مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية_ سلسلة العلوم الأساسية المجلد (9) العدد (3) 2025

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies –Basic Sciences Series Vol. (9) No. (3) 2025

# معايرة كاشف الأثر النووي CR-39 باستعمال المصدر النيتروني $^{241}Am$-$^{9}Be$ من أجل الأبعاد 1m، 2m، 3m، 3.4m بين الكاشف والمصدر النيتروني

أ.د.هيثم جبيلي*

أ. د. رياض محمد سعيد شويكاني**

د.م.أنس إسماعيل***

محمد حيدر أحمد****

(تاريخ الإيداع 27/ 8/ 2025 – تاريخ النشر 11/ 11/ 2025)

□ ملخّص □

قمنا في هذه العمل بمعايرة كاشف الأثر النووي CR-39 بأستخدام عشرة كواشف، وكاشفان للخلفية الطبيعية، لكل عملية قياس حيث تمت أربع عمليات قياس. استُخدم بكل عملية 12 كاشفاً بخطوة كاشفين لكل زمن تشعيع وكاشفين للخلفية الطبيعية. وبعد عمليات القياس، ولإظهار الآثار الكامنة باستخدام المجهر الضوئي، أُجريت عملية الحك الكيميائي للكواشف المشعة باستعمال محلول هيدروكسيد الصوديوم $6.25mol/l$ ودرجة حرارة $70^oC$ لمدة 7hr. وبحساب كثافة الآثار ورسم مستقيمات المعايرة، بعد الأخذ بعين الاعتبار الخلفية الطبيعية للنيترونات، تبين أن البعد 3m يوافق أفضل معامل ترابط $R^2 = 0.988$. وبالتالي كانت عملية القياس الموافقة للبعد 3m هي المعتمدة لمعايرة الكاشف CR-39. ونبين أننا قارنا قيمة معامل الترابط السابقة مع قيم معاملات ترابط مرجعية، فكانت قيمة معامل الترابط $R^2 = 0.988$ قريبة من أفضل قيمة مرجعية $R^2= 0.998$.

**الكلمات المفتاحية:** الكاشف CR-39، معامل الترابط، الخلفية الطبيعية، مصدر النيترونات النشط $^{241}Am$-$^{9}Be$.

*أستاذ– قسم الفيزياء– كلية العلوم– جامعة اللاذقية –اللاذقية– سوريا.

**مدير أبحاث لدى هيئة الطاقة الذرية السورية– دمشق– سوريا.

*** مدير أبحاث لدى هيئة الطاقة الذرية السورية – دمشق – سوريا.

****طالب دارسات عليا (دكتواره)– قسم الفيزياء– كلية العلوم–جامعة اللاذقية – اللاذقية–سوريا

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية_ سلسلة العلوم الأساسية المجلد (9) العدد (3) 2025

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies –Basic Sciences Series Vol. (9) No. (3) 2025

# Calibration of the CR-39 nuclear trace detector using a $^{241}$Am-$^{9}$Be neutron source for distances of 1m, 2m, 3m, and 3.4m between the detector and the neutron source

**Prof. Hytham Jibali***
**Dr. Riad Mohammed Saeed Shwankani****
**Dr. Anas Ismail*****
**Mohammad Haidar Ahmad******

**(Received 27/8/2025.Accepted 11/11/2025)**

□**ABSTRACT** □

To calibrate the CR-39 passive nuclear track detector, ten detectors and two natural background detectors were used for each measurement, with four measurements performed. Twelve detectors were used in each process, with two detectors per irradiation time and two detectors for the natural background. After the measurements, and to visualize the potential tracks using an optical microscope, the irradiated detectors were chemically etched using a 6.25 *mol/l* sodium hydroxide solution at 70°C for 7 hr. Calculating the track density and drawing calibration lines, taking into account the natural neutron background, revealed that the 3m distance corresponded to the best correlation coefficient, $R^2 = 0.988$. Therefore, the measurement process, Approval for 3m distance, was adopted for calibrating the CR-39 detector. We show that by comparing the previous correlation coefficient value with reference correlation coefficient values, the correlation coefficient value, $R^2 = 0.988$, was close to the best reference value, $R^2 = 0.998$.

**Keywords**: CR-39 detector, correlation coefficient, natural background, active neutron source $^{241}$Am-$^{9}$Be.

*Professor - Department of Physics - Faculty of Science - University of Latakia - Latakia, Syria .
**Research Director at the Syrian Atomic Energy Authority - Damascus, Syria
***Research Director at the Syrian Atomic Energy Authority - Damascus, Syria
****Graduate Student (PhD) - Department of Physics - Faculty of Science - University of Latakia - Latakia, Syria .

## 1ـ مقدمة Introduction

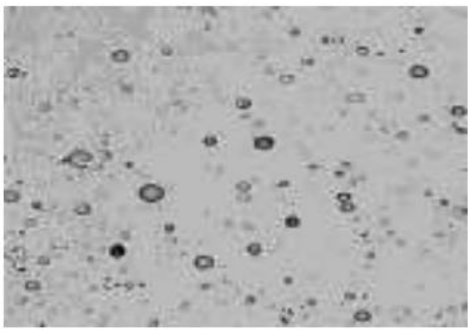
تقسم الكواشف الإشعاعية إلى كواشف فاعلة (Active) وكواشف منفعلة (Passive). أما الكواشف الفاعلة فهي تحتاج إلى مصدر كهربائي خارجي من أجل كشف الأشعة الواردة، بينما الكواشف المنفعلة لا تحتاج إلى مصدر كهربائي خارجي وإنما تعتمد بشكل مباشر على تفاعل الإشعاع الوارد عليها وتأثيرها على مادة الكشف.

يُعد كاشف الأثر النووي CR-39 الأداة المُفضّلة لقياس الإشعاع، نظراً لحساسيته العالية واستقراره الكيميائي وميزات التسجيل الدائم التي تلتقط آثار الجسيمات المشحونة. يخدم الكاشف تطبيقات متعددة، بدءاً من تقييم الإشعاع البيئي وصولاً إلى مراقبة السلامة النووية، كما يُسهم في أبحاث الفيزياء الطبية ومهام استكشاف الفضاء من خلال الكشف عن الأشعة الكونية. كَشفُ الأثر النووي بالحالة الصلبة (SSNTD) هو النظرية التي تقوم عليها آلية عمل جهاز CR-39. من خلال عملية SSNTD، تتحول كواشف CR-39 إلى أدوات تعرض آثار الجسيمات المرئية بعد تطبيق الحك الكيميائي. يفحص العلماء الآثار لتحديد نوع الإشعاع ومستوى طاقته ومستويات الجرعة. يعمل الكاشف بشكل مستقل دون الحاجة إلى مصادر طاقة أو مكونات إلكترونية، مما يجعله مثالياً للتتبع البيئي لفترات طويلة في البيئات النائية والقاسية [1-3].

يتم الكشف عن النيترونات من خلال بوليمر CR-39 بمساعدة مادة محوِّلة، نظراً لعدم امتلاك النيترونات شحنة كهربائية. عادةً ما تحتوي مواد محولات النيترونات على كلٍّ من البولي إيثيلين والبورون. تُولّد المواد المتفاعلة مع النيترونات جسيمات مشحونة مثل البروتونات وجسيمات ألفا، مما يُشكّل آثاراً مرئية على مادة CR-39. تتحرك الجسيمات المشحونة من مادة المحول عبر بوليمر CR-39، مُشكّلةً آثاراً كامنة تصبح مرئية بعد الحك. تعمل طريقة الكشف بشكل أفضل مع CR-39، لأن البوليمر لا يستطيع بمفرده اكتشاف النيوترونات.

