

تصميم حزمة نترونية حرارية عن طريق التفاعل ${}^9\text{Be}(\text{p},\text{n}){}^9\text{B}$ لاستعمالها في التصوير النتروني المسرع باستعمال الكوادات MCNP5-BETA و MCNPX

سلمان حسن⁽¹⁾ وماجدة نحيلي⁽²⁾ و إسماعيل شعبان⁽³⁾

تاريخ الإيداع 2013/02/18

قبل للنشر في 2013/06/03

الملخص

استخدم الكوдан MCNP5-BETA و MCNPX لنمذجة التفاعل ${}^9\text{Be}(\text{p},\text{n}){}^9\text{B}$ باستعمال حزمة بروتونات ناتجة عن مسرع السينكلترون السوري، وحسب طيف النترونات الصادر عن هذا التفاعل وأجريت الحسابات النترونية اللازمة لتصميم حزمة نترونية حرارية لاستخدامها في التصوير بالنترونات الحرارية في المسرع السوري. استخدمت بروتونات مسرعة لطاقة 15.0 MeV بتيار شدته $200.0 \mu\text{A}$ وهدف من البيريليوم النقى سماكته 0.5cm وقطر 1cm لإنتاج تدفق نتروني من مرتبة $7.864 \times 10^{12} \text{ neutron/sec}$ بلغ قيمة تدفق النترونات الحرارية عند خرج المجمع الرئيسي للنترونات القيمة: $1.09 \times 10^5 \text{ neutron/cm}^2 \cdot \text{sec}$. وذلك من أجل النسبة $\Phi_{\text{thermal}}/\Phi_{\text{gamma dose}} = 110$, إذ $L/D = L/D$ طول المجمع الرئيسي للنترونات و D قطر فتحة دخول النترونات إلى المجمع الرئيسي للنترونات. حسب فضلاً عن ذلك قيمة نسبة النترونات الحرارية كانت 90.0% , ومحتوى أشعة غاما في الطيف النتروني عند خرج المجمع الرئيسي للنترونات وكانت هذه القيمة $\Phi_{\text{thermal}}/\Phi_{\text{gamma dose}} = 1.60 \times 10^8 \text{ neutron/mRem}$ (إذ: Φ_{thermal} : تدفق النترونات الحرارية و Rem : قيمة جرعة أشعة غاما عند خرج المجمع الرئيسي للنترونات على الترتيب). لم تُستخدم آلية مرشحات لتخفيف طاقة النترونات السريعة ولا متصاص أشعة غاما في التصميم خلافاً للعديد من التصاميم المعتمدة، وهذا يخفض الكلفة الاقتصادية للعمل، و يجعل إمكانية تطبيقه في المسرع ممكناً.

الكلمات المفتاحية: المسرع السوري، التصوير بالنترونات الحرارية، الكود MCNPX و MCNP5-BETA

⁽¹⁾ طالب ماجستير، ⁽²⁾ أستاذ مشرف، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سورية.

⁽³⁾ أستاذ مشرف مشارك، قسم الهندسة النووية، هيئة الطاقة الذرية السورية، سورية.

Thermal neutron beam design based on ${}^9\text{Be}(\text{p},\text{n}){}^9\text{B}$ reaction for neutron radiography using MCNPX and MCNP5-BETA codes

S. Hasan⁽¹⁾, M. Nahili⁽²⁾ and E. Shaban⁽³⁾

Received 18/02/2013

Accepted 03/06/2013

ABSTRACT

The MCNPX and MCNP5-BETA codes were used to simulate the reaction ${}^9\text{Be}(\text{p},\text{n}){}^9\text{B}$ in the Syrian cyclotron, to calculate the neutron spectrum emission from this reaction and for neutronic calculations to design of the thermal neutron beam for thermal neutron radiography.

Protons with 15.0 MeV, current 200.0 μA and Be target (0.50 cm thickness and 1.0 cm diameter) were used to produce the neutron intensity from the order of 7.864×10^{12} n/s. The calculated value of the thermal neutron flux at the main collimator exit of neutrons is $1.09 \times 10^5 \text{ n/cm}^2\cdot\text{s}$ for $L/D = 110.0$ (where: L is the length of the neutrons collimator and D is the diameter of the neutronic aperture). In addition, the calculated values of the content of the neutronic beam from thermal neutron flux and the ratio of the thermal neutron flux to gamma dose at the beam exit are 90.0 % and $\Phi_{\text{thermal}}/\text{gamma dose} = 1.60 \times 10^8$ neutron/mRem, respectively. In this design the neutronic and gamma filters were not used, which reduces the economic cost to build this beam.

Key words: Syrian Cyclotron, Thermal Neutron Radiography, MCNPX and MCNP5BETA codes.

⁽¹⁾Master Student, ⁽²⁾ Supervisor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria.
⁽³⁾ Associated Supervisor, AECS-Nuclear Engineering Department, Syria.

مقدمة

تعد تقانة التصوير بالنترอนات أداة اختبارية لا إلتلافية ومكملة للتصوير بأشعة X وغاما، ويستخدم هذا النوع من التصوير النترونات التي تتغلغل داخل المادة بشكل أعمق من الجسيمات المشحونة والفوتونات. تتوهن النترونات ضمن مادة العينة وتسجل على شكل صورة خيال ببعدين. يحوي هذا الخيال على معلومات عن البنية الداخلية للجسم المدروس. يعد التصوير بالنترونات أداة مهمة لدراسة المواد المشعة، وتعُد الميزة الأكثر أهمية للتصوير بالنترونات مقدرتها على كشف العناصر الخفيفة مثل: H, O, N, B المسبيبة للتأكل [1-5].

تؤمن المسرعات من خلال تفاعلات معينة من النوع $X(p,n)y$ تدفقات نترونية عالية التي تستخدم لبناء الحزم النترونية المختلفة الاستخدام (مثل: تصوير بالنترونات الحرارية، ومعالجة الأمراض الدماغية السرطانية باستخدام حزمة نترونية فوق حرارية،.....الخ) باستخدام مرشحات نترونية معينة. يتَّألف الطيف الطاقي للنترونات، الصادرة عن التفاعلات $X(p,n)y$ من ثلاثة مجموعات طاقية أي: حرارية، وفوق الحرارية والسريعة. ويستخدم التصوير بالنترونات الحرارية بشكل واسع كأداة جيدة للاختبار في الصناعة، لأن النترونات الحرارية تعطي تبايناً جيداً لعدد كبيرٍ من العناصر وأكثر سهولة وإباحة لمعظم المنابع النترونية [1,2].

استخدم في هذا البحث الكودان MCNPX و MCNP5-BETA لحساب طيف النترونات الصادر عن التفاعل $B(p,n)^9Be$ ، ولأمثلة الأبعاد الهندسية لقناة نترونية حرارية في المسرع السوري لاستخدامها في التصوير بالنترونات الحرارية باستخدام هذا التفاعل، ولتحديد وسطاء هذه الحزمة مثل: تدفق النترونات الحرارية وجرعة أشعة غاما عند خرج الحزمة فضلاً عن محتوى الحزمة من النترونات الحرارية.

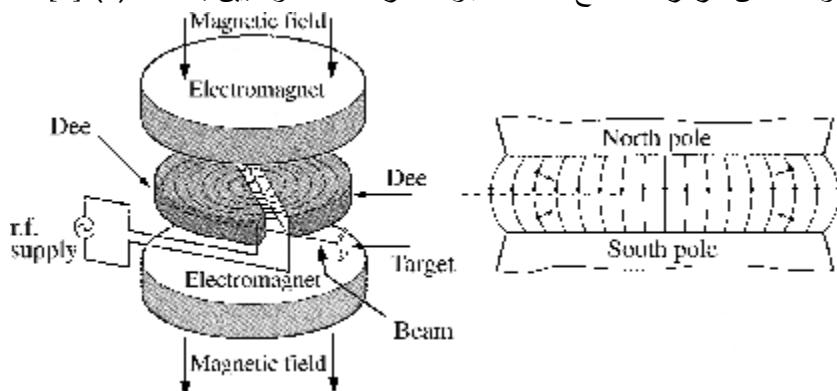
أهمية السيكلotron ومواصفاته

يستخدم المسرع لزيادة الطاقة الحركية للجسيمات المشحونة كهربائياً مثل: الإلكترونات، والبروتونات، والديترونات، وجسيمات ألفا ونووي العناصر الخفيفة والتقليلية. وتعُد المسرعات أداة مهمة لأغراض البحث العلمي، ولها استخدامات كثيرة مثل [6]:

1. إنتاج نظائر مشعة قصيرة العمر تستخدم للتشخيص الطبي وللعلاج.
2. توليد أشعة X و البيونات المستخدمة في العلاج الإشعاعي.

