مجلة جامعة دمشق للعلوم الأساسية
مجلد 41-عدد 3 (2025): 152- 170

Damascus University Journal for the Basic Sciences
Vol 41 No.3 (2025): 170-152

قياس تدفقات النترونات الضوئية على طاولة المعالجة للمسرع الخطي الطبي VARIAN IX

محمد حيدر أحمد[1]، ماجدة عبد المجيد نحيلي[2]، رياض محمد سعيد شويكاني[3]

[1]طالب دراسات عليا (ماجستير)–قسم الفيزياء–كلية العلوم–جامعة دمشق–دمشق–سوريا.
Muhammad.Ahmad@damascusuniversity.edu.sy
[2] أستاذ–قسم الفيزياء–كلية العلوم–جامعة دمشق–دمشق–سوريا.
majeda.nahili@damascusuniversity.ed.sy
[3] أستاذ–قسم الوقاية والأمان–هيئة الطاقة الذرية السورية–دمشق–سوريا. rshweikani@aec.org.sy

الملخص

جرى في هذا البحث قياس تدفقات النترونات الضوئية المرافقة للحزم الفوتونية عالية الطاقة 18 $MV\ and\ 23\ MV$ الصادرة عن المسرعين الخطيين الطبيين من النوع VARIAN IX المتوفرين في مستشفى تشرين الجامعي باللاذقية شعبة المعالجة الإشعاعية.

استعمل 40 كاشف من النوع CR-39 مثبتة على عوارض خشبية بشكل متتالي وبخطوة 50 cm لقياس التدفقات النترونية الضوئية، حيث وزعت هذه الكواشف بشكل عرضي وطولي على طاولة المعالجة الخاصة بكل مسرع خطي، واستخدمت الساحة الإشعاعية للمسرع بأبعاد $40\times40\ cm^2$ وضبطت المسافة من رأس المسرع إلى سطح طاولة المعالجة لتكون SSD=100 cm ودلت نتائج القياس أن قيمة تدفق النترونات الضوئية:

- تكون أعلى ما يمكن في مركز الساحة الإشعاعية حيث بلغت القيمة $n/(cm^2.Gy)$ 5.0×10^8 لحالة الحزمة 23 MV والقيمة $n/(cm^2.Gy)$ 4.8×10^8 لحالة الحزمة 18 MV
- تتناقص بشكل تناظري غاوصي بالنسبة إلى المحور الأفقي المار من مركز الساحة الإشعاعية.
- تتجاوز في حالة الحزمة 23 MV مثيلتها لحالة الحزمة18 MV بمقدار 17%

الكلمات المفتاحية: نترونات ضوئية، تدفق نتروني، كواشف CR-39، مسرع خطي، حزم فوتونية عالية الطاقة.

تاريخ الإيداع: 2023/12/03
تاريخ الموافقة: 2024/02/28

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

ISSN (online): 2789-6366
http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index

Measurement of photoneutron fluxes on the processing table of two VARIAN IX medical linear accelerators

Mohamed Haydar Ahmad[1], Majeda abdalmajed Nohaili[2], Riyad Muhammad Saeed Shweikani[3]

[1] Student Postgraduate (Master) - Physics - Faculty of Science - Damascus University - Damascus - Syria.
Muhammad.Ahmad@damascusuniversity.edu.sy
[2] Professor - Department of Physics - Faculty of Science - Damascus University - Damascus - Syria.
majeda.nahili@damascusuniversity.ed.sy
[3] Professor - Department of Prevention and Security - Syrian Atomic Energy Agency - Damascus – Syria rshweikani@aec.org.sy

Received :2023/12/03
Accepted:2024/02/28

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

Abstract

In this research, the fluxes of optical neutrons accompanying the high-energy photon beams 18 MV and 23 MV issued by the two VARIAN IX medical linear accelerators available at Tishreen University Hospital in Lattakia, Radiation Treatment Division, were measured.

40 CR-39 detectors were installed on wooden beams in succession and at a step of 50 cm to measure the optical neutron fluxes. These detectors were distributed transversely and longitudinally on the processing table of each linear accelerator. The irradiation field of the accelerator was used with dimensions of 40×40 cm^2 and the distance was adjusted from the accelerator head to the surface of the treatment table should be SSD=100cm. The measurement results indicated that the value of the photoneutron flux is:

→ It is highest in the center of the irradiation field, where the value reached 5.0 x 10^8 n/(cm^2.Gy) for the 23 MV beam and 4.8 x 10^8 n/(cm^2.Gy) for the 18 MV beam.

→ - It decreases in a Gaussian symmetry with respect to the horizontal axis passing through the center of the irradiation square

→ - In the case of the 23 MV package, it exceeds that of the18 MV package by 17%.

Key words: Photoneutrons, neutron flux, CR-39 detectors, linear accelerator, high energy photon beams.

1. مقدمة:

بطريقة مشابهة للفوتونات، لا تحمل النيوترونات أي شحنة وبالتالي لا تتفاعل في المادة عن طريق قوة كولوم. وبالتالي تنتقل عبر عدة سنتيمترات من المادة بينما تكون غير مرئية لتقنيات الكشف القائمة على التفاعلات الكهرومغناطيسية. وبالتالي، لا يزال الكشف عن النيوترونات يمثل تحدياً تقنياً في الفيزياء وخاصة في الفيزياء الطبية حيث تكون النيوترونات أحياناً منتجاً ثانوياً للأشعة السينية المتولدة وتعتبر ذات تأثير ثانوي في عملية العلاج الإشعاعي

يخضع معظم مرضى السرطان لنوع من العلاج الإشعاعي الخارجي ((External Beam Radiotherapy (EBRT) باستعمال المسرعات الخطية [1] التي تولد حزم فوتونية عالية الطاقة مستخدمة لتقليص حجم الورم السرطاني وقتل الخلايا السرطانية من خلال إتلاف البنية الجزيئية للحمض النووي [2].

يستخدم المحدد المتعدد الوريقات ((Multi Leaf Collimator (MLC) لتشكيل حزم فوتونية تتناسب مع حجم الورم [3–7] وهذا يساهم بتقليل التعرض الإشعاعي للأنسجة السليمة المحيطة بالورم مع استخدام تقنيات مختلفة نذكر أهمها [8].

- تقنية ((3D Conformal Radiotherapy (3DCRT).
- تقنية ((Intensity Modulated Radiotherapy (IMRT).

على الرغم من دقة هذه التقنيات إلا أن استخدامها يمثل مجموعة من التحديات التقنية للباحثين في مجال الفيزياء الطبية، حيث أن الإشعاع الذي يدمر الخلايا السرطانية وينقذ الأرواح، يمكن أن يتسبب أيضاً في آثار جانبية سلبية للمريض ومنها السرطان [9–11]، ويرتبط هذا بأن تحويل الحزمة الإلكترونية إلى حزمة فوتونية ذات طاقات عالية يترافق بتلوث نتروني وكذلك أيضاً تشكل نترونات ضوئية تتسبب بجرعة إضافية للمرضى والعاملين[9, 12, 13]. حيث تعاني حسابات حماية المسرع بشكل عام من عدم توفر، المنهجية والدعم المترولوجي لقياسات التدفقات النيوترونية من المسرعات.، ونقص التقدير الدقيق لمقدار التدفق النتروني في الغرف الحاوية على مسرع من نوع Varian. Ix من الضروري العمل على حساب التدفقات النترونية بإجراء قياسات واسعة في حقول إشعاع المسرعات الطبية للإلكترون.

لذلك يُجرى العلاج الإشعاعي في غرف خاصة مدرعة مصممة خصيصاً لتقليل تأثير الإشعاعات وبالتالي التعرضات غير المقصودة على الطاقم الطبي والجمهور، تجهز غرف المعالجة المدرعة باتباع واضح وإرشادات صارمة من المنظمات الوطنية أو الدولية:

(National Council on Radiation Protection and Measurements , International Commission on Radiological Protection , International Atomic Energy Agency , Atomic Energy Commission Syria)

التي تتعامل مع الوقاية من الإشعاع. ونظراً لطبيعة النترونات المعتدلة بشحنتها وقدرتها العالية على تأيين الأوساط المادية، فإنها تمثل تحدياً لمتخصصي الوقاية الإشعاعية[14].

غرض البحث:

قياس التدفقات النترونية الضوئية على طاولة المعالجة الخاصة بالمسرعين الطبيين الخطيين من نوع VARIAN IX المشغلين بالطاقتين $18\ MV\ and\ 23\ MV$ (الموجودان في مستشفى تشرين الجامعي باللاذقية – قسم العلاج الإشعاعي) باستعمال الكواشف $CR-39$.

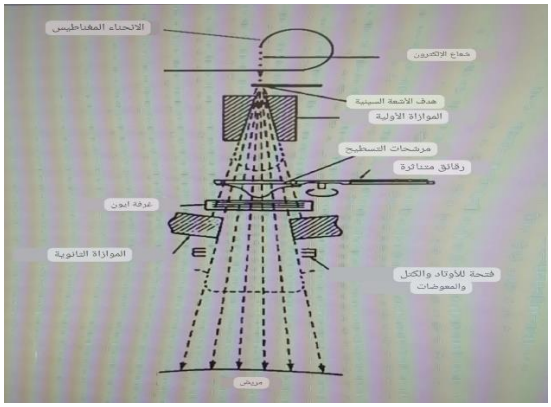
2. الأجهزة والأدوات المستخدمة.

