

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

سلمان حسن<sup>(1)</sup> وماجدة نحيلي<sup>(2)</sup> و إسماعيل شعبان<sup>(3)</sup>

تاريخ الإيداع 2013/02/18

قبل للنشر في 2013/06/03

## الملخص

استخدم الكودان MCNP5-BETA و MCNPX لنمذجة التفاعل  ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$  باستعمال حزمة بروتونات ناتجة عن مسرع السيكلترون السوري، وحُسب 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 النقي سماكته 0.5cm وقطره 1cm لإنتاج تدفق نتروني من مرتبة  $7.864 \times 10^{12}$  neutron/sec. بلغت قيمة تدفق النترونات الحرارية عند خرج المجمع الرئيسي للنترونات القيمة:  $1.09 \times 10^5$  neutron/cm<sup>2</sup>. sec وذلك من أجل النسبة  $L/D = 110$ ، إذ L طول المجمع الرئيسي للنترونات وD قطر فتحة دخول النترونات إلى المجمع الرئيسي للنترونات. حسبت فضلاً عن ذلك قيمة نسبة النترونات الحرارية فكانت 90.0%، ومحتوى أشعة غاما في الطيف النتروني عند خرج المجمع الرئيسي للنترونات فكانت هذه القيمة  $\Phi_{\text{thermal}}/\text{gamma dose} = 1.60 \times 10^8$  neutron/mRem (إذ:  $\Phi_{\text{thermal}}$ : تدفق النترونات الحرارية وRem: قيمة جرعة أشعة غاما عند خرج المجمع الرئيسي للنترونات على الترتيب). لم تُستخدم أية مرشحات لتخفيض طاقة النترونات السريعة ولامتصاص أشعة غاما في التصميم خلافاً للعديد من التصاميم المعتمدة، وهذا يخفف الكلفة الاقتصادية للعمل، ويجعل إمكانية تطبيقه في المسرع ممكناً.

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

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

S. Hasan<sup>(1)</sup>, M. Nahili<sup>(2)</sup> and E. Shaban<sup>(3)</sup>

Received 18/02/2013

Accepted 03/06/2013

### ABSTRACT

The MCNPX and MCNP5-BETA codes were used to simulate the reaction  ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$  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  $\mu\text{A}$  and Be target (0.50 cm thickness and 1.0 cm diameter) were used to produce the neutron intensity from the order of  $7.864 \times 10^{12}$  n/s. The calculated value of the thermal neutron flux at the main collimator exit of neutrons is  $1.09 \times 10^5$  n/cm<sup>2</sup>.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.

---

<sup>(1)</sup>Master Student, <sup>(2)</sup> Supervisor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria.

<sup>(3)</sup> Associated Supervisor, AECS-Nuclear Engineering Department, Syria.

## مقدمة

تعدُّ تقانة التصوير بالنترونات أداةً اختياريةً لا إتلافيةً ومكملةً 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. يعدُّ التصوير بالنترونات أداة مهمة لدراسة المواد المشعة، وتعدُّ الميزة الأكثر أهميةً للتصوير بالنترونات مقدرتها على كشف العناصر الخفيفة مثل: H, O, N, B، المسببة للتآكل [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 النترونات الحرارية، ومعالجة الأمراض الدماغية السرطانية باستخدام حزمة نترونية فوق حرارية،....الخ) باستخدام مرشحات نترونية معينة. يتألف الطيف الطاقوي للنترونات، الصادرة عن التفاعلات  $X(p,n)y$  من ثلاث مجموعات طاقوية أي: حرارية، وفوق الحرارية والسريعة. ويستخدم التصوير بالنترونات الحرارية بشكل واسع كأداة جيدة للاختبار في الصناعة، لأن النترونات الحرارية تعطي تبايناً جيداً لعدد كبير من العناصر وأكثر سهولة وإتاحة لمعظم المنابع النترونية [1,2].

استخدم في هذا البحث الكودان MCNPX و MCNP5-BETA لحساب طيف النترونات الصادر عن التفاعل  ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ ، 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 السيكلترون ومواصفاته

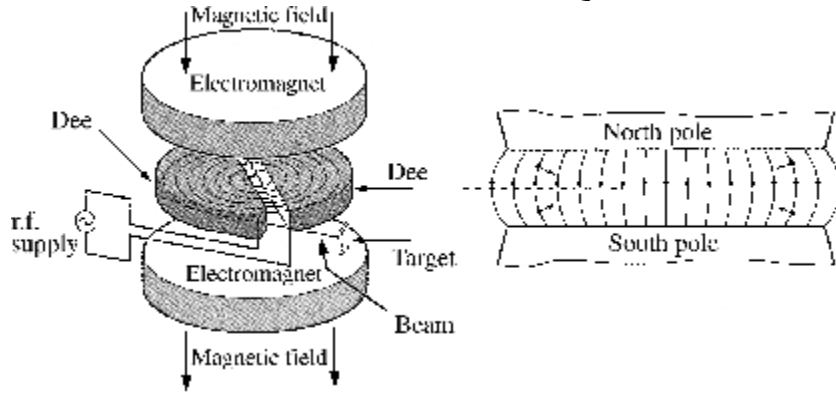
يستخدم المسرع لزيادة الطاقة الحركية للجسيمات المشحونة كهربائياً مثل: الإلكترونات، والبروتونات، والديترونات، وجسيمات ألفا ونوى العناصر الخفيفة والثقيلة. وتعدُّ المسرعات أداة مهمة لأغراض البحث العلمي، ولها استخدامات كثيرة مثل [6]:

1. إنتاج نظائر مشعة قصيرة العمر تستخدم للتشخيص الطبي وللعلاج.

