

جامعة سامراء

كلية العلوم التطبيقية

قسم التقانات الاحيائية

المرحلة الأولى

م/ تأثير الاشعاع على الخلايا

م . م محمد شهاب أحمد الخزرجي

مقدمة :

لقد عرف الإنسان التأثير الضار للإشعاع منذ بداية اكتشافه وقبل أن يتعرف على طرق الوقاية منه ، ومن هذه التأثيرات ملاحظة سقوط الشعر واحمرار الجلد نتيجة التعرض للأشعة السينية وإصابة مكتشف هذه الأشعة بسرطان الجلد ، بالإضافة الى ارتفاع نسبة الإصابة بسرطان الرئة لدى عمال مناجم اليورانيوم نتيجة استنشاقهم لغاز الرادون وغيرها من الحالات التي تم رصدها لدى العاملين في مجال الإشعاع ونتيجة للحوادث والتفجيرات النووية والأضرار التي نتجت عنها.

يعتمد التأثير البيولوجي للإشعاع على عدة عوامل منها نوع الإشعاع وطريقة التعرض له سواء كان خارجي أو داخلي ، وحساسية العضو المتعرض للإشعاع وقابليته لتخزين المواد المشعة في حالة التعرض الداخلي . ويكون تأثير الإشعاع على خلايا الجسم بطريقتين ، طريقة مباشرة وطريقة غير مباشرة ، ففي الطريقة المباشرة يتم تكسير الروابط بين الذرات المكونة لجزيئات المادة الحية نتيجة التأين وبالأخص نواة الخلية مسببا موتها أو تغير جيني بها أما التأثير غير المباشرة فينتج عن تحلل الماء الذي يشكل ما نسبته 70-85% من الجسم الحي وهذا بدوره ينتج مواد كيميائية سامة تؤثر على الخلية وعلى الخلايا المجاورة.

التأثير المباشر للأشعاع:

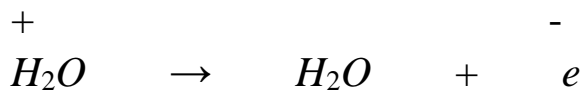
التأثير المباشر للإشعاع يحدث نتيجة تأين أو إثارة ذرات المادة المكونة للخلية الحية والذي يمكن أن يحدث في مكان ما من الجسم المتعرض للإشعاع ، ويكون الجزء المتضرر من الإشعاع هو نواة الخلية او المادة الوراثية فيها نتيجة تكسير الروابط بين جزيئات المادة ، مؤديا لموت الخلية أو التغير في الشفرة الوراثية ، مما ينتج عنه تشكل طفرة قد تكون سرطانية في الخلية ، أو حدوث تشوهات في الخلية أو فقدان المادة الوراثية قدرتها على نقل المعلومات الوراثية للخلايا الجديدة . فعند حدوث هذه الطفرات فمن الممكن أن تكون في الخلايا الجينية مسببة في انتقال هذه الطفرة الى الجيل القادم أو في الخلايا الجسدية مسببة انتقال هذه الطفرة الى الخلية المتولدة . ومن هنا فان التأثير البيولوجي المباشر للإشعاع يتمثل بالأغلب في تكون هذه الطفرات وانتقالها أو تطورها الى طفرات أخرى . وهذه التأثيرات تشمل الجرعات الصغيرة التي يتعرض لها الإنسان بشكل مستمر ، حيث يكون من الممكن أن تحدث هذا التأثير وبالتالي وجود تأثير تراكمي للإشعاع وبشكل احتمالي في الجرعات الإشعاعية لغاية 250 ملي جري . وبعد هذه الجرعة يبدأ هذا التأثير بالزيادة متناسبا مع مقدار الجرعة ، ولهذا فانه لا توجد قيم تجريبية يمكن أن يعول عليها في نطاق الجرعة من 0-250 ملي جري ولكن هناك العديد من الدراسات التي أكدت حدوث هذه التغيرات عند الجرعات العالية للإشعاع نتيجة احتمالية التأثير الثنائي للإشعاع الذي يحدث عندما يكون مقدار وطاقة

