

تصميم حزمة نترونات باردة في المفاعل TRIGA MARK_II_2MW باستخدام الكود MCNP4C2

د. اسماعيل شعبان*

د. عدنان أحمد**

أحمد محمد***

(تاريخ الإيداع 2022 /10/2 – تاريخ النشر 2022 /11/17)

□ ملخص □

استخدم الكود MCNP4C2 ومكتبة المقاطع العرضية ENDF/B-VII لأمثلة الأبعاد الهندسية والنترونية لحزمة نترونية باردة في المفاعل TRIGA MARK-II-2MW. وقسم المجال الطاقى للنترونات إلى أربعة مجموعات طاقة هي: نترونات باردة (0.005-0.025) eV، وحرارية (0.025_0.30) eV، وفوق حرارية (0.30eV_10KeV) وسريعة (>10 KeV). واستخدمت المرشحات التالية: البيريليوم (Be)، والألمنيوم (AL)، والهيدروجين السائل (LH) لتهدئة النترونات السريعة، والبيزموت (Bi) لتخفيض أشعة غاما. بلغت قيمة تدفق النترونات الباردة المحسوبة وجرعة أشعة غاما عند خرج المجمع الرئيسي للقناة القيم 1.459×10^5 n/cm².s و 4.136 Gy/hr على الترتيب من أجل النسبة $L/D = 200$ حيث L طول المجمع الرئيسي للنترونات D قطر فتحة دخول النترونات إلى المجمع الرئيسي.

الكلمات المفتاحية: قناة نترونية، نترونات باردة، مفاعل البحث TRIGA MARK_II_2MW والكود MCNP4C2.

* عضو هيئة تدريسية- قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة طرطوس

** عضو هيئة تدريسية- قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة طرطوس

*** طالب ماجستير - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة طرطوس

Design of a cold neutrons beam at the TRIGA MARK_II _2MW reactor by using the code MCNP4C2

D.Ismail Shaaban*

D.Adnan Ahmad**

Ahmad Mohamad***

(Received 2/10/2022.Accepted 17/11/2022)

□ABSTRACT □

The MCNP4C2 code and ENDF/B-VII cross-section library were used to optimize the neutronic and geometric parameters of the cold neutron beam in the TRIGA MARK-II reactor. The energy range of neutrons was divided into four groups: cold (<0.025) eV, thermal (0.025_0.30) eV, epithermal (0.30 eV_10KeV) and fast (>10 KeV). The filters such as: beryllium (Be), aluminum (AL) and liquid hydrogen (LH) were used to moderated the neutrons. In addition, the bismuth (Bi) was used to reduce the gamma ray. The calculated value of the cold neutron flux and the gamma dose at the main collector exit of the beam was 1.459×10^5 n/ cm².s and 4.136 Gy/hr respectively for the ratio L / D = 200 (where: L is the length of the main collector of neutrons and D is the diameter of the neutronic aperture).

Key words: Neutronic beam, cold neutrons , TRIGA – MARK_ II_2MW reactor and MCNP4C2 code.

* Lecture – Department of physic – Sciences faculty – Tartous University.

** Lecture – Department of physic – Sciences faculty – Tartous University.

*** Master of student - Department of physic – Sciences faculty – Tartous University.

1. المقدمة:

تمتلك النترونات الباردة أهمية كبيرة في مجالات علمية مختلفة مثل: دراسة البنية الداخلية للمواد بعد تعرضها للإجهادات الميكانيكية المختلفة أو لجرعات إشعاعية عالية، ودراسة تشوهات تصنيع المواد والخلائط من خلال معرفة توزع الذرات ضمن الشبكة البلورية، وفي دراسة نشاط الخلايا الحية وكيفية عملها ودراسة أمراض النباتات، ودراسة الوقود النووي من خلال كشف التشوهات في التصنيع وتوزع ذرات الوقود غير المتماثلة ضمن البنية البلورية للوقود، ودراسة النفايات النووية الناتجة عن الوقود المستحرق لمعرفة النظائر وتوزعها ومعرفة التشوهات التي تعرض عليها الوقود نتيجة درجات الحرارة العالية والضغط أثناء عمل المفاعل، واختبار مدى فعالية قضبان التحكم في المفاعلات، وفي دراسة التشوهات أو الإخلاعات الذرية التي تحدث في توربينات المحطات الكهربائية وفي دراسة التشوهات الناتجة في محركات وتوربينات الطائرات، وفي دراسة انتشار غاز الهيدروجين في المعادن وعلم الآثار، [1],[2] وبما أن النترون لا يمتلك أي شحنة كهربائية وبالتالي لديه قدرة عالية على التغلغل ضمن البنية البلورية للمواد. وتتميز النترونات الباردة عن غيرها من النترونات بقدرتها على التفاعل مع العناصر الخفيفة مثل: الليثيوم (Li) والبور (B)، والهيدروجين (H) لامتلاك هذه المواد مقطع عرضي كبير للنترونات الباردة ومعامل توهين منخفض لأشعة غاما، [1],[2], [3],[4]. وللتصوير بالنترونات الباردة أهمية كبيرة نتيجة تمكننا من قياس تدفق النترونات العابرة للعينة المدروسة لها وفق بعدين. وتتفاعل النترونات مع المادة بشكل مختلف عن تفاعل أشعة غاما وأشعة X ولذلك فإن الصورة المتشكلة مختلفة أيضاً من حيث تباين التركيب الداخلي للمادة [3],[4]. وبما أن توهين أشعة X يتزايد بتزايد الكثافة الإلكترونية، بينما النترونات الباردة تكون متوهنة بالنسبة للعناصر الخفيفة مثل: البور، والهيدروجين والليثيوم وغيرها من المواد الأخرى بسبب تفاعل النترونات مع نوى هذه العناصر ولذلك يعتبر التصوير بالنترونات الباردة أداة مكملة لطريقة الفحص بأشعة غاما وأشعة X [3],[4],[5].

ونظراً لأهمية النترونات الباردة في المجالات العلمية كما ذكرنا سابقاً فقد تم في هذا البحث استخدام الكود MCNP4C2 ومكتبة المقاطع العرضية ENDF/B-VII في أمثلة تصميم حزمة نترونية باردة في المفاعل TRIGA MARK_II_2 MW بهدف الحصول على أفضل قيمة لتدفق النترونات الباردة عند خرج المجمع الرئيسي للنترونات وأخفض قيمة لجرعة أشعة غاما. حيث استخدمت المواد التالية: البيريليوم (Be) والألمنيوم (Al) والهيدروجين السائل (LH) لتهديئة النترونات السريعة، والبزموت (Bi) لتخفيض أشعة غاما.

2. أهمية البحث و أهدافه

تأتي أهمية هذا البحث من خلال زيادة الاستفادة من المفاعل TRIGA MARK_II_2 MW في الأغراض البحثية من خلال تطبيقات حزمة النترونات الباردة وفي استخدام طرق مونتج كارلو (الكود MCNP4C2) في تصميم حزمة نترونية باردة وأمثلة الوسطاء الهندسية والنترونية لها، بهدف الاستفادة من تطبيقاتها في المجالات المختلفة.