2. توليد أشعة x و البيونات المستخدمة في العلاج الإشعاعي.

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 الصفائح داخل الفجوة المفرغة كما هو مبين بالشكل (1) [6].



الشكل (1) البنية الأساسية لمسرّع السيكلترون

وبالنتيجة يضبط كل من شدة الحقل المغناطيسي  $B$  وتواتر الكمون المتناوب  $F$  بحيث نجعل الأيون متوافقاً 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 مستوي. يصل الأيون أخيراً 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 الآتية [6]:

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

إذ:

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

$R$  - نصف قطر المسرى وتقدر (m).

$F$  - تواتر الكمون المتناوب ويقدر (Hz).

#### المواصفات العامة للسيكلترون السوري

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).

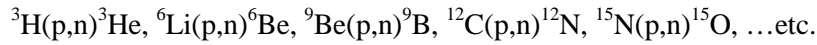
الجدول (1) المواصفات العامة للمسرّع السيكلترون السوري.

(15-30) MeV	مجال طاقة البروتونات
200 $\mu$ 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 للمسرّع
70/110 kW	استطاعة التشغيل عند بروتونات بطاقة 30 (MeV)
50 tons	الوزن الكلي

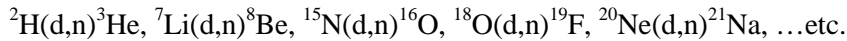
#### التفاعلات المعتمدة في المسرّعات لإنتاج النترونات [7]

يعتمد مبدأ إنتاج النترونات في المسرّعات 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 نذكر منها:

1. التفاعلات (p,n):



2. التفاعلات (d,n):



### نمذجة التفاعل ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ باستخدام الكود MCNPX [8]

استخدم في هذا البحث التفاعل  ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$  من أجل:

1. دراسة تغيّر الكثافة النترونية الصادرة عنه كتابع لسماكة الهدف  $Be$  لاختيار أفضل سماكة والموافقة لأعلى كثافة نترونية. واختير البيريليوم كهدف لتميزه بدرجة انصهار مرتفعة، وموصلية حرارية عالية والثبات الميكانيكي من أجل البروتونات العالية الطاقة [9].

2. لحساب طيف النترونات الصادرة عن التفاعل  ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$  باستخدام حزمة بروتونات طاقتها 15.0 MeV صادرة عن المسرع السوري بقطر 1cm، وتيار خرج شدته 200.0  $\mu\text{A}$ .

ولتوصيف المنبع (التفاعل  ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ ) باستخدام الكود MCNPX استخدمت البطاقة SDEF الواردة في الكود MCNPX، وحزمة بروتونات طاقتها 15.0 MeV صادرة عن المسرع السوري بقطر 1.0 cm وتيار خرج شدته 200.0  $\mu\text{A}$  واستثمر هدف من البيريليوم بشكل قرص دائري قطره 1.0 cm متعدد السماكات، كما هو موضّح بالجدول (2).

تعطى الكثافة البروتونية الموافقة لتيار خرج شدته 200.0  $\mu\text{A}$  بالعلاقة الآتية [6]:

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

إذ:

t - وحدة الزمن [sec]

I - شدة تيار البروتونات ويقدر [ $\mu\text{A}$ ]

e - شحنة البروتون وتقدر [coulomb]

ولحساب الكثافة النترونية والفوتونية الناتجة عن هذا التفاعل  ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ ، استخدم الأمر  $F_2$  الذي يعطي كثافة تدفق الجسيمات من خلال سطح معين، ويعبر عنه رياضياً بالعلاقة الآتية [8]:

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

إذ:

$f(r, E, \Omega)$  - 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 النeutرونية الكلية باستخدام الأمر F2 الناتجة عن هدف من البيريليوم سماكته 0.5 mm وقطره 1.0 cm كتابع لطاقة البروتونات باستخدام الكود .MCNPX.

وتعطى القيم الحسابية لكل من:

- 1-الكثافة النeutرونية والفوتونية التي حُسبت باستخدام الكود MCNPX في الجدول (2).
- 2-القيم الحسابية لطيف النeutرونات بالجدول (3)، وموضحة بالرسم في الشكل (3).

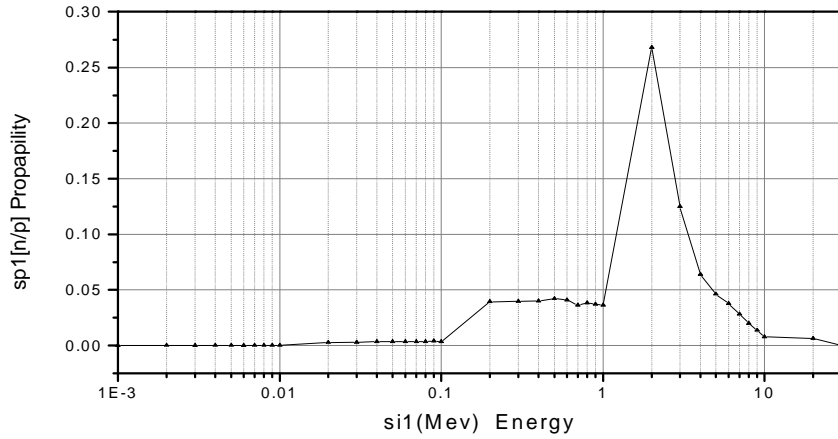
الجدول (2) القيم المحسوبة للكثافة النeutرونية والفوتونية الناتجة عن التفاعل  ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$  كتابع لسماكة الهدف من أجل بروتونات طاقتها  $E_p = 15.0 \text{ MeV}$ .