تُعد طريقة الحك الكيميائي أساسية للكشف عن الآثار الخفية في مادة CR-39. يُغمر الكاشف في محلول كيميائي، عادةً هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) أو هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH)، والذي يزيل المادة التالفة بشكل انتقائي على طول آثار الجسيمات. تُنتج هذه العملية حفراً أو تجاويف فريدة يمكن رؤيتها تحت المجهر، كما هو موضح في الشكل (1) [1].

تُستخدم في كاشف CR-39 مصادر نيوترونية للمعايرة، بالإضافة إلى نظائر مشعة ألفا، بما في ذلك الأميرشيوم ـ241. تتم عملية المعايرة كما يلي:



**الشكل(1): الآثار الكامنة في كاشف CR-39.**

يستقبل الكاشف كمية محددة من الإشعاع من مصدر المعايرة. يتم تقييم استجابة الكاشف (مثل كثافة الأثر) ومقارنتها بالجرعة المعروفة. يتم إنشاء منحني معايرة، مما يتيح إجراء تقييمات دقيقة للجرعة في التجارب اللاحقة. المعايرة المنتظمة أمر بالغ الأهمية لمعالجة التقلبات في حساسية الكاشف والعوامل البيئية [1].

يُعد العلاج الإشعاعي أكثر التقنيات انتشاراً للسيطرة على السرطان وعلاجه، ولزيادة فعالية العلاج، تُستخدم المسرعات الخطية عالية الطاقة. وقد استُخدمت كواشف الأثر النووي ذات الحالة الصلبة (SSNTDs) CR-39 لدراسة تغيرات الشدة النسبية للنيترونات السريعة حول حزمة فوتون مسرع خطي (Varian 21EX) عالي الطاقة ( 23 MV) [2.3].

تتميز تقنية كواشف الأثر ذات الحالة الصلبة CR-39 بمزايا عديدة مقارنةً بالطرق الأخرى، مثل انخفاض تكلفة الاقتناء والصيانة، وعدم حساسيتها للضوء المرئي وأشعة جاما، وكفاءة كشف عالية، وتسجيل دقيق للأثر، واستقرار الكفاءة مع مرور الوقت، وإمكانية تمييز الآثار بفضل وجود البروتونات وجسيمات ألفا وشظايا الانشطار. بالإضافة إلى ذلك، يمكن تمييز الآثار المسجلة من نفس نوع الجسيم، ولكن بطاقات مختلفة [2.3].

برز التفاعل $^{11}B(p,\alpha)2\alpha$، الذي يتضمن اندماج بروتونات منخفضة الطاقة (p) مع نواة $^{11}B$، منتجاً ثلاث جسيمات ألفا $(\alpha)$، كبديل واعد أو طريق مكمل لتوليد طاقة نظيفة وفعالة. يتطلب الفهم الشامل لديناميكيات التفاعل، وتوزيع طاقة الجسيمات المنبعثة وتحسين كفاءة الاندماج، أساليب تشخيص دقيقة. ومن أجل ذلك تمت معايرة كاشف الأثر CR-39 باستخدام حزمتي الهيدروجين $^{1}H$ والهيليوم$^{2}He$ لتطبيقات تفاعل الاندماج $^{11}B(p,\alpha)2\alpha$ [2,4].

تمت معايرة كواشف الأثر ذات الحالة الصلبة CR-39، باستخدام بروتونات أحادية الطاقة، لدراسة تجريبية على التفاعل $^{2}H(d,p)^{3}H$ والذي يُعد أهم التفاعلات في عملية التوليد النووي للانفجار العظيم (BBN) [5].

ولدراسة مشكلة الليثيوم البدائي في عملية التوليد النووي للانفجار العظيم (BBN)، وهي تُنبِئُ بوفرة $^{7}Li$ التي تفوق بكثير ما هو مرصود والتي لها آثار مهمة على النموذج القياسي لعلم الكونيات. تمت معايرة كواشف الأثر النووي CR-39للكشف عن جسيمات ألفا والبروتونات في بيئة تدفق نيوتروني عالي.[6]

تُظهر معايرة كاشف الأثر النووي CR-39 باستخدام بروتونات أحادية الطاقة المنخفضة جداً، أنه من خلال قياس قطر الأثر، يُمكن استخدام CR-39 لتحديد طاقة البروتونات التي تتراوح طاقاتها بين20 Kev و 200 Kev، نظراً لوجود علاقة طردية بين أقطار الآثار المُحكَّة والطاقة [7].

وتم استخدام كاشف الأثر CR-39 لتقدير التعرض للمجال النيتروني داخل خزان ماء باستخدام مصدر نيتروني من نوع PuBe. مما سمح بالحصول على معامل معايرة تجريبي $F_c=0.77\pm0.21$ لتحويل المستوى الرمادي لكاشف CR-39 المُحك إلى جرعة مكافئة شخصية [8].واستُخدمت كواشف الأثر CR-39، على نطاق واسع لقياس جرعات النيوترونات في بيئة إشعاع المسرعات، لقياس جرعات الأنسجة الدقيقة من خلال توليد طيف نقل الطاقة الخطي Linear Energy Transfer (LET). وتم تعريض كواشف الأثر CR-39 للنيوترونات الناتجة عن تفاعل البروتونات مع هدف Be-9 سميك على بعد 6 m من منفذ الإشعاع. ومن تغير كثافة أثر الارتداد المُستحث بالنيترون مع طاقة البروتون تم الحصول على معامل الترابط $R^2=0.987$ بين كثافة الآثار وطاقة المقذوف (البروتون) [9].

وللحصول على عامل التحويل $k = 52.028 \pm 0.752$ بين كثافة الآثار والتعرض الناتج في المناجم تحت الأرض ذات التركيز العالي، تمت معايرة كواشف الأثر النووي بالحالة الصلبة CR-39؛ ومن مستقيم معايرة الكاشف السابق تم الحصول على معامل الترابط $R^2=0.8229$ بين كثافة الآثار والتعرض للرادون [3].

ولتحسين معاملات معالجة كواشف الأثر النووي CR-39 ذات الحالة الصلبة والمُشبَّعة بالبورون للاستجابة للنيترونات الحرارية، عُرّضت الكواشف السابقة لجرعات نيترونيه حرارية مقدارهاmSv ( 0.25، 0.5، 0.75، 1، و1.25). وكان عامل الاستجابة للكواشف السابقة $743 \pm 13$ tracks.cm$^{-2}$. mSv$^{-1}$، ومن مستقيم استجابة جرعة النيوترون الحراري لكاشف الأثر النووي CR-39 تم الحصول على قيمة معامل الترابط $R^2$= 0.998 بين كثافة الأثر و جرعة النيوترون الحراري [10].

