الفصل الثالث

التأثيرات البيولوجية للإشعاع

Biological Effects of Radiation

obeikandl.com

3 – 1 المقدمة :

عرفت التأثيرات البيولوجية للأشعة المؤينة بعد اكتشاف الاشعة السينية من قبل العالم رونتجن والاشعاع النووي من قبل العالمة كيوري . حصلت عدة حوادث خطيرة نتيجة لاستخدام الاشعة السينية بسبب عدم الفهم الصحيح لمخاطرها على صحة الانسان وحياته . ومنذ بدأ استخدام الاشعاع المؤين حتي عام 1922 توفي حوالي مائة شخص من العاملين في هذا الحقل نتيجة لضرر الاشعاع البيولوجي. ولعل أشهر حادث في هذا الصدد هو ما جري لعمالات صناعة الساعات في سويسرا واللاتى يقمن بطلي عقارب الساعات بمادة الراديوم المشع لكي تضيئ في الضلام. فلقد دأب هؤلاء العمال علي جعل اطراف فرشاة الطلاء دقيقة بترطيبها بأفواههم. أخذ هذا العنصر بالتراكم في اجسادهن مع مرور الزمن مما أدي الي زيادة احتمال الاصابة بمرض السرطان. يمثل الاشعاع وبصورة دائمة خطرا على الأنظمة البيولوجية وذلك بسبب تأين أوتهييج ذرات او جزيئات المادة المارة بها. تؤدي عملية التأين تخريب مباشر للنظم البيولوجية جراء تكسر الروابط الكيميائية التي تربط ذرات الجزيئات ببعضها داخل نسيج الخلية الحية أو تأثيرات غير مباشرة نتيجة لتفاعل الاشعاع مع الماء مسببا في تكوين الجذور الحرة القادرة علي القيام بتفاعلات كيميائية عديدة مما يؤدي الي تخريب الخلايا عن طريق تفاعلات الاكسدة والاختزال بشكل خاص.

يمكن أن يقود التأين إلى تغيرات جزيئيه للكروموسومات ويأخذ هذا التلف شكل تغيرات في تركيب ونشاط الخلية. وينشأ تفاعل الإشعاع مع جسم الإنسان عن مصدرين هما : الاول مصدر خارجي عن الجسم الناتج عن تعرض الإنسان خلال حياته إلى الأشعة المؤينة من مصادر طبيعية ومصادر صناعية ، والثاني هو التعرض الداخلي والذي يحدث عندما تصل المادة المشعة إلى داخل جسم الإنسان عن طريق البلع أو الإستنشاق أو من خلال الجلد وكلاهما يقود إلى تأثيرات بيولوجية قد تظهر فيما بعد كأعراض مرضية وتعتمد طبيعة وشدة هذه الأعراض والمدة التي تظهر فيها على مقدار جرعة التعرض وعلى الفترة الزمنية لهذا التعرض. عند مرور الجسيمات المشحونة (الفا وبيتا) خلال ذرات الخلايا فانها تؤينها مباشرةً ،اما إشعاعات جاما

أو الأشعة السينية فان طاقتها تنتقل إلى ما يجاور ذرات الخلية ، وتقوم بتحويلها الى ايونات سالبة (الإلكترونات) وايونات موجبة هذه الإلكترونات هي التي تقوم بتأيين ذرات الخلية . أما طاقة النيوترونات فتنتقل إلى بروتونات ذرات الهيدروجين عن طريق التصادم المرن ثمّ تقوم هذه البروتونات بتأيين ذرات الخلايا . كذلك يمكن أن تمتص النيوترونات (خاصة الحرارية) فيؤدي ذلك إلى تكوين نظائر مشعة داخل الجسم وتؤدي الإشعاعات المنطلقة من هذه النظائر إلى تأيين ذرات الخلايا. وسواءً كانت مصادر الإشعاع من خارج الجسم أو عن تلوث الجسم من الداخل فإنّ ذلك يؤدي إلى تأثرات بيولوجية في الجسم يمكن أن تظهر فيما بعد في شكل أعراض سريرية . وتعتمد خطورة هذه الأعراض والفترة الزمنية اللازمة لظهورها على كمية الإشعاعات الممتصة وعلى معدل إمتصاصها .

لقد تعرض الباحثين في الإشعاع والأطباء المستخدمين للأشعة السينية في التشخيص إلى بعض الحروق أو الأمراض. وبعد 100 سنة من اكتشاف الإشعاع فإن بحوثا كثيرة في مجال التأثيرات البيولوجية للإشعاع والتأثيرات الناتجة عن التعرض إلى جرع عالية معروفة جيداً وموثقة في الوقت الحالي.اما ثأثيرات الجرع الواطئة من الإشعاع فإنها غير معروفة بشكل جيد . بالرغم من أن معلومات البحوث المتوفرة عن الجرع العالية واستقراء تاثيرات الجرع الواطئة مكنت العلماء من تقدير تأثيرات الجرع الواطئة. ففي السنوات الأخيرة وضحت البحوث معرفة التفاصيل لتقدير التأثيرات الناتجة عن الجرع الواطئة.

3 – 2 الخلية الحية :

الخلية هي الوحدة التركيبية والوظيفية في الكائنات الحية ، فكل الكائنات الحية تتركب من خلية واحدة أو أكثر، وتنتج الخلايا من انقسام مستمر لخلايا الجسم . وتقسم الخلايا عادة إلى خلايا نباتية واخرى حيوانية ، اما النسيج فهو مجموعة الخلايا المتشابهة في التركيب والتي تؤدي معاً وظيفة معينة في الكائن الحي عديد الخلايا. وتحتوي الخلية على أجسام أصغر منها مثل جسيمات كولجي والنواة التي تحمل في داخلها الشيفرة الوراثية. كما يحيط بالخلية غشاء يسمى الغشاء الخلوي

ولدى الخلايا النباتية جدار من السيليلوز يسمى الجدار الخلوي. ويوضح الجدول (3 – 1) الفرق بين الخلية الحيوانية والخلية النباتية

الجدول (3 – 1) الفرق بين الخلية الحيوانية والخلية النباتية

الخلية النباتية	الخلية الحيوانية
1- تحتوي على جدار خلوي غير مرن	1- لا تحتوي على جدار خلوي .
2- تحتوي على بلاستيدات .	2- لا تحتوي على بلاستيدات .
3- لا تحتوي على جسم مركزي .	3- تحتوي على جسم مركزي .
4- النواة جانبية .	4- النواة مركزية (في الوسط) .
5- الفجوة العصارية كبيرة .	5- الفجوة العصارية صغيرة إن وجدت

تتكون جميع أعضاء الكائنات الحية الحيوانية والنباتية وا نسجتها الحية من وحدات دقيقة وصغيرة تعرف بالخلايا. (الشكل 3- 1) وأهم مكونات الخلية:

١ - الغشاء الخلوي:

الغشاء الرقيق الذي يحيط بمكونات الخلية ويتركب من طبقتين من الليبيدات المفسفرة Phospholipids تتخللها جزيئات بروتينية موزعة فيها توزيعا غير منتظما ،تتصل ببعض الجزيئات الليبيدية سلاسل كربوهيدراتية صغيرة لتكون الليبيدات السكرية Glycolipids، كما وتتصل ببعض الجزيئات البروتينية سلاسل كربوهيدراتية لتكون البروتينات السكرية Glycoprotein . يحيط بالنوى غشاء مزدوج يسمى الغشاء النووي. ويتكون من غشائين احدهما داخلي و الأخر خارجي ، يكونان بينهما الثقوب النووية. تتيح هذه الأخيرة التبادل النووي الهيولي في الاتجاهين، مثل انتقال الحامض المرسل mRNA)- Messenger RNA) إلى الهيولى. وبذلك يقوم الغشاء النووي بتنظيم وتسهيل النقل بين النوى والهيولى في ذات الوقت الذي يقوم فيه بعزل التفاعلات الكيميائية التي تجري في الهيولى عن تلك التي تجري بداخل النوى. ويشكل الغشاء الخارجي امتدادا مع الشبكة الهيولية المبطنة

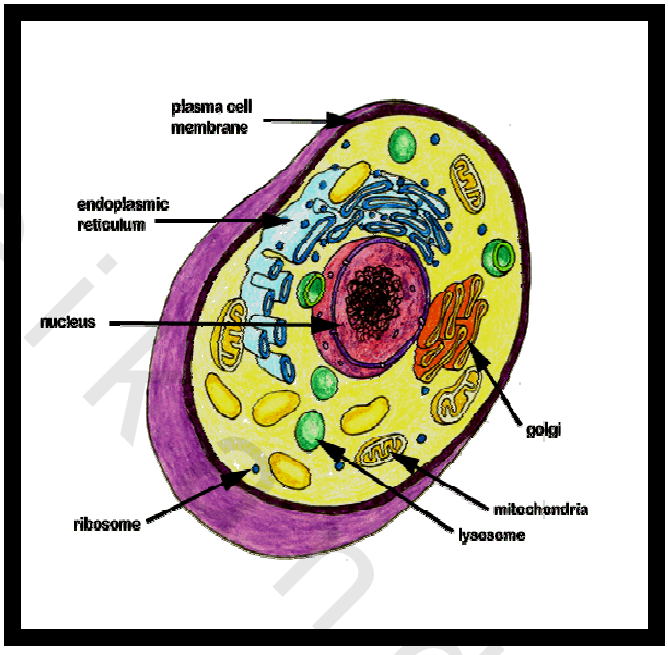
الخشنة. والمجال ما بين الغشاءين (المجال المحيط بالنوى) يمتد مع المجال الداخلي للشبكة الهيولية المبطنة. أما الغشاء الداخلي فيغطيه طبقة الامينا lamina على الواجهة النووية البلازمية. وتشكل طبقة الامينا شبكة من البروتينات التي تقوم بدور الدعامة وتساهم في تنظيم حركات الصبغين chromatins أثناء مختلف مراحل الدورة الخلوية cycle cellular. يكوّن الغشاء الخلوي(جدار الخلية) من غشاء رقيق الجدران يحيط بالخلية من الخارج ويحمي مكوناتها ويقوم بتنظيم مرور المواد المختلفة بين الخلية والوسط المحيط بها فيسمح بمرور بعض المواد ويمنع الأخرى من الدخول حسب الخاصية الازموزية.يتكون الغشاء من مركبات تسمى اللبيدات (Lipeds)).

2 – السايتوبلازم:cytoplasm

السيتوبلازم تعني المادة الحية الخاصة بالخلية. وهو سائل هلامي يوجد داخل الخلية، ويحيط به جدارها. ويشكل الماء 60- 90٪ من وزنه. والسيتوبلازم مادة جلاتينية تحيط بالنواة ويقوم بجميع الافعال الحيوية عدا التكاثر ويحتوي على عضيات حية واخرى غير حية مثل الحبيبات الافرازية والصبغية ، تسبح فيه مئات من الجسيمات المختلفة الأشكال والوظائف والتركيب. ويتكون هذا السائل من الأحماض الأمينية ويحتوي السايتوبلازم على الشبكة الاندوبلازمية والتي تتكون دائما من مجموعة من التجاويف المحاطة بأغشية رقيقة و التي يتصل بعضها ببعض لتكون شبكة متصلة داخل الخلية ، والرايبوسومات وهي مواقع تصنيع البروتين في الخلية . لذا فهي تتوافر بكثرة في الخلايا النشطة مثل الكبد و البنكرياس. وجهاز كولجي وهو عبارة عن تراكيب غشائية تشمل حزمة من أكياس منبسطة مرتبة ترتيباً متوازياً ومن حويصلات كروية ذات أغشية رقيقة تقع بالقرب من حافة الأكياس وهي تعمل على تعديل تركيب البروتينات المصنعة في الرايبوسومات وتصنيفها وإعدادها بشكلها النهائي لتستخدم في داخل الخلية او لتفرز خارجها كما تعمل على تصنيع بعض جزيئات الكربوهيدرات عديدة السكر. والجسم المركزي (السنترومير) وهو تركيب خلوي صغير يقع قريبا من النواة ، في الغالبية العظمى من الخلايا الحيوانية ، فيما

عدا تلك الخلايا التي فقدت قدرتها على الانقسام و التكاثر ، مثل الخلايا العصبية البالغة .

(الشكل 3 - 1) الخلية ومكوناتها



ويتكون هذا الجسم من جزأين يطلق على كل منهما السنتريول centriol، ولا يوجد السنتروسوم في الخلايا النباتية ، يلعب السنترومير دورا مهما في عملية انقسام الخلية ، حيث تبتعد الحبيبتان المركزيتان عن بعضهما البعض و تتحركان إلى قطبين متقابلين من أقطاب الخلية ، و لكنهما تظلان متصلتان بواسطة خيوط دقيقة تعرف بخيط المغزل Spindle Fibres تنتظم عليها الكروموسوما وجزيئات اخرى.

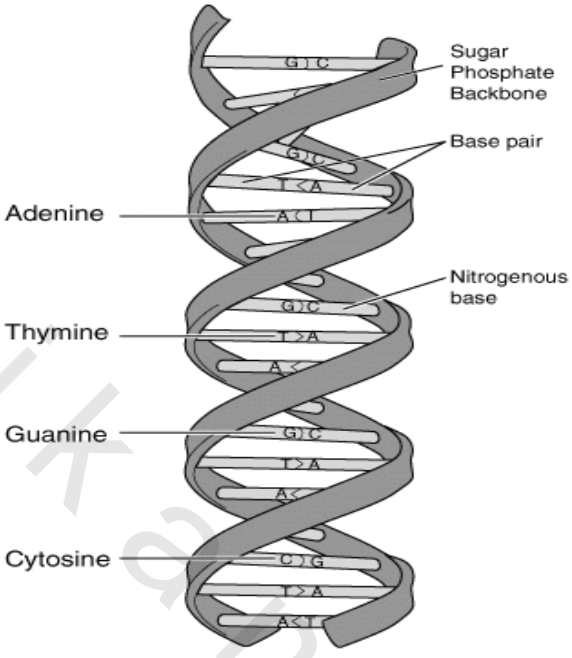
والخلاصة ان وظيفة السايتوبلازم الاساسية هي تحويل الغذاء الذي يصله إلى طاقة تمكن السايتوبلازم من القيام بافعاله الحيوية وإنتاج وجزيئات صغيرة وتتحول هذه الجزيئات الصغيرة فيما بعد إلى جزيئات أكثر تعقيدا وهي التي تحتاجها الخلية لعمليات التجديد والانقسام.

obeikandl.com

3- النواة:Nucleus

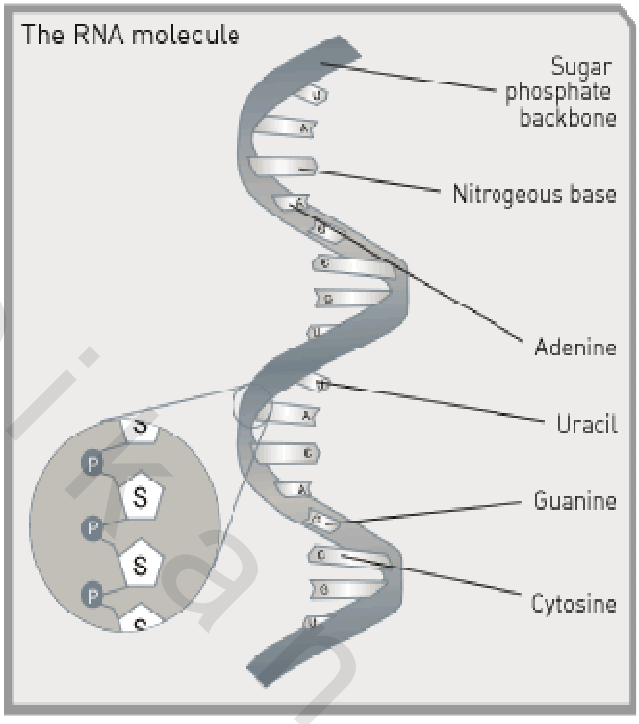
النواة جسم صغير يوجد في الغالبية العظمى من الخلايا الحيوانية النباتية وهي بشكل نواة كروية الشكل أو بيضاوية ، تقع في منتصف الخلية تقريباً، ويحيط بها السيتوبلازم من كل جانب وتعمل على تنظيم الأنشطة الحيوية في الخلية وتلعب دوراً مهماً في عملية الانقسام الخلوي وتكاثرها، وانتقال الصفات الوراثية من جيل إلى آخر كما أنها مستودع المادة الوراثية التي تحدد صفات الكائن الحي. كما أنها تعد مركز الهيمنة والسيطرة الذي يعطى الأوامر لكل وظائف الخلية ، وأثناء مرحلة التطور الجسمي من الجنين إلى الشخص البالغ، تعمل نواة الخلية على تحديد نوع البروتين المطلوب تكوينه لكل خلية، ونوع البروتين هذا هو الذي يحدد تركيب كل خلية، والوظيفة التي ستقوم بها. وتتم عمليات الضبط والسيطرة عن طريق تفاعل كيميائي يحدد نوع التفاعل الذي ستقوم به الخلية، وهذه التعليمات (مشفرة) coded ولها الشفرة الخاصة بها التي تتحدد وراثياً. تتكون النواة من غشاء مزدوج يحتوي عدد من الثقوب يؤمن مرور المواد عبرة يسمى الغشاء النووي. تحتوي النواة على الكروموسومات والتي هي عبارة عن تراكيب خيطية صغيرة مكونة من الجينات والتي تحتوي على المعلومات الوراثية التي تحتاجها الخلية للقيام بنشاطاتها وتكاثرها .وعدد الكروموسومات ثابت في النوع الواحد من الكائنات الحية فتحتوي خلايا الانسان الجسدية على 46 كروموسوم في حين تحتوي خلايا الارنب الجسدية على 44 كروموسوم (النصف من الام والنصف الاخر من الاب).تتكون الكروموسومات من الحامض النووي الرايبوزي منقوص الاوكسجين (Deoxyribo nucleic acid) (DNA) و هي عبارة عن تراكيب خيطية صغيرة تحدد صفات الخلية الوليدة، يتكون الحامض النووي من زوج من الضفائر تلتف حول نفسها عدة مرات، ويرتبط بالعديد من البروتينات، مكوناً الكروماتين. ويوجد هذا المركب على شكل سلم حلزوني يُسمى بالحلزون المزدوج Double Helix والذي يشكل ما يُعرف بالجينات أو المورثات Genes. وتقوم الجينات بحمل المعلومات الشكل (3- 2) .

