مجلة الدراسات التربوية والعلمية - كلية التربية - الجامعة العراقية
العدد السابع والعشرون - المجلد التاسع - علوم الفيزياء - نيسان 2026 م
doi.org/10.52866/esj.2026.09.27.11

# التحديد التجريبي لمعاملات التوهين لأشعة كاما لمواد مكافئة للأنسجة

عبد الواحد احمد عناز[1*] ، محسن حسن علي[2]
1 و 2 . قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة تكريت، تكريت، العراق.
* البحث مستل من رسلة ماجستير الباحث الأول
الايميل: AWAueps82@st.tu.edu.iq

**مستخلص:**

تم إيجاد معاملات التوهين لاشعة كاما لعينات محضرة من رانتج الايبوكسي المدعم بكلوريد البوتاسيوم (KCl) وبدرجة حرارة الغرفة C°(25)، باستخدام طريقة القالب المفتوح وهو قالب دائري الشكل نصف قطره (2.9) cm وارتفاع (0.5) cm وبحجم ثابت $cm^3$ (13.2)، اذ تم دراسة تأثير إضافة كلوريد البوتاسيوم (KCl) بكسور وزنية مختلفة wt٪(14،12،10،8،6،4،2،0)، على معاملات التوهين لأشعة كاما، كذلك تم استخدام منظومة كاشف ايوديد الصوديوم المطعم بالثاليوم NaI (TI) 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 معامل التوهين الخطي والكتلي ومعدل المسار الحر، وان افضل نتيجة تم الحصول عليها لتمثيل الانسجة المكافئة هي للعينة التي كانت نسبة التدعيم لها بكلوريد البوتاسيوم (KCl) (10)٪، حيث ان الاختلاف كان اقل من (7) ٪ بالمقارنة مع بيانات اللجنة الدولية للوحدات والقياسات الاشعاعية (ICRU-44)، وهذا يؤكد مدى إمكانية استخدام هذه المواد كأنسجة مكافئة للاستخدام في المجالات الاشعاعية والبيولوجية.

**الكلمات المفتاحية:** معاملات التوهين، اشعاع كاما، الأنسجة المكافئة، كلوريد البوتاسيوم .(KCl) .

## Experimental determination of gamma ray attenuation coefficients for tissue-Equivalents materials

Abdulwahid Ahmed Anaz[1*] , Mohsin Hassan Ali [2]
[1,2] Department of Physics, College of Education for Pure Sciences, Tikrit University, Tikrit, Iraq.
Email: AWAueps82@st.tu.edu.iq

**Abstract :**

The gamma-ray attenuation coefficients of samples prepared from potassium chloride (KCl)-doped epoxy resin at room temperature (25°C) were determined using the open-mold method. The open-mold was a circular mold with a radius of 2.9 cm, a height of 0.5 cm, and a constant volume of 13.2 $cm^3$. The effect of adding potassium chloride (KCl) at different weight fractions (wt% 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, and 14%) on the gamma-ray attenuation coefficients was investigated. Additionally, a thallium-doped sodium iodide (NaI(-TI)) detector system with a crystal size of (1.5 × 1.5) was used to analyze the gamma-ray spectra emitted from point radioactive sources: americium-$^{241}Am$ (60 KeV, 74 KBq) and cesium-$^{137}Cs$ (74 KBq). (662) KeV with a radioactive decay of (400) KBq and radium ($^{226}Ra$) at energies of (186, 242, 295, 352, 609) KeV with a radioactive decay of (74) KBq. The distance between the radioactive source and the detector was (15) cm, and the sample to be analyzed was placed between them. The spectral collection time was fixed at (900) sec for all obtained spectra. The intensity of gamma-ray photons was used to determine the net area of photopeaks in the resulting gamma-ray spectrum, and from this, the linear and mass attenuation coefficients and the free path rate were determined. The best result obtained for representing equivalent tissues was for the sample with a potassium chloride (KCl) reinforcement percentage of (10%), as the difference was less than (7%) compared to the data of the International Committee of Units. Radiometric measurements (ICRU-44) confirm the extent to which these materials can be used as equivalent tissues for use in radiological and biological fields.

