

نمذجة تأثيرات الحدث الفردي لحزمة بروتونية واردة ضمن مجال طاقي – (1 KeV – 100 MeV) على رقاقة سيليكونية

إعداد:

د. حيدر حسن المصطفى*

* جامعة حمص. كلية العلوم. قسم الفيزياء

الملخص:

في هذا البحث تم نمذجة تبادل التأثير لحزمة بروتونات نشطة طاقياً مع مادة الهدف (السيليكون) باستخدام برنامج COMSOL Multiphysics، بهدف دراسة تبادل الطاقة بين الأيونات الواردة والذرات ضمن مادة الهدف والذي يشكل أساس لصنف من التأثيرات المتبادلة المعروفة بشكل شائع باسم "تأثيرات الحدث الفردي" (SEEs). وذلك باستعمال ميزات مصممة في وصلة تتبع أثر جسيم مشحون. استعملت تلك الوصلة لحساب المسافة الوسطية العابرة من قبل البروتونات في السيليكون والتي تمت مقارنتها بعد ذلك مع البيانات التجريبية ضمن مجال من قيم الطاقة البدائية، وباستعمال مُتغير تابع مُساعد لحساب طول المسار لكل أيون في الهدف، يمكن حساب المدى الوسطي للأيونات. هذا المدى الوسطي (CSDA) تم مقارنته حينئذٍ مع المدى المجدول المتوقع بموجب تقرير التباطؤ المستمر (range)

نمذجة تأثيرات الحدث الفردي لحزمة بروتونية واردة ضمن مجال طافي – (1 KeV – 100 MeV على رقاقة سيليكونية)

تكون مسارات الجسيم محسوبة من أجل قيم طاقة بدائية تتراوح من $1 keV$ إلى $100 MeV$. عموماً عندما تزداد الطاقة فإن الجسيمات تتحرك في مسارات أكثر خطية، بينما تباطؤهم يكون محكوماً بخسارة التأين. عند قيم طاقة بدائية مُنخفضة فإن مسارات الأيون تكون محكومة بالتأثيرات المتبادلة النووية وتميل الأيونات لأن تتحرك في اتجاهات عشوائية.

عند زيادة طاقة الأيون البدائية فإن التوافق بين مدى (CSDA) والمدى المتوقع يتحسن لأن التناقص في طاقة الأيون يكون محكوماً بخسارات التأين التي تسبب تباطؤ مستمر للأيونات مع مرور الزمن. وأن التوافق بين مدى (CSDA) والمدى المتوقع يتحسن أيضاً لأن خسارات التأين لا تسبب أي تغيير في اتجاه انتشار الأيون.

الكلمات المفتاحية:

نمذجة تأثيرات الحدث الفردي، التأثير المتبادل (جسيم-مادة)، بروتون، سيليكون، خسارات التأين، قدرة الإيقاف النووية، المدى الوسطي لجسيم.

The Modeling of Single Event Effects of the Incident Proton Beam Within Energy Range (1 KeV – 100 MeV) on the Silicon Flake

Abstract:

In this research, had been modeling the interaction of energetic proton beam with a target material (silicon) by using COMSOL Multiphysics program, for studying the exchange of energy between the incident ions and atoms within the target material, which forms the basis of a class of interactions known broadly as Single Event Effects (SEEs), that are by using dedicated features in the Charged Particle Tracing interface. These features are used to compute the average distance traversed by protons in silicon, which is then compared to empirical data over a range of initial energy values, and by using an Auxiliary Dependent Variable to compute the path length of each ion in the target, the average range of the ions is computed. This average range is then compared to the projected tabulated range under the **Continuous Slowing Down Approximation (CSDA range)**.

The particle trajectories are computed for initial energy values ranging from 1 keV to 100 MeV. In general, as the energy increases, the particles move in more linear trajectories as their deceleration is dominated by ionization loss. At lower initial energy values, the ion trajectories are dominated by nuclear interactions and the ions tend to move in random directions.

At lower initial energy, the CSDA range and projected range differ significantly because the ion trajectories are dominated by nuclear stopping, which causes their energy to change discontinuously and also deflects them from their initial direction of propagation.

The computed path lengths then show closer agreement to the projected range than the CSDA range.