الشكل (3- 2) مكونات الحوامض النووية DNA



تتكون كل ضفيرة من تعاقب مركبات السكر الخماسي الرايبوزي منقوص الاوكسجين والفوسفات بينما يتصل الجانبان من الداخل بالقواعد النيتروجينية الاربعة وهي تحتوي على مجموعتين من القواعد احدهما من الثايمين- ادنين (T-A) والأخرى الكوانين – سايتوزين (G-C) .وترتبط القواعد مع بعضها بواسطة اواصر هيدروجينية . كما في الشكل (3- 3). هناك نوعان اساسيان من السكر الذي تتركب منه الحوامض النووية.النوع الاول يسمى السكر الثنائي و الذي يدخل في تركيب DAN . و النوع الثاني يسمى بالسكر الريبوزي و الذي يدخل في تركيب الحامض (RNA). تنقسم القواعد النيتروجينية الى خمسة انواع، ثلاثة منها تدخل في تكوين كل من DAN وRNA وهي الادنين ،الجوانين ، و السايتوسين بينما الرابع (اليورسيل) والخامس (الثيامين) يدخل في تكوين RNA لوحده كما في الجدول (3 – 2)

الشكل (3- 3) مكونات الحامض RNA



تقسم القواعد النيتروجينية ايضا الى نوعين اساسيين الاول يسمى بالبيورين (Purines) ويتكون من الجوانين والسيتوسون. و النوع الثاني تسمى بالبيرمدين (pyrimidines) و هي اصغر حجما من النوع الاول و ويتكون من السيتوسون و الثيامين و اليوراسيل يتكون (DNA) من زوج من الضفائر تحتوي على مجموعتين من القواعد احدهما من الثايمين- ادنين (T-A) والأخرى الكوانين – سايتوزين (G-C) وترتبط القواعد مع بعضها بواسطة اواصر هيدروجينية . يتشابه RNA مع حامض (DNA) إلا أنه يختلف عنه في الوظائف. ففي حين نجد أن معظم جزيئات (DNA) تحتوي على معلومات وراثية، نجد بعضها الآخر لا يحتوي على هذه المعلومات، أي أنها جزيئات لا تحمل الشفرات الوراثية للخلية، وقد تكون وظيفتها في هذه الحالة الحفاظ على تركيب الكروموسومات.

الجدول (3 – 2)القواعد النيتروجينية في الاحماض الامينية

DNA	RNA
Adenine	Adenine الادنين
Cytosine	Cytosine السايتوسين
Guanine	Guanine الجوانين
Thymine الثيامين	Uracil اليورسيل

ويعتبر DNA مصدر المعلومات الهامة لتصنيع كل أنواع البروتين للخلية وللكائن الحي بشكل عام. وكذلك فانه يعطي نسخة طبق الأصل من المعلومات الوراثية الخاصة بالخلية الأم، للخلايا الجديدة الناتجة من انقسام الخلية، ومن ثم فإنها تقوم في البداية بنسخ المعلومة لحامض (RNA) ثم تعمل في المرحلة الثانية على تكرار المعلومة لجزيء (DNA)الناتج اي ان أن كمية (DNA) يجب أن تتضاعف لتعطي النسخة الثانية من المعلومات. وتسمى هذه العملية بعملية نسخ (DNA)، وتتطلب وجود عدد من الإنزيمات والبروتينات في الخلية يسمح بعملية النسخ أو التضاعف. وإذا كانت المعلومات الوراثية هامة بالنسبة لتصنيع بروتين الخلايا، فإن عملية التصنيع هذه تتطلب وجود أنواع معينة من (RNA) هي :-

1- الحامض المرسل Messenger RNA (mRNA):-

يتم بناؤه في النواة، و في بداية كل جزيء منه يوجد موقع لارتباطه بالريبوسوم، وهو ينتقل من النواة إلى الريبوسومات الموجودة على سطح الشبكة الإندوبلازمية ليدخل في عملية تصنيع البروتين،. ولذا يقوم هذا النوع من الحامض بدور الوسيط الذي يقوم بفك الشفرة المكتوبة على جزيء (DNA) ثم يقوم بنقل هذه المعلومات من النواة إلى الريبوسومات.

obeikandi.com

2- الحامض الناقل Transfer RNA- (tRNA):-

يدخل أيضاً في عملية بناء البروتين، ويتلخص دوره في نقل الأحماض الأمينية إلى الريبوسومات التي تستخدمها بعد ذلك في تصنيع البروتين. ويوجد من هذا الحمض أنواع عديدة إذ أن لكل حمض أميني (عشرون نوعاً) نوع خاص من (t RNA)، هو المسئول عن التعرف عليه، ونقله إلى الريبوسومات.

3- **الحامض الريبوسومي Ribosome RNA (rRNA).:-**

يدخل هذا الحامض في بناء الريبوسومات، التي تتكون أساساً في نوية النواة. ويتم بناء البروتينات الداخلة في تركيب الريبوسومات في السيتوبلازم، ثم تنتقل هذه البروتينات إلى النواة عبر الغشاء النووي، حيث يتم تكوين الحامض النووي الريبوسومي، الذي ينتقل بعد ذلك إلى سطح الشبكة الإندوبلازمية مكوناً الريبوسومات.

انقسام الخلية Cell Division

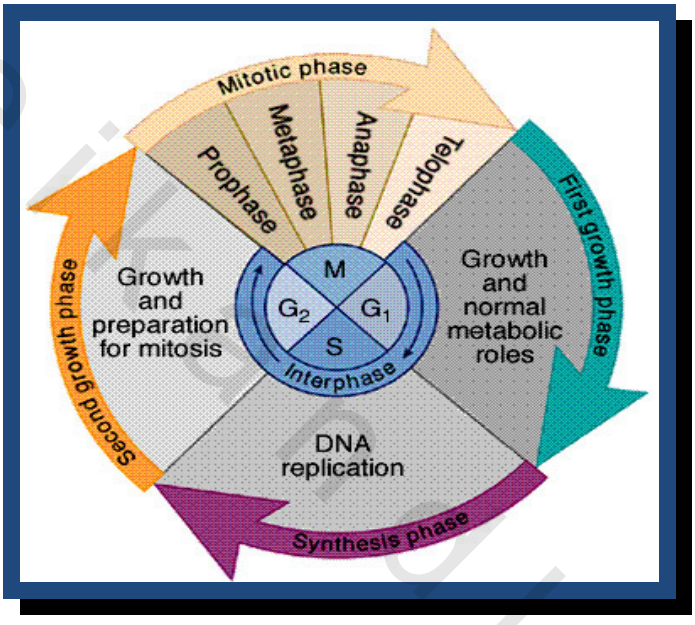
الانقسام الخلوي يكون على نوعين:

الاول- الانقسام غير المباشرMitosis الذي يحصل في الخلايا الجسمية للكائنات الحية لحصول عملية النمو، والثاني - الانقسام الاختزالي (المنصف) Meiosis ويحدث في الخلايا الجنسية الحيوانية (الخصى والمبايض) حيث تتكون منها امشاج مذكرة ومؤنثة وتحمل كل منهما عدد n من الكروموسومات.

دورة الخلية Cell Cycle: تشمل دورة الخلية الفترة الواقعة بين انقسامين متتالين للخلية وهما الطور البيني Interphase ومراحل الانقسام غير المباشر شكل (3– 4). وتختلف الفترة الزمنية لدورة الخلية من خلية الى اخرى. ففي الطور البيني يحصل انقسام في الخلية ولكنها تكون نشطة وتستعد للانقسام وتستغرق اكثر من 90 ٪من زمن دورة الخلية وينقسم هذا الدور الى ثلاث مراحل:

1 – المرحلة التحضيرية الاولى **G1** cell growth and duplication :يتم في هذة المرحلة تحضير جميع متطلبات عملية تخليق DNA وتكوين العديد من الانزيمات وكذلك تكوين انواع من RNA.

الشكل (3- 4) دورة الخلية Cell ycle



2 – مرحلة التخليق **S** chromosome (DNA) replication :وفيها تتضاعف جزيئات DNA الموجودة في النواة بحيث تخلق نسخ مشابهة لهذة الجزيئات وتسمى S-synthesis phase.

3 - المرحلة التحضيرية الثانية **G2** preparation to divide :تتم في هذة المرحلة عملية النمو الايض وتجهيز الكروموسومات.

3 – 3 الانقسام غير المباشر Mitosis :

يحدث هذا النوع من الانقسام في الخلايا الجسمية للكائنات الحية بهدف مضاعفة عدد الخلايا لغرض النمو.حيث تنقسم الخلية الام الى خليتين تحتوي كل منهما نفس الكمية من المادة الكروماتينية، وتتكون الشبكة الكروماتينية كخيوط منفصلة تعرف بالكروموسومات والتي يكون عددها ثابت في الخلايا الجسمية في النوع الواحد. ويسمى العدد الثنائي للكروموسومات ويرمز لة بالرمز(2 n). يشمل الانقسام غير المباشر عمليتين هما انقسام النواة وانقسام السايتوبلازم.تقسم عملية الانقسام غير المباشر الى اربعة اطوار موضحة في الشكل (3- 5).هي :

1– الطور التمهيدي Prophase: وهو اطول الاطوار وفي بدايتة يتضاعف الجسم المركزي لتكوين زوج من السنتريولات وتتميز الشبكة الكروماتينية الى عدد من الكروموسومات مشقوقة طوليا الى زوج من الكروماتيدات تتصل مع بعضها بالسنترومير.يتجة كل زوج من السنتريولات الى احد اقطاب الخلية ويبدا تكون الخيوط المغزلية، وفي نهاية الطور تختفي النوية ويتلاشى الغشاء النووي.

2 – الطور الاستوائي Metaphase : وفية تنتظم الكروموسومات في صف واحد عند خط استواء الخلية وترتبط الكروموسومات بخيوط المغزل بواسطة السنترومير بصورة مستقلة ، وتزداد سمكا وقصرا وتكون واضحة المعالم.

3- الطور الانفصالي Anaphase : نتيجة لتقلص خيوط المغزل ينفلق السنترومير لكل كروموسوم ، ثم يتباعد كل كروماتيد عن صنوة باتجاهين متعاكسين ويصبح عند كل قطب من اقطاب الخلية مجموعة من الكروماتيدات .

4 - الطور النهائي Telophase: التغيرات التي تحصل فيه عكس ما يحصل في الطور التمهيدي ،حيث تبدأ النوية و الغشاء النووي في الخلية بالظهور وتختفي خيوط المغزل وتتحول الكروموسومات الى خيوط كروماتينية والتي تتجمع مكونة

الشبكة الكروماتينية، بعدها يبدأ انقسام السايتوبلازم بالتخصر من وسط الخلية والذي يزداد في النهاية بحيث تنقسة المحتويات الى خليتين مستقلتين في كل منهما نفس العدد الكروموسومي الثنائي (2n) والذي كان موجود في الخلية الأم.

3 – 4 الانقسام الاختزالي Meiosis :

يحصل الانقسام الاختزالي في الخلايا الجنسية للكائنات الحية ويؤدي لتكوين المني او البيوض، وفيه يتم اختزال عدد الكروموسومات في الخلايا الناتجة الى نصف عددها في الخلية الام، . ويسمى العدد الاحادي للكروموسومات ويرمز لة بالرمز(n). ويشمل الانقسام الاختزالي انقسامين متتالين هما:

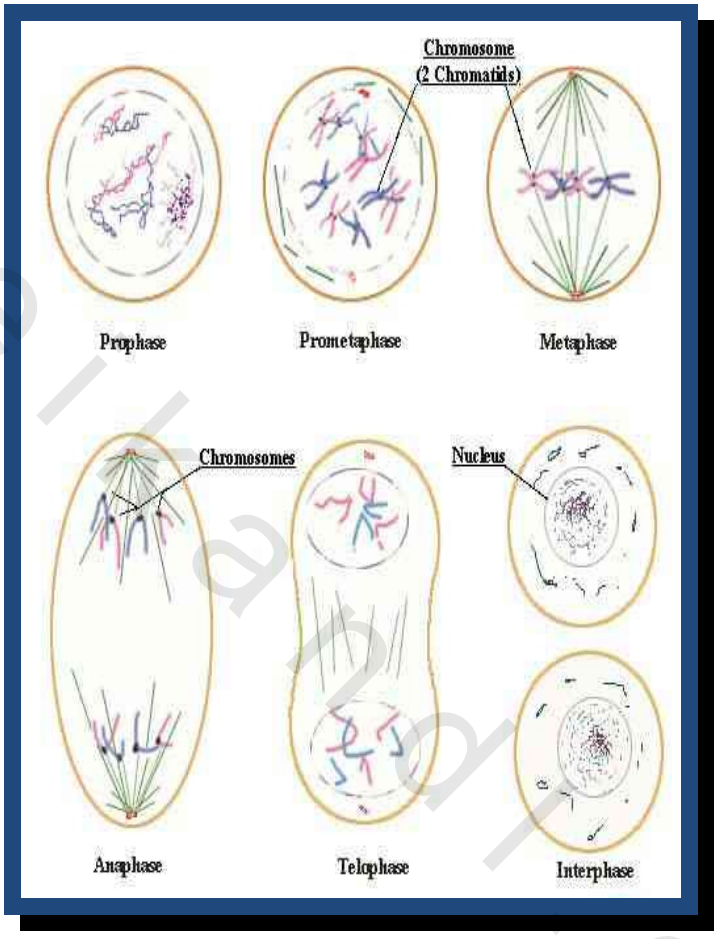
أ – الانقسام الاختزالي الاول Meiosis I :

ويشمل مجموعة من الاطوار هي :

1 – ألطور التمهيدي الاول Prophase I: تظهر الكروموسومات على شكل ازواج متماثلة وينشطر كل كروموسوم الى زوج من الكروماتيدات تتصل مع بعضها بالسنترومير أي ان ازواج الكروموسومات المتماثلة تكون اربع كروماتيدات وتتلاصق الكروماتيدات المتماثلة، ويحدث تقاطع بين الكروماتيدات غيرالمتماثلة(الشقيقة) عند نقاط تسمى نقاط التقاطع، وهذا يتيح تبادل الجينات المتماثلة بين اثنين من الكروماتيدات الداخلية وتعرف هذة الظاهرة بالعبور ، وفي نهاية الطور تختفي النوية ويتلاشى الغشاء النووي .

obeikandl.com

الشكل (3- 5)الانقسام غير المباشر في الخلية الحيوانية



2 – الطور الاستوائي الاول Metaphase I :وفية تنتظم الكروموسومات المتماثلة في صف واحد عند خط استواء الخلية وترتبط بخيوط المغزل.

3- الطور الانفصالي الاول Anaphase I : تنفصل الكروموسومات المتماثلة عن بعضها باتجاهين متعاكسين الى احد اقطاب الخلية ويكون عدد الكروموسومات في كل مجموعة نصف عدد الكروموسومات في الخلية الام .

4 - الطور النهائي الاول Telophase I: التغيرات التي تحصل فيه عكس ما يحصل في الطور التمهيدي ، حيث تبدا النوية بالظهور وتختفي خيوط المغزل تحاط كل مجموعة من الكروموسومات بغشاء نووي لتتكون نواتان كل منهما تحتوي نصف عدد الكروموسومات في الخلية الام. بعدها يبدأ انقسام السايتوبلازم لتتكون خليتان كل منهما تحتوي نصف عدد الكروموسومات في الخلية الام.

ب - الانقسام الاختزالي الثاني Meiosis II:

وهو الطور الذي يلي الانقسام الاختزالي الاول أي ان الخليتين الناتجتين منة تتداخلان في اطوار الانقسام الاختزالي الثاني حيث ان اطوارة تشابة اطوار الانقسام غير المباشر وهي:

1- الطور التمهيدي الثاني Prophase ll: تتميز كل كروموسوم الى كروماتيدين تتصل مع بعضها بالسنترومير. ويبدأ تكون الخيوط المغزلية الذي يربط الكروماتيدات ويرتبطان مع بعضها بالسنترومير ويتنافر كروماتيدا كل كروموسوم مع ارتبطهما مع بعضها بالسنترومير.شكل (3 - 6).

2 - الطور الاستوائي الثاني Metaphase ll :وفية تنتظم الكروموسومات في صف واحد عند خط استواء الخلية وترتبط الكروموسومات بخيوط المغزل بواسطة السنترومير بصورة مستقلة وعددها يساوي(n).

3- الطور الانفصالي الثاني Anaphase ll : نتيجة لتقلص خيوط المغزل ينفلق السنترومير لكل كروموسوم ،ثم يتباعد كل كروماتيد عن صنوة باتجاهين متعاكسين ويصبح عند كل قطب من اقطاب الخلية مجموعة من الكروماتيدات .

4- الطور النهائي الثاني Telophase ll: تتجمع الكروماتيدات عند كل قطب مكونة الشبكة الكروماتينية، بعدها يبدأ انقسام السايتوبلازم الى قسمين مستقلتين في كل منهما نفس العدد الثنائي(n) من الكروموسومات. ويكون ناتج كل خلية دخلت

obeikandl.com

الانقسام الاختزالي الثاني خليتين متماثلتين ، وبذلك يكون ناتج الانقسام الاختزالي هو اربع خلايا كل خلية تحتوي نصف عدد كروموسومات الام.

يوضح الشكل (3 – 7) الفرق بين الانقسام غير المباشرMitosis و الانقسام الاختزالي Meiosis حيث ان :

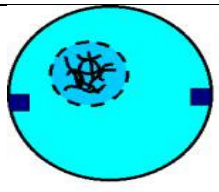
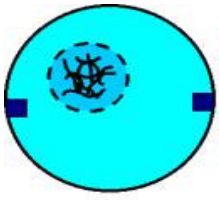
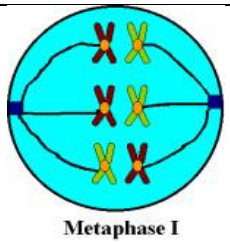
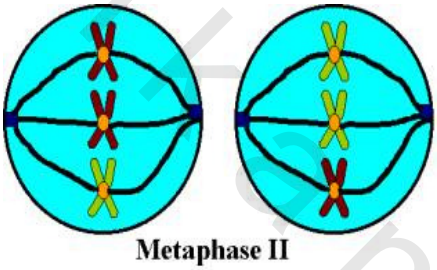
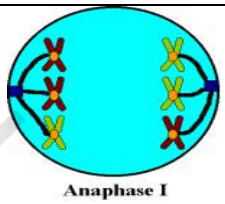
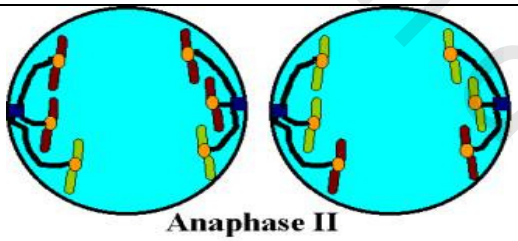
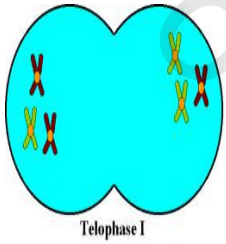
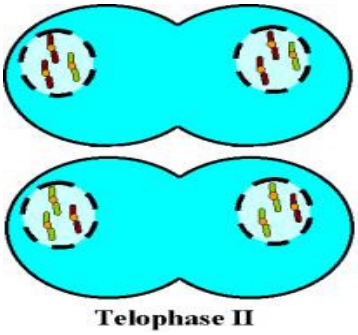
1- ألانقسام الاختزالي يحدث في عدد قليل نسبيا من خلايا الكائن الحي متعدد الخلايا ، في حين أن الانقسام غير المباشر أكثر شيوعا وفيه ينقسم السنترومير وتنفصل الكروميتدات أما في الانقسام الاختزالي لا يحصل انقسام للسنترومير .
2- يحصل الانقسام الاختزالي في الخلايا الجنسية للكائنات الحية ويؤدي لتكوين المني او البيوض، بينما يحدث الانقسام غير المباشر في الخلايا الجسمية للكائنات الحية .
3- يتم اختزال عدد الكروموسومات في الانقسام الاختزالي فتكون الخلايا الناتجة نصف عددها في الخلية الام، أما في الانقسام غير المباشر فتتضاعف عدد الخلايا لغرض النمو. تنتظم الكروموسومات في صف واحد عند خط استواء الخلية تنتظم الكروموسومات في صف واحد عند خط استواء الخلية .