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

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

si1 Energy(Mev)	Sp1 (neut/proton)	si1 Energy(Mev)	Sp1 (neut/proton)	si1 Energy(Mev)	Sp1 (neut/proton)
1x10 <sup>-5</sup>	0.00	1x10 <sup>-5</sup>	1.23x10 <sup>-5</sup>	1x10 <sup>-1</sup>	3.54x10 <sup>-3</sup>
2x10 <sup>-5</sup>	0.00	2x10 <sup>-5</sup>	1.36x10 <sup>-4</sup>	2x10 <sup>-1</sup>	3.94x10 <sup>-2</sup>
3x10 <sup>-5</sup>	0.00	3x10 <sup>-5</sup>	1.11x10 <sup>-4</sup>	3x10 <sup>-1</sup>	3.97x10 <sup>-2</sup>
4x10 <sup>-5</sup>	0.00	4x10 <sup>-5</sup>	1.47x10 <sup>-4</sup>	4x10 <sup>-1</sup>	4.01x10 <sup>-2</sup>
5x10 <sup>-5</sup>	0.00	5x10 <sup>-5</sup>	1.47x10 <sup>-4</sup>	5x10 <sup>-1</sup>	4.22x10 <sup>-2</sup>
6x10 <sup>-5</sup>	0.00	6x10 <sup>-5</sup>	1.23x10 <sup>-4</sup>	6x10 <sup>-1</sup>	4.11x10 <sup>-2</sup>
7x10 <sup>-5</sup>	0.00	7x10 <sup>-5</sup>	1.72x10 <sup>-4</sup>	7x10 <sup>-1</sup>	3.63x10 <sup>-2</sup>
8x10 <sup>-5</sup>	0.00	8x10 <sup>-5</sup>	2.44x10 <sup>-4</sup>	8x10 <sup>-1</sup>	3.83x10 <sup>-2</sup>
9x10 <sup>-5</sup>	1.23x10 <sup>-5</sup>	9x10 <sup>-5</sup>	1.6x10 <sup>-4</sup>	9x10 <sup>-1</sup>	3.72x10 <sup>-2</sup>
1x10 <sup>-4</sup>	0.00	1x10 <sup>-2</sup>	2.22x10 <sup>-4</sup>	1.00	3.63x10 <sup>-2</sup>
2x10 <sup>-4</sup>	0.00	2x10 <sup>-2</sup>	2.78x10 <sup>-3</sup>	2.00	2.68x10 <sup>-1</sup>
3x10 <sup>-4</sup>	0.00	3x10 <sup>-2</sup>	3.07x10 <sup>-3</sup>	3.00	1.25x10 <sup>-1</sup>
4x10 <sup>-4</sup>	1.23x10 <sup>-5</sup>	4x10 <sup>-2</sup>	3.41x10 <sup>-3</sup>	4.00	6.4x10 <sup>-2</sup>
5x10 <sup>-4</sup>	1.23x10 <sup>-5</sup>	5x10 <sup>-2</sup>	3.38x10 <sup>-3</sup>	5.00	4.62x10 <sup>-2</sup>
6x10 <sup>-4</sup>	0.000	6x10 <sup>-2</sup>	3.43x10 <sup>-3</sup>	6.00	3.78x10 <sup>-2</sup>
7x10 <sup>-4</sup>	4.94x10 <sup>-5</sup>	7x10 <sup>-2</sup>	3.45x10 <sup>-3</sup>	7.00	2.82x10 <sup>-2</sup>
8x10 <sup>-4</sup>	0.00	8x10 <sup>-2</sup>	3.72x10 <sup>-3</sup>	8.00	2.01x10 <sup>-2</sup>
9x10 <sup>-4</sup>	0.00	9x10 <sup>-2</sup>	3.99x10 <sup>-3</sup>	9.00	1.38x10 <sup>-2</sup>
				10.00	7.95x10 <sup>-3</sup>
				20.00	6.41x10 <sup>-3</sup>
				30.00	0.00

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



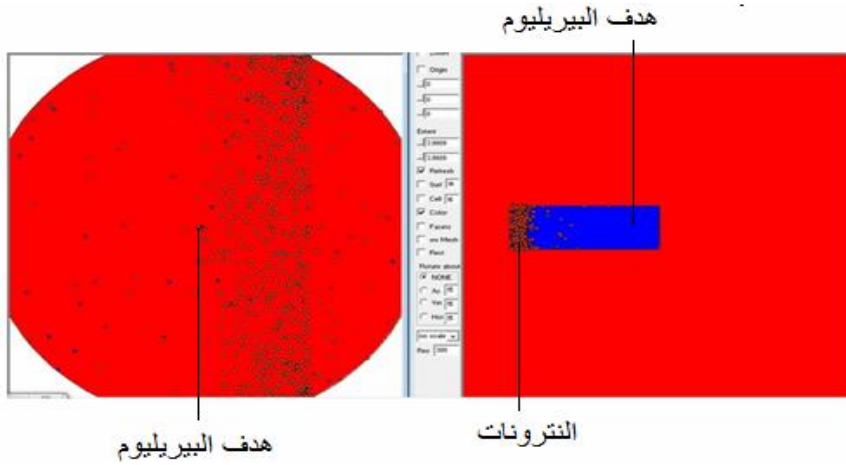
الشكل (3) يبين احتمالية التوزيع النتروني مع الطاقة للطيف النتروني الناتج من المنبع: يمثل المحور X الطاقة، أما المحور y فيمثل الاحتمالية.