**Keywords:** attenuation coefficients, gamma radiation, equivalent tissues, potassium chloride (KCl).

## 1-المقدمة:

يُعد تطوير المواد المكافئة للأنسجة (tissue-equivalent materials) عنصرًا أساسيًا في إنتاج المجسمات المستخدمة في قياس جرعات الإشعاع ومعايرتها ضمن تطبيقات التصوير الطبي [1]. ويتم تصنيع هذه المواد من تركيبات كيميائية متعددة [2] بحيث تمتلك سلوكًا إشعاعيًا مشابهًا لما تظهره الأنسجة البشرية عند تعرضها للإشعاع المؤين (ionizing radiation). ولتحقيق هذا التشابه، ينبغي أن تتوافق خصائص التوهين الإشعاعي للمواد المكافئة مع خصائص الأنسجة المستهدفة تحت الظروف نفسها. إن الإلمام الدقيق بالخصائص الفيزيائية وآليات التفاعل الإشعاعي لهذه المواد يُعد شرطًا أساسيًا لضمان إنتاج مواد مكافئة عالية الدقة [3]. وتُستخدم حاليًا أصناف متعددة من المواد التي تحاكي الأنسجة البشرية بهدف تقدير جرعات الإشعاع المؤين الممتصّة من قبل المرضى، ويُطلق عليها عمومًا اسم المواد المكافئة للأنسجة. وقد أصبح استخدامها واسع الانتشار في مجالات الفيزياء الطبية، بما في ذلك الأشعة التشخيصية والطب النووي والعلاج الإشعاعي [4-6].

تم استخدام البولي إيثيلين كمادة مكافئة للأنسجة في التصوير الطبي [2،7]. ومع ذلك، فإن البولي إيثيلين باهظ الثمن، وله احتمالية عالية للتشقق الإجهادي وصعوبة الالتصاق. وقد صنع جونز وآخرون مواد مكافئة للأنسجة لمحاكاة الأنسجة الرخوة والرئة والعظام لدى حديثي الولادة والأطفال والبالغين لإجراءات فحص التصوير المقطعي المحوسب. وقد قورنت هذه المواد بالمواد القياسية الموجودة في تقرير (ICRU-44)[4].

ان تقرير (ICRU-44) يجمع نتائج دراسات مختلفة حول خصائص تفاعل الإشعاع للمواد المكافئة للأنسجة مع الإشعاع المؤين. يعرض التقرير معاملات التوهين الكتلي، بالإضافة إلى كميات أخرى من بدائل الأنسجة في قياس جرعات الإشعاع وقياس طاقة الأشعة السينية التي تتراوح بين (1)KeV و(50)MeV[8].

يُعرف معامل التوهين الكتلي بأنه مقياس لقدرة المادة على امتصاص أو تشتيت الإشعاع الكهرومغناطيسي في أي وحدة كتلة. تم حساب معامل التوهين الكتلي الكلي من خلال طاقة الفوتون والعناصر المكونة للمادة [9،10]. يصف معامل التوهين الخطي جزء حزمة الأشعة السينية أو أشعة جاما التي يتم امتصاصها أو تشتيتها لكل وحدة سمك من الممتص. ويُستخدم قانون بير-لامبرت لقياس معامل توهين أشعة جاما باستخدام طريقة النقل القياسية ذات هندسة الحزمة الظيقة [9]. في هذه الدراسة، تم تحديد معاملات التوهين الكتلي والخطي ومعدل المسار الحر للمواد المركبة من راتنج الايبوكسي والكبريت عند طاقات كاما مختلفة.

## 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-لامبرت[11] :

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

حيث I هي شدة الشعاع الموهن؛ و $I_0$ هي شدة الشعاع الأصلية؛ و($x$=0.5cm) هي سمك المادة

الموهنة؛ و $\mu_l$ 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 ($\mu_m$) يمثل معدل تفاعلات الفوتونات ضمن وحدة واحدة من الكتلة لكل وحدة مساحة ($cm^2/g$) ، والذي يعطى بالمعادلة التالية[11]:

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

حيث $\rho$ هي كثافة المادة؛ I هي شدة الشعاع الموهن؛ و $I_0$ هي شدة الشعاع الأصلية؛ و($x$=0.5cm) هي سمك المادة الموهنة.

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 ($\mu_l$) هو معامل التوهين الخطي ($cm^{-1}$).

كذلك تم مقارنة نتائج الدراسة الحالية مع تقرير (ICRU-44) حيث تم استخدام المعادلة التالية لايجاد نسبة الاختلاف بي نتائج الدراسة الحالية ونتائج تقرير(ICRU-44)[13]:

$$(\Delta)\% = \mu_m \text{ (ICRU-44)} - \mu_m \text{ (Exp) x}$$
$$\mu m \text{ (ICRU-44) x100(0.0.1)} \qquad (4)$$

(Δ)٪ النسبة المئوية للاختلاف؛ $\mu_m$ (ICRU-44) معامل التوهين الكتلي لتقرير(ICRU-44)؛ $\mu_m$ (Exp) معامل التوهين الكتلي للدراسة الحالية.

