الفصل الرابع

التأثيرات الأحيائية للإشعاع

obeikandl.com

obeikandl.com

الفصل الرابع

التأثيرات الأحيائية للإشعاع

4 ـ 1 المقدمة:

ينشأ تفاعل الأشعة المؤينة مع جسم الإنسان عن مصدرين: أحدهما **خارجي** عن الجسم والثاني **داخلي** نتيجة تلوث بالمواد المشعة، وكلاهما يقود إلى تأثيرات حيوية (بيولوجية) قد تظهر فيما بعد بوصفها أعراضًا مرضية. وتعتمد طبيعة هذه الأعراض وشدتها والمدة التي تظهر فيها على مقدار الجرعة المتعرض لها، وعلى طول المدة الزمنية لهذا التعرض. وإضافة إلى التأثيرات الجسدية على الشخص المتعرض للإشعاع فإن التلف الحاصل في الخلايا الجنسية والأعضاء التناسلية (المناسل) قد يقود إلى تأثيرات وراثية تظهر في الأجيال اللاحقة.

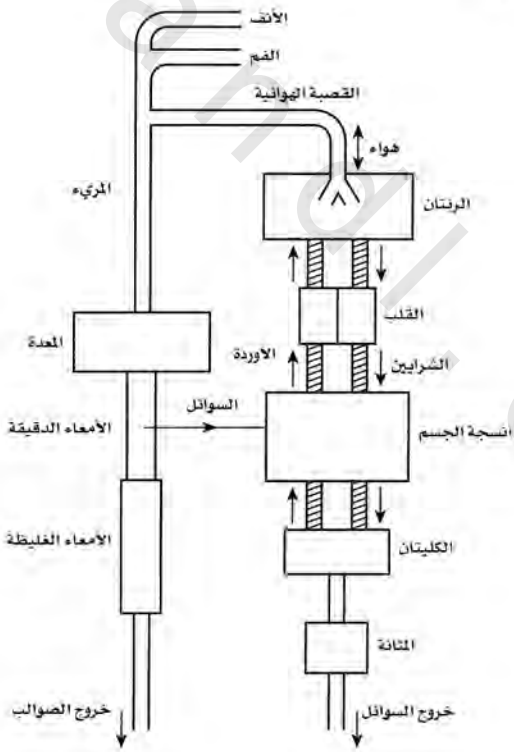
4 ـ 2 أساسيات علم وظائف أعضاء جسم الإنسان:

يُعنى علم وظائف الأعضاء (الفسيولوجيا) بأنشطة الجسم ككل، وبأنشطة أعضاء وأجهزة الجسم المختلفة كلاً على حدة. ومن الضروري معرفة بعض أساسيات الفسيولوجيا لتفهم الطرق التي يمكن أن يتم عن طريقها دخول المواد المشعة إلى الجسم وتوزيعها داخله.

لو فرضنا أن الإنسان ماكينات مكونة من كثير من الأجهزة المترابطة، حيث يقوم كل واحد منها ببعض الأنشطة المهمة، وأن الأجهزة الأكثر علاقة لإدراك ما يحدث للمواد المشعة عند دخولها الجسم هي كل من الجهاز الدموي والتنفسي والهضمي (انظر الشكل 4 – 1).

4-2-1 الجهاز الدموي:

الجهاز الدموي عبارة عن دائرة مغلقة من الأنابيب يضخ الدم داخلها بفعل **القلب**، وما الدم إلا آلة النقل في الجسم، حيث يدور في جميع أجزاء الجسم تقريبًا حاملاً معه الغذاء والأكسجين إلى الخلايا، ويعود منها بالفضلات وبثاني أكسيد الكربون الذي ينقلهما إلى أعضاء الطرح. والقلب - في الحقيقة - عبارة عن مضختين: جهته اليسرى تضخ الدم إلى الأنسجة عن طريق **الشرايين**، حيث ينتقل الغذاء من الأنسجة إلى الخلايا بواسطة السائل النسيجي، ثم يعود الدم بعد مروره بالأنسجة إلى الجهة اليمنى من القلب عن طريق **الأوردة**، ثم يضخ الدم بعد ذلك إلى **الرئتين** للتزود بالأكسجين قبل أن يعود إلى جهة القلب اليسرى.



شكل (4-1) رسم تخطيطي لوظائف أنسجة الإنسان

يحتوي الدم المار في الشرايين على كثير من الأكسجين ولونه أحمر فاتح، في حين يحتوي الدم العائد من الأنسجة على القليل جدًّا من الأكسجين ولونه أحمر قاني، والجسم يحوي تقريبًا خمسة لترات من الدم الذي يدور بمعدل دورة واحدة في الدقيقة، وفيه ثلاثة أنواع من الخلايا الدموية، يقوم كل نوع منها بوظيفة أساسية، وهي: **الخلايا الحمراء، والخلايا البيضاء، والصفيحات**. فوظيفة الخلايا الحمراء هي القيام بنقل الغذاء والأكسجين الذي يحتاج إليه الجسم، في حين تقوم الخلايا البيضاء بالدفاع ضد الأمراض، وذلك بالتهام الأحياء المجهرية، وتؤدي الصفيحات دورًا حيويًّا في التخثر عند مواقع الجروح.

