الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة قاصدي مرباح ورقلة

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفيزياء

مذكرة تخرج:

لنيل شهادة ماسترمهني في

الفيزياء الطبية

الموضوع:

دراسة ونمذجة قياس الجرعات لمواد مركبة جديدة للحماية من الإشعاع في غرف العلاج الإشعاعي

من إعداد:

سفيان خولة

خميس ريان

نوقشت يوم: 06/02 /2026 من قبل أعضاء لجنة التحكيم المكونة من:

رئيس اللجنة	عياط زهية	جامعة ورقلة
المشرف	تجيني محمد حسين	-
المناقش	بن طويلة عمر	جامعة ورقلة

2026/2025

الشكر..

﴿ وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ ۚ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ ﴾

سورة هود الآية 88.

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، نحمده سبحانه وتعالى على توفيقه وإعانته لنا لإتمام هذا العمل المتواضع نتقدم بخالص عبارات الشكر والتقدير إلى الأستاذ المشرف" تجيني محمد حسين "على هذه المذكرة، وعلى ما قدمه لنا من توجيهات ونصائح قيمة ومتابعة مستمرة طيلة فترة إنجاز هذا العمل

كما نتوجه بجزيل الشكر إلى أعضاء لجنة المناقشة الكرام لقبولهم مناقشة هذه المذكرة وتقييمها ولا يفوتنا أن نتقدم بالشكر لكل أساتذتنا الأفاضل الذين ساهموا في تكويننا العلمي طوال مشوارنا الدراسي.

الإهداء..

إلى من كان دعاؤها سرَّ نجاحي، ونورها يضيء دربي... أمي الحبيبة

إلى من علّمني أن الاجتهاد طريق الوصول، وكان سندي وفخري... أبي العزيز

إلى إخوتي وأخواتي، الذين شاركوني لحظات التعب والفرح، وكانوا دائمًا مصدر قوة وأمل

إلى كل أستاذ علّمني حرفًا، فكان لذلك الحرف أثر في بناء مستقبلي

إلى كل صديق صادق وقف بجانبي وشجعني في مشواري الدراسي

إلى كل من آمن بقدراتي وساندني ولو بكلمة طيبة

أهدي ثمرة جهدي المتواضع هذا، راجيةً من الله أن يكون بداية نجاح أكبر ومستقبل أفضل.

الإهداء

بفضل من الله وتوفيقه أتقدم بإهداء هذا البحث المتواضع إلى من أحمل اسمهم بكل فخر، إلى والديّ الكريمين؛ نبع العطاء والرضا، اللذين لم يبخلا عليّ يومًا بالدعم والتوجيه، وكان لجميل صنيعهما الأثر الأكبر في بلوغي هذه المرحلة.

وإلى إخوتي الأفاضل شركاء الخطوات والداعمين لي في كل حين، وإلى كافة أفراد عائلتي الكريمة الذين أعتز بوجودهم في حياتي وأثمن مساندتهم الصادقة.

أهديكم جميعًا هذا النجاح تعبيرًا عن عميق امتناني وتقديري.

الملخص:

يركز هذا البحث على دراسة ونمذجة كفاءة مواد مركبة جديدة لاستخدامها في التدرع الإشعاعي لغرف العلاج الإشعاعي، حيث تمت مقارنة مجموعة من الأكاسيد عالية الكثافة مثل أكسيد التنتاليوم،التنغستن،السيريوم، أكسيد البزموث، بالإضافة إلى خرسانة الباريت. وقد لخصت الدراسة استخدام برنامجphy-X/PSDلحساب المعاملات الفيزيائية الأساسية للتوهين وتوصلنا الى أن أكسيد البزموث (Bi2O3) بكثافته التي تصل $8.90g/cm^3$ أنه المادة الأفضل والأكثر ترشيحاً لتوفير حماية إشعاعية فائقة، مما يسمح بتصميم دروع أكثر كفاءة وأقل سماكة لتأمين بيئات العمل الطبية ضد الإشعاعات عالية الطاقة.

الكلمات المفتاحية :إشعاع مؤين،حماية من الأشعة، معاملات التوهين،أكاسيد المعادن القوية، غرف العلاج الاشعاعي.

This research focuses on the study and modeling of the efficiency of new composite materials for use in radiation shielding in radiotherapy rooms. A comparison was made between a group of high-density oxides such as tantalum oxide, tungsten oxide, cerium oxide, bismuth oxide, in addition to barite concrete. The study highlighted the use of the Phy-X/PSD program to calculate the fundamental physical attenuation parameters. The results showed that bismuth oxide (Bi_2O_3), with a density reaching 8.90 g/cm³, is the best and most promising material for providing superior radiation protection. This allows the design of more efficient and thinner shields to secure medical working environments against high-energy radiation.

Keywords: ionizing radiation, radiation protection, attenuation coefficients, heavy metal oxides, radiotherapy rooms.

Cette recherche porte sur l'étude et la modélisation de l'efficacité de nouveaux matériaux composites destinés au blindage radiologique des salles de radiothérapie. Une comparaison a été effectuée entre plusieurs oxydes à haute densité, tels que l'oxyde de tantale, l'oxyde de tungstène, l'oxyde de cérium, l'oxyde de bismuth, ainsi que le béton baryté. L'étude a également mis en évidence l'utilisation du logiciel Phy-X/PSD pour calculer les paramètres physiques fondamentaux d'atténuation. Les résultats obtenus ont montré que l'oxyde de bismuth (Bi_2O_3), avec une densité atteignant 8,90 g/cm³, constitue le matériau le plus performant et le plus prometteur pour assurer une protection radiologique supérieure. Cela permet de concevoir des écrans de protection plus efficaces et moins épais afin de sécuriser les environnements médicaux contre les rayonnements de haute énergie.

Mots-clés : rayonnements ionisants, radioprotection, coefficients d'atténuation, oxydes métalliques lourds, salles de radiothérapie.

الفهرس

الشكر..... III
الإهداء..... II
الإهداء..... III
الملخص:..... IV
الفهرس..... V
قائمة الأشكال:..... IX
قائمة الجداول:..... XI
قائمة الإختصارات:..... XII
المقدمة العامة..... 1
المقدمة العامة (Introduction Générale) :..... 2
الفصـــــــــل الأول: معلومات عامة عن العلاج الإشعاعي والحماية من الإشعاع..... 4
1. مقدمة:..... 5
2. العلاج الإشعاعي:..... 5
1.2.إستخدامات العلاج الإشعاعي :..... 5
3. الأسس الفيزيائية للعلاج الإشعاعي:..... 5
1.3.تفاعل الإشعاع مع المادة:..... 5
2.3.تفاعل الجسيمات المشحونة مع المادة:..... 7
3.3.تفاعل الجسيمات الغير مشحونة مع المادة:..... 7
4.3.الأشعة المؤينة:..... 8
5.3.الإشعاع المؤين المباشر:..... 8
6.3.الإشعاع المؤين الغير مباشر:..... 8
7.3.قدرة التوقف S(Stopping power):..... 9
8.3.نقل الطاقة الخطيLET:..... 9
9.3.كثافة التأين الخطية LID :..... 10
10.3تفاعل الفوتونات مع المادة :..... 10
1.10.3تأثيركومبتون :..... 11
2.10.3.التأثير الكهروضوئي :..... 12
3.10.3.ظاهرة إنتاج الزوج :..... 12
4.10.3.تشتت رايلي :..... 13

5.10.3.تشتت طومسون : 13
6.10.3.التفاعلات النووية الضوئية : 14
7.10.3.الأهمية النسبية للتأثيرات الرئيسية الثلاثةكدالة لطاقة الفوتون والعدد الذري لكل مادة: 14
4. التأثيرالبيولوجي للإشعاع : 15
5. الأليات الرئيسية للتأثيرالبيولوجي : 15
1.5.العوامل المؤثرة على الإستجابة الإشعاعية: 16
6. أنواع العلاج الإشعاعي :..... 16
1.6.العلاج الإشعاعي الخارجي(EBRT): 16
2.6.العلاج الإشعاعي الداخلي ((Brachytherapy(Internal Radiation Therapy): 17
3.6.أجهزة العلاج الإشعاعي الخارجي: 17
4.6.أجهزة العلاج الإشعاعي الداخلي: 18
5.6.تخطيط العلاج الإشعاعي (Radiation Therapy Treatment Planning): 18
7. الوقاية من العلاج الإشعاعي:..... 19
8. مبادئ الأساسية للوقاية من العلاج:..... 19
9. وسائل الحماية من الإشعاع:..... 20
10. قوانين مهمة فالحماية من الإشعاع:..... 20
1.10.قانون التوهين: 20
2.10.معامل التوهين الخطيLAC: 21
3.10.معامل التوهين الكتلي (MAC): 21
4.10.طبقة نصف القيمة (HVL): 22
5.10.طبقة عشر القيمة(TVL): 22
6.10.قانون التربيع العكسي: 22
7.10.الجرعة الممتصة: 23
8.10.الجرعة الفعالة: 23
9.10.الجرعة المكافئة: 23
10.10المقطع العرضي الإلكتروني(ECS): 24
11.10.متوسط الوزن الجزيئي (AMW) : 24
12.10.متوسط المسار الحر (MFP): 24
13.10.العدد الذري المكافئ(Zeq) : 24
14.10.العدد الذري الفعال(Zeff) : 24
15.10.كثافة الإلكترون الفعال (Neff): 25
16.10.المقطع العرضي الذري (ACS): 25

17.10.الموصلية الفعالة$(Ceff)$: 25
11. خاتمة: 25
الفصل الثاني: مواد للحماية من الإشعاع 23
1. مقدمة: 24
2. مواد التدريع والحماية من الإشعاع: 24
1.2.الرصاص(Pb): 24
2.2.أكسيد البزموث $Bi2O3$: 25
3.2.أكسيد التنتالوم $Ta2O5$: 25
4.2.أكسيد التنغستن$WO3$: 26
5.2.اكسيد السيريوم$CeO3$: 27
6.2.الخرسانة العادية مع إضافات: 27
1.6.2.الخرسانة: 27
2.6.2. كبريتات الباريوم$BaSO4$بنسبة(55%): 28
3.6.2.أكسيد الكالسيومCaO بنسبة(10%): 28
4.6.2.أكسيد السيليكون$SiO2$: 29
5.6.2.أكسيد الألمنيوم$Al2O3$: 29
6.6.2.الماء$H2O$بنسبة(5%): 30
3. التقنيات والمواد المستحدثة المستخدمة في تعزيز كفاءة الحماية من الأشعة غاما: 30
4. خاتمة: 35
الفصل الثالث: طرق وكميات قياس الجرعات الإشعاعية 36
1. مقدمة: 37
2. برنامج مونت كارلو Monte Carlo N-particle(MCNP): 37
3. برنامجWinXCOM Program: 38
4. كود(KAsKade tuierende FLUKa(Fluka)): 39
5. الهندسة والتتبع(Geometry And Tracking(Geant4)) : 39
5. برنامج حزمة تفاعل الكترون-فوتون 40
(Package for Electron –photon Interaction(penelope)Code): 40
6. المقارنة بين البرامج: 41
7. برنامجPhy-X/PSD: 41
8. خاتمة: 44
الفصل الرابع: النتائج والمناقشة 43
1. مقدمة: 44

.2 المواد المرشحة: 44
3. معاملات التدريع: 45
1.3.معامل التوهين الكتلي (MAC) : 45
2.3.معامل التوهين الخطي (LAC) : 47
3.3.المقطع العرضي الذري(ACS): 48
4.3.المقطع العرضي الإلكتروني(ECS): 50
5.4.معامل التوهين(HVL) : 52
6.4.معامل التوهين(TVL): 53
7.4.متوسط المسار الحر(MFP): 55
8.4.كثافة الالكترونية الفعالة(Neff) : 56
9.4.العدد الذري الفعال (Zeff): 58
.4 تحليل مقارن لأداء عينات زجاج البوروسيليكات والبيروفسكايت مقابل المواد التي تم دراستها في بحثنا كأفضل أداء في الحماية من الإشعاع خاصة في غرف العلاج الإشعاعي: 59
1.4.معامل التوهين الكتلي (MAC): 61
2.4.معامل التوهين الخطي (LAC): 62
3.4.طبقة نصف القيمة (HVL): 64
4.4.العدد الذري الفعال(Zeff): 65
.5 خاتمة: 67
الخاتمة العامة 68
الخاتمة العامة (Conclusion Générale): 69
قائمة المراجع: 70

قائمة الأشكال:

الشكل (1.1):يمثل طيف الأشعة الكهرومغناطيسية	4
الشكل (2.1):صورة توضيحية لتأثير كومبتون	9
الشكل (3.1):صورة توضح كيفية حدوث التأثير الكهروضوئي	10
الشكل (4.1):كيفية حدوث ظاهرة إنتاج الزوج.	10
الشكل (5.1):تشتت رايلي	11
الشكل (6.1):تشتت طومسون	11
الشكل (7.1):أهمية التأثيرات الرئيسية (التأثير الكهروضوئي، تشتت كومبتون، انتاج الزوج)	12
الشكل (8.1):التأثيرات البيولوجية للأشعة المؤينة	13
الشكل (9.1):توهين الأشعة بواسطة مادة	18
الشكل (10.2):معدن الرصاص(Pb)المستخدم في التدريع الإشعاع	24
الشكل (11.2):مركب أو أكسيد البزموثBi2O3	25
الشكل (12.2):بنية بلورية لعنصر التنغستنWO3	27
الشكل (13.2): مسحوق كبريتات الباريوم BaSO4النقي	28
الشكل (14.2): الصخر الخام لأكسيد الكالسيومCaO	29
الشكل (15.2): مسحوق أكسيد الألمنيوم النقيAl2O3	30
الشكل (16.3):تمثيل تخطيطي لمحاكاة(a) التصميم الهندسي و(b)التوزيع الإشعاعي للجسيمات باستخدام كودMCNP	37
الشكل (17.3):نموذج محاكاة يوضح التوزيع الهندسي والإشعاعي للجسيمات باستخدام كودMCNP	38
الشكل (18.3):التعريف ببرنامج WinXCOM ودوره في حساب معاملات التوهين الإشعاعي	38
الشكل (19.3):تطبيقات كود Fluka في نمذجة تتبع الجسيمات المشحونة	39
الشكل (20.3):محاكاةGeant4 لإنتشار الجسيمات وتفاعلها مع المادة	40
الشكل (21.3):بنية المجلدات والملفات المصدرية لبرنامجPENELOPEلمحاكاة إنتقال الإلكترونات والفوتونات بطريقةMCNP	41
الشكل (22.3):الواجهة الرئيسية لبرنامجPhy-X/PSD لحساب معلمات الوقاية الإشعاعية	42
الشكل (23.3):الطريقة الوظيفية لبرنامجphy-X/PSD	43
الشكل (24.4):معامل التوهين الكتلي MACلعينات مواد في نطاق طاقة0.015 MeVإلى0.15MeV	46
الشكل (25.4):معامل التوهين الخطيLAC لعينات مواد ضمن نطاق طاقة0.015 MeVإلى0.15MeV	48
الشكل (26.4):تغيرات المقطع العرضي الذري ضمن نطاق طاقة 0.015 MeVإلى0.15MeV	50
الشكل (27.4):تغيرات قيم المقطع العرضي الإلكتروني ضمن مجال طاقة 0.015 MeVإلى0.15MeV	52
الشكل (28.4):تغيرات قيم HVL ضمن مجال طاقة 0.015 MeVإلى0.15MeV	53
الشكل (29.4):تغيرات قيم TVL ضمن نطاق الطاقة0.015 MeVإلى0.15MeV	54
الشكل (30.4):تغيرات قيم MFP ضمن مجال الطاقة0.015 MeVإلى0.15MeV	56
الشكل (31.4):تغيرات قيم Neff ضمن مجال الطاقة0.015 MeVإلى0.15MeV	57
الشكل (32.4):تغيرات قيم Zeff ضمن مجال الطاقة0.015 MeVإلى0.15MeV	59
الشكل (37.4):مقارنة تغيرات MAC ضمن مجال الطاقة 0.015 MeVإلى 0.15MeV (زجاج بروسيليكات مقابل البروفسكايت مقابل اكاسيد العينات المدروسة)	62
الشكل (38.4):مقارنة تغيرات LAC ضمن مجال الطاقة0.015 MeVإلى 0.15MeV (زجاج بروسيليكات مقابل البروفسكايت مقابل اكاسيد العينات المدروسة)	63
الشكل (39.4):مقارنة تغيرات HVL ضمن مجال الطاقة0.015 MeVإلى 0.15MeV (زجاج بروسيليكات مقابل البيروفسكايت مقابل اكاسيد العينات المدروسة)	65

الشكل (40.4):مقارنة تغيرات Zeff ضمن مجال الطاقةMeV0.015 إلى MeV0.15 (زجاج بروسيليكات مقابل البروفسكايت مقابل اكاسيد العينات المدروسة)	67

قائمة الجداول:

الجدول (1.1):تصنيف الأشعة المؤينة	5
الجدول (2.1):مختلف الأشعة المؤينة والغير مؤينة	7
الجدول (3.1):يجمع بين المواد التدريعية المتألقة والمبتكرة كدورها في الحماية	36
الجدول (4.4):معلومات مهمة عن المواد المدروسة اللازمة للحماية من الإشعاع	44
الجدول (5.4): بيانات زجاج البوروسيليكات المعتمدة في التدريع	58
الجدول (6.4): بيانات البيروفسكايت المعتمدة في التدريع	59

قائمة الإختصارات:

LET: linear energy transfer

LID: linear ionization density

S: Stopping power

EBRT: External Beam Radiation Therapy

IGRT: Image-Guided Radiotherapy

IMRT: Intensity-Modulated Radiation Therapy

VMAT: Volumetric Modulated Arc Therapy

SRS: Stereotactic Radiosurgery

SBRT: Stereotactic Body Radiation Therapy

ALARA: As Low As Reasonably Achievable

LAC: Linear Attenuation Coefficient

MAC: Mass Attenuation Coefficient

HVL: Half Value Layer

TVL: Tenth Value Layer

AMW: Average Molecular Weight

MFP: Mean Free Path

Neff: Effective electron density

ACS: atomic cross section

Zeq: Equivalent atomic number

R: Ratio

Zeff: effective atomic number

ECS: Electronic cross section

Ceff: Effective conductivity

Pb: Lead

MCNP: Monte Carlo N-Particle

FLUKA: FLUKtuierende KAskade

PENELOPE: PENetration and Energy LOss of Positrons and Electrons

GEANT4: GEometry And Tracking

المقدمة العامة

المقدمة العامة (Introduction Générale) :

تعد الفيزياء الطبية وبالأخص تقنيات العلاج الإشعاعي(Radiothérapie) من أهم الركائز في الطب الحديث لعلاج الأورام السرطانية. ومع تطور التكنولوجيا وزيادة دقة الأجهزة الإشعاعية برز تحدي كبير يتعلق بكيفية حماية المرضى والعاملين في المجال الطبي والبيئة المحيطة من الآثار الجانبية للإشعاعات المؤينة. ومن هنا تبرز أهمية "الوقاية الإشعاعية (Radioprotection) "كعلم يهدف إلى تقليل التعرض الإشعاعي إلى أدنى المستويات الممكنة.

تعتمد فعالية الحماية داخل غرف العلاج الإشعاعي بشكل أساسي على جودة ونوعية المواد المستخدمة في بناء الدروع الواقية. ونظرا لعيوب المواد التقليدية (مثل الرصاص لسميته وثقله أو الخرسانة لضخامة حجمها) اتجه البحث العلمي الحديث نحو تطوير مواد مركبة (Matériaux Composites) مبتكرة. تتميز هذه المواد بقدرة عالية على امتصاص وتوهين الإشعاع مع الحفاظ على خصائص ميكانيكية وفيزيائية متفوقة وخفة في الوزن.

يتمحور هذا البحث حول:

"Étude et modélisation dosimétrique de nouveaux matériaux composites pour la radioprotection des salles de radiothérapie"

(دراسة ونمذجة قياس الجرعات لمواد مركبة جديدة للحماية من الإشعاع في غرف العلاج الإشعاعي)

يهدف هذا العمل إلى تقييم كفاءة هذه المواد الجديدة باستخدام طرق النمذجة والمحاكاة لضمان بيئة عمل آمنة وفق المعايير الدولية. وللوصول إلى هذه الأهداف تم تقسيم هذا البحث إلى الفصول التالية:

الفصل الأول معلومات عامة عن العلاج الإشعاعي والحماية من الإشعاع: يتناول هذا الفصل المبادئ الفيزيائية للعلاج الإشعاعي وأنواع الأشعة المستخدمة (فوتونات، إلكترونات) والتأثيرات البيولوجية للإشعاع بالإضافة إلى القوانين والأسس التي تقوم عليها الوقاية الإشعاعية.

الفصل الثاني مواد الحماية من الإشعاع: يركز هذا الفصل على دراسة خصائص المواد الواقية. يبدأ بالموادالكلاسيكية ثم ينتقل إلى صلب الموضوع وهو المواد المركبة الجديدة، موضحاً تركيبها الكيميائي، وكيفية تفاعلها مع الإشعاع لتوفير حماية مثالية.

الفصل الثالث طرق وكميات قياس الجرعات: يشرح هذا الجانب التقني من البحث حيث يتم استعراض المفاهيم الخاصة بالجرعات الإشعاعية (الجرعة الممتصة، الجرعة المكافئة) وطرق قياسها، مع التركيز على أدوات النمذجة والمحاكاةمثل برامج مونت كارلو و برنامج phy-X / PSD التي تستخدم للتنبؤ بسلوك الإشعاع داخل المواد.

الفصل الرابع النتائج والمناقشة: يمثل الجزء العملي/التحليلي.حيث يتم عرض النتائج المحصل عليها من عملية النمذجة للمواد المركبة المقترحة (أكاسيد ومركبات اخرى)في تحليل قدرتها على توهين الحزم الإشعاعية ومناقشة مدى فاعليتها مقارنة بالمواد التقليدية والدراسات السابقة.

وفي الاخير تم تلخيص لأهم النتائج التي توصل إليها البحث، وتقديم توصيات حول إمكانية استخدام هذه المواد في المنشآت الطبية المستقبليّة، وفتح آفاق لدراسات جديدة

الفصـــــــــل الأول:

معلومات عامة عن العلاج الإشعاعي والحماية من الإشعاع

I. الفصل الأول:معلومات عامة عن العلاج الإشعاعي والحماية من الإشعاع

1. مقدمة:

يعد العلاج الاشعاعي أحد الركائز الأساسية في علاج السرطان إلى جانب الجراحة والعلاج الكيميائي. وقد أدت التقنيات المتطورة في السنوات الأخيرة إلى جعل العلاج الإشعاعي أكثر دقة وفعالية.

يستعرض هذا الفصل الأسس الفيزيائية في العلاج الإشعاعي تحت ضوء الأشعة المؤينة التي تستخدم في تدمير الخلايا السرطانية والتقنيات التي تبرزها في نهج التخطيط العلاجي، إلا أن الإشعاع يحمل معاكسات قد تؤدي إلى خطر بيولوجي محتمل. فمن هنا نستدعي جانب الحماية من الإشعاع والقواعد التي تضمن السلامة الإشعاعية.

2. العلاج الإشعاعي:

يعد توظيف الإشعاع في المجال الطبي من الركائز الأساسية التي ساهمت بشكل كبير في تحسين صحة المجتمع لما له دور في التشخيص والعلاج ويعتبر أحد أكثر علاجات السرطان الأكثر شيوعا.

يستخدم العلاج الإشعاعي جسيمات أو موجات عالية الطاقة لإستهداف الخلايا السرطانية وتدميرها إنه علاج موضعي ودقيق يعمل على جزء محدد من الجسم حيث يوجد السرطان.

يعتبر العلاج الإشعاعي جزءا أساسيا من العديد من خطط علاج السرطان ومفيد بشكل خاص في إزالة الأورام و تقليص حجمها، ويتلقى حوالي60 %من مرضى السرطان العلاج الإشعاعي في مرحلة ما من علاجهم الإشعاعي [1].

1.2.إستخدامات العلاج الإشعاعي :

يمكن إستخدام العلاج الإشعاعي بمفرده أو بالتزامن مع الجراحة أو العلاج الكيميائي وذلك حسب نوع ومرحلة السرطان يمكن إستخدام العلاج الإشعاعي في مجموعة حالات منها:

قبل الجراحة: تقليص حجم الورم

بعد الجراحة: لتدمير الخلايا السرطانية المتبقية

بديلا عن الجراحة: عندمالا تكون الجراحة خيارا متاحا

لتخفيف الأعراض:في الحالات المتقدمة [2].

3.الأسس الفيزيائية للعلاج الإشعاعي:

1.3.تفاعل الإشعاع مع المادة:

تتفاعل الإشعاعات بأنواعها مع المادة بأليات مختلفة كطبيعة الإشعاع والمادة المتعرضة زيادة إلى ذلك طاقة الإشعاع مما يسبب تغيرات في الخواص الكيميائية والفيزيائية للمادة ناتجة عن تأثيرات الإشعاع.

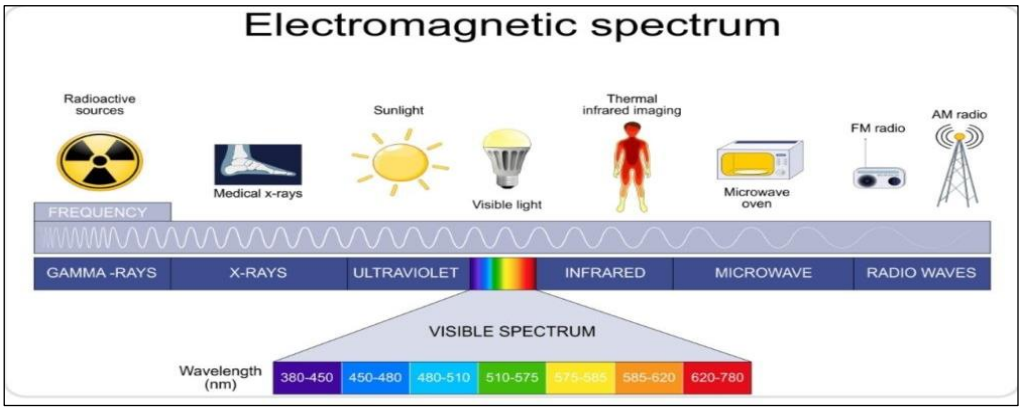
تصنف هذه الإشعاعات بنوعيها:

- **الإشعاع الجسيمي:**

هو إنتقال الطاقة عبر الفضاء بواسطة جسيمات دون ذرية سريعة الحركة ولها كتلة سكون مثل جسيمات المشحونة كألفا أو الإلكترونات أوالبروتونات أوالبوزيترونات أو غير مشحونة مثل النيترونات.

- **الإشعاع الكهرومغناطيسي:**

هو صورة من صور الطاقة التي لا تستند على كتلة مادية أي أنها كيان غير مادي وعديم الكتلة. وبتعبير آخر هي طاقة متمثلة في صورة مجالين أحدهما كهربائي والأخر مغناطيسي يتغيران بمرور الزمن [3].



الشكل (1.1):يمثل طيف الأشعة الكهرومغناطيسية

تصنف هذه الجسيمات في الجدول التالي:

	وزن الجسيم	نوع الجسيم/الإشعاع
جسيمات المشحونة	خفيفة خفيفة ثقيلة ثقيلة	إلكترونات بوزيترونات ألفا بروتونات
جسيمات غير مشحونة	ثقيلة	نيترونات
الإشعاع الكهرومغناطيسي	عديم الكتلة	غاما الأشعة السينية

الجدول(1.1):تصنيف الأشعة المؤينة

2.3.تفاعل الجسيمات المشحونة مع المادة:

- **جسيمات خفيفة:**

تتفاعل الجسيمات مشحونة خفيفة مثل الإلكترونات والبوزيترونات مع المادة بشكل أساسي عبر عدة تفاعلات أساسية منها التصادمات مع إلكترونات الوسط أو تفاعلات كولومية مع النواة [4].

