تقييم خلائط $(Pb-Sn)$ منخفضة الانصهار كمواد تدريع لأشعة (X) وأشعة غاما

د. سعيد مندو

قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة إدلب

https://orcid.org/0009-0004-3996-9887

الملخص:

يتناول هذا البحث تحضير ودراسة مجموعة من الخلائط الثنائية منخفضة الانصهار من نظام الرصاص – القصدير $(Pb-Sn)$ بغية تقييم إمكاناتها كمواد تدريع منخفضة الرصاص لتطبيقات الأشعة السينية (X) وأشعة غاما. تم تحضير الخلائط باستعمال طريقتين مختلفتين؛ إذ استُعملت تقنية الصهر المغزلي (Melt Spinning) لإنتاج شرائح رقيقة مناسبة لقياسات الأشعة السينية، في حين حُضّرت عينات قياسات أشعة غاما بالطريقة التقليدية للصهر والصب. شملت الدراسة تحديد درجات الانصهار وقياس معاملات التدريع الإشعاعي المتمثلة بمعامل التوهين الخطي (μ) وسماكة النصف (HVL) ضمن مجالات طاقية مختلفة. واعتمد تقييم الخلائط على مجموعة من المعايير تشمل كفاءة التوهين الإشعاعي، وانخفاض درجة الانصهار، وتقليل محتوى الرصاص بوصفه مؤشراً تقريبياً للحد من المخاطر السمية المحتملة.

أظهرت النتائج أن قيم (μ) و (HVL) تعتمد بوضوح على كل من طاقة الفوتون والتركيب الكيميائي للخليطة، إذ يتناقص معامل التوهين مع انخفاض نسبة الرصاص، كما تبيّن أن التركيب اليوتيكتي $(Pb_{38.1}Sn_{61.9})$ يحقق توازناً مناسباً بين مؤشرات التدريع الإشعاعي والخواص الحرارية، إذ تبلغ درجة انصهاره نحو $(183\ ^\circ C)$، مع احتفاظه بكفاءة توهين يمكن تعويض انخفاضها مقارنة بالرصاص النقي بزيادة السماكة التصميمية عند الحاجة. وتشير هذه النتائج إلى أن هذا التركيب يمثل خياراً مناسباً لتطوير مواد تدريع منخفضة الرصاص ضمن شروط الدراسة.

الكلمات المفتاحية:

التدريع الإشعاعي؛ خلائط الرصاص – القصدير $(Pb-Sn)$؛ معامل التوهين الخطي؛ سماكة النصف (HVL)؛ أشعة (X)؛ أشعة غاما؛ مواد منخفضة الانصهار؛ التطبيقات الطبية للإشعاع.

تاريخ إيداع البحث :2026/01/16
تاريخ قبوله للنشر:2026/03/24

Evaluation of Low-Melting Pb–Sn Alloys as Shielding Materials for X-Ray and Gamma Radiation

Dr. Saeed Mando
Department of Physics Faculty of Science, Idlib University

Abstract:

This study explores the preparation and characterization of low-melting binary alloys in the lead–tin (Pb–Sn) system as potential reduced-lead shielding materials for X-ray and gamma-ray applications. The alloys were fabricated using two preparation routes: the melt-spinning technique to produce thin ribbons suitable for X-ray measurements, and the conventional melting–casting method for samples used in gamma-ray attenuation measurements.

The investigation involved determining the melting temperatures and evaluating key radiation shielding parameters, including the linear attenuation coefficient (μ) and the half-value layer (HVL), across different photon energy ranges. The performance of the prepared alloys was assessed based on multiple criteria, namely radiation attenuation efficiency, low melting temperature, and reduced lead content as an indicator of potentially lower toxicity.

The results reveal that both (μ) and (HVL) strongly depend on photon energy and alloy composition. A gradual reduction in the attenuation coefficient was observed with decreasing lead content. Among the investigated compositions, the eutectic alloy ($Pb_{38.1}Sn_{61.9}$) exhibits a favorable balance between shielding effectiveness and thermal characteristics, with a melting temperature of approximately ($183\,°C$). Although its attenuation capability is slightly lower than that of pure lead, the difference can be compensated by modest increases in shielding thickness. These findings indicate that the eutectic Pb–Sn alloy represents a promising candidate for the development of reduced-lead radiation shielding materials under the conditions examined in this study.

Keywords

Radiation shielding; *Pb–Sn* alloys; Linear attenuation coefficient; Half-value layer (HVL); X-rays; Gamma rays; Low-melting materials; Medical radiation applications.

.

1- المقدمة:

يُعدّ الرصاص من العناصر ذات السمية العالية، إذ يمكن للرصاص وأكاسيده المتكوّنة أثناء عمليات الانصهار أن تدخل جسم الإنسان عبر البلع أو الاستنشاق أو الامتصاص عن طريق الجلد، ما قد يسبب اضطرابات في الجهاز العصبي، والتهابات في الجهاز التنفسي، فضلاً عن التأثير سلباً على بعض وظائف الكلى [1]. كما يتميز الرصاص بدرجة انصهار مرتفعة نسبياً تبلغ نحو $(327°C)$، ما يحدّ من سهولة التعامل معه مخبرياً، لا سيما في تطبيقات العلاج الإشعاعي [2]. ونظراً لهذه الاعتبارات، ظهرت الحاجة إلى البحث عن مواد بديلة أو خلائط معدنية تتمتع بدرجات انصهار أقل، وسمية محدودة، وتكلفة اقتصادية مناسبة.

في هذا الإطار، يعد القصدير (Sn) خياراً مناسباً للإضافة إلى الرصاص، إذ يتميز بانخفاض سمّيّته نسبياً، وانخفاض درجة انصهاره إلى نحو $(231.9°C)$، ما يسهل استعماله في تصنيع الخلائط منخفضة الانصهار. كما يظهر من الجدول (1) أن القصدير يتوافر بشكل أكبر في القشرة الأرضية مقارنةً بالكادميوم (Cd) والبزموت (Bi)، ما يجعله خياراً عملياً واقتصادياً عند تحضير قوالب التدريع الإشعاعي، في حين يتميز البزموت بندرة عالية وسعر مرتفع، والكادميوم بسعر مماثل تقريباً ولكنه أقل وفرة [3].

الجدول (1) :الأسعار العالمية ونسب التوافر في القشرة الأرضية لعناصر القصدير، البزموت، والكادميوم

العنصر	الوفرة في القشرة الأرضية (ppm)	السعر العالمي التقريبي (USD/kg)
Sn	≈ 2	≈ 6–8
Bi	≈ 0.025	≈ 49–61
Cd	≈ 0.1–0.5	≈ 3–5

انطلاقاً من ذلك، جاءت فكرة تحضير مجموعة من الخلائط الثنائية من نظام الرصاص– القصدير بنسب تركيب مختلفة، ودراسة التأثير المتبادل لكل من أشعة غاما والأشعة السينية مع هذه الخلائط، بغية تقييم قدرتها على امتصاص الإشعاع ومدى صلاحيتها للاستعمال في تطبيقات التدريع الإشعاعي.