تم في هذا العمل معايرة كاشف الأثر النووي CR-39 باستعمال المصدر النيتروني

$^{241}$Am-$^{9}$Be من أجل الأبعاد 1m، 2m، 3m، 3.4m بين الكاشف والمصدر النيتروني. وبرسم مستقيم المعايرة بين كثافة الآثار وزمن تشعيع كاشف الأثر النووي من أجل كل من الأبعاد السابقة، حصلنا على معاملات ترابط ومجالات خطأ نسبي للعد. وبمقارنة معاملات الترابط ومجالات الخطأ النسبي للعد، تبين أن البعد 3m يوافق أفضل معامل ترابط

$R^2$ = 0.988 ويوافق أيضاً مجالاً للخطأ النسبي للعد 0.105-0.332 = [$\Delta N/N$]الأفضل.

## 2. الهدف من البحث The objective of the research

تحديد شروط المعايرة ومدى الاستجابة لكواشف الأثر النووي الصلب CR-39 باستخدام المصدر النيتروني النشط $^{241}$Am-$^{9}$Be.

## 3- المواد والطرق Materials and methods

### 1.3. كاشف الأثر النووي البلاستيكيPlastic nuclear track detector CR-39

يعد كاشف الأثر النووي البلاستيكي CR-39 كاشفاً مثالياً لقياس التدفقات النيترونية وجرعاتها. الكاشف CR-39 أو كربونات بولي أليل دي غليكول ($C_{12}H_{18}O_7$) عبارة عن بوليمر متصلد بالحرارة، وخواصه الكيميائية تجعله واحداً من أكثر أجهزة كشف الآثار النووية البلاستيكية حساسية من حيث معامل نقل الطاقة الخطي [2].

يتشابه التركيب الكيميائي للكاشف CR-39 ($C_{12}H_{18}O_7$) مع التركيب الكيميائي للأنسجة البشرية، لذا فإن استجابته للنيترونات تشبه استجابة الأنسجة للنيترونات [9,11].

أهم ما يميز كواشف CR-39 بأنها ذات نقاوة عالية وتأثرها بالتغيرات البيئية ضئيل، ويمكنها تسجيل آثار النيترونات السريعة من خلال تسجيل آثار البروتونات المرتدة، بتفاعلها مع مادة الكاشف، والتي تنتج عن تفاعل من النوع (n,p). وبالتالي تساعد هذه الكواشف على قياس عدد الآثار التي تحدثها البروتونات المرتدة، وبالتالي كثافة هذه الآثار (tracks/cm$^2$). لذلك كان لا بد لنا من معايرتها باستعمال المصدر النتروني $^{241}$Am-$^{9}$Be لنتمكن من معرفة كثافة الآثار النترونية. يمكن كشف النيترونات ذوات الطاقات من 1 إلى 20 MeV عن طريق البروتونات المرتدة التي تتشكل نتيجة لتفاعل التبعثر المرن للنيترونات مع نوى هدروجين البوليمر. [2]

### 3.2. المصدر النيتروني $^{241}$Am-$^{9}$Be Neutron source $^{241}$Am-$^{9}$Be

المصدر $^{241}$Am-$^{9}$Be مصدر نيتروني (α, n) بعمر نصف 432y، الشكل (2). يُستخدم المصدر السابق على نطاق واسع في العديد من المجالات، مثل تحليل تنشيط النيترونات، والمعايرة، والبحث العلمي،

والتطبيقات الصناعية. يبين الشكل (2) أن المصدر $^{241}Am\text{-}^{9}Be$ عبارة عن خليط متجانس من بودرة ثاني أوكسيد الأميرشيوم والبيريليوم(Mixing fine Powder of $AmO_2$ and Be) . يتفكك نظير الأميرشيوم مطلقاً جسيمات ألفا وبطاقات مختلفة. تتفاعل جسيمات ألفا مع نوى البيريليوم مما يسمح بإطلاق نيترونات وفق المعادلة التالية:

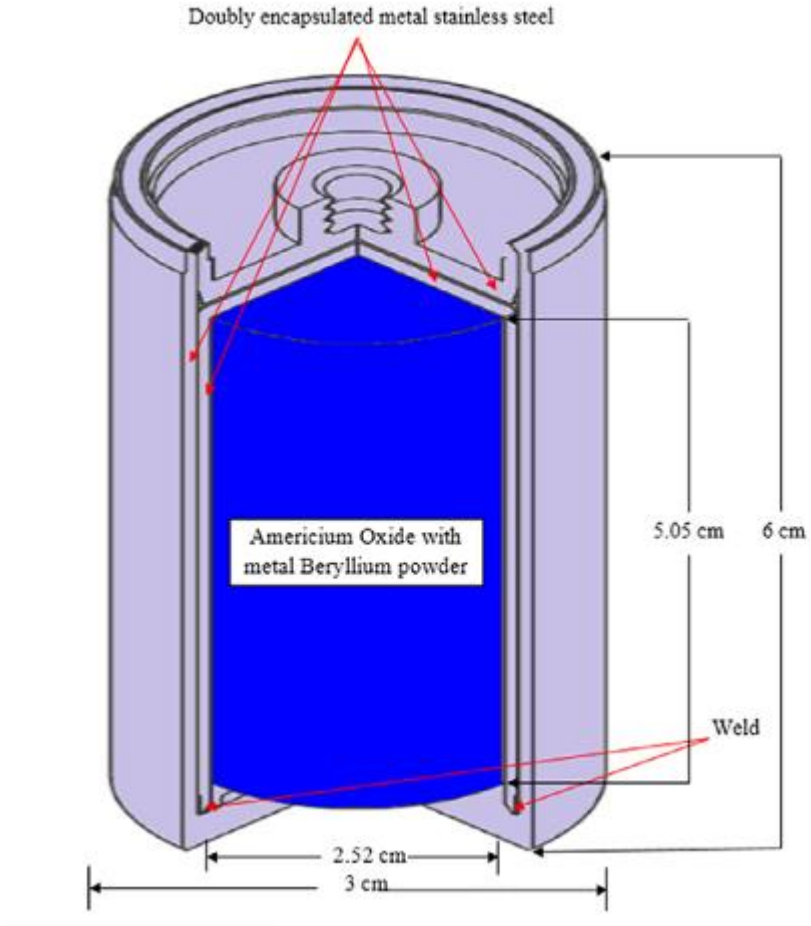
$$\alpha + {}^{9}Be \rightarrow {}^{12}C + n$$

المصدر النيتروني النشط $^{241}Am\text{-}^{9}Be$ موجود في هيئة الطاقة الذرية السورية – قسم المعايرة.

المصدر النتروني السابق ذي شدة نيترونيه معروفة ($S=1.2\times10^{7}n.s^{-1}\pm$ 2%) على بُعد 25 cm من المصدر[2].

### 3.3. معايرة الكواشف CR-39 Calibration of Detectors

تم تحضير عشرة كواشف CR-39، وكاشفين للخلفية الطبيعية، لكل عملية قياس حيث تمت أربع عمليات قياس. استُخدم بكل عملية 12 كاشفاً بخطوة كاشفين لكل زمن تشعيع وكاشفان للخلفية الطبيعية. وكانت أبعاد كل كاشف $1.5\times1.3\ cm^2$، وسماكة 1mm، وتم وضع الكواشف على حامل خشبي وعلى أبعاد مختلفة عن المصدر $^{241}Am\text{-}^{9}Be$ كما هو موضح في الشكل (3).




