

Calculation the Effect of Atomic Number for Projectile and Target on the Electronic Stopping Power

Roaa Salam Kadhum Al- Hasnawei

Al Mustqbal College University, Babil, Iraq.
ali_s63@yahoo.com

Submission date:- 25/11/2018 Acceptance date:- 17/12/2018 Publication date:- 24/2/2019

Keywords: Stopping Power, Distant Collisions, Close Collisions.

Abstract

In this research, a theoretical study was made to calculate electronic stopping power for heavy charged particles (Protons, Alpha particles, Heavy ions (C,O)) which interact with atomic targets (H,C,O,Si) by using the equation which resulting from distant and close collisions ,as it has been calculate the effect of atomic number (Z_1) for projectiles and the effect of atomic number (Z_2) for targets on the electronic stopping power in range velocities ($v=v_o, 2v_o, 5v_o, 10v_o$).

A mathematical approximative methods are used in the calculation and some of equation programmed by Matlab language to obtain the theoretical result which are shown in graphic.

حساب تأثير العدد الذري للجسيمة المشحونة الساقطة والهدف على قدرة الإيقاف الإلكترونية

رؤى سلام كاظم الحسناوي
كلية المستقبل الجامعة/بابل-حلة
ali_s63@yahoo.com

الخلاصة

تم في هذا البحث دراسة نظرية لحساب قدرة الإيقاف لكل من (البروتونات-جسيمات الفا -إيونات الكاربون - الاوكسجين) المترادفة مع الاهداف (الميبروجين H والكاربون C والاوكسجين O والسلیكون Si) وذلك باستخدام المعادلة الناتجة من جمع التصادمات القريبة والبعيدة ،اذ تم حساب قدرة الإيقاف الإلكترونية كدالة للعدد الذري للجسيمات الساقطة (البروتونات،جسيمات الفا،إيونات الكاربون والاوكسجين). كما تم حساب قدرة الإيقاف الإلكترونية كدالة للعدد الذري للهدف(الميبروجين H، الكاربون C، الاوكسجين O، السليكون Si).لقد تم استعمال الطرق الرياضية في حساب وبرمجة جميع المعادلات على وفق برنامج كتب بلغة Matlab للحصول على النتائج النظرية المطلوبة والتي تم توضيحها كرسوم بيانية.

الكلمات الدالة: قدرة الإيقاف، التصادمات البعيدة، التصادمات القريبة.

1- المقدمة

عند انتقال الجسيمة المشحونة خلال المادة فأن تفاعلها مع ذرات مادة الهدف ناتج عن القوى الكهرومغناطيسية بين الجسيمات المشحونة [1]. ذلك التفاعل يقسم إلى قسمين: تصادمات مرنة تحصل بين الجسيمة الثقيلة الساقطة ونوى ذرات مادة الهدف [2] وتصادمات غير المرنة تحدث بين الجسيمة الثقيلة الساقطة والكترونات ذرات مادة الهدف [3] وعندما ينتقل الزخم إلى ذرة الهدف بالكامل فأن التصادمات غير المرنة تسبب تأين ذرات الهدف ولما كانت السحابة الإلكترونية في الذرة تحتل حيزاً أكبر من نوى الذرات لذا فأن فقدان الطاقة الناتج عن التصادمات غير المرنة من

المتوقع ان يكون اكبر من فقدان الطاقة المرن. عند الطاقات الواطئة جداً فأن فقدان الطاقة الكلي الناتج عن التصادمات المرنة يظهر بشكل ملحوظ ويمكن ان يكون بنسبة 10-15% من قدرة الإيقاف عند 1KeV [5]. سوف نتناول في هذا الفصل نوعين من التصادمات وهما:

- 1 التصادمات القريبة Close Collisions
- 2 التصادمات البعيدة Distant Collisions

1-1-التصادمات القريبة Close Collisions

لقد تم الافتراض ان التصادمات القريبة تخضع لقانون استطارة كولوم الحرجة (Free Coulomb Scattering) وان حساب فقدان الطاقة يتم من خلال استطارة الالكترونات الذرية بواسطة الجسيم الساقط، وبما ان التصادمات القريبة تكون فيها الالكترونات الذرية حرّة لذلك فأن ترابط هذه الالكترونات يكون مهملاً داخل الذرة [4]. وبما ان الجسيم المشحون الساقط سوف يفقد طاقته في هذه العملية، لذلك فأن الطاقة المنتقلة (Energy Transformation) إلى ذرة الهدف كدالة لمعامل التصادم (p) تعطى بالعلاقة الآتية [6]:

$$T_{\text{close}} = \frac{2Z_1^2 e^4}{mv^2 p^2} \frac{1}{1 + (b/2p)^2} \quad (1)$$

حيث ان :