1.2 المسرع الخطي الطبي:

استعمل في هذا البحث المسرعين الخطيين الطبيين VARIAN IX المتوفرين في مستشفى تشرين الجامعي باللاذقية لإجراء جميع القياسات. يولد هذان المسرعان حزم فوتونية عالية الطاقة (18 MV) و (23 MV) للأول (SN:5365) وللثاني (SN:4966) على التوالي، وضُبط كل من حجم الساحة الإشعاعية

Field Size ($40\times40\ cm^2$) والبعد بين المنبع وسطح الطاولة عند المسافة (SSD =100 cm).

يوضح الشكل (1.2) مكونات رأس المسرع الخطي، يعبر الخط المنقط عن اتجاه المحور z–axis أما المحور x من يسار إلى يمين الذراع Gantry والمحور y موازي لطاولة المعالجة. يتكون رأس المسرع من الهدف والمحددات الأولية والمرشح وحجيرة التأين والمحددات الثانوية.



الشكل: (1.2) مكونات رأس المسرع الخطي فاريان [15]

2.2 كواشف الأثر النووي البلاستيكية CR-39:

2.2.1 خصائص كاشف الأثر النووي البلاستيكي CR-39:

يعد كاشف الأثر النووي البلاستيكي CR−39 كاشفاً مثالياً لقياس التدفقات النترونية وجرعاتها. الكاشف CR−39 أو كربونات بولي أليل دي غليكول ($C_{12}H_{18}O_7$) هو عبارة عن بوليمر متصلد بالحرارة، وخواصه الكيميائية تجعله واحداً من أكثر أجهزة كشف الآثار النووية البلاستيكية حساسية من حيث معامل نقل الطاقة الخطي LET .

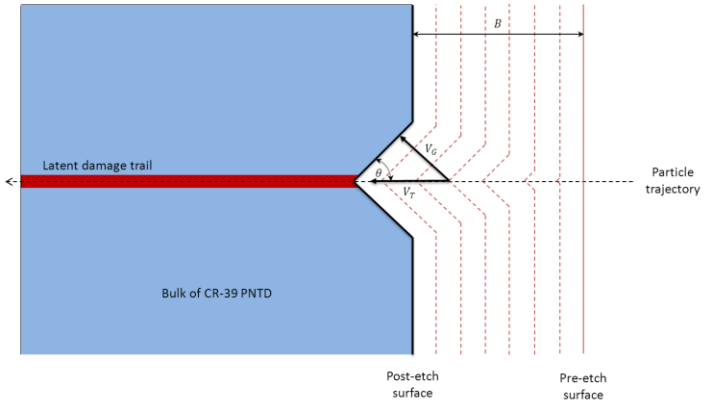
إن الكاشف CR−39 متجانس وشفاف بصرياً وحساس للجسيمات المشحونة التي يقع معامل نقل الطاقة الخطي لها في الماء ($LET_\infty H_2O$) بين 5 و $1500keV/\mu m$، بما فيها البروتونات ذوات الطاقة $MeV \leq 10$ وجسيمات ألفا ذوات الطاقة $MeV \leq 50$ والأيونات الثقيلة بجميع الطاقات[16].

يتشابه التركيب الكيميائي للكاشف $CR-39$ ($C_{12}H_{18}O_7$) مع التركيب الكيميائي للأنسجة البشرية، لذا فإن استجابته للنترونات تشبه استجابة الأنسجة للنترونات.

يمكن كشف النترونات ذوات الطاقات من 1 إلى $20MeV$ عن طريق البروتونات المرتدة التي تتشكل نتيجة لتفاعل التبعثر المرن للنترونات مع نوى هدروجين البوليمر. يمكن أيضاً كشف النترونات بواسطة $CR-39$ من خلال آثار الأيونات المرتدة الثقيلة الناتجة عن تفاعلات التقسيم غير المرن لنوى الكربون والأكسجين المستهدفة[16]..

2.2.2.تشكل الأثر في كاشف الأثر النووي البلاستيكي CR−39:

يترافق مرور جسيم مشحون عبر طبقة من الكاشف CR−39 بتكسير العديد من الروابط الجزيئية للبوليمر على طول مساره. يُعرف هذا الأثر التالف عبر الجزء الأكبر من الكاشف باسم "الأثر الكامن". وبعد تشعيع الكاشف CR−39، يعاد إلى المختبر ويخضع لعملية حك كيميائية في محلول $NaOH$ لفترة محددة من الزمن. يبدأ محلول $NaOH$ في إذابة مادة البوليميرية للكاشف CR−39، ويتفاعل مع الأثر الكامن أكثر من تفاعله مع الجزء الأكبر من المادة. يُطلق على المعدل الذي يعمل به المحلول القلوي على الأثر الكامن معدل حك الأثر V_T. ومعدل الحك الحجمي V_G هو المعدل الذي يؤثر فيه المحلول القلوي على حجم الكاشف. يوضح الشكل.2.2 معدل حك الأثر ومعدل الحك الكلي.



الشكل .2.2 رسم تخطيطي لعملية تشكل الأثر النووي من خلال الحك الكيميائي. [16]

يقاس كل من V_T و V_G بـ $(\frac{\mu m}{h})$. بعد حك CR−39، يرفع الكاشف من محلول $NaOH$، ومن ثم يمكن فحصه تحت المجهر الضوئي. تظهر حفرة مخروطية الشكل على سطح كاشف الأثر نووي تمثل أثر الضرر الكامن.

تتناسب أبعاد الفتحة الإهليلجية للحفرة المخروطية مع معامل نقل الطاقة الخطي (LET) للجسيم الذي شكل أثر الضرر الكامن. LET هي كمية الطاقة المنقولة من الجسيم المؤين إلى المادة لكل وحدة طول أثر عند قياس الأثر في CR−39، يعرف معدل الحك المختزل V_R، وهو كمية بلا أبعاد تربط معدل حفر الأثر V_T بمعدل الحفر الحجمي V_G[20]:

$$V_R \equiv \frac{V_T}{V_G} \qquad (1)$$

لجعل الآثار المحفورة مرئية أي $V_T > V_G$ ينبغي أن يكون:

$$\frac{V_T}{V_G} = V_R > 1 \qquad (2)$$

تسمى الزاوية بين مسار الجسيم المشحون وجانب المسار المخروطي بالزاوية المخروطية θ. جيب الزاوية θ يساوي نسبة معدل الحك الحجمي V_G إلى معدل حك الأثر V_T:

$$sin\theta = \frac{V_G}{V_T} = \frac{1}{V_R} = \qquad (3)$$

2.2.3 إنتاج النترونات الضوئية

يمكن أن يؤدي تفاعل الفوتون مع المادة إلى نتائج مختلفة. يمكن تصنيف هذه النتائج وفقاً لمادة الهدف الذي يتفاعل معه الفوتون، مثل الإلكترونات أو الذرات أو النوى، ونوع التفاعل، أي التبعثر أو الامتصاص. تنتج النترونات الضوئية من خلال تفاعلات نووية ضوئية

تسمى التفكك الضوئي [5]. يحدث التفكك الضوئي عندما تمتص النواة فوتوناً عالي الطاقة يتبعه حدوث إعادة ترتيب لداخل النواة وطرد جسيم واحد أو أكثر منها، مثل البروتونات أو النترونات أو جسيمات ألفا. تُعرف هذه العملية بالتبخر [11]. تنتج معظم النترونات الضوئية (80−90%) من خلال عملية التبخر بعد منطقة الرنين في النوى الثقيلة. تنبعث نترونات التبخر بشكل متناحٍ ولها طاقات متوسطة ضمن المجال MeV (2 − 1) [12].

ويمكن أيضاً أن تنبعث النترونات الضوئية من عملية تسمى الانبعاث المباشر [11]. الانبعاث المباشر يحدث عندما يتفاعل جسيم عالي الطاقة كالفوتون مثلاً مباشرة مع واحد أو أكثر من النكلونات المفردة (النترونات) داخل النواة. تمتلك نترونات الانبعاث المباشر طاقات متوسطة تصل إلى عدة MeV.

التوزيع الزاوي للنترونات المباشرة يتبع الدالة $sin\ \theta$ [20]. يقدر مردود النترونات المباشرة في حالة الأشعة السينية ذات الطاقة MeV (30 − 15) التي تتفاعل مع النوى الثقيلة بنحو %(20 − 10) [13].

يعتمد إنتاج النترونات الضوئية (γ, n) على المقطع العرضي للنترونات الضوئية وطاقة ارتباط النواة. الطاقة الدنيا اللازمة للتغلب على طاقة الارتباط تسمى طاقة العتبة E_{th} في إنتاج النترونات الضوئية، من الواضح أن الطاقة المضافة تكون على شكل فوتون أشعة سينية وارد. يوضح الجدول (1.2) طاقات عتبة النترونات الضوئية لمجموعة متنوعة من العناصر والنظائر. وتمثل هذه العناصر والنظائر تلك التي يتكون منها جسم الإنسان (^{12}C و ^{14}N و ^{16}O)، والهواء (^{14}N و ^{16}O) ورأس المعالجة للمسرع فاريان (^{206}Pb و ^{207}Pb و ^{208}Pb و ^{186}W). يلاحظ من الجدول(1.2) أن النترونات الضوئية يمكن تنشأ عند طاقات فوتونية منخفضة تبلغ MeV 6.57 للمواد ذات العدد الذري المرتفع Z مثل التنغستن والرصاص. تتطلب العناصر الأخرى مثل الكربون MV 18.72 والنتروجين MV 10.56 والأكسجين طاقات تتجاوز عتبة الطاقة، للخضوع للتفاعلات من نوع (γ, n).