**الشكل (2): منظر مقطعي لتجميع مصدر نيوترون $^{241}Am\text{-}^{9}Be$ [17].**

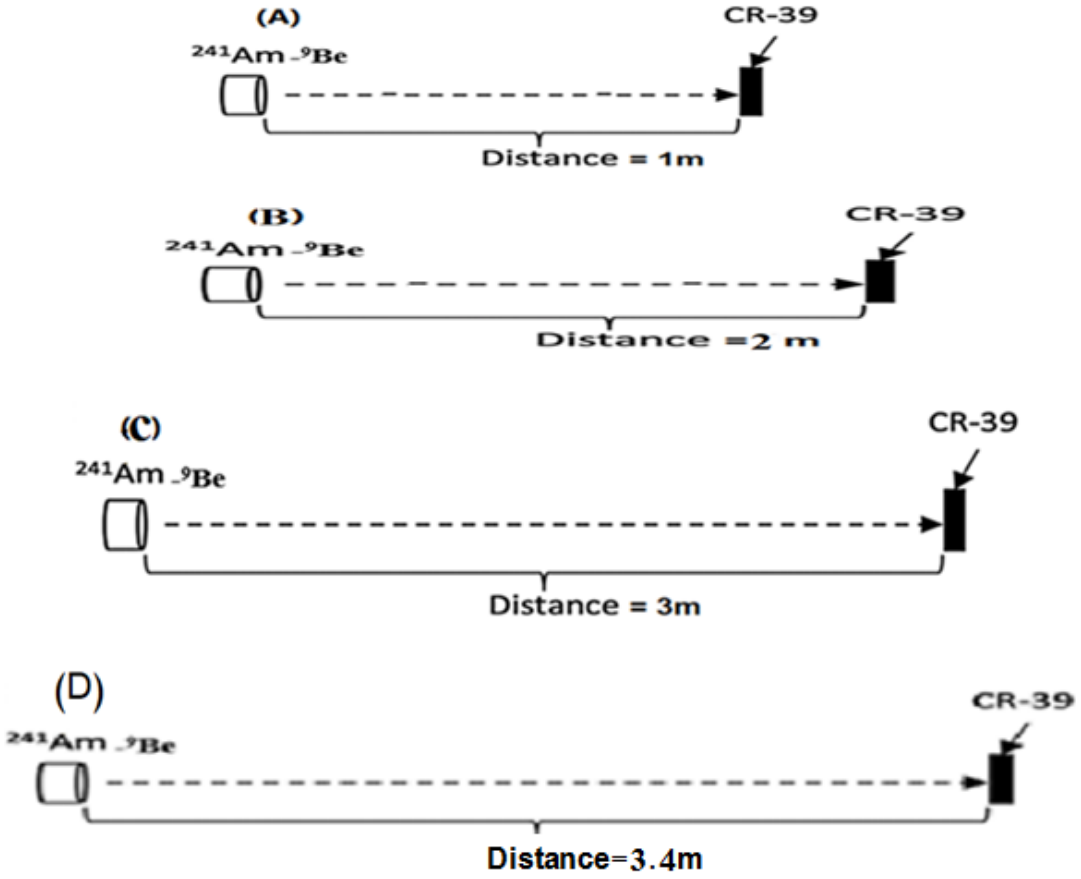
أُجريت المعايرة في المخبر العياري الثانوي بهيئة الطاقة الذرية السورية، حيث وضعت عشرة كواشف للتجربة الأولى على بعد 1m عن المصدر كما هو موضح بالشكل (3).

جرى، من أجل التجربة الأولى، تعريض الكاشفين (1-2) لمدة 20 min والكاشفين (3-4) لمدة 40min والكاشفين (5-6) لمدة 60 min والكاشفين (7-8) لمدة 80 min والكاشفين (9-10) لمدة 120min وكاشفين للخلفية الطبيعية في التجربة الأولى، حيث تم الأخذ بالاعتبار الخلفية الطبيعية لآثار النيترونات الكامنة على سطح الكاشف قبل البدء بأخذ القياسات.

عند قراءة الكواشف بعد التشعيع، على بعد 1m، ولفترات زمنية (20، 40، 60، 80، 120min) كانت عدد المشاهد 5 فقط، لكل كاشف، بسبب صعوبة مشاهدة الآثار بشكل واضح بعد التشعيع لفترات زمنية عالية. لذلك قمنا بإعادة التشعيع لفترات زمنية (20، 40، 60، 80، 120s)، من أجل التجارب الثلاثة الأخيرة والموافقة للأبعاد 2m، 3m، 3.4m كما تم أخذ كاشفين للخلفية الطبيعية من أجل كل تجربة من التجارب الثلاثة الأخيرة.

ولقراءة الكواشف باستخدام المجهر الضوئي أُجريت عملية الحك الكيميائي للكواشف المشعة باستعمال محلول هيدروكسيد الصوديوم 6.25 *mol/l* ودرجة حرارة 70°C لمدة 7hr.

وبعد الحك، تم استخدام المجهر الضوئي من النوع (PSD1-L5-MO1) مزود بمسطرة




**الشكل (3): يبين طريقة ترتيب الكواشف لمعايرتها من أجل المسافة Distance=1m، بين المصدر النيتروني والكاشف CR-39، وحتى المسافة Distance=3.4m.[2]**

إلكترونية، حيث يستخدم المجهر الضوئي للضوء المرئي لإنشاء صورة مكبرة لأجسام صغيرة لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة. يمتد نطاق تكبير المجهر الضوئي السابق من 10x إلى 100x، مما يعني أنه يمكن ملاحظة التفاصيل في نطاق حجم 0.2µm وهو متوفر في هيئة الطاقة الذرية السورية، الشكل (4).

يبين الشكل (5) مشهداً للآثار الناتجة عن تشعيع كاشف على بعد محدد وفترة زمنية محددة حيث تظهر الآثار على سطح الكاشف عند عملية القراءة.

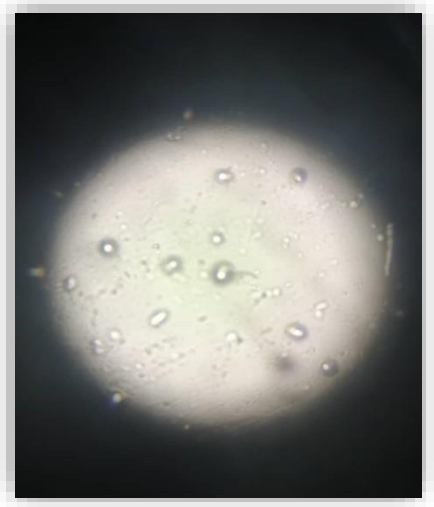
تمت قراءة الكواشف المشععة العشرة لكل عملية قياس بالإضافة لكواشف الخلفية الإشعاعية الطبيعية باستخدام المجهر الضوئي، مع مراعاة الخطوات التالية:

1) بعد الانتهاء من عملية الحك الكيميائي، تم تشغيل المجهر الضوئي واختيار عدسة مناسبة بقوة تكبير 20x، وباستخدام المسطرة المجهرية المدرَّجة، الشكل (4)، تم قياس قطر المشهد،

**الشكل (4): المجهر الضوئي المستخدم من النوع (PSD1-L5-MO1)، مزود بمسطرة إلكترونية.**

المبيَّن بالشكل (5)، حيث كانت قيمته:

$$2r = 0.92mm$$



**الشكل(5): مشهد للآثار باستخدام المجهر الضوئي.**

وبالتالي مساحة المشهد $S = \pi r^2 = 0.00665\ cm^2$.