يتَّألف السيكلotron من صفيحتين على شكل حرف D يطبق عليهما جهد متزاوب بواسطة مزود للجهد عالي التردد. وتوضع الصفيحتان ضمن حقل مغناطيسي منتظم B

بحيث يكون اتجاه الحقل عمودياً على مسار الجسيمات. ويوضع مصدر الجسيمات المشحونة ضمن مركز الصفائح داخل الفجوة المفرغة كما هو مبين بالشكل (1) [6].



الشكل (1) البنية الأساسية لمسرع السينكلترون

وبالنتيجة يضبط كلُّ من شدة الحقل المغناطيسي B وتواتر الكمون المتداوب F بحيث يجعل الأيون متافقاً في الطور فإنه في كل لحظة يعبر فيها الأيون الفجوة بين اللبوسين فإنه سيكتسب طاقة إضافية وفي الوقت نفسه يزداد نصف قطره ويكون مساره على شكل مسار حلزوني مستوٍ. يصل الأيون أخيراً محيط المسري حيث يخرج من هناك بواسطة صفيحة حارفة مشحونة بكمون سالب مرتفع. فإذا كان R هو نصف قطر المسري D فإن الطاقة الحرارية للأيون عند خروجه من السينكلترون تعطى بالعلاقة الآتية [6]:

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

إذ:

m - كتلة البروتون (الأيون) وتقدر (Kg).

R - نصف قطر المسري وتقدر (m).

F - تواتر الكمون المتداوب ويقدر (Hz).

المواصفات العامة للسينكلترون السوري

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



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

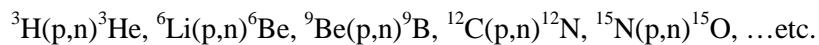
الجدول (1) المواصفات العامة للمسرع السيكلotron السوري.

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

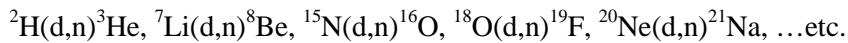
التفاعلات المعتمدة في المسرعات لإنتاج النترونات [7]

يعتمد مبدأ إنتاج النترونات في المسرعات على تسريع نوى مشحونة خفيفة أو ثقيلة و من ثم صدمها بهدف مناسب للحصول على كثافة نترونية محددة وهناك كثير من التفاعلات المستخدمة لهذا الغرض ذكر منها:

1. التفاعلات (p,n):



2. التفاعلات (d,n):



[8] MCNPX الكود باستخدام $B(p,n)^9Be$ التفاعل نمذجة

استخدم في هذا البحث التفاعل $B(p,n)^9Be$ من أجل:
 1. دراسة تغير الكثافة النترونية الصادرة عنه كتابع لسماكـة الهدف *Be* لاختيار أفضل سماكة و الموافقة لأعلى كثافة نترونية. و اختيار البيريليوم كهدف لتميزه بدرجة انصهار مرتفعة، و موصلـيه حراريـة عالـية والثبات الميكانيـكي من أجل البروتونات العالية الطاقة .[9].

2. لحساب طيف النترونـات الصادرة عن التفاعل $B(p,n)^9Be$ باستخدام حزمة بروتونـات طاقتـها 15.0 MeV صادرـة عن المسـرع السـوري بـقطر 1cm، و تيار خـرج شـدته 200.0 μA .

ولتوصـيف المـنبـع (التفاعل $B(p,n)^9Be$) باستخدام الكـود *MCNPX* استـخدمـت البطـاقـة *SDEF* الواردـة فـي الكـود *MCNPX*، و حـزمـة بـروـتونـات طـاقـتها 15.0 MeV صـادرـة عن المسـرع السـوري بـقطر 1.0 cm و تـيـار خـرج شـدـته I=200.0 μA واستـمـرـت هـدـفـ من البـيرـيلـيوم بشـكـل قـرـصـ دـائـري قـطـره 1.0 cm مـتـعددـ السـماـكـاتـ، كـمـا هو مـوضـحـ بالـجـوـلـ (2).

تعـطـىـ الكـثـافـةـ البرـوتـونـيـةـ المـوـافـقـةـ لـتـيـارـ خـرجـ شـدـته 200.0 μA بالـعـلـاقـةـ الآـتـيـةـ [6]:

$$j_p = \frac{N_p}{t} = \frac{I}{e} = 200 \times 10^{-6} \times \frac{1}{1.60217 \times 10^{-19}} = 1.2483 \times 10^{15} [\text{proton per sec}] \dots \dots \dots (2)$$

إذ:

t - واحـدةـ الزـمـنـ [sec]

I - شـدـةـ تـيـارـ البرـوتـونـاتـ وـيـقـدـرـ [μA]

e - شـحـنةـ البرـوتـونـ وـتـقـدـرـ [coulomb]

ولـحـسابـ الكـثـافـةـ النـتـرـونـيـةـ وـالـفـوتـونـيـةـ النـاتـجـةـ عنـ هـذـاـ التـفـاعـلـ $B(p,n)^9Be$ ، اـسـتـخـدمـ الأـمـرـ F₂ـ الـذـيـ يـعـطـيـ كـثـافـةـ تـدـفـقـ الجـسـيـمـاتـ منـ خـلـالـ سـطـحـ مـعـيـنـ، وـيـعـبـرـ عنـ رـياـضـياـ بالـعـلـاقـةـ الآـتـيـةـ [8]:

$$F_2 = \frac{1}{A} \int_A dA \int_E dE \int_{4p} d\Omega \cdot f(r, E, \Omega) \left[\frac{\text{particle}}{\text{cm}^2} \right] \dots \dots \dots (3)$$

إذ:

f(r, E, Ω) - التوزع الزاوي والطاقي لتدفق الجسيمات كتابع للموضع r الذي يعبر عن

إحداثيات نقطة ما.

A - مساحة السطح الذي يحدث من خلاله تدفق الجسيمات.

فضلاً عن ذلك، حُسبت الكثافة النترونية الكلية باستخدام الأمر F2 الناتجة عن هدف من البيريليوم سماكته 0.5 mm وقطره 1.0 cm لكتاب طاقة البروتونات باستخدام الكود MCNPX.

وتعطى القيم الحسابية لكل من:

- 1- الكثافة النترونية والفوتو巾ية التي حُسبت باستخدام الكود MCNPX في الجدول (2).
- 2- القيم الحسابية لطيف النترونات بالجدول (3)، وموضحة بالرسم في الشكل (3).