عند حدوث تفاعل نتروني ضوئي، قد ينتج نترون واحد أو أكثر تبعاً لطاقة الفوتون والمقطع العرضي لتفاعل النترون الضوئي. المقطع العرضي الكلي للنترون الضوئي هو مجموع المقاطع العرضية $\sigma(\gamma, n)$ و $\sigma(\gamma, 2n)$ و $\sigma(\gamma, 3n)$ ... إلخ:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \sigma(\gamma, in) \qquad (4)$$

يوضح الشكلان (4.2) (3.2) المقطع العرضي للفوتون الضوئي لكل من ^{12}C و ^{14}N و ^{16}O و ^{206}Pb و ^{207}Pb و ^{208}Pb و ^{186}W. تتبع هذه المنحنيات توزيع Poison أو توزيع Lorentz، حيث يبلغ المقطع العرضي عند الطاقات الأعلى إلى ذروة أو قمم متعددة. تسمى هذه القمم الرنينات وتحدث عند طاقات الفوتون حيث تتعزز التفاعلات مع النوى. إذا كانت ذروة الرنين واسعة وإذا كانت طاقة الفوتون الوارد بالقرب من ذروة الرنين، فإن احتمال انبعاث النترون الضوئي كبير.

الجدول (1.2) طاقات العتبة للعناصر/النظائر المختلفة للتفاعلات (γ, n) و $(\gamma, 2n)$ و $(\gamma, 3n)$ [15]

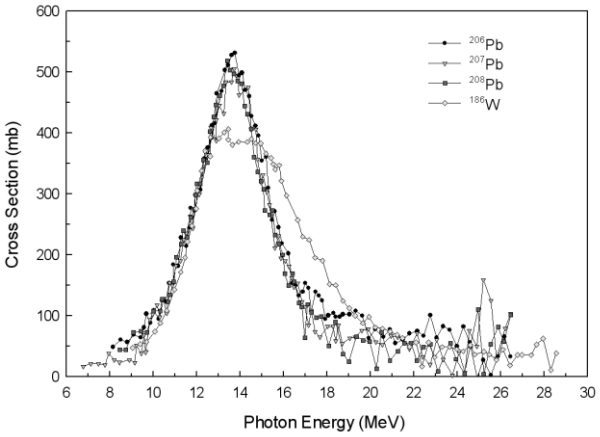
العنصر	(γ, n)	$(\gamma, 2n)$	$(\gamma, 3n)$
	طاقة العتبة MeV		
^{12}C	18.72	31.83	-
^{14}N	10.56	-	-
^{16}O	15.72	-	-
^{206}Pb	8.05	14.79	23.02
^{207}Pb	6.57	14.79	21.62
^{208}Pb	7.31	22.24	21.42
^{186}W	7.22	12.94	20.41

يوضح الشكل 3.2 المقاطع العرضية لتفاعل الفوتونات مع النوى ^{206}Pb و ^{207}Pb و ^{208}Pb و ^{186}W حيث يلاحظ أن إنتاج النترونات الضوئية يبدء من طاقات الأشعة السينية التي تتجاوز الطاقات(^{206}Pb عند MeV 8.05) و(^{207}Pb عند MeV 6.75)

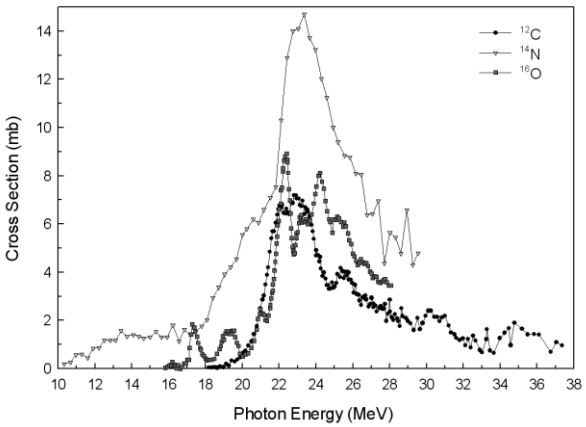
(Pb^{208}عند 7.31) و MeV (W^{186}عند 7.22). تبدأ قمم الرنين في النوى Pb^{206} و Pb^{207} و Pb^{208} و W^{186} بدءاً من الطاقة $10\ MeV$ وتستمر حتى $18\ MeV$. ويلاحظ أن أكبر قيم المقطع العرضي المقاسة هي mb $(531, 505, 518, 406)$ على التوالي، وتحدث عند طاقات الفوتون بين $12\ MeV$ و $16\ MeV$.

توضح بيانات المقطع العرضي للنوى C^{12} و N^{14} و O^{16} الموضحة في الشكل(4.2)

أنه بالنسبة لهذه النوى الثلاثة، يبدأ إنتاج النترونات عند طاقة الفوتون $(18\sim{}^{16}O)MeV, 10\sim{}^{14}N)MeV, (15\sim{}^{12}C)\ MeV$. ومع ازدياد طاقة الأشعة السينية إلى ما يقرب من $(26 - 22)\ MeV$ فإن قمم الرنين تزداد في جميع النظائر الثلاثة. أكبر قيم للمقاطع العرضية المقاسة لـ C^{12} و N^{14} و O^{16}هي mb $(17, 15, 9)$ على التوالي.



شكل ..32 المقاطع العرضية للنترونات الضوئية الناتجة عن تفاعل الفوتونات مع النوى Pb^{206} و Pb^{207} و Pb^{208} و W^{186} الموجودة في رأس المعالجة للمسرع الخطي [20].



شكل 4.2.المقاطع العرضية للنترونات الضوئية الناتجة عن تفاعل الفوتونات مع النوى C^{12} و N^{14} و O^{16} الموجودة في الهواء وجسم الإنسان [20].

بمجرد تجاوز عتبة التفاعل، تظهر النترونات بطاقة حركية يمكن حسابها بواسطة العلاقة:

$$E_n = hf - E_{th} \qquad (5)$$

وبالسرعات:

$$E_n = \left(\frac{2E_n}{m_n}\right)^{1/2} \qquad (6)$$

حيث E_n هي طاقة النترون المنبعث، و E_{th} هي طاقة العتبة، و m_n هي كتلة النترون.و hf طاقة الفوتون

يعطي الجدول (2.2) الطاقات القصوى للنترون المنبعث المحسوبة بواسطة المعادلة (5). وتجدر الإشارة إلى أن النترونات الضوئية ستمتلك نطاق واسع من الطاقات، وأن الجدول (2.2) يوضح فقط الطاقة القصوى التي يمكن أن يمتلكها النترون الضوئي الوارد.

الجدول (2.2) القيمة القصوى للطاقات الحركية للنترونات الضوئية الناتجة عن التفاعلات (γ, n) من أجل طاقة الفوتونات الواردة MeV $(6, 10, 18)$.

العناصر	طاقة الفوتون $(6MeV)$	طاقة الفوتون $(10MeV)$	طاقة الفوتون $(18MeV)$
	طاقة النترون الضوئي القصوى E_n		
^{12}C	-	-	-
^{14}N	-	-	7.44
^{16}O	-	-	2.28
^{206}Pb	-	1.95	9.95
^{207}Pb	-	3.25	11.25
^{208}Pb	-	2.69	10.69
^{186}W	-	2.78	10.78

3.2 طيف النترونات الضوئية

يعد طيف النترونات الضوئية في مواقع مختلفة في غرفة المسرع الخطي الطبي مقياساً رئيسياً في اعتبارات التصميم، لأنه فقط من خلال الفهم الكامل لتوزع طاقة النترونات الضوئية، يمكن أن تُطور إستراتيجية فعالة لتدريع غرفة المسرع

تُعطى المعادلة التحليلية التي تصف طيف النترونات الضوئية بمساهمة نوعي النترونات الضوئية بواسطة المعادلة (7) التي اقترحت لأول مرة في عام 1991 [17].

$$\frac{dN}{dE_n} = \frac{0.8929E_n}{T^2}\, e^{-E_n/T} + \frac{0.107 ln\left[\frac{E_{max}}{E_n+7.34}\right]}{\int_0^{E_max-7.34}\left[\frac{E_{max}}{E_n+7.34}\right] dE_n} \qquad (7)$$

يصف الحد الأول في هذه المعادلة طيف نترونات التبخر، حينما يرتبط الحد الثاني بالنترونات المباشرة. E_n هي طاقة النترون، T هي درجة الحرارة النووية بـ MeV. $(T = 1.5\ MeV\ in\ Tungsten)$،

E_{max} هي أقصى طاقة للفوتونات التي يولدها المسرع عند التشغيل.

القيمة $7.34\ MeV$ هي مع متوسط طاقة ارتباط النترون المنبعث للتنغستن [17].