2- التوهين الإشعاعي وسماكة النصف:

تتميز أشعة غاما والأشعة السينية بقدرتها العالية على الاختراق، ولا يمكن تحديد مدى اختراق ثابت لها داخل المادة، إذ تخضـــع تفاعلاتها لطبيعة احتمالية؛ فقد يتفاعل الفوتون عند أي عمق داخل الوســط أو يســتمر في الانتشــار دون تفاعل، ما يؤدي إلى تناقص تدريجي في الشدة وفق قانون التوهين الأسي. الذي يُعطى بالعلاقة:

$$I = I_0\, e^{-\mu x} \qquad (1)$$

إذ تمثل (I) شدة الإشعاع النافذ من المادة الماصة، و(I_0) شدة الإشعاع الساقط قبل اختراق المادة، و(μ) معامل التوهين الخطي (cm^{-1})، و(x) سماكة المادة الماصة.

ويبيّن الجدول (2) بعض قيم معاملات التوهين الخطي لكل من الرصاص والقصدير عند طاقات مختلفة لأشعة غاما والأشعة السينية.

الجدول (2): بعض قيم معاملات التوهين الخطي للرصاص والقصدير عند طاقات مختلفة لأشعة غاما وأشعة (X)

Element	Linear Attenuation Coefficient (cm^{-1})				
	$X-Ray$		$\gamma-Ray$		
	10 keV	50 keV	1 MeV	3 MeV	6 MeV
Pb	1469	90.860	0.797	0.468	0.505
Sn	1010.320	78.110	0.423	0.269	0.261

ومن العلاقة (1) يمكن تحديد ســماكة النصــف (HVL)، وهي ســماكة المادة الماصة اللازمة لخفض شدة الإشعاع إلى نصف قيمتها الابتدائية، أي عندما تكون النسبة $(I/I_0 = 0.5)$. وبالتعويض عن هذه القيمة في العلاقة (1)، نحصل على:

$$HVL = \frac{0.693}{\mu} \qquad (2)$$

ويعرض الجدول (3) بعض قيم سماكة النصف لأشعة (X) عند طاقات مختلفة لكل من الرصاص والقصدير [4].

الجدول (3) :بعض قيم سماكة النصف للرصاص والقصدير عند طاقات مختلفة لأشعة (X)

Element	$HVL\ (cm)$		
	30 keV	60 keV	150 keV
Pb	0.0020	0.0121	0.0303
Sn	0.0023	0.0144	0.1558

ومن خلال العلاقتين (1) و(2)، يمكن تحديد قيم كلٍّ من معامل التوهين الخطي (μ) وسماكة النصف (HVL) للمادة الماصة. وبصورة عامة، يعتمد معامل التوهين الخطي على طاقة الإشعاع الوارد والخصائص الذرية للمادة، ولا سيما العدد الذري والكثافة. إذ يزداد توهين الحزم الإشعاعية بازدياد سماكة المادة الماصة (x)، وهي بدورها ترتبط بعدد الإلكترونات المتاحة للتفاعل داخل المادة. وبناءً عليه، يتناسب معامل التوهين الخطي (μ) طرداً مع كثافة المادة، ويزداد بزيادة العدد الذري للعناصر المكوّنة لها.

3- آليات تفاعل أشعة (X) وأشعة غاما مع المادة:

يعود توهين أشعة (X) وأشعة غاما داخل المواد الماصة إلى مجموعة من الآليات الفيزيائية التي يعتمد حدوثها أساساً على طاقة الفوتون الساقط والخصائص الذرية للمادة، ولاسيما العدد الذري والكثافة الإلكترونية. ويُوصف التوهين في حالة هندسة الحزمة الضيقة (Narrow Beam Geometry) بالعلاقة الأسية المعروفة:

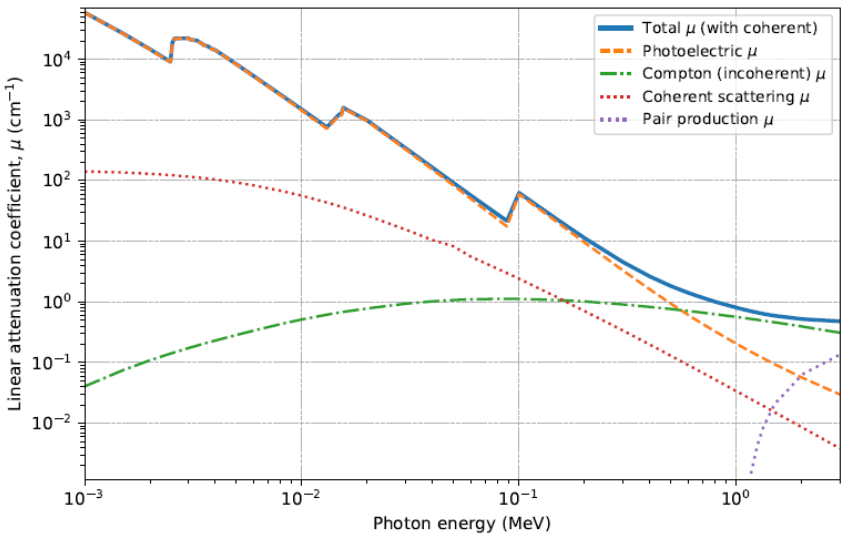
$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

إذ يمثل (μ_{tot}) معامل التوهين الخطي الكلي (cm^{-1})، وهو يعبر عن مجموع مساهمات آليات التفاعل الرئيسة بين الفوتونات والمادة، ويمكن بصورة تقريبية التعبير عنه بالعلاقة:

$$\mu_{tot} = \mu_{ph} + \mu_c + \mu_{pp}$$

إذ تمثل (μ_{ph}) مساهمة التأثير الكهروضوئي، و(μ_c) مساهمة تشتت كومبتون، في حين تمثل (μ_{pp}) مساهمة إنتاج الأزواج، ويبيّن الشكل (1) التغير النسبي لهذه المساهمات بدلالة طاقة الفوتون بالنسبة للرصاص اعتماداً على بيانات (XCOM) [5].

في مجال الطاقات المنخفضة نسبياً (كما في نطاق الأشعة السينية منخفضة الطاقة)، يسود التأثير الكهروضوئي؛ إذ يُمتص الفوتون كلياً بواسطة أحد إلكترونات الذرة، ويتميز هذا التفاعل بحساسية عالية للعدد الذري (يزداد بقوة مع Z) مع تناقص سريع بزيادة طاقة الفوتون، ولذلك تظهر المواد عالية العدد الذري مثل الرصاص كفاءة كبيرة في هذا المجال، وهو ما ينعكس على قيم (μ) المرتفعة و (HVL) الصغيرة عند الطاقات المنخفضة [6].