- **آليات التفاعل الأساسية:**

- **الإثارةوالتأين**:الإثارة هي إنتقال إلكترون الذرة من مدار الى مدار أعلى بينما التأين هو إنتزاع أو قلع إلكترون من الذرة.
- **التشتت:** تفاعل يؤدي إلى إنحراف الجسيم أو الفوتون عن مساره الأصلي.
- **فقدان الطاقة الحركية:** يحدث فقدان في الطاقة الحركية في حالة تصادمات الغير مرنة والخسائر الإشعاعية.
- **تفاعلات التصادمية:**

تصادم المرن: يحافظ على الطاقة الحركية كالتشتت

تصادم الغير مرن: يغير في الطاقة الحركية كالإثارة والتأين

- **تفاعلات اشعاعية:** يصف بأنه إنبعاث أشعة الكبح المصاحبة لتباطؤ الإلكترون

- **جسيمات ثقيلة:**

جسيم ألفا:

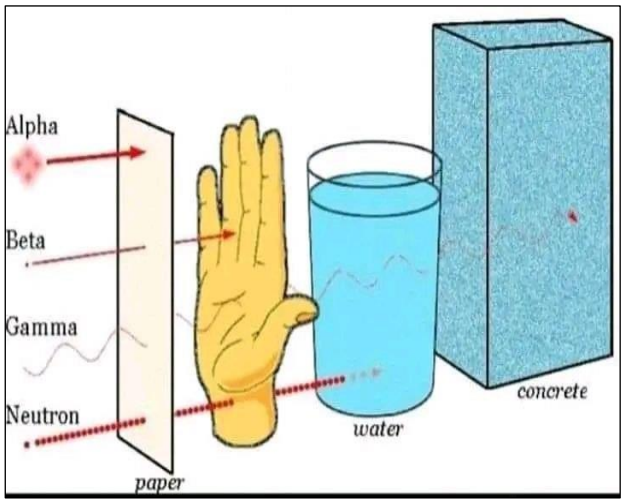
يعتبر الجسيم ألفا شكل من أشكال الإشعاع المؤين تعرف بأيونات الهيليوم ^{2} **(He+)**تنبعث من بعض العناصر المشعة.تتميز هذه الجسيمات بطاقتها العالية وسرعتها الفائقة وتحمل شحنة موجبة مقدارها3.20×10^{-19}

وكتلة تقارب **4.002** من وحدة الكتل الذرية(μ).

3.3.تفاعل الجسيمات الغير مشحونة مع المادة:

النيترونات:

هي جسيم دون ذري ومن أحد مكونات نواة المادة وأهمها بإستثناء ذرة الهيدروجين، يعتبرجسيم متعادل وحيادي الشحنة وكتلته تساوي 1.00866 من وحدة الكتل الذرية(μ)تتمثل الوظيفة الرئيسية للنيترونات في المساهمة في طاقة الربط الذي يربط النواة نفسها معا.



الشكل (2.1):أهم الإشعاعات المؤينة ومدى مسارها

4.3.الأشعة المؤينة:

تعتبر نوع من الطاقة تطلقه الذرات، بحيث تنتقل على شكل موجات كهرومغناطيسية (الأشعة السينية وغاما) أو على شكل جسيمات (نيترونات، بيتا، ألفا) ويسمى بالتفكك التلقائي تطلقه الأنوية الغير مسقرة [5].

هناك نوعين من تأثيرالإشعاع على المادة:

5.3.الإشعاع المؤين المباشر:

هي جسيمات مشحونة سريعة مثل جسيمات ألفا،بيتا، البروتونات، الأيونات الثقيلة تنقل طاقتها مباشرة إلى المادة عبر عدة تفاعلات كولومية(كهروستاتكية)مع إلكترونات الذرة.

6.3.الإشعاع المؤين الغير مباشر:

يشمل الأشعة السينية والفوتونات والنيترونات أي الجسيمات المشحونة تنقل طاقتها أولا الى الجسيمات المشحونة في المادة التي تمر من خلالها في عدد قليل نسبيا من التفاعلات الكبيرة [6].

يوضح الجدول أدناه مختلف الأشعة المؤينة والغير مؤينة:

الأشعة	**الأشعة المؤينة**	**الأشعة المؤينة المباشرة:** جسيمات كالإلكترونات والبروتونات والنيترونات وجسيم ألفا
		الأشعة المؤينة الغير مباشرة: الموجات الكهرومغناطيسية كالأشعة غاما والأشعة السينية
	الأشعة الغير المؤينة	**الأشعة الغير مؤينة المباشرة:** الأشعة فوق البنفسجية، الأشعة تحت الحمراء، الضوء المرئي، ميكروويف، موجات الراديو

الجدول (2.1):مختلف الأشعة المؤينة والغير مؤينة

7.3.قدرة التوقف (Stopping power)S:

تعرف بأنها متوسط الطاقة المبددة بواسطة الإشعاع المؤين في وسط ما لكل وحدة طول مسار يقطعه الإشعاع في ذلك الوسط تأخذ في الإعتبار التفاعلات بين الجسيمات المشحونة وذرات المادة الماصة وتتأثر بعدة عوامل كالكتلة وسرعة الجسيمات وكثافة وعدد ذرات الوسط [7].

$$S= -\frac{dE}{dx} \quad (1.1)$$

S :قدرة الإيقاف

dE : مقدار الطاقة المفقودة

dx:مسافة مقطوعة داخل المادة

(-): تدل على أن طاقة الجسيم تتناقص أثناء حركته

8.3.نقل الطاقة الخطيLET:

هو مقدار الطاقة المنقولة لكل وحدة مسار بواسطة جسيم مشحون عالي الطاقة متحرك إلى وسط ما على طول مساره [8].

$$LET= k\frac{q^2\, nz}{v^2} \quad (1.2)$$

K:ثابت

q: شحنة الجسيم

n: عدد ذرات الهدف لكل وحدة حجم

z: عدد الذري لذرات الهدف

v: سرعة الجسيم

9.3.كثافة التأين الخطية LID :

تسمى أيضا بكثافة التأين المحدد وتمثل عدد أزواج التأين المنتجة لكل وحدة مسار جسيم مشحون داخل المادة.

$$LID = \frac{dN}{dx} \qquad (1.3)$$

dN=عدد أزواج التأين المتولدة

dx=مسافة على طول مسار الجسيم

ويمكن وصف العلاقة بين معدل نقل الطاقة الخطي وكثافة التأين الخطية بالعلاقة التالية:

$$LID = \frac{LET}{W} \qquad (1.4)$$

LET : نقل الطاقة الخطي

W : متوسط الطاقة اللازمة لتكوين زوج أيوني.**مثال**الطاقة المطلوبة لتكوين زوج أيوني بالنسبة للماء (32 kev)

10.3تفاعل الفوتونات مع المادة :

عند مرور الإشعاع الكهرومغناطيسي المؤيّن (اشعة سينية واشعة غاما) عبر مادة ما تنشأ مجموعة من الظواهر الفيزيائية التي تؤدي إلى إنخفاض تدريجي في عدد الفوتونات المكوّنة له. ويُعرف هذا الإنخفاض بظاهرة التوهين حيث يرجع إلى تفاعل جزء من الفوتونات الساقطة مع مكونات المادة ولا سيما إلكترونات الذرات.

تحدث هذه التفاعلات نتيجة تأثير قوى كهرومغناطيسية تعمل على مسافات قصيرة جدًا بين المجال الكهرومغناطيسي المصاحب للفوتون والمجال الكهربائي للإلكترون داخل الذرة. ونتيجة لذلك تفقد الحزمة الإشعاعية جزءًا من طاقتها إذ قد تُمتص طاقة الفوتون كليًا أو جزئيًا من قبل ذرات الوسط أو يتشتت الفوتون مغيرًا اتجاهه الأصلي، بحيث يغادر الوسط المادي في مسار يختلف عن اتجاه الإشعاع الساقط [9].

تتفاعل الفوتونات مع المادة بشكل رئيسي عبر عدة تفاعلات او تأثيرات أهمها:

1.10.3تأثيركومبتون :

ويعرف بتشتت كومبتون هو ظاهرة فيزيائية إكتشفها الفيزيائي الأمريكي آرثر أتش كومبتون عام 1922. يحدث هذا التشتت عندما يصطدم إشعاع كهرومغناطيسي عالي الطاقة كالأشعة السينية والأشعة غاما بإلكترونات المادة ناقلا الطاقة والزخم بين الفوتونات والإلكترونات [10].

عند تطبيق قانون حفظ الطاقة نحصل على:

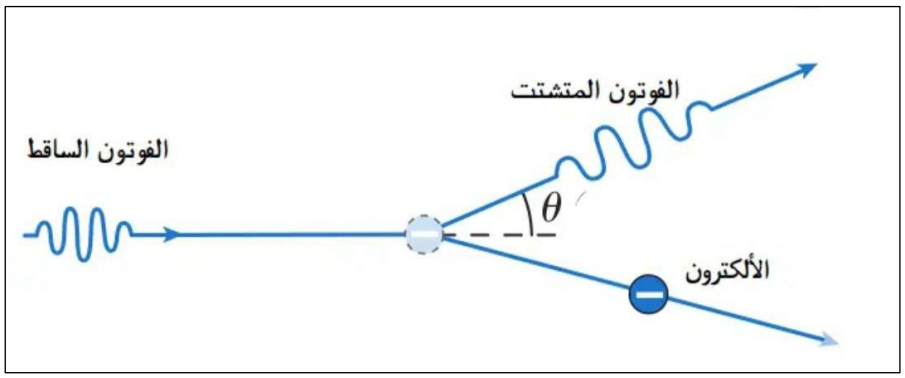
$$E\gamma = E'\gamma + T \quad (1.5)$$

حيث أن:

$E\gamma$: طاقة الفوتون الساقط

$E'\gamma$: طاقة الفوتون المشتت

الطاقة الحركية للإلكترون $T = m0c^2(ß-1)$ ، $ß = \frac{1}{\sqrt{1-(\frac{v^2}{c^2})}}$



الشكل (2.1):صورة توضيحية لتأثير كومبتون

بتطبيق قانوني حفظ الطاقة والزخم فإنه بالإمكان حساب الطاقة الضائعة للفوتون الساقط من خلال التغير الموجي للفوتون قبل وبعد التصادم على النحو التالي:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{(m0c)(1-cos\theta)} \quad (1.6)$$

2.10.3.التأثير الكهروضوئي :

يعرف التأثير الكهروضوئي بأنه ظاهرة إنبعاث الإلكترونات على أسطح المواد. يمكن تصور أن طاقة الضوء تتحول إلى طاقة كهربائية مع ذلك لا تنبعث الإلكترونات إلا عند سقوط الضوء على المادة بتردد معين (الحد الأدنى لطاقة الفوتون اللازمة لإنبعاث الإلكترون هو دالة الشغل) [11].

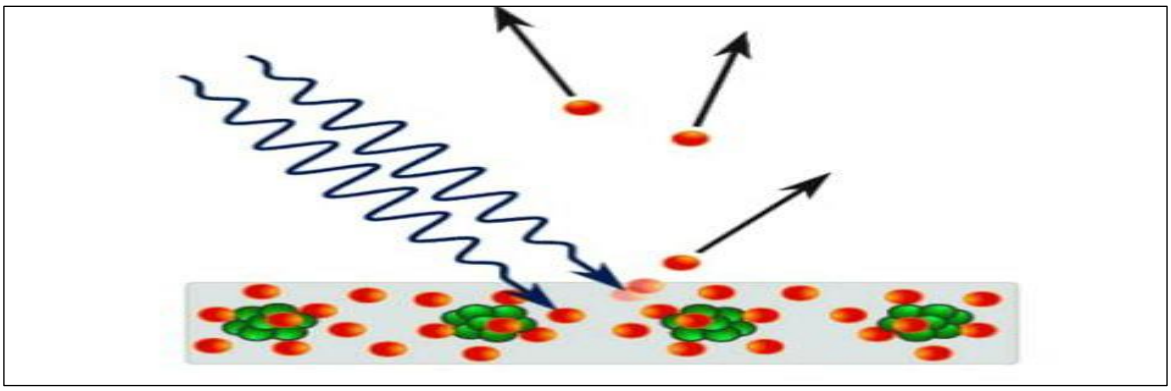
يمكن كتابة معادلة الطاقة الحركية القصوى للإلكترونات المنبعثة على النحو التالي:

$$E_k = hU - \phi \quad (1.7)$$

h :ثابت بلانك

U : تردد الضوء الساقط

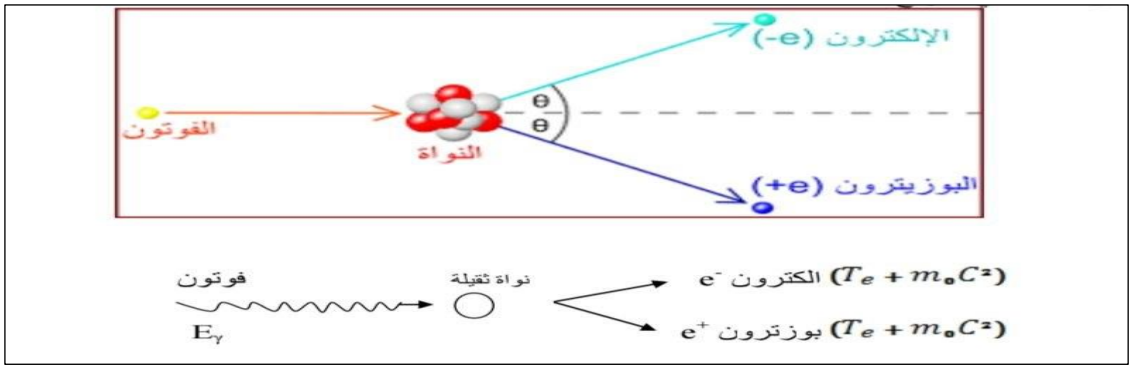
ϕ : دالة الشغل (طاقة الحد الأدنى لتحرير الالكترون)



الشكل (3.1):صورة توضح كيفية حدوث التأثير الكهروضوئي

3.10.3.ظاهرة إنتاج الزوج :

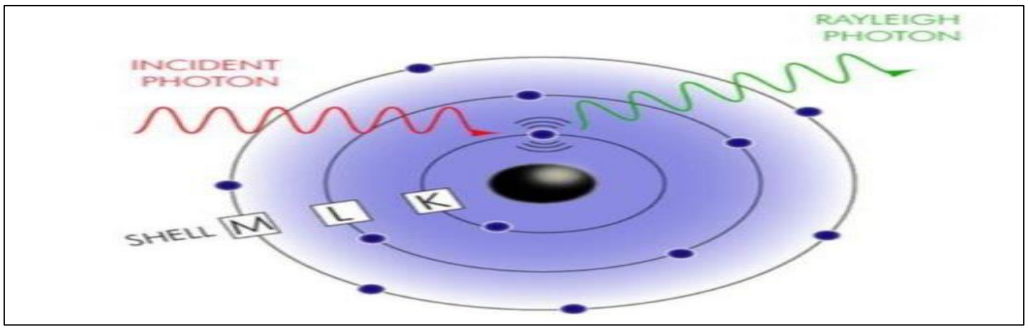
هو تفاعل بين الفوتون والنواة بصورة عامة. ونتيجة هذا التفاعل فالفوتون يختفي كليا ويتكون زوج إلكترون-بوزيترون،لكي تحدث هذه الظاهرة يجب أن تكون طاقة الفوتون أكبر من مجموع طاقتي السكون لكل من الإلكترون-بوزيترون [12].



الشكل (4.1):كيفية حدوث ظاهرة إنتاج الزوج[12].

4.10.3.تشتت رايلي :

ويسمى بالتشتت المتماسك ينسب إلى العالم البريطانيlord Rayleigh، يعرف بأنه تشتت الموجات الكهرومغناطيسية بواسطة جسيمات أصغر حجما من الطول الموجي، حيث تتفاعل الفوتونات بشكل مرن مع الإلكترونات الذرية المرتبطة بطريقة متماسكة مما يؤدي إلى الحد الأدنى من فقدان الطاقةوشبه تغير في الزاوية، وهوأكثر شيوعا من تشتت طومسون [13].



الشكل (5.1):تشتت رايلي

5.10.3.تشتت طومسون :

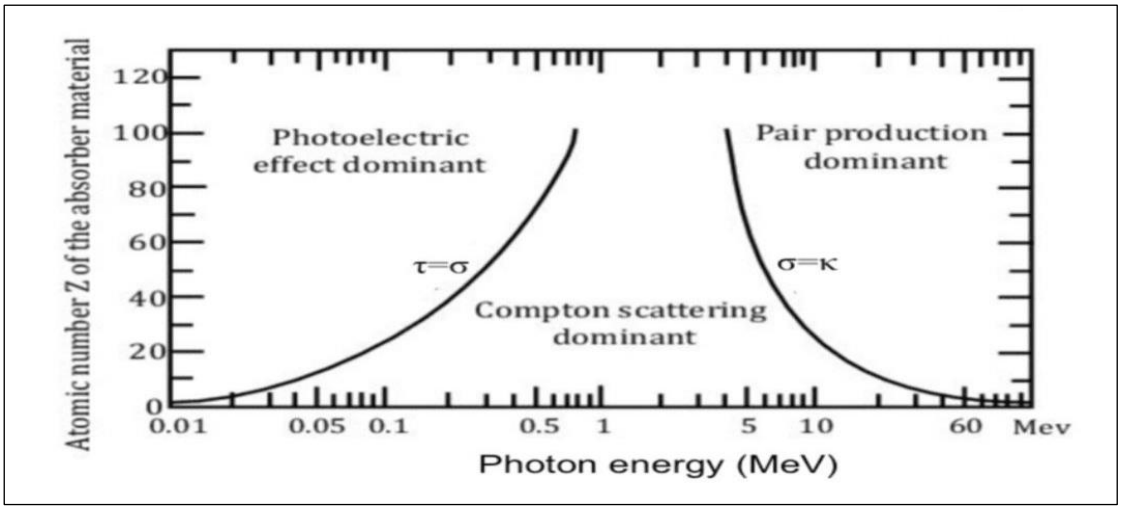
يحدث هذا التشتت إما على الإلكترونات الحرة أو على الشحنة نووية ويعتبر عملية موجية بحثه حيث تتشتت الموجة الساقطة ببساطة دون تغير في طولها الموجي. [14]

الشكل (6.1):تشتت طومسون[55]

6.10.3.التفاعلات النووية الضوئية :

تعرف التفاعلات النووية الضوئية بأنها تفاعلات نووية ناتجة عن الفوتونات، تحدث عندما يتفاعل فوتون ذو طاقة تتجاوز طاقة ربط النكليون مع الذرة المستهدفة مما يؤدي إلى إثارة النواة وتحرير نكليون واحد أو أكثر فتتحول النواة الأصلية إلى نظيرأو نوع كيميائي آخر. [15]

7.10.3.الأهمية النسبية للتأثيرات الرئيسية الثلاثةكدالة لطاقة الفوتون والعدد الذري لكل مادة:



الشكل (7.1):أهمية التأثيرات الرئيسية (التأثير الكهروضوئي، تشتت كومبتون، انتاج الزوج)[55]

التأثيرالكهروضوئي: سائد عند قيم zالعاليةوالطاقة المنخفضة$E< 50Mev$

تشتت كومبتون :سائد بالنسبة لقيمZ المنخفضة إلى المتوسطة والطاقات المنخفضة إلى المتوسطة من 20 MeV إلى50MeV

إنتاج الزوج: سائد بالنسبة لقيم Zالعالية والطاقات العالية E>20Mev

4.التأثيرالبيولوجي للإشعاع :

أدى زيادة إستخدام النظائر المشعة إلى تزايد المخاوف بشأن تأثير هذه المواد على الأنظمة البيولوجية، تصدر النويدات المشعة جسيمات عالية الطاقة أو موجات كهرومغناطيسية لتصطدم هذه الإشعاعات بالخلايا الحية ما قد يسبب مجموعة تأثيرات وأخطار بيولوجية داخل الخلايا.

5.الأليات الرئيسية للتأثيرالبيولوجي :

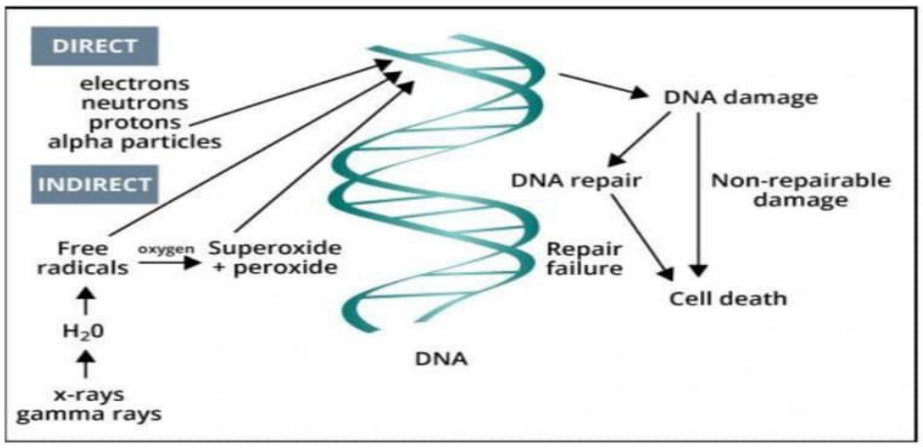
التأثيرالمباشر:

التأثيرات المباشرة يؤدي هذا النوع من التفاعلات إلى تلف بعض أجزاء مكونات الخلية وذلك بفعل إصطدام الجسيمات أو الفوتونات،مما يسبب تلفا كليا الأمر الذي يؤدي إلى إحباط عمل الخلية أو يكون جزئياً مما يؤدي إلى فقدان أحد وظائف الخلية المهمة مثل الانقسام.بحيث يتفاعل الإشعاع مباشرة مع ذرات جزيء الحمض النووي (DNA) أو الأهداف الحرجة الأخرى مثل الكرموزومات.

- قد يسبب موت للخلية وهذا مرتبط بكمية الاشعاع المتعرضة لها
- حدوث طفرات جينية أو وراثية

التأثير الغير مباشر:

كما هو معروف بأن الإشعاع المؤين خلال الخلية يؤدي إلى حدوث إثارة وتأين في ذرات الجزيئات. هذه الحوادث تتم في غضون فترة زمنية وجيزة (10-12 ثانية) يتبعها عدد من الحوادث الكيميائية والفيزيائية في وقت سريع ومتتابع. وبما أن أكثر مكونات الخلية عبارة عن ماء (حوالي75%) فإن نسبة كبيرة من هذه الطاقة الإشعاعية ستمتصها الجزيئات الماء مؤدية إلى حدوث تفاعلات كيميائية.



الشكل(8.1):التأثيرات البيولوجية للأشعة المؤينة[16]

1.5.العوامل المؤثرة على الإستجابة الإشعاعية:

أولا: عوامل حيوية Factors Biological منها ما يلي :

- **وضع الخلية:** من حيث كونها في حالة إنقسام أو سكون. حيث وجد أن الخلايا التي تعرضت للإشعاع وهي في حالة الإنقسام كانت إستجابتها للإشعاع أكبر بحوالي 1000 مرة من تلك التي لم تكن في حال الانقسام.
- **العمرAge:** حيث أن حساسية الخلية للإشعاع تكون أعلى ما يمكن عند طرفي العمر عنها من مرحلة النضوج .
- **الظروف الفسيولوجيةCondition Physiological:**وجد أن إزالة الماء من الخلية يقلل من استجابتها للإشعاع

.ثانيا: عوامل فيزيائية-كيميائية Physical-Factors -Chemical من هذه العوامل ما يلي :

- **نوع الإشعاع Type Radiation:**حيث لكل نوع من الأشعة المؤينة كفاءته وتأثيره على الخلية المتفاعلة وذلك تبعا:

✓ الجرعة المعطاة Dose Delivered والتوزيع الزمني للجرعات (التجزئة)من البديهي أن نذكر أنه كلما إزدادت الجرعة المعطاة كلما كان الدمار الناتج أكبر. وما يهمنا هنا هو أن الدمار يكون أقل إذا أعطيت الجرعة على عدة دفعات فبإمكان الخلية في كثير من الأحيان إعادة إصلاح ما أتلفته الجرعة السابقة.

✓ تركيز الدم Concentration Blood هذا ناشئ عن وجود الأكسجين الذي بدوره يزيد من إستجابة الخلايا للإشعاع [16].

6.أنواع العلاج الإشعاعي :

1.6.العلاج الإشعاعي الخارجي(EBRT):

يعد العلاج بالحزمة الخارجية الشكل الأكثر شيوعا للعلاج الاشعاعي حيث يتم توجيه الإشعاع المؤين مثل الأشعة السينية عالية الطاقة أو الأشعة غاما أو حزم الإلكترونات مباشرة إلى موقع الورم داخل جسم المريض مما يؤدي إلى تدمير الحمض النووي للخلايا السرطانية مع حماية الانسجة المحيطة ومن أنواعه ما يلي:

- **العلاج الإشعاعي ثلاثي الأبعاد المطابق:** تستخدم هذه الطريقة التصوير المقطعي المحوسب وبرامج حاسوبية لإنشاء صورة ثلاثية الأبعاد للورم. يقوم فيها الجهاز بتوجيه حزم الإشعاع بدقة إلى الورم بناءً علىشكله.

- **العلاج الإشعاعي الموجه بالصور (IGRT):** يستخدم العلاج الإشعاعي الموجه بالصور تقنيات التصوير في الوقت الحقيقي مثل الأشعة السينية منخفضة الجرعة أو التصوير المقطعي المحوسب المصغر لتوجيه العلاج. وهذا يضمن محاذاة دقيقة وتوصيلًا دقيقًا للإشعاع مع حماية الانسجة المجاورة.
- **العلاج الإشعاعي معدل الشدةIMRT:** هي إحدى الأنواع الأكثر تقدما من طرق العلاجية في العلاج الإشعاعي الخارجي. يجرى تصوير مقطعي محوسب على الورم لتحديد حجمه والأعضاء المحيطة به وبالتالي تحديد جرعة الإشعاع وإستنادا على هذه البيانات تعدل حزمة الإشعاع إلى مستويات مختلفة من الكثافة بحيث ترسم حزمة الإشعاع شكل الورم، تدخل الحزم الجسم من زوايا مختلفة من أجل زيادة الجرعة الواصلة إلى الورم إلى أقصى حد مع حماية أعلى للأنسجة المجاورة.
- **العلاج الاشعاعي القوسي VMAT:** تقنية إشعاعية حديثة ونوع متطور منIMRTتتيح توزيع جرعات عالية الدقة مع تغطية محسنة لحجم الورم المستهدف مع حماية الأنسجة السليمة مقارنة بالعلاج الاشعاعي التقليدي تتميز بأنها علاج أسرع وتوزيع جرعة أكثر تجانسا.
- **العلاج الإشعاعي التجسيمي (SRS)** :هي شكل من أشكال العلاج الإشعاعي حيث تُسلَّط جرعة عالية من الإشعاع على منطقة صغيرة في الدماغ أو الرأس من زوايا متعددة. ورغم أنها ليست جراحة بالمعنى الحرفي (لعدم وجود شقوق جراحية) إلا أن دقة توصيل الإشعاع فيها عالية للغاية ما يجعلها تُعرف بالجراحة الإشعاعية.
- **العلاج الإشعاعي التجسيمي للجسم(SBRT):** مشابه للجراحة الإشعاعية التجسيمية، ولكنه يستخدم في مناطق خارج الدماغ مثل الرئتين والعمود الفقري والكبد.يُستخدم العلاج الإشعاعي التجسيمي عالي الدقة (SBRT) في المراحل المبكرة من سرطان الرئة وعندما يتعذر إجراء الجراحة. كما يُستخدم أيضًا في حالات السرطان إلى الكبد أو الغدة الكظرية.
- **العلاج الإشعاعي بالبروتونات(Proton Therapy) :**

أحد أنواع العلاجات الإشعاعية المتطورة ويتم فيها إستخدام أشعة البروتونات لعلاج السرطان، كما أنه علاج بنفس فاعلية العلاج الإشعاعي التقليدي ولكن ما يميزه هي الدقة الأكبر. فعند إستخدام أشعة البروتونات يتم التركيز على الورم السرطاني دون المساس بالأنسجة والأعضاء السليمة المجاورة. [17]

2.6.العلاج الإشعاعي الداخلي ((Brachytherapy(Internal Radiation Therapy):

يعرف أيضا بالعلاج الإشعاعي الموضعي وهو علاج متقدم للسرطان يتم فيه وضع مواد مشعة تعرف بالبذور أوالمصادرمباشرة داخل الورم أو بالقرب منه، يوصل هذا الأسلوب جرعة إشعاعيةعالية إلى الورم مع تقليل تعرض الأنسجة المجاورة لها.