## 3- طريقة العمل:

ولتحضير العينات تم استخدام طريقة القالب المفتوح حيث أنها من الطرق الشائعة والسهلة والناجحة في تحضير المركبات البوليمرية، وتم استخدام قوالب بلاستيكية دائرية نصف قطرها (2.9)cm وارتفاعها (0.5)cm وبحجم ثابت (13.2)$cm^3$ تقريبا، والتي تم تنظيفها مسبقاً ووضع شمع البارافين فيها لتسهيل عملية فصل العينات ومنع التصاقها بالبلاستيك، ولتحضير العينة غير المدعمة وللوصول لمرحلة التجانس تم خلط راتنج الايبوكسي من نوع (siKadur-52 LP) والذي تبلغ كثافته (1.06) $g/cm^3$ ببطء بسرعة دوران (250).r.p.m باستخدام خلاط محمول من نوع (P.L.A.) صيني المنشأ مع المصلب بنسبة خلط (1:2) وحسب الكمية المطلوبة لمقاسات القالب، ثم تم سكبه بهدوء في القالب وتركه بدرجة حرارة الغرفة حتى يتصلب حيث يستغرق تصلب العينة الواحدة (24)h وبعد تصلب العينات يتم فصلها عن القالب وتصبح جاهزة. وبعد ذلك تم تحضير العينات من راتنج الايبوكسي المدعم بكلوريد البوتاسيوم (KCl) حيث تم اضافة كلوريد البوتاسيوم (KCl) المنتج من قبل شركة (EDU TEK) والذي تبلغ كثافته (1.98) $g/cm^3$ الى الايبوكسي بنسب وزنية (0,2,4,6,8,10,12,14)٪wt حيث تم استخدام ميزان حساس بدقة (0.01)mg لوزن العينات وهو من نوع (Adapter) ياباني المنشأ لوزن المادة الاساسية وهي راتنج الايبوكسي والمادة الداعمة جسيمات المغنيسيوم النانوية (Mg Nps) وتم حساب كتلة العينات باستخدام المعادلة

التالية[14]:

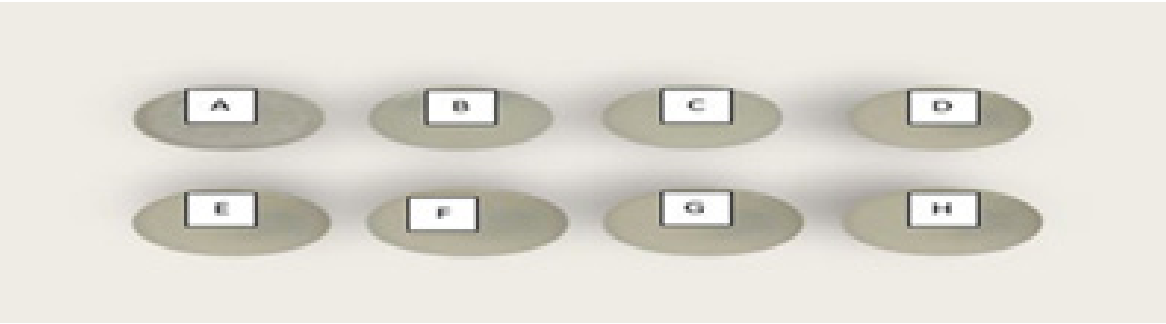
$$m_s = V_s x \rho_{sample} \quad (4)$$

حيث ان: $\rho_{sample}$ كثافة العينة، $m_s$: كتلة العينة، Vs: حجم العينة.

حيث بلغ العدد الإجمالي للعينات المحضرة (8) عينات. وقد أشير إلى العينات بالعينات من (A) إلى (H)، وقد تم إعداد هذه العينات لمحاكاة أنسجة العظام، وكل عينة تحتوي على كميات متفاوتة من كلوريد البوتاسيوم (KCl) وراتنج الإيبوكسي، ويوضح الجدول (1) النسبة المئوية لكلوريد البوتاسيوم (KCl) وكذلك الكثافة في كل عينة والشكل (1) يوضح العينات المحضرة من (A-H).

الجدول(1): النسبة المئوية لكلوريد البوتاسيوم (KCl) في كل عينة.

