

دراسة وتحديد المقاطع العرضية لتفاعل البروتونات متغيرة الطاقة بدلالة الزاوية مع نسيج الكبد

باستخدام الكود MCNP

لارا كمال جورج¹ أنيس بلال² نقولا نجيب ابو عيسى³

¹ قسم الفيزياء-كلية العلوم -جامعة البعث-سوريا
lara.jarouj@damascusuniversity.edu.sy

² قسم الفيزياء-كلية العلوم -جامعة البعث-سوريا
Anees.belal@damascusuniversity.edu.sy

³ قسم الهندسة الطبية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة دمشق-سوريا
nicola.aboissa@damascusuniversity.edu.sy

الملخص

تم في هذا العمل دراسة تغيرات المقطع العرضي لتفاعل البروتونات بدلالة الزاوية عند طاقات مختلفة 50-231 MeV مع مادة مكافئة لنسيج الكبد باستخدام الكود MCNP. جرى بحساب الجرعة كتابع للمقطع العرضي عند الطاقة 231MeV بدلالة الزوايا المختلفة (-90...+90) وحساب الجرعة كتابع للمقطع العرضي عند الزاوية صفر بدلالة الطاقات المختلفة..

النتائج: وجدنا أن القيمة الصغرى للمقطع العرضي تكون عند الزاوية 0 حيث يبلغ $1 \times 10^3 \text{ barn}$ يزداد عند الاتجاه لليمين واليسار (باتجاه الزاوية +80, -80) ليبلغ قيمة عظمية $3 \times 10^3 \text{ barn}$. كما وجدنا أن اعظم قيمة للجرعة عند تثبيت الطاقة عند قيمة 231MeV كانت عند الزاوية 0 وأعظم قيمة للجرعة عند تثبيت الزاوية عند القيمة 0 كانت عند الطاقة 50MeV للبروتونات.

الكلمات المفتاحية: المقطع العرضي- الكود MCNP- الجرعة- نسج الكبد

تاريخ الإيداع: 2022/11/01

تاريخ الموافقة: 2023/03/06



حقوق النشر: جامعة دمشق -

سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق

النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA 04

Study and Determination of Cross-sections Of the Interaction of Protons of Variable Energy in Terms of Angle With Liver Tissue Using The Code MCNP

Lara Kamal jarouj¹ Anees Belal² Nicola Najeb abo issa³

¹ Science Faculty-Albaath university – Syrian arab Republic

lara.jarouj@damascusuniversity.edu.sy

² Science Faculty- Albaath university – Syrian arab Republic

Anees.belal@damascusuniversity.edu.sy

³ Biomedical Faculty-Damascus university – Syrian arab Republic

nicola.aboissa@damascusuniversity.edu.sy

Abstract:

In this research, the changes of cross section vs. angle was studied for different energies protons [50 to 231 MeV] in case of liver equivalent tissue using MCNP code, then we calculated the dose as a function of the cross-section at 231 MeV in terms of the different angles (-90.....+90) and calculated the dose as a function of the cross-section at angle 0 in terms of different energies.

Results: from study we found that the minimum value was at 0 angle , which about $1 \times 10^3 \text{ barn}$, and the maximum value was at two sides (-80 , +80), which about $3 \times 10^3 \text{ barn}$. In addition we found that the maximum dose value at 231 MeV was at the angle 0 and the maximum dose value at angle 0 was at 50 MeV of protons .

Received :2022/11/01

Accepted:2023/03/06



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

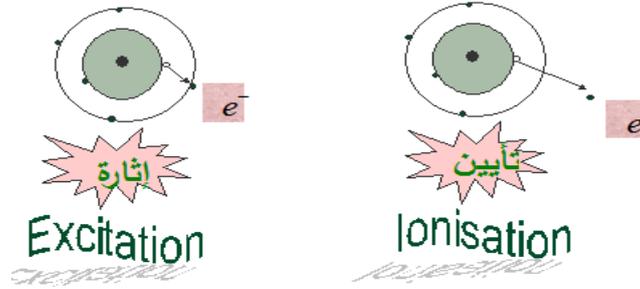
Key words: Cross Section- MCNP Code- Dose- Liver Tissue

1- مقدمة

تعتبر البروتونات، نسبياً، من الأيونات الخفيفة. تتفاعل هذه الأيونات مع المادة بثلاثة تفاعلات مختلفة وهي: التأين والإثارة، تفاعل كولون (التبعثر على الكمون الكولوني للنواة)، والتفاعل النووي.

تفاعل التأين والإثارة: وفيه يصطدم البروتون الوارد مع إلكترون مداري ناقلاً الطاقة إليه. وهنا نميز حالتين، إذا كانت الطاقة المنقولة للإلكترون تتجاوز طاقة ارتباط الإلكترون بمداره، يمكن للإلكترون أن يترك ذرته وأن يشكل مع الأيون الموجب الزوج الأيوني (ion pair) وفي هذه الحالة نقول بأننا حصلنا على تأين للذرة. أما إذا كانت الطاقة المنقولة للإلكترون لا تتجاوز طاقة ارتباط الإلكترون بمداره فإن الإلكترون يُثار بشكل مؤقت منتقلاً لمدار طاقي أعلى ولكن دون أن يغادر الذرة وفي هذه الحالة نحصل على إثارة للذرة فقط، الشكل (1).

معظم تفاعلات البروتونات مع النسيج من خلال تفاعلات التأين، ورغم أن الطاقة التي يفقدها البروتون في تفاعل تأين واحد صغيرة، إلا أن معدل التفاعل الكبير للبروتون خلال مساره ضمن النسيج هو السبب في فقدان الطاقة [1], [2], [1 A]. وهذا ما سوف نصل إليه ونشره لاحقاً في نتائج الدراسة.



الشكل (1): التأين والإثارة

التبعثر على الكمون الكولوني للنواة: بما أن نواة الذرة والبروتون كلاهما يحمل شحنة موجبة فإن قوة التنافر الكولوني سوف تتشأ عند اقتراب البروتون من حقل النواة، مما يؤدي لانحراف البروتون وارتداده عن النواة. بالتالي سوف ينزاح البروتون، نتيجة التبعثر عن الحاجز الكولوني للنواة، عن مسار الحزمة الرئيسية ليودع معظم طاقته في منطقة فرعية جانبية عن محور الحزمة الرئيسية. بما أن الجرعة المودعة تتخفف تدريجياً مع زيادة المسار لذلك يتشكل ما يسمى مخروط الظل (penumbra) على كامل مسار حزمة الجسيمات المشحونة عند عبورها النسيج [1], [2].