4-2-2 الجهاز التنفسي:

التنفس هو وسيلة لإدخال الأكسجين إلى الرئتين والتخلص من ثاني أكسيد الكربون. يُمتَصُّ الأكسجين من قبل الدم خلال مروره بالرئتين، وينقله إلى الأنسجة كما ذكر سابقًا، أما الأنسجة فتنتج غاز ثاني أكسيد الكربون الذي يُحمل بدوره بواسطة الدم إلى الرئتين حيث يُطرد في عملية الزفير، بوصفه فضلات. هذا وإن حجم الهواء المستنشق في اليوم هو نحو 20م^3، يستنشق نصفه تقريبًا في ساعات العمل اليومية الثمانية.

يستنشق الإنسان في عملية التنفس كثيرًا من الملوثات الهوائية على شكل غازات أو غبار يحمله الهواء، وتمر الغازات بسهولة خلال الرئتين، وتدخل مجرى الدم بدرجات متفاوتة حسب قابلية ذوبانها. أما في حالة المواد الصلبة المستنشقة فيترسب جزء منها فقط في الرئتين، والباقي إما أن يطرد في الزفير أو أن يترسب في الممر العلوي من الجهاز التنفسي ثم يبلع بعد ذلك، وتصرف المواد المترسبة في الرئتين يعتمد على قابلية ذوبانها أيضًا، فالمواد شديدة الذوبان تمتص بسرعة إلى مجرى الدم ـ ربما ـ في غضون ساعات، في حين المواد غير القابلة للذوبان قد تبقى في الرئتين أشهرًا عدّة، ومن هذا يتبين بوضوح أن

الجهاز التنفسي يهيىء طريقًا لدخول المواد المشعة التي يمكن أن تبقى في الرئتين مدة طويلة أو تنقل بعد ذلك بواسطة مجرى الدم إلى أجزاء أخرى من الجسم.

4- 2- 3 الجهاز الهضمي:

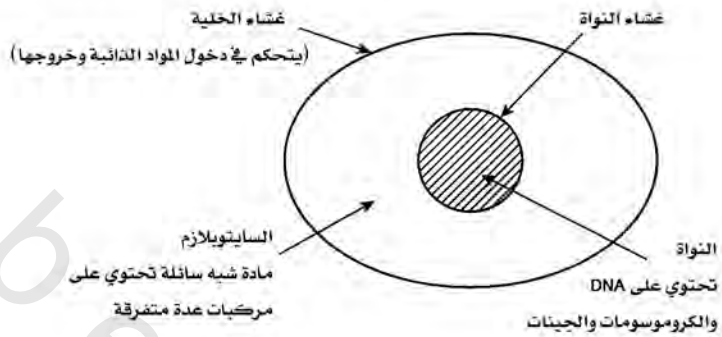
يتكون الجهاز الهضمي من المريء والمعدة والاثنا عشرى، إضافة إلى الأمعاء الدقيقة التي تتصل بالأمعاء الغليظة. والغذاء المتناول عن طريق الفم يتشكل بهيئة مناسبة؛ لتوليد الحرارة والطاقة ولتكوين الجزيئات الضرورية لنمو الأنسجة وإصلاحها.

تتحلل الجزيئات الكبيرة في الغذاء بواسطة الإنزيمات في الممر الهضمي قبل أن تمتص إلى مجرى الدم، وتمر من خلال **الكبد** إلى الأنسجة، ويخرج الغذاء غير الممتص مع البكتيريا والخلايا المنسلخة من جدران الأمعاء على شكل فضلات صلبة (البراز). أما الفضلات السائلة (نتائج فضلات الخلايا مذابة في الماء) فيتخلص منها الجسم عن طريق الكليتين والمثانة على شكل يوريا (البول).

عندما تبلع مواد مشعة قابلة للذوبان بسبب تلوث ما، فقد تمر خلال الممر الهضمي، وتمتص إلى مجرى الدم الذي يحملها إلى جميع أجزاء الجسم، لهذا من الممكن أن تتركز بصورة رئيسة في عضو أو نسيج معين حيث يتعرض للتشعيع حتى تضمحل المادة المشعة أو تخرج من الجسم، أما المواد المشعة غير القابلة للذوبان فتعبر خلال الممر الهضمي، وتخرج مع البراز، وخلال مرورها في الجسم تشعع الممر والأمعاء الغليظة.

4-3 أحيائية الخلية:

تتكون جميع الكائنات الحية من تراكيب صغيرة تعرف بالخلايا، والأجزاء الأساسية لكل خلية هي كل من **النواة** والسائل المحيط بها الذي يعرف **بالسيتوبلازم**، **والغشاء** الذي يكون جدار الخلية. والشكل (4-2) يظهر تركيب خلية بشرية مثالية.



شكل (4-2) رسم تخطيطي لتركيب الخلية البشرية

إن أبسط تصوير للخلية هو أن السيتوبلازم يمثل مصنع الخلية، في حين تحتوي النواة على كل المعلومات التي تحتاج إليها الخلية للقيام بأنشطتها وتكاثرها، فالسيتوبلازم يقوم بتمثيل الغذاء وتحويله إلى طاقة وإلى جزيئات صغيرة، وهذه بدورها تتحول بعد ذلك إلى جزيئات معقدة تحتاج إليها الخلية للصيانة أو للتكاثر.

