----- مجلة علوم الرافدين، المجلد 16، العدد 1 خاص بالفيزياء، ص 100-114، 2005 -----

حساب طاقة تنشيط المعالجة الحرارية للكاشف CR-39

احمد خلف محيميد محمد عبد الحسين الكعبي

قسم الفيزياء – كلية التربية

جامعة الموصل

(تاريخ الاستلام 2002/4/9 ، تاريخ القبول 2002/11/2)

الملخص

تم في هذا البحث دراسة تأثير درجة حرارة المعالجة الحرارية وزمنها وزمن القشط على اقطـــار اثار جسيمات الفا وذلك باستخدام كاشف الاثر النووي CR-39. تم ايجاد طاقة تنشيط المعالجة الحراريـــة (Ea) باستخدام نموذجين من النماذج الموضوعة لحسابها ولكل زمن من ازمان التسخين.

Calculating Activation Energy for the Annealing of CR-39 Detector

Ahmed K. Mheemeed **Mohammed A. AL-Kabi**

Department of Physics
College of Education
Mosul University

ABSTRACT

In the present work, the effect of annealing temperature, annealing time and etching time on the track diameter of α-particle have been studied using CR-39 detector. Two models were used to measure the activation energy (E_a) at each time periods.

المقدمة

نظرا لامتلاك كاشف الاثر النووي (CR-39) قدرة تحليل وحساسية عالية فقد وظف في العديـد من التطبيقات كاستخدامه في تسجيل اثار البروتونات والنيوترونات وجسيمات الفا فضلا عن استخدامه في دراسات الاشعة الكونية وقياس جرع الرادون وغيرها.

(Cartwright et al., 1978; Durrani and Al-Najjar, 1980; Durrani and Bull, 1987; Randhawa et al., 1997 and Mheemeed,1994).

لاحظ العديد من الباحثون ان استجابة الكاشف CR-39 تتأثر كثيرا بالعوامل البيئية ومن بينها نوعية وتركيز ودرجة حرارة المحلول القاشط والاشعة الكهرومغناطيسية والمعالجة الحرارية، وقـــد تركـــزت

معظم هذه الدرسات على تأثير هذه العوامل على كل من سرعة القشط العام وسرعة القشط على طول الاثر وقطر الاثر وكثافة الاثار وطاقة التنشيط.
(Kumar et al.,1986; Durrani and Bull,1987; Singh et al.,1988; Virk et al.,1988 and Mheemeed, 1994).

وهنالك العديد من الدراسات التي اجريت لايجاد طاقة تنشيط المعالجة الحرارية لكاشف الاثر النووي CR-39 اذ قام (Virk et al.,1986) بدراسة هذه الطاقة معتمدا بذلك على الدرجات الحرارية التي تتراوح بين (150-225)°C ومستخدما ايونات (^{93}Nb , ^{238}U) وكان التسخين بعد التشعيع. واجرى (Virk et al. 1988) الدراسة نفسها مستخدما ايونات (^{139}La, ^{208}Pb, ^{238}U) وكان التسخين بعد التشعيع وضمن مدى حراري بين (150-225)°C ولزمن تسخين (10 min). قام (العيثاوي، 1995) بوضع نماذج من الكاشف CR-39 على احد وجهي قرص يحوي تراكيز معلومة من اليورانيوم وعرض وجه القرص الاخر الى نيوترونات حرارية بعد ذلك تمت المعالجة الحرارية على نماذج من الكاشف CR-39 عند مدى حراري يتراوح بين (100-140)°C ووجد ان طاقة التنشيط تساوي(0.183 eV) .لقد استخدم الباحثون في الدراسات اعلاه زمن تسخين واحد وايونات ثقيلة متنوعة واجراء التشعيع في الهواء وقبل عملية المعالجة الحرارية. اما في البحث الحالي فقد استخدمت طريقة المعالجة الحرارية عند مدى حراري يتراوح بين (130-200)°C ولازمان تسخين متنوعة تضمنت (30,60,90,120) min وايون خفيف نسبيا(جسيمة الفا) وباجراء عملية التشعيع بمعزل عن الهواء وكان التسخين قبل التشعيع ساعين الى معرفة تأثير هذه الظروف على طاقة التنشيط.

الجانب النظري

من الملاحظ عدم وجود نظرية مفردة قادرة على ان توضح سلوك المعالجة الحرارية للاثار الكامنة في كواشف الاثر النووي العضوية وغير العضوية (Virk et al.,1988) ولفهم ميكانيكية التسخين وضعت العديد من النماذج وفيما ياتي بيان للنماذج الموضوعة.

1- قام (Mark,1973) بوضع نموذج يوضح حركيات المعالجة الحرارية حيث يتألف هذا النموذج من مجموعة متسلسلات لدوال الانحلال الاسي والتي يعبر عنها رياضيا كالاتي

$$\rho_t = \rho_o e^{[-\alpha(T)t]} \quad \ldots(1)$$

حيث ρ_t و ρ_o هما كثافة الحالات(كثافة الاثر) عند زمن تسخين t = 0 و t على التوالي

α(T) : هو ثابت الانحلال ويعطى بالعلاقة:

$$\alpha(T) = \alpha_{01} e^{[-E_{o1}/KT]} + \alpha_{02} e^{[-E_{o2}/KT]} \quad \ldots(2)$$