التفاعلات النووية: تملك هذه التفاعلات احتمالية أقل بين جميع أنواع التفاعلات السابقة. تحدث هذه التفاعلات إذا اخترق البروتون الحاجز الكولوني للنواة. بالنتيجة يتم امتصاص البروتون من قبل النواة لتصدر جسيمات جديدة. التفاعلات النووية مميزة للنواة، فعادةً يختفي الجسيم الوارد ويتم إصدار جسيم جديد... (p, γ) , (p, α) , (p, d) وبالتالي يمكن تجريبياً استخدام هذه التفاعلات للكشف عن نظير معين في المادة الهدف وتحديد تركيزه في العينة وهذا ما يسمى بتقنية التحليل بالتفاعلات النووية (nuclear reaction analysis) [1 A], [2].

1.1 قدرة إيقاف

إن التفاعلات النووية وحوادث التأين للجسيمات المشحونة هي تفاعلات غير مرنة (inelastic processes) لأنها تتسبب في فقدان الطاقة الحركية للجسيمات المشحونة، بالتالي تباطؤ في حركة جسيمات حزمة الأشعة وهذا المقدار من الطاقة الذي تفقده الجسيمات خلال مسيرها ضمن مادة ما يدعى بقدرة إيقاف المادة للجسيمات أي الطاقة المفقودة من الحزمة خلال وحدة المسافة، وهو مقدار مرتبط بكمية الجرعة التي تودعها حزمة الجسيمات خلال مسارها عبر النسيج.

إذا مثلنا مادة ما في فضاء ثلاثي الأبعاد، فإن فقدان الطاقة يحدث وفق بعد واحد فقط (إما x أو y أو z) لذا يدعى هذا المسار بالعمق (depth). تحسب قدرة الإيقاف الخطية (في بعد واحد) من خلال علاقة بيت [2], [1 A]:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z_t Z_p^2}{m_e v^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e v^2}{\langle I \rangle} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 - \frac{C}{Z_t} - \frac{\delta}{2} \right] \dots (2)$$

الدلالة الفيزيائية للرموز في علاقة بيت هي:

$-\frac{dE}{dx}$: قدرة الإيقاف أي تناقص الطاقة خلال وحدة المسافة المقطوعة داخل المادة،

Z_t : العدد الذري لمادة الوسط، Z_p : العدد الذري للجسيمات الواردة إلى المادة (في حالة البروتونات $Z_p = 1$)

m_e : كتلة الإلكترون، $\langle I \rangle$: طاقة التأين الوسطية، β : يمثل نسبة سرعة الجسيمات إلى سرعة الضوء وهو معامل

لايعدي (ليس له وحدة)، $\frac{C}{Z_t}$: معامل تصحيح للمدار، $\frac{\delta}{2}$: معامل تصحيح الكثافة

1.2 نقل الطاقة الخطي:

تصف قدرة الإيقاف مقدار الطاقة التي يفقدها الجسيم الوارد إلى مادة ما خلال واحدة المسافة ضمن المادة، لكن عملياً فإن الطاقة التي يفقدها الجسيم أو حزمة جسيمات ضمن وحدة المسار ليس بالضرورة أن يتم امتصاصها ضمن هذه المادة، حيث أن جزء من هذه الطاقة المفقودة قد يتسرب خارج المادة أو النموذج الحجمي المحدد، لذلك جاء مفهوم نقل الطاقة الخطي (بالإنكليزي Linear energy transfer LET) ليعبر عن الطاقة التي يفقدها الجسيم خلال وحدة المسافة المقطوعة ضمن مادة ما والتي يتم امتصاصها ضمن نفس المادة ولا تتسرب إلى خارج الوسط.

1.3 المدى:

يعتمد مقدار نفوذية الجسيمات ضمن مادة محددة على الطاقة الابتدائية لهذه الجسيمات (كلما زادت الطاقة الابتدائية زادت بالنتيجة المسافة المقطوعة داخل النسيج) وعلى معدل الطاقة التي تفقدها هذه الجسيمات خلال مسارها ضمن المادة. ويسمى أطول مسار الذي يقطعه الجسيم ضمن مادة ما بالمدى (بالإنكليزي Range). إذا كان لدينا حزمة من الجسيمات فإن المدى لكل جسيم في هذه الحزمة يختلف قليلاً عن مدى باقي الجسيمات وهذا بسبب أن عملية التفاعل التي يفقد من خلالها الجسيم جزء أو كامل طاقته هي عملية احتمالية ومن جهة ثانية اختلاف الطاقة البدائية للجسيمات المكونة للحزمة. لذلك يستخدم في حالة حزمة جسيمات المدى الوسطي حيث يتم حسابه رياضياً من خلال تكامل قدرة الإيقاف على كامل مسار حزمة الجسيمات.

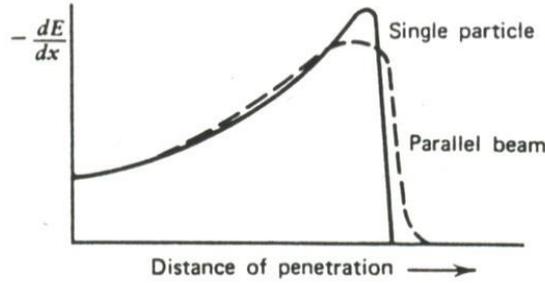
$$R = \int_E^{m_0 c^2} -\frac{dE}{dx} \dots (3)$$

1.4 منحنى براغ Bragg Curve وقمة براغ Bragg peak

منحنى براغ هو منحنٍ يمثل تغير قدرة الإيقاف الخطية لحزمة من الجسيمات المشحونة المنبعثة من مصدرٍ معينٍ بدلالة المسافة التي تقطعها الحزمة في وسط الامتصاص. تبين علاقة بيت أن الجسيمات المشحونة تودع الجزء الأكبر من طاقتها في نهاية مسارها ضمن المادة أو الوسط مشكلةً قمة تدعى قمة براغ، وقد سميت بهذا الاسم نسبة للعالم البريطاني William Henry Bragg اول من اكتشف هذه الخاصية عام 1903 من أجل جسيمات ألفا.

يبين الشكل (2) منحنى براغ لجسيمات ألفا. يلاحظ ازدياد قدرة الإيقاف الخطية لهذه الجسيمات مع تقدمها في الوسط الماص. ويعود سبب ذلك إلى الانخفاض التدريجي لطاقة الجسيمات أي لسرعتها. وفي نهاية المسار تنخفض قدرة

الإيقاف الخطية بشكلٍ سريعٍ حيث يأسر جسيم ألفا إلكترونات فتقل شحنته وتنقص بالتالي قدرة إيقافه الخطية حتى إذا اقتنص إلكتروناتٍ آخر أصبح ذرة متعادلة كهربائياً. تُسمى القمة المتميزة بالقرب من المدى قمة براغ Bragg peak.



