

المجلة الأردنية للفيزياء

ARTICLE

برنامج حاسوبي لتعداد آثار جسيمات ألفا وقياس أقطارها
في كاشف الأثر النووي CR-39

مشتاق عبد داود الجبوري و صلاح أحمد محمد الشميسي
قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة الموصل، الموصل، العراق.

Received on: 15/9/2014;

Accepted on: 19/1/2015

الملخص: يتعلق البحث بتصميم برنامج حاسوبي بلغة Matlab-2012 واختباره يقوم بإجراء عمليات المعالجة الصورية لآثار جسيمات ألفا الساقطة على كاشف الأثر النووي CR-39، وذلك من خلال استخدام كاميرا رقمية متصلة بمايكروسكوب (مجهر). يقوم البرنامج بقياس أقطار الآثار كل على حدة وتسجيل قيمة كل قطر على الصورة الرقمية وحساب معدل الأقطار وانحرافاتها المعيارية ضمن المشهد الواحد. كما يوفر البرنامج جهداً كبيراً بالمقارنة مع الطريقة اليدوية التقليدية المستخدمة في دراسة الآثار النووية، بالإضافة إلى زيادة الدقة في قياس الأقطار من خلال تجنب الأخطاء اليدوية الناتجة عن استخدام المايكروسكوب. يؤدي هذا البرنامج من خلال استخدامه في تحليل آثار جسيمات ألفا بطاقات 2, 2.5, 3.1 MeV على الكاشف CR-39 بعد عمليات القشط بمحلول NaOH 6.25 N بدرجة حرارة $(70 \pm 1)^\circ\text{C}$ إلى التمكن من الوصول إلى معادلات تجريبية لوصف علاقة قطر الأثر مع كل من طاقة جسيمات ألفا ومع درجة حرارة محلول القشط.

الكلمات المفتاحية: كواشف الأثر النووي، نمذجة أقطار ألفا، معادلات تجريبية، CR-39، Matlab.

Computer Algorithm for Counting and Measuring Alpha Particles Track Diameters in CR-39 Detectors

Mushtaq Al-Jubbori and Salah Al-Shumaisy

Department of Physics, College of Education for Pure Science, Mosul University, Mosul, Iraq.

Abstract: This work is concerned with the design and test of a Matlab-2012 computer algorithm capable of performing image processing operations on digital images of alpha particles tracks on CR-39 detectors. The software measures the diameters of individual tracks separately and registers the measured value of each diameter on the digital picture. It also calculates the mean and standard deviation for all tracks within any particular view. In addition to the enhanced measurement accuracy resulting from the elimination of sources of human errors associated with microscope measurements, the software saves a great deal of manual effort compared with the method currently being used for the study of nuclear tracks. The use of the software in the analysis of 2, 2.5, 3.1 MeV alpha particles tracks on CR-39 detector etched with 6.25 N NaOH solution at $(70 \pm 1)^\circ\text{C}$ resulted in the ability to reach some empirical relations describing the tracks diameters as functions of alpha particles energy and etching solution temperature.

Keywords: CR-39 detectors; Alpha diameters modeling; Empirical relations; Matlab.

المقدمة

لقد وفر التطور الكبير في برمجيات الحاسبات المختصة بالمعالجات الصورية في السنوات الأخيرة إمكانيات واسعة من أجل تطوير عمليات التعداد اليدوي للأثار في الكواشف النووية. ويتعلق هذا البحث بتطوير برنامج خاص يستخدم البرمجة بلغة MATLAB لتحقيق هذا الغرض. وقد تم استخدام هذه اللغة البرمجية، ليس فقط بسبب قدرتها الكبيرة في إجراء عمليات المعالجة الصورية، ولكن أيضاً لتمتعها بأدوات حسابات إحصائية ورياضية كبيرة بشكل يمكن من خلاله إجراء تحليلات إضافية للنتائج المستخلصة. كما يمكن أيضاً بسهولة تخزين النتائج الرقمية أو نقلها لتستخدم ضمن برمجيات شائعة أخرى مثل Microsoft Excel.

الجانب العملي

1- التشعيع والقشط

تم في هذا البحث استخدام كاشف الأثر النووي CR-39 بريطاني المنشأ من صنع شركة (Page Moldings Pershore UK) بسمك $200\mu\text{m}$ لقياس أقطار آثار جسيمات ألفا. والكاشف عبارة عن مادة بوليمرية بلاستيكية صلبة من نوع متعدد الكربون يمتاز بتجانس مادته وتمائل خواصه وبخلفيته الإشعاعية القليلة وحساسيته العالية للكشف عن الجسيمات المشحونة مثل جسيمات ألفا وكذلك الكشف عن النيوترونات. تم تقطيع هذا الكاشف إلى مجموعتين ذات أبعاد $1\text{cm} \times 1\text{cm}$. وللحصول على صور أقطار الآثار لفترات قشط مختلفة جرى تشعيع الكاشف بجسيمات ألفا المنبعثة من مصدر ^{241}Am بطاقة قصوى 5.485MeV لها متوسط مدى في الهواء مقداره 4.16cm . ولأجل الحصول على طاقات مختلفة، تم تغيير المسافة بين المصدر المشع والكاشف من خلال منظومة تشعيع للحصول على الطاقات المستخدمة في هذا البحث. أخذت عدة عينات من الكاشف بواقع مجموعتين: جرى تعريض المجموعة الأولى المؤلفة من عينتين لجسيمات بطاقات $(2.5, 2)$ MeV في حين شُعبت المجموعة الثانية المكونة من أربع عينات بطاقة 3.1MeV بهدف إجراء دراسة جزئية لتأثير درجة حرارة محلول القشط على أقطار الآثار. وتضمنت عملية التشعيع استخدام منظومة بحيث تكون كمجمع لجسيمات ألفا من خلال ثقب صغير لا تتجاوز مساحته 1mm^2 ، وذلك لضمان السقوط العمودي لجسيمات ألفا على الكاشف CR-39. بعد قشط العينات لغرض حفر