ونوضح أننا أخذنا قطر المشهد لكل عمليات القياس ($2r = 0.92mm$)، وبالتالي مساحة المشهد $S = \pi r^2 = 0.00665\ cm^2$ [2] لكل عمليات القياس.

تُعطى كثافة الآثار في مشهد واحد بالعلاقة :

$$\rho(\mathrm{Tr/cm^2}) = \frac{Nu}{s} \qquad (1)$$

حيث $Nu$ عدد الآثار في المشهد وS مساحة المشهد.

2) كان عدد مشاهد الرؤية للقياس الثاني والثالث والرابع n=10، بينما كان عدد مشاهد الرؤية للقياس الأول $n=5$.

3) إذا كان $N$ العد الصافي للآثار الذي تمَّ حسابه لخمسة مشاهد للقياس الأول ولعشرة مشاهد للقياسات الثاني والثالث والرابع، وn عدد مشاهد الرؤية وS مساحة المشهد فإن كثافة الآثار لكل كاشف، وبالمقارنة مع المعادلة (1)، تعطى بالمعادلة:

$$D(\mathrm{Tr/cm^2}) = \frac{N}{s.n} \qquad (2)$$

ويساوي العد الصافي للآثار $N$ إلى الفرق بين العد $N_d$ على سطح الكاشف مطروحاً منه العد $N_b$ على سطح كاشف الخلفية الطبيعية، أي $N = N_d - N_b$.

يُحسب الخطأ النسبي للعد $N$ من خلال العلاقة[**13**] :

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta N_d + \Delta N_b}{N} = \frac{\sqrt{N_d} + \sqrt{N_b}}{N} \qquad (3)$$

### 3.4. معامل الترابط الإحصائي Statistical correlation coefficient

يعد معامل الترابط الإحصائي أنه معياراً يُستخدم في الإحصاء لقياس قوة واتجاه العلاقة الخطية بين متغيرين (مجموعتين من البيانات). يُرمز له عادةً بـ $R^2$ عندما يكون الحديث عن معامل ترابط بيرسون (وهو الأشهر). تتراوح قيمة هذا المعامل بين 1+ و 1- حيث يشير :

- **1+** :علاقة طردية تامة (أي كلما زاد أحد المتغيرين زاد الآخر بنسبة ثابتة).
- **0** : لعدم وجود علاقة خطية بين المتغيرين.
- **1−** :علاقة عكسية تامة (أي كلما زاد أحد المتغيرين، قل الآخر بنسبة ثابتة).

تحليل الترابط هو الأداة الإحصائية التي يمكننا استخدامها لتحديد درجة ارتباط متغيرين.

يُشير معامل الترابط $R^2 \approx 1$ إلى وجود علاقة خطية إيجابية قوية جداً بين $y$ و$x$.

يمكن تبسيط معامل الترابط إلى الشكل التالي باستخدام الصيغ المختصرة[**14**] :

$$R^2 = \frac{(\sum xy - n\bar{x}\bar{y})^2}{(\sum x^2 - n\bar{x}^2)(\sum y^2 - n\bar{y}^2)} \qquad (4)$$

حيث: x وy القيم للمتغيرين، $\bar{x}$ و$\bar{y}$ المتوسط الحسابي للمتغيرين$x$ و$y$، n عدد عناصر العينة.

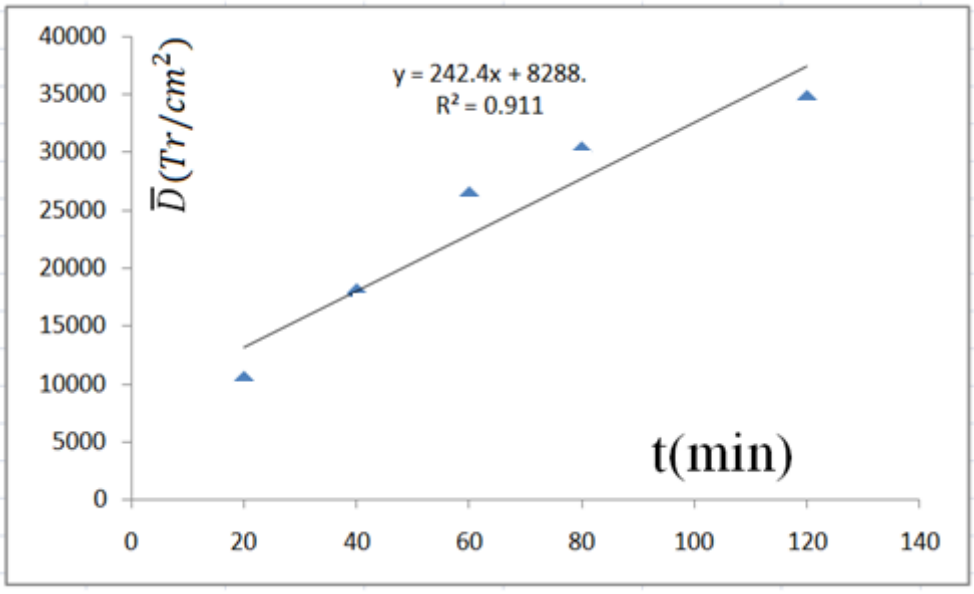
يمثل $x$، في عملنا، زمن تعريض الكاشف t لمصدر النيوترونات، ويمثل $y$ كثافة الآثار $D(\mathrm{Tr/cm^2})$ على الكاشف من أجل مسافة محددة. ويمثل معامل الترابط $R^2$مؤشراً مهماً عند دراسة معايرة الكاشف **CR-39**ويمكن الحصول عليه باستخدام العلاقة (4) أو برسم $D(\mathrm{Tr/cm^2})$ بدلالة الزمن t. ويمكن أن يكون الخطأ النسبي المعطى بالعلاقة (3) عند دراسة معايرة الكاشف السابق مؤشراً مهماً أيضاً.

## 4. النتائج والمناقشة Results and discussions

عند الانتهاء من عملية التشعيع والحك الكيميائي وعد الآثار على سطح الكواشف لعمليات المعايرة تم تنظيم النتائج وفق الجداول الأربعة التالية. وكما أشرنا إلى أن عدد المشاهد في

**الجدول (1): يبين عدد المشاهد *n* والخطأ النسبي للعد ΔN/N وكثافة الأثر D ومتوسط كثافة $\overline{D}$ من أجل المسافة 1m.**

| $\overline{D}$ $(Tr/cm^2)$ | D ($Tr/cm^2$) | $\Delta N/N$ | $N$ | $N_d$ | $n$ | $S(cm^2)$ | $t(min)$ | الكاشف |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10240 | 10105 | 0.087 | 336 | 416 | 5 | 0.00665 | 20 | 1 |
| | 10376 | 0.086 | 345 | 425 | 5 | 0.00665 | 20 | 2 |
| 17834 | 17834 | 0.058 | 593 | 673 | 5 | 0.00665 | 40 | 3 |
| | 17834 | 0.058 | 597 | 677 | 5 | 0.00665 | 40 | 4 |
| 26240 | 26466 | 0.045 | 880 | 960 | 5 | 0.00665 | 60 | 5 |
| | 26015 | 0.046 | 865 | 945 | 5 | 0.00665 | 60 | 6 |
| 30135 | 30466 | 0.041 | 1013 | 1093 | 5 | 0.00665 | 80 | 7 |
| | 29804 | 0.042 | 991 | 1071 | 5 | 0.00665 | 80 | 8 |
| 34586 | 35669 | 0.038 | 1186 | 1266 | 5 | 0.00665 | 120 | 9 |
| | 33503 | 0.039 | 1114 | 1200 | 5 | 0.00665 | 120 | 10 |
| $\overline{N_b} = N_b = 80$ | | $N_b = 80$ | | | 10 | 0.00665 | 0 | الخلفية 1 |
| | | $N_b = 80$ | | | 10 | 0.00665 | 0 | الخلفية 2 |