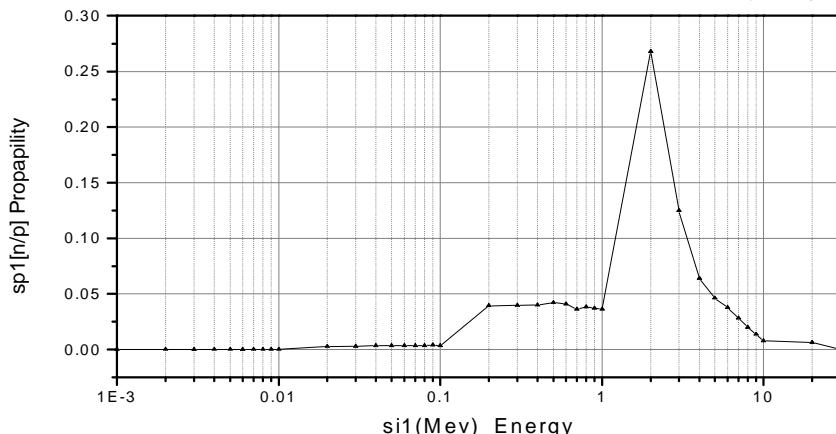
الجدول (2) القيم المحسوبة للكثافة النترو巾ية والفوتو巾ية الناتجة عن التفاعل ${}^9\text{Be}(\text{p},\text{n}){}^9\text{B}$ كتابع لسماكتة الهدف من أجل بروتونات طاقتها $E_p = 15.0 \text{ MeV}$

طاقة البروتونات $E_p=15 \text{ MeV}$						
ناتج النترونات (photon/neutron)	Error%	ناتج الفوتو巾ات (photon/sec)	الكثافة الفوتو巾ية (photon/sec)	Error%	الكثافة النترو巾ية (neutron/sec)	سماكتة 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	

الجدول (3) القيم المحسوبة لطيف النترونات الصادرة عن هدف من البيريليوم نصف قطره وسماكته 0.5cm باستخدام حزمة بروتونات صادرة عن المسرع (قطرها $200.0 \mu\text{A}$ وطاقتها 15.0 MeV) وتيار شدته 1.0 cm .

si1 Energy(Mev)	Sp1 (neut/proton)	si1 Energy(Mev)	Sp1 (neut/proton)	si1 Energy(Mev)	Sp1 (neut/proton)
1×10^{-5}	0.00	1×10^{-5}	1.23×10^{-5}	1×10^{-1}	3.54×10^{-5}
2×10^{-5}	0.00	2×10^{-5}	1.36×10^{-4}	2×10^{-1}	3.94×10^{-4}
3×10^{-5}	0.00	3×10^{-5}	1.11×10^{-4}	3×10^{-1}	3.97×10^{-4}
4×10^{-5}	0.00	4×10^{-5}	1.47×10^{-4}	4×10^{-1}	4.01×10^{-4}
5×10^{-5}	0.00	5×10^{-5}	1.47×10^{-4}	5×10^{-1}	4.22×10^{-4}
6×10^{-5}	0.00	6×10^{-5}	1.23×10^{-4}	6×10^{-1}	4.11×10^{-4}
7×10^{-5}	0.00	7×10^{-5}	1.72×10^{-4}	7×10^{-1}	3.63×10^{-4}
8×10^{-5}	0.00	8×10^{-5}	2.44×10^{-4}	8×10^{-1}	3.83×10^{-4}
9×10^{-5}	1.23×10^{-5}	9×10^{-5}	1.6×10^{-4}	9×10^{-1}	3.72×10^{-4}
1×10^{-4}	0.00	1×10^{-2}	2.22×10^{-4}	1.00	3.63×10^{-2}
2×10^{-4}	0.00	2×10^{-2}	2.78×10^{-3}	2.00	2.68×10^{-1}
3×10^{-4}	0.00	3×10^{-2}	3.07×10^{-3}	3.00	1.25×10^{-1}
4×10^{-4}	1.23×10^{-5}	4×10^{-2}	3.41×10^{-3}	4.00	6.4×10^{-2}
5×10^{-4}	1.23×10^{-5}	5×10^{-2}	3.38×10^{-3}	5.00	4.62×10^{-2}
6×10^{-4}	0.000	6×10^{-2}	3.43×10^{-3}	6.00	3.78×10^{-2}
7×10^{-4}	4.94×10^{-5}	7×10^{-2}	3.45×10^{-3}	7.00	2.82×10^{-2}
8×10^{-4}	0.00	8×10^{-2}	3.72×10^{-3}	8.00	2.01×10^{-2}
9×10^{-4}	0.00	9×10^{-2}	3.99×10^{-3}	9.00	1.38×10^{-2}
				10.00	7.95×10^{-3}
				20.00	6.41×10^{-3}
				30.00	0.00

إذ: si1 تشير عن قيم الطاقة و sp1 تعبر عن احتمالية الناتج النتروني (احتمال خروج النترون من هذا التفاعل بهذه الطاقة) لكل بروتون.



الشكل (3) يبين احتمالية التوزع النتروني مع الطاقة للطيف النتروني الناتج من المنبع: يمثل المحور X الطاقة، أما المحور y فيمثل الاحتمالية.

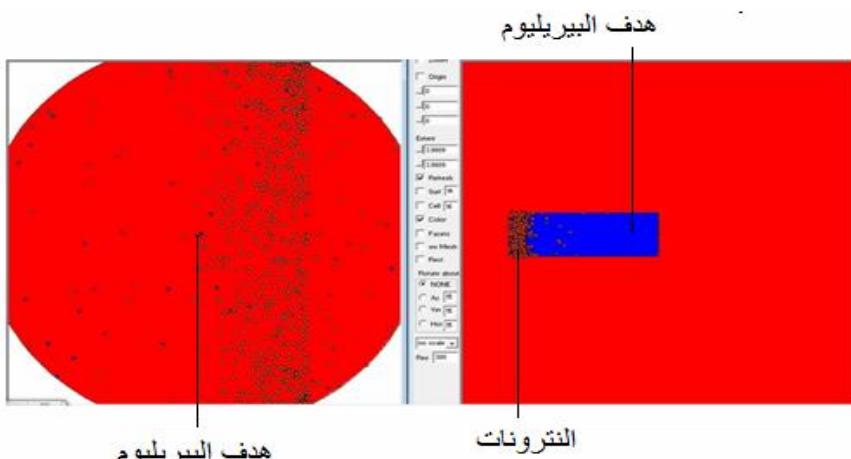
نلاحظ من الجدول (2) أن القيم المحسوبة للكثافة النيترونية الناتجة عن التفاعل ${}^9\text{B}(\text{p},\text{n}){}^9\text{Be}$ بتباعية سماكة الهدف من أجل بروتونات طاقتها $\text{Ep}=15.0\text{MeV}$ تزداد بشكل طردي مع زيادة سماكة الهدف من 0.00050cm إلى 0.50cm ، ومن ثم تصل إلى حد الإشباع ضمن المجال 0.50cm إلى 10.0cm .

ويمكننا تفسير مasic ما يأتي:

ت فقد البروتونات طاقتها ضمن مادة الهدف عن طريق تشكيل قمة براغ، إذ تزداد قدرة الإيقاف الخطية للجسيمات المشحونة في البداية تدريجياً مع زيادة سماكة الهدف (من 0.00050cm إلى 0.50cm)، وذلك نتيجة الانخاض في طاقة هذه الجسيمات عند عبورها مادة الهدف إذ تتناسب قدرة الإيقاف عكساً مع مربع السرعة ($\left| \frac{\text{d}E}{\text{dx}} \right| \approx \frac{1}{v^2}$) وهذا ما يزيد

من معدل إنتاج النيترونات نتيجة التفاعل ${}^9\text{B}(\text{p},\text{n}){}^9\text{Be}$ ضمن المجال المذكور لسماكة الهدف، وبعدها يلقط البروتون الكتروناً ليتعادل كهربائياً، مما يسبب زيادة (نتيجة انخفاض السرعة) في قدرة الإيقاف الخطية، ومن ثم عند قيمة محددة لسماكة الهدف تكون البروتونات جميعها قد تم إيقافها ضمن مادة الهدف وعندها نصل إلى حد الإشباع؛ وفي هذه الحالة نحصل على شبه ثبات في الناتج النتروني مع زيادة سماكة الهدف. كما أن هذه القيمة للناتج النتروني الذي تم الوصول إليه عند حد الإشباع سوف تبقى شبه ثابتة ولن تتأثر بزيادة سمك الهدف بعد حد الإشباع، وهذا مرد إلى أن معظم النيترونات الناتجة سوف تتبعثر ضمن المجال ($40^\circ - 50^\circ$) باحتمال أكبر منه من الاتجاه الأمامي (الزاوية 0°) نتيجة تأثيرها بسماكة الهدف (أي زيادة امتصاص النيترونات مع زيادة المسافة المقطوعة)، فقط ما يؤثر في هذه الحالة في الناتج النتروني هو الزيادة في نصف قطر مادة الهدف.