T_{close} : تمثل الطاقة المنتقلة الى ذرة الهدف كدالة لمعامل التصادم b : هو قطر التصادم (Collision Diameter) ويساوي

$$b = \frac{2Z_1 e^2}{mv^2} \quad (2)$$

إن المعادلة (1) مشتقة مباشرة من قانون رذرفورد ($T=2mv^2 \sin^2 \theta/2=b/2$) حيث ان θ زاوية استطارة مركز الكتلة(The center-of-mass Scattering Angle) [6]. ولقد أوضح ليندهارد إن تأثير التصادمات القريبة لا تهم عند حساب تصحيح باركز (Barkes Correction) Z^3 ، وأن تفسير ليندهارد دعم بواسطة النظرية الكمية (Quantum Theory) كون ان إدخال التصادمات القريبة يكون أفضل في حساب تصحيح باركز. وأن مساهمة التصادمات القريبة هي السائدة عند السرع العالية [7].

2-1 التصادمات البعيدة Distant Collisions

ان التصادمات البعيدة تكون فيها الالكترونات الذرية غير حرّة، أي أنها ناتجة من ترابط الالكترونات الهدف من خلال التردد الكلاسيكي (ω) وان الطاقة المنتقلة إلى الالكترونات ذرة الهدف كدالة لمعامل التصادم p (Impact Parameter) تعطى بالعلاقة الآتية: [6]

$$T_{\text{dis}} = \frac{2Z_1^2 e^4}{mv^2 p^2} \left\{ \left[k_0 \left(\frac{\omega p_0}{v} \right) \right]^2 + \left[k_1 \left(\frac{\omega p_0}{v} \right) \right]^2 \right\} \quad (3)$$

حيث ان :

p_0 : معامل التصادم الحرج

k_0, k_1 : تمثل دوال بيسيل المعدلة (Modified Bessel Functions).

وان مساهمة التصادمات البعيدة في حد باركز تكون هي السائدة في السرع الواطئة [5]. وبما ان قدرة الإيقاف تعرف بدالة الطاقة المنتقلة (Impact Parameter) (p) على وفق المعادلة الآتية:

$$S_{\text{tot}} = \int_0^\infty 2\pi T(p)p dp \quad (4)$$

فبعد الأخذ بالحساب التصادمات القريبة والبعيدة والمعطاة بالمعادلات (1) و (3) لذلك معادلة (4) تصبح على النحو الآتي:

$$\begin{aligned} S_{\text{tot}} &= \int_0^\infty 2\pi p dp (T_{\text{close}} + T_{\text{dis}}) \\ &= \int_0^{p_0} 2\pi p dp T_{\text{close}}(p) + \int_{p_0}^\infty 2\pi p dp T_{\text{dis}}(p) \end{aligned} \quad (5)$$

حيث أن الحد الأول من المعادلة (5-3) يمثل التصادمات القريبة والحد الثاني يمثل التصادمات البعيدة، حيث ان (p_0) هو الذي يحدد التصادمات القريبة من التصادمات البعيدة اي عند القيمة (p_0) تكون الطاقة المنتقلة للتصادمات القريبة T_{close} مساوية للطاقة المنتقلة للتصادمات البعيدة أي ان T_{dis} :

$$T_{\text{close}}(p_0) = T_{\text{dis}}(p_0)$$

وبتعويض المعادلتين (1) و (3) في المعادلة (5) نحصل على المعادلتين الآتيتين:

$$S_{\text{close}}(p) = \frac{2\pi Z_1^2 e^4}{mv^2} \ln \left[1 + \left(\frac{2p_0}{b} \right)^2 \right] \quad (6)$$

$$L_{\text{close}} = \ln \left[1 + \left(\frac{2p_0}{b} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$$S_{\text{dis}} = \frac{4\pi Z_1^2 e^4}{mv^2} \left(\frac{\omega p_0}{v} \right) K_0 \left(\frac{\omega p_0}{v} \right) K_1 \left(\frac{\omega p_0}{v} \right) \quad (8)$$

$$L_{\text{dis}} = \left(\frac{\omega p_0}{v} \right) K_0 \left(\frac{\omega p_0}{v} \right) K_1 \left(\frac{\omega p_0}{v} \right) \quad (9)$$

ويمكن اعادة كتابة المعادلين (6) و (8) بالصيغة الآتية:

$$S_{\text{close}}(p) = \frac{2\pi Z_1^2 e^4}{mv^2} L_{\text{close}} \quad (10)$$

$$S_{\text{dis}}(p) = \frac{4\pi Z_1^2 e^4}{mv^2} L_{\text{dis}} \quad (11)$$

وبجمع المعادلين (7) و (9) نحصل على الصيغة العامة لعدد الإيقاف الكلي (L_{tot}) :

$$L_{\text{tot}} = \ln \left[1 + \left(\frac{2p_0}{b} \right)^2 \right] + \left(\frac{\omega p_0}{v} \right) K_0 \left(\frac{\omega p_0}{v} \right) K_1 \left(\frac{\omega p_0}{v} \right) \quad (12)$$