3.6.أجهزة العلاج الإشعاعي الخارجي:

- **المعجل الخطي (LINAC) :**هو الجهاز الأكثر شيوعاً، يوجه حزم أشعة سينية أو إلكترونات عالية الطاقة نحو الورم.
- **TrueBeam STx & Novalis:**تقنيات متطورة جداً لتركيز الأشعة وإدارة حركة الورم أثناء العلاج.
- **CyberKnife(السكين السايبراني):** روبوت ذراعي آلي يوجه الأشعة من آلاف الزوايا بدقة متناهية، يستخدم للأورام الدقيقة (الدماغ، الرئة، الكبد).
- **Vital Beam:** جهاز يستخدم التيار الكهربائي لإنتاج أشعة سينية عالية الطاقة لتدمير الأورام.
- **أجهزة البروتونات(Proton Therapy) :**تستخدم حزم بروتونات مركزة، فعالة للأورام القريبة من الأنسجة الحساسة.

4.6.أجهزة العلاج الإشعاعي الداخلي:

- **أجهزة المعالجة:** تُستخدم لوضع مصادر مشعة صغيرة (بذور أو كبسولات) داخل الجسم مباشرة أو بالقرب من الورم.
- **نظام المعالجة عالية الجرعة (HDR):** يستخدم مصادر مثل الإيريديوم-192 أو الكوبالت-60 لتقديم جرعات عالية في وقت قصير.
- **المصادر الدائمة (Permanent sources):** مثل اليود-125، توضع بشكل دائم داخل الورم (خاصة في سرطان البروستاتا).
- **أجهزة مساعدة (للتخطيط والمحاكاة):**

❖ التصوير المقطعي (CT scan): لتحديد موقع الورم بدقة.

❖ التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI) و PET-CT: لضمان الدقة التشخيصية قبل العلاج [4].

5.6.تخطيط العلاج الإشعاعي (Radiation Therapy Treatment Planning):

1- (الإستشارةالأولية) البداية:

الهدف: تقييم الحالة وتحديد نوع العلاج.

ما يحدث: يجتمع المريض مع أخصائي الأورام لمراجعة السجلات الطبية، تقارير المختبر،ونتائج الأشعة السابقة.

2-تحديد منطقة العلاج (عمليةالمحاكاة):

المدة: حوالي ساعة واحدة.

الإجراءات:استخدام التصوير المقطعي (CT) أو الرنين المغناطيسي (MRI) لرسم خريطة دقيقة للورم. وتثبيت وضعية الجسم لضمان الدقة في كل جلسة (استخدام أقنعة خاصة أو علامات وشم صغيرة دائمة).

3-مرحلةالتخطيط:

المدة: من عدة أيام إلى أسبوع.

الفريق: أخصائيون قياس الجرعات والفيزيائيون الطبيون.

المهمة: تصميم خطة معقدة تضمن إيصال أقصى جرعة إشعاع للورم مع حماية الأنسجة السليمة المحيطة به تماماً.

4-(جلسات العلاج الفعلية) التنفيذ:

الجدول الزمني: 5 جلسات أسبوعياً (من الاثنين إلى الجمعة).

مدة الجلسة: من 10 إلى 40 دقيقة (الإشعاع الفعلي يستغرق دقائق فقط).

التجربة داخل الغرفة:

يستلقي المريض بلا حراك على الطاولة.

يتحرك المعجل الخطي حول الجسم ليوجه الحزم من زوايا مختلفة.

تتم مراقبة المريض عبر نظام اتصال داخلي وكاميرات بينما يكون بمفرده في الغرفة.

5-(مرحلةالمتابعة) مابعدالعلاج:

الجدول: فحوصات دورية بعد 4 أسابيع ثم 12 أسبوعاً من انتهاء العلاج.

الهدف: مراقبة تعافي الأنسجة، التأكد من فاعلية العلاج، والسيطرة على أي آثار جانبية قد تظهر

7.الوقاية من العلاج الإشعاعي:

هو علم حماية الإنسان من تأثير الأشعة المؤينة سواء كانت جسيمات أولية مثل البروتونات والنيوترونات أو الأشعة الكهرومغناطيسية عالية الطاقة مثل الأشعة السينية وأشعة غاما. وقد إنصبت نتائج ذلك العلم الذي يجمع بين الفيزياء والطب في تعليمات ووصايا متفق عليها عالميا وتقوم كل دولة بوضعها ضمن قوانينها بغرض الوقاية من الإشعاعيتوجب على العاملين في المجالات العلمية والصناعية وكذلك الأطباء المختصين بالتعامل مع المواد والأجهزة المصدرة للأشعة المؤينة إتباع تلك الوصايا والقوانين من أجل الحفاظ على صحتهم وسلامتهم وكذلك سلامة المرضى الذين يُعالجون بواسطة الإشعاع والنظائر المشعة وينطبق ذلك أيضا على أطباء التصوير بالأشعة. [18]

8.مبادئ الأساسية للوقاية من العلاج:

تبريرjustification:لا يسمح بأي استخدام جديد للإشعاع إلا إذا كان به فائد تبرر على إستعماله ولها نتيجة علمية.

تحديد الجرعة: يجب ألا تتجاوز جرعات الإشعاع التي يتعرض لها الأفراد أثناء ممارسة الأنشطة وتختلف هذه القيم الحدية بين الجرعة المبررة قيمًا حدية معينة (الحد الأقصى للجرعة).

تحسين(مبدأALARA) :عندما يكون النشاط مبرر يجب العمل على تقليل المخاطر وزيادة النتائج الصحيحة [19].

9.وسائل الحماية من الإشعاع:

تبدأ الحماية من التعرض للإشعاع بثلاثة مبادئ أساسية للحماية منه: الوقت، والمسافة، والحماية. التي أعتمد عليها في قوانين ALARA.

الوقت: كلما قلّ الوقت الذي يقضيه المريض بالقرب من مصدر مشع، قلّ تعرضه للإشعاع. وهذا يعني أنه يجب على الفرق الطبية العمل بكفاءة عالية مع إتباع أفضل الممارسات لتجنب المساس بسلامة المرضى.

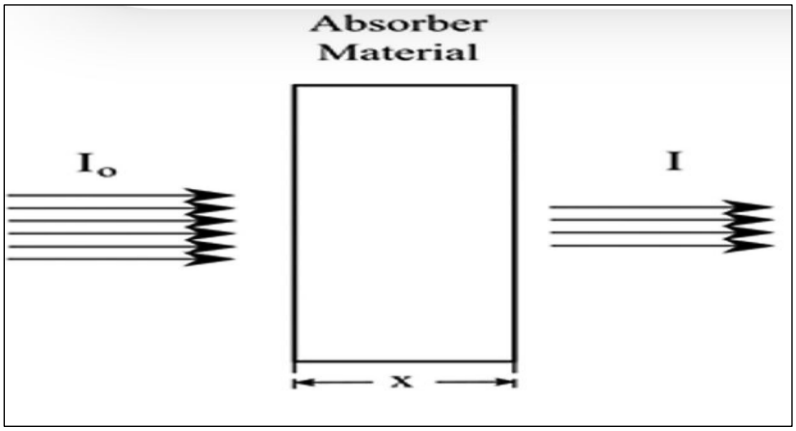
المسافة: تقل شدة الإشعاع كلما ابتعدت عن مصدره. لهذا السبب، تُصمَّم غرف الأشعة بحيث يبقى الطاقم الطبي على مسافة آمنة أثناء إجراءات التصوير. مع ذلك في غرف العمليات أو مختبرات القسطرة حيث يُستخدم جهاز الأشعة السينية المتنقل أو غيره من أجهزة التصوير، يكون الطبيب وفريق الجراحة عادةً على مقربة من مصدر الإشعاع أثناء الجراحة، مما يجعل الحماية الشخصية ضرورية مثل شارات قياس الجرعةDosimeter، قفازات خاصة عند التعامل مع الإشعاع.

الحماية:وضع حواجز تحجب الإشعاع وتمتصها وتستخدم بالقدر المناسب لخفض كمية الإشعاع خلفها. من أهم المواد المستخدمة لحجب الأشعة منها الرصاص والحديد والخرسانةوأنظمة تحكم عن بعد في أجهزة العلاج الإشعاعي وأنظمة الإنذار اشعاعي وبالنسبة لحجب النيوترونات كالبرافين والماء [20].

10.قوانين مهمة فالحماية من الإشعاع:

1.10.قانون التوهين:

يعرف بقانون بير-لا مبرت يصف تضاءل شدة الأشعة عند مرورها عبر مادة. أي أن حزمة الأشعة السينية تقل كل ما توغلت في المادة. ببساطة هو كل تفاعل بين فوتون من الأشعة السينية وذرة من المادة فإنها تقلل من شدتها [21].



الشكل (9.1):توهين الأشعة بواسطة مادة

يعتمدمقدار إنخفاض شدة الأشعة السينية على عاملين:

- السمك أو عمق الاختراق
- خاصية المادة تسمى بمعامل الإمتصاص

تتناقص شدة الإشعاع بشكل أسي مع المسافة المقطوعة بالشكل التالي:

$$I(x)=I0e^{-\mu x} \quad (1.8)$$

بحيث:

I(x):شدة الإشعاع بعد قطع مسافةx

I0:شدة الإشعاع الساقطة الابتدائية

e:أساس لوغاريتم الطبيعي

μ:معامل التوهين الخطي

x:سمك المادة الماصة أو المسافةالتي قطعها الإشعاع

2.10.معامل التوهين الخطيLAC:

هو ثابت يصف نسبة الفوتونات الساقطة المتوهنة في حزمة أحادية الطاقة لكل وحدة سمك من المادة وهو يشمل جميع التفاعلات الممكنة [22]،يزداد معامل التوهين الخطي مع زيادة العدد الذري وزيادة الكثافة الفيزيائية للمادة الماصة.

3.10.معامل التوهين الكتلي (MAC):

معامل يتم إستخدامه في التدريع والوقاية من الإشعاع، يعبر عنه بأنه حزمة ضيقة من فوتونات أحادية الطاقة ذات شدة سقوط**I0** تخترق طبقة من مادة ذات سمك كتلة **x** وكثافة$\boldsymbol{\rho}$وتخرج بشدة **I**معطاة بقانون التوهين الأسي [23]:

$$\mathbf{I/I0=exp(-(\mu/\rho)x)} \quad (1.9)$$

ومنه فإن

$$\boldsymbol{\mu/\rho=x^{-1}ln(I0/I)} \quad (1.10)$$

4.10.طبقة نصف القيمة (HVL):

يعرف بأنه السمك الازم لتقليل شدة الأشعة المارة من المادة إلى نصف قيمتها الأصلية، يستخدم لتقييم إختراق الحزمة وجودتها ويرتبط بمعامل التوهين الخطي [24]ويعبر عنه بالعلاقة التالية:

$$\mathbf{HVL}=\frac{\boldsymbol{ln2}}{\boldsymbol{\mu}} \quad (1.11)$$

5.10.طبقة عشر القيمة(TVL):

وتعني سمك مادة محددة تعمل على تخفيف الأشعة وإستعمالها كدرع واقي من خطر الاشعة المؤينة إلى حد يقلل معدلالتعرض ومعدل الجرعة الممتصة إلى عشر القيمة المقاسة بدون المادة عند نفس النقطة [25].

يتم حسابه بالعلاقة التالية:

$$\mathbf{TVL}=\frac{\boldsymbol{ln10}}{\boldsymbol{\mu}} \quad (1.12)$$

6.10.قانون التربيع العكسي:

ينص قانون التربيع العكسي على أن شدة الإشعاع تتناسب عكسيا مع مربع المسافة من مصدرإشعاع مؤين. وهذا يعني أنه إذا تضاعفت المسافة فإن الشدة تنخفض بمقدار أربعة أضعاف. بعبارة أخرى تصبح الشدة ربع شدتها عند المضاعفة [26]ويعبر عنه بالعلاقة التالية:

$$\frac{\boldsymbol{D2^2}}{\boldsymbol{D1^2}}=\frac{\boldsymbol{I1}}{\boldsymbol{I2}} \quad (1.13)$$

$\boldsymbol{I1}$: شدةالإشارة المسافة المقاسة

$\boldsymbol{D1}$: المسافة مع شدة معينة عادة ما تقيس بالأقدام

$I2$: الشدة بدون مسافة

$D2$:المسافة بدون شدة

7.10.الجرعة الممتصة:

تمثل كمية الطاقة التي يمتصها كل كيلو غرام من وسط ما إثر تعرضه لمختلف الأشعة المؤينة.[27]

ويعبر عنه بالعلاقة التالية:

$$D=\frac{dE}{dm} \quad (1.14)$$

حيث:

E:الطاقة الممتصة

m:الكتلة

الوحدة الدولية هيGYحيث:1GY=1J/kg

8.10.الجرعة الفعالة:

سمة أساسية للحماية من الإشعاع تأخذ بعين الإعتبارتفاعل الإشعاع مع عضو أو نسيج والنظر لحساسية الخاصة به لكل منهما مع تفاوت تعرض الضرر لنفس الجرعة، وهي مجموع الجرعات المكافئة لكل نسيج في معامل الترجيح لكل نسيج ووحدتها(sievert).

يعبر عنها بالعبارة التالية:

$$=\sum_t W_t.H_t H_t \quad (1.15)$$

W_t:عامل الترجيح النسيج (يمثل حساسية العضو أو النسيجTللإشعاع)

H_t:الجرعة المكافئة في العضو أو النسيجT

9.10.الجرعة المكافئة:

مقياس في الوقاية الإشعاعية يربط الجرعة الممتصة بالضرر البيولوجي الفعال للأشعةتقاس بوحدة sievertتحسب معدل الجرعة الممتصة في معامل الترجيح الإشعاعي والذي يعكس قابلية نوع محدد من الإشعاع على إحداث ضرر بيولوجي، ترتبط إرتباطا وثيقا بكثافة التأين الذي يسببه الإشعاع.

يعبر عنها بالعلاقة التالية:

$$W_R H_t = D_t \quad (1.16)$$

D_t : متوسط الجرعة الممتصة

W_R: عامل ترجيح الاشعاع

10.10المقطع العرضي الإلكتروني(ECS):

يوضح تفاعل الاشعاع مع المواد المركبة، يوصف باستخدام مقطع عرضي فعال يمثل الوسط ككيان واحد مكافئ [6].

11.10.متوسط الوزن الجزيئي (AMW) :

هو المتوسط الشائع للوزن الجزيئي لبوليمر محدد. يتم تحديده بقياس الوزن الجزيئي لعدد nمن الجزيئات ثم جمع الأوزان وقسمتها علىn. [28].

12.10.متوسط المسار الحر (MFP):

هو المسافة المتوسطة التي يقطعها جسيم (فوتون أو إلكترون أو نيترون) داخل مادة قبل أن يتعرض لتفاعل مع ذراتها[6].

13.10.العدد الذري المكافئ(Z_{eq}) :

تمثيل مادة المركبة بواسطة مكافئ له عدد ذري فعال يحقق نفس إستجابة التفاعل الإشعاعي عند طاقة فوتونية معينة[6].

14.10.العدد الذري الفعال(Zeff) :

هو عدد ذري إفتراضي يعطى لمادة مركبة بحيث يمثل سلوكها في التفاعل مع الإشعاع كما لو كانت عنصر واحد[6]،كما يعتمد على طاقة الإشعاع ونوع التفاعل المسيطر.

15.10.كثافة الإلكترون الفعال (Neff):

يمثل عدد الإلكترونات الموجودة في وحدة الكتلة المادة والتي تشارك فعليا في عمليات التفاعل مع الإشعاع الكهرومغناطيسي.

16.10.المقطع العرضي الذري (ACS):

المقطع العرضي مقياس احتماليةحدوث تفاعل بين الجسيم الساقط مثل (فوتون غاما أو النيترون)وذرة واحدة من المادة [29].

$$= \frac{\mu_t}{N_A \frac{W_t}{A_i}} \sigma_t \qquad (1.17)$$

17.10.الموصلية الفعالة(C_{eff}):

خاصية فيزيائية تستخدم لوصف سلوك الموصلية المكافئة الناتجة عن دمج مساهمات المكونات المختلفة داخل مادة مركبة [30].

11.خاتمة:

قدم في هذا الفصل نظرة متكاملة حول عموميات العلاج الإشعاعي، موضحا كيف يُوظف الإشعاع المؤين كأداة دقيقة لإستهداف الخلايا السرطانية وتحطيم مادتها الوراثية. كماإستعرضنا المبادئ التي تضمن توازن الكفة بين الجرعة العلاجية الفعالة وبين الوقاية الإشعاعية الضرورية لحماية الأنسجة السليمة المحيطة.

الفصل الثاني:

مواد للحماية من الإشعاع

1.مقدمة:

تعرف الحماية من الاشعاع بأنها مجال علمي يهتم بتطوير المفاهيم والأساليب والإجراءات اللازمة لحماية الانسان والبيئة من الاثار الضارة للإشعاع المؤين والغير مؤين.

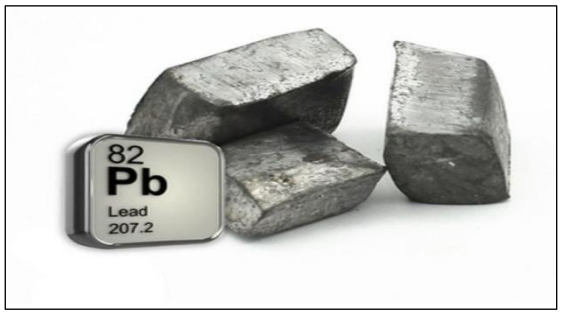
فعند استخدام الاشعاع المؤين بشكل آمن في مجل الطب البحث العلمي والصناعة فإنه يحقق فوائد كثيرة الا انه من الضروري تقييم المخاطر المرتبطة به والتحكم فيها.

في هذا الفصل سنعرض عن بعض المواد التدريعية المختلفة التي تم دراستها حاليا للحماية من الاشعة في غرف العلاج الاشعاعي.

2.مواد التدريع والحماية من الإشعاع:

1.2.الرصاص(Pb):

يعد الرصاص المعيار الذهبي ومن أكثر المواد فعالية في تخفيف آثار الإشعاع المؤين وذلك بفضل عدده الذري العالي Z=82وكثافته العالية $11.34g/cm^3$.يعمل عن طريق أو حد الطاقة المنبعثة من أنواع مختلفة من الاشعاع بما في ذلك الأشعة السينية والأشعة غاما، فتعمل المواد المصنوعة من الرصاص كحاجز يقلل بشكل كبير من جرعة الاشعاع وتستخدم على نطاق واسع في الدروع الوقائية مثل المآزر الرصاصية مما تضمن سلامة وحماية كل من الموظفين والمرضى في البيئات التي يكون فيها التعرض للإشعاع شائعا. [31]



الشكل (10.2):معدن الرصاص(Pb)المستخدم في التدريع الإشعاع

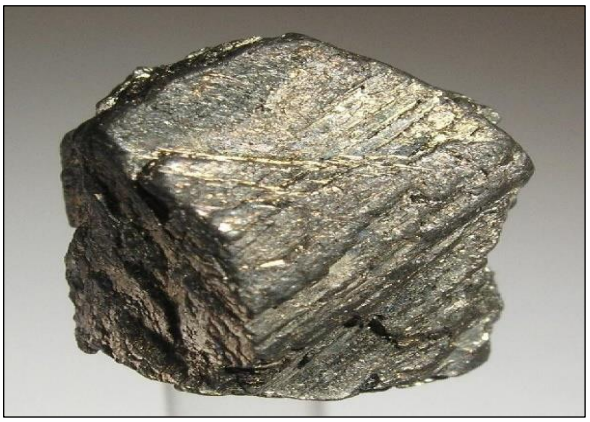
عيوبه:

- سميته العالية مما ينتج عنه أمراض بيئية
- مرونته المنخفضة
- وزن ثقيل، عدم وجود الراحة عن إستخدامه كمآزر ودروع للحماية

2.2.أكسيد البزموث Bi_2O_3:

يعد الاشعاع المؤين إشعاع قادر على إطلاق إلكترونات من الذرات خاصة في الفحوصات الطبية الاشعاعية وعلاج السرطان ونظرا لتأثيرات الاشعاع المؤين السلبية على صحة الانسان فمن الضروري الحماية منه باستخدام مواد ودروع واقية يعد البزموثBi_2O_3أحد المواد المميزة في الحماية من الإشعاع.البزموث مركب كيمائي صيغته الكيميائيةBi_2O_3 يتميز بكثافة أقل من كثافة الرصاص حيث تبلغ كثافته $8.90 g/cm^3$ يعد من المواد الواعدة والجديدة في مجال الحماية من الإشعاع خاصة كبدائل آمنة وغير سامة كالرصاص.

في هذه الدراسة طورت مادة طلاء تتكون من أكسيد البزموثBi_2O_3 النانوني ودمجها مع بولي يوريثان المائي وتصنيعها على شكل أقمشة منسوجة خفيفة الوزن متوفرة تجاريا لتصنيع مادة واقية قابلة للإرتداء ومرنة وقد أظهرت نتائج الاقمشة المطلية بأكسيد البزموث النانوي مع بولي يوريثان المائي نتائج واعدة. [32]



الشكل (11.2):*مركب أو أكسيد البزموث Bi2O3*

عيوبه:

أستخدمت دروع البزموث لتقليل من جرعة الأشعة المقطعية للأعضاء الأمامية الحساسة للإشعاع مثل عدسة العين يتم وضع هذه الدروع فوق العضو المراد تصويره وذلك لتخفيف شدة الإشعاع الساقطة على العضو، وعلى الرغم من أن دروع البزموث تبدو سهلة الاستخدام **إلاأن هناك مجموعة منها:**

- زيادة جرعةالتي يتعرض لها المريض
- تدهور جودة الصور
- تهدر الدروع جزءا من تعرض المريض للإشعاع

3.2.أكسيد التنتالوم Ta_2O_5 :

يعد استخدام مواد جديدة من الجيل التالي كالمركبات البوليميرية والمكثفات والعوازل والطلاءات الرقيقة المدعمة بمجوعة مواد منها أكسيد التنتالوم Ta_2O_5من المواد البديلة والصديقة للبيئة بخلاف الرصاص.

التنتالومTa_2O_5 عنصر ذي عدد ذري مرتفع(Z=73) وكثافة عالية 8.20g/cm³، من أحد وأهم العناصر التي تجذب اهتماما كبيرا من الباحثين، تقع حافة امتصاص K للتنتالوم عند 67.4كيلو الكترون فولط مما يسمح له بأداء حماية من الاشعة السينية.بعد العديد من الدراسات وجد ان الدراسات التي تستخدم التنتالوم كحشو للمركبات قدمت حماية افضل من الاشعة وذلك بفضل خصائصها المميزة من مرونة وخفة في الوزن واستقرار كيميائي وحراري ممتاز وكثافة طاقة عالية [33] .كما تم دراسة لمركب بولي ميثيل ميثاكريلات (PMMA) نوع من البوليمر المدعمة بخامس أكسيد التنتالومTa_2O_5واظهرت النتائج ان جميع المركبات المدعمة بخامس أكسيد التنتالومTa_2O_5قدمت أداء أفضل للحماية من الاشعة [34].

عيوب:

- تكلفته العالية نظرا لندرته
- تعقيد استخراجه ومعالجته
- اقل موثوقية مقارنة بأكسيد أخرى

4.2.أكسيد التنغستنWO_3 :

يعد التنغستن من أكثر المواد كثافة 7.16g/cm³والأعداد الذرية العالية وفعالية في حجب الاشعة غاما مثل الرصاص مع انعدام السمية.تم دراسة وتجربة محاكاة سبيكة من التنغستن والنيكل والحديد والرصاص في التدريع الاشعاعي وأظهرت النتائج أن سبيكة التنغستن والنيكل والحديد التي يبلغ طولها 5.2mm يمكن ان تمنع ما يقرب 100من الاشعة في عرض مادة الرصاص سمك أكبر حوالي 4mm لتحقيق نفس درجة الحماية وبعبارة أخرى السبيكة السالف ذكرها أن لها القدرة على الحماية بنسبة 30 إلى40 أعلى من الرصاص.

يعتبر التنغستن الخيار الامثل في بيئات الطبية والصناعية التي تتطلب الحماية من الاشعاع ومع ذلك يحقق أهداف مبدأ التعرض للإشعاع بأقل قدر ممكن .[35] [36]

الشكل (12.2):بنية بلورية لعنصر التنغستنWO3

العيوب :

-التنغستن ذو كثافة كبيرة

5.2.اكسيد السيريومCeO_3:

يتميز السيريوم برقم ذري مرتفع 258 اعلى من ذرة الاكسجين وكثافة$7.22g/cm^3$ وتحسن هذه الخواص من امتصاص الاشعاع عن طريق زيادة التأثير الكهروضوئي وهو الية التفاعل الاساسية للفوتونات ذات الطاقات المتوسطة الى المنخفضة. تم ربط زجاج البورات مع السيريوم لمقارنته برصاص بحيث اظهرت أن زيادة ثاني أكسيد السيريوم في الزجاج أدت الى تعزيز وزيادة كثافة الزجاج كدروع زجاج السيريوم للمراقبة المرئية في المنشئات النووية او البيئات الطبية، يعد السيريوم اقل ضررا بيئيا من الرصاص السام [37].

العيوب:

-كثافته أقل من كثافة الزجاج والرصاص يستلزم طبقات أكثر سمكا لتحقيق الحماية مماثلة من الأشعة غاما. يهدف تطور تركيبات لتحقيق التوازن بين كفاءة الحماية والشفافية والاستقرار مما يجعلها مناسبة لتطبيقات نانوية مثل غرف العلاج الاشعاعي.

6.2.الخرسانة العادية مع إضافات:

1.6.2.الخرسانة:

الخرسانة هي إحدى المواد البارزة المستخدمة في مجال الحماية من الإشعاع،توفر الخرسانة العديد من المزايا منها كثافتها العالية وقدرتهاعلى إمتصاص جزيئات الإشعاع العالية ووفرتها وتكلفتها المعقولة وسهولة البناء هذه الصفات والميزات تجعل الخرسانة خيارا متعدد الاستخدامات لإنشاء حواجز وهياكل وقائية في المناطق المعرضة للإشعاع.تلعب الخرسانة دورا حاسما في التخرين الآمن والتخلص من النفايات النووية [38].ومع ذلك يجب مراعاة مجموعة من المتطلبات في اختيار مكونات الخرسانة ونسبها الممتصة المصممة لتوهين الأمثل لكل من الاشعة غاما والنيترونات عن طريق التفاعلات الرئسية ثلاثة (كومبتون، كهروضوئي، انتاج الزوج).يمكن إضافة بعض المواد والحصول على خرسانة مدعمة بمجوعة مواد مثلH_2O،Al_2O_3، CaO، SiO_2،$BaSO_4$:تحت كثافة $3.5g/cm^3$وذالك لزيادة كفاءة دور الخرسانة في الحماية من الإشعاع

عيوب:

- قيود الحجم والوزن

- ضعف هيكلي (تشققات/فراغات)

2.6.2. كبريتات الباريوم$BaSO_4$بنسبة(55%):

تعد الخرسانة من أهم الدروع في الحماية من الإشعاع نظرا لكثافتها العالية في الحماية من الإشعاع بينمالا تعد مقاومتها للضغط ذات أهمية كبيرة ويعود ذلك إلى أنه مع زيادة كثافة الخرسانة تقل نفاذيتها في إمتصاص الأشعة ومن هنا أتى دور إستخدام مواد مضافة ككبريتات الباريوم بهدف تغيير في الخواص الفيزيائية والكيميائية للخرسانة، تم دراسة خلط مادة كبريتات الباريوم بنسبة من 0% الى 80%بهدف زيادة كثافتها ومقومتها العالية للضغط.