الإشعاع كافيين لأحداث كسر ثنائي في الرابطة الجزئية التي تربط مادة الحمض النووي الحامل للشفرة الوراثية (أي في موقعين مختلفين في السلسلة الوراثية) وهو ما يعرف ب (Theory of Dual Radiation Action) (بين الذرات المكونة للمادة الوراثية DNA) مما يفقد الخلية قدرتها على إعادة إصلاح نفسها وعملية الإصلاح تكون

أسهل عندما يكون الكسر في الرابطة من موقع واحد ، وبالتالي فإن عدد الخلايا المتضررة في هذه الحالة يتناسب مع مربع الجرعة .وعندما يكون مقدار الإشعاع وتأثيره الخطي كبير بحسب معامل النوعية للإشعاع تكون الاحتمالية لحدوث هذا التأثير المزدوج في موقعين متقاربين في السلسلة الوراثية أكبر مسيبا بذلك تدمير لنواة الخلية نتيجة فقدان الخلية قدرتها على إعادة إصلاح نفسها ، وفي المقابل فإن احتمالية أن تقوم الخلية بإصلاح نفسها ستكون أكبر عندما يكون الكسر في الرابطة أحادي ، ويتم في العادة تقدير مقدار هذا الضرر الناتج عن أي نوع من الإشعاع نسبة الى مقدار ونوع معياري من الأشعة وبالغالب تكون أشعة أكس أو أشعة جاما.

التأثير غير المباشر:

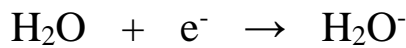
من المعلوم بان معظم الجسم الحي مكون من الماء ، وبالتالي فإن معظم التأثيرات المباشرة للإشعاع ستحدث في جزيئات الماء مسببة تفككها منتجة بذلك جذور حرة لها القابلية العالية على التفاعل مكونة بذلك مركبات سامة تؤثر على الخلايا من خلال هذه السمية ، فعند تعرض الماء الى الإشعاع فإن جزئي الماء سيتحلل حسب المعادلة التالية:



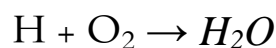
ومن ثم فإن الأيون الموجب للماء سيتحلل فوراً كما يلي:



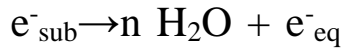
وبالمقابل فإن الإلكترون الحر سيتم أخذه من قبل جزئي ماء غير متحلل لينحل مباشرة ، حسب المعادلات التالية:



والزمن اللازم لحدوث هذه التفاعلات يبدأ بالمرحلة الفيزيائية وهي مرحلة التأين والإثارة، وزمن هذه المرحلة يبلغ 10^{-14} ثانية ومن ثم المرحلة قبل الكيميائية والتي يبلغ زمنها 10^{-11} ثانية ، يتم خلالها التحلل ، ومن ثم تأتي المرحلة الكيميائية التي يتم فيها تفاعل الجذور الحرة مع بعضها أو مع جزيئات أخرى في حال انتشارها في زمن يتراوح ما بين 10^{-6} - 10^{-11} ثانية حسب المعادلات التالية:



أما بالنسبة للإلكترونات التي تكون في حالة اقل بقليل من حالة التهيج *sub - excitation* والتي تكون قد تشكلت خلال المرحلة الفيزيائية تواصل عملية نقل الطاقة الى الماء المحيط بحركة دورانية ، لتصبح حرارية بعد فقدانها للطاقة وتعمل على تشكل مجموعة من جزيئات الماء حولها ، حيث يتجمع حول كل الإلكترون من ست الى ثمانية جزيئات من الماء بحيث يكون اتجاه ذرات الأوكسجين للخارج بسبب أن جزئي الماء بالأصل يملك مقدار زائد من الشحنة الموجبة عن ذرة الهيدروجين ، وزيادة قليلة في الشحنة السالبة عند ذرة الأوكسجين (قطبية جزئي الماء) وبالتالي فان الإلكترون يشكل جذر حر نقي غير مرتبط ويدعي بالإلكترون المائي كما هو مبين في المعادلة التالية



وفي حالة وجود إشعاع ذو قدرة تأين عالية مثل جسيمات ألفا فان معظم الجذور الحرة من *OH* ستتكون بالقرب من بعضها مما يزيد من قابلية تفاعلها مع بعضها قبل تفاعلها مع *H* مكونة بذلك مركب بيروكسيد الهيدروجين