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

تفقد 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  $0.00050\text{cm}$  إلى  $0.50\text{cm}$ )، وذلك نتيجة الانخفاض في طاقة هذه الجسيمات عند عبورها مادة الهدف إذ تتناسب قدرة الإيقاف عكساً مع مربع السرعة  $\left(\frac{dE}{dx} \approx \frac{1}{v^2}\right)$  وهذا ما يزيد من معدل إنتاج النيترونات نتيجة التفاعل  ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$  ضمن المجال المذكور لسماكة الهدف، وبعدها يلتقط البروتون الكترناً 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 النيتروني مع زيادة سماكة الهدف. كما أن هذه القيمة للناتج النيتروني الذي تم الوصول إليه عند حد الإشباع سوف تبقى شبه ثابتة ولن تتأثر بزيادة سمك الهدف بعد حد الإشباع، وهذا مرده إلى أن معظم النيترونات الناتجة سوف تتبعثر ضمن المجال  $(40^\circ-50^\circ)$  باحتمال أكبر منه من الاتجاه الأمامي (الزاوية  $0^\circ$ ) نتيجة تأثرها بسماكة الهدف (أي زيادة امتصاص النيترونات مع زيادة المسافة المقطوعة)، فقط ما يؤثر في هذه الحالة في الناتج النيتروني هو الزيادة في نصف قطر مادة الهدف.

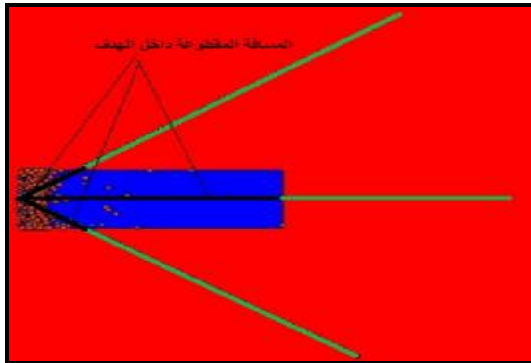
يبين الشكل (4) توزيع النيترونات الصادرة (اللون البني) عن هدف من البيريليوم (اللون الأزرق) سماكته  $3.0\text{cm}$  باستخدام رسام الكود MCNP5-BETA وبروتونات طاقتها  $E_p = 15.0\text{MeV}$ .



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

إذ يبين الجزء الأيمن من الشكل (4) توزيع 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 توزيع 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 لأنه 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 عمليتي الامتصاص والتبعثر على نوى البيريليوم.



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

أخذت مواصفات الهدف (البيريليوم) المقابلة لهذه القيمة لخفض الكلفة الاقتصادية للهدف (معدن البيريليوم النقي غال نسبياً) لاستخدامه كمنبع نتروني في المسرع من أجل الحصول على الكثافة النترونية المطلوبة لتصميم حزمة نترونية حرارية. إذ يوضع هدف البيريليوم داخل أنبوب من الألمنيوم (قطره 1 cm، وسماكته 1mm وطوله 39.5 cm) ويحاط بعكس أسطواني من البيريليوم قطره 30.0 cm وطوله 29.95 cm، وعاكس 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 يبين الشكل (3) احتمالية التوزع النتروني مع الطاقة للطيف النتروني الناتج من المنبع؛ وذلك للقيم الواردة في الجدول (3)، ومن الشكل نجد أن الطيف الطاقى للنترونات الخارجة عن التفاعل بمعظمه 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 لا بد من العمل على تبريد الهدف ولأن الكود MCNP-5C لا يؤمن إمكانية دراسة انتقال الحرارة، كان لا بد 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 المدروسة. تتألف منظومة التبريد من قناة اسطوانية تحيط بالهدف مصنوعة من النحاس، سماكة جدرانها 1mm كما هو مبين بالأشكال (6,7,8). وقد اختير النحاس لأن إصاليته الحرارية عالية ويعبء من أفضل المعادن المستخدمة لنقل الحرارة.

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

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

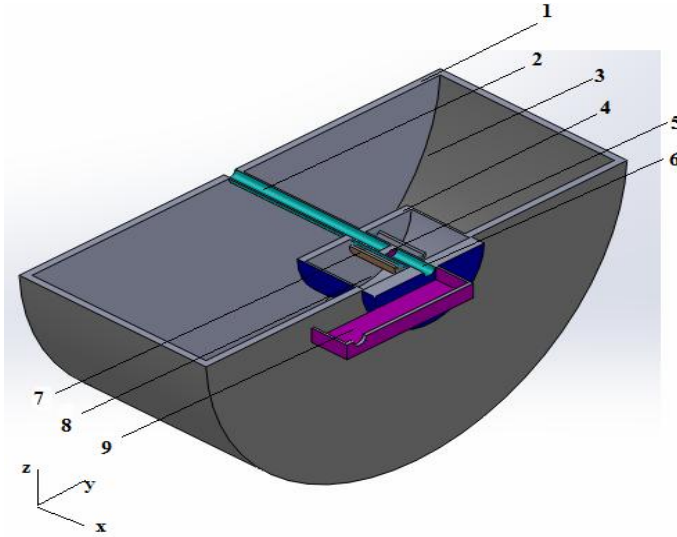
يوضح الجدول (4) البارامترات الأساسية لكل من المبرد والهدف المأخوذة من النمذجة باستخدام برنامج Solid Works Simulation 2012.