الشكل (13.2):مسحوق كبريتات الباريومBaSO4النقي

عيوب:

-انخفاض المقاومة الميكانيكية للخرسانة التي تحتوي على نسبة كبيرة من الباريوم تكون اقل قوة في تحمل الضغط

التكلفة المرتفعة

-الحاجة الى سمك أكبر للتخفيف نفس مستوى الحماية مثل الرصاص

3.6.2.أكسيد الكالسيومCaO بنسبة(10%):

تعد مادة أكسيد الكالسيوم من احد مكونات الخرسانة ومن المواد المقصودة والمناسبة في مجال الحماية من الإشعاع نظرا لعددها الذري المنخفض مقارنة بالرصاص مما يجعلها أقل سمية وتكلفة منخفضة وسهولة استخدامه ،كما تم تصنيع تركيبات للحماية من الاشعاع لمصنوعة من مصفوفة الإسمنت والتي تحتوي على مركبات الكالسيوم للحصول على خرسانة تتمتع بقوة هيكلية وكثافة عالية مما تساهم بشكل كبير في الحماية من الأشعة [39]،وبعد دراسات لخرسانة مضاف اليها أكسيد الكالسيوم بتراكيز محددة الى 10%كجزء من الخرسانة فوجد ان الخرسانة المضاف اليها أكسيد الكالسيوم تتميز بكفاءة وفعالية عالية وخواص ميكانيكية ممتازة ومقاومة عالية للإشعاع عالي الطاقة .

الشكل (*14.2*):الصخر الخام لأكسيد الكالسيومCaO

عيوب:

-انخفاض كفاءته مقارنة بالمعادن الثقيلة (يملك Z=20 أقل من الرصاص Z=82) يعني معامل توهينأقل

-تفاعله العالي مع الماء والهواء يقلل من فعاليته

4.6.2.أكسيد السيليكونSiO_2 :

في السنوات الأخيرة إنجذبت إضافة مواد نانونية إلى الخرسانة إهتماما بحثيا متزايدا، غبار سيليكا يعد مكون أساسي في خلطات خرسانية فائقة الأداء نظرا لصغر حجم جزيئاته حيث تتراوح نسبته عادة من 5%الى10% وذلك لتميزه بأنه يحسن من البنية المجهرية وكثافة تماسك الخرسانة والحفاظ عليها من التصلب والانكماش والهبوط ،وذلك بفضل نشاطه العالي وتكوين نوى جزيئات السيليكون النانوية، يعد تأثير تحسين جزيئات السيليكون النانوية على الخرسانة [40]ملحوظا لاسيما من حيث تعزيز متانتها وتحسين الخواص الميكانيكية للخرسانة.

عيوب:

-التكلفة المرتفعة

-مادةSiO_2تتطلب كميات كبيرة من الماء لخلطها في الخرسانة، وزيادة نسبة الماء في الخرسانة يقلل من قابلية تشغيل الخرسانة وكفاءتها

5.6.2.أكسيد الألمنيومAl_2O_3:

يعد استخدام أكسيد الالمنيوم من المواد الواعدة في مجال حماية من الإشعاع وذلك لصلابته العالية وإستقراره الحراري ومقاومته الإستثنائية لتآكل كما تم دراسة تصميم وإنتاج خرسانة ثقيلة جديدة مقاومة لدرجات الحرارة العالية باستخدام الإسمنت الألومينى مع إضافات كأكسيد الالمنيوم وأكسيد التيتانيوم وثاني أكسيد السيلكون بنسب مختلفة تبين أن الخرسانة الثقيلة الجديدة كانت نتائج ممتازة في امتصاص الاشعة غاما والنيترونات السريعة. تم اقتراح استخدام هذه الخرسانة الثقيلة الجديدة في المفاعلات النووية وغرف العلاج الاشعاعي والمخازن النووية كدرع في الحماية من الاشعة [41]،كما تعد الخرسانة البروتلاندية من الخرسانة التي تحتوي على جزيئات نانوية من أكسيد الالمنيوم بحت تصل

نسبته من 3% الى 10%فيساعد في التصلب الاولي للخرسانة وقدرتها الفائقة في مقاومة أضرار الاشعاع ،يستخدم الاسمنت ذو الكفاءة العالية في مقاومة الهجمات الكيميائية والحرارية العالية وبفضل نسبة قوته الى وزنه المذهلة اصبح الالمنيوم بوصفه جزءا من الخرسانة كدرع واقي من الاشعاع.

الشكل (*15.2*):مسحوق أكسيد الألمنيوم النقيAl2O3

عيوب:

- تكلفته العالية
- تقليل من مقاومة الخرسانة للإشعاع

6.6.2.الماءH_2Oبنسبة(5%):

تعد نسبة الماء ضرورية في خليط الخرسانة، تتراوح نسبة الماء في الخرسانة من5% الى 10%بحيث نسبة انخفاضها فالخرسانة يزيد من قوة وكفاءة الخرسانة، ومع ذلك المواد المنخفضة في نسبة الماء ذو تكلفة عالية [42] .

عيوب:

- يؤدي زيادة أو سوء إدارة الماء في الخرسانة للحماية من الإشعاع إلى عيوب هيكلية ووظيفية كإنخفاض في كثافة الخرسانة وضعف هيكلهاالإنشائي (تفتت)

3.التقنيات والمواد المستحدثة المستخدمة في تعزيز كفاءة الحماية من الأشعة غاما:

من أبرز مستجدات التكنولوجيا لمراد الحماية من الإشعاع استعرضنا مجموعة واسعة من الدراسات المرجعية التي تناولت الدراسة النظرية والتجريبية وأخرى مستقبلية القائمة كمواد تدريعية وحماية من الإشعاع، وقد لخصلنا في الجدول التالي **(2.1)** الذي يجمع بين المواد التدريعية المتألقة والمبتكرة كدورها في الحماية:

المادة	الحماية من الاشعة غاما وX	بحث نظري	بحث تجريبي
أكسيد البزموث Bi_2O_3	نعم	يوجد	يوجد
التعليق	**الدراسة1:** هذا المقالة تدرس خصائص الحماية من الإشعاع، العينة هي أكسيد البزموث مدمج في جسيمات الخرسانة ومقارنة النتائج بقيم تجريبية من محاكاة WinXCOMوGeant4وتم تحديد قيم معامل الإمتصاص الإشعاعي الخطي وطبقة نصف القيمةHVL أشارت كل معايير المقارنة أن الخرسانة بفعل أكسيد البزموث تحسنت بشكل أفضل [43]. **الدراسة2:** هذه المقالة تبرز كيفية تحضير مركبات النانوية من أكسيد البزموث والزنك وتم دراسة عينات المركب من حيث الخصائص البصرية والبنيوية وقدرتها على الحماية من الأشعة غاما [44].		
خامس أكسيد التنتالوم Ta_2O_5	نعم	يوجد	يوجد
التعليق	**الدراسة 1:** في هذه الورقة البحثية بينت أنه يتكون التدريع الإشعاعي الرقيق والخفيف من بنية متعددة الطبقات طبقة منخفضة عدد الذري من تيتانيوم وطبقةعالية العدد الذري من التنتالوم بحيث أظهرت محاكاة أداة التدريع الاشعاعي من مصدر كوبالت 57 انخفاضا بمقدار 10 اضعاف في إشعاع غاما عند استخدامTa_2O_5وإنخفاضا بمقدار 25 ضعفا عند استخدام التيتانيوم. مقارنة بطبقة واحدة من الرصاص. إضافة الى ذلك فإن التدريع أخف وزنا بنسبة 25% من طبقة رصاص واحدة بنسبة0.35إلى0.36mm. يستخدم هذا الإبتكار في نسج الأقمشة [45]. **الدراسة 2:** تبين هذه المقالة عمل بلورات وزجاج أكسيد المعادن المطعم بTa_2O_5 في تعزيز خصائص الميكانيكية والمغناطسية والحماية من الإشعاع [46].		

	الدراسة 3: تم في هذه الدراسة على إستخدام مركبة البولي إيثلين عالية الكثافة المطعمة بخامس أكسيد التنتالوم Ta_2O_5في مجال الحماية من الإشعاع. وذلك باستخدام برامج المحاكاة توافقت طاقات الفوتونات المختارة مع الفوتونات المنبعثة من المصادر مشعة مثل الباريوم133 والسيزيوم137 والتي تغطي نطاق الأشعة السينية بالإضافة إلى الأشعة غاما منخفضة ومتوسطة الطاقة وتم حساب معامل التوهين الخطي والكتلي وتحديد Zeffو HVL وتم الحصول على نتائج تتوافق المعايير وتحديد أفضل أداء للحماية من الإشعاع [47].			
أكسيد التنغستن WO_3	نعم	يوجد	يوجد	
التعليق	**الدراسة 1:** في هذه الدراسة تم إستخدام مسحوق أكسيد التنغستن النانوي عالي الكثافة مع كحول البولي فينيل تم الحصول على صفائح. تم إختبارالمادة النانوية المركبةالجديدة بإستخدام عداد جايجر مولر لقياس التوهين ووفقا لنتائج كانت مادة التدريع فعالة في حماية من اشعة غاما [48]. **الدراسة 2:** ذكر في هذه المقالة بأن أكسيد التنغستن يحظى بإهتمام خاص لخصائصه الفردية التي أدت إلى إستخدامه على أوسع نطاق وإمكانية التطورات مثل إستعماله في أجهزة استشعار الغاز والأجهزة البصرية كألياف مقاومة للحريق. وعلى ذلك يستعمل كبديل لرصاص لحجب الأشعة السينية والأشعة غاما [49]. **الدراسة 3:** درست في هذه المقالة عوامل النقل والخواص الميكانيكية وخواص إمتصاص الأشعة غاما لزجاج فوسفات الباريوم وأكسيد التنغستن وتأتي الإضافة على أكسيد التنغستن [50]. **الدراسة 4:** في هذا المرجع تم تصنيع سلسلة الزجاج معدل بأكسيدالتنغستن ودراسة الخصائص البصرية والحرارية وخصائص إمتصاص الأشعة غاما لسلسلة [51]			
أكسيد السريوم CeO_2	نعم	يوجد	يوجد	
	الدراسة 1: في هذه الدراسة تم تطوير زجاج غير سام بديل لرصاص مكون من Na2O وMgOو Bi2O3 وإضافة إليها تراكيز مختلفة منCeO2 بهدف الحماية من الإشعاع [52].			

التعليق	**الدراسة 2:** في هذه الدراسة تم بشكل أساسي إستخدام مركب نانوي مكون من(Ceo2/Zro2) المصنع (CZ-NPS) بتراكيز مختلفة لتحسين الخصائص الميكانيكية والميكروية والمقاومة الحرارية والحماية من الأشعة غاما. أظهرت النتائج أن المركب CZNPSالذي يحتوي على 0.25% من جسيماتCZالنانونية هو الخيار الأفضل من حيث الأداء الميكانيكي وأعلى مستوى وكفاءة في الحماية من الأشعة غاما حيث توصل إلى أنها يمكنها تخفيف من 50%إلى90%من الأشعة غاما [53].		
خرسانةعادية مع إضافات	نعم	يوجد	يوجد
التعليق	**الدراسة 1:** تلعب الخرسانة دورا حاسما في الحماية والوقاية من الإشعاع كالتخزين الآمن والتخلص من النفايات النووية تم دراسة تركيبات خرسانية متخصصة لتحسين خصائص الحماية للخرسانة يعد إستخدام وإضافة مواد ذات الأعداد الذرية العليا كالباريت والمغنتيت للخرسانة أن يخفف الإشعاع بشكل فعال نظرا لزيادة كثافته وقدرته العالية على إمتصاص جزيئات الإشعاع [54].		
إضافة: $BaSO_4$	نعم	يوجد	يوجد
التعليق	**الدراسة 1:** تم دراسة مادة أسمنتية جديدة كالجيوبوليمرات والتي يمكن تطبيقها أن يقلل من إنبعاث ثاني أكسيد الكربون الناتج عن تطور صناعة الإسمنت، هدفت هذه الدراسة في قدرة جيوبوليمرات المصنوعة من الرماد المتطاير للحماية من الإشعاع كبديل عملي للإسمنت البورتلاندي تم تصنيع مادة جيوبوليمرات ودمجها معBaSO4بنسب مختلفة وتم الحصول على نتائج أفضل في الحماية من الأشعة [55]. **الدراسة 2:** تم دراسة مواد واقية من الأشعة السينية مصنوعة من مركبات كبريتات الباريوم كونهامادة غير سامة واقتصادية والسيليلوز الغير متبلور والمدمج مع المطاط الطبيعي. بعد التحقق من الدراسة تم تصنيع وتصميم دروع للرأس والغدة الدرقية والصدر بهدف الحماية من الأشعة المتناثرة [56].		
إضافة:	نعم	يوجد	يوجد

SiO_2			
التعليق	**الدراسة 1:** في هذه الدراسة تم إستخدام خزف زجاجي أو السيراميك ذي محتوى معزز من SiO2 بناء على نطوره البنيوي وخواصه الفيزيائية وفحص مورفولوجيا سطح العينات بإستخدام الماسح الإلكتروني الضوئي ونتيجة المحاكاة والمعادلات التحليلية أظهرت أن السيراميك المعززبSiO2 قدم نتائج أفضل في الحماية من الإشعاع [57].		
إضافة: Al_2O_3	نعم	يوجد	يوجد
التعليق	**الدراسة 1:** تناولت هذه الدراسة فعالية الحماية من الإشعاع عن طريق دمج مركبات من الإسمنت والرخام المعاد تدويره مع جزيئات دقيقة ونانوية من أكسيد الكادميومCdOوأكسيد الألمنيوم Al2O3مع التركيز على المعايير الرئيسية فالتوهين. تظهر هذه المركبات إمكانيات واعدة في تحسين أداء الحماية بفضل الخصائص الفريدة للجزيئات النانوية [58].		
إضافة: **CaO**	نعم	يوجد	يوجد
التعليق	**الدراسة 1:** تناولت هذه الدراسة تأثير أكسيد الكالسيوم CaOلتميزه بتكلفة منخفضة ومتوفر بكثرة على تحسين قدرة البوليستر الخفيف المستخدم في صناعة المواد العازلة للحماية من الأشعة غاما [59]. **الدراسة 3:** في هذه الدراسة تم تقييم أداء الحماية من الإشعاع للخرسانة المصنعة من البازلت والرمل والإسمنت ورماد الفول السوداني (PNSA)وأكسيد الكالسيوم وأكسيد الالمنيوم وثاني أكسيد السيلكون باستخدام برنامج phy-X/ PSDوأظهرت النتائج كثافة عالية وإستقرار حراري وسلامة هيكلية مما يؤكد أنه المزيج الأمثل للحماية من الإشعاع غاما [60].		
إضافة: H_2O	نعم	يوجد	يوجد
	الدراسة 1:		

التعليق	تستخدم الخرسانة للحماية من الإشعاع لخاصيتين أساسيتين فيها قوتها الهيكلية وقدرتها على حجب الإشعاع ومن المعروف أهمية وجود الهيدروجين في درع الخرسانة الواقي من الاشعاع لاسيما فيما يتعلق بتخفيف النيترونات لذلك يعد محتوى الماء في الخرسانة المتصلبة عاملا بالغ الأهمية لتقدير فعالية دروع الخرسانة في الحماية من الإشعاع بل يؤثر أيضا على الموصلية الحرارية للخرسانة وبالتالي على توزيع درجة الحرارة والإجهادات الحرارية في الدرع [61].			
خرسانة $+BaSO_4(55\%)$ $(25\%)+SiO_2$ $+CaO(10\%)$ $+Al_2O_3\ (5\%)$ $+H_2O(5\%)$	/	/	/	////////////////
التعليق	//////////			

الجدول (3.1): يجمع بين المواد التدريعية المتألقة والمبتكرة كدورها في الحماية

4.خاتمة:

إستنادا إلى ما ورد في الدراسات السابقة، تم توجيه نحو إعتماد هذه المواد كبدائل للرصاص واستخدامها كدروع واقية من الأشعة غاما. ولضمان دقة النتائج وإثبات فعالية المواد المقترحة عند دمجها مع مركبات أخرى كالخرسانة تم الاعتماد على مجموعة من الأدوات والبرامج المتخصصة والتي سيتم عرضها وشرح تفاصيلها في الفصل التالي.

الفصل الثالث:

طرق وكميات قياس الجرعات الإشعاعية

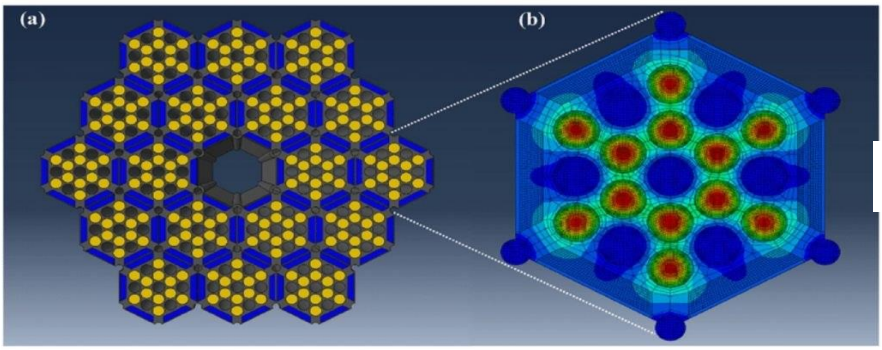
1.مقدمة:

تتيح إمكانيات النمذجة والمحاكاة الحديثة في الهندسة النووية فهما شاملا للظواهر الفيزيائية. تهدف إلى إستنساخ سلوك الأنظمة الفيزيائية المعقدة إلى نتائج حسابية دقيقة مما يؤدى إلى زيادة هوامش الأمان والحماية وتحسين تصاميم جديدة كتدريع وحماية من الأشعة لذا سيعرض هذا الفصل أبرز البرامج المحاكاة في مجال الحماية من الإشعاع مع تركيز على برنامج phy-X/PSD بصفة محورية.

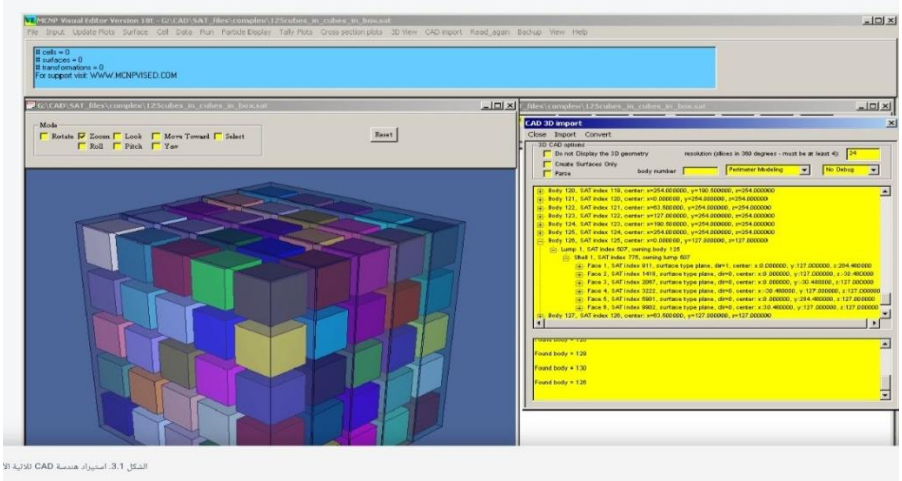
2.برنامج مونت كارلو Monte Carlo N-particle(MCNP):

استعملت الفيزياء الطبية مناهج ذات اهمية مرتبطة بالحاسوب لنمذجة تفسير النقل الاشعاعي وتحويله إلى محاكاة ونتائج دقيقة تسمح بتطبيقه بشكل ملموس بحيث يمكن إستخدام MCNP لنقل العديد من الجسيمات للإغراض العامة بما في ذلك النيترونات والفوتونات والأيونات والعديد من الجسيمات الأولية الاخرى حتى طاقة 1TeV/nucleon .

تشمل مجالات التطبيق التي تستخدم تنبؤات برنامج MCNP على سبيل المثال الحماية من الإشعاع وقياس الجرعة والتدريع والتصوير الإشعاعي والفيزياء الطبية والسلامة النووية وكل ما يخص جانب الحماية من الإشعاع والجوانب الأخرى لأن هذا ما يركز عليه موضوعنا [62].



الشكل (16.3):تمثيل تخطيطي لمحاكاة (a)التصميم الهندسي و(b)التوزيع الإشعاعي للجسيمات باستخدام كودMCNP

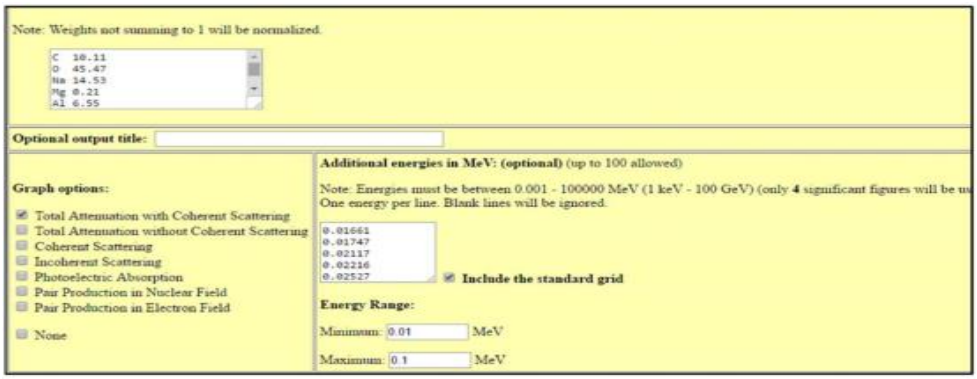


الشكل (3.*17*):نموذج محاكاة يوضح التوزيع الهندسي والإشعاعي للجسيمات باستخدام كودMCNP

3.برنامجWinXCOM Program:

هو برنامج يعمل على نظام الويندوز لحساب معاملات تفاعل الفوتونات مع الأشعة السينية والأشعة غاما ومعاملات التوهين للعناصر والمركبات والمخاليط.

يتيح تحديد تركيبات المواد ونطاقات الطاقة ثم ينتج جداول دقيقة لمعاملات التوهين الكتلي و الخطي ومتوسط المسارات الحرة ومقاطع التفاعل الجزيئات (التأثير الكهروضوئي والتشتت المتماسك وغير المتماسك وانتاج الازواج في المجلات النووية والالكترونية) يستخدم البرنامج على نطاق واسع في فيزياء الإشعاع وتصميم الدروع وتحليل المواد كما يدعم المهام الشائعة في مجال الحماية من الاشعاع كالفيزياء الطبية والإختبارات الغير المدمرة وتوصيف المواد [63].

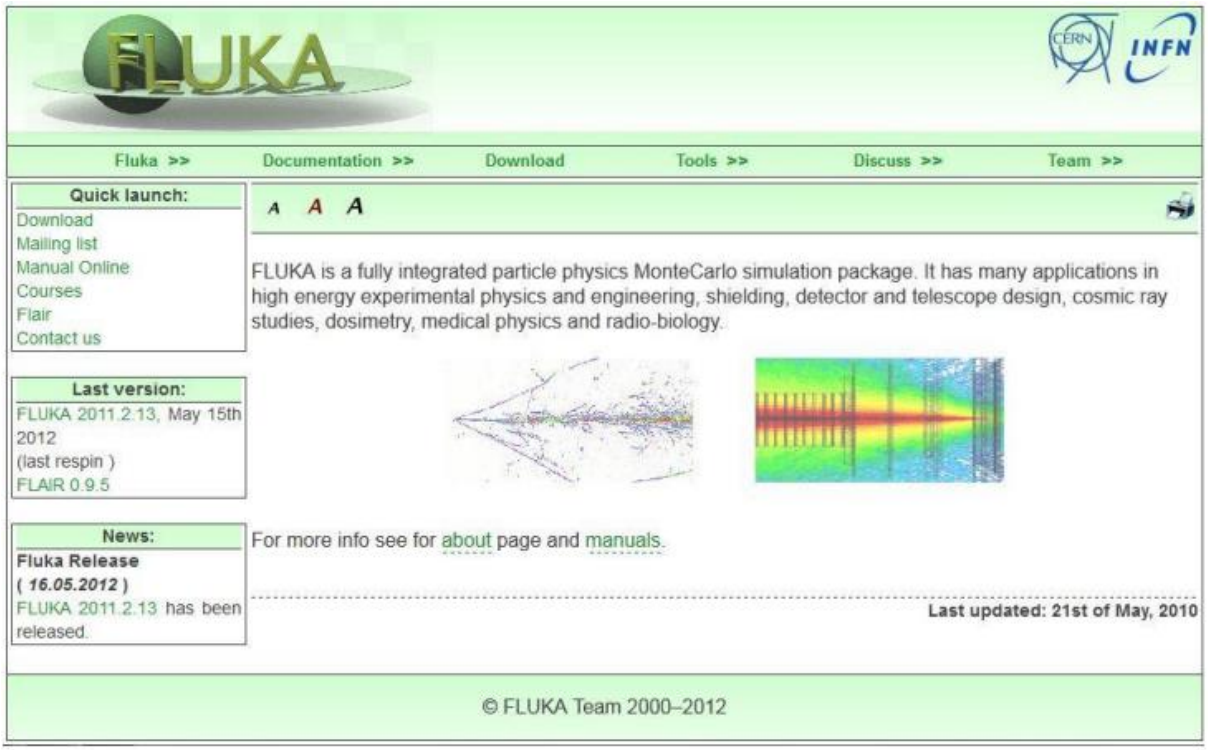


الشكل (18.3):التعريف ببرنامجWinXCOM ودوره في حساب معاملات التوهين الإشعاعي

4.كود(FLUKtuierende KAsKade)(Fluka)):

هي أداة للأغراض العامة ولحساب نقل الجسيمات وتفاعلاتها مع المادة خاصة .يستطيع برنامج(Fluka)محاكاة تفاعل وانتشار حوالي60نوعا مختلفا من الجسيمات في المادة بدقة عالية بما في ذلك الفوتونات والالكترونات من 1كيلو الكترون فولت الى آلأف التيرا الكترون فولط والنيوترينوات والميونات بأي طاقة والهادرونات بطاقة تصل الى 20تيرا الكترون فولط (تصل الى 10بيتا الكترون فولط)،كما يمكن لبرنامج(Fluka)محاكاة الفوتونات المستقطبة والفوتونات الضوئية.يمكن استخدام برنامج(Fluka)حتى مع الاشكال الهندسية المعقدة للغاية باستخدام نسخة محسنة من حزمة الهندسة التوافقية(CG).

يمكن لبرنامج(Fluka)تتبع الجسيمات المشحونة في وجود مجالات مغناطسية كهربائية. من الممكن أيضا وصف الشكل الهندسي المعقد من حيث' الفوكسل' (اختصار لحجم البكسل) وهو عبارة عن متوازيات مستطيلات صغيرة تشكل شبكة ثلاثية الأبعاد،وهي طريقة مفيدة بشكل خاص عند ترجمة فحص التصوير المقطعي المحوسب لجسم الانسان الى نموذج قياس الجرعات [64].