تحتوي النواة على الصبغيات أو الكروموسومات (حاملات الصفات الوراثية) التي هي عبارة عن تراكيب خيطية صغيرة تحمل الجينات (المورثات). وتحوي الخلية البشرية 46 كروموسومًا، وتتركب المورثات من الحمض النووي الريبي غير المؤكسد (المعروف بـ DNA) de-oxyribonucleic وجزيئات بروتينية. وتقوم المورثات بحمل المعلومات التي تحدد صفات الخلية الوليدة.

وللخلايا القدرة على التكاثر؛ للتعويض عن تلك التي تموت، ونظرًا لتباين أعمار الأنواع المختلفة من الخلايا البشرية، فإن سرعة تكاثر الخلايا تتباين من بضع ساعات حتى سنوات عدة. ويحصل تكاثر الخلايا بطريقين يعرفان **بالانقسام الفتيلي، والانقسام المنصِّف**. ففي الخلايا الفتيلية، يشمل التكاثر جميع خلايا الجسم المعتادة وفيها تتضاعف الكروموسومات بالانقسام طوليًّا، ومن ثم تنقسم الخلية الأصلية إلى خليتين جديدتين

كلاهما تشبه الخلية الأم. أما في الانقسام المنصف، فهو نوع خاص من الانقسام يحدث عند تكون الخلايا التناسلية أي الحيمن في الذكر والبويضة في الأنثى، ويحدث هذا الانقسام مرة واحدة في دورة حياة الخلية وفي الخلايا التناسلية فقط. وفي التكاثر الجنسي يتحد الحيمن مع البويضة، وتتحد الكروموسومات لتكوين خلية جديدة تحوي المواد الموروثة من كل من الوالدين، ويتكون الجنين، ومن ثم الذرية من هذه الخلية الوحيدة: البويضة المخصبة.

4-4 تفاعل الإشعاع مع الخلايا:

الفرق الأساسي بين الإشعاعات النووية[1] وبقية الإشعاعات التي نواجهها عادة مثل الحرارة والضوء، هو أن الإشعاعات النووية لديها الطاقة الكافية لإحداث تأين، ففي الماء - الذي تتكون منه معظم الخلية - يمكن أن يقود التأين إلى تغيرات جزيئية تنبثق عنها فصائل كيميائية من أنواع متلفة لمادة الكروموسومات. ويأخذ هذا التلف شكل تغيرات في تركيب الخلية ونشاطها، ويمكن أن تظهر هذه التغيرات في الجسم البشري بوصفها آثارًا مَرَضيَّة مثل غثيان الإشعاع، أوإعتام عدسة العين، أو السرطان على المدى البعيد.

والعمليات التي تقود إلى التلف الإشعاعي هي عمليات معقدة وغالبًا ما تتخذ أربع مراحل:

1- المرحلة الفيزيائية الابتدائية:

وتستغرق جزءًا ضئيلاً جدًّا من الثانية (نحو 10^{-16} ثانية) حيث تترسب الطاقة في الخلية، وتحدث التأين، ويمكن كتابة هذه العملية بالنسبة إلى الماء، كما يلي:

$$H_2O \xrightarrow{\text{إشعاع}} H_2O^+ + e^-$$

حيث H_2O^+ هو الأيون الموجب (الهيدرونيوم) وe^- هو الأيون السالب (الإلكترون).

(1) سميت بالإشعاعات النووية نسبة إلى مصدرها: النواة، وهناك إشعاعات ذرية مصدرها إلكترونات النواة، ولها القدرة كذلك على إحداث التأين، مثل الأشعة السينية.

2- المرحلة الفيزياكيميائية:

تستغرق نحو 10^{-6} ثانية، حيث تتفاعل الأيونات مع جزيئات الماء الأخرى مؤدية إلى عدد من النواتج الجديدة. فمثلاً يتحلل الأيون الموجب إلى:

$$H_2O^+ \longrightarrow H^+ + OH$$

والأيون السالب وهو الإلكترون يرتبط بجزيئة ماء متعادلة، فتتحلل فيما بعد إلى:

$$H_2O + e^- \longrightarrow H_2O^-$$
$$H_2O^- \longrightarrow H + OH^-$$

وبهذا يكون ناتج التفاعل هو OH, H, OH^-, H^+. ويوجد الأيونان الأولان بشكل واسع في الماء المعتاد، وليس لهما دور في التفاعلات اللاحقة. أما الناتجان OH, H فيطلق عليهما **الجذور الحرة**: أي إن لديهما إلكترونًا غير مزدوج، ومن ثم فهما شديدا الفعالية.

وهناك ناتج آخر للتفاعل، وهو بيروكسيدات الهيدروجين الذي يعدّ من العوامل شديدة الأكسدة.

$$OH + OH \longrightarrow H_2O_2$$

3- المرحلة الكيميائية:

تستغرق بضع ثوانٍ يتم خلالها تفاعل النواتج مع الجزيئات العضوية المهمة في الخلية، وأن الجذور الحرة والعوامل المؤكسدة قد تهاجم الجزيئات المعقدة للكروموسومات، فترتبط نفسها بجزيء ما يؤدي إلى كسر الربط في سلسلة الجزيئات الطويلة.