Key Words:

Modeling of single event effects, Interaction (particle-material), Proton, Silicon, Ionization losses, Nuclear stopping, Average range of the particle

مشكلة وأهمية البحث:

عندما يتصدم أيون سطح مادة صلبة بطاقة عالية جدًا فإنه قد يخترق مسافة معينة ضمن مادة الهدف أو ربما يعبر خلاه. تبادل الطاقة بين الأيونات الواردة والذرات ضمن مادة الهدف يشكل أساس لصنف من التأثيرات المتبادلة المعروفة بشكل شائع باسم "تأثيرات الحدث الفردي" (SEEs).

في بيئات الإشعاع القاسي مثل الارتفاعات العالية القريبة من الفضاء الخارجي والناشرة بشكل أساسي من النشاط النووي في الشمس فإن تأثيرات الحدث الفردي يمكن أن تسبب أنواع من الظواهر الغير مرغوبة في الأنظمة الإلكترونية الحساسة تتراوح من أخطاء ناعمة (Single Event Upset (SEU)) إلى مشاكل دائمة (قاسية) مثل إخماد ذاتي انتقالي (Single Event Latch-Up (SET) أو احتراق (Single Event Transient (SET)) أو احتراق (SEL)). لهذا السبب فهم تأثيرات الحدث الفردي أساساً عند تصميم الأجهزة الإلكترونية العاملة في الارتفاعات العالية.

بناءً على ذلك تم نمذجة تبادل التأثير لأيونات عالية الطاقة مع مادة الهدف باستعمال ميزات مصممة في وصلة تتبع أثر جسيم مشحون. استعملت تلك الوصلة لحساب المسافة الوسطية العابرة من قبل البروتونات في السيليكون والتي تمت مقارنتها بعد ذلك مع البيانات التجريبية ضمن مجال من قيم الطاقة البدائية.

نظريّة التأثير المتبادل (جسيم-مادة) وفقاً لبرنامج COMSOL Multiphysics

عقدة التأثيرات المتبادل (جسيم-مادة) استعملت لنمذجة تبادل التأثير لأيون نشيط مع المادة الصلبة. التأثير المتبادل للأيونات النشطة مع مادة الهدف. صُنفت إلى نوعين من التأثيرات المتبادل: ضياعات بالتأيّين وإيقاف نووية.

عقدة الضياعات بالتأيّين : Ionization Loss

عقدة الضياعات بالتأيّين تُتمذّج تبادل التأثير للأيونات مع الإلكترونات في مادة الهدف كقوة كبح مستمرة وفقاً للعلاقة:

$$\mathbf{F} = -S_e \rho \frac{\mathbf{v}}{|\mathbf{v}|}$$

حيث:

\mathbf{F} القوة التي يخضع لها الأيون (مقاسة بالنيوتن في الجملة الدولية)، S_e قدرة الإيقاف الإلكترونية (مقاسة بأبعاد m^4/s^2 في الجملة الدولية)، ρ الكثافة لمادة الهدف (مقاسة بأبعاد kg/m^3 في الجملة الدولية)، \mathbf{v} سرعة الأيون (مقاسة بأبعاد m/s في الجملة الدولية).

يبدو واضحاً من العلاقة بأن القوة تؤثر دوماً باتجاه معاكس لحركة الجسيمة. من أجل نمذجة ضياع التأين يتم استعمال البيانات التجريبية [1] ، أو المقيمة والموثوقة وفقاً للنمذج النظري [2,7] لتوليد دالة استيفاء (1D) والتي من خلالها تكون قدرة الإيقاف ممثلاً على شكل دالة للطاقة الحركية للجسيم.

عقدة الإيقاف النووية :Nuclear Stopping

عقدة الإيقاف النووية تُنمذج تبادل التأثير للأيونات مع النوى في مادة الهدف. وهي على خلاف الضياعات بالتأين التي أعتبرت كقوة مستمرة عند تابعيتها للزمن في حين أن التأثيرات المترادفة مع نوى الهدف أعتبرت كأحداث مُنفصلة التي تحدث بشكل آني باحتمال معين خلال كل خطوة زمن. بالإضافة إلى أن التفاعلات النووية قد تغير اتجاه سرعة الأيون بالإضافة إلى مقداره [2-15] .