تتباين كفاءة الأنواع المختلفة من كواشف الأثر النووي في التحسس بالجسيمات الساقطة عليها تبايناً كبيراً. وتعتمد هذه الكفاءة أيضاً على نوع الجسيم الساقط وطاقته. وعلى الرغم من أن الكواشف الإلكترونية بمختلف أنواعها تتمتع بخصائص أفضل في مجال الاستخدام بهدف كشف نوعية الجسيمات وطاقاتها، فإن اللجوء إلى استخدام الكواشف البلاستيكية ككواشف LR-115, CN-85, CR-39, PM قد يكون أكثر ملاءمة في بعض التطبيقات والاستخدامات [4-1] المتعلقة بمراقبة التلوثات الإشعاعية لفترات طويلة، وذلك لسهولة استخدامها وعدم حاجتها إلى أجهزة إلكترونية ومجسات قدرة... إلخ. وعلى الرغم أيضاً من أن قدرة التمييز للطاقات المختلفة لهذه الكواشف هي محدودة جداً، فإنها في الوقت نفسه تتمتع بكفاءة كشف عالية جداً تقترب من 100%، إذ إن معظم الجسيمات المادية أو جميعها كالبروتونات وجسيمات ألفا والأيونات التي تسقط عليها تؤدي إلى تكوين آثار ثابتة في هذه الكواشف. وبذلك فإن المؤثر الرئيسي المهم في تحديد كفاءة الكاشف هو مدى فعالية العمليات والإجراءات المتبعة في إظهار تلك الآثار [7-5].

تتضمن عمليات إظهار الآثار في معظم الأحيان إجراء عملية القشط الكيميائي لفترات زمنية معينة بهدف إزالة جزيئات مادة الكاشف المتأثرة بالجسيمات المشحونة من خلال تحول تلك الجزيئات الخاملة إلى جذور كيميائية حرة يمكن إذابتها في محلول قاعدي عند درجات حرارة معينة. وقد أجريت الكثير من البحوث والدراسات المتعلقة بأنواع المحاليل المستخدمة ومدى درجات الحرارة لأنواع كثيرة من الجسيمات المشحونة لفترات قشط مختلفة [10-8].

تعتبر كثافة الآثار المتكونة على الكاشف مقياساً مباشراً لشدة الإشعاعات المؤينة التي يكون الكاشف قد سبق أن تعرض لها. وعلى هذا الأساس، فإن مدى كفاءة عملية تعداد الآثار التي تظهرها عملية القشط هو من العوامل الحاسمة في تحديد دقة القياسات. وتتم عملية التعداد هذه عادة بطريقة يدوية من خلال استخدام المجهر الضوئي الاعتيادي في تحديد عدد الآثار لكل وحدة مساحة للكاشف وكذلك قياس أقطار تلك الآثار، وهذا ما يسمى الطريقة اليدوية. وتتطلب هذه الطريقة جهداً بشرياً لا يُستهانُ به إضافة إلى إمكانيات حدوث أخطاء في أثناء عمليات العد والقياس.

صور الآثار النووية بعد معالجتها من البرنامج لكي تصبح صورة ثنائية اللون، ومن ثم أخذ معكوس الصورة ثنائية اللون حيث يتم تحويل الخلفية من البيضاء إلى السوداء، وذلك لكي يتمكن البرنامج من عزل الآثار عن الشوائب (الخلفية الإشعاعية) الموجودة في الكاشف، وهذا موضح في الشكل (1-d)، وبعدها يقوم البرنامج بعد الأثر وقياس أقطارها من خلال الدالة Center التي تسمح بتحسس الأشكال الدائرية وقياس أقطارها. والخطوة الأخيرة في البرنامج هي إعادة قراءة الصورة الأصلية وطباعة قطر كل أثر من هذه الآثار على الصورة الأصلية وكتابة عبارة (original image with calculation) للتأكد من أنها الصورة النهائية للكاشف، وهذا موضح في الشكل (1-e). ولا تستغرق عملية المعالجة وإجراء العد والحسابات سوى بضع ثوان حسب عدد الآثار. يُظهر الشكل (2) الزمن المستغرق في تنفيذ البرنامج من خلال طباعة دوال حساب الزمن المستغرق في تنفيذ البرنامج على الشاشة الخاصة بماتلاب (Work Space) (عدّ الآثار وقياس أقطارها وطباعتها).