4- المرحلة البيولوجية:

يتباين مقدار الوقت فيها من دقائق إلى عشرات السنين بحسب نوع الأعراض. والتغيرات الكيميائية المناقشة آنفًا يمكنها التأثير على الخلية المفردة بطرق عدة، فمثلاً قد تؤدي إلى:

(أ) الموت المبكر للخلية، أو منع انقسامها أو تأخيره.

(ب) التغير الدائم الذي ينتقل إلى الخلايا الوليدة.

وتأثيرات الإشعاع على الجسم الإنساني تحصل نتيجة التلف في الخلايا الفردية، ولكن هذين التأثيرين لهما نتائج مختلفة إلى حدٍّ ما. ففي الحالة الأولى يؤدي موت الخلايا أو منع انقسامها إلى استنزاف الخلايا في أعضاء الجسم. وإذا لم تصل الجرعة إلى حد معين (عتبة) فإن نسبة الخلايا التالفة لن تكون كافية للتأثير على وظيفة العضو. أما إذا زادت الجرعة عن العتبة فإن التأثيرات على العضو تبدأ في الظهور، وتزداد هذه التأثيرات مع ازدياد الجرعة. وهذا النوع من التأثيرات يدعى التأثيرات **الحتمية**، بمعنى أن العلاقة بين الجرعة وشدة التأثيرات يمكن تقويمها بدقة مقبولة مع الأخذ في الحسبان مدى الفروق بين الأفراد. أما في الحالة الثانية فإن التغير في خلية واحدة قد يؤدي ـ بعد مدة كمون ـ إلى حدوث السرطان في الشخص المتعرض، أما إذا كان التغير حادثاً في الخلايا التناسلية فإن التلف يمكن أن ينتقل إلى الأجيال القادمة مؤديًا إلى تأثيرات **وراثية**. واحتمال حدوث هذه التأثيرات في تلك الحالات يعتمد على الجرعة. ويطلق على هذا الصنف من التأثيرات "**بالاحتمالية**" ما يعني أن طبيعة هذه التأثيرات احتمالية. ولإيجاز التغيرات التي يحدثها الإشعاع على مستوى الخلايا يمكن القول: إنها قد تقود إلى صنفين مميزين من التأثيرات:

1- التأثيرات الحتمية:

هي التي تظهر إذا تعدت الجرعة عتبة معينة، وتزداد شدة هذه التأثيرات مع ازدياد الجرعة. وهذه التأثيرات مفصلة في الباب (4-5).

2- التأثيرات الاحتمالية (غير العتبية):

هي التي يزداد احتمال ظهورها مع ازدياد الجرعة. وتشمل هذه التأثيرات حدوث السرطان (انظر الباب 4 - 6) والتأثيرات الوراثية في الأجيال اللاحقة (انظر الباب 4-7).

4 ـ 5 التأثيرات الحتمية للإشعاع:

4 – 5 – 1 تأثيرات الإشعاع الشديدة:

إن التأثيرات الشديدة للإشعاع هي تلك التي تحدث بعد أسابيع عدة من التعرض الحاد، وهو التعرض لجرعة عالية من الإشعاع خلال مدة قصيرة نسبيًّا. وسبب هذه التأثيرات هو الاستنزاف الكبير للخلايا في عدد من أعضاء الجسم بسبب قتلها أو منع انقسامها وتأخره، وتعزى هذه التأثيرات بشكل رئيس إلى التلف في نخاع العظام والجهاز المعوي والعصبي والعضلي الذي يعتمد على الجرعة المتعرض لها، أما في حالة الجرع الحادة التي تزيد على 1 جراي تقريبًا فتؤدي إلى الغثيان والاستفراغ، وهذا ما يسمى **بغثيان الإشعاع**، ويحدث بعد ساعات عدة من التعرض، وذلك بسبب التلف الذي يصيب خلايا بطانة الأمعاء. أما إذا كانت الجرعة الممتصة تزيد على 2 جراي تقريبًا فقد تؤدي إلى الهلاك بعد نحو مدة تعرض تتراوح ما بين 10 إلى 15 يومًا.

ليس هناك عتبة محددة تمامًا للجرعات الحادة التي يتلاشى فيها خطر الموت (إذا ما قلّت الجرعة عن تلك العتبة)، غير أنه إذا كانت الجرعة أقل من 1.5 جراي تقريبًا فإن احتمال الموت المبكر ضئيل جدًّا وبالمثل، ليس هناك جرعة محددة تمامًا يكون الموت بعدها محتمًا، غير أن احتمال الحياة عند التعرض لجرعة حادة بحدود 8 جراي منخفض جدًّا. ويمكن عمل تقدير مقبول للجرعة القاتلة لـ50 ٪ من المتعرضين في خلال 30 يومًا من التعرض، وهذا ما يسمى $\left[D_{50}^{30}\right]$، ويظن أن مقدارها للإنسان 3 جراي تقريبًا[1].

