Find semi- empirical relationship to calculate the electronic stopping power of Carbon and Oxygen ions in some organic compounds

استنباط علاقة شبه تجريبية لحساب قدرة الإيقاف الالكترونية لأيونات الكاربون والاوكسجين في بعض المركبات العضوية .

ا.م.د. راشد عويد كاظم م.م. شهله عبد السادة كاظم
جامعة الكوفة - كلية التربية للبنات - قسم الفيزياء

البحث مستل من رسالة الماجستير للباحث الثاني

الخلاصة :-

تم في هذا البحث استنباط علاقة شبه تجريبية لحساب قدرة الإيقاف الالكترونية للجسيمات المشحونة (لأيونات الكاربون والاوكسجين) المتفاعلة مع المركبات العضوية [polypropylene(C_3H_6) ,Polycarbonate($C_{16}H_{14}O_3$), Mylar ($C_{10}H_8O_4$), Polyvinylalcohol (C_2H_4O), Polyoxymethylene (CH_2O), Polyacrylonitrile (C_3H_3N), Polyvinylpyrrolidone ($C_6 H_9 N O$) , Polyvinylacetate ($C_4H_6O_2$) , Kapton ($C_{22} H_{10} N_2 O_5$) , Bakelite ($C_{44} H_{36} O_6$)] باعتماد النسبة $\langle\frac{Z_2}{A_2}\rangle$ ، ضمن مدى الطاقة [0.01-1000] MeV ، ومن خلال مقارنة النتائج المستحصلة مع نتائج برنامج الـ SRIM 2012 لنفس القذائف في تلك المركبات فقد أظهرت توافقاً جيداً مع نتائج الـ SRIM 2012 .

الكلمات المفتاحية: - قدرة الايقاف الالكترونية ، العلاقات شبه التجريبية ، برنامج الـ SRIM 2012 .

Abstract : -

In this research find semi-empirical relationships to calculate the electronic stopping power of charged (Carbon ions and Oxygen ions) interacting with organic compounds : - [Polypropylene (C_3H_6), Polycarbonate ($C_{16}H_{14}O_3$), Mylar ($C_{10}H_8O_4$), Polyvinylalcohol (C_2H_4O), Polyoxymethylene (CH_2O), Polyacrylonitrile (C3H3N), Polyvinylpyrrolidone ($C_6 H_9$ NO), Polyvinylacetate ($C_4H_6O_2$), Kapton ($C_{22} H_{10} N_2 O_5$) , Bakelite ($C_{44} H_{36} O_6$)] using the ratio $\langle\frac{Z_2}{A_2}\rangle$, within range of energy [0.01-1000] MeV, and by comparing the obtained results with the results of the SRIM 2012 program for the same projectiles in these compounds have shown good agreement with the results of the SRIM 2012.

Key words: - electronic stopping power, semi-empirical relations, the SRIM 2012 program.

1- المقدمة :- Introduction

تأخذ عملية فقدان الطاقة للجسيمات المشحونة اهتماماً واسعاً في كافة مجالات الفيزياء الذرية والنووية ومجالات العلوم الأخرى .وتعتمد عمليات حساب فقدان الطاقة على عوامل أساسية للجسيم الساقط ومادة الهدف من خلال السرعة v والشحنة Z_1e والكتلة (M) بالنسبة للجسيم الساقط وكذلك على صفة ذلك الوسط (أي مادة الهدف) لذلك تختلف عمليات فقدان الطاقة من خلال طبيعة ونوع الجسيم الساقط والوسط [1].

2- النظرية :- Theory

لقد اعتبر بور فقدان طاقة جسيمة مشحونة ثقيلة نشيطة بسبب تصادمها مع الكترونات الذرة وإن الإلكترون يعد تقريباً حر وساكن قبل التصادم [2]. حيث إشتق علاقة قدرة الإيقاف الالكترونية لكل الكترون هدف من المادة [3]بالاعتماد على الميكانيك الكلاسيكي :

$$S_e = -\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi Z_1^2 e^4}{mv^2} \ln\frac{Cmv^3}{Z_1 e^2 \omega} \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots. \quad (1)$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi Z_1^2 e^4}{mv^2} L_{Bohr} \quad \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (2)$$

حيث $S_e, -\frac{dE}{dx}$ ،تمثل قدرة الإيقاف الالكترونية ، Z_1e شحنة الجسيمة المشحونة الثقيلة ، v سرعتها ، m كتلة الألكترون ، e شحنته .

وأن :- $L_{Bohr} = \ln\frac{Cmv^3}{Z_1e^2\omega} = \ln\xi C$ عدد إيقاف بور [5,4] .

كما اشتق بيث Bethe صيغة مماثلة لصيغة بور لقدرة الايقاف الالكترونية للجسيمات المشحونة الثقيلة معتمداً على الميكانيك الكمي حيث حسب المقطع العرضي التفاضلي باستخدام تقريب بورن الاول لإستطارة الايون [2،5،6] .

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4Z_1^2N}{mc^2\beta^2}\ln\frac{2mv^2}{I} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (3)$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4Z_1^2N}{mc^2\beta^2}L_{Bethe} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \qquad (4)$$

حيث إن N الكثافة الالكترونية للهدف

β النسبة بين سرعة الجسيمة الساقطة الى سرعة الضوء

و $L_{Bethe} = \ln\frac{2mv^2}{I}$ يسمى عدد ايقاف بيث

إذ $I = \hbar\omega$ معدل جهد التأين .

بالإضافة إلى الدراسات النظرية فالعديد من الدراسات التجريبية اجريت بهدف صياغة علاقات طاقة ومدى قياسية لحساب قدرة الايقاف . وقد تمت مراجعة الموضوع في العقدين (1950-1960) من قبل عدد من الباحثين مثل Taylor ، Bethe و Askin، Allision وWarshaw،Uehling، Barkas وBerger . وإن أغلب البيانات التجريبية جمعت من قبل Bichsel Whaling , على هيئة جداول[7] .

توصل A. K. Chaubey و H. V. Gupta الى العلاقة التجريبية التالية لقدرة إيقاف البروتونات [7] :-

$$-\frac{dE}{\rho dX} = \frac{a}{A_2}E^{-b}\,Z_2^{c\log E+d} \qquad \ldots\ldots\ldots \qquad (5)$$

إنَّ القيم المناسبة للثوابت a, b, c, d هي a=915, b=0.85, c=0.145, d=0.635 ، أما ρ فهي الكثافة للوسط وA_2 الوزن الذري و Z_2 العدد الذري للوسط (للمادة الموقفة) بينما E تمثل الطاقة الحركية للجسيمة الساقطة (القذيفة) بوحدات MeV/amu [7] .