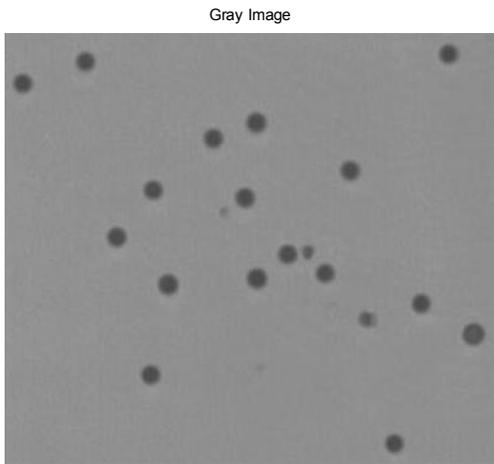
أظهرت عمليات تعداد الآثار تطابقاً جيداً بين الطريقتين الحاسوبية واليدوية، في حين أنّ الدقة في قياس الأقطار بالطريقة الحاسوبية متفوقة كثيراً على نظيرتها اليدوية؛ إذ إنّ دقة الأولى تكون بحدود البكسل (Pixel). وكمثال على ذلك، فإنّ صورة لمشهد 1mm x 1mm مأخوذة بحجم 10000 x 10000 pixels ستوفر دقة في القياس تصل إلى 0.1 مايكرون، وهي دقة كبيرة بالمقارنة بالقياس اليدوي التي تصل دقته إلى حوالي 1 مايكرون.

المناطق التالفة لإظهار الآثار المتكونة، استخدام محلول هيدروكسيد الصوديوم NaOH بتركيز 6.25N ودرجة حرارة 70 ± 1 °C للطاقتين (2.0, 2.5) MeV. وفي حالة العينات المُشعّعة بطاقة 3.1 MeV (المجموعة الثانية) استخدم تركيز المحلول نفسه 6.25N لكن بمدى مختلف لدرجات الحرارة $70-85$ °C بزيادة تتابعية مقدارها 5°C، وذلك لدراسة تأثير درجة حرارة المحلول القاشط على أقطار الآثار. ولأخذ صور للآثار المقشوفة وقياس أقطارها، تم ربط الكاميرا الرقمية من نوع OPTIKAM (4083.B5 مع المجهر الضوئي من نوع OPTIKA B-193) الذي يعمل ضمن برنامج معين لغرض نقل صور الآثار مباشرة إلى الحاسوب الشخصي PC حيث يتم إجراء عمليات القياس عليها باستعمال تقنية التحليل الصوري من خلال البرنامج الحاسوبي الذي تم إعداده.

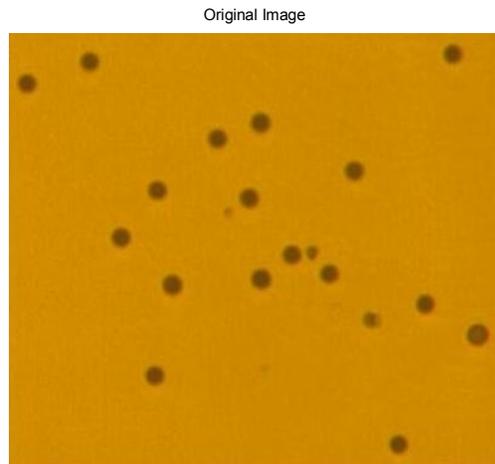
2- المعالجة الصورية الحاسوبية

تمت كتابة برنامج حاسوبي بلغة Matlab2012 لعدّ آثار جسيمات ألفا المتكونة على سطح الكاشف وقياس أقطارها، وسُمي هذا البرنامج "CR-39-D1" وهو متوفر الآن على موقع تبادل الملفات الخاص بـ Matlab من خلال الرابط التالي حيث يتم تحميل هذا البرنامج [11] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/44920-cr-39-d1>

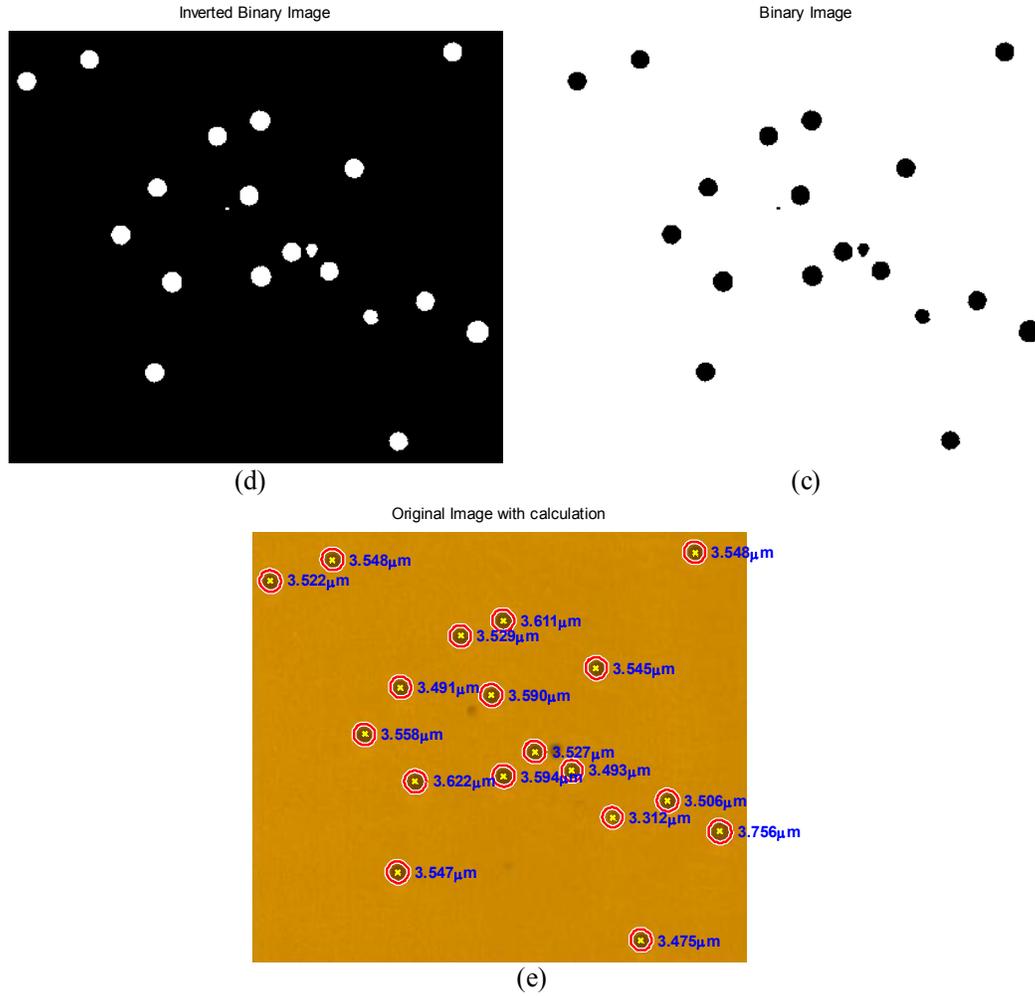
يقوم البرنامج "CR-39-D1" بتحميل الصورة وقراءتها آلياً، وهذا موضح في الشكل (1-a). ومن خلال دوال متحسسة في لغة Matlab كدالة Gray تحول الصورة إلى اللون الرمادي لكي يتسنى للبرنامج تحسس الآثار النووية كما في الشكل (1-b). أما الشكل (1-c) فيبين