حيث α_{o1} وα_{o2} ثوابت المعالجة الحرارية

E_{a1} وE_{a2} :طاقات التنشيط لعمليتي انتشار مختلفتين وتبعا لهذا النموذج فان الحد الثاني من المعادلـــة (2) يمكن اهماله بسبب مساهمته القليلة عند درجات الحرارة العالية وبذلك تصبح المعادلة (2) كالاتي:

$$\alpha(T) = \alpha_0 e^{[-E_a/KT]} \quad \ldots(3)$$

وعند استبدال كثافة الاثـــر (ρ_t/ρ_o) بنسب طول الاثر (L_t/L_o) أو بنسب قطر الاثر (D_t/D_o) وتعويض المعادلة (3) في المعادلة (1) نحصل على:

$$(D_t, L_t) = (D_o, L_o)\exp\left[-\alpha_o\left\{\exp\left(\frac{-E}{KT}\right)\right\}t\right] \quad \ldots(4)$$

او

$$Ln\left[-Ln\left(\frac{D_t, L_t}{D_o, L_o}\right)\right] = Ln\alpha_o + Lnt - \frac{E_o}{KT} \quad \ldots(5)$$

حيث ان (D_t L_t) و(D_o, L_o) هما اقطار الاثار واطوالهما عند زمن تسخين t و$t = 0$ على الترتيب ويمكن الحصول على طاقة التنشيط برسم العلاقة البيانية بين $Ln\left[-Ln\left(\frac{D_t, L_t}{D_o, L_o}\right)\right]$ و $\frac{1}{T}$ وايجاد الميل واستخدام العلاقة التالية:

$$E_o(eV) = 8.625\times10^{-5}[slope] \quad \ldots(6)$$

2- حاول (Green et al. 1985) فهم سلوك الاثار في المواد الصلبة غير العضوية خصوصا في معـــادن الابانيت وباستخدام تقريبات مختلفة،لذلك وصفوا قياسات طول الاثر والبيانـــات التجريبيـــة بـــالتعبير الاتي:-

$$Lnt - C_1 Ln\left[1 - \frac{L_t, D_t}{L_o, D_o}\right] = C_2 + \frac{C_3}{T} \quad \ldots(7)$$

حيث $C_1 = 4.47$ و$C_2 = -17.37$ و $C_3 = 19.0$

او

$$Ln\left[1 - \frac{L_t, D_t}{L_o, D_o}\right] = -\frac{C_2}{C_1} + \frac{1}{C_1}Lnt - \frac{C_3}{C_1 T} \quad \ldots(8)$$

بعد ذلك شكك بعض الباحثين في تطبيقها لحالة الزجاج لذا اعيد صياغتها بالشكل المطور الاتي:

$$Ln\left[\frac{dL_t, dD_t}{L_o, D_o}\right] = LnA + n\,Lnt - \frac{E_a}{KT} \quad \ldots(9)$$

حيث: A ثابت تناسبي و n أس زمن المعالجة الحرارية (t)

$$\frac{dL_t}{L_o} = \frac{L_t - L_o}{L_o} \quad \ldots(10)$$

$$\frac{dD_t}{D_o} = \frac{D_t - D_o}{D_o} \quad \ldots(11)$$

يمكن ايجاد قيمة طاقة التنشيط من رسم العلاقة البيانية بين $Ln\left[\frac{dL_t, dD_t}{L_o, D_o}\right]$ و $\frac{1}{T}$ وايجاد الميل ثم استخدام العلاقة (6) .

3- لقد وضع (Modgil and Virk,1985) علاقة تجريبية تربط معدل المعالجة الحرارية (V_a) مع طاقة تنشيط المعالجة الحرارية (E_a) وهي:

$$V_a = At^{-n}e^{[-E_a/KT]} \quad \ldots(12)$$

$$LnV_a = LnA - n\,Lnt - \frac{E_a}{KT} \quad \ldots(13)$$

حيث :

$$V_a = \frac{dD_t}{dt} = \frac{D_t - D_o}{t} \quad \ldots(14)$$

اما طاقة التنشيط فتوجد من رسم العلاقة البيانية بين Ln V_a و 1/T ثم ايجاد الميل واستخدام المعادلة (6). وفي كاشف CR-39 تعرف طاقة تنشيط المعالجة الحرارية على انها ادنى طاقة لازمة لبدء عملية المعالجة الحرارية (Virk et al.,1986).

الجانب العملي

1: المعالجة الحرارية والتشعيع وظروف القشط:

لتسجيل اثار جسيمات الفا تم استخدام كاشف الاثر النووي (CR-39) ذي السمك (550 µm) وقطع الكاشف الى عدد من القطع بابعاد cm^2 (1 × 1). تم تسخين قطع الكاشف لمدى حراري يتراوح بين (130-200)°C ولفترات زمنية مختلفة (30,60,90,120)min وذلك باستخدام فرن من نوع (Memmert U40 791 412) تم تشعيع النماذج المسخنة داخل حجرة التفريغ بوساطة جسيمات الفا المنبعثة من مصدر ^{241}Am والساقطة عموديا على سطح الكاشف بمساحة دائرية صغيرة قطرها يقرب من (0.9mm) وكان زمن التشعيع(5) دقائق.ومن الجدير بالذكر ان كل نموذج مسخن رافقه نموذج قياسي (غير مسخن) والذي من خلاله يمكن معرفة النمو الحاصل في اقطار اثار جسيمات الفا للنماذج المسخنة. استخدم المحلول الكيمياوي NaOH بعيارية 6.25 وعند درجة حرارة 70 ± 1°C لقشط قطع الكاشف (CR-39) وقد وضع المحلول الكيمياوي داخل اقداح توضع داخل حمام مائي نوع (Memmert W200) يستعمل لتسخين المحلول القاشط بعد انتهاء عملية القشط استخدمنا محرك مغناطيسي لغسل وتنظيف قطع الكاشف باستخدام الماء المقطر. ثم تجفف من الماء باستخدام ورق تجفيف وتوضع على شرائح زجاجية لغرض دراستها باستخدام مجهر ضوئي نوع (Reichert Neover Type 300 442). ولحساب كثافة الاثار المقشوطة تستخدم قوة التكبير (X 10 × 40). اما لحساب اقطار الاثار فتستخدم قوة التكبير (X 7 × 40).

