

حساب كثافة الفوتونات والنترونات الناتجة عن التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ في مسرع السيكلترون السوري باستخدام الكودين MCNPX و MCNP5C

توفيق أبو شديد⁽¹⁾ و ماجدة نحيلي⁽²⁾ و إسماعيل شعبان⁽³⁾

^(*) قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة دمشق - سورية

^(**) قسم الهندسة النووية - هيئة الطاقة الذرية السورية - سورية

تاريخ الإيداع 2012/08/08

قبل للنشر في 2012/11/05

المخلص

استخدم الكودان MCNPX و MCNP5C لنمذجة التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ في مسرع السيكلترون السوري لحساب كثافة النترونات والفوتونات الناتجة عن هذا التفاعل كتابع لسماكة هدف ${}^9\text{Be}$ البيريليوم. استخدمت بروتونات مسرعة لطاقة 15.0MeV، وتيار شدته 200.0µA. ودرس أيضاً التوزيع الزاوي للنترونات الصادرة عن التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ كتابع لسماكة الهدف، إذ لوحظ أن القيمة العظمى للكثافة النترونية والفوتونية تقع عند الزاوية صفر. قورنت القيم الحسابية بالنسبة إلى التفاعلين ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ و ${}^{207}\text{Pb}(p,n)$ بالقيم التجريبية بالنسبة إلى الطيف النترونات الصادر عن هذين التفاعلين، ووجد تطابق جيد بين القيم الحسابية والتجريبية.

الكلمات المفتاحية: مسرع السيكلترون السوري، التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ ، كثافة نترونية وفوتونية، طيف النترونات، الكودان MCNPX و MCNP5C.

⁽¹⁾ طالب، ⁽²⁾ الأستاذ المشرف، ⁽³⁾ الأستاذ المشرف المشارك.

Calculation of the Photons and Neutrons Intensity From the Reaction ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ in the Syrian Cyclotron Accelerator using MCNPX and MCNP5C codes

T. Abo-Shdeed^{*(1)}, M. Nahili^{*(2)} and I. Shaaban^{** (3)}

^(*) Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria

^(**) Department of Nuclear engineering, Atomic Energy Commission of Syria, Syria.

Received 08/08/2012

Accepted 05/11/2012

ABSTRACT

The MCNPX and MCNP5C codes are used to simulate the reaction ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$. The photons and neutrons intensities resulting of this reaction are calculated as a functions of the ${}^9\text{Be}$ target thickness. To calculate this intensity, the protons with energy 15.0MeV and protons current 200.0 μA are used. In addition, the angular distribution of the emitted photons and neutrons from the reaction ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ is calculated as a function of the ${}^9\text{Be}$ target thickness. The maximum value of the photons and neutrons flux is found to be at angle 0° for thin targets. The calculated values using MCNPX of the neutrons spectrum emission from reactions of ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ and ${}^{207}\text{Pb}(p,n)$ is compared to experimental values. There is a good agreement between them.

Keywords: Syrian cyclotron accelerator, ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$, MCNPX, MCNP5C.

⁽¹⁾Student, ⁽²⁾ Supervisor, ⁽³⁾ Associated supervisor.

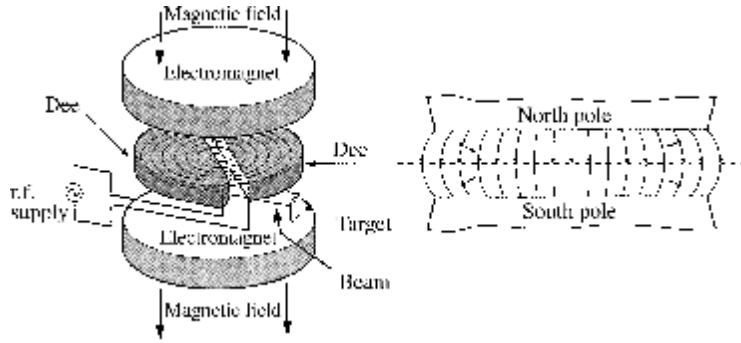
المقدمة

يستخدم المسرع لزيادة الطاقة الحركية للجسيمات المشحونة كهربائياً مثل: الإلكترونات، والبروتونات، والديتروونات، وجسيمات ألفا ونوى العناصر الخفيفة والثقيلة. وتعدُّ المسرعات أداة مهمة لأغراض البحث العلمي، ولها استخدامات كثيرة مثل [1]:

1. إنتاج نظائر مشعة قصيرة العمر تستخدم للتشخيص الطبي و للعلاج،
2. توليد أشعة x والبيونات المستخدمة في العلاج الإشعاعي.

مسرع السيكلترون:

يتألف السيكلترون من صفيحتين على شكل حرف D يطبق عليهما جهد متناوب بواسطة مزود للجهد عالي التردد. وتوضع الصفيحتان ضمن حقل مغناطيسي منتظم B بحيث يكون اتجاه الحقل عامودياً على مسار الجسيمات. ويوضع مصدر الجسيمات المشحونة ضمن مركز الصفيحتين داخل الفجوة المفرغة، كما هو مبين بالشكل (1) [1].



الشكل (1) البنية الأساسية لمسرّع السيكلترون

وبنتيجة تعديل كل من شدة الحقل المغناطيسي B وتردد الكمون المتناوب F بحيث نجعل الأيون متوافقاً في الطور فإنه في كل لحظة يعبر فيها الأيون الفجوة بين اللبوسين يكتسب طاقة إضافية، وفي الوقت نفسه يزداد نصف قطر مساره الذي يأخذ شكل مسار حلزوني مستو. وأخيراً يصل الأيون محيط المسرى حيث يخرج من هناك بواسطة صفيحة حارفة مشحونة بكمون سالب مرتفع. فإذا كان R هو نصف قطر المسرى D فإن الطاقة الحركية للأيون عند خروجه من السيكلترون تعطى بالعلاقة [1]:

$$E = m.v^2/2 = 2.\pi^2.R^2.F^2.m \quad (1)$$

إذ: m- كتلة البروتون (الأيون). R- نصف قطر المسرى. F- تردد الكمون المتناوب.

تعطى المواصفات العامة للمسرّع السيكلترون السوري (هو من النوع Cyclotron 30 LC) في الجدول (1) ويظهر الشكل (2) المظهر العام للمسرّع السوري الموجود في هيئة الطاقة الذرية السورية.



الشكل (2) المسرع السوري السيكلترون (Cyclone 30 LC).

الجدول (1) المواصفات العامة لمسرّع السيكلترون السوري.

مجال طاقة البروتونات	(15 – 30) MeV
شدة تيار البروتونات	200 μ A
الحقل المغناطيسي الأعظمي (Hill Field)	1.7 Tesla
الحقل المغناطيسي الأدنى (Valley Field)	0.12 Tesla
التردد (ثابت)	65 MHz
تيار الحقن للمسرّع (H)	5 mA
استطاعة التشغيل عند بروتونات بطاقة 30 (MeV)	70/110 kW
الوزن الكلي	50 tons

التفاعلات المعتمدة في المسرّعات لإنتاج النترونات [2]:

إن مبدأ إنتاج النترونات في المسرّعات يعتمد على تسريع نوى مشحونة خفيفة أو ثقيلة ومن ثم صدمها بهدف مناسب للحصول على كثافة نترونية محددة، وهنالك كثير من التفاعلات المستخدمة لهذا الغرض نذكر منها:

1. التفاعلات (p,n):
 ${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$, ${}^6\text{Li}(p,n){}^6\text{Be}$, ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$, ${}^{12}\text{C}(p,n){}^{12}\text{N}$, ${}^{15}\text{N}(p,n){}^{15}\text{O}$, ...etc.