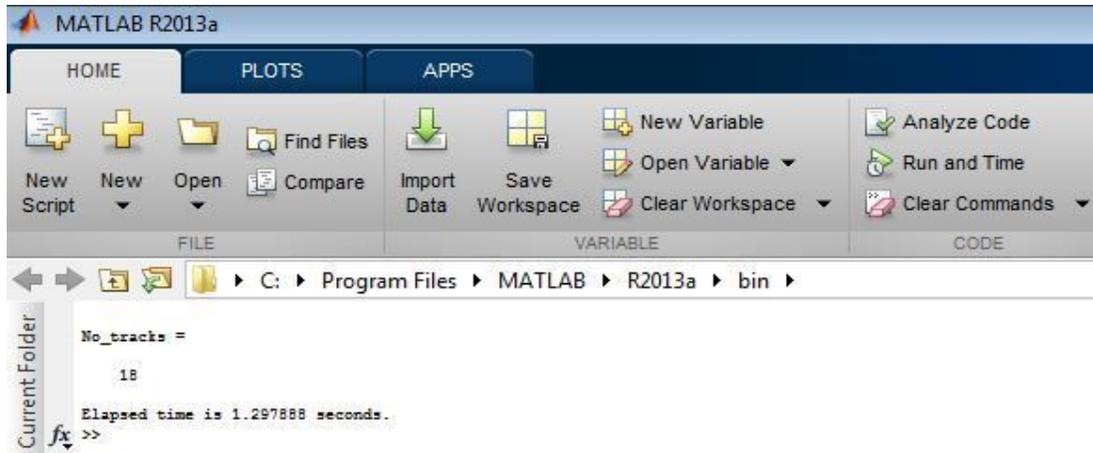
(b)



(a)



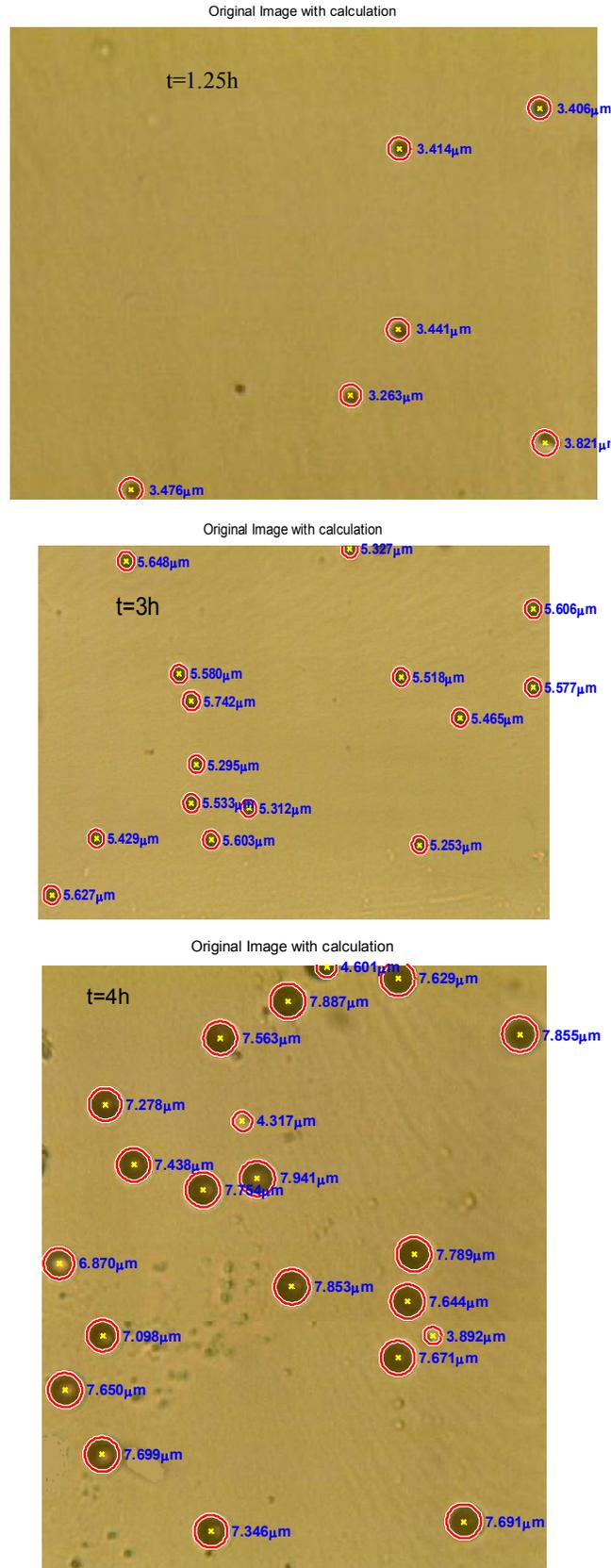
الشكل (1): مراحل قراءة الآثار المتكونة في الكاشف CR-39 وعدّها وقياسها للطاقة 3.1 MeV وزمن قشط 2hr.