يمكن مثلاً، وصف طيف انبعاث النترونات الضوئية في حالة إنتاج المسرع لأشعة سينية بطاقة قصوى $25MeV$ بالعلاقة التالية:

$$N(E_n) = 3.5716E_n \times e^{-2E_n} + 0.0123607\frac{25}{E_n+7.34} \qquad (8)$$

3- العمل التجريبي والنتائج:

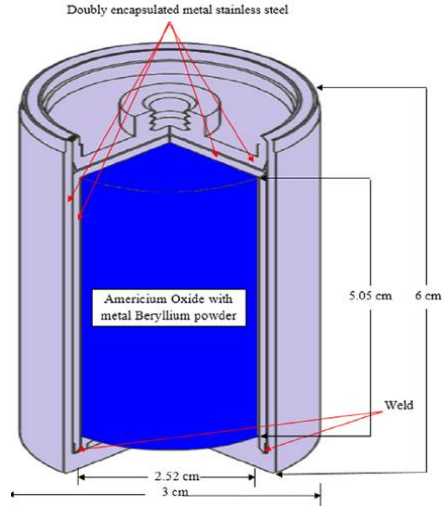
3.1 معايرة كواشف الأثر النووي $CR-39$

أهم ما يميز كواشف $CR-39$ بأنها ذات نقاوة عالية وتأثرها بالتغيرات البيئية ضئيل، ويمكنها تسجيل آثار النترونات السريعة بشكل مباشر من خلال تسجيل آثار البروتونات المرتدة نتيجة تفاعل النترونات الضوئية مع مادة الكاشف بتفاعل من النوع (n, p). وبالتالي يمكن بواسطة الكواشف $CR-39$ قياس عدد الآثار التي تحدثها البروتونات المرتدة (tracks/cm2)، وهذا يقتضي معايرة هذه الكواشف باستعمال منابع نترونية عيارية كالمنبع $^{241}Am-{}^{9}Be$.

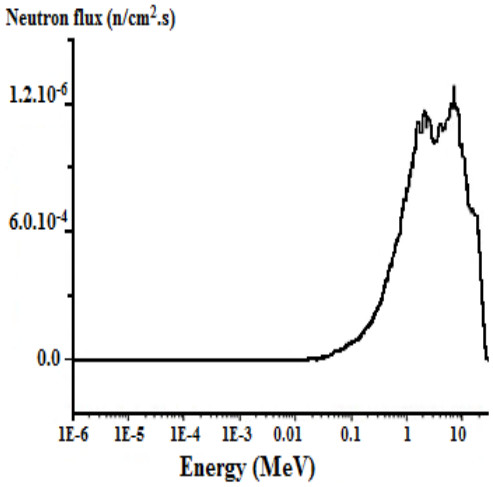
3.2 المنبع النتروني $^{241}Am-{}^{9}Be$:

المنبع النتروني $^{241}Am-{}^{9}Be$ هو عبارة عن خليط متجانس من نظيري البيريليوم (^{9}Be) والأميرشيوم (^{241}Am)، حيث يشكل البيريليوم معظم مادته. وتنشأ النترونات من المنبع $^{241}Am-{}^{9}Be$ نتيجة للتفاعل $^{9}Be(\alpha, n)^{12}C$ الذي يجري بواسطة الجسيمات ألفا المنبعثة من ^{241}Am.

استخدم في هذا البحث المنبع النتروني $^{241}Am - {}^{9}Be$ شكله أسطواني محاط بطبقتين من مادة الستانلس ستيل سماكة كل طبقة $1.2mm$، ونصف قطر الأسطوانة الداخلية $13.3\ mm$ والخارجية $15\ mm$، ويبلغ ارتفاعه $60\ mm$، يحوي هذا المنبع $5\ Ci$ من الأميريشيوم ويبلغ نشاطه الإشعاعي $S = 1.2 \times 10^{7}\left(\frac{n}{s}\right)$ يتفكك نظير الأميرشيوم مطلقاً جسيمات ألفا وبطاقات مختلفة، تتفاعل جسيمات ألفا مع نوى البيريليوم مما يسمح بإطلاق نترونات وإصدار أشعة غاما بطاقة $4.44\ MeV$، نسبة ما يصدره المصدر من الفوتونات إلى ما يصدره من النترونات 59.6%.



الشكل (5.3:) مصدر نتروني من النوع $^{241}Am - {}^{9}Be$.

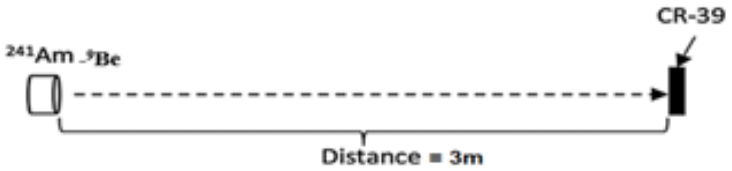


الشكل(6.3) الطيف الطاقي لمنبع النترونات ^{241}Am–^{9}Be.

تنطلق هذه النترونات بطاقات مختلفة وتشكل طيفاً نترونياً مستمراً، حيث تتركز أكثر من98% من نترونات هذا الطيف في المجال السريع $(0.1 - 10.8\ MeV)$ وبطاقة وسطى $5.48\ MeV$ كما هو موضح في الشكل (6.3).

3.3 آلية معايرة الكواشف CR−39:

في عملية المعايرة استعملت ثمانية كواشف $CR - 39$، أبعاد كل منها $1.5\times1.3\ cm^2$، وثبتت هذه الكواشف على عوارض (حاملات) خشبية التي وضعت على مسافة بلغت $3m$ عن منبع النترونات $^{241}Am - {}^{9}Be$ كما هو موضح بالشكل (7.3)



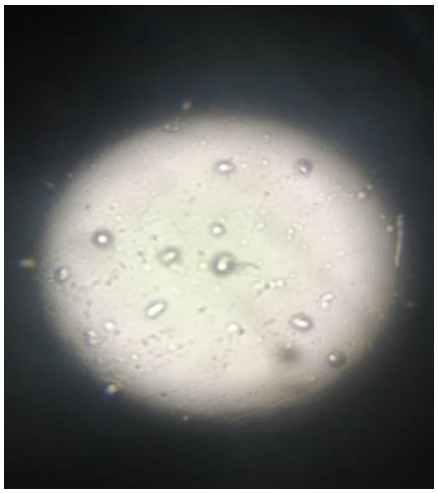
الشكل(7.3) يوضح تخطيطياً معايرة الكواشف CR−39 باستخدام المنبع النتروني العياري $^{241}Am - {}^{9}Be$

أُجريت المعايرة في المخبر العياري الثانوي بهيئة الطاقة الذرية السورية باستعمال المصدر النتروني 241Am–9Be شدة إصداره $S = 1.2 \times 10^{7}\left(\frac{n}{s}\right)$، حيث وضعت الكواشف بالبداية على بعد 300 cm عن المصدر كما هو موضح بالشكل (7.3)

حيث جرى تعريض الكاشفين (1–2) لمدة $10\ s$ والكاشفين (3–4) لمدة $20\ s$ والكاشفين (5–6) لمدة $30\ s$ والكاشفين (7–8) لمدة $60\ s$ ومن ثم حُكت الكواشف المشعة $CR-39$ كيميائياً باستخدام محلول هيدروكسيد الصوديوم تركيزه $(\frac{6.25mol}{l})$ ودرجة حرارته 70^0C لمدة 7 ساعات.

قُرأت الكواشف المشعة الثمانية بالإضافة لكواشف الخلفية الإشعاعية الطبيعية باستخدام المجهر الضوئي من النوع (PSD1–L5–MO1)، المتوفر في هيئة الطاقة الذرية السورية كما هو موضح في الشكل (8.3) والذي يمتلك مقدرة تكبير من 10x إلى 100x، ومقدرة فصل تبلغ 0.2 ميكرومتر وذلك لتسجيل عدد آثار البروتونات المقتلعة من الكواشف بواسطة النترونات الصادرة عن المنبع $^{241}Am-{}^{9}Be$ كما هو موضح بالشكل (9.3)

الشكل (8.3).: المجهر الضوئي المستعمل لعد الآثار على الكواشف CR-39 .



الشكل(9.3) يوضح الآثار المتشكلة على الكواشف CR-39 كما تشاهد باستعمال المجهر الضوئي.

جرى استعمال المجهر الضوئي عند قوة تكبير 20 وباستخدام المسطرة المجهرية المدرجة جرى قياس قطر المشهد وحسبت مساحة المشهد وفقاً للعلاقة:

$$s = \pi \times r^2 \qquad (9)$$

ووجد أن قطر المشهد يساوي $r = 0.92mm$ ومساحة المشهد $S = 0.00665\ cm^2$.