2. التفاعلات (d,n):
 ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$, ${}^7\text{Li}(d,n){}^8\text{Be}$, ${}^{15}\text{N}(d,n){}^{16}\text{O}$, ${}^{18}\text{O}(d,n){}^{19}\text{F}$, ${}^{20}\text{Ne}(d,n){}^{21}\text{Na}$, ...etc.

ويعتمد اختيار التفاعل على شدة الكثافة النeutronية المطلوبة والغرض منها. مثلاً في مجال علاج الأورام الدماغية السرطانية باستخدام طريقة أسر النوترون في نواة البورون أو ما يعرف باسم Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) عادة يستخدم التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ وهذا مرتبط بعدة شروط مثل:

1. درجة الانصهار لمادة الهدف عالية.
 2. الموصلية الحرارية جيدة.
 3. التماسك العالي للبنية الميكانيكية لمادة الهدف.
- يبين الجدول (2) خصائص بعض التفاعلات المستخدمة في مجال العلاج الإشعاعي أي ما يعرف بـ BNCT [3].

الجدول (2) خصائص بعض التفاعلات المستخدمة في مجال العلاج الإشعاعي.

التفاعل	طاقة القذف MeV	معدل إنتاج النوترونات n/(min-mA)	الطاقة الوسطى للنوترونات عند الزاوية 0° MeV	الطاقة العظمى للنوترونات MeV	درجة انصهار مادة الهدف C°	الموصلية الحرارية لمادة الهدف W/m-K
${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	2.5	5.34×10^{13}	0.55	0.786	181	85
${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$	4.0	6.00×10^{13}	1.06	2.12	1287	201
${}^9\text{Be}(d,n)$	1.5	1.30×10^{13}	2.01	5.81	1287	201
${}^{13}\text{C}(d,n){}^{14}\text{N}$	1.5	1.09×10^{13}	1.08	6.77	3550	230

ترتبط الشدة النeutronية (intensity) الناتجة عن التفاعل مع تيار الخرج للمسرّع (حزمة الجسيمات المسرّعة) بالعلاقة الآتية [3]:

$$\varphi_n(n/sec) = N \times V \times \sigma_{(p,n)} \times \frac{I_p}{q \times A} \dots \dots \dots (2)$$

إذ: $\varphi_n(\frac{n}{sec})$ - شدة النوترونات الناتجة.

$V (cm^3)$ - حجم الهدف.

$q (C)$ - شحنة البروتون.

$N (atom/cm^3)$ - كثافة نوى مادة الهدف في وحدة الحجم $V(cm^3)$.

$I_p(A)$ - شدة تيار البروتونات الخارج من المسرّع.

$A(cm^2)$ - أبعاد حزمة البروتونات.

$\sigma_{(p,n)} (cm^2)$ - المقطع العرضي للتفاعل من النوع (p,n).

لمحة عن الكودين MCNP5C و MCNPX [4].

يعدّ الكود MCNP (Monte Carlo N - Particle code) من أشهر كودات طرائق مونتني كارلو الذي يطور في مخبر لوس الاموس الوطنية في الولايات المتحدة الأمريكية. يتضمن ملف الدخّل لأية مسألة العناصر الآتية:

1. بطاقة العنوان Title card
2. بطاقة الخلايا Cell Cards
3. بطاقة السطوح Surface Cards
4. التحويلات أو الانتقالات Transformations
5. نمط الإصدار Mode
6. توصيف مصدر الجسيمات Source
7. توصيف المواد المستخدمة Materials
8. أهمية كل خلية Importances
9. معلومات أخرى Other data لإجراء الحسابات المطلوبة.

وتتضمن النسخة الحديثة للكود MCNP5C الميزات الآتية:

التصميم الهندسي ثلاثي البعد، وتحسينات على المصادر المستخدمة في كتابة ملف الدخل، وإنقاص الأخطاء وإمكانية إظهار توزيع الجسيمات على الرسم ويستخدم هذا الكود في مسائل عديدة مثل: فيزياء المفاعلات، والتدريع، وحسابات الحرجية، ومعالجة النفايات المشعة، والتصوير الشعاعي،.....الخ.

وقد طُوِّرت الواجهة المرئية (Visual Editor) للإصدار MCNP5C التي تساعد المستخدم كثيراً في كتابة ملف الدخل (Input File) وإجراء الحسابات اللازمة. بينما يتميز الكود MCNPX باحتوائه على مكتبة للمقاطع العرضية لجميع تفاعلات الجسيمات المشحونة وغير المشحونة (بروتونات، وجسيمات ألفا، والكتروونات، ونيوترونات،... الخ) فضلاً عن أشعة غاما.

نمذجة التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ باستخدام الكودين MCNPX & MCNP5C

يعد التفاعل الآتيان ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ و ${}^7\text{Li}(p,n)$ الأكثر استخداماً في السرعات لتصميم حزمة نترونية فوق حرارية لاستخدامها في مجال معالجة الأورام السرطانية الدماغية أو ما يعرف بـ BNCT. وقد اعتمد في هذا البحث التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ لتوليد كثافة نترونية عالية باستخدام حزمة بروتونات طاقتها 15.0MeV صادرة عن المسرع السوري، واختير البيريليوم كهدف لتمييزه بدرجة انصهار مرتفعة مقارنة بالليثيوم، وكذلك لموصلية الحرارية العالية والثبات مقابل البروتونات العالية الطاقة. ولنمذجة هذا التفاعل أخذ قرص دائري قطره 1.0cm من البيريليوم النقي متعدد السماكات مع الأخذ بالحسبان مواصفات السيكلترون مثل:

- تيار الخرج $I=200.0\mu\text{A}$.

- طاقة البروتونات 15.0MeV.

من علاقة التيار الكهربائي يمكن حساب شدة البروتونات $\Phi_p \left(\frac{p}{sec} \right)$ الموافقة لتيار الخرج للمسرّع $200.0\mu A$ [3]:

$$\Phi_p = N_p/t = I/e = 200 \times 10^{-6} / 1.6 \times 10^{-19} \\ = 1.2483 \times 10^{15} [proton / sec] \dots \dots (3)$$

إذ: $I(A)$ - تيار الخرج للمسرّع، N_p - عدد البروتونات الموافق لتيار الخرج المعطى $\Phi_p \left(\frac{proton}{sec} \right)$ - شدة البروتونات الصادرة عن المسرّع الموافقة لتيار الخرج $200.0\mu A$ $t_{(sec)}$ - واحدة الزمن. $e(C)$ - شحنة البروتون.

وتستخدم القيمة السابقة للشدة البروتونية في ملف الدخل للكود MCNPX عند تعريف مصدر الجسيمات.

1- دراسة تغير الكثافة النترونية والفوتونية الناتجة عن التفاعل ${}^9Be(p,n){}^9B$ كتابع لسماكة الهدف المستخدم من البيريليوم باستخدام الكود MCNPX.