الشكل (2): مخطط طباعة عدد الآثار والوقت المستغرق لتنفيذ البرنامج.

بدايات عملية القشط تكون صغيرة، أما في مراحل متقدمة من عملية القشط، فإن هذه الأقطار تزداد تبعاً.

بعد التأكد من توافق نتائج البرنامج مع النتائج اليدوية ومدى صحة عمله، التقطت صور لآثار مختلفة ولأزمنة قشط مختلفة. ويتضح من الشكل (3) أن الأقطار في



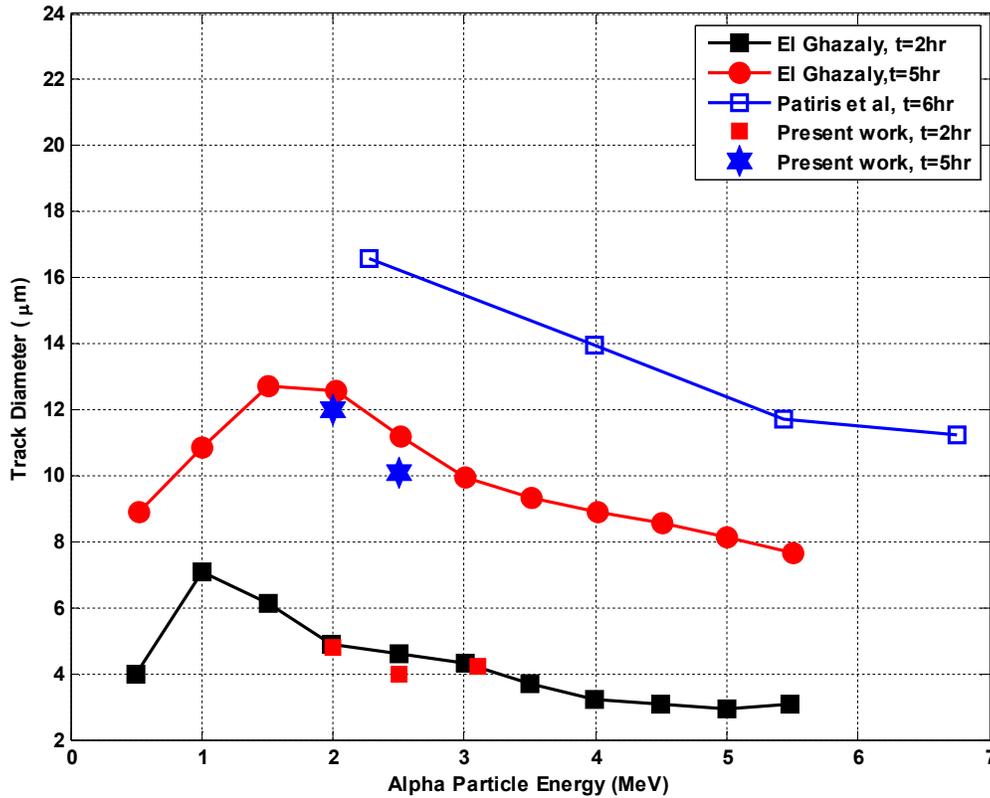
الشكل (3): عند الأثار وقياس أقطارها للطاقة 2MeV ولأزمان قشط مختلفة عند درجة حرارة 70°C.

Ghazaly) لأثار جسيمات ألفا عند الطاقات وأزمان القشط نفسها كما هو مبين في الشكل (4). إذ إن El Ghazaly استخدم في بحثه شروط القشط نفسها من تركيز محلول NaOH ودرجة حرارته (6.25N, T=70°C). أما فيما يخص نتائج (Patiris *et al.*) [13], فنلاحظ أن هنالك انحرافاً بسيطاً؛ إذ استخدموا شروط قشط مغايرة: NaOH (6N, T=75°C).

