بسم الله الرحمن الرحيم

جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا

كلية الدارسات العليا

التأثيرات الاحيائية للإشعاع ومعالجة النفايات المشعة

Biological Effects of Radiation and Curing of Radioactive Wastes

بحث تكميلي لنيل درجة الماجستير في الفيزياء

إعداد

مريم يوسف خضر علي

إشراف

د/ احمد الحسن الفكي

2019م

بسم الله الرحمن الرحيم

قال الله تعالى : {وَاللَّهُ خَلَقَ كُلَّ دَابَّةٍ مِن مَّاء فَمِنْهُم مَّن يَمْشِي عَلَى بَطْنِهِ وَمِنْهُم مَّن يَمْشِي عَلَى رِجْلَيْنِ وَمِنْهُم مَّن يَمْشِي عَلَى أَرْبَعٍ يَخْلُقُ اللَّهُ مَا يَشَاء إِنَّ اللَّهَ عَلَى كُلِّ شَيْءٍ قَدِيرٌ}(٤٥)

صدق الله العظيم

الإهداء

أهدي هذا البحث المتواضع إلى نبع الحنان أمي العزيزة، وإلى من سهر الليالى وكافح في دروب الحياة لكي يوفر لنا سبل العيش الهانئ والدي العزيز، وإلى من كان عوناً لي وساندني للوصول إلى مبتغاي زوجي وأبنائي ، و إلى الذين يسيرون معي في طريق العلم والمعرفة زملائي وزميلاتي ، وإلى من تحمل عبء ثقلنا وكان خير معين لنا دكتورنا الفاضل ، وإلى إخواني وكل من ساهم معي في إخراج هذا العمل المتواضع لكم التحية والتقدير.

الشكر والعرفان

إلهي لا يطيب الليل إلا بشكرك ولا يطيب النهار إلا بطاعتك ولا تطيب اللحظات إلا بذكرك ولا تطيب الآخرة إلا بعفوك ولا تطيب الجنة إلا برؤيتك.

الشكر أولاً وأخيراً لمن وفقني على إكمال هذا البحث المولى عز وجل . والشكر موصول إلى مؤسستي العامرة وأساتذتي الأجلاء ومع خالص تقديري وشكري للدكتور أحمد الحسن الفكي والشكر إلى كل من ساعدني وأخذ بيدي وأعطاني دافعاً قوياً لإكمال هذا البحث.

المستخلص

هدفت هذه الدراسة إلى معرفة الإشعاع والآثار البيولوجية الضارة الناجمة عنه، كما سلطت الضوء على النفايات المشعة وكيفية التعامل معها والتخلص منها بالطرق السليمة.

وأخيراً اقترحت الدراسة معايرة جميع الأجهزة المستخدمة في كافة المجالات قبل استخدامها وعرضها على الهيئة السودانية للمواصفات والمقاييس ، كما أوصت الدراسة بزيادة الحرص عند التعامل مع النفايات المشعة.

Abstract

The aimed of this stud was acquainted to the radiations and harmful biological effects also the effects of above radiation from that; the study enlightened the radiated litters, how to deal and getting rid of it following the sound and safe methods regarding that.

Finally, the study suggest calibrating all apparatus used in all field regarding the above study before using. Also, the study was recommended increasing the keenness when dealing with the radiation litters.

الفهرس

المحتويات	رقم الصفحة
الآية	I
الإهداء	II
الشكر والعرفان	III
المستخلص	IV
Abstract	V
فهرس المحتويات	VI
الباب الاول **المقدمة**	
١.١ المقدمة	١
١.١.١ إكتشاف الطاقة النووية	١
١.١.٢ الإستخدامات السلمية للطاقة النووية	١
١.٢ مشكلة البحث	٤
١.٣ أهداف البحث	٤
١.٤ محتوي البحث	٤
الباب الثاني **النشاط الاشعاعي والاشعاعات المؤينة**	
٢.١ النشاط الإشعاعي	٥
٢.١.١ دقائق ألفا	٦

٢.١.٢ دقائق بيتا	٧
٢.١.٣ اشعة غاما	٩
٢.٢ قانون التحلل الإشعاعي	١٠
٢.٣ الإشعاع المؤين	١٢
٢.٣.١ الفوتونات	١٣
٢.٣.٢ الجسيمات المشحونة	١٣
٢.٣.٣ الجسيمات غير المشحونة	١٣
الباب الثالث **التأثيرات البيولوجية الضارة للاشعاع**	
٣.١ المقدمة	١٤
٣.٢ التصرف الزمني لتأثير الأشعة	١٤
٣.٢.١ الطور الفيزيائي	١٥
٣.٢.٢ الطور الكيميائي	١٥
٣.٢.٣ الطور البيولوجي	١٥
٣.٣ التأثيرات البيولوجية الضارة للأشعاع	١٦
٣.٤ تأثيرات الإشعاع على مستوى الجزئيات الكبيرة	١٨
٣.٤.١ تأثيرات الإشعاع على البروتينات	١٨
٣.٤.٢ تأثيرات الإشعاع على الإنزيمات	١٩
٣.٤.٣ تأثيرات الإشعاع على الأحماض النووية	١٩
٣.٤.٤ تأثيرات الإشعاع على الدهون	٢٠

٣.٤.٥ تأثيرات الإشعاع على الكربوهيدارت	٢٠
٣.٥ تأثيرات الإشعاع على مستوى الخلية	٢٠
٣.٦ تأثيرات الإشعاع على الأجهزة البيولوجية	٢٢
٣.٧ عامل التأثير البيولوجي النسبي	٢٦
الباب الرابع **النفايات المشعة**	
٤.١ المقدمة	٢٧
٤.٢ إدارة النفايات	٢٨
٤.٣ تصنيف النفايات	٢٨
٤.٣.١ النفايات منخفضة المستوى الإشعاعي	٢٨
٤.٣.٢ النفايات متوسطة المستوى الأشعاعي	٢٩
٤.٣.٣ النفايات عالية المستوى الإشعاعي	٢٩
٤.٤ مصادر النفايات المشعة في دورة الوقود النووي	٢٩
٤.٤.١ النفايات المتخلفة من إستخراج اليورانيوم	٣٠
٤.٤.٢ النفايات المتخلفة عن إثراء اليورانيوم	٣١
٤.٤.٣ النفايات المتخلفة عن تشغيل المفاعلات	٣١
٤.٥ إشعاع من صنع الإنسان	٣٣
٤.٦ نواتج الإنشطار	٣٤
الباب الخامس **النتائج والمناقشة**	
٥.١ المقدمة	٣٦

٥.٢ التعامل مع النفايات	٣٦
٥.٢.١ تكييف النفايات الناتجة عن إعادة معالجة وقود مفاعل الماء الخفيف	٣٧
٥.٢.١.١ تقسية وتخزين النفايات السائلة ذات المحتوي الإشعاعي العالي	٣٧
٥.٢.١.٢ تقسية وتخزين النفايات الصلبة ذات المحتوي الإشعاعي العالي	٤٠
٥.٢.١.٣ معالجة النفايات ذات المحتوي الإشعاعي المتوسط	٤١
٥.٢.١.٤ معالجة ماتبقى من النفايات	٤١
٥.٢.٢ مستودعات النفايات النووية	٤٣
٥.٢.٢.١ التخلص من النفايات عن طريق الإنفاق العميقة	٤٣
٥.٢.٢.٢ التخلص المباشر من عناصر الوقود المستخدم	٤٤
٥.٣ الصحة العامة والسلامة وعلاقتهما بالتخلص من النفايات	٤٤
٥.٤ التوصيات العامة المتعلقة باستعمال مصادر الإشعاع	٤٥
٥.٥ الخاتمة	٤٦
٥.٦ التوصيات	٤٧
المصادر والمراجع	٤٨

الباب الأول

المقدمة

١.١ الطاقة النووية

تعتبر الطاقة النووية اليوم بديلاً مهماً عن النفط والغاز بتحويلها حلماً لعلماء الطاقة النووية قبل الحرب العالمية الثانية إلى واقع خلال السنوات 1940-1945 عندما تم بنجاح إختراع وإختبار أول مفاعل نووي. وقد حدث تطور هائل في التقنية النووية خلال العقود الأربعة الماضية وأصبحت العلوم النووية أساساً في بعض الأبحاث الطبية والزراعية والصناعية.

١.١.١ إكتشاف الطاقة النووية

لقد بدأت الأبحاث النووية منذ أواخر القرن التاسع عشر من خلال ما قام به الفيزيائي الفرنسي هنرى بيكريل حيث حدد طبيعة الإشعاع عام 1896 وإكتشف الإلكترونات في العام الثاني. وفي عام 1989 نجح كل من بيار وماري كوري في عزل المواد الطبيعية المشعة وهي الراديوم والبولونيوم في أواخر القرن العشرين وظهرت أسس الفيزياء النووية من خلال الأبحاث التي قام بها ثلاثة علماء والذين إقترنت أسماءهم فيما بعد بالقنبلة النووية الأولي وهم أدوارد تيليد , أتريكو فيرمي وج -روبرت أوبنهايمر [١].

١.١.٢ الإستخدامات السلمية للطاقة النووية

(A) إنتاج الطاقة الكهربائية

في العام 1954 تم إنشاء أول مفاعل نووي لإنتاج الطاقة الكهربائية في الإتحاد السوفيتي سابقاً . وفي العام 1956 أنشئت في بريطانيا أول محطة لتوليد الكهرباء تعمل بالطاقة النووية في أوربا . وخلال العقود الثلاثة الأخيرة من القرن العشرين أتسع نطاق إستخدام الطاقة النووية في مجال توليد الطاقة الكهربائية في العديد من دول العالم . ولاسيما فإن الطاقة

النووية تزود دول العالم باكثر من 16% من الطاقة الكهربائية فهي تمد 35% من إحتياجات دول الإتحاد الأوربي، واليابان تحصل على % 30 من إحتياجاتها من الكهرباء من الطاقة النووية بينما تعتمد بلجيكا وبلغاريا والمجر وسلوفاكيا وكوريا الجنوبية والسويد وسويسرا وأوكرانيا على الطاقة النووية لتزويد ثلث إحتياجاتها من الطاقة . إن كمية الوقود النووي المطلوبة لتوليد كمية كبيرة من الطاقة الكهربائية أقل بكثير من كمية الفحم أو البترول اللازمة لتوليد الكمية نفسها . مثلاً طن واحد من اليورانيوم يولد طاقة كهربائية أكبر بملايين من براميل البترول أو ملايين الأطنان من الفحم.

تشغل المحطات النووية لتوليد الطاقة مساحات صغيرة نسبياً من الأراضي مقارنة مع محطات التوليد التي تعتمد على الطاقة الشمسية؟ فقد أكدت اللجان التنظيمية للمفاعلات النووية على أننا بحاجة إلى حقل شمسي بمساحة تزيد عن 35 ألف فدان لإنشاء محطة تدار بالطاقة الشمسية لتوليد طاقة تعادل ما تولده المحطة النووية بمقدار 1000 ميقا وات.

(B) مجال الطب والصيدلة

الطب النووي هو فرع من علم الطب، تستخدم فيه النظائر المشعة لتحديد المرض ومعالجته. لقد أدى التطور الكبير للتقنيات المعتمدة على إستخدام النظائر المشعة في تشخيص الأمراض إلى تطور كبير في قدرة الأطباء على التشخيص الدقيق لمختلف الحالات المرضية مما كان له الأثر الكبير في نجاح إستخدام العلاج. فقد تمكن الأطباء من تحديد حجم الدم في جسم الإنسان وتحديد حجم البلازما ومن دراسة الدورة الدموية في الشرايين وتحديد أماكن الضعف بها كما تم تشخيص أمراض القلب وتحديد مدى الضيق في صماماته وتحديد كفاءتها.

لقد وفرت النظائر المشعة إمكانيات هائلة في مجال الصيدلة من خـــلال إســـتخدام المـــوارد الكيميائية والصيدلانية الموسومة بالنظائر المشعة. فقد أمكن بصورة دقيقة التعرف على تأثير الدواء ومساره وتحولاته داخل جسم الإنسان أو النبات.

(C) مجال الزراعة وإنتاج الغذاء

لقد دفع إستخدام النظائر المشعة بالعلوم الزراعية وعلوم الأراضي أشواطاً كبيرة إلى الأمام مما أدى إلى ظهور عصر جديد يمكن أن نسميه عصر الزراعة النووية فقد أمكن بإستخدام النظائر والإشعاع دارسة خصائص العلاقة الثلاثية بين الأرض والنبات والماء والوصول إلى حقائق أساسية ومعلومات إضافية لم يكن من الممكن الحصول عليها إلا بإستخدام النظائر المشعة والإشعاع .فقد تمت دراسة الأراضي ونوعياتها وخصائصها ومكوناتها، وأساليب إنتقال الغذاء والماء من خلالها إلى النبات وأثر ذلك في نمو النبات .وكذلك تعتبر دراسة إمتصاص الأسمدة والمبيدات من الخطوات التي ساعدت على ضبط عملية التسميد.

وإذا كان تطوير آليات الإنتاج الزراعي وتفهمها لرفع الإنتاج إلى نتائج إيجابية واضحة فـــإن إستحداث ما يسمى بالطفرات النباتية قد أدى إلى نتائج باهرة. فقد إســـتخدمت بعـــض أنـــواع الأشعة للتأثير على الجينات النباتية وأحداث طفرات فيها لتحسين المحاصيل الزراعية بإشراف منظمة الأغذية والزراعة بالتعاون مع الوكالة الدولية للطاقة الذرية.

