

Determined the bulk etch rate V_B by different methods for nuclear track detector CR-39

Zainab Hatem Mohialdeen^{*1}, Mushtaq Abed Dawood Al-Jubbori²

^{1,2}Department of Physics, College of Education for Pure Sciences, University of Mosul, Mosul, Iraq

E-mail: ^{1*}zainab.22esp30@student.uomosul.edu.iq, ²mushtaq_phy@uomosul.edu.iq

(Received December 11, 2022; Accepted January 12, 2023; Available online March 01, 2023)

DOI: [10.33899/edusj.2023.137160.1297](https://doi.org/10.33899/edusj.2023.137160.1297), © 2023, College of Education for Pure Science, University of Mosul.

This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract:

In this study, the bulk etch rate (V_B) was measured by three different methods for CR-39 with a thickness of $200\mu\text{m}$ and an area of $(1 \times 1 \text{ cm}^2)$, where CR-39 was irradiated through from ^{241}Am source with energy of alpha particles is 2.6MeV and at an angle of fall perpendicular to the surface of the CR-39 detector, the detector etching with (NaOH) at a concentration of 6.25N and $(70 \pm 1^\circ\text{C})$ and showing the effects formed on the surface of the detector with time periods ranging from (0.25h) and the formed effects were photographed In the detector at different etching times using an optical microscope of the type (XSZ-H Series Biological Microscope) equipped with a digital camera of the type (MADC-5A) connected to a personal computer, in order to find the length, thickness and diameters of the track formed on the surface of the detector. V_B determined by methods are: Removed thickness method, the second method, the saturation track method, and the diameter-length method (D-L method), as the first method does not require irradiation of the detector, but the other two methods require irradiation of the detector and measurement of lengths and diameters And the time of proving the effect, and we found that the values of V_B rate for the three methods, the removed thickness method, the saturation track method, and the diameter-length of the effect (D-L method) respectively are: 1.206 , 1.204 , 1.271 ($\mu\text{m}/\text{h}$) and compare the results between the mentioned methods, as we found that they are close.

Keyword: Alpha particles, CR-39 detector, Bulk etch rate, Track depth, Removed layer.

حساب معدل القشط العام V_B بطرق مختلفة لكاشف الاثر النووي CR-39

زينب حاتم محي الدين^{*1}، مشتاق عبد داود الجبوري²

^{2,*1} قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة الموصل، الموصل، العراق

الخلاصة:

في هذا البحث تم قياس معدل القشط العام (V_B , Bulk etch rate) بثلاثة طرق مختلفة لكاشف الاثر النووي في الحالة الصلبة CR-39 ذات السمك $200\mu\text{m}$ وذات المساحة $(1 \times 1 \text{ cm}^2)$ إذ تم تشيع كاشف الاثر النووي CR-39 من خلال مصدر الأمرشيوم ^{241}Am

وبطاقة جسيمات ألفا 2.6MeV وبزاوية سقوط عمودية على سطح الكاشف CR-39 ثم قشط الكاشف بمحلول هيدروكسيد الصوديوم NaOH بتركيز 6.25N ودرجة حرارة ($70 \pm 1^\circ\text{C}$) واطهار الاثار المتكونة على سطح الكاشف بفترات زمنية تتراوح (0.25h) وتم تصوير الاثار المتكونة في الكاشف عند أزمان قشط مختلفة بواسطة المجهر البصري (الضوئي) من نوع (XSZ-H Series Biological Microscope) المزود بكاميرا رقمية من نوع (MADC-5A) متصلة بجهاز الحاسوب الشخصي PC وذلك لإيجاد طول وسمك وأقطار الاثار المتكونة على سطح الكاشف والطرائق هي: الاولى عن طريق قياس السمك المزال (Removed thickness method) والطريقة الثانية طريقة ثبوت الأثر والطريقة الثالثة طريقة قطر-طول الأثر (D-L method) حيث ان الطريقة الاولى لا تحتاج الى تشيع الكاشف اما الطريقتين الأخرتين فتحتاج تشيع الكاشف وقياس اطوال واقطار وزمن ثبوت الاثر، ووجدنا أن قيم معدل القشط العام للطرق الثلاثة طريقة السُمك المزال (Removed thickness method) و طريقة ثبوت الأثر وطريقة قطر-طول الأثر (D-L method) على التوالي هي: $(1.206, 1.204, 1.271)\mu\text{m/h}$ وإجراء مقارنة النتائج بين الطرق المذكورة حيث وجدنا انها متقاربة.