ولغرض التأكد من صحة أداء البرنامج وكفاءته، فقد تم إجراء مقارنة بين البيانات المستحصلة عن طريق استخدام البرنامج وتلك التي تم الحصول عليها بالطريقة اليدوية. ويوضح الجدول (1) نتائج هذه المقارنة. وتظهر هذه النتائج توافقاً جيداً بين الطريقتين ضمن حدود الخطأ التجريبي للطريقة اليدوية الذي لا يقل عن 10% في أحسن الأحوال. إضافة لذلك، فإن هذه النتائج جاءت متوافقة مع النتائج المستقلة المنشورة [12] (El

الجدول(1): مقارنة بين الطريقتين اليدوية والرقمية لبعض أقطار آثار ألفا.

E_{α} (MeV)	Etching Time, t (hr)	Diameter, D (μm)	
		Manual System	Digital System
2.0	2	5.20±0.30	4.80±0.05
2.5	2	4.50±0.23	4.00±0.02
3.1	4	6.75±0.15	6.50±0.01



الشكل (4): مقارنة بين القياسات الحالية وقياسات El Ghazaly [12] و Patiris *et al.* [13] لأقطار آثار جسيمات ألفا.

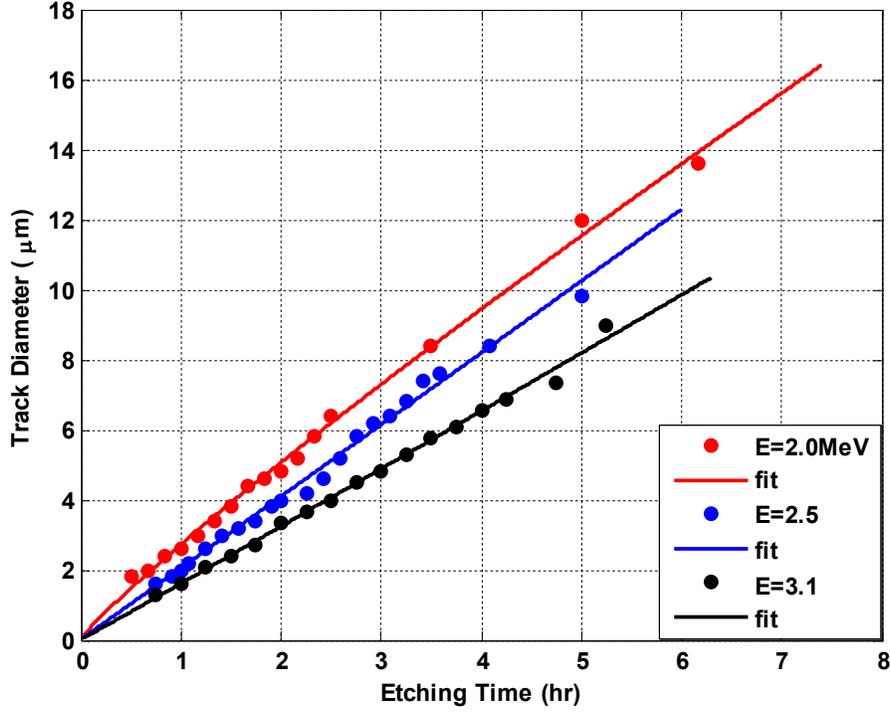
النتائج والمناقشة

ولأجل الوصول إلى معادلة تربط الأقطار بطاقات جسيمات ألفا وزمن القشط، تم رسم هذه الأقطار كدالة لزمن القشط للطاقات الثلاث التي تمت دراستها في الشكل (5). إن أي علاقة من هذا النوع يجب أن تأخذ بعين الاعتبار وجوب تحقيقها للشروط الفيزيائية التالية:

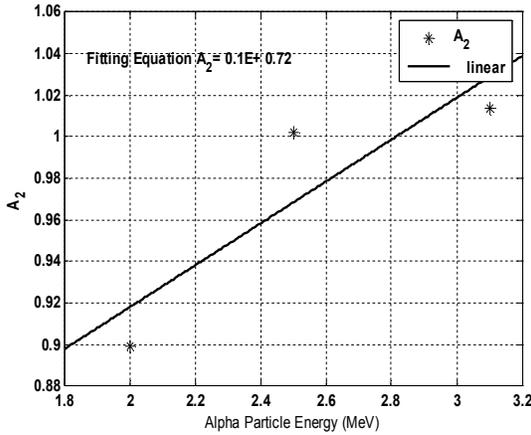
بعد التأكد من أداء البرنامج الحاسوبي، تم استخدامه لقياس تطور أقطار الآثار مع كل من زمن القشط ودرجة حرارة المحلول القاشط، بهدف محاولة وضع علاقة تجريبية بين أقطار الآثار وكل من طاقة الجسيمات وزمن القشط ودرجة حرارة المحلول.

1- يجب أن تحقق المعادلة المقترحة زيادة قطر جسيم ألفا بزيادة زمن القشط.
 2- عند زمن قشط وطاقة مساويين للصفر، يجب أن يكون القطر مساوياً للصفر أيضاً $D(t=0, E=0) = 0$.
 وعلى هذا الأساس، فقد تم اختيار معادلة من النوع:
 $D(t) = A_1 t^{A_2}$ (1)
 الساقط. أُجريت عملية الموازنة للمعادلة (1) لإيجاد قيم المعلمات الحرة للطاقت المستخدمة في هذا البحث (2.0, 3.1) MeV باستخدام برنامج Matlab الذي يعطي درجة ثقة لإجراء الموازنة تزيد على 95%. ولكي تكون المعادلة (1) أكثر فائدة، يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار اعتماد المعلمتين A_1 و A_2 على الطاقة كما هو موضح في الشكل (6).