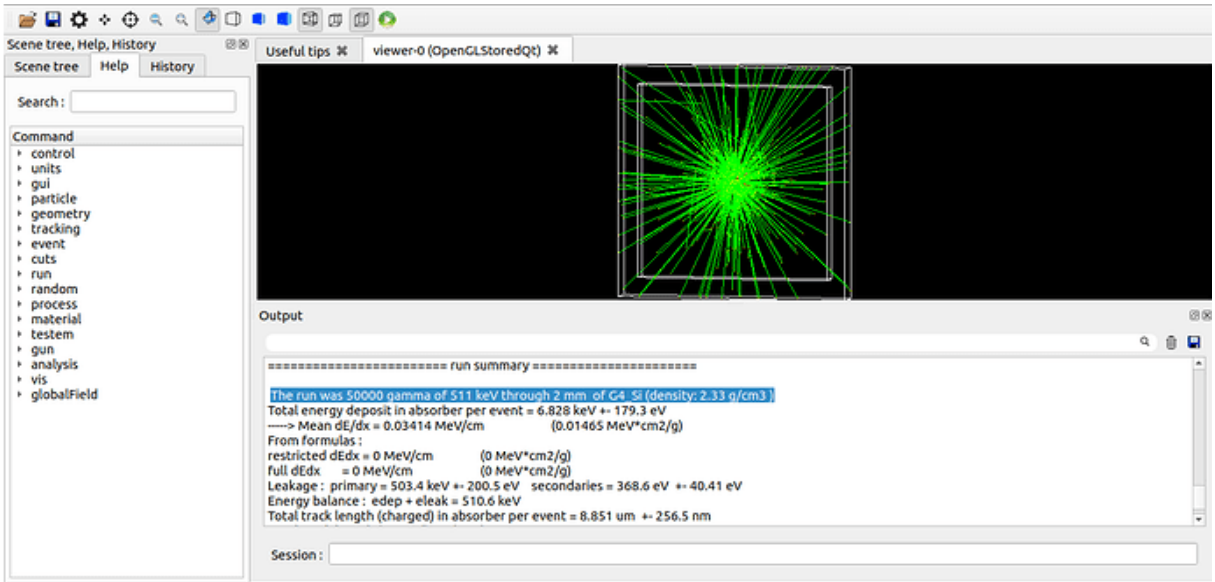
الشكل (19.3):تطبيقات كود Fluka في نمذجة تتبع الجسيمات المشحونة

5.الهندسة والتتبع((Geometry And Tracking(Geant4) :

عبارة عن منصة لمحاكاة مرور الجزيئات عبر المادة باستخدام أساليب مونتي كارلو،تستخدم مجوعة أدوات (Geant4)في انتاج مونتي كارلو لتطبيقات فيزياء الطاقة العالية وفي تطبيقات متنوعة لكاشفات الإشعاع والفضاء

والطب.تتيح توسيعات وتطورات نماذج(Geant4)في الفيزياء لا للحصر إلى إمكانيات جديدة وتحسينات لتطبيقات أخرى لمجموعة الأدوات في دراسة الإشعاع في فيزياء الطاقة العالية والفضاء والبحوث الطبية.يتضمن برنامج(Geant4)مكونات لوصف الهندسة وتحديد الجسيمات و التنقل و التتبع و الاصطدامات ونماذج فيزيائية للتفاعلات الكهرومغناطيسية والهادرونية والبصرية [65].

بالإضافة الى مجموعة الجسيمات طويلة العمر والمواد والعناصر ضمن نطاق طاقة واسع يبدأ في بعض الحالات من 250الكترون فولط وتمتد في حالات أخرى الى نطاق الطاقة تيرا الكترون فولط. صممت هذه المجموعة وبنيت لعرض نماذج الفيزياء المستخدمة والتعامل مع الاشكال الهندسية المعقدة ولتمكين تكييفها بسهولة للاستخدام الأمثل في مختلف التطبيقات [66].وقد طورت مؤخرا تكوينات لنماذج فيزيائية مصممة خصيصا لعمليات المحاكات الواسعة والآن(Geant4)جزء من هذه الأدوات، تم رصد التقدم في الأداء الفيزيائي من خلال جهود التحقق ومقارنات الفيزياء مع البيانات سواء داخل فرق(Geant4) أو بالتعاون مع تجارب ومجموعة مستخدمين مختلفة.

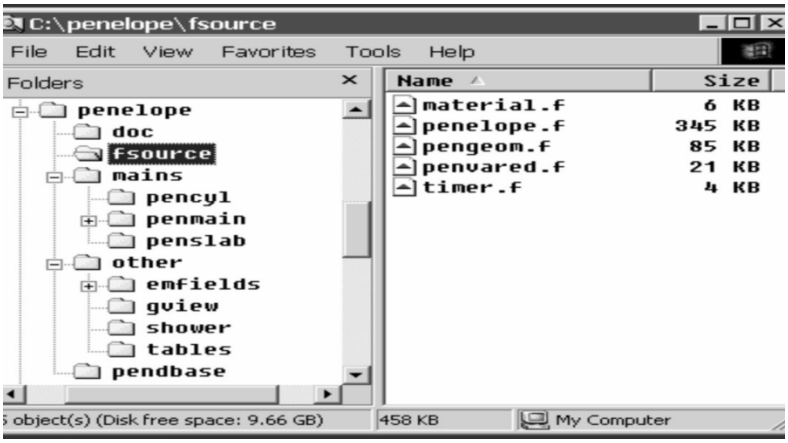


الشكل (20.3):محاكاة Geant4لإنتشار الجسيمات وتفاعلها مع المادة

5.برنامج حزمة تفاعل الكترون-فوتون (Package for Electron –photon Interaction(penelope)Code):

يجري برنامج Penelope محاكاة مونت كارلو للالكترونيات والفوتونات المترافقة في مواد مختلفة ضمن نطاق طاقة واسع. من بعض مئات من الالكترون فولط الى حوالي 1جيجا الكترون فولط. تتم محاكاة انتقال الفوتونات باستخدام مخطط المحاكاة القياسي المفصل تولد مسارات للإلكترونات والبوزيترونات بناء على إجراء مختلط يجمع بين المحاكاة التفصيلية للأحداث القوية والمحاكاة المكثفة للتفاعلات الضعيفة. [67]كمحاكاة تفاعلات الالكترونات والبوزيترونات

التشتت المرن والتشتت غير المرن وإنبعاث أشعة الكبح. يتيح إستخدام برنامجPenelope إجراءات وتقنيات مختلفة لتقليل التباين ويتم تطبيقه في مهام الحماية من الإشعاع وقياس الجرعات الدقيقة. [68]



الشكل (21.3):بنية المجلدات والملفات المصدرية لبرنامجPENELOPEلمحاكاة إنتقال الإلكترونات والفوتونات بطريقة MCNP

6.المقارنة بين البرامج:

تم مقارنة البرامج السابقة وتم الحصول على: [69]

MCNPاكثر دقة من Geant4

Flukaاسرع في محاكاة تتبع الجسيمات أكثرمنMCNP

Geant4أبطأ في وقت الحساب مقارنة بFluka

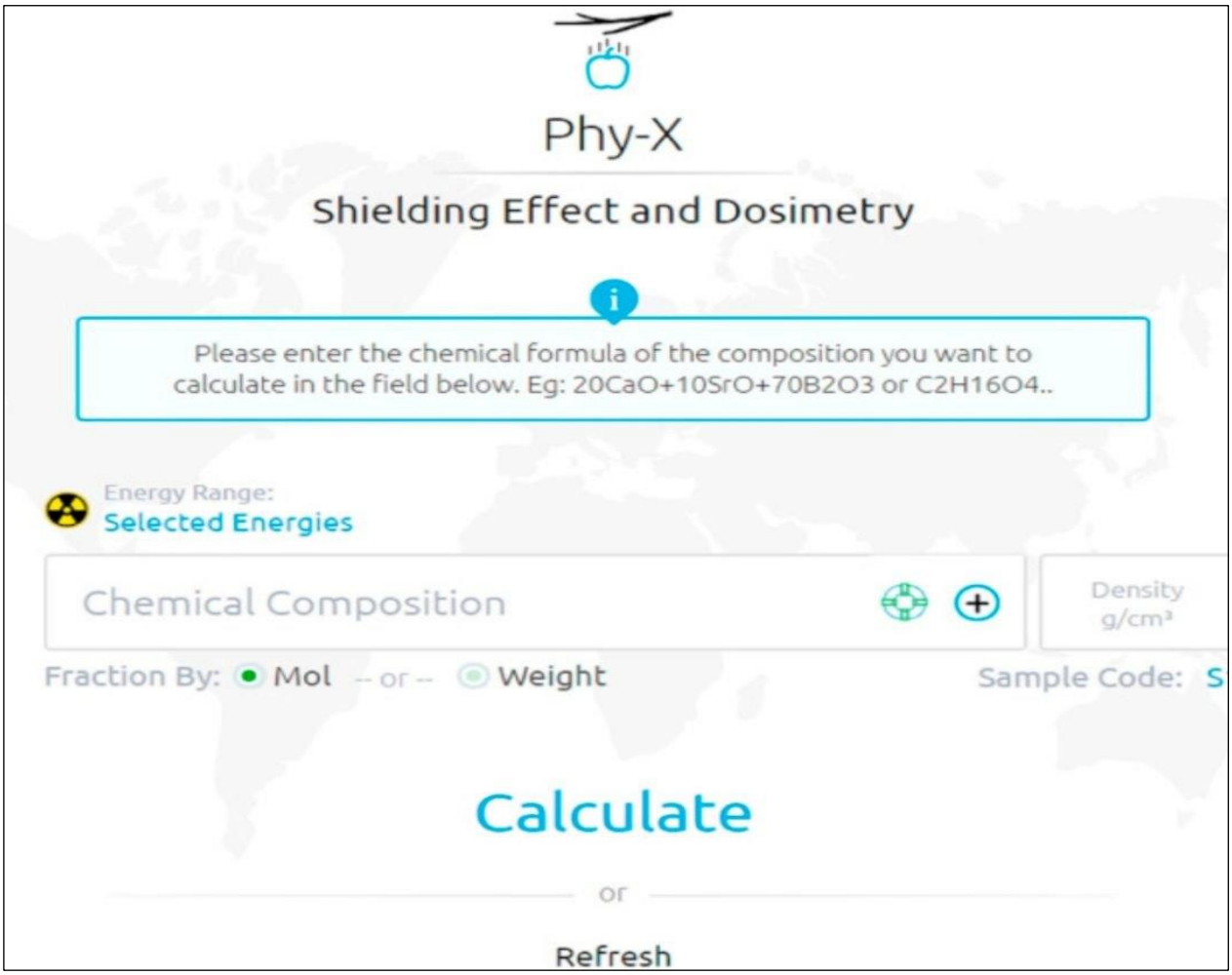
Penelope أقل شموليةمقارنة بMCNPوGeant4 فيما يخص النيترونات والطاقات العالية. [70]

في إصداراتMCNPوجد أنMCNP5 أكثر دقة من MCNP6

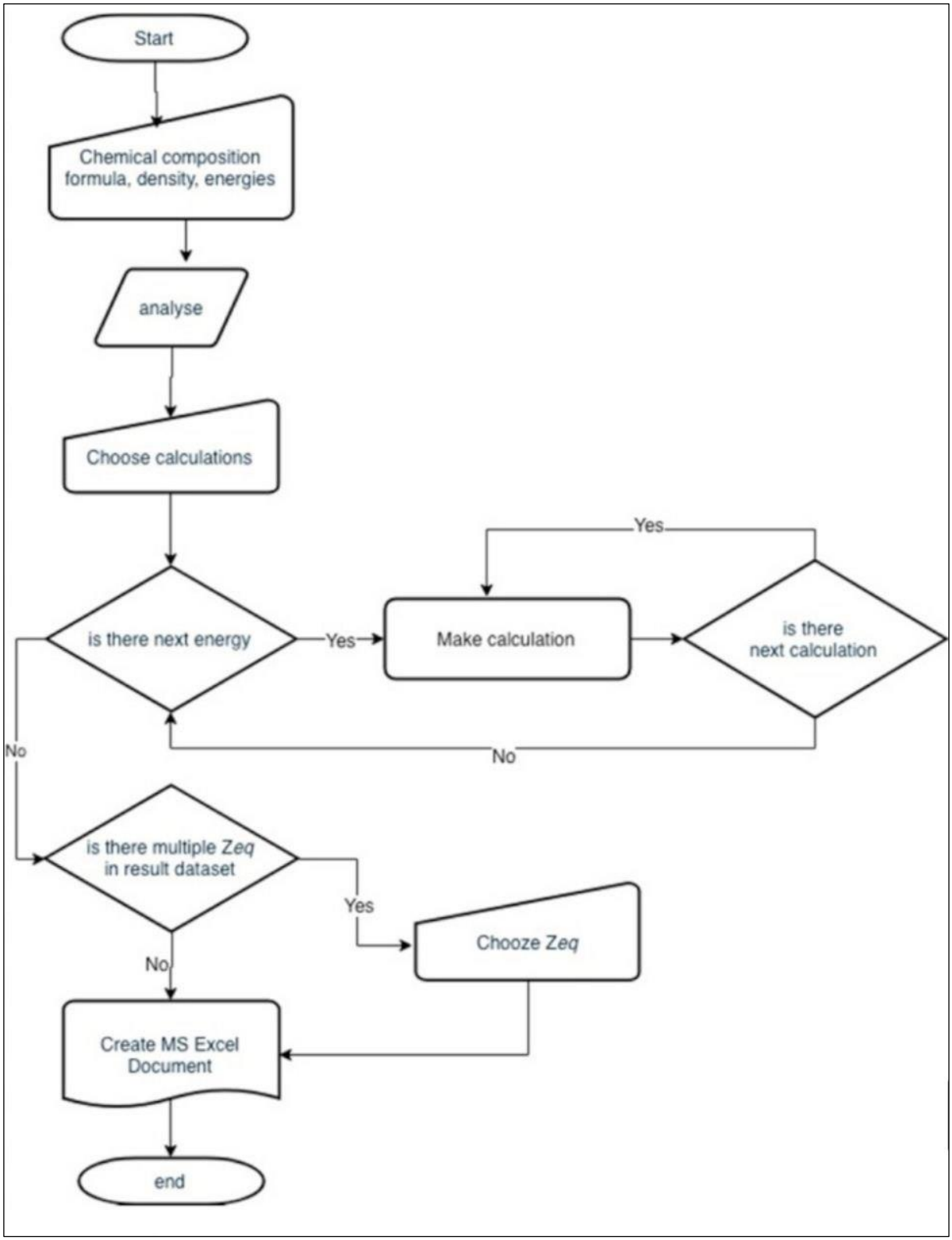
7.برنامجPhy-X/PSD:

تم تطوير برنامج سهل الاستخدام عبر الانترنت لحصر الجرعات الضوئية وحساب معلمات المتعلقة بالحصر والجرعات متاح عبر الرابط التاليhttps://phy-x.net/PSD .تشمل هذه المعلمات معاملات التوهين الخطي والكتلي(LAC,MAC) وطبقة نصف وعشر القيمة(HVL,TVL) ومتوسط المسارالحر(MFP) والعددالذري الفعال وكثافة الالكترون (Neff, Zeff) والتوصيلية الفعالة(Ceff)وإمتصاص الطاقة وتراكم التعرض (EABF,EBF).

يستطيع برنامجPhy-X/PSD توليد بيانات حول معايير التدريع في نطاق الطاقة المتصل من 1كيلو الكترون فولط الى 100جيجا الكترون فولط وذلك بسرعة ودقة لعدد لانهائي من المواد المختلفة كما يساعد في اختيار افضل مادة حماية في المجالات التكنولوجية ذات الصلة باسم معايير الحماية من الاشعاع يتميز بانه برنامج يظهر النتائج في فترة زمنية قصيرة نسبيا تعتمد على عدد العمليات الحسابية ويجري برنامجPSD حوالي377600عملية حسابية في غصون 500 ثانية تقريبا لأربعة مواد مختلفة.حظى برنامجPSD بإهتمام كبير في العديد من التطبيقات الهندسية والطبية لاسيما في مجال الحماية من الإشعاع وحساب معلمات الجرعات التي تظهر أداء الحماية من الاشعاع. [71]



الشكل (22.3):الواجهة الرئيسية لبرنامج Phy-X/PSDلحساب معلمات الوقاية الإشعاعية



الشكل (23.3): الطريقة الوظيفية لبرنامج phy-X/PSD

8.خاتمة:

نستنتج ان برامج المحاكاة لها أهمية كبيرة في معرفة نتائج دقيقة تقودنا نحو عمليات تخطيط الخاصة بالحماية والتدريع، كونها تمنح اختصارات في الوقت والجهد والموازنة بين الجودة والوقاية وهذا يزيد من تحسين اختيار مواد التدريع البديلة. بناء على هذا سيخصص الفصل التالي لتحليل ومناقشة النتائج التي تم الحصول عليها باستخدامPhy-X/PSD

الفصل الرابع:

النتائج والمناقشة

1.مقدمة:

من أجل إجراء مقارنة شاملة بين المواد المرشحة في هذه الدراسة، يتم في هذا الفصل عرض وتحليل المعلمات الأساسية كالHVL،TVL،MAC،LAC،AMWبصورة مفصلة. وتركز النتائج المقدمة هنا أساسا على تقييم تأثير هذه المواد وكثافتها على كفاءة الحماية من الإشعاع بشكل عام. كما تتم مناقشة القيم المتحصل عليها ومقارنتها بالبيانات النظرية والتجريبية المتوفرة في الدراسات السابقة.

2.المواد المرشحة:

لقد استخدمنا برنامجphy-X/PSD لتحليل ودراسة عينات من مواد مختلفة بهدف حماية أفضل من الإشعاع على غرار مادة الرصاص وذلك بحساب معلمات التوهين مثل:

MAC،LAC،HVL،TVL، ،MEP،Neff،وعلى الرغم من أن الدراسة شملت المجال الطاقي الممتد من 0.015Mev الى15Mev فقد تم التركيز في التحليل والمناقشة التفصيلية على المجال0.015 Mev الى0.15Mev نظرا لأهميته في إبراز التغيرات الملحوظة في خصائص التوهين الإشعاعي للمواد المدروسة.

.يعرض الجدول أدناه المعلومات المهمة عن المواد المدروسة ضمن بحثنا اللازمة للحماية من الإشعاع:

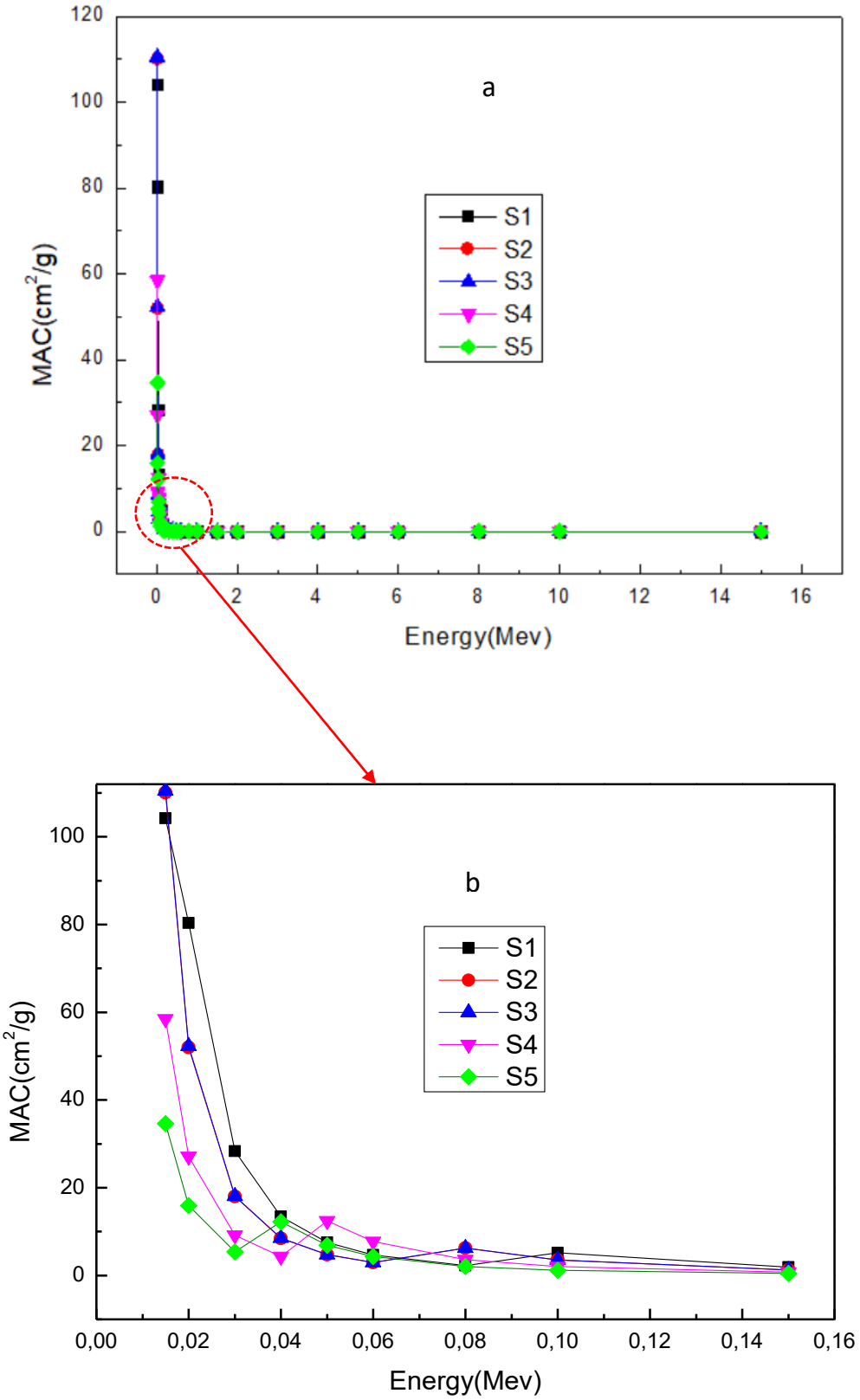
المواد	العدد الذري											الكثافة (g/cm^3)
(S1) Bi2O3	Bi	O	Ta	W	Ce	Ba	AL	H	Si	Ca	S	8.90
	83	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
(S2) Ta2O5	-	8	73	-	-	-	-	-	-	-	-	8.20
(S3) WO3	-	8	-	74	-	-	-	-	-	-	-	7.16
(S4) CeO2	-	8	-	-	58	-	-	-	-	-	-	7.22
(S5) 55BaSO4+25SiO2+ 10CaO+5Al2O3 +5H2O	-	8	-	-	-	56	13	1	14	20	16	3.5

الجدول (4.4):معلومات مهمة عن المواد المدروسة اللازمة للحماية من الإشعاع

3.معاملات التدريع:

1.3.معامل التوهين الكتلي (MAC) :

يوضح الشكل**(24.4)** قيم MAC لعينات المواد المدروسة المصنفة S5.S4.S3.S2.S1 يعد معامل التوهين الكتلي أحد أفضل المعاملات لتحديد مادة التدرع الجديدة حيث كلما زاد معامل التوهين الكتلي كان التوهين افضل في دراسة المواد تم الحصول على قيم معامل التوهين الكتلي نظريا باستعمال برنامج phy-X/PSD في نطاق الطاقي 0.015MeV إلى0.15MeV .يوضح الشكل تغيرات قيم معامل التوهين الكتلي للمواد المدروسة مع زيادة طاقة الفوتون يظهر معامل التوهين سلوكا تنازليا مع زيادة الطاقة نظرا لانخفاض احتمالية تفاعل الفوتونات عالية الطاقة التي يكون اختراقها عالي والتي من المرجح أن تتشتت أكثر من أن تمتص في منطقة الطاقة المنخفضةE<0.03حيث يكون التفاعل السائد هو تأثير الكهروضوئي تظهر جميع العينات قيم MAC عالية .تشير الانخفاضات الطفيفة الملحوظة في حدود مجال طاقة0.01Mev <E<0.11Mev الى حواف الامتصاص تحدث عندما تكون طاقة الفوتون الساقط متساوية او اكبر من الطاقة ربط الالكترونات ما بين الاغلفة وخاصة المدارK.وعند طاقة0.15 Mev <E<0.11 Mev يبدأ تأثير كومبتون بالظهور ويكون التفاعل أقل إعتمادا على العدد الذريZمما يفسر تقارب المنحنيات بشكل عام .كانت العينة التي أظهرت اعلى قيمة هي S1 تم ترتيب العينات المواد المدروسة على النحو التالي:S5>S4>S3>S2>S1

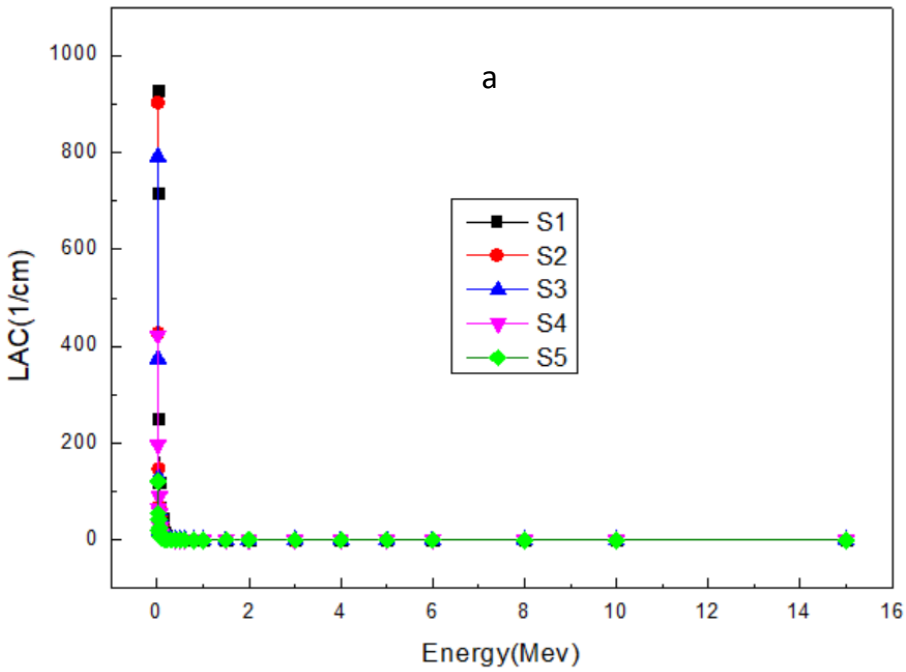


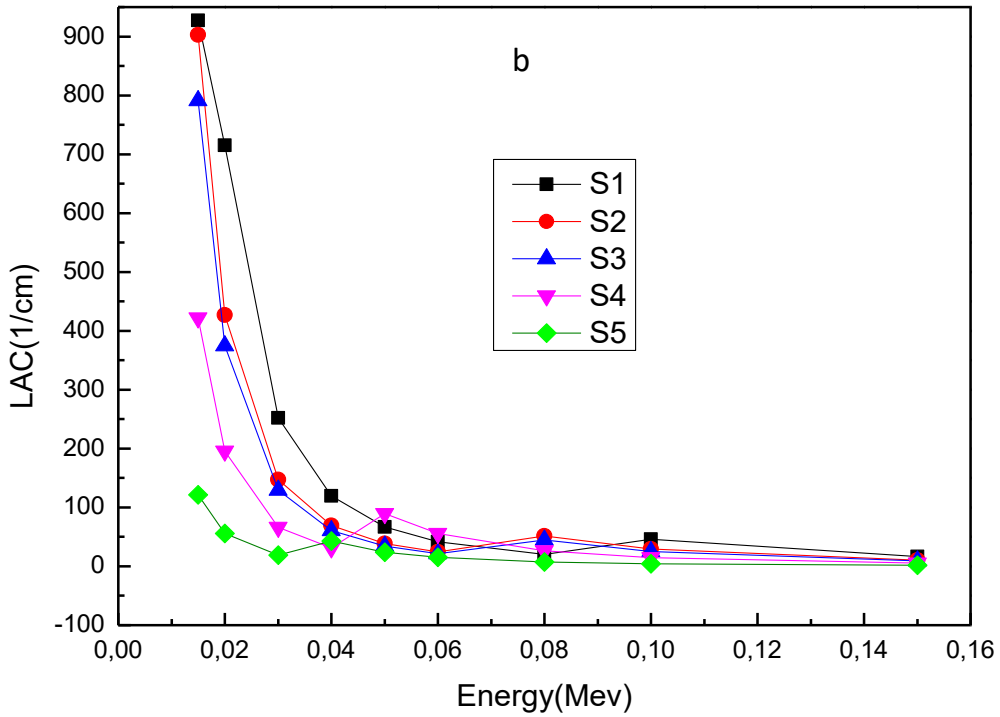
الشكل (24.4):معامل التوهين الكتليMAC لعينات مواد في نطاق طاقةMeV0.015 إلىMeV0.15

2.3.معامل التوهين الخطي (LAC) :

على غرار معامل الإمتصاص الكتلي MACيعتمد معامل الإمتصاص الخطيLAC بشكل مباشر على كل من العدد الذري Z للمواد المكونة للعينات وطاقة الفوتون الساقطة. يوضح الشكل **(25.4)**تغيرات قيم LACعبر مجال طاقة

تتبع منحنيات العينات بوضوح نمطا تنازليا مع زيادة الطاقة ،نلاحظ أن العينةS1 تمتلك أعلى معامل توهين عبر جميع مستويات الطاقة مما يجعلها الأفضل في الحماية مقارنة بالعينات S5 .S4. S2.S3،نلاحظ أن الكفاءة تقل تدريجيا بالإنتقالS1>S2>S3>S4>S5. تشير بيانات المنحنى الى وجود تناسب طردي بين قيم LAC وكثافة العينة فكلما زدات الكثافة زدات احتمالية حدوث التفاعلات الإشعاعية خاصة التأثير الكهروضوئي مما يؤدي الى معامل إمتصاص أعلى.نلاحظ أيضا أن الفرق بين العينات يكون في أقصى درجة عند مجال طاقةE<0.04 Mev وتبدأ بالإستقرار عند الطاقات الأعلى.