الكلمات المفتاحية: جسيمات ألفا، الكاشف CR-39، معدل القشط العام V_B ، عمق الأثر، الطبقة المزالة.

المقدمة :

كواشف الأثر النووي الصلب بدأت فكرتها في عام 1958 عندما لاحظ العالم الإنكليزي ينك Young في مؤسسة بحثية في إنكلترا حدوث تلف في بلورة فلوريد الليثيوم (Lif) المجاور لرقائق اليورانيوم عند تعريضها للقصف بالنيوترونات الحرارية، و تمت معالجتها بالمحاليل الكيميائية القاشطة المناسبة وعرضها تحت المجهر الضوئي و ظهرت المناطق على شكل حفر [5-1] وكان عدد هذه الحفر متناسبا مع عدد شظايا الانشطارات الناتجة عن تفاعل النيوترونات الحرارية مع رقاقة اليورانيوم التي تصطدم بسطح بلورة الليثيوم [6-7]. ومنذ ذلك الوقت أصبحت هذه البلورة إحدى المواد المستخدمة في الكشف عن اثار الجسيمات المشحونة، وتعد كواشف الاثار النووية الصلبة مواد جيدة للكشف عن الجسيمات المشحونة والأيونات الثقيلة من خلال الاثار أو المسارات المتضررة التي تسببها هذه الجسيمات أو تسجل فيها. تظهر آثار الجسيمات والأيونات في الكواشف النووية الصلبة بأشكال مختلفة عندما تظهر من خلال عملية القشط، اعتمادًا على نوع الجسم ونوع الكاشف المستخدم. وهي تستخدم على نطاق واسع في العديد من المجالات. لدراسة الاثار المتكونة في الكواشف الصلبة، من الضروري معرفة آلية تكوين الأثر وقياس العديد من معالم الأثر المقشوط، مثل قياس قطر وطول الأثر وإيجاد معدل نموه، وكذلك تصوير أشكال الاثار المقشوفة ومراحل النمو التي تمر بها، وكذلك رسم أشكال الاثار نظريًا وفقًا لنماذج تكوين الأثر باستخدام برامج ومعادلات متعددة وضعت لهذا الغرض، والذي من خلاله يمكن معرفة وتمييز المعلومات الأساسية للجسيم النووي الذي يسقط على الكاشف [8-10]. ومن هذه الكواشف كاشف CR-39 الذي اكتشف عام 1978 من قبل الباحثان (Cartwright & Shirk) [11] ، يعد كاشف الاثر النووي CR-39 أحد أهم الكواشف العضوية التي لا تحتوي على النتروجين وهو عبارة عن مادة بوليمرية مختصرها CR مشتقة من Columbia Resin [12]. يحضر هذا الكاشف من عملية البلمرة لكاربونات الأليل دايكول المتعدد Ploy Ally diglycol Carbonate والصيغة الجزيئية له $(\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_7)_n$ ، وان الوزن الجزيئي المكافئ له يساوي 274 [13]، وكثافته 1.32gm/cm^3 . هنالك عدد من المعالم الاساسية في عملية تكوين الاثر واطهاره نتيجة سقوط جسيمات الفا على الكاشف CR-39 منها: معدل القشط العام [9] ، معدل القشط باتجاه الأثر، معدل نمو الاثر ومعدل القشط . يعرف معدل القشط العام V_B بأنه معدل ما يُزال من المادة من سطح الكاشف لكل وحدة زمنية بسبب القشط الكيميائي للكاشف [14] . فقد يحدث تحلل تدريجي للجزيئات السطحية للكاشف مع تقدم عملية القشط تبعاً لطبيعة المحلول القاشط، وزمن القشط، ونوع الكاشف فعملية القشط تؤدي إلى إزالة طبقة تلو الأخرى ويقل سمك الكاشف شيئاً

فشيئاً ويعد معدل القشط العام معلماً كشفياً (detecting parameter) مهماً [15] ، حيث يعتمد على نوع الكاشف وأصله ودرجة بلمرته، ونقاوة المادة المصنوع منها، ومدى تجانس مادة الكاشف وتماثل خواصه.