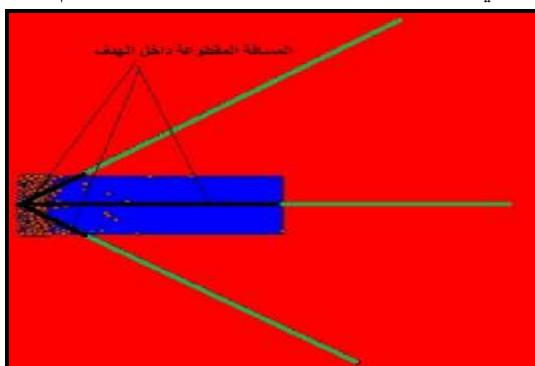
يبين الشكل (4) توزع النيترونات الصادرة (اللون البني) عن هدف من البيريليوم (اللون الأزرق) سماكته 3.0cm باستخدام رسام الكود MCNP5-BETA وبروتونات طاقتها $\text{Ep} = 15.0\text{MeV}$.



الشكل (4) توزع النترونات الصادرة عن هدف البيريليوم سماكته 3.0 cm باستخدام رسام MCNP5-BETA.

إذ يبيّن الجزء الأيمن من الشكل (4) توزع النترونات ضمن هدف مادة البيريليوم (اللون الأزرق) الذي يقع في مركز كرة من الهواء (اللون الأحمر) نصف قطرها 100.0cm، في حين يوضح الجزء الأيسر توزع النترونات (اللون البني) في الهواء حول الهدف، إذ يلاحظ انخفاض واضح لكثافة النترونات باتجاه الأمام (أي وفق الزاوية 0) عند سماكة هدف 3.0cm.

وذلك لأنّه عند زيادة سماكة الهدف تزداد المسافة التي تقطعها الجسيمات باتجاه الأمام داخل المادة مقارنة بالمسافة التي تقطعها داخل المادة بالاتجاه الجانبي كما بالشكل (5). هذا فضلاً عن أن زيادة مسار الجسيمات داخل البيريليوم تؤدي إلى ازدياد احتمال فقدان الجسيمات بنتيجة عمليّة الامتصاص والتبعثر على نوى البيريليوم .



الشكل (5) مسار النيترونات داخل هدف البيريليوم باستخدام الكود MCNP5C

أخذت مواصفات الهدف (البيريليوم) المقابلة لهذه القيمة لخض الكفة الاقتصادية للهدف (معدن البيريليوم النقي غال نسبياً) لاستخدامه كمنبع نتروني في المسرب من أجل الحصول على الكثافة النترونية المطلوبة لتصميم حزمة نترونية حرارية. إذ يوضع هدف البيريليوم داخل أنبوب من الألمنيوم (قطره 1 mm، وسماكته 1 mm وطوله 39.5 cm) ويحاط بعاسك أسطواني من البيريليوم قطره 30.0 cm وطوله 29.95 cm، وعاسك آخر من الغرافيت أسطواني الشكل قطره 51.0 cm وطوله 59.0 cm لزيادة تدفق النترونات عند خرج الحزمة كما هو موضح بالأشكال (6) و (7) و (8).

كما يبيّن الشكل (3) احتمالية التوزع النتروني مع الطاقة للطيف النتروني الناتج من المنبع؛ وذلك للقيم الواردة في الجدول (3)، ومن الشكل نجد أن الطيف الطيفي للنترونات الخارجة عن التفاعل بمعظم سريع، ونلاحظ أن الاحتمالية الأكبر لخروج النترونات من الهدف تكون حول 2Mev إذ تبلغ قيمة عظمى نحو 27%.

تبريد الهدف

وضعت منظومة تبريد للتبريد حول هدف البيريليوم؛ وذلك لأن استخدام بروتونات ذات طاقة 15Mev من أجل إنتاج النترونات ضمن هدف البيريليوم سيؤدي إلى رفع درجة حرارة البيريليوم إلى درجات حرارة عالية أكبر من درجة انصهاره التي تبلغ 1560K، وهذا ناتج بدوره عن الاستطاعة الحرارية المودعة ضمن مادة الهدف التي تبلغ 3000W، لذلك كان لابد من العمل على تبريد الهدف ولأنَّ الكود MCNP-5C لا يؤمن إمكانية دراسة انتقال الحرارة، كان لابد من الاستعانة ببرنامج Solid Works Simulation 2012 من أجل تصميم منظومة تبريد حرارية. وقد أدخل تصميم منظومة التبريد في ملف دخل الكود MCNP الخاص بالمسألة المدرosaة. تتألف منظومة التبريد من قناة أسطوانية تحيط بالهدف مصنوعة من النحاس، سماكة جرانتها 1mm كما هو مبيّن بالأشكال (6,7,8). وقد اختير النحاس لأنَّ إ يصلاليته الحرارة عالية ويعدُّ من أفضل المعادن المستخدمة لنقل الحرارة.

إذ يدخل الماء من السطح القريب من المنبع؛ وذلك عند درجة حرارة 20°، وقد أخذت بالحساب النبذة جملة من الشروط أهمها:

- استخدام الماء الخفيف عند درجة حرارة 20° كنافح حراري.
- يدخل الماء إلى القناة من السطح القريب من المنبع.
- عُدَّ هدف البيريليوم مصدرًا حجميًّا للحرارة باستطاعة حرارية 3000Watt.
- ضغط خروج الماء من سطح الخروج هو الضغط الجوي النظامي.
- سماكة جرمان منظومة التبريد 1mm ومصنوعة من النحاس.

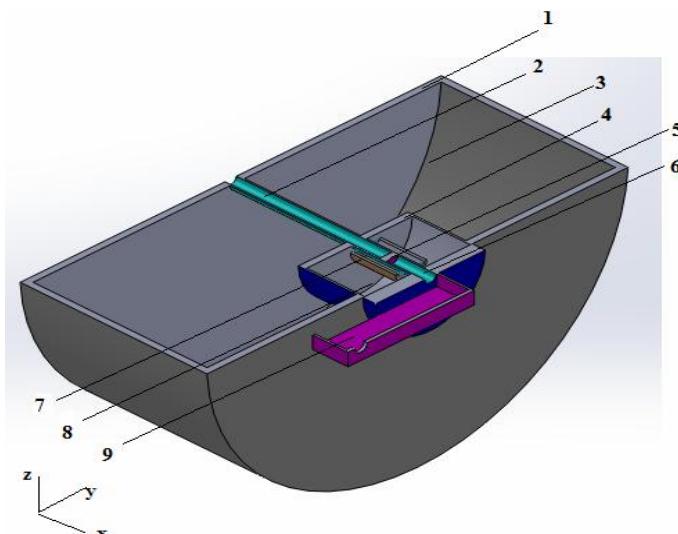
يوضح الجدول (4) البارامترات الأساسية لكل من المبرد والهدف المأخوذة من النبذة باستخدام برنامج Solid Works Simulation 2012.

إذ: $T_s(K)$: درجة الحرارة العظمى لمادة الهدف، ($T_f(K)$): درجة الحرارة العظمى للماء عند المخرج، $\Delta P(kPa)$: فرق الضغط اللازム من أجل التدفق المعطى،
 $m(\frac{kg}{sec})$: معدل تدفق ماء التبريد، $V_{max}(m/s)$: السرعة العظمى للماء.