وصف التفاعل المدروس ${}^9Be(p,n){}^9B$ من خلال كتابة ملف الدخل لهذا التفاعل باستخدام الكود MCNPX واستخدمت بروتونات طاقتها $E_p=15.0MeV$ الموافقة لطاقة الخرج لمسرّع السيكلترون السوري، وجرت محاكاة المصدر على شكل مصدر قرصي بقطر 1cm (قطر حزمة البروتونات الصادرة عن قناة الخرج للمسرّع) عند سماكات مختلفة. هذا المصدر متوضع في مركز كرة من الهواء ذات نصف قطر 100cm وحُسبت كثافة الجسيمات الواردة إلى سطح هذه الكرة والناتجة عن المصدر السابق. ولحساب الكثافة النترونية و الفوتونية الناتجة عن هذا التفاعل استخدم الأمر أو العداد F_2 ضمن بطاقة الحساب (Tally card) لملف الدخل للبرنامج الذي يعطي كثافة تدفق الجسيمات من خلال سطح معين ويعبّر عنه رياضياً بالعلاقة [4]:

$$F_2 = \frac{1}{A} \int_A dA \int_E dE \int dt \int_{4\pi} d\Omega. \Phi(r_s, t, E, \Omega) \left[\frac{Particle}{cm^2} \right] \dots \dots (4)$$

إذ: $\Phi(r_s, E, \Omega, t)$ - التوزع الزاوي لتدفق الجسيمات كتابع لموضع الجسيم الممثل بالشعاع $r(cm)$ وطاقة الجسيم الوارد $E(MeV)$ ، واتجاه الجسيم Ω (الزاوية المجرّسة steradians)، والزمن $t(shakes=10^{-8} s)$ ، ومساحة السطح الذي يحدث من خلاله تدفق الجسيمات. $A(cm^2)$

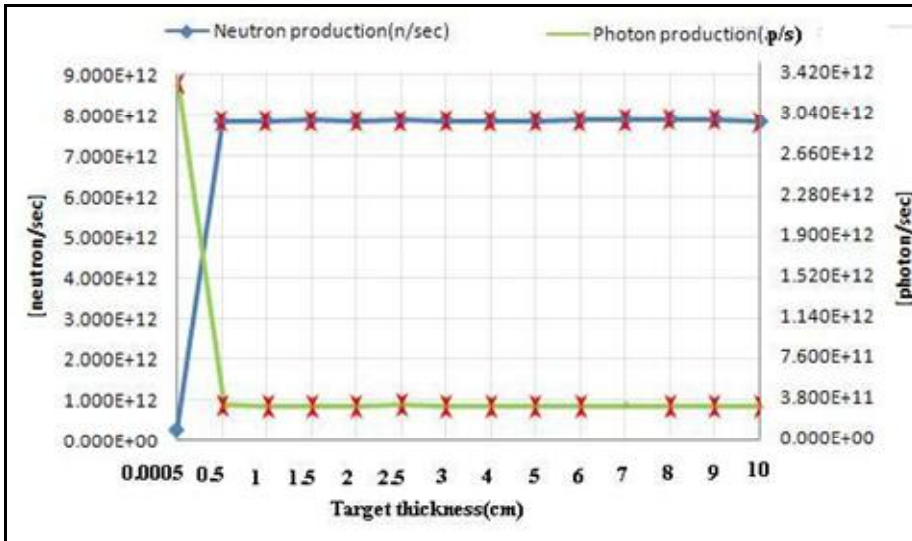
وتجدر الإشارة إلى أنه عند طاقة بروتونات أقل من 5MeV فإن المركبة الفوتونية المرافقة للإصدار النتروني عن هدف البيريليوم تأتي من مصدرين: المصدر الأول نتيجة التفاعل ${}^9\text{Be}(p,\alpha){}^6\text{Li}^*$ فعند عودة الليثيوم إلى الحالة المستقرة تصدر أشعة غاما بطاقة 3.56MeV، أما المصدر الثاني فهو أسر البروتونات ضمن نوى البيريليوم وفق التفاعل ${}^9\text{Be}(p,\gamma){}^{10}\text{B}$ [5].

تعطى القيم المحسوبة للكثافة النترونية والفوتونية الناتجة عن التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ بتابعية تغير سماكة الهدف وباستخدام بروتونات طاقتها $E_p=15.0\text{MeV}$ بالجدول (3).

الجدول (3) القيم المحسوبة للكثافة النترونية و الفوتونية الناتجة عن التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ بتابعية تغير سماكة الهدف من أجل بروتونات طاقتها $E_p = 15.0 \text{ MeV}$.

طاقة البروتونات $E_p=15 \text{ MeV}$					
نتاج الفوتونات/نتاج النترونات (photon/neutron)	Error %	الكثافة الفوتونية (photon/sec)	Error %	الكثافة النترونية (neutron/sec)	سماكة الهدف cm
12.7235	0.48%	3.315×10^{12}	1.67%	2.606×10^{11}	0.0005
0.0390	2.59%	3.071×10^{11}	0.51%	7.864×10^{12}	0.5
0.0390	2.58%	3.066×10^{11}	0.51%	7.869×10^{12}	1.0
0.0389	2.56%	3.064×10^{11}	0.50%	7.884×10^{12}	1.50
0.0388	2.57%	3.060×10^{11}	0.50%	7.881×10^{12}	2.0
0.0390	2.55%	3.076×10^{11}	0.50%	7.887×10^{12}	2.50
0.0389	2.58%	3.065×10^{11}	0.51%	7.877×10^{12}	3.0
0.0389	2.58%	3.063×10^{11}	0.51%	7.878×10^{12}	4.0
0.0388	2.57%	3.058×10^{11}	0.51%	7.879×10^{12}	5.0
0.0387	2.57%	3.056×10^{11}	0.50%	7.889×10^{12}	6.0
0.0387	1.83%	3.059×10^{11}	0.36%	7.897×10^{12}	7.0
0.0388	2.55%	3.063×10^{11}	0.50%	7.903×10^{12}	8.0
0.0388	2.57%	3.063×10^{11}	0.51%	7.900×10^{12}	9.0
0.0390	2.57%	3.07×10^{11}	0.51%	7.852×10^{12}	10.0

يوضح الشكل (3) التمثيل البياني لكثافة النترونات (معدل إنتاج النترونات) والفوتونات (معدل إنتاج الفوتونات) الناتجة عن التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ بتابعية تغير سماكة الهدف من أجل بروتونات طاقتها $E_p = 15.0\text{MeV}$.



الشكل (3) التمثيل البياني لمعدل إنتاج النيوترونات و الفوتونات و مجال الخطأ المطلق المسجل الناتج عن التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ بتابعة تغير سماكة الهدف من أجل بروتونات طاقتها $E_p = 15.0 \text{ MeV}$.

2- دراسة التوزيع الزاوي للنيوترونات الصادرة عن التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ باستخدام حزمة بروتونات طاقتها $E_p = 15.0 \text{ MeV}$ باستخدام الكود MCNPX.