فالعلاقة اعلاه صحيحة ضمن مدى الطاقة MeV/amu (0.7-12) ، والثوابت c,d تم الحصول عليها من مطابقة (Fitting) Northcliffe وSchilling (التي دعيت فيما بعد NS) ، وقد وجدت لتكون مستقلة عن نوع الجسيمة حيث حسبت قدرة الايقاف بواسطة طريقة التربيعات الصغرى ، أما الثوابت a,b فقد استخلصت من البيانات التجريبية لـ Whaling و Anderson et al وكذلك بيانات NS عند الطاقات الواطئة وقدرة الايقاف الناتجة تقاس بوحدات $MeV\ cm^2/gm$ [7].

قدرة الايقاف للايونات الاثقل من البروتونات يمكن ايجادها بواسطة التعبير المعطى من قبل Pierce وBlann [7]:-

$$\left(-\frac{dE}{\rho dX}\right)_H = \frac{Z_{eff}^2}{\gamma_P^2}\left(-\frac{dE}{\rho dX}\right)_P \qquad \ldots\ldots\ldots \qquad (6)$$

حيث : $Z_{eff}^2 = \gamma^2 Z_2^2$، هنا الطاقة فوق 0.7 MeV لذلك للبروتونات $\gamma_P=1$ وبتعويض (6) في (5) نحصل على :

$$\left(-\frac{dE}{\rho dX}\right)_H = \gamma^2 Z_2^2 a\,E^{-b}\,Z_2^{c\log E+d} \qquad \ldots\ldots\ldots \qquad (7)$$

γ كسر الشحنة الفعالة لإيون طاقته (MeV/amu) E يمكن تخمينها من الصيغة التجريبية لـ Booth وGrant [7] :-

$$\gamma^2 = f\left(EZ_2^{-4/3}\right)$$

حيث:- $f(x) = 1 - \exp(-24.73x + 247.6x^2 - 1131x^3)$

ولحساب قدرة ايقاف جسيمات الفا من المعادلة (7) ، نفترض بأنّ الطاقة اكبر من 4 MeV ، كسر الشحنة الفعّالة لجسيمات ألفا γ^2 = 1 . وعند الطاقة أقل من 4 MeV اي من 0.7 إلى 1 MeV /amu ، بمطابقة بيانات NS لجسيمات ألفا بواسطة طريقة التربيعات الصغرى وابقاء c وd ثوابت تصبح a = 3 574, b = 0.84 ، لذا للطاقة بين (0.7-1) MeV/amu لجسيمات ألفا، فإن المعادلة (5) ينبغي ان تعدّل الى [7]:-

$$\left(-\frac{dE}{\rho dX}\right) = \frac{3574}{A_2}E^{-0.84}\,Z_2^{0.145\log E+0.635} \qquad \ldots\ldots \qquad (8)$$

و قدرة الإيقاف في الاهداف المركبة يمكن الحصول عليها بواسطة نظرية الجمع [7] :-

$$\left(-\frac{dE}{\rho dX}\right)_{compound} = \frac{1}{M_2}\sum_i N_iA_i\left(-\frac{dE}{\rho dX}\right)_i \qquad \ldots\ldots\ldots \qquad (9)$$

حيث M_2 الوزن الجزيئي للوسط المركب من N من الذرات ذات الوزن الذري A_2 .
وكذلك لخّص Anderson و Ziegler بيانات قدرة إيقاف البروتون التجريبية للعديد من العناصر لمدى واسع من الطاقات. وللحصول على القيم لكلّ العناصر على مدى مستمر من طاقات البروتون، قام الباحثون بمطابقة (fitting) المنحنيات مع البيانات التجريبية المتوفرة لتوليد معاملات لإستعمالها في قدرّة الإيقاف شبه التجريبية كدالة لطاقة البروتون E (keV) والعدد الذرّي Z_2 للهدف . S_e أفترضت لتكون متناسبة مع $E^{0.45}$ للطاقة E <25 keV ، ماعدا $Z_2 \le 6$ فإنّها تتناسب مع $E^{0.25}$, ولـ (25KeV ≤ E ≤ 10MeV) استعمل Ziegler et al العلاقة [8] :-

$$\frac{1}{S_e}=\frac{1}{S_{low}}+\frac{1}{S_{high}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

حيث :-

$$S_{low}=A_1E^{A_2}+A_3E^{A_4} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

$$S_{high}=\frac{A_5\ln\left(\frac{A_6}{E}+A_7E\right)}{E^{A_8}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (12)$$

S_e قدرة الإيقاف الالكترونية .
S_{low}، S_{high} قدرة الإيقاف الالكترونية للطاقات الواطئة والعالية على التوالي .
وللطاقة 10MeV ≤ E ≤ 2GeV يتطلب استعمال العلاقة التالية [8]:-

$$S_e=A_9+A_{10}\left(\frac{\ln E}{E}\right)+A_{11}\left(\frac{\ln E}{E}\right)^2+A_{12}\left(\frac{E}{\ln E}\right) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (13)$$

والمعاملات A_i لكل Z_2 متوفرة على شكل جداول الـ TRIM [8] .

3- الحسابات و النتائج :- Calculations and results

في هذا البحث فقد تم اقتراح علاقتان شبه تجريبية لحساب قدرة إيقاف أيونات الكربون والاوكسجين في المركبات العضوية العشرة وقد تم برمجتها ببرنامج حاسوبي بلغة الماتلاب MATLAB للحصول على النتائج النظرية المطلوبة والتي تم توضيحها كرسوم بيانية ومن ثم تم مقارنتها مع نتائج برامج الـ SRIM 2012 .

3-1 العلاقة شبه التجريبية لحساب قدرة إيقاف أيونات الكربون في المركبات العضوية العشرة:-

لقد تم اقتراح علاقة شبه تجريبية لحساب قدرة إيقاف أيونات الكربون في المركبات العضوية العشرة ضمن مدى الطاقة [0.01-1000]MeV وذلك باستخدام النسبة $\langle\frac{Z_2}{A_2}\rangle$ ، وبتعويض طاقة القذيفة ومعدل جهد التأين للوسط تم الحصول على نتائج اكثر تقارب مع نتائج الـ SRIM 2012، والعلاقة شبه التجريبية المقترحة هي :

$$S_{emp}=abE^{-1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (14)$$

حيث :-

$$a=70*\langle\frac{Z_2}{A_2}\rangle$$

و

$$b=\ln(1+12.5*(\frac{E^{1.6}}{I}))$$

$$\langle\frac{Z_2}{A_2}\rangle=\frac{\sum_i n_iZ_{2i}}{\sum_i n_iA_{2i}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots. \quad (15)$$

حيث :- Z_{2i} وA_{2i} العدد الذري و الوزن الذري للعنصر i th من عناصر الهدف ،n_i عدد الذرات للهدف (الوسط) .
وأن I تمثل معدل جهد التأين للوسط والتي تحسب كالتالي [10,9]:-

$$I\cong\begin{cases}19.0\ \text{eV} & ,Z_2=1\ (\text{Hydrogen})\\ 11.2+11.7Z_2\ \text{eV}, & 2\le Z_2\le 13\\ 52.8+8.71\ Z_2\ \text{eV}, & Z_2>13\end{cases} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (16)$$