3 – 5 تاثير الاشعاع المؤين على مكونات الخلية

عندما يمر الإشعاع خلال الأنسجة الحية فإن الطاقة سوف تترسب وتؤدي إلى تأين الذرات. وهذا التأين هو المسوؤل عن الأضرار الإشعاعية. والتأين اما ان يكون مباشرا عندما تقوم الفوتونات بكسر الحامض النووي او يحصل التخريب بشكل غير مباشر.

openkandil.com

الشكل (3- 6)الانقسام الاختزالي Meiosis

الانقسام الاختزالي الاول I	الانقسام الاختزالي الثاني II
 Prophase I	 Prophase II
 Metaphase I	 Metaphase II
 Anaphase I	 Anaphase II
 Telophase I	 Telophase II

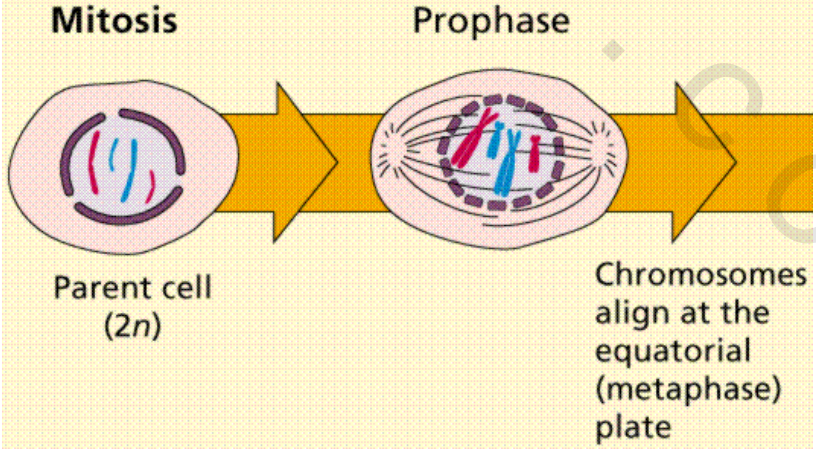
يطرأ احيانا تغير في جين او اكثر من جينات الفرد فتظهر صفات جديدة ، يسمى هذا التغير بالطفرة ، والطفرات على نوعين الاولى تلقائية تحصل بفعل المؤثرات البيئية المختلفة والطفرات المستحثة (الصناعية) التي تحدث بفعل الاشعاع المؤين او المواد الكيميائية.

تحتوي المعلومات الوراثية شفرات (كود) عن سلوك وتجديد الخلية. عندما يمر الإشعاع خلال الأنسجة الحية فإن الطاقة سوف تترسب وتؤدي إلى تأين الذرات. وهذا التأين هو المسؤل عن الأضرار الإشعاعية. فهي تؤدي إلى كسر احد ضفائر DNA Single strand break ، واذا كانت جرعة الاشعاع عالية فقد يحصل كسر مزدوج لضفيرتي DNA Double strand break ونتيجة لذلك تتولد مواد كيميائية سامة في الخلية.

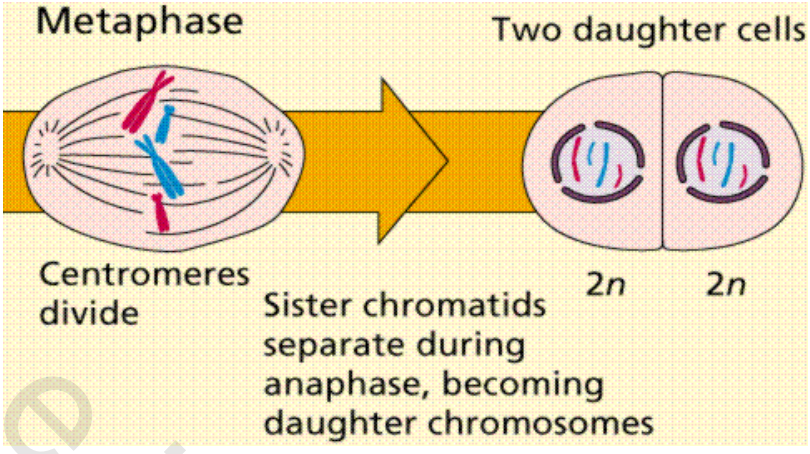
سقوط الاشعاع على الخلايا الحية يؤدي الى كسر الاواصر الهيدروجينية وضرر قواعد الحامض النووي لكن هذه الخلايا لها القدرة على اصلاح الضرر والتحام الاواصر الهيدروجينية اذا كان التاثير قليلا. شكل (3 - 9).

الشكل (3 - 7) الفرق بين الا نقسام غير المباشر و الانقسام الاختزالي Meiosis

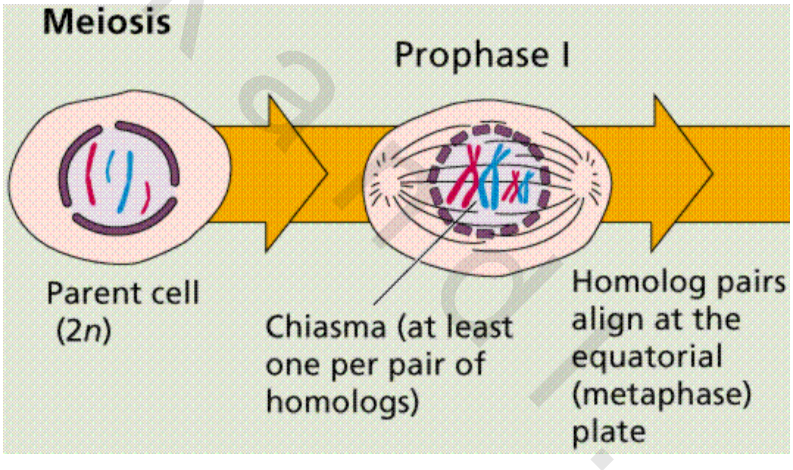
أ - الا نقسام غير المباشر Mitosis

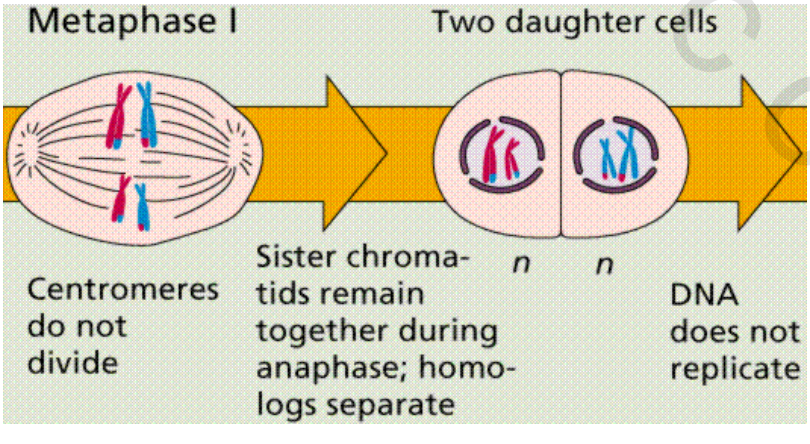


openkandil.com

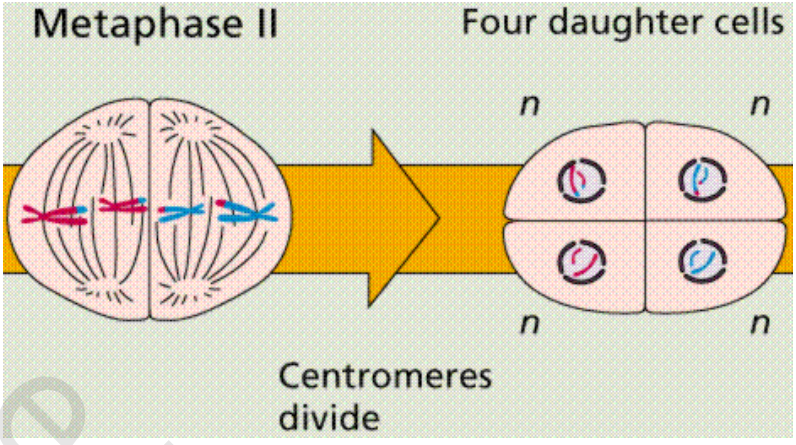


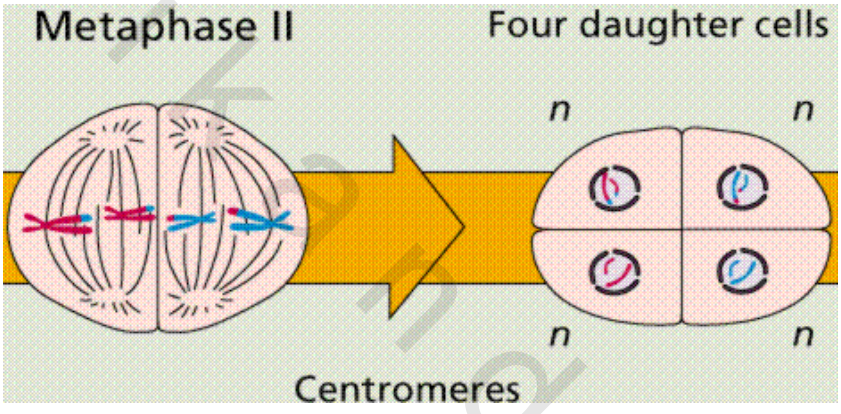
ب - الانقسام الاختزالي Meiosis





obeikandl.com

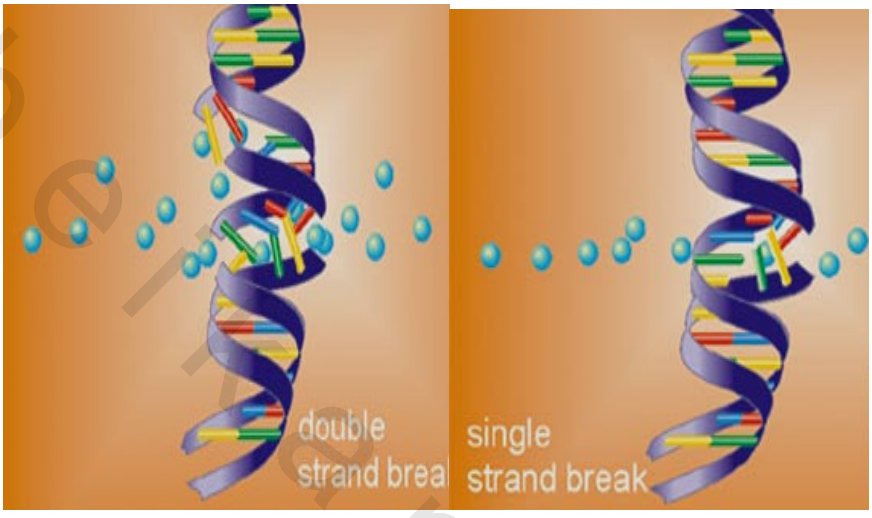




ومع ذلك فإن فعالية هذا الإصلاح يعتمد على درجة الضرر وقد يحدث إصلاح غير صحيح يؤدي إلى تكون معلومات غير صحيحة في سلوك الخلية الذي قد يؤدي إلى انقسام الخلية انقسامات غير مسيطر عليها وتتولد نتيجة لذلك أنسجة سرطانية.يحدث الإصلاح لأن الحامض النووي (DNA) له القدرة على المضاعفة والتي تسمى النسخ الذاتي(Replication) حيث ينشطر الحامض النووي طوليا عبر الاواصر الهيدروجينية الضعيفة ثم تبدأ قواعد كل سسلة بالارتباط بنيوكليونات جديدة حرة في النواة لتقوم كل سلسلة بعمل سلسلة مكملة لها تتكون من جزيئان متماثلان ولايختلف عن الجزيئة الام شكل (3 - 10) يعد من أهم العمليات الحيوية في الخلايا، فهي وسيلة للتطور و التجديد و النمو. حيث يتم بناء جزيئين

متطابقان DNA ، ولهذا السبب يتم تسمية عملية التضاعف هذه بالعملية شبة المحافظة semi conservative.

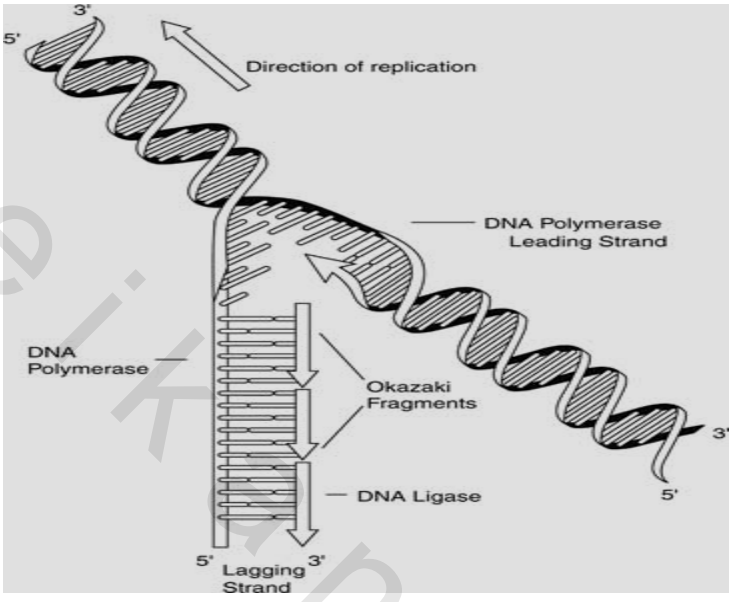
شكل (3 - 9) إصلاح الخلايا المتضررة نتيجة الاشعاع

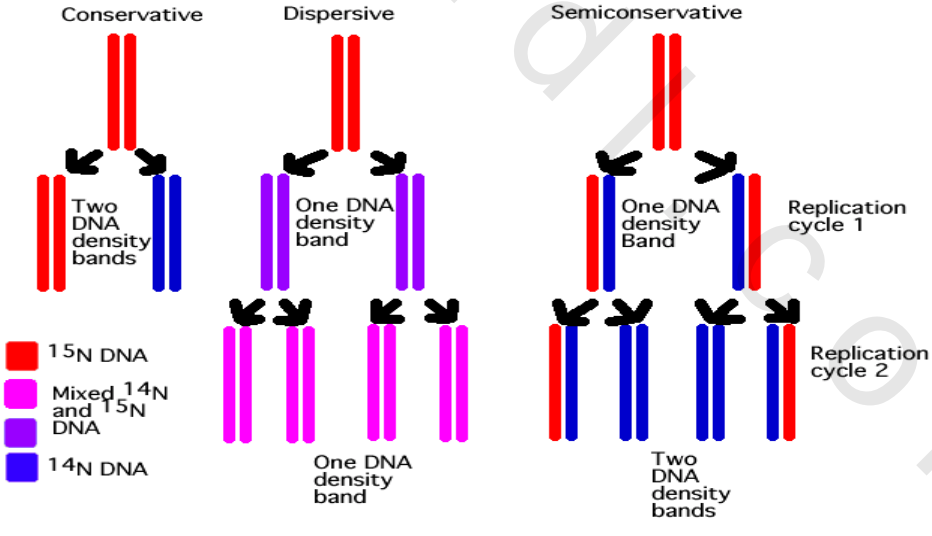


تبدأ العملية عند قيام إنزيم DNA هيليكيز بحل سلسلتي DNA ليفسح المجال لكل سلسلة من الحامض النووي ببناء سلسلة متممة و مكملة لها، بعدها ترتبط البروتينات الرابطة للسلسلة الأحادية بسلسلتي DNA المنفصلتين لمنع إعادة ارتباطهما ببعض. بعد قيام إلانزيم بحل السلسلتين تنشأ نقاط بدأ للتضاعف في السلسلتين و تسمى هذه النقاط شوكة التضاعف (Replication Fork) و يكون شكلها قريب من شكل الحرف Y. أنزيم DNA بوليميراز هو الأنزيم الرئيسي المسؤول عن تصنيع سلاسل DNA الجديدة، يتم بناء السلسلتين الجديدتين باتجاه واحد و هو من ٥' إلى ٣' وذلك لقدرة أنزيم DNA بوليميراز على إضافة نويدة جديدة على مجموعة الهيدروكسيل (OH) الموجودة على ذرة الكاربون رقم ٣ فقط.أحد السلسلتين الجديدتين سيتم بناؤها بشكل مستمر و سريع، تسمى هذه السلسلة بالسلسلة المتقدمة.أما السلسلة المقابلة فيكون بناؤها بطيء نسبيا مقارنة بالسلسلة المتقدمة، وتسمى هذه السلسلة بالسلسلة المتأخرة و تتخذ من السلسلة الأصلية

للحمض النووي الاتجاه 3'- 5' قالبا لها. يتم تصنيع هذه السلسلة بشكل أكثر تعقيدا مقارنة بالسلسلة المتقدمة.

