

حساب المدى وتغير الجرعة النترونية والفوتونية في المعالجة بالبروتونات ضمن فانتوم مكافئ للنسيج الحي باستعمال حزم بروتونية متغيرة الطاقة والكود MCNPX-2.3.0

ماجدة نحيلي⁽¹⁾

تاريخ الإيداع 2014/03/26

قبل للنشر في 2014/08/28

الملخص

تمثل المنشآت البروتونية إنجازاً رئيساً في العلاج الإشعاعي وأنظمة المسح الإشعاعي، ويعود ذلك للتوزيعات الجيدة للجرعة حول الورم وإمكانية خفض جرعة كامل الجسم مقارنة بطرائق العلاج الإشعاعي التقليدي كالفوتونات.

استعمل الكود MCNPX-2.3.0 في هذا العمل لحساب المدى والجرعة الممتصة لحزم بروتونية تتغير طاقتها في المجال من 50 MeV إلى 235 MeV وتوزعات الجرعة النترونية والفوتونية ضمن فانتوم مكافئ في التركيبة الكيميائية للنسيج الحي، كما درس أيضاً تأثير إضافة ثخانات محددة من مادة اللكسان في تغير كل من مدى البروتونات وتوزعات الجرعة كتابع للعمق ضمن الفانتوم.

الكلمات المفتاحية: مدى البروتونات، قمة براغ، محدد حزمة، جرعة، نترونية، فوتونية، مادة اللكسان، كود MCNPX-2.3.0.

⁽¹⁾ أستاذة، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سورية.

Calculation of the range, neutron and photon doses in protons radiotherapy into phantom equivalent to organic tissue using the MCNPX- 2.3.0 code

M. Nahili⁽¹⁾

Received 26/03/2014

Accepted 28/08/2014

ABSTRACT

Proton facilities represent a major advance in radiation therapy in addition to scanning systems, because of excellent dose distributions around the tumor, and because of potentially lower whole-body dose compared with conventional radiotherapy methods such as photons.

In this paper Monte Carlo Code MCNPX- 2.3.0 was used, that has been verified to be a suitable tool to evaluate dose distributions in radiotherapy problems, to calculate the range, deposited energy and dose distributions in a phantom equivalent to organic tissue with protons energy between (50–130, 235 MeV). In addition effect of the added thickness of Lexan material on change of protons' range and dose distributions were studied.

Key words: Protons range, Bragg peak, neutron and photon doses, beam collimator, Lexan material, MCNPX- 2.3.0 code.

⁽¹⁾ Prof., Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria

1. المقدمة

تعدُّ مسرعات الجسيمات المشحونة المصدر الرئيس للبروتونات التي تستعمل في عملية العلاج الإشعاعي إذ يعمل المسرع على زيادة الطاقة الحركية للجسيمات المشحونة (مثل الإلكترونات والبروتونات والديترونات والجسيمات ألفا ونوى العناصر الخفيفة والثقيلة) كما تستعمل المسرعات في أغراض البحث العلمي وفي مجال العلاج الإشعاعي إذ يمكن بواسطتها:

- 1- إنتاج نظائر مشعة قصيرة العمر تستعمل للتشخيص الطبي والعلاج.
- 2- توليد الأشعة السينية التي تستعمل في العلاج الإشعاعي.
- 3- الحصول على حزم بروتونية ذات طاقات عالية تستعمل في المعالجة الإشعاعية.
- 4- الحصول على حزم نترونية تستعمل لأغراض العلاج الإشعاعي.

تختلف خصائص الحزم البروتونية عن خصائص الأشعة التقليدية التي تستعمل في مجال المعالجة الإشعاعية كالفوتونات، إذ تفقد الفوتونات طاقتها داخل النسيج مع زيادة العمق وتكون الجرعة الممتصة أكبر ما يمكن قرب السطح ثم تتخفف أسياً مع العمق، نجد أن فقدان البروتونات لطاقتها يزداد مع زيادة العمق داخل النسيج حتى الوصول إلى عمق معين، حيث يلتقط البروتون إلكترونًا ويتعادل كهربائياً متحولاً إلى ذرة هيدروجين، وعند هذا العمق يكون فقدان الطاقة أعظمياً وهو ما يعرف بقمة براغ (Bragg peak) التي تتشكل في نهاية مسار البروتون في المادة [1]. وتعدُّ هذه الخاصية الفيزيائية أساساً لاستعمال البروتونات في المعالجة الإشعاعية حيث تكون الجرعة الممتصة أعظمية عند عمق معين داخل نسيج منطقة الورم، ويمكن التحكم بهذا العمق باستعمال معدات وأجهزة خاصة.

2. الكود MCNPX-2.3.0

الكود MCNPX-2.3.0 يمثل إحدى طرائق مونتني كارلو (MCNP (Monte Carlo N-Particle التي تدرس تفاعل الجسيمات بأنواعها المختلفة مع المادة وعند الطاقات جميعها. وقد بدأ العمل على هذا الإصدار من الكود MCNP منذ عام 1994 إذ كان الغرض منه الحصول على وسيلة لنمذجة ومحاكاة تفاعل إنتاج التريتيوم في المسرع. ويتميز الإصدار MCNPX-2.3.0 بما يأتي [2]:

- تحسينات على طرائق الموازنة الفيزيائية (physics simulation models).
- مكتبات للمقاطع العرضية لتفاعل النترون والبروتون تصل إلى 150 MeV مع إمكانية محاكاة نقل الجسيمات ذات الطاقة الأعلى اعتماداً على استخدام النماذج الفيزيائية (Models) المختلفة.
- طرائق جديدة لتخفيض الارتياح.
- إمكانية محاكاة تفاعلات الجسيمات المشحونة وغير المشحونة.

- أداة محاكاة لعملية إنتاج النظائر المشعة اعتماداً على المسرعات.
- استعماله في معالجة الأورام في مجالي العلاج الإشعاعي بالبروتونات والنترونات.
- أداة تستعمل لمحاكاة الأشعة الكونية ودراستها وتدريب الطائرات عند الارتفاعات العالية.
- تقنيات التصوير المعتمدة على المسرعات.
- تجارب النترينو.