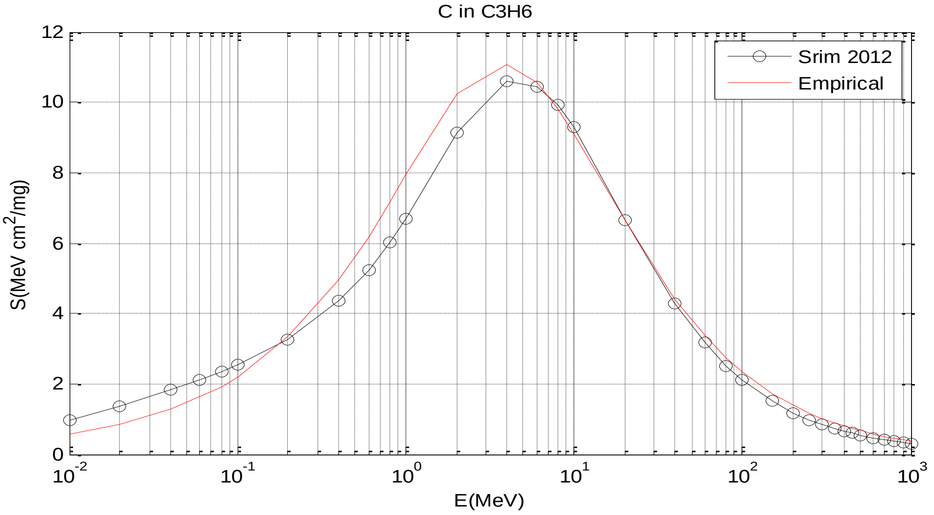
$$\ln\langle I\rangle=\frac{\sum_i n_iZ_{2i}\ln I_i}{\sum_i n_iZ_{2i}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (17)$$

الشكل (1a, b, c,d,e,f,g,e,h,i,j) يوضح ان قدرة الايقاف تزداد مع الطاقة حتى تصل اعظم قيمة لقدرة الايقاف عند الطاقة MeV (3-4) ثم تبدأ بالنقصان كلما تزداد الطاقة .
ويكون الايقاف النووي هو السائد ضمن مدى الطاقة (0.01-0.2)MeV وتأثير التهيج والتأين يكون ضمن مدى الطاقة (0.2-40)MeV وضمن مدى الطاقة (40-1000)MeV يكون الايقاف الالكتروني هو السائد .

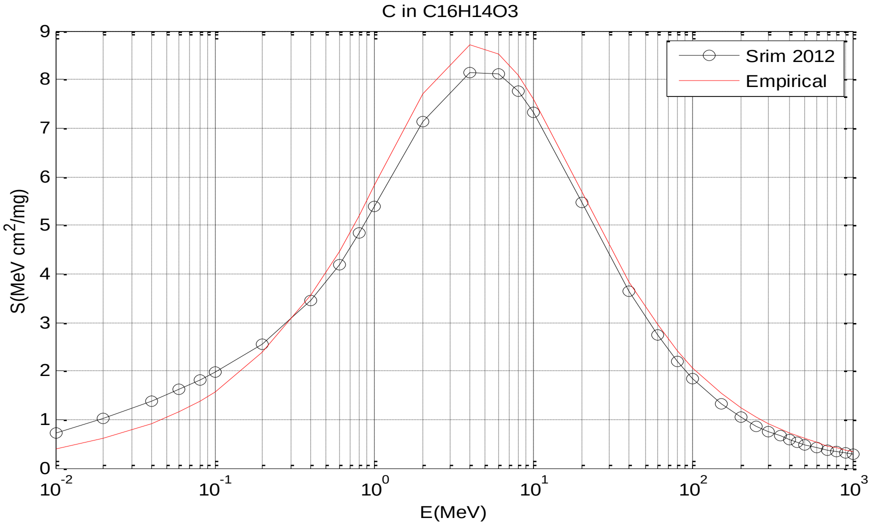
ومن خلال الشكل (1a,b,c,d,e,f,g,e,h,i,j) تم ملاحظة ان النتائج المحسوبة باستعمال الشبه التجريبية المقترحة تتطابق بشكل جيد مع نتائج برنامج الـ SRIM 2012 وكان معامل الارتباط هو (0.992748-0.998032) وكذلك نسبة الخطأ كانت (0.170832-0.42632) كما مبين في الجدول (1) .

جدول (1) يبين الكثافة الكتلية ومعدل جهد التأين والنسبة $\langle \frac{Z_2}{A_2} \rangle$ ومعامل الارتباط ونسبة الخطأ لأيونات الكاربون في المركبات العشرة .

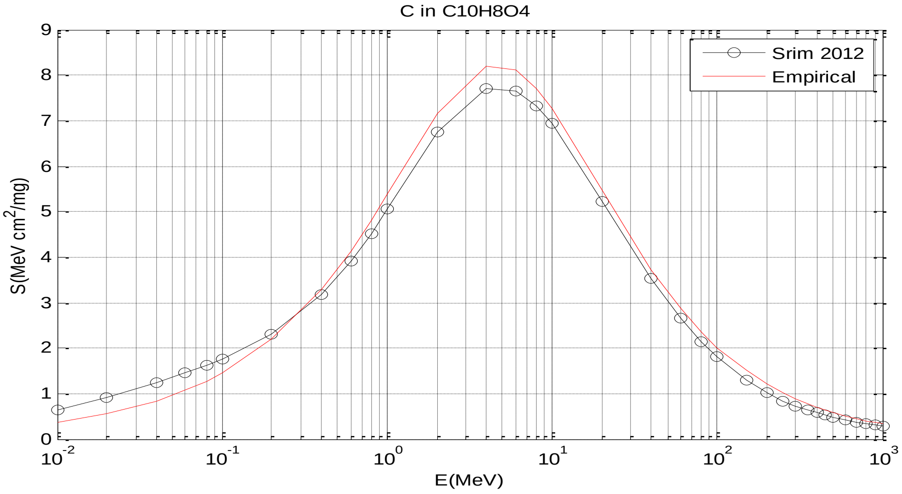
ت	الصيغة المركب	الكثافة الكتلية ρ g/cm^3	معدل جهد التأين $\langle I \rangle$ eV	النسبة $\langle \frac{Z_2}{A_2} \rangle$	معامل الارتباط	نسبة الخطأ
1	C_3H_6 Polypropylene	0.9	56.5429	0.5714	0.992748	0.42632
2	$C_{16}H_{14}O_3$	1.2	73.171	0.5276	0.996403	0.235929
3	$C_{10}H_8O_4$ Mylar	1.4	78.6116	0.5208	0.997232	0.195364
4	C_2H_4O Polyvinylalcohol	1.3	69.53	0.5455	0.997119	0.225541
5	CH_2O Polyoxymethylene	1.425	77.1016	0.5333	0.998032	0.170832
6	C_3H_3N Polyacrylonitrile,	1.17	72.006	0.5283	0.995488	0.267171
7	C_6H_9NO Polyvinylpyrrolidone	1.25	68.75	0.5405	0.996153	0.259948
8	$C_4H_6O_2$ Polyvinylacetate	1.19	73.57	0.5349	0.997428	0.201677
9	$C_{22}H_{10}N_2O_5$ Kapton	1.42	80.368	0.5131	0.994039	0.27826
10	$C_{44}H_{36}O_6$ Bakelite	1.4	72.5149	0.5273	0.995194	0.274042