الشكل(2): منحنى براغ لجسيمات ألفا

تستخدم خاصية وجود قمة مميزة في منحنى براغ للجسيمات المشحونة الثقيلة في معالجة الأورام القريبة من سطح الجلد: حيث يتم اختيار طاقة حزمة الجسيمات المناسبة بحيث تتفرغ كمية كبيرة من الطاقة في حيزٍ صغيرٍ على عمقٍ محددٍ داخل الجسم (مكان الورم) وبالتالي يتم تخريب الخلايا الخبيثة دون إلحاق الضرر بالخلايا السليمة على طريق الحزمة [1 A]. لذلك يفضل استخدام حزمة الجسيمات المشحونة (مثل البروتونات) في المعالجة الإشعاعية عوضاً عن الفوتونات أو النيوترونات لأن الجرعة المقدمة للنسج السليمة على كامل مسار الحزمة تكون أقل مقارنة بالجرعة المودعة في منطقة الورم والتي تكون أعظم ما يمكن خلافاً للفوتونات والنيوترونات التي تقدم جرعة كبيرة للنسيج بداية دخولها ثم تنخفض الجرعة مع تقدم الحزمة ضمن النسيج لتودع أقل جرعة في منطقة الورم.

1.5 المقطع العرضي للتفاعل النووي

بفرض لدينا حزمة إشعاعية بشدة تساوي إلى $\Phi_0 \left[\frac{\text{particle}}{s} \right]$ ، الشكل(3)، ترد إلى صفيحة رقيقة من مادة (الهدف)، يتم توهين حزمة الأشعة عند عبورها الهدف لتخرج الحزمة بشدة $\Phi \left[\frac{\text{particle}}{s} \right]$ [3]. بفرض أن حزمة الجسيمات تسقط على مساحة مقدارها A من سطح المادة الهدف، بالتالي يمكن الافتراض أن الجزء الحزمة الذي تم امتصاصه داخل المادة الهدف يساوي إلى نسبة المساحة A المملوءة بنوى المادة الهدف.

بفرض أن المادة الهدف مكونة من $N \left[\frac{\text{atoms}}{\text{cm}^2} \right]$ عندها فإن الجزء من الحزمة الذي تم امتصاصه هو:

$$\Delta \Phi = -\Phi N \sigma$$

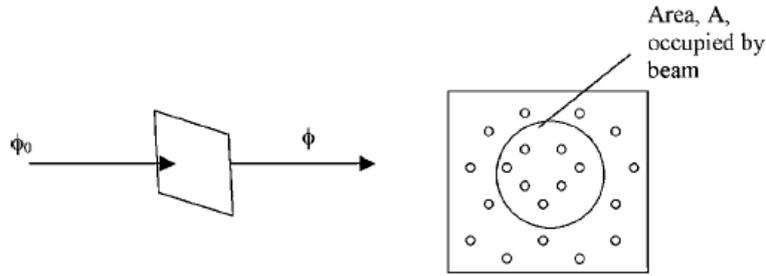
σ : المقطع العرضي للتفاعل (cm^2).

$$N = n \times \Delta x \quad : \text{تمثل جداء الكثافة الذرية للمادة } n \left[\frac{\text{atoms}}{\text{cm}^3} \right] \text{ بسماكة المادة } \Delta x [\text{cm}].$$

ويمكن التعبير عن العلاقة السابقة بالصيغة التفاضلية كما يلي:

$$-\partial \Phi = \Phi N \sigma \Rightarrow -\frac{\partial \Phi}{\Phi} = N \sigma \Rightarrow \int_{\Phi_0}^{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\Phi} = -n \sigma \int_0^x dx$$

$$\Rightarrow \Phi = \Phi_0 e^{-n \sigma x}$$



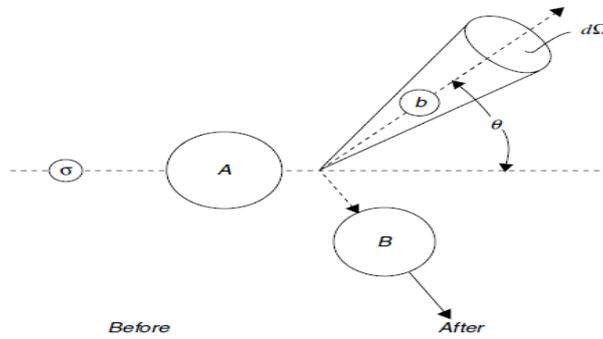
الشكل (3) الحزمة الواردة إلى صفيحة رقيقة تمثل المادة الهدف

المناقشة السابقة تركز على فقدان طاقة الجسيمات نتيجة كل التفاعلات الممكنة مع المادة الهدف، من المناسب التعبير عن المقطع العرضي بدلالة المقطع العرضي التفاضلي (المقطع العرضي لواحدة الزاوية المجسمة) من أجل تفاعلات محددة للجسيمات وباتجاه محدد:

$$\frac{\partial N}{\partial \Omega} = \Phi n \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \Omega} \right) dx$$

: $\frac{\partial N}{\partial \Omega}$ عدد الجسيمات التي تتحرك بالاتجاه المحدد في واحدة الزاوية المجسمة، ومنه:

$$\sigma = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) \sin \theta d\theta d\phi$$



الشكل (4) الزاوية المجسمة في المقطع العرضي التفاضلي

(2) المواد المستخدمة في البحث:

2.1 كود المحاكاة الإشعاعية (الإصدار MCNPX) Monte Carlo N_Particle

طرائق مونتني كارلو هي إحدى طرائق الإحصاء الرياضي والاحتمالات تتكون هذه الطرائق من مجموعة من الخوارزميات الحسابية تعتمد على تكرار العمليات الحسابية انطلاقاً من قيم بدائية عشوائية حتى الوصول لحل المسألة. وكلما زادت عدد مرات التكرار ازدادت دقة النتائج [4]. يعد الكود (MCNP (Monte Carlo N-Particle code) من أشهر الكودات الحاسوبية التي تعتمد طرائق مونتني كارلو في الحساب، هذا الكود مبني بلغة الفورتران حيث يمكن استخدام الكود MCNP في دراسة تدرج المنشآت الإشعاعية المختلفة، دراسة الطيف الطاقي للأشعة الصادرة عن المصادر الإشعاعية المختلفة (للنوترونات، الفوتونات، الإلكترونات)، الكشف عن الأشعة، تقدير كفاءة كاشف، تعيين مقدار عد الجسيمات في نقطة، معدل تدفق الجسيمات عند نقطة أو سطح أو داخل خلية، حساب الطاقة المودعة، الجرعة الممتصة، الجرعة الإشعاعية

الناجمة عن التعرض لأنواع الإشعاعات المختلفة، حساب النشاطية الإشعاعية للمواد والعناصر. إضافة إلى العديد من المسائل الأخرى التي يمكن دراستها باستخدام الكود [4].