3. الطرائق و المواد

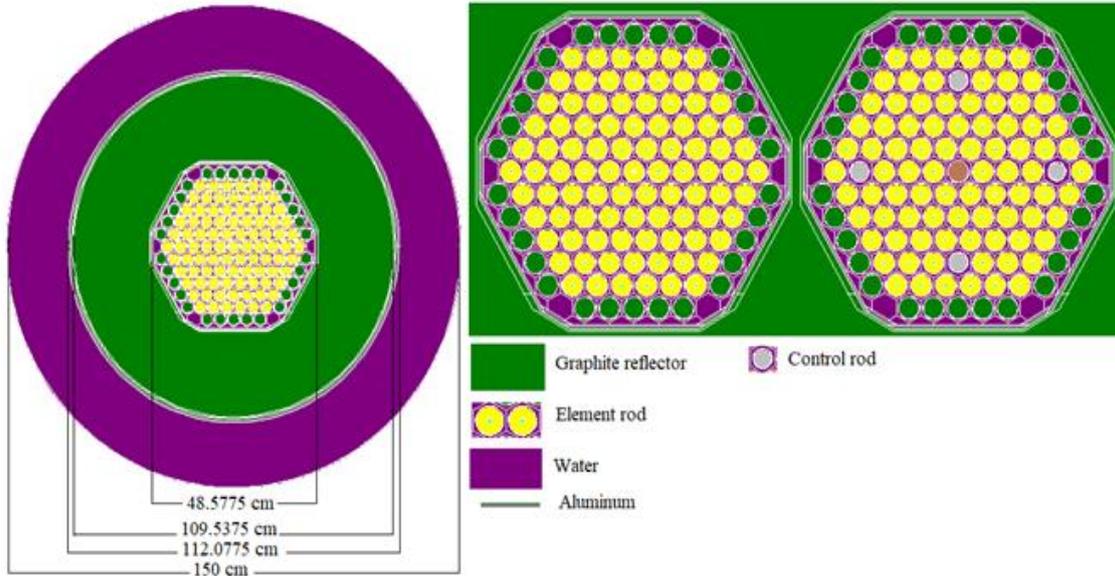
1.3 المفاعل TRIGA MARKII-2MW

تستخدم مفاعلات البحث في أغراض متعددة، كإجراء الأبحاث النووية والتصوير بالنترونات، وإنتاج النظائر المشعة وتطبيقات علمية مختلفة. ويعد المفاعل (TRIGA -2 MW Training Research and Isotop Production General Atomic) أحد مفاعلات الأبحاث المصممة لإجراء الأبحاث النووية التجريبية والتدريبية وإنتاج النظائر المشعة، والتصوير بالنترونات، ويصنف هذا المفاعل من مفاعلات الحوض المفتوح حيث يتموضع قلب المفاعل أسفل بركة ماء أسطوانية مفتوحة مصنوعة من الألمنيوم نصف قطرها 2.29m، وارتفاعها 7.47m حيث يعمل الماء كمبرد ومهدئ للنترونات وللوقاية من أشعة غاما [6] وتعطى مواصفات المفاعل بالجدول (1).

الجدول (1): أهم المواصفات للمفاعل TRIGA_MARK-II_2 MW [1]

| | |
|---|---------------------------|
| 2MW | القدرة التشغيلية |
| 10^{14} n/cm ² .sec | التدفق النتروني |
| TRIGA | نوع الوقود |
| U-ZrH | الوسيط المستخدم مع الوقود |
| 8.5-20wt% | النسبة الوزنية لليورانيوم |
| 20% | نسبة الإغناء |
| 38 cm | طول عنصر الوقود |
| 3.65 cm | قطر عنصر الوقود |
| 0.051cm-304ss | سماكة و نوع مادة الغلاف |
| 80-120 | عدد عناصر الوقود |
| 4-6 | عدد عناصر التحكم |
| 9.50\$ | المفاعلية |
| 10\$-18\$ | وثوقية قضبان التحكم |
| التبريد العادي كما في مفاعلات الحوض المفتوح | التبريد |

يتألف قلب المفاعل من 116 عنصر وقود أسطواني الشكل، وعنصر وقود احتياط، وأربع عناصر تحكم. وتتوضع عناصر الوقود والتحكم والاحتياط في 121 موقع داخل شبكة سداسية الشكل كما هو موضح في الشكل (1). ويحاط قلب المفاعل بعكس من الغرافيت المغلف بالألمنيوم (سماكة 1mm) ويبلغ نصف القطر الداخلي له 54.93cm وارتفاعه 55.56cm حيث يعمل كمهدئ وعاكس للنترونات كما يوضح الشكل (1) [1],[6].



الشكل (1): مقطع عرضي في قلب المفاعل TRIGA_MARK-II_2 MW باستخدام MCNP4C2

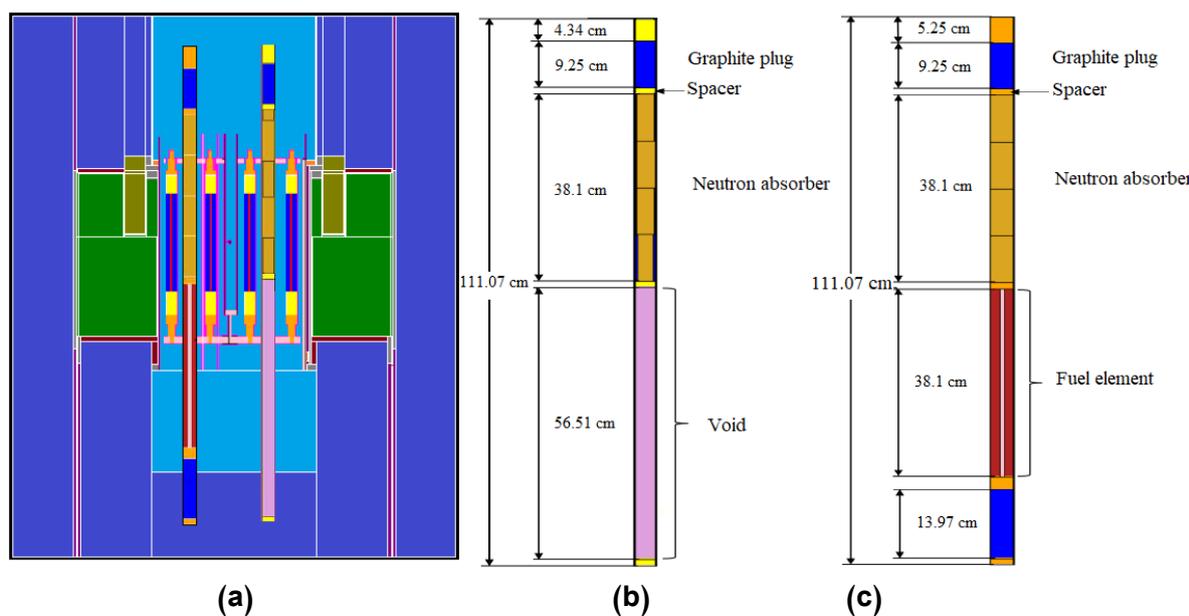
2.1.3 قضبان الوقود

يملك قضيب الوقود شكلاً أسطوانياً طوله 38.1 cm وقطره 3.63 cm. ويستخدم الوقود (U_ZrH) يورانيوم هيدريد الزركونيوم في المفاعل المذكور. حيث تبلغ النسبة الوزنية لليورانيوم 8% ونسبة التخصيب 20% باليورانيوم 235. ويغلق كل من طرفيه العلوي والسفلي بسدادة من الغرافيت طولها 8.7 cm وتتموضع في نهايتي كل قضيب لعكس النيوترونات نحو الوقود كما يوضح الشكل (2)، ويحاط قضيب الوقود والتحكم بغلاف من الستانلس ستيل من النوع SS304 سماكته 0.051 cm [1],[6].

