مجلة الدراسات التربوية والعلمية - كلية التربية - الجامعة العراقية
العدد السابع والعشرون - المجلد التاسع - علوم الفيزياء - نيسان 2026 م
doi.org/10.52866/esj.2026.09.27.05

التحديد التجريبي لمعاملات توهين وتشتت اشعة كاما في خرسانة مدعمة بـ (Al_2O_3)

ماردين جهاد احمد محمد[1*] ، صباح محمود امان الله[2] ، عبدالسميع فوزي عبد العزيز[3]
1. قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة تكريت، تكريت، العراق.
2. قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة كركوك، كركوك، العراق.
3. قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة تكريت، تكريت، العراق.
*البحث مستل من اطروحة دكتوراه الباحث الاول
mardin.jihad@st.tu.edu

مستخلص:
تم تحضير عينات من السمنت المدعم بمسحوق من اوكسيد الالمنيوم (Al_2O_3) بأستخدام طريقة القالب المفتوح وبدرجة حرارة الغرفة ان القالب المستخدم دائري الشكل نصف قطره cm (1) وارتفاع cm (0.5) وبحجم ثابت cm^3 (1.57)، إذ تم دراسة تأثير اضافة اوكسيد الالمنيوم (Al_2O_3) بكسور وزنية مختلفة wt٪(30,50, 10) على معاملات التوهين لأشعة كاما.حيث تم استخدام منظومة كاشف ايوديد الصوديوم المطعم بالثاليوم NaI (Th) ذات بلورة ابعادها (''1.5×''1.5) لتحليل أطياف اشعة كاما المنبعثة من المصادر المشعة النقطية وهي الامريشيوم (^{241}Am) بطاقة (60) keV وبفعالية اشعاعية مقدارها (74) KBq و السيزيوم (^{137}Cs) بطاقة (662) keV وبفعالية اشعاعية مقدارها (400) KBq و الراديوم (^{226}Ra) عند الطاقات (186, 242, 295, 352, 609) keV وبفعالية اشعاعية مقدارها (74) KBq ، وان المسافة الفاصلة بين المصدر المشع والكاشف هي (15) cm، حيث تم وضع العينة المراد إيجاد معاملات التوهين بينهما، وان زمن التجميع الطيفي تم تثبيته عند (900) sec لجميع الاطياف التي تم ايجادها، حيث تم اعتماد شدة فوتونات اشعة كاما لصافي العدد للقمم الضوئية (Net Area of Photopeak) في الطيف الناتج لاشعة كاما، ومن خلالها تم تحديد معاملا التوهين الخطي والكتلي ومعدل المسار الحر، وان افضل نتيجة تم الحصول هي للعينة (S_3) ، وهذه النتيجة والنتائج الاخر لباقي العينات تؤكد مدى امكانية استخدام هذه المواد كدروع واقية من الاشعاع.
الكلمات المفتاحية: خرسانة، أوكسيد الالمنيوم، اشعة كاما، معاملات التوهين.

Experimental determination of gamma ray attenuation and scattering coefficients in concrete reinforced with Al_2O_3

Mardeen Jihad Ahmed Mohammad[1*] , Sabah Mahmoud Aman Allah,[2]
abdulsamee Fawzi AbdulAziz[3]
1.Department of Physics, College of Science, Tikrit University, Tikrit, Iraq.
2.Department of Physics, College of education for pure science, University of Kirkuk, Kirkuk, Iraq.
3.Department of Physics, College of Science, Tikrit University, Tikrit, Iraq.
E-mail: [1*] : mardin.jihad@st.tu.edu

ABSTRACT :
Cement samples supplemented with aluminium oxide powder (Al_2O_3) were fabricated via the manual open-mold technique at ambient temperature. The mould had a circular configuration with a radius of 1 cm, a height of 0.5 cm, and a constant volume of 1.57 cm^3. The impact of incorporating aluminium oxide (Al_2O_3) at several weight fractions (30, 10, 50)%wt on the attenuation coefficients of gamma rays was examined. The thallium-doped sodium iodide detector system NaI(Th), with crystal dimensions of (1.5"×1.5"), was employed to analyse the gamma-ray spectra emitted from point radioactive sources: americium (^{241}Am) at (60) keV with a radiation efficiency of (74) KBq, caesium (^{137}Cs) at (662) keV with a radiation efficiency of (400) KBq, and radium (^{226}Ra) at energies of (186, 242, 295, 352, 609) keV with a radiation efficiency of (74) KBq. The distance between the radioactive source and the detector was (15) cm, with the sample positioned between them to determine the attenuation coefficients, and the spectral collection time was set at (900) seconds. For all identified spectra, the intensity of gamma ray photons was utilised to ascertain the net number of photopeaks (Net Area of Photopeak) in the resultant gamma ray spectrum. Consequently, the linear and mass attenuation coefficients, as well as the mean free path, were calculated, with the optimal outcome achieved for sample (S_3). This result, along with those of the other samples, substantiates the potential of these materials as effective radiation shields.
Key words: Concrete, aluminum oxide, gamma rays, attenuation coefficients.

1- المقدمة

في ظل التوسع المتزايد في استخدام التطبيقات النووية والطبية والصناعية التي تعتمد على الإشعاع المؤين، أصبحت الحاجة ملحّة لتطوير مواد إنشائية تتمتع بقدرة فعالة على الحماية من الإشعاع، لا سيما أشعة غاما والنيوترونات. تعد الخرسانة من المواد الأساسية المستخدمة في إنشاء الدروع الإشعاعية، إلا أن تحسين كفاءتها الإشعاعية يتطلب تعزيز تركيبها بمواد مضافة ذات عدد ذري عالٍ وكثافة مرتفعة [1,2].

من بين المواد المقترحة، يحتل أكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) مكانة بارزة نظرًا لخصائصه الفيزيائية والكيميائية المستقرة، وكثافته التي تبلغ حوالي g/cm^3 (3.95) ، إلى جانب مقاومته للحرارة والتآكل، مما يجعله مرشحًا فعالًا لتحسين أداء الخرسانة الواقية من الإشعاع [3-5]. وقد بينت دراسات متعددة أن إدخال (Al_2O_3) بنسب وزنية معينة يؤدي إلى زيادة معامل التوهين الخطي وتقليل سمك نصف القيمة، مما يسهم في تقليل نفاذية أشعة غاما داخل الهياكل الخرسانية [6,7].