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

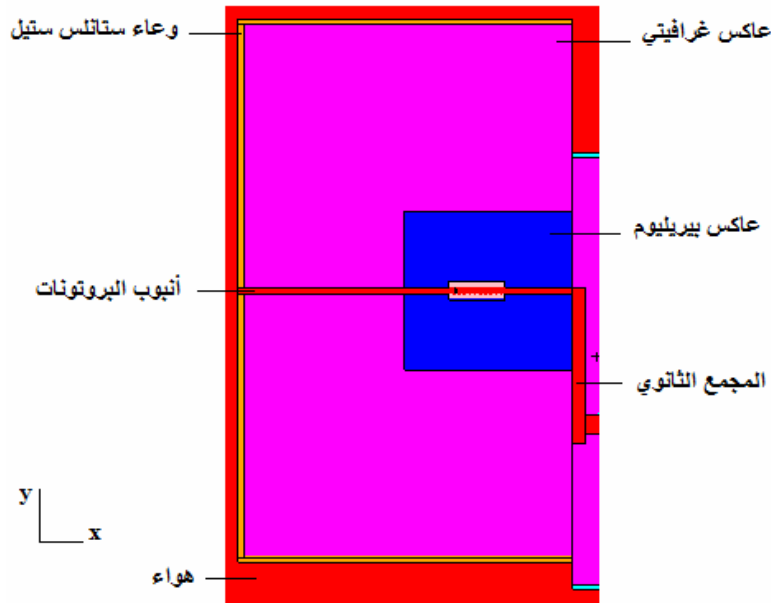
الجدول (4) تغيّر درجة الحرارة لكل من الهدف والمبرد، والسرعة العظمى للماء وانخفاض الضغط كتابع لمعدل تدفق المبرد من أجل بروتونات بطاقة 15 MeV وشدة 200  $\mu\text{Am}$

$\Delta P$ (kPa)	$V_{\text{max}}$ (m/s)	$T_f$ (K)	$T_s$ (K)	$\dot{m}(\frac{\text{kg}}{\text{sec}})$
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

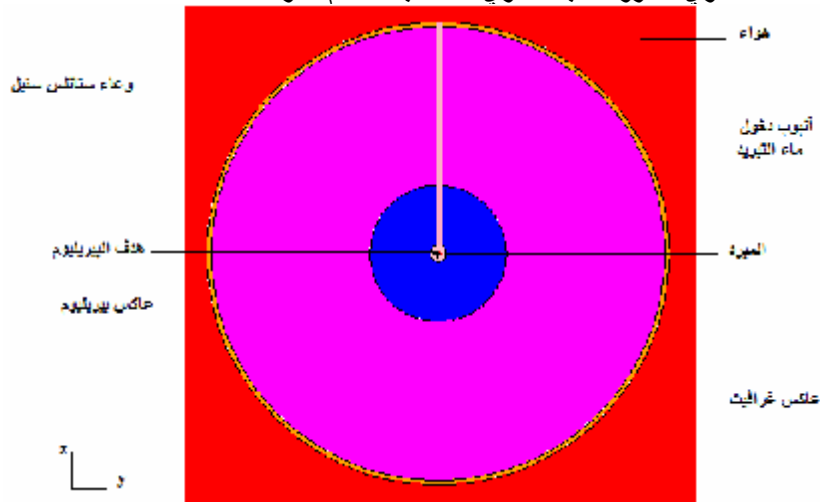
من الجدول السابق تتغير درجة حرارة الهدف مع تغيير تدفق الماء الداخل إلى قناة التبريد، ومن أجل إبقاء درجة حرارة الهدف أقل من 500K لابد من تأمين تدفق أكبر من 1.5 kg/sec.



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



الشكل (7) مسقط أفقي في المستوي x-y لحزمة البروتونات، والهدف (هدف البيريليوم)، وأنبوب الألمنيوم مع حزمة البروتونات، والعاكس المحيطة بالهدف والمجمع الثانوي للنترونات بالمستوي X-Y باستخدام الكود MCNP5-BETA.



الشكل (8) مسقط عامودي في المستوي 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

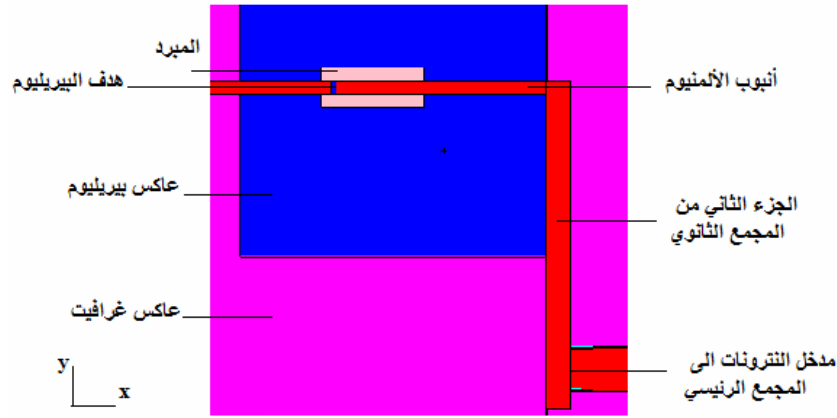
بعد أن حُسبت كل من الكثافة النترونية وطيف النترونات الصادر عن هدف من البيريليوم كما هو موضح بالجدولين (2) و(3). حددت الأبعاد الهندسية لمنظومة الحزمة النترونية (مثل: الأبعاد الهندسية للعواكس المحيطة بالهدف، أبعاد المجمع الثانوي والرئيسي للنترونات فضلاً عن أبعاد فتحة دخول النترونات إلى المجمع الرئيسي للنترونات)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