- جرى حساب الخطأ النسبي لمحموع عدد الآثار وفقاً للعلاقة:

$$R = \frac{1}{\sqrt{total\ count}} \qquad (10)$$

وفي عملية قراءة الكواشف كان

- ✓ عدد مشاهد الرؤية: 10
- ✓ مجموع عدد الآثار: هو مجموع الآثار التي تمّ عدُها لعشرة مشاهدات .
- ✓ متوسط عدد الآثار: هو مجموع عدد الآثار مقسوم على عدد المشاهدات .
- ✓ جرى حساب كثافة الآثار من العلاقة التالية:

$$D = \frac{N}{A \times V} \qquad (11)$$

حيث

D: كثافة الآثار على سطح الكاشف (Tr/cm^2)،

N: عدد الآثار التي تم عدها،

A: مساحة مشهد، الرؤيا (cm^2)،

V: عدد مشاهد الرؤيا

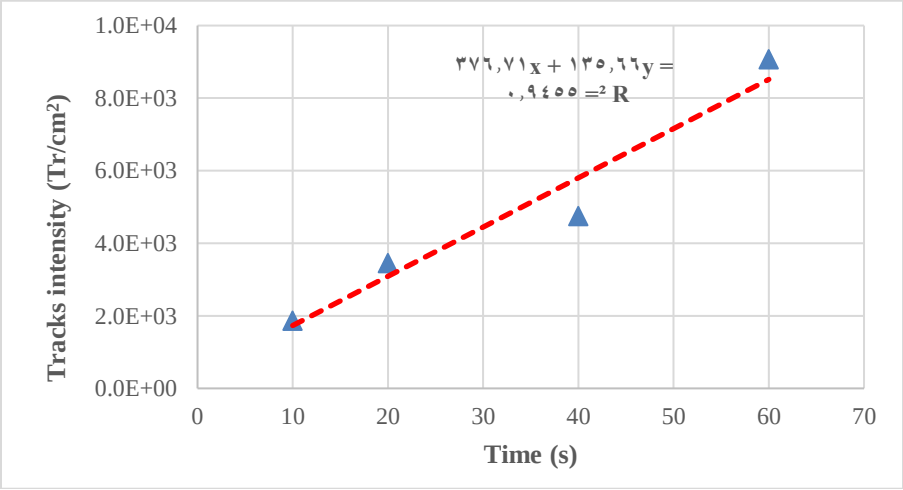
✓ متوسط كثافة الآثار: هو المتوسط الحسابي لكثافة الآثار (لنفس زمن التشعيع)

يوضح الجدول(3.2) عدد آثار البروتونات المتشكلة على الكواشف CR−39 والناتجة عن تفاعل النترونات مع مادة هذه الكواشف.

الجدول (3.2): عدد آثار البروتونات المتشكلة على الكواشف CR−39 بدلالة زمن تعرضها للمنبع النتروني ^{241}Am−Be

الكاشف		زمن التشعيع (s)	مجموع عدد الآثار	الخطأ النسبي	متوسط عدد الآثار	كثافة الآثار (Tr/cm^2)	متوسط كثافة الآثار (Tr/cm^2)
رقم	رمز						
1	B246	10	126	0.089	12.6	189	186
2	B259	10	122	0.091	12.2	183	
3	B034	20	231	0.066	23.1	347	344
4	B116	20	228	0.066	22.8	342	
5	B115	40	318	0.056	31.8	478	475
6	B259	40	314	0.056	31.4	472	
7	B039	60	597	0.041	59.7	897	907
8	B242	60	610	0.040	61	917	

يوضح الشكل(10.3) منحني معايرة الكواشف $CR-39$ المحصول عليه في هذا البحث.



الشكل (10.3) منحني معايرة الكواشف CR−39 عند تشعيعها على مسافة 300cm بنترونات المنبع ^{241}Am−^{9}Be

يُلاحظ من الشكل (10.3) خطية منحني معايرة الكواشف CR−39 ذي الشكل العام:

$$Y = ax + b$$

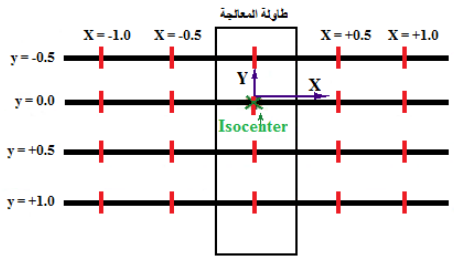
حيث بلغ الارتباط الخطي القيمة ($R^2 = 0.9455$) وهي قريبة جداً من الواحد، ولذلك تم اعتماد هذا المنحني كمنحني معايرة.

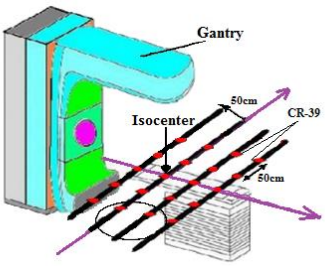
3.4 قياس توزع التدفقات النترونية الضوئية على طاولة المعالجة:

لقياس توزع التدفقات النترونية الضوئية المرافقة للحزم الفوتونية الواردة من رأس المسرع الخطي على طاولة المعالجة، استعملت أربعة عوارض خشبية طول كل منها $2\ m$ وسماكتها $2\ cm$ وعرضها $3\ cm$، ثبتت خمسة كواشف من نوع $CR-39$ على كل عارضة بحيث كانت المسافة بين تتالي الكواشف $50cm$ ووزعت وفقاً للمحور ox وعند الإحداثيات ($x = -100, -50, 0, +50, +100]\ cm$)، وبنفس الطريقة وزعت أربعة كواشف أخرى وفقاً للمحور oy عند الإحداثيات ($y = -50, 0, +50, +100]\ cm$).

وُضعت العوارض الخشبية الحاملة للكواشف على طاولة المعالجة تحت رأس المسرع الخطي كما هو موضح بالشكل (11.3)، بحيث ينطبق المحور oy المار من الأيزوسنتر (مركز المعالجة) على الكواشف ذات الإحداثيات $x = 0$ وهي الكواشف المتوضعة عند $(0,-50), (0,0), (0,+50), (0,+100)$، حينما وزعت الكواشف الأخرى بشكل متناظر على يمين ويسار هذا المحور، وتوضع الكاشف $(0,0)$ في الأيزوسنتر.

أُجريت قياسات التدفقات النترونية الضوئية على جهازين مسرعين خطيين من النوع $Varian\ ix$ (المسرع الأول يُعطي حزمة فوتونية بطاقة $23\ MV$ والمسرع الثاني يُعطي حزمة فوتونية بطاقة $18\ MV$) متوفرين في مشفى تشرين الجامعي باللاذقية بشعبة المعالجة الإشعاعية، واستخدمت حزم بساحة تشعيعية بلغت القيمة $40 \times 40\ cm^2$.





الشكل(11.3).: يوضح تخطيطياً توزع العوارض الخشبية الحاملة للكواشف $CR-39$ على طاولة المعالجة.

الشكل (12.3) يوضح تخطيطياً توزع العوارض الخشبية الحاملة للكواشف $CR-39$ على طاولة المعالجة.في مستشفى تشرين الجامعي باللاذقية شعبة المعالجة الإشعاعية.

3.5 قياس توزع التدفقات النترونية الضوئية على طاولة المعالجة للحزمة $23\ MV$

تم اعتماد توزيع الكواشف $CR-39$ المذكور في الفقرة 4، واعتماد الحزمة الفوتونية بالطاقة $23\ MV$ معدل الجرعة الإشعاعية $400\ MU/min$ حيث أنها مقياس لمخرجات الآلة من (MU) وحدة المراقبة للمسرع السريري للعلاج الإشعاعي للمسرع الخطي، والساحة الإشعاعية $40\times40\ cm^2$ والبعد بين المنبع وسطح الطاولة

$SSD = 100\ cm$. وتمت عملية الحك المذكورة سابقاً، ومن ثم أُجريت قراءة الوكاشف $CR-39$ باستعمال المجهر الضوئي ومساحة المشهد $S = 0.00665\ \text{cm}^2$ وتم حساب الخطأ النسبي باستخدام العلاقة

$$.R = \frac{1}{\sqrt{total\ count}}$$

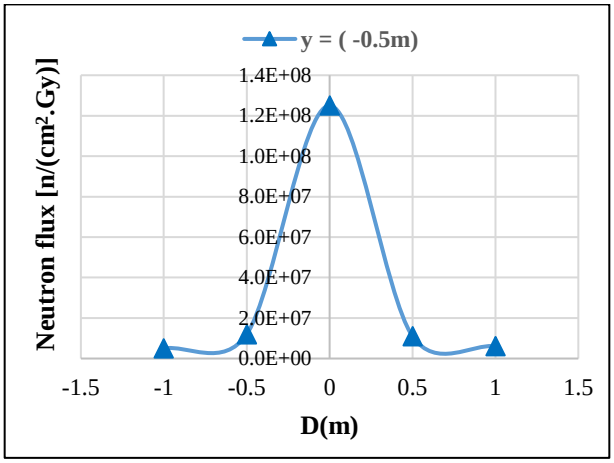
وتمت جدولة نتائج قياس كثافة آثار النترونات الضوئية لحالة الحزمة 23 MV كما في الجدول(4.2) ، وتدفقات النترونات الضوئية كما في الجدول (5.2) وتم تمثيل التدفقات النترونية بيانياً كما في الشكل (13.3)

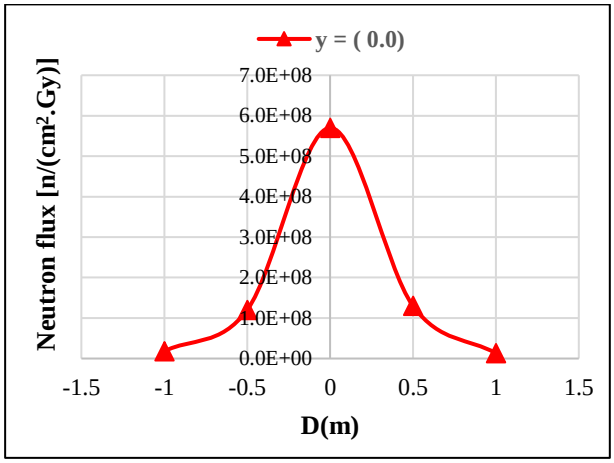
الجدول (4.2) يوضح كثافة آثار النترونات الضوئية على كواشف CR−39 مقابل البعد عن مركز الساحة الإشعاعية لحالة الحزمة الفوتونية 23 MV