يمتاز (Al_2O_3) أيضًا بأنه بديل آمن بيئيًا وصحيًا للرصاص، والذي لا يزال يُستخدم على نطاق واسع رغم أضراره البيئية والسمية [8,9]. وبالإضافة إلى ذلك، فإن توظيف (Al_2O_3) في شكله النانوي يساهم في تحسين التوزيع الداخلي داخل مصفوفة الخرسانة، مما يؤدي إلى خصائص إشعاعية وميكانيكية أفضل [10,11].

في السياق نفسه، أظهرت مقارنة بين أداء (Al_2O_3)وأكاسيد أخرى مثل (Fe_2O_3) و(Bi_2O_3) و(NiO) أن (Al_2O_3)يحتفظ بخصائص ميكانيكية مناسبة مع تحسين التوهين الإشعاعي، خاصة عند دمجه في نسب مناسبة تقل عن 50٪ من الوزن الكلي للمزيج [12-15].

وبناءً على ما سبق، تهدف هذه الدراسة إلى تقييم الأداء الإشعاعي للخرسانة المسلحة بجسيمات أكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) المضافة بنسب وزنية مختلفة (10,30,50)٪، وذلك من خلال حساب معامل التوهين الخطي (L.A.C.) والكتلي (M.A.C.)، بالإضافة إلى متوسط المسار الحر (M.F.P.) باستخدام تقنيات تجريبية دقيقة. كما تم مقارنة النتائج التجريبية مع القيم النظرية المستخرجة من قاعدة بيانات (XCOM) التابعة للهيئة الدولية للطاقة الذرية (I.A.E.A.)، لتحديد مدى فعالية (Al_2O_3) كمادة محسنة لأداء الخرسانة في الحماية من أشعة ;اما. تسهم هذه المقارنة في تقييم موثوقية البيانات النظرية وتعزيز فهم آلية التوهين الإشعاعي في الخرسانة المعدلة، وهو ما يعد ذا أهمية كبيرة في التطبيقات النووية والطبية والصناعية.

2 - الجانب النظري

يمثل معامل التوهين الخطي عدد الفوتونات المزاحة او المحجوبة من الحزمة لكل وحدة مسافة ويقاس هذا المعامل بوحدة (cm^{-1})، والذي يمكن ايجاده من خلال معادلة بير-لمبرت[14] :

$$I(x) = I_0 e^{-\mu_\ell x} \qquad (1)$$

حيث I هي شدة الشعاع الموهن؛ و I_0 هي شدة الشعاع الأصلية؛ و x هي سمك المادة الموهنة (cm)؛ و μ_l هي معاملات التوهين الخطي (cm^{-1}).

ويعد من اهم المعاملات التي تبين عملية الاختراق للدروع من قبل أشعة كاما، ويعتمد على

طاقة الفوتونات الساقطة وعلى العدد الذري أو العدد الذري المؤثر لمادة الهدف الساقط عليه.

كما ان معامل التوهين الكتلي (μ_m) يمثل معدل تفاعلات الفوتونات ضمن وحدة واحدة من الكتلة لكل وحدة مساحة (cm^2/g) ، والذي يعطى بالمعادلة التالية[13]:

$$\mu_m = \frac{\mu_l}{\rho} = \frac{Ln\frac{I_0}{I}}{\rho x} \qquad (2)$$

حيث ρ هي كثافة المادة؛ I هي شدة الشعاع الموهن؛ وI_0 هي شدة الشعاع الأصلية؛ و x هي سمك المادة الموهنة (cm).

كما أن المسافة بين تفاعلين متتاليين لحركة جسيم واحد عبر العينة المعطاة قبل التفاعل مع المادة تسمى معدل المسار الحر (m.f.p.)، ويتم ايجادها من خلال المعادلة التالية[12]:

$$\lambda(cm) = \frac{\int_0^\infty x.e^{\mu_l x}dx}{\int_0^\infty e^{\mu_l x}dx} = \frac{1}{\mu_l} \qquad (3)$$

حيث λ هو معدل المسار الحر بوحدة (cm)؛ و (μ_l) هو معامل التوهين الخطي (cm^{-1}).

كذلك تم مقارنة نتائج الدراسة الحالية مع قاعدة بيانات (XCOM) التابعة للهيئة الدولية للطاقة الذرية (I.A.E.A.) حيث تم استخدام المعادلة التالية لإيجاد نسبة الاختلاف بي نتائج الدراسة الحالية ونتائج قاعدة بيانات (XCOM) التابعة للهيئة الدولية للطاقة الذرية (I.A.E.A)[13]:

$$\%deviation\ (\Delta\ \%) = \mu\ (WINXCOM) - \mu\ (Exp)\ \mu\ (WINXCOM) \times 100(0.01) \qquad (4)$$

(Δ)٪ النسبة المئوية للاختلاف؛ μ_m (ICRU-44) معامل التوهين الكتلي لتقرير(WINXCOM)؛ μ_m (Exp) معامل التوهين الكتلي للدراسة الحالية.

3 - طريقة العمل

3-1 تحضير العينات

تم في هذا البحث دراسة تأثير إضافة أوكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) على خصائص التوهين لمادة السمنت. وقد تم تحضير العينات باستخدام طريقة الصب في القالب المفتوح وفق الخطوات التالية، تم استخدام سمنت بورتلاندي عراقي المنشأ عادي كمادة أساس والذي تبلغ كثافته (2.4 g/cm^3)، وتمت إضافة نسب وزنية مختلفة من مسحوق أوكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) المنتج من قبل شركة (Sigma Aldrich, U.S.A.) والذي تبلغ كثافته (3.95 g/cm^3) إلى الخلطة. تم تحديد النسب على النحو التالي wt٪(0,10,30,50)، حيث تم استخدام ميزان حساس بدقة (0.01)mg لوزن العينات وهو من نوع (Adapter) ياباني المنشأ لوزن المادة الاساسية والمادة الداعمة حيث تم خلط السمنت مع أوكسيد الألمنيوم بشكل جاف أولًا لضمان التوزيع المتجانس للمادة المضافة، ثم أُضيفت كمية محسوبة من الماء المقطر تدريجيًا للوصول إلى القوام المناسب للتشكيل. تم استخدام خلاط ميكانيكي محمول من نوع (P.L.A.) صيني المنشأ بسرعة دوران (250)r.p.m لضمان تجانس الخلطة لمدة تتراوح بين min(5-10). تم صب الخلطة في قوالب مفتوحة مصنوعة من البلاستيك دائرية نصف قطرها cm(1) وارتفاعها cm(0.5) وبحجم ثابت (1.57 cm^3) تقريبا، والتي تم تنظيفها مسبقاً لتسهيل عملية فصل العينات ومنع التصاقها بالبلاستيك، تم تثبيت القوالب على سطح مستوٍ لتجنب الفراغات والتشوهات. بعد الصب، تركت