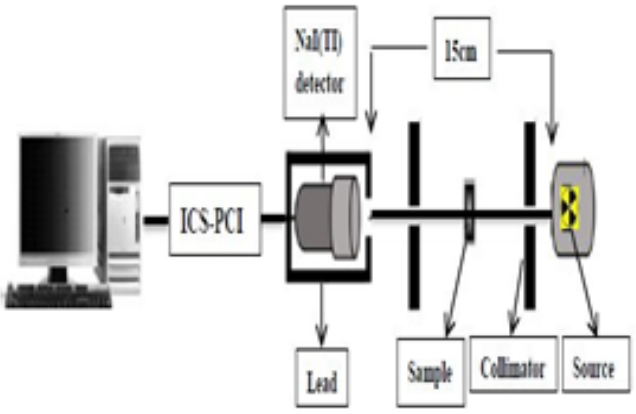
| sample | Epoxy resin | Percentage of Epoxy (%) resin | Potassium chloride ((KCl | Percentage of Potassium chloride (KCl (%) | Mass of composites(g | Density of composites (g/cm$^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | Epoxy | 100 | (KCl) | 0 | 14 | 1.06 |
| B | Epoxy | 98 | (KCl) | 2 | 14.2348 | 1.0784 |
| C | Epoxy | 96 | (KCl) | 4 | 14.4777 | 1.0968 |
| D | Epoxy | 94 | (KCl) | 6 | 14.7206 | 1.1152 |
| E | Epoxy | 92 | (KCl) | 8 | 14.9635 | 1.1336 |
| F | Epoxy | 90 | (KCl) | 10 | 15.2064 | 1.152 |
| G | Epoxy | 88 | (KCl) | 12 | 15.4492 | 1.1704 |
| H | Epoxy | 86 | (KCl) | 14 | 15.6921 | 1.1888 |



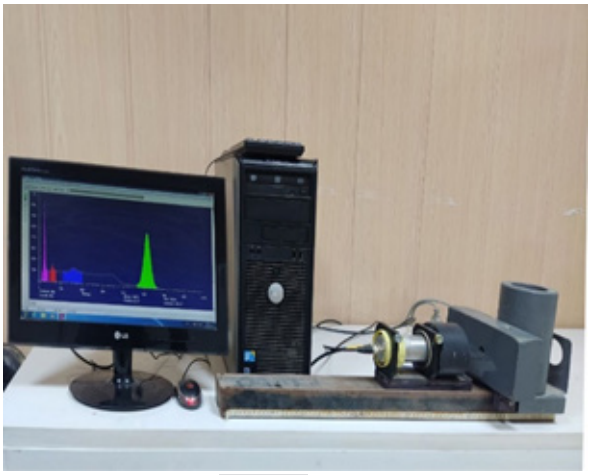

الشكل (1): يوضح الشكل صورة العينات المكافئة للأنسجة التي تم تحضيرها A، B، C، D، E، F، G، و. H

**2.2.2. القياسات**

ان الكاشف المستخدم في هذا العمل هو مستشعر الاشعاع (LLCHARVEST AL35749 PHEWY)، وذا أبعاد ("1.5×"1.5) أي(3.81x3.81 cm) موديل(S6P1.5VD)، تم تصميم الكاشف الوميضي (6S6P1.5VD) ليكون كاشف الأشعة السينية وأشعة كاما وكذلك هو متعدد الاستخدامات والملائم للعديد من التطبيقات. ولتحليل أطياف اشعة كاما المنبعثة من المصادر المشعة النقطية والمستخدمة في هذا البحث وهي الامريشيوم ($^{241}$Am) بطاقة (59.6) 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) وذلك من خلال نظام قياس مطيافية أشعة كاما المتكامل بالكمبيوتر (I.C.S.) ويتم تشغيل النظام بواسطة الكمبيوتر وفق برنامج معد لهذا الغرض، ويوضح الشكل (2) المخطط التجريبي للمنظومة المستخدمة لقياس مطيافية اشعة كاما، حيث يحتوي النظام على مكبر أولي ومكبر رئيسي مزود بالكاشف الوميضي (NaI(TI)) ومحلل متعدد القنوات، ويرتبط هذا النظام بجهاز كمبيوتر لدقة تشغيله وقراءة قياساته وتحليل النتائج، وتم الحصول على شعاع ضيق من أشعة جاما حيث تم استخدام مسدد من الرصاص مستطيل الشكل ابعاده cm(20×10×5)، يمر من خلاله الأشعة القادمة من المصدر المشع، وكان قطر الفتحة المارة من خلالها الاشعة mm(15).




(a)



(b)

الشكل (2): يوضح الشكل
(a)- المخطط التجريبي للمنظومة المستخدمة (b)- صورة للمنظومة العملية المستخدمة لقياس مطيافية اشعة كاما.