وان حساب Bohr استند إلى تمييز ذلك عند السرع العالية أي عندما تكون $v/b < p_0/\omega$ حيث إن القيمة p_0 يمكن إيجادها اعتماداً على الفترة v/ω وان دوال بيسيل من الممكن تمثيلها بمفكوكها الخاص ولقيم صغيرة x حيث:

$$xK_0(x)K_1(x) = \ln(2/x) - \gamma + O(x^2) \quad (13)$$

حيث إن:

x يمثل متغيراً ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$x = \frac{\omega p_0}{v} \quad (14)$$

يتمثل ثابت اويلر (Euler's constant) وقيمة تساوي (0.5772) ومن الممكن اعادة كتابة المعادلين (6) و (7) على النحو الآتي:

$$S_{\text{close}} = \frac{4\pi Z_1^2 e^4}{mv^2} \ln \left(\frac{2p_0}{b} \right) \quad (15)$$

$$L_{\text{close}} = \ln \left(\frac{2p_0}{b} \right) \quad (16)$$

وعندما $b < 2P_0/v$ فإن المعادلات (8) و (9) تكتب بالصيغة الآتية

$$S_{\text{dis}} = \frac{4\pi Z_1^2 e^4}{mv^2} \ln \left(\frac{Cv}{\omega p_0} \right) \quad (17)$$

$$L_{\text{dis}} = \ln \left(\frac{Cv}{\omega p_0} \right) \quad (18)$$

حيث ان C ثابت يعطى بالعلاقة [6] ($C=2e^{-\gamma}$)

$$S_{\text{tot}} = S_{\text{close}} + S_{\text{dis}} \quad (19)$$

وبتعويض المعادلات (15) و (17) في المعادلة (19) نحصل على الصيغة العامة لحساب المقطع العرضي للإيقاف لنظرية Bohr:

$$S_{\text{tot}} = \frac{4\pi e^4 Z_1^2 Z_2}{mv^2} \ln \left(\frac{Cmv^3}{Z_1 e^2 \omega} \right) \quad (20)$$

$$L_{\text{tot}} = \ln \frac{Cmv^3}{Z_1 e^2 \omega} \quad (21)$$

وهو يساوي L_{Bohr} ونلاحظ ان معامل Bohr (β) هو المعامل الثاني الذي يؤثر في حساب المقطع العرضي للإيقاف فضلاً عن معامل التصادم الحرj (p_0). اما عن كيفية الحصول على الصيغة الكلاسيكية لحساب قدرة الإيقاف فنتم من خلال حل التكاملات رياضياً في المعادلين (6) و (8) فقط بدون الاعتماد على التقريب الرياضي (13) لتجنب حصول توقف في اللوغاريتم والمتمنى في المعادلة (20). فبالتعميّض عن قيم m و e (كتلة وشحنة الالكترون) والعلاقة ($c=v/\beta$) في معادلة (6) و (8) نحصل على المعادلين الآتيين بوحدات (MeV.cm²/mg) وكالآتي:

$$S_{\text{close}} = 0.30707 \left(\frac{Z_1^2}{\beta^2} \right) \left(\frac{Z_2}{a_2} \right) \times \frac{1}{2} \ln \left(1 + \left(\frac{2p_0}{b} \right)^2 \right) \quad (22)$$

$$S_{\text{dis}} = 0.30707 \left(\frac{Z_1^2}{\beta^2} \right) \left(\frac{Z_2}{a_2} \right) \left(\frac{\omega p_0}{v} \right) K_0 \left(\frac{\omega p_0}{v} \right) K_1 \left(\frac{\omega p_0}{v} \right) \quad (23)$$

وعند جمع هاتين المعادلين نحصل على المعادلة الكلاسيكية العامة لحساب المقطع العرضي للإيقاف التي تم الاعتماد عليها في حساباتنا النظرية:

$$S_{\text{tot}} = 0.30707 \left(\frac{Z_1^2}{\beta^2} \right) \left(\frac{Z_2}{a_2} \right) L_{\text{tot}} \quad (24)$$

عدد الإيقاف الكلي للمعادلة (24) يعطى بالعلاقة الآتية:

$$L_{\text{tot}} = \frac{1}{2} \ln \left(1 + \left(\frac{2p_0}{b} \right)^2 \right) + xK_0(x)K_1(x) \quad (25)$$

- المعاملات المؤثرة في حساب المقطع العرضي للإيقاف

The effective parameters for calculating the stopping cross section

من المعادلين (6) و (8) والناتجة منها معادلة (20) نلاحظ ان هناك معاملات اساسية تؤثر في حساب المقطع العرضي

لإيقاف الجسيمات الثقيلة وهي معامل التصادم الحرj (p_0) (Bohr's parameter) (critical impact parameter).