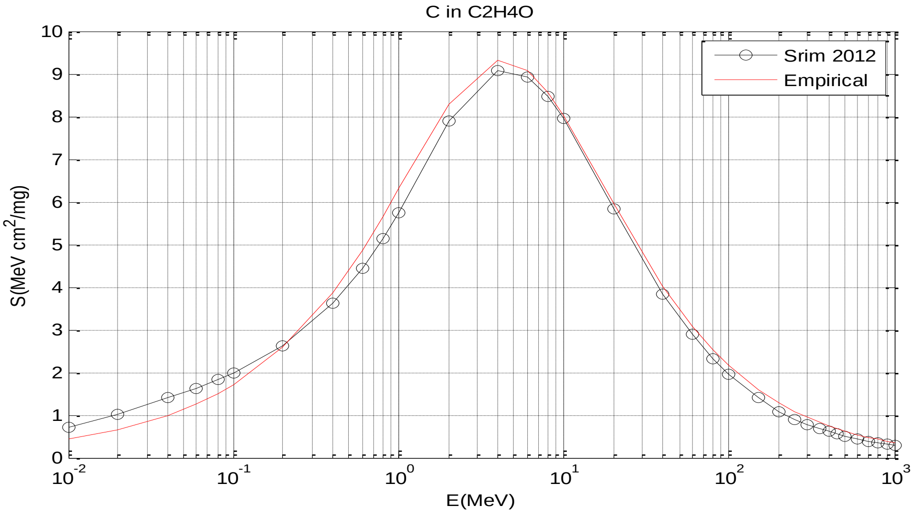
a


C in C16H14O3
Srim 2012
Empirical
S(MeV cm2/mg)
E(MeV)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10-2
10-1
100
101
102
103

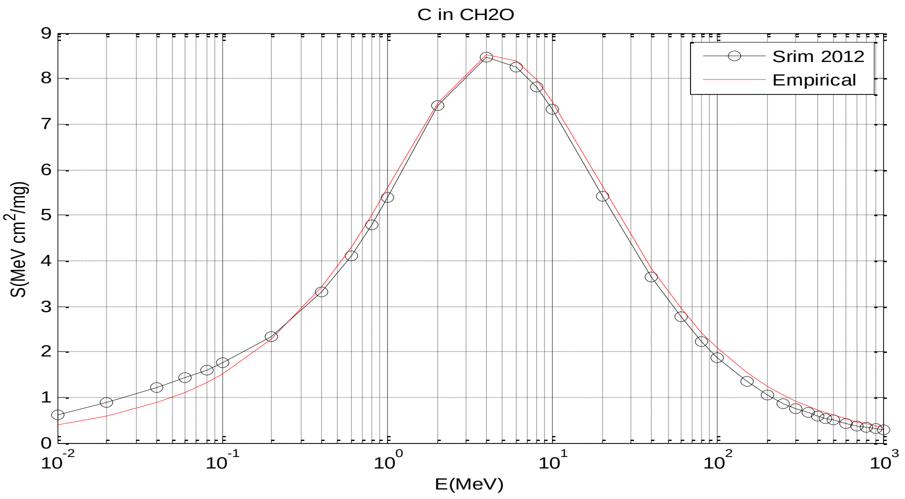
b


C in C10H8O4
Srim 2012
Empirical
S(MeV cm2/mg)
E(MeV)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10-2
10-1
100
101
102
103

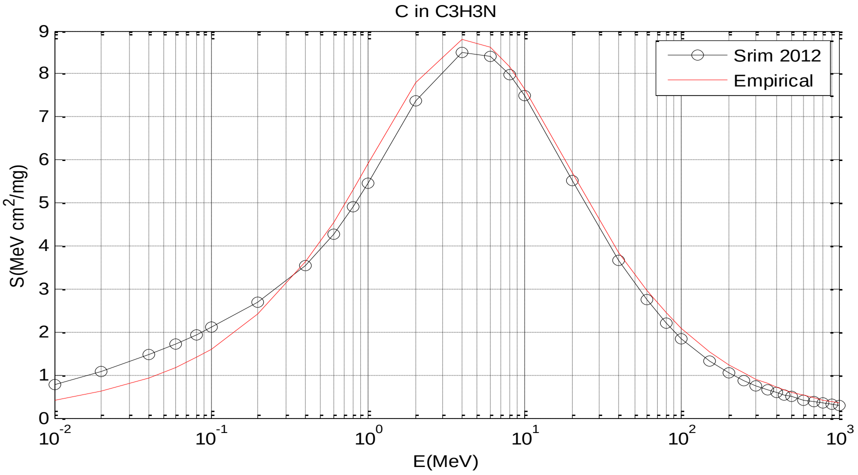
c


C in C2H4O
Srim 2012
Empirical
S(MeV cm2/mg)
E(MeV)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
10-2
10-1
100
101
102
103

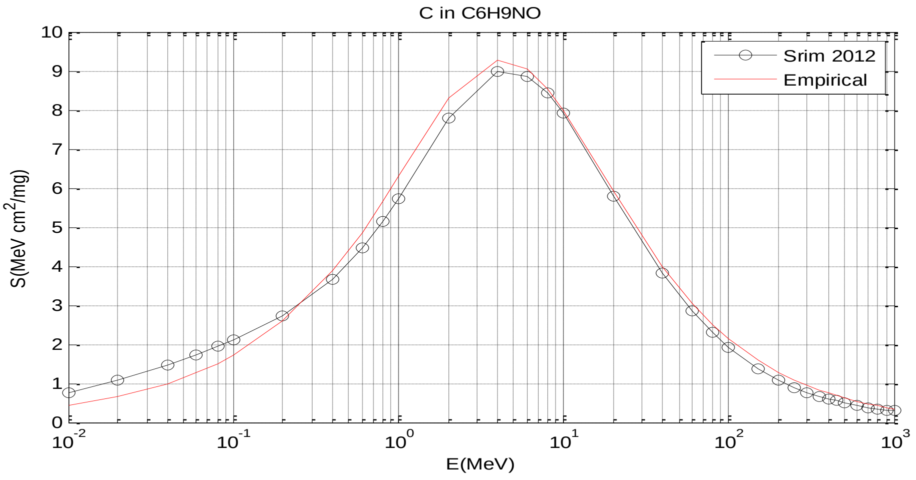
d


C in CH2O
Srim 2012
Empirical
S(MeV cm2/mg)
E(MeV)