لتعيين التدفق الزاوي للنيوترونات الصادرة عن التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ باستخدام حزمة بروتونات طاقتها $E_p = 15.0 \text{ MeV}$ استخدم العداد النقطي F5 الذي وضع عند زوايا مختلفة تتغير ضمن المجال الزاوي الآتي: $\theta = \text{from } -90^\circ \text{ to } +90^\circ$ حول المصدر كما هو موضح بالشكل 4. ويعبر عن العداد F5 رياضياً بالعلاقة الآتية [4]:

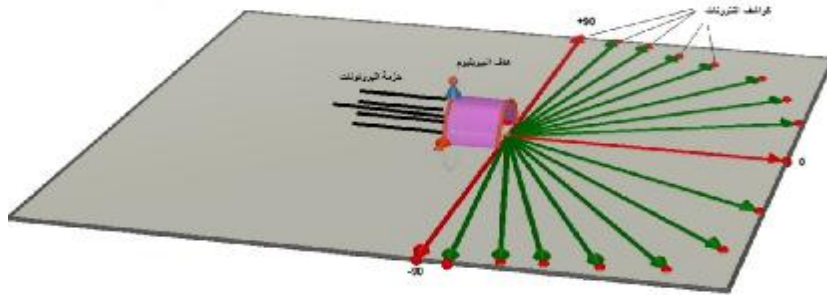
$$\delta\Phi = \frac{W}{2\pi r^2} * e^{-r \cdot \mu(E)} \left[\frac{\text{particle}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right] \dots \dots \dots (5)$$

إذ:

$w(\text{particle/s})$ - عدد الجسيمات أو ثقل المصدر المحسوب وفق العلاقة (3)،

$r(\text{cm})$ - المسافة بين موقع تفاعل الجسيم إلى موضع الكاشف النقطي، وتعرف هذا المسافة بالمسار الحر الوسطي للجسيم،

$\mu(\text{cm}^{-1})$ - معامل الامتصاص الخطي وهو تابع لطاقة الجسيم.



الشكل (4) أماكن توضع العداد F5 عند زوايا مختلفة بالنسبة إلى السطح الأمامي لمصدر النيوترونات الصادرة عن التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ باستخدام حزمة بروتونات طاقتها $E_p = 15.0\text{MeV}$ باستخدام الكود MCNP5C.

يبين الجدول (4) والجدول (5) التوزيع الزاوي لتدفق النيوترونات الصادرة عن هدف البيريليوم نصف قطره 0.50 cm من أجل بروتونات طاقتها $E_p = 15.0\text{MeV}$ كتابع لسماكة.

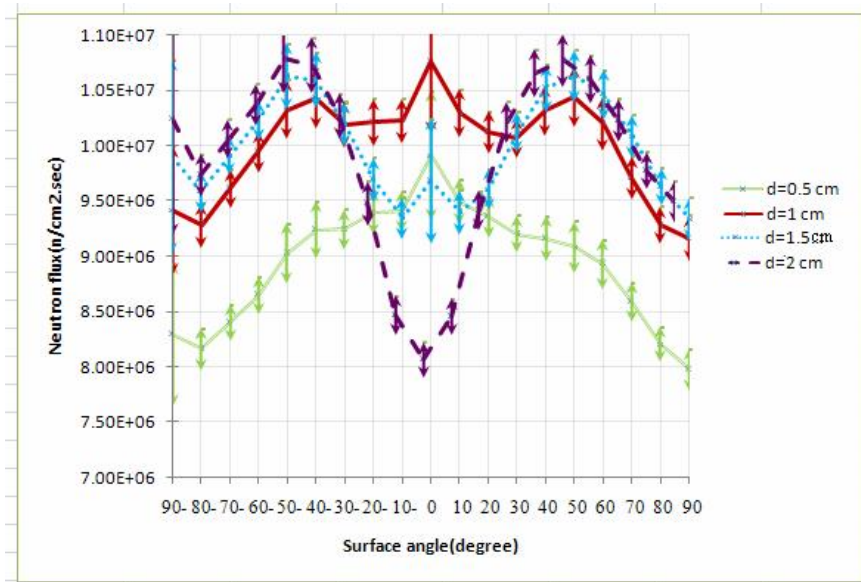
الجدول (4) التوزيع الزاوي لتدفق النيوترونات الصادرة عند المسافة 100.0 cm عن هدف من البيريليوم نصف قطره 0.50 cm من أجل بروتونات طاقتها $E_p = 15.0\text{MeV}$ كتابع لسماكة مادة الهدف.

سماكة الهدف								الزاوية θ°
2.0cm		1.50cm		1.0cm		0.50cm		
error	$\phi(\theta)$ ($n/cm^2\text{ sec}$)	error	$\phi(\theta)$ ($n/cm^2\text{ sec}$)	error	$\phi(\theta)$ ($n/cm^2\text{ sec}$)	error	$\phi(\theta)$ ($n/cm^2\text{ sec}$)	
2.05%	9.491×10^6	2.08%	9.348×10^6	2.24%	9.160×10^6	2.40%	7.977×10^6	90
1.76%	9.775×10^6	1.76%	9.639×10^6	1.83%	9.276×10^6	1.95%	8.208×10^6	80
1.92%	1.023×10^7	1.92%	1.009×10^7	1.99%	9.702×10^6	2.12%	8.586×10^6	70
2.09%	1.060×10^7	2.13%	1.047×10^7	2.35%	1.019×10^7	2.51%	8.931×10^6	60
2.20%	1.077×10^7	2.23%	1.063×10^7	2.56%	1.043×10^7	2.56%	9.088×10^6	50
2.02%	1.065×10^7	2.04%	1.052×10^7	2.18%	1.031×10^7	2.26%	9.162×10^6	40
1.80%	1.021×10^7	1.80%	1.013×10^7	1.82%	1.006×10^7	1.86%	9.203×10^6	30
1.91%	9.411×10^6	1.88%	9.617×10^6	1.90%	1.011×10^7	1.93%	9.358×10^6	20
1.98%	8.452×10^6	2.16%	9.406×10^6	2.12%	1.028×10^7	2.19%	9.494×10^6	10
1.99%	8.063×10^6	5.82%	9.688×10^6	5.95%	1.075×10^7	5.92%	9.915×10^6	0
2.08%	8.467×10^6	1.99%	9.354×10^6	1.95%	1.022×10^7	1.98%	9.406×10^6	-10
2.14%	9.475×10^6	2.10%	9.698×10^6	2.09%	1.020×10^7	2.12%	9.392×10^6	-20
1.97%	1.027×10^7	1.96%	1.020×10^7	2.01%	1.018×10^7	1.98%	9.245×10^6	-30
2.35%	1.073×10^7	2.39%	1.060×10^7	2.59%	1.042×10^7	2.76%	9.243×10^6	-40
2.93%	1.079×10^7	2.83%	1.063×10^7	2.60%	1.032×10^7	2.99%	9.028×10^6	-50
1.78%	1.037×10^7	1.78%	1.023×10^7	1.84%	9.937×10^6	1.96%	8.652×10^6	-60
1.76%	1.006×10^7	1.76%	9.921×10^6	1.82%	9.605×10^6	1.95%	8.405×10^6	-70
1.93%	9.734×10^6	1.96%	9.592×10^6	2.17%	9.273×10^6	2.30%	8.164×10^6	-80
10.23%	1.024×10^7	8.82%	9.910×10^6	6.13%	9.415×10^6	7.78%	8.293×10^6	-90