2: التجارب والحسابات :

1. دراسة العلاقة بين اقطار الاثار وزمن القشط لمدى حراري يتراوح بين (130-200)°C ولفترات زمنية مختلفة (30,60,90,120) min .
2. حساب معدل المعالجة الحرارية باستخدام المعادلة (14).
3. حساب النسبة dD_t / D_o باستخدام المعادلة (11).
4. حساب طاقة تنشيط المعالجة الحرارية (E_a) لكل زمن من ازمان التسخين بالاعتماد على الطريقتين الآتيتين :

الطريقة الاولى: تتمثل بالمعادلة (9).

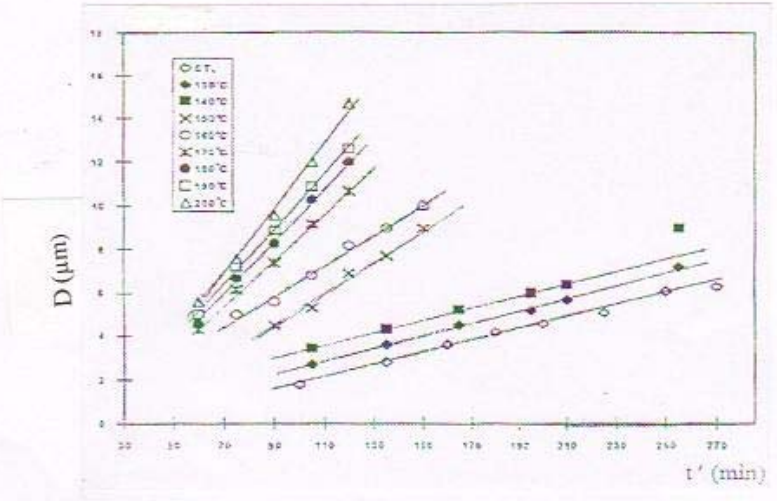
الطريقة الثانية: تتمثل بالمعادلة (13).

النتائج والمناقشة

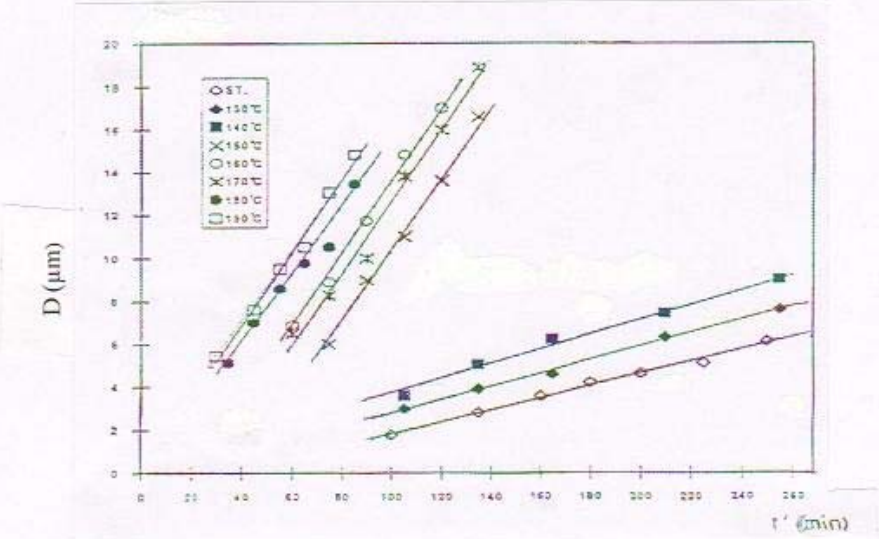
1: تأثير التسخين على نمو الاقطار:

ان تأثير التسخين يبدو واضحا عند جميع الدرجات الحرارية اذ ان هذا التأثير يكون مجاميع من الحزم المتفرقة حيث تضم كل مجموعة عددا من الخطوط التي تصور اقطار النماذج المسخنة عند ازمنة القشط المختلفة. ويشير الشكل (1) الخاص بزمن التسخين min(30) الى ان الحزمة الاولى تضم اقطار النماذج المسخنة عند درجات الحرارة °C(130,140) واقطار النموذج القياسي وتاتي الحزمة الثانية مفصولة عن الحزمة الاولى بفجوة حيث تضم اقطار النماذج المسخنة عند الدرجات الحرارية °C(150,160) يليها فجوة اخرى ثم تاتي الحزمة الاخيرة والتي تضم اقطار النماذج المسخنة عند الدرجات الحرارية °C(170-200) .وعند الانتقال الى زمن التسخين min(60) .