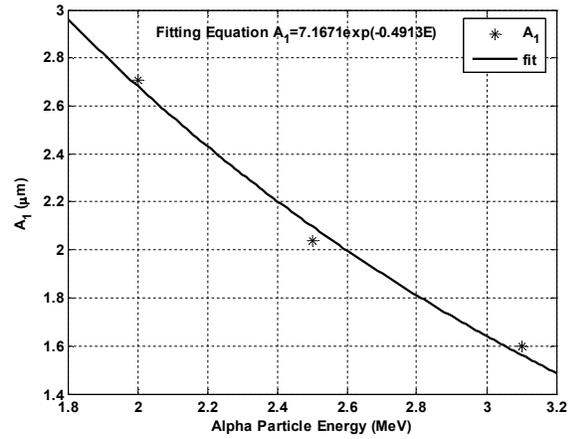
1- يجب أن تحقق المعادلة المقترحة زيادة قطر جسيم ألفا بزيادة زمن القشط.
 2- عند زمن قشط وطاقة مساويين للصفر، يجب أن يكون القطر مساوياً للصفر أيضاً $D(t=0, E=0) = 0$.
 وعلى هذا الأساس، فقد تم اختيار معادلة من النوع:
 $D(t) = A_1 t^{A_2}$ (1)



الشكل(5): تغير أقطار آثار جسيمات ألفا مع زمن القشط.



(b)



(a)

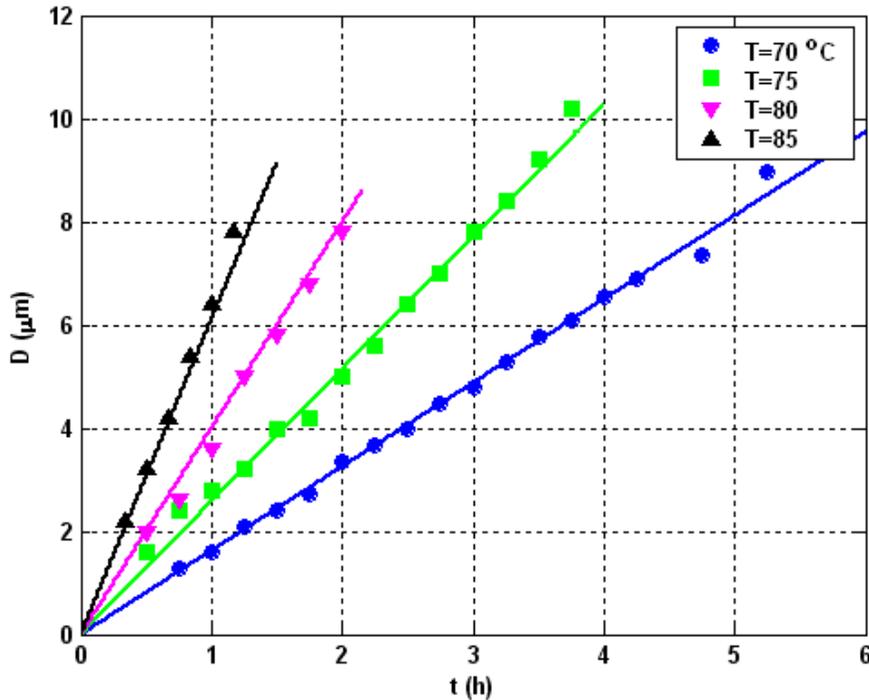
الشكل(6): تغير المعلمتين A_1 و A_2 مع طاقة جسيمات ألفا.

بمحلول NaOH بعيارية 6.25N وبمدى درجات حرارة $70-85^{\circ}\text{C}$ بزيادة تناهية مقدارها 5°C . ولإيجاد معادلة لأقطار جسيمات ألفا دالة لدرجة حرارة المحلول القاشط، رسم تغير هذه الأقطار مع زمن القشط لدرجات الحرارة $70, 75, 80, 85^{\circ}\text{C}$ بالطريقة نفسها المتبعة في الوصول لمعادلة الأقطار دالة للطاقة. وقد تم الوصول إلى معادلة أخرى تربط بين الأقطار ودرجة حرارة المحلول القاشط ولها شروط المعادلة (1) نفسها؛ أي أنها تحقق $D(t=0, T=0) = 0$. ويمكن أن تعطى هذه المعادلة بالصيغة التالية:

$$D(t, T) = \left. \begin{aligned} &(-b_1 T + 2200)(1 - \exp(-(b_2 \exp(b_3 T))t)) \end{aligned} \right\} (5)$$

حيث T درجة حرارة المحلول القاشط و t زمن القشط. أما قيم المعلمات b_1, b_2, b_3 فهي كما يلي: $b_1 = 19 \mu\text{m}^{\circ}\text{C}$, $b_2 = 6.028 \times 10^{-7}$ and $b_3 = 0.1149^{\circ}\text{C}^{-1}$.

يبين الشكل (7) تغير أقطار آثار جسيمات ألفا لدرجات حرارة مختلفة للمحلول القاشط. ويتضح من الشكل أن التوافق جيد بين قيم الأقطار المقاسة (العملية) وحسابات المعادلة (5)؛ إذ تدل الإشارات الملونة على القيم العملية في حين تدل الخطوط الملونة على نتائج المعادلة (5).