(D) مجال الصناعة

تستخدم المواد المشعة على نطاق واسع في التطبيقات الصناعية على المستوى العالمي بإجراء العمليات الصناعية أو ضبط جودة المنتجات. وذلك من خلال إستخدام المعامل والماكينات التي تعتمد على نظم الضبط الإشعاعية، ففي صناعة النفط تستخدم النظائر المشعة لتحديد ســـرعة

تدفق النفط عبر الأنابيب وفي صناعة الرقائق تستخدم المصادر المشعة في ضبط سماكة الرقائق وتعديلها.

١.٢ مشكلة البحث

يتركز هذا البحث حول الآثار البيولوجية الضارة للإشعاع وكيفية التخلص من النفايات المشعة بطرق سليمة وذلك نسبه للزيادة في عدد السكان وبالتالي زيادة الطلب لمصادر الطاقة لسد النقص مما دفع هذا البحث لإجراء مسح لمعرفة كيفية التخلص من النفايات المشعة بطرق سليمة .ومن دوافع هذا البحث إستخدام الطاقة النووية للإستفادة منها في ميادين شتى مع درء خطرها لأنها تمثل خير بديل.

١.٣ أهداف البحث

i. معرفة الإشعاع والآثار البيولوجية الضارة الناجمة عنه.
ii. دراسة مصادر النفايات المشعة وكيفية التعامل معها ومعالجتها.
iii. تسليط الضوء على الطرق السليمة للتخلص من النفايات المشعة.
iv. وضع أطر عامة للإرشاد والتوعية الذرية الإشعاعية لدرء المخاطر الإشعاعية ما أمكن ذلك.

١.٤ محتوى البحث

لم يغفل هذا البحث من التطرق للتطورات الحديثة لأنظمة الطاقة النووية حيث تناول الباب الأول المقدمة والتي تحتوي على إكتشاف الطاقة النووية والإستخدامات السليمة لها والباب الثاني عنوانه النشاط الإشعاعي والإشعاعات المؤينة بينما تناول الباب الثالث التأثيرات البيولوجية الضارة للإشعاع , والباب الرابع النفايات المشعة وأنواعها ومصادرها وبعد ذلك إستعرض الباحث مناقشة كيفية التخلص من النفايات المشعة بطرق سليمة والخاتمة والتوصيات في الباب الخامس.

الباب الثاني

النشاط الاشعاعي والاشعاعات المؤينة

٢.١ النشاط الإشعاعي Radioactivity

تم إكتشاف النشاط الإشعاعي على يد هنري بيكرل في اوائل عام ١٨٩٦م وذلك عندما وجد أن ذرات اليورانيوم Z= 92 تصدر إشعاعات تؤثر على الأفلام والشرائح الفوتوغرافية وتجعلها سوداء وبعد عامين من ذلك الإكتشاف نجح كل من ماري وبيبر كوري في فصل عنصرين مشعين جديدين هما البولونيوم z=84 والراديوم z=88 ومنذ ذلك الحين أصبح معلوماً أن كل العناصر التي يزيد عددها الذري عن 83 تعتبر مشعة، والعناصر المشعة هي عادة عناصر غير مستقرة لذا فهي تتخلص من جزء من طاقتها في صورة إشعاعات وتحدث ظاهرة النشاط الإشعاعي في الأنوية التي تكون فيها نسبة عدد البروتونات إلى النيوترونات كبيرة وبالتالي تصبح النواة غير مستقرة . ولكي تصل هذه النواة إلى حالة الاستقرار فإنها تتخلص من الطاقة الزائدة ببثها في صورة إشعاعات وقد دلت التجارب إلى أن هنالك ثلاثة إشعاعات مختلفة تنطلق من المواد المشعة تم التمييز بينها بقياس إنحرافها بتأثير المجالين الكهربي والمغناطيسي وتم إختبار مقدرة الإشعاعات على اختراق المواد المختلفة وهذه الإشعاعات هي: دقائق ألفا ونرمز لها بالرمز α ودقائق بيتا ونرمز لها بالرمز β وأشعة غاما ونرمز لها بالرمز γ [٢].

والمعدل الذي تتفتت أو تضمحل به أي مادة مشعة معينة ثابت ومستقل تقريباً عن جميع الظروف الفيزيائية والكيميائية. فإذا توفر لدينا عدد كبير من ذرات نظير مشع معين فإننا نجد

أن عدد الذرات د ن الذي يتفتت في فترة زمنية صغيرة د ز يتناسب مع عدد الذرات ن الموجودة عند الزمن ز [٣].

٢.١.١ دقائق ألفا

هي عبارة عن نواة ذرة الهيليوم $_2He^4$ وتحوي بروتونين ونيوترونين. وعندما تنبعث أشعة ألفا من نواة مثل $_zx^A$ فأنها تتحول إلى نواة أخرى ($_{z-2}Y^{A-4}$) وتكتب معادلة الانحلال الإشعاعي للنواة الأصلية في الصورة:

$$ {}^{A}_{z}\mathrm{X} \longrightarrow {}_{z-2}\mathrm{Y}^{A-4} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} $$

$$ {}^{A}_{z}\mathrm{X} \longrightarrow {}_{z-2}\mathrm{Y}^{A-4} + \alpha \qquad (٢.١) $$

وهذا يعني إن إنطلاق أشعة ألفا من النواة المثارة يؤدي إلى نقصان عدد الكتلة بمقدار 4 بينما ينقص العدد الذري بمقدار 2.

فإذا كانت النواة الأصلية (الأم) x ساكنة وعندما انطلقت أشعة ألفا بطاقة حركية مقدارها ($T\alpha$) إرتدت النواة الناتجة y بطاقة حركية مقدارها (Ty) فإن قانون بقاء الحركة لهذه العملية يكون في الصورة

طاقة النواة الأصلية = طاقة النواة الناتجة+ طاقة أشعة α

$$ (\mathbf{M}_{\alpha}C^2 + T_{\alpha}) + (M_yC^2 + T_y) = M_xC^2 $$

$$ (M_{\alpha} + M_y)\,C^2 + T_{\alpha} + T_y = M_xC^2 \qquad (2.2) $$

حيث أن :

طاقة كتلة جسم ألفا = $M_\alpha c^2$

طاقة كتلة النواة الناتجة y = $M_y C^2$

طاقة كتلة النواة الأصلية X = $M_x C^2$

سرعة الضوء فى الفراغ = C

أما طاقة التفتت Q التي تعرف بأنها هي الطاقة المستنفده في التفتت فهي تساوي مجموع طاقتي حركة ألفا والنواة y أي أن :

$$Q = T_\alpha + Ty = (Mx - My - M_\alpha)\, C2 \qquad (٢.٣)$$

مدى جسيمات ألفا (المسافة التي تستطيع أشعة ألفا سيرها في الهواء تحت ظروف قياسية تؤخذ بدرجة حرارة $10^{\circ}C$ وضغط جوي واحد) من المصدر إلي نقطة لا تستطيع فيها توليد أيونات جديدة هو حوالي 10cm للمصادر الطبيعية لأشعة ألفا [٤].

٢.١.٢ دقائق بيتا "β"

دقائق بيتا السالبة هي عبارة عن الكترونات. وتنطلق دقائق بيتا السالبة من النواة التي يوجد بها عدد كبير من النيوترونات يزيد عن عدد البروتونات التي فيها.

ولكي تستقر النواة فلابد أن يقل عدد النيوترونات، ولكي يقل عدد النيوترونات فان النيوترون يفتت إلى بروتون وإلكترون وجسم ثالث يسمي ضديد النيوترينو ونرمز له بالرمز (υ^-) حيث يبقي البروتون بالنواة بينما تنطلق الالكترونات في شكل أشعة تسمي بأشعة بيتا السالبة وينطلق معها أيضاً ضديد النيوترينو.

$$n \longrightarrow P + \beta^- + \upsilon^- \qquad (٢.٤)$$

وتتحلل النواة (X) التي نسميها بالأم عندما تشع دقائق بيتا السالبة فتتحول إلى نواة أخــرى(Y) نسميها بالابنة وتكون معادلة التحلل في الصورة

$$ {}^{A}_{z}X \longrightarrow {}^{A}_{z+1}Y + \beta^{-} + \upsilon^{-} \qquad (٢.٥) $$

وكمثال على ذلك عنصر البورن B الذي تنطلق فيه أشعة بيتا فيتحول إلى عنصر الكربون كما في المعادلة

$$ {}^{12}_{5}B \longrightarrow {}^{12}_{6}C + \beta^{-} + \upsilon_{e}^{-} \qquad (2.6) $$

حيث يؤدي تحول النيوترون إلى بروتون لزيادة العدد الذري من Z إلى Z+1 . أما دقائق **β** الموجبة فهي عبارة عن بوزيترونات (ضديدات الالكترون e^{+}) وهي تنطلق من الأنوية التي يوجد بها عدد كبير من البروتونات والتي تتخلص منها النواة بتحلل البروتون p الى نيوترون n وبوزيترون e^{+} ونيوترينو حسب المعادلة :

$$ P \longrightarrow n + e^{+} + \upsilon_{e} \qquad (2.7) $$

وعادة ما تشع النواة الأم التي توجد بها بروتونات زائدة دقائق بيتا الموجبة للتخلص من هذه البروتونات الزائدة حيث تتحلل لتتحول الى نواة أخرى نسميها بالاينة.

وتكون معادلة التحلل في الصورة :

$$ {}^{A}_{z}X \longrightarrow {}^{A}_{z-1}Y + \beta^{+} + \upsilon \qquad (2.8) $$

ومن العناصر التي تطلق أشعة **β**+ هي عنصر النيتروجين N الذي يتحلل لعنصر لكربونC حيث تكون معادلة التحلل في الصورة

$$^{12}_{7}N \rightarrow {}^{12}_{6}C + e^{+} + v \qquad (2.9)$$

لا تحدث العمليات التلقائية بتكون جسيمات ذات كتلة أقل. وحيث أن النيوكليونات خلال إنحلال بيتا توجد في حالة مترابطة مع النيوكليونات الأخرى. لذلك فإن العلاقات الكتلية يجب أن تضم كتل الذرات **Ma**. وشرط إنحلال بيتا السالبة هو التالي:

$$M_a(A,Z) > M_a(A,Z \pm 1) \qquad (2.10)$$

أما شرط إنحلال بيتا الموجبة هو:

$$M_a(A,Z) > M_a(A,Z-1)+2m \qquad (2.11)$$

ويضاف التصحيح 2m في العلاقة الأخيرة لأنه توجد أثناء إنحلال **β**+ ذرة بها Z-1 من الإلكترونات كما يوجد خارج حدود الذرة بوزيترون وإلكترون ذري [٥].

2.1.3 أشعة غاما

أشعة غاما هي عبارة عن فوتونات تحمل الطاقة الكهربية المغنطيسية. وهذا يعني أنها موجات كهرومغناطيسية وتنبعث أشعة غاما من الأنوية المثارة التي تحمل طاقة زائدة والتي تكون في مستوى طاقة مثار أي اكبر من المستوى الأرضي فإذا كانت طاقة النواة المثارة تساوي E_2 ثم إنتقلت هذه النواة إلى مستوى الطاقة الأقل E_1 فان النواة تطلق فوتونا تردده f.

$$E_2 - E_1 = hf \qquad (2.12)$$

تشكل هذه الفوتونات التي تحمل الطاقة الزائدة أشعة غاما.

- امتصاص أشعة غاما من قبل المادة

إن الميزة الأساسية لامتصاص أشعة غاما هي التناقص الأسي في شدة الإشعاع المتجانس لأشعة غاما المار خلال شريحة رقيقة من المادة.

عند سقوط شعاع من أشعة غاما شدته (I) علي شريحة سمكها (ΔX)، فإن التغير في شدة الإشعاع عند مروره خلال الشريحة يتناسب مع سمك الشريحة وشدة الإشعاع الساقط استناداً إلى العلاقة الآتية:

$$\Delta I = -\mu I \Delta X \qquad (2.13)$$

حيث μ ≡ معامل الإمتصاص [٦].

2. 2 قانون التحلل الإشعاعي

تكون العناصر الثقيلة الموجودة في الكون غير مستقرة لان بعضها قد يكون بـــه بروتونـــات زائدة أو نيوترونات زائدة أو طاقة زائدة لذا فهي تشع جسيمات أو موجات كهرومغناطيســـية للتخلص من الفائض الذي يوجد بها . فهناك عناصر طبيعية مشعة مثل اليورانيوم والبولونيوم. وهناك عناصر مشعة صناعياً وهي عناصر تمت معالجتها لتصبح عناصـــر مشـــعة وهـــذه العناصر لا توجد في الطبيعة، لكن يتم تحضيرها في المفاعلات النووية ومثـــال لـــذلك اليـــود 131 وبغض النظر عن مصدر المادة المشعة ونوعها وعمرها فإننا نجد أنهـــا تتحلـــل كلهـــا بطريقة واحدة وتتحلل النواة عادةً عندما تنبعث منها دقائق α أو β او γ. ونرمز لعدد الانوية الموجودة عند اللحظة t بالرمز N . ولثابت الانحلال بالرمز λ فإذا كان عدد الانويـــة التـــي تتحلل في ثانية واحدة من عنصر معين هو $\frac{dN}{dt}$ فان ثابت الانحلال يعرف بأنه هو:-

$$\lambda = \frac{\frac{-dN}{dt}}{N} = \frac{\text{عدد الأنوية المتحللة في الثانية}}{\text{عدد الأنوية عند اللحظة } t}$$

$$\int_{N_0}^{N} \frac{dN}{dt} = -\lambda \int_0^t dt \qquad (٢.١٤)$$

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t$$

$$\ln(N - N_0) = -\lambda t$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (٢.١٥)$$

ويسمى هذا القانون بقانون التحلل الإشعاعي وهو يعطي علاقة بين عدد الانوية N عند اللحظة tوعدد الانوية N_0 عند اللحظة. t=o حيث يبين هذا القانون أن عدد الانوية N يتناقص بمرور الزمن وان هذا التناقص يتوقف معدله على ثابت الانحلال.