الذي يكون مستقرا مع زمن كافي لانتشاره بعيدا عن منطقة التفاعل عالية التركيز الى المناطق الأقل تركيزاً ، وهذا المركب ذو قدرة عالية على التأكسد الذي يؤثر بطريقة غير مباشرة على الخلايا أما في حالة وجود *O2* فأنه سيتفاعل مع الجذر الحر *H* مكون بيروكسيد الماء الحر مما يزيد من سمية الإشعاع. أن عملية انتشار هذه الجذور الحرة والمركبات تتم في كافة الاتجاهات وبشكل عشوائي لمسافة مقدارها λ مقترنة خلال الزمن *t* وبالتالي فان مقدار ثابت الانتشار *D* يساوي:

$$D = \frac{\lambda^2}{6t}$$

فعلى سبيل المثال فأنه بعد زمن يساوي 10^{-12} ثانية فان المسافة التي تقطعها هذه الجذور الحرة تبلغ حوالي 1.1 انجستروم وبالمقابل فان قطر جزئي الماء يساوي 2.9 انجستروم ، ومن هنا نرى بان هذا يثبت بان الزمن 10^{-11} هو الزمن المناسب لبدء المرحلة الكيميائية و اقل من هذا الزمن ستبقى هذه الجذور الحرة في نطاق جزئي الماء ، وإذا بقي في مجال الجزئي ، فان احتمالية العودة الى وضعة السابق كبيرة ولكن بعد ابتعاده عن مجال الجزئي ، تكون احتمالية حدوث إحدى تفاعلات المرحلة الكيميائية أكبر .وبذلك فان مسار الجسيمات المشحونة في الماء الذي يمثل النسيج الحي يكون فقدان طاقة الجسيم فيه على طول هذا المسار نتيجة عمليات التأين و إنتاج الإلكترونات الثانوية .وهذه الإلكترونات بدورها ستقوم بتأين ذرات أخرى وإنتاج الإلكترونات ثانوية جديدة و كلما جرا ، ولغاية فقدان الكامل للطاقة التي يحملها الجسيم الرئيس والطاقة التي اكتسبتها النواتج الثانوية والتي ستؤدي الى إنتاج مجموعات من الجذور الحرة بعد زمن معين يلي الزمن اللازم للتفاعل الأصلي وبشكل منتشر عشوائي على طول المسار .

التأثيرات البيولوجية للأشعاع :

أن التأثيرات البيولوجية للإشعاع تنتج عن التأثير المباشر والتأثير غير المباشر للإشعاع معتمدا على مقدار الجرعة وعلى نوع الإشعاع .ويمكن لهذه الآثار البيولوجية أن تختلف عن بعضها البعض فمنها ما يظهر مباشرة وبسرعة ويدعى في هذه الحالة التأثير الحتمي للإشعاع **Deterministic-Effects** ويكون له حد عتبة معين والبعض الآخر قد يظهر بعد سنوات طويلة من التعرض للإشعاع وبشكل احتمالي أو غير عت *stochastic* . ومن هنا فأنه يمكن اعتبار نوعين رئيسيين من التعرض الإشعاعي ، الأول التعرض لجرعة عالية من الإشعاع في زمن قصير بشكل عرضي ويدعى هذا النوع بالتعرض الحاد وهذا النوع من التعرض تظهر فيه التأثيرات البيولوجية مباشرة أو خلال فترة قصيرة من الزمن بعد التعرض وبعد التعرض لمقدار معين من الإشعاع والنوع الآخر من التعرض هو التعرض لجرعة قليلة من الإشعاع وعلى مدى طويل وهذا يدعى بالتعرض المستمر أو التعرض المزمّن وفي هذه الحالة قد لا تظهر فيه التأثيرات البيولوجية مباشرة وقد تستغرق سنوات عدة بعد التعرض أو تظهر في الأجيال التالية وقد يكون ظهوره بشكل احتمالي وتزداد احتمالية الظهور مع الجرعة.