الشكل (7): تغير أقطار آثار جسيمات ألفا بدلالة زمن القشط لدرجات حرارة مختلفة للطاقة 3.1MeV وعيارية 6.25N للمحلول.

يتضح من الشكل (6-a) أن مواعمة المعلمة A_1 غالباً تكون دالة أسية تناقصية، وهذا منطقي؛ إذ عند زمن قشط ثابت فإن أقطار جسيمات ألفا تقل بزيادة طاقة الجسيم. أما فيما يخص المعلمة A_2 فتكون العلاقة أقرب إلى الدالة الخطية. لذا أستنبطت معادلات المعلمتين أعلاه دالة للطاقة كما يلي:

$$A_1 = a_1 \exp(-a_2 E) \quad (2)$$

$$A_2 = a_3 E + 0.72 \quad (3)$$

ومن الممكن كتابة المعادلة (1) دالة لزمن القشط t وطاقة الجسيم E بدلالة المعلمات الجديدة a_1, a_2, a_3 .

$$D(t, E) = a_1 \exp(-a_2 E) \times t^{a_3 E + 0.72} \quad (4)$$

المعلمات الثلاث أُختبرت بحيث تكون لها القيم نفسها للطاقات المستخدمة. وفي بحثنا هذا كانت قيم هذه

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= 7.1671 \mu\text{m}, \\ a_2 &= 0.4913 \text{MeV}^{-1} \\ a_3 &= 0.1 \text{MeV}^{-1} \end{aligned} \right\} \text{المعلمات:}$$

إن لدرجة حرارة المحلول القاشط تأثيراً على سرعة عملية القشط [14]. ولدراسة هذا التأثير على أقطار آثار جسيمات ألفا أخذت أربع عينات من كاشف CR-39 وشُععت بجسيمات ألفا بطاقة 3.1MeV. قشطت العينات

الاستنتاجات

عدة أضعاف الدقة التي يتم الحصول عليها يدوياً والتي يحددها سمك شعيرة (تدریجة) القياس للمايكروسكوب المستخدم. كما أن السرعة والدقة التي تميزت بها الطريقة الرقمية أدت إلى إمكانية إجراء عدد كبير من القياسات تحت ظروف مختلفة، وساعدت نتائجها في التوصل إلى علاقات تجريبية لأقطار الأثار مع متغيرات عدة: كطاقة الجسيمات، وزمن القشط، ودرجة حرارة محلول القشط.

أظهرت النتائج أن استخدام الطريقة الرقمية التي تم عرضها في هذا البحث يوفر سرعة ودقة مضافة في عمليات تعداد الأثار وقياس أقطارها. وفرت الطريقة الجديدة التي أتمتت المعالجة الصورية باستخدام البرمجة بلغة Matlab في بناء برمجياتها سرعة كبيرة جداً في حساب عدد الأثار النووية الموجودة على وحدة السطوح للكاشف بالمقارنة مع طريقة التعداد اليدوية. أما فيما يتعلق بالدقة، فإن الطريقة الرقمية التي تتحدد دقتها بأبعاد pixel وفرت دقة تفوق

المراجع

- [8] Cassou, R.M. and Benton, E.V., Nucl. Track. Detect., 2 (1988) 173.
- [9] Sadowski, M., Al-Mashhadani, E.M., Szydlowski, A.T., Czyzewki, T., Glowacka, L., Jaskola, M., Rolfs, C. and Wielunski, M., Radiat. Meas., 25(1-4) (1999) 175.
- [10] Dwaikat, N., El-hasan, M., Sueyasu, M., Kada, W., Sato, F., Kato, Y., Saffarini, G. and Iida, T., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B, 268 (2010) 3351.
- [11] http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4492_0-cr-39-d1
- [12] El Gazaly, M., Radia. Eff. and Deff. in Soli, 167 (6) (2012) 421.
- [13] Patiris, D.L., Blekas, K. and Ioannides, K.G., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B, 244 (2006) 392.
- [14] Al-Jubbori, M.A., Raf. J. Sci., 25(1) (2014) 120.
- [1] Al-Jubbory, M.M.S., M. Sc. Thesis, Physics Dept., College of Education, University of Mosul, Iraq (2004).
- [2] Ramakumar, K.L., "Interaction of Radiation with Matter", Ed. Rama Rao, G.A., III(3), (IANCAS Bulletin, 2004), pp. 189-192.
- [3] Al-Jumaely, F.M.A., Ph.D. Thesis, Physics Dept., College of Science, University of Mosul, Iraq (2009).
- [4] Yu, K.N., Ng, F.M.F. and Nikezic, D., Radiat. Meas., 40 (2005) 380.
- [5] Al-Jubbori, M.A.D., Ph.D. Thesis, Physics Dept., College of Education, University of Mosul, Iraq (2004).
- [6] Patiris, D.L., Blekas, K. and Ioannides, K.G., Comp. Phys. Comm., 177 (2007) 329.
- [7] Sinenian, N., Rosenberg, M.J., Manuel, M.J.E., McDuffee, S.C., Casey, D.T., Zylstra, A.B., Rinderknecht, H.G., Gatu Johnson, M., Seguin, F.H., Frenje, J.A., Li, C.K. and Petrasso, R. D., Revi. Scien. Instr., 82(10) (2011) 103303.