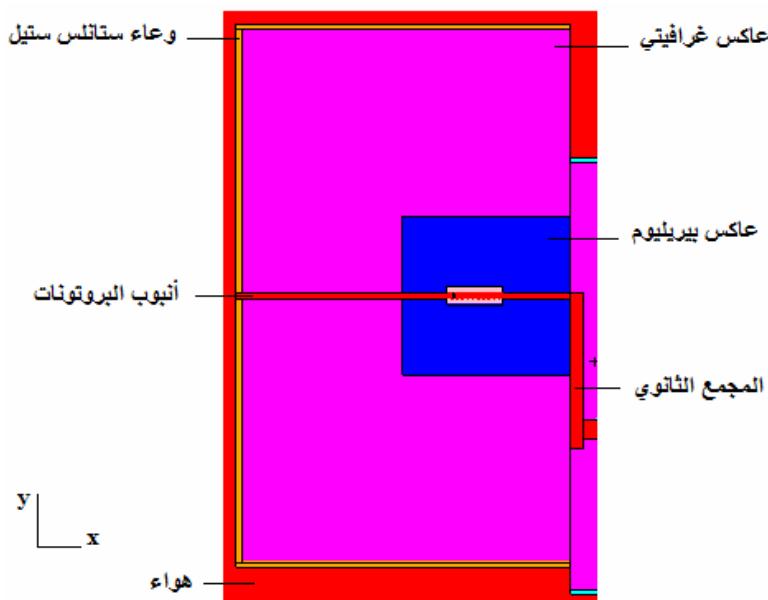
الجدول (4) تغير درجة الحرارة لكل من الهدف والمبرد، والسرعة العظمى للماء وانخفاض الضغط
 كتابع لمعدل تدفق المبرد من أجل بروتونات بطاقة $15 MeV$ وشدة $200 \mu Am$

$\Delta P (kPa)$	$V_{max}(m/s)$	$T_f(K)$	$T_s(K)$	$m(\frac{kg}{sec})$
7.48	3.79	499.34	636.93	0.5
20.08	7.53	415.29	533.47	1
43.83	11.37	377.92	483.05	1.5
86.92	15.07	355.86	450.62	2
112.96	18.66	343.53	431.25	2.5
157.21	22.19	333.92	414.55	3

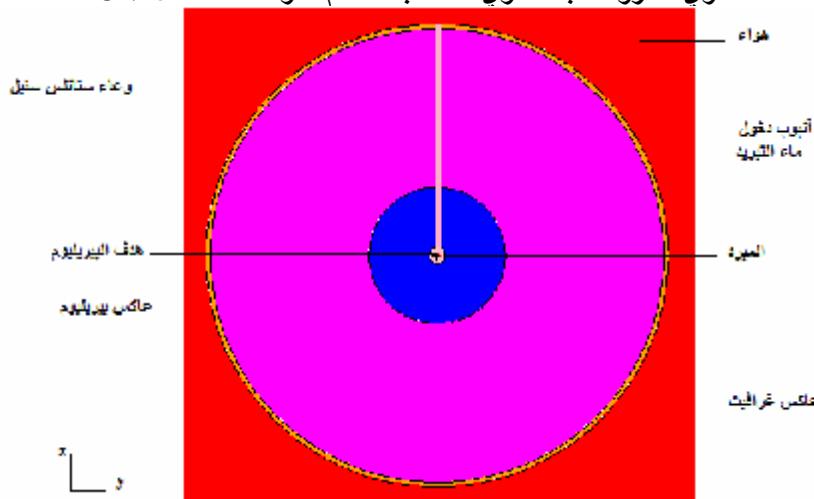
من الجدول السابق تتغير درجة حرارة الهدف مع تغيير تدفق الماء الداخل إلى قناة التبريد، ومن أجل إبقاء درجة حرارة الهدف أقل من $500K$ لابد من تأمين تدفق أكبر من $1.5 kg/sec$.



الشكل (6) رسم توضيحي ثالثي الأبعاد لحزمة البروتونات، وأنبوب الألمنيوم لدخول البروتونات،
 وهدف البيريليوم والعاكس المحيطة فضلاً عن مجمع النترونات الثانوي.
 1: وعاء ستانلس ستيل، 2: أنبوب البروتونات، 3: عاكس من الغرافيت، 4: وعاء الألمنيوم،
 5: هدف البيريليوم، 6: الجزء الأول من المجمع الثنائي للنترونات، 7: وعاء المبرد، 8: عاكس بيريليوم،
 9: الجزء الثاني من المجمع الثنائي للنترونات.



الشكل (7) مسقط أفقي في المستوى $x-y$ لحزمة البروتونات، والهدف (هدف البيريليوم)، وأنبوب الألمنيوم مع حزمة البروتونات، والعواكس المحيطة بالهدف والمجمع الثنائي للنترؤنات بالمستوى $X-Y$ باستخدام الكود MCNP5-BETA.



الشكل (8) مسقط عامودي في المستوى $y-z$ لحزمة البروتونات، والهدف (هدف البيريليوم) و العواكس المحيطة بالهدف باستخدام الكود MCNP5-BETA.

تصميم منظومة التصوير بالنترونات الحرارية في المسرع السوري

باستخدام الكود MCNP5-BETA

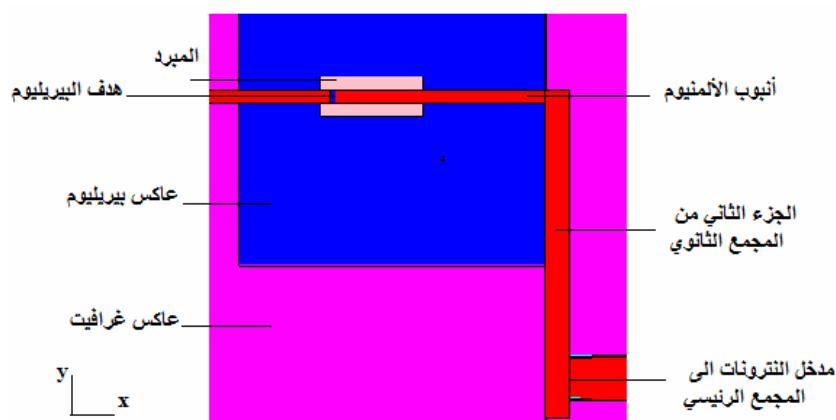
بعد أن حُسبت كل من الكثافة النترونية وطيف النترونات الصادر عن هدف من البيريليوم كما هو موضح بالجدولين (2) و (3). حددت الأبعاد الهندسية لمنظومة الحزمة النترونية (مثل: الأبعاد الهندسية للعواكس المحيطة بالهدف، أبعاد المجمع الثانوي والرئيسي للنترونات فضلاً عن أبعاد فتحة دخول النترونات إلى المجمع الرئيسي للنترونات) باستخدام الكود MCNP5-BETA بهدف الحصول على أعلى قيمة لتدفق النترونات الحرارية عند نهاية خرج المجمع الرئيسي للنترونات (مستوى التصوير)، وتتألف هذه المنظومة من:

1- المجمع الثنوي للنترونات.

يعلم المجمع الثنوي للنترونات على تجميع النترونات الصادرة عن هدف البيريليوم وتوجيهها إلى فتحة دخول النترونات إلى المجمع الرئيسي للنترونات، كما هو مبين بالأشكال (6,7,9)، ويكون من جزأين أساسين هما:

الأول: وهو عبارة عن أنبوب أسطواني من الألمنيوم سماكة جدرانه 1.00mm وقطره cm 1.0 طوله 20.55cm يحيط بهذا الأنابيب عاكس من البيريليوم طوله 29.95cm وقطره cm 30.0 لخفض تبعثر النترونات وتوجيهها باتجاه فتحة الجزء الثنوي من المجمع. وأحيط هذا العاكس من الجهة الأمامية (جهة حركة النترونات) بطبقة من الرصاص سماكتها cm 5.0 وقطرها cm 100 لامتصاص الفوتونات الصادرة عن هدف البيريليوم والمرافقة للنترونات والناشئة عن تفاعل النترونات مع مواد منظومة التصوير بشكل عام، ومنع وصولها إلى فتحة خرج النترونات (نهاية المجمع الرئيسي للنترونات).