لقد درس Henk وجماعته الطريقة المثلى لإيجاد معدل القشط العام للكاشف (CR-39) واستنتج بأنه في الحالة التي يكون فيها سمك الطبقة التي تمت إزالتها أكبر من $15\mu\text{m}$ ، فإنه يستخدم طريقة تغير الكتلة (The mass change method) لإيجاد (V_B) ، و إذا كانت سُمك القشط أقل من أو تساوي $15\mu\text{m}$ ، يتم استخدام قطر شظايا الشظايا (FF method). أما بالنسبة لطريقة السُمك التي تمت إزالتها، فيتم استخدامها إذا كان الحفر كبيراً، مع الانتباه الدقيق لسُمك الكاشف قبل القشط [16].

قام Yu وجماعته بقياس معاملات الأثر في كاشف CR-39 باستخدام طريقة المتطابق الراتنجية (Epoxy replicas) ووجدوا معدل القشط V ، بعد تشعيه الكاشف بجسيمات ألفا بطاقة 4MeV من مصدر الأمرشيوم ^{241}Am ($1\mu\text{Ci}$) وقشطه باستخدام محلول هيدروكسيد الصوديوم NaOH بتركيز 6.25 N ودرجة حرارة 70°C لمدة 15 ساعة [6].

قام النعيمي والرمضاني بإيجاد معدل القشط العام لكاشف الأثر النووي CR-39 بطريقة قياس سمك الطبقة المزالة من سطح الكاشف بفعل القشط الكيميائي وقشط الكاشف بالمحلول الكيميائي NaOH بتركيز 6N عند درجات حرارة مختلفة $80,70,60,50\pm 1^\circ\text{C}$ ، وتم إيجاد سمك الطبقة المزالة بقياس تتابعي لسُمك الكاشف لآزمان قشط 1-9h بزيادة دورية 1h وقد أظهرت النتائج أن قيم V_B كانت $(0.605-2.351)\mu\text{m/h}$ عند درجات حرارة قشط ($50-80^\circ\text{C}$) على الترتيب كما استخدموا طريقة قطر طول (D-L method) لإيجاد معدل القشط العام [17].

ودرس Brunilda وجماعته الظروف المثالية لقشط الكاشف من نوع CR-39، حيث قاموا بقشط عينات من كاشف CR-39 المعرضة لمدة ستة أشهر في بيئة ذات مستوى رادون معروفة بمحلول NaOH وبتراكيز تراوحت بين $(4-8)\text{N}$ ودرجات حرارة مختلفة تراوحت بين $(50-80)^\circ\text{C}$ لفترات زمنية مختلفة من $(1-10)\text{ hrs}$ وبعد عمليات القشط تم تنظيف شرائح CR-39 في مياه جارية لمدة 20min ، وتجفيفها وبعد حساب معاملات الكاشف V, V_T, V_B ، وجد أن حالة القشط المثالية للكاشف CR-39 المستخدمة لهذه الدراسة، هي محلول NaOH بتركيز 6N عند درجة حرارة 70°C ، وعلى مدى 7hrs وكان معدل القشط العام في الظروف المثالية بحدود $V_B=1.15+0.05\mu\text{m hr}^{-1}$ [18].

لقد قام Khlile و Al-Jubbori بحساب معدل القشط العام للكاشف النووي CR-39 بطريقة السُمك المزال كانت قيمته $V_B=1.55\mu\text{m}$ كان ذلك بالنسبة للجزء الأول من الدراسة، أما الجزء الثاني فقد تم تشيع عينات من كاشف الأثر النووي CR-39 بجسيمات الفا بطاقة $E=1.2\text{ MeV}$ باستخدام مصدر لأمرشيوم ^{241}Am وبزاويا سقوط $(0,10,30,50)^\circ$ مختلفة مع العمود و قشطت العينات بمحلول هيدروكسيد الصوديوم بتركيز 6.25 N ودرجة الحرارة $(70\pm 1)^\circ\text{C}$ وتضمنت الدراسة حساب معاملات الأثر وتصوير مظاهره الجانبية ومقارنتها مع نتائج المعادلة الأولى من برنامج Track-Test [19] .