ويمكن تعريف عمر النصف $T_{\frac{1}{2}}$ بأنه هو الزمن اللازم لكي يتناقص عدد الانوية بمقدار النصف أي أن :

$N = \frac{1}{2} N_0$ عندما $t = T_{\frac{1}{2}}$

$$\frac{1}{2} N = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}$$

$$e^{\lambda T_{\frac{1}{2}}} = 2$$

$$\lambda \, T_{\frac{1}{2}} = \ln 2$$

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{ln\,2}{\lambda} = \frac{0.692}{\lambda} \qquad (٢.١٦)$$

ويعرف النشاط (A= Activity) A بأنه هو معدل المتحللة أي عدد الانوية المتحللة في ثانية حيث نجد أن :

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} = -\lambda N \qquad (٢.١٧)$$

وتستخدم ظاهرة النشاط الإشعاعي في علم الآثار والحفريات في تقدير عمر البقايا المتحجرة ويستفاد منه في علم الأرض (الجيولوجيا) في تقدير عمر الطبقات الرسوبية والحقب الجيولوجية المختلفة . كما يستخدم في تقدير كمية الدم والماء الموجود في جسم الإنسان وفى معرفة المواد التي تمتصها النباتات من التربة ويستفاد منها أيضاً في تسخين الماء وإدارة المحركات الكهربائية.

٢.٣ الإشعاع المؤين

يعرف الإشعاع بأنه عملية إنتقال الطاقة من المصدر إلى المادة بشكل دقائق أو بشكل موجات .وعندما تكون لهذه الإشعاعات قابلية على تايين ذرات المادة وذلك بفقدانها او اكتسابها إلكترون أو أكثر فتسمي هذه الإشعاعات بالإشعاعات المؤينة[٧].

وتنقسم الإشعاعات المؤينة إلى :

٢.٣.١ الفوتونات : وهي الإشعاعات التي تحمل الطاقة نتيجة لتذبذب المجال الكهربي والمغناطيسي المنتقل في الفراغ وبسرعة تساوي سرعة الضوء واهم هذه الإشعاعات هي الأشعة السينية وأشعة غاما.

٢.٣.٢ الجسيمات المشحونة : وهي الدقائق الذرية أو دون الذرية والتي تحمل طاقة حركية مثل الالكترونات السريعة (جسيمات بيتا) وجسيمات ألفا.

٢.٣.٣ الجسيمات غير المشحونة : وهي النيوترونات وهي جسيمات عديمة الشحنة كتلتها تساوي كتلة البروتون ، اكتشف العالم شادويك عام 1932 هذه الجسيمات عندما كان يقصف هدف من البريليوم بجسيمات الغازات عالية الطاقة حيث لاحظ انبعاث إشعاعات لها قدرة على التأين غير المباشر وبأنها تحرر بروتونات سريعة عندما تتفاعل مع المواد الحاوية على الهيدروجين وتوصل إلى أن هذه الأشعة ليست بفوتونات وإنما جسيمات عديمة الشحنة وتوضح المعادلة التالية انبعاث النيوترون حسب تجارب شادويك

$$^{9}Be + {}^{4}He \longrightarrow {}^{1}n + {}^{12}c \qquad (2.18)$$

حيث أن n هو النيوترون والذي بلغ عدده الكتلي .1 والنيوترونات تنبعث عادة من النواة وتملك طاقة عالية جدا وتسمى بالنيوترونات السريعة وعند مرورها في المواد الخفيفة فإنها تهدأ مولده نيوترونات ذات طاقة قليلة . وهذه النيوترونات خطرة على الجسم البشري لقدرتها على تنشيط المواد أي تحويلها من مواد مستقرة إلى مواد مشعة . أو أن النيوترونات يمكن أن تحدث عملية الانشطار المتسلسل إذا قصفت النواة بنيوترونات سريعة أو حرارية.

الباب الثالث

التأثيرات البيولوجية الضارة للإشعاع

٣.١ المقدمة

تشمل الإشعاعات المؤينة كل الإشعاعات التي لها المقدرة على تأيين ذرات المادة بطريقة مباشرة أو غير مباشرة ، والإشعاعات المؤينة مباشرةً هي الجسيمات المشحونة مثل الإلكترون والبروتون وجسيمات ألفا. أما الإشعاعات غير المؤينة مباشرةً فهي تشمل الأشعة السينية والنيوترونات. تتفاعل هذه الإشعاعات مع المادة بطرق مختلفة حسب نوع الإشعاع وطاقته ونوعية المادة ، كل التفاعلات الإشعاعية تؤدي إلى فقدان جزئي أو كلي لطاقة الإشعاع ، مما يحدث تغيرات كيميائية وفيزيائية للمادة ، عندما تتفاعل الإشعاعات النووية مع جسم كائن حي فإن تلك التغيرات المادية تصبح لها تأثيرات بيولوجية ربما تدخل حياة ذلك الكائن الحي في خطر. ولذلك يجب وضع قواعد لتعامل الإنسان مع هذه الإشعاعات ، لكي يتمكن من التعامل معها والاستفادة منها في شتى الميادين دون أن يعود ذلك عليه بالضرر.

كان تعامل الإنسان مع الإشعاعات في بداية الأمر بطريقة طبيعية دون حذر ، وذلك لأن التأثيرات البيولوجية للإشعاع غير محسوسة وغير سريعة ، ولكن بعد فترة من الزمن تظهر تلك التأثيرات على شكل أعراض مرضية خطيرة ومتنوعة. وكان أول الضحايا لذلك العلماء الذين استخدموا هذه الإشعاعات في بحوثهم. وعندئذٍ سرعان ما بدأ الاهتمام بهذه الظاهرة وشكلت اللجان والجمعيات لدراسة التأثيرات البيولوجية للإشعاع ، ووضع قواعد الوقاية والحد من التلوث الإشعاعي بخلاف ما حدث في نشاطات إنسانية أخرى كيميائية أو غيرها ، والتي لها تأثيرات على الإنسان والبيئة[٨].

٣.٢ التصرف الزمني لتأثير الأشعة

يُجزأ تأثير التصرف الزمني للأشعة إلى ثلاثة أطوار ، وهي[٩]:

٣.٢.١ الطور الفيزيائي

يعطي الإشعاع طاقته للمادة الحية ، تنجم عن ذلك العمليات ذاتها كما لدى المادة غير الحية. يدوم هـذا الطور نحو 10^{-13} ثانية.

٣.٢.٢ الطور الكيميائي والفيزيائي

تتولد من خلال التفاعلات مواد اسمها الجذور الحيوية وتحدث تشوشاً في العمليات البيولوجيـة. يـدوم هذا الطور10^{-6} ثانية. أن التأثير في هذا التشويش يبدو ممكناً من خلال تقديم وقائي لمواد كيميائية تمنع تشكيل الجذور البيولوجية. إن المواد المانحة للإلكترونات تقلل من تشـكيل هـذه الجـذور ، والمـواد المستقبلة للإلكترونات تقوي تشكليها مثل الكوفيين.

إن إمتصاص الطاقة في الطور الفيزيائي يحدث بشكل خاص في جزيئات الماء. يؤثر الأيون الموجـب المشكل في الطور الكيميائي في الشكل التالي:

$$H_2O^+ \ + \rightleftarrows H^+ + OH^- \quad (3.1)$$

(تحدث أيضاً العملية العكسية " إعادة التركيب ")

ويؤثر أيضاً الإلكترون المشكل كالتإلى:

$$e^- + H_2O \rightleftarrows OH^- + H \quad (3.2)$$

هذه النواتج أي OH وH الهامة من الناحية البيولوجية تسمى جذوراً مائيـة. إن للجـذور H^+ تـأثير اختزالي بينما للجذور OH^- تأثير تأكسدي.

تتمكن الجذور المائية من التفاعل داخل الخلية مع جزئيات هامة تسمى الجزيئات البيولوجيـة. بسـبب التصرفات المعقدة في الخلية تتمكن الجذور الحيوية من إحداث اضطرابات أي أضرار في الخلية.

٣.٢.٣ الطور البيولوجي

تؤثر الجذور الحيوية في التصرفات الحيوية في الخلية ، وتتمكن بذلك من إحداث أضرار منظورة وفي بعض الحالات تكون سبباً في الوفاة.

يدوم هذا الطور سنوات عديدة ، يكون التدخل الطبي خلالها ممكناً ، وتتجلى اضطرابات الخلية في حدوث أمراض في عضو ما[٩].

٣.٣ التأثيرات البيولوجية الضارة للإشعاع

وتشمل هذه التأثيرات نوعان هما:

(A) التأثيرات المباشرة أو العاجلة.

(B) التأثيرات غير المباشرة أو الآجلة.

تعتمد شدة الآثار البيولوجية للإشعاع على العوامل الآتية:

i. **نوع الإشعاع:** هل هو جسيمات أو موجات كهرومغناطيسية ، وما هي سرعته والطاقة التي يحملها والشحنة الكهربائية إن وجدت. فكلها تؤثر في شدة التأثير الإشعاعي على الكائن.

ii. **الجرعة الكلية للإشعاع:** هي التي يتعرض لها الكائن الحي هل هي عالية (مميتة) أو منخفضة (أقل من المميتة) أو ضعيفة جداً (أثرها بسيط).

iii. **طريقة التشعيع:** هل الجرعة الإشعاعية أعطيت للكائن الحي على دفعة واحدة أو على دفعات ؟ ، والوقت بين كل دفعة ودفعة قصير أم طويل؟ كل ذلك سيؤثر في مقدار الضرر الإشعاعي الناتج[١٠].

iv. **معدل التشعيع:** وهو عبارة عن الجرعة الإشعاعية في وحدة الزمن ، فإن كان معدل التشعيع عالياً فإن الضرر الناتج عنه يكون أكبر مما لو كان منخفضاً وبطيئاً.

v. **حساسية الكائن الحي للإشعاع:** وهي تختلف من كائن حي إلى آخر وفقاً للجنس ، فالذكور أكثر حساسيةً للإشعاع من الإناث ، كذلك الحجم فالكائنات الحية صغيرة الحجم أكثر مقاومةً للإشعاع ، كذلك العمر والحالة الصحية فإذا كان الكائن الحي جنيناً كان أكثر حساسيةً وأكثر تأثراً بالإشعاع من الكائن الحي اليافع.

(A) التأثيرات المباشرة أو العاجلة Direct or Immediate Effects

ويقصد بها ما يحدث الجزيء من تأين أو عدم استقرار نتيجة للإشعاع الساقط عليه ، حيث أن طاقة الجسيم المؤين تنقص بمقدار ٣٤ev، جزء منها فقط يستخدم في نزع الإلكترون من الذرة أو الجزيء. أما باقي الطاقة فتثير الجزيء وتجعله غير مستقر وقد تؤدي إلى تكسيره إلى وحدات صغيرة متماثلة، لأن معظم الجزيئات الكبيرة ما هي إلا سلسلة من الجزئيات الصغيرة مترابطة كيميائياً مع بعضها ، ولهذا فإن مبلغ الأثر في الجزئ يكمن في مدى أهميته في حياة الخلية عند تعرضها للإشعاع ، كما هو الحال في

جزيئات الأحماض النووية DNA ، RNA ، فعند حدوث أي تلف بها نتيجة لتعرضها للإشعاع فإنها تحدث إضراراً خطيرة على الخلية كلها ، كما أن الضرر يتوقف أيضاً على قدرة الجزيء على استعادة نشاطه مرةً أخرى بمرور الوقت (تأثير مؤقت) ، أولا يقدر الجزئ على استعادة نشاطه مرةً أخرى (تأثير دائم). ففي الحالة الأولى يحدث استرداد وشفاء إلى الحالة ، عكس ما يحدث في الحالة الثانية من عدم استرداد أو عدم شفاء ، مما قد يترتب عليه أضرار أخرى مؤثرة في حياة الخلية[١٠].

(B) التأثيرات غير المباشرة أو الآجلة Indirect or Latent Effects

وهي التي تحدث نتيجة للأضرار المباشرة من التعرض للإشعاع ، فمثلاً تأثير الإشعاع على جزيئات الماء في الجسم يعتبر تأثيراً مباشراً ، لكن الضرر الذي سينتج من أيونات الماء بعد ذلك يعتبر تأثيراً غير مباشر ، وكذلك الحال مع أي جزئ بيولوجي سوف يتعرض للإشعاع، ولقد ذكرت جزيئات الماء كمثال لنسبتها الكبيرة بجسم الحيوان، وما يحدث من آثار ثانوية غير مباشرة نتيجة لتأينها بالإشعاع.