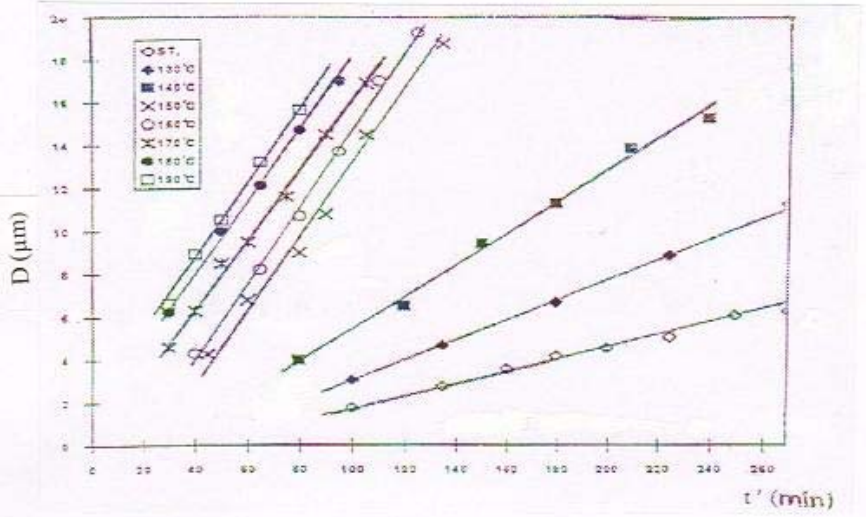
الشكل (2) نلاحظ ان التسخين عند هذا الزمن يؤدي الى تكوين حزمتين لخطوط اقطار الاثار بدلا من ثلاثة حزم كما هو الحال عند زمن التسخين min(30) .حيث ضمت الحزمة الاولى النماذج المسخنة عند الدرجات الحرارية °C(130,140) فضلا عن النموذج القياسي وتليها فجوة كبيرة نسبيا فحزمة اخرى ضمت النماذج المسخنة عند الدرجات الحرارية °C(150-190) وهذا يعني ان تأثير التسخين لمدة (60) min كان فعالا في النموذجين المسخنين عند °C(150,160) حيث حصلت زيادة واضحة في اقطارهما مقارنة بالحالة السابقة min (30) مما ادى الى انضمامهما الى الحزمة الاخيرة.يلاحظ السلوك نفسه عند زمني التسخين min (90) min (120) ومع زيادة اكبر في سرعة نمو اقطار الاثار وانفصال خطوط الحزمة الاولى بصورة اكبر وهذا ما توضحه الاشكال (3) و(4). من ملاحظة الاشكال (1 و2 و3 و4) يمكننا القول ان زيادة زمن القشط وزمن التسخين ودرجة الحرارة يؤدي الى زيادة اقطار اثار جسيمات الفا.كما نود الاشارة هنا انه مع زيادة كل من درجة الحرارة وزمن التسخين بدأت الكواشف بالاصفرار تدريجيا كذلك قلت شفافيتها وبذلك تصعب مشاهدة الاثار.



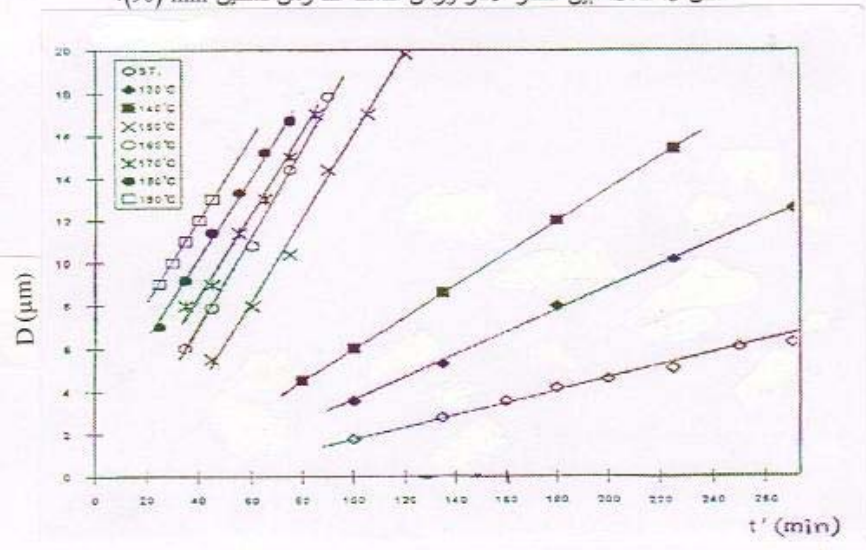
شكل 1: العلاقة بين أقطار الاثار وزمن القشط عند زمن تسخين min (30).



شكل 2: العلاقة بين أقطار الاثار وزمن القشط عند زمن تسخين min (60).



شكل 3: العلاقة بين أقطار الاثار وزمن القشط عند زمن تسخين min (90).



شكل 4: العلاقة بين أقطار الاثار وزمن القشط عند زمن تسخين min (120).