كما قام Malo وجماعته بقياس أطوال الأثار المتكونة على سطح كاشف الأثر النووي CR-39 حيث تم تقطيع كاشف الأثر النووي في الحالة الصلبة CR-39 الى عدة عينات ذات مساحة $(1\times 1)\text{ cm}^2$ وقد تم تشيع هذه العينات من خلال مصدر الأمرشيوم ^{241}Am وبطاقات جسيمات الفا $(3.13, 3.59\text{ and } 4.17)\text{ MeV}$ وبزاوية سقوط عمودية على سطح الكاشف و قشطت هذه العينات بمحلول هيدروكسيد الصوديوم NaOH وبظروف قشطية $(70\pm 1)^\circ\text{C}$ ولفترات قشط تتابعية قدرها 0.25h ومن ثم حساب طول الأثر كدالة لآمن القشط، وتمت دراسة معاملات تلك الأثار مثل معدل نمو الأثار ومعدل قشط الأثر ونسبة معدل القشط دالة لعدد من المعلمات منها زمن القشط، وعمق الأثر إضافة الى المدى المتبقي ولقد لاحظوا ان معدل قشط الأثر ونسبة معدل القشط تنطبق مع منحني براك الذي يهتم بدراسة فقدان الطاقة الخطي في المواد الصلبة اذ يتضح ان معدل فقدان يكون في حالته العظمى عند نهاية مدى الجسيم [20].

أن الهدف من هذه الدراسة هو إيجاد معدل القشط العام لكاشف الاثر النووي CR-39 بطرق مختلفة منها طريقة السُمك المزال (Removed thickness method) و طريقة ثبوت الأثر وطريقة قطر-طول الأثر (D-L method) وإجراء مقارنة النتائج بين الطرق المذكورة .

طريقة العمل :

في هذا البحث شعع كاشف الأثر النووي CR-39 ذات السمك $200\mu\text{m}$ بمساحة $(1\times 1\text{cm}^2)$ من خلال مصدر الأمريشيوم ^{241}Am وبطاقة جسيمات ألفا 2.6MeV وبزاوية سقوط عمودية على سطح الكاشف CR-39 وتم استخدام محلول هيدروكسيد الصوديوم NaOH بتركيز 6.25N ودرجة حرارة $(70\pm 1^\circ\text{C})$ لقشط الكاشف CR-39 وظهر الأثار المتكونة على سطح الكاشف بفترات زمنية تتراوح (1-4h) و تم تصوير الأثار المتكونة في الكاشف عند ازمان قشط مختلفة بواسطة المجهر البصري (الضوئي) من نوع (XSZ-H Series Biological Microscope) ولقوة تكبير $10\times$ المزود بكاميرا رقمية من نوع (MADC-5A) متصلة بجهاز الحاسوب الشخصي PC

الجانب النظري







هنالك عدد من الطرائق لحساب معدل القشط العام V_B ومنها:

طريقة السمك المزال (Removed thickness method):

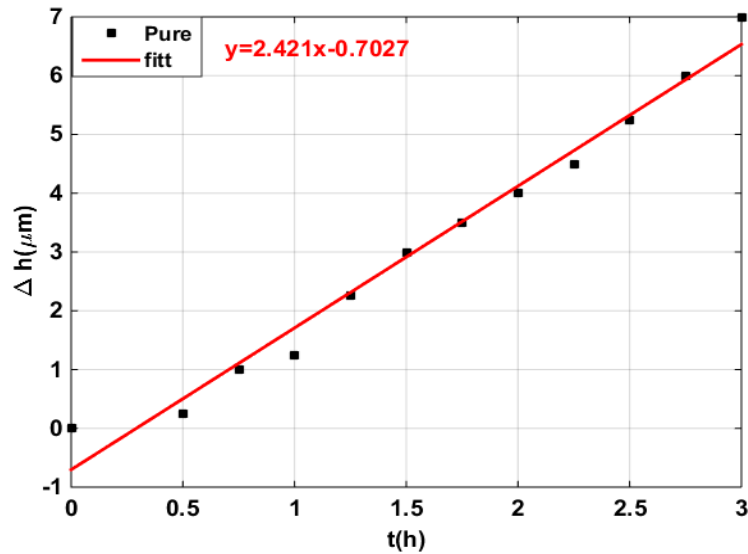
في هذه الطريقة يتم قياس السُمك المزال من سطح الكاشف $\Delta h(\mu\text{m})$ لأزمان قشط متعاقبة $\Delta t(\text{h})$ وتعطى V_B بالعلاقة التالية:

$$V_B = \frac{\Delta h}{2\Delta t} \quad \dots \dots (1)$$

حيث يظهر العامل (2) في المقام كون الكاشف يقشط من الجهتين ومع تطور الأجهزة حالياً أصبح بالإمكان قياس فرق السمك المزال بسهولة كما هو موضح في الشكل (1) من خلال كاميرا مثبتة على مجهر ومربوطة الى حاسبة [21] .