خلال كل خطوة زمنية عند حل المعادلات من قبل البرنامج تكون قيمة زاوية التبعثر χ (مقاسة بالراديان بالجملة الدولية) محسوبة من أجل كل جسيم باستعمال الصيغة:

$$\chi = \pi - 2 \int_{\xi_{\min}}^{\infty} \frac{b}{\sqrt{1 - \frac{\Phi(\xi)}{\xi \epsilon} - \frac{b^2}{\xi^2}}} d\xi \quad (1)$$

وهي توصيف بلا أبعاد لصياغة مرجعية من أجل زاوية التبعثر [6] . ويمثل هنا b (بلا أبعاد) وسيط الصدم المختزل و ξ : الطاقة المختزلة والمعرفة بالعلاقة:

$$\xi = \frac{r}{a_I}$$

حيث:

r: (مقاساً بالمتر في الجملة الدولية) وهي المسافة القطرية من مسیر الجسيم إلى النواة
الهدف و a_l : طول الحجب (screening length) (مقاساً بالметр في الجملة الدولية).
التعريف لغيرات طول الحجب يعتمد على الخيار المحدد من قائمة دالة الحجب
والموضح بالجدول التالي:

SCREENING LENGTH AND SCREENING FUNCTION DEFINITIONS		
SCREENING FUNCTION	SCREENING LENGTH EXPRESSION	SCREENING FUNCTION EXPRESSION
None	$\frac{0.8853a_0}{Z_p^{0.23} + Z_m^{0.23}}$	$\Phi(\xi)$
Bohr	$\frac{a_0}{Z_p^{0.23} + Z_m^{0.23}}$	$\exp(-\xi)$
Moliere	$\frac{0.8853a_0}{Z_p^{2/3} + Z_m^{2/3}}$	$0.35\exp(-0.3\xi) + 5.5\exp(-1.2\xi) + 0.1\exp(-6\xi)$

نمذجة تأثيرات الحدث الفردي لحزمة بروتونية واردة ضمن مجال طافي –
(1 KeV – 100 MeV على رقاقة سيليكونية)

Lenz– Jensen	$\frac{0.8853a_0}{Z_p^{2/3} + Z_m^{2/3}}$	$0.7466\exp(-1.038\xi) + 0.2433\exp(-0.387\xi) + 0.01818\exp(-0.206\xi)$
Universal	$\frac{0.8853a_0}{Z_p^{0.23} + Z_m^{0.23}}$	$0.1818\exp(-3.2\xi) + 0.5099\exp(-0.9423\xi) + 0.2802\exp(-0.4028\xi) + 0.2817\exp(-0.2016\xi)$

الطاقة المختزلة ϵ (بلا أبعاد) عُرفت بالصيغة التالية:

$$\epsilon = \frac{4\pi\epsilon_0}{Z_p Z_m e^2} a_I E_{cm}$$

حيث:

Z_p (بلا أبعاد) العدد الذري للأيونات المُنشرة. Z_m (بلا أبعاد) العدد الذري للمادة.
 $\epsilon_0 = 8.854187817 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ السماحية الكهربائية في الخلاء.
 $e = 1.602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$ مُقايسة بالجول في
الجملة الدولية) الطاقة الحركية في نظام إحداثيات مركز الكتلة.

الحد الأدنى للتكامل ξ_{min} (بلا أبعاد) هو الجذر الموجب الأكبر للمعادلة:

$$-\xi_{min}^2 + \frac{\Phi(\xi_{min})}{\epsilon} \xi_{min} + b^2 = 0$$

تتغير دالة الحجب ($\Phi(\chi)$) (بلا أبعاد) اعتماداً على الخيار المحدد من قائمة دالة الحجب، كما هو موضح بالجدول السابق [7].

القيمة لوسبيط الصدم المُختزل أختبرت من التوزع الاحتمالي لرالي (Rayleigh) باستخدام الصيغة:

$$b = \frac{1}{a_1} \sqrt{\frac{-\log(U)}{\pi LN}}$$

حيث:

U عدد اختياري (بلا أبعاد) اختبر بالاحتمال المنتظم ضمن الفترة (0,1)، L المسافة التي يجتازها الجسيم خلال خطوة الزمن، N الكثافة العددية للجسيمات في مادة الهدف. بذلك يبدو واضحاً بأنه عندما تكون خطوات الزمن صغيرة جداً مأخوذة من قبل محل (solver) البرنامج فإن قيمة b تكون كبيرة جداً نموذجياً. وهذا يعني تباعاً بأن زاوية التبعثر χ تكون قريبة جداً من الصفر، لذا فإن معظم التصادمات تتجه بأن لا يكون لها تأثير كبير على مسار الجسيم. فعندما تكون القيمة المحسوبة ل χ أقل من القيمة المحددة لزاوية تبعثر القطع (Cutoff) χ_c ، عندئذٍ اعتبر التصادم تافه وسرعة الجسيم لن تكون قيمة مبدئية مرةً أخرى خلال خطوة الزمن تلك.