ان ازدياد قطر الاثر مع زيادة درجة الحرارة وزمن التسخين يعود الى ان الطاقة الناتجة من عملية التسخين تكون مساوية لـ أو اكبر من طاقة الآصرة التي تربط مكونات البوليمر (أنا تاكر ،1984) وبذلك تعمل على كسرها مولدة سلاسل بوليمرية تنتج عن تكسر السلسلة الرئيسية في البوليمر.وهذه السلاسل تكون ذات نهايات فعالة (جذور حرة) متنافرة فيما بينها. يتولد عدد جديد من الجذور الحرة نتيجة فقدان جسيمات الفا لطاقتها عند مرورها في البوليمر. ان هذه الجذور الحرة المتولدة في منطقة الضرر تميل إلى الاتحاد مع الجزيئات الصغيرة الموجودة في البوليمر، وعند اجراء عملية القشط الكيميائي فان المحلول القاشط سوف يسعى إلى مهاجمة الجذور الحرة عاملا على فصلها من جزيئات البوليمر وبذلك تتنافر هذه الجذور مبتعدة عن مركز الاثر ومكونة اثارا ذات اقطار اكبر من اقطار الاثار في الكاشف غير المسخن (Koul et al., 1988; Koul and Campbell, 1988).

2: تأثير زمن التسخين على طاقة تنشيط المعالجة الحرارية:

تم حساب طاقة تنشيط المعاجة الحرارية (E_a) لكل زمن من ازمان التسخين بالاعتماد على الطريقتين الانفتي الذكر وتبين لنا من الجداول (1) و(2) و(3) و(4) البيانات اللازمة لحساب طاقة التنشيط علما انه تم اختيار اقطار الاثار (D_o ,D_t) للطريقتين كلتيهما عند زمن قشط ملائم (t') والمبين في الجداول اعلاه. وتبين ان كلتا الطريقتين اعطت نفس النتائج لطاقة التنشيط وان قيم هذه الطاقات هي (0.193 eV) و (0.23 eV) و (0.195 eV) و (0.23 eV) لازمان التسخين(30 min) و (60 min) و(90 min) و (120 min))على التوالي. ان الاشكال (5-12) توضح رسم العلاقات البيانية الخاصة بايجاد طاقة التنشيط ومن الجدير بالذكر انه تم استخدام طريقة المربعات الصغرى في رسم هذه العلاقات.

جدول 1: القيم التجريبية لمعلمات المعالجة الحرارية لآثار جسيمات الفا في كاشف (CR-39) عند زمن تسخين (30) min. D_o= 1.6 µm, t' = (90) min.

T°C	T(k)	1000/T (K)	D(µm)	$V_a = \frac{D_t - D_o}{t}$	Ln V_a	$\frac{D_t - D_o}{D_o}$	$Ln\frac{D_t - D_o}{D_o}$
170	443	2.25	7.6	0.200	-1.60	3.750	1.32
180	453	2.20	8.4	0.226	-1.48	4.250	1.44
190	463	2.15	8.9	0.243	-1.41	4.562	1.51
200	473	2.11	10.0	0.280	-1.27	5.250	1.65

جدول 2 : القيم التجريبية لمعلمات المعالجة الحرارية لآثار جسيمات الفا في كاشف (CR-39) عند زمن تسخين (60) min . (90) min, $t' = (90)$ min . $D_o = 1.6$ µm

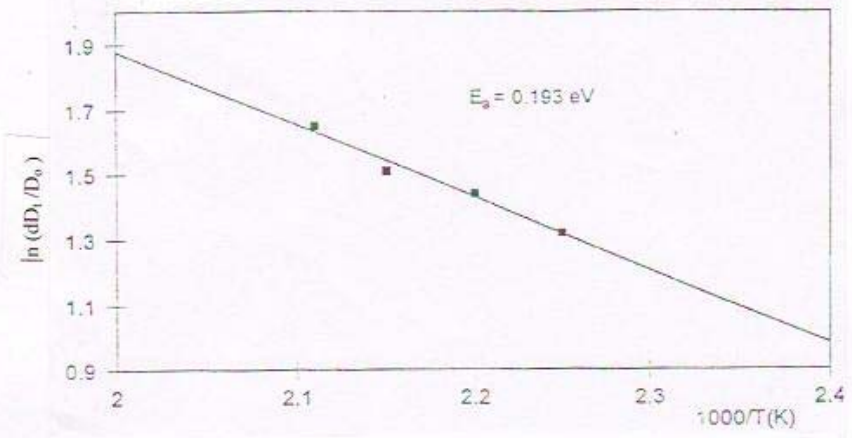
T°C	T(k)	1000/T (K)	D(µm)	$V_a = \frac{D_t - D_o}{t}$	Ln V_a	$\frac{D_t - D_o}{D_o}$	$Ln\frac{D_t - D_o}{D_o}$
150	423	2.36	9.0	0.123	-2.09	4.625	1.53
160	433	2.30	11.8	0.170	-1.77	6.375	1.85
170	443	2.25	11.0	0.156	-1.85	5.875	1.77
180	453	2.20	14.0	0.206	-1.57	7.750	2.04
190	463	2.15	15.1	0.225	-1.49	8.437	2.13

جدول 3: القيم التجريبية لمعلمات المعالجة الحرارية لآثار جسيمات الفا في كاشف (CR-39) عند زمن تسخين (90) min . (90) min, $t' = (90)$ min . $D_o = 1.6$ µm