ان المعامل (p_0) يفصل ما بين التصادمات القريبة والتصادمات البعيدة في حساب المقطع العرضي

ان التصادمات القريبة والتصادمات البعيدة تكون متساوية عند معامل التصادم (p_0) اي ان:

$$S_{\text{close}} = S_{\text{dis}}$$

فمن مساواة المعادلة (15) و (17) نحصل على:

$$\ln \left(\frac{Cv}{\omega p_0} \right) = \ln \left(\frac{2p_0}{b} \right) \quad (26)$$

$$\therefore p_0 = \left(\frac{Cvb}{2\omega} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

وبالتعويض عن $(\omega = I/\hbar)$ والمعادلة (2) في المعادلة (28) نحصل على:

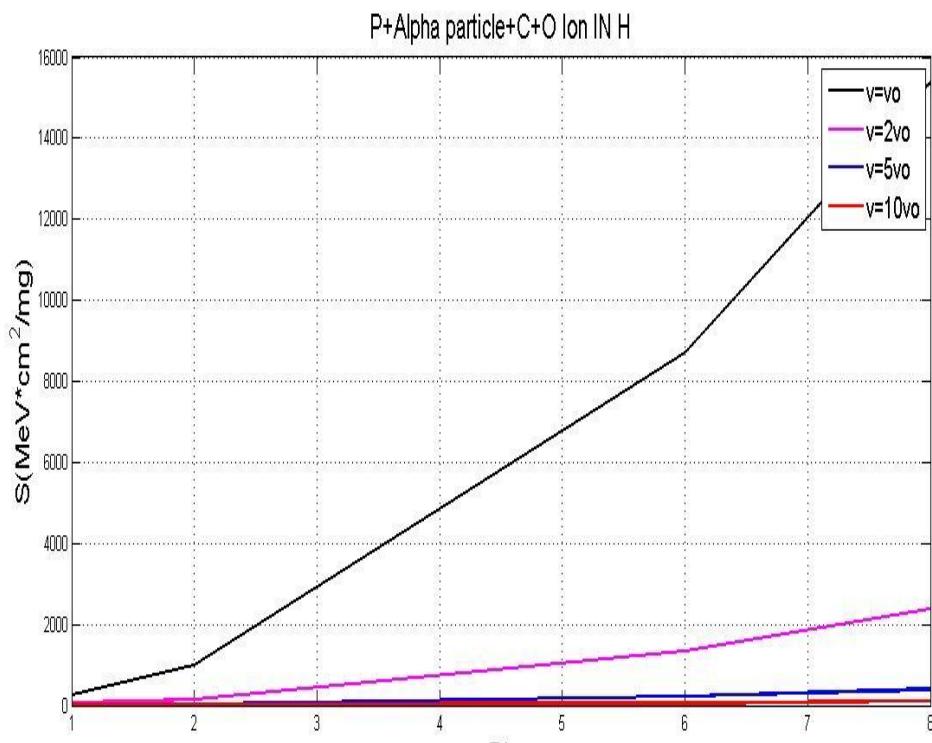
$$p_0 = \left(\frac{CZ_1 e^4}{mv_0 I} \right)^{1/2} \quad (28)$$

2-الحسابات والنتائج

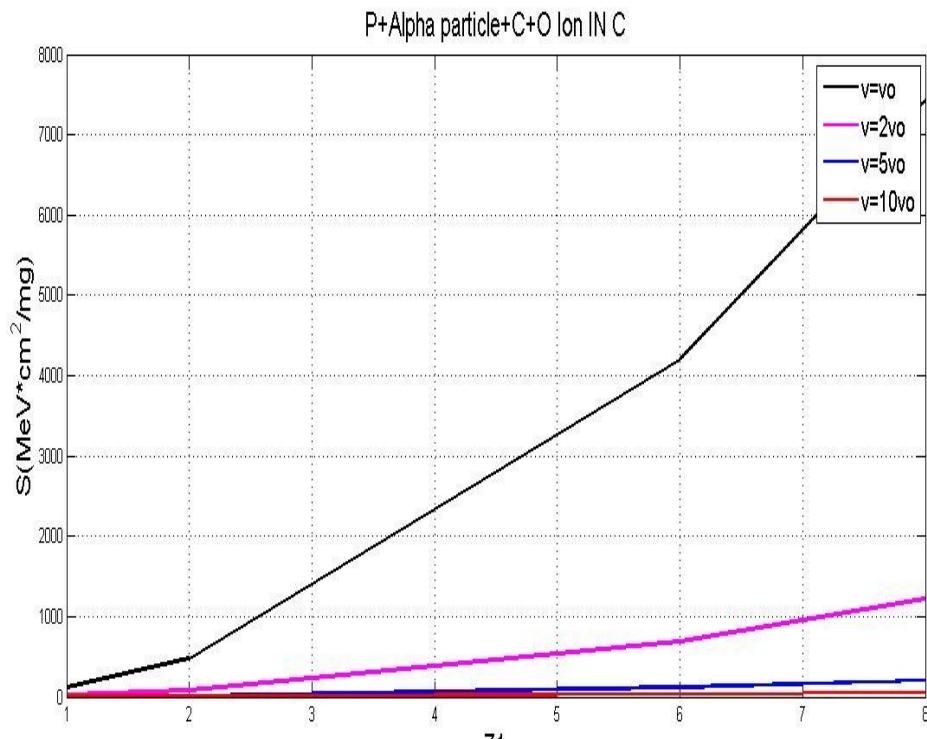
2-1- حساب تأثير العدد الذري للجسيمة المشحونة الساقطة والهدف على قدرة الإيقاف الالكترونية