عندما يكون التصادم المعتبر مهماً، وهذا يتحقق عندما $\chi_c \geq \chi$ عندئذٍ بالإضافة إلى كونه مُنحرفاً بزاوية تبعثر، فإن مسار الجسيم البدائي الجديد يكون أيضاً مُداراً بزاوية سمطيه ϕ (azimuthal) التي تكون مختبرة عشوائياً ضمن الفترة [0, 2π]. جزء من طاقة الجسيم تكون مفقودة أيضاً إلى الوسط المحيط بحيث ان الطاقة الحركية E للجسيم تتناقص بطاقة الارتداد T المُعرفة بالصيغة التالية:

$$T = \frac{4m_1m_2}{(m_1 + m_2)^2} E \sin\left(\frac{\chi}{2}\right)$$

حيث: m_1 و m_2 كتلة الأيون والكتلة الذرية لمادة الهدف (مقدار بوحدة kg في الجملة الدولية).

لتجنب الكلفة الحسابية لتخمين تكامل (الصيغة 1) عند كل خطوة زمن من أجل كل جسيم تكون القيمة لهذا التكامل مجذولة من أجل مجال لقيم b و ϵ ، عندئذ يتم استيرادها ضمن النماذج كمجموعة لدوال الاستيفاء (interpolation functions) 2D. وبذلك هناك مجال محدود من القيم التي فيها تكون بيانات الإيقاف النووية محسوبة بدقة والمقابلة لفترة المعرفة بالمتراجحات التالية:

$$-5 \leq \log(\epsilon) \leq 15$$

$$-25 \leq \log(b) \leq 10$$

خارج هذا المجال تكون قيمة زاوية التبعثر محسوبةً بالاستكمال الاستقرائي (extrapolation) وربما تكون أقل دقة مقارنةً بالقيم التي تكون محسوبة ضمن هذا المجال.

تعريف النموذج:

تتضمن وصلة تتبع أثر الجسيم المشحون عقد مصممة لنمذجة تبادل التأثير للأيونات مع المواد الصلبة. حيث أن عقدة تبادل التأثير (جسيم – مادة) تأخذ بالحسبان فقدان الطاقة والتبعثر للأيونات الواردة في المادة الصلبة بمساندة عقد ثانوية مصممة من أجل الأنواع التالية من التأثيرات المتبادلة:

- عقدة فاقد التأين الثانوية: التي تعالج تبادل التأثير بين الأيونات الواردة والإلكترونات في مادة الهدف كقوة مستمرة تؤثر باتجاه معاكس لحركة الجسيم المشحون.
- عقدة الإيقاف النووية الثانوية: التي تعالج تبادل التأثير بين الأيونات الواردة والنووي في مادة الهدف كقوة منقطعة التي تبطئ الأيون وتحرفه بزاوية عشوائية باحتمال مؤكد.

أكَّد هذا النموذج القياسي بأن البروتونات المُحررة ضمن شريحة سيليكونية بطاقة بدائية محددة يخضعون عندئِذ إلى خسارات تأين حتمية وتأثيرات مُتبادلَة نووية عشوائية حتى تصبح سرعتهم الوسطية صغيرة لدرجة الإهمال. باستعمال مُتغير تابع مُساعد لحساب طول المسار لكل أيون في الهدف، يُمكِّن حساب المدى الوسطي للأيونات.