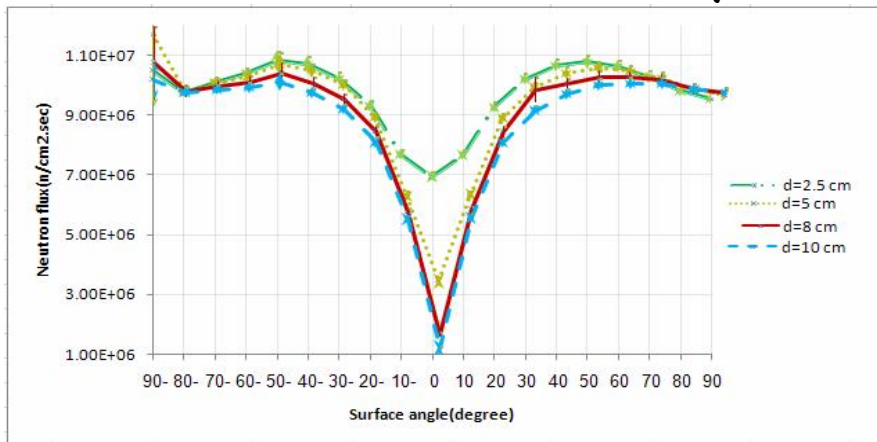
الجدول (5) التوزيع الزاوي لتدفق النيوترونات الصادرة عند المسافة 100.0cm عن هدف من البيريليوم نصف قطره 0.50cm من أجل بروتونات طاقتها $E_p=15.0\text{MeV}$ كتابع لسماكة مادة الهدف.

سماكة الهدف								الزاوية θ°
10.0cm		8.0cm		5.0cm		2.50cm		
error	$\varphi(\theta)$ ($n/cm^2 \text{ sec}$)	error	$\varphi(\theta)$ ($n/cm^2 \text{ sec}$)	error	$\varphi(\theta)$ ($n/cm^2 \text{ sec}$)	error	$\varphi(\theta)$ ($n/cm^2 \text{ sec}$)	
1.82%	9.7532×10^6	1.84%	9.760×10^6	1.94%	9.6961×10^6	2.01%	9.560×10^6	90
1.77%	9.8680×10^6	1.73%	9.910×10^6	1.75%	9.9131×10^6	1.74%	9.837×10^6	80
2.00%	1.0066×10^7	1.97%	1.019×10^7	1.97%	1.0293×10^7	1.91%	1.028×10^7	70
1.89%	1.0066×10^7	1.89%	1.028×10^7	1.97%	1.0524×10^7	2.04%	1.063×10^7	60
2.00%	1.0010×10^7	2.01%	1.029×10^7	2.10%	1.0641×10^7	2.16%	1.080×10^7	50
1.85%	9.7052×10^6	1.87%	1.005×10^7	1.94%	1.0467×10^7	1.98%	1.067×10^7	40
1.81%	9.1638×10^6	4.08%	9.862×10^6	1.81%	9.9843×10^6	1.79%	1.021×10^7	30
1.93%	8.0851×10^6	1.95%	8.460×10^6	1.93%	8.9389×10^6	1.91%	9.272×10^6	20
2.18%	5.5773×10^6	2.16%	5.855×10^6	2.18%	6.3613×10^6	2.02%	7.680×10^6	10
4.24%	1.2107×10^6	3.51%	1.705×10^6	2.70%	3.4539×10^6	2.07%	6.957×10^6	0
2.26%	5.5210×10^6	2.25%	5.798×10^6	2.30%	6.3183×10^6	2.13%	7.687×10^6	-10
2.08%	8.0894×10^6	2.08%	8.446×10^6	2.14%	8.9701×10^6	2.13%	9.312×10^6	-20
1.95%	9.1982×10^6	1.94%	9.553×10^6	1.98%	1.0047×10^7	1.94%	1.025×10^7	-30
2.01%	9.7485×10^6	2.04%	1.009×10^7	2.19%	1.0543×10^7	2.29%	1.073×10^7	-40
3.00%	1.0103×10^7	3.30%	1.041×10^7	3.48%	1.0775×10^7	3.00%	1.083×10^7	-50
1.81%	9.9213×10^6	1.78%	1.012×10^7	1.78%	1.0348×10^7	1.76%	1.040×10^7	-60
1.74%	9.8431×10^6	1.73%	9.980×10^6	1.75%	1.0111×10^7	1.74%	1.009×10^7	-70
1.76%	9.7546×10^6	1.76%	9.823×10^6	1.82%	9.8594×10^6	1.88%	9.774×10^6	-80
6.38%	1.0182×10^7	11.41%	1.075×10^7	19.75%	1.1770×10^7	11.79%	1.049×10^7	-90

ويوضح الشكلان (5) و(6) قيم التوزيع الزاوي ضمن المجال من -90° إلى $+90^\circ$ لتدفق النيوترونات الصادرة عند مسافة 100.0cm عن هدف من البيريليوم نصف قطره 0.50cm مختلف السماكة من أجل بروتونات طاقتها $E_p=15.0\text{MeV}$.

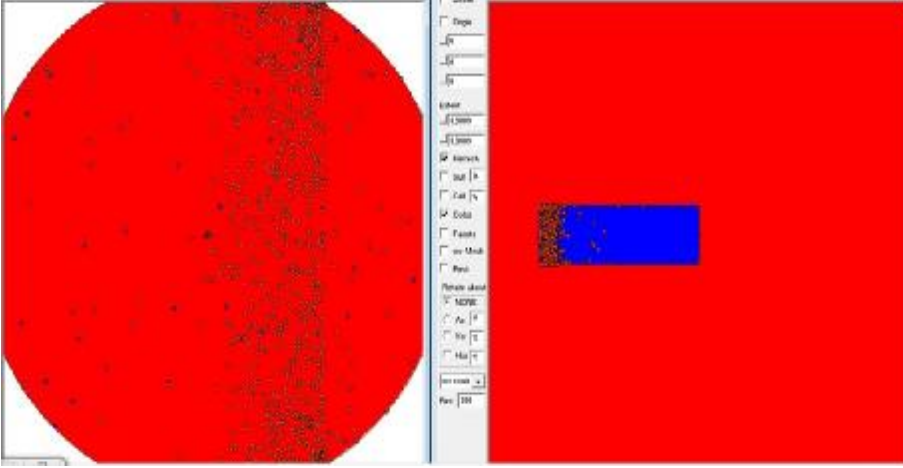


الشكل (5) التوزيع الزاوي ومجال الخطأ المطلق المسجل لتدفق النترونات الصادرة على المسافة 100.0cm عن هدف من البيريليوم نصف قطره 0.50cm من أجل بروتونات طاقتها $E_p=15.0\text{MeV}$ وسماكات 0.5 cm، 1.0 cm، 1.50 cm و 2.0cm من مادة الهدف.



الشكل (6) التوزيع الزاوي ومجال الخطأ المطلق المسجل لتدفق النترونات الصادرة على المسافة 100.0cm عن هدف من البيريليوم نصف قطره 0.50 cm من أجل بروتونات طاقتها $E_p=15.0\text{MeV}$ وسماكات 2.50cm، 5.0cm، 8.0cm و 10.0cm من مادة الهدف.

وبيّن الشكل (7) توزيع النيوترونات الصادرة (اللون البني) عن هدف من البيريليوم (اللون الأزرق) سماكته 3.0cm باستخدام رسام الكود MCNP5C وبروتونات طاقتها $E_p = 15.0\text{MeV}$.