Calculation effect the atomic number for projectile and target on the electronic stopping power

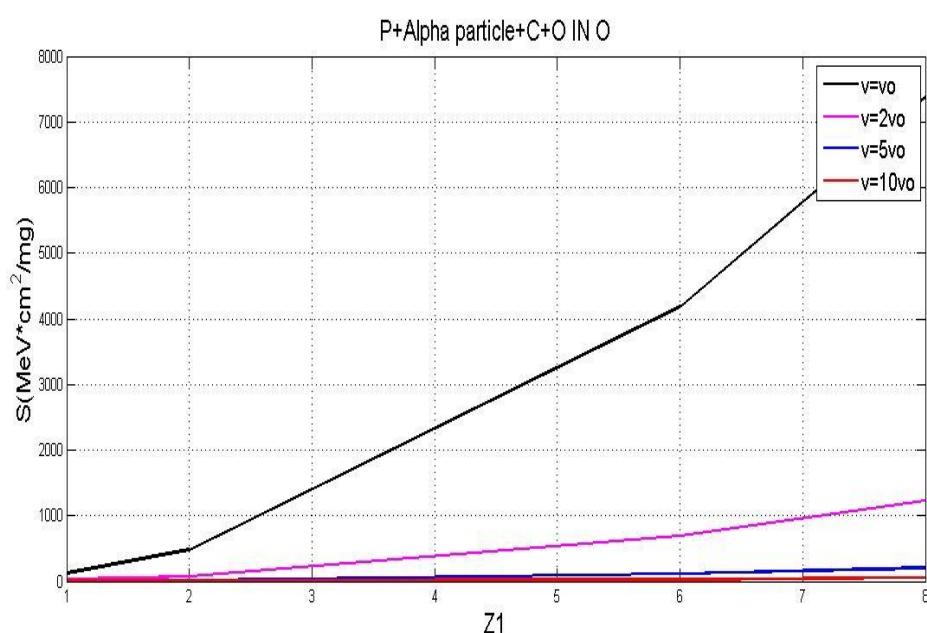
لقد تم حساب قدرة الإيقاف الالكترونية لكل من البروتونات وجسيمات الفا وايونات الكاربون والاوكسجين ذات العدد الذري (8,6,2,1) على التوالي المتقاطعة مع الأهداف (المهروجين H والكاربون C والأوكسجين O والسليلون Si) وذلك باستخدام المعادلة (24) والتي تمت برمجتها باستخدام برنامج بلغة Matlab والتي اعتمدناها في حساباتنا النظرية اذ تم حساب قدرة الإيقاف الالكترونية كدالة للعدد الذري للجسيمات الساقطة كما في الشكل (1) الذي يوضح مجموعة من الجسيمات الساقطة (P,Alpha particle,C,O) على الأهداف الذرية (H,C,O, Si) على التوالي. كما تم حساب قدرة الإيقاف الالكترونية (P,Alpha particle,C,O) كدالة للعدد الذري للهدف (14,8,6,1) كما موضح في الشكل (2) عند السرع (v=v₀,v=2v₀,v=5v₀,v=10v₀). اذ تبين ان قدرة الإيقاف الالكترونية تتزداد بزيادة العدد الذري للجسيمة الساقطة عند السرع (v=v₀,v=2v₀,v=5v₀,v=10v₀) ونلاحظ ان هذه العلاقة الطردية تكون واضحة اكثراً عندما تكون السرعة (v=v₀) كما موضح في الشكل (1). اما عند ملاحظة الشكل (2) فنلاحظ ان العلاقة بين قدرة الإيقاف الالكترونية والعدد الذري للهدف هي علاقة عكسيّة حيث نلاحظ انه كلما زاد العدد الذري للهدف قلت قدرة الإيقاف الالكترونية وذلك لأن النسبة بين العدد الذري للهدف والعدد الكتلي للهدف (a_2/z_2) هي اقل من نصف تقريباً لذلك فإن تأثير العدد الذري للجسيمة الساقطة اكثراً من تأثير العدد الذري للهدف. ونلاحظ ان العلاقة العكسيّة تكون واضحة اكثراً لاسيما عندما تكون السرعة (v=v₀).