وتعتمد نواتج التأين على ما يعرف بمعامل نقل الطاقة طولياً، وهو يمثل المعدل الذي يفقد به الإشعاع الطاقة خلال وحدة المسافة التي يقطعها، ولذلك إذا كان هذا المعامل مرتفعاً، فإن الأيونات الناتجة تكون قريبة من بعضها البعض ، وتزداد فرصة إتحادها لتعطي نواتج جديدة والعكس صحيح. إذا كان هذا

المعامل ضعيفاً فإن الأيونات الناتجة تكون بعيدة عن بعضها البعض ، وتقل فرصة إتحادها. ويتناسب معامل نقل الطاقة طولياً مع شحنة وسرعة الجسم المؤين فتزداد قيمته بزيادة الشحنة وانخفاض السرعة[١٠].

٣.٤ تأثيرات الإشعاع على مستوى الجزيئات الكبيرة

إن التأثيرات الملحوظة للإشعاع قد تكون مباشرة أو غير مباشرة بإحداث تلف للجزيئات المهمة لاستمرار حياة الخلية ، وتعتمد أهمية الجزئيات على مكانها في الخلية ، مثل جزيئات الحامض النووي DNA القليلة العدد والحاملة للجينات والموجودة في النواة ، والتي تلعب دوراً مهماً في توجيه وضبط نشاط الخلية ككل. فهذه عند تأثرها بالإشعاع سوف يكون لها ضرر بالغ على الخلية. وكذلك جزيئات الحامض النووي RNA والموجود في سيتوبلازم الخلية بأعداد كبيرة. ولها وظيفة إلى حدٍ ما أقل من وظيفة DNA. وإن تأثرها بالإشعاع قد لا يكون بنفس الخطورة على الخلية. إلا أنها قد تكون مدمرة لها أيضاً لكونها مركزاً لتكوين البروتينات المهمة الحيوية واستمرار الحياة.

٣.٤.١ تأثيرات الإشعاع على البروتينات

حقيقة لا غني للخلية عن جزئيات البروتين. سواء من ناحية تركيب الغشاء الخلوي أو احتياجها لهرمونات وانزيمات منظمة لعمليات الأيض والتفاعلات الحيوية المستمرة داخل الخلية ، أو لتكوين الأجسام المضادة للدفاع عن الجسم ضد الميكروبات المهاجمة ، ويمكن وصف البروتينات بأنها سلسلة من الأحماض الأمينية وكل حامض أميني به مجموعة أمينية ومجموعة كربوكسيلية (COOH) وسلسلة جانبية مميزة R للحامض الأميني. وقد يكون البروتين مدمجاً مع غيره من الجزيئات الكربوهيدرتية أو الدهنية أو الأحماض النووية. وعادةً ما تكون مجموعة الأمين هي الجزيء الأكثر حساسيةً في الحامض الأميني ، ولكن نظراً لارتباطها الوثيق بالمجموعة الكربوسيلية فإنها تعتبر مقاومة للإشعاع. وبتأثره يتأثر جزيء البروتين كله تأثراً خطيراً.

كما يمكن للإشعاع أن يكسر الروابط الكيمائية التي تربط أجزاء البروتين وبالتالي يؤثر على فعاليتها. وقد يؤثر الإشعاع بفك الشكل الملفوف وتغيير نظام الجزيء ، مما يؤدي إلى تغيير في صفاته الطبيعية والكيمائية.

٣.٤.٢ تأثيرات الإشعاع على الانزيمات

من المعروف أن تعريض الإنزيمات للإشعاع يثبط من نشاطها. ويتناسب مدى هذا التأثير تناسباً طردياً مع درجة تخفيف الإنزيم. ويبدو أن التثبيط يتم بطريقة غير مباشرة ، والإنزيمات هي بروتينات موجودة في معظم الأحيان بأعداد كبيرة في السيتوبلازم ولا تنشط إلا عند الحاجة ، وتعمل كعامل مساعد في التفاعلات الكيموحيوية. وقد يكون تلف إنزيم معين بالإشعاع غير مدمر للخلية. حيث يمكن لإنزيمات أخرى أن تحل محله وتعوض نشاطه ، وعموماً فإن تدمير الإنزيم يؤثر ولو لفترة على اتزان الخلية والتحكم

في نشاطها. ومما لاشك فيه أن التعرض لجرعة كبيرة من الإشعاع سوف يؤدي إلى آثار لا يمكن للخلية أن تسترد بعدها حيويتها.

٣.٤.٣ تأثيرات الإشعاع على الأحماض النووية

الحامضان النوويان DNA ، RNA ذوا أهمية كبيرة للخلية ، وهما عبارة عن جزيئات كبيرة تحتوي على قواعد نيتروجينية مرتبطة بمجموعات سكر خماسي وفوسفات ، ومن التأثيرات التي يحدثها الإشعاع على هذه الجزيئات المعقدة تكسير روابط الهيدروجين بين السلاسل وتغيير أو فقد القواعد النيتروجينية أو كسر الروابط بين مجموعات السكر والفوسفات ، مؤدياً إلى فصل شرائط الحامض النووي وتكسيرها مكوناً بروتينات أخرى ، وليست كل هذه التأثيرات تؤدي إلى تلف لا يمكن للخلية الاسترداد منه ، حيث يمكن لبعضها تصحيحه داخل الجزيء نفسه بفضل التركيب اللولبي للحامض

الأميني. أما في حالة فصل جزء من الحامض النووي أو تغيير متبادل بين أجزائه مع حامض نـــووي آخر فيصبح هذا التأثير غير مسترد حتى للخلية نفسها.

٣.٤.٤ تأثيرات الإشعاع على الدهون

التأثير الرئيسي للإشعاع على الدهون هو تحويلها إلى أكاسيد فوقية عضوية يكون تأثيرها الضار علـــى الخلية مماثلاً تماماً لتأثير فوق أكسيد الهيدروجين الناتج من التأين الإشعاعي للماء الموجود بالخلايا.

٣.٤.٥ تأثيرات الإشعاع على الكربوهيدرات

تتكون الكربوهيدرات من سلسلة من ذرات الكربون والهيدروجين والأكسجين. وقـــد تكـــون ســـكريات أحادية أو ثنائية أو عديدة ، ويبدو أن الإشعاع يسبب تكسيراً للروابط الكيمائية بين سلســـة ذارات هـــذه الجزئيات ويحدث تغييراً في صفاتها الطبيعية والكيميائية. وبالتالي في نشاطها الحيوي.

٣.٥ تأثيرات الإشعاع على مستوى الخلية

يمكن القول أنه ليس هنالك خلية حية لديها مقاومة كاملة للإشعاع ، حيث أن الضرر الخلوي يعبر عـــن نفسه بطرق شتى. فقد يكون تغييراً في جزئ واحد يمكن أن يشفى منه

في الحال ، وعموماً فهناك فرق كبير في حساسية النواة للإشعاع لما تحتوي عليه من كروموســـومات خصوصاً إذا كان التشعيع خلال فترة الانقسام مقارنة بحساسية السيتوبلازم تحـــت نفـــس الظـــروف ، فالسيتوبلازم تظهر فيه فجوات خصوصاً عند التعرض لجرعات عالية كما تقـــل قابليـــة الســـيتوبلازم للصبغات المختلفة. أما الغشاء الخلوي فيفقد انتظامه ويظهر به تلف مما يحدث تغيرات خطيـــرة فـــي عملية النفاذية الاختيارية ، والتي ينتج عنها خلل كبير في العمليات الحيوية داخل الخلية والمسئولة عن تكوين الطاقة اللازمة لحيوية ونشاط الخلية. وأما بخصوص النواة والكروموسومات فيتـــأثر التركيـــب الكروموسومي للنواة ، فمثلاً أن يبقى الكروموسوم ناقصاً أو يبقى اثنان من الكروموسومات ملتصـــقين ولا ينفصلان كما هو متوقع في الحالات الطبيعية ، مما يؤدي إلى إنتاج خلايا شاذة ناقصة أو زيادة في

عدد الكروموسومات عن المعدل الطبيعي ، فلا تستطيع أن تحيا حياة طبيعية وتموت وأحياناً تحتوي النواة على العدد الطبيعي من الكروموسوم ولكن نفس تكوين الكروموسوم متغير بأن حدث نقل أو تبادل لبعض أجزائه إلى كروموسوم آخر ، مما يغير ترتيب الجينات ، ولا يظهر هذا التحول من الناحية البيولوجية في الحال ، إنما يظهر جلياً في الأجيال المتعاقبة والتي تتوارث هذه الصفات الشاذة:

(A) نقص معدل النمو

يعتبر نقص معدل النمو من أهم الآثار الواضحة على الخلية نتيجة لتعرضها للإشعاع ، فيلاحظ اضطراب في معدل النمو نتيجةً لاضطراب في الانقسام الفتيلي ، مما يسبب نقصاً في عدد الخلايا. وهناك اتفاق علمي عام على أن الخلايا ذات النشاط الفتيلي الكبير تكون أكثر حساسيةً للإشعاع. وهذا النشاط يعتمد على عدد الخلايا التي تكون في حالة الانقسام وطول الفترة التي تستغرقها الخلية في ذلك ، ولا يشترط أن تكون الخلية فعلاً في حالة الانقسام عند تعرضها للإشعاع لكي تتلف ، بل يكفي أن تكون نشطة وعلى استعداد للدخول في الانقسام ولو لفترة وجيزة ، وهذه الصورة المتأخرة من نقص النمو نتيجة للإشعاع تبدأ بالتأثير أثناء الانقسام ، حيث تفقد القدرة على ذلك سريعاً. ويوجد عدد من التناقضات الظاهرية للعلاقة بين النشاط الانقسامي للخلية والإشعاع. فعلى سبيل المثال هنالك بعض الأورام الخبيثة لوحظ أنها مقاومة نسبياً للإشعاع رغم نشاطها الانقسامي مثل سرطانات العظام والنخاع وعلى العكس نلاحظ أن الخلايا الليمفاوية حساسة للإشعاع حتى ولو لم تظهر نشاطاً انقسامياً.

(B) ظهور خلايا عملاقة

من التأثيرات الضارة للتشعيع هو ظهور خلايا عملاقة ، كما يحدث عند علاج الأورام السرطانية بالإشعاع ، فقد تتلف الخلايا إلى الحد الذي لا تستطيع فيه الانقسام ، ولكن الخلايا المشععة لا تموت في الحال ، وقد تستمر في قدرتها على القيام بنشاطها الأيضي ، ولهذا السبب تصبح الخلية أكبر فأكبر في الوقت الذي لا تستطيع فيه الانقسام فيكون مصيرها الموت.

(C) العوامل البيئية

تلعب العوامل البيئة دوراً مهماً في تأثير الإشعاع على الخلايا الحية ، فالمحتوى الأكسجيني والحرارة والضغط يمكن أن تزيد أو تقلل من حساسية الخلايا للإشعاع ، ويمكن وضع مصطلح يمكن الاعتماد عليه بالنسبة لهذه العوامل الثلاثة ، وهو حساسية الخلية الحية للإشعاع تتناسب تناسباً طردياً مع كمية الأكسجين والحرارة والضغط. فكلما زاد أحد هذه العوامل البيئية زادت الحساسية للإشعاع ، وكلما قل قلت معه الحساسية للإشعاع [١٠].

٣.٦ تأثيرات الإشعاع على الأجهزة البيولوجية

تقسم الخلايا بجميع أنواعها إلى ثلاثة مجموعات رئيسية بالنسبة لحساسيتها للإشعاع ، وهي:

A. الخلايا الإنشائية.

B. الخلايا المتشكلة.

C. الخلايا الناضجة.

فكل عضو في جهاز بيولوجي يقع في مجموعة استجابة معينة للإشعاع وفقاً لغالبية الخلايا الموجودة به. فالخلايا الإنشائية تعتبر خلايا بدائية في صورة غير ناضجة وليست في الصورة النهائية التي ستصبح عليها الخلية. وهي لا تتشكل أي لا تتحول إلى نوع آخر من الخلايا ، ولكنها نشطة تنقسم انقساماً فتيلياً لتنتج خلايا تحل محل خلايا أخرى. هذا النوع من الخلايا حساس جداً للإشعاع.