الشكل (1) تغير معامل التوهين الخطي للرصاص (Pb) بدلالة طاقة الفوتون

ومع الانتقال إلى الطاقات المتوسـطة (مجال غاما حتى حدود عدة مئات keV وحتى قرابة $1MeV$)، تصبح آلية كومبتون هي المسيطرة؛ إذ يتفاعل الفوتون مع إلكترون شـــبه حر فيفقد جزءاً من طاقته ويتغير اتجاهه. ويعتمد هذا التفاعل بدرجة أكبر على الكثافة الإلكترونية أكثر من اعتماده على (Z)، لذلك تتقارب قيم (μ) نســـبياً بين المواد مقارنةً بما يحدث في مجال التأثير الكهروضـوئي [7]، وهو ما ينسـجم مع السـلوك المبين في الشكل (1).

أما إنتاج الأزواج فلا يبدأ إلا عند طاقات أعلى من عتبة ($1.022\ MeV$)، ولذلك يكون مهمَلاً عملياً عند الطاقات دون هذه العتبة، بينما يبدأ بالمساهمة عند الطاقات الأعلى (مثل خطوط $Co-60$) إلا أن مساهمته تبقى محدودة مقارنة بمساهمة كومبتون ضمن مجال الطاقات المعتمد في هذه الدراسة، كما يظهر في الشكل (1).

وبناءً على ذلك، فإن تحسين كفاءة التدريع الإشعاعي للخلائط المعدنية يقوم على تحقيق موازنة بين العدد الذري والكثافة (لرفع μ وخفض HVL) وبين الخواص التطبيقية مثل انخفاض درجة الانصهار وسهولة التصنيع، وهو ما يبرر التركيز في هذا البحث على تقييم خلائط الرصاص – القصدير ذات تراكيب مختلفة لتحديد الخيار الأنسب لتطبيقات التدريع الإشعاعي.

4- الدراسات المرجعية:

أظهرت الدراسات الأساسية في مجال التدريع الإشعاعي أن معاملات التوهين لأشعة (X) وأشعة غاما، تتأثر بطاقة الفوتون وبخصائص المادة الماصة، ولاسيما العدد الذري والكثافة (أو الكثافة الإلكترونية)، وهو ما تناولته دراسات مبكرة ربطت هذه المؤشرات بخصائص المادة ضمن مجالات طاقية مختلفة [8]. وقد شكّل هذا الفهم الأساس النظري لاعتماد المواد عالية العدد الذري لأغراض الحماية الإشعاعية.

ومع تطور الأبحاث، توسعت الدراسات لتشمل توصيف الخواص الإشعاعية والفيزيائية للرصاص بوصفه المادة المرجعية الأكثر استخداماً في التدريع، إلى جانب تطوير نماذج نظرية وعددية لتمثيل اعتماد معامل التوهين الخطي (μ) وسماكة النصف (HVL) على طاقة الإشعاع وتركيب المادة [9].

غير أن التحديات الصحية والبيئية المرتبطة باستعمال الرصاص النقي، إضافة إلى اعتبارات تصنيعية مرتبطة بارتفاع درجة انصهاره، دفعت الأبحاث الحديثة إلى توسيع نطاق البحث عن بدائل عملية أو مواد منخفضة الرصاص تحقق توازناً بين الكفاءة الإشعاعية والخواص الفيزيائية المناسبة [10]. وفي هذا السياق، تناولت عدة دراسات خواص عناصر منفردة مثل الرصاص والقصدير. كما تم تقييم خلائط منخفضة الانصهار مثل (Cerrobend) و(Rose's alloy) وأثبتت إمكانية استعمالها كبدائل جزئية للرصاص في بعض التطبيقات، مع ملاحظة تحسن مؤشرات التدريع بازدياد نسبة الرصاص ضمن الخليطة [11-12].

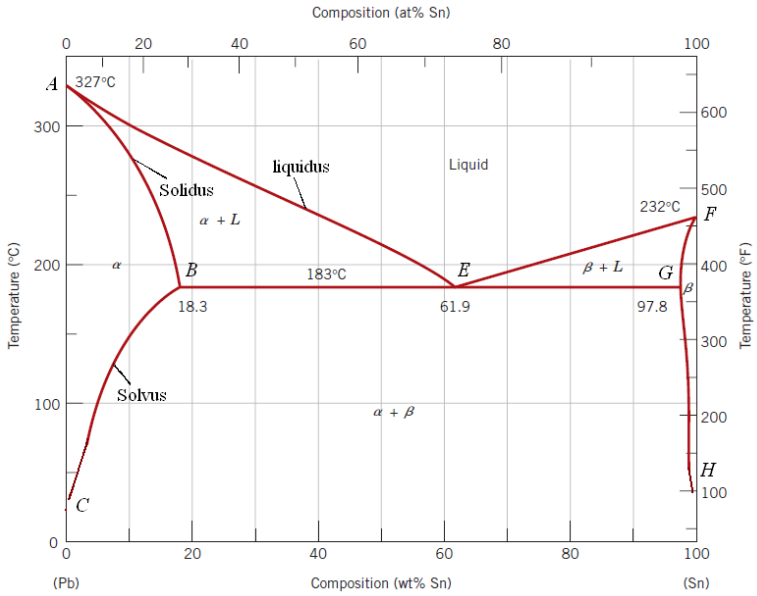
وفي مرحلة لاحقة، اتجهت الدراسات إلى تقييم أنظمة ثنائية وثلاثية مثل خلائط $(Pb-Sn)$، و$(Bi-Sn-Zn)$، و$(Zn-Pb)$، إذ أظهرت النتائج وفق قيم (μ) و(HVL) ضمن مجالات طاقية منخفضة ومتوسطة، أن بعض هذه الخلائط قد يحقق أداءً إشعاعياً منافساً للرصاص، مع مزايا تطبيقية تتعلق بانخفاض درجة الانصهار وسهولة التصنيع [13، 14، 15، 16]. كما وظفت أدوات حسابية ومحاكاة عددية مثل (WinXCom) و(MCNP) لفهم سلوك التوهين الإشعاعي بصورة أدق والتحقق من حساسية النتائج للطاقة والتركيب [17].

وعلى الرغم من هذا التوسع الملحوظ في دراسة الخلائط المعدنية منخفضة الانصهار، فإن الدراسات المنهجية التي تركز تحديداً على نظام الرصاص – القصدير $(Pb-Sn)$ لا تزال محدودة نسبياً مقارنة بأنظمة أخرى، ولاسيما فيما يتعلق بعرض مقارنة كمية مباشرة تجمع بين مؤشرات التدريع (HVL,μ) ودرجة الانصهار ومحتوى الرصاص ضمن نفس إطار الدراسة.