أما الجزء الثنوي من المجمع الثنوي للنترونات فهو عبارة عن فراغ هوائي داخل عاكس الغرافيت له شكل متوازي مستطيلات مقطعه مستطيل أبعاده 2.45cm على المحور x cm 5.0 على المحور z، أما طوله على المحور y فهو cm 29.0 كما هو مبين بالأشكال (9) و (6) مهمته توجيه النترونات إلى مدخل المجمع الرئيسي، كما أنه يؤدي دوراً مهماً في تهدئة النترونات السريعة؛ وذلك عن طريق التصادمات المرنة وغير المرنة، ويُخفض محتوى أشعة غاما في الحزمة النترونية. ويحاط هذا الجزء وجزء من المجمع الرئيسي بعاكس أسطواني من الغرافيت طوله cm 34.9 قطره cm 100.0.



الشكل (9) مسقط أفقى في المستوى x-y لهدف البيريليوم، أنبوب الألمنيوم والجزء الثاني من المجمع الثنائى وفتحة دخول النترونات إلى المجمع الرئيسي باستخدام الكود MCNP5-BETA.

2- المجمع الرئيسي للنترونات .

يعرف هذا المجمع بأنه المسافة L بين فتحة دخول النترونات ومستوى التصوير، ويتألف من مخروط أسطواني الشكل مقلوب كما هو موضح بالشكل 10 طوله 330.0 cm وسمكاه جرائه 1.00 mm من الألمنيوم.

الأبعاد الهندسية لقاعدته السفلية متساوية لأبعاد فتحة دخول النترونات إليه، أي متساوية إلى $D = 3.0\text{ cm}$ كما هو مبين بالشكل (9)، وأبعاد قاعدته العلوية متساوية لأبعاد فتحة خروج النترونات منه $d = 18.0\text{ cm}$ كما هو مبين بالشكل (11). وضع هذا المخروط ضمن أنبوب من الألمنيوم قطره 100.0 cm وسمكاه جرائه 1.0 cm وطوله 332.95 cm وقد مليء الفراغ بين الجدران الخارجية لهذا المخروط والجدران الداخلية لأنبوب الألمنيوم بمادة البولي إيتيلين الممزوجة مع البور بنسبة 4.0% لامتصاص النترونات الحرارية المشتتة نتيجة تفاعلات النترونات مع مواد الحزمة ومنع وصولها إلى مستوى التصوير بغية الحد من ضبابية الصورة الناشئة عن النترونات الحرارية المتGANSA الطاقة، إذ تمتلك هذه النترونات طاقات متعددة، وهذا يؤثر سلبياً في تباين الصورة.



الشكل (10) مقطع أفقي في المستوى x-y لمجمع النترونات (الثانوي والرئيسي) باستخدام الكود MCNP5-BETA.



الشكل (11) مقطع أفقي في المستوى x-y لمنظومة التصوير بالنترونات الحرارية في المسرع السوري باستخدام الكود MCNP5-BETA.

اختيار وسطاء الحزمة النترونية الحرارية

صممت الحزمة النترونية الحرارية في المسرع السوري بهدف الحصول على:

- أعلى قيمة لتدفق النترونات الحرارية عند نهاية المجمع الرئيسي للنترونات من أجل القيمة 110 للنسبة L/D , إذ L طول المجمع الرئيسي للنترونات، و D قطر فتحة دخول النترونات إلى المجمع الرئيسي.

إن اختيار النسبة $L/d=110$ مرتبط بمعامل التشويف في الصورة المأخوذة عند الأطراف والمعطى بالعلاقة الآتية:

$$m = \frac{t}{L/D}$$

إذ: t : سماكة العينة المراد تصويرها. نلاحظ من هذه العلاقة أنه كلما ازدادت النسبة كان معامل التشويف صغيراً، وبغيه الحصول على تدفق نتروني من مرتبة $10^5 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$

رأينا نتيجة النمذجة أن أفضل قيمة يمكن أخذها هي 110، لأنه في حال زيادة النسبة على ذلك سينخفض التدفق التتروني عند مستوى التصوير.

2. أكبر قيمة لنسبة النترونات الحرارية في الحزمة مع محتوى منخفض من الفوتونات ومحقق للعلاقة $\phi_{ther}/D_\gamma \geq 1.0 \times 10^6$ [1] $n/cm^2.mR$.
إذ: ϕ_{ther} - تدفق النترونات الحرارية.

D_γ - جرعة أشعة غاما عند خرج المجمع الرئيسي للنترونات (مستوى التصوير).
 mR - ملي ريم (واحدة الجرعة).

لتقدير هذه الوسطاء والأبعاد الهندسية لكل من المجمع الثانوي والرئيسي للنترونات ووضع فتحة دخول النترونات إلى المجمع الرئيسي. أجريت نمذجة منظومة الحزمة التترונית بشكل كامل باستخدام الكود MCNP5-BETA مع كثافة تترונית وفوتونية من مرتبة $10^{12} n/s$ و $7.864 \times 10^{11} ph/s$ على الترتيب، وقسم المجال الطيفي للنترونات إلى ثلاثة مجموعات طافية، هي: حرارية $0.3 eV < 0.30 eV - 10.0 keV$ ، فوق حرارية $> 10.0 keV$ [1].

ونتيجة الأمثلة باستخدام الكود MCNP5-BETA وتشغيله مرات عديدة تم الحصول على الأبعاد الهندسية لكل من المجمع الثانوي، والرئيسي للنترونات، والعواكس المحيطية بالهدف والمجمع الثانوي الواردة في الفقرة السابقة والموافقة لأعلى قيمة لتدفق النترونات الحرارية عند خرج الحزمة.

تعطى القيم المحسوبة لكل من تدفق النترونات الحرارية عند مستوى التصوير، ونسبة ϕ_{ther}/D_γ ومتوى الحزمة من النترونات الحرارية بالجدول (5).

الجدول (5) المواصفات التترונית للحزمة المصممة.

Thermal neutron flux ($n/cm^2.s$)	$(1.09 \pm 0.006) \times 10^5$
Epithermal neutron flux ($n/cm^2.s$)	$(9.24 \pm 0.01) \times 10^3$
Fast neutron flux ($n/cm^2.s$)	$(2.87 \pm 0.02) \times 10^3$
ϕ_{ther}/D_γ ($n/cm^2.mR$)	1.6×10^8
TNC %	% 90
2Θ (degree)	2.78

إذ: TNC - محتوى الحزمة من النترونات الحرارية عند مستوى التصوير، وتعرف بأنها قيمة تدفق النترونات الحرارية عند مستوى التصوير إلى القيمة الكلية لتدفق النترونات عند المستوى نفسه، وهذه الأحرف هي اختصار لجملة Thermal Neutron Content (TNC).

20 - زاوية انفراج الحزمة التترונית وتحسب من العلاقة الآتية [1]:

$$2\theta = \tan^{-1}\left(\frac{I}{L}\right)$$

إذ: I - نصف قطر فتحة خروج النترونات عند مستوى التصوير وتساوي إلى 9.0 cm في حالتنا.

L - طول المجمع الرئيسي للنترونات ويساوي إلى 330.0 cm استخدم في عملية النمذجة كل من:

1. بطاقة توصيف المنبع من النوع SDEF الواردة في الكود MCNP5-BETA والموافقة للتوصيف الآتي [8]:

```
sdef par=1 pos= 29 25 0 erg=d1 sur=8 nrm=1 rad=d2 wgt=7.864E+12
      إذ:
```

- نوع الجسيم وتأخذ الرقم واحد ويعني النترونات.

- إحداثيات مركز سطح الهدف من جهة حزمة البروتونات.

- التوزع الطاقي للنترونات ويكتب بحسب البطاقة d1.

- SUR - سطح الهدف ويستخدم كدليل لجهة حركة النترونات.

- NRM - يحدد جهة خروج النترونات بالنسبة إلى السطح، ويأخذ قيمة 1، وتعني خروج النترونات من يمين السطح المختار.

- RAD - نصف قطر الهدف ويأخذ قيمة تراوح من cm (0 - 0.50).