(3) المحاكاة الحاسوبية باستخدام الكود MCNP

(3.1) نمذجة حزمة البروتونات

استخدمت البطاقة SDEF وهي اختصار للعبارة source definition أي تعريف المصدر، المتاحة في الكود MCNP لتصميم الحزمة الإشعاعية من بروتونات متغيرة الطاقة ضمن المجال [50, 231] MeV. وتمت المحاكاة من أجل بروتون واحد وذلك لتلافي ظاهرة التباين في الطاقة الناتجة عن استخدام حزمة جسيمات، وفي هذه الحالة فإن خرج الكود سوف يكون منسوباً لبروتون واحد [tally/particle].

(3.2) نمذجة الخلية الهدف

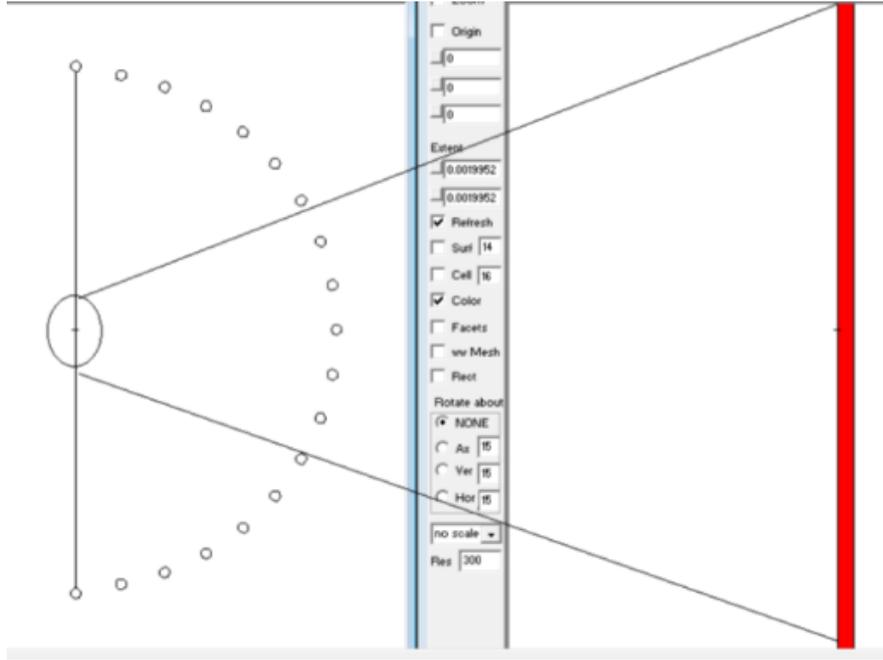
تمت نمذجة الخلية الهدف على شكل أسطوانة بقطر 1 cm وسماكة $D = 0.05 \text{ cm}$ متوضعة على مسافة 1 cm من مصدر الحزمة، تحتوي الخلية على مادة مكافئة لنسيج الكبد. يبين الجدول (1) النسب الوزنية المئوية للمادة المستخدمة في الدراسة.

الجدول (1) النسب الوزنية المئوية للمادة المستخدمة في الدراسة.

النسبة الوزنية %	الرمز	المادة
10.2	H	الهيدروجين
13.9	C	الكربون
3	N	النترجين
71.6	O	الأوكسجين
0.2	Na	الصوديوم
0.3	P	الفوسفور
0.3	S	الكبريت
0.2	Cl	الكلور
0.3	K	البوتاسيوم
0.100275		الكثافة الذرية $\left(\frac{\text{atom}}{\text{barn.cm}}\right)$
1.04		الكثافة الكتلية $\left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)$

(3.3) نمذجة سطوح الحساب

بهدف حساب التوزع الزاوي لشدة البروتونات النافذة ومنه حساب المقطع العرضي للتفاعل بدلالة الزاوية، استخدمنا بطاقة العداد F1 في حساب شدة الحزمة النافذة عبر المادة الهدف عبر سطوح خلايا بأقطار من رتبة 0.01 cm متوضعة على محيط دائرة نصف قطرها 0.5 cm بزوايا تمتد من -90 degree to + 90 degree بخطوة مقدارها 10 degree، الشكل (5).



الشكل(5): نمذجة الخلية الهدف وسطوح الحساب باستخدام الكود MCNP

3.4 طريقة حساب المقاطع العرضية

يمكن حساب المقاطع العرضية بالطريقة التقليدية بعد معرفة كل من التدفق الابتدائي للجسيمات N_1 والتدفق النهائي N_2 عند زاوية محددة وفق ما يلي:

$$N_2 = N_1 e^{-\Sigma \Delta x}$$

Σ : المقطع العرضي الماكروسكوبي (العياني) الكلي للتفاعل مع المادة الهدف مقدراً بـ cm^{-1} .

Δx : سماكة المادة الهدف بـ cm .

يرتبط المقطع العرضي الميكروسكوبي للتفاعل مع المقطع العرضي الماكروسكوبي (العياني) من خلال العلاقة:

$$\sigma = \frac{\Sigma}{N}$$

حيث:

σ : المقطع العرضي الميكروسكوبي للتفاعل بـ (barn)، N : الكثافة الذرية للمادة الهدف $\frac{\text{atom}}{\text{barn. cm}}$

4 النتائج والمناقشة:

يبين الجداول (2,3,4,5) نتائج قياس المقطع العرضي الميكروسكوبي للتفاعل لحزمة بروتونات مختلفة الطاقة بدلالة

الزاوية مع المادة المكافئة لنسيج الكبد ذات الكثافة الذرية $N = 0.100275 \left[\frac{\text{atom}}{\text{barn.cm}} \right]$

الجدول (2) المقطع العرضي لتفاعل البروتونات ذات الطاقة 50, 75 MeV مع النسيج بدلالة الزاوية