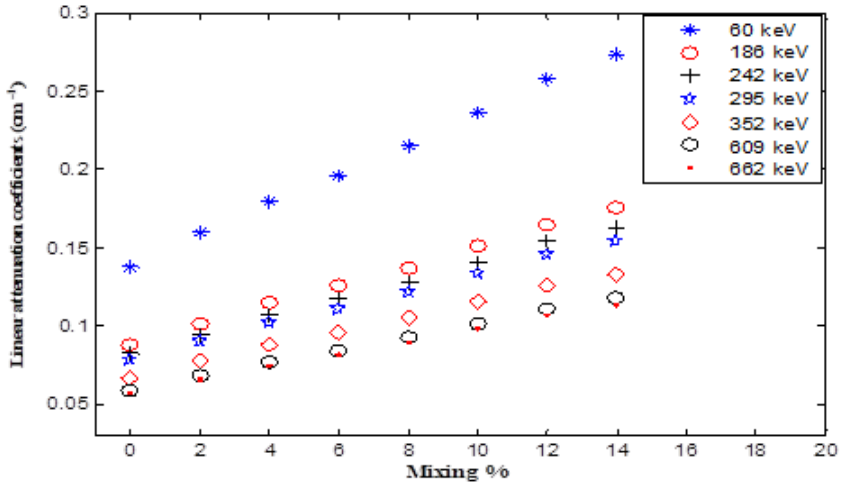
## 4- النتائج والمناقشة:

### 4-1 معامل التوهين الخطي

تم إيجاد معامل التوهين الخطي ($\mu_l$) 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 كلوريد البوتاسيوم (KCl) إلى مادة راتنج الإيبوكسي كما في الشكل (3). 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 كلوريد البوتاسيوم (KCl) المضافة داخل مادة راتنج الإيبوكسي مما يؤدي إلى زيادة كثافة المادة المحضرة بشكل عام وبالتالي يحدث زيادة في توهين أشعة جاما وبالتالي يزداد معامل التوهين الخطي. كما يلاحظ أن مادة راتنج الإيبوكسي وحدها لا تكفي لاستخدامها كمادة بديلة للأنسجة، ولكن عند إضافة مادة التدعيم (كلوريد البوتاسيوم (KCl)) إليها يصبح من الممكن استخدام مادة راتنج الإيبوكسي كمادة بديلة للأنسجة، وهذا السلوك يتوافق مع ما توصل إليه الباحث[4].

الجدول (2): النتائج التجريبية لمعامل التوهين الخطي لراتنج الايبوكسي المدعم بكلوريد البوتاسيوم (KCl).

| sample | E(KeV) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 60 | 186 | 242 | 295 | 352 | 609 | 662 |
| | $^{241}Am$ | $^{246}Ra$ | | | | | $^{137}Cs$ |
| | $\mu_l$ | | | | | | |
| A | 0.1378 | 0.088234 | 0.082469 | 0.078385 | 0.067089 | 0.058982 | 0.057185 |
| B | 0.15961 | 0.10148 | 0.094532 | 0.090154 | 0.078052 | 0.068315 | 0.066225 |
| C | 0.17987 | 0.11481 | 0.10667 | 0.10199 | 0.08775 | 0.077021 | 0.074642 |
| D | 0.19628 | 0.12599 | 0.11713 | 0.11092 | 0.09572 | 0.083744 | 0.081441 |
| E | 0.21538 | 0.13723 | 0.12765 | 0.12213 | 0.10506 | 0.092517 | 0.089398 |
| F | 0.23639 | 0.15081 | 0.13999 | 0.13416 | 0.11534 | 0.10133 | 0.098088 |
| G | 0.25749 | 0.16448 | 0.15419 | 0.14551 | 0.12567 | 0.11086 | 0.10685 |
| H | 0.27342 | 0.17594 | 0.16311 | 0.15463 | 0.13334 | 0.1177 | 0.11346 |