3.1.3 قضبان التحكم

يتم التحكم في المفاعل عن طريق أربعة قضبان تحكم كما في الشكل (1) باستخدام المادة B_4C ، ثلاثة منها متماثلة التركيب و يتألف كل واحد منها من جزأين: الجزء الأول طوله 38.1 cm يحتوي على المادة B_4C والجزء الثاني يستخدم كعنصر وقود احتياطي بنفس مواصفات قضيب الوقود كما يوضح الشكل (2-c). ويتكون قضيب التحكم الرابع من جزأين: الجزء الأول يستخدم كعنصر تحكم، والجزء الآخر مفرغ من الهواء ويمثل بالمواصفات الهندسية عنصر الوقود لتخفيض التفاعلية عند اللزوم كما في الشكل

[1],[6](2-b).



(a) مقطع طولي في المفاعل

(b) قضيب وقود وهواء

(c) قضيب وقود وتحكم (احتياط)

الشكل (2): مقطع طولي في قلب المفاعل وقضبان التحكم والوقود

2.3 أمثلة الأبعاد الهندسية لحزمة النوترونات الباردة في المفاعل TRIGA-MARK II-2MW

باستخدام الكود MCNP4C2.

تتألف منظومة التصوير بالنوترونات الباردة من:

1. منبع نوترونات.
2. المجمع الأولي وفتحة القناة.
3. المجمع الرئيسي.
4. المرشحات (نوترونية وفوتونية).

1.2.3 منبع النوترونات

يعتبر المفاعل TRIGA_MARK_II_2MW منبعاً للنوترونات، حيث تبلغ قيمة تدفق النوترونات الحرارية في

قلب المفاعل القيمة $10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$.

يحسب عدد النوترونات المتولدة في قلب المفاعل من العلاقة (1) [7]

$$s = \frac{p \bar{\nu} \left[\frac{\text{neutron}}{\text{fission}} \right]}{1.6022 \times 10^{-13} \left[\frac{\text{J}}{\text{MeV}} \right] w_f \left[\frac{\text{MeV}}{\text{fission}} \right]} = 3.467 \times 10^{10} \times p \times \bar{\nu}$$

$$= 1.5 \times 10^{17} \text{ n/sec} \quad (1)$$

حيث

$p=2\text{MW}$ استطاعة المفاعل،

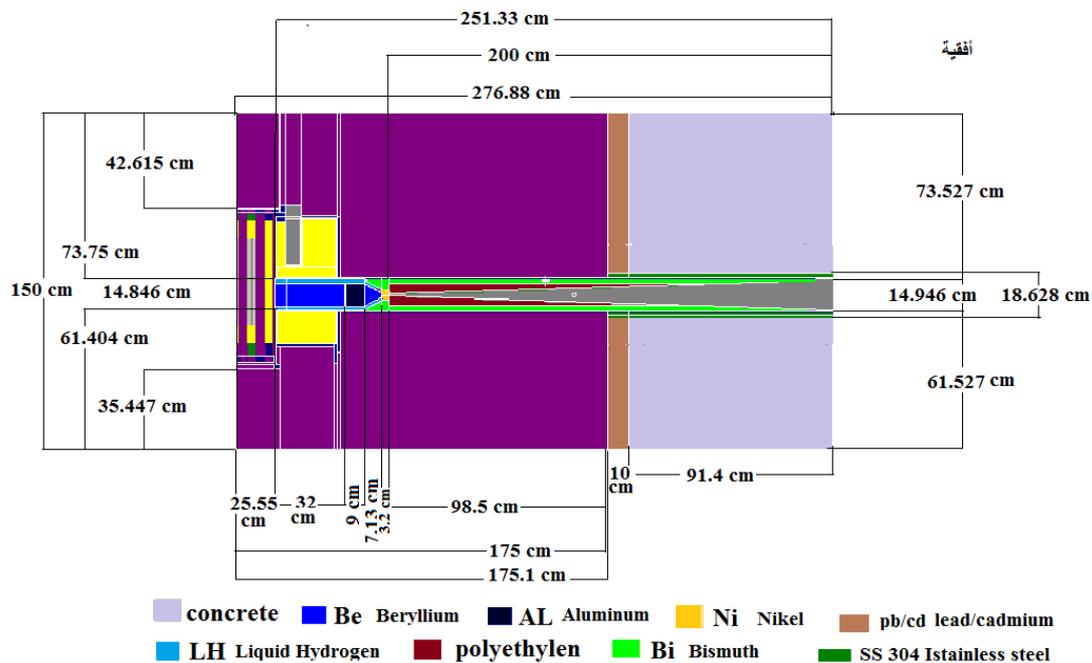
$\bar{\nu} = 2.43$ عدد النوترونات المتولدة في انشطار واحد،