العينات في الهواء الطلق لمدة (24) h لتجف أوليًا، ثم تم إخضاعها لعملية المعالجة الرطبة عن طريق الغمر في ماء خال من الشوائب لمدة (7)day لضمان إتمام تفاعل الإماهة واكتساب الخواص الميكانيكية المطلوبة. بعد اكتمال فترة المعالجة، تم إخراج العينات من الماء وتجفيفها في درجة حرارة الغرفة لمدة (24) h ، ثم تم قياس أبعادها بدقة وتسجيل الكتلة باستخدام نفس الميزان إلكتروني المذكور انفا. وتم حساب كتلة العينات باستخدام المعادلة التالية[11]:

$$m_s = \rho_{sample} * V_s \qquad (5)$$

حيث ان ρ_{sample} كثافة العينة؛ m_s كتلة العينة؛ Vs حجم العينة.

اذ تم تحضير (4) عينات وترميزها بالعينات من (S_0) إلى (S_3)، وقد تم إعداد هذه العينات لمحاكاة الدروع الواقية من الاشعاع، وكل عينة تحتوي على كميات متفاوتة من أوكسيد الالمنيوم (AL_2O_3) والسمنت، ويوضح الجدول (1) النسبة المئوية أوكسيد الالمنيوم (AL_2O_3) وكذلك الكثافة في كل عينة.

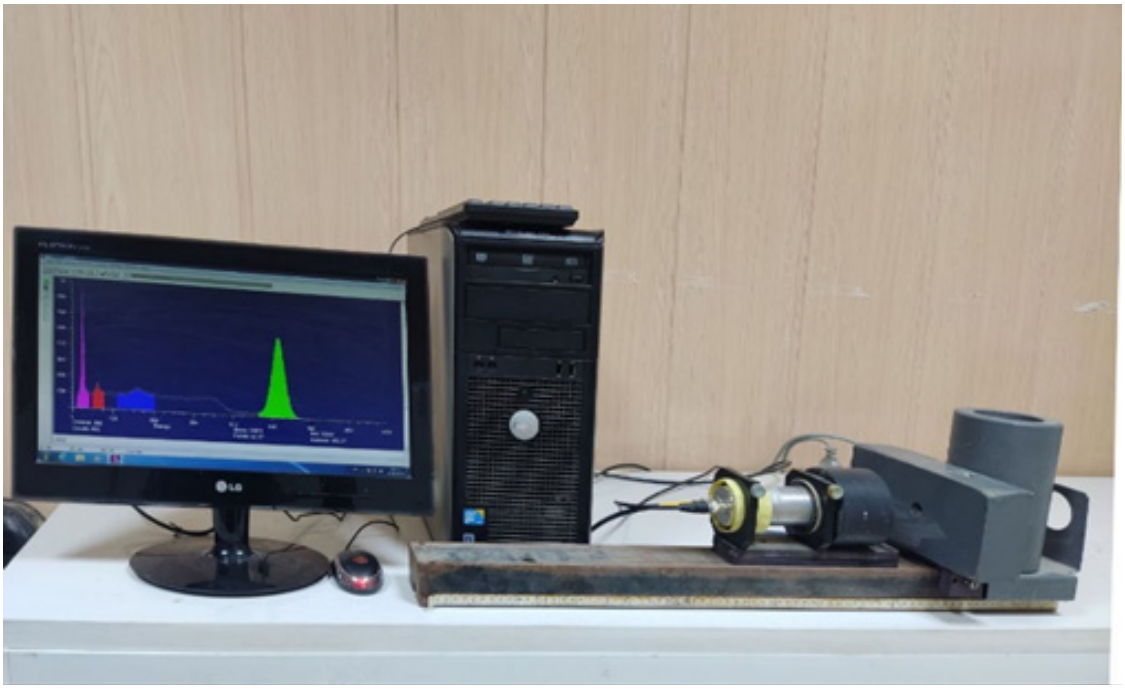
الجدول (1): النسبة المئوية لأوكسيد الالمنيوم (AL_2O_3) في كل عينة.

رمز العينة	المادة الاساس	النسبة المئوية للمادة الاساس (٪)	المادة الداعمة	النسبة المئوية للمادة الداعمة (٪)	كتلة الخليط (g)	كثافة الخليط (g/cm^3)
S_0	Cement	100	AL_2O_3	0	3.768	2.4
S_1	Cement	90	AL_2O_3	10	4.019	2.56
S_2	Cement	70	AL_2O_3	30	4.521	2.88
S_3	Cement	50	AL_2O_3	50	5.024	3.2