التأثيرات الحادة والحتمية :

عند تعرض الإنسان لجرعة عالية من الإشعاع فأثما ستؤثر على كافة أعضاء الجسم وحيث أن حساسية هذه الأعضاء تختلف من نوع الى آخر ، في حالات التعرض الإشعاعي ، هناك أعضاء في الجسم أكثر تأثراً بالإشعاع من أعضاء وأنسجة أخرى ، وبالتالي فان ظهور الأعراض المصاحبة للتعرض الإشعاعي الحاد ستظهر على الأعضاء الحساسة بالاعتماد على مقدار الجرعة الإشعاعية .فإذا كانت الجرعة الإشعاعية فوق حد العتبة لهذه الأنسجة فان الأعراض ستظهر مباشرة أو بشكل متأخر ولكنه شبه حتمي ، وبالعكس ذلك فان الأعراض أما أن تظهر لاحقا أو لا تظهر وتكون بشكل احتمالي .لذا وبناء على حساسية الأنسجة والأعضاء للإشعاع تم تقسيم الأعراض الى ثلاث فئات أولها أعراض الجهاز الدموي والثانية أعراض الجهاز الهضمي والأخيرة هي أعراض الجهاز العصبي المركزي مع وجود أعراض مشتركة تجمع بين هذه الفئات الثلاث مثل الغثيان والتقيؤ والإعياء وارتفاع درجة حرارة الجسم والتغيرات في الدم ، بالإضافة الى بعض أعراض اعتلال الجسم وبعض التغيرات على الجلد مثل الاحمرار والحروق في حالات التعرض الشديد والموضعي.

يعتبر التغير في عدد كريات الدم الحمراء والبيضاء من أهم الأعراض للتعرض الإشعاعي حيث أن خلايا الدم من أكثر الخلايا حساسية للإشعاع ، وبالتالي تكون بمثابة كاشف بيولوجي للتعرض الإشعاعي في حالات التعرض الحاد للإشعاع حيث انه من المحتمل ملاحظة هذه التغيرات بعد التعرض لجرعات تزيد عن 140 ملي جري والممكن أيضا أن لا تظهر هذه التغيرات لغايات 250-500 ملي جري وبعد هذه الجرعة فانه من شبه المؤكد

ظهور هذه التغيرات حيث أنه من المعروف أن ما نسبته 55% من الدم هي سوائل تدعى بـ بلازما الدم والبقية من المواد المكونة للدم والتي تشمل كريات الدم الحمراء والبيضاء والصفائح الدموية ، وان متوسط عدد كريات الدم

البيضاء يبلغ حوالي 7000 لكل ملم مكعب في الشخص الطبيعي وهي تمثل خط الدفاع الرئيسي في الجسم وهذه مكونة من نوعين رئيسيين من الخلايا هي *Lymphocytes* و *Granulocytes* وتبلغ نسبة الأولى حوالي 70-75% وتنتج في خلايا نخاع العظم وتعمر ثلاث أيام والثانية تبلغ نسبتها من 25-30% وتنتج في العقد الليمفاوية وتعمر لمدة يوم واحد وبعد التعرض الإشعاعي الحاد يكون هناك زيادة حادة في عدد *Granulocytes* يتلوها تناقص بعد يوم واحد لغاية بلوغ الحد الأدنى لتعود بعدها الى نسبتها الطبيعية بعد عدة أسابيع الى عدة اشهر بينما تتناقص نسبة *Lymphocytes* بحدة بعد التعرض وتبقى كذلك لعدة اشهر. وهذه التغيرات تعتبر من أحد المؤشرات على التعرض الإشعاعي الحاد وبالمقابل فان كريات الدم الحمراء لا تبدى هذا الأمر لغاية أسبوع بعد التعرض ثم تنخفض وتستمر بالانخفاض لغاية الوصول الى حدها الأدنى خلال شهر الى شهرين لتبدأ بالتعافي البطيء وقد يستغرق هذا التعافي عدة اشهر.