$w_f = 200\text{MeV}$ الطاقة الناتجة عن انشطار واحد،

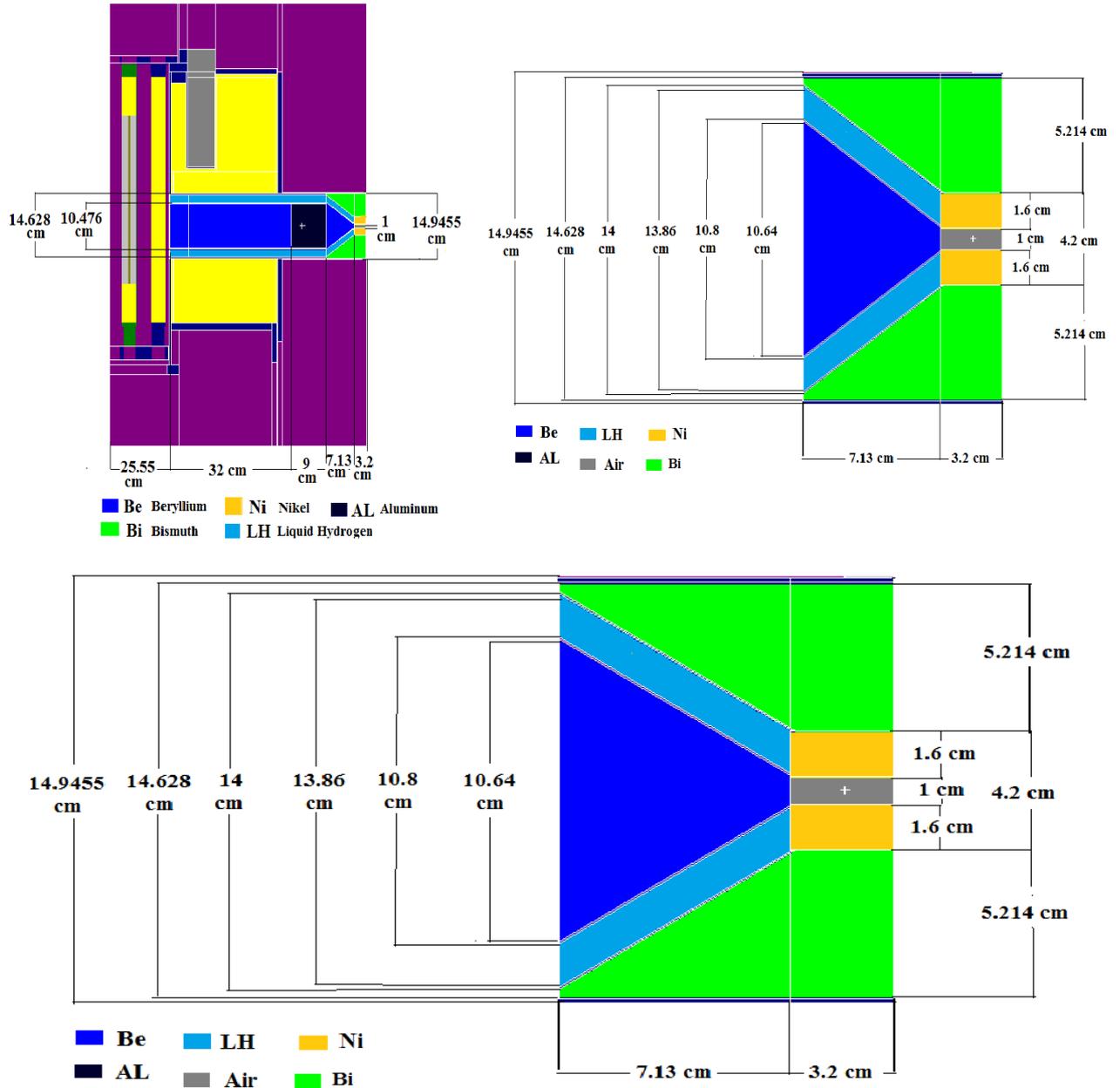
$1.6022 \times 10^{-13} \left[\frac{\text{J}}{\text{MeV}} \right]$ معامل تحويل من MeV إلى Joule.

2.2.3 المجمع الأولي وفتحة القناة

يتألف المجمع الأولي من جذع مخروط أبعاده: قطر قاعدته الصغرى 1 cm وقطر قاعدته الكبرى 10.64 cm وطوله 7.13cm وسماكة جداره 0.8 mm من الألمنيوم يملأ بالبيريليوم، ويتم تبريده بالهيدروجين السائل بسماكة قدرها 1.53 cm كما هو مبين في الشكل (4). وأدخل هذا المجمع ضمن اسطوانة من الألمنيوم قطرها 14.628 cm وارتفاعها 7.13 cm وسماكة جدارها 3 mm حيث يملأ الفراغ المتشكل بين جذع المخروط والاسطوانة بالزيموث لتخفيض شدة أشعة غاما كما هو موضح بالشكل (3). وتوجه النيوترونات إلى الفتحة النيوترونية التي هي عبارة عن أسطوانة من الهوا تلتصق بالقاعدة الصغرى للمجمع الأولي قطرها 1cm وطولها 3.2 cm وتغلف بسماكة قدرها 1.6 cm من النيكل لتخفيض طاقة النيوترونات الداخلة إلى المجمع الرئيسي. وتحاط نهاية المجمع الأولي وفتحة النيوترونات بسماكة قدرها 5.214 cm من الزيموث المغلف بـ 3mm من الألمنيوم كما يوضح الشكل (3) و(4).



الشكل(3): الحزمة النيوترونية الباردة مع الأبعاد كما تمت نمذجتها باستخدام MCNP4C2

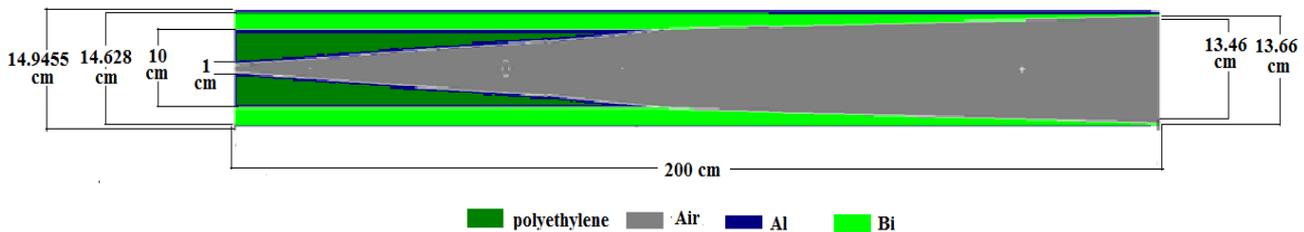
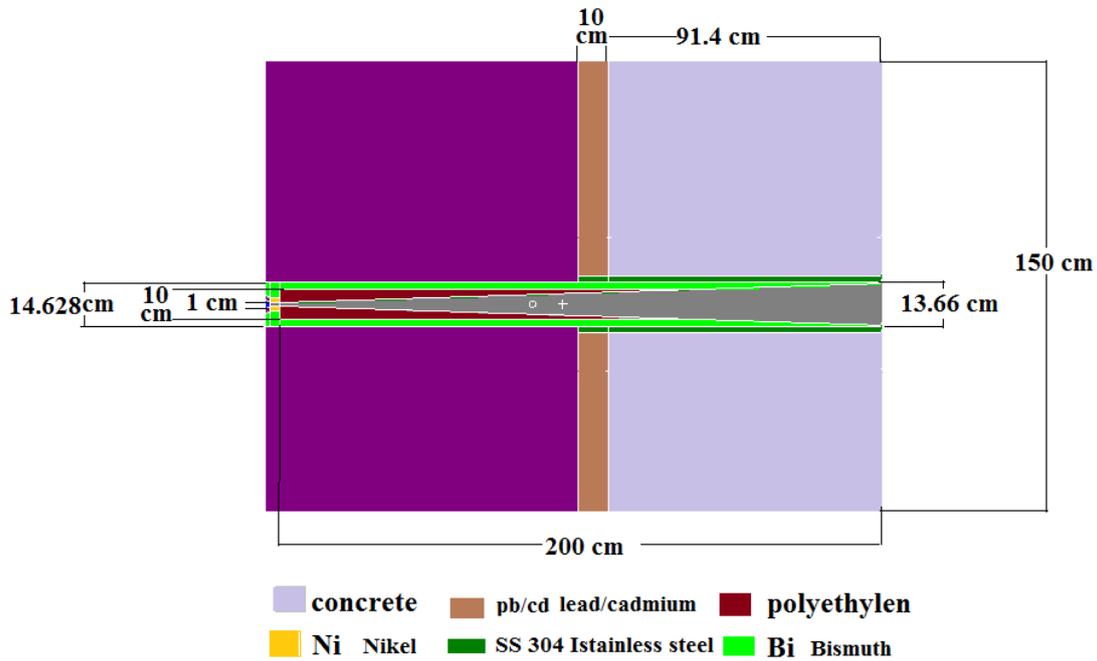


الشكل(4): المجمع الأولي وفتحة القناة

3.2.3 المجمع الرئيسي للنترونات:

يحدد بالمسافة ما بين فتحة دخول النوترونات إلى المجمع الرئيسي ونهاية خرج الحزمة. ويتألف من مقطع مخروطي منفرج طوله 200 cm وقطره 13.66 cm عند خرج الحزمة النوترونية وسماكة جداره 2mm من الألمنيوم. واستخدم المجمع الرئيسي للحزمة بشكل منفرج بعد الاستنتاج التي توصل إليه Barton [2] عام 1967 بأن مجمعات الحزمة المنفرجة تنتج تدفق نوتروني منتظم عند خرج الحزمة [3],[8]. وأدخل الجزء الأول من هذا المجمع داخل اسطوانة قطرها 10 cm من مادة البولي إيثيلين لامتصاص النوترونات الحرارية المتشكلة كنتيجة للتفاعل ما بين النوترونات ومواد الحزمة النوترونية كما هو موضح بالشكل (5) و(3). وأدخل المجمع والاسطوانة داخل أسطوانة أخرى قطرها 14.628 cm

وسماكة جدارها 3.175mm من الألمنيوم. وملئ الفراغ ما بين جدران اسطوانة الألمنيوم والجزء المخروطي المنفرج بمادة البزموت لامتصاص أشعة غاما.



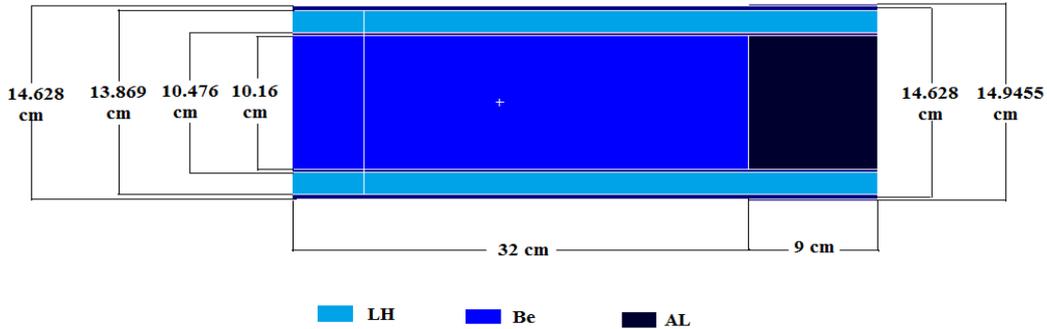
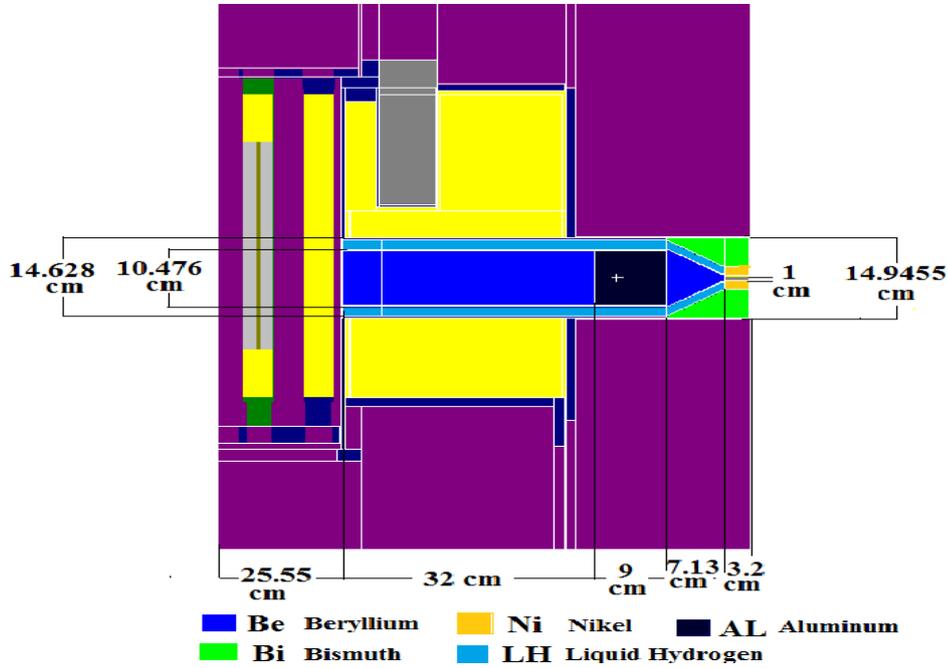
الشكل (5): المجمع الرئيسي للنترونات

أمثلنا الأبعاد الهندسية لكل جزء من أجزاء الحزمة النترونية باستخدام الكود MCNP4C2 للحصول على أعلى قيمة لتدفق النترونات الباردة وعلى قيمة مقبولة لجرعة أشعة غاما عند خرج الحزمة، وشغل الكود MCNP4C2 عدة مرات (استخدم في كل مرة 10000 جسيم) من أجل النسبة $L/D = 200$ (حيث: L طول المجمع الرئيسي للنترونات و D قطر فتحة دخول النترونات إلى المجمع الرئيسي).

4.2.3 المرشحات

مرشح النوترونات: يتألف من أسطوانة من البيريليوم طولها 32 cm واسطوانة من الألمنيوم طولها 9 cm، لهما نفس القطر البالغ 10.16 cm لتهدئة النوترونات السريعة ويحاطا بغلاف من الألمنيوم سماكته 1.58 mm وتبرد أسطوانة البيريليوم والألمنيوم باستخدام الهيدروجين السائل (LH-liquied Hydrogen) بسماكة 5.238 cm كما يوضح الشكل (6).

مرشح الفوتونات: يتكون من البزموت، حيث يتمتع بمقطع أسر عرضي للنوترونات أقل من مقطع الأسر العرضي للبرصا، ومعامل التوهين للبزموت بالنسبة لأشعة غاما مساوي تقريبا لمعامل التوهين للبرصا [2],[9]، ولذلك تم استخدام البزموت عند خرج المجمع الرئيسي والأولي للتخلص من أشعة غاما كما يوضح الشكلان (5) و(6)



الشكل (6): مرشح الحزمة النوترونية الباردة

3.3 حساب تدفق النيوترونات الباردة و جرعة أشعة غاما عند خرج المجمع الرئيسي للنيوترونات

استخدمت البطاقة F5: N,P لحساب تدفق النيوترونات الباردة Φ_{cold} ، والحرارية $\Phi_{thermal}$ وجرعة أشعة غاما $D\gamma$ عند خرج الحزمة حيث تمثل N النيوترونات و P الفوتونات. حيث تستخدم لحساب تدفق النيوترونات الذي يجتاز نقطة معينة تمثل بكرة إحداثيات مركزها (x,y,z) ونصف قطرها r، وتستخدم معها FM المحتوية على عدد النيوترونات المتولدة في قلب المفاعل لحساب التدفق الذي يجتاز النقطة المذكورة بوحدة $[n/cm^2.sec]$ وتعطى F5 بالمعادلة (2) [7].

$$F5 = \iint_{t E} \Phi(\vec{r}.E.t)dEdt = \iint_{t E} vN(\vec{r}.E.t)dEdt = \frac{Wvt}{V} = \frac{WT_1}{V} \quad (2)$$

حيث يمثل المقدار $\Phi(\vec{r}.E.t)$ تدفق النيوترونات $[n/cm^2.sec]$ ، و $N(\vec{r}.E.t)$ كثافة النيوترونات $[n/cm^3]$

و v سرعة النيوترونات $[cm/sec]$ ، و W الوزن الإحصائي للنيوترونات (نسبة عدد النيوترونات التي يمكن أن تعبر الخلية المدروسة والتي هي جزء من الحجم الإسمي للمنبع)، و t زمن الذي يستغرقه النيوترون لعبور الخلية $[sec]$ ، و T_1 طول الأثر النيوتروني $[cm]$ ، و V حجم الخلية المدروسة $[cm^3]$.