Objective lens 10x 1 Div=1μm		
t (h)	Δh(μm)	Detector
0	0	
1	1.25	
1.50	3	
2	4	
2.50	5.25	
3	7	

الشكل (1): التغير في سُمك الكاشف قبل القشط وبعده لمدة ثلاث ساعات.

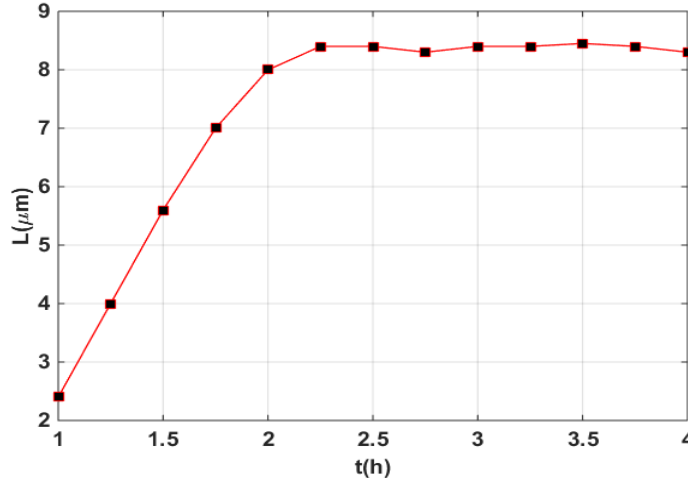


الشكل (2): تغير السُمك المزال من سطح الكاشف مع زمن القشط.

طريقة ثبوت الأثر

تعتبر هذه الطريقة حديثة نوعا ما لقياس معدل القشط العام وذلك من خلال معلمات الأثر عند بداية ثبوته وهي كل من طول الأثر عند الثبوت ويسمى اقصى طول اثر L_{max} (μm) والذي يقابل زمن الثبوت t_{sat} (hr) وبإيجاد مدى جسيمات ألفا $R(\mu m)$ وتحسب قيمته باستخدام برنامج SREM في الكاشف CR-39 تم قياس معدل القشط العام من المعادلة التالية: [9]

$$V_B = \frac{R-L_{max}}{t_{sat}} \dots \dots (2)$$

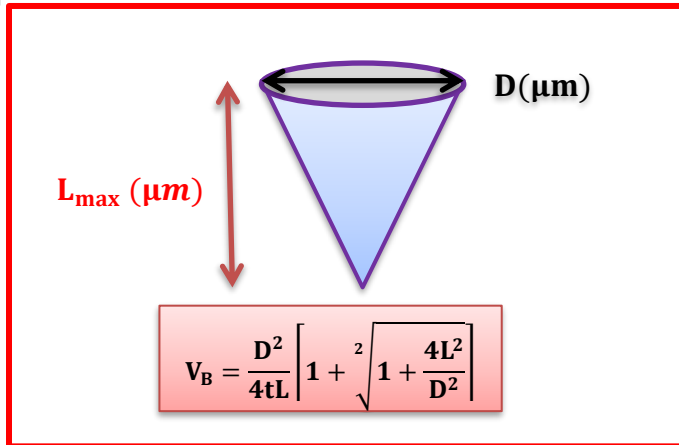


الشكل(3): العلاقة بين طول الأثر المقشوط وزمن القشط.