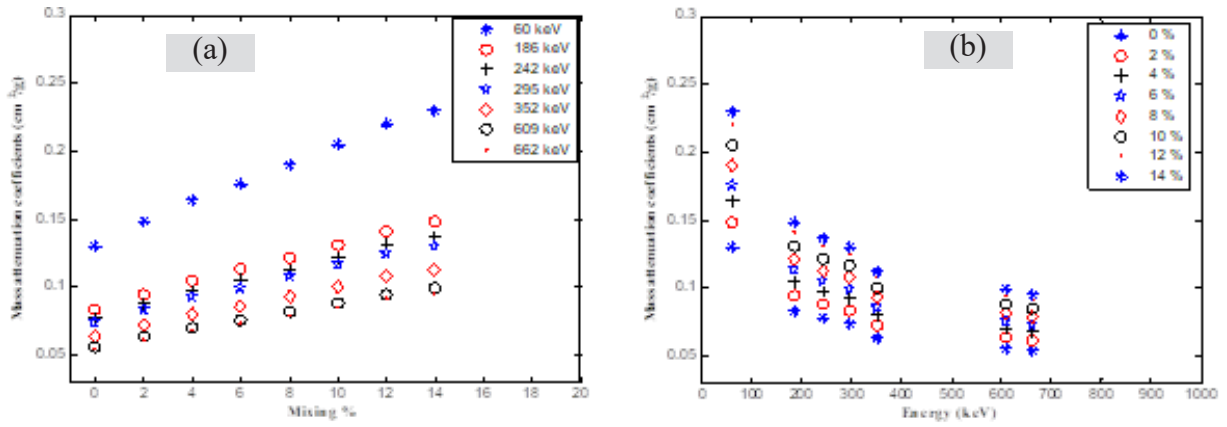

الشكل (3): اعتماد معامل التوهين الخطي على نسبة الخلط.

### 3.2. معامل التوهين الكتلي

تم إيجاد معامل التوهين الكتلي ($\mu_m$) 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 (4). 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 الكفاءة، يرجع 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].

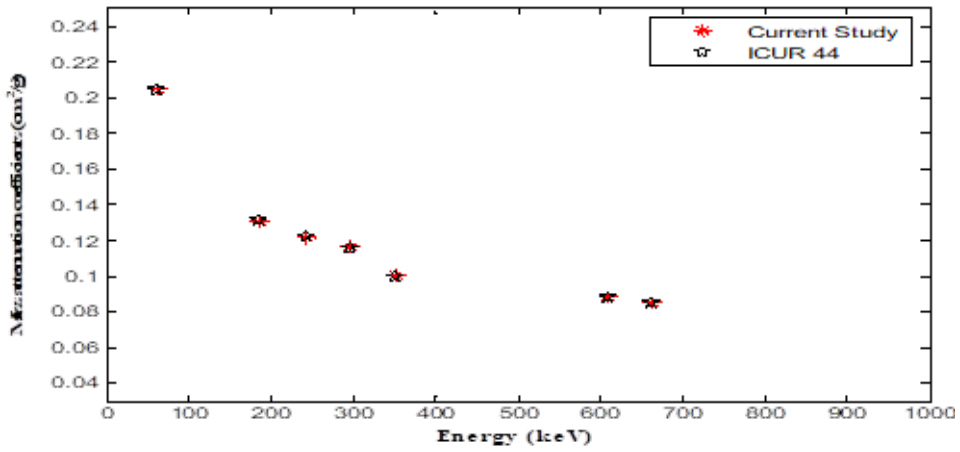
الجدول (3): النتائج التجريبية لمعامل التوهين الكتلي لراتنج الايبوكسي المدعم بكلوريد البوتاسيوم (KCl).

| sample | E(KeV) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 60 | 186 | 242 | 295 | 352 | 609 | 662 |
| | $^{241}$Am | $^{246}$Ra | | | | | $^{137}$Cs |
| | $\mu_m$ | | | | | | |
| A | 0.13 | 0.083239 | 0.077801 | 0.073948 | 0.063291 | 0.055643 | 0.053949 |
| B | 0.148 | 0.094101 | 0.08766 | 0.0836 | 0.072378 | 0.063349 | 0.061411 |
| C | 0.164 | 0.10468 | 0.097255 | 0.092991 | 0.080006 | 0.070224 | 0.068054 |
| D | 0.176 | 0.11298 | 0.10503 | 0.09946 | 0.085832 | 0.075093 | 0.073028 |
| E | 0.19 | 0.12106 | 0.1126 | 0.10774 | 0.092677 | 0.081614 | 0.078862 |
| F | 0.2052 | 0.13091 | 0.12152 | 0.11646 | 0.10012 | 0.08796 | 0.085146 |
| G | 0.22 | 0.14053 | 0.13174 | 0.12432 | 0.10737 | 0.094722 | 0.09129 |
| H | 0.23 | 0.148 | 0.13721 | 0.13007 | 0.11216 | 0.099008 | 0.095442 |




الشكل (4): اعتماد معامل التوهين الخطي على (a)- نسبة الخلط و (b)- طاقة الفوتون الساقط.