- Wgt - تدفق النترونات الصادر عن المنبع وواحدته (n/cm².sec).

- D1 - بطاقة التوزع الطاقي للنترونات.

- D2 - بطاقة تغير نصف قطر الهدف.

2. الطيف النتروني (الجدول 3) المحسوب من الكود MCNPX باستخدام هدف من البيريليوم نصف قطره 0.5cm وسماكته cm 0.50 وحزمة البروتونات صادرة عن المسرع (قطرها 1cm وطاقتها 15.0 MeV) بتيار شدته 200.0 μA .

3. شغل الكود MCNP5-BETA باستخدام 600 دورة، وفي كل دورة 7400 نترون لحساب تدفق النترونات الحرارية وجرعة أشعة عاماً في نقطة واحدة عند مستوى التصوير (نهاية المجمع الرئيسي للنترونات) باستخدام الأمر F5 (x, y, z, r).

وكرر هذا العمل لحساب تدفق النترونات الحرارية وفق المحورين X وY عند مستوى التصوير. وتعطى القيم المحسوبة لتدفق النترونات الحرارية عند نهاية المجمع الرئيسي للنترونات بالجدول (6).

بينما يعطي الجدول (7) القيم المحسوبة لتدفق النترونات الحرارية والفوق حرارية والسرعة عند نقاط مختلفة على طول المحور (x) بدءاً من المنبع الترoney (هدف البيريليوم) وصولاً إلى مستوى التصوير.

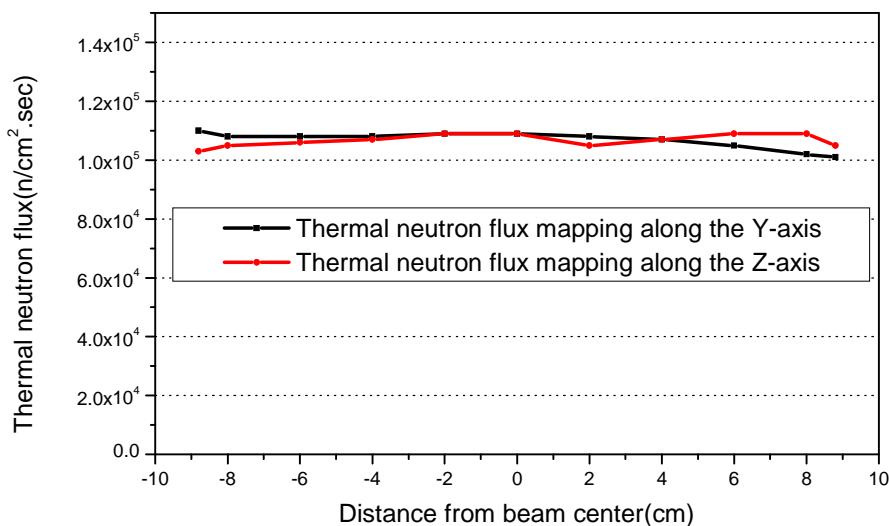
الجدول (6) القيم المحسوبة لتدفق النترونات الحرارية وفق المحورين Z وY عند مستوى التصوير.

المسافة عن مركز الحزمة (cm)	تدفق النترونات الحرارية وفق المحور y (n/cm ² .sec)	تدفق النترونات الحرارية (n/cm ² .sec) وفق المحور z
-8.8	1.10x10 ⁵	1.03x10 ⁵
-8.0	1.08x10 ⁵	1.05x10 ⁵
-6.0	1.08x10 ⁵	1.06x10 ⁵
--4.0	1.08x10 ⁵	1.07x10 ⁵
-2.0	1.09x10 ⁵	1.09x10 ⁵
0	1.09x10 ⁵	1.09x10 ⁵
2	1.08x10 ⁵	1.05x10 ⁵
4	1.07x10 ⁵	1.07x10 ⁵
6	1.05x10 ⁵	1.09x10 ⁵
8	1.02x10 ⁵	1.09x10 ⁵
8.8	1.01x10 ⁵	1.05x10 ⁵

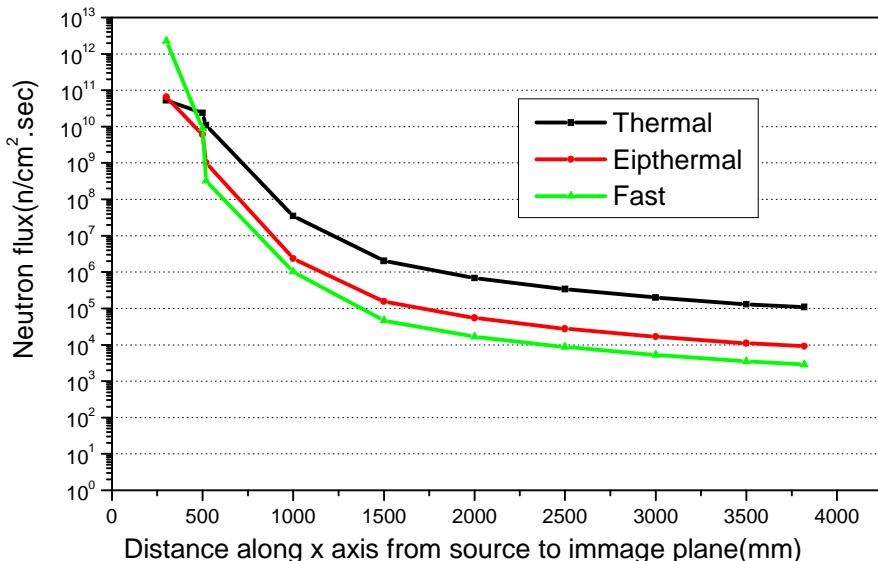
الجدول (7) القيم المحسوبة لتدفق النترونات الحرارية والفوق حرارية والسرعة على طول المحور (x).

x_{axis} (mm)	520	1000	1500	2000	2500	3000	3500	3820
φ_{th} ($\frac{n}{cm^2.sec}$)	1.09×10^{10}	3.45×10^7	2.02×10^6	6.91×10^5	3.38×10^6	1.98×10^5	1.30×10^5	1.09×10^5
φ_{eipth} ($\frac{n}{cm^2.sec}$)	1.03×10^9	2.37×10^6	1.56×10^5	5.45×10^4	2.78×10^4	1.67×10^4	1.11×10^4	9.24×10^8
φ_{fast} ($\frac{n}{cm^2.sec}$)	3.17×10^8	1.02×10^6	4.66×10^4	1.67×10^4	8.67×10^8	5.27×10^8	3.53×10^8	2.87×10^8

يبين الشكلان (12) و (13) توزع تدفق النترونات الحرارية في المستوى Y-Z عند مستوى التصوير (نهاية المجمع الرئيسي للنترونات)، وتدفق النترونات الحرارية، وفوق الحرارية والسرعة على طول الحزمة الترoneyية بدءاً من المنبع وحتى مستوى التصوير.



الشكل (12) توزع تدفق النترونات الحرارية على طول المحور y والمحور Z عند خرج المجمع الرئيسي (مستوى التصوير) للنترونات.



الشكل (13) توزع تدفق النترونات الحرارية، فوق الحرارية، والسريعة على طول محور مجمع النترونات بدءاً من المنبع وحتى نهاية المجمع الرئيسي للنترونات (مستوى التصوير) (يعد الحساب بدءاً من المنبع).

النتائج والمناقشة

تعطى القيم المحسوبة لكل من تدفق النترونات الحرارية، والنسبة المئوية لقيمة TNC ، والنسبة φ_{ther}/D_γ وزاوية انفراج الحزمة عند خرج المجمع الرئيس للنترونات بالجدول (5).

نلاحظ من هذا الجدول:

1. أن القيمة الوسطى لتدفق النترونات الحرارية عند مستوى التصوير هي من مرتبة $n/s \times 10^5$. تعد هذه القيمة كافية لاستخدامها في التصوير بالنترونات الحرارية، إذ يعطى تدفق النترونات الحرارية المستخدمة في التصوير من مرتبة $[1,2] n/s \times 10^4$.