3. غرض البحث:

استعمل الكود MCNPX-2.3.0 في هذا البحث لدراسة كل من:

- تغير المدى والجرعة الممتصة للبروتونات ضمن فانتوم أسطواناني مكافئ في التركيبة الكيميائية للأنسجة الحية (الجدول 1)؛ وذلك لحزم بروتونية تتغير طاقتها في المجال (50-130, 235) MeV.
- تغير جرعة النترونات والفوتونات الناتجة عن تفاعل البروتونات في النسيج الحي كتابع لطاقة البروتون الوارد.
- تأثير استعمال سمك مكافئ من مادة اللكسان (وهي المادة الأساسية للعجلة المعدلة للطور modulator في المعالجة بالبروتونات) في تغير كل من مدى البروتونات ومعدل جرعة البروتونات والنترونات والفوتونات.

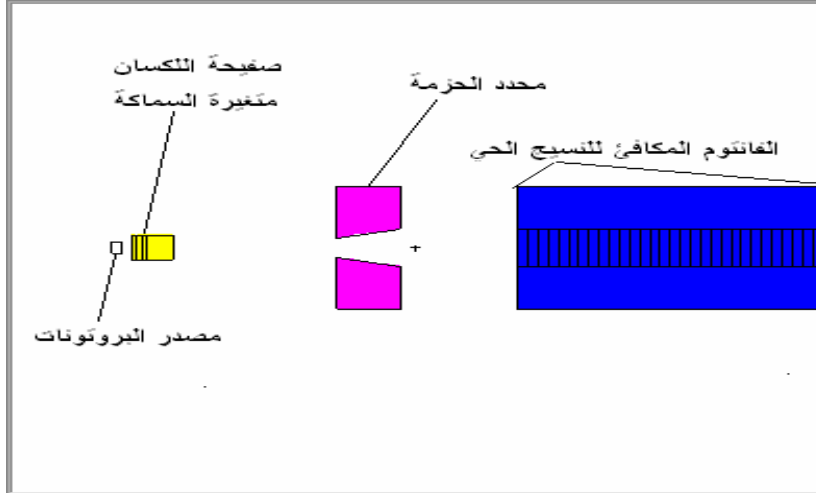
4. توصيف الفانتوم المستعمل في هذا البحث:

استعمل في هذا البحث فانتوم أبعاده $50 \times 20 \times 20$ cm³ مكون من خلايا أسطوانية تمتد على المحور المركزي للفانتوم الموافق لمسار انتشار البروتونات وقطر كل منها 6 cm وسمكها 1cm كما هو موضح في الشكل (1). ويتركب الفانتوم من مواد مكافئة للنسيج الحي كثافتها 1.04 g/cm³ بحسب ICRU وفق النسب الآتية [3]:

الجدول (1) النسب الوزنية لمكونات النسيج الحي والعظام بحسب ICRU

العنصر	ICRU Wt%
H	النسيج الحي 10.7
C	14.5
N	2.2
O	71.2
Na	0.2
Mg	-
P	0.4
S	0.2
Cl	0.3
K	0.3
Ca	-
الكثافة (g/cm ³)	1.04

ويستعمل محدد الحزمة (Beam collimator) في منظومة المعالجة بالبروتونات، إذ تتخذ الحزمة البروتونية شكل مقطع الورم على المستوي العامودي على اتجاهها ويمنع مرورها إلى الأجزاء السليمة المحيطة بالورم مما يجنب الأنسجة السليمة التعرض لجرعة غير مرغوب فيها، كما تؤدي مادة محدد الحزمة دوراً مهماً في مقدار الجرعة النترونية والفوتونية المتولدة ضمن النسيج التي تنجم عن عمليتي التبعثر المرن وغير المرن للبروتونات على ذرات مادة المحدد؛ مما يؤدي إلى تغير ملحوظ في الجرعة الممتصة والجرعة النترونية والفوتونية ضمن النسيج.



الشكل (1) الفانتوم المكافئ للنسيج الحي موضح عليه الخلايا ومحدد الحزمة المستعملة في الحساب في هذا البحث باستعمال رسام الكود MCNP5-beta.

5. توصيف مصدر البروتونات

وصف مصدر البروتونات باستعمال بطاقة المصدر SDEF المتاحة في الكود MCNPX-2.3.0 على شكل قرص مهمل السمك قطره 1 cm ويبعد مسافة 40 cm عن السطح الأمامي للفانتوم كما هو موضح في الشكل (1). وتصدر حزم بروتونية (تقع طاقتها في المدى (50-130, 235) MeV) عن الوجه الأمامي للمصدر القرصي وتتحرك باتجاه الفانتوم على شكل حزم متوازية. ولحساب الجرعة لكل من البروتونات والنترونات والفوتونات داخل خلايا الفانتوم استعملت بطاقة العداد F_6 (Tally) المتاحة في الكود MCNPX-2.3.0 التي تعبر عن متوسط الجرعة الممتصة (الجرعة الممتصة) في الخلية الواحدة مقدرة بوحدة (MeV/g) ويعبر عنها رياضياً بالعلاقة الآتية [4]:

$$H_t = \frac{\rho}{m} \int dE \int dt \int dV \int d\Omega \sigma_t(E) \times H(E) \times \Psi(r, \Omega, E, t) \times d\Omega \quad (\text{MeV/g}) \quad (1)$$

إذ:

- ρ (atoms/barn.cm) كثافة الذرات في الخلية.

- m (g) كتلة الخلية و V (cm³) حجمها.

- t (sh) الزمن (sh: 1 sh=10⁻⁸ s).

- E (MeV) طاقة البروتون.

- Ω (steradian) تمثل الزاوية المجسمة لاتجاه الشعاع.

- r (cm) شعاع موضع البروتون.