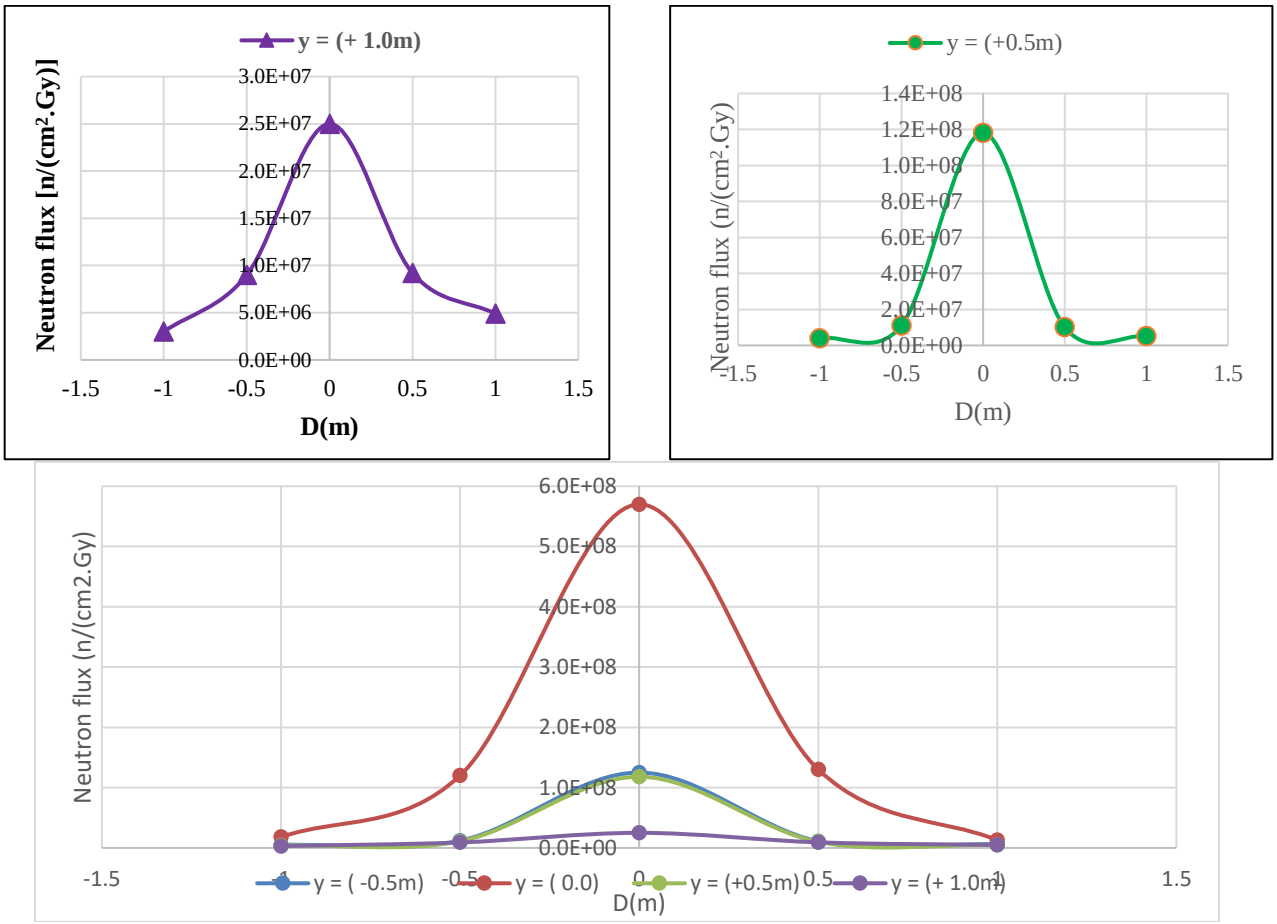
كثافة الآثار على الكواشف $CR-39$ tr/cm^2				
$y=+1.0$	$y=+0.5$	$y=0.0$	$y=-0.5$	المسافة (m)
496	1008	1309	1098	-1
1699	2977	3339	3100	-0.5
5399	10692	19249	11692	0
1600	3158	3384	3240	0.5
451	887	1339	998	1

الجدول (5.2) تدفقات النترونات الضوئية مقابل البعد عن مركز الساحة الإشعاعية المقاسة بواسطة الكواشف CR−39 لحالة الحزمة الفوتونية 23 MV.

تدفق النترونات الضوئية $\varphi[n/(cm^2.Gy)]$				
$y=+1.0$	$y=+0.5$	$y=0.0$	$y=-0.5$	المسافة (m)
3.00E+06	4.00E+06	1.80E+07	5.00E+06	-1
9.00E+06	1.10E+07	1.20E+08	1.20E+07	-0.5
2.50E+07	*1.18E+08*	*5.70E+08*	*1.25E+08*	0
9.20E+06	1.01E+07	1.30E+08	1.10E+07	0.5
4.90E+06	5.10E+06	1.30E+07	6.10E+06	1







الشكل (13.3): يوضح تابعية تدفق النترونات الضوئية للبعد عن مركز الساحة الإشعاعية مقاساً بواسطة كواشف $CR-39$ وللحزمة الفوتونية $23\ MV$.

يلاحظ من الجدول (5.2) والشكل (13.3) أن تدفق النترونات الضوئية يكون أعظم ما يمكن في مركز الساحة الإشعاعية (0,0)،لأن شدة الحزمة الفوتونية تكون عظمى في هذه النقطة وتكون غالبية النترونات الضوئية المتشكلة فيها هي نترونات سريعة وينخفض مع الابتعاد عن هذا المركز، لأن النترونات الضوئية تتلاشى وتنخفض طاقتها بزيادة البعد عن الساحة الإشعاعية و منحنيات توزيع تدفق النترونات الضوئية غاوصية الشكل ومتناظرة بالنسبة إلى المحور oy.

يعطي الجدول(6.2) يم التغيرات النسبية لتدفق النترونات الضوئية في أماكن توضع الكواشف $CR-39$ بالنسبة إلى قيمته في مركز الساحة الإشعاعية لحالة الحزمة الفوتونية 23 MV.

الجدول (6.2) التغير النسبي لتدفق النترونات الضوئية في أماكن توضع الكواشف $CR-39$ بالنسبة إلى قيمته في مركز الساحة الإشعاعية لحالة الحزمة الفوتونية $23\ MV$.

$(\Delta\varphi_i/\bar{\varphi}_i)*100$				
$y=+1.0$	$y=+0.5$	$y=0.0$	$y=-0.5$	المسافة (m)
-1.98E+02	-1.97E+02	-1.88E+02	-1.97E+02	-1
-1.94E+02	-1.92E+02	-1.30E+02	-1.64E+02	-0.5
-1.83E+02	-1.40E+02	0.00E+00	-1.28E+02	0
-1.94E+02	-1.93E+02	-1.26E+02	-1.92E+02	0.5
-1.97E+02	-1.96E+02	-1.91E+02	-1.96E+02	1

3.6 قياس توزع التدفقات النترونية الضوئية على طاولة المعالجة للحزمة $18\ MV$.

أجريت نفس الدراسة السابقة وبنفس الشروط على المسرع $VARIAN\ IX\ (SN: 5365)$ مع مراعاة العوامل التالية:

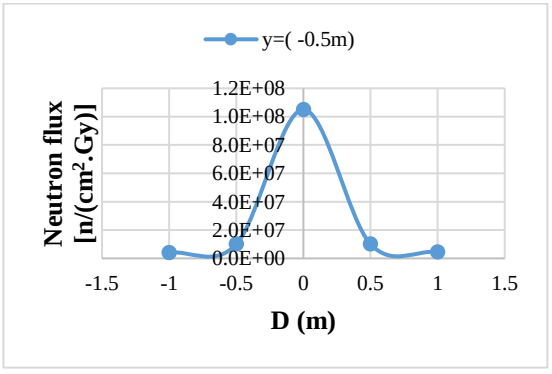
اعتمد توزيع الكواشف $CR-39$ المذكور في الفقرة 3-2، واعتمدت الحزمة الفوتونية بالطاقة $18\ MV$ معدل الجرعة الإشعاعية $400\ MU/min$، والساحة الإشعاعية $40\times40\ cm^2$ والبعد بين المنبع وسطح الطاولة $SSD = 100cm$. وتُركت الكواشف $CR-39$ لفترة زمنية $400\ MU/min$ ومن ثم حُكت الكواشف $CR-39$ وقرأت باستعمال المجهر الضوئي ومساحة المشهد $S = 0.00665\ \text{cm}^2$ وحسب الخطأ النسبي باستخدام العلاقة $R = \frac{1}{\sqrt{total\ count}}$. وتمت جدولة نتائج قياس كثافة آثار النترونات الضوئية كما في الجدول (7.2)، والتدفقات النترونية الضوئية كما في الجدول (8.2) وتمثيل التدفقات النترونية بيانياً كما يوضح الشكل (14.3).