طريقة قطر-طول الأثر (D-L method):

تعتمد هذه الطريقة على طول وقطر الأثر في مرحلة النمو أي في مرحلة المخروط المنتظم وتتطلب هذه الطريقة دقة في قياسات طول الأثر المقشوط في مرحلة نموه $L(\mu m)$ وكذلك قطره $D(\mu m)$ والشكل (4) يوضح معلمات الأثر المقشوط في مرحلة المخروط المنتظم. ويمكن ايجاد V_B من العلاقة الآتية: [22]

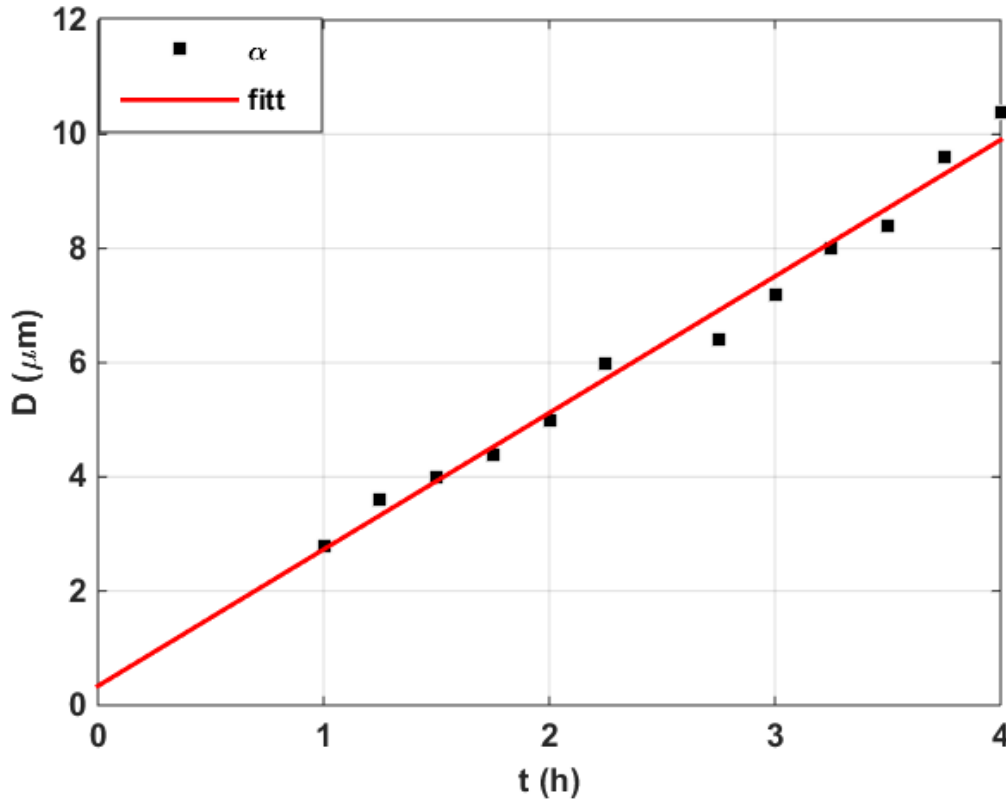
$$V_B = \frac{D^2}{4tL} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4L^2}{D^2}} \right] \dots \dots (3)$$



الشكل(4): معدل القشط العام بطريقة علاقة قطر - طول الأثر [23].

النتائج والمناقشة:

حسب معدل القشط العام بالطرائق الثلاثة انفة الذكر إذ إن الشكل (1) يبين سمك الطبقة المزالة دالة لزمن القشط ويتضح منه ان هنالك زيادة في سمك الطبقة المزالة مع التقدم في عملية القشط وهذا منطقي لكون سمك الكاشف يقل بزيادة زمن القشط وذلك لان المحلول القاشط سيهاجم الكاشف لفترة زمنية أطول وبالتالي يؤدي الى قشط طبقة مزالة اكبر استخدمت المعادلة (1) لحساب قيمة معدل القشط العام V_B وتبين انها تساوي $1.206 (\mu\text{m}/\text{h})$ من ميل المستقيم الموضح في الشكل (2) أما الطريقة الثانية (طريقة ثبوت الأثر) فيمثل الشكل (3) العلاقة بين طول الأثر المقشوط وزمن القشط اذ نلاحظ ان هنالك زيادة لا خطية بطول الأثر الى زمن معين يثبت بعده طول الأثر بزيادة زمن القشط. يتم اخذ زمن ثبوت الأثر والطول المرافق له ويعوضان في المعادلة (2) لإيجاد قيم V_B في دراستنا الحالية, $R=11.11(\mu\text{m})$ طول-قطر الأثر، نحتاج الى قياس اطوال واقطار الأثر المقشوط في المراحل الأولى الى ما قبل الثبوت وذلك بالاستعانة بالشكل (4) اما الشكل (5) فيمثل العلاقة بين قطر الأثر وزمن القشط ونلاحظ بان هنالك زيادة في قطر الأثر بتقدم زمن القشط وهذا منطقي ومن خلال المعادلة (3) وجد ان قيمة معدل القشط العام V_B هي $1.271(\mu\text{m}/\text{h})$.