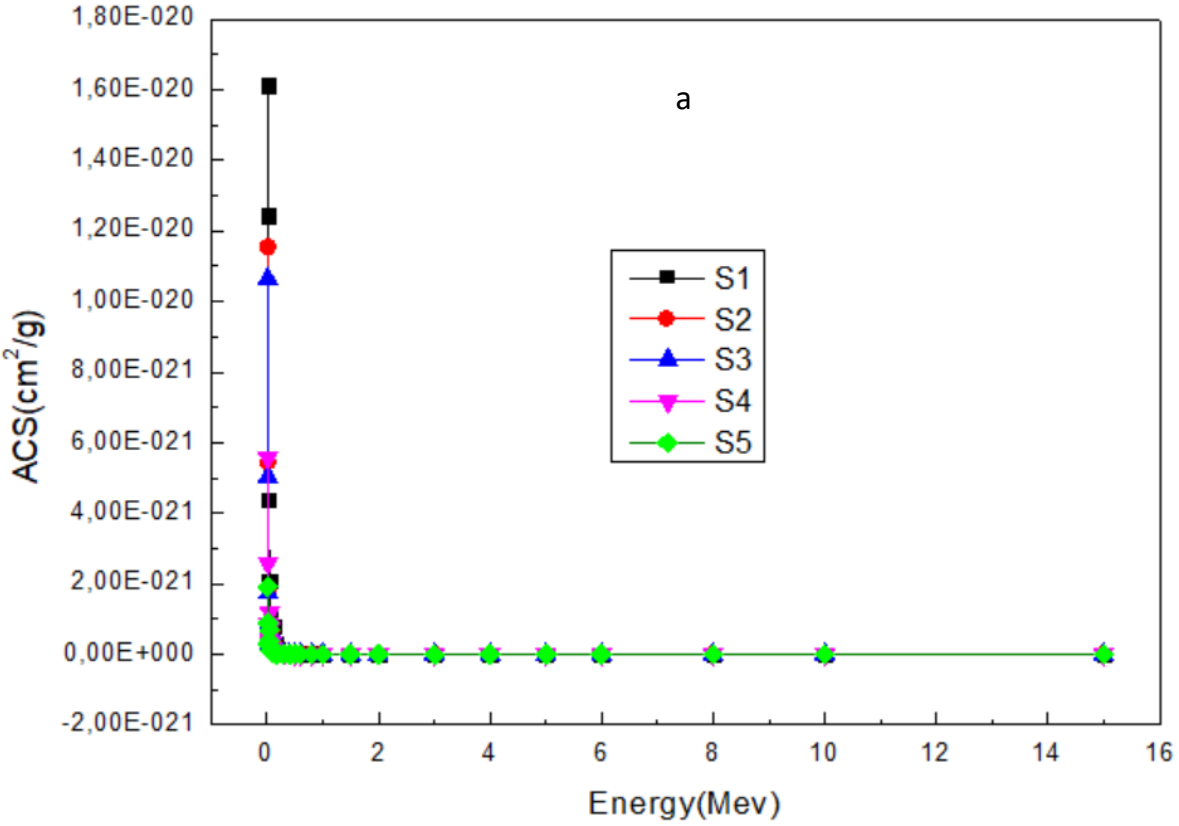


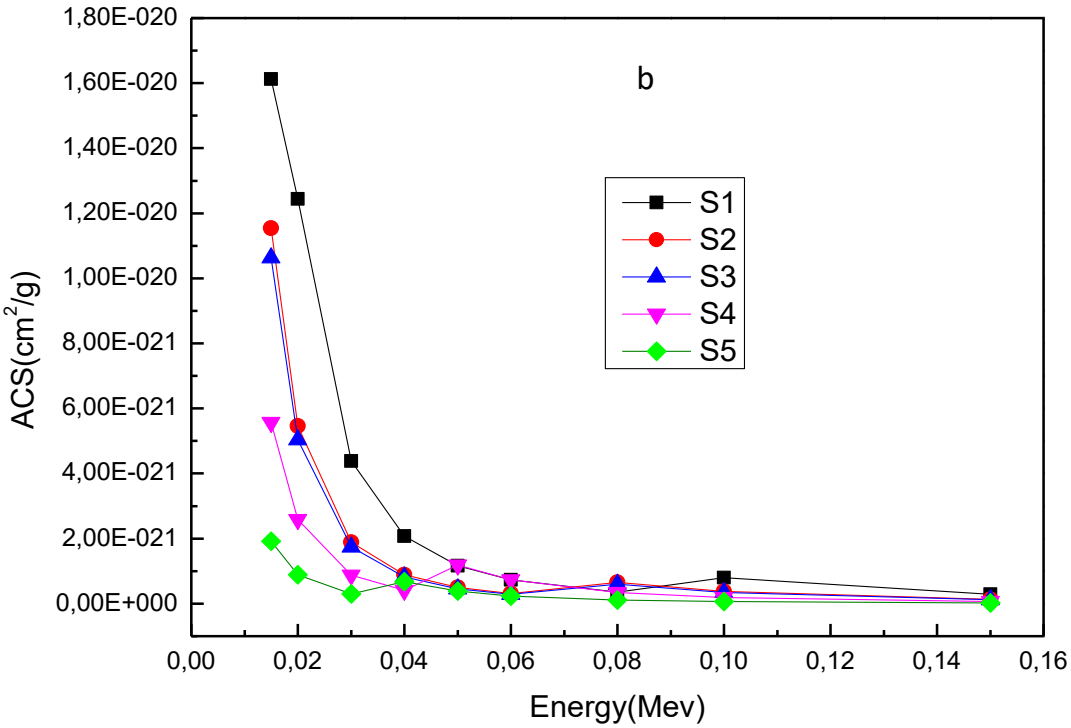
الشكل (25.4):معامل التوهين الخطيLACلعينات مواد ضمن نطاق طاقةMeV0.015 إلى MeV0.15LAC

3.3.المقطع العرضي الذري(ACS):

هو معامل قدر إحتمالية تفاعل الفوتون الساقط مع المادة. يوضح الشكل **(26.4)**تغيرات المقطع العرضي الذري ضمن مجال طاقة.نلاحظ بوضوح أن جميع العينات تتبع سلوكا تنازليا حادا مع زيادة الطاقة خاصة في نطاق الطاقة المنخفضة 0.06 Mev <E <0.01 Mev نلاحظ تناقص لقيم ACSيشير هذا التناقص الى هيمنة التأثير الكهروضوئي في هذا النطاق ،وفي منطقة الطاقة المتوسطة0.15 Mev<E< 0.08 Mev نلاحظ حدوث تقارب في المنحنيات وبداية ظهور تأثير كومبتون وهو أقل إعتمادا على العدد الذري للمادة مقارنة بالتأثير الكهروضوئي.تصبح الفوراق بين العينات طفيفة جدا وتكاد تنعدم عند الطاقة 0.15 Mev.ووجد أن العينة S1 تمتلك قيم ACS أعلى عبر معظم نطاق الطاقة وقد يشير هذا إالى كثافة أعلى أو وجود عناصر ذات عدد ذري مرتفع .كما ترتبت العينات من حيث قوة الإمتصاص في النطاق المنخفض كتالي:

S5<S4<S2<S3<S1

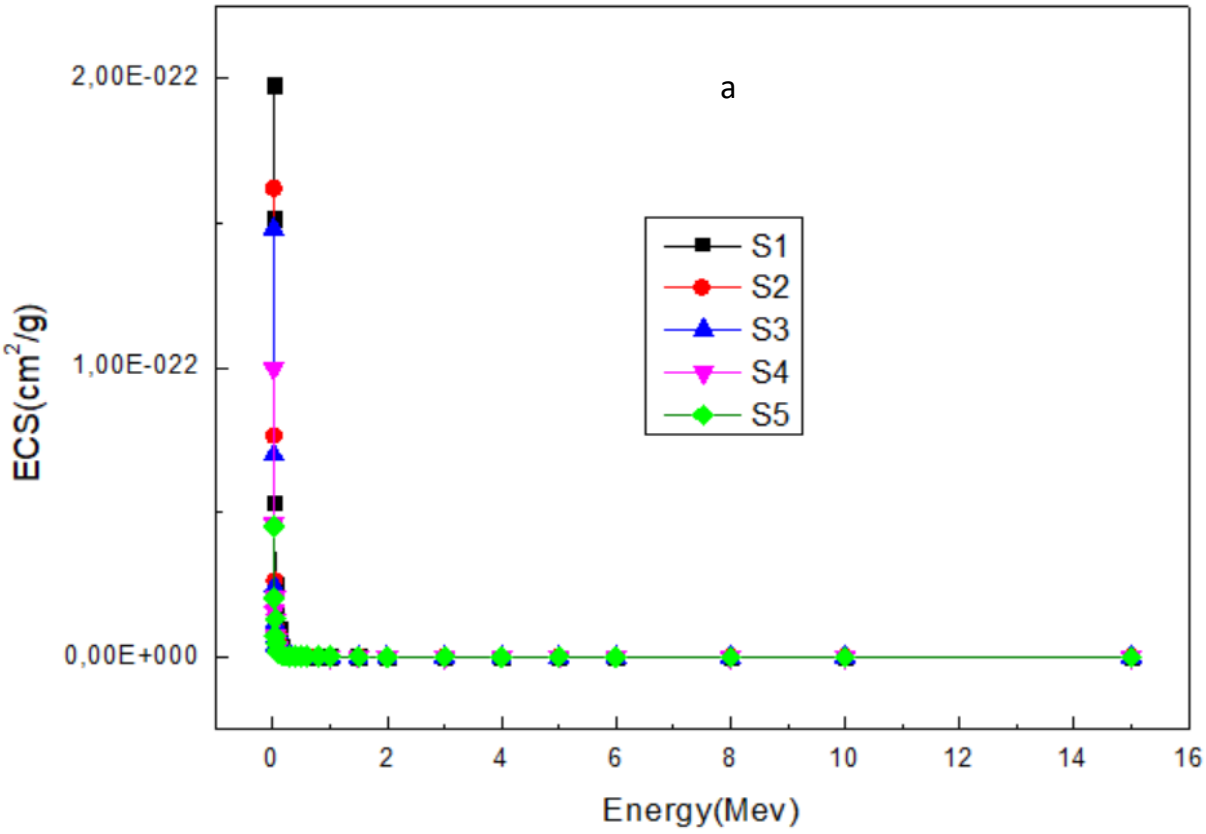

a
S1
S2
S3
S4
S5
ACS(cm²/g)
Energy(Mev)
1,80E-020
1,60E-020
1,40E-020
1,20E-020
1,00E-020
8,00E-021
6,00E-021
4,00E-021
2,00E-021
0,00E+000
-2,00E-021
0
2
4
6
8
10
12
14
16

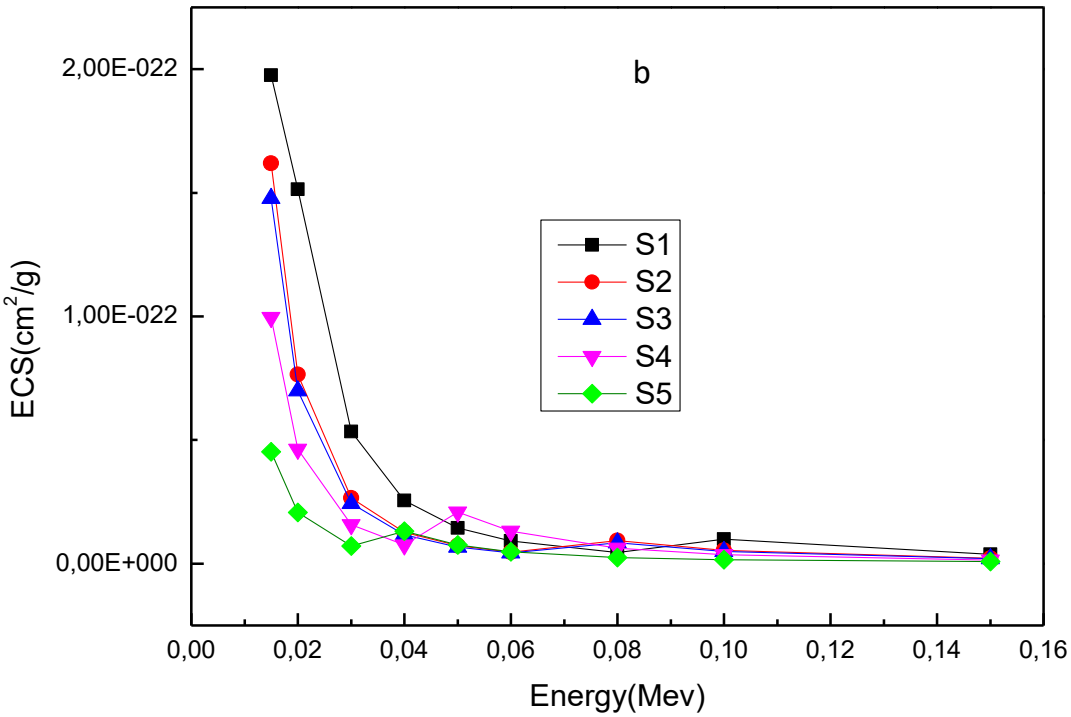


الشكل (26.4):تغيرات المقطع العرضي الذري ضمن نطاق طاقة MeV0.015 إلى MeV0.15

4.3.المقطع العرضي الإلكتروني(ECS):

هي معلمة تقدر إحتمالية تفاعل الفوتونات الساقطة مع المادة المستهدفة يوضح الشكل **(27.4)** تغيرات المقطع العرضي الإلكتروني ضمن مجال الطاقة.حيث تتبع جميع المنحنيات سلوكا طرديا وعكسيا مع الطاقة .ففي منطقة الطاقة المنخفضة E<0.04 Mev نلاحظ زيادة حادة في قيم ECS كلما إقتربنا من 0 هذا يشير إلى وجود عدد كبير من الإلكترونات في وحدة الحجم من المادة المستهدفة .ففي هذه المنطقة يظهر تباين كبير بين العينات حيث تمتلك العينة S1 أعلى قيم ECSبينما تمتلك العينة S5 أدنى قيمة ECS .وفي منطقة الطاقةE<0.06 Mev تصل المنحنيات إلى حالة الاستقرار النسبي حيث تكاد المنحنيات تنطبق على بعضها البعض هذا يعني أن تأثير نوع المادة يتلاشى تدريجيا مع زيادة الطاقة. يكون ترتيب العينات على النحو التالي:S5<S4<S3<S2<S1

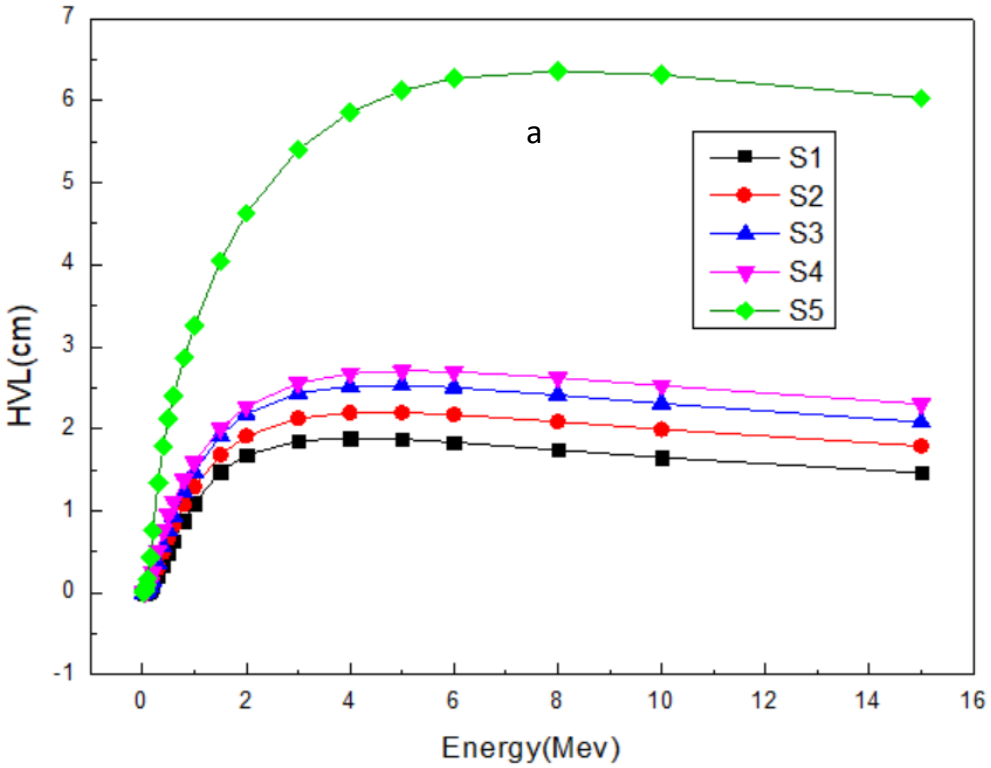

a
2,00E-022
1,00E-022
0,00E+000
ECS(cm²/g)
S1
S2
S3
S4
S5
0
2
4
6
8
10
12
14
16
Energy(Mev)

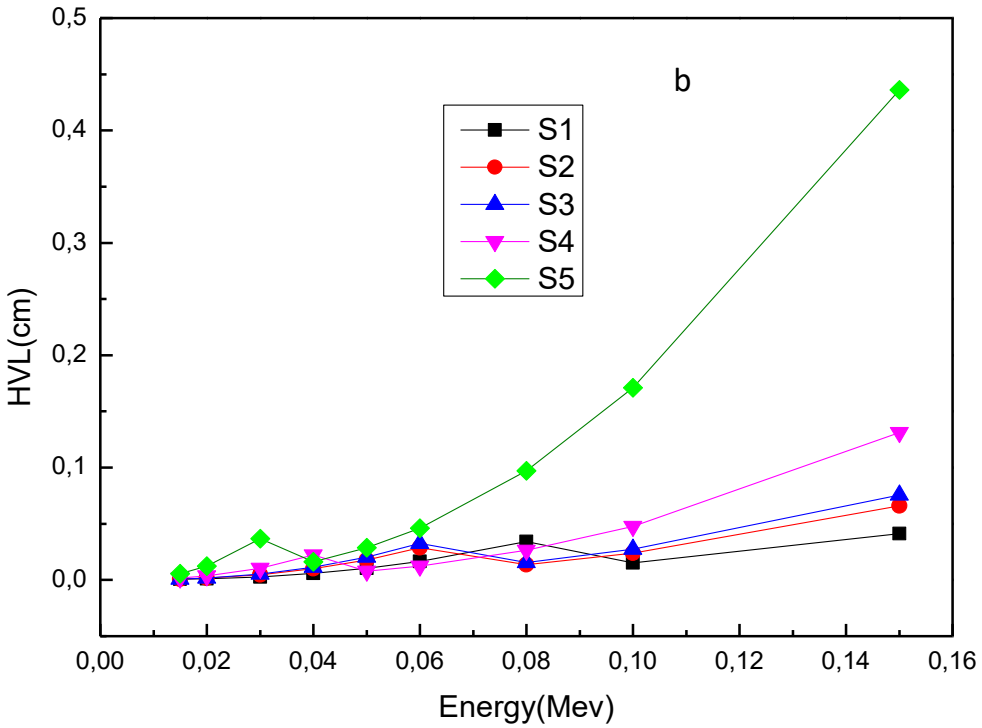

b
2,00E-022
1,00E-022
0,00E+000
ECS(cm²/g)
S1
S2
S3
S4
S5
0,00
0,02
0,04
0,06
0,08
0,10
0,12
0,14
0,16
Energy(Mev)

الشكل (27.4):تغيرات قيم المقطع العرضي الإلكتروني ضمن مجال طاقة MeV0.015 إلى MeV0.15

5.4.معامل التوهين(HVL) :

يعد معامل طبقة نصف القيمة مؤشر لقياس قدرة المادة على تضاعف الإشعاع حيث تعبر عن السمك الازم من المادة لخفض كثافة الإشعاع الساقط إلى نصف قيمته الإبتدائية .يوضح الشكل **(28.4)**تغيرات قيم HVL ضمن مجال طاقة نلاحظ زيادة في قيم HVL عبر جميع الطاقات لجميع العينات الخمسة والتي تفسر العلاقة العكسية بين HVL و LACفي الطاقة التي تقل على 0.06 Mev .وجود قيم منخفضة جدا ومتقاربة لكل العينات تشير إلى قوة التأثير الكهروضوئي عند الطاقات المنخفضة بحيث تمتص المادة الاشعاع بكفاءة عالية في سمك ضئيل جدا.تظهر نتائج أن العينة S5 تمتلك أعلى قيمة HVLخاصة مع زيادة الطاقة 0.08 Mev<E مما يعكس أداءها الضعيف في التوهين. أما بالنسبة للعينة S1 كانت أقل قيم HVLعبر نطاق الطاقة بالكامل مما يشير إلى أفضل أداء توهين وذلك لإمتلاكها على كثافة عالية أو نسبة من الاكاسيد الثقيلة.

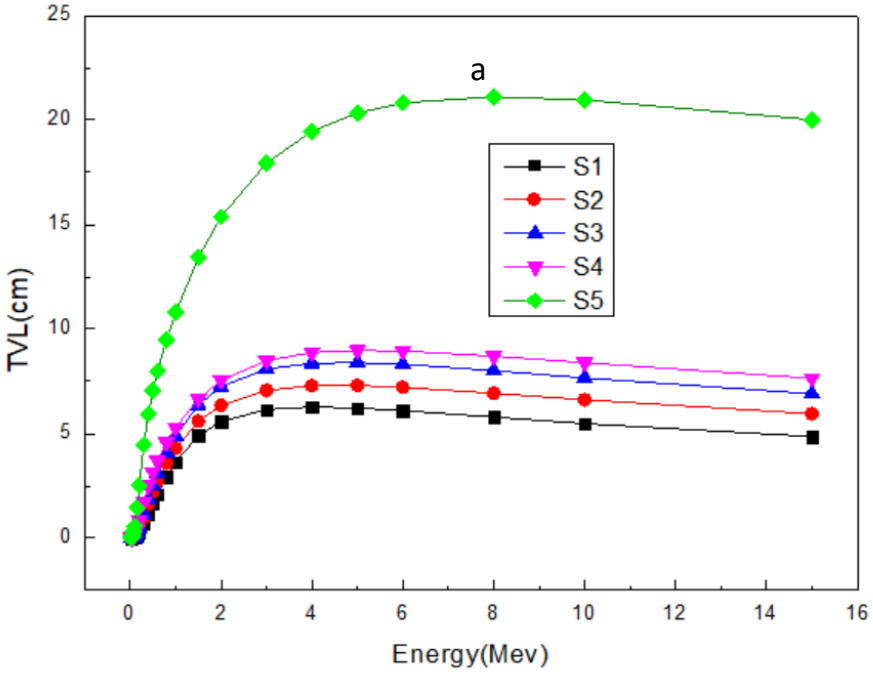


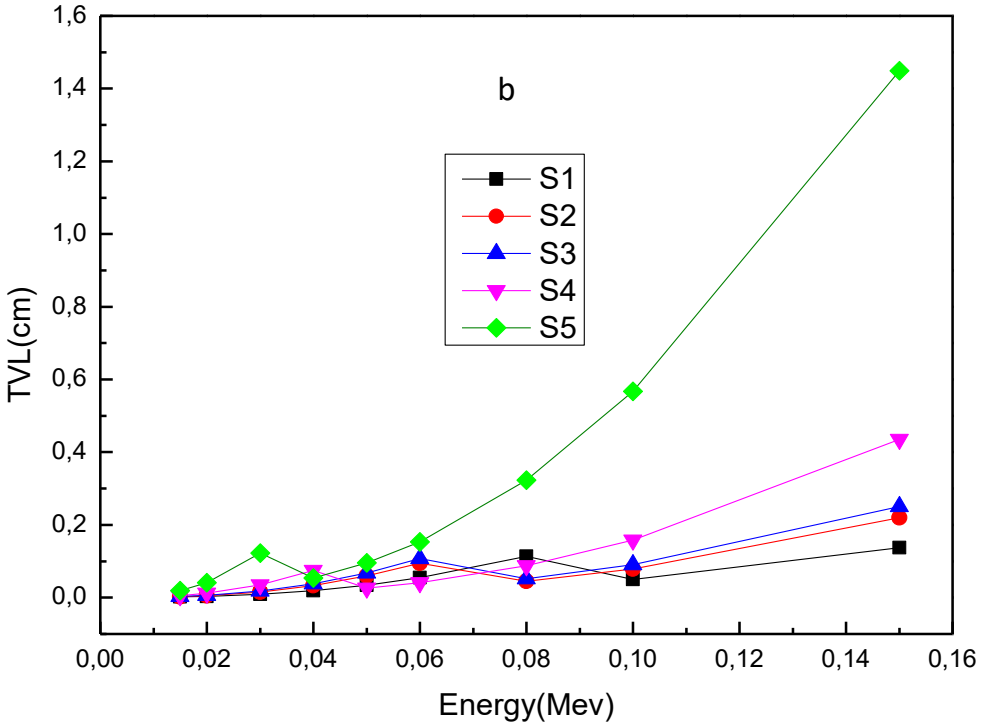


الشكل (28.4):تغيرات قيم HVL ضمن مجال طاقة MeV0.015 إلى MeV0.15

6.4.معامل التوهين(TVL):

هو معلم يقوم بحساب السمك اللازم من المادة لتقليل % 90 من الشدة الأولية للإشعاع الساقط كما هو موضح في الشكل **(29.4)**.تظهر جميع العينات سلوكا عاما يتمثل في زيادة قيمة TVL مع زيادة الطاقة تظهر العينة S5 أعلى قيم TVL بشكل ملحوظ خاصة بعد 0.06 Mev<E يعني أنها الأقل كفاءة في إمتصاص الإشعاع مقارنة بالبقية تظهر العينتان S1وS2 أدنى قيم TVL عبر معظم النطاق الطاقي هذا يشير إلى أن هاتين المادتين هما الأفضل في الحماية الإشعاعية حيث يكفي سمك بسيط جدا لتقليل من نسبة الإشعاع بنسبة% 90.تم ترتيب العينات على الشكل التالي:S1>S2>S3>S4> S5

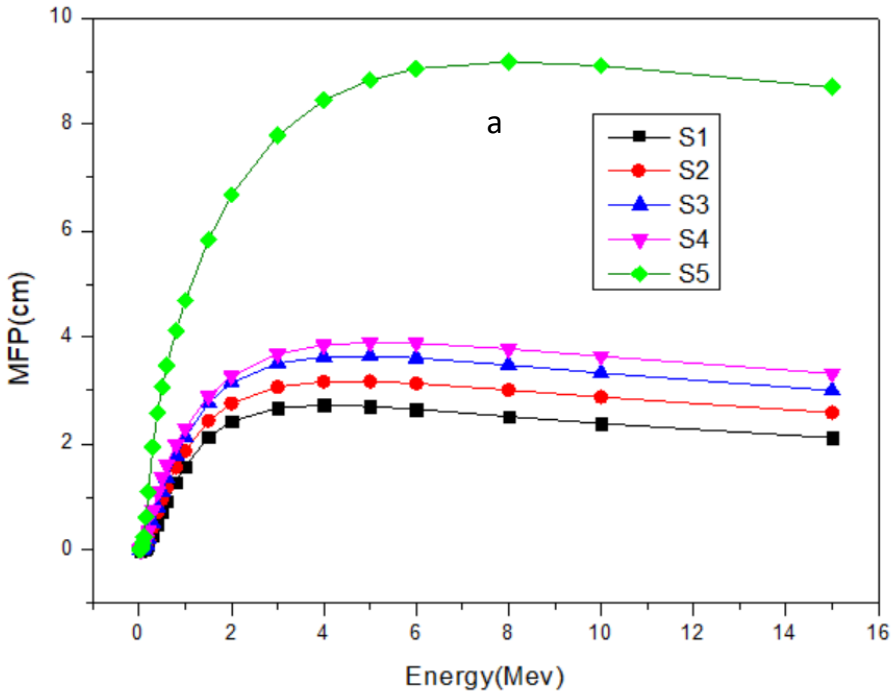


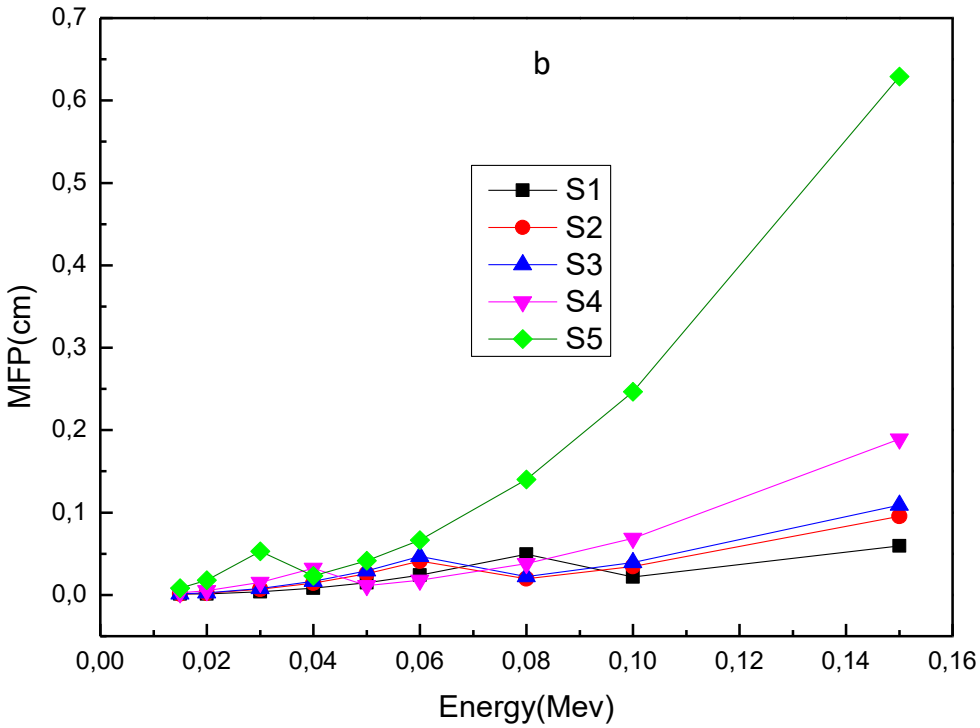


الشكل (29.4):تغيرات قيم TVL ضمن نطاق الطاقةMeV0.015 إلى MeV0.15

7.4.متوسط المسار الحر(MFP):

يوضح الشكل**(30.4)** تغيرات في قيم متوسط المسار الحر بشكل عام يزداد MFP مع زيادة الطاقة ومع ذلك فإنه يزداد بشكل أكبر وضوحا عند الطاقات الأعلى حيث تصبح الفوتونات أكثر قدرة على النفاد عبر المادة دون حدوث تفاعل.تظهر العينات ذات الكثافة العالية مثل العينة S1 أدنى قيم MFPمما تشير إلى الكفاءة أفضل في توهين الأشعة غاما حيث تقطع الفوتونات مسافة قصيرة جدا قبل أن يتم إمتصاصها أو تشتتها في المقابل تظهر العينة الأقل كثافة وهي العينة S5 أعلى قيم MFP مما يعكس أداء توهين أضعف وقدرة إختراق أكبر للفوتونات.عند الطاقة المنخفضةE<Mev 0.06 تظهر جميع العينات قيم متقاربة ولكن مع زيادة الطاقة يزداد تباعد بين المنحنيات بشكل كبير .