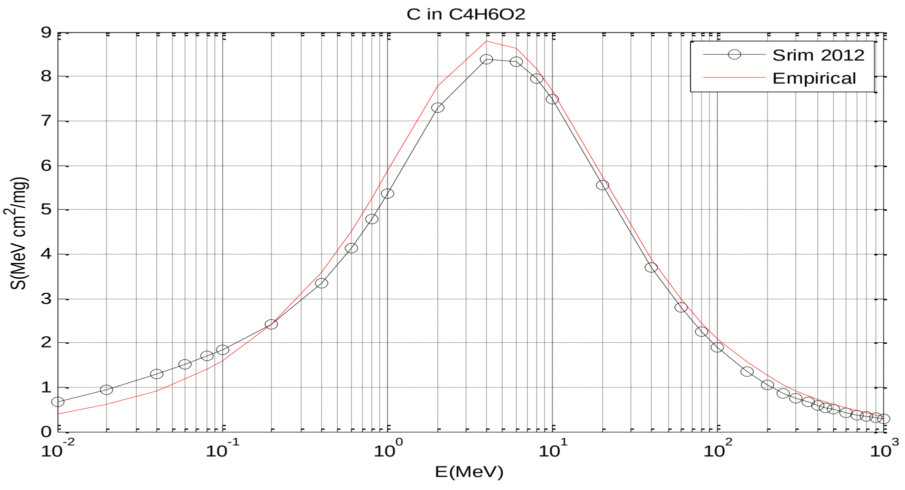
e


C in C3H3N
Srim 2012
Empirical
S(MeV cm2/mg)
E(MeV)

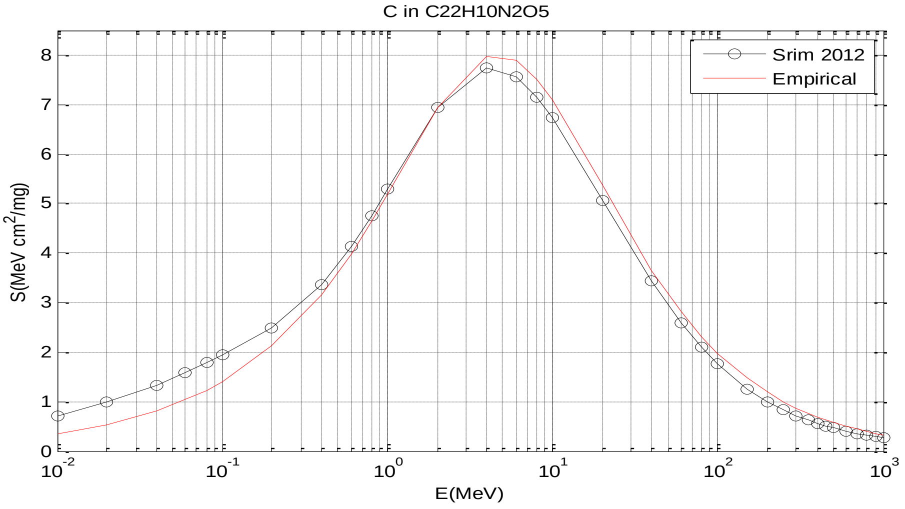
f


C in C6H9NO
Srim 2012
Empirical
S(MeV cm2/mg)
E(MeV)

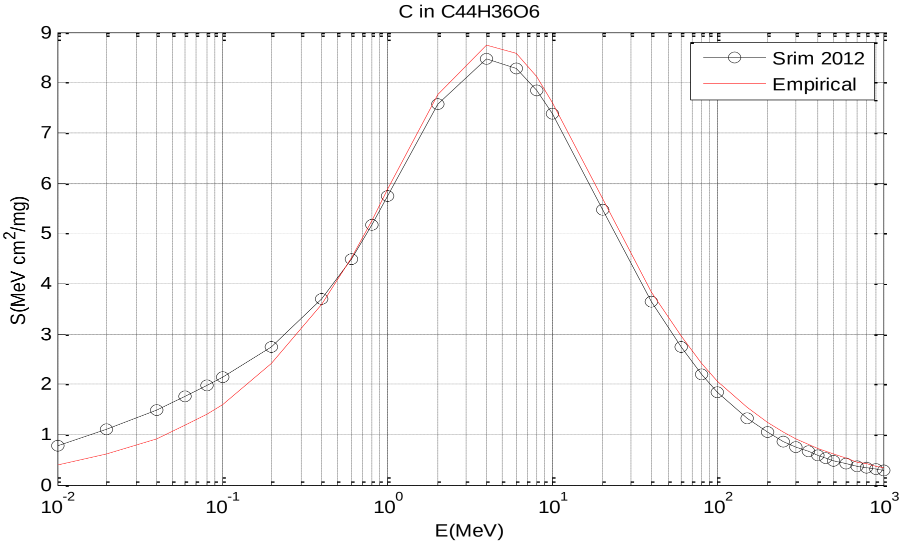
g



h



i



j

شكل (1a, b, c,d,e,f,g,e,h,i,j) يوضح العلاقة بين قدرة الإيقاف الالكترونية لأيونات الكاربون المارة خلال الأهداف , (C_6H_9NO) , (C_3H_3N) , (CH_2O) , (C_2H_4O) , ($C_{10}H_8O_4$) , ($C_{16}H_{14}O_3$) , (C_3H_6) ($C_{44}H_{36}O_6$) , ($C_{22}H_{10}N_2O_5$) , ($C_4H_6O_2$)على التوالي.

3-2 العلاقة شبه التجريبية لحساب قدرة إيقاف أيونات الاوكسجين في المركبات العضوية العشرة :-

لقد تم اقتراح علاقة تجريبية لحساب قدرة إيقاف أيونات الاوكسجين في مركبات العضوية العشرة ضمن مدى الطاقة [0.01-1000]MeV وذلك باستخدام النسبة $\langle \frac{Z_2}{A_2} \rangle$ ،وبتعويض طاقة القذيفة ومعدل جهد التأين للوسط نحصل على نتائج اكثر تقارب مع نتائج الـ SRIM 2012، والعلاقة شبه التجريبية المقترحة هي :

$S_{emp} = abE^{-1}$ ………… (18)

حيث

$a = 137.7 * \langle \frac{Z_2}{A_2} \rangle$

و

$b = \ln(1 + 6 * (\frac{E^{1.7}}{I}))$

الشكل (1a, b, c,d,e,f,g,e,h,i,j) يوضح ان قدرة الايقاف تزداد مع الطاقة حتى تصل اعظم قيمة لقدرة الايقاف عند الطاقة MeV (6-8) ثم تبدأ بالنقصان كلما تزداد الطاقة .