ويحسب التدفق النيوتروني بوحدة $[n/cm^2.sec]$ من خلال العلاقة (3) [7]

$$\Phi \left(\frac{neutron}{cm^2 sec} \right) = \frac{P \bar{v} \left[\frac{neutron}{fission} \right]}{1.6022 \times 10^{-13} \left[\frac{J}{MeV} \right] w_f \left[\frac{MeV}{fission} \right]} F_5 \left[\frac{1}{cm^2} \right] \quad (3)$$

حيث

$F_5 \left[\frac{1}{cm^2} \right]$ التدفق النيوتروني المحسوب باستخدام البطاقة F5 والتي تعطي عدد النيوترونات التي تجتاز وحدة السطح

[7]

$P = 2MW$ استطاعة المفاعل.

$\bar{v} = 2.43$ عدد النيوترونات المتولدة في انشطار واحد.

$w_f = 200MeV$ الطاقة الناتجة عن انشطار واحد.

$1.6022 \times 10^{-13} \left[\frac{J}{MeV} \right]$ معامل تحويل من MeV إلى Joul .

ولحساب كل من التدفقات النيوترونية الباردة Φ_{cold} والحرارية $\Phi_{thermal}$ وجرعة أشعة غاما $D\gamma$ قمنا بتشغيل الكود MCNP4C2 باستخدام 10000 جسيم في الثانية، حيث تم حسابهم عند خرج المجمع الرئيسي باستخدام الهيدروجين السائل كمبرد عند عدة درجات حرارة مختلفة. واستخدمت معاملات KERMA في حساب $D\gamma$ كما في الجدول (2). [10]

الجدول (2): تدفق النوترونات الباردة، والحرارية وجرعة أشعة غاما باستعمال المبرد LH

| Temperature T[K] | 20 | 60 | 77 | 100 | 295 |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Cold neutron flux Φ_{cold} [n/cm ² .sec] | 7.43×10^3 | 1.459×10^5 | 5.123×10^4 | 4.664×10^2 | 4.744×10^2 |
| mal neutron flux Φ_{thermal} [n/cm ² .sec] | 2.268×10^3 | 8.380×10^3 | 2.691×10^4 | 1.310×10^5 | 4.002×10^5 |
| Photon Dose D_γ [Gy/hr] | 2.58 | 4.136 | 3.46 | 2.341 | 3.517 |

4.3 حساب قيمة الطاقة المودعة في المرشحات

استخدمت البطاقة F6:N,P لتقدير قيمة الطاقة المودعة في واحدة الكتل من البيريليوم والهيدروجين السائل والألومنيوم والبزموت، والناجمة عن النوترونات السريعة وفوتونات أشعة غاما، حيث تعطي البطاقة F6 قيمة الطاقة المودعة بوحدة [MeV/gr] ويبدل الرمز N على النوترونات والرمز P على الفوتونات. ولحساب الطاقة بوحدة [Watt/gr] استخدم معامل التحويل 1.6×10^{-13} Watt/MeV كما هو موضح في المعادلة (4) و [7].

$$p \left[\frac{\text{Watt}}{\text{gr}} \right] = p \left[\frac{\text{MeV}}{\text{gr}} \right] \times S \times 1.6022 \times 10^{-13} \left[\frac{\text{Watt.sec}}{\text{MeV}} \right] \quad (4)$$

$$p \left[\frac{\text{MeV}}{\text{gr}} \right] (F6) = \rho_a / \rho_g \iiint_{V t E} \sigma_t \text{Havg}(E) \Phi(\vec{r}, E, t) dE dt \frac{dV}{V} \quad (5)$$

حيث

ρ_a الكثافة الذرية للمادة [atom/cm².barn]

ρ_g الكثافة الكتلية [gr/cm³]

$\text{Havg}(E)$ معدل الطاقة المنقولة إلى واحدة الكتل.

σ_t و مجموع المقاطع العرضية الميكروسكوبية للمادة .

ويوضح الجدول (3) الطاقات المودعة في الفلتر والناجمة عن النوترونات السريعة وأشعة غاما حيث بلغ مجموعها

466.5KW من أجل قدرة تشغيلية 2 MW .

الجدول (3): مساهمة النوترونات السريعة وأشعة غاما في الجرعة الإشعاعية الممتصة

| | LH (163.1gr) | AL (9234 gr) | Be (5180 gr) | Bi (25480 gr) |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Fast Neutron (KW) | 81.2 | 12.22 | 55.4 | 0.00494 |
| Gamma Rays (KW) | 16.94 | 59 | 169.6 | 72.4 |
| Total (KW) | 98.14 | 71.22 | 225 | 72.405 |

5.3 حساب زاوية انفراج الحزمة النوترونية الباردة

تحتسب زاوية انفراج الحزمة النوترونية الباردة من خلال العلاقة (6) [4] [11] التالية:

$$\tan \theta = \frac{0.5(R-D)}{L} \quad (6)$$

حيث تمثل θ نصف زاوية انقراج الحزمة النترونية الباردة، و R قطر الحزمة عند خرج المجمع الرئيسي و D قطر فتحة القناة، و L طول المجمع الرئيسي، ويلخص الجدول (4) زاوية انقراج الحزمة بالنسبة للمجمع الرئيسي .

الجدول (4): زاوية انقراج الحزمة النترونية الباردة بالنسبة للمجمع الرئيسي

| parameter | L (cm) | D (cm) | R (cm) | L/D | 2 θ (degree) |
|----------------|--------|--------|--------|-----|---------------------|
| المجمع الرئيسي | 200 | 1 | 13.64 | 200 | 3.62 |

الجدول(5): الوسطاء الهندسية والنترونية للحزمة النترونية الباردة عند $T=60k$

| طول المجمع الرئيسي L[cm] | قطر الحزمة R[cm] | قطر فتحة القناة D[cm] | L/D | زاوية انقراج الحزمة 2 θ [degree] | تدفق النترونات الباردة [n/cm ² .sec] | جرعة أشعة غاما [Gy/hr] |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|-----|--|--|---------------------------|
| 100 cm | 13.64 cm | 1 cm | 200 | 3.62 | 1.459×10^5 | 4.136 |