- $\sigma_t(E)$ (barns) المقطع الميكروسكوبي الكلي لتفاعل البروتون.

- $H(E)$ (MeV/collision) رقم التسخين (Heating number).

- $H_t(E)$ (MeV/g) الطاقة الكلية المودعة في الخلية.

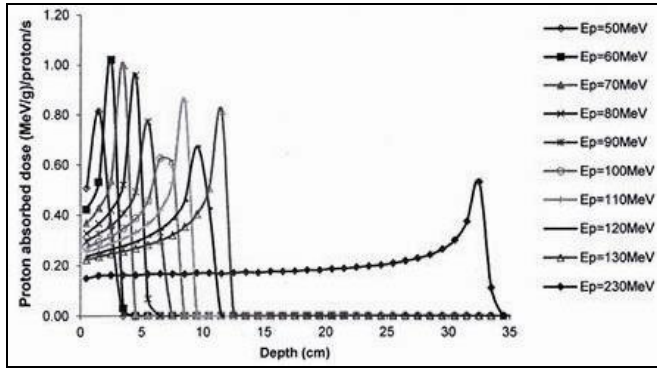
- $\Psi(r, \Omega, E, t)$ (particles/cm³/MeV/steradian) معدل التدفق الزاوي للجسيمات.

وحُسبت الجرعة الممتصة في كل خلية؛ وذلك بتحويل خرج العداد F_6 مقدراً بالوحدة (J/kg) أو (Gy) عن طريق الضرب بالمعامل $(1.6 \times 10^{-10} \text{ (J/kg)/(MeV/g)})$. وتعتمد الدقة في حساب الجرعة على زمن تشغيل الكود MCNPX-2.3.0 لذا اعتمد زمن تشغيل يصل إلى 120 min ويعالج فيه 1270000 بروتون (history).

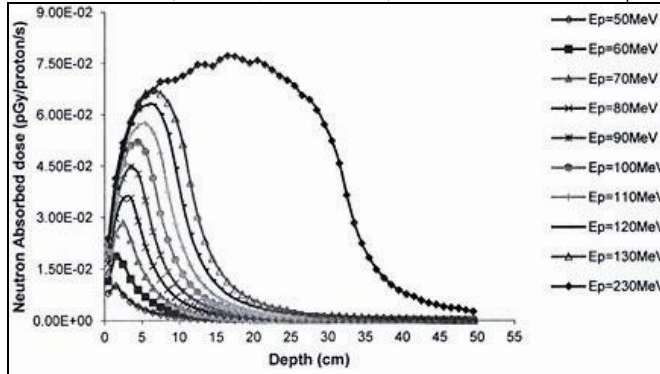
6. المدى وتوزعات الجرعة البروتونية والنترونية والفوتونية كتابع للعمق في الفانتوم وطاقة البروتونات الواردة:

6.1. المدى وتوزعات الجرعة بوجود محدد حزمة من خلائط النحاس Brass:

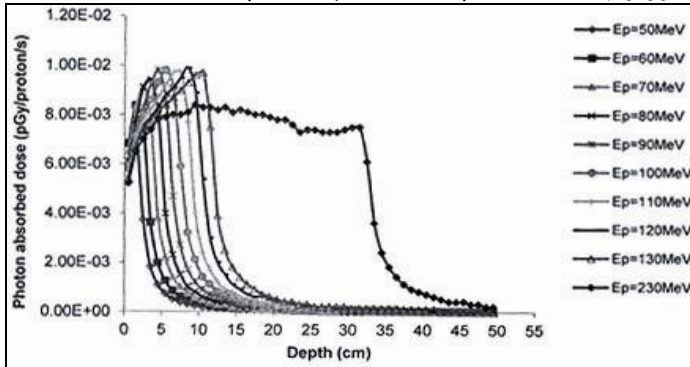
توضح الأشكال (2) و(3) و(4) المدى والجرعة الممتصة للحزم البروتونية ذات الطاقة (235 MeV, 130-50) ومعدل الجرعة النترونية والفوتونية الممتصة في الفانتوم منسوبة إلى بروتون وارد من الحزم على الترتيب، وذلك باستعمال محدد حزمة من خلائط النحاس Brass سمكه 6.5 cm (السماكة اللازمة لإيقاف البروتونات ذات الطاقة 230 MeV [5]) باستعمال الكود MCNPX-2.3.0. وتجدر الإشارة إلى أن الجرعة الفوتونية والنترونية المحسوبة هنا تمثل جرعة الفوتونات والنترونات المرافقة للحزمة البروتونية الناتجة عن تفاعل البروتونات مع كل من الهواء ومحدد الحزمة فضلاً عن النترونات والفوتونات الناتجة عن تفاعل البروتونات مع ذرات النسيج الحي المعبر عنه بالفانتوم المكافئ في تركيبته الكيميائية للنسيج الحي وفق الجدول (1).



الشكل (2) المدى والجرعة الممتصة المتتابع للعمق في الفانتوم منسوبة إلى بروتون من المصدر للحزم البروتونية ذات الطاقة (50-130, 235 MeV).



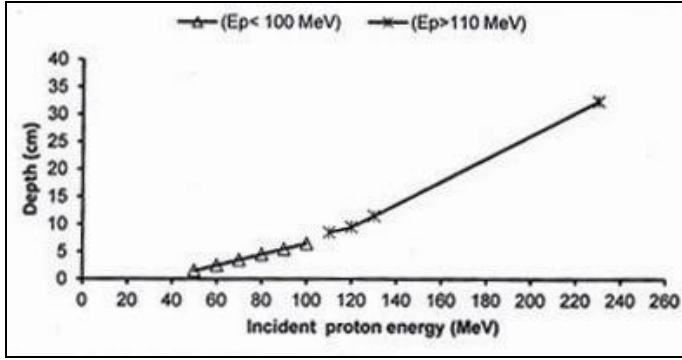
الشكل (3) معدل الجرعة النيوترونية المتتابع للعمق في الفانتوم منسوبة إلى بروتون من المصدر للحزم البروتونية ذات الطاقة (50-130, 235 MeV).