أما الخلايا المتشكلة فتنشأ من الخلايا الإنشائية حينما تبدأ التخصص بفقدها لصفاتها العامة واكتسابها مميزات خاصة وفي هذه الحالة تستطيع أن تقوم بوظائف خاصة بها. وهذه الخلايا حساسة جداً للإشعاع ولكنها أقل نسبياً من النوع الإنشائي ، أما الخلايا الناضجة فهي التي تقوم بالوظائف المهمة لكل عضو وقد يحدث القليل من الانقسام الفتيلي ، لذلك تعتبر هذه الخلايا مقاومة للإشعاع نسبياً ، حيث تستمر الأعضاء في أداء وظيفتها بعد التشعيع. ولكنها تقل فقط بعدم قدرة العضو على إنتاج خلايا

إنشائية متشكلة. وكلما كبر عمر الخلية الناضجة كان استمرار العضو في أداء وظيفته أطول وحساسيته للإشعاع أقل ، لذلك فإن تأثيرات الإشعاع تختلف بدرجة محسوسة من عضو إلى آخر ، وفيما يلي بعض المشاكل المتوقعة في حوادث الإشعاع لبعض الأجهزة البيولوجية الأساسية:

i. جهاز إنتاج خلايا الدم

يقصد به الأعضاء التي تنتج خلايا الدم مثل نخاع العظم الأحمر والطوحال والعقد الليمفاوية ، وهي ذات حساسية فائقة للإشعاع مقارنةً بخلايا الدم الأخرى والتي تكون عالية الحساسية. ويظهر ذلك خلال ساعات من التشعيع. فكريات الدم البيضاء أكثر الخلايا الدموية حساسيةً وتختفي من الدورة الدموية أولاً ، وتبدأ باختفاء الخلايا الليمفاوية ثم الخلايا المحببة بأنواعها الثلاثة ، ثم كريات الدم الحمراء تليها الصفائح الدموية ، لذلك يؤخذ الهبوط في عدد الخلايا الليمفاوية كدليل على حدوث التعرض الإشعاعي ، فإذا نقص عددها من المستوى ١٠٠ إلى ٢٠٠/مم^{٣} خلال الفترة من ١٢ ساعة إلى ٢٤ ساعة فمن المحتمل أن تكون الجرعة الإشعاعية مميتة. أما إذا كان عدد الخلايا الليمفاوية أعلى من ١٠٠٠/مم^{٣} ثم زاد بعد أسبوع من التشعيع فيكون الشفاء غالباً مؤكداً. وقد تحدث وفاة الكائن الحي دون نقص محسوس في كريات الدم الحمراء اليافعة ، ويرجع ذلك إلى أن الجهاز المسئول عن تجديد هذه الكريات قد تأثر بالتشعيع ، أما الخلايا الليمفاوية فتختفي سريعاً لأن عمرها قصير حوالي يومين في حين عمر الخلايا الحمراء ١٢٠ يوماً ، وهذه من ضمن أسباب زيادة حساسية الخلايا الليمفاوية للتشعيع.

النزيف الداخلي أيضاً من أعراض التعرض الإشعاعي ، وهو مرتبط ارتباطاً وثيقاً بمستوى صفائح الدم السابحة في الدورة الدموية ، وتأثير الإشعاع على جذر الشعيرات الدموية ويعزى ذلك إلى نقص في عدد الصفائح الدموية.

(ii)الجهاز التناسلي

تعتبر المناسل (الخصية في الذكر والمبيض في الأنثى) من الأعضاء الحساسة للإشعاع ، حيث تحدث تحولات وطفرات واختلالات لمكونات الكروموسوم في أي من الحيوان المنوي أو البويضة بعد التشعيع. ومن آثار التشعيع أيضاً حدوث عقم مؤقت أو دائم وفقاً لكمية الإشعاع ونوعيته ، ويحدث ذلك بجرعات إشعاعية أقل في الأنثى عن الذكر ، فمثلاً يحدث عقم مؤقت في أنثى الحيوانات الثديية بعد التعرض لجرعة إشعاعية أقل من ٢٠٠ رونتجن ، في حين يحدث عقم دائم بعد التعرض لجرعة إشعاعية تفوق ٣٠٠ رونتجن ، أما في ذكر الحيوانات الثديية فيحدث عقم مؤقت عندما تتعرض الخصى لجرعة إشعاعية تفوق ٣٠٠ رونتجن في حين يحدث عقم دائم في الجرعات الإشعاعية الأعلى من ١٠٠٠ رونتجن.

(iii) الجهاز الليمفاوي

الطحال والعقد الليمفاوية والغدة التيموسية تنتمي للجهاز الليمفاوي ، ولذلك فهي على درجة عالية من الحساسية للإشعاع. فالانقسام الميتوزي في الطحال يقف في أقل من ساعة بعد التعرض لجرعة متوسطة من الإشعاع ، ويتبع بعد ذلك تلف شديد للخلايا الليمفاوية. ومن الآثار الضارة أيضاً للإشعاع على الطحال فقدان الوزن حيث يعتبر ذلك مؤشراً حساساً للجرعة التي تعرض لها العضو، كما يقف أيضاً إنتاج الطحال لكريات الدم الحمراء والبيضاء ، حيث تضمحل الخلايا المكونة لها تماماً.

العقد الليمفاوية والأنسجة الليمفاوية الأخرى لها حساسية عالية لمستويات الإشعاع المنخفضة ، فبعد التشعيع ينقص حجم العقد الليمفاوية وفقاً لكمية الإشعاع.

(iv) الجهاز الهضمي

الطبقة الطلائية المخاطية للقناة الهضمية حساسة تماماً للإشعاع ، ولكنها ليست بالدرجة العالية مثل الجهاز المنتج للدم والمناسل ، فيلاحظ أنه بعد التشعيع يقف الانقسام الميتوزي متبوعاً بالاستسقاء وتآكل

ونخر في الخلية الطلائية المخاطية ، وهذه التغيرات المبكرة مسئولة عن الأعراض التي تظهر بالقناة الهضمية نتيجة للتعرض الإشعاعي وهي تسبب فقد الشهية للطعام وغثيان وقئ وإسهال.

هناك تغيرات وظيفية تشمل النقص في إفراز إنزيم الببسين وحامض الهيدروكلوريك بواسطة المعدة وزيادة في إنتاج المخاط بواسطة الأمعاء والقولون. وكلما زادت جرعة الإشعاع التهبت الأمعاء مع ظهور أشكال شاذة من الخلايا المخاطية.

(v) الجلد

يعتبر الجلد نسيجاً حساساً للإشعاعات نسبياً ومماثلاً تقريباً لنفس القدر من الحساسية الموجودة في القناة الهضمية ، وتظهر تأثيرات الإشعاع عادةً على الجلد على هيئة إحمرار وتغيرات في الشعر والأظافر. حيث يلاحظ سقوط الشعر حتى عند التعرض للجرعات الإشعاعية المنخفضة.

(vi) المياه البيضاء

تعتبر عدسة العين أكبر المساحات حساسيةً للإشعاع ، وهي تنتج من التعرض للإشعاعات المؤينة.

(vii) الجهاز العصبي المركزي

وهو من أقوى الأجهزة مقاومةً للإشعاع في الحيوانات الثديية. ونسبياً يعتبر المخ أكثر حساسيةً للإشعاع في الحبل الشوكي. ولكن هذه الحساسية لا تظهر إلا بعد التعرض لجرعة مقدارها ١٠٠٠ رونتجن. ولا تظهر آثار الإشعاع على الجهاز العصبي المركزي عادةً إلا عند التعرض للإشعاع المركزي على المكان المستخدم في العلاج الإشعاعي وليس عند تعرض الجسم كله للإشعاع [١٠].

(viii) الأعضاء الأخرى

مثل القلب والكُلى والكبد والبنكرياس ذات مقاومة شديدة للإشعاع والتغيرات التي تحدث لهذه الأعضاء تحدث فقط عند التعرض لجرعات عالية من الإشعاع مثل النزيف والنخر والاستسقاء.

٣.٧ عامل التأثير البيولوجي النسبي RBE

التأثير البيولوجي النسبي هو عبارة عن نسبة الجرعة الممتصة لأشعة x أو غاما عند طاقة معينة إلـــى الجرعة الممتصة من أي نوع آخر من الإشعاعات وحدوث نفس التأثير البيولوجي لكل منها:

RBE≡ Relative Biological Effectiveness

$$RBE = \frac{D_\gamma}{D_n} = \varepsilon\,(n) \qquad (3.3)$$

حيث أن D_γ هي الجرعة الممتصة لأشعة γ وD_n هي الجرعة الإشعاعية للنيوترونات.

الباب الرابع

النفايات المشعة

٤.١ المقدمة

النفايات بصورة عامة هي كل المواد التي انتهى الإنسان من استخدامها وأصبحت غير ذات جدوى لـه ، ويريد التخلص منها أو المواد التي تنشأ عن الأنشطة البشرية المختلفة وليست لهـا منفعـة ويريـد الإنسان التخلص منها ، وأهم مثال على ذلك القمامة المنزلية والسيارات القديمـة المسـتهلكة والأدوات المنزلية والأجهزة الكهربائية التي إنتهى عمرها الافتراضي ، وعوادم المصـانع ونـواتج الاحتـراق والصرف الصحي وغيرها. وقد بدأ الإنسان يشعر أن تراكم هذه المواد أو بعضها فـي بيئتـه يشـكل مشكلة أخذت تتزايد في القرن العشرين ، حتى وصلت إلى مرحلة الكارثة ، وذلك لأن هذه المواد فـي معظمها غريبة عن البيئة أو يزيد تركيزها في البيئة بنسبة ضارة بها وبالإنسان نفسه.

ولقد وجد الإنسان أن استخدام التكنولوجيا أراحه كثيراً فأوغل فيه دون أن ينظر بعين الاعتبـار إلـى الوجه الآخر للعملية ، ولكنه تبين أخيراً أن من خصائص التكنولوجيا إنتاج النفايات والمخلفـات التـي يجب التخلص منها بصورة آمنة ، وكلما ازداد التقدم التكنولوجي تصاعد خطر التلوث النـاتج عنـه ، وقد قدر أن الإنتاج الصناعي العالمي في القرن العشرين وصل إلى ٥٠ ضعف الإنتاج الصناعي علـى مر التاريخ حتى نهاية القرن التاسع عشر ، وأن ٨٠% من هذا الإنتاج تم بعد عام ١٩٥٠م ، وهذا يبين الكم الهائل من المخلفات والنفايات التي يجب أن يتعامل معها الإنسان لكي يستمر وجوده علـى وجـه الأرض.

ومن هذا المنطلق يمكن أن نعرف النفايات المشعة على أنها نواتج استخدامات التكنولوجيا النووية فـي كافة الأنشطة الإنسانية السلمية والعسكرية ، وأهم خاصية لهذه النفايات في أنها مشعة [١١].

٤.٢ إدارة النفايات

كل أجزاء دورة الوقود النووي تنتج نفايات مشعة، وتكاليف الإدارة والتخلص من هذا الجزء يعتبر جزء من تكاليف الكهرباء أي أنها تصبح مدمجة معها. يوجد في مرحلة من

دورة الوقود بعض التكنولوجيا المعتمدة للتخلص من النفايات المشعة بأمان. لكن في بعض الحالات لم ينجز ذلك بسبب اعتبارات عامة.

والهدف الرئيس لإدارة أو التخلص من النفايات المشعة هو حماية الناس والبيئة وهذا يعني عزل أو تخفيف النفايات بحيث أن تركيز أي إشعاع نووي يعود علي الغلاف الإحيائي بالضرر [١٢].

٤.٣ تصنيف النفايات

يمكن أن تكون النفايات النووية على هيئة مواد صلبة أو سائلة أو غازية. وهذه تنتج من شظايا الانشطار أو التنشيط النيوتروني أو نظائر عناصر ما بعد اليورانيوم وتصنف هذه حسب وجهة النظر الإشعاعية إلى:

- نفايات منخفضة المستوى الإشعاعي.
- نفايات متوسطة المستوى الإشعاعي.
- نفايات عالية المستوى الإشعاعي.

٤.٣.١ النفايات منخفضة المستوى الإشعاعي Low Radioactive Waste

وهي النفايات التي تحتوي على مواد ذات إشعاع ضعيف أو على مواد مشعة ذات عمر نصف إشعاعي قصير ، بحيث تتحلل بسرعة إلى مستويات إشعاعية لا تذكر. وهذه النفايات يمكن التعامل معها دورياً مباشرةً باستخدام القفازات الواقية والملابس المناسبة التي تحمي العاملين من أي تلوث بها ، كما أن التخلص منها لا يشكل أي صعوبة. وتعتبر كل نفايات ومخلفات الاستخدامات الطبية والصناعية والزراعية ومعظم التطبيقات الأخرى من النفايات منخفضة الإشعاع.

٤.٣.٢ النفايات متوسطة المستوى الإشعاعي Intermediate Radioactive Waste: هي

النفايات التي تحتوي على مواد ذات إشعاع متوسط، أو مواد ذات إشعاع عالي ولكنها في نفس الوقت ذات عمر نصف قصير يجعلها تتحلل بسرعة إلى مستوى إشعاعي منخفض ، وهذه يتم التعامل معها من خلال حواجز واقية وبتجهيزات خاصة تشمل في بعض الأحيان استخدام أجهزة بسيطة للتحكم عن بعد.

٤.٣.٣ النفايات عالية المستوى الإشعاعي High Radioactive Waste

وهي النفايات التي تحتوي على مواد ذات مستويات إشعاعية عالية ، وفي نفس الوقت ذات عمر نصف طويل بحيث تظل على مستوى إشعاعيتها لفترات طويلة ، ويستلزم التعامل معها أن يكون من خلال حواجز واقية سميكة وأجهزة تحكم عن بعد معقدة مع عمل كل الاحتياطات اللازمة لمنع أي تلامس بينها وبين العاملين أو البيئة.