ومن هنا تنبع أهمية البحث الحالي، الذي يسعى إلى تقييم (HVL,μ) ودرجة الانصهار لخلائط $(Pb-Sn)$ منخفضة الانصهار ضمن نطاقات طاقية محددة لأشعة (X) وأشعة غاما، وتحليل مدى إمكانية اعتمادها كبدائل منخفضة الرصاص مع الحفاظ على كفاءة تدريع مناسبة ضمن شروط الدراسة.

5- طريقة العمل:

أُستعملت في هذا البحث عناصر معدنية عالية النقاوة، إذ بلغت نقاوة كلٍّ من الرصاص والقصدير (99.99%)، وذلك وفقاً لمواصفات الشركة الفرنسية المنتجة (Prolabo). وزنت العناصر باستعمال ميزان تحليلي رقمي بدقة $(0.1\,mg)$، وذلك اعتماداً على مخطط التوازن الطوري لنظام $(Pb-Sn)$، الموضح في الشكل (2) [18].



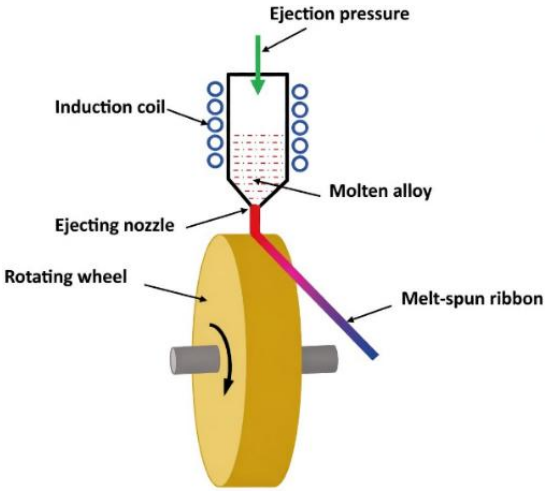
الشكل (2) مخطط التوازن الطوري رصاص – قصدير

وُضعت الكميات الموزونة في بوتقة من البورسلان، ثم نُقلت إلى فرن كهربائي ماركة (Tanco)، إذ سُخِّنت العينات تدريجياً إلى درجات حرارة مناسبة تتوافق مع التراكيب المتوقعة لكل خليطة، كما هو محدد في مخطط الأطوار.

وبعد الوصول إلى حالة الانصهار الكامل، جرى تحريك المصهور جيداً بغية تعزيز تجانس المزيج المعدني. وللتحقق من درجة التجانس في العينات المحضّرة، قيست درجات الانصهار لكل خليطة باستعمال منظومة التسخين نفسها. وتجدر الإشارة إلى أن الدقة الحرارية للأفران الكهربائية المخبرية تقع عادة ضمن المجال $(\pm 1 - 3\ ^\circ C)$ وفقاً لمواصفات الجهاز المستعمل.

وبمقارنة القيم المقاسة مع القيم النظرية المستمدة من مخطط التوازن الطوري لنظام $(Pb - Sn)$، تبيّن أن الفروقات كانت صغيرة وبلغت نحو $(1 - 2\ ^\circ C)$ تقريباً، وهي تقع ضمن حدود عدم اليقين التجريبي. ويشير هذا التقارب إلى توافق جيد بين النتائج العملية والقيم النظرية، ما يدعم تحقق درجة جيدة من التجانس في العينات المحضّرة.

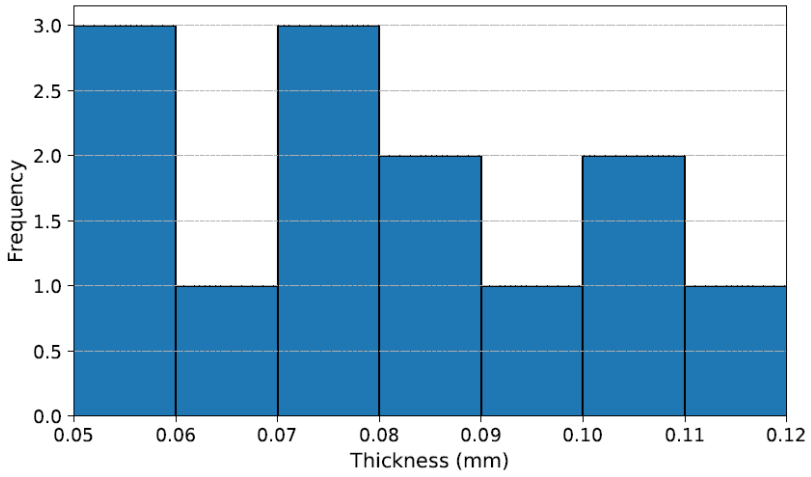
سُكب جزءٌ من المصهور على دولابٍ دوّار من الألمنيوم بسرعة خطية مقدارها $(31\ m/s)$ باستعمال تقنية الصهر المغزلي (melt spinning) الموضحة في الشكل (3)، ما أدى إلى الحصول على شرائح رقيقة جداً من الخلائط.



الشكل (3) تقنية الصهر المغزلي

حُضّرت (13) شريحة لكل خليطة ضمن نفس ظروف التشغيل. جرى قياس سماكة كل شريحة باستعمال ميكروميتر ميكانيكي بأصغر تدريجة $(0.01\ mm)$، وذلك عند خمس نقاط مختلفة تشمل أربع نقاط قريبة من الحواف الجانبية ونقطة عند منتصف الشريحة، ثم اعتمُدَ متوسط هذه القراءات ممثلاً لسماكة الشريحة. تراوحت سماكات الشرائح المحضّرة بين $(0.05 - 0.12\ mm)$، وبلغ متوسط السماكة الكلي $(0.0812 \pm 0.0214\ mm)$ لعدد عينات $(n = 13)$. كما أدرج مدرج تكراري (Histogram) يوضح توزع سماكات الشرائح في الشكل (4)، بغية توثيق التوزيع الإحصائي للسماكات المستعملة في حسابات التوهين.

أما الجزء المتبقي من المصهور، فقد صُبَّ في قوالب فولاذية بأبعاد $(2 \times 2 \times 1.5\ cm)$، ثم تُرك ليبرد ببطء للحصول على عينات بسماكات مختلفة تراوحت بين $(3 - 9\ mm)$ لاستعمالها لاحقاً في قياسات التوهين الإشعاعي.



الشكل (4) المدرج التكراري لتوزع سماكات الشرائح المحضّرة بتقنية الصهر المغزلي.

6- النتائج والمناقشة:

أولاً . الأشعة السينية (X-Ray):

في هذا الجزء من الدراسة، جرى تعريض الخلائط المعدنية منخفضة درجة الانصهار إلى حزمة من الأشعة السينية بطاقة $(18.5\ keV)$، إذ تراوحت سماكات العينات بين $(0.05 - 0.12\ mm)$.