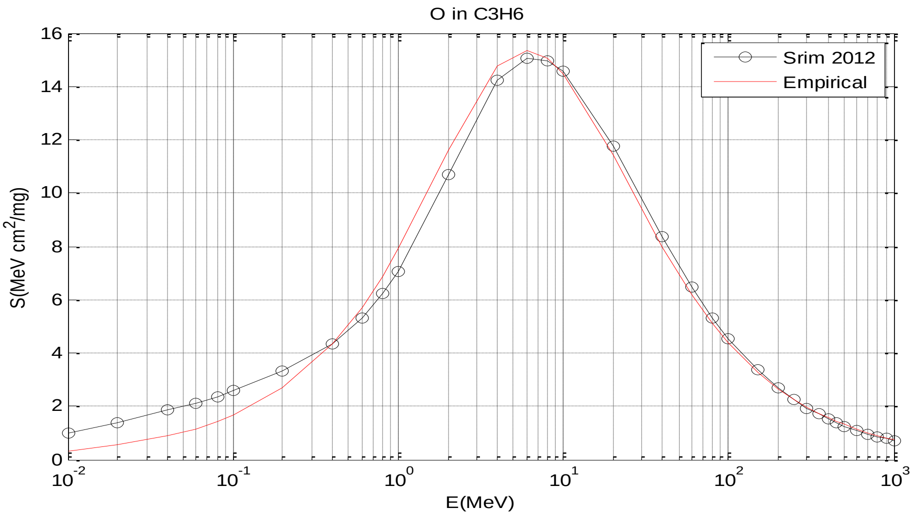
ويكون الايقاف النووي هو السائد ضمن مدى الطاقة (0.01-0.4)MeV وتأثير التهيج والتأين يكون ضمن مدى الطاقة (0.4-100)MeV وضمن مدى الطاقة (100-1000)MeV يكون الايقاف الالكتروني هو السائد .

ومن خلال الشكل (1a,b,c,d,e,f,g,e,h,i,j) تم ملاحظة ان النتائج المحسوبة باستعمال الشبه التجريبية المقترحة تتطابق بشكل جيد مع نتائج برنامج الـ SRIM 2012 وكان معامل الارتباط هو (0.994186-0.997944) وكذلك نسبة الخطأ كانت (0.247482-0.457659) كما مبين في الجدول (2) .

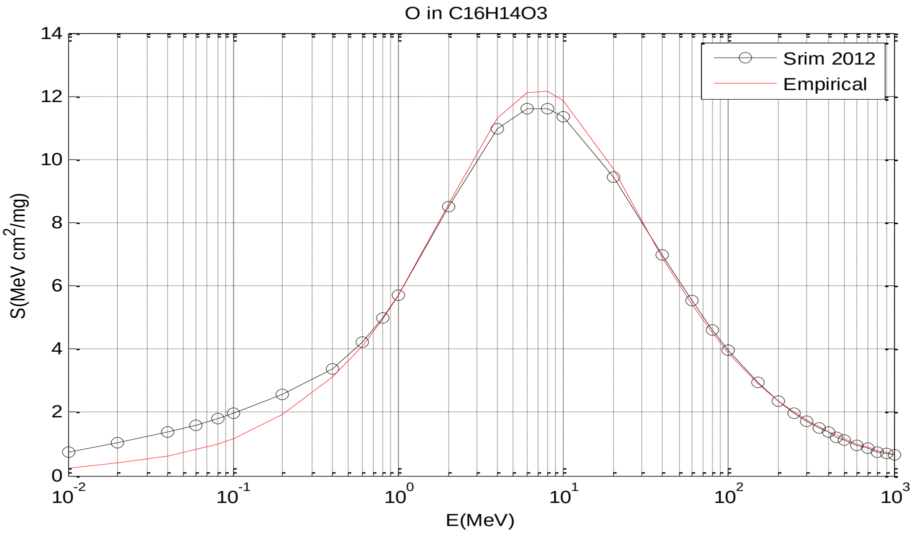
جدول (2) يبين الكثافة الكتلية ومعدل جهد التأين والنسبة $\langle \frac{Z_2}{A_2} \rangle$ ومعامل الارتباط ونسبة الخطأ لأيونات الاوكسجين في المركبات العشرة .

ت	الصيغة المركب	الكثافة الكتلية $g/cm^3 \rho$	معدل جهد التأين $\langle I \rangle$ eV	النسبة $\langle \frac{Z_2}{A_2} \rangle$	معامل الارتباط	نسبة الخطأ
1	C_3H_6 Polypropylene	0.9	56.5429	0.5714	0.995579	0.457659
2	$C_{16}H_{14}O_3$	1.2	73.171	0.5276	0.996985	0.299227
3	$C_{10}H_8O_4$ Mylar	1.4	78.6116	0.5208	0.997386	0.263478
4	C_2H_4O Polyvinylalcohol	1.3	69.53	0.5455	0.997825	0.27109
5	CH_2O Polyoxymethylene	1.425	77.1016	0.5333	0.997853	0.247482
6	C_3H_3N Polyacrylonitrile,	1.17	72.006	0.5283	0.996475	0.327016
7	C_6H_9NO Polyvinylpyrrolidone	1.25	68.75	0.5405	0.997171	0.308323
8	$C_4H_6O_2$ Polyvinylacetate	1.19	73.57	0.5349	0.997944	0.249786
9	$C_{22}H_{10}N_2O_5$ Kapton	1.42	80.368	0.5131	0.994186	0.38163
10	$C_{44}H_{36}O_6$ Bakelite	1.4	72.5149	0.5273	0.995515	0.36661

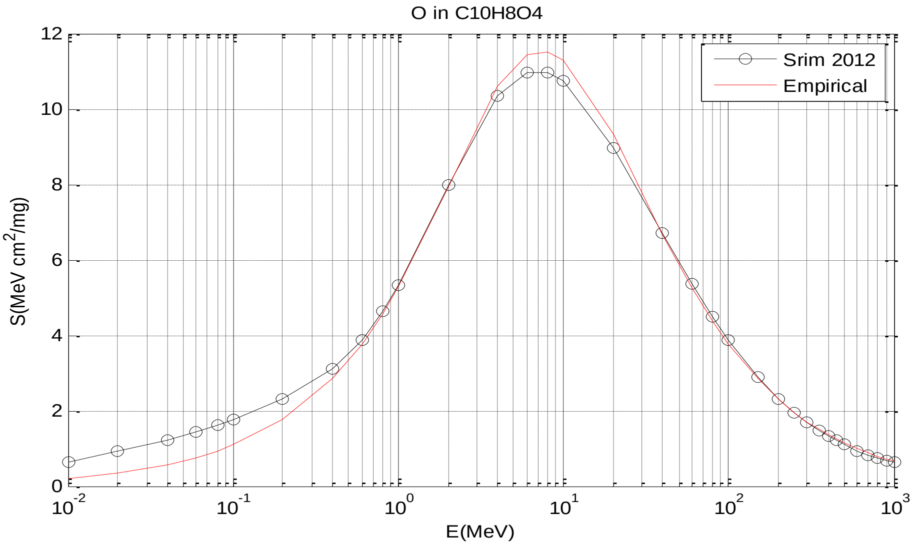
جدول (2)


O in C3H6
Srim 2012
Empirical
S(MeV cm^2/mg)
E(MeV)