الشكل (7) توزيع النيوترونات الصادرة عن هدف البيريليوم سماكته 3.0 cm باستخدام رسام الكود MCNP5C وبروتونات طاقتها $E_p=15.0\text{MeV}$.

إذ بيّن الجزء الأيمن من الشكل 7 توزيع النيوترونات ضمن هدف مادة البيريليوم (اللون الأزرق) الذي يقع في مركز كرة من الهواء (اللون الأحمر) نصف قطرها 100.0cm، في حين يوضح الجزء الأيسر توزيع النيوترونات (اللون البني) في الهواء حول الهدف، إذ يلاحظ انخفاض واضح لكثافة النيوترونات باتجاه الأمام (أي وفق الزاوية 0) عند سماكة هدف 3.0 cm.

مقارنة طيف النيوترونات الناتج عن التفاعلين ${}^9\text{Be}(p,n)$ و ${}^{207}\text{Pb}(p,n)$ والمحسوب بالكود MCNPX بقيم تجريبية مرجعية.

للتحقق من صحة النتائج التي جرى الحصول عليها فيما يخص حساب الكثافة النيوترونية والفوتونية الناتجة عن التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n)$ باستخدام حزمة بروتونات طاقتها $E_p=15.0\text{MeV}$ ، قورن الطيف النيوتروني الناتج عن التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n)$ بقيم تجريبية مرجعية، ولزيادة التأكد من صحة النتائج حُسب طيف النيوترونات الناتجة عن التفاعل ${}^{207}\text{Pb}(p,n)$ باستخدام الكود MCNPX وقورنت النتائج الحسابية مع قيم تجريبية للتفاعل نفسه.

1- حساب طيف النترونات الناتج عن التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ باستخدام الكود

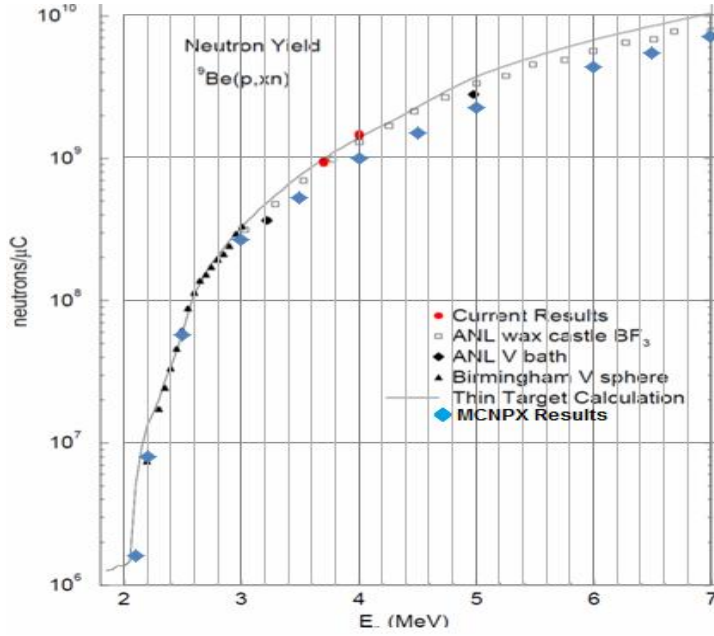
.MCNPX

أخذ هدف من البيريليوم النقي مساحة مقطعه 2.50 cm^2 وسماكته 0.50 mm (كما هو موصف في المرجع [5]) متوضع ضمن مركز كرة من الهواء بحيث تسقط عليه حزمة من البروتونات تقع طاقتها في المجال $E_p = 2.0-7.0 \text{ MeV}$ ، ومن ثم حسب الناتج النتروني الكلي على سطح الكرة لكل بروتون باستخدام الكود MCNPX، وفي هذه الحالة لم نأخذ بالحسبان شدة البروتونات (ثقل المصدر) المحسوبة وفق العلاقة (3) عند تعريف مصدر البروتونات ضمن ملف الدخول للكود MCNPX، أي إن خرج البرنامج تلقائياً يكون منسوباً إلى كل بروتون في الثانية الواحدة ($\text{particle}/(\text{proton}/\text{sec}) = 1/1.602 \times 10^{-19}$) (6) قيم الناتج النتروني الكلي كتابع لطاقة حزمة البروتونات. ويبين الشكل (8) الناتج النتروني الكلي المحسوب مقارنة بنتائج البحوث الأخرى المأخوذة من المرجع [5].

الجدول (6) القيم الحسابية للناتج النتروني الكلي الناتج عن هدف من البيريليوم سماكته 0.5 mm وقطره 1.78 cm كتابع لطاقة البروتونات الواردة عليه باستخدام الكود

.MCNPX

Error	الناتج النتروني [neutron/ μC]	الناتج النتروني [neutron/proton]	طاقة البروتونات [MeV]
0.00	0.00	0.00	2.0
44.72%	$1.61 \times 10^{+6}$	2.58×10^{-7}	2.10
20.00%	$8.06 \times 10^{+6}$	1.29×10^{-6}	2.20
8.36%	$5.71 \times 10^{+7}$	9.13×10^{-6}	2.50
5.04%	$2.65 \times 10^{+8}$	4.23×10^{-5}	3.0
3.84%	$5.19 \times 10^{+8}$	8.30×10^{-5}	3.50
3.06%	$9.82 \times 10^{+8}$	1.57×10^{-4}	4.0
7.57%	$1.49 \times 10^{+9}$	2.38×10^{-4}	4.50
6.33%	$2.25 \times 10^{+9}$	3.60×10^{-4}	5.0
4.81%	$4.34 \times 10^{+9}$	6.95×10^{-4}	6.0
4.35%	$5.43 \times 10^{+9}$	8.69×10^{-4}	6.50
3.91%	$7.11 \times 10^{+9}$	1.14×10^{-3}	7.0



الشكل (8) مقارنة بين الناتج النتروني الكلي الناتج عن هدف من البيريليوم المحسوب باستخدام الكود MCNPX بنتائج بعض الدراسات التجريبية والحسابية المأخوذة من المرجع [5] لمواصفات الهدف نفسه.

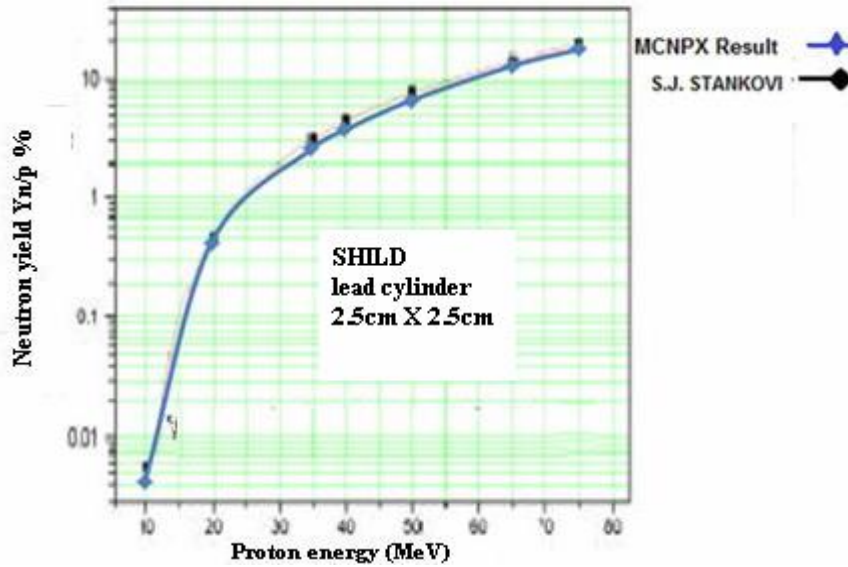
2- حساب طيف النترونات الناتج عن التفاعل $^{207}\text{Pb}(p,n)$ باستخدام الكود MCNPX.