تم مقارنة قيم معاملات التوهين الكتلي التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة مع قيم معاملات التوهين الكتلي لتقرير (ICRU-44)، وتبين أن أفضل اتفاق لهذه العينات مع تقرير (ICRU-44) كان للعينة ٪(10)، حيث أن الفروق بين قيم معاملات التوهين الكتلي لهذه العينة مع تقرير (ICRU-44) أقل من (7)٪، ويوضح الشكل (5) المقارنة بين قيم معاملات التوهين الكتلي، ولهذا السبب فإن دراسة خصائص التوهين للمواد المكافئة للأنسجة كدالة لطاقة الفوتون ضرورية للغاية عند استخدامها للأغراض العلمية وهي المعيار الأساسي لتحديد دقة تمثيل المادة للأنسجة المدروسة، حيث يتم تطبيق هذه المواد المكافئة للأنسجة في الأشعة التشخيصية. وتؤكد هذه النتيجة إمكانية استخدام راتنج الإيبوكسي مع كلوريد البوتاسيوم (KCl) كمواد مكافئة للأنسجة صالحة للعلاج والاستخدام في الطب النووي. جميع العينات المختارة هي مواد مكافئة للأنسجة ويمكن استخدامها في تصنيع مواد نسيجية مشابهة لخصائص الأنسجة البشرية والتي تحاكي تفاعل الإشعاع مع جسم الإنسان في العلاج والطب النووي.



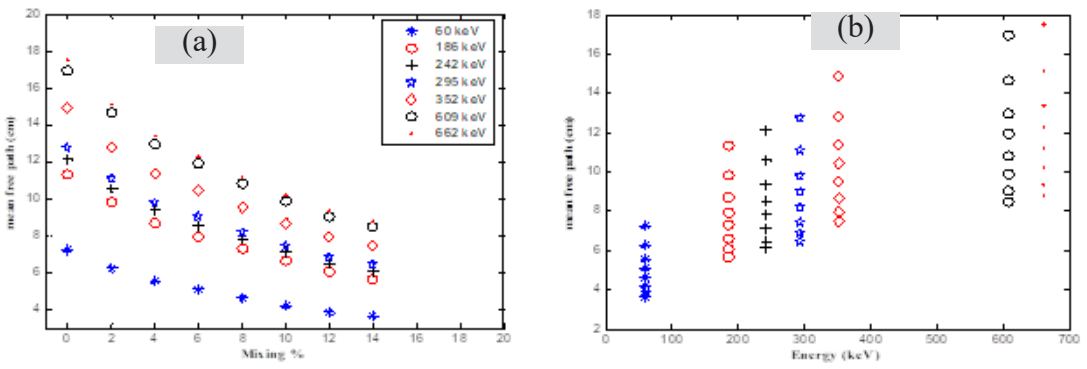

الشكل (5): تباين معاملات التوهين الكتلي للدراسة الحالية وتقرير (ICRU-44).

### 3.3. معدل المسار الحر

تم إيجاد معدل المسار الحر (λ) باستخدام المعادلة (3) لجميع العينات المحضرة والتي تم توضيح تفاصيلها في الجدول (1) ولطاقات وتراكيز وسمك ثابت، وقد تم تلخيص نتائج هذه القياسات التجريبية في الجدول (4). ونلاحظ من الجدول (4) أن قيم معدل المسار الحر للعينات تتغير مع تغير التركيز، حيث من الواضح أن هذه القيم تقل مع زيادة تركيز كلوريد البوتاسيوم (KCl) المضافة ولجميع الطاقات، ويمكن تفسير ذلك على أنه بزيادة تركيز مادة كلوريد البوتاسيوم (KCl) المضافة فإن عمليات التوهين فيها ستقل بسبب زيادة توزيع مادة التعزيز المضافة داخل المادة الأساسية مما يؤدي إلى زيادة كثافة المادة المحضرة بشكل عام وذلك لأن زيادة تركيز المادة المضافة تعمل على تحسين خصائص المادة الأساسية تجاه التوهين لأشعة كاما، كما يلاحظ من الجدول أن معدل المسار الحر يعتمد على طاقة الفوتون الساقط. كما تم رسم العلاقة بين معدل المسار الحر وكل من نسبة الخلط وطاقة الفوتون الساقط كما هو موضح بالشكل (6) ونلاحظ من هذا الشكل أن معدل المسار الحر يعتمد على كل من نسبة الخلط وطاقة الفوتون الوارد فهو يزداد بزيادة الطاقة ويرجع السبب إلى اختلاف آلية تفاعل أشعة جاما مع المادة حسب قيم الطاقة المستخدمة بينما يقل بزيادة نسبة الخلط وهذا يرجع إلى زيادة الكثافة[15].