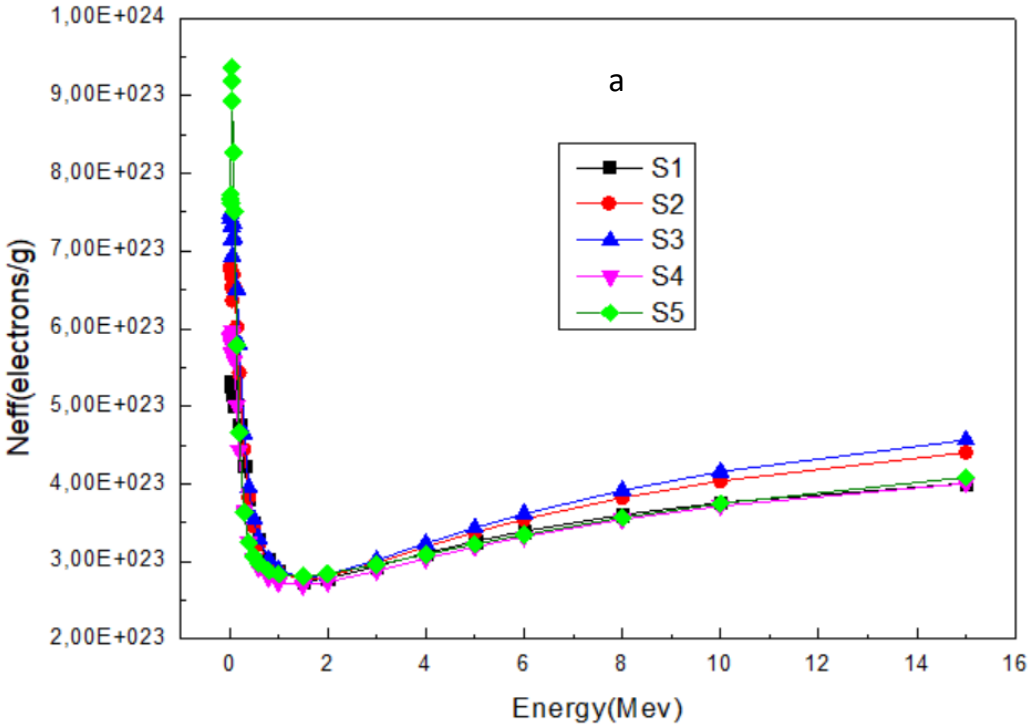


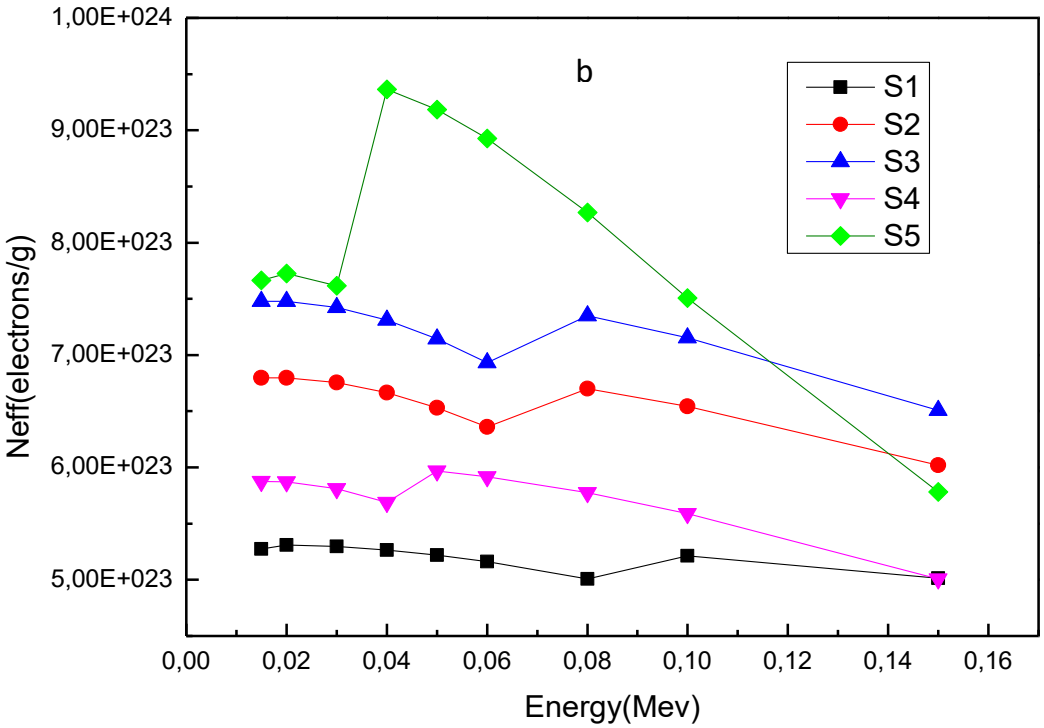


الشكل (30.4):تغيرات قيم MFP ضمن مجال الطاقةMeV0.015 إلى MeV0.15

8.4.كثافة الالكترونية الفعالة(Neff) :

هو معامل يعبر عن كثافة الإلكترونية للمادة ويتأثر بشكل كبير بالعدد الدري ويرتبط عكسيا بالكتلة الذريةA . كما يوضحهالشكل**(31.4)** تبرز العينات S4 و S5 عند الطاقة المنخفضةMev E<0.10حيث يكون التأثير الكهروضوئي هو آلية التفاعل المهيمنة في المقابل مع زيادة الطاقة مما يجعل التأثير الكهروضوئي أقل فعالية وبداية ظهور تشتت كومبتون في حدود مجال الطاقي 0.10 Mev<E< 0.15 Mev تبدأ فيه العينات بالإنخفاض بحيث يعتمد هذا التفاعل بشكل أساسي على عدد الإلكترونات في المادة تشير القفزة الملحوظة للعينة S5 دليل قوي على وجود عنصر ذو عدد ذري مرتفع مثل الباريوم كما تم ترتيب العينات على النحو التالي:S1<S4<S2<S3<S5

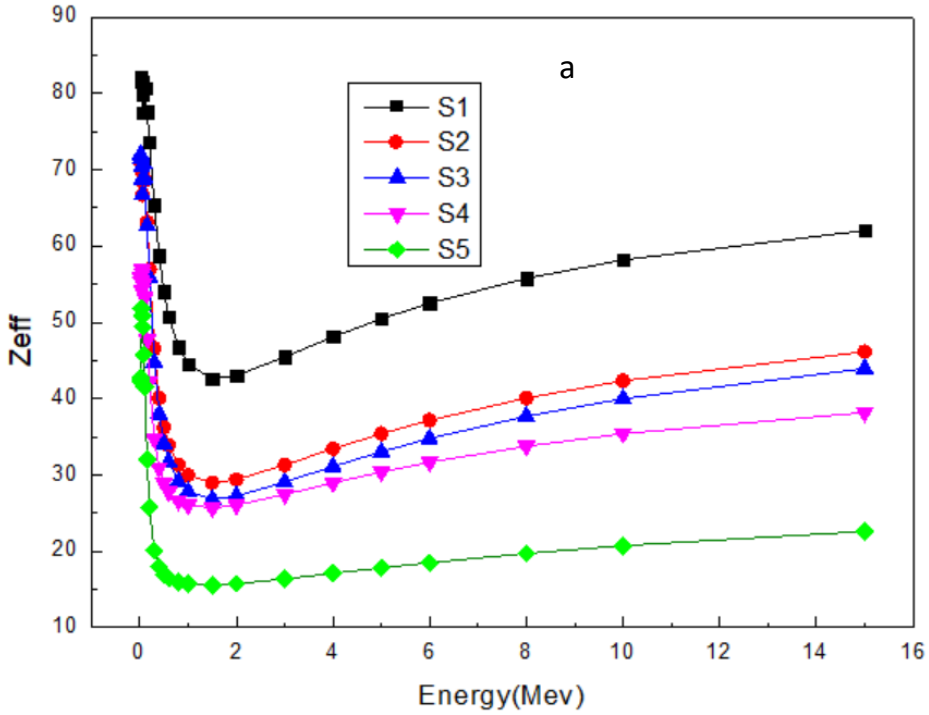

a
S1
S2
S3
S4
S5
Neff(electrons/g)
Energy(Mev)
1,00E+024
9,00E+023
8,00E+023
7,00E+023
6,00E+023
5,00E+023
4,00E+023
3,00E+023
2,00E+023
0
2
4
6
8
10
12
14
16

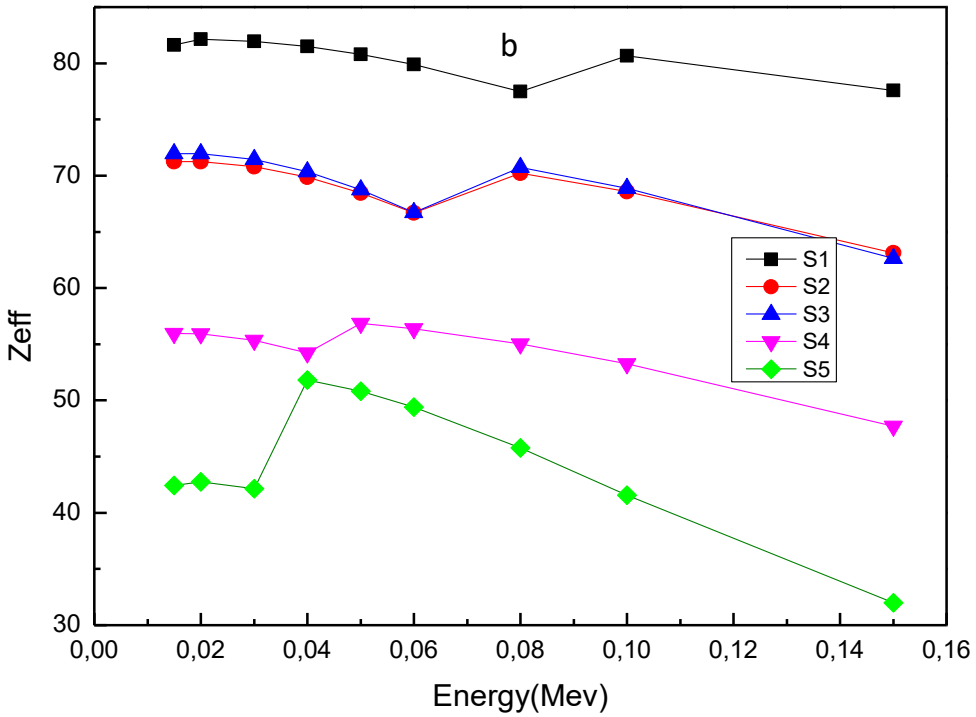

b
S1
S2
S3
S4
S5
Neff(electrons/g)
Energy(Mev)
1,00E+024
9,00E+023
8,00E+023
7,00E+023
6,00E+023
5,00E+023
0,00
0,02
0,04
0,06
0,08
0,10
0,12
0,14
0,16

الشكل (31.4):تغيرات قيم Neff ضمن مجال الطاقةMeV0.015 إلى MeV0.15

9.4.العدد الذري الفعال (Zeff):

يعتبر العدد الدري الفعال معامل اساسي يعكس استجابة المادة المركبة للإشعاع يوضح الشكل **(32.4)** تغيرات Zeffللعينات المدروسة عبر مدى طاقة يتراوح بينMeV 0.15 MeV<E<0.015.تظهر نتائج ان العينة S1تمتلك اعلى قيم العدد الدري الفعال مما يشير الى إحتوائها على نسبة عالية من العناصر ذات عدد درى المرتفع وهو ما يعزز قدرتها على امتصاص الاشعة وفي المقابل تظهر العينة S5 أدنى قيم Zeffمما يفسر أداءها الضعيف في التوهين مقارنة بالبقية. نلاحظ وجود تذبذب طفيف في المنحنيات عند الطاقةMev 0.03 <E< 0.10 Mev دليل على وجود حواف الإمتصاص للعناصر الثقيلة





الشكل (32.4):تغيرات قيم Zeff ضمن مجال الطاقةMeV0.015 إلى MeV0.15

4.تحليل مقارن لأداء عينات زجاج البوروسيليكات والبيروفسكايت مقابل المواد التى تم دراستها في بحثنا كأفضل أداء في الحماية من الإشعاع خاصة في غرف العلاج الإشعاعي:

يعد الرصاص من أهم المواد المعروفة في غرف العلاج الإشعاعي ومع البحث المستمر نحو إستبدال إستخدام الرصاص بمواد حماية أكثر أمانا وأسعار معقولة فقد تم بحث كدراسات سابقة مثل زجاج البوروسيليكات [72] والبيروفسكايت [73]إلى جانب العينات المدروسة ضمن بحثنا كبدائل في بعض الدراسات الحديثة لأدائها الفعال تم تضمين البوروسيليكات والبيروفسكايت في هذه الدراسة لتقييم ومقارنة أداء كل عينة. تم جمع النتائج المعتمدة للبوروسيليكات والبيروفسكايت من دراسات سابقة وتم إستخدامها بغرض المقارنة. يعرض الجدولين أدناه(5.4)و(6.4) *بيانات حول زجاج البوروسيليكات و البيروفسكايت المعتمدة في التدريع.*

المواد	العدد الذري									الكثافة (g/cm^3)
(D1) 48B2O3+5Na2O+ 17BiO3+12SiO2 +18BaO	B	O	Na	Bi	**Si**	Ba	F	Li	Zn	4.11
	5	8	11	83	14	56	-	-	-	
(D2) 47.37BaO+23.68Bi2O3+ 23.68B2O3+ 5.26SiO2	5	8	-	83	14	56	-	-	-	5.8
(D3) 7B2O3+50SiO2+ 38ZnO+5BaO	5	8	-	-	14	56	-	-	30	4.88
(D4) 60B2O3+10SiO2+ 20BaF2+10Li2O	5	8	-	-	14	56	9	3	-	2.74

الجدول (5.4): بيانات زجاج البوروسيليكات المعتمدة في التدريع

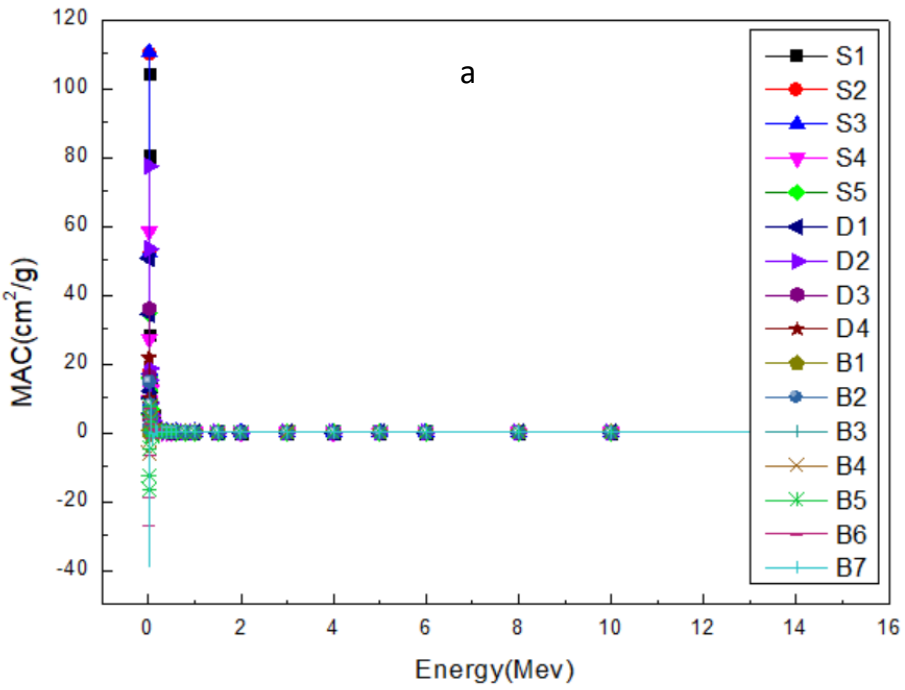
المواد	العدد الذري			الكثافة (g/cm^3)
(B1) Cs2SnI6	Cs	X	I	4.66
	55	50	53	
(B2) Cs2TiI6	55	22	53	4.49
(B3) Cs2ZrI6	55	40	53	4.54
(B4) Cs2HfI6	55	72	53	4.88
(B5)	55	52	53	4.59

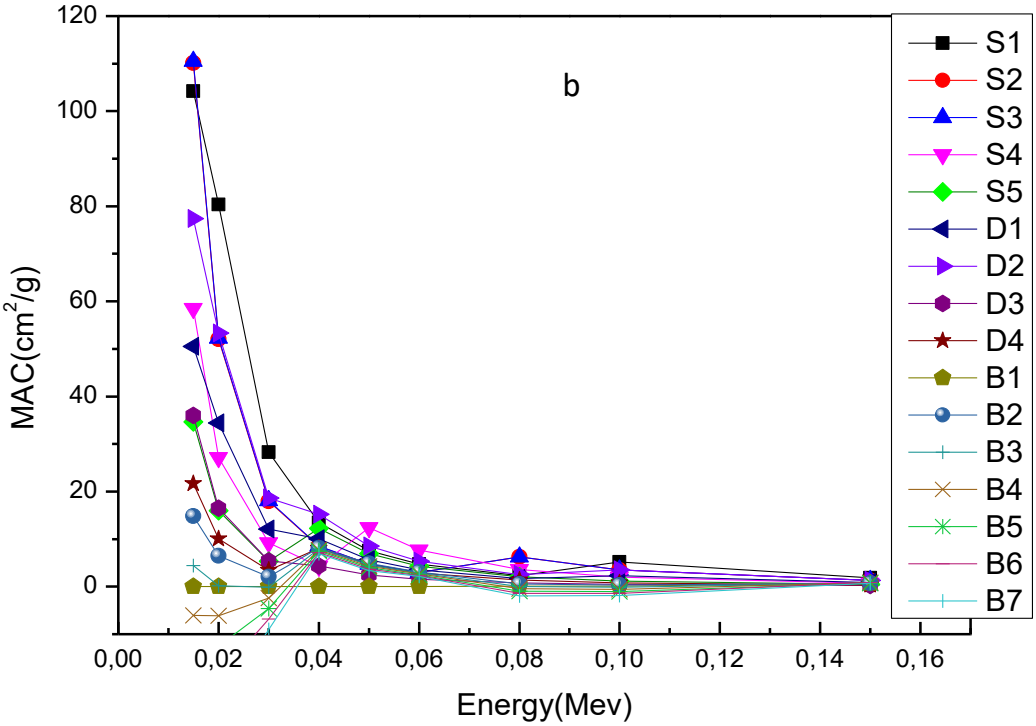
Cs2TeI6				
(B6) Cs2PtI6	55	78	53	5.26
(B7) Cs2PdI6	55	46	53	4.89

الجدول (6.4):بيانات البيروفسكايت المعتمدة في التدريع

1.4.معامل التوهين الكتلي (MAC):

يوضح **الشكل(33.4)** قيم MAC لعينات المواد المدروسة ضمن بحثنا والمصنفةS5.S4.S3.S2.S1بالإضافة إلى بعض عينات البوروسيليكات المصنفة D4،D3،D2،D1.والبيروفسكايت المصنفة B7،B6،B5،B4،B3،B2،B1 تم رسمها جميعا على مدى طاقيMev 0.015>E>0.15 .يوضح الشكل قيم MAC لكل العينات بدلالة الطاقة وبوضوح نلاحظ أن العينةS1 لديها أعلى إمتصاص للكتلة ضمن النطاق بأكمله تقريبا مما يشير إلى قدرة حجب أعلى للإشعاع.

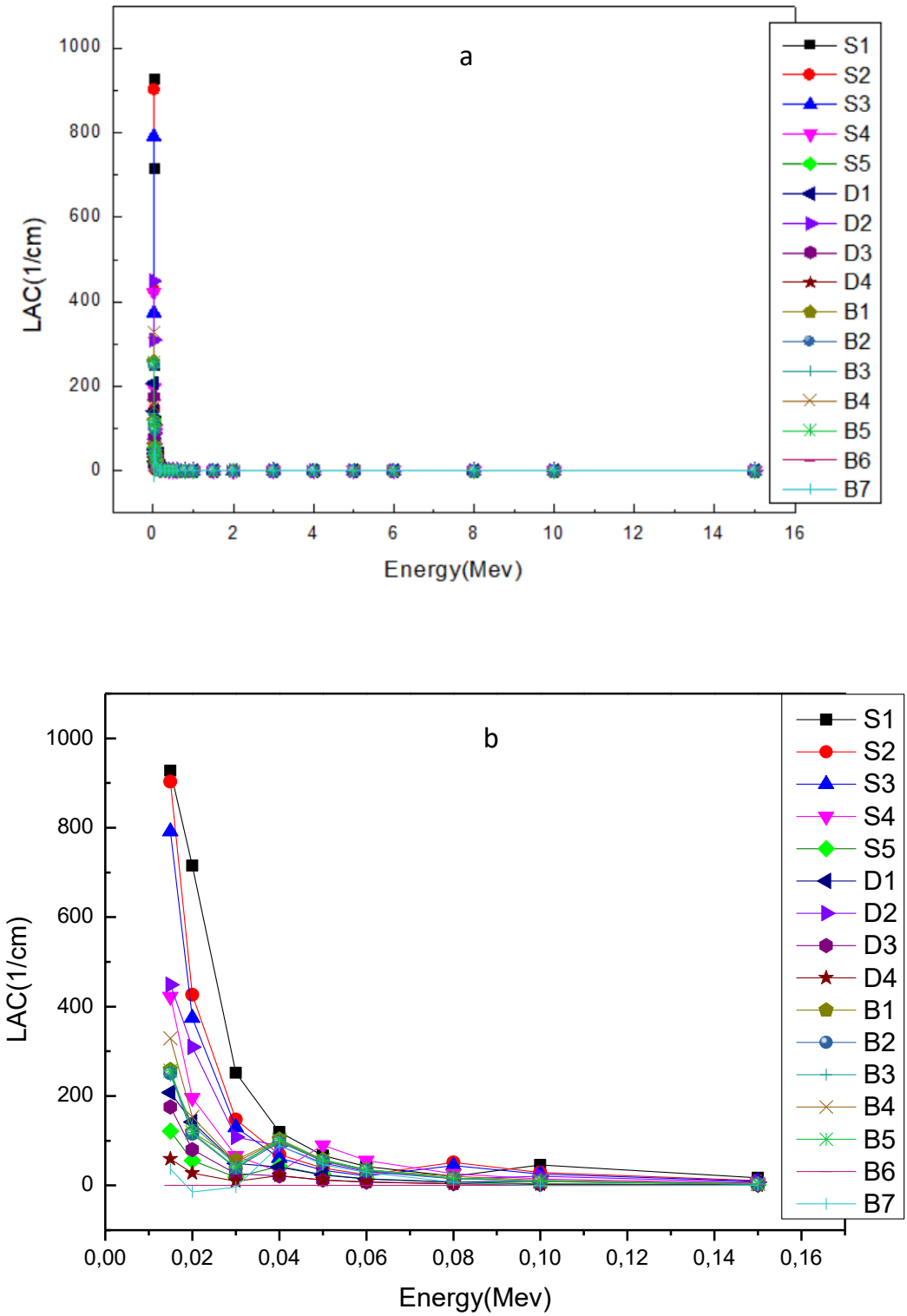




الشكل (33.4):مقارنة تغيرات MAC ضمن مجال الطاقة MeV0.015 إلى MeV0.15 (زجاج بروسيليكات مقابل البروفسكايت مقابل اكاسيد العينات المدروسة)

2.4.معامل التوهين الخطي (LAC):

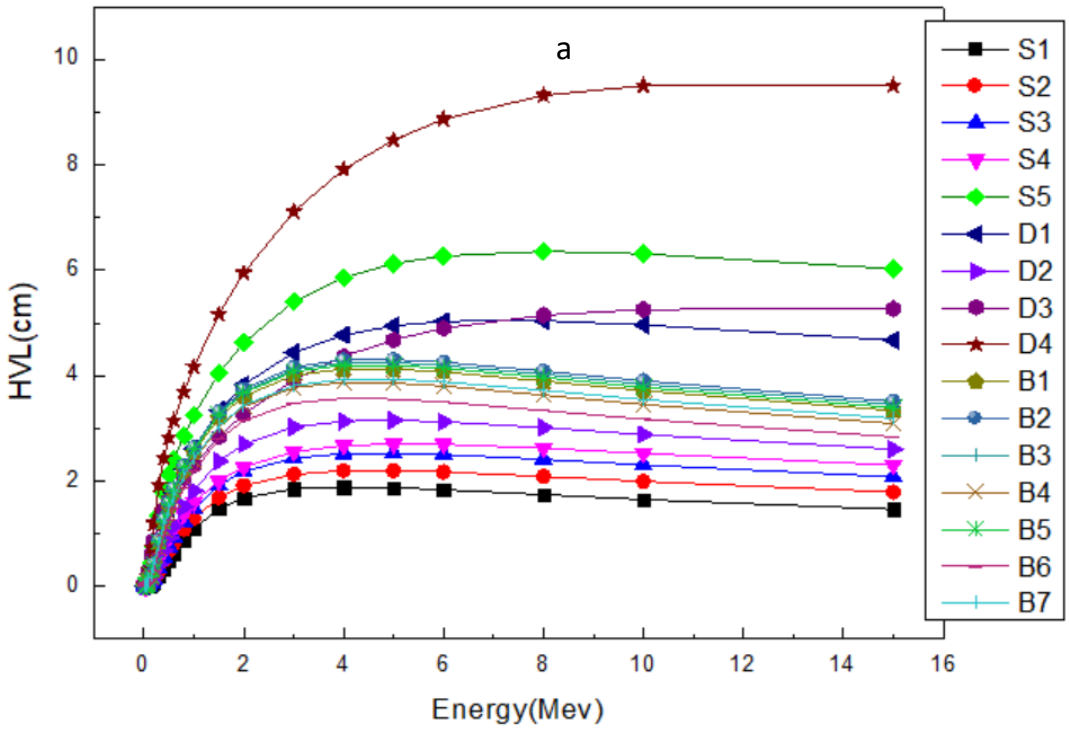
يظهر**الشكل (34.4)** توزيع قيم معامل التوهين الخطي في الشكل سلوكا متسقا مع نتائج MAC حيث سجلت العينة S1 تفوقا ملحوظا لإمتلاكها أعلى قيمة LAC مقارنة ببقية العينات.أثبتت المركبات الاخرى تسجيلات تأخذ قيم مرتفعة تقريبية S2،S3وهذا ما يشير إلى قدرة إمتصاص عالي.