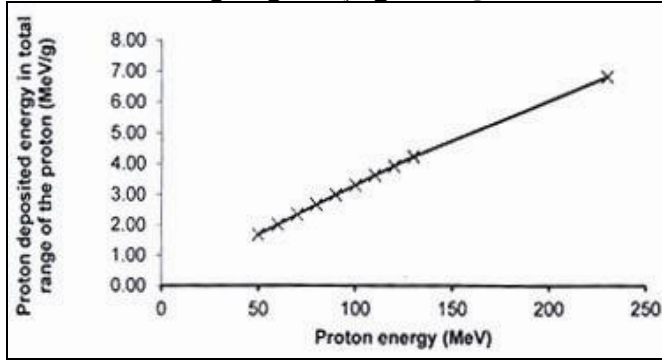
الشكل (4) معدل الجرعة الفوتونية المتتابع للعمق في الفانتوم منسوبة إلى بروتون من المصدر للحزم البروتونية ذات الطاقة (50-130, 235 MeV).

يلاحظ من الشكل (2) أن مدى البروتونات داخل الفانتوم يزداد بزيادة طاقة البروتون إذ يبلغ القيمة 11.5 cm من أجل البروتونات ذات الطاقة 130 MeV والقيمة 32.5 cm من أجل البروتونات ذات الطاقة 235 MeV، إذ يزداد مدى البروتون خطياً مع زيادة طاقة البروتون، ولكن يلاحظ أن المدى يزداد بشكل أسرع بدءاً من طاقة البروتون 110 MeV مقارنة بالطاقات الأقل من ذلك كما هو موضح في الشكل (5)، كما يلاحظ من جهة أخرى أنه مع زيادة الجرعة الممتصة على كامل مسار البروتون مع زيادة طاقته، إلا أن هناك انخفاضاً في الجرعة الممتصة في منطقة القمة (ارتفاع قمة براغ) وتناقصاً في الجرعة الممتصة في وحدة مسار البروتون؛ وذلك مع زيادة طاقة البروتون كما هو موضح في الأشكال (6) و (7) و (8) والجدول (2) على الترتيب.

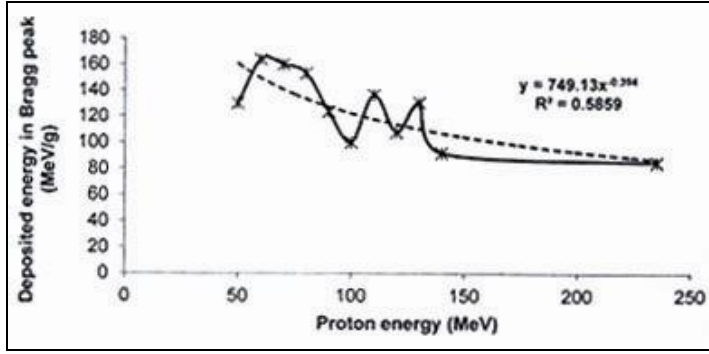
ويلاحظ من الشكلين (3) و (4) أن معدل كل من الجرعة النترونية و الفوتونية كتتابع للعمق في الفانتوم يزداد مع زيادة طاقة البروتون (وتنتج عن تفاعل البروتون مع نوى النسيج) وأن معدل الجرعة النترونية يزداد بشكل أسرع من ازدياد معدل الجرعة الفوتونية مع زيادة طاقة البروتون كما هو موضح في الشكلين (9) و (10).



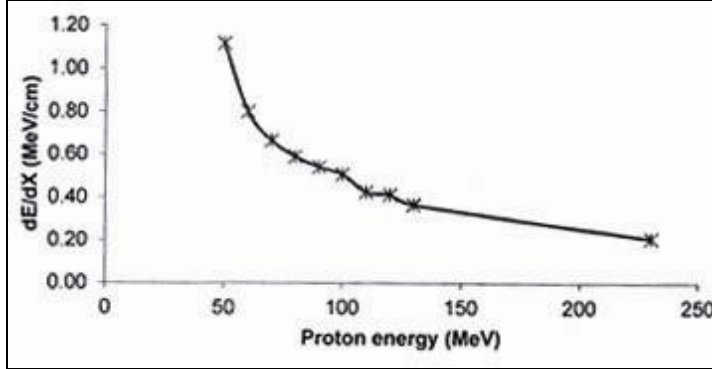
الشكل (5) عمق قمة براغ في النسيج كتابع لطاقة البروتون



الشكل (6) الجرعة الممتصة على كامل المسار كتابع لطاقة البروتون



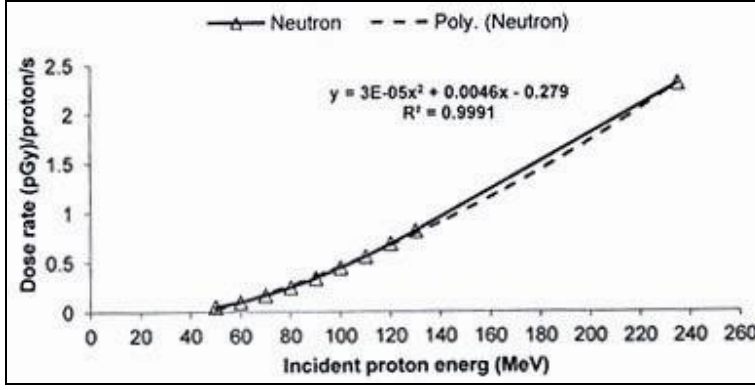
الشكل (7) الجرعة الممتصة في قمة براغ كتابع لطاقة البروتون