### 1- المجمع الثانوي للنترونات.

يعمل المجمع الثانوي للنترونات على تجميع النترونات الصادرة عن هدف البيريليوم وتوجيهها إلى فتحة دخول النترونات إلى المجمع الرئيسي للنترونات، كما هو مبين بالأشكال (6,7,9)، ويتكون من جزأين أساسيين هما:

الأول: وهو عبارة عن أنبوب أسطواني من الألمنيوم سماكة جدرانه 1.00mm وقطره 1.0 cm طوله 20.55cm يحيط بهذا الأنبوب عاكس من البيريليوم طوله 29.95cm وقطره 30.0 cm لخفض تبعثر النترونات وتوجيهها باتجاه فتحة الجزء الثاني من المجمع. وأحيط هذا العاكس من الجهة الأمامية (جهة حركة النترونات) بطبقة من الرصاص سماكتها 5.0 cm وقطرها 100 cm 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).

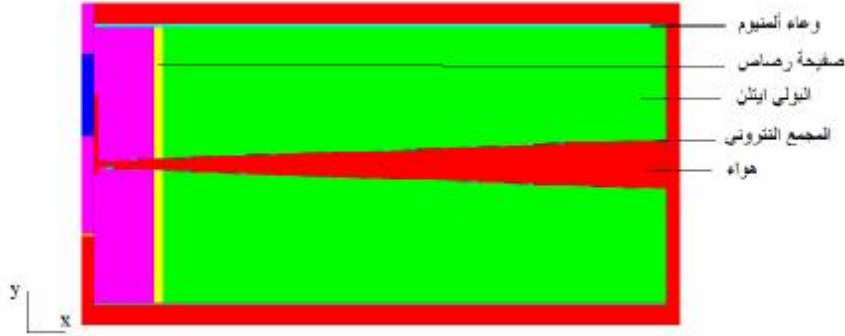
أما الجزء الثاني من المجمع الثانوي للنترونات فهو عبارة عن فراغ هوائي داخل عاكس الغرافيت له شكل متوازي مستطيلات مقطعه مستطيل أبعاده (2.45cm) على المحور x و 5.0 cm على المحور z، أما طوله على المحور y فهو 29.0 cm كما هو مبين بالأشكال (9) و(6) مهمته توجيه النترونات إلى مدخل المجمع الرئيسي، كما أنه يؤدي دوراً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



الشكل (9) مسقط أفقي في المستوي x-y لهدف البيريليوم، أنبوب الألمنيوم والجزء الثاني من المجمع الثانوي وفتحة دخول النيوترونات إلى المجمع الرئيسي باستخدام الكود .MCNP5-BETA

## 2- المجمع الرئيسي للنيوترونات.

يعرف هذا المجمع بأنه المسافة  $L$  بين فتحة دخول النيوترونات ومستوي التصوير، ويتألف من مخروط أسطواني الشكل مقلوب كما هو موضح بالشكل 10 طوله 330.0 cm وسماكة جدرانه 1.00 mm من الألمنيوم. الأبعاد الهندسية لقاعدته السفلية مساوية لأبعاد فتحة دخول النيوترونات إليه، أي مساوية إلى  $D = 3.0$  cm كما هو مبين بالشكل (9)، وأبعاد قاعدته العلوية مساوية لأبعاد فتحة خروج النيوترونات منه  $d = 18.0$  cm كما هو مبين بالشكل (11). وضع هذا المخروط ضمن أنبوب من الألمنيوم قطره 100.0 cm وسماكة جدرانه 1.0 cm وطوله 332.95 cm وقد ملئ الفراغ بين الجدران الخارجية لهذا المخروط والجدران الداخلية لأنبوب الألمنيوم بمادة البولي إيثيلين الممزوجة مع البور بنسبة 4.0% لامتصاص النيوترونات الحرارية المشتتة نتيجة تفاعلات النيوترونات مع مواد الحزمة ومنع وصولها إلى مستوي التصوير بغية الحد من ضبابية الصورة الناشئة عن النيوترونات الحرارية المتجانسة الطاقة، إذ تمتلك هذه النيوترونات طاقات متعددة، وهذا يؤثر سلباً في تباين الصورة.



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



الشكل (11) مقطع أفقي في المستوي 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:

1. 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 التشويه 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 التشويه صغيراً، وبغية الحصول على تدفق نتروني من مرتبة  $10^5 \text{ n/cm}^2.\text{s}$



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

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

إذ:  $\phi_{\text{ther}}$  - تدفق النترونات الحرارية.

$D_{\gamma}$  - جرعة أشعة غاما عند خرج المجمع الرئيسي للنترونات (مستوى التصوير).

mR - ميلي ريم (واحدة الجرعة).

لتقدير هذه الوسطاء و الأبعاد الهندسية لكل من المجمع الثانوي و الرئيسي للنترونات و موضع فتحة دخول النترونات إلى المجمع الرئيسي. أجريت نمذجة منظومة الحزمة النترونية بشكل كامل باستخدام الكود MCNP5-BETA مع كثافة نترونية و فوتونية من مرتبة  $7.864 \times 10^{12}$  n/s و  $3.071 \times 10^{11}$  ph/s على الترتيب، وقسم المجال الطاقوي للنترونات إلى ثلاث مجموعات طاقية، هي: حرارية  $0.3 \text{ eV} <$ ، و فوق حرارية  $(0.30 \text{ eV} - 10.0 \text{ keV})$  وسريعة  $(10.0 \text{ keV} > [1])$ .