3-2 القياسات

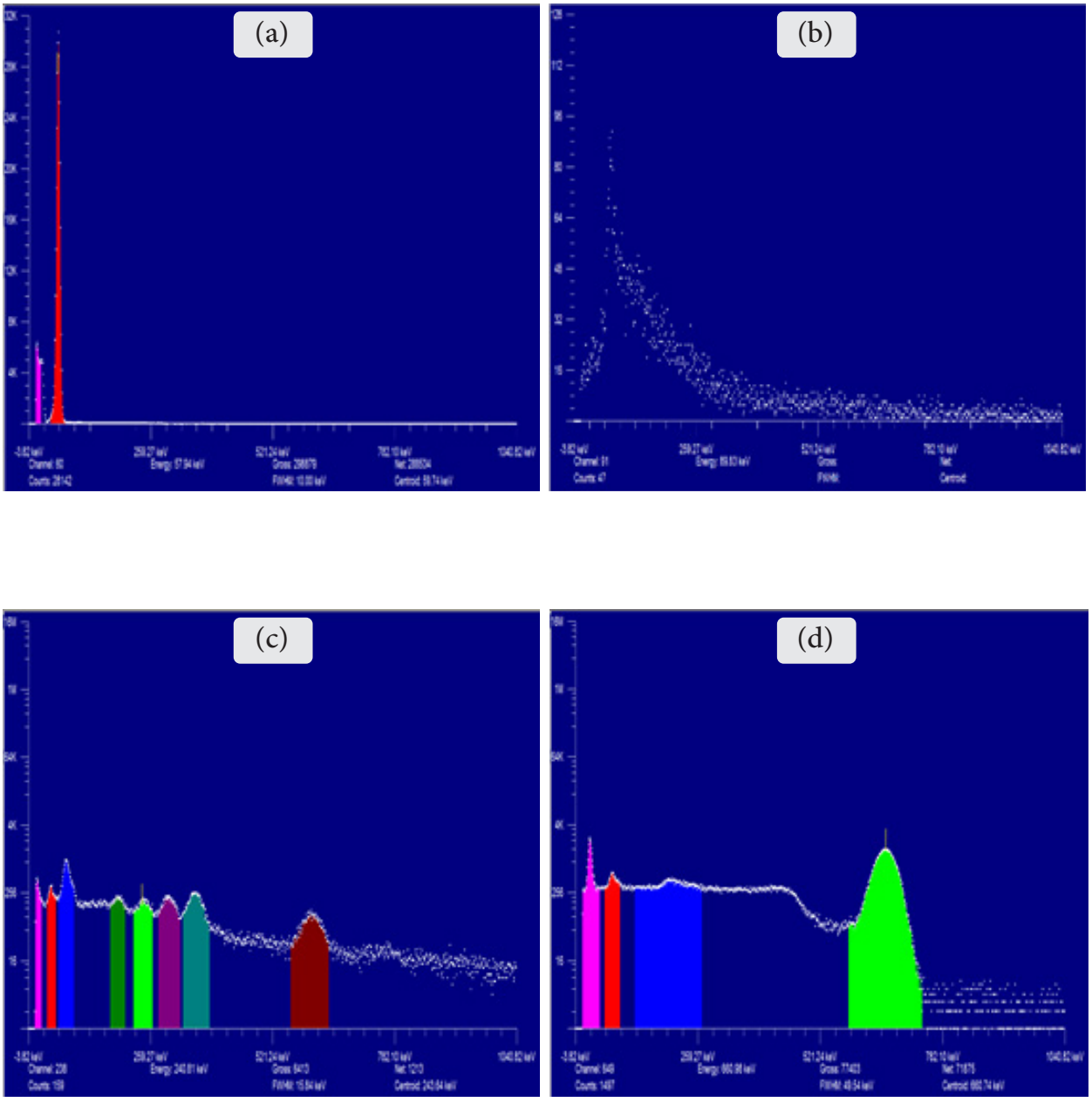
لتحليل أطياف اشعة كاما المنبعثة من المصادر المشعة النقطية والمستخدمة في هذا البحث وهي الامريشيوم (^{241}Am) بطاقة (60) keV وبفعالية اشعاعية مقدارها (74) KBq و السيزيوم (^{137}Cs) بطاقة (662) keV وبفعالية اشعاعية مقدارها (400) KBq و الراديوم (^{226}Ra) عند الطاقات (186, 242, 295, 352, 609) keV وبفعالية اشعاعية مقدارها (74) KBq ، تم استخدام منظومة كاشف ايوديد الصوديوم المطعم بالثاليوم NaI (TI) ، والموضحة بالشكل (1)، ونظام قياس أشعة كاما المسمى بمطياف الحاسوب المتكامل (I.C.S.). ويتم تشغيل النظام بواسطة الحاسوب وفقًا لبرنامج معد لهذا الغرض، ويحتوي النظام على مضخم أولي ومضخم رئيسي مزود بكاشف ايوديد الصوديوم المطعم بالثاليوم NaI (TI). ومحلل متعدد القنوات، ويرتبط هذا النظام بجهاز حاسوب لدقة تشغيله وقراءة قياساته وتحليل النتائج. وقد تم الحصول

على شعاع ضيق من أشعة كاما باستخدام مسدد رصاص مستطيل الشكل cm(20×10×5)، يمر من خلاله الأشعة القادمة من المصدر المشع. يبلغ قطر الثقب mm(15). وتم تحديد معاملات التوهين للعينات المحضرة للطاقات keV(662 – 60) باستخدام قانون بير–لامبرت. تم إكمال قيمة التحديد باستخدام كاشف NaI (Tl) لقياس طيف أشعة جاما. تم حماية الكاشف بغطاء من الرصاص لتقليل إشعاع التشتت القادم من مصدر الإشعاع مباشرة. تم قياس التوهين باستخدام كاشف NaI (Tl). تم وضع العينات بين مصدر الإشعاع والكاشف. تم ضبط وقت التراكم على sec(900). حيث تم قياس شدة فوتونات اشعة كاما لصافي العدد للقمم الضوئية (Net Area of Photope-ak) في الطيف الناتج لاشعة كاما والعرض الكلي عند منتصف القمة (FWHM) باستخدام برنامج (U.S.X. P.C.I).