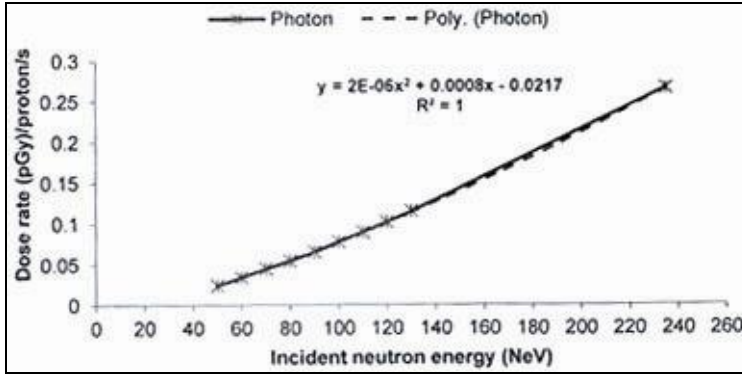
الشكل (8) الجرعة الممتصة في وحدة المسار كتابع لطاقة البروتون

الجدول (2) تغير عمق قمة براغ في النسيج بتغير طاقة البروتون والجرعة البروتونية والنترونية والفوتونية الممتصة في منطقة القمة منسوبة لبروتون واحد من المصدر والخطأ النسبي الموافق باستعمال الكود MCNPX-2.3.0

Dose (pGy/ proton/sec)					Protons	Bragg Depth (cm)	E _p (MeV)
error%	photons	error %	neutrons	error %			
1.09%	0.0072	1.52%	0.0100	0.01%	130.2100	1.5	50
1.07%	0.0075	1.20%	0.0164	0.02%	163.8257	2.5	60
1.11%	0.0076	1.05%	0.0234	0.02%	159.9762	3.5	70
1.08%	0.0080	0.93%	0.0289	0.03%	153.3039	4.5	80
1.07%	0.0086	0.86%	0.0349	0.03%	123.5453	5.5	90
1.05%	0.0091	0.81%	0.0414	0.03%	100.1115	6.5	100
1.14%	0.0077	0.84%	0.0374	0.04%	136.4744	8.5	110
1.11%	0.0089	0.80%	0.0445	0.04%	107.7505	9.5	120
1.20%	0.0075	0.84%	0.0401	0.05%	130.6133	11.5	130
1.16%	0.0089	0.80%	0.0484	0.05%	92.0454	12.5	140
1.16%	0.0061	1.10%	0.0364	0.11%	85.0430	32.5	235



الشكل (9) تغير معدل الجرعة النeutronية كتابع لطاقة البروتون وعلى كامل مساره

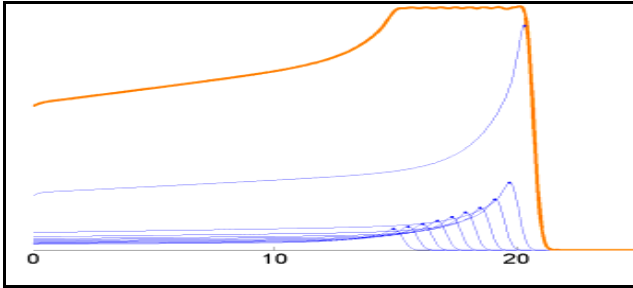
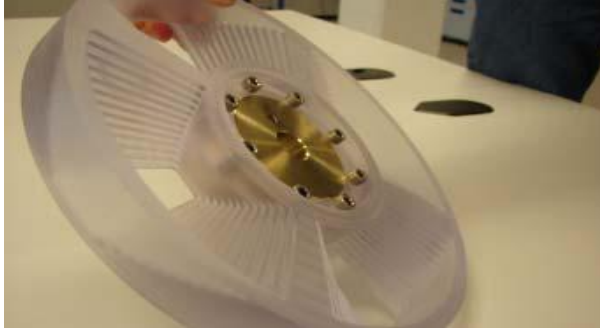


الشكل (10) تغير معدل الجرعة الفوتونية كتابع لطاقة البروتون وعلى كامل مساره

6.2. المدى وتوزيعات الجرعة للبروتونات ذات الطاقة 100 MeV بوجود محدد حزمة من خلائط النحاس Brras وسمك مكافئ من مادة اللكسان:

تتشكل قمة براغ الوحيدة في نقطة واحدة من الورم (single Bragg peak) لا تتجاوز ميلي متراً واحداً. وفي حالة العلاج الإشعاعي بالبروتونات ينبغي أن تتوزع الجرعة العظمى على كامل عمق الورم (مثلاً في حالة سرطان غدة البروستات يبلغ عمق المعالجة نحو 1.2 cm وفقاً للصور الثلاثية البعد المأخوذة لمنطقة المعالجة) ويقتضي ذلك تشكيل مجموعة من قمم براغ (Bragg Family) لتغطية منطقة العلاج بشكل تام، ولهذا الغاية تستعمل العجلة المعدلة (modulator wheel) لتشكيل مجموعة من القمم على طول المحور المركزي لمنطقة العلاج كما هو موضح في الشكل (11). وتتألف العجلة المعدلة من عدد من القطاعات (sectors) تحضر من مواد ماصة للبروتونات ومتفاوتة السمك