الشكل (5): يمثل العلاقة بين قطر الأثر وزمن القشط.

الجدول (1): قيم معدل القشط العام بثلاثة طرق مختلفة.

Removed layer	$V_B = \frac{R - L_{\max}}{t}$	D-L	mean
1.206±0.221	1.204±0.069	1.271±0.075	1.227

الاستنتاجات:

في هذه الدراسة تم حساب معدل القشط العام V_B لكاشف النوي CR-39 بطرائق مختلفة ومنها طريقة السمك المزال (Removed thickness method) وفيما يخص هذه الطريقة فإنها لا تحتاج الى تشيع الكاشف وطريقة ثبوت الأثر وطريقة قطر-طول (D-L method) الأثر وأظهرت هذه الدراسة نتائج مقاربة وكما موضح في الجدول (1) كما ويلاحظ أن النتائج كانت متوافقة إلى حد كبير مع نتائج دراسات أخرى. إن طريقة ثبوت الاثر المستخدمة في دراستنا تمتاز بسهولةها وقدرتها على إيجاد معدل القشط العام V_B حيث تتطلب قياس واحد لطول الأثر من خلال تحديد القيمة العظمى لطول الأثر، وزمن ثبوته الذي يصل فيه طول الأثر إلى الثبوت إضافة إلى مدى جسيمات إلفا R .

تعتبر طريقة قطر-طول (D-L method) الأثر جيدة وصعبة الى حد ما وتحتاج هذه الطريقة إلى اجراء قياسات مباشرة ودقيقة لقطر الاثر $D(\mu m)$ وطوله $L(\mu m)$ في الطور المخروطي عند ثبوت الاثر ووصوله اقصى طول قبل الوصول الى الطور الكروي وتتميز هذه الطريقة بإيجاد الأطوال بدقة عالية لدراسة تطور الأثار من حيث نمو أشكالها (Track shape growth) , إذا ما تمت مقارنتها بالطرائق الأخرى .

شكر وتقدير

يود ان يشكر الباحثين عمادة كلية التربية للعلوم الصرفة قسم الفيزياء جامعة الموصل لتهيئة المستلزمات المطلوبة لإجراء البحث.

References

- [1] Al-Jubbori, M.A., 2013. Extension of alpha particles in CR-39-etched track depth model to heavier ion, Radia. Effe. Defe. Soli. 168 (11-12) 1004-1010.
- [2] Al-Jubbori, M.A., 2016. A parameterization of the chemistry-normality dependence of bulk etch rate in a CR-39 detector, Appli. Radia. Isoto. 118. 228-231.
- [3] Al-Jubbori, M.A., 2017. Empirical model of alpha particle track length in CR-39 detector, Nucl. Instrum. Methods A 871, 54-58.
- [4] Green P. Gi Ramli, A.G., AL. Najjar, - S. A. R. Abu- Jarad, F. and Durrania - S. A. and Durrani, S. A. (1982), "A Study of Bulk - Etch Rates and Track - Etch Rates in CR-39". Nucl... Instr. and Meth., 203, pp. 551-559.
- [5] Brun, C., Fromm, M; Jouffroy, M; Meyer, P; Groetz, J. E; Abel, Feja Chambaudet, A; Dorschel, B; Hermsdorf, Das Bretschneider, R; Kadner, K. and Kuhnes H., (1999), "Intercomparative Study of the Detection Characteristics of the CR-39 SSNTD for Light Ions: a Present Status of the Besancon. Dresden Approaches", Radiat. Meas31, pp. 89-98.
- [6] Yu, K. N.; Ng, F. M. F and Nikezic, D. (2005), "Measuring Depths of Sub-Micron in a CR-39 Detector from Replicas Using Atomic Force Microscopy, Radiat. Meas., 40, PP. 380-383.
- [7] Al-Jubbori, M. A. (2020), " V- function to investigate tracks of the alpha particle irradiated CR. 39 detector" Rad. Meas., 136-106388.
- [8] Nikezic, D. and Yu, K.N. (2006). Computer program TRACK-TEST for calculating parameters and plotting profiles for etch pits in nuclear track materials. Computer Physics Communications, 174, 160-165.
- [9] Azooz, A. A.; Al-Nia'emi, S. H. and Al-Jubbori, M. A. (2012b). Empirical parameterization of CR-39 longitudinal track depth. Rad.Meas., 47, 67-72.
- [10] Nikezic, D.; Ivanovic. M. and Yu K. N. (2016). A computer program TRACK P for studying proton tracks in PADC detectors. SoftwareX 5, 74–79. www.elsevier.com/locate/softx.
- [11] Cartwright, B. G. and Shirk, E. K. (1978), "A Nuclear-Recording Polymer of Unique Sensitivity and Resolution", Nucl. Instr. Meth., 153, PP. 457-460.