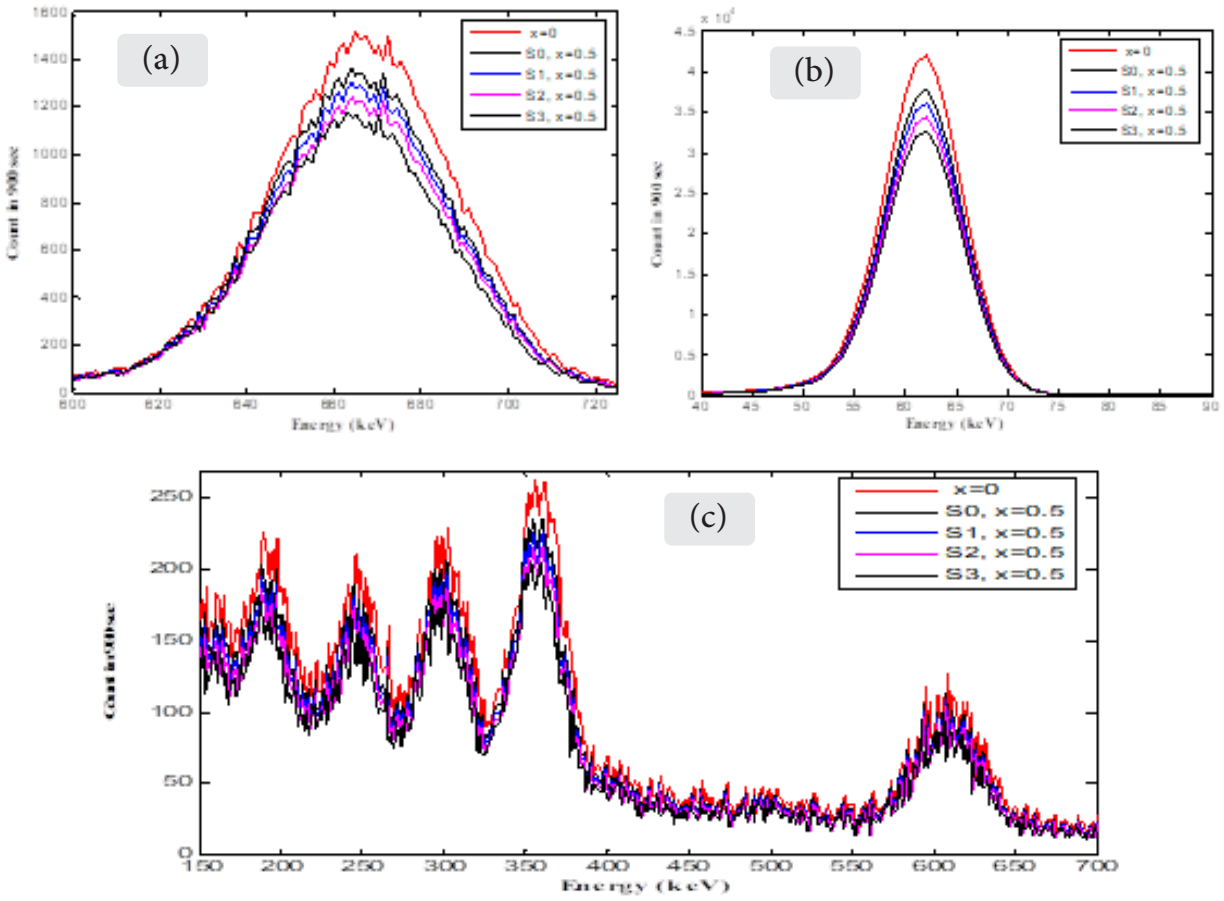


الشكل (1): يوضح الشكل صورة للمنظومة العملية المستخدمة لقياس مطيافية اشعة كاما.

بعد اعداد المنظومة تم إيجاد طيف الخلفية الاشعاعية حيث يوضح الشكل (3) و (4) نتائج الطيف التي تم الحصول عليها من برنامج (U.S.X. P.C.I) لمصادر أشعة جاما keV (60) ^{241}Am و ^{137}Cs keV (662) و ^{226}Ra (186, 242, 295, 352, keV 609) وتم استخدام هذه المصادر لتحديد معاملات التوهين لكل عينة، والخلفية الاشعاعية بوجود وعدم وجود العينات.



الشكل (2): الطيف الذي تم الحصول عليه من مطيافية أشعة كاما بدون وجود العينات لـ (a)– الخلفية الاشعاعية
^{226}Ra .-(d)-^{137}Cs (c) ^{241}Am -(b)



الشكل (3): الطيف الذي تم الحصول عليه من مطيافية أشعة كاما مع وجود العينات لـ
^{226}Ra .-(c)-^{137}Cs (b) ^{241}Am -(a)

4 - النتائج والمناقشة

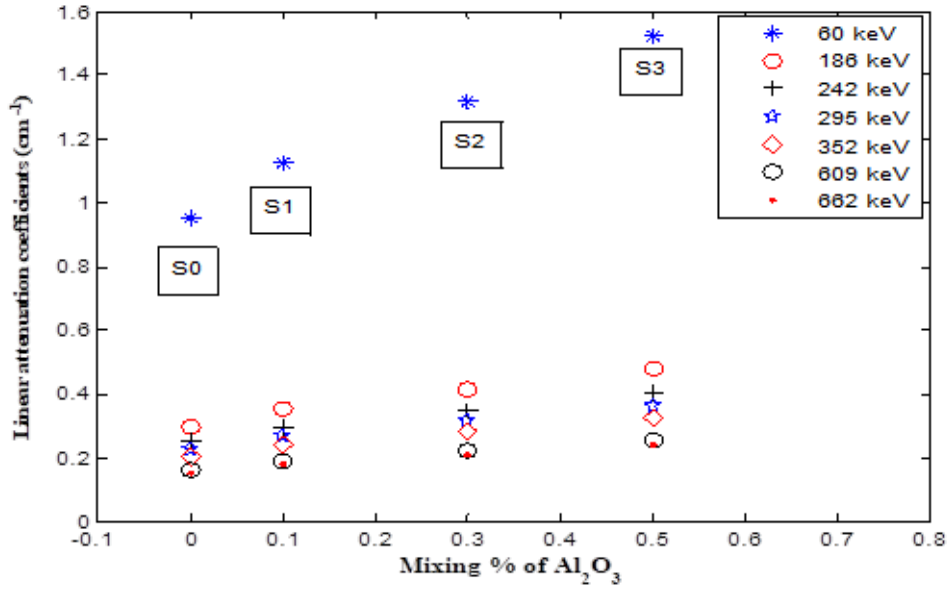
4-1 معامل التوهين الخطي

تم إيجاد معامل التوهين الخطي (μ_l) باستخدام المعادلة (1) لجميع العينات المحضرة والتي تم توضيح تفاصيلها في الجدول (1) لطاقات مختلفة ونسب وزنية مختلفة، وتم تلخيص نتائج هذه القياسات التجريبية في الجدول (2)، كما وتم رسم العلاقة بين معامل التوهين الخطي ونسبة خلط أوكسيد الالمنيوم (AL_2O_3) إلى مادة السمنت كما في الشكل (4). نلاحظ من هذا الشكل أن قيم معامل التوهين الخطي للعينات تتغير مع تغير التركيز لنفس السمك، حيث من الواضح أن هذه القيم تزداد مع زيادة تركيز مادة التدعيم المضافة ولجميع الطاقات، ويمكن تفسير ذلك على أنه بزيادة تركيز مادة التدعيم المضافة فإن عمليات التوهين فيها ستزداد بسبب زيادة توزيع مادة أوكسيد الالمنيوم (AL_2O_3) المضافة داخل مادة السمنت مما يؤدي إلى زيادة كثافة المادة المحضرة بشكل عام وبالتالي يحدث زيادة في توهين أشعة كاما وبالتالي يزداد معامل التوهين الخطي. كما يلاحظ أن مادة السمنت وحدها لا تكفي لاستخدامها كدروع واقية،

ولكن عند إضافة مادة التدعيم (أوكسيد الالمنيوم (AL2O3)) إليها يصبح من الممكن استخدام مادة السمنت كدرع واقي، وهذا السلوك يتوافق مع ما توصل إليه[14]. كما أظهرت النتائج أيضًا أن التوزيع المتجانس لأوكسيد الالمنيوم (AL_2O_3) داخل مادة السمنت عزز كفاءة التوهين بشكل ملحوظ. ومع زيادة تركيز أوكسيد الالمنيوم (AL_2O_3)، أصبح التوزيع أكثر تجانسًا، مما أدى إلى زيادة التفاعل الإشعاعي وارتفاع معامل التوهين الخطي.