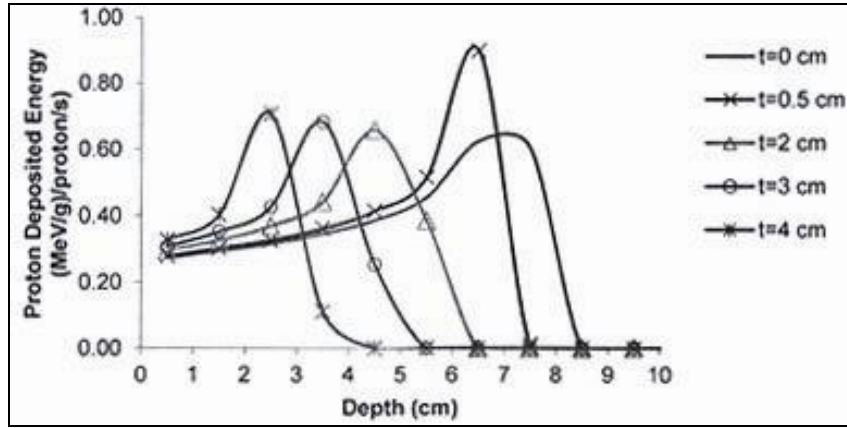
وتفصل بينها فراغات متساوية، إذ عند دوران العجلة تقوم حزم البروتونات التي تعبر من خلال الفراغات بين قطاعات العجلة بتوليد قمم براغ عند أكبر عمق لمنطقة الورم، في حين تنفذ الحزم البروتونية التي تعبر القطاعات إلى أعماق أقل ضمن منطقة الورم تبعاً لسماك مادة قطاع العجلة وتوهين البروتونات فيها، وبذلك تتشكل قمم براغ عند هذه الأعماق. ونتيجة لدوران العجلة بمعدل ثابت تتشكل قمم براغ عند أعماق مختلفة وبمعدل ثابت بدءاً من بداية منطقة الورم (الموافق لنفاذ البروتونات من خلال السمك الأكبر لقطاع العجلة) إلى أكبر عمق للورم (الموافق لمرور البروتونات ضمن الفراغ بين قطاعات العجلة). ولذلك ندرس تأثير مادة العجلة المعدلة في مدى حزمة البروتونات وفي مركبات الجرعة الممتصة النترونية والفتونية الناتجة عن تفاعل البروتونات مع نوى النسيج.



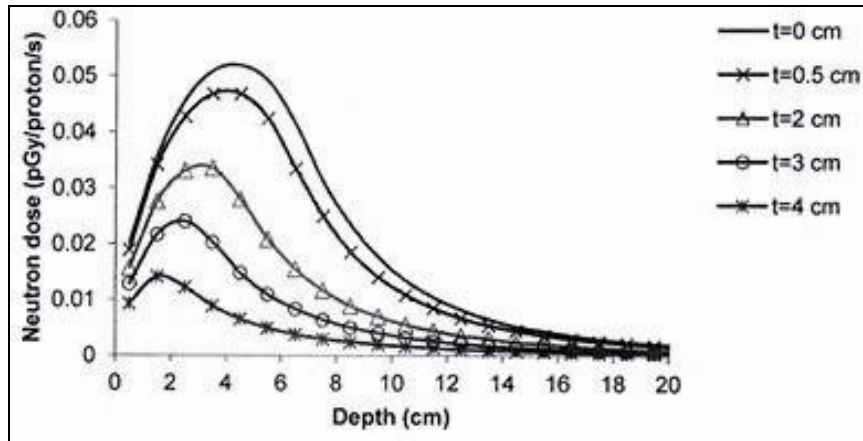
الشكل (11) العجلة المعدلة المستعملة في تشكيل قمم براغ (Bragg family)

لحساب الجرعة الممتصة للبروتونات وتوزع الجرعة النترونية والفتونية بوجود سمك مكافئ للنسيج من مادة اللكسان (المكونة لقطاعات العجلة) ذات التركيب (C: 75.5749%, H:5.5494%, O:18.8757%) والكثافة ($\rho=1.20 \text{ g/cm}^3$) [6] اعتمد مصدر البروتونات المستعمل في الدراسة السابقة قرصاً مهمل السمك قطره 1cm ويصدر البروتونات ذات الطاقة 100 MeV (يمكن اعتماد أية طاقة) ويبعد مسافة 40cm عن السطح

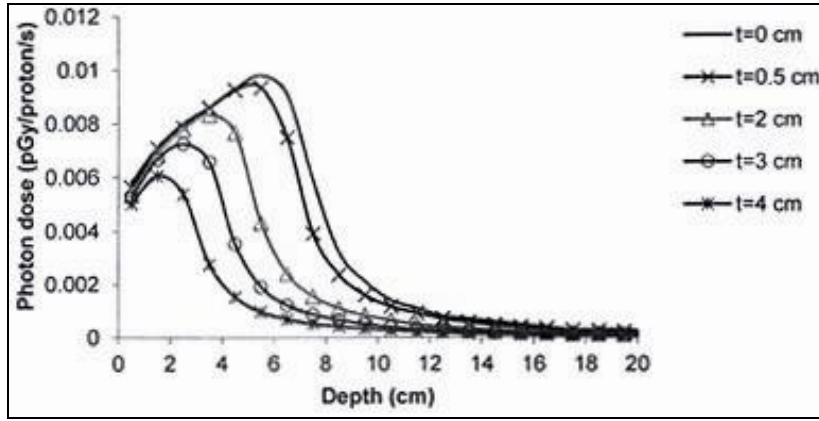
الأمامي للفانتوم. ومثلت مادة اللكسان في النمذجة على شكل أقراص متغيرة السمك تتوضع على المحور ox ونصف قطر كل منها 3 cm كما هو موضح في الشكل (1).
توضح الأشكال (12) و(13) و(14) تغير المدى والجرعة الممتصة النترونية والفوتونية في النسيج بوجود أقراص مختلفة السمك من مادة اللكسان وبعدها من أجل الحزمة البروتونية ذات الطاقة $E_p=100$ MeV.



الشكل (12) تغير المدى والجرعة الممتصة في النسيج بوجود وعدم وجود طبقة متغيرة السمك من مادة اللكسان من أجل البروتونات ذات الطاقة $E_p=100$ MeV



الشكل (13) تغير معدل الجرعة النترونية في النسيج بوجود وعدم وجود طبقة متغيرة السمك من مادة اللكسان من أجل البروتونات ذات الطاقة $E_p=100$ MeV