شكل (3 - 10)النسخ الذاتي للحامض النووي(DNA)



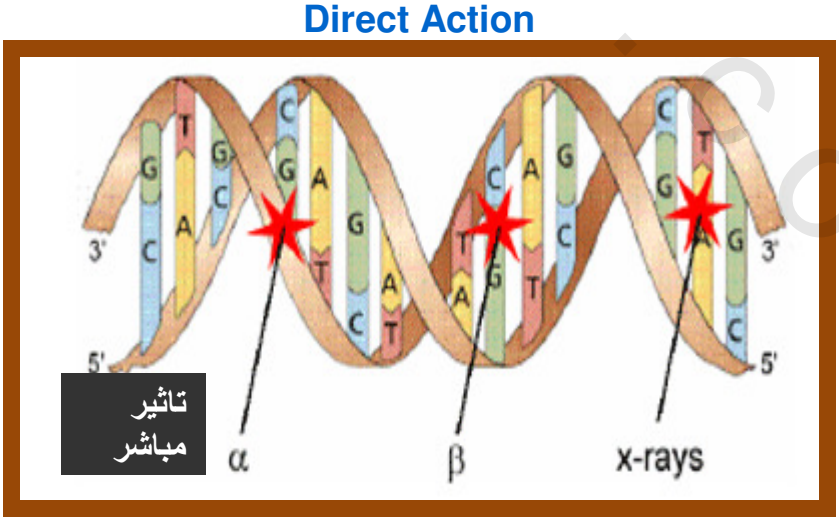


obeikandl.com

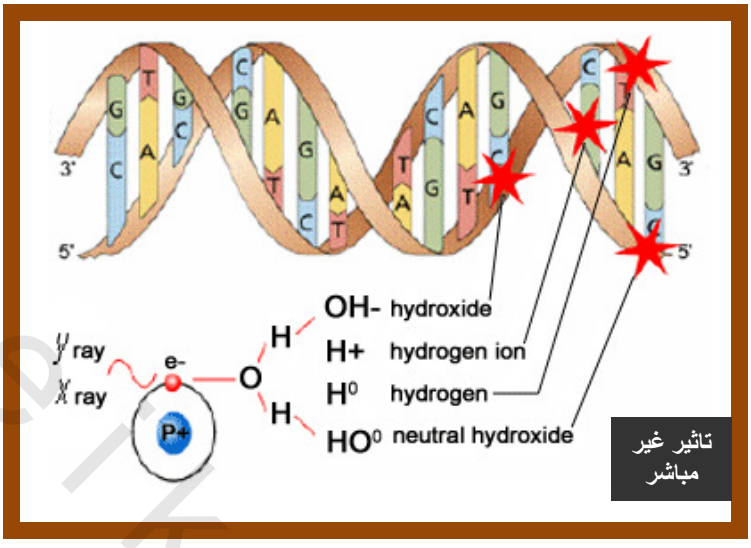
تبدأ العملية أيضا بإضافة مجموعة من النويدات عن طريق إنزيم RNA برايميز (لإضافة مجموعة هيدروكسيل حرة) ليأتي بعدها إنزيم DNA بوليميريز لإضافة النويدات متممة لسلسلة DNA الأصلية. عندما يصل إنزيم DNA بوليميريز إلى سلسلة النويدات التي تم أنشاها بواسطة إنزيم RNA برايميز يتم استبدال إنزيم DNA بوليميريز بنوع آخر من نفس الإنزيم حتى يستبدل نويدات RNA بنويدات DNA.

و يتم وصل هذه بالسلسلة التي تسبقها بواسطة إنزيم الربط و ذلك عن طريق إضافة مجموعة الفوسفات بين ذرتي الكربون الثالثة و الخامسة. عندما تسقط الجسيمات المشحونة الثقيلة والإلكترونات على DNA تقوم بتأيين المادة بشكل مباشر (Direct action)عند المرور فيها (اشعاع مؤين بشكل مباشر). أما بالنسبة لإشعاعات جاما والأشعة السينية فهي تؤين المادة بصورة غير مباشرة (Indirect action) شكل (3- 11). و تنتقل طاقتها إلى إلكترونات المادة عن طريق العمليات الثلاثة المعروفة لتفاعل الاشعاع مع المادة (الظاهرة الكهروضوئية، ظاهرة استطارة كومبتون ، و ظاهرة إنتاج الأزواج) ثم تقوم الإلكترونات الثانوية بالتأين.

شكل (3 - 11) التأثيرات المباشرة Direct Action والتاثيرغير المباشرة Indirect Action للإشعاع



Indirect Action



أما بالنسبة للنيترونات فتنتقل طاقتها إلى المادة إما عن طريق الاستطارة المرنة والاستطارة اللامرنة أو عن طريق امتصاص النيترونات. سواء كانت الإشعاعات المؤينة صادرة عن مصدر خارجي أو عن تلوث الجسم داخلياً بالمواد المشعة فإنها تؤدي إلى آثار بيولوجية في جسم الكائن الحي. يمكن أن تظهر فيما بعد على شكل أعراض مرضية وتعتمد خطورة هذه الأعراض والفترة الزمنية لظهورها على كمية الإشعاع الممتص وعلى معدل الامتصاص. فالجرعة الإشعاعية العالية (أكبر من 10 سيفرت) تؤدي إلى قتل الخلية وموتها بعد فترة قصيرة من التعرض. أما الجرع الوسطية (0.5 – 10 سيفرت) فإنها لا تقتل الخلايا ولكنها تمنع الخلايا من التكاثر، اما الجرعة الواطئة من الإشعاع (أقل من 0.5 سيفرت) لا تؤدي إلى قتل الخلايا ولكنها تؤدي إلى تغيير تركيبة الكروموسومات بطريقة لا يمكن الكشف عنها بسهولة.

تعتمد مدى الأضرار التي تصيب الخلية على معدل التعرض الذي تستلمة الخلية. وبسبب ميكانيكية اصلاح الخلايا فان الجرع العالية المستلمة في وقت قصير والتي تسمى بالجرع الحادة (acute dose) تسبب ضررا اكبر مما لوتعرضت الخلايا الى نفس الجرع ولكن بزمن طويل.

تنقسم الخلية بصورة طبيعية لوجود جينات تسيطر على انقسام الخلية. الا انة تحدث احيانا اما بصورة تلقائية او نتيجة لتاثير بعض المواد الكيماوية او الاشعاع المؤين،

اختلاف في عملية الانقسام ويحصل شذوذ اثناء عملية الانقسام الاختزالي وتتكون خلايا (امشاج) تحتوي على زيادة او نقصان في عدد الكروموسومات .وعند اتمام عملية الاخصاب تظهر تشوهات خلقية.اوقد يحدث خطأ ما في الجينات التي تتحكم في الانقسام مما يؤدي الى فقان السيطرة على الانقسام والتكاثر وعندها يبدأ حدوث السرطان ، والسرطان ورم خبيث لة طاقة كبيرة للنمو وقد تمتد هذه الخلايا وتغزو وتدمر النسيج الطبيعي المجاور ،او تنتقل عبر الاوعية الدموية او اللمفاوية الى اماكن اخرى من الجسم .

3 – 6 الأساس الفيزياوي لتأثير للإشعاع:

التأين هو السبب الأساسي لميكانيكية الضرر الإشعاعي ،فبدون التأين لا يحصل الضرر الإشعاعي وكما نعلم فان التأين يحصل للذرات ، لذلك فان الضرر الإشعاعي يبدأ على مستوى الذرات ثم يؤثر على الجزيئات الحيوية وتوجد خمسة كميات لها علاقة بامتصاص طاقة الإشعاع هي :

1 - الطاقة الخطية المنتقلة Linear energy transferred (LET)

يسمى انتقال الطاقة من الاشعاع الى الانسجة بشكل خط مستقيم باسم الطاقة الخطية المنتقلة (LET) . والتي توصف بوحدات(keV/cm) .ألاشعة السينية التشخيصية تنقل الطاقة بمعدل 3 keV\μm في الانسجة الرقيقة والتي تعتبر (LET) لها قليلة.وعندما تزداد طاقة الفوتونات للاشعاع الكهرومغناطيسي فان الطاقة الخطية المنتقلة سوف تقل.حيث ان الاشعة السينية واشعة جاما تعتبر اشعة ذات قدرة نفاذ عالية ، ليس من السهل ان ترسب طاقتها لذلك تعتبر ذات طاقة خطية منتقلة قليلة . اما الجسيمات المشحونة مثل الالكترونات او جسيمات الفا وبيتا السريعة يمكن ان ترسب طاقة تصل الى 20 keV / cm من الانتقال لذلك تعتبر ذات طاقة خطية منتقلة كبيرة.هذه الطاقة قد تؤثر بشكل مباشر اوغير مباشر على الجزيئات الحيوية، من خلال تفاعلها مع الماء. وتكون (LET) لجسيمات الفا اكبر

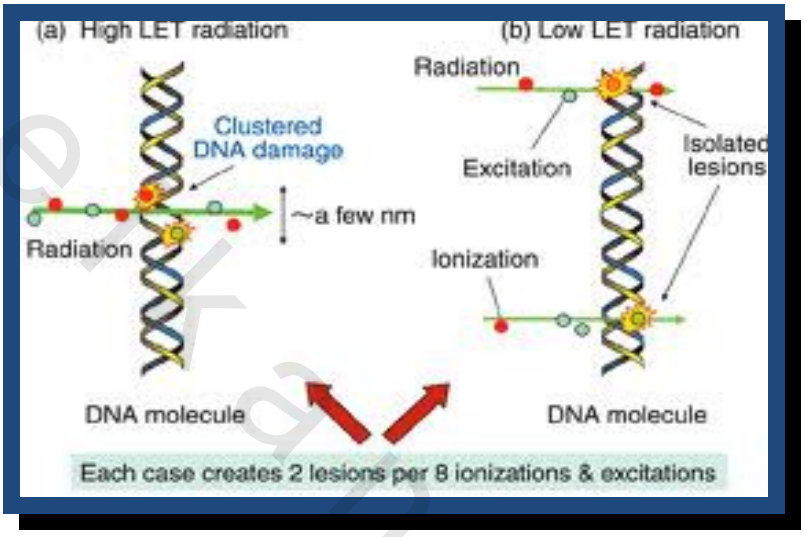
من الالكترونات شكل (3 – 12 أ) . فائدة الطاقة الخطية المنتقلة هي معرفة العلاقة بين كمية التاين والطاقة الخطية المنتقلة ، فكلما زاد عدد التاينات زادت الطاقة الخطية المنتقلة وبالعكس . الجسيمات المشحونة مثل جسيمات الفا لها كتلة وشحنة وتتفاعل مع المادة اثناء اختراقها من خلال كسر الاواصر الكيميائية وتأين المادة. جسيمات الفا لها شحنة موجبة(+2) وخلال انبعاثها فانها تؤين الذرات المجاورة لها بقوة ، ولكي تعود جسيمات الفا الى الحالة المستقرة يلزمها الحصول على الكترونين لتتكون ذرة الهليوم. وتؤدي هذه العملية الى تأين اولي وتأين ثانوي. جسيمات الفا تفقد في المعدل 34 الكترون فولط لكل تأين في الهواء فاذا كانت طاقة جسيمات الفا 34 ميجا الكترون فولط فانها تؤدي الى تكوين 100000عملية تأين مولدة 100000 زوج ايوني قبل ان تصل الى حالة السكون في بضع سنتمترات في الهواء. النسيج الطري يكون اكثر كثافة من الهواء لذلك فان الايونات المتكونة تكون قريبة من بعضها على طول المسار ويكون مدى اختراق جسيمات الفا قليلا .كلما زادت (LET) فان طاقة الاشعاع تقل ومدى

2 - التأثير البيولوجي النسبي Relative Biological Effectiveness:

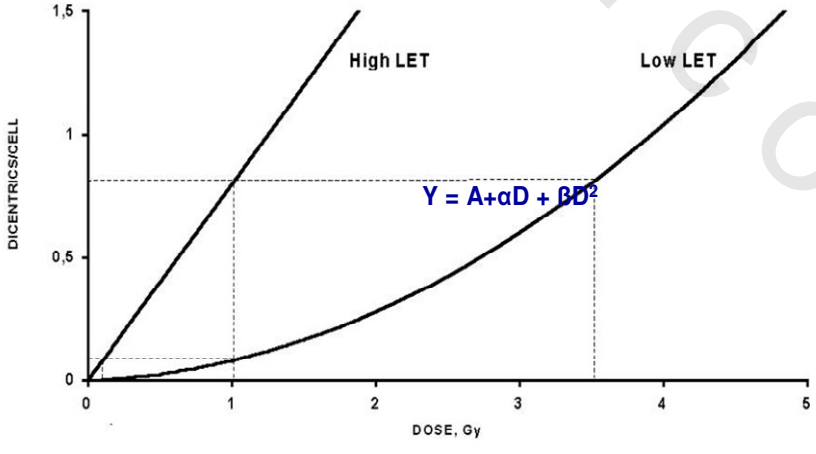
التأثير البيولوجي النسبي يوصف تأثيرات الإشعاع وليس الضرر العام أو النسبي. أنها تشمل التأثيرات المختلفة التي تسببها الإشعاعات المؤينة المختلفة، نوع الأنسجة التي ينتقل إليها الإشعاع ، التأثير البيولوجي المراد معرفته، والمعدل التي تستلم فيه الطاقة. التأثير البيولوجي النسبيRBE يقارن بين كمية الإشعاع ذات الطاقة العالية (orthovoltage) وهي إشعاعات كهرومغناطيسية لها ذروة فولطية تتراوح بين 200-250 kV_p والأنواع المختلفة للإشعاع. أختراقها في المادة يقل **شكل (3– 12 ب)**. يمثل التأثير البيولوجي النسبي لأشعة معينة مقارنة بين الجرعة المتصة من تلك الأشعة التي تولد تأثيرا بيولوجيا معينا، والجرعة المتصة من إشعاع مرجعي (أشعة جاما أو الأشعة السينية ذات الطاقة العالية orthovoltage) والتي تولد نفس التأثير البيولوجي، فمثلا التأثير البيولوجي النسبي(للنيوترونات) =جرعة أشعة جاما \ جرعة النيوترونات. فإذا كان يتطلب 80 mSv من إشعاع معين لتوليد تأثير

معين ويتطلب 400 mSv من 250 kV_p من الأشعة السينية لتوليد نفس التأثير.
فان:

شكل (٣ – 12 أ) الطاقة الخطية المنتقلة لجسيمات الفا و الالكترونات



شكل(3- 12ب) منحنى الاستجابة لقيم مختلفة من الطاقة الخطية المنتقلة LET



التأثير البيولوجي النسبي= جرعة الأشعة السينية \ جرعة الاختبار

= 80 / 400 = 5

ان RBE لاتحتوي وحدات للقياس وفي المثال تعني بأن جسيمات الاختبار اكثر تأثيرا بمقدار 5 مرات وذلك يعود الى ان التأين النوعي(عددالازواج الايونية المتولدة لوحدة الطول التي يخترقها الاشعاع الساقط على المادة) لجسيمات الفا اكبر من التاين النوعي للاشعة السينية او اشعة جاما. في حالة الاشعة السينية تكونLET واطئة لان لها قدرة اختراق عالية عند مرورها في النسيج الطري او الجلد ، وينتقل جزء قليل من طاقتها فتولد تأين قليل على طول مسارها. أما في حالة جسيمات الفا او النيوترونات فتكونLET لها عالية لان قدرة اختراقها واطئة عند مرورها في النسيج الطري او الجلد وتنقل جزء كبير من طاقتها فتولد تاين عالي ومتقارب على طول مسارها. تؤثر كل من LET, RBE والتأين النوعي للاشعاع بشكل مباشر على بقاء الخلية على قيد الحياة بعد عملية التاين . بشكل عام فان الخلية قد تعاني اضرار غير مميتة وتتعافى منها بعد فترة او تعاني اضرار بليغة وتموت. الضرر الممكن اصلاحه يعني ميكانيكية اعادة الجزيئات العملاقة macromolecules مثل الكاربوهيدرات والشحوم والبروتينات . اما الضرر الذي لا يمكن اصلاحة ويؤدي لموت الخلية فيحصل نتيجة لتخريب DNA في الخلية. بقاء الخلية على قيد الحياة هو مقياس لقدرة الخلية على الانقسام بعد مضاعفة DNA.اما التاثير الاشعاعي المميت على DNA عند الانقسام الخيطي . بقاء الخلية على قيد الحياة يعتمد على نوع الخلية ودرجة التخصص.

3 - تعزيز الأوكسجين Oxygen Enhancement.

تكون الأنسجة الحية أكثر حساسية للإشعاع عندما تكون فيها كمية الأوكسجين عالية.الخلايا المشبعة بالأوكسجين تكون لها حساسية للإشعاع تتراوح بين 2.5- 3 مرات أكثر منها للخلايا غير المشبعة بالأوكسجين . تعزيز الأوكسجين يعتمد على مقدار LET للشعاع. الإشعاع ذات LET القليلة (الأشعة السينية وجاما) يمكن

زيادة حساسية للإشعاع بواسطة تعزيز الأوكسجين.والسبب في ذلك بان الإشعاع ذات LET القليلة تكون قيمة RBE و Q تساوي واحد. ان تأثير تعزيز الأوكسجين يمكن أن يرفع قيمة RBE إلى 3.

ميكانيكية زيادة التخريب الإشعاعي للخلية بتأثير الأوكسجين يكون كبيرا لتوليد الجذور الحرة.أما ميكانيكية زيادة التخريب الإشعاعي للخلية باستخدام إشعاع له LET عالية فانه يوثر مباشرة لتخريب DNA وليس لتوليد الجذور الحرة. ميكانيكية زيادة التخريب الإشعاعي للخلية باستخدام إشعاع مقدار LET له واطئة هو تأثير غير مباشر لتخريب DNA بواسطة توليد الجذور الحرة.

4 - تأثير الإشعاع على الهرمون Radiation Hormesis :

توجد بعض الأدلة بان الإشعاع ذات الجرعة الواطئة ،اقل من0.1 جراي. يكون مؤثرا لتحفيز الدفاع الطبيعي للجسم نتيجة لتحفيز الهرمون والمناعة واستجابتها إلى المحيط السام وبذلك يقل ضرر الجذور الحرة لتخرب الخلايا. البحوث التي أنجزها العالم دوفي (Christian de Duve) الحائز على جائزة نوبل في الفسيولوجي والطب عام 1974 والذي اكتشف خلية سماها البيروكسوم (peroxisome) وهي المسولة عن منع التخريب الذي تحدثه الجذور الحرة لأنها تحتوي على الإنزيم المحفز لتكسير بيرو كسيد الهيدروجين(H_2O_2) في الخلية. هذه الطريقة مهمة للتخلص من الجذور الحرة في خلايا الثدييات. من المعروف بان خلايا الكبد والكليتين تحتوي على المئات من خلايا البيروكسوم التي تحطم بيروكسيد الهيدروجين.