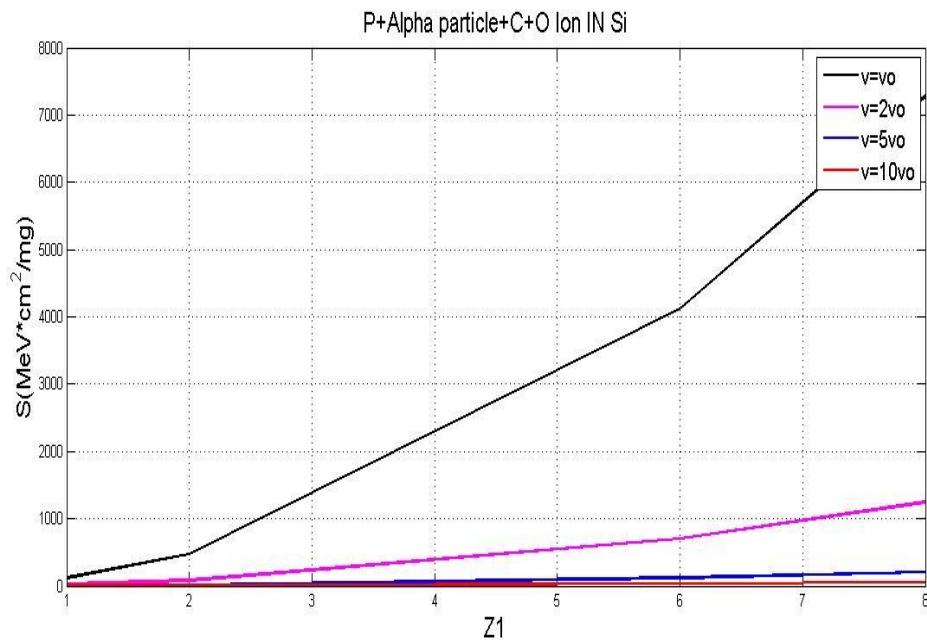
(a) P+Alpha particle+C+O IN H



(b) P+Alpha particle+C+O IN C

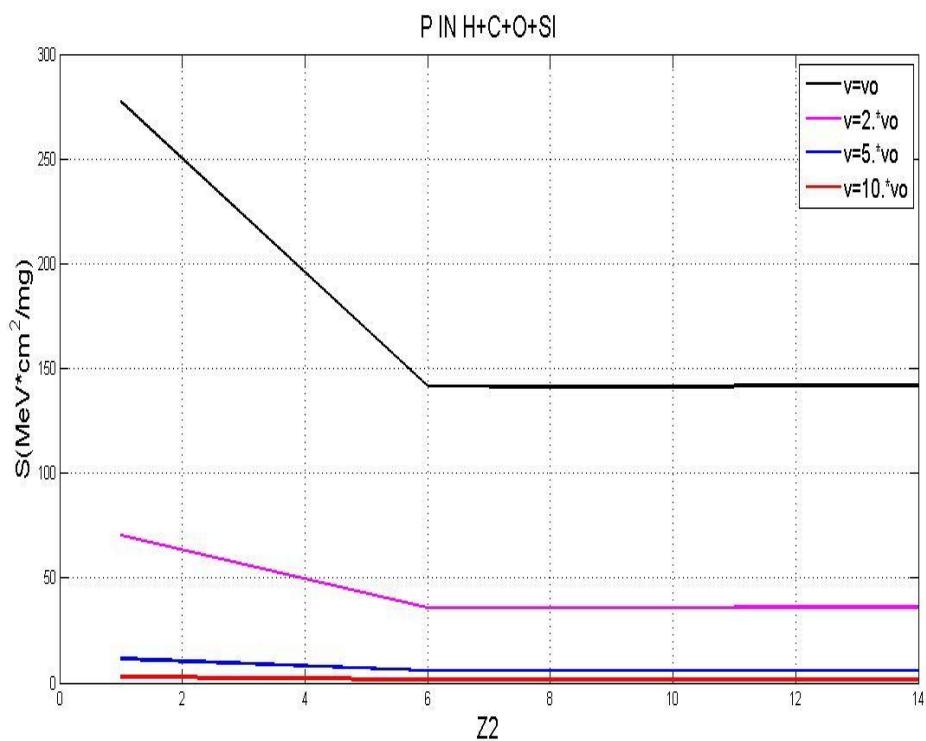


(c) P+Alpha particle+C+O IN O

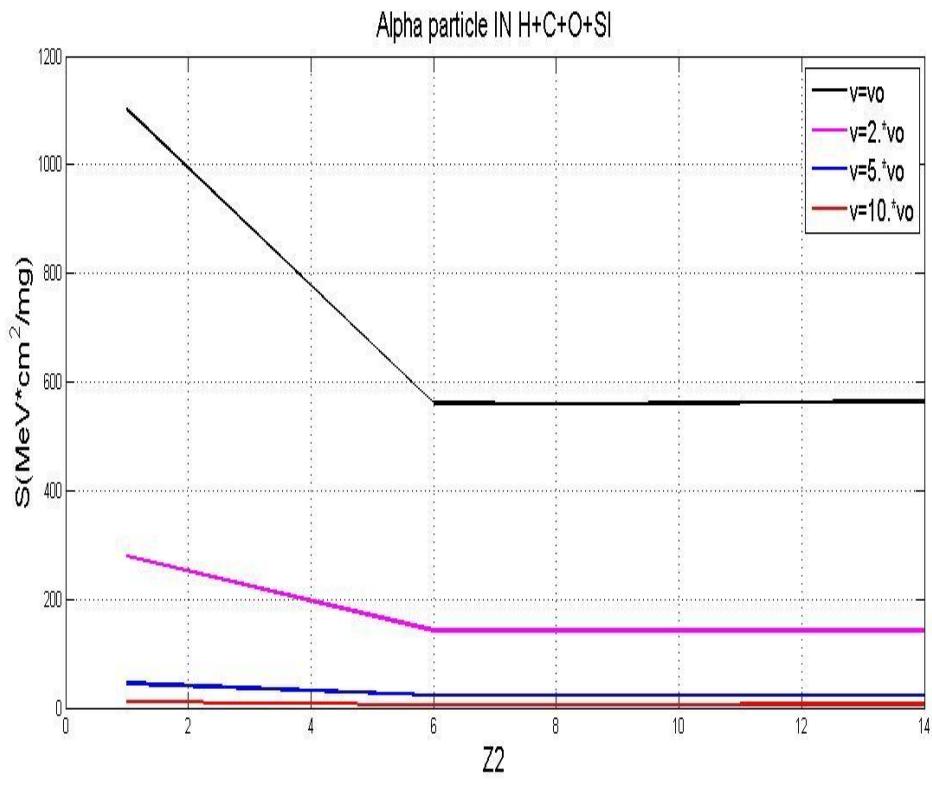


(d) P+Alpha particle+C+O IN Si