قيست شدة الإشعاع النافذ (I) ومقارنتها بالشدة الابتدائية (I_0). دُرست العلاقة بين $(ln\, I/I_0)$ وسماكة المادة (x) لكل خليطة على حدة، إذ أظهرت النتائج علاقات خطية واضحة بما يؤكد خضوع عملية التوهين لقانون الامتصاص الأسي. ومن ميل المستقيمات تم تحديد معامل التوهين الخطي (μ)، ثم حُسبت سماكة النصف (HVL) وفق العلاقة $(HVL = ln2/\mu)$. ويعرض الجدول (4) قيم (μ) و (HVL)، ودرجات الانصهار للخلائط المدروسة إضافةً إلى الرصاص النقي عند طاقة $(18.5\ keV)$.

الجدول (4): قيم (μ) و (HVL) ودرجات انصهار الخلائط المحضّرة تحت طاقة أشعة (X)

$X-Ray\ (18.5\ keV)$			
Alloys	Melting point (℃)	$\mu\ (cm^{-1})$	$HVL\ (\times 10^{-3} cm)$
Pb	327.50	1007.00	0.69
$Pb_{49}Sn_{51}$	183–215	611.34	1.13
$Pb_{38.1}Sn_{61.9}$	183	540.82	1.28
$Pb_{29}Sn_{71}$	183–195	477.65	1.45

تُظهر النتائج تناقصاً تدريجياً في (μ) مع انخفاض نسبة الرصاص، ويُعزى ذلك إلى انخفاض الخصائص الذرية للمادة وما يرافقه من تراجع احتمال حدوث التأثير الكهروضوئي، وهو التفاعل المسيطر عند هذه الطاقة المنخفضة نسبياً. في المقابل، تزداد سماكة النصف (HVL) بزيادة محتوى القصدير، نتيجة انخفاض كفاءة التوهين مقارنة بالرصاص النقي، ما يعني زيادة السماكة المطلوبة لتحقيق نفس مستوى التوهين.

وبالمقارنة بين الرصاص النقي والتركيب اليوتيكتي $(Pb_{38.1}Sn_{61.9})$، انخفض (μ) من $(1007\ cm^{-1})$ إلى $(0.0128\ mm)$ وازدادت سماكة النصف (HVL) من $(0.0069\ mm)$ إلى $(1.28 \times 10^{-3}\ cm)$، ويمكن تعويض ذلك بزيادة السماكة التصميمية بنسبة تقارب $(1007/540.8 \approx 1.86)$ عند الحاجة لتحقيق مستوى توهين مماثل. من الناحية الحرارية، تنخفض درجة الانصهار حتى تبلغ نحو $(183\ °C)$ عند التركيب اليوتيكتي، وهو الحد الأدنى في نظام $(Pb-Sn)$ وفق المخطط الطوري.

وبالتزامن مع خفض محتوى الرصاص (كمؤشر تقريبي لتقليل المخاطر السمية المحتملة)، يمكن عدّ الخليطة $(Pb_{38.1}Sn_{61.9})$ خياراً متوازناً يجمع بين كفاءة تدريع مقبولة وخصائص حرارية محسّنة لتطبيقات أشعة (X) ضمن شروط الدراسة.

ثانياً . أشعة غاما (γ-Ray):

في هذا الجزء من الدراسة جرى تعريض العينات السميكة المحضّرة بالتبريد التقليدي، بسماكات تراوحت بين $(3-9\ mm)$، إلى حزم من أشعة غاما عند طاقات قمم فوتونية مميزة بلغت $(0.06 - 0.356 - 0.662 - 1.17 - 1.33\ Mev)$، وذلك باستعمال المصادر الإشعاعية $(Am-241, Ba-133, Cs-137, Co-60)$. واعتمدت طاقات القمم (photopeaks) في التحليل لكونها تمثل الطاقات الفيزيائية الفوتونية الفعلية المستخدمة لاستخراج معاملات التوهين ضمن هندسة الحزمة الضيقة، كما هو موثق في الجداول النووية القياسية والطيوف التوضيحية (الملحق A).

تم قياس الشدة الابتدائية (I_0) والشدة النافذة (I) لكل سماكة، ثم حُللت العلاقة الخطية بين $ln(I_0/I)$ والسماكة (x) لكل خليطة عند كل طاقة. أظهرت العلاقات خطية واضحة، ما أتاح تحديد معامل التوهين الخطي (μ) من ميل المستقيم، ثم حساب سماكة النصف (HVL)، باستخدام العلاقة $(HVL = ln2/\mu)$.

ولضمان تكرارية القياس، أُعيدت القياسات لكل سماكة بتكرار $(n = 5)$، واعتمد هامش عدم يقين نسبي محافظ قدره $(\pm 5\%)$ لقياسات غاما عند عرض النتائج، إذ مُثل هذا الهامش على شكل أشرطة خطأ في الشكل (5).

يعرض الجدول (5) قيم (μ) و(HVL) لكل من الرصاص النقي والخلائط $(Pb-Sn)$ عند طاقات غاما المختلفة. وتُظهر النتائج اتجاهاً عاماً يتمثل في تناقص (μ) مع ازدياد طاقة الفوتون لجميع المواد المدروسة، يقابله ازدياد في قيم (HVL)، وهو سلوك متوقع يعكس تغير الآليات الفيزيائية المسيطرة لتفاعل الفوتونات مع المادة.

فعند الطاقات المنخفضة $(0.060\ MeV)$ تكون قيم (μ) مرتفعة وقيم (HVL) صغيرة نسبياً نتيجة سيطرة الامتصاص الكهروضوئي، ومع الانتقال إلى الطاقات المتوسطة والعالية تزداد مساهمة تشتت كومبتون، فينخفض احتمال التفاعل الكلي للفوتونات مع المادة، ما يؤدي إلى تناقص (μ) وزيادة السماكة اللازمة لتحقيق نفس مستوى التوهين.

أما عند الطاقات الأعلى مثل $(1.17 - 1.33\ MeV)$ فيبقى تشتت كومبتون هو الآلية المسيطرة، مع بداية ظهور مساهمة إنتاج الأزواج فوق عتبة $(1.022\ MeV)$، إلا أن تأثيره يبقى محدوداً نسبياً ضمن المجال الطاقي المستعمل في هذه الدراسة.