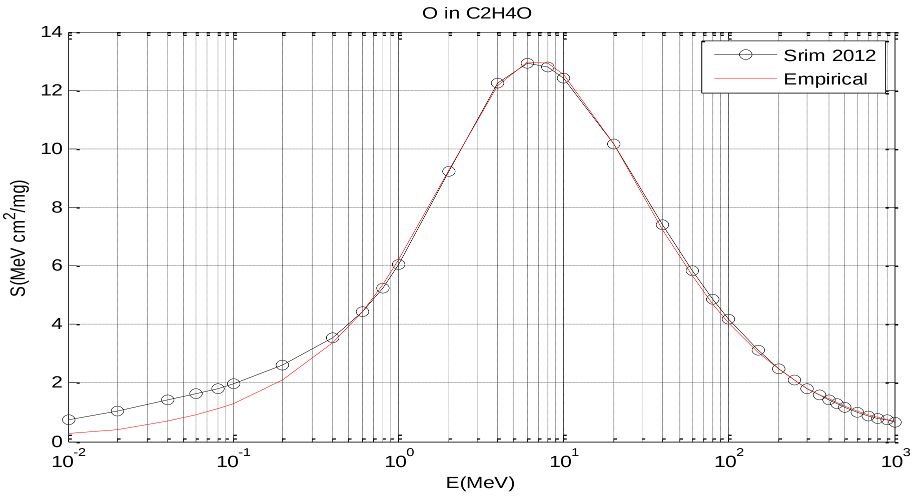
a


O in C16H14O3
Srim 2012
Empirical
S(MeV cm^2/mg)
E(MeV)

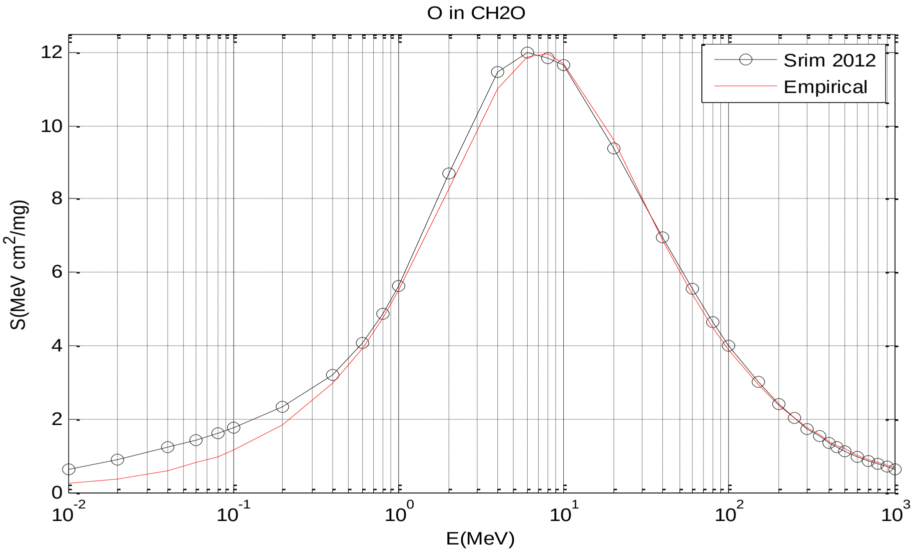
b


O in C10H8O4
Srim 2012
Empirical
S(MeV cm^2/mg)
E(MeV)

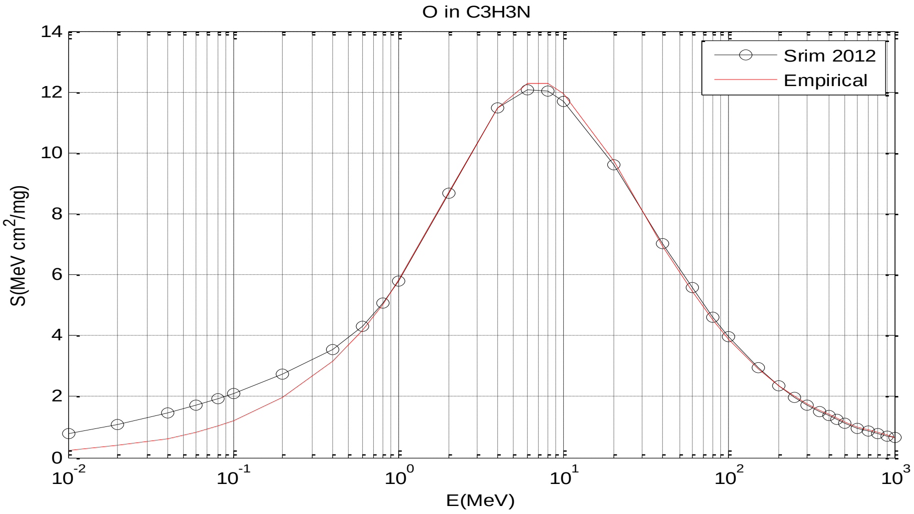
c


O in C2H4O
Srim 2012
Empirical
S(MeV cm^2/mg)
E(MeV)

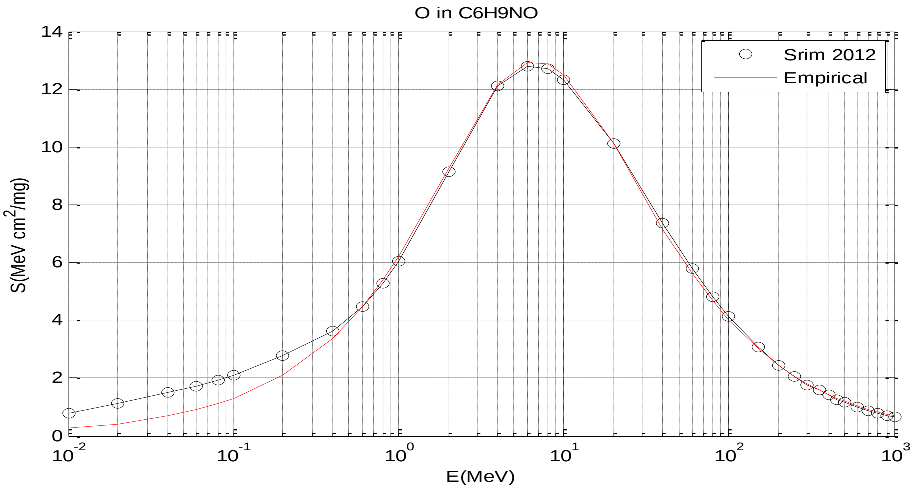
d


O in CH2O
Srim 2012
Empirical
S(MeV cm^2/mg)
E(MeV)