5 - الاستجابة للجرع Dose-Response :

توجد فرضيتان لتقويم المخاطر الإشعاعية :

الأولى – إن الجرعة مهما كانت قليلة فلها تأثيرات ضارة على الإنسان أي لا توجد عتبة للجرعة ويسمى هذا التأثير بالتأثير العشوائي.

الثانية - إن التأثيرات الضارة للإشعاع على الإنسان تتناسب طرديا مع الجرعة أي ان زيادة الجرعة يؤدي إلى زيادة الضرر الإشعاعي ، إن التخريب لا يظهر ما لم تتجاوز الجرعة جرعة العتبة ويسمى هذا التأثير بالتأثير إلا عشوائي. لم تلاحظ تأثيرات مبكرة أو متأخرة للإشعاع عند التعرض لجرعة 0.25Sv، ولا يعني ذلك عدم وجود تأثير ولكن أساليب التشخيص الحالية غير قادرة على التحسس بهذه الجرعة لمجموعة قليلة من السكان.

توجد أربع أنواع من منحنيات الاستجابة للجرعة والتي لها أهمية كبيرة في عملية المخاطر من الإشعاع هذه المنحنيات موضحة في الشكل (3 - 13) وهي:

1 - منحى العتبة Threshold: هناك مستوى لا توجد الاستجابة عند قيمة اقل منه. أي أن الثاني الإشعاعي لا يحصل ما لم تصل الجرعة إلى حد معين، فمثلا هناك مستوى للعتبة الألم عند قيمة اقل منها لا يمكن الشعور بالألم.

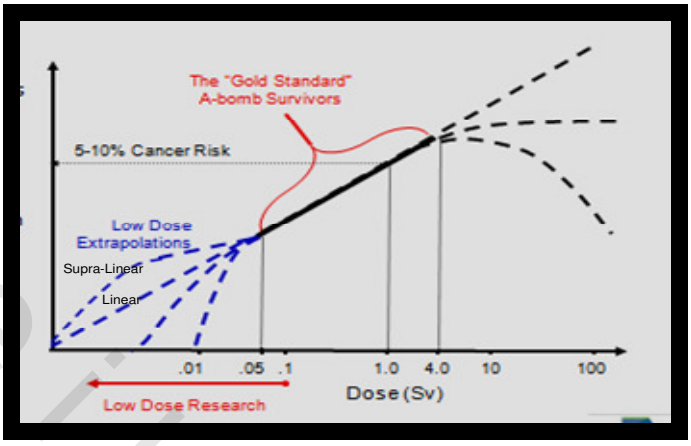
2 - المنحنى غير العتبي No threshold:لا يوجد مستوى أمان لأن جميع الجرعة مهما كان صغيرة فلها تأثيرات ضارة .فمثلا عند ابتلاع الثاليوم، لا توجد جرعة أمينة للثاليوم وقد تكون نتيجة الابتلاع مميتة أو غير مميتة ولكنها ضارة.

3– المنحنى الخطي Linear: ويعني ان الاستجابة تتناسب طرديا مع الجرعة ويزداد الضرر بزيادة الجرعة.فمثلا عند ابتلاع السيانيد فان احتمال التسمم والموت تتناسب طرديا مع جرعة التعرض للفيروسات.

4 - المنحنى غير الخطي Nonlinear: ويعني ان الاستجابة لا تتناسب طرديا مع الجرعة ولكنها تتغير حسب الشكل الرياضي للمنحني.

openkanal.com

شكل (3 - 13) العلاقة بين الجرعة والضرر البايولوجي



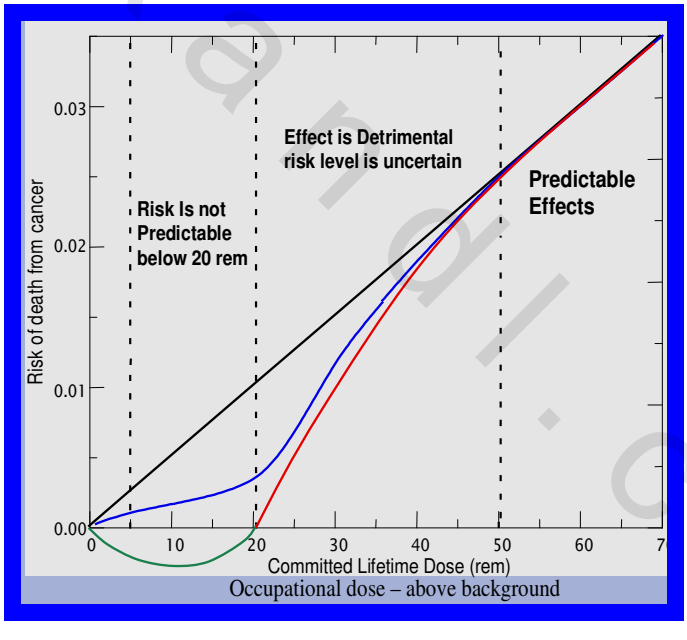
3 – 7 التأثيرات البيولوجية للإشعاع :

تنقسم التأثيرات البيولوجية للإشعاعات المؤينة في الكائنات الحية إلى تأثيرات جسمية وتأثيرات وراثية . فالتأثيرات الجسمية هي التي تنشأ عن تدمير الخلايا الاعتيادية للجسم وتقسم إلى تأثيرات مبكرة وأخرى متأخرة .إنّ التأثيرات المبكرة للإشعاع هي تلك التأثيرات التي تحدث بعد عدة ساعات أو حتى عدة أسابيع من التعرض الحاد لجرعة كبيرة من الإشعاع لعدة ساعات أو أقل . كما أنه لا يوجد حد فاصل بين الجرعات الإشعاعية المميتة والجرعات غير المميتة. تأثير الجرع الإشعاعية العالية يمكن ملاحظته على جسم الإنسان بعد فترة قصيرة من التعرض وبذلك يسهل تقييم مخاطرها. أما الجرع المنخفضة من الإشعاع فلا يمكن التحسس بها بسهولة وبذلك يكون تقييم مخاطرها صعبا وغير دقيق ويستند إلى فرضيتين أساسيتين :

الأولى : إنّ جميع الجرع الإشعاعية مهما كانت منخفضة تعتبر مضرة للجسم وبذلك لا توجد عتبة محددة لبدء تأثيرها على الجسم ، وهذا ما يسمى بالتأثيرات العشوائية. Stochastic Effect أ.

الثانية : إنّ تأثير الإشعاع يتناسب طردياً مع الجرعة الإشعاعية ولكن تأثير الإشعاع على الجسم لا يظهر على الجسم إلا بعد أن تتجاوز الجرعة الإشعاعية حدود حرجة معينة ، وهذا ما يسمى بالتأثيرات غير العشوائية أو الحتمية Nonstochastic Effect شكل (3 - 14) يوضح العلاقة بين الجرعة والضرر البيولوجي حيث أن المنحني العلوي خطي وعند الصفر في المحور السيني ويعني أنه غير عتبي. المنحني الوسطي خطي و غير عتبي ويمثل الاستجابة للإشعاع المؤين ويولد على خلايا البشر تأثيرات متأخرة المنحنى الأسفل يمثل الاستجابة للجرعة غير الخطية – العتبية وهي استجابة يكون فيها المنحني بشكل حرف S sigmoid curve التي لا يتناسب فيها الضرر خطيا مع الجرعة.

شكل (3 - 14) العلاقة بين الجرعة والضرر البيولوجي



خطر الاشعاع على الأنظمة البيولوجية كبير و يتناسب الخطر طرديا مع شدة ونوع الاشعاع، ويقل الخطر عند تداول المصادر المشعة بشكل صحيح واتقاء المخاطر الناجمة عنها بالكشف عن النشاط الإشعاعي. ويمكن اختزال الخطر الي حدوده الدنيا المقبولة بالتزام قواعد ومعايير الوقاية من الاشعاع. التعرض للإشعاع المؤين يؤدي الى تخريب

obeikandi.com

الأنسجة الحية نتيجة لعمليتي التأين والتهيج وتكون ما يسمى بالجذور الحرة، الجذور الحرة هي ذرات او جزيئات تحتوي الكترونات غير مزدوجة (unpaired) وتكون فعالة كيماويا يشكل كبير وتحاول الاستقرار بتكوين اواصر مع ذرت وجزيئات في النسيج الحي وتؤدي الى تخريبه. تتسبب عملية التأين في الكائن الحي بتكسر الروابط الكيميائية التي تربط ذرات الجزيئات ببعضها داخل نسيج الخلية الحية (تخريب مباشر). اما التأثير المتبادل للإشعاع مع الماء سواء داخل او خارج الخلايا الحية فانه يكون سببا في تكوين الجذور الحرة القادرة علي القيام بتفاعلات كيميائية عديدة مما يؤدي الي تخريب الخلايا عن طريق تفاعلات الاكسدة والاختزال(تخريب غير مباشر). يعتمد مقدار الضرر البيولوجي علي عوامل عدة منها نوع الاشعاع ، طاقته وسرعة دخوله الجسم الحي ونوع العضو المعرض لهذا الاشعاع. بالنسبة للتشعيع بمصدر خارجي تعتبر النيوترونات وأشعة جاما والأشعة السينية من اكثر الاشعاعات خطراً علي الانسان بسبب قدرتها الفائقة علي الاختراق والنفوذ. اما التعرض الخارجي من جسيمات ألفا فإنها غير خطرة لأنها لا تستطيع النفاذ إلا لطبقات الجلد السطحية غير الحساسة. لكنها تعتبر الاشد خطرا عند التعرض الداخلي ، اي اذا دخلت جسم الانسان واستقرت في احد اعضائه. تعتمد مدى الأضرار التي تصيب الخلية على معدل التعرض الذي تستلمه الخلية، وبسبب ميكانيكية اصلاح الخلايا فان الجرع العالية المستلمة في وقت قصير والتي تسمى بالجرع الحادة تسبب ضررا اكبر مما لو تعرضت الخلايا الى نفس الجرع ولكن بزمن طويل. من اهم اخطار الإشعاعات المؤينة المبكرة او المتاخرة :

1- الامراض السرطانية: حيث أصبح معروفاً أن التعرض للأشعة المؤينة قد يسبب زيادة في حالات السرطان مثل سرطان الدم وسرطان الثدي.

2- حدوث التشوهات الخلقية لدى الأجنة: فتعرض المرأة الحامل للأشعة المؤينة قد يعرض الجنين إلى تأثيرات خطيرة هذه التأثيرات تعتمد على مرحلة الحمل التي تم فيها التعرض وعلى الجرعة فإذا كان التعرض في الأسبوع الأول للحمل فقد يؤدي إلى موت الجنين أما التعرض خلال الأسابيع الستة التالية فإنة قد يؤدي إلى تشوهات

خلقية للجنين واخيراً فإن التعرض للإشعاع في الشهرين الأخيرين للحمل لم يثبت أنه يسبب أي تشوهات خلقية للجنين.

3- العقم : عند تعرض الخصيتين المباشر للأشعة قد يحدث العقم والذي إما أن يكون مؤقتاً أو دائم حسب الجرعة.

4- السمية الإشعاعية والسمية الكيميائية: لكل نظير خاصيتان الأول خواص كيميائية بغض النظر عن كونه مشعا أم غير مشع والثاني خصائص إشعاعية، أي ان لكل نظير مشع سمية إشعاعية وأخرى كيميائية . فالرصاص مادة سامة كيميائيا وله تأثيرات على الدماغ والجهاز العصبي بغض النظر عن كونة مشع أم لا، ولكن الرصاص- 210 بالإضافة إلى سميته الكيميائية له سمية إشعاعية حيث يطلق إشعاعات بيتا التي قد تؤدي إلى تاثيرات بايولوجية ضارة وكذلك فان اليورانيوم المنظب له تاثيرات سمية كيميائية على الكليتين اذا كان في حالة ذائبة ، وسمية إشعاعية اذا كان غير مذاب وتكون الرئتين العضو الحرج.عند سقوط الإشعاعات المؤينة على الخلية فإنها تؤدي إلى تأين بعض مكوناتها وخصوصا جزيئات الماء الذي يمثل الجزء الأكبر في أي خلية حية ويؤدي تأين جزيئات الماء إلى حدوث تغيرات كيميائية تؤدي بدورها إلى إحداث تغيرات في تركيب وظيفة الخلية . ويمكن أن تظهر نتائج هذه التغيرات في الإنسان في شكل أعراض إكلينيكية كالمرض الإشعاعي أو عتمة عدسة العين أو في الإصابة بالسرطان على المدى البعيد . وهكذا تؤدي الإشعاعات المؤينة إلى إتلاف الخلية من خلال عدة مراحل معقدة ومختلفة .يمكن تقسم التأثيرات البيولوجية للإشعاع حسب كمية الجرعة الممتصة إلى نوعين من التأثيرات : الأولى وتسمى التأثيرات المبكرة وهي التي تنتج نتيجة استلام جرعات عالية من الإشعاعات كافية لإحداث تأثيرات بعد وقت قصير من التعرض . والثانية : هي التأثيرات المتأخرة والتي تنتج عن جرعات منخفضة ومستمرة من الإشعاع .وتنقسم الآثار البيولوجية للإشعاعات في الكائنات الحية إلى نوعين :

1 - التأثيرات القطعية او الجسدية (deterministic effect) :

تؤدي الجرع الحادة للأنسجة الحية الى التأثيرات الضارة للإشعاع والتي تسمى بالتأثيرات القطعية. هذه التأثيرات تحصل عند أو فوق جرعة معينة تسمى جرعة

العتبة وتؤدي إلى ضرر عالي لعدد كبيرمن الخلايا وتزداد حدة التأثيرات البيولوجية بزيادة الجرعة.

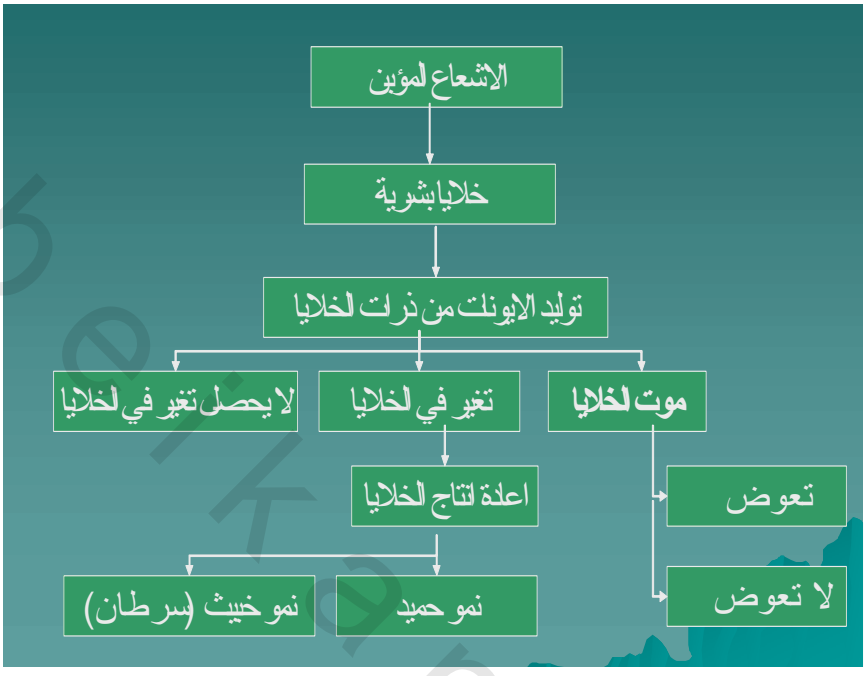
وتعتمد حدة التأثير مباشرة على مقدار الجرعة المستلمة والجزء المعرض من الجسم. وهذه التأثيرات تظهر بعد عدة أيام من التعرض وتحصل بصورة حتمية بسبب عمليات مختلفة أهمها موت الخلايا وتأخر انقسامها نتيجة تعرضها الى مستويات عالية من الإشعاع.إذا كان الإشعاع مركزا بقدر كاف فقد يضعف وظيفة النسيج المتعرض. وتزداد شدة الأثر المؤكد لدى الفرد المعرض كلما تجاوزت الجرعة مستوى العتبة لحدوث هذا الاثر. هذه التأثيرات هي تأثيرات مبكرة للإشعاع (Early effects) وهي آثار تظهر من الناحية السريرية لدى الأشخاص المعرضين للإشعاعات المؤينة بعد وقت قصير من التعرض. ويعاني المتعرضين للاشعاع الى ما يسمى بأمراض الإشعاع (Radiation sickness) والأمراض الإشعاعية مصطلح يعبر عن الأضرار المعقدة الناتجة للخلايا عند تعرضها للإشعاع.

ويمكن لهذه الأمراض أن تحصل بجرعة تصل إلى 1Sv وتتضمن ثلاث مراحل:

الأولى : تحصل بعد التعرض مباشرة للإشعاع حيث يشعر الإنسان بالمرض والتقيئ وسبب ذلك يعود إلى ازدياد التوكسينات (المواد السامة toxins) نتيجة للتعرض.

المرحلة الثانية: تحصل بعد يوم واحد فإن الشخص يبدأ بالتماثل للشفاء وقد يشفى كلياً بعد عدة أسابيع. أما المرحلة الثالثة من المرض فقد تظهر أضرار بليغة للجسم نتيجة لتأثيرات التعرض للإشعاع والتي تبدأ بنقصان كريات الدم ، وضرر الجهاز المعوي المعدي.....الخ وقد ينتج عن ذلك الوفاة والتي تعتمد على الجرعة التي يتعرض لها الفرد. شكل (3 - 15).

شكل (3 - 15) تأثير الإشعاع المؤين على الخلايا البشرية وتوليد الاورام



يصاب الشخص الذي يتعرض لجرعة عالية من الإشعاعات المؤينة بالمرض الإشعاعي واهم أعراضه: شعور الشخص بالتقيىء والغثيان وتبدأ أعراض هذا المرض في الظهور بعد ساعات قليلة من التعرض للإشعاعات . وقد تقصر مدة ظهور الأعراض أو تطول وذلك حسب قيمة الجرعة الممتصة من الإشعاعات . فإذا كان مكافئ الجرعة الممتصة خلال فترة زمنية قصيرة في حدود (3) سيفرت فانه يمكن أن يحصل خطر الموت.

ويوضح الجدول (3 - 2) اعراض وتأثيرات الاشعاع كدالة للجرعة .