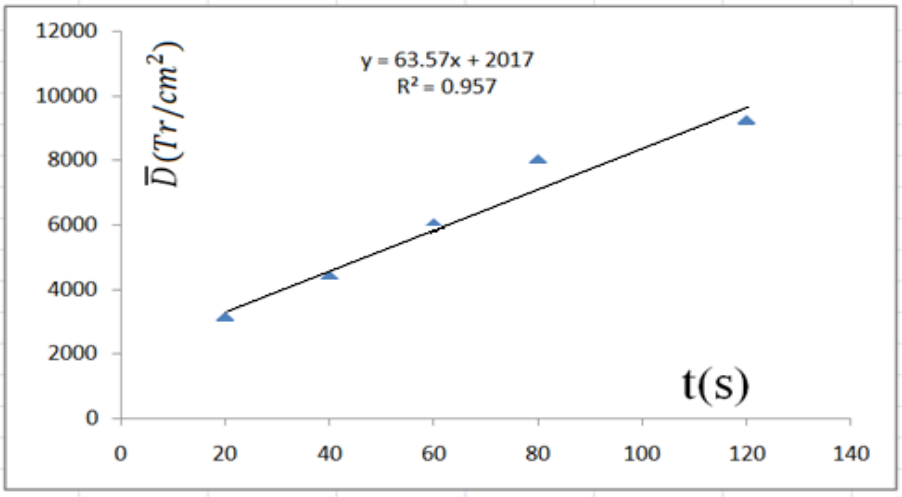

**الشكل (6): مستقيم معايرة الكاشف CR-39 عند تعرضه للمصدر النيتروني على بعد 1m.**

الجدول (1)، n = 5 وذلك بسبب تداخل الآثار الذي حدث من أجل المسافة 1m وفترات زمنية مقدرة بالـ min، ، فإن معامل الترابط $R^2 = 0.911$ بين كثافة الآثار وزمن القياس صغير وكما هو مبين في الشكل (6). ومن الشكل السابق نجد أيضاً أن نقطة واحدة فقط من نقاط القياس تقع على مستقيم المعايرة، مما أدى إلى استبعاد القياس خلال فترات زمنية مقدرة بالـ min. وهذا سمح بعدم اعتماد نتيجة الجدول السابق لمعايرة الكاشف CR-39.

ويبين الجدول (2) والشكل (7) النتائج التي تم الحصول عليها لمعايرة الكاشف CR-39. ونستنتج

**الجدول (2): عدد المشاهد *n* والخطأ النسبي للعد ΔN/N وكثافة الأثر *D* ومتوسط كثافة $\overline{D}$ من أجل المسافة 2m.**

| $\overline{D}$ $(Tr/cm^2$ | D (Tr/cm$^2$) | $\Delta N/N$ | $N$ | $N_d$ | $n$ | $S(cm^2)$ | $t(s)$ | الكاشف |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3060 | 3053 | 0.127 | 203 | 283 | 10 | 0.00665 | 20 | 1 |
| | 3068 | 0.126 | 204 | 284 | 10 | 0.00665 | 20 | 2 |
| 4338 | 4331 | 0.098 | 288 | 368 | 10 | 0.00665 | 40 | 3 |
| | 4346 | 0.097 | 289 | 369 | 10 | 0.00665 | 40 | 4 |
| 5955 | 5940 | 0.078 | 395 | 475 | 10 | 0.00665 | 60 | 5 |
| | 5970 | 0.078 | 397 | 477 | 10 | 0.00665 | 60 | 6 |
| 7932 | 7940 | 0.064 | 528 | 608 | 10 | 0.00665 | 80 | 7 |
| | 7925 | 0.064 | 527 | 607 | 10 | 0.00665 | 80 | 8 |
| 9143 | 9128 | 0.058 | 607 | 687 | 10 | 0.00665 | 120 | 9 |
| | 9158 | 0.058 | 609 | 689 | 10 | 0.00665 | 120 | 10 |
| $\overline{N_b} = N_b = 80$ | | $N_b = 80$ | | | 10 | 0.00665 | 0 | الخلفية 1 |
| | | $N_b = 80$ | | | 10 | 0.00665 | 0 | الخلفية 2 |



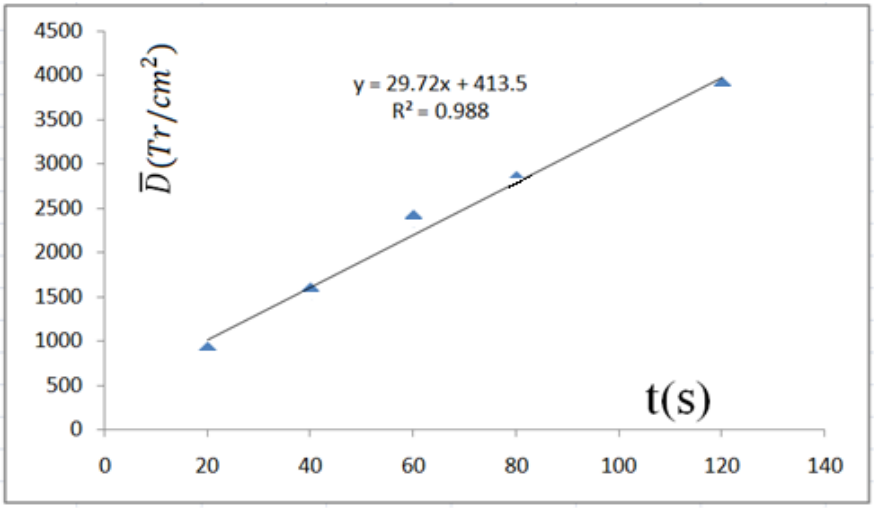

**الشكل (7): مستقيم معايرة الكاشف CR-39 عند تعرضه للمصدر النيتروني على بعد 2m.**

مما سبق أن معامل الترابط $R^2 = 0.957$ بين كثافة الآثار وزمن التسجيل قد أصبح أفضل وأن أغلب نقاط القياس قد أصبحت على مستقيم المعايرة. ويبين الجدول (3) والشكل (8) أن معامل الترابط $R^2 = 0.988$ بين كثافة الآثار وزمن التسجيل قد أصبح أيضاً أفضل وأن كل نقاط القياس قد أصبحت تقريباً على مستقيم المعايرة.