وللتحقق أيضاً من صحة حساب الكثافة النترونية المحسوبة في الجدول (3) والتوزيع الزاوي للنترونات في الجدول (5) والجدول (6) استخدم الكود MCNPX لحساب الناتج النتروني الكلي الناتج عن هدف من الرصاص سماكته 2.50cm وقطره 2.50cm؛ وذلك باستخدام حزمة بروتونات طاقتها ترواح بين 10.0 – 75.0MeV E_p وجرت المقارنة بقيم مرجعية منشورة وفق البحث [6].

تعطى القيم المحسوبة للناتج النتروني الكلي الناتج عن التفاعل $^{207}\text{Pb}(p,n)$ بالجدول (7) وجرت مقارنة هذه القيم بقيم تجريبية مأخوذة من المرجع [6] كما هو مبين بالشكل (9).

الجدول (7) الناتج النتروني الكلي الناتج عن هدف من الرصاص سماكته 2.50 cm وقطره 2.50 cm كتابع لطاقة البروتونات.

Error%	الناتج النتروني Y [n/p] %	الناتج النتروني Y [n/p]	طاقة البروتونات Ep [MeV]
16.01%	0.0039%	3.90×10^{-5}	10.0
2.12%	0.4237%	4.24×10^{-3}	20.0
1.02%	2.6537%	2.65×10^{-2}	35.0
0.88%	3.8295%	3.83×10^{-2}	40.0
0.90%	6.8789%	6.88×10^{-2}	50.0
0.54%	13.4108%	1.34×10^{-1}	65.0
0.48%	18.5905%	1.86×10^{-1}	75.0



الشكل (9) مقارنة بين الناتج النتروني الكلي الناتج عن هدف من الرصاص المحسوب باستخدام الكود MCNPX بالنتائج التجريبية المأخوذة من المرجع [6] لمواصفات الهدف نفسه.

النتائج والمناقشة

نلاحظ من خلال المقارنة بين القيم الحسابية (مشار إليها باللون الأزرق على الشكل (8) و(9)) والقيم التجريبية بالنسبة إلى الناتج النتروني الكلي الناتج عن التفاعلين $^{207}\text{Pb}(p,n)$ و $^9\text{Be}(p,n)^8\text{B}$ ، بأن هنالك توافقاً جيداً بين القيم الحسابية والتجريبية وخصوصاً فيما يخص التفاعل $^{207}\text{Pb}(p,n)$ إذ الفرق لا يتجاوز 2.0%، وهذا ناتج عن

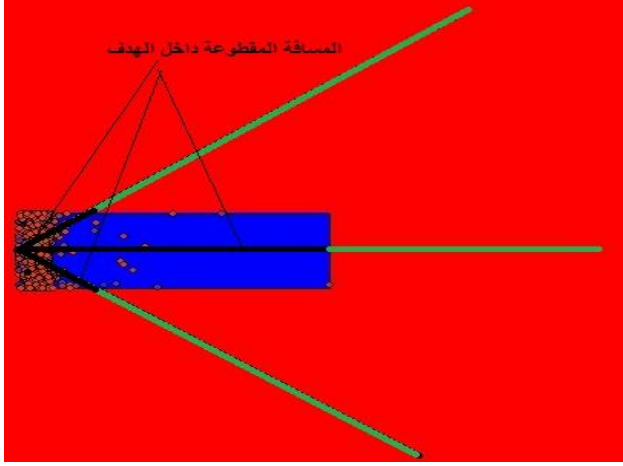
توافر المعطيات جميعها فيما يخص المقاطع العرضية العائدة للتفاعل $^{207}\text{Pb}(p,n)$ ، بالمجالات الطاقية كلها لحزمة البروتونات المستخدمة في مكتبة الكود MCNPX. أمّا فيما يخص التفاعل $^9\text{Be}(p,n)^9\text{B}$ فهناك نقص في معطيات مكتبة المقاطع العرضية في مكتبة الكود MCNPX، خصوصاً عند الطاقات العالية إذ يلاحظ أن الفرق يصل إلى 10.0% بين القيم الحسابية والتجريبية. في هذه الحالة يستخدم الكود الطرق الملائمة (Models) للحصول على النتائج، وفيها يعتمد البرنامج في الحساب نماذج فيزيائية منها (CEM Model) الذي يستخدم في حالة تفاعل الجسيمات العالية الطاقة مع أهداف رقيقة فضلاً عن (ISABEL Model)، (Bertini Model) (Fermi-Breakup Model)، أما في حالة الطاقات المنخفضة فيلاحظ أن هنالك توافقاً جيداً بين القيم الحسابية والتجريبية إذ لا يتجاوز الفرق 1.0%؛ وهذا عائد إلى توافر المعطيات بالنسبة إلى المقاطع العرضية في مكتبة الكود MCNPX في حالة الطاقات المنخفضة أي ما دون 3.0MeV.

يمكن استخدام هذا التوافق بين القيم التجريبية والحسابية كقيم مرجعية لإثبات صحة النتائج التي تم الحصول عليها في الجداول (3) و(4) و(5) بالنسبة إلى حساب الكثافة الفوتونية والنترونية الناتجة عن التفاعل $^9\text{Be}(p,n)^9\text{B}$ والتوزيع الزاوي للنترونات الناتجة عن هذا التفاعل.

من الجدول (3) والشكل (3) نلاحظ أن القيم المحسوبة للكثافة النترونية الناتجة عن التفاعل $^9\text{Be}(p,n)^9\text{B}$ بتأبعية تغيّر سماكة الهدف من أجل بروتونات طاقتها $E_p=15.0\text{MeV}$ تزداد بشكل طردي مع زيادة سماكة الهدف من 0.00050cm إلى 0.50cm، ومن ثم تصل إلى حد الإشباع ضمن المجال 0.50cm إلى 10.0cm بالنسبة إلى سماكة الهدف، كما يلاحظ أيضاً من الجدول (3) والشكل (3) أن القيم الحسابية بالنسبة إلى الكثافة الفوتونية تتناقص بشكل كبير مع زيادة سماكة الهدف من 0.00050cm إلى 0.50cm، ومن ثم تبقى شبه ثابتة ضمن مجال الخطأ عندما تزداد السماكة من 0.50cm إلى 10.0cm، ويلاحظ أن معدل إنتاج النترونات يفوق عشر مرات وسطياً معدل إنتاج الفوتونات بالنسبة إلى السماكات الأكبر من 0.50cm، يمكن تعليل ذلك أنه عند سماكة منخفضة لمادة الهدف فإن نسبة قليلة فقط من البروتونات ذات الطاقة 15MeV سوف يتم إيقافها ضمن الهدف ومع زيادة سماكة الهدف تزداد نسبة البروتونات التي يتم إيقافها من قبل السماكة المحددة لمادة الهدف؛ مما يؤدي إلى زيادة في الناتج النتروني الكلي يفوق الزيادة في ناتج أشعة غاما التي يتعرض جزء منها للامتصاص ضمن مادة الهدف.