ويزداد احتمال الوفاة المبكرة بهذا المرض كلما زادت الجرعة الممتصة فإذا كان مكافئ الجرعة في حدود (10) سيفرت فانه يمكن أن تحدث الوفاة خلال فترة تتراوح بين أسبوع أوأسبوعين.نتيجة إتلاف عدد كبير من الخلايا المبطنة للجدار المعوي. وتجدر الإشارة إلى انه لاتوجد قيمة محددة للجرعات المميتة والجرعات الغير مميتة .

openkanal.com

جدول (3 - 2) اعراض الاشعاع وتاثيراتة بزيادة مكافى الجرعة

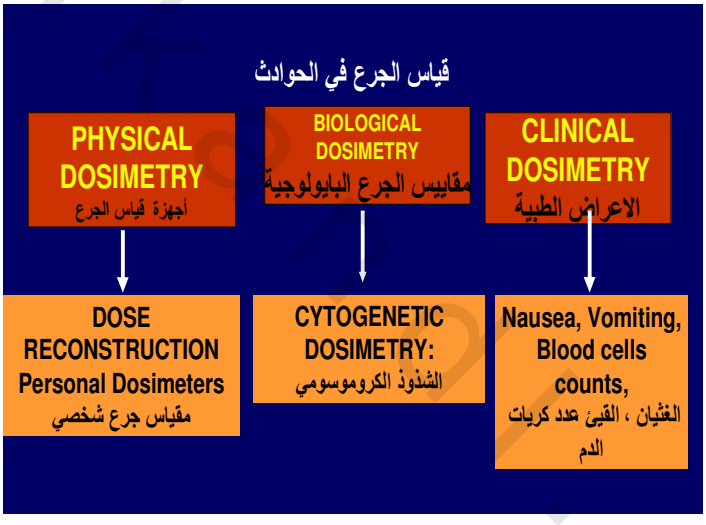
الجرعة	الاعراض	التاثير	العضو	مايحصل
1Sv	لاتوجد	نقصان مؤقت في كريات الدم البيضاء	نخاع العظم	تعود الكريات لوضعها الطبيعي بعد فترة وجيزة
2Sv	تضهر اعراض الاشعاع بعد ساعات من التعرض	نقصان مؤقت في كريات الدم البيضاء والحمراء بنسبة 50%	نخاع العظم	تعود الكريات لوضعها الطبيعي بعد فترة غير وجيزة
3Sv	اعراض الاشعاع والتهابات بكتريا ودم مع الغائط	نقصان كبير في كريات الدم البيضاء والحمراء بنسبة 50%	نخاع العظم	قد يشفى الشخص بعد اشهر او يموت
4-6Sv	جميع الاعراض السابقة + النزف الداخلي	تلف غشاء الامعاء وتساقط الشعر الدائمي (7Sv) او المؤقت (4Sv)	غشاء الامعاء والجلد والرئتين	احتال الوفاة بعد شهر او اكثر من التعرض
6-15Sv	التهاب بكتيري ودم مع الغائط	حروق اشعاعية	الجهاز الهضمي	احتال الوفاة بعد 10 يوم من التعرض
15 او اكثر Sv	فقدان الوعي والغيبوبة	تلف الجهاز العصبي المركزي والصدمة القلبية	العصبي المركزي	احتال الوفاة بعد 1 يوم من التعرض

obeikandl.com

ولكن يمكن القول بشكل عام بأنه إذا كان مكافئ الجرعة يتراوح بين حوالي (1- 5) سيفرت فإن احتمال الوفاة يكون صغيرا أما إذا زاد مكافئ الجرعة عن حوالي (15) سيفرت فان احتمال الوفاة المبكرة يكون كبيرا .

يؤدي التعرض إلى مصادر إشعاعية غير مدرعة كبيرة كالتي تستخدم في التشعيع الصناعي إلى جميع الأضرار الإشعاعية المعروفة سابقاً وحتى بعد عدة ثواني من التعرض. لهذا السبب تأخذ الاحتياطات المناسبة للوقاية من الإشعاع في هذه المنظومات.يمكن قياس الجرعة في حالة الحوادث من مقاييس الجرع الشخصية او مقاييس الجرع البايولوجية اوالاعراض الطبية شكل (3 -16)

شكل (3 -16) مقاييس الجرع الشخصية في حالة الحوادث



ومن أهم التأثيرات القطعية:

أ - تناقص كرات الدم Blood count depression

تعرض عموم الجسم الى جرعة مقدارها 1 سيفرت أو أكثر تؤدي إلى تخريب الغدد اللمفاوية الحساسة للإشعاع أو نخاع العظم الذي تكون خلاياة مسئولة عن إنتاج خلايا الدم البيضاء والحمراء، هذا الإنتاج يضطرب نتيجة لامتصاص الإشعاع. يتراوح عمر خلايا الدم بين عدة أيام إلى عدة أسابيع اعتمادا على نوع الخلايا، وعند تعرض الخلايا للإشعاع فإن ذلك يؤدي إلى موت الخلايا بعد زمن قصير من التعرض. عدم إنتاج خلايا جديدة يؤدي إلى نقصان حاد في عدد الكريات في الدم وهذا النقصان

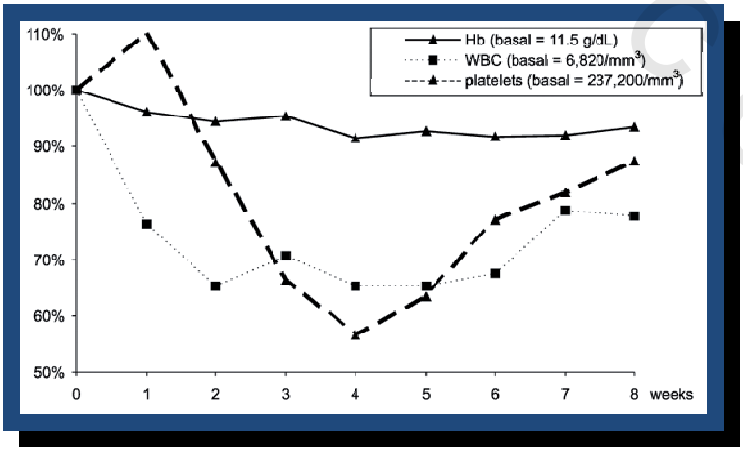
يعتمد على الجرع الإشعاعية المستلمة. النقصان في عدد الكريات الحمراء بمقدار 15٪ من عددها الأصلي بعد عدة أسابيع من التعرض يؤدي إلى خفض مناعة الجسم ويكون الإنسان معرضاً للالتهابات الحادة والأمراض. وقد تحصل الوفاة نتيجة لعوامل ثانوية إلا إذا وضع الإنسان في حيز معفر (معقم) طبياً. النقصان في الخلايا الحمراء يؤدي إلى تأثيرات ثانوية مثل فقر الدم (anemic).اوضحت الدراسات إن الأفراد الباقين على قيد الحياة نتيجة للتأثيرات الثانوية للإشعاع فإن الأضرار للخلايا الجذعية (stem cells) سوف يعاد إصلاحها ويعود عدد الكريات إلى المستوى الاعتيادي بعد عدة أشهر من التعرض للإشعاع (شكل3 - 17).

ب- احمرار في الجلد (Erythema) :

يحصل احمرار الجلد عند التعرض إلى جرع إشعاعية عالية نسبيا لان الجلد معرض للإشعاع أكثر من أي نسيج آخر في الجسم، خصوصا بالنسبة للأشعة السينية وأشعة جاما لذا فان التعرض لجرعة مكافئة مقدارها 5 سيفرت أو أكثر من الأشعة السينية ذات الطاقة المنخفضة تؤدي إلى احمرار الجلد (الاريثيما). وعند زيادة الجرعة يمكن أن تظهر أعراض أخرى كالحروق والتقيحات وغيرها .

الاحمرار للجلد مشابه إلى حد كبير للحروق الناتجة عن أشعة الشمس. إن سبب الإحمرار يعود إلى الأضرار الناتجة في للأنسجة الواقعة أسفل الجلد مباشرة. شكل (3 - 18).

شكل (3 - 17) تغير النسبة المئوية لمكونات الدم بعد العلاج بالاشعاع



ت- حروق نتيجة للإشعاع (Radiation burns)

عند التعرض لجرع تصل إلى 10 سيفرت أو أكثر فإن ذلك يؤدي إلى تلف خلايا الجلد وموتها بعد زمن قصير من التعرض والذي يؤدي إلى أضرار حرق الجلد وفي البداية يتقرح الجلد يتبع ذلك تليف (necrosis) للأنسجة. العلاج المؤثر يتطلب طبيب أخصائي في معالجة الجروح.

ث- تساقط الشعر Depilation :

يحصل تساقط الشعر المؤقت عند جرعة مقدارها ٤ سيفرت. هذا التأثير يحصل نتيجة لتلف بصيلات الشعر والتي تؤدي إلى توقف إنتاج خلايا شعر جديدة مع فقدان الشعر. و يمكن أن ينمو الشعر من جديد بعد فترة. وعندما تكون الجرعة ٧ سيفرت فإن تساقط الشعر يكون دائماً.

ج - قصر العمر

يؤدي التعرض المستمر للإشعاعات المؤينة إلى قصر فترة حياة الكائن الحي بشكل عام فالجرعة العالية تزيد من إحتمالية الإصابة بمختلف الأمراض السرطانية ، والتعرض للجرع المنخفضة تضعف مقاومة الجسم وتؤدي إلى إحتمالية الإصابة بأمراض مختلفة

شكل (3 - 18) التأثيرات العشوائية للإشعاع المسببة لاحمرار جلد وتساقط الشعر

openkanal.com

ح - الجهاز العصبي المركزي

زيادة الجرعة الإشعاعية بصورة مضطردة يزيد احتمال الوفاة من خلال التجارب التي أجريت على الحيوانات المختبرية والذي أظهر التشخيص الطبي وجود تلف جزئي في الجهاز العصبي المركزي ولهذا تسمى هذه الجرع بالجرع المميتة مع ملاحظة أن الموت لا يحدث مباشرة حتى في الحيوانات المختبرية التي تتعرض لجرعات تزيد على (500) كري . وهناك القليل جدا من هذه المعلومات حول الإنسان في هذه الجرع .

2 - التأثيرات العشوائية Stochastic effect .

التأثيرات الحادة هي التأثيرات التي تلاحظ بعد التعرض الجدي لحادث إشعاعي يؤدي إلى تعرض الفرد إلى جرعة إشعاعية كبيرة، ولحسن الحظ فإن مثل هذه التأثيرات غير شائعة. ومع ذلك فهناك احتمال للأضرار الناتجة من الإشعاع عند التعرض إلى جرع إشعاعية واطئة والذي يتسبب في استحداث السرطان. أثبتت الدراسات أنّ التعرض للإشعاعات المؤينة يسبب إحتمال الإصابة بالسرطان حيث أنّ هذه الأشعة لها القدرة على إستحداث السرطان. والسرطان هو تكاثر الخلايا في العضو المعين بمعدل أكبر من المعدل الطبيعي ، ويعتقد البعض أنه ناتج عن تلف جهاز التحكم في الخلية مما يؤدي إلى إنقسامها بمعدل سريع . وتحمل الخلايا الوليدة نفس الصفة فتنقسم بدورها بنفس هذا المعدل السريع مما يؤدي إلى تكوين نسيج سرطاني يضر بالأنسجة العادية في العضو المعيّن . وتقدير فرص إحتمال الإصابة بالسرطان بسبب التعرض للإشعاعات عملية معقدة للغاية لعدم إمكانية فصل السرطان الناتج عن الإشعاعات المؤينة عن مثيله الناتج ذاتياً .

الدراسات والأبحاث لمجموعة من الأفراد تعرضوا إلى جرع قليلة من الإشعاع أشارت إلى امكانية تعزيز استحداث السرطان من التعرض الإشعاعي والذي يزداد إحتماله بزيادة الجرعة الإشعاعية. ومع أن الدراسات العملية للجرع الواطئة قليلة إلا أنه افترض بأنه لا توجد جرعة يكون التعرض للإشعاع عندها أميناً. لذلك فإن أي جرعة مهما كانت قليلة قد تؤدي إلى تأثيرات ضارة. هذا النوع من التأثيرات تؤدي إلى حصول تأثيرات ضارة تتناسب طردياً مع الجرع المستلمة والذي يسمى بالتأثيرات

العشوائية.وقد تحصل التاثيرات العشوائية إذا حدث تحور في الخلية المشعة دون ان تقتل.وقد تتطور الخلايا المتحورة بعد عملية طويلة الى سرطان.وهكذا فان تأثير الإشعاعات على الإنسان والكائنات الحية الأخرى ينتج عن تلف الخلايا. ويمكن أن تتجلى هذه التأثيرات في نفس الشخص المتعرض للإشعاع نتيجة إتلاف الخلايا العادية لجسمه وتعرف هذه التأثيرات عندئذ بالذاتية Somatic effects . كذلك يمكن أن تنتقل هذه التأثيرات إلى الأبناء أو الأجيال التالية للشخص المتعرض وتعرف عندئذ بالوراثية Hereditary effects. تؤدي التأثيرات الوراثية لتلف خلايا الأعضاء التناسلية للشخص المتعرض.لذلك تقسم التاثيرات العشوائية الى قسمين هما :

1 - التاثيرات الذاتية (الجسدية) (Somatic Effects)

2 – التاثيرات الوراثية (Heredity Effects)

الاول- التأثيرات الذاتية(الجسدية) للإشعاعات :

وهي التاثيرات الصحية على الاشخاص المتعرضين للإشعاع وتؤدي الى استحداث انواع كثيرة من السرطان، اكثرها شيوعا سرطان الدم(اللوكيميا) حيث ان الفترة الكامنة لهذا المرض تتراوح من 2 – 5 سنة (الفترة الزمنية من بداية تكون المرض حتى ظهوره سريريا) ينشأ سرطان الدم نتيجة الزيادة الهائلة في عدد كريات الدم البيضاء . وقد لوحظ ظهور هذا المرض على سكان مدينتي هيروشيما ونجازاكي ، كما أن الجنين الذي يتعرض إلى جرع إشعاعية بين(0.01 – 0.05 Sv) بسبب التشخيص الطبي بالإشعة السينية قد يتعرضون إلى خطر الإصابة بمرض سرطان الدم بعد الولادة وتتولد انواع اخرى من السرطان بفعل الاشعاع تختلف في فتراتها الكامنة مثل سرطان الرئتين ، القولون ، والمعدة. أما سرطان الغدة الدرقية فان احتمال اصابة الأطفال أكبر من البالغين وذلك لأنّ الغدة الدرقية لدى البالغين تبدي مقاومة نسبية للإشعاع. أما سرطان الثدي فيزيد إحتمال الإصابة به لدى النساء اللاتي يتعرضن إلى جرعات عالية من الإشعاعات المؤينة تزيد عن (0.5 Sv) وتتراوح الفترة الكامنة لظهور المرض بين 8 إلى 25 سنة كما تزداد إحتمالية الإصابة بالمرض

لدى النساء المعالجات بالإشعاع نتيجة إلتهاب الثدي الحاد بعد الولادة

تنقسم التأثيرات الذاتية إلى نوعين:

ا - التأثيرات المبكرة: The early effects.

التأثيرات المبكرة للإشعاع هي تلك التي تحدث خلال فترة زمنية تتراوح بين عدة ساعات وعدة أسابيع من وقت التعرض لجرعة كبيرة من الإشعاعات خلال زمن قصير (لمدة ساعات قليلة) إن سبب هذه التأثيرات يعود إلى استنزاف جزء كبير من خلايا بعض أعضاء الجسم بسبب قتلها أو منع أو تأخير انقسامها. وتعود معظم أمراض التأثيرات المبكرة إلى تلف خلايا النخاع العظمى أو الخلايا العصبية أو الخلايا المعوية تبعا للجرعة الممتصة.

يمكن تقيم الجرعة التي يمكن اعتبارها مميتة بالنسبة لنصف المتعرضين (50٪منهم) خلال ثلاثين يوما من التعرض إلى حوالي (3) كرى وبالنسبة للجرعات التي تتراوح بين (3 - 10) كري تحدث الوفاة عادة بسبب التعرض الى الالتهابات الثانوية Secondary Infections ، حيث أن هذه الجرعات تؤدي إلى استنزاف كريات الدم البيضاء وهي الكريات المسئولة عن مناعة الجسم ووقايته من العدوى . لذا يعرف مدى الجرعات من (3 - 10) كري بمنطقة الموت بالعدوى وفي هذه المنطقة يمكن زيادة فرص البقاء بعزل المريض ووضعه في جو كامل التعقيم (معفر) ونقل نخاع عظمي إليه لتنشيط عملية إنتاج كريات الدم البيضاء.أما بالنسبة للجرعات التي تزيد على (10) كري فان زمن البقاء على قيد الحياة ينخفض بصورة حادة إلى ما بين (3 إلى 5) أيام وتظل بحدود هذه المدة تقريبا حتى الجرعات العالية جدا . وفي هذه الحالات يؤدي الإشعاع إلى الاستنفاذ الشديد لخلايا بطانة الأمعاء يتبعها هجوم شديد للبكتيريا على الجسم وهذا ما يسمى بمنطقة الوفاة الناتجة عن الالتهابات المعوية .

ب - الآثار المتأخرة The Late effects.

مستويات الجرعة الناتجة عن الاشعاع المنبعث من مفاعلات البحوث ومحطات الطاقة النووية أو من التطبيقات الصناعية والطبية للإشعاع هي اقل بكثير من معدلات الجرعات التي تؤدي إلى التأثيرات المبكرة للإشعاع. غير أن الجرعات المنخفضة التي

يتعرض العاملين في الاشعاع عند التشغيل الاعتيادي قد يؤدي إلى آثار ضارة على المدى البعيد . اوضحت الدراسات الوبائية منذ أوائل القرن التاسع عشر أن مجموعات من الناس من مصوري الأشعة ومرضاهم والعلماء الاوائل في النشاط الاشعاعي (كوري وزوجته) الذين تعرضوا لمستويات عالية نسبيا من الإشعاع قد ظهرت فيهم أنواع من السرطان بنسب أعلى مما هو الحال عند المجموعات التي لم تتعرض للإشعاع والتي كانت سببا في وفاتهم . وفي دراسة تفصيلية لسكان تعرضوا للإشعاع الناتج عن اجراء التجارب النووية واستخدام السلاح النووي في هيروشيما ونكزاكي ولمرضى تم علاجهم بالإشعاع وكذلك المجموعات التي تعرضت للإشعاع أثناء العمل وبخاصة عمال مناجم اليورانيوم . ظهرت قدرة الإشعاع على استحداث السرطان . والسرطان هو تكاثر غيرمسيطر عليه للخلايا في أحد أعضاء الجسم ، ويظن أن السرطان يحدث بسبب تلف جهاز التحكم في خلية فردية فيؤدي ذلك إلى الانقسام بسرعة أكثر من انقسام الخلية الصحيحة . ثم ينتقل هذه الخلل إلى الخلايا الوليدة وبهذا يزداد عدد الخلايا الشاذة إلى حد يؤدي الى موت الخلايا الصحيحة في نسيج العضو . إن تقيم خطر حدوث السرطان بسبب الإشعاع عملية معقدة بسببين مهمين هما:

1 - طول الفترة الكامنة للسرطان والتي تتغير ما بين حوالي 2- 5 سنة لسرطان الدم إلى 30 سنة أو أكثر في السرطانات الاخرى .