**الجدول (3): عدد المشاهد $n$ والخطأ النسبي للعد $\Delta N/N$ وكثافة الأثر $D$ ومتوسط كثافة $\overline{D}$ من أجل المسافة 3m.**

| $\overline{D}$ $(Tr/cm^2$ | D (Tr/cm$^2$) | $\Delta N/N$ | $N$ | $N_d$ | $n$ | $S(cm^2)$ | $t(s)$ | الكاشف |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 902 | 902 | 0.332 | 63 | 143 | 10 | 0.00665 | 20 | 1 |
| | 902 | 0.346 | 60 | 140 | 10 | 0.00665 | 20 | 2 |
| 1572 | 1549 | 0.218 | 103 | 183 | 10 | 0.00665 | 40 | 3 |
| | 1594 | 0.213 | 106 | 186 | 10 | 0.00665 | 40 | 4 |
| 2391 | 2376 | 0.163 | 158 | 238 | 10 | 0.00665 | 60 | 5 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2406 | 0.153 | 160 | 240 | 10 | 0.00665 | 60 | 6 |
| 2827 | 2812 | 0.135 | 187 | 267 | 10 | 0.00665 | 80 | 7 |
| | 2842 | 0.134 | 189 | 269 | 10 | 0.00665 | 80 | 8 |
| 3888 | 3865 | 0.106 | 257 | 337 | 10 | 0.00665 | 120 | 9 |
| | 3910 | 0.105 | 260 | 340 | 10 | 0.00665 | 120 | 10 |
| $\overline{N_b} = N_b = 80$ | | $N_b = 80$ | | | 10 | 0.00665 | 0 | الخلفية 1 |
| | | $N_b = 80$ | | | 10 | 0.00665 | 0 | الخلفية 2 |



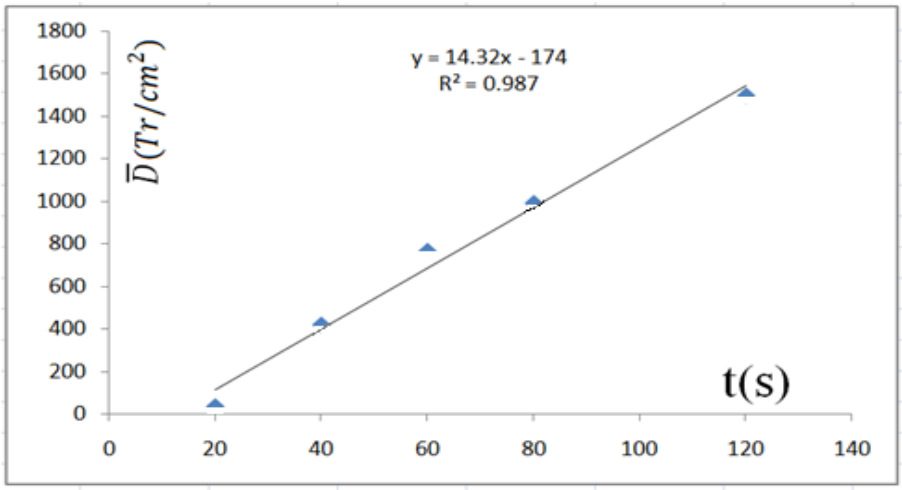

**الشكل (8): مستقيم معايرة الكاشف CR-39 عند تعرضه للمصدر النيتروني على بعد 3m.**

ويبين الجدول (4) والشكل (9) أن معامل الترابط $R^2 = 0.987$ بين كثافة الآثار وزمن التسجيل قد أصبح أصغر وأن الخطأ النسبي $\Delta N/N$ أكبر، بشكل ملحوظ، كما هو مبين في الجدول (4).

**الجدول (4): عدد المشاهد *n* والخطأ النسبي للعد ΔN/N وكثافة الأثر *D***

**ومتوسط كثافة $\overline{D}$ من أجل المسافة 3.4m.**

| الكاشف | $t(s)$ | $S(cm^2)$ | $n$ | $N_d$ | $N$ | $\Delta N/N$ | D (Tr/cm²) | $\overline{D}$ $(Tr/cm^2)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 20 | 0.00665 | 10 | 82 | 2 | 8.999 | 30 | 38 |
| 2 | 20 | 0.00665 | 10 | 83 | 3 | 6.018 | 45 | |
| 3 | 40 | 0.00665 | 10 | 106 | 26 | 0.740 | 391 | 421 |
| 4 | 40 | 0.00665 | 10 | 110 | 30 | 0.648 | 451 | |
| 5 | 60 | 0.00665 | 10 | 130 | 50 | 0.407 | 752 | 767 |
| 6 | 60 | 0.00665 | 10 | 132 | 52 | 0.393 | 782 | |
| 7 | 80 | 0.00665 | 10 | 145 | 65 | 0.323 | 977 | 992 |
| 8 | 80 | 0.00665 | 10 | 147 | 67 | 0.314 | 1008 | |
| 9 | 120 | 0.00665 | 10 | 179 | 99 | 0.225 | 1489 | 1496 |
| 10 | 120 | 0.00665 | 10 | 180 | 100 | 0.224 | 1504 | |
| الخلفية 1 | 0 | 0.00665 | 10 | $N_b = 80$ | | | $\overline{N_b} = N_b = 80$ | |
| الخلفية 2 | 0 | 0.00665 | 10 | $N_b = 80$ | | | | |




**الشكل (9): مستقيم معايرة الكاشف CR-39 عند تعرضه للمصدر النيتروني على بعد 3.4m.**

وتبين الجداول من (1) إلى (4) أنها تضمنت العد $N_b$ على سطح كاشف الخلفية الطبيعية والذي يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار[10] . تجدر الإشارة إلى أننا استخدمنا العد $N_b$عند حساب العد الصافي $N$ وعند حساب الخطأ النسبي$\Delta N/N$، المعادلة (3).

وقد نتساءل من أين جاءت الخلفية الطبيعية؟ إن الخلفية النيترونية الطبيعية، المرصودة في أجهزة الرصد بشكل شبه كامل، تنشأ من الشلالات الناتجة عن الأشعة الكونية في الغلاف الجوي والبيئة المحيطة.[15] وهذه الخلفية النيترونية هي التي تنتج الكربون 14 ($^{14}C$) بشكل مستمر في الطبقات العليا من الغلاف الجوي حسب التفاعل $^{14}N(n,p)^{14}C$ [16].

ونبين في الجدول (5) قيم معامل الترابط $R^2$ وقيم مجال الخطأ النسبي[$\Delta N/N$] من أجل المسافات المختلفة. وننوه إلى أن نتيجتي$R^2$ و [$\Delta N/N$]، من أجل المسافة 1m، مستبعدتان بسبب تداخل الآثار. أما قيمة $R^2$، من أجل المسافة 2m، فهي أصغر من قيمتي $R^2$ من أجل المسافتين 3m، 3.4m وبالتالي هي مستبعدة. وبالنظر لقيمتي $R^2$ و [$\Delta N/N$]، من أجل المسافتين 3m، 3.4m نجد أنهما الأفضل من أجل المسافة 3m. وبالتالي النتيجة المعتمدة لمعامل الترابط هي $R^2 = 0.988$ من أجل المسافة 3m.

**الجدول (5): مقارنة بين $R^2$ ومجال الخطأ النسبي [$\Delta N/N$] من أجل المسافات 1m إلى 3.4m.**

| المسافة (m) | 1 | 2 | 3 | 3.4 |
|---|---|---|---|---|
| $R^2$ | 0.911 | 0.957 | 0.988 | 0.987 |
| [$\Delta N/N$] | 0.039-0.087 | 0.058-0.127 | 0.105-0.332 | 0.224-8.999 |

ونبين في الجدول (6) مقارنة بين قيم معامل الترابط $R^2$ المرجعية وقيمة معامل الترابط الحالية *pre* المحسوبة من قبلنا.