وحيث أن الإشعاعات هي انتقال الطاقة من أنوية المادة المشعة إلى الوسط المحيط بها ، فإن إنطلاق الإشعاعات من المادة المشعة يصاحبه انبعاث حراري ناتج عن امتصاص الإشعاعات في الوسط المحيط بالمادة المشعة ، ولذلك فإن تخزين المواد المشعة في حيز معزول يؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة في الوسط المحيط وإذا لم تكن هنالك وسيلة لتبديد هذه الحرارة ، فإنه قد تتراكم إلى الحد الذي يؤدي إلى الانصهار ، ومن الأسباب التي تؤدي إلى انبعاث الحرارة الأرضية المواد المشعة التي تحتويها صخور الأرض.

٤.٤ مصادر النفايات المشعة في دورة الوقود النووي

تعتبر دورة الوقود النووي هي المصدر الرئيس للنفايات المشعة التي يجب التخلص منها بطرق آمنة، ولذلك سنلخص بعض مراحل هذه الدورة لبيان النفايات الناتجة في كل مرحلة وكيفية التخلص منها.

٤.٤.١ النفايات المتخلفة عن استخراج اليورانيوم واستخلاصه منها

يوجد اليورانيوم في الطبيعة ومع كل عناصر سلسلتيه الإشعاعيتين ، وهي كلها من عناصر الإشعاع الطبيعي ، وحيث أن نسبة اليورانيوم في خاماته عادةً لا تتعدى ١% فإن استخلاص اليورانيوم يتخلف عنه كم كبير من النفايات الصخرية التي تحتوي عناصر سلسلتيه الإشعاعيتين ، ولكن لا تتولد عن ذلك أي نفايات مشعة جديدة ، ولذلك لا تشكل نفايات مناجم اليورانيوم على البيئة إذا ما أحسن التعامل معها بالطرق السليمة خطراً ، وهي عادةً واحدة من الطرق الثلاثة الآتية:

i. في حالة المناجم تحت السطحية يمكن إعادة معظم النفايات أو جزء منها إلى المنجم نفسه كمواد مالئة للفراغات الناتجة عن استخراج الخام ، وهذه العملية من طرق التعدين المعروفة، وهكذا تعود العناصر المشعة المتخلفة بعد استخلاص اليورانيوم إلى مكانها الطبيعي التي كانت فيه ولا يكون لها أي تأثير على البيئة.

ii. في حالة المناجم المكشوفة يمكن أيضاً إعادة معظم النفايات إلى الحفرة المنجمية نفسها ، وفي هذه الحالة أيضاً تعود المواد الصخرية إلى المكان الذي استخرجت منه.

iii. في حالة عدم إعادة النفايات إلى مكانها لأسباب فنية أو اقتصادية فإن نفايات المناجم يعاد طرحها في المنخفضات الطبيعية الموجودة بجوار المنجم ومنشآته الأخرى ، ويتم اختيار هذه الأماكن بناءاً على دراسة جيولوجية دقيقة لتجنب أي احتمال لتسرب أي مواد مشعة أو ضارة إلى المياه الجوفية أو اختلاط الأتربة التي قد تحمل مواد ضارة بالتربة ، وتوجد في كل الدول التي لها نشاط تعديني بصفة عامة قوانين تلزم شركات التعدين بقواعد محددة للتخلص من نفايات المناجم بصفة عامة ، وإعادة تأهيل المنطقة التي يتم الإنتهاء من تعدينها لتعود كجزء من البيئة التي تحيطها ، وقد تمتنع بعض الشركات عن استغلال بعض الخامات الهامة لارتفاع تكلفة التأهيل التي يجب أن تلتزم بها ، وبالطبع تختلف الأعمال المطلوبة للتخلص من نفايات المناجم وإعادة

التأهيل حسب طبيعة المنطقة ، فالمناطق الصحراوية تختلف في هــذه الامــور عــن المنــاطق الممطرة ، وكذلك المناطق الجبلية تختلف عن المناطق المنبسطة.

٤.٤.٢ النفايات المتخلفة عن إثراء اليورانيوم

يتخلف عن إثراء اليورانيوم الطبيعي يورانيوم يحتوي على يورانيوم ٢٣٥ بنسبة حوالي ٠.٢% بــدلاً من النسبة الطبيعية وهي ٠.٧% ويخزن هذا اليورانيوم في أماكن خاصة في مصانع الإثــراء نفســها لحين الحاجة لاستخدامه في المفاعلات المولدة في المستقبل ، ولقد استخدمت أمريكا هذا اليورانيوم في مقذوفات خاصة لاحتراق المدرعات الثقيلة في حرب الخليج ، وتخزين هذا اليورانيوم حالياً لا يشــكل أي خطورة.

٤.٤.٣ النفايات المتخلفة عن تشغيل المفاعلات

ينتج عن تشغيل المفاعلات النووية نفايات متعددة تختلف كثيــراً فــي مســتوى إشــعاعيتها وكمياتهــا وطبيعتها ، ولذلك يختلف أسلوب التعامل معها ، فتعالج النفايات المنخفضة والمتوسطة الإشــعاع معــاً كمجموعة واحدة والنفايات العالية الإشعاع كمجموعة أخرى على حدة.

(A) نفايات المفاعل المنخفضة والمتوسطة الإشعاع

تنتج هذه النفايات أثناء تشغيل وصيانة المحطات النووية ، وتشمل هذه النفايات مواد غازية أو سائلة أو صلبة:

(i) النفايات الغازية

وتنشأ من نواتج الانشطار الغازية ومن الغازات المصاحبة لعمليات التهوية المستمرة بالمحطة ، وكذلك من الغازات الناتجة من عمليات تبخير وتكثيف النفايات السائلة.

(ii) النفايات السائلة

وهي التي تنتج عن التسربات من مكونات دورة تبريد المفاعل مثل الصمامات والطلمبات وخزانات مثبط الضغط وأحواض تخزين الوقود المستنفد وصرف المعامل ، وكذلك أثناء عمليات الصيانة وإعادة الشحن بالوقود النووي.

(iii) النفايات الصلبة

وتتكون أساساً من نواتج التطهير بالإضافة إلى مرشحات الهواء المستنفدة والمواد المتخلفة عن أعمال الصيانة والتشغيل ، مثل الملابس الواقية والأحذية وقفازات الأيدي والورق ، وكذلك الأجزاء والمعدات التي تلامس مياه تبريد المفاعل ويتم استبدالها أثناء عمليات الصيانة.

(B) النفايات عالية الإشعاع (مخلفات الوقود النووي)

الوقود النووي المستنفد هو أكثر النفايات خطورةً من ناحية النشاط الإشعاعي ، ويشكل الجزء الأكبر من النفايات عالية الإشعاع المتخلفة من المفاعلات النووية ، وذلك بالرغم من صغر حجمها بكثير ، فقد قدر أن النفايات العالية الإشعاع تشكل ١% من حجم النفايات المشعة في أمريكا بالرغم من أنها تحتوي على ٩٥% من الإشعاع في النفايات المشعة مجتمعة. وقد قدر أن الوقود المستنفد الذي أخرج من المفاعلات في عام ١٩٩٠م يبلغ حوالي ٩٥٠٠ طن ، وبهذا وصل الوقود المستنفد على مستوى العالم كله حوالي

٨٤٠٠٠ ألف طن ، وهو ضعف الوقود المستنفد الذي كان في عام ١٩٨٥م ، ومن المتوقع أن يصل مقدار الوقود المستنفد من كل المفاعلات العاملة حالياً ، والتي تحت الإنشاء إلى حوالي ٤٥٠٠٠ طن بعد إنتهاء عمرها الافتراضي في منتصف القرن الحادي والعشرين حسب تقديرات الوكالة الدولية للطاقة الذرية ، ومتوسط ما يخرج من مفاعل توليد الكهرباء العادي من الوقود المستنفد نسبياً حوالي ٣ طن ، وقد تبدو كذلك الكمية صغيرة ولكن مشاكلها كبيرة.

ومن المقترحات التي تناول استحساناً للتعامل مع النفايات عالية الإشعاع مقترح يتعلق بتحويلها إلى أشكال ثابتة للزجاج ، أو أسمنت توضع في كبسولات داخل حلقات من الصلب. ثم تشحن هذه على ظهور السفن أو القطارات إلى مخازن التخلص الناشئة ، حيث يمكن دفنها غالباً عند أعماق كبيرة تحت سطح الأرض في صخور تتمتع باستقرار جيولوجي متميز.

يشكل إذن الوقود المستخدم وإعادة المعالجة المصدر الأساسي للنفايات النووية. ففي حالة دورة اليورانيوم/ والبلوتونيوم المستخدم في مفاعلات الماء الخفيف هنالك عدة خيارات:

i. دورة الإلقاء بعيداً: حيث يعتبر هنا الوقود المستخدم نفاية يتم التخلص منها بشكل دائم مباشرةً.

ii. دورة الإخفاء: حيث يتم هنا تخزين الوقود المستخدم في أماكن من السهل الحصول عليه بعد ذلك منها ، حيث يعاد استخدامه بعد معالجته في المفاعل.

iii. إعادة المعالجة للحصول على اليورانيوم فقط.

iv. إعادة المعالجة للحصول على اليورانيوم والبلوتونيوم كلٍ على حدة[١١].

٤.٥ إشعاع من صنع الإنسان

وينقسم إلى الأقسام التالية:

(A) الإشعاعات الطبية

وتمثل هذه أعلى معدل للإشعاع الذي يتعرض له الإنسان عن طريق الاستخدامات الطبية (أشعة X وغيرها) والتي تتمثل في الطرق الآتية:

i. التشخيص الإشعاعي.

ii. العلاج الإشعاعي.

(B) الغبار النووي الناتج من التفجيرات النووية

وهذه تمثل المخلفات الإشعاعية الناتجة عن التفجيرات النووية منذ قنبلتي هيروشيما ونجازاكي. كما وتنتج الكثير من هذه المخلفات نظراً للتجارب النووية التي لاتزال تجريها الكثير من الدول ، وتنطلق إلى الغلاف الجوي نظائر كثيرة ناتجة عن هذه التفجيرات مثل Sr^{90}، C^{137} ، C^{14}، وغيرها وينتج عن هذه جرعات تتراوح بين (1-8)m Rem/Years

٤.٦ نواتج الانشطار

تعد مشكلة النفايات المشعة إحدى القضايا الجديرة بالذكر والاهتمام ، ولهذا يجب التخلص من النفايات شديدة الإشعاع التي يستمر إشعاعها لآلاف السنين. ولقد حرص العلماء على دراسة التخلص من هذه النفايات بمعالجة الوقود المستهلك في التفاعلات النووية. فالعنصر الأساسي في الوقود هو اليورانيوم وعندما يشع بواسطة النيوترونات يعطي نواتج الانشطار، وهي نفايات مشعة غير مرغوب فيها وهي عناصر ذات عدد ذري متوسط. ووجود هذه النفايات داخل المفاعل النووي يقلل من التفاعلات ، لذلك يجب التخلص منها بتبديل قضبان الوقود كل ثلاثة أشهر.

هناك مواد أخرى من النفايات المشعة تتولد في الوقود المستهلك ومنها البلوتونيوم والتي تتكون بإضافة نيوترونات إلى أنوية ذرات اليورانيوم ، وهذه العناصر سامة جداً ولها نصف عمر طويل. فالبلوتونيوم له نصف عمر يبلغ ٢٥ ألف سنة للتحلل إلى نصف نشاطه الإشعاعي الأولي. ولقد اتخذت عدة طرق في معالجة النفايات المشعة المستخرجة من المفاعلات النووية ، حيث يوضع الوقود المستهلك في أحواض ممتلئة بالماء للتبريد، وهذا الماء يوضع فور إخراجه من المفاعل لحرارته الشديدة ويترك حوالي ١٠٠ يوم، حتى تصبح معظم نواتج الانشطار من ذات فترة نصف العمر القصيرة والمتوسطة قد اضمحلت ، ثم يرسل الوقود بعد ذلك إلى المعمل الكيميائي وهو ما يعرف بـ(الخلايا الحارة) ، لفصل البلوتونيوم واليورانيوم بالطرق الكيميائية بعد إزالة غلاف الألمونيوم عن الوقود ، ويتبقى بعد

ذلك من الوقود المستهلك النفايات المشعة ذات النشاط الإشعاعي العالي ، وهي في صورة سائلة وتخزن تخزيناً مؤقتاً لمدة سنتين تمهيداً لتخزينها بصفة دائمة. حيث أن العناصر المشعة التي تشكل خطراً هي التي نصف عمرها أكثر من سنتين وغالبية هذه العناصر تصدر جسيمات بيتا، ويستمر إشعاعها ملايين السنين ، كما أنه تولد حرارة شديدة لذلك فهي تبرد بالهواء والماء تفادياً لحدوث انفجار يكون له أضراراً جسيمة من تلوث خطير في البيئة[١٢].

الباب الخامس

النتائج والمناقشة

٥.١ المقدمة

يشكل التخلص من النفايات النووية أكبر معضلة تواجه تشغيل المفاعلات النووية. ولعل عامة الناس أكثر حساسيةً من غيرهم تجاه هذه المعضلة. إذ ينتج عند تشغيل هذه المفاعلات تولد مواد إشعاعية ذات مستوى إشعاعي عالي. وعندما يتم توقف المفاعل أو معالجة الوقود المستخدم تهبط فاعلية المواد المشعة بسرعة ، وعلى كل حال تشكل نواتج الانشطار وعناصر الأكتينيدات المصدر الرئيس للتلوث الإشعاعي السام الذي يستمر لآلاف السنين ، وحتى الآن ليست هناك التزامات معينة نحو التخلص الدائم من النفايات النووية. فهناك اتجاه لتعليق التعامل مع النفايات في الوقت الراهن ويمكن تخبئة منظومات الوقود المستهلك في أماكن محددة ، حيث يمكن استردادها والتعامل معها بعد ذلك[١٣].