هذا المدى الوسطي يتم مقارنته حينئِذ مع المجال المجدول بموجب تقرير التباطؤ المستمر (Continuous Slowing Down Approximation (CSDA range) [1]. بموجب (CSDA) أفترض تباضُع الأيونات بحيث أن فقدان الطاقة هو نفسه عند كل نقطة على طول مسار الأيون وفقاً للعلاقة:

$$R_{\text{CSDA}} = \int_{E_f}^{E_i} \frac{1}{S(E)} dE$$

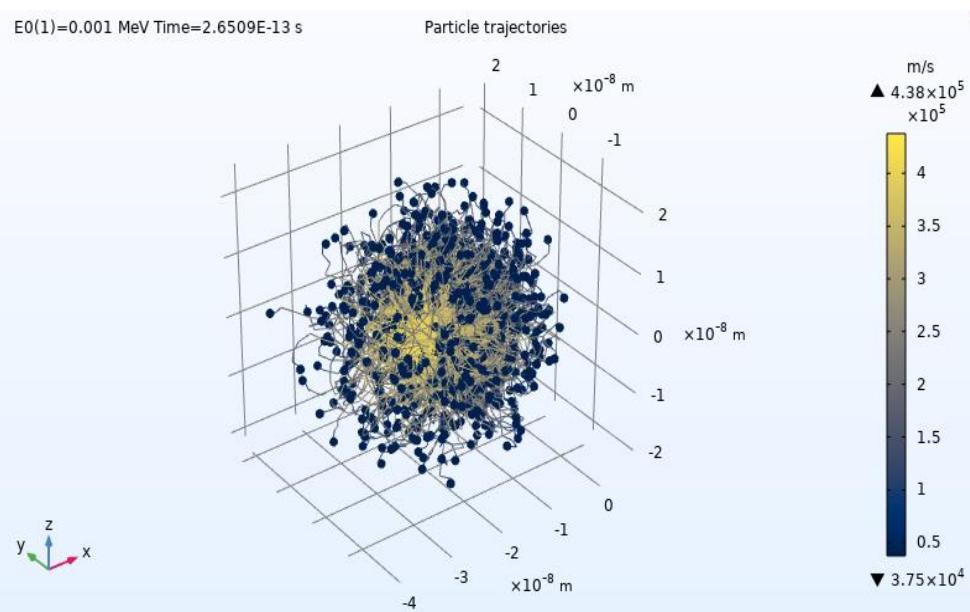
حيث: E_f , E_i الطاقتين البدائية والنهائية للأيون على التوالي. $S(E)$: قدرة الإيقاف الكلية كتابع لطاقة الأيون (total stopping power).

الوسائل البديلة للإقرار عن مدى الأيون هو المدى المتوقع الذي يُشير إلى عمق الاختراق التقريري ضمن مادة الهدف. وحسب المدى المتوقع بواسطة مسقط سرعة الأيون الأول في الاتجاه البدائي للانتشار.

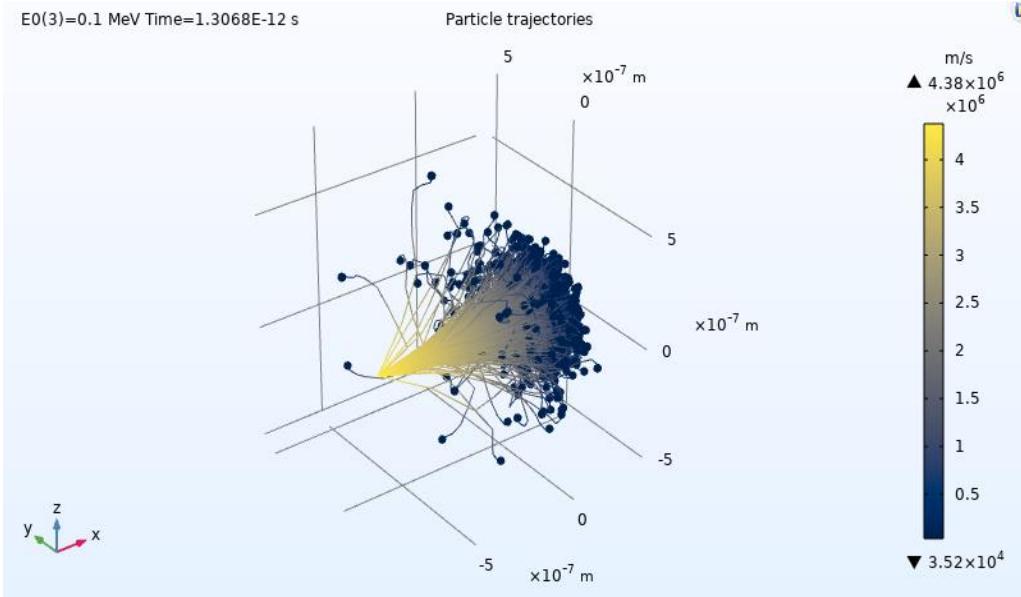
النتائج والمناقشة:

نمذجة تأثيرات الحدث الفردي لحزمة بروتونية واردة ضمن مجال طافي – (1 KeV – 100 MeV على رقاقة سيليكونية)

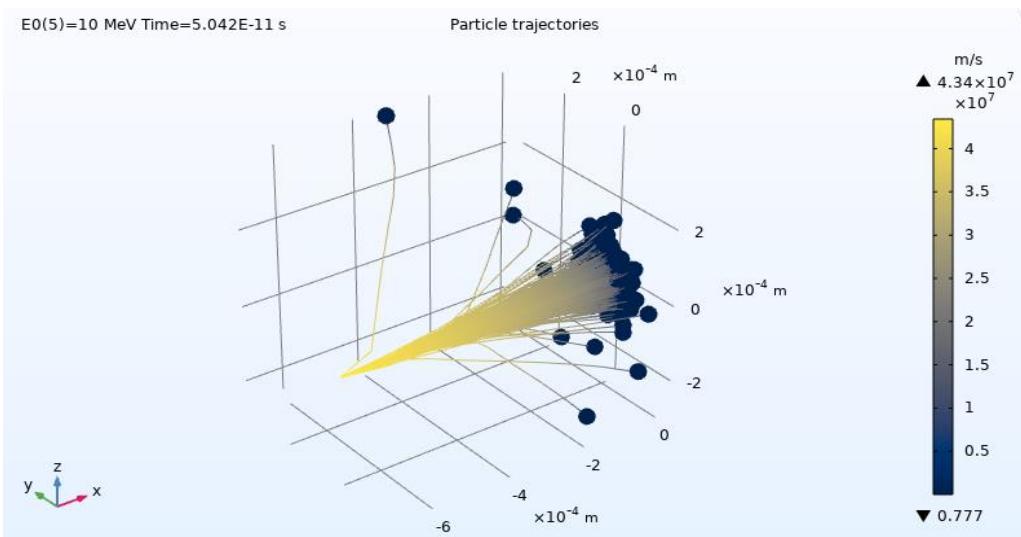
تكون مسارات الجسيم محسوبة من أجل قيم طاقة بدائية تتراوح من $1 keV$ إلى $100 MeV$. عموماً عندما تزداد الطاقة فإن الجسيمات تتحرك في مسارات أكثر خطية، بينما تباطؤهم يكون محكوماً بخسارة التأينين. عند قيم طاقة بدائية مُنخفضة فإن مسارات الأيون تكون محكومة بالتأثيرات المتبادلة النووية وتميل الأيونات لأن تتحرك في اتجاهات عشوائية. المخطط النموذجي لمسارات الأيون يكون موضحاً بالأسكال (1,2,3,4).



الشكل (1). المسارات لبروتونات طاقتها 0.001 MeV . التغير في الاتجاه بسبب التصادمات مع نوى الهدف.