وفي الجرعات التي تصل 10 جراي تقريبًا يكون سبب الهلاك عادة هو الالتهاب الثانوي بسبب استنفاد خلايا الدم البيضاء التي توفر الحماية ضد الأمراض. إن الجرعات في المدى ما بين 3 إلى 10 جراي، تسمى غالبًا بمجال **الموت بالالتهاب**، حيث يمكن في

(1) هناك تباين واسع في هذه القيمة في المصادر المختلفة، فبعض المصادر تقدر هذه الجرعة بـ 5 جراي.

هذا المدى زيادة احتمال الحياة بالمعالجة الطبية الخاصة التي تشمل عزل المصاب في وسط معقم (خالٍ من التلوث) ونقل نخاع عظم له للتحفيز على إنتاج خلايا الدم البيضاء.

أما بالنسبة للجرعات التي تزيد على 10 جراي، فإن زمن البقاء على قيد الحياة ينخفض بصورة حادة إلى ما بين 3 إلى 5 أيام، وتظل بحدود هذه المدة تقريبًا حتى الجرعات العالية جدًّا، وفي هذه الحالات يؤدي الإشعاع إلى الاستنفاد الشديد لخلايا بطانة الأمعاء يتبعها هجوم شديد للبكتيريا على الجسم، وهذا ما يسمى بمجال **الموت المعوي**.

يقل زمن الحياة بارتفاع الجرعات بصورة مطردة، وهناك القليل جدًّا من المعلومات عن الإنسان عند هذه الحالات، غير أنه من التجارب التي أجريت على الحيوانات أظهر التشخيص بعض التلف في الجهاز العصبي المركزي، ولهذا تسمى هذه المنطقة بمجال **الموت بسبب الجهاز العصبي المركزي**، مع ملاحظة أن الموت لا يحدث مباشرة حتى في الحيوانات التي تعرضت لجرعات تزيد على 500 جراي.

هناك أثر آخر يظهر عند التعرض الحاد للإشعاع ألا وهو مرض **الحمامى** (التهاب الجلد) وهو احمرار في الجلد؛ لأن الجلد يتعرض إلى جرعة إشعاعية أعلى مما تتعرض له بقية الأنسجة، وهذا صحيح بصورة خاصة في حالات إشعاع بيتا والأشعة السينية منخفضة الطاقة، فإن التعرض لنحو 3 جراي من الأشعة السينية منخفضة الطاقة يؤدي إلى الحمامى، والتعرض الأكبر يقود إلى أعراض أخرى مثل التخضب والتبشر والتقرح.

ومستويات التعرض لكل من العاملين في مجالات الإشعاع والمواطنين بسبب التشغيل المعتاد لصناعة الطاقة النووية، أو من التطبيقات الصناعية والطبية للإشعاع، هي أقل بكثير من معدلات الجرعات التي تؤدي إلى تأثيرات مبكرة، فهذه الجرعات العالية يمكن التعرض لها فقط في الحالات غير المحتملة من الحوادث النووية الرئيسة، غير أن الجرع المنخفضة التي يتعرض لها عند التشغيل المعتاد قد تؤدي إلى آثار ضارة على المدى البعيد، وهذه ستناقش فيما بعد.

لقد لوحظ في هذه المناقشة أن التأثيرات المبكرة كانت تقدر بالجرعات الممتصة مقيسة بالجراي بدلاً من قياسها بالجرعة المكافئة بالسيفرت، والأمر في الحقيقة مسألة تعريف: إن معامل الإشعاع النوعي (w_R) الذي نوقش في الفصل السابق، ومصطلح مكافئ الجرعة، أُريدَ استخدامها في التعرض الإشعاعي الذي هو بحدود الجرع الاعتيادية المصرح بها (انظر الفصل 6)، وينبغي عدم استخدامها في مستوى الجرعات التي قد تقود إلى التأثيرات المبكرة[1].

4 – 5 – 2 التأثيرات الحتمية المتأخرة:

للإشعاع تأثير آخر متأخر قد لا يحصل إلا بعد سنوات عدة وهو تلف عدسة العين. وهذا يأخذ شكل الغمامة في العدسة، أو انعدام الرؤية في الحالات الشديدة نتيجة سد العدسة. وهنا كذلك عتبة لهذا التأثير، فإذا ما وضعت الحدود الإشعاعية لعدسة العين فإنه يمكن منع حدوث هذا التأثير (انظر فصل 6).

هناك بعض الأدلة من التجارب على الحيوان أن التعرض للإشعاع يؤدي إلى نقص قليل في الأعمار المتوقعة للأفراد الذين لا تظهر فيهم أعراض محددة للإشعاع. أما المشاهدات على الناس المتعرضين لجرع مرتفعة نسبيًّا من الإشعاع فإنها تشير إلى أن النقص في الأعمار المتوقعة إما أن يكون معدومًا أو ضئيلاً جدًّا لا يتجاوز سنة واحدة للسيفرت.

4-6 التأثيرات الاحتمالية - إحداث السرطان:

لقد أصبح جليًّا منذ أوائل القرن العشرين أن مجاميع من الناس مثل مصوري الأشعة ومرضاهم الذين تعرضوا لمستويات عالية نسبيًّا من الإشعاع قد ظهرت فيهم أنواع من السرطان بنسب أعلى مما هو الحال عند المجاميع التي لم تتعرض للإشعاع. وفي دراسة

(1) يعود السبب في ذلك إلى أن w_R و w_T قيم تقريبية لا يمكن تحديدها بدقة.