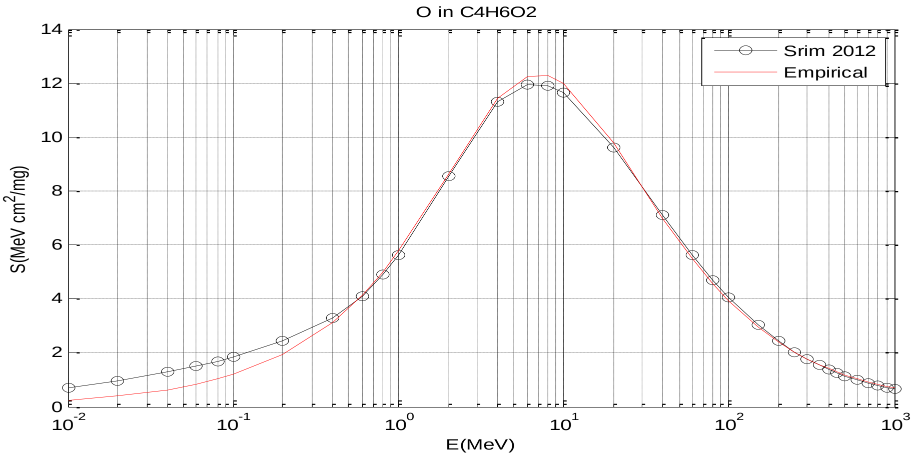
e


O in C3H3N
Srim 2012
Empirical
S(MeV cm^2/mg)
E(MeV)

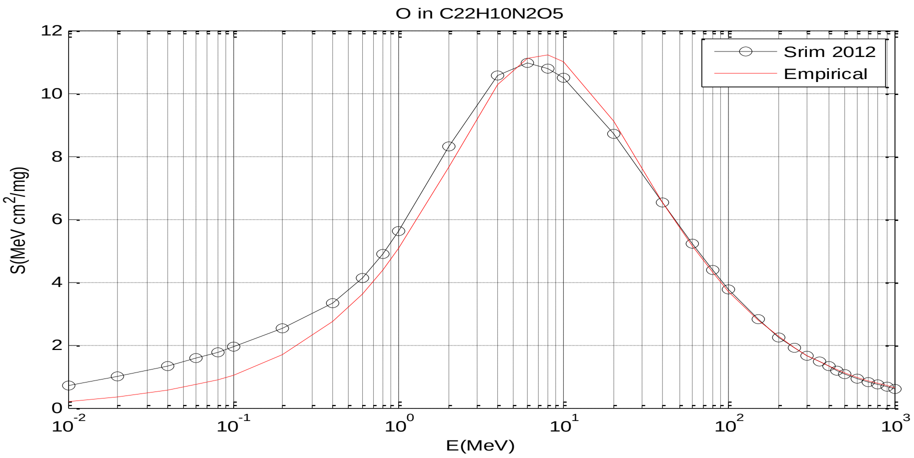
f


O in C6H9NO
Srim 2012
Empirical
S(MeV cm2/mg)
E(MeV)

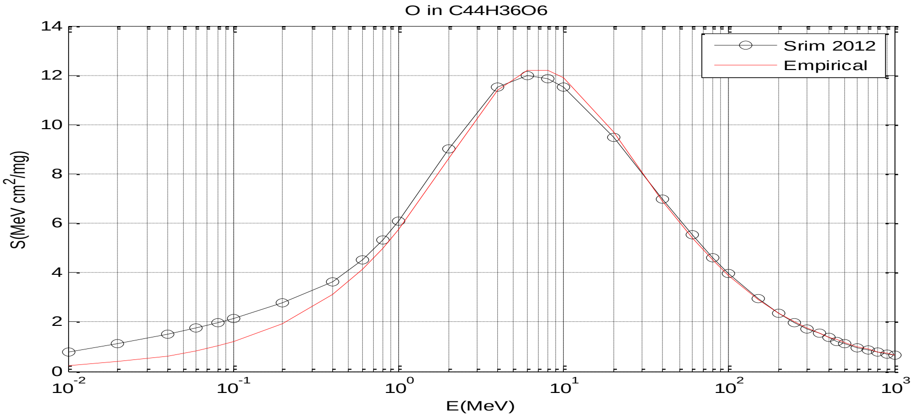
g


O in C4H6O2
Srim 2012
Empirical
S(MeV cm2/mg)
E(MeV)

h


O in C22H10N2O5
Srim 2012
Empirical
S(MeV cm2/mg)
E(MeV)

i



j

شكل (2) يوضح العلاقة بين قدرة الإيقاف الالكترونية لأيونات الاوكسجين ألمارة خلال الأهداف ,(C_3H_6) ($C_{16}H_{14}O_3$) , ($C_{10}H_8O_4$) , (C_2H_4O) , (C H_2O) , (C_3H_3N) , (C_6H_9NO) , ($C_4H_6O_2$) , ($C_{22}H_{10}N_2O_5$) , ($C_{44}H_{36}O_6$)على التوالي.

الاستنتاجات:-

من خلال دراستنا لقدرة الإيقاف الالكترونية للجسيمات المشحونة الثقيلة (ايونات الكاربون والاوكسجين) في أوساط ذرية مختلفة والمتمثلة بمركبات عضوية يمكن أن نستنتج ان العلاقات (14,18) الشبه تجريبية التي تم استنباطها من خلال البحث ابدت توافقاً جيداً مع نتائج الـ SRIM 2012 ولمدى كبير من الطاقات MeV (0.01-1000) وبالتالي فهي مفيدة في دراسة قدرة الإيقاف الالكترونية للقذائف في المركبات التي تم دراستها في هذا البحث .

References:-

[1] A . Aziz Al Rubyi ," Increase the range of stopping power of energies (1<E(MeV/u)≤0.1) ", M. SC. Thesis , Al - Mustansiriyah University, (1999).

[2] J. E. Turner, "Interaction of ionizing radiation with matter ", Health Physics, Vol. 86, No.3, p.p. (228-252) , (2004) .

[3] P. Sigmund , " Low-speed limit of Bohr's stopping–power formula " , Phys. Rev A , Vol.54 , No.4 , p.p. (3113-3118) , (1996).

[4] A. Schinner and P. Sigmund , " Polarization effect in stopping of swift partially screened heavy ions: Perturbative theory ", Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B, Vol. 164, No.165, p.p. (220-229) , (2000) .

[5] P. Sigmund , "Charge - dependent electronic stopping of swift nonrelativistic heavy ions", Phys. Rev. A , Vol. 56 , No. 5, p.p. (3781-3792) , (1997).

[6] R. Lozeva ,"A new developed calorimeter telescope for identification of relativistic heavy ion reaction channels", Ph. D. thesis , Sofia University ,(2005) .

[7] A. K. Chaubey and H. V. Gupta," New empirical relations for stopping power and range of charged particles ", revue de physique appliquée , Vol. 12, p.p. (321-329) , (1977) .

[8] H.H. Andersen and J.F. Ziegler," The Stopping and Ranges of Ions in Matter ", Vol. 2 , Pergamon Press, New York (1977).

[9] D. E. Groom, N. V. Mokhov, and S. Striganov ," Muon Stopping Power and Range Tables 10 MeV-100 TeV ", Atomic Data and Nuclear Data Tables, Vol. 76, No. 2, p.p. (1-37), (2001).

[10] J. E. Turner ,"Atoms, radiation, and radiation protection ", physics textbook , John Wiley & Sons , (2008) .