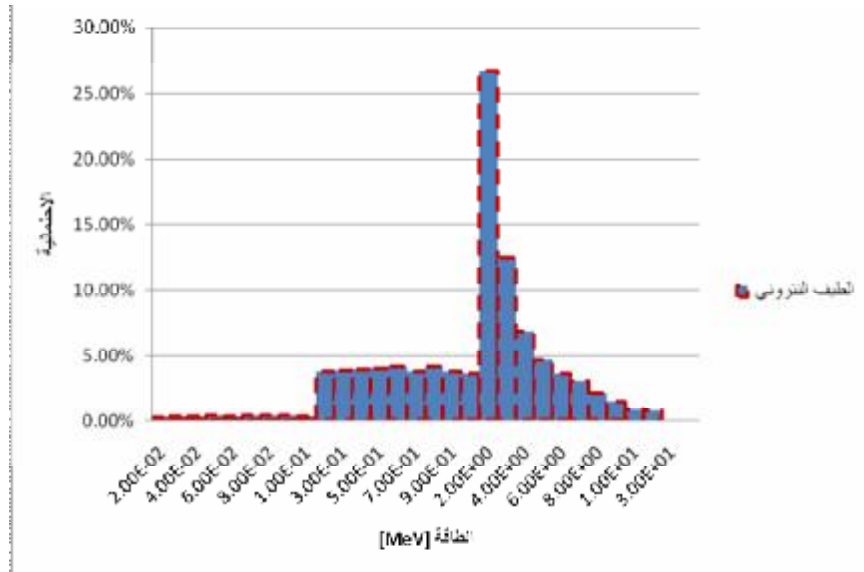
يبلغ تدفق النترونات الصادر عن التفاعل $^9\text{Be}(p,n)^9\text{B}$ قيمته العظمى عند الزاوية 0° من أجل هدف سماكته 1.0cm كما هو مبين بالشكل (5) حيث يكون المسار الحر الوسطي لتبعثر النترونات في البيريليوم أكبر من سماكة الهدف. وأيضاً نلاحظ أن القيمة العظمى

لتدفق النترونات تنزاح باتجاه اليمين واليسار لتصبح عند الزاويتين 50° و $50^\circ+$ بالنسبة إلى هدف سماكته تساوي أو تزيد عن 2.0cm كما هو مبين بالجدولين (4) و(5)، والشكل (6)، فمع زيادة سماكة الهدف تزداد المسافة التي تقطعها الجسيمات باتجاه الأمام داخل المادة مقارنة بالمسافة التي تقطعها داخل المادة بالاتجاه الجانبي كما بالشكل (10)، هذا فضلاً عن أن زيادة مسار الجسيمات داخل البيريليوم تؤدي إلى ازدياد احتمال فقدان الجسيمات بنتيجة عمليتي الامتصاص والتبعثر على نوى البيريليوم.

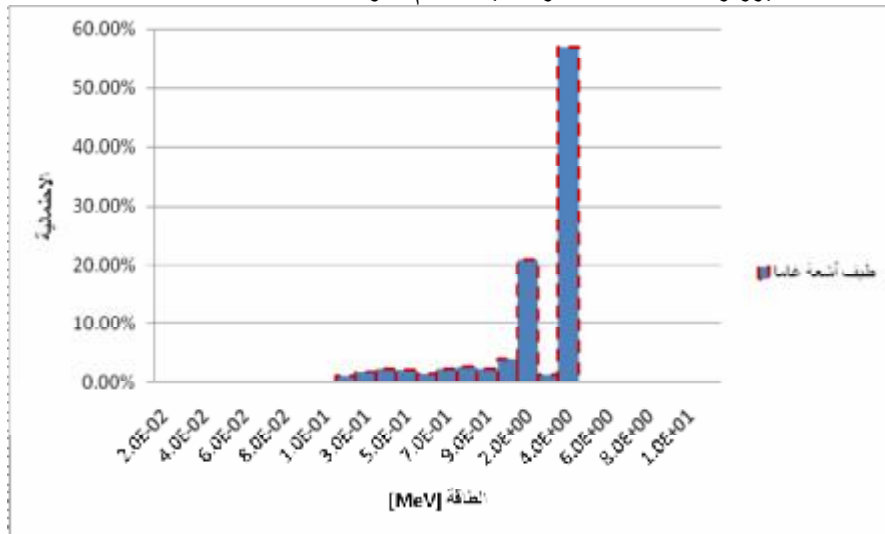


الشكل (10) مسار النترونات داخل هدف البيريليوم باستخدام الكود MCNP5C

فيما يخص العلاج الإشعاعي من المهم أن تكون كثافة الجسيمات الصادرة باتجاه منطقة المعالجة أكبر من المنطقة المحيطة للتقليل من تعرض الأنسجة السليمة المحيطة بمنطقة المعالجة من جهة فضلاً عن خفض كمية التدريع، من جهة أخرى لذا يفضل استخدام سماكة لمادة الهدف تحقق هذا الشرط مع مراعاة أن تكون قيمة الناتج النتروني كافية لتحقيق شروط العلاج المطلوبة. وعليه يمكننا اعتماد سماكة لمادة الهدف ضمن مجال (1-0.5)cm لتصميم حزمة نترونية حرارية، أو فوق حرارية وسريعة من أجل التطبيقات العلمية والبحوث. بدراسة الطيف الطاقي للنترونات عند السماكة 1cm لهدف من البيريليوم وذلك باستخدام الكود MCNPX نلاحظ أن الطاقة العظمى للنترونات الصادرة عن التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ تصل إلى نحو 30.0MeV فضلاً عن أن الطاقة الأكثر احتمالية للنترونات الصادرة تقع ضمن المجال (2.0-3.0)MeV؛ وذلك باحتمال يصل إلى 27% كما هو مبين بالشكل (11). أما طيف الفوتونات الصادرة عن التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ فيقع معظمها في المجال الطاقي (4.0 - 5.0) MeV؛ وذلك باحتمال يتجاوز 57%، كما هو مبين بالشكل (12).



الشكل (11) الطيف الطاقي للنيوترونات الصادرة عن هدف من البيريليوم بسماكة 1cm وطاقة بروتونات 15.0MeV وذلك باستخدام الكود MCNPX.



الشكل (12) الطيف الطاقي للفوتونات الصادرة عن هدف من البيريليوم بسماكة 1cm وطاقة بروتونات 15.0MeV وذلك باستخدام الكود MCNPX.

REFERENCES

1. <http://www.springeronline.com/series/5267>. Access 1/8/2012 At 11.36 AM.
2. <http://homepage.univie.ac.at/manfred.drosg/drosg99.pdf>. Access 1/8/2012 at 10.05 AM.
3. Thomas E, Blue C, Jacquelyn C. Yanch. (2003). Accelerator-based epithermal neutron sources for boron neutron capture therapy of brain tumors. *Journal of Neuro - Oncology* 62: 19–31.
4. Briesmeister, J. F., A General Monte Carlo N-Partical transport code Version 5C and MCNPX version 2.5B. 1997. LA-7396-M,
5. <http://www.phv.ohiou.edu/~massey/massey11.pdf> Access 1/8/2012 At 11.05 AM.
6. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/srn-shi.pdf> .Access 1/7/2012