تفصيلية حديثة جدًّا لسكان تعرضوا للإشعاع الناتج عن القنابل الذرية، ولمرضى عُرِّضوا للعلاج الإشعاعي، وكذلك لمجاميع تعرضوا للإشعاع في أثناء عملهم وبخاصة عمال مناجم اليورانيوم، ظهرت قدرة الإشعاع على توليد السرطان.

والسرطان هو: تكاثر مفرط للخلايا في أحد أعضاء الجسم، ويُظن أنه يحدث بسبب تلف جهاز التحكم في خلية فردية، فيؤدي بها إلى الانقسام بسرعة أكثر من انقسام الخلية الصحيحة ثم ينتقل هذا الخلل إلى الخلايا الوليدة، وبهذا يزداد تعداد الخلايا الشاذة إلى حد يؤذي الخلايا الصحيحة في نسيج العضو، وتقدير زيادة خطر حدوث السرطان بسبب الإشعاع عملية معقدة نتيجة لطول مدة الكمون، وهي المدة المحصورة ما بين نحو 5 إلى 30 سنة أو أكثر، ولأنه لا يمكن عادة تمييز السرطان المسبب بالإشعاع عن السرطان الذي يحدث فجأة، إن حدوث السرطان في عموم الناس عادةً مرتفع، حيث يقدر أن فردًا من كل ثلاثة يتوقع أن يموت في آخر المطاف بأحد أنواع السرطان، وهذا الارتفاع الأساسي يجعل من العسير إثبات أن حدوث حالات إضافية لأحد أنواع السرطان هو نتيجة لتعرض إضافي للإشعاع، حتى في السكان الذين تعرضوا لمستويات مرتفعة نسبيًّا.

وفي المستويات العالية من التعرض للمجاميع المذكورة آنفًا فإن الهيئة الدولية للحماية الإشعاعية (ICRP) (انظر فصل 6) قدرت أن تعرض الناس من جميع الأعمار إلى جرعة مقدارها 1 سيفرت لكل فرد سوف تؤدي إلى حدوث السرطان القاتل في 10٪ من الأفراد المتعرضين للإشعاع، وهذا يماثل القول: إن معدل الخطر على الفرد من جرعة مقدارها سيفرت واحد هو واحد بالعشرة أو 0.1، واستقراء خطر التعرض لمستويات منخفضة جدًّا من الإشعاع -كتلك التي تكون في الصناعات النووية وفي غيرها- من تقديرات خطر التعرض للجرعات العالية المذكورة آنفًا تزيد من مقدار الشك، والتقدير المتحفظ جدًّا يكون بعمل استقراء خطي من الجرعات المرتفعة إلى الجرعات المنخفضة،

وحيث إن جرعة 1 سيفرت تحمل خطر حدوث سرطان قاتل مقداره 0.1 فإن خطر 1 ملي سيفرت يكون أقل بـ 1000 مرة أو 0.0001 ولكن استنادًا إلى حسابات رياضية، وتجارب على الحيوانات، وكائنات حية أخرى، ومعلومات محدودة عن الإنسان، فقد استنتجت الهيئة الدولية للحماية الإشعاعية (ICRP) أن الاستقراء الخطي يحتمل أن يزيد في تقدير أخطار التعرض الإشعاعي عند الجرعات ومعدلات الجرعات المنخفضة بمقدار الضعفين إلى عشرة أضعاف، وهذا يدعى **بمعامل تأثير الجرعة ومعدل الجرعة (DDREF)**. وقد أوصت الهيئة الدولية باستخدام معامل الضعفين ليكون الخطأ في صالح السلامة، وهذا يعني أن الخطر الإضافي الناتج عن الإصابة بالسرطان القاتل لعموم الأفراد نتيجة التعرض للجرعات ومعدلات الجرعات المنخفضة يمكن تقديره باستخدام **معامل خطر الجرعة** 0.05/للسيفرت (ويكتب هذا عادة 5×10^{-2} سيفرت$^{-1}$) ويمكن تقدير أي جرعة ما باستخدام هذا المعامل في المعادلة الآتية:

الخطر =الجرعة (سيفرت) × معامل الخطر (سيفرت)$^{-1}$

وبهذا يكون خطر السرطان القاتل لـ 10 ملي سيفرت هو:

الخطر =0.01 سيفرت × 0.05 (سيفرت)$^{-1}$ = 5×10^{-4}

إن التعرض للإشعاع يولد، إضافة إلى السرطان القاتل أمراض سرطان غير قاتلة يمكن علاجها، وهذه الأمراض ينبغي أخذها في الحسبان، ولكن بالتأكيد ليس من المناسب إعطاؤها معامل أمراض السرطان القاتلة نفسها، ولأخذ هذا في الحسبان فقد طورت الهيئة الدولية للحماية الإشعاعية مبدأ **الضرر** الذي يأخذ في الحسبان التأثيرات متباينة الأهمية، حتى يمكن جمعها للحصول على مقياس شامل لتأثيرات التعرض الإشعاعي، وقد نوقش هذا الموضوع فيما بعد (4 - 8).