الطاقة Ep=75 MeV		الطاقة Ep=50 MeV		الزاوية θ
المقطع العرضي الميكروسكوبي σ [barn]	المقطع الكلي للإزالة Σ [cm ⁻¹]	المقطع العرضي الميكروسكوبي σ [barn]	المقطع الكلي للإزالة Σ [cm ⁻¹]	
-	-	3.46E+03	3.47E+02	-90
3.31E+03	3.32E+02	3.07E+03	3.08E+02	-80
3.18E+03	3.18E+02	3.32E+03	3.33E+02	-70
3.18E+03	3.18E+02	2.95E+03	2.96E+02	-60
2.91E+03	2.92E+02	2.88E+03	2.89E+02	-50
2.58E+03	2.59E+02	2.54E+03	2.55E+02	-40
1.90E+03	1.90E+02	1.90E+03	1.90E+02	-30
1.32E+03	1.32E+02	1.32E+03	1.32E+02	-20
9.38E+02	9.41E+01	9.38E+02	9.41E+01	-10
8.07E+02	8.09E+01	8.07E+02	8.09E+01	0
9.39E+02	9.42E+01	9.39E+02	9.42E+01	10
1.32E+03	1.32E+02	1.32E+03	1.32E+02	20
1.89E+03	1.90E+02	1.89E+03	1.90E+02	30
2.58E+03	2.59E+02	2.55E+03	2.56E+02	40
3.01E+03	3.01E+02	2.89E+03	2.90E+02	50
2.96E+03	2.96E+02	3.09E+03	3.10E+02	60
3.04E+03	3.05E+02	3.18E+03	3.19E+02	70
3.31E+03	3.32E+02	3.16E+03	3.17E+02	80
-	-	-	-	90

الجدول (3) المقطع العرضي لتفاعل البروتونات ذات الطاقة 100, 125 MeV مع النسيج بدلالة الزاوية

الطاقة Ep=125 MeV		الطاقة Ep=100 MeV		الزاوية θ
المقطع العرضي الميكروسكوبي σ [barn]	المقطع الكلي للإزالة Σ [cm ⁻¹]	المقطع العرضي الميكروسكوبي σ [barn]	المقطع الكلي للإزالة Σ [cm ⁻¹]	
-	-	-	-	-90
3.28E+03	3.29E+02	3.19E+03	3.20E+02	-80
3.28E+03	3.29E+02	3.33E+03	3.33E+02	-70
3.09E+03	3.10E+02	3.05E+03	3.06E+02	-60
3.06E+03	3.07E+02	3.05E+03	3.06E+02	-50
2.63E+03	2.63E+02	2.60E+03	2.61E+02	-40
1.90E+03	1.90E+02	1.90E+03	1.90E+02	-30
1.32E+03	1.32E+02	1.32E+03	1.32E+02	-20
9.38E+02	9.40E+01	9.38E+02	9.41E+01	-10
8.06E+02	8.09E+01	8.07E+02	8.09E+01	0
9.39E+02	9.42E+01	9.39E+02	9.42E+01	10
1.32E+03	1.32E+02	1.32E+03	1.32E+02	20
1.88E+03	1.88E+02	1.89E+03	1.89E+02	30
2.60E+03	2.60E+02	2.62E+03	2.63E+02	40
3.06E+03	3.07E+02	3.03E+03	3.03E+02	50
3.14E+03	3.15E+02	3.00E+03	3.01E+02	60
3.06E+03	3.07E+02	3.33E+03	3.33E+02	70
3.41E+03	3.42E+02	-	-	80
-	-	-	-	90

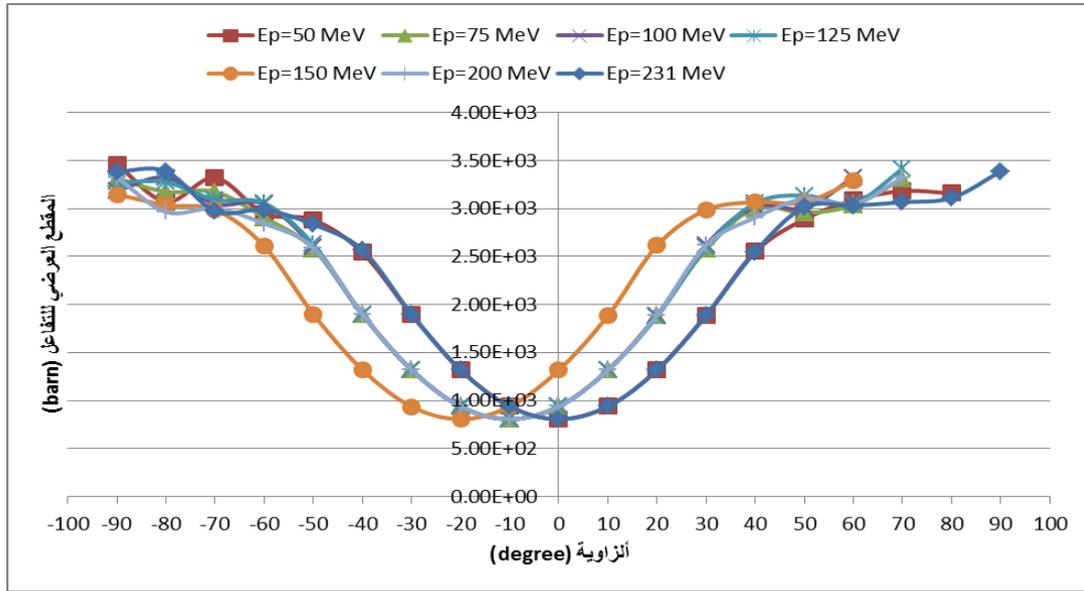
الجدول (4) المقطع العرضي لتفاعل البروتونات ذات الطاقة 200, 150 MeV مع النسيج بدلالة الزاوية

الطاقة Ep=200 MeV		الطاقة Ep=150 MeV		الزاوية θ
المقطع العرضي الميكروسكوبي σ [barn]	المقطع الكلي للإزالة Σ [cm ⁻¹]	المقطع العرضي الميكروسكوبي σ [barn]	المقطع الكلي للإزالة Σ [cm ⁻¹]	
-	-	-	-	-90
3.32E+03	3.33E+02	-	-	-80
2.97E+03	2.97E+02	3.15E+03	3.16E+02	-70
3.00E+03	3.01E+02	3.04E+03	3.05E+02	-60
2.84E+03	2.85E+02	2.99E+03	3.00E+02	-50
2.59E+03	2.60E+02	2.61E+03	2.62E+02	-40
1.90E+03	1.90E+02	1.90E+03	1.90E+02	-30
1.32E+03	1.32E+02	1.32E+03	1.32E+02	-20
9.38E+02	9.40E+01	9.38E+02	9.40E+01	-10
8.07E+02	8.09E+01	8.06E+02	8.09E+01	0
9.39E+02	9.42E+01	9.39E+02	9.42E+01	10
1.32E+03	1.32E+02	1.32E+03	1.32E+02	20
1.89E+03	1.89E+02	1.89E+03	1.89E+02	30
2.62E+03	2.63E+02	2.62E+03	2.62E+02	40
2.91E+03	2.92E+02	2.99E+03	3.00E+02	50
3.10E+03	3.11E+02	3.07E+03	3.08E+02	60
3.05E+03	3.05E+02	3.07E+03	3.08E+02	70
3.32E+03	3.33E+02	3.29E+03	3.30E+02	80
-	-	-	-	90