٥.٢ التعامل مع النفايات

بعد إزالة قضبان الوقود من المفاعل بعد استخدامها يتم نقلها إلى مخازن عبارة عن برك مائية ضخمة حيث تخزن هنالك كل بضعة شهور ، حيث يتم تحلل نواتج الانشطار قصيرة العمر ، وهنا يتم الاستفادة من المياه حيث تعتبر:

i. درع واقي من الإشعاع.

ii. حمام مائي للتخلص من الحرارة الناتجة عن التحلل الإشعاعي للمواد المشعة.

ويتم التعامل مع النفايات بصورة عامة على خطوتين:

i. تقليل كمية النفاية عند المصدر إلى أقل ما يمكن.

ii. تقليل النشاط الإشعاعي للنفاية إلى أقل ما يمكن.

ويجب أن يتم تكييف النفايات بحيث يمكننا التعامل معها وتخزينها بسهولة وأمان. ويتم ذلك بتقليل حجمها وتحويلها إلى حالة صلبة ، بحيث يكون الناتج مستقراً ميكانيكياً وكيميائياً وإشعاعياً وقابلاً لامتصاص الحرارة الناتجة عنه. وفيما يلي استعراض لهذه العمليات بالتفصيل:

٥.٢.١ تكييف النفايات الناتجة عن إعادة معالجة وقود مفاعل الماء الخفيف

وهذه تنقسم إلى أربعة أقسام ، هي:

٥.٢.١.١ تقسية وتخزين النفايات السائلة ذات المحتوى الإشعاعي العالى

يتم تركيز المحلول الناتج عن استخلاص اليورانيوم والبلوتونيوم في معامل إعادة معالجة الوقود المستخدم إلى حوالي $\frac{1}{10}$ من قيمته بالتبخر ، وينتج عن ذلك حوالي $0.5m^3$ من محلول النفاية ذات المحتوى الإشعاعي العالي لكل طن من الوقود المستخدم. ثم يضخ هذا المحلول إلى صهاريج من الصلب موضوعة داخل أوعية من الصلب لتجميع أي كمية متسربة. كما وتوضع هذه الأوعية بدورها في خلايا حادة مبطنة بالصلب ، وذلك لحجز الإشعاع القوي الناتج عن النفاية.

ويتم إعادة دوران محلول النفاية خلال الأوعية ، ويتم تبريده بتمرير الماء داخل أنابيب حلزونية خلال الأوعية الحاوية لمحلول النفاية ، وذلك للتخلص من الحرارة الناتجة عن النشاط الإشعاعي لنواتج الانشطار والأكتينيدات. ثم تحفظ هذه الأوعية لمدة لا تقل عن ٢٠- ٣٠ سنة.

ولتقسية النفايات السائلة فإن الخطوة الأولى هي تكليسها أي طرد السوائل من المحلول عند درجة حرارة عالية $900c°$ حيث ينتج عن ذلك نترات أو أكاسيد معينة. كما توجد طريقة بديلة ، حيث يمكن هنا إزالة النترات بإضافة غاز الفورميك الساخن إلى المحلول ، وينتج عن ذلك أكساييد متكلسة.

وهنالك أربع تقنيات للتكلس هي:

i. تقنية الوعاء.

ii. السطح المائع.

iii. الرذاذ.

iv. الأنبوبة الدوارة.

يعتبر التكلس مرحلة متوسطة ، وذلك لأن التكلس غير مقاوم بما فيه الكفاية للترشيح ، وذو توصيل حراري منخفض ، بالإضافة إلى أن استقراره الميكانيكي غير كافي. ولهذا يتم تحويل الكلس إلى مادة زجاجية أو سيراميكية. ويتم ذلك بتسخين قمينة الزجاج بعد إضافة السليكون والبورون والكلس إلى درجة الانصهار 1200°C – ١٠٠٠ °C ، ومن ثم ينتج الزجاج.

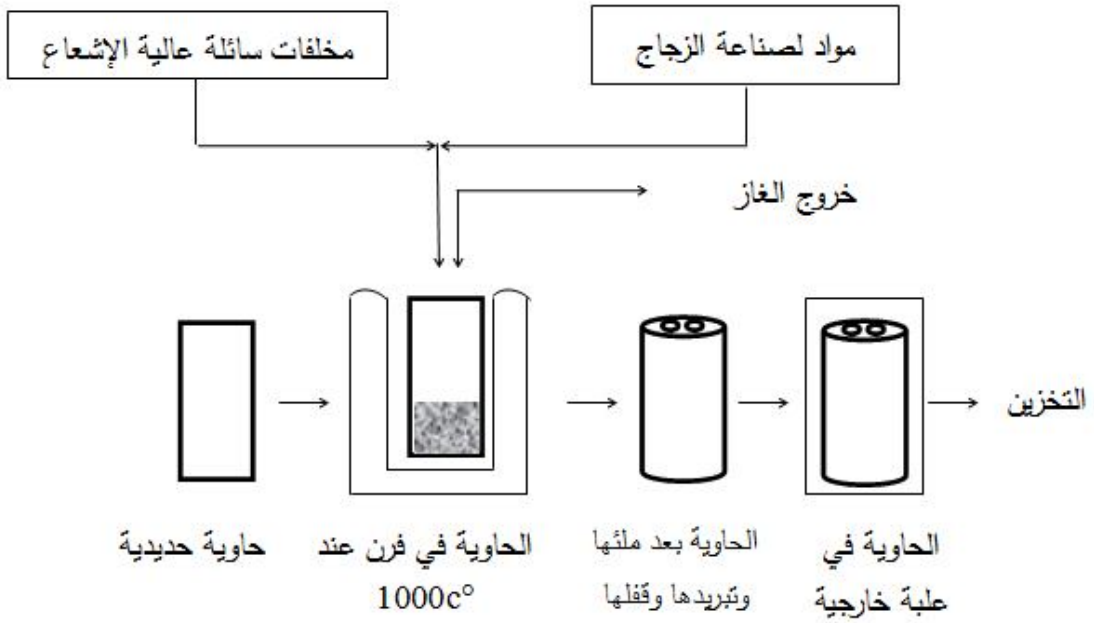
وهناك ثلاث تقنيات للترجيح ، وهي:

(A). تقنية تكلس الرذاذ

وهنا يتم تغذية النفاية المشعة بعد تسخينها إلى درجة حرارة تتراوح بين^{o}C (800–٣٠٠). وبينما يهبط رذاذ النفاية خلال المكلس فإنه يتجفف ويتأكسد متحولاً إلى مادة كلسية ناعمة. أما الهزاز فيعمل على منع ترسب المادة الصلبة إلى جدران الحجيرة. وحجيرة المرشح تتكون من مجموعة من المرشحات الصلبة التي تعمل على حجز الجسيمات الصلبة من تيار الغازات. وبعد أن تؤدي هذه المرشحات عملها فإنها تحرق داخل حجيرة الرذاذ. أما تيار الغازات الناتج فيحتوي على بعض الجسيمات المشعة والغازات المشعة ، ويعامل هذا التيار بعد ذلك وتزال المواد المشعة فيه ثم يطلق في الهواء. أما الكلس الناتج فإنه يخلط بعد ذلك مع المواد المستخدمة لصناعة الزجاج. ويهبط الخليط إلى الكلس ، حيث يصهر عند درجة حرارة 1050C°ثم ويبرد بعد ذلك. وينتج في النهاية ما يعرف بزجاج اليودوسيليكات الذي يملأ العلبة التي استخدمت كبوتقة للانصهار، يبلغ طول العلبة في هذه التقنية حوالي 344cm وقطرها 20cm. أما الزجاج الناتج فتبلغ كثافته حوالي 2.8g/cm^3 وحجمه حوالي ٥٠ لتراً.

(B) تقنية الحصاد

وهذه التقنية مناسبة للعمليات الهندسية الروتينية ويبين الشكل (١-٥) مبدأ هذه التقنية. وتعتمد هذه التقنية في الأصل على تقنية سبقتها وهي تقنية تثبيت السائل النشط في الزجاج ، وقد استخدمت هذه التقنية في معامل هارول منذ ١٩٦٢م وحتى ١٩٦٦م للتخلص من نفاية تبلغ ١٥٠٠٠ كوري ناتجة عن نفايات مفاعل Magnox. وتعتمد هذه التقنية أساساً على ما يعرف بـ(التذوب داخل العلبة) ، حيث يستخدم الوعاء الأسطواني الذي صنع فيه الزجاج كحاوية تخزين للنفايات النووية.



شكل (٥.١): يوضح تقنية الحصاد [١٣]

يتم هنا تغذية كل النفايات السائلة والمواد المستخدمة لصناعة الزجاج آنياً إلى حاوية ساخنة من الصلب. حيث يتم فيها صهر الخليط وتحويله إلى مادة زجاجية ، وعندما يتم ملئ الحاوية فإنها تخرج من الفرن وتبرد وتقفل وتصبح وعاء التخزين. وهنا يتم أيضاً الحصول على الغبار النشط من الغازات التي تغادر الحاوية ، حيث تمرر على مرشحات موضوعة في أسطوانة أخرى من الصلب ، وتستخدم بعد ذلك الأسطوانة والمرشح في دورة الزجاج التالية ، ومن ثم فإن المرشح يساهم في صناعة

الزجاج. وتنتج عن هذه التقنية كتل من الزجاج تبلغ كل منها 50kg. وتمتاز هـذه التقنيـة ببسـاطتها الهندسية.

(C) تقنية AVM الفرنسية Atelier De Vir

وهذه التقنية أصبحت تعمل على نطاق تجاري منذ عام ١٩٧٨م ، حيث هنا يتم تحويل نفايـات مفاعـل Magnox المجزئة لفترة طويلة إلى زجاج ، ويتم تحويل النفايات إلى زجاج باستمرار على خطوتين:

i. **في الخطوة الأولى:** يتم تجفيف النفايات السائلة وتحويلها إلى مسحوق سهل الحركة.
ii. **في الخطوة الثانية:** يتم تغذية النفايات الجافة مع مسحوق الزجاج إلى فـرن صـناعة الزجـاج ، حيث تتم هنا عملية انصهار الخليط وتحويله إلى زجاج. ثم يصب الزجاج المصهور داخـل إنـاء التخزين الذي يبرد ويقفل بعد لجم غطائه.

٥.٢.١.٢ تقسية وتخزين النفايات الصلبة ذات المحتوى الإشعاعي العالي

تتركب هذه النفايات غالباً من أغطية قضبان الوقود ونهاياتها والفضلات العالقة الناتجة عـن تخفيـف الوقود بالسوائل ، يتم حفظ هذه المواد بصورة مؤقتة في صوامع تخزين تحـت المـاء. ويبلـغ حجـم الأغطية وغيرها من المواد الإنشائية حوالي $0.5cm^3/HM$. أما كتلة الفضلات العالقة فتبلـغ حـوالي 4kg/HM. ثم تعد هذه المواد للتخزين النهائي ، وذلك بفصل النفايات الصلبة وخلطها مـع الرواسـب السائلة ، ثم يعبأ هذا الخليط في علب توضع بدورها في أوعية مدرعة ، ويجب أن تعبـأ أي فراغـات في العلبة بالأسمنت. ثم تقفل العلبة المدرعة بغطاء مدرع. كما وتوجد بعض التقنيات الأخـرى التـي تتمثل في غمس أغطية قضبان الوقود في الرصاص. إلا أن هذه التقنيات لاتزال قيد البحث.

٥.٢.١.٣ معالجة النفايات ذات المحتوى الإشعاعي المتوسط (MLW)

يتم تركيز محلول النفايات بالتبخير ثم يعامل في وعاء لإزالة النترات. (ويصبح هنا حجم النفايات حوالي $0.6cm^3/HM$ من الوقود المستخدم). ثم يتم بعد ذلك خلط هذه النفايات مع الأسمنت وتعبأ في براميل.

وهناك تقنية أخرى تتمثل في خلط محلول النفايات المركز مع الغاز الساخن. وهذا يساعد على تبخير بقايا الماء من المحلول. ثم يعبأ الناتج في براميل تترك لتبرد ثم تقفل ، ويمتاز استخدام الغاز على تقنية استخدام الأسمنت بأن الأول ينتج عنه نفايات أقل من الثاني.

أما محاليل (MLW) العضوية فتتم معالجتها باستخدام طريقة حمض الكبريتيك المحورية. أما ما تبقى من محلول MLW فيتم مزجه بالبلاستيك الحبيبي الذي ينتج عنه محلولاً متجانساً يعبأ بعد ذلك في براميل ثم تقفل.