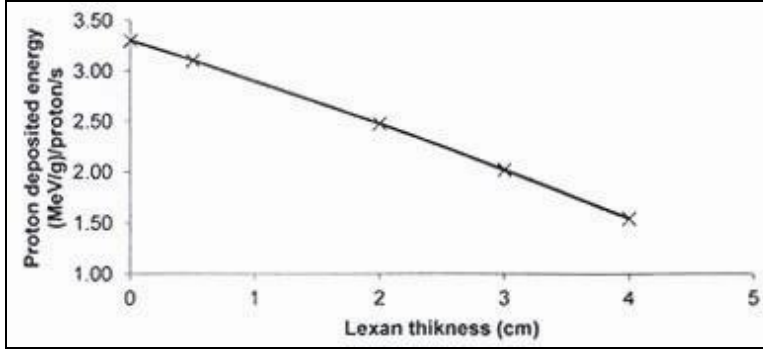


الشكل (14) تغير معدل الجرعة الفوتونية في النسيج بوجود وعدم وجود طبقة متغيرة السمك من مادة اللكسان من أجل البروتونات ذات الطاقة $E_p=100 \text{ MeV}$

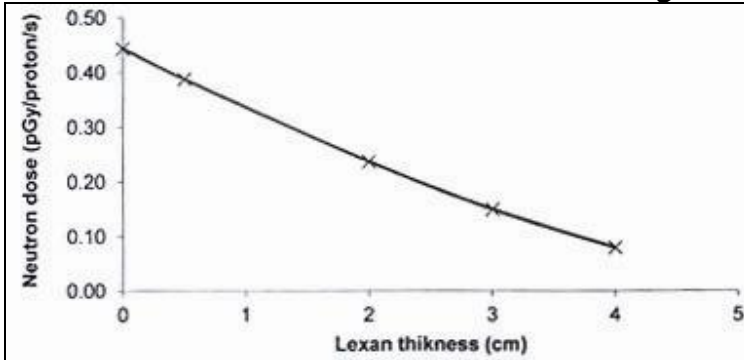
يلاحظ من الشكل (12) أن استعمال محدد حزمة من خلائط النحاس وطبقة متغيرة السمك من مادة اللكسان يؤدي إلى انزياح قمة براغ نحو اليسار مع زيادة سمك طبقة اللكسان، إذ تنزاح قمة براغ من 7.5 cm في حالة عدم وجود طبقة اللكسان إلى 2.5 cm في حالة وجود طبقة من اللكسان سمكها 4 cm، كما أن زيادة سمك طبقة اللكسان من 0.5 cm إلى 4 cm يؤدي إلى توزيع معدل جرعة البروتونات (ذات الطاقة 100 MeV) داخل النسيج في عمق يمتد من 2.5 cm إلى 6.5 cm، ومنه فمدى العمق هذا كاف لتوزيع الجرعة على ورم يمتد على مسافة 4 cm في النسيج، كما يلاحظ أن معدل جرعة البروتونات في النسيج يتناقص خطياً مع زيادة سمك طبقة اللكسان نتيجة تباطؤ البروتونات عبر مادة اللكسان ويبلغ الفرق 53.16% في حالة وجود طبقة من اللكسان سمكها 4cm مقارنة بالحالة نفسها لكن دون وجود طبقة اللكسان كما هو موضح في الشكل (15).

ويلاحظ من الشكل (13) أن وجود طبقة متغيرة السمك من مادة اللكسان يؤدي إلى تناقص معدل الجرعة النترونية بشكل خطي مع زيادة سمك طبقة اللكسان كما هو موضح في الشكل (16)، إذ يبلغ الفرق 82% في حالة وجود طبقة من اللكسان سمكها 4 cm مقارنة بالحالة نفسها لكن دون وجود طبقة اللكسان.

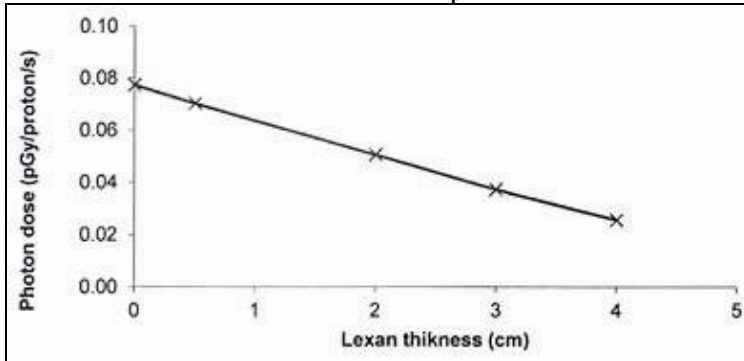
ويلاحظ من الشكل (14) أن وجود طبقة متغيرة السمك من مادة اللكسان يؤدي إلى تناقص الجرعة الفوتونية بشكل خطي مع زيادة سمك طبقة اللكسان كما هو موضح في الشكل (17)، إذ يبلغ الفرق 66.77% في حالة وجود طبقة من اللكسان سمكها 4 cm مقارنة بالحالة نفسها لكن دون وجود طبقة اللكسان.



الشكل (15) تناقص الجرعة الممتصة للبروتونات ذات الطاقة $E_p=100$ MeV في النسيج كتابع لسمك مادة اللكسان.



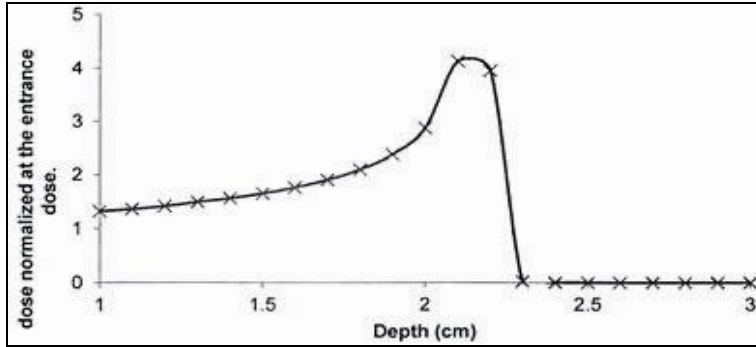
الشكل (16) تناقص معدل الجرعة النترونية في النسيج كتابع لسمك طبقة اللكسان للبروتونات ذات الطاقة $E_p=100$ MeV.