أما في حالة التعرض لجرعات إشعاعية أكبر من 2 جري ، يحدث تدمير لخلايا نخاع العظم المنتجة لكريات الدم وهذا يؤدي فورا لتعرض الجسم لهجوم الأمراض نتيجة فقدان الجهاز الدفاعي في الجسم لوظائفه، وهذا قد يلاحظ بعد عدة ساعات من التعرض ويكون على شكل غثيان وتقيؤ وعدم اتزان يتبعه بعد أسبوعين الى ثلاثة أسابيع من التعرض تساقط الشعر. وفي حال عدم المتابعة والمعالجة قد تحدث الوفاة خلال شهر الى شهرين بعد التعرض. أما التعرض لجرعات أكبر من 4-6 جري ، فان تلف نخاع العظم بالكامل مؤكد. وبالعموم فان هناك إمكانية لزراعة نخاع عظم جديد من متبرع متطابق نسيجيا مع المريض وفي حال نجاح عملية الزراعة فان النخاع يبدأ بالنمو مع المحافظة على عدم تعرض المريض الى الجراثيم والأمراض عن طريق عزلة في مكان معقم ونظيف. هذا العلاج متبع بالعادة في معالجة الأمراض المستعصية مثل سرطان الدم بعد عملية تشعيع كامل الجسم *Total Body Irradiation (TBI)* ، وتقنية تشعيع كامل الجسم تتم عن طريق تعريض المريض الى جرعة إشعاعية قد تصل الى 15 جري تعطي بشكل متقطع وعلى عدة جلسات حيث يتم تعريض المريض الى جرعة إشعاعية مقدارها 2 جري أو أقل في كل جلسة ليتم القضاء وتدمير خلايا نخاع العظم بالكامل ومن ثم يتم ذلك زراعة نخاع عظم سليم للمريض .

أما بالنسبة الى الفئة الثانية وهي أعراض الجهاز الهضمي فألها تظهر بعد التعرض لجرعة إشعاعية من أشعة جاما أو أشعة اكس مقدارها 10 جري أو أكثر ، تؤدي الى تقشر وتلف النسيج المبطن للجهاز الهضمي بالإضافة الى ظهور أعراض الجهاز الدموي التي ذكرت سابقا يحدث تقيؤ مستمر مع إسهال يظهر مباشرة بعد التعرض ويمكن أن تحدث الوفاة خلال أسبوع الى أسبوعين بشكل مرجح. وفي حال التعرض لجرعة إشعاعية تصل الى 20 جري أو

أكثر تبدأ أعراض المرحلة الثالثة بالظهور وهي أعراض الجهاز العصبي المركزي ، حيث تبدأ خلايا الجهاز العصبي والتي تعتبر بالعادة من الخلايا الأكثر مقاومة لتأثير الإشعاع بالتلف ، هذا بالإضافة الى تلف بقية الخلايا والأنسجة التي تكون اقل مقاومة لتأثير الإشعاع يؤدي الى تعرض المصاب الى إغماء بعد عدة دقائق من التعرض ومن ثم الوفاة خلال ساعات قليلة من التعرض .

بالإضافة الى ما تم ذكره توجد بعض التأثيرات الحادة الأخرى التي قد تحدث لأعضاء وأنسجة الجسم المختلفة بحكم موقعها بالجسم أو بحكم مقدار حساسيتها للإشعاع . ويعتبر الجلد احد هذه الأنسجة التي تتأثر بالإشعاع وبالأخص في حالة التعرض للأشعة السينية منخفضة الطاقة ولجسيمات بيتا حيث أن تعرض الجلد للأشعة السينية بمقدار 300روننتجن يسبب احمرار الجلد وزيادة الجرعة قد يسبب حروق وتغير في لون الجلد وتساقط الشعر وارتفاع حرارة الجلد والموت الموضعي للجلد .

التأثيرات المتأخرة للإشعاع:

التأثيرات المتأخرة للإشعاع قد تحدث نتيجة جرعات كبيرة في زمن قصير أو نتيجة تعرض منخفض للإشعاع لمدة طويلة، وهذا الأمر قد يحدث نتيجة تعرض خارجي للإشعاع فوق الحدود المسموح بها ، أو في ظروف وقاية إشعاعية سيئة بالإضافة الى التعرض الداخلي نتيجة تناول أو استنشاق نظائر مشعة قد تستقر في الجسم لفترات زمنية طويلة.