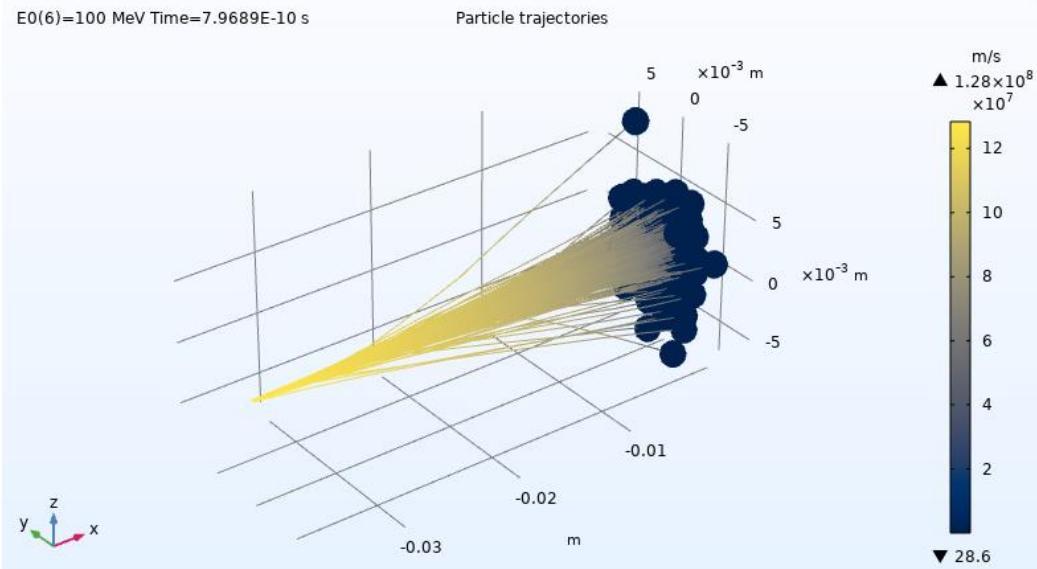


الشكل (2). المسارات لبروتونات طاقتها 0.1 MeV. التغير في الاتجاه بسبب التصادمات مع نوى الهدف. التناقص المستمر في الطاقة ناتج عن الخسارة بالتأين.



الشكل (3). المسارات لبروتونات طاقتها 10 MeV. التغير في الاتجاه بسبب التصادمات مع نوى الهدف. التناقص المستمر في الطاقة ناتج عن الخسارة بالتأين.

نمذجة تأثيرات الحدث الفردي لحزمة بروتونية واردة ضمن مجال طافي – (1 KeV – 100 MeV على رفقة سيليكونية)

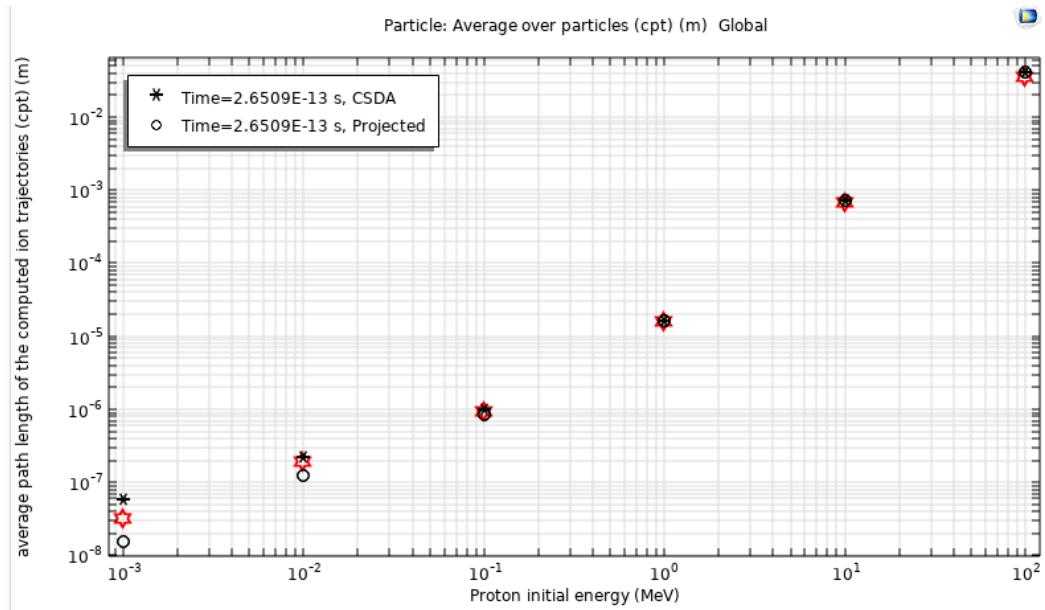


الشكل (4). المسارات لبروتونات طافتها 100 MeV. الخسارة بالتأين هو المهيمن، المسارات تصبح أكثر خطية مع تزايد الطاقة.

مدى الأيون الوسطي يكون موضحاً في الشكل (5)، وقررت قيمه إلى القيم المتوقعة من المرجع (1). حيث أن كلا المدى المتوقع ومدى (CSDA) تكون واضحة. فعند زيادة طاقة الأيون البدائية فإن التوافق بين مدي (CSDA) والمدى المتوقع يتحسن لأن التناقص في طاقة الأيون يكون محكماً بخسارات التأين التي تسبب تباطؤ مستمر للأيونات مع مرور الزمن. التوافق بين مدي (CSDA) والمدى المتوقع يتحسن أيضاً لأن خسارات التأين لا تسبب أي تغيير في اتجاه انتشار الأيون.