ونتيجة الأمثلة باستخدام الكود MCNP5-BETA وتشغيله مرات عديدة تم الحصول على الأبعاد الهندسية لكل من المجمع الثانوي، والرئيسي للنترونات، والعاكس المحيطة 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، والنسبة  $\phi_{\text{ther}}/D_{\gamma}$  ومحتوى الحزمة من النترونات الحرارية بالجدول (5).

الجدول (5) المواصفات النترونية للحزمة المصممة.

Thermal neutron flux (n/cm <sup>2</sup> .s)	$(1.09 \pm 0.006) \times 10^5$
Epithermal neutron flux (n/cm <sup>2</sup> .s)	$(9.24 \pm 0.01) \times 10^3$
Fast neutron flux (n/cm <sup>2</sup> .s)	$(2.87 \pm 0.02) \times 10^3$
$\phi_{\text{ther}}/D_{\gamma}$ (n/cm <sup>2</sup> .mR)	$1.6 \times 10^8$
TNC %	%90
2 $\theta$ (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 المستوي نفسه، وهذه الأحرف هي اختصار لجملة Thermal Neutron Content (TNC).

2 $\theta$  - زوايا انفراج الحزمة النترونية و تحسب من العلاقة الآتية [1]:

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

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:

*PAR* - نوع الجسيم وتأخذ الرقم واحد ويعني النترونات.

*POS* - إحداثيات مركز سطح الهدف من جهة حزمة البروتونات.

*ERG* - التوزع الطاقوي 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 (0 - 0.50) cm.

*Wgt* - تدفق النترونات الصادر عن المنبع وواحدته (n/cm<sup>2</sup>.sec).

*D1* - بطاقة التوزع الطاقوي للنترونات.

*D2* - بطاقة تغيير نصف قطر الهدف.

2. الطيف النتروني (الجدول 3) المحسوب من الكود *MCNPX* باستخدام هدف من البيريليوم نصف قطره 0.5cm وسماكته 0.50 cm وحزمة البروتونات صادرة عن المسرع (قطرها 1cm وطاقاتها 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 غاما 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 و Y عند مستوى التصوير. وتعطى القيم المحسوبة لتدفق النترونات الحرارية عند نهاية المجمع الرئيسي للنترونات بالجدول (6).

بينما يعطي الجدول (7) القيم المحسوبة لتدفق النيوترونات الحرارية والفوق حرارية والسريعة عند نقاط مختلفة على طول المحور (x) بدءاً من المنبع النيوتروني (هدف البيريليوم) وصولاً إلى مستوي التصوير.

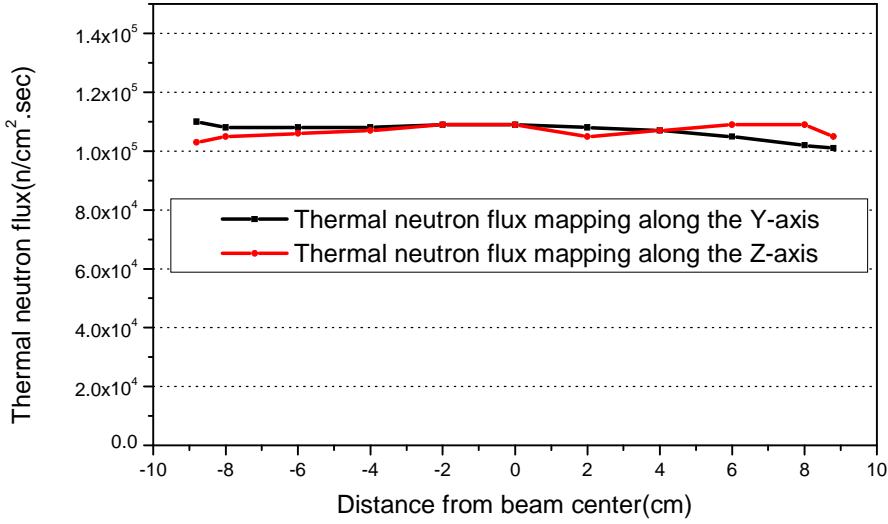
الجدول (6) القيم المحسوبة لتدفق النيوترونات الحرارية وفق المحورين Z و Y عند مستوي التصوير.

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

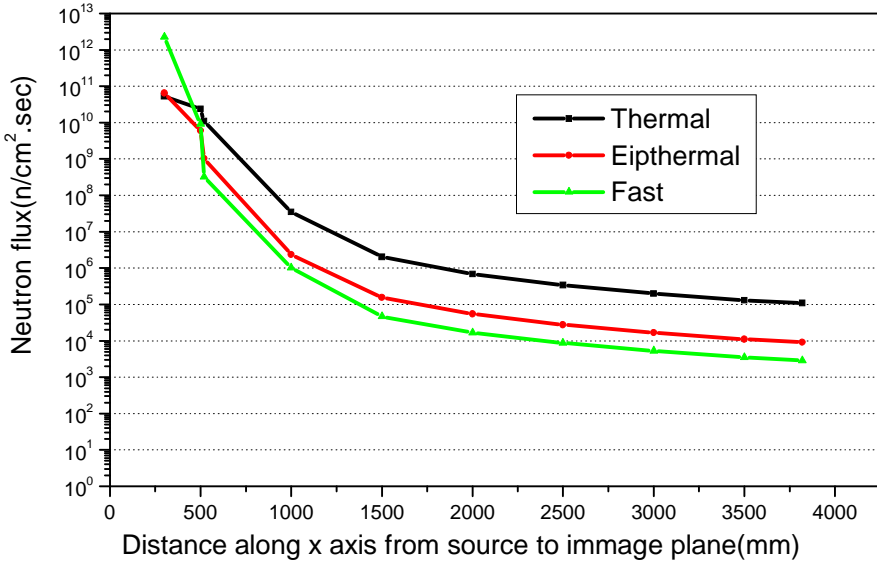
الجدول (7) القيم المحسوبة لتدفق النيوترونات الحرارية والفوق حرارية والسريعة على طول المحور (x).