4. النتائج و المناقشة

أولاً : تمت أمثلة الوسطاء الهندسية والنترونية للحزمة الباردة، وتم استخدام الهيدروجين السائل LH كمبرد ومهدئ للنترونات، بالإضافة إلى البيريليوم والألمنيوم وكما هو ملاحظ من النتائج التي حصلنا عليها في الجدولين (5) و(2) أنه عند استخدام الهيدروجين السائل بدرجة حرارة 60k تكون قيمة تدفق النترونات الباردة 1.459×10^5 وقيمة تدفق النترونات الحرارية 8.380×10^3 ، حيث يكون محتوى النترونات الباردة (والذي يعرف بأنه قيمة تدفق النترونات الباردة ذات الطاقة $0.005eV$ عند خرج المجمع الرئيسي إلى قيمة تدفق النترونات الحرارية ذات الطاقة $(0.025-0.30)eV$) مساوياً إلى 1741%، وإن كبر هذه النسبة يعطي دلالة على أن الصورة المتشكلة ناتجة بشكل أساسي عن النترونات الباردة، كما أن قيمة تدفق النترونات الباردة التي حصلنا عليها مناسبة لاستخدام الحزمة النترونية الباردة في التصوير بالنترونات الباردة حيث تقترب هذه القيمة من قيمة تدفق النترونات الباردة التي تم الحصول عليها في عدة حزم باردة أخرى مثل حزمة المفاعل DIDO و MNRC والتي بلغت 3.3×10^5 n/cm².sec و 2.5×10^5 n/cm².sec على الترتيب [12]. ويمكن تفسير النسبة الكبيرة لمحتوى الحزمة الباردة عند درجة 60K بعدة أسباب:

١- تعطى العلاقة المعبرة عن كفاءة المرشح (قدرة المرشح على تحويل النترونات الحرارية إلى نترونات

باردة بعد عبورها مسافة معينة منه) بالعلاقة (7) [13]

$$R = \sigma_a + \sigma_{inc} + \sigma_{inel}/\sigma_{tot} \quad (7)$$

حيث يمثل σ_a المقطع العرضي الميكروسكوبي الامتصاصي للنترونات و σ_{inc} المقطع العرضي الميكروسكوبي للتشتت المتماثل و σ_{inel} المقطع العرضي الميكروسكوبي للتشتت اللأمرن و σ_{tot} المقطع العرضي الميكروسكوبي الكلي، حيث تزداد كفاءة المرشح بانخفاض قيمة R ، كما وتعطى علاقة المقطع العرضي الميكروسكوبي الامتصاصي للنترونات بتابعية درجة حرارة المرشح بالعلاقة (8) [14]

$$\sigma_a = \sigma_{a(293)} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(\frac{293}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

حيث يمثل $\sigma_{a(293)}$ المقطع العرضي الميكروسكوبي الامتصاصي للنترونات عند درجة حرارة 293K و T درجة حرارة مادة المرشح مقدرة بالكلفن. ومن الملاحظ من العلاقتين (7) و(8) أن انخفاض درجة حرارة المرشح يؤدي إلى زيادة المقطع العرضي الميكروسكوبي الكلي بسبب زيادة المقطع العرضي الميكروسكوبي الامتصاصي حيث يكون تأثير المقطع العرضي الميكروسكوبي

الكلية أكبر من تأثير المقطع العرضي الميكروسكوبي الامتصاصي في العلاقة (7) وهذا يخفض من قيمة R أي يزيد من كفاءة المرشح وهذا ما يفسر زيادة محتوى الحزمة الباردة بانخفاض درجة حرارة المرشح حتى يصل إلى أفضل قيمة عند 60K وهي درجة حرارة الهيدروجين السائل، كما أنه يخفض من قيمة المقطع العرضي الميكروسكوبي للتشتت اللأمرن الناتج عن تبعثر النوترونات مع فونونات الشبكة البلورية [13]. وعند تبريد المرشح إلى درجة حرارة 20K تنقل المسافة بين المستويات البلورية d_{hkl} لبلورة البيريليوم وهذا يؤدي إلى انخفاض قيمة المقطع العرضي لتشتت براغ، وما نحتاج إليه في المرشح هو أن يكون لمادة المرشح مقطع عرضي ميكروسكوبي كبير لتشتت براغ بالنسبة للنوترونات السريعة، وهذا ما يتوفر في البيريليوم حيث تمتلك النوترونات ذات الطاقة الأعلى من 0.005eV والتي يبلغ طول موجتها 4A مقطع عرضي كبير لتشتت المرن يبلغ حوالي 7.5barn عند درجة حرارة 300K ثم ينخفض فجأة إلى الصفر تقريبا من أجل النوترونات ذات الطاقة الأقل من 0.005eV، وهكذا عندما تجتاز النوترونات ذات الطاقة الأعلى من 0.005eV مسافة معينة من المرشح سنحصل في نهايته على نوترونات تساوي طاقتها 0.005eV أو أقل، ولذلك نسمي الطول الموجي الموافق للطاقة 0.005eV طول موجة القطع والذي يبلغ حوالي $\lambda_c = 4A$ وإن شرط حدوث تشتت براغ هو $d_{hkl} \geq \lambda_c/2$ [15] ، وهكذا نجد أن التبريد الزائد لبلورة البيريليوم يكون له مفعول عكسي يؤدي لتناقص المقطع العرضي الميكروسكوبي الكلية نتيجة انخفاض المقطع العرضي للتشتت المرن (تشتت براغ) نتيجة تقليص المسافة بين المستويات البلورية d_{hkl} وهذا يخفض من كفاءة المرشح.

٢- يحدث أثناء التصادم المرن بين النوترون وكل من ذرة الهيدروجين السائل والبيريليوم والألمنيوم

نقصان في الطاقة يمكن حساب نسبته عند كل تصادم من خلال العلاقة (9) التالية [16]:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{A^2+1}{(A+1)^2} \quad (9)$$

حيث تمثل A العدد الكتلي للنواة الهدف و E_0 طاقة النوترون قبل التصادم، و E طاقة النوترون بعد التصادم

وبإجراء حساب بسيط يمكننا أن نجد أن النوترون يفقد 50% من طاقته بعد كل تصادم مرن مع نواة الهيدروجين و 82% بعد كل تصادم مع نواة البيريليوم، و 93% بعد كل تصادم مع نواة الألمنيوم حيث يساوي العدد الكتلي لنواة الهيدروجين 1 ولنواة البيريليوم 9 ولنواة الألمنيوم 27.

كما يمكننا حساب عدد التصادمات اللازمة حتى تتغير طاقة النوترون من 0.025eV إلى 0.005eV مع

كل من النوى السابقة من خلال العلاقة (10) [16] .

$$n = \frac{\log\left(\frac{E}{E_0}\right)}{\log\left[\frac{(A^2+1)}{(A+1)^2}\right]} \quad (10)$$

حيث E_0 طاقة النوترون قبل التصادم وتساوي 0.025eV و E طاقة النوترون بعد التصادم وتساوي

0.005eV و A العدد الكتلي، فنجد أن النوترون الحراري يحتاج إلى 2 تصادم فقط مع نواة الهيدروجين حتى يتحول إلى نوترون بارد وإلى 8 تصادم مع نواة البيريليوم وإلى 22 تصادم مع نواة الألمنيوم من أجل التحول نفسه وهكذا نجد أن الهيدروجين أكثر كفاءة في تحويل النوترونات الحرارية إلى باردة يليه البيريليوم ثم الألمنيوم وذلك بسبب قدرتها على الوصول إلى طاقة النوترونات الباردة بشكل أسرع.

