالراد، فإن وحدة الجرعة المكافئة من خارج جملة الوحدات هي الرم rem (المكافئ البيولوجي للراد)، $1rem = 0,01Sv$.

إن معدل الجرعة المكافئة H' هو نسبة ازدياد الجرعة المكافئة dH خلال المجال الزمني dt إلى قيمة هذا المجال:

$$H' = \frac{dH}{dt} \quad (29.9)$$

إذا تناسبت الجرعة المكافئة طردياً مع الزمن، فإن معدل الجرعة يتعين بنسبة الجرعة إلى الزمن:

$$H' = \frac{H}{t}$$

إن وحدات قياس معدل الجرعة المكافئة هي: Sv/s ، mSv/h ، rem/s ، $mrem/s$ إلخ.

قياس جرعات الإشعاع المؤين

إذا تغير معدل الجرعة مع الزمن $H' = f(t)$ ، فإن جرعة التعرض المكافئة خلال الزمن τ يتم إيجادها من العلاقة:

$$H = \int_0^{\tau} H'(t) dt$$

إن الجرعة الإجمالية المكافئة هي التي تحدد درجة الضرر الإشعاعي لعضو معين.

4.1.29. الجرعة المكافئة الفعالة

تتمتع الأعضاء والأنسجة المختلفة بحساسية مختلفة للإشعاع، ولذلك فإن استجابة الجسم بكامله لتأثير الإشعاع المؤين يتبع لنوع العضو وللجرعة التي استلمها هذا العضو. إن حالة التعرض الموضوعي لأجزاء الجسم منفردة، تواجهها، مثلاً، في حالة العلاج الشعاعي. أيضاً من الضروري احتساب الحساسية الإشعاعية للأعضاء منفردة في حالة تقدير التعرض الداخلي، لأن النظائر منفردة تتراكم بشكل نوعي في الأعضاء المختلفة (^{90}Sr - يتراكم بشكل رئيسي في الأنسجة العظمية، ويتراكم ^{131}I - في الغدة الدرقية)، وتسبب تعرضها بشكل مفضل.

الجرعة الفعالة المكافئة H_{ef} هي مجموع جداء الجرعات المكافئة، التي تستلمها الأعضاء الفردية للجسم H_i ، بالمعاملات الموافقة لمخاطر الإشعاع w_i .

$$H_{ef} = \sum_i w_i H_i \quad (29.10)$$

معامل خطر الإشعاع w_i (العامل الوزني) هو نسبة احتمالية خطر الموت عند تعرض العضو i لجرعة مكافئة معينة إلى خطر الموت عند تعرض منتظم لكامل الجسم بنفس الجرعة المكافئة.

الجدول 1.29

العضو	w_i
الغدة التناسلية	0,25
الغدة الثديية	0,15
نقي العظام الأحمر	0,12
المرتئين	1,12
الغدة الدرقية	0.03
سطوح العظام	0,03
بقية الأعضاء مجتمعة	0,30

مثال. إذا تعرضت رئتي الإنسان لجرعة مكافئة $1Sv$ فإن خطر (احتمالية) الموت بسرطان الرئتين يبلغ $P_l = 2.10^{-3}$. إذا استلمت جميع أعضاء الإنسان بانتظام $1Sv$ ، فإن احتمال خطر الموت يبلغ $P_0 = 1,65.10^{-2}$. ومنه فمعامل الخطر الإشعاعي للرئتين:

$$w_i = \frac{P_l}{P_0} = \frac{2.10^{-3}}{1,65.10^{-2}} \approx 0,12$$

وهكذا، يحدد المعامل w_i مساهمة الضرر الإشعاعي لهذا العضو في خطر التأثيرات الضارة على الجسم في حالة التعرض المنتظم (الجدول 1.29).

إن مجموع جميع معاملات الخطر الإشعاعي يساوي الواحد: $\sum_i w_i = 1$.

5.1.29. الجرعة الجماعية

تصف الجرعة المكافئة آثار التأثير الإشعاعي للأعضاء منفردة، بينما تصف الجرعة الفعالة المكافئة الآثار الموافقة للجسم برمته. لتقدير الآثار الإشعاعية على مستوى فرقة كبيرة من السكان يتم إدخال مفهوم الجرعة الجماعية أو الجرعة الفعالة المكافئة الجماعية S . وهذا المقدار هو تقدير موضوعي بمقياس الضرر الإشعاعي لمجموعة كبيرة من الأشخاص ويساوي مجموع الجرعات الفعالة المكافئة H_{ief} التي حصل عليها أفراد مختلفين:

$$S = \sum_i H_{ief} N_i \quad (29.11)$$

حيث N_i - عدد الأشخاص في المجموعة، الحاصلين على الجرعة H_{ief} . إن وحدة قياس الجرعة الجماعية هي شخص-Sv.

الجرعة الجماعية المعرفة تعطي إمكانية استخدام الطرائق الإحصائية لتعيين عدد الآثار الظاهرة والأقل وضوحاً للإشعاع. إن جرعة فردية معينة تسبب تطور بعض الأمراض لفرد معين فقط باحتمال ما. ومع وجود عدد كبير من الأشخاص المتعرضين للإشعاع، ينبغي أن يتحقق العدد المتوقع من الأمراض في الواقع.

بالنسبة للسكان الذين يعيشون فترة أطول في ظروف التعرض المزمّن لفترات طويلة، يمكن حساب الجرعة المكافئة الجماعية المتوقعة لفترة معينة. وتعتمد دقة هذا التوقع (وبالتالي، توقع

الحالة الصحية للسكان) على أخذ خصائص التلوث الإشعاعي والنظافة وعوامل أخرى بعين الاعتبار. إن تحقيق مثل هذه التوقعات هو مسألة معقدة جداً.

2.29. مبادئ حساب جرعة التعرض الداخلي

تسبب النظائر المشعة التي تدخل إلى الجسم، خطراً عالياً للضرر الإشعاعي. ويتعين هذا بعدد من العوامل.

بالمقام الأول، النظائر المشعة لجسيمات α - و β - التي تقع خارج الجسم، لا تشكل خطراً كبيراً بالنسبة لوسطه الداخلي، بسبب مقدرة النفاذية المنخفضة لهذه الأشعة. ولكن عندما تصل النظائر المشعة إلى داخل الجسم، بشكل رئيسي في حالة التنفس واستعمال الماء والغذاء، فإنها بسبب مقدرة تأيينها العالية تحدث فيه ضرر إشعاعي كبير.

ثانياً، إن الكثير من النظائر المشعة يتراكم بشكل انتقائي في أعضاء منفردة، وتترسب طاقة الأشعة المؤينة، الناشئة عن التفكك الإشعاعي لهذه العناصر، في حجم صغير نسبياً من النسيج، وتسبب فيه أضرار موضعية كبيرة.

ثالثاً: النظائر المشعة التي لديها دور نصف تفكك ونصف إخراج كبيرين، عندما تسقط في الجسم، يكون تأثيرها مدمر عليه لفترة زمنية طويلة.

إن قيمة الجرعة المكافئة المقاسة هي التي تحدد درجة الآثار البيولوجية للإشعاع على مستوى الجسم. وهي لا تقاس مباشرة، وإنما تعين بالحساب. البيانات الأساسية لحساب الجرعة في التعرض الداخلي هي المعلومات عن النشاط النوعي للهواء، والماء والمنتجات الغذائية.