$x_{axis} (mm)$	520	1000	1500	2000	2500	3000	3500	3820
$\varphi_{th} \left( \frac{n}{cm^2 \cdot sec} \right)$	1.09x10 <sup>10</sup>	3.45x10 <sup>7</sup>	2.02x10 <sup>6</sup>	6.91x10 <sup>5</sup>	3.38x10 <sup>6</sup>	1.98x10 <sup>5</sup>	1.30x10 <sup>5</sup>	1.09x10 <sup>5</sup>
$\varphi_{eipth} \left( \frac{n}{cm^2 \cdot sec} \right)$	1.03x10 <sup>9</sup>	2.37x10 <sup>6</sup>	1.56x10 <sup>5</sup>	5.45x10 <sup>4</sup>	2.78x10 <sup>4</sup>	1.67x10 <sup>4</sup>	1.11x10 <sup>4</sup>	9.24x10 <sup>8</sup>
$\varphi_{fast} \left( \frac{n}{cm^2 \cdot sec} \right)$	3.17x10 <sup>8</sup>	1.02x10 <sup>6</sup>	4.66x10 <sup>4</sup>	1.67x10 <sup>4</sup>	8.67x10 <sup>8</sup>	5.27x10 <sup>8</sup>	3.53x10 <sup>8</sup>	2.87x10 <sup>8</sup>

يبين الشكلان (12) و (13) توزيع تدفق النيوترونات الحرارية في المستوي Y-Z عند مستوي التصوير (نهاية المجمع الرئيسي للنيوترونات)، وتدفق النيوترونات الحرارية، وفوق الحرارية والسريعة على طول الحزمة النيوترونية بدءاً من المنبع وحتى مستوي التصوير.



الشكل (12) توزع تدفق النوترونات الحرارية على طول المحور y والمحور Z عند خرج المجمع الرئيسي (مستوي التصوير) للنوترونات.



الشكل (13) توزع تدفق النوترونات الحرارية، فوق الحرارية، والسريعة على طول محور مجمع النوترونات بدءاً من المنبع وحتى نهاية المجمع الرئيسي للنوترونات (مستوي التصوير) (يعاد الحساب بدءاً من المنبع).

### النتائج والمناقشة

تعطى القيم المحسوبة لكل من تدفق النيوترونات الحرارية، والنسبة المئوية للقيمة TNC، والنسبة  $\phi_{\text{ther}}/D_{\gamma}$  وزاوية انفراج الحزمة عند خرج المجمع الرئيس للنيوترونات بالجدول (5).

نلاحظ من هذا الجدول:

1. أن القيمة الوسطى لتدفق النيوترونات الحرارية عند مستوي التصوير هي من مرتبة  $10^5$  n/s. تعدّ هذه القيمة كافية لاستخدامها في التصوير بالنيوترونات الحرارية، إذ يعطى تدفق النيوترونات الحرارية المستخدمة في التصوير من مرتبة  $(10^4-10^6)$  n/s [1,2].

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

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

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

يبين الشكل (12) توزيع تدفق النيوترونات الحرارية المحسوب باستخدام الكود MCNP5- BETA وفق المحورين Z and Y عند خرج المجمع. نلاحظ توافقاً جيداً بين القيم المحسوبة لتدفق النيوترونات الحرارية وفق المحورين Z and Y ويعطى الفرق الأعظم بين القيم المحسوبة بنحو 8%. التجانس الجيد بين القيم المحسوبة لتدفق النيوترونات 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 وبيّن 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.

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

### الاستنتاج

استخدم الكودان MCNP5-BETA و MCNPX لنمذجة التفاعل  ${}^9\text{Be}(p,n)$  في مسرع السيكلترون السوري، ولحساب طيف النترونات الصادر عن هذا التفاعل، ولإجراء الحسابات النترونية اللازمة لتصميم حزمة نترونية حرارية لاستخدامها في التصوير بالنترونات الحرارية في المسرع السوري.

بلغت قيمة تدفق النترونات الحرارية عند خرج المجمع الرئيسي للنترونات القيمة:  $1.09 \times 10^5$  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 لتخفيض طاقة النترونات السريعة ولامتصاص أشعة غاما في التصميم خلافاً للعديد من التصاميم المعتمدة، وهذا يخفف الكلفة الاقتصادية للعمل، ويجعل إمكانية تطبيقه في المسرع ممكناً.

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

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

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

إن مبادئ تصميم الحزمة النترونية هي واحدة في المراجع العلمية العالمية كلّها، وتُصمّم الحزمة بحسب الهدف من استخدام هذه الحزمة، أي تطبيقاتها. أمّا الجديد في هذا العمل فهو تصميم حزمة نترونية على المسرع السوري، إذ لم يتم أحد بإجراء حساب تصميمي على المسرع السوري (أو على أي مسرع مشابه للمسرّع 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 لا بد من تقصي إمكانيّة 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.](http://www.springeronline.com/series/5267.particle%20Acceleration%20and%20detection)
7. <http://homepage.univie.ac.at/manfred.drosg/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.