عند طاقة بدائية مُنخفضة المدى (CSDA) والمدى المتوقع يختلفان بشكلٍ ملحوظ لأن مسارات الأيون تكون محكومة بالإيقاف النووي والتي تسبب تغيير متقطع لطاقاتهم وتحرفهم عن اتجاه الانتشار البدائي.

مع تزايد الطاقة تظهر أطوال المسار المحسوبة عندئذٍ بتوافق أقرب إلى المدى المتوقع عن مدي (CSDA).



الشكل (5). مقارنة طول المسار الوسطي لمسارات الأيون المحسوبة بالقيم المنشورة لمدى الأيون. مدي (CSDA) والمدى المتوقع مذكورين.

الاستنتاجات:

وفقاً لنموذج تبادل التأثير لحزمة بروتونات نشطة طاقياً مع مادة الهدف (السيليكون) تبين أن:

1 - مسارات البروتون المحسوبة من أجل قيم طاقة بدائية تتراوح من 1 إلى $1 keV$ إلى $100 MeV$ ، تصبح أكثر خطية عموماً عندما تزداد الطاقة وأن تباطؤهم يكون محكماً بخسارة التأيin. في حين أنه عند قيم طاقة بدائية مُنخفضة فإن مسارات البروتون تكون محكمة بالتأثيرات المتبادلة النووية وتميل لأن تتحرك في اتجاهات عشوائية.

2 – يتحسن التوافق بين مدى البروتون الوسطي ومدى (CSDA) عند مقارنتهما مع بعضهما عند زيادة طاقة البروتون لأن التناقص في طاقته يكون ملحوظاً بخسارات التأين التي تسبب تباطؤ مستمر للبروتونات مع مرور الزمن، ولأن خسارات التأين لا تسبب أي تغيير في اتجاه انتشار البروتون ضمن مادة السيليكون. ومع تزايد الطاقة تظهر أطوال المسار المحسوبة عندئذٍ بتوافق أقرب إلى المدى المتوقع عن مدى (CSDA).

References

1. NIST Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions, <https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions>, & <http://www.nist.gov/pml/data/star/index.cfm>
2. ZIEGLER J.F, BIERACK J.P, ZIEGLER M.D, 2010 -“SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 268 1818–1823, journal homepage: www.elsevier.com/locate/nimb
3. RISTIVOJEVIC Z, & PETROVIC Z.L, 2012- “A Monte Carlo simulation of ion transport at finite temperatures,” *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 21, no. 3, 035001, 12 pp.
4. SKULLERUDE H.R, 1968 -“The stochastic computer simulation of ion motion in a gas subjected to a constant electric field.” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 1, no. 11, pp. 1567–1568,
5. NANBU K, 2000 -“Probability theory of electron-molecule, ion-molecule, molecule-molecule, and Coulomb collisions for particle modeling of materials processing plasmas and cases.” *IEEE Transactions on plasma science* , vol. 28, no. 3, pp. 971–990.
6. LANDAU L.D, and LIFSHITZ E.M, 1976- *Mechanics*, 3rd ed., Elsevier.
7. ZIEGLER J.F, BIERACK J.P, ZIEGLER M.D, 2015 – “SRIM - *The Stopping and Range of Ions and Matter*”.
8. CHILTON A.B, SHULTIS J.K, and FAW R.E, 1984 -“*Principles of Radiation Shielding*.” Prentice-Hall.
9. MARTIN J.E, 2013 -“*Physics for Radiation Protection*.” Wiley.
10. HUMPHRIES S, 2013-“*Charged Particle Beams*,” Dover.
11. LUND S.M, KIKUCHI T, DAVIDSON R.C, 2007-“Generation of initial Vlasov distributions for simulation of charged particle

- beams with high space-charge intensity”, *Phys. Rev. Spec. Top. — Accelerators and Beams*.
12. KIRSTEIN P.T, KINO G.S, WATERS W.E, 1967-“*Space charge flow*,” McGraw Hill.
13. DEVROVE L, 1986 -“*Non-Uniform Random Variate Generation*,” Springer-Verlag.
14. YIN Y, SAWIN H.H, 2008-“Surface Roughening of Silicon, Thermal Silicon Dioxide, and Low-k Dielectric Coral Films in Argon Plasma”, *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 26, no. 1, pp. 151–160.
15. GUO W, SAWIN H.H, 2009-“Modeling of the Angular Dependence of Plasma Etching”, *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 27, no. 6, pp. 1326–1336.