الجدول (5): قيم (μ) و (HVL) للخلائط المحضرة تحت طاقات غاما المختلفة

Energy (MeV)	^{241}Am (0.060)		^{133}Ba (0.356)	
Alloys	μ (cm^{-1})	HVL $(\times 10^{-2} cm)$	μ (cm^{-1})	HVL (cm)
Pb	56.93±2.84	1.22±0.06	3.28±0.16	0.21±0.01
$Pb_{49}Sn_{51}$	52.42±2.62	1.32±0.06	2.11±0.10	0.33±0.02
$Pb_{38.1}Sn_{61.9}$	51.34±2.56	1.35±0.06	1.83±0.09	0.38±0.02
$Pb_{29}Sn_{71}$	50.61±2.53	1.37±0.06	1.64±0.08	0.42±0.02

Energy (MeV)	^{137}Cs (0.662)	
Alloys	μ (cm^{-1})	HVL (cm)
Pb	1.36 ± 0.07	0.50 ± 0.03
$Pb_{49}Sn_{51}$	0.95±0.05	0.72±0.04
$Pb_{38.1}Sn_{61.9}$	0.86±0.04	0.80±0.04
$Pb_{29}Sn_{71}$	0.79±0.04	0.87±0.04

Energy (MeV)	^{60}Co (1.17)		^{60}Co (1.33)	
Alloys	μ (cm^{-1})	HVL (cm)	μ (cm^{-1})	HVL (cm)
Pb	0.71±0.04	0.98±0.05	0.64±0.03	1.08±0.05
$Pb_{49}Sn_{51}$	0.55±0.03	1.26±0.06	0.50±0.03	1.38±0.07
$Pb_{38.1}Sn_{61.9}$	0.51±0.03	1.36±0.07	0.47±0.02	1.48±0.07
$Pb_{29}Sn_{71}$	0.48±0.02	1.43±0.07	0.44±0.02	1.55±0.08

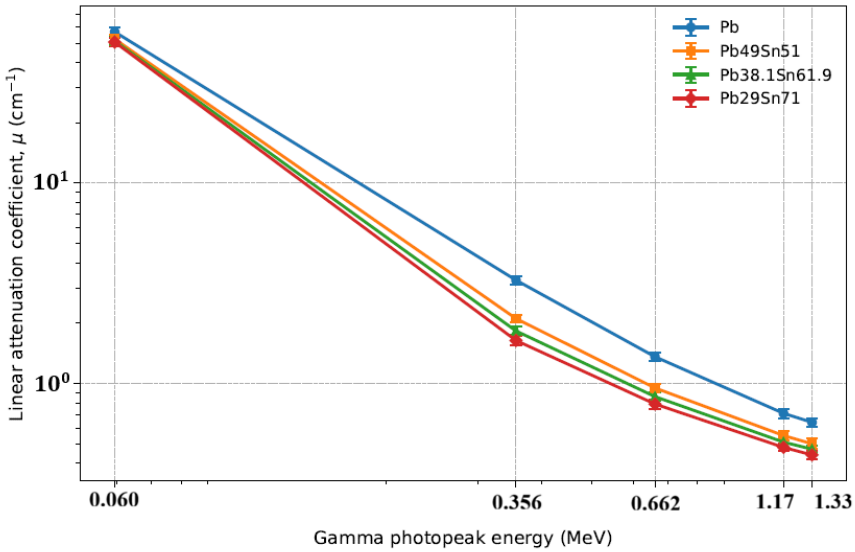
وعند المقارنة بين المواد، حافظ الرصـــاص النقي على أعلى قيم لمعامل التوهين الخطي وأصغر قيم لسماكة النصف عند جميع الطاقات المدروسة، بينما أظهرت الخلائط انخفاضاً تدريجياً في (μ) وارتفاعاً في (HVL) مع انخفاض نسبة الرصاص. ويرتبط هذا التغير في معاملات التوهين أيضاً بانخفاض العدد الذري الفعال والكثافة للخلائط مع زيادة

نسبة القصدير، إذ تزداد كفاءة امتصاص الفوتونات عموماً مع زيادة العدد الذري للمادة، ولا سيما في مجال الطاقات المنخفضة إذ يهيمن التأثير الكهروضوئي.

فعلى سبيل المثال عند الطاقة $(0.662\ MeV)$ انخفض (μ) من $(1.36\ cm^{-1})$ للرصاص إلى $(0.86\ cm^{-1})$ للخليطة $(Pb_{38.1}Sn_{61.9})$، أي بانخفاض يقارب $(\approx 37\%)$، في حين ارتفعت (HVL) من $(0.50\ cm)$ إلى $(0.80\ cm)$، ما يشير إلى الحاجة إلى سماكة أكبر لتحقيق مستوى توهين مماثل.

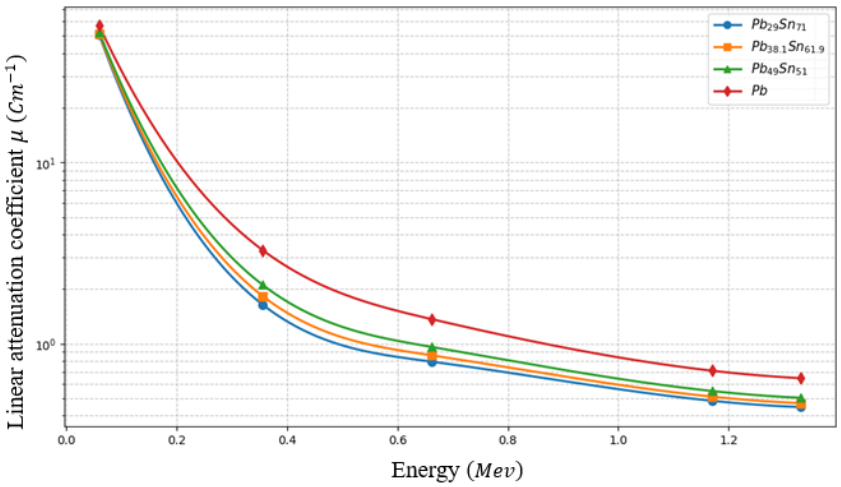
كما يُلاحظ أن الفروقات بين المواد تقل نسبياً عند الطاقات الأعلى مثل $(1.33\ MeV)$ إذ تصبح قيم (μ) أقرب بين المواد المدروسة $(0.64\ cm^{-1})$ للرصاص مقابل $(0.47\ cm^{-1})$ للخليطة $(Pb_{38.1}Sn_{61.9})$، وهو ما يتسق مع هيمنة تشتت كومبتون في هذا المجال الطاقي.

ولتسهيل المقارنة البصرية، يوضح الشكل (5) تغير معامل التوهين الخطي (μ) مع طاقة غاما للرصاص والخلائط المدروسة مع تمثيل أشرطة الخطأ، إذ يؤكد بوضوح الاتجاه المنتظم لانخفاض (μ) مع ازدياد الطاقة وترتيب المواد وفق محتوى الرصاص.