الجدول (5) المقطع العرضي لتفاعل البروتونات ذات الطاقة 231 MeV مع النسيج بدلالة الزاوية

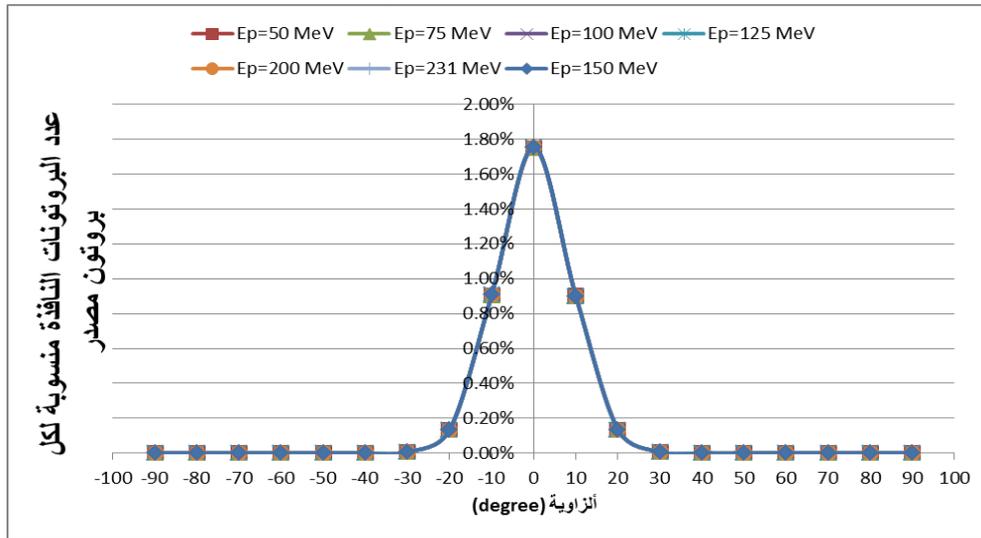
الطاقة Ep=231 MeV		الزاوية θ
المقطع العرضي الميكروسكوبي σ [barn]	المقطع الكلي للإزالة Σ [cm ⁻¹]	
3.39E+03	3.40E+02	-90
3.39E+03	3.40E+02	-80
2.97E+03	2.98E+02	-70
2.99E+03	3.00E+02	-60
2.84E+03	2.84E+02	-50
2.57E+03	2.58E+02	-40
1.90E+03	1.91E+02	-30
1.32E+03	1.32E+02	-20
9.38E+02	9.41E+01	-10
8.07E+02	8.09E+01	0
9.39E+02	9.42E+01	10
1.32E+03	1.32E+02	20
1.89E+03	1.89E+02	30
2.55E+03	2.56E+02	40
3.02E+03	3.02E+02	50
3.03E+03	3.04E+02	60
3.07E+03	3.08E+02	70
3.11E+03	3.12E+02	80
3.39E+03	3.40E+02	90

يبين الشكل (6) تغيرات المقطع العرضي للتفاعل لبروتونات عند طاقات مختلفة بدلالة الزاوية



الشكل (6) تغيرات المقطع العرضي للتفاعل لبروتونات عند طاقات مختلفة بدلالة الزاوية باستخدام الكود MCNP

يبين الشكل (7) تغيرات شدة البروتونات النافذة عبر المادة الهدف بدلالة الزاوية عند الطاقات المختلفة،



الشكل (7) تغيرات شدة البروتونات النافذة منسوبة لكل بروتون مصدر بدلالة الزاوية عند طاقات مختلفة باستخدام الكود MCNP

حساب الجرعة بدلالة المقاطع العرضية:

يبين الجدولين (7,8) قيمة الجرعة بدلالة المقاطع العرضية عند الطاقة 231MeV بدلالة الزوايا المختلفة وعند الزاوية 0 بدلالة الطاقات المختلفة.

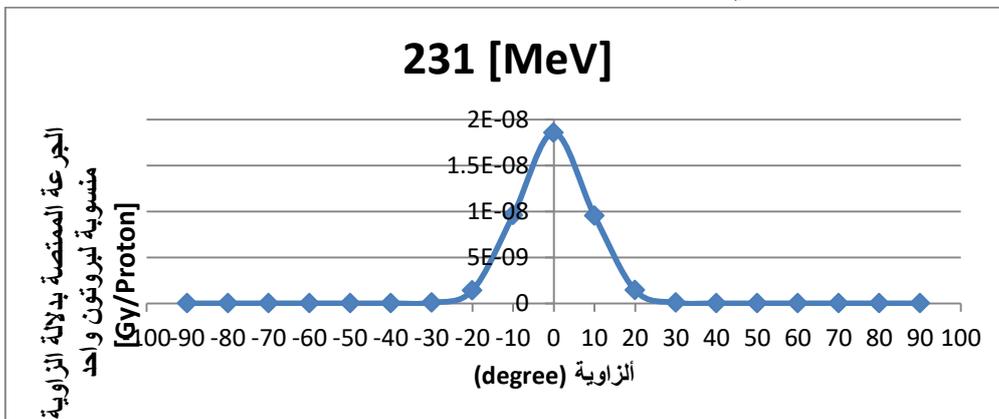
الجدول (6) قيمة الجرعة المقابلة للطاقة 231MeV بدلالة المقاطع العرضية عند الزوايا المختلفة مع ثبات قيمة الطاقة:

الزاوية θ	المقطع الكلي للإزالة Σ [cm ⁻¹]	المقطع العرضي الميكروسكوبي σ [barn]	الجرعة (Mev/g)/proton	الجرعة (Gy)/proton
-90	3.40E+02	3.39E+03	1.01E-03	1.62E-13
-80	3.40E+02	3.39E+03	2.67E-04	4.27E-14
-70	2.98E+02	2.97E+03	6.81E-03	1.09E-12
-60	3.00E+02	2.99E+03	1.12E-02	1.8E-12
-50	2.84E+02	2.84E+03	1.14E-02	1.83E-12
-40	2.58E+02	2.57E+03	2.67E-02	4.27E-12
-30	1.91E+02	1.90E+03	4.68E-01	7.5E-11
-20	1.32E+02	1.32E+03	8.81E+00	1.41E-09
-10	9.41E+01	9.38E+02	5.98E+01	9.58E-09
0	8.09E+01	8.07E+02	1.16E+02	1.85E-08
10	9.42E+01	9.39E+02	5.95E+01	9.53E-09
20	1.32E+02	1.32E+03	8.82E+00	1.41E-09
30	1.89E+02	1.89E+03	5.15E-01	8.25E-11
40	2.56E+02	2.55E+03	2.90E-02	4.64E-12
50	3.02E+02	3.02E+03	1.66E-02	2.66E-12
60	3.04E+02	3.03E+03	1.11E-02	1.77E-12
70	3.08E+02	3.07E+03	2.06E-02	3.3E-12
80	3.12E+02	3.11E+03	1.10E-02	1.77E-12
90	3.40E+02	3.39E+03	9.44E-03	1.51E-12