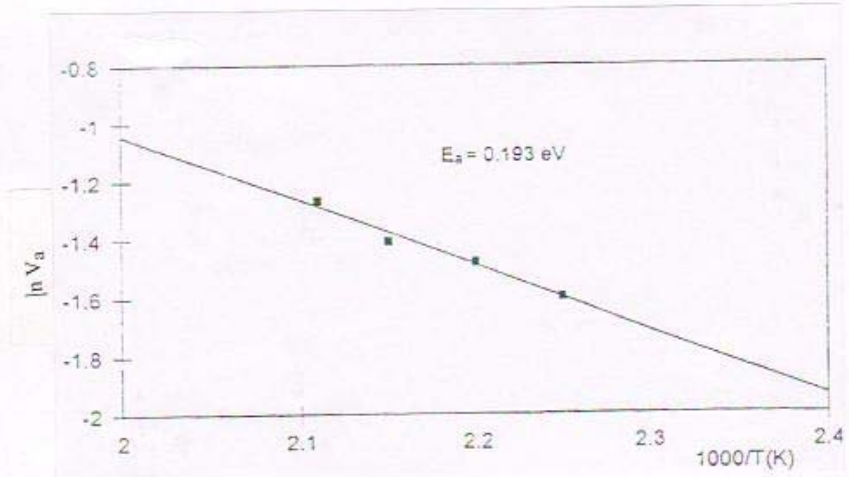
T°C	T(k)	1000/T (K)	D(µm)	$V_a = \frac{D_t - D_o}{t}$	Ln V_a	$\frac{D_t - D_o}{D_o}$	$Ln\frac{D_t - D_o}{D_o}$
150	423	2.36	11.5	0.110	-2.2	6.187	1.82
160	433	2.30	12.8	0.124	-2.08	7.000	1.94
170	443	2.25	14.6	0.144	-1.93	8.125	2.09
180	453	2.20	16.4	0.164	-1.80	9.250	2.22
190	463	2.15	17.2	0.173	-1.75	9.750	2.27

جدول 4: القيم التجريبية لمعلمات المعالجة الحرارية لآثار جسيمات الفا في الكاشف (CR-39) عند زمن تسخين (120) min .(60) min, $t' = (60)$ min . $D_o = 0.8$ µm

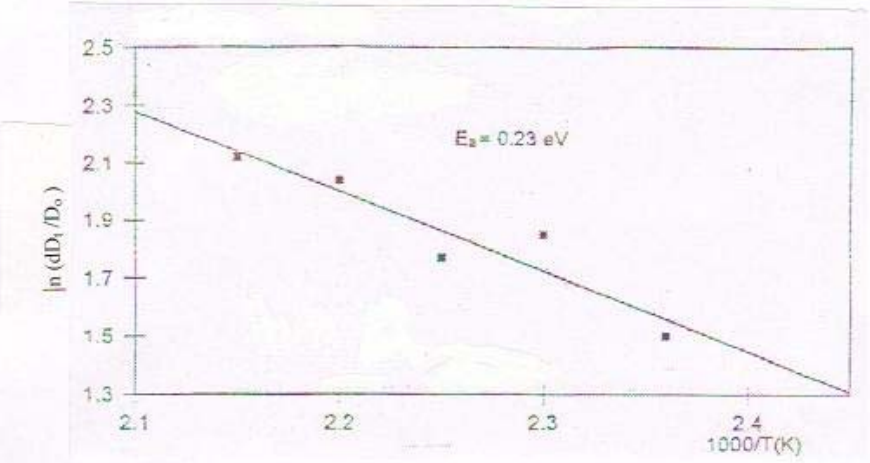
T°C	T(k)	1000/T (K)	D(µm)	$V_a = \frac{D_t - D_o}{t}$	Ln V_a	$\frac{D_t - D_o}{D_o}$	$Ln\frac{D_t - D_o}{D_o}$
160	433	2.30	11.0	0.085	-2.46	12.750	2.54
170	443	2.25	12.2	0.095	-2.35	14.250	2.65
180	453	2.20	14.0	0.110	-2.20	16.500	2.80
190	463	2.15	16.0	0.126	-2.06	19.000	2.94



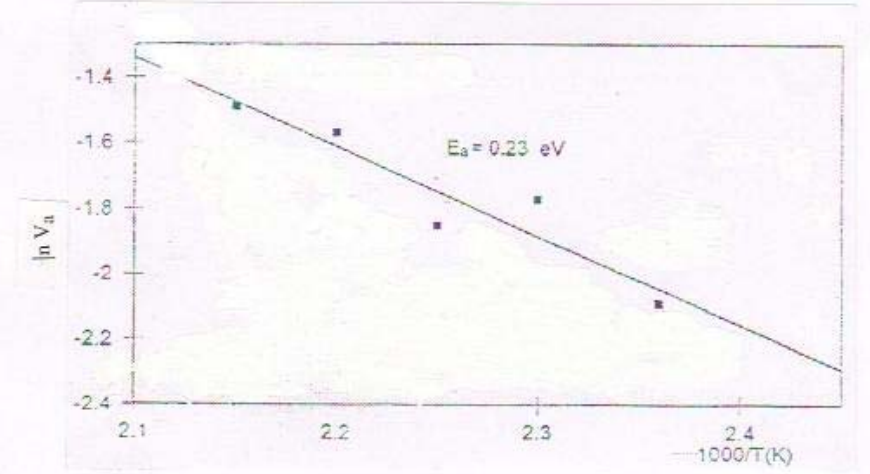
شكل 5: العلاقة بين (In(dD_t/D_c و 1/T عند زمن تسخين min (30).