**الجدول (6): مقارنة بين قيم $R^2$ المرجعية وقيمة معامل الترابط الحالية *pre*.**

| $R^2$ | 0.987 | 0.8229 | 0.998 | 0.988 |
|---|---|---|---|---|
| $R^2$المرجع | [9] | [3] | [10] | *pre* |

ونلاحظ من الجدول (6) أن قيمة $R^2$ المحسوبة من قبلنا *pre*قريبة من أفضل قيمة مرجعية[10] لـ $R^2$. أي أن الترابط بين كثافة الأثر و زمن تسجيل القياس، من أجل المسافة 3m، مماثل للترابط بين كثافة الأثر و جرعة النيوترون الحراري.

## 5. الاستنتاجات والتوصيات Conclusions and recommendations

تضمنت معايرة كاشف الأثر النووي CR-39 باستخدام مصدر نيتروني $^{241}Am$-$^{9}Be$ تعريضَ الكاشف للنيترونات من المصدر لفترات زمنية مختلفة، ومن أجل مسافات مختلفة، تم الحك الكيميائي لـ CR-39 للكشف عن الآثار الكامنة وتحليل النتائج التي تم الحصول عليها. بعد استعراض الأشكال التي نتجت عن الرسم البياني لكثافة الأثر المُستحث بالنيترونات مُقابل زمن تعرض الكاشف للنيترونات، تبين أنه ينتج تداخل للآثار من أجل المسافة 1m وأزمنة تعرض مقدرة بالـ min، وبالتالي تم استبعاد هذه الحالة. وأما من أجل المسافات 2m، 3m، 3.4m وزمن تعرض مقدراً بالـ s فقد تم اعتماد النتيجة من أجل المسافة 3m وذلك لأن مستقيم المعايرة الموافق يملك معامل الترابط $R^2 = 0.988$ الأقرب للواحد. كما تميزت الكواشف البلاستيكية CR-39 المستخدمة في الدارسة بما يلي: 1) لا توجد أية مشاكل في استخدام هذا النوع من الكواشف لقياس النيترونات؛ 2) لا يوجد أي تأثير interference للفوتونات (تداخل الفوتونات) عند قياس النيترونات؛ 3) يمكن إجراء القياس دون الحاجة لاستخدام تجهيزات (مقاييس) إلكترونية؛ 4) أقل من غيرها للتعرض للتشويش والتداخل.

وأخيراً، يُوصى بما يلي:

1- استخدام مصادر نترونية مختلفة عند المعايرة ومقارنتها للتاكد من مدى اسجابة الكاشف CR-39 العديد من المصادر التي تختلف من حيث شدة الاصدارية النترونية.

2- استخدام شروط حك مختلفة عند اجراء عملية الحك الكيميائي ، من حيث أزمنة الحك ودرجات الحرارة و تركيز هدروكسيد الصوديوم. والبحث عن أفضل شروط لإظهار الآثار.

3- استخدام أكثر من أربع كواشف لكل عملية قياس للحصول على أدق نتائج.

4- استخدام أجهزة كاميرا متطورة وحساسات رقمية من أجل عد الآثار ومقارنتها مع نتائج العد بالعين المجردة، للتأكد من دقة البيانات .

5- إعادة إجراء التجربة عن طريق النمذجة الحاسوبية باستخدام كود مونتي كارلو MCNP .

## المراجع

[1] Ruwi Adah Tarek MAHDI and Sala Sami HAMZA, *CR-39 NUCLEAR TRACK DETECTOR: A REVIEW ARTICLE*, International Journal of Applied Sciences and Technology 2025.

[2] Mohamed et al. *Photoneutron fluxes on the Processing table of two VARIAN IX medical linear accelerators Nomber 222/11935 ISSN 1726-5487*..20242024

[3] R. Shweikani,O.Anjak, *Estimation of photoneutron intensities around radiotherapy linear accelerator 23-MV photon beam,* Applied Radiation and Isotopes 99 (2015) 168–171.

[4] Takahashi et al., *Calibration of solid state nuclear track detectors CR-39 for radon study of in high concentration underground mines*, Braz. J. Rad. Sci. 2021.

[5]G. Petringa et al., **CR-***39 track detector calibration with H and He beams for applications in the p-11B fusion reaction, Publ*ished by IOP Publishing for Sissa Medialab 2024.

[6]Yangfan He et al., *Calibration of CR-39 solid state track detectors with monoenergetic protons from 0.3 MeV to 2.5 MeV*, EPJ Web of Conferences 239, 07006 (2020).

[7]Emily E. Kading, *Calibration of CR-39 Nuclear Track Detectors with Alpha-Particles and Protons for a Measurement of Neutron Interactions with 7Be and the Primordial 7Li Problem*, A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science At the University of Connecticu 2017.

[8]Duan Xiaojiao et al., *Calibration of CR-39 with monoenergetic protons,* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 609 (2009) 190–193.

[9]ELENA STANCU et al., *NEUTRON FIELD EXPOSURE ESTIMATION USING PASSIVE CR-39 DETECTORS WITHIN A WATER TANK USING A MODERATED PuBe NEUTRON SOURCE,* Romanian Journal of Physics 68, 302 (2023).

[10]G. S. Sahoo et al., *Neutron dose estimation via LET spectrometry using CR-39 detector for the reaction 9Be (p, n),* Journal of Medical Physics, Vol. 39, No. 4, 225-30, 2014.

[11]Deepa Sathian, Rupali Pal, A. K. Bakshi, B. K. Sapra, *A study on the optimization of processing parameters of boron-doped CR-39 solid-state nuclear track detectors for response to thermal neutron*s, © 2022 Radiation Protection and Environment.

[12]Abdessamad Didi, Ahmed Dadouch, Otman Jaï, Jaouad Tajmouati, Hassane El Bekkouri, *Neutron activation analysis: Modelling studies to improve the neutron flux of AmericiumeBeryllium sourc*, Nuclear Engineering and Technology(2017).

[13]Sh Esraa and I Ahmed, *The Etching Effect Methods in Registration Properties on CR-39 Nuclear Track Detecto*r, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1325 (2024) 012028.

[14]Dr. Haisam Ibrahim Jbeli, Ekhlass AbdulKarim Abboud, *Measuring of Radioactivity Resulting from the Isotopes of Potassium $^{40}K$ and Cesium $^{137}Cs$ of Seawater Samples from the Blue Beach Resort in the Mediterranean, Syria,* Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Basic Sciences Series Vol. (46) No. (3) 2024.

[15]Majdalen Nizar Sarheel, *Calculations the half-lives of Alpha-decay Americium Isotopes Using a Semi-empirical relationship*, A thesis submitted to the College of Sciences Latakia University for the degree of Master in Radiation Physics,2025.

[16]Richard T. Kouzes et al., *Cosmic-ray-induced ship-effect neutron measurements and implications for cargo scanning at borders*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 587 (2008).

[17] A. Saeed et al. *Calculating the ambient dose equivalent of fast neutrons using elemental composition of human body.* A. Saeed et al./Applied Mathematics and Computation 274 (2016) 604–610.