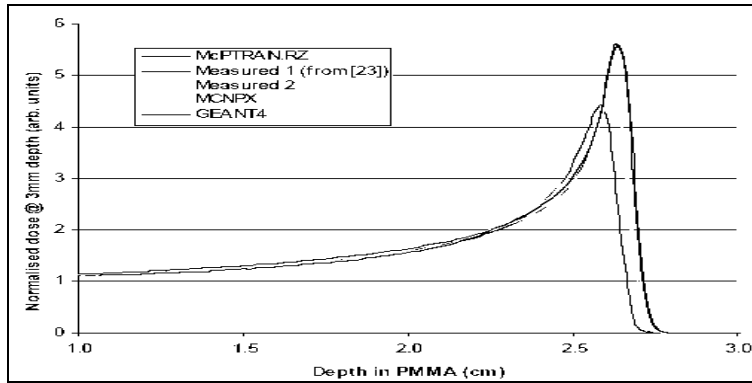
الشكل (17) تناقص معدل الجرعة الفوتونية في النسيج كتابع لسمك طبقة اللكسان للبروتونات ذات الطاقة $E_p=100$ MeV.

7. مقارنة النتائج:

للتحقق من صحة نتائج هذه الدراسة قمنا بحساب مدى البروتونات في الفانتوم المكافئ في تركيبته الكيميائية للنسيج العضوي الموصف في الجدول (1) من أجل البروتونات ذات الطاقة 60 MeV باستعمال الكود MCNPX-2.3.0 كما هو موضح في الشكل (18)، وقورنت نتيجة هذا الحساب بإحدى النتائج المنشورة في العمل [7] الذي اشتمل على مقارنة لمدى البروتونات في فانتوم مركب من المادة PMMA وباستعمال بروتونات يبلغ متوسط طاقتها 60 MeV عند مخرج محدد الحزمة، إذ جرت المقارنة في العمل [7] بين نتائج الحساب باستعمال الكودين MCNPX و GENAT4 وبعض النتائج التجريبية الأخرى الوارد ذكرها في العمل [7].



الشكل (18) المدى وجرعة البروتونات منسوبة إلى الجرعة عند نقطة الدخول للفانتوم المحسوبة في هذا البحث للبروتونات ذات الطاقة 60 MeV باستعمال الكود MCNPX-2.3.0.



الشكل (19) المدى وجرعة البروتونات منسوبة إلى الجرعة عند نقطة الدخول لفانتوم من النوع PMMA وفق العمل [7] والمحسوبة باستعمال الكودين MCNPX و GENAT4 وبعض النتائج التجريبية

ويلاحظ من الشكلين (18) و(19) أن هناك توافقاً جيداً في قيمة جرعة البروتونات ذات الطاقة 60 MeV المحسوبة في هذا العمل باستعمال الكود MCNPX-2.3.0 والمحسوبة باستعمال الكود GENAT4 والنتائج التجريبية للعمل [7]، ولكن هناك فرق في مدى البروتونات واختلاف في عرض القمة (FWHM) بين النتائج، وهذا الاختلاف مرده إلى وجود أجهزة أخرى في العمل [7] لم نتطرق لها في هذه الدراسة فضلاً عن اختلاف شدة مصدر البروتونات المستعمل وأبعاده في كلتا الحالتين والشكل الهندسي للفانتوم وتركيبه الفانتوم.

8. الاستنتاجات:

استعمل الكود MCNPX-2.3.0 في هذا العمل لحساب المدى والجرعة الممتصة للحزم البروتونية ذات الطاقة (50-130, 235 MeV) وتوزعات الجرعة النترونية والفوتونية المرافقة لهذه الحزم وذلك ضمن فانتوم مكافئ في التركيبة الكيميائية للنسيج الحي بوجود صفيحة متغيرة السمك من مادة اللكسان ومحدد حزمة من خلائط النحاس وبعدها وجودها.

وقد بينت نتائج المحاكاة أن مدى البروتونات في النسيج يزداد خطياً مع زيادة طاقة البروتون، وبالمقابل فإن الجرعة الممتصة في منطقة قمة براغ ووحدة مسار البروتون تتخفف مع زيادة طاقة البروتون في حين تزداد الجرعة الناتجة عن النترونات والفوتونات المرافقة للحزمة البروتونية.

ووجد أن استعمال محدد حزمة من خلائط النحاس Brass وصفيحة متغيرة السمك من مادة اللكسان يؤدي إلى خفض الجرعة الممتصة لكل من البروتونات والنترونات والفوتونات. وقد وجد نتيجة المقارنة بين النتائج المستخلصة من هذا البحث ونتائج العمل [7] لحزمة البروتونات ذات الطاقة 60 MeV أن هناك توافقاً بين النتائج جيداً.

REFERENCES

1. Schlegel, W., Bortfeld, T. and Grosu, A-L., (2005). Proton Beam Radiotherapy-The State of the Art: New Technologies in Radiation Oncology (Medical Radiology Series) Springer Verlag, Heidelberg, ISBN 3-540-00321-5.
2. Berylene, R., Patty, M., Barbara, O., Arlene, L., and Jean, H., (2002). mcnpTM user's manual version 2.3.0, LA-UR-02-2607.
3. International Atomic Energy Agency, (2001). Current status of neutron Capture therapy: IAEA, Vienna, IAEA-TECDOC-1223 ISSN 1011-4289 ©IAEA.
4. X-5 Monte Carlo Team, (2003). MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, LA-UR-03-1987.
5. David, J., Brenner, C., Elliston, D., Eric, J. and Harald, P., (2009). Reduction of the secondary neutron dose in passive scattered proton radiotherapy, using an optimized pre-collimator/collimator: Phys. Med. Biol. pp. 6065-6078.
6. Charles, D., Harmon, R., Bush, D. and Judith, F., (1994). Criticality Calculations with MCNP A primer, LA-12827-M.
7. David, S., Hugo, P., Colin, B. and Andrzej, K., (2005). Geant4 Simulation of an Ocular Proton Beam And Benchmark Against other Monte Carlo Codes, American Nuclear Society Topical Meeting in Monte Carlo, Chattanooga, LA-2311- TN.