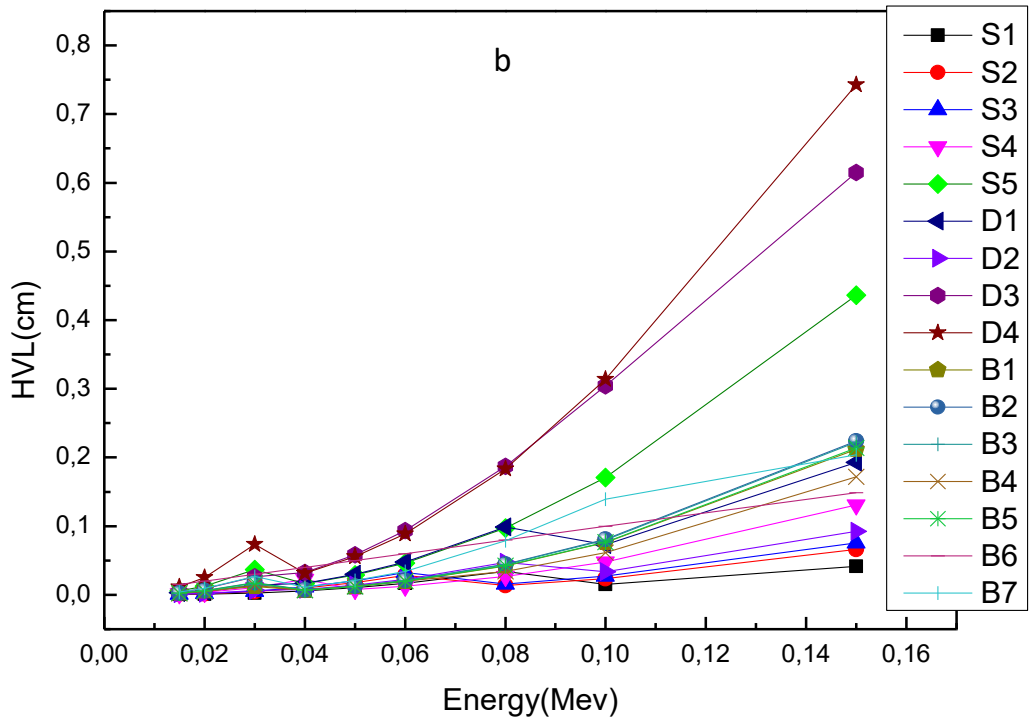


الشكل (34.4):مقارنة تغيرات LAC ضمن مجال الطاقةMeV0.015 إلى MeV0.15 (زجاج بروسيليكات مقابل البروفسكايت مقابل اكاسيد العينات المدروسة)

3.4.طبقة نصف القيمة (HVL):

تظهر النتائج إرتباط عكسيا بين HVL وقدرة المادة على توهين فكلما إنخفضت قيم HVL زادت فعالية المادة في تقليل كثافة الفوتونات كما هو موضح في الشكل **(35.4)** كانت العينة S1أدنى قيمة مقارنة بكل العينات مما يتبين أن لها قدرة توهين أفضل، في حين أن العينة D4تتميز بأعلى قيم HVL وهو ما يعكس قدرة توهين منخفضة نسبيا.

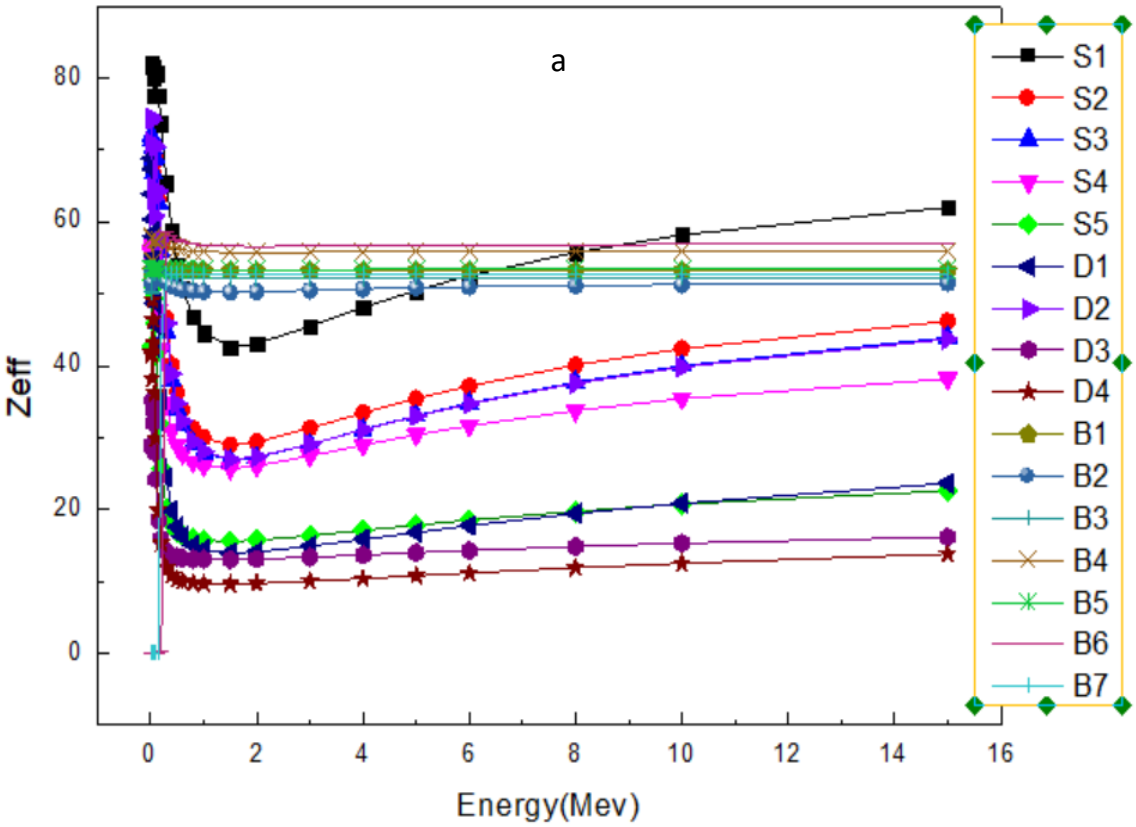


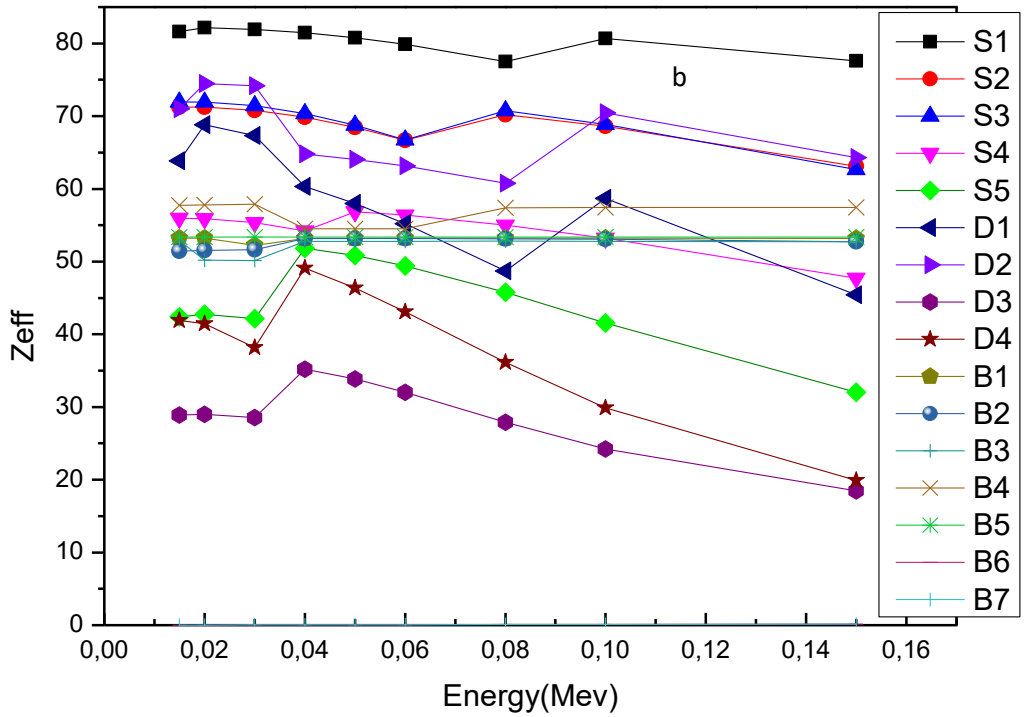


الشكل (35.4):مقارنة تغيرات HVL ضمن مجال الطاقةMeV0.015 إلى MeV0.15 (زجاج بروسيليكات مقابل البيروفسكايت مقابل اكاسيد العينات المدروسة)

4.4.العدد الذري الفعال(Zeff):

يوضح الشكل **(36.4)** العدد الذري الفعال لعينات المواد المدروسة ضمن بحثنا مقابل عينات زجاج البوروسيليكات والبيروفسكايت. من الواضح أن العينةS1 لديها قيمةZeff يليهS2،S3ومع ذلك نلاحظ إنخفاض تدريجي للعينات مع زيادة الطاقة على عكس B7،B6،B5،B4،B3،B2،B1 فنلاحظ إستقرار نسبي لقيم Zeff في كل مجال الطاقة مما يعطي الأفضلية للعينة S1 ضمن إطار بحثنا مع أعلى قيم Zeff


a
Zeff
Energy(Mev)
0
20
40
60
80
0
2
4
6
8
10
12
14
16
S1
S2
S3
S4
S5
D1
D2
D3
D4
B1
B2
B3
B4
B5
B6
B7



الشكل (36.4):مقارنة تغيرات Zeff ضمن مجال الطاقةMeV0.015 إلى MeV0.15 (زجاج بروسيليكات مقابل البروفسكايت مقابل اكاسيد العينات المدروسة)

5.خاتمة:

أثبتت النتائج المعروضة في هذا الفصل أن معلمات التدرع للمواد المدروسة ترتبط إرتباطا وثيقا بطاقة الفوتونات الساقطة، مما يبرز التباين في هيمنة آليات التفاعل التأثير الكهروضوئي وتأثير كومبتون. تشير النتائج التي تم الحصول إلى أن أكسيد البزموثBi2O3 يمتلك خصائص تأهله ليكون بديلا فعالا في تطبيقات التدرع والوقاية من الإشعاع، وتكتسب هذه المعلمات المحسوبة أهمية علمية جديدة لتحقيق من صحتها التجريبية.

الخاتمة العامة

الخاتمة العامة (Conclusion Générale):

في ختام هذه الدراسة يمكننا القول أن البحث في هذا المجال لم يعد مجرد خيار تقني، بل أصبح ضرورة جيدة لمواكبة التطورات المتسارعة في أجهزة العلاج الإشعاعي عالية الطاقة.لقد سمحت لنا هذه الدراسة، من خلال الفصول المتسلسلة، بالوصول إلى الاستنتاجات التالية:

من الناحية النظرية: تبين أن الفهم العميق لفيزياء التفاعلات بين الإشعاع والمادة هو المفتاح الأساسي لتطوير دروع واقية فعالة وأن الوقاية الإشعاعية داخل غرف العلاج تتطلب توازناً دقيقاً بين المعايير القانونية الصارمة والحلول الهندسية المبتكرة.

من حيث المواد: أثبتت المواد المركبة (Composites) المدروسة،(أكسيد ومركبات اخرى) أنها البديل الأمثل للمواد التقليدية؛ فهي لا توفر فقط قدرة عالية على توهين الإشعاع، بل تتميز أيضاً بخصائص هيكلية وتكلفة اقتصادية تجعلها الخيار الأكثر استدامة في بناء المنشآت الطبية الحديثة.

من حيث النمذجة: أكدت النتائج التي تم الحصول عليها عبر المحاكاة برنامجphy-X/PSDتم حساب العديد من المعلمات المهمة، بما في ذلكMAC ، LAC، HVL، Zeff، وغيرها، عبر مجموعة واسعة من طاقة الفوتون من0.015Mevإلى15Mevأظهرت النتائج أن جميع العينات تأثرت بطاقة الفوتون، مما يعكس آليات التفاعل المهيمنة للتأثير الكهروضوئي، وإنتاج كومبون، عبر مناطق الطاقة المنخفضة والوسيطة والمرتفعة. أظهرالعينة S1 أفضل أداء التدريع. هذا هو أساسا بسبب كثافته العالية وحضور أكاسيد معدنية ثقيلة في تكوينه، مما ساعد في زيادة قدرته على التوهين. كانت العينات الأخرى لها عروض مختلفة، لكن S5 عموما لديها ضعف النتائج. بعد ذلك، تم إجراء مقارنة بين الزجاج البورسليكات وبعض مركبات بيروفسكيت خالية من الرصاص. في حين أناكسيد البزموث يؤدي جيدا، خاصة في الطاقات المنخفضة، تؤكد هذه الدراسة إمكانية إستخدامأكسيد بزموث كأكسيد معدني ثقيلكمرشح موثوق به للتطبيقات التدريع الفوتونية.

آفاق البحث(Perspectives) :

إن النتائج التي توصلنا إليها تفتح الباب أمام دراسات مستقبلية أكثر عمقاً، مثل تجريب تركيبات كيميائية جديدة للمواد المركبة لرفع معامل التوهين بشكل أكبر.كما تم البحث في إمكانية استخدام هذه المواد في مجالات أخرى مثل الطب النووي أو التصوير التشخيصي.

ختاماً، نأمل أن تساهم هذه الدراسة في تعزيز معايير السلامة الإشعاعية وتوفير بيئة علاجية آمنة تضمن حماية الطواقم الطبية والمجتمع من مخاطر الإشعاعات المؤينة، مع الحفاظ على أعلى كفاءة علاجية ممكنة

قائمة المراجع:

[1] «Amercan Cancer Society,»

https://www.cancer.org/cancer/acs-medical-content-and-news-staff.html.

[2] «Cancer Care Understanding Radiation,»

https://www.bayhealth.org/community-wellness/blog/2025/september/what-is-radiation-therapy.

[3] ا. س. ح. ه. النصراوي، الأشعة الكهرو مغناطيسية وتأثيرها على الانسان، جامعة بابل، p. 03.

[4] ا. ط. الكناني، الفيزياء النووية و الطبية، دار الفجر للنشر و التوزيع، 2009.

[5] G. K. B. supriya Mallick, Practical Radiation Oncology.Interaction of Radiation with Matter, 26/11/2019.

[6] W. FRANK HERBERT ATTIX.Professor of Medical physics University of Wisconsin Medical School Madison, INTRODUCTION TO RADIOLOGICAL PHYSICS AND RADIATION DOSIMETRY.

[7] D. M. FAROUK, Les intteractions des rayonnements ionisants avec la matiere, 2021/2022.

[8] «Linear Energy Transfer,» ENCYCLOPedia.com
https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/linear-energy-transfer.

[9] P. MANSOUR, «LES RAYONNEMENTS IONISANTS.,» 2024/2025.

[10] «compton Effect,» LibreTexts
https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_(Materials_Science)/Electronic_Properties/Compton_Effect.

[11] «Photoelectric Experiment,» Javalab, 17/01/2021.
https://javalab.org/en/photoelectric_effect_2_en/.

[12] «Compton Effect,» الجامعة المستنصرية
https://www.uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/9/9_2018_12_27!07_28_15_PM.pdf.

[13] «Rayleigh Scattering,» ScienceDirect

https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/rayleigh-scattering.

[14] H. E. R. C. JOHNS, THE PHYSICS OF RADIOLOGY.

[15] «photonuclear Reaction,» ScienceDirect,

https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/photonuclear-reaction.

[16] ا. ح. ك. س. ب. أ. ح. ابراهيم، التأثير البيولوجي للاشعة المؤينة، العراق، 2023.

«External beam radiation therapy,» City of Hope, [17]

https://www.cancercenter.com/treatment-options/radiation-therapy/external-beam-radiation.

B. D. Gaurav, «How Radiotherapy Works:A Step-by-Step Explanation,» meDanta, 17 03 2025. [18]
https://www.medanta.org/patient-education-blog/how-radiotherapy-works-a-step-by-step-explanation.

«ALARAوتقليل التعرض.الحماية من الاشعاع ،فهم مبدأ,» fuji Electric, [19]
https://www.fujielectric.fr/ar/%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%AF%D9%88%D9%86%D8%A9/%D8%A7%D9%84%D8%AD%D9%85%D8%A7%D9%8A%D8%A9-%D9%85%D9%86-%D8%A7%D9%84%D8%A7%D8%B4%D8%B9%D8%A7%D8%B9-%D9%81%D9%87%D9%85-%D9%85%D8%A8%D8%AF%D8%A7-alara-%D8%AA%D9%82%D9%84%D9%8A%D9%84-%.

P. o. r. protection, 25 06 2019. [20]

https://www.bfs.de/EN/topics/ion/radiation-protection/introduction/principles/principles.html.

A. V. T. S. Mercuro, «Attenuation of X-Rays By Matter,» 01 9 2005. [21]
https://www.spectroscopyonline.com/view/tutorial-attenuation-x-rays-matter.

H. knipe, «Linear attenuation coefficient,» Radiopaedia, 28 08 2025. [22]
https://radiopaedia.org/articles/linear-attenuation-coefficient.

«X-Ray Mass Attenuation Coefficients,» [23]
https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/chap2.html.

أ .م .ج .د/محمد شحادة الدغمة ,«الفيزياء النووية ,الفيزياء الحديثة,علم الفيزياء,,» 12 12 2021. [24]
https://ns1.almerja.com/more.php?idm=161738.

«Tenth -value layer (TVL) definition,» [25]

https://www.lawinsider.com/dictionary/tenth-value-layer-tvl.

«Invrerse Square Law,» [26]

https://openoregon.pressbooks.pub/radsafety130/chapter/inverse-square-law/.

«Absorbed, Equivalent, and Effective Dose,» [27]
https://icrpaedia.org/Absorbed,_Equivalent,_and_Effective_Dose.

«متوسط الوزن الجزيئي,» [28]
https://www.marefa.org/%D9%88%D8%B2%D9%86_%D8%AC%D8%B2%D9%8A%D8%A6%D9%8A_%D9%85%D8%AA%D9%88%D8%B3%D8%B7_%D8%B9%D8%AF%D8%AF%D9%8A.

A.H, «Determination of atomic cross-sections and effective atomic numbers for some alloys,» vol. 27, n° %114, pp. 1333-1343, 09 2000. [29]

K. k.Chawla, Composite Materials. [30]

M. Haydoh, «Thickness of Lead for Radiation Protection,» 7 11 2024. [31]
https://raybloc.com/thickness-of-lead-for-radiation-protection/.

B. k. .. A. .. Nergis, «Bismuth oxide nanoparticlles/waterborn polyurethane-coated fabrics for iinizing radiation protion,» *Journal of Coatings Technology and Research,* vol. 21, pp. 969-978, 08/01/2024. [32]

«Aluminum Oxide vs.Tantalum Pentoxiide:Trade-Offs in Energy Density and Reliability,» 9 07 2025. [33]

https://eureka.patsnap.com/article/aluminum-oxide-vs-tantalum-pentoxide-trade-offs-in-energy-density-and-reliability.

Ç. Mustafa, «Performance of PMMA/Ta2O5 Combosites as Medical Radiation Shielding: WinXCon and MCNP6 Studies,» *JOURNAL OF ADVANCEDRESEARCH IN NATURAL AND APPLIENCES,* vol. 10, n° %14, pp. 913-921, 12/2024. [34]

https://share.google/UwGWxGOLueuz6kJu3. [35]

"سبيكة التغستن مقابل الرصاص:أيهما أفضل كدرع اشعاعي،" 13 01 2022. [36]

http://ar.metal-tungsten.com/info/tungsten-alloy-vs-lead--for-radiation-shield-66357978.html

https://share.google/ibTvDHwdgJ6bZ9RbJ. [37]

A. M. Onaizi, «Radiation-shielding concrete: A review of materials, performance, and the impact of radiation on concrete properties,» vol. 97, 15 10 2024. [38]

A. T. C. V. William Cornelius Hall, «CEMENT MATRIX RADIATION SHIELDING COM-POSITIONS CONTAINING CALCIUM COMPOUNDS,» *United States Patent Office,* n° %1657494, 1971/01/26. [39]

C. Z. a. Y. Chen, «The effect of nano-SiO2 on concrete properties,» vol. 8, n° %1562-572, 2019. [40]

B. A. a. A. KARABULUT, «Development and Production of High Heat Resistant Heavy Concrete Shielding Materials for Neutron and Gamma Radiation,» *Eastern Anatolian Journal of Science,* vol. 4, n° %111, pp. 24-30, 2018. [41]

. panelM.H. Kharita a, The effect of the initial water to cement ratio on shielding properties of ordinary concrete, vol. 52, Progress in Nuclear Energy, 2010, pp. 491-493. [42]

M. A. E.-N. ،. Elsafi, «Understanding the Effect of Introducing Micro- and Nanoparticle Bismuth Oxide (Bi2O3) on the Gamma Ray Shielding Performance of Novel Concrete,» *materials,* p. 14, 2021. [43]

https://doi.org/10.3390/ma14216487

M. S. A. e. a. Al-Buriahi, «ZnO– Bi2O3 nanopowders: Fabrication, structural, optical, and radiation shielding properties,» vol. 48, pp. 3464-3472, 1/02/2022. [44]

https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.10.124

«Flexible Lightweight Radiation Shielding (LAR-TOPS-354)». [45]

https://ntts-prod.s3.amazonaws.com/t2p/prod/t2media/tops/pdf/LAR-TOPS-354.pdf?utm_source=chatgpt.com

X. Z. e. autres, «Ta2O5 Nanocrystals Strengthened Mechanical, Magnetic, and Radiation Shielding Properties of Heavy Metal Oxide Glass,» 2021/07/26. [46]

https://www.mdpi.com/1420-3049/26/15/4494

«Ionizing Radiation Shielding Properties of Tantalum Pentoxide Doped High-Density Polyethylene Composites: A Theoretical Study,» vol. 8, n° %13, 31/12/2023. [47]

M. M. M. e. autres, «USING NANO TUNGSTEN OXIDE POLYMER COMPOSITE AS A GAMMA RADIATION SHIELDING». [48]

https://djs.journals.ekb.eg/article_195252.html

"Polylactic acid tungsten trioxide reinforced composites: A study of their thermal, optical, and gamma radiation attenuation performance," vol. 205, 04/2023. [49]

https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110705

"Transmission factors, mechanical, and gamma ray attenuation properties of barium-phosphate-tungsten glasses: Incorporation impact of WO3," vol. 267, 10/2022. [50]

https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169643

H. A. T. e. autres, «Optical, thermal and gamma ray attenuation characteristics of tungsten oxide modified: B2O3–SrCO3–TeO2–ZnO glass series,» vol. 56, pp. 247-256, 01/2024. [51]

https://doi.org/10.1016/j.net.2023.09.032

. Sitendu Mandal , «Effect of gamma ray irradiation on optical and luminescence properties of CeO2 doped bismuth glass,» vol. 49, 15/07/2023. [52]

https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.04.231

S. M. e. autres, «Fabricated CeO2/ZrO2 nanocomposite to improve thermal resistance, mechanical characteristics, microstructure and gamma radiation shielding of OPC composite cement pastes,» vol. 392, 15/08/2023. [53]

https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131971

A. M. O. e. autres, "Radiation-shielding concrete: A review of materials, performance,," 15/11/2024. [54]

https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110800

A. A. O. a. S. M. Shalbi, «An Alternative Radiation Shielding Material Based on Barium-Sulphate (BaSO4)-Modified Fly Ash Geopolymers,» vol. 8, n° %14, 07/04/2022. [55]

https://doi.org/10.3390/gels8040227

Harinate Mungpayaban, "X-ray protective materials from barium sulfate/amorphous cellulose/natural rubber composites," vol. 194, 05/2022. [56]

https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110011

l. e. autres, "Influence of SiO2 on the synthesis, structural and radiation attenuation properties of apatite wollastonite ceramics," vol. 52, 04/2026. [57]

https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2026.01.381

A. M. E.-K. e. autres, «Experimental and FLUKA simulation study of CdO /Al2O3cement waste marble composites for nuclear radiation shielding,» 08/10/2025. [58]

https://www.nature.com/articles/s41598-025-21061-y

M. W. M. A. M. , "CaO-enhanced polyester for safety: experimental study on fabrication, characterization, and gamma-ray attenuation". [59]

https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/ract-2023-0265/html

R. U. ‹. Marashdeh, «Impact of CaO, SiO2, and Al2O3 on the Thermal Stability, Structural Integrity, and Gamma Radiation Protection Efficiency of Concretes Blended with Peanut Shell Ash,» 11/2025. [60]

https://www.researchgate.net/publication/397546230_Impact_of_CaO_SiO2_and_Al2O3_on_the_Thermal_Stability_Structural_Integrity_and_Gamma_Radiation_Protection_Efficiency_of_Concretes_Blended_with_Peanut_Shell_Ash

M. K. Y. AlNassar, «The effect of the initial water to cement ratio on shielding properties of ordinary concrete,» vol. 52, pp. 491-493, 7/2010. [61]

https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2009.11.005

«The MCNP Code,» 2025/09/18. [62]
https://mcnp.lanl.gov/#:~:text=The%20application%20areas%20that%20use.

«WinXCom1.0,» [63]

https://share.google/nHGsQ8bFJptyBa9Oc.

«fluka,» [64]

https://fluka.cern/download/latest-fluka-release.

M. J.Apostolakis, Geometry and physics of the Geant4 toolkit for high and medium energy applications, vol. 78, Radiation Physics and Chemistry, 2009/10, pp. 859-873. [65]

J. A. S. Agostinelli, GEANT4 a simulation toolkit, 2003. [66]

O. f. E. C.-O. a. D. -. N. E. Agency, Penelope-2006: a code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport, France, 2006. [67]

F. Salvat, The penelope code system. Specific features and recent improvements, 2015. [68]

H. F. al. , A comparative analysis of GEANT4, MCNP6 and FLUKA on proton-induced gamma-ray simulation, 06/2025. [69]

S. al., Geant4—a simulation toolkit, 07/2003. [70]

E. Ş. e. al., Phy-X / PSD: Development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry, 1/07/2003. [71]

L. I. M. Hocine, «A comparative study on nuclear radiation shielding features of Borosilicate Glass systems,» University of Kasdi Merbah Ouargla, 2024/2025. [72]

K. H. M. Hocine, «Theoretical investigation of gamma shielding of new Perovskites,» KASDI MERBAH UNIVERSITY OUARGLA, 06/06/2024. [73]