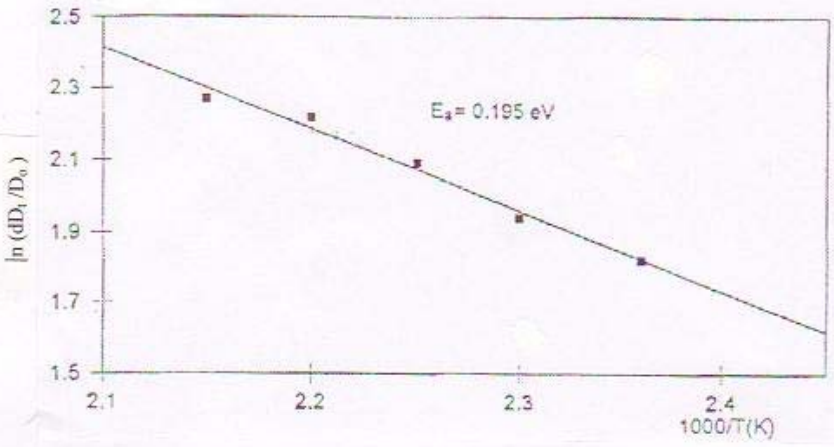
شكل 6: العلاقة بين In Va و 1/T عند زمن تسخين min (30).



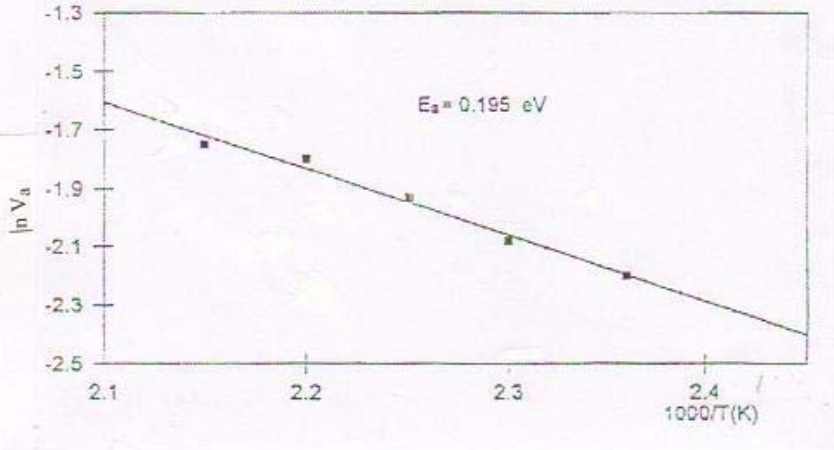
شكل 7: العلاقة بين ($In(dD_t/D_o)$ و 1/T عند زمن تسخين min (60).



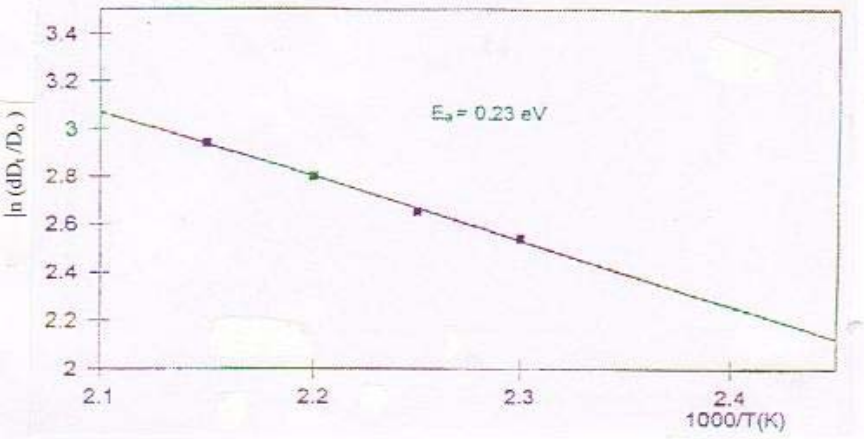
شكل 8: العلاقة بين In Va و 1/T عند زمن تسخين min (60).



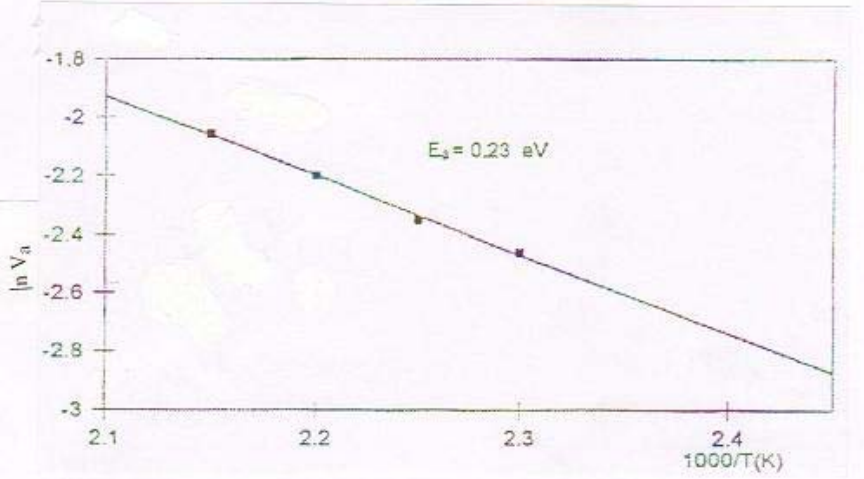
شكل 9: العلاقة بين (dD_t/D_o)In و 1/T عند زمن تسخين min (90).



شكل 10: العلاقة بين In Va و 1/T عند زمن تسخين min (90).



شكل 11: العلاقة بين ($In(dD_t/D_o)$ و 1/T عند زمن تسخين min (120).