٥.٢.١.٤ معالجة ما تبقى من النفايات

وهذه تقسم إلى أربعة أقسام ، وهي:

a- المخلفات الصلبة منخفضة التركيز

يمكن تركيز المخلفات الصلبة منخفضة التركيز Low Level Waste (LLW) عن طريق العصر والتسخين. أما المخلفات السائلة المنخفضة التركيز فيتم تركيزها بصورة عامة عن طريق التبخير. ثم تقسى هذه المخلفات المركزة بالأسمنت والقار وتعبأ في براميل ثم تقفل هذه البراميل وتعد للتخزين. أما المخلفات الغازية المشعة كالكربتون والتريتيوم تعالج كما يلي:

بالنسبة للكربتون فإنه يضغط داخل أسطوانات من الصلب سعة الواحدة منها ٥٠ لتراً. ثم توضع هذه الأسطوانات داخل أنفاق خاصة بهذا الغاز ، حيث يمكن وضع أربع أسطوانات فوق بعضها البعض ثم تبرد هذه الأسطوانات باستخدام الهواء العادي.

أما المياه المحتوية على تركيزات عالية من التريتيوم ، فإنه يتم تخزينها في صهاريج خاصة أو حصرها في برك ذات تركيب جيولوجي معين.

b-النفايات الناتجة عن إعادة معالجة اليورانيوم/ بلوتونيوم في وقود المفاعلات الإنتاجية السريعة المبردة بالمعدن السائل

تنتج هذه النفايات في هذه الحالة من مصانع إعادة معالجة الوقود. تحتوي النفايات السائلة عالية المستوى على نواتج الانشطار والاكتنيدات. ويبلغ مستواها الإشعاعي مستوى النفايات السائلة عالية المستوى الناتجة عن مفاعلات الماء الخفيف ومن ثم تعالج هذه النفايات.

c- النفايات الناتجة عن إعادة معالجة وقود اليورانيوم ٢٣٣/ثوريوم

يتم هنا تجميع النفايات الصلبة ذات المحتوى الإشعاعي العالى (HLW) التي هي عبارة عن قشور الأغطية تتكون النفايات السائلة عالية المحتوى (HLW) من النفايات السائلة الناتجة من عمود الاستخلاص الأول. وهذه تحتوي على نواتج الانشطار وكميات صغيرة من الاكتنيدات وكميات صغيرة أخرى من الألمونيوم الذائب والفرويدات. يجب تركيز هذه النفايات وتكليسها وتحويلها إلى خليط من الأكاسيد المستقرة. أما المخلفات منخفضة ومتوسطة الإشعاع فهي تتكون من النفايات السائلة ومخلفات المرشحات وغيرها.

d-النفايات الناتجة عن دورات الوقود الأخرى

هنالك نفايات تنتج عن عمليات تعدين اليورانيوم والثوريوم وعمليات تحويل الوقود وتخصيبه وتصنيعه ، وتلك الناتجة عن تشغيل المفاعلات النووية وجميعها يجب التعامل معها ومعالجتها [١٣].

٥.٢.٢ مستودعات النفايات النووية

٥.٢.٢.١ التخلص من النفايات عن طريق الإنفاق العميقة

يتم دفن النفايات النووية داخل تراكيب جيولوجية مناسبة تحت حزام القارات. هذه التراكيب ينبغي أن تكون خالية من دوران المياه الجوفية وغير قابلة للاختراق ، وتتمتع بتوصيلية حرارية عالية. لتتمكن من تسرب الحرارة الناتجة عن المواد المشعة. تعتبر التراكيب الجيولوجية للصخور الملحية الكثيفة مثالاً نموذجياً للصخور المتمتعة بلدونة عالية وإمكانية قفل الشقوق الناتجة حول حاويات وبراميل النفايات. كما يمكن أن يوزع الضغط بإنتظام خلال هذه الصخور.

كما ويمكن تخزين النفايات في صخور الجرانيت والبازلت والصلصال عند أعماق تصل إلى بضع مئات من الأمتار ، ولقد تم بالفعل دفن النفايات ذات LLW وMLW تحت المحيط الهادي بواسطة الولايات المتحدة الأمريكية ، أما البريطانيون فقد أخفوا نفاياتهم تحت المحيط الأطلنطي ، كما وتتجه بعض الدول لإخفاء نفاياتها في حفر قريبة من سطح الأرض (فرنسا ، كندا ، بريطانيا ، الاتحاد السوفيتي) ، وهناك الكثير من الخيارات المفتوحة. والتي لا تزال قيد البحث والاختبار والتجربة للتخلص من النفايات ، ومنها ما يلي:

a- مستودعات الإنفاق تحت الأرض عند عمق يصل إلى ٦٠٠ متراً.

b- استخدام آبار عميقة يصل عمقها إلى ١٠٠٠٠ متراً حيث توضع علب النفايات عند آخر ١٥٠٠ متراً فيها.

c- وضع النفايات في كهوف صخرية ، حيث يسمح للحرارة المتسربة منها بإذابة الصخور حولها.

d- وضع علب النفايات في الصخور المستقرة تحت قيعان المحيطات أو تحت القطبين.

e- وضع النفايات في سفن فضائية تنطلق خارج مجموعتنا الشمسية ، وهذه تقنية خطرة وباهظة التكاليف.

f- تحويل النفايات المشعة ذات الأعمار الطويلة إلى نفايات ذات إعمار قصيرة أو مواد مستقرة ، وذلك باستخدام التنشيط النيوتروني بتعريضها لفيض عالي من النيوترونات الناتجة من المفاعلات النووية.

٥.٢.٢.٢ التخلص المباشر من عناصر الوقود المستخدم

بعد استخراج عناصر الوقود المستخدم من المفاعل تخزن لمدة سنتين على الأقل قبل أن تعامل وتعد للتخزين الدائم. ويمكن لهذه العناصر أن تغلق بنفس حجمها الذي خزنت به وبجميع المواد المحتوية عليها كنواتج الانشطار والمواد الإنشائية وغيرها أو يمكن أن تفكك وتؤخذ قضبان الوقود فقط ، ويتم تقصيرها بليها على بعضها بعضاً. ثم تغلق في كبسولات التخزين ثم توضع في مستودعات التخزين الدائمة.

٥.٣ الصحة العامة والسلامة وعلاقتهما بالتخلص من النفايات

يتعلق التلوث البيئي في هذه الحالة بمرور الزمن والمخاطر التي يمكن أن تنشأ عن الحوادث الجيولوجية. وتكمن المخاطر في إمكانية تسرب المواد المشعة الناتجة عن النفايات من المستودعات أو الحواجز المحيطة بها. ويمكن أن تعمل حركة المياه الجوفية على انتقال المواد المشعة من مكان التخزين إلى مواضع أخرى. ومن ثم تسرب الإشعاع إلى الجو. اما احتمالات التسرب بصورة عامة تكمن في تحطم التراكيب الجيولوجية نتيجة لما يلي:

i. تشوه القشرة الأرضية نتيجة لحركات الأرض والزلازل.

ii. النشاط البركاني والتعرية.

iii. التجارب على الانفجاريات النووية السطحية.

iv. تسرب المادة المشعة من مستودعات النفايات بفعل عمليات تخريبية متعمدة أو نتيجة لعمليات الحفر بالخطأ حول السكان[١٣].

٥.٤ التوصيات العامة المتعلقة باستعمال مصادر الإشعاع

هنالك العديد من التعليمات التي يجب تطبيقها داخل الغرف المخصصة لمصادر الإشعاعات المفتوحة منها:

i. لا يجوز إدخال أو تحضير أو استعمال المواد التالية:

   a- الطعام والشراب ومواد التدخين.

   b- حقائب اليد ، أدوات التجميل ومساحيقها.

   c- المناديل الشخصية المصنعة من القماش.

ii. عدم ترك أماكن العمل دون اختبار أجهزة فحص التلوث الإشعاعي.

iii. منع الأشخاص من العمل داخل هذه الغرف ما لم يستعملوا الألبسة الواقية.

iv. الفحص الدوري للألبسة الواقية والاهتمام بنظافتها باستمرار.

v. عدم تنظيف الملابس الملوثة مع الملابس غير الملوثة.

٥.٥ الخاتمة

استفاد العالم من التقنية النووية في مجالات كثيرة ولكنها خلفت مشاكل جمة، أهمها مشكلة النفايات المشعة الناتجة من هذه التقنية وما تسببه من أضرار إذا لم يتم التخلص منها بطرق سليمة. تناول هذا البحث الأضرار البيولوجية الناتجة عن الإشعاع كما عرف النفاية المشعة وأنواعها ومصادرها ، وأهم الطرق للتخلص منها والتقليل من خطرها ، ولكن من أهم الصعوبات التي واجهت هذا الباحث هي قلة وشح المصادر وعدم توفرها في السودان. كما أن عدم وجود الأجهزة العلمية اللازمة للكشف عن الإشعاعات ومعالجتها وتحزينها في السودان تعتبر عائقاً للباحثين في هذا المجال للوصول إلى الحقائق العلمية التي يمكن الاستفادة منها لحماية البيئة السودانية من خطر تلك النفايات.

تطرق البحث لبعض التوصيات التي نأمل أن تكون من النقاط المفيدة لكل باحث في هذا المجال.

٥.٦ التوصيات

تعتبر النفاية المشعة مشكلة ناجمة من التقدم التقني، ولحماية الإنسان والبيئة من الأضرار التي يمكن أن تسببها هذه النفاية لابد أن تكون هناك بعض الضمانات التي يمكن إتباعها ومن المقترح خلال البحث التالي:

- التوعية بأضرار الإشعاعات وآثارها السلبية على البيئة.
- التوعية بالمصادر المختلفة للإشعاعات.
- وضع العلامات التي توضح المناطق التي بها إشعاع.
- حدود التعرض للإشعاع يجب أن لا تزيد عن الحد الموصى به حسب الظروف المعينة.
- دعم وإقامة مؤتمرات توضح خطر النفاية المشعة وكيفية التخلص منها بالطرق السليمة.
- التوعية الكاملة بكيفية التعامل مع النفاية المشعة.
- أن تساعد الدولة الجهات المختصة كهيئة الطاقة الذرية السودانية والهيئة السودانية للمواصفات والمقاييس باستجلاب كل الأجهزة التي تساعد في الكشف عن الإشعاعات والأجهزة التي تعمل على تأمين البيئة من الأخطار الإشعاعية.

المراجع والمصادر

[١] شبكة الإنترنت/٢٠١٩/٣/٢٣/١٣:٤٢م.
http://www.sciencedomain.org/review-history/20438

[٢] أ. مبارك درار عبد الله و د. مكي الطيب محمد أحمد، مقدمة في الفيزياء الحديثة ، المعهد الإسلامي للترجمة – الخرطوم ، ص (١٣٦– ١٤٥) .

[٣] هنري بسمات ، (١٩٨٦م) ، مقدمة الفيزياء الذرية والنووية مكتبة النهضة المصرية– القاهرة ، الطبعة الثانية ، ص٤٨٦ .

[٤] د. خضر عبد العباس حمزة و د. غسان هاشم الخطيب ، (١٩٨٩م) ، الطاقة الذرية واستخداماتها ، منشورات منظمة الطاقة الذرية العراقية ، الطبعة الأولي ، الطبعة الثانية ،(١٩٨٤م) ، (١٩٨٩م) ، ص٣٧ .

[٥] د. مجدي مصطفى إمام ، (١٩٨٠م) ، الفيزياء النووية والتفاعلات النووية ، دار مير للطباعة والنشر – موسكو ، ص(١٩١–١٩٢) .

[٦] د. مناف عبد حسن ، (٢٠٠٨م) ، الفيزياء النووية ، دار صفاء للنشر والتوزيع – عمان ، الطبعة الأولي ، ص(١٣٩–١٤٠) .

[٧] أ. د. عذاب طاهر الكناني ، (٢٠٠٨م) ، الفيزياء الإشعاعية– الأشعة السينية التشخيصية ، دار الفجر للنشر والتوزيع ، ص(٢٢–٢٧) .

[٨] د. محمد عبد الرحمن آل الشيخ وأ. أحمد نصر كراشي وأ. د. محمد عبد الفتاح عبيد هندسة الإشعاع النووي ، جامعة الملك سعود – المملكة العربية السعودية ، ص٢١٨

[٩] الدكتور المهندس مطاوع الأشهب ، الإشعاع النووي والوقاية من الإشعاع والتلوث ، المنظمة العربية للترجمة والثقافة والعلوم – دمشق ، ص(٧٧– ٧٩) .

[١٠] د. ممدوح حامد عطية ود. سحر مصطفى حافظ ، (١٤٢٥هـ– ٢٠٠٥م) المخاطر الإشعاعية بين البيئة والتشريعات في الوطن العربي ، دار الفكر العربي – القاهرة ، الطبعة الأولى ، ص (٦٩– ٨٣) .

[١١] د. ممدوح عبد الغفور حسن ، (١٤٢٠هـ- ٢٠٠٠م) الثقافة النووية للقرن ٢١ ما يجب أن تعرفه عن أساسيات التكنولوجيا النووية ، دار الفكر العربي - القاهرة ، الطبعة الأولى ، ص (١٢٦- ١٣١) .

[١٢] أ.د. حمدي السيد ، (٢٠١٥) ، الأمان النووي والحماية الفيزيائية للمواد والمنشآت النووية، دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع- القاهرة ، الطبعة الأولي ، ص(٤٤-٤٥) .

[١٣] د. محمد شحادة الدغمة و أ. د. على محمد جمعة ، الفيزياء النووية- الجزء الثاني، مكتبة الفلاح للنشر والتوزيع ، ص(٤٦٥- ٦٣١) .