الجدول (2): النتائج التجريبية لمعامل التوهين الخطي للأسمنت المدعم باوكسيد الالمنيوم (AL_2O_3).

رمز العينة	تركيز التدعيم	E (keV)						
		60	186	242	295	352	609	662
		^{241}Am	^{226}Ra					^{137}Cs
		$\mu_\ell\ (cm^{-1})$						
S_0	0%	0.9504	0.29852	0.25264	0.22721	0.20305	0.15993	0.15121
S_1	10%	1.1264	0.35392	0.29938	0.26887	0.24091	0.18956	0.1792
S_2	30%	1.3179	0.41295	0.35079	0.31495	0.28154	0.22169	0.20966
S_3	50%	1.5206	0.47805	0.40476	0.36283	0.32508	0.25592	0.24193



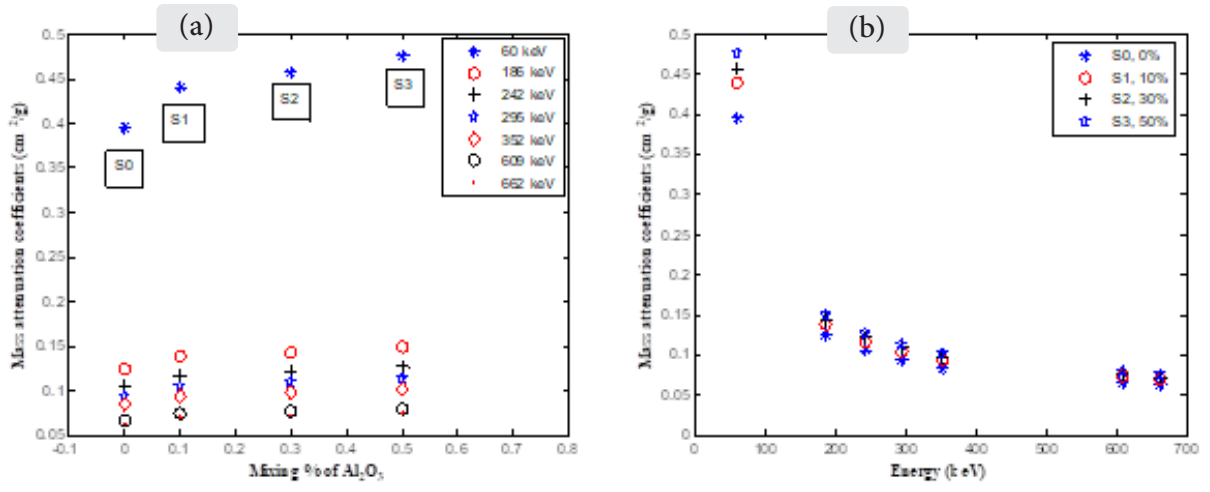
الشكل (4): اعتماد معامل التوهين الخطي على نسبة الخلط.

4-2 معامل التوهين الكتلي

تم إيجاد معامل التوهين الكتلي (μ_m) من المعادلة (2) لجميع العينات المحضرة تبعاً للكثافة الموضحة تفصيلياً في الجدول (1)، ولطاقات مختلفة وتراكيز مختلفة، وقد فصلت نتائج هذه الحسابات في الجدول (3)، كما تم رسم العلاقة بين معامل التوهين الكتلي وكلاً من نسبة الخلط وطاقة الفوتون الساقط كما هو موضح في الشكل (5). نلاحظ من هذه الأشكال أن معامل التوهين الكتلي يعتمد على كلاً من نسبة الخلط وطاقة الفوتون الساقط، حيث يزداد بزيادة نسبة الخلط ويقل بزيادة طاقة الفوتون الساقط، بالنسبة لنسبة الخلط فإن ذلك يرجع إلى زيادة كفاءة التوهين، ويرجع ذلك إلى أن المقطع العرضي لعملية تشتت كومبتون يتناسب عكسياً مع طاقة الفوتونات الساقط، لذلك نلاحظ أن معامل التوهين الكتلي يتناقص ببطء مع زيادة طاقة الفوتون الوارد. وهذا السلوك يتوافق مع ما تم التوصل إليه[15].

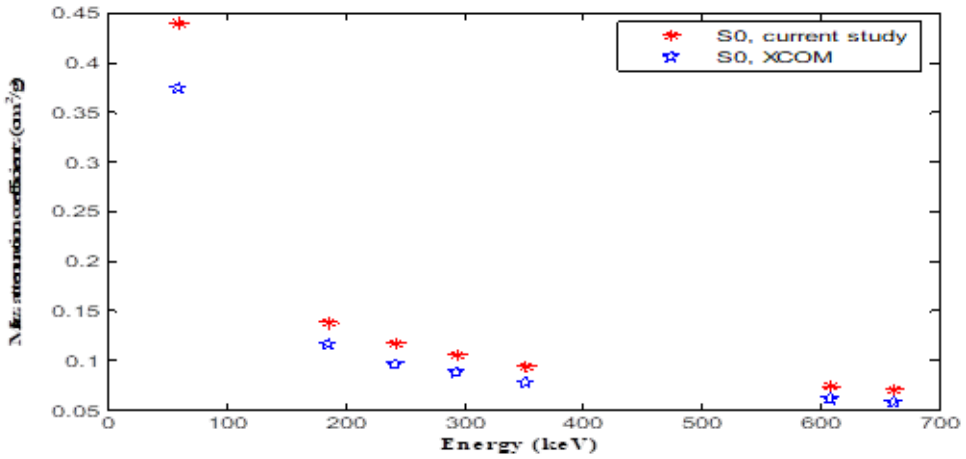
الجدول (3): النتائج التجريبية لمعامل التوهين الكتلي للأسمنت المدعم باوكسيد الالمنيوم (AL_2O_3).