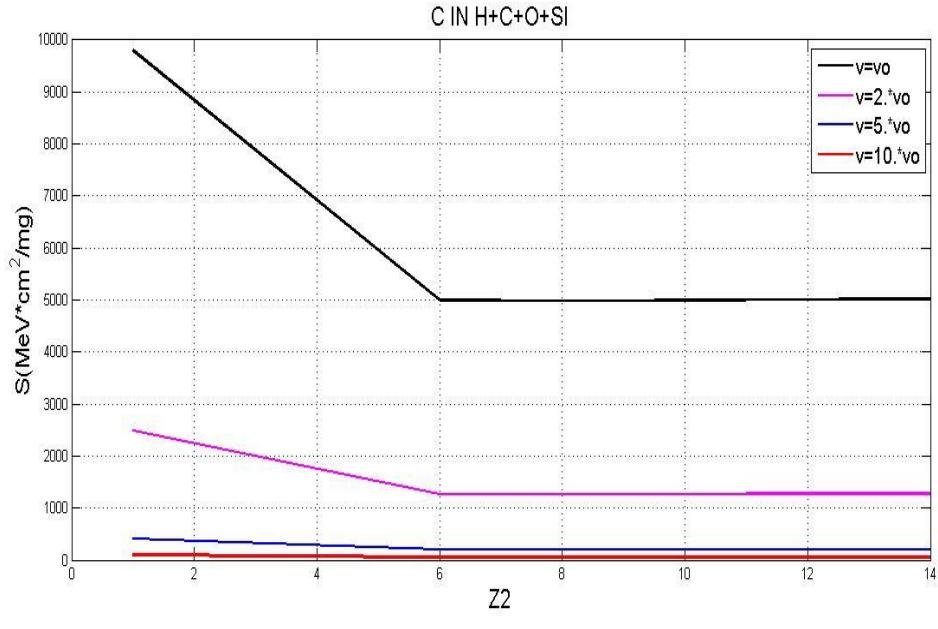
الشكل (1) تأثير العدد الذري للجسيمات الساقطة على الاهداف الذرية ($\text{Si}, \text{O}, \text{C}, \text{H}$) (Si) باستخدام المعادلة الناتجة من تأثير التصادمات القريبة والتصادمات البعيدة.