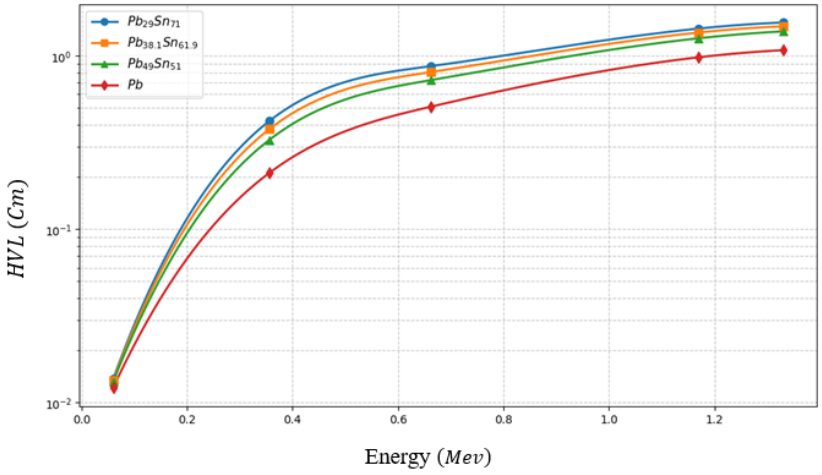
الشكل (5) تغير معامل التوهين الخطي (μ) مع طاقة قمم أشعة غاما للرصاص وخلائط $(Pb-Sn)$، تمثل أشرطة الخطأ عدم اليقين التجريبي لقياسات غاما $(n=5)$

كما يُبيّن الشكل (6) التغيّر في معامل التوهين الخطي (μ) بدلالة طاقة أشعة غاما، إذ يظهر التناقص التدريجي في قيم (μ) نتيجة انتقال آليات التفاعل المسيطرة من التأثير الكهروضوئي إلى تشتت كومبتون مع زيادة الطاقة.



الشكل (6) تغيّر معامل التوهين الخطي (μ) بدلالة طاقة أشعة غاما

في المقابل، يوضّح الشكل (7) العلاقة بين سماكة النصف (HVL) وطاقة الإشعاع، إذ تزداد قيم (HVL) مع ازدياد الطاقة لجميع المواد المدروسة، نتيجة انخفاض احتمال التفاعل الإشعاعي للفوتونات مع المادة عند الطاقات الأعلى، مما يتطلب سماكات أكبر لتحقيق مستوى التوهين نفسه.



الشكل (7) تغيّر سماكة النصف (HVL) بدلالة طاقة أشعة غاما

وعلى الرغم من أن الرصاص النقي يمتلك أقل قيم (HVL)، فإن الخليطة $(Pb_{38.1}Sn_{61.9})$ تُظهر قيم (HVL) أعلى عبر مجال الطاقات المدروسة (أي تتطلب سماكة أكبر لتحقيق نفس التوهين)، وهو فرق يمكن تعويضه تصميمياً بزيادة السماكة عند الحاجة. وبالتزامن مع انخفاض درجة الانصهار وتقليل محتوى الرصاص (كمؤشر تقريبي لتقليل المخاطر السمية المحتملة)، يمكن عدّ هذه الخليطة خياراً متوازناً ضمن شروط الدراسة من حيث الجمع بين الأداء الإشعاعي المقبول والخصائص الفيزيائية المناسبة للتطبيقات العملية.

7- الخلاصة:

يهدف هذا البحث إلى تقييم بعض الخواص الإشعاعية والحرارية لخلائط $(Pb-Sn)$ منخفضة الانصهار ودراسة إمكاناتها كمواد تدريع لأشعة (X) وأشعة غاما ضمن مجالات طاقية مختلفة.

أظهرت النتائج أن معامل التوهين الخطي (μ) وسماكة النصف (HVL) يعتمدان بوضوح على طاقة الفوتون والتركيب الكيميائي للخليطة، بما يتوافق مع آليات التفاعل الفيزيائي المعروفة بين الفوتونات والمادة. فعند طاقة الأشعة السينية $(18.5\ keV)$ سجّلت الخلائط الأعلى محتوى من الرصاص قيماً أكبر لمعامل التوهين (μ) وأصغر لقيم (HVL)، نتيجة سيطرة التأثير الكهروضوئي في هذا المجال الطاقي. أما في مجال أشعة غاما المدروس $(1.33 - 0.06\ MeV)$، فقد تناقصت قيم (μ) مع زيادة الطاقة لجميع المواد المدروسة وازدادت قيم (HVL)، وهو سلوك يتوافق مع هيمنة تشتت كومبتون ضمن هذا المجال الطاقي.

وبالمقارنة مع الرصاص النقي، انخفضت قيم (μ) للخلائط بنحو $(25 - 40\%)$، في حين ازدادت قيم (HVL) بنحو $(20 - 35\%)$ عبر الطاقات المدروسة، وهو فرق يمكن تعويضه تصميمياً بزيادة السماكة عند الحاجة لتحقيق مستوى توهين مماثل.

تشير النتائج إلى أن الخليطة $(Pb_{38.1}Sn_{61.9})$ تمثل خياراً متوازناً ضمن شروط الدراسة، إذ تجمع بين مؤشرات تدريع قابلة للتعويض هندسياً مقارنةً بالرصاص

وميزة حرارية واضحة تتمثل بانخفاض درجة الانصهار، إضافةً إلى خفض محتوى الرصاص بوصفه مؤشراً تقريبياً لتقليل المخاطر السمية المحتملة. ومع ذلك، فإن تقييم الجدوى التطبيقية لهذه الخلائط يتطلب دراسات إضافية تشمل الخواص الميكانيكية ومقاومة التآكل واختبارات تطبيقية أكثر شمولاً، بما في ذلك دراسة الاستقرار تحت ظروف تشغيل طويلة الأمد.

وتشير النتائج بصورة عامة إلى أن خلائط $(Pb-Sn)$ منخفضة الانصهار تمثل مواد مرشحة لتطبيقات التدريع الإشعاعي ضمن مجال الطاقات المنخفضة والمتوسطة المدروس.

References

1- World Health Organization. (2024). Lead poisoning and health [Fact sheet]. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health.
2- Zamel, T. (2004). Preparation of lead-free solder alloys and study of their properties (PhD thesis). University of Aleppo, Faculty of Science, Department of Physics.
3- United States Geological Survey. (2024). Mineral commodity summaries 2024. https://www.usgs.gov
4- National Institute of Standards and Technology. (n.d.). X-ray mass attenuation coefficients. https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef
5- National Institute of Standards and Technology. (n.d.). XCOM: Photon cross sections database. Retrieved March 6, 2026, from.
6- Attix, F. H. (1986). *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. New York: John Wiley & Sons.
7- Knoll, G. F. (2010). Radiation detection and measurement (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
8- Meli, J., & Nath, R. (1985). Choice of material for HVL measurements in megavoltage X-ray beams. Medical Physics, 12(1), 108–110. https://doi.org/10.1118/1.595728
9- Hubbell, J. H. (1999). Review of photon interaction cross-section data in the medical and shielding energy regions. Physics in Medicine & Biology, 44(1), R1–R22. https://doi.org/10.1088/0031-9155/44/1/001
10- AbuAlRoos, N. J., Baharul Amin, N. A., & Zainon, R. (2019). Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: A review. Radiation Physics and Chemistry, 165, 108439. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108439
11- Smentkowski, S. (2002). 99.9% attenuation of 120 keV X-rays: Elemental materials technical information. National Institute of Standards and Technology. https://physics.nist.gov
12- Kleine, T., & Ostmann, K. (2007). A new shielding effectiveness measurement method based on a skin-effect transmission line coupler. Advances in Radio Science, 5, 37–42. https://doi.org/10.5194/ars-5-37-2007.
13- Kaur, S., Kaur, A., Singh, P. S., & Singh, T. (2016). Scope of Pb–Sn binary alloys as gamma rays shielding material. Progress in Nuclear Energy, 93, 277–286. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.08.022