شكل 12: العلاقة بين In Va و 1/T عند زمن تسخين min (120).

ان قيم طاقات التنشيط التي تم الحصول عليها في هـــذا البحـــث كـــانت واقعـــة ضمـــن المـــدى (0.193-0.23)eV وبمعدل eV (0.212 ± 9 %) وهذا يتفق مع ماجاء به الباحثون في هذا المجـــال اذ وجد (Virk et al.,1986) قيم طاقة التنشيط لكاشـف (CR-39) المشـعع بايونـات (^{93}Nb.^{238}U) وكانت تقع ضمن المدى eV (0.193 – 0.185). كما وجد (Virk et al.,1988) قيم طاقة التنشيط للكاشف اعلاه المشعع بايونات (^{139}La, ^{208}Pb, ^{238}U) فكانت تقع ضمن المدى eV (0.194-0.185). وبالتالي فقـد تم التوصل في الدراسة الحالية ان طاقة التنشيط هي خاصية للكاشف ولا تعتمد على نوعية التسخين (قبـل أو بعد التشعيع) ولا تعتمد على نوعية الايون المستخدم خفيفا كان ام ثقيلا كمـــا لا تعتمـــد علـــى زمـــن التسخين.

الاستنتاج

من النتائج التي حصلنا عليها من هذه الدراسة يمكن استنتاج:

1- ازدياد معدل المعالجة الحرارية (V_a) والنسبة (dD_t / D_o) مع زيادة درجة الحرارة.

2- إن تسخين نماذج الكاشف قد غير من لونها وشفافيتها ، ان هذه الشفافية تقل بارتفاع درجة الحـــرارة وزمن التسخين.

3- طاقة التنشيط لاتعتمد على العوامل الاتية (نوع الحزمة الايونية المستخدمة وطاقتها وزاوية الســـقوط ودرجة الحرارة ونوع التسخين (قبل التشعيع أو بعده) وزمن التسخين).

المصادر العربية

العيثاوي، وداد حمدي جاسم، 1995. دراسة خصائص كاشف الاثر النـــووي CR-39 لتحديـــد تراكـــيز اليورانيـــوم فـــي اوراق النبـــات. رســـالة ماجســـتير مقدمـــة الـــى مجلـــس كليـــة التربيـــة (ابن الهيثم)، جامعة بغداد.

انا، أ. ثاكر ترجمة محمد، اكرم عزيز، 1984. الكيمياء الفيزيائية للبوليمرات مطبعة جامعة الموصل.

المصادر الأجنبية

Cartwright, B.C.; Shirk, E.K. and Price, P.B.,1978. A Nuclear Track Recording Polymer of Unique Sensitivity and Resolution. Nucl. Inst. and Meth.153, 457-460.

Durrani, S.A. and Al-Najjar, S.A.S.,1980. Electrochemical Etching Studies of the CR-39 Plastic. Nucl. Inst. and Meth. 173, 97-102.

Durrani, S.A. and Bull, R.K., 1987. Solid State Nuclear Track Detection, Pergamon Press. Oxford.

Green, P.F.; Duddy I.R.; Gleadow, A.J.W. and Tingate, P.R.,1985. Fission Track Annealing in Apatite: Track Length Measurement and the Form of the Arrhenius Plot. Nucl.Tracks. 10, 323-328.

Koul,S.L. and Campbell,I.D., 1988. ESR and Track-Etch Studies of Irradiation Polymers. Nucl. Inst. and Meth. In Phys. Resea. B32, 383-388.

Koul, S.L.; Campbell, I.D. and McDonald, D.C.,1988. Energy Transfer Mechanisms and the Radiation Chemistry of Nobel Gas Irradiation Polymers. Nucl. Inst. and Meth. In Phys. Resea. B32, 186-193.

Kumar, S.; Chander, S.; Yadav, J.S. and Sharma, A..P., 1986. Some Enviromental Effect Studies on the Response of CR-39 (Dop) Plastic Track Detector. Nucl. Tracks. 12 , 129-132.

Mark, E.; Pahl, E.; Purtcheller and Mark, T.D., 1973. Tschermarks Min Petr.Mitt 20, 131-154.

Mheemeed, A.K., 1994. The Effect of Chemical Etchant on the Properties of CR-39 Nuclear Track Detector. 21.

Modgil, S.K. and Virk, H.S.,1985. Annealing of Fission Fragment Track in Inorganic Solids. Nucl. Inst. and Meth. In Phys. Resea. B12, 212-218.

Randhawa, G.S.; Kumar, S. and Virk, H. S., 1997. Response of Different Plastic Track Detectors to α-Particles. Radia. Meas. 27, 523-527.

Singh, J.; Singh, S. and Virk, H.S., 1988. Etching Studies of CR-39 Plastic Track Detector. Nucl. Tracks. Radiat. Meas. 15, 187-190.

Virk, H.S.; Modgil, S.K. and Bhatia, R.K., 1986. Activation Energy for the Annealing of Radiation Damage in CR-39: An Intrinsic Property of the Detector. Nucl. Tracks. Radiat. Meas. 11, 323-325.

Virk, H.S.; Modgil, S.K.; Singh G. and Bhatia, R.K., 1988, Annealing Characteristics of Heavy Ion Radiation Damage in SSNTDs and Concept of Single Activation Energy. Nucl. Inst. and Meth. In Phys. Resea. B32, 401-404.