4 ـ 7 التأثيرات الاحتمالية الوراثية:

تنتج التأثيرات الوراثية للإشعاع عن تلف في الخلايا التناسلية، إذ يأخذ هذا التلف شكل تغيير يدعى **الطفرات الوراثية** في المادة الوراثية للخلية[1].

وذكر سابقًا أن التكاثر يحدث عند إخصاب البويضة بواسطة الحيمن، ونتيجة لذلك فإن الذرية تحصل على مجموعتين كاملتين من المورثات (الجينات) من كل من الوالدين، وبصورة عامة فإن أحد الجينات يكون متغلبًا والآخر يكون متنحيًا، ويظهر الجين المتغلب الصفة المعينة التي يحملها، أما الجينات المتنحية فيمكن ملاحظتها فقط عندما يجتمع ـ قدرًا ـ اثنان من الجينات المتنحية معًا. وهناك كثير من الأمراض المرتبطة بالجينات، ولهذا فهي لا تظهر إلا عندما يكون كل من الوالدين يحمل الجينات المتنحية نفسها. إن الطفرات الفجائية في الحقيقة لمسؤولة عن النسبة الملموسة من سكان العالم الذين يعانون واحدًا أو أكثر من الخمس مئة عيب أو مرض التي منشؤها التأثيرات الوراثية.

يمكن للإشعاع أن يولد الطفرات الوراثية التي لا يمكن تمييزها عن الطفرات التي تحدث طبيعيًا، ويجب أن يلاحظ أن الحرارة والمواد الكيميائية يمكنها كذلك أن تسبب الطفرات، وجين الطفرة إما أن يكون متغلبًا، وفي هذه الحالة يظهر تأثيره في الجيل الأول من الذرية، أو يكون متنحيًا حيث لا يظهر التأثير في الجيل الأول. إن الجين المتنحي لا يظهر أي تأثير له إلا عند وراثته من كلا الوالدين، ويفترض عمومًا أن كل الطفرات غير مؤذية، وهذا غير صحيح تمامًا، فالإنسان قد وصل إلى هذه المرحلة المتقدمة خلال سلسلة من الطفرات[1]، إلا أن هذا قد حدث خلال حقبة طويلة جدًا من الزمن بحيث كان عدد الطفرات التي يجب التخلص منها في الأجناس خلال تلك الحقبة كبيرًا جدًا.

---

(1) يمكن أن يؤدي الإشعاع كذلك إلى العقم في الذكور والإناث، نتيجة قتل الخلايا التناسلية في المنسلين، وهذه تعدّ من التأثيرات الوراثية للإشعاع.

(2) يبني المؤلفان هذا الكلام على نتيجة الاعتقاد بنظرية (دوفري) في التطور، وهي نظرية ليس لها مستند علمي كبير.

إن الأشعة المؤينة يمكن أن تزيد في معدل حدوث الطفرات؛ لذا فإن استخدامها سيزيد من عدد الشاذين جينيًّا في الأجيال القادمة، ومن الواضح أن التلف الجيني المفرط ستكون له – دون شك – آثار خطيرة جدًّا، ولهذا يجب أخذ الحيطة التامة في تعرض عموم المواطنين للإشعاع.

إن أخطار التأثيرات الوراثية بسبب تعرض العدد التناسلية للإشعاع غير معلوم تمامًا، فقد قدرت الهيئة الدولية للحماية الإشعاعية خطر الإصابة بمرض وراثي خطير في جميع الأجيال بعد تعرض أحد الوالدين لجرعات ومعدلات جرعات منخفضة بنحو 3×10^{-2} للسيفرت تقريبًا، وقد أخذ هذا المعدل لجميع السكان. ومن البدهي أن التعرض المؤثر على الصفات الوراثية للذرية هو ذلك التعرض الذي يحدث حتى نهاية المدة المخصبة. وحيث إن معدل عمر الإنجاب نحو 30 سنة، فإن جزءًا محدودًا من الجرعة الإشعاعية التي تتعرض لها عينة سكانية ستكون مضرة جينيًّا؛ لذا فإن معدل الخطر الجيني الكلي في كل الأجيال من الجنسين ولكل الأعمار هو 1.3×10^{-2} للسيفرت تقريبًا، وفي السكان حيث التباين في توزيع أعمار العاملين فإن الخطر هو 0.8×10^{-2} للسيفرت تقريبًا.

4-8 الضرر:

لقد طورت الهيئة الدولية للحماية الإشعاعية مبدأ **الضرر** لغرض التقويم الكمي ولجمع تأثيرات تعرض أعضاء وأنسجة الجسم المختلفة للإشعاع، وهذا يأخذ في الحسبان الأخطار النسبية ومعدل مدة التأخر في ظهور أمراض السرطان القاتل في الأعضاء المختلفة، واعتلال الصحة المتولدة من أمراض السرطان غير القاتلة، وأخذت كذلك في الحسبان أخطار التأثيرات الوراثية الخطيرة في جميع الأجيال القادمة من الشخص المتعرض، والجدول (4-1) يوضح في العمود الأول مشاركات أعضاء الجسم الرئيسة في الضرر، والعمود الثاني يوضح احتمالية الإصابة بالسرطان القاتل لكل عضو نتيجة جرعة مكافئة مقدارها 1 سيفرت، أما العمود الثالث فيبين احتمالية ظهور التأثيرات الوراثية

الشديدة في الأجيال القادمة نتيجة جرعة مكافئة مقدارها 1 سيفرت للأعضاء التناسلية، أما العمود الرابع والأخير فيظهر المشاركة النسبية لكل عضو في الضرر آخذين في الحسبان العوامل المناقشة آنفًا.