من أهم التأثيرات المتأخرة نتيجة التعرض للإشعاع هو احتمالية الإصابة بالسرطان في كل من الدم والجلد والعظام والرئتين والغدة الدرقية . و ظهور هذا المرض قد يستغرق سنوات أو أكثر ، حيث تعتبر الإصابة بسرطان الدم من الأهمية حيث انه نادر الحدوث في الحالات الطبيعية . سرطان الدم وسرطان العظم الذي يحدث نتيجة التعرض لعنصر الراديوم يمكن أن يحدث خلال سنتين الى أربعة سنوات بعد التعرض وخطر الإصابة بعد التعرض بالسرطان لا يمكن تجاهلها حتى لغاية 25-30 سنة . ومن التأثيرات المتأخرة أيضا ، هو الحد من قدرة الأنسجة على التجدد وبالتالي إضعاف قدرة الأنسجة على تجديد نفسها ، وهذا يعتبر مرض في الأنسجة بحد ذاته يمكن أن يصيب كل من العظم والجلد والرئتين والكلى والقناة الهضمية .

قصر الحياة (الأعمار بيد الله سبحانه وتعالى) يعتبر أيضا من التأثيرات المتأخرة للإشعاع فقد تبين في العديد من الدراسات والأبحاث بان الأشخاص الذين يتعرضون للإشعاع تكون أعمارهم اقل من الذين لم يتعرضوا للإشعاع وذلك بسبب فقدان بعض الأنسجة قدراتها على التجدد وكذلك تعتبر التغيرات الجينية والطفرات الجينية

من أهم أعراض التأثيرات المتأخرة للإشعاع ، وبالمقابل فقد تم توظيف الإشعاع لغايات إنتاج الطفرات في أصناف مختلفة من الكائنات الحية والنباتات لإحداث طفرات جينة قد تكون سيئة وقد تكون محمودة وبالتالي فان عملية

انتقاء هذه الطفرات المحمودة لتحسين الأصناف النباتية والحيوانية لزيادة الإنتاج أو أيجاد أنواع مقاومة للأمراض أو الظروف المناخية المختلفة ساهم بشكل إيجابي في هذه المجالات.

العلاقة بين الجرعة والاستجابة للتأثيرات:

أن العلاقة بين التأثيرات البيولوجية والجرعة الإشعاعية على مستوى الجزيئات أو على مستوى الخلية يمكن أن تفهم من وجهة النظر العلاجية بأنها مدى أهمية نقطة النهاية لها أما بموت الخلية أو بان تصبح خلية سرطانية وهذا الاعتبار يجب أخذه بعين الاعتبار في حالات التشخيص الإشعاعي بعدم الوصول الى هذه النقطة الحرجة للخلايا السليمة وبالتالي فان سلامة الخلية أو موتها المبرمج هو الاعتبار المهم. فعلى المستوى الجزيئي ، فان الإشعاع قد يتسبب في تدمير أحادي أو ثنائي لجزيئي الشيفرة الوراثية ، DNA وهذا التدمير قد يمكن أن تعالجه الخلية نفسها بواسطة الأنزيمات الخاصة لهذه الغاية وهذه العملية ستكون أسهل في حالة التلف القليل وصعبة كلما كان التلف أكبر والتلف عادة مرتبط ارتباط وثيق بنوع الإشعاع ، فالإشعاع أليسيمي الناتج عن الجسيمات الثقيلة أكثر تأثيراً من الإشعاع ذو الطاقة الانتقالية الخطية المنخفضة $LET - low$ فالجرعات الإشعاعية التي تقل عن 0.3 جري قد تحث الخلية على القيام برد فعل استجابي من حيث عملية الإصلاح ، مع إمكانية أن تتأخر هذه الاستجابة لعدة أسابيع بعد التعرض ولكن في النهاية فان عملية الاستجابة ممكنة ، حيث أظهرت الدراسات على الخلايا الحية المخبرية بان جرعة إشعاعية تقل عن 1 جري قد تعطي الخلية حافز إضافي لتصبح مقاومة للإشعاع. ولكن حتى عملية الإصلاح هذه تحتل عملية الخطأ في التركيب والترتيب الصحيح لهذه الجينات الوراثية بحيث يتم نقل معلومات مغلوطة للخلية وهذا يعتبر تدمير للشفرة الوراثية وبالتالي تدمير الخلية بإخراجها عن وظيفتها الأصلية. ولكن بالعموم فان شكل العلاقة بين الجرعة وان كانت منخفضة وعملية التلف الجيني تأخذ الشكل الرياضي الخطي - التربيعي $\alpha D + \beta D^2$.