رمز العينة	تركيز التدعيم	E (keV)						
		60	186	242	295	352	609	662
		^{241}Am	^{226}Ra					^{137}Cs
		$\mu_m\ (cm^2/gm)$						
S_0	0%	0.396	0.12438	0.10527	0.09467	0.08460	0.066638	0.063005
S_1	10%	0.44	0.13825	0.11695	0.10503	0.094106	0.074048	0.07
S_2	30%	0.4576	0.14339	0.1218	0.10936	0.097756	0.076977	0.072799
S_3	50%	0.4752	0.14939	0.12649	0.11339	0.10159	0.079974	0.075604



الشكل (5): اعتماد معامل التوهين الكتلي على (a)- نسبة الخلط و (b)- طاقة الفوتون الساقط.

تـم مقارنـة قيـم معامـلات التوهـين الكتليـة التـي تـم الحصـول عليهـا في هـذه الدراسـة مع قيـم معاملات التوهـين الكتليـة لقاعـدة بيانـات (XCOM)، وتبـين ان افضـل توافـق لهـذه العينـات مـع قاعـدة بيانـات (XCOM) كان للعينـة (S_3)، حيـث ان الفروقـات بـين قيـم معامـلات التوهـين الكتليـة لهـذه العينـة مـع قاعـدة بيانـات (XCOM) اقـل مـن ٪(8)، الشـكل (6) يوضـح المقارنـة بـين قيـم معامـلات التوهـين الكتليـة، وتؤكـد هـذه النتيجـة إمكانيـة اسـتخدام السـمنت مـع أوكسـيد الالمنيـوم (AL2O3) كـدروع واقيـة للإشـعاع.



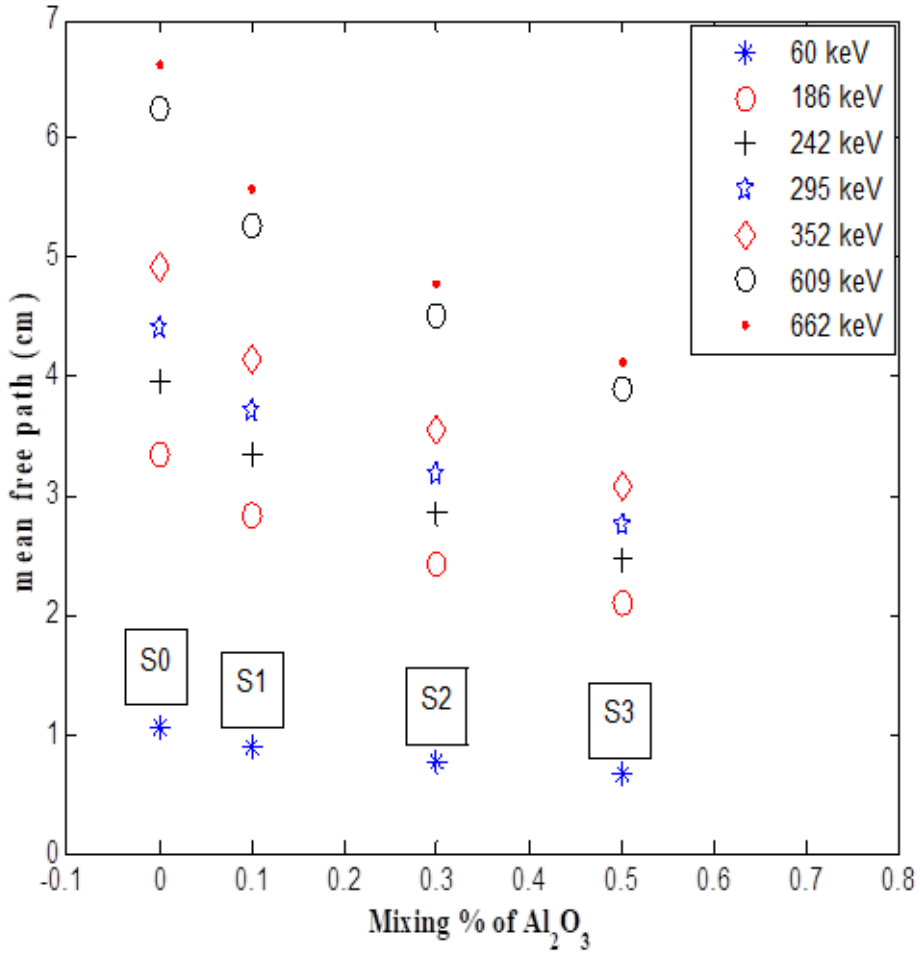
الشكل (6): تباين معاملات التوهين الكتلي للدراسة الحالية وقاعدة بيانات (XCOM).

4-3 معدل المسار الحر

تـم إيجـاد معـدل المسـار الحـر (λ) باسـتخدام المعادلـة (3) لجميـع العينـات المحـضرة والتـي تـم توضيـح تفاصيلها في الجـدول (1) ولطاقـات وتراكيـز وسـمك ثابـت، وقـد تـم تلخيـص نتائـج هـذه القياسـات التجريبيـة في الجـدول (4). ونلاحـظ مـن الجـدول (4) أن قيـم معـدل المسـار الحـر للعينـات تتغير مـع تغـير التركيـز، حيـث مـن الواضـح أن هـذه القيـم تقـل مـع زيـادة تركيـز أوكسـيد الالمنيـوم (AL_2O_3) المضافـة ولجميـع الطاقـات، ويمكـن تفسـير ذلـك عـلى أنـه بزيـادة تركيـز مـادة أوكسـيد الالمنيـوم (AL_2O_3) المضافـة فـإن عمليـات التوهـين فيهـا سـتقل بسـبب زيـادة توزيـع مـادة التدعيـم المضافـة داخـل المـادة الأساسـية ممـا يـؤدي إلى زيـادة كثافـة المـادة المحـضرة بشـكل عـام وذلـك لأن زيـادة تركيـز المـادة المضافـة تعمـل عـلى تحسـين خصائـص المـادة الأساسـية تجـاه التوهـين لأشـعة كامـا، كـما يلاحـظ مـن الجـدول أن معـدل المسـار الحـر يعتمـد عـلى طاقـة الفوتـون السـاقط. كـما تـم رسـم العلاقـة بـين معـدل المسـار الحـر وكل مـن نسـبة الخلـط وطاقـة الفوتـون السـاقط كـما هـو موضـح بالشـكل (7) ونلاحـظ مـن هـذا الشـكل أن معـدل المسـار الحـر يعتمـد عـلى كل مـن نسـبة الخلـط وطاقـة الفوتـون السـاقط فهـو يـزداد بزيـادة الطاقـة ويرجـع السـبب إلى اختـلاف آليـة تفاعـل أشـعة كامـا مـع المـادة حسـب قيـم الطاقـة المسـتخدمة بينـما يقـل بزيـادة نسـبة الخلـط وهـذا يرجـع إلى زيـادة الكثافـة [15].