2 - و لا يمكن عادة تمييز السرطان المستحث بالإشعاع عن السرطان الاعتيادي .

غير أنه في المستويات العالية نسبيا من التعرض للمجموعات المذكورة آنفا يمكن عمل تقديرات تقريبية ثم استقراء خطر التعرض لمستويات منخفضة جدا من الإشعاع كالتعرض الاشعاعي للعمل الاعتيادي لمنشات الطاقة النووية. ان استقراء تأثيرات الجرع الواطئة من تقديرات خطر التعرض للجرعات العالية غير دقيقة و تحوي الكثير من الشك.

اوصت الهيئات الدولية للإشعاع على أن الأساس العملي للوقاية الإشعاعية هو ان الجرع الاشعاعية مهما كانت صغيرة فإنها تؤثر بمخاطر اشعاعية . وقد تم ذلك من خلال استقراء الخطر الناتج عن الجرعات العالية على افتراض أن العلاقة طردية بين الجرعة والخطر .

احد الدراسات قيمت الخطر الناتج عن الإشعاع بعدد حالات السرطان المتوقعة بالمليون الناتجة عن التعرض إلى مكافئ جرعة قدره 1mSv. فان عدد السرطانات القاتلة المتسببة عن الإشعاع للذكور هو حوالي 10 حالات والتي قد تظهر خلال فترة تمتد بضع عقود . أما في حالة الإناث فان عدد إصابات السرطان المتولدة عن الإشعاع فيتوقع أن تكون حوالي 15 حالة بسبب الخطر الإضافي بتولد سرطان الثدي .أما معدل خطر السرطان في خليط من الجنسين فستكون 13 حالة تقريبا في المليون لكل ملي سيفيرت.

هناك أثر متأخر آخر محتمل للإشعاع ألا وهو إعتام عدسة العين لأن عدسة العين حساسة جدا للإشعاع وعند تعرضها تتجمع البروتينات في العين عند جرعة تصل الى 2 كري .وهناك تأثيرين مهمين هما عدم وضوح الرؤية وعتمة العين كما في الجدول التالي:

التأثير	مكافئ الجرعة سيفرت	سيفرت\ سنة لعدة سنوات
مؤشرات عن عدم وضوح الرؤية	2 – 5	اقل من 0.1
عتمة العين	5	اقل من 0.15

هناك حدا للجرعة لا يحدث دونه إعتام لعدسة العين وهذه الجرعة بحدود 5 سيفيرت ولهذا فإذا ما وضع حد لا تتجاوزه الجرعة الكلية المتجمعة فيه خلال العمر فيمكن تجنب حدوث عتمة عدسة العين بسبب الإشعاع .

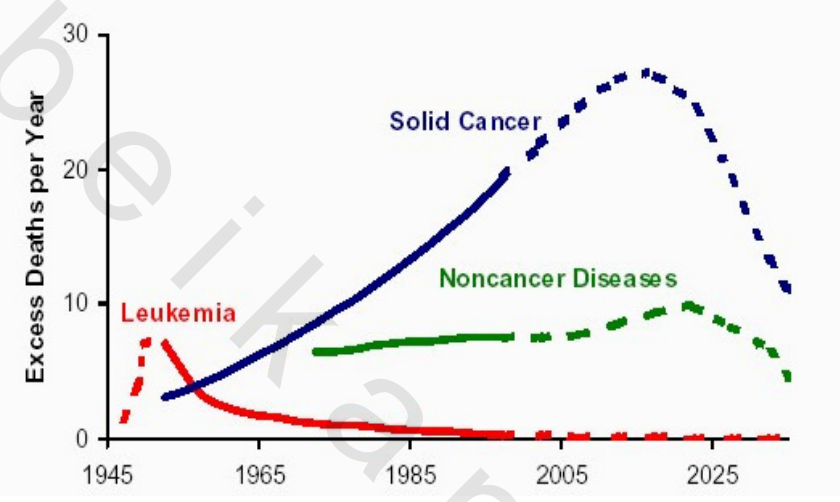
ومع إن هذه التأثيرات تم ملاحظتها في التجارب الحيوانية ولكنها لم تلاحظ بشكل كبير بالأفراد المتعرضين للإشعاع وخاصة من التفجير النووي في هيروشيما ونكزاكي ومن أهم الدراسات التي توضح تأثير الجرع الواطئة هي :

1 - الناجين من التفجيرات النووية في هيروشيما ونكزاكي. هذه الدراسات أعطت الكثير من تأثيرات الجرع الواطئة مع أنه من الصعب تحديد الجرع المستلمة للأفراد وتحديد نماذج بشرية للسيطرة من أجل المقارنة. مع ذلك فقد بينت الدراسات أن

openkandil.com

نسبة من الناجين أصيبوا بسرطان الدم أو السرطانات الأخرى والتي تختلف في الفترة الكامنة لضهورها. شكل (3 – 19).

الشكل (3 - 19) الفترة الكامنة للسرطان للناجين من التفجير النووي في هيروشيما ونكزاكي



2 - الأطفال المعرضين للإشعاع نتيجة لتصوير امهاتهم بصورة إشعاعية لمنطقة البطن أو الحوض خلال فترة الحمل.

3 - الأطفال المعالجين بالإشعاع نتيجة لتضخم الغدة الدرقية حيث أن العلاج يؤدي تشعيع ذات مستوى عالي لجزء صغير من الجسم.

4 - البالغين المصابين بمرض العمود الفقري ankylosing spondylitis والذي يستدعي علاجهم بالإشعاع الذي يؤثر على نخاع العظم أو مرضى الغدة الدرقية والتي تعالج باليود المشع.

5 - أوضحت الدراسات الوبائية بأن هناك علاقة بين زيادة كمية الراديوم في الجسم (وهو من العناصر التي تتركز في العظام) وسرطان العظام.

6 - عمال المناجم يتعرضون إلى مستوى عالي من الغازات أو الجسيمات الصلبة المشعة. التعرض للإشعاع لهؤلاء العمال يبين بأن هناك عدداً كبيراً من العمال أصيبوا بسرطان الرئة.

obeikandl.com

ثانيا - التأثيرات الوراثية :

يؤدي تعرض الخلايا الجنسية للإشعاع المؤين إلى تغيرات في تركيب هذه الخلايا ويؤدي لحصول الطفرات الوراثية . والمعروف إن الطفرات ظاهرة طبيعية تخضع لها الأحياء بصورة مستمرة وإليها يعزى تطور الأحياء من أشكال أولية بسيطة إلى النظم الحية المعقدة التي نعرفها اليوم والتي لا تزال تخضع إلى تطور مستمر . لا تعرف بالضبط العوامل المؤدية إلى إحداث الطفرات الوراثية الطبيعية ، أما العوامل الصناعية التي تسهم في إحداث الطفرات الوراثية فتشتمل المحفزات الكيماوية ، الأشعة تحت الحمراء ، والإشعاعات المؤينة .

ولا تظهر التأثيرات الوراثية للإشعاع على الشخص المتعرض للإشعاع بل تظهر على الأجيال اللاحقة كطفرات تشتمل على الشذوذ الجيني الذي لا يحدث تغيراً في تركيب الكروموسومات أو عددها فقط بل يغير موقع الجينات أو مجموعة منها مؤدياً إلى ظهور صفات مختلفة عن صفات الأبوين . ويعتمد تأثير الإشعاع على الخلايا الجنسية على الجرعة الإشعاعية المستلمة والعامل الزمني ، حيث إتضح أنّ جرعة تتراوح بين (0.2- 2) سيفرت كفيلة بمضاعفة عدد الطفرات الوراثية في الخلايا الجنسية وإنّ عدد الطفرات يرتفع بنسبة خطية مع الجرعة المتصة إذا تجاوزت هذا الحد . كما أنّ للعامل الزمني تأثيراً كبيراً على عدد الطفرات المتوقعة إذ يقل عددها إذا كان التأثير الإشعاعي ناجماً عن تعرض متكرر قصير الأمد لجرع إشعاعية قصيرة ، ويرتفع بإرتفاع الجرعة الإشعاعية. وقد تبيّن أنّ التعرض للإشعاعات المؤينة يساعد على إيجاد نوع من التأثير على نسبة الذكور في المواليد في حالة تعرض النساء للإشعاع وبشكل أقل وضوحاً في حالة تعرض الرجال للإشعاع .

2 – 8 - الشذوذ الكروموسومي (Chromosomal aberration):

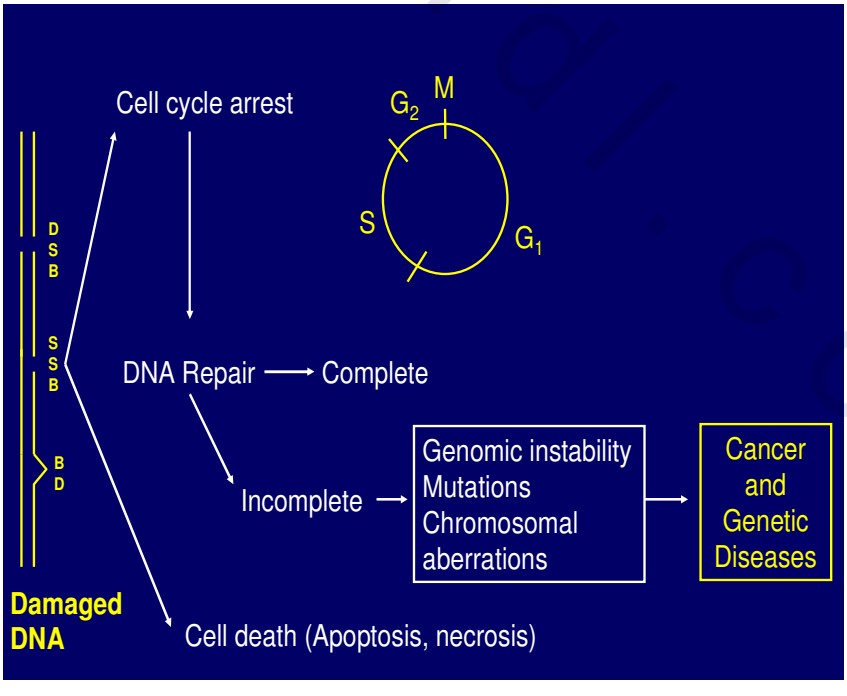
مع تضاؤل الجرعات فان آليات الجسم الخاصة بالتجديد والدفاع تجعل هذه النتيجة غير محتملة الى حد كبير.غير أنة لايوجد ما يدل على ان هناك حد للجرعة لايمكن للسرطان ان يحدث دونه ويزداد الاحتمال بالإصابة بالسرطان كلما ازدادت الجرعة. عند سقوط الاشعاع على الخلية الجرثومية وهي في طور الانقسام لنقل الصفات الوراثية الى الابناء فقد يحصل ما يلي الشكل(3 – 20) .

1 - تتوقف الخلية عن الانقسام بشكل طبيعي (Cell cycle arrest):

في هذة الحالة يحصل تكسر في الحامض النووي والذي اما ان يتم اصلاحة بشكل تام ولا يتولد أي ضرر للخلية . او ان الجرعة تكون كافية لحصول الاصلاح غير تام وفي هذه الحالة تحصل طفرات وراثية Mutations او شذوذ كروموسومي نتيجة التصاق الجزء المقطوع من احد الكروموسومات مع الجزء المقطوع من كروموسوم أخر ويتولد مايدعى بتغير المواقع (translocations) شكل (3 – 21). أو ان أجزاء الكروموسومات تلتصق مع بعضها بشكل حلقات بدون السنترومير ويسمى ذلك مسح الكروموسوم (Chromosomal deletions) او تتضاعف الكروموسومات الملتصقة لوجود قطعة اضافية من الكروموسوم Duplication او الانعكاس. ويوضح الجدول (3 – 3) والشكل(2 – 22) انواع الشذوذ الكروموسومي.

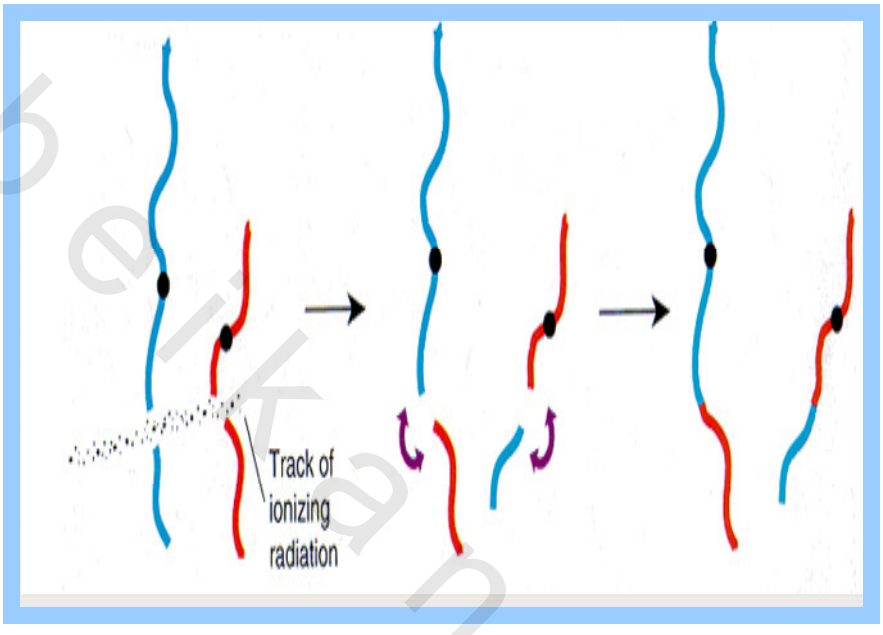
2 – موت الخلية وتليفها (necrosis): وفي هذة الحالة تكون الجرعة عالية بم فيه الكفاية لموت الخلية بعد التعرض.

شكل (3 - 20) اضرار الاشعاع على الخلية في طور الانقسام

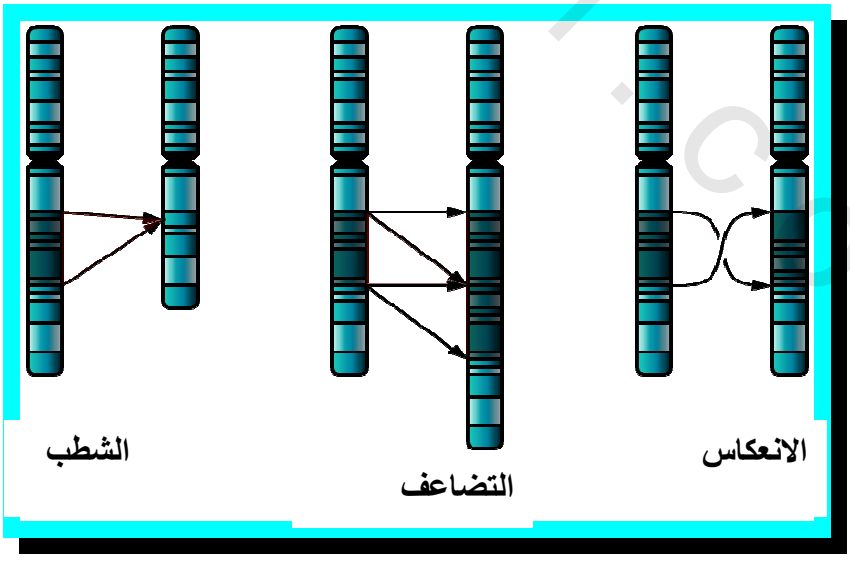


Operika.com

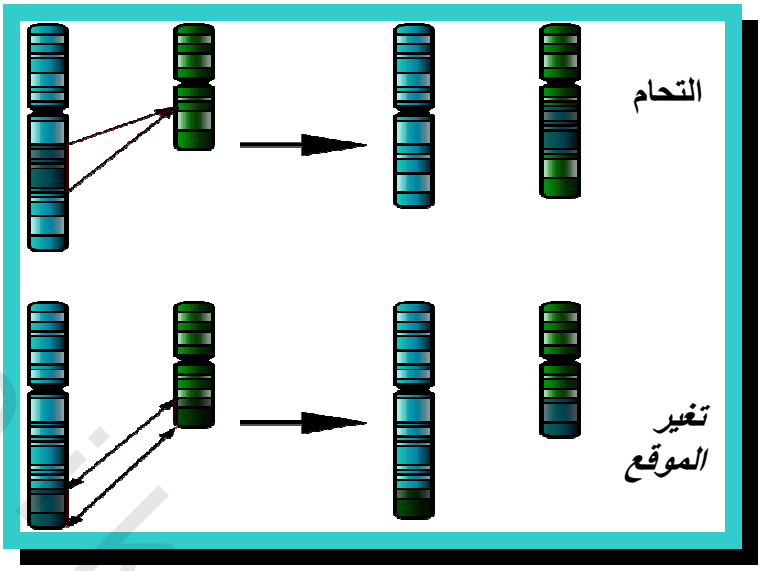
شكل (3 - 21) تغير مواقع الكروموسومات(translocations)



شكل (3 - 22) أنواع الشذوذ الذي يحصل في تركيب الكروموسومات



obeikandl.com

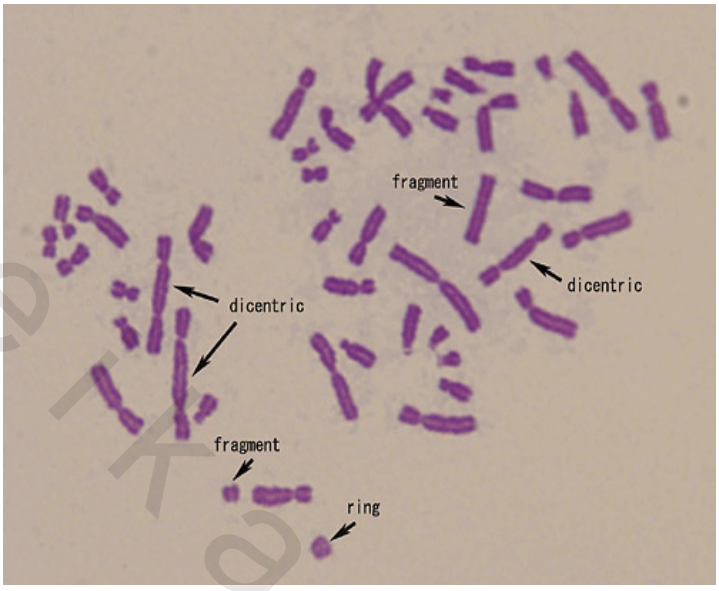


كل هذه التغيرات تدعى بالشذوذ الكروموسومي (Chromosomal aberration) والشكل (3– 23) يوضح الشذوذ في الكروموسومات بعد التعرض إلى الإشعاع والذي يعتبر من أهم التأثيرات العشوائية وهي الآثار الناتجة في ذرية الكائن نتيجة للتلف الإشعاعي لأعضائه التناسلية.