ففي حالة استخدام الإشعاع لأغراض التشخيص فان الاهتمام يكون منصب على قضية التأثيرات تحت العتبة والتبعات الوراثية أما في حالة العلاج الإشعاعي فان القضية تكون منصبة على القدرة على قتل الخلية. فعند تعرض الأنسجة الحية للإشعاع فان جزء من هذه الخلايا يعود الى طبيعته في الانقسام والتكاثر وهذا النوع من الخلايا يدعى بالخلايا الناجية ويمكن استخدام هذا النسبة أيضا في التعبير عن مقدار نجاة الخلايا من الإشعاع وقدرتها على العودة الى الوضع الطبيعي في علاقة على شكل رياضي كما مبين أدناه:

$$S = S_0 e^{-\frac{D}{D_0}}$$

حيث أن S هي عدد الخلايا الناجية بعد التعرض لجرعة مقدارها D و S_0 عدد الخلايا الأصلية قبل التعرض للإشعاع و D_0 هي متوسط الجرعة التي يتم امتصاصها من قبل الخلية قبل الموت وفي حالة أن كانت الجرعة مساوية لمتوسط الجرعة الممتصة من قبل الخلية $D = D_0$ فان:

$$\frac{S}{S_0} = e^{-1} = 0.37$$

ولهذا السبب فإنه يتم تسمية D_0 باسم $D-37$

هذه العلاقة تصبح مهمة إذا تم الآخذ بعين الاعتبار أيضا معدل الجرعة فإن معدل النجاة يزداد مع انخفاض معدل الجرعة والعكس صحيح لذا فإن الأهمية تأتي في عملية العلاج الإشعاعي حيث يكون هناك تداخل ما بين الأنسجة السليمة والأنسجة المصابة فإن تقسيم الجرعة على شكل جرعات مجزئة وليست كجرعة واحدة مما يتيح لهذه الخلايا من زيادة معدل النجاة فيها وبالتالي التقليل من الأثر السليبي عليها.

الهدف يكون قتل الخلايا السرطانية

قدر الإمكان والإبقاء على الخلايا السليمة قدر الإمكان كذلك فإذا تم إعطاء الجرعة مرة واحدة فإن هذا يعني معدل جرعة عالي وبالتالي فإن احتمالية إعطاء فرصة للخلايا السليمة بإعادة بناء نفسها مجددا يصبح ضئيل وبالتالي فإن النجاة بالخلايا السليمة يصبح قليل جدا ولكن في حالة تجزئة الجرعة على زمن أطول فإن إعطاء الخلايا السليمة فرصة إعادة بناء نفسها تصبح أفضل بكثير حيث يزداد معدل النجاة للخلايا السليمة وبهذه الطريقة يمكن تحقيق الهدف المرجو من العلاج الإشعاعي. ومن هنا فإن معدل الجرعة أو زمن إعطاء الجرعة يصبح مهما جدا في قضية العلاج بالرغم من أن هناك أنواع من العلاج الإشعاعي الجسم *Stereotactic* يتطلب الأمر فيها إعطاء الجرعة بشكل كامل وفي جلسة واحدة بحيث يكون الإشعاع مركز بشكل كثيف على الأنسجة المصابة ولا يشمل الأنسجة السليمة وبهذه الطريقة يتم التقليل من فرصة إعادة نمو الخلايا السرطانية ، هذه الطريقة تستخدم عادة لمعالجة الأورام السرطانية في منطقة الدماغ

هناك عامل آخر يؤثر على مقدار قتل الخلايا ومقدار الاستجابة والتأثر بالإشعاع وهذا العامل هو عامل وجود الأوكسجين حيث أن معدل النجاة في الخلايا يتضاءل بوجود تركيز عالي من الأوكسجين في الخلايا وبالتالي مقدار تحقيق العلاج لأهدافه ، وهذا التأثير نتيجة التأثير غير المباشر للإشعاع والذي تم التحدث عنه سابقا وهذا التأثير يكون أكبر في حال الإشعاع ذو الانتقال الخطي للطاقة المنخفض حيث أن عملية التفاعل ضمن المسار نفسه اقل من الإشعاع ذو الانتقال الخطي للطاقة الأكثر .