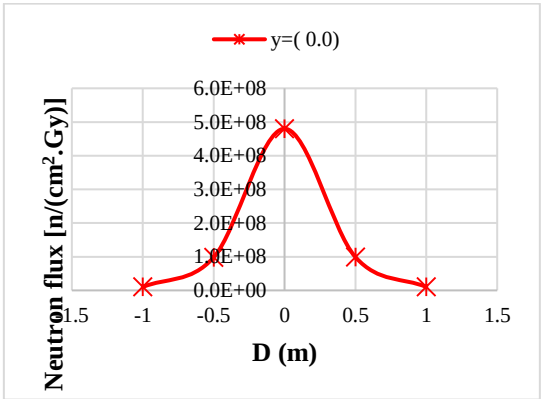
الجدول (7.2) يوضح كثافة آثار النترونات الضوئية على كواشف CR-39 مقابل البعد عن مركز الساحة الإشعاعية لحالة الحزمة الفوتونية 18 MV

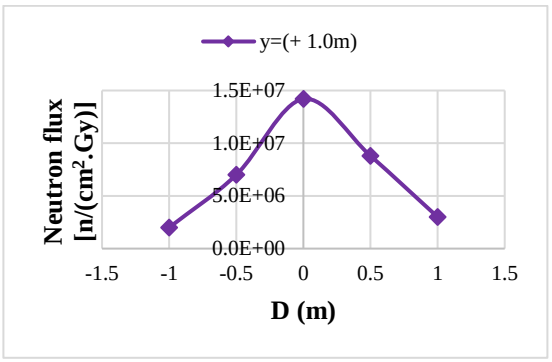
عدد الآثار على الكواشف $CR-39$ tr/cm^2				
$y=+1.0$	$y=+0.5$	$y=0.0$	$y=-0.5$	المسافة (m)
400	**929**	**1108**	**943**	**-1**
1520	**2411**	**3150**	**2500**	**-0.5**
5200	***9010***	**17258**	**9045**	**0**
1490	**2241**	**3111**	**2350**	**0.5**
407	**911**	**1088**	**930**	**1**

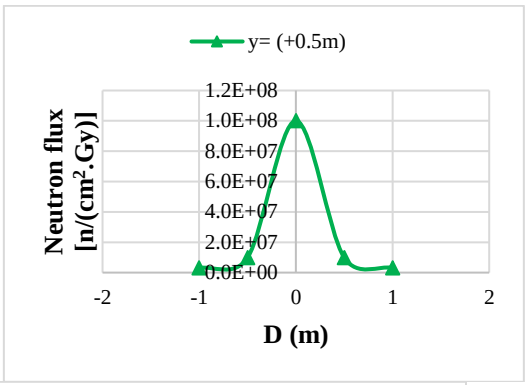
الجدول(8.2) : تدفق النترونات الضوئية مقابل البعد عن مركز الساحة الإشعاعية المقاسة بواسطة الكواشف $CR-39$ لحالة الحزمة الفوتونية $18\ MV$

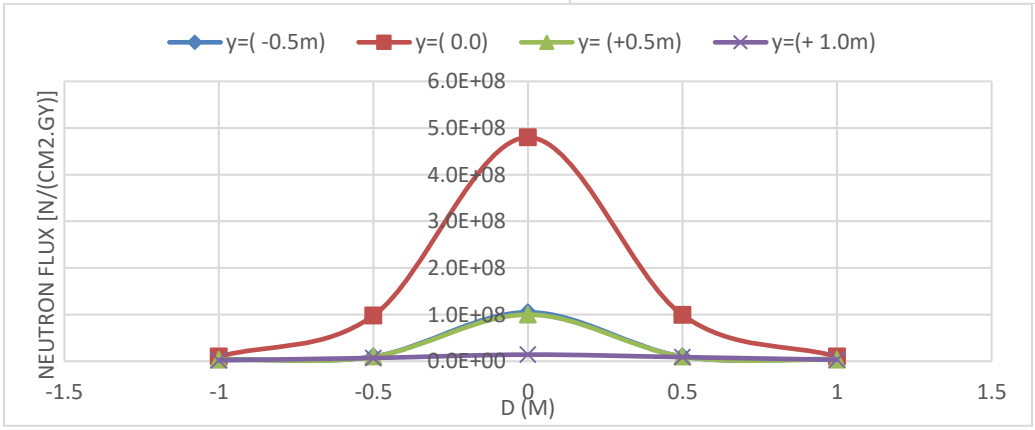
تدفق النترونات الضوئية $\varphi[n/(cm^2.Gy)]$				
$y=+1.0$	$y=+0.5$	$y=0.0$	$y=-0.5$	المسافة (m)
2.00E+06	3.00E+06	1.00E+07	4.00E+06	-1
7.00E+06	9.80E+06	9.80E+07	1.00E+07	-0.5
1.42E+07	1.00E+08	4.80E+08	1.05E+08	0
8.80E+06	9.90E+06	9.90E+07	1.01E+07	0.5
3.00E+06	3.10E+06	1.01E+07	4.50E+06	1











الشكل (14.3): يوضح تابعية تدفق النترونات الضوئية للبعد عن مركز الساحة الإشعاعية مقاساً بواسطة كواشف CR-39 لحالة الحزمة الفوتونية MV 18.

يلاحظ من الجدول (8.2) والشكل(14.3) أن تدفق النترونات الضوئية يكون أعظم ما يمكن في مركز الساحة التشعيعية (0,0)، لان غالبية النترونات في هذه النقطة هي نترونات سريعة ثم ينخفض مع الابتعاد عن هذا المركز، وأن منحنيات توزيع تدفق النترونات الضوئية غاوصية الشكل ومتناظرة بالنسبة إلى المحور oy.

يعطي الجدول (9.2) يم التغيرات النسبية لتدفق النترونات الضوئية في أماكن توضع الكواشف $CR-39$ بالنسبة إلى قيمته في مركز الساحة الإشعاعية لحالة الحزمة الفوتونية $18\ MV$.

الجدول (9.2): التغير النسبي لتدفق النترونات الضوئية في أماكن توضع الكواشف $CR-39$ بالنسبة إلى قيمته في مركز الساحة الإشعاعية لحالة الحزمة الفوتونية $18\ MV$

$(\Delta\varphi_i/\bar{\varphi}_i)*100$				
$y=+1.0$	$y=+0.5$	$y=0.0$	$y=-0.5$	المسافة (m)
-1.98E+02	-1.98E+02	-1.92E+02	-1.97E+02	-1
-1.94E+02	-1.92E+02	-1.32E+02	-1.63E+02	-0.5
-1.89E+02	-1.31E+02	0.00E+00	-1.28E+02	0
-1.93E+02	-1.92E+02	-1.32E+02	-1.92E+02	0.5
-1.98E+02	-1.97E+02	-1.92E+02	-1.96E+02	1

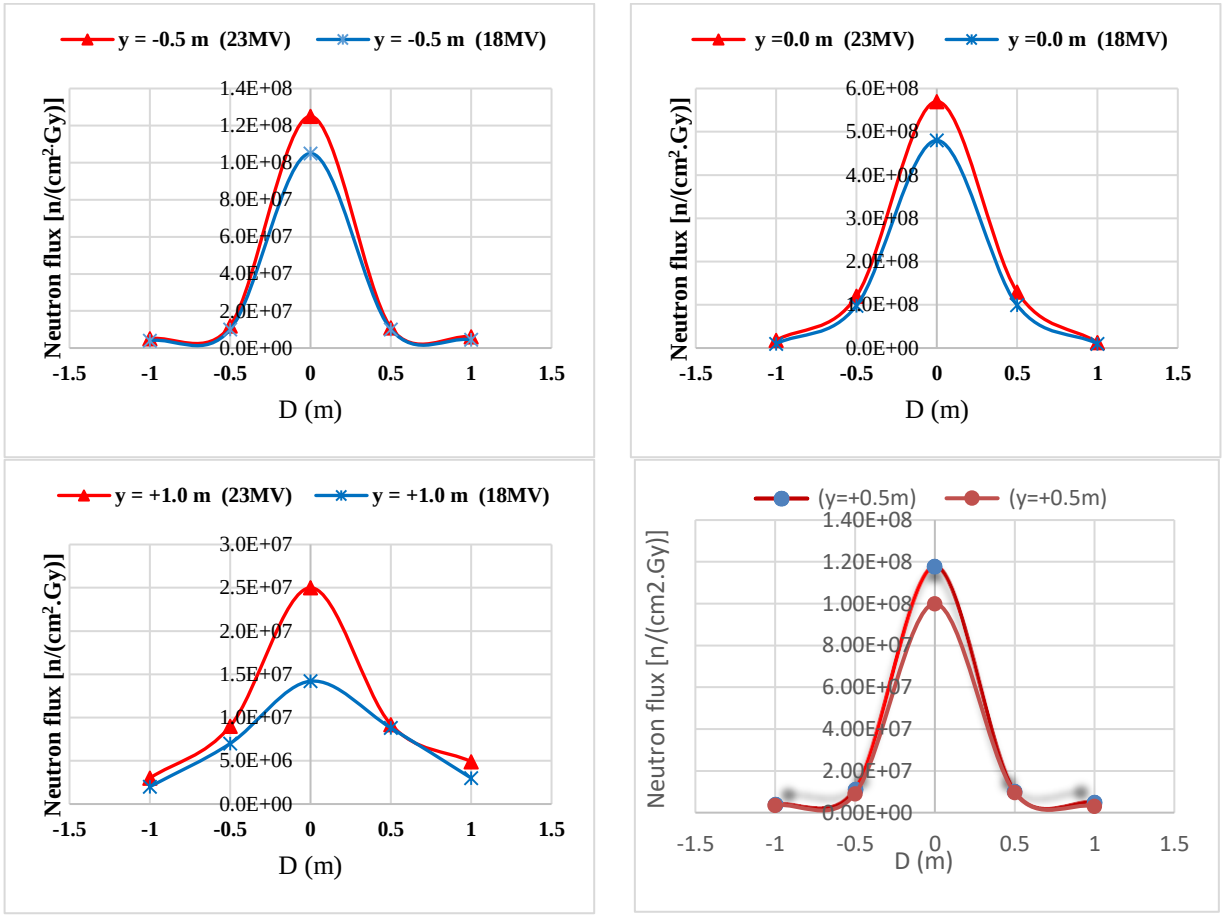
3.7 مقارنة توزعات تدفق النترونات الضوئية لحالتي الحزمتين الفوتونيتين $23\ MV$ و $18\ MV$.