14- Rani, N., Vermani, Y. K., & Singh, T. (2020). Gamma radiation shielding properties of some Bi–Sn–Zn alloys. Journal of Radiological Protection, 40(1), 296–310. https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab6aaf
15- Saleh, A., Almohiy, H., Rizk, M., & Shalaby, M. (2023). Comprehensive investigation on physical, structural, mechanical and nuclear shielding features against X/gamma-rays, neutron, proton and alpha particles of various binary alloys. Radiation Physics and Chemistry, 216, 111443. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111443
16- Saleh, A., Mansour, F. E., & Abdelhakim, N. A. (2024). An appropriate balance of mechanical and ionized radiation shielding performance across some tin binary alloys: A comparative investigation. Radiation Physics and Chemistry, 221, 111726. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111726
17- Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K. B., & Leving, H. (2004). WinXCom: A program for calculating X-ray attenuation coefficients. Radiation Physics and Chemistry, 71, 653–654. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.04.040
18- Ghorabie, F. (2005). Computer modeling of megavoltage X-rays transmission through some shielding materials used in radiotherapy. Umm Al-Qura University Journal of Science, Medicine and Engineering, 17(2), 137–153.
19- National Nuclear Data Center. (n.d.). NuDat 3 database. Brookhaven National Laboratory. Retrieved March 5, 2026, from https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/
20- International Atomic Energy Agency. (n.d.). LiveChart of Nuclides. Retrieved March 5, 2026, from https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html
21- Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement* (4th ed.). John Wiley & Sons.

الملاحق

الملحق (A)

يبيّن الجدول (A1) طاقات القمم الفوتونية والشدّات النسبية للمصادر المشعة التي استُخدمت في هذه الدراسة، وذلك لاعتمادها في تحليل الأطياف وتفسير نتائج التوهين الإشعاعي [19–20].

Source	Radiation	Photon energy (keV)	Emission probability (%)	Reference
Am-241	γ (photopeak)	59.5	35.9	NNDC/ENSDF (NuDat 3)
Ba-133	γ (photopeak)	356.0	62.0	NNDC/ENSDF (NuDat 3)
Cs-137	γ (photopeak)	661.7	85.1	IAEA LiveChart of Nuclides
Co-60	γ (photopeak)	1173.2	99.9	IAEA LiveChart of Nuclides
Co-60	γ (photopeak)	1332.5	99.9	IAEA LiveChart of Nuclides

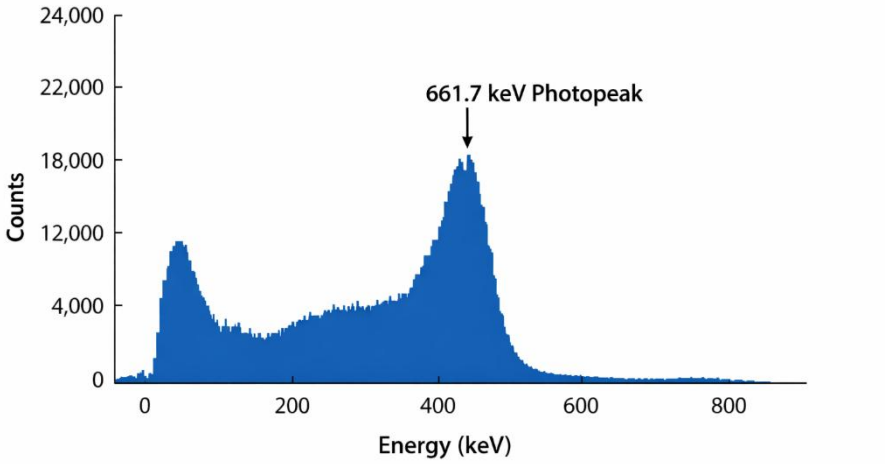
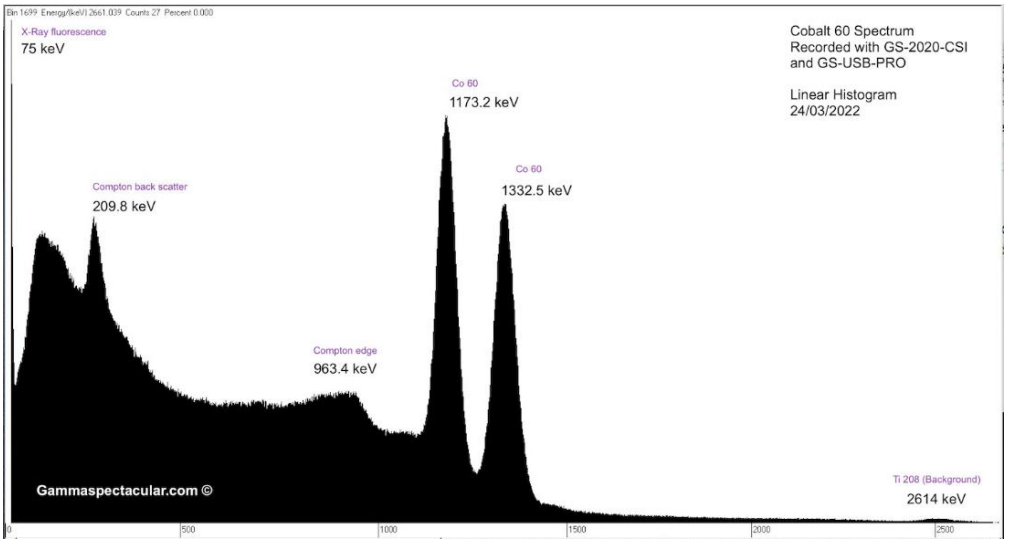


Figure A1. *Spectrum for ^{137}Cs source using NaI(Tl) detector.*

الشكل (A1) طيف طاقة أشعة غاما النموذجي لمصدر (^{137}Cs)

يُظهر ذروة الفوتون عند ($661.7\ keV$) المستخدمة في تحليل التوهين [21].



الشكل (A2) طيف طاقة أشعة غاما النموذجي لمصدر (^{60}Co)

يُظهر ذروة الفوتون عند ($1173.2\ keV - 1332.5\ keV$) المستخدمة في تحليل التوهين [21].