2. قيمة النسبة φ_{ther}/D_γ من مرتبة $n/cm^2.mR \times 10^8$ ، وهذه القيمة محققة للشرط $\varphi_{ther}/D_\gamma \geq 1.0 \times 10^6 n/cm^2.mR$ الواجب تطبيقه في حالة التصوير بالنترونات الحرارية. ويثبت هذا الشرط أن إسهام أشعة غاما في تشكيل الخيال (للعينة المدروسة) سيكون صغيراً نسبياً مقارنة بالخيال المتشكل عن النترونات.

3. قيمة النسبة TNC هي 90% عند خرج المجمع الرئيس للنترونات. تثبت هذه القيمة بأن الخيال المتشكل للعينة المدروسة ناشئ بشكل أساسي عن النترونات الحرارية، وهذا يزيد من التباين في الصورة المتشكلة.

4. زاوية انفراج الحزمة تساوي إلى 2.78 درجة. وتعزى زاوية انفراج الحزمة مقداراً مهماً لقياس مدى فعالية الحزمة عند محيطها. لذلك عندما تفرج الحزمة بشكل سريع لتشكيل بقعة كبيرة تكون الأجزاء الخارجية للخيال المتشكل مشوهة بشكل واضح، على العكس عندما تكون الحزمة طويلة (طول المجمع الرئيس للنترونات كبير) وحجم الخيال المتشكل (فتحة خرج مجمع النترونات) صغيراً يكون التشوه عند محيط الخيال المتشكل صغيراً، وهناك وضوح (تبابين) جيد في الخيال.

يبين الشكل (12) توزع تدفق النترونات الحرارية المحسوب باستخدام الكود MCNP5-BETA وفق المحورين Y and Z عند خرج المجمع. نلاحظ توافقاً جيداً بين القيم المحسوبة لتدفق النترونات الحرارية وفق المحورين Y and Z وبين الفرق الأعظم بين القيم المحسوبة بنحو 8%. التجانس الجيد بين القيم المحسوبة لتدفق النترونات الحرارية مهم جداً للحصول على خيال واضح للعينة المدروسة، وإظهار البنية الداخلية للعينة بشكل أفضل ما يمكن.

يظهر الشكل (13) توزع تدفق النترونات الحرارية، وفوق الحرارية والسريعة على طول محور مجمع النترونات ويبين هذا الشكل تناقص كل من تدفق النترونات فوق الحرارية والسريعة بشكل متدرج حتى نهاية المجمع الرئيسي، إذ يكون هذا التناقص أعظماً، وقيمة تدفق النترونات الحرارية أعظمية.

يبين الجدول (2) القيم المحسوبة لكل من الكثافة النترونية والفوتونية. إذ نلاحظ تغير هذه القيم بتابعية سماكة الهدف وهذا متوقع لأن طاقة البروتونات المستخدمة كبيرة جداً، مما يسمح لها بالتلغغل بشكل كبير داخل الهدف، وتمثل هذه الطاقة الحد الأدنى بالنسبة إلى المسارع السوري. ونلاحظ من هذا الجدول أنه بعد القيمة 6.0 cm بالنسبة إلى سماكة الهدف يصبح التغيير في الكثافة النترونية والفوتونية شبه مهمل ضمن حدود الأخطاء؛ وهذا يمكن تفسيره على الشكل الآتي: إنَّ عدد البروتونات الواردة إلى مسافة أكبر داخل الهدف يصبح قليلاً بسبب معامل الحجب الذاتي، ومن ثمَّ عدد النترونات والفوتونات الصادرة (عند هذا الحد من العمق داخل الهدف) ينخفض تدريجياً بتابعية العمق داخل الهدف.

الاستنتاج

استخدم الكودان MCNPX و MCNP5-BETA لنموذج التفاعل ${}^9\text{Be}(\text{p},\text{n}){}^8\text{B}$ في مسارع السينكلترون السوري، ولحساب طيف النترونات الصادر عن هذا التفاعل، وإجراء الحسابات النترونية اللازمة لتصميم حزمة نترونية حرارية لاستخدامها في التصوير بالنترونات الحرارية في المسارع السوري.

بلغت قيمة تدفق النترونات الحرارية عند خرج المجمع الرئيسي للنترونات القيمة: $1.09 \times 10^5 \text{ نترون/ثانية}$ ؛ وذلك من أجل النسبة $L/D = 110$ إذ L طول المجمع الرئيسي للنترونات، و D قطر فتحة دخول النترونات إلى المجمع.

لم تُستخدم أية مرشحات لتخفيف طاقة النترونات السريعة ولا متصاص أشعة عاماً في التصميم خلافاً للعديد من التصاميم المعتمدة، وهذا يخفض الكلفة الاقتصادية للعمل، ويجعل إمكانية تطبيقه في المسارع ممكناً.

استخدم الكودان MCNPX و MCNP5-BETA لتحديد الكثافة النترونية الصادرة عن التفاعل ${}^9\text{Be}(\text{p},\text{n}){}^8\text{B}$ ولأمثلة الأبعاد الهندسية لكل من:

- العواكس المحيطة بالهدف ومجمع النترونات الثانوي؛ بغية الحصول على أعلى نسبة نترونات حرارية عند خرج المجمع الرئيسي للنترونات.

2. أنبوب الألمنيوم المتضمن التفاعل ${}^9\text{Be}(\text{p},\text{n}){}^9\text{B}$.

إن مبادئ تصميم الحزمة النترونية هي واحدة في المراجع العلمية العالمية كلها، وتُصمّم الحزمة بحسب الهدف من استخدام هذه الحزمة، أي تطبيقاتها. أمّا الجديد في هذا العمل فهو تصميم حزمة نترونية على المسرع السوري، إذ لم يقم أحد بإجراء حساب تصميمي على المسرع السوري (أو على أي مسرع مشابه للمسرع السوري) بهدف زيادة تطبيقاته أو البحث في هذا المجال. بشكل عام إن معظم الحزم النترونية تصمم باستخدام حزمة بروتونات طاقتها منخفضة لأسباب عديدة لذلك كان لابد من تقصي إمكانية استخدام هذا المسرع في تصميم حزمة نترونية.

REFERENCES

1. Kaushal, K. M. 2005. Development of a Thermal Neutron Imaging at the N.C.S.U PULSTAR Reactor.ph.D, North Carolina State University, USA.
2. Thomas, R. C. 2000. Development of Neutron Radioscopy at the SLOWPOKE-2 Facility at RMC for the Inspection of CF188 Flight Control Surfaces.ph.D, Faculty of the Royal Military College of Canada, Canada.
3. Eberhardt, J. E., Rainey, S., Stevens, R. J., Sowerby, B. D., Tickner, J. R. 2005. Fast neutron radiography scanner for detection of contraband in air cargo containers. *Appl. Radiat. Isot.* 63, 179-188.
4. Gongyin, C., Richard, C. L. 2002. Fast resonance radiography for elemental imaging: Theory and Applications. *IEE Trans. Nucl. Sci.* 40, 1919-1924.
5. Krner, S., Pleinert, H., H. Bck. 1996. Review of Neutron radiography Activities at the Atominstitut of the Austrian Universities, Proceedings of the 5th World Conference on Neutron Radiography, Berlin
6. <http://www.springeronline.com/series/5267>.particle Acceleration and detection.
7. <http://homepage.univie.ac.at/manfred.drosig/drosg99.pdf>, Monoenergetic neutron production by tow body reaction in the energy range from 0.0001 to 500 Mev.
8. Briesmeister, J. F. 1997. LA-7396-M, A General Monte Carlo N-Partical transport code Version 4C,Radiation Safety Information Computational Center (RSICC), Oak Ridge, TN, 37831-6362.
9. Zhonglu Wang. 2006. Design of a boron neutron capture enhanced fast neutron therapy assembly. Ph.D, Georgia Institue of Technology, USA.