الجدول (3 - 3) أنواع الشذوذ الذي يحصل في تركيب الكروموسومات

نوع الشذوذ	الوصف
الشطب Deletion	فقدان جزء من الكروموسوم
المضاعفة Duplication	وجود قطعة إضافية من الكروموسوم
الانعكاس Inversion	تلتحم الكروموسومات المتشظية بشكل مقلوب وبذلك تختلف الشفرة الجينية
التحام Insertion	يحصل هذا النوع من الشذوذ نتيجة لحصول ثلاث كسور في الكروموسوم فيلتحم الجزء الأول مع جزء الكروموسوم الثاني أو الثالث
تغير المواقع Translocation	تتبادل الأجزاء المقطوعة من الكروموسومات اماكنها

الشكل (3 – 23) الشذوذ الكروموسومي



وبالإضافة إلى الآثار الصحية المذكورة اعلاه ، يمكن حدوث آثار صحية في الرضع بسبب تعرض الأجنة للإشعاع. وتشمل هذه الآثار زيادة احتمال الإصابة بسرطان الدم، وكذلك الإصابة بالتخلف العقلي والتشوهات الخلقية ويوضح الجدول (3 -4) هذه التأثيرات.احد انواع التأثيرات الوراثية للإشعاع العقم في الذكور او الإناث نتيجة قتل الخلايا التناسلية في المعرضين . إذ يأخذ هذا التلف شكل تغيير يدعى بالطفرات الوراثية في المادة الوراثية للخلية. من المعلوم بان التكاثر يحدث عند تلقيح البويضة بواسطة الحيوان المنوي ، ونتيجة لذلك فان الذرية تحصل على مجموعتين كاملتين من الجينات من كل من الوالدين.وحسب قوانين مندل في الوراثية التي تبين أن أحد الجينات يكون متغلبا والآخر يكون متنحيا ويكون الجين المتغلب الصفة المعينة التي يحملها .

operkan.com

جدول (3 - 4) التاثيرات الاشعاعية على الرضيع

الفترة بعد الحمل	التأثير	احتمال التأثير على الرضيع
الثلاث اسابيع الأولى	لا تاثير اكيد او عشوائي على حياة الرضيع	- -
من الاسبوع الثالث حتى الثامن	احتمال تشوه بعض الأعضاء	0.06 (1 لكل 17)
من الاسبوع الثامن حتى الاسبوع 25	احتمال الاصابة بالتخلف العقلي	0.005(1 لكل 200)
الاسبوع الرابع من الحمل	احتمال الاصابة بسرطان في الطفولة اوعند البلوغ	0.001 (1 لكل 1000)

أما الجينات المتنحية فيمكن ملاحظتها عندما يجتمع اثنان من الجينات المتنحية معا. يمكن للإشعاع أن يولد الطفرات الوراثية التي لا يمكن تمييزها عن الطفرات التي تحدث طبيعيا. الحرارة والمواد الكيميائية يمكنها كذلك أن تسبب الطفرات ويكون الجين ذو الطفرة المتنحية في العادة.

الاهتمام بأساسيات الوقاية من الاشعاع المؤين يمكن أن تقلل من معدل حدوث الطفرات ، وتقلل من عدد الشاذين جينيا في الأجيال القادمة . مخاطر التأثيرات الوراثية بسبب تعرض الغدد التناسلية للإشعاع غير معلوم تماما ، فقد قدرت الهيئة الدولية للوقاية الإشعاعية ICRP خطر الإصابة بمرض وراثي خطير في الجيلين الذين يليان تعرض أحد الوالدين للإشعاع بحوالي 10 أفراد بالمليون\ ميلي سيفرت ، ويقدر الخطر لكل الأجيال القادمة بحوالي ضعف هذا العدد . أن التعرض المؤثر على الصفات الوراثية الذرية هو ذلك التعرض الذي يحدث حتى نهاية فترة التخصيب . ولان معدل عمر الإنجاب حوالي 30 سنة ، فان جزءا محدودا من الجرعة الإشعاعية التي تتعرض لها عينة سكانية ستكون مضرة جينيا ويكون معدل الخطر الجيني الكلي في كل الأجيال من الجنسين ولكل الأعمار هو 8 تأثيرات خطيرة بالمليون\ ميلي سيفيرت.

لقد أدخلت ICRP مصطلح العتبة للتمييز بين التأثيرات التي يعتمد احتمال حدوثها على الجرعة المتعرض لها ، وتلك التي تعتمد شدتها على الجرعة ، وتدعى الأولى بالتأثيرات غير العتبية أما الأخرى فتدعى بالتأثيرات العتبية .

التأثيرات غير العتبية هي التأثيرات التي قد تحدث أو لا تحدث وليس هناك حالة وسط بينهما . ولهذا فالسرطان والتأثيرات الوراثية هي من التأثيرات غير العتبية واحتمال تولد نوع معين من السرطان او الطفرات الوراثية المتولدة بواسطة الإشعاع يعتمد على الجرعة المستلمة. أما التأثيرات المبكرة للإشعاع وبعض التأثيرات المتأخرة مثل إعتام عدسة العين تعتمد شدتها على الجرعة المستلمة ولهذا فان هذه التأثيرات هي كذلك عتبية . يتراوح عمر الخلية و تكاثرها في الإنسان بين عدة ساعات وعدة سنوات وذلك حسب نوع الخلية وتقوم الخلايا بالتكاثر للمحافظة على النوع وتعويض ما يموت منها . ويحدث هذا النوع من التكاثر مرة واحدة خلال دورة حياة الخلية. ويحدث التكاثر للخلايا الجنسية عند اتحاد الحيوان المنوي في الذكر والبويضة في الأنثى فعند تلاقي الحيوان المنوي مع البويضة يتحدان وتتجمع كروموسوماتهما مكونين بذلك خلية جديدة تحتوي على العدد الكلي من الجينات من كلا الوالدين وتتكون بذلك البويضة المخصبة.

ويتولد الكروموسوم خلال الانقسام حيث ان جزء من DNA يلتف حول جزيئات البروتين ليولد خيوط كروماتينية تلتوي هذه الخيوط كذلك لتوليد الكروماتين وترتبط أربع جزيئات كروماتينية في نقطة واحدة تسمى السنترومير وبذلك تتولد الكروموسومات .

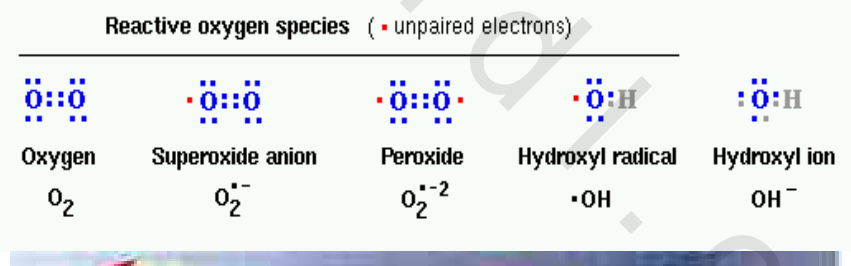
3 – 9 - مراحل تأثير الإشعاع على الخلايا الحية:

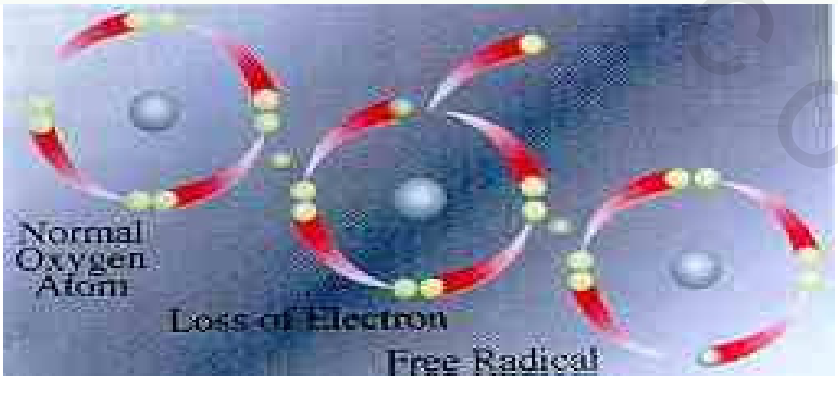
الجذور الحرة هي ذرة أو مجموعة من الذرات التي لديها إلكترون واحدة أو أكثر غير المزدوجة unpaired . الجذور الحرة ويمكن أن تكون موجبة ، سالبة ،أو متعادلة الشحنة وتتكون كعامل وسيط في مجموعة متنوعة من التفاعلات الكيميائية الحيوية العادية ، ولكن عندما تتولد بشكل كبير فإنة لا يمكن السيطرة على تأثيراتها ، يمكن أن تؤثر على طائفة واسعة من الجزيئات. ومن السمات البارزة للجذور الحرة هو نشاطها المرتفع للغاية للتفاعلات الكيميائية ، وهو ما يفسر كيف أنها

تلحق الضرر على الخلايا البيولوجية. هناك أنواع عديدة من الجذور الحرة ، ولكن تلك الأكثر إثارة للقلق في النظم البيولوجية هي الجذور المستمدة من الأكسجين ، والمعروفة مجتمعة باسم جذور الأكسجين الفعالة. الأكسجين يحتوي على اثنين من الإلكترونات غير المزدوجة في المدارات المنفصلة لغلافه الخارجي. هذا الهيكل الكتروني يجعل الأكسجين عرضة لتشكيل الجذور الحرة وأهمها:

- الانيون ذات الأكسدة الكبيرة super oxide anion
- بيروكسيد الهيدروجين
- الهيدروكسيل

تركيب هذه الجذور مبين في الشكل أدناه ، جنبا إلى جنب مع الرموز المستخدمة للدلالة عليها. لاحظ الفرق بين جذر الهيدروكسيل وأيون الهيدروكسيل ، والتي ليست جذور.



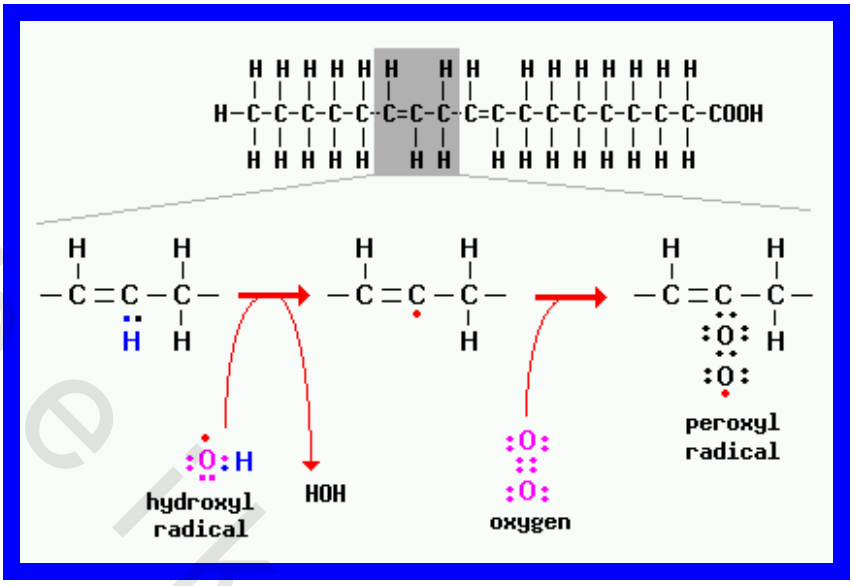


obeikandl.com

تصنف الإشعاعات المؤينة على أنها عامل مسرطن قوي ، تتولد إصابة الخلايا الحية ، إلى حد كبير ، بسبب شدة الأكسدة. في معظم الأحيان تشير التقارير إلى أن أهم الجزيئات التي تتضرر من الإشعاعات المؤينة هو الحامض النوويDNA . يعتبر الجذر الحر للهيدروكسيل ,(OH*) أشد ضررا من جميع الجذور الحرة المتولدة في الكائنات الحية ، وغالبا ما يكون مسؤول عن الضرر الذي تسببه الإشعاعات المؤينة للحامض النووي. الميلاتونين ، ومركب N-acetyl-5-methoxytryptamine ، يعتبران أحد مضادات الأكسدة المعروفة والتي تحمي الحامض النووي ، والدهون ، والبروتينات من ضرر الجذور الحرة.

الاندولامين (indoleamine) يظهر خصائص مضادات الأكسدة عن طريق تحفز نشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة ويزيل الجذور الحرة مباشر أو غير مباشر.من بين أهم مضادات الأكسدة المعروفة ، الميلاتونين هو مزيل فعال للغاية للجذور الحرة OH* لأنه سرعان ما يمر عبر كل الأغشية البيولوجية. التأثيرات الوقائية للميلاتونين ضد الأكسدة التي تسببها الإشعاعات المؤينة قد جرى توثيقها في الدراسات داخل وخارج الجسم الحي وفي تجارب مختلفة للأنسجة البشرية ، وجد بان الميلاتونين يعتبر من الواقيات الإشعاعية radioprotective الجيدة والفعالة . عندما يعرض الإنسان للإشعاعات المؤينة فأن الميلاتونين يعمل على وقاية الخلايا من التلف الذي تسببه الأكسدة ويمتاز الميلاتونين بسميته المنخفضة والتي جعلته علاج فعال من آثار الإشعاع المؤين .

واحدة من الآثار السامة المعروفة للجذور الحرة للأوكسجين هي الأضرار التي تحدث بالأغشية الخلوية (البلازما ، والميتوكوندريا) ، والتي تبدأ بعملية تعرف باسم بيروكسيد الدهون lipid peroxidation . و الهدف المشترك للبيروكسيد هي الأحماض الدهنية غير المشبعة الموجودة في الغشاء المكون من الفوسفولبد. وهناك تفاعل للبيروكسيد مع الأحماض الدهنية هو مبين في الشكل أدناه.



الاشعاع المؤين يتفاعل على المستوى الخلوي للجسم. تقود التفاعلات بين الخلية والإشعاع إلى الضرر الإشعاعي وهي تأثيرات معقدة تولد مكونات أيونية، كيماوية، وبيولوجية . تقسم هذه العمليات الى أربع مراحل هي :

أ. المرحلة الفيزيائية الابتدائية :

تستغرق هذه المرحلة جزءاً ضئيلا من الثانية فقط (حوالي 10^{-16} ثانية) حيث تترسب الطاقة في الخلية ونتيجة لذلك تتأين جزيئات الماء والتي تكون 90٪ من الخلية. ويمكن كتابة هذه العملية بالنسبة للماء كما يلي:

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

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

ب. المرحلة الفيزيوكيماوية :

وتستغرق هذه المرحلة حوالي 10^{-6} ثانية حيث تتفاعل الأيونات الموجبة لجزيئات الماء مع جزيئات الماء الأخرى مؤدية إلى عدد من النواتج الجديدة نتيجة لتحلل الأيون الموجب إلى ايون الهيدروجين الموجب:

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

والأيون السالب وهو الإلكترون يرتبط بجزئية ماء متعادلة فتتحلل فيما بعد إلى ايون سالب للماء والذي بدورة يتحلل ايونات الهيدروكسيد السالبة :

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

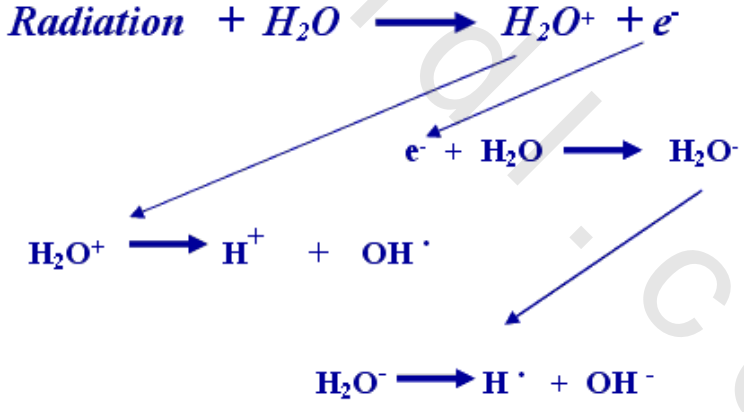
$$H_2O^- \longrightarrow H + OH^-$$

وبهذا يكون ناتج التفاعل هو H^+ و OH^- و H و OH ويوجد الأيونين الأوليين بشكل واسع في الماء المعتاد وليس لهما دور في التفاعلات التالية. أما الناتجان H و OH فيطلق عليهما الجذور الحرة (Free - radicals) أي أن لديها إلكترون غير مزدوج ، وبالتالي فهي شديدة الفعالية.

وهناك ناتج آخر للتفاعل وهو بيرو كسيدات الهيدروجين الذي يعتبر من العوامل الشديدة الأكسدة.

$$OH + HO \longrightarrow H_2O_2$$

ويمكن تلخيص تكون الجذور الحرة بالشكل التالي



ت. المرحلة الكيميائية :

وتستغرق بضع ثوان يتم خلالها تفاعل النواتج مع الجزيئات العضوية المهمة في الخلية ، كما أن الجذور الحرة والعوامل المؤكسدة قد تهاجم الجزيئات

obeikandl.com

المعقدة للكروموسومات و تربط نفسها بجزيء مما يؤدي إلى كسر الربط في سلسلة الجزيئات الطويلة وإحداث اضرار اولية الى (DNA)

ث. المرحلة البيولوجية :

حيث يتباين مقدار الوقت من دقائق إلى عشرات السنين ويؤدي الى ثبوت الضرر وموت الخلايا وشذوذ الكروموسومات. تتبع ذلك التأثيرات الطبية وهي اما تكون احد انواع السرطان او تأثيرات وراثية بحسب نوع الأعراض.

خلاصة التغييرات الكيميائية المناقشة آنفا يمكنها التأثير على الخلية المفردة بطرق عدة قد تؤدي إلى :

(١) الموت المبكر للخلية.

(٢) منع أو تأخير انقسام الخلية .

(٣) التغيير الدائم الذي ينتقل إلى الخلايا الوليدة .

openkandl.com