الجدول (7) قيمة الجرعة المقابلة للطاقات المختلفة بدلالة المقاطع العرضية عند الزاوية 0:

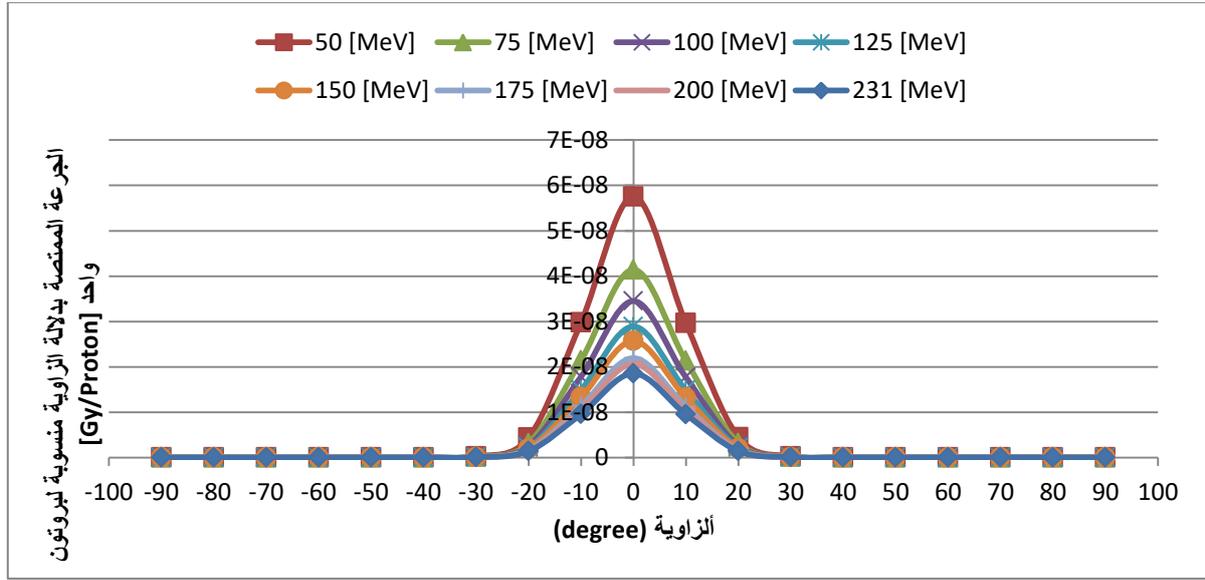
الطاقة (MeV)	المقطع الكلي للإزالة Σ [cm ⁻¹]	المقطع العرضي الميكروسكوبي σ [barn]	الجرعة (Mev/g)/proton	الجرعة (Gy)/proton	المقطع العرضي الميكروسكوبي [6] (barn)
50	8.09E+01	8.07E+02	3.59E+02	5.76E-08	1.00E+05
75	8.09E+01	8.07E+02	2.59E+02	4.14E-08	
100	8.09E+01	8.07E+02	2.15E+02	3.45E-08	1.50E+06
125	8.09E+01	8.07E+02	1.80E+02	2.89E-08	
150	8.09E+01	8.07E+02	1.61E+02	2.57E-08	
175	8.09E+01	8.07E+02	1.37E+02	2.19E-08	
200	8.09E+01	8.07E+02	1.29E+02	2.06E-08	
231	8.09E+01	8.07E+02	1.01E+03	1.62E-13	1.00E+06

يبين الشكل (8) تغيرات الجرعة بدلالة الزاوية عند الطاقة 231MeV :



الشكل (8) تغيرات الجرعة بدلالة الزاوية عند الطاقة 231MeV

يبين الشكل (9) تغيرات الجرعة بدلالة الطاقة عند الزاوية 0:



الشكل (9) تغيرات الجرعة بدلالة الطاقة عند الزاوية 0

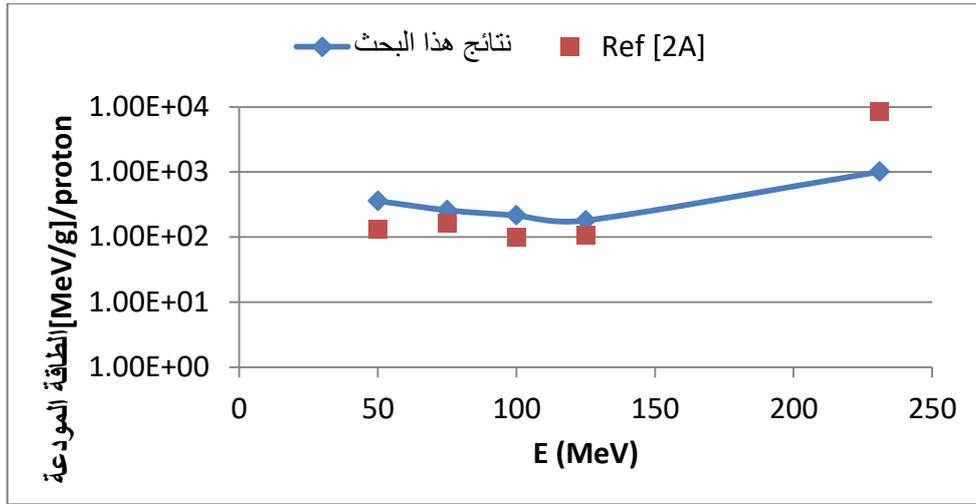
- مناقشة النتائج

من الجداول (2,3,4,5) والشكل (6) نلاحظ أن المقطع العرضي للتفاعل يملك قيمة صغيرة عند الزاوية 0 تصل إلى $1 \times 10^3 \text{ barn}$ بينما يزداد تدريجياً بالابتعاد إلى جانبي الهدف (الزاوية +80, -80) ليبلغ قيمة عظمى $3 \times 10^3 \text{ barn}$. لتفسير ذلك نعلم على طيف مكسويل للحزمة الناتجة عن المسرع، الشكل (7)، الذي يمثل تغيرات شدة البروتونات النافذة منسوبة لكل بروتون مصدر نجد أن الشدة العظمى للبروتونات النافذة عبر الهدف تكون أعظمية باتجاه الأمام (الزاوية 0) وتتناقص تدريجياً بالاتجاه نحو اليمين واليسار، بالتالي فتفاعل البروتونات النافذة باتجاه الأمام مع مادة الهدف يكون أصغرياً نظراً لطاقتها العالية أي المقطع العرضي للتفاعل أقل ما يمكن (لأن المقطع العرضي للتفاعل يتناسب عكساً مع طاقة البروتونات)، كلما ابتعدنا نحو اليمين واليسار نجد أن عدد البروتونات النافذة يتناقص تدريجياً نظراً لانخفاض طاقتها وبالتالي يزداد احتمال تفاعلها مع مادة الهدف أي يزداد المقطع العرضي للتفاعل.