وهذه التقديرات للمشاركات النسبية للضرر الكلي من التعرض الإشعاعي يوفر الأساس في تعريف **معاملات الأنسجة النوعية** (w_T) التي تستخدم في حساب **الجرعة المؤثرة** حسب المناقشة الواردة في (فصل 3) والموضحة ثانية في (فصل 6).

جدول (4-1) المشاركة النسبية للأنسجة في الضرر الكلي.

العضو أو النسيج	احتمالية السرطان القاتل 10^{-4} سيفرت$^{-1}$	احتمالية التأثيرات الوراثية الشديدة 10^{-4} سيفرت$^{-1}$	المشاركة النسبية في الضرر
المثانة	30		0.040
مخ العظم	50		0.143
سطح العظم	5		0.009
الثدي	20		0.050
القولون	85		0.141
الكبد	15		0.022
الرئة	85		0.111
المريء	30		0.034
الخصية	10		0.020
الجلد	2		0.006
المعدة	110		0.139
الغدة الدرقية	8		0.021
البقية	50		0.081
الأعضاء التناسلية		100	0.183
المجموع	**500**	**100**	**1.00**

خلاصة الفصل:

علم وظائف الأعضاء (الفسيولوجي): هو علم دراسة وظائف كل من الأعضاء والأجهزة.

القلب: يضخ الدم إلى جميع أجزاء الجسم عن طريق الشرايين والأوردة.

خلايا الدم الحمراء: تنقل الغذاء والأكسجين.

خلايا الدم البيضاء: تدافع عن الجسم ضد الإصابة بالأمراض.

الصفيحات: ضرورية لتكوين التخثر.

التنفس: الطريقة التي يحدث فيها إدخال الأكسجين إلى الرئتين، ويتم التخلص من ثاني أكسيد الكربون.

الجهاز الهضمي: يحوِّل الغذاء إلى شكل يناسب توليد الحرارة والطاقة وإلى جزيئات ضرورية لنمو الأنسجة وإصلاحها.

مراحل في عملية التلف الإشعاعي:

1- المرحلة الفيزيائية الأولية (10^{-16} ثانية) وتشمل تأين وإثارة الذرات والجزيئات.
2- المرحلة الفيزو-كيميائية (10^{-8} - 10^{-5} ثانية) وتشمل انفصال الأيونات وتكوين الجذور الحرة.
3- المرحلة الكيميائية (ثوانٍ عدة) وتشمل تفاعل الجذور الحرة مع الجزيئات الأخرى في الجسم.
4- المرحلة الحياتية (البيولوجية) (دقائق لسنوات) وهي التي تظهر فيها التفاعلات الكيميائية تأثيرات على الخلايا.

مكونات الخلية: النواة، والسايتوبلازما، والغلاف الخارجي.

النواة: تحوي حاملات الصفات الوراثية (الكروموسومات) وهي تراكيب خيطية مكونة من الجينات.

الجينات: تحمل المعلومات التي تحدد صفات الخلايا الوليدة.

الانقسام الفتيلي: عملية تكاثر الخلايا المفردة.

الانقسام المنصف: مرحلة في تكوين الخلايا التناسلية، وهي الحيمن في الذكر والبويضة في الأنثى.

تأثيرات الإشعاع على الخلايا: منع الانقسام الفتيلي، تغيرات في حاملات الصفات الوراثية.

التأثيرات الحادة: وهي التأثيرات التي تحدث خلال أسابيع عدة نتيجة التعرض الحاد للإشعاع بسبب استنزاف الخلايا.

التأثيرات المتأخرة: هي التأثيرات التي تحدث في أوقات متأخرة وعادة بعد سنوات من التعرض وأهمها مرض السرطان والتأثيرات الوراثية.

التأثيرات الوراثية: قد تظهر في ذرية الأفراد المتعرضين للإشعاع.

التأثيرات الاحتمالية: يعتمد حدوثها على مقدار الجرعة: السرطان والتأثيرات الوراثية.

التأثيرات الحتمية: تعتمد شدتها على الجرعة وأهمها التأثيرات المبكرة للإشعاع، إضافة إلى التأثيرات المتأخرة، مثل إعتام عدسة العين.

أسئلة المراجعة:

(1) صف كيف يمكن للمواد المشعة أن تترسب في أنسجة الجسم المختلفة؟

(أ) عند التنفس. (ب) عند الهضم.

(2) حدد المراحل الأربع في عملية التلف الإشعاعي؟

(3) ميز بين التأثيرات الحتمية والتأثيرات الوراثية؟

(4) ما التأثيرات الحادة للإشعاع؟ ناقش شدة التأثيرات للجرعات ما بين 1 إلى 10 جراي.

(5) ما التأثيرات المتأخرة الرئيسة للإشعاع، وعلى أي فرضية يعتمد تقدير خطرها؟