يوضح الشكلان 7 و 8 أن تدفق النترونات الضوئية المقاسة بواسطة الكواشف $CR-39$ أن هذه التدفقات في حالة الحزمة الفوتونية $23\ MV$ أكبر من مثيلاتها لحالة الحزمة الفوتونية $18\ MV$، ويُعزى السبب في ذلك إلى طاقة الحزمة الفوتونية نفسها $23\ MV$ و

MV 18. وجرى حساب الفرق النسبي المئوي في توزع النترونات الضوئية لحالتي الحزمتين الفوتونيتين MV 23 و MV 18 بواسطة العلاقة التالية:

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_{23MV}-\varphi_{18MV}}{(\varphi_{23MV}+\varphi_{18MV})/2} \times 100 \qquad (12)$$

وبينت النتائج كما هو موضح بالشكل 14، أن نسبة معدل التدفق النتروني الناتج عن الطاقة MV 23 أعلى من مثيله لحالة الحزمة MV 18 بنسب متفاوتة فعند مركز الساحة الإشعاعية تبلغ هذه النسبة 17.14% ويُعزى ذلك إلى تغير قيمة طاقة الحزمة نفسها، وعند الموضع y=−0.5 تبلغ النسبة 17.4% نتيجة توضع الكاشف أسفل ذراع المسرع (مسار الإلكترونات). وعند الموضع y=+0.5 تبلغ النسبة 16.5% وعند الموضع y=+1 بلغت النسبة5.4%



الشكل (15.3) : يوضح الفرق في توزع التدفق النتروني الناتج عن الطاقة MV 23 والتدفق النتروني الناتج عن الطاقة MV 18.

4. مناقشة النتائج والإستنتاجات:

جرى في هذا البحث قياس التدفقات النترونية الضوئية لحالة الحزمتين الفوتونيتين MV 23 و MV 18 ضمن غرف مسرعين خطيين يتوفران في مستشفى تشرين الجامعي باللاذقية – شعبة المعالجة الإشعاعية باستخدام كواشف الأثر النووي من النوع CR−39 وعددها 40 كاشف، حيث تم وضع هذه الكواشف في مواضع مختلفة بشكل عرضي (OX) معامد لطاولة المعالجة وبشكل طولي (OY) موازي لطاولة المعالجة.

تم وضع جميع الكواشف على عوارض خشبية وتم تعريضها للحزمة الفوتونية لمدة زمنية وقدرها $400\ MU/min$ وبعد حك الكواشف وعد الآثار بواسطة المجهر الضوئي تبين أن:

1. قيم التدفق النتروني الضوئي في حالة الساحة الإشعاعية $40 \times 40\ cm^2$ ولحالة الحزمتين $23\ MV$ و $18\ MV$ تتغير في مجال من رتبة ($10^6(n/cm^2.Gy$ إلى ($.10^8(n/cm^2.Gy$
2. تبلغ القيمة العظمى للتدفق النتروني الضوئي في مركز الساحة الإشعاعية (isocenter) وتتناقص مع الابتعاد عن هذا المركز.
3. معدل التدفق النتروني الضوئي الموافق للحزمة 23 MV أعلى من مثيله لحالة الحزمة 18 MV بنسبة 17.14%. في مركز الساحة الإشعاعية.
4. عند مقارنة التدفق النتروني لحالة الحزمة الفوتونية 23 MV في هذا البحث والتي بلغت القيمة 5.70E+08 مع العمل المنجز في مستشفى البيروني [18] والتي بلغت قيمتها 2.50E+07 تبين النتائج أن شدة الفوتونات انخفضت بسرعة بازدياد المسافة من مركز شعاع الأشعة السينية نحو المحيط للحقول المفتوحة. وهو يتطابق مع العمل المنجز في مشتفى تشرين الجامعي في مدينة اللاذقية.

- ولحالة الحزمة 18 MV مع العمل المنجز في [19] باستخدام كود MCNP والتي بلغت 2.50E+12 ومقارنته مع العمل المنجز في هذا البحث والتي بلغت 9.80E+07 بينت النتائج ان شدة النترونات الضوئية في قياسات MCNP تكون اعلى قيمة من العمل التجريبي المنجز في هذا البحث لأنه يأخذ جميع أنواع النترونات المتشكلة في غرفة المسرع أما القياسات التجريبية بواسطة كواشف CR−39 تأخذ النترونات السريعة فقط. وتكون عظمى في مركز الساحة الإشعاعية وتنخفض كلما ابتعدنا عن مركز الساحة الإشعاعية باتجاه الحقول المفتوحة. وتأخذ منحني غاوصي الشكل.

References:

[1] A. Jemal, T. Murray, A. Samuels, A. Ghafoor, E. Ward, M.J. Thun, Cancer Statistics. American Cancer Society. **53**: 5-26 (2003)

[2] F. Biltekin, M. Ye iner, G. Özyi it, Investigating infield and out-of-field neutron contamination in highenergy medical linear accelerators based on the treatment factors of field size, depth, beam modifiers, and beam type. Physica Medica. **31**: 517-523 (2015).

[3] Mesbahi A. Dosimetric characteristics of unflattened 6 MV photon beams of a clinical linear accelerator: a Monte Carlo study. Applied Radiation and Isotopes. 2007; 65:1029–36.

[4] Kragl G, af Wetterstedt S, Knäusl B, Lind M, McCavana P, Knöös T, et al. Dosimetric characteristics of 6 and 10MV unflattened photon beams. Radiother Oncol. 2009; 93(1):141-6.

[5] Kragl G, af Wetterstedt S, Knäusl B, Lind M, McCavana P, Knöös T, et al. Dosimetric characteristics of 6 and 10MV unflattened photon beams. Radiother Oncol. 2009; 93(1):141-6.

[6] Jank J, Kragl' G, Georg D. Impact of a flattening filter free linear accelerator on structural shielding design. Z. Med. Phys. 2014; 24:38–48.

[7] Chung JB, Kim JS, Eom KY, Kim IA, Kang SW, Lee JW, et al. Comparison of VMAT-SABR treatment plans with flattening flter (FF) and flattening flter-free (FFF) beam for localized prostate cancer. Journal of Applied Clinical Medical Physics. 2015; 16(6):302–13.

[8] Shirani Tak Abi K, Nedaie HA, Banaee N et al. Step-and-shoot versus compensator-based IMRT: calculation and comparison of integral dose in non-tumoral and target organs in prostate cancer. Iranian Journal of Medical Physics 2015;12:1–6.

[9] B. Juste, S. Morató, R. Miró, G. Verdú, S. Díez, MCNP6 unstructured mesh application to estimate the photoneutron distribution and induced activity inside a linac bunker. Radiation Physics and Chemistry. (2016).

[10] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (1990). (http://www.icrp.org/publication.asp?id=icrp%20pub lication%2060)

[11] R.M. Howell, M.S. Ferenci, Investigation of secondary neutron dose for 18 MV dynamic MLC IMRT delivery. American Association of Physicists in Medicine **32**: 786-793 (2005).

[12] J.P. Lin, W.C. Liu, C.C. Lin CC, Investigation of photoneutron dose equivalent from high-energy photons in radiotherapy. Applied Radiation and Isotopes, **65**: 599–604 (2007).

[13] L. Sajó-Bohus, H.R. Vega-Carrillo, H.S. Virk, SSNTD technique in photo-neutron applications. Solid State Phenomena. **239**: 180-214 (2015).

[14] NCRP. Structural shielding design and evaluation for megavoltage X and gamma-ray radiotherapy facilities: recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements, volume no. 151. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD, 2005. ISBN 0929600878.

[15]Khan, F. M. The Physics of Radiation Therapy. Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia, PA 19106, third edition. (2003).

[16] Cassou, R. M. and Benton, E. V. (1978). Properties and applications of cr-39 polymeric nuclear track detector. Nuclear. Track Detection.

[17]H. Aiginger and M.Silari.2001.Dissertation Design ،Calibration and Tests of an Extended-Range Bonner Sphere spectrometer. CERN

[18]Estimation of photoneutron intensities around radiotherapy linear accelerator
23-MV photon beam.

[19] Neutron dose calculation at the maze entrance of medical linear accelerator rooms

[20] MEASUREMENTS OF PHOTO-NEUTRONS FROM A MEDICAL LINEAR ACCELERATOR USING CR-39 PLASTIC NUCLEAR TRACK DETECTORS