من الجدول (6) نلاحظ أن أعلى قيمة للجرعة عند الطاقة 231MeV كانت عند الزاوية 0 حيث أن شدة البروتونات تكون أعظمية وبالتالي تولد أكبر جرعة ممكنة عند هذه الزاوية، كما نلاحظ من الجدول (7) أن أعلى قيمة للجرعة عند الزاوية 0 كانت عند الطاقة 50 MeV للبروتونات حيث كلما كانت طاقة البروتونات منخفضة كان احتمال تفاعلها مع مادة الهدف أكبر. بهدف التحقق من صحة النتائج جرت مقارنة القيم مع النتائج المنشورة في المرجعين [5] [2A] واللذان اعتمدا على الكودين MCNPX,MCNPX-2,3,0 لحساب الجرعة الممتصة المتولدة عن بروتونات بطاقة 230MeV ضمن فانتوم مكافئ بتركيبه الكيميائي للنسيج الحي وكانت النتائج متطابقة كما في الجدول (8).

يبين الجدول (8) مقارنة بين قيم الجرعة التي توصلنا اليها في البحث عند طاقات مختلفة مع قيم الجرعة في المرجع [2A]

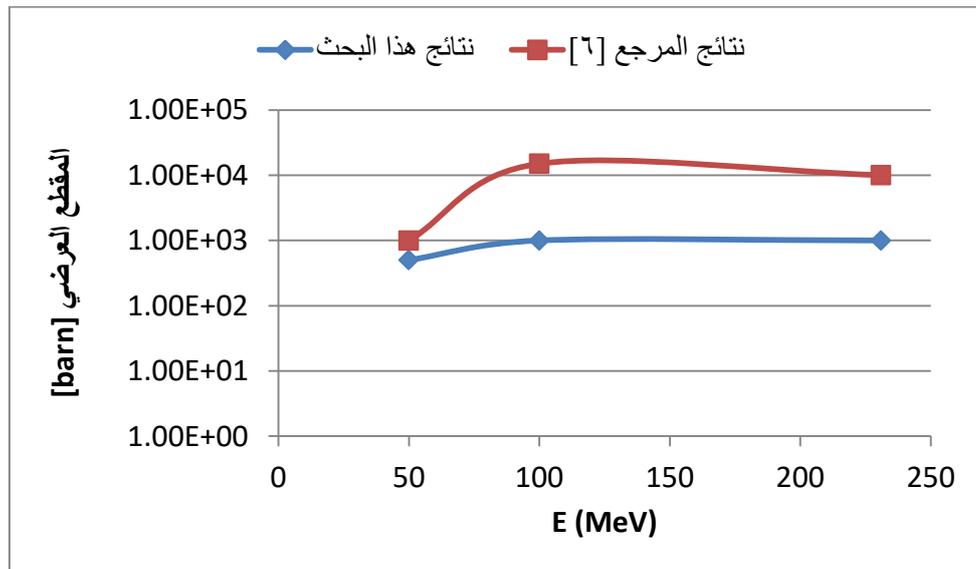
الزاوية (0)			
الطاقة (MeV)	الجرعة (Mev/g)/proton	الجرعة (Mev/g)/proton[2,A]	الخطأ النسبي %
50	3.59E+02	1.30E+02	0.01%
75	2.59E+02	1.63E+02	0.02%
100	2.15E+02	1.00E+02	0.03%
125	1.80E+02	1.07E+02	0.04%
231	1.01E+03	8.50E+03	0.11%



الشكل (10) مقارنة بين الجرعة المحسوبة في هذا البحث والجرعة في المرجع (2,A)

للحزم البروتونية ذات الطاقة (50-130, 235 MeV).

وللتحقق من صحة قيم المقاطع العرضية قمنا بمقارنة القيم التي توصلنا اليها مع القيم الموجود في المرجع [6] وكانت القيم متقاربة مع وجود اختلافات صغيرة نتيجة اختلاف الشروط التجريبية في كلا الدراستين.



الشكل (11) المقاطع العرضية المحسوبة في هذا البحث مع المقاطع العرضية المحسوب في المرجع (6)

References:

- [1] James E. Martin: A Handbook. Physics for Radiation Protection , ISBN: 3-527- 40611-5. (2006).
- [2] Yannick Alexander Broese van Groenou, Monte Carlo simulation of neutron doses from pencil beam scanning proton therapy, Master thesis in medical physics and technology, Department of physics and technology- Bergensis universitas (June 2017).
- [3] WALTER D. LOVELAND, DAVID J. MORRISSEY, GLENN T. SEABORG MODERN NUCLEAR CHEMISTRY. A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, ISBN-13 978-0-471-11532-8 (2006).
- [4] X-5 Monte Carlo Team: MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5; Los Alamos National Laboratory Controlled Publication (April 24, 2003).
- [5] USING MCNPX TO CALCULATE PRIMARY AND SECONDARY DOSE IN PROTON THERAPY By Jeffrey M. Ryckman In Partial Fulfillment Of the Requirements for the Degree Master of Science in Medical Physics Georgia Institute of Technology May, 2011.
- [6] Slawosz Uznanski, Benjamin Todd, Andrea Vilar Villanueva CERN, Geneva, Switzerland Ruben Garcia Alia, Ewart Blackmore, Markus Brugger, Remi Gaillard, Julien Mekki, Michael Trinczek Member, IEEE. The Effect of Proton Energy on SEU Cross-Section of a 16Mbit TFT PMOS SRAM with DRAM Capacitors. January, 2015.

المراجع العربية:

- [1 A] د. بيداء الأشقر: محاضرات التأثير المتبادل بين المادة والإشعاع، ماجستير الوقاية الإشعاعية وأمان المصادر المشعة وأمنها، قسم الفيزياء-كلية العلوم-جامعة دمشق (2011).
- [2 A] د. ماجدة نحيلي: حساب المدى وتغير الجرعة النترونية والفوتونية في المعالجة بالبروتونات ضمن فانتوم مكافئ للنسيج الحي باستخدام حزم بروتونية متغيرة الطاقة والكود MCNPX-2.3.0.