الجدول (4): النتائج التجريبية لمعدل المسار الحر للأسمنت المدعم باوكسيد الالمنيوم (AL_2O_3).

رمز العينة	تركيز التدعيم	E (keV)						
		60	186	242	295	352	609	662
		^{241}Am	^{226}Ra					^{137}Cs
		λ						
S_0	0%	1.0522	3.3498	3.9581	4.4012	4.9249	6.2527	6.6132
S_1	10%	1.1264	0.35392	0.29938	0.26887	0.24091	0.18956	0.1792
S_2	30%	1.3179	0.41295	0.35079	0.31495	0.28154	0.22169	0.20966
S_3	50%	1.5206	0.47805	0.40476	0.36283	0.32508	0.25592	0.24193



الشكل (7): اعتماد معدل المسار الحر على نسبة الخلط.

5- الاستنتاجات

أظهرت الدراسة أن إضافة أوكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) إلى السمنت بنسب وزنية مختلفة أدت إلى تحسن واضح في خصائص التوهين الإشعاعي، حيث لوحظ ارتفاع في معامل التوهين الخطي والكتلي بشكل متناسب مع زيادة تركيز (Al_2O_3)، نتيجة لارتفاع الكثافة الكلية للعينات وزيادة احتمال تفاعل فوتونات أشعة غاما داخل المادة. كذلك أظهرت النتائج انخفاضًا في معدل المسار الحر (MFP) مع ارتفاع نسبة المضاف، مما يشير إلى فعالية العينة في تقليل مدى اختراق الإشعاع، وكانت العينة ذات النسبة الوزنية ٪(50) هي الأفضل أداءً، إذ حققت أعلى كفاءة في التوهين. وعند مقارنة القيم التجريبية لمعاملات التوهين الكتلي مع قاعدة بيانات (XCOM)، وُجد توافق جيد خاصة للعينة (S_3)، حيث لم تتجاوز نسبة الانحراف ٪(8)، وهو ما يؤكد دقة القياسات وإمكانية الاعتماد على الخرسانة المحسّنة بـ(Al_2O_3) في تطبيقات الوقاية الإشعاعية. هذه النتائج تتوافق مع دراسات سابقة أكدت أن استخدام (Al_2O_3) في الخرسانة يحسن من كفاءتها الإشعاعية ويقلل من نفاذية أشعة غاما، ما يجعلها خيارًا واعدًا في التطبيقات الطبية والصناعية والنووية الآمنة بيئيًا.

المصادر

1. B. Aygün, E. Şakar, T. Korkut, M. I. Sayyed, and A. Karabulut, "New high temperature resistant heavy concretes for fast neutron and gamma radiation shielding," Radiochim. Acta, vol. 107, no. 4, pp. 359–367, 2019. DOI: 10.1515/ract-2018-3075
2. S. A. Barbhuiya and N. Ghafoori, "A comprehensive review of radiation shielding concrete: Properties, design, evaluation, and applications," Structural Concrete, 2024. DOI: 10.1002/suco.202400519
3. M. I. Sayyed, "The Impact of Chemical Composition, Density and Thickness on the Radiation Shielding Properties of $CaO–Al_2O_3–SiO_2$ Glasses," Silicon, vol. 15, pp. 7917–7926, 2023. DOI: 10.1007/s12633-023-02640-y
4. E. Hannachi, "Scheelite-type $BaWO_4$ doped with Ho_2O_3 oxide as a promising lead-free shield for gamma rays," Materials Science in Semiconductor Processing, vol. 167, p. 107802, 2023. DOI: 10.1016/j.mssp.2023.107802
5. M. Y. Hanfi, "Effect of Bi_2O_3/WO_3 on Improving the Ability of Polyepoxide-Based Composites to Attenuate Gamma Rays," Nuclear Science and Engineering, 2024. DOI: 10.1080/00295639.2023.2234567
6. A. M. El-Khayatt, "Radiation shielding properties of nickel oxide and their applicability in nuclear technology," Annals of Nuclear Energy, vol. 62, pp.

tion shielding materials: A review," Radiation Physics and Chemistry, vol. 171, p. 108725, 2020. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2020.108725

13. A. Mostafa et al., "Design and characterization of tungsten–epoxy composites for gamma radiation shielding," Journal of Materials Research and Technology, vol. 12, pp. 1650–1658, 2021. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.03.02
14. A. E. Othman et al., "Characterization of lead-free shielding mortar containing barite and Al_2O_3 nanoparticles against gamma rays," Construction and Building Materials, vol. 344, p. 128208, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128208
15. I. M. Nabil et al., "Experimental, analytical, and simulation studies of modified concrete mix for radiation shielding in a mixed radiation field," Scientific Reports, vol. 13, p. 17637, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-44647-9

179–184, 2013. DOI: 10.1016/j.anucene.2013.07.024

7. M. E. Medhat and V. P. Singh, "Gamma-ray attenuation and shielding behavior of NiO-reinforced polymer composites," Journal of Alloys and Compounds, vol. 680, pp. 263–271, 2016. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.04.092
8. D. A. Aloraini et al., "Experimental Investigation of Radiation Shielding Competence of Bi_2O_3-CaO-K_2O-Na_2O-P_2O_5 Glass Systems," Materials, vol. 14, no. 17, p. 5061, 2021. DOI: 10.3390/ma14175061
9. Q. Chang et al., "Radiation shielding polymer composites: Ray-interaction mechanism, structural design, manufacture and biomedical applications," Materials & Design, vol. 233, p. 112253, 2023. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.112253
10. M. Yılmaz, "Gamma radiation shielding properties for polymer composites reinforced with bismuth tungstate in different proportions," Applied Radiation and Isotopes, vol. 200, p. 110994, 2023. DOI: 10.1016/j.apradiso.2023.110994
11. P. Sikora et al., "Rheological, Mechanical, Microstructural and Radiation Shielding Properties of Cement Pastes Containing Magnetite (Fe_3O_4) Nanoparticles," International Journal of Concrete Structures and Materials, vol. 17, no. 7, 2023. DOI: 10.1186/s40069-023-00642-5
12. Y. Al-Hadeethi et al., "Lead-free radia-