الجدول (4): النتائج التجريبية لمعدل المسار الحر لراتنج الايبوكسي المدعم بكلوريد البوتاسيوم (KCl).

| sample | E(KeV) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 60 | 186 | 242 | 295 | 352 | 609 | 662 |
| | $^{241}Am$ | $^{246}Ra$ | | | | | $^{137}Cs$ |
| | λ | | | | | | |
| A | 7.2567 | 11.334 | 12.126 | 12.758 | 14.906 | 16.954 | 17.487 |
| B | 6.2654 | 9.8543 | 10.578 | 11.092 | 12.812 | 14.638 | 15.1 |
| C | 5.5595 | 8.7099 | 9.3748 | 9.8046 | 11.396 | 12.983 | 13.397 |
| D | 5.0949 | 7.937 | 8.5374 | 9.0157 | 10.447 | 11.941 | 12.279 |
| E | 4.6429 | 7.2868 | 7.834 | 8.1879 | 9.5185 | 10.809 | 11.186 |
| F | 4.2303 | 6.6309 | 7.1434 | 7.4537 | 8.6702 | 9.8688 | 10.195 |
| G | 3.8837 | 6.0799 | 6.4857 | 6.8726 | 7.9575 | 9.0201 | 9.3593 |
| H | 3.6574 | 5.6838 | 6.1308 | 6.4672 | 7.4997 | 8.4961 | 8.8136 |




الشكل (6): اعتماد معدل المسار الحر على (a)- نسبة الخلط و (b)- طاقة الفوتون الساقط.

### 5- الاستنتاجات:

بعد إجراء البحث، خلصنا إلى أن تركيبة ٪90 من راتنج الإيبوكسي و٪10 (كلوريد البوتاسيوم) هي التركيبة الأمثل لمحاكاة مكافئ الأنسجة البشرية. تم تقييم جميع العينات في هذا البحث بنجاح ضمن نطاق طاقة eV60–662 . وتبين أن معاملات التوهين الكتلي التجريبية للعينات وتقرير ICRU–44 متطابقتان بشكل جيد. يعزز هذا التطابق موثوقية النتائج ويؤكد إمكانية استخدام هذه المواد في التطبيقات الطبية والإشعاعية. على سبيل المثال، يمكن استخدام هذه المواد في تصميم الأشباح لضمان الجودة في العلاج الإشعاعي، حيث توفر محاكاة دقيقة للأنسجة البشرية. بالإضافة إلى ذلك، يدعم التطابق مع بيانات ICRU–44 استخدام هذه المواد في تطبيقات قياس جرعات الإشعاع، مما يجعلها مرشحة قوية للاستخدام في المجالات الطبية، مثل التصوير التشخيصي والعلاج الإشعاعي. يُوصى باستخدام العينة المختارة (F) من مواد مكافئة الأنسجة لإنشاء نماذج تحاكي تفاعل الإشعاع مع جسم الإنسان في الطب النووي والعلاجات.

### المصادر:

Saha GB (2006) Medical Physics and Radiobiology of Nuclear Medicine. Phys Rev 3: 56-190.

PodogorsacK EB (2005) Radiation Physics for Medical Physicists.

James E ParKs (2015) The compton effect, compton scattering and gamma rar spectroscopy.

J Weily and Sons, Krane KS (1988) Introductory Nuclear Physics (2nd edn) Krane-Kenneth-S.

Fano U. On the Theory of Ionization Yield of Radiation in Different Substances. Phy Review 70: 44-52.

Robert E Krebs (2006) The history and use of our earths chemical elements. Chem Rev 2: 114-117.

M Ragheb (2007) Radiation Physics (3rd edn) John Wiley and Sons.

NIST(National Institute of Standards and Technology). X-ray mass attenuation coefficients (2013).

Hubbell JH, Seltzer SM (1995) Tables of X-Ray of Mass attenuation coefficient and mass energy absorption coefficient 1 KeV to 20 MeV for elements Z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest.

Jones, AK, Hintenlang, DE and Bolch, WE 2003, 'Tissue-equivalent materials for construction of pediatric radiology', Medical Physics, vol. 30, pp. 2072-2081. doi:10.1118/1.159264.

I. Amini, P. AKhlaghi, and P. SarbaKhsh, "Construction and verification of a physical chest phantom from suitable tissue equivalent materials for computed tomography examinations," Radiat. Phys. Chem., vol. 150, pp. 51–57, 2018.

G. Apaza, F. Chen, and J. Vega, "Construction and characterization of materials equivalent to the tissues and organs of the human body for radiotherapy," Radiat. Phys. Chem., vol. 159, pp. 70–75, 2019.

H. Hasanzadeh and A. Abedelahi, "Introducing a simple tissue equivalent anthropomorphic phantom for radiation dosimetry in diagnostic radiology and radiotherapy," 2011.

D. R. White, J. Booz, R. V Griffith, J. J. SpoKas, and I. J. Wilson, "Tissue substitutes in radiation dosimetry and measurement," ICRU Rep., vol. 44, pp. 10–1093, 1989.

Sayyed MI. Half value layer, mean free path and exposure buildup factor for tellurite glasses with different oxide compositions. Alloy Compd. 2017; 695: 3191-3197.