- [12] Harvey, J. R., Tanner, R. J., Alberts, W. G., Bartlett, D. T., Piesch, E. K. A. and Schraube, H. (1998). "The Contribution of Eurodos and Cendos to Etched Track Neutron Dosimetry the Current Status in Europe". *Radiat. Prot. Dosimetry*, 77 (1-4), PP.267-304
- [13] Nikezic, D. and Yu., K.N. (2007), "Computer Simulation of Radon Measurements with Nuclear Track Detector", Editor: Silvan J. Bianco, pp. 119-150.
- [14] Hermsdorf, D. and Hunger, M. (2009). Determination of track etch rates from wall profiles of particle tracks etched in direct and reversed direction in PADC CR-39 SSNTDs. *Radiat. Meas.*, 44(9-10), 766-774.
- [15] Nikezic, D. and Yu, K.N. (2006). Computer program TRACK-TEST for calculating parameters and plotting profiles for etch pits in nuclear track materials. *Computer Physics Communications*, 174, 160-165.
- [16] Henke R., K. Ogura* and E. V. Benton (1986)," STANDARD METHOD FOR MEASUREMENT OF BULK ETCH IN CR-39" *Nuclear Tracks*, Vol. 12, Nos I-6, pp. 307-310.
- [17] Al-Nia'emi, S. H. S. and A. Q. M. Al-Ramadhni. (2018) Bulk etch rate and the activation energy of the CR-39 detector using thickness difference method. *Kirkuk University Journal/ Scientific Studies*. 13(2) 114-126.
- [18] Brunilda Daci, Kozeta Tushe-Bode, Elida Bylyku, and Dritan Prifti,(2019)," Study of optimal etching conditions of passive radon detectors (SSNTD's Cr-39)" *Natural radioactivity in cigarette tobacco and radiation dose induced from smoking AIP Conference Proceedings 2075*.
- [19] Yasser T. Khilile and Mushtaq A. D. Al-Jubbori.(2020) Investigate Oblique Incident Alpha Particle Tracks on CR-39 Detector. *Journal of Education and Science (ISSN 1812-125X)*, Vol: 29, No: 3, 2020 (196-210).
- [20] Sabreen Thanoon Malo, Yasir Yahya Kasim, Mushtaq Abed Al-Jubbori .(2021), Study of nuclear track parameters of normal incident alpha particles on CR-39 detector. *Journal of Education and Science (ISSN 1812-125X)*, Vol: 30, No: 2, 2021 (138-147).
- [21] Ho, J. P. Y.; Yip, C. W. Y.; Koo, V. S. Y. and Yu, K. N. (2002), "Feasibility and Limitation of Track Studies Using Atomic Force Microscopy", *Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research B*, 197, PP. 293-300.
- [22] Balestra, S.; Cozzi, M.; Giacomelli, G.; Giacomelli, R.; Giorgini, M.; Kumar, A.; Mandrioli, G.; Manzoor, S.; Margiotta, A. R.; Medinaceli, E.; Partizii, L.; Popa, V.; Qureshi, I. E.; Rana, M. A.; Sirri, G.; Spurio, M.; Togo, V. and Valieri, C. (2007), "Bulk Etch Rate Measurements and Calibrations of Plastic Nuclear Track Detectors", *Nucl. Instr. Meth. in physics research, B* 254, pp. 254-258
- [23] Manzoor, S. (2006), "Nuclear Track Detectors for Environmental Studies and Radiation Monitoring", *Physical Department, University of Bologna*.
<http://www.slac.stanford.edu/spires/find/hep/wwwauthors?key=6995985>.