٣- تمتلك نواة الهيدروجين بروتونا واحدا، ويتواجد الهيدروجين في حالته الطبيعية على شكل جزيئات ثنائية

الذرة، وبالتالي نميز هنا بين حالتين الحالة الأولى: أن يكون البروتونان المكونان لنواة جزيء الهيدروجين على توافق في جهة اللف الذاتي (السبين) أو على تعاكس وفي الحالة الأولى سيكون العزم السبيني المحصل لهما مساويا على الواحد وفي

الحالة الثانية سيكون معدوماً، ويكون المقطع العرضي للتشتت المرن مع نواة الهيدروجين في الحالة الثانية أكبر منه في الحالة الأولى، وفي درجات الحرارة العادية يكون 75% من نوى جزيئات الهيدروجين على توافق في جهة اللف الذاتي، وتتناقص هذه النسبة عند تبريد الهيدروجين وتحويله إلى الحالة السائلة بسبب تحولها تدريجياً إلى نوى ذات تعاكس في اتجاه اللف الذاتي، كما تزداد كثافة الهيدروجين السائل وهذا يزيد من التصادمات المرنة بين النيوترونات ونوى الهيدروجين السائل [17]، ولذلك تزداد كفاءة الهيدروجين السائل في تحويل النيوترونات الحرارية إلى باردة عند تخفيض درجة حرارته.

ثانياً: تم حساب مقدار الطاقة الحرارية الناتجة عن الجرعة الإشعاعية لكل من أشعة غاما والنيوترونات السريعة والمودعة في كل جزء من أجزاء الفلتر كما هو موضح في الجدول رقم (3)، وكان مجموع الطاقات المودعة في كل من الألمنيوم والهيدروجين السائل والبيريليوم والبزموت مساوياً إلى 466.5KW وكما هو ملاحظ فإن 48.28% منها تم امتصاصه في البيريليوم و 51.72% في باقي مواد الفلتر، وإن كبر هذه النسبة بالنسبة للبيريليوم يعطي إشارة واضحة على أن البيريليوم له الدور الأساسي في عمل المرشح وإن استمراره بالعمل لفترات طويلة يمكن أن يؤثر على كفاءته مع مرور الزمن بسبب التخریب التدريجي الذي يتعرض له نتيجة الطاقة الحرارية التي يمتصها ولذلك ينصح باستبداله وبشكل دوري.

3- نلاحظ من الجدول (4) أن زاوية انفرج الحزمة النيوترونية الباردة هي 3.62 وطول المجمع الرئيسي $L=200$ cm أي أن الحزمة تتفرج بشكل بطيء، وهذا يعطي دلالة واضحة على أن التشوه في محيط الخيال المتشكل سيكون صغيراً، كما يمكن أن نلاحظ أن النسبة $L/D=200$ (L : طول المجمع الرئيسي، وD: قطر فتحة القناة) كبيرة بما يكفي وهذا ما يجعل الحزمة النيوترونية الباردة أكثر فعالية منها في حالة كون (L/D) كبيرة حيث يكون التشوه على حواف العينة في هذه الحالة صغيراً. وبالتالي يمكن القول أن الخيال المتشكل يمتلك وضوح جيد [4] [11].

5. الاستنتاج

تمت أمثلة الأبعاد الهندسية والنيوترونية لحزمة نيوترونات باردة في المفاعل TRIGA-II-2MW باستخدام الكود MCNP4C2 ومكتبة المقاطع العرضية ENDF/B-VII أظهرت الحسابات إمكانية الحصول على تدفق نيوترونات باردة من مرتبة 1.459×10^5 وبمساهمة ضعيفة من أشعة غاما بلغت قيمتها 4.136Gy/hr ، هذا يلبي شروط طريقة التصوير بالنيوترونات الباردة، وتم الحصول على أفضل تدفق نيوتروني بارد باستعمال مرشح البيريليوم المبرد بالهيدروجين السائل إلى درجة حرارة 60K وبلغت الطاقة الحرارية الكلية المودعة في مرشح النيوترونات وأشعة غاما 466.5KW حيث تم امتصاص 48.28% منها تم امتصاصه في البيريليوم و 51% في باقي مواد المرشح وهذا يدل على أن البيريليوم يأخذ دور مرشح نيوتروني وإشعاعي هام في هذه الحزمة.

المراجع

- [1] Jensen, R.T and Newell. D.L., 1998. *Thelma hydraulic calculations to support increase in operating power in McClellan nuclear radiation center (MNRC) TRIGA reactor. Argonne national Laboratory – West. Idaho Falls, ID 83403-2528. McClellan nuclear radiation center (MNRC). McClellan AFB, CA 95652 – 2504. Texas.*
- [2] Karner, S., Pleinert, H., Back, H., *Review of neutron radiography activities at the atominstitut of the Austrian Universities. In: Proceedings of the 5th World Conference on Neutron Radiography, Berlin, 1996.*
- [3] Kaushal K M, *Development of a Thermal Neutron Imaging at the N.C.S.U PULSTAR Reactor*, PhD thesis, North Carolina State University, 2005.
- [4] Thomas R C, *Development of Neutron Radioscopy at the SLOWPOKE-2 Facility at RMC for the Inspection of CF188 Flight Control Surfaces*, Master of Engineering in Chemical and Materials, Faculty of the Royal Military College of Canada, 2000
- [5] Zou Y, Wen W, Guo Z et al, *NuclInstr & Meth In Phys Res A*, 651 (2011) 62.
- [6] Shugart, N., 2013. Neutronic and thermal hydraulic analysis of the geological survey TRIGA reactor. Thesis Master of Science (Nuclear Engineering), University of Colorado, USA.
- [7] J. F. Briesmeister, Ed., "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C," LA-13709-M (April 2000)
- [8] Berger H, Iddings F, *Neutron Radiography, Repot NTIAC-SR-98-01*, Louisiana State University. 1998, p.13-20, 25,34.
- [9] Barton J P, *J Non-destruct. Test & Eval*, 16 (2001)
- [10] Briesmeister J F, *A General Monte Carlo N-Particle transport code Version 4C, LA-7396-M*, (Los Alamos National Laboratory, New Mexico, USA), 1997.
- [11] <http://glenergy.biz/images/collimator/design.pdf>, pp 6, 7. Accessed 2 July 2012
- [12] R. Flocchini, H. Liu, and M. Boussoufi, Development of a Large-Field Cold Neutron Source at the University of California, Davis, McClellan Nuclear Radiation Center (UCD/ MNRC), October 2007.
- [13] N. Habib, SINGLE CRYSTAL FILTERS FOR NEUTRON SPECTROMETRY, Reactor Physics Department, 6th Conference on Nuclear and Particle Physics 17-21 Nov. 2007 Luxor, Egypt.
- [14] prof.dr.ir. H. van Dam, prof.dr.ir. T.H.J.J. van der Hagen, dr.ir. J.E. Hoogenboom, Nuclear Reactor Physics, Delft University of Technology 2005.
- [15] P. A. EGELSTAFF, B.Sc., and R. S. PEASE, M.A The design of cold neutron filters
Atomic Energy Research Establishment, Hanvell, Berks 29 December, 1953
- [16] LAMARSH, J. R.: "Introduction to Nuclear Reactor Theory", p. 185 (1966)
- [17] SCHWINGER, J, The Scattering of Neutrons by Ortho- and Parahydrogen, Columbia University, New York, A U G U S T 1 5, 1 9 3 7