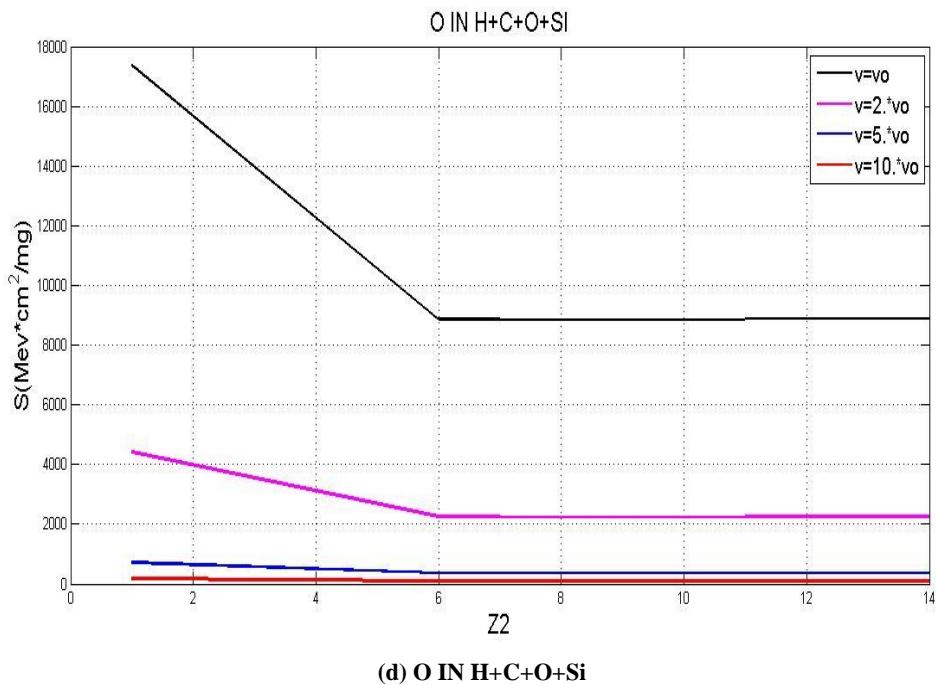
(a) P+IN H+C+O+Si



(b) Alpha particle IN H+C+O+Si



(c) C IN H+C+O+Si



(d) O IN H+C+O+Si

الشكل (2) يوضح تأثير العدد الذري للأهداف الذرية (Si,O,C,H) على قدرة الاصطدام الإلكتروني باستخدام المعادلة الناتجة من تأثير التصادمات القريبة والتصادمات البعيدة

٣- الاستنتاجات

من خلال دراستنا لقدرة الاصطدام الإلكتروني يمكن ان نستنتج النقاط المهمة الآتية:

- ان هناك معاملات أساسية تؤثر في حساب المقطع العرضي لاصطدام الجسيمات الثقيلة وهي معامل التصادم الحر (p_c) critical impact (Bohr's parameter) (Bohr's parameter).
- يمكن استخدام المعادلة (24) في حساب قدرة الاصطدام الإلكتروني لكل من البروتونات وجزيئات الفا وايونات الكربون واللوكسجين ذات العدد الذري (8,6,2,1) على التوالي المتفاعلة مع الأهداف (هيدروجين H و الكربون C و الاوكسجين O و السليكون Si).
- عند ملاحظة الشكل (1) نلاحظ ان قدرة الاصطدام الإلكتروني تزداد بزيادة العدد الذري للجسيمة الساقطة عند السرع (v=v_o,v=2v_o,v=5v_o,v=10v_o).
- عند ملاحظة الشكل (2) فنلاحظ ان العلاقة بين قدرة الاصطدام الإلكتروني والعدد الذري للأهداف هي علاقة عكسية حيث نلاحظ انه كلما زاد العدد الذري للأهداف قلت قدرة الاصطدام الإلكتروني وذلك لأن النسبة بين العدد الذري للأهداف والعدد الكثلي للأهداف (a₂/z₂) هي اقل من نصف تقريباً لذلك فان تأثير العدد الذري للجسيمة الساقطة اكبر من تأثير العدد الذري للأهداف. ونلاحظ ان العلاقة العكسية تكون واضحة اكتر لاسيماء عندما تكون السرعة (v=v_o).

CONFLICT OF INTERESTS

There are no conflicts of interest.

المصادر References

- [1]Csete A., "Experimental investigations of the energy loss of slow protons and antiprotons in matter", M.Sc.Thesis, Institute of physics and astronomy, University of Aarhus, 2002.
- [2]Meyerhof W.E., "Elements of Nuclear Physics", New York, McGraw-Hill, 1967.
- [3]Evan R.D., "The Atomic Nucleus", New York, McGraw-Hill, 1955.
- [4]Aziz.Al-Rubyi,"Increase the range of stopping power of energies (1<E(MeV/u)<0.1)", M.Sc.Thesis, Al-Mustansiriyah university, 1999.
- [5] Ziegler J.F. and J.P. Biersack, [SRIM.com] contribution by M.Ziegler ,D.J.Marwick,G.A.Cuomo,W.A.Porter,S.A.Harrison [SRIM-2003.12].
- [6]Sigmund P., "Low-speed limit of Bohr's stopping -power formula", Phys.Rev A.Vol.54, No.4, 1996..
- [7]Najem K.S., "Shell and inverse Bloch correction computing from stopping power theories of Bohr and Bethe", M.Sc.Thesis, Al- Mustansiriyah university, 2010.