

تعيين المدى والطاقة المودعة للبروتونات ذات الطاقة
(E=50-130 MeV) في النسيج العضوي ودراسة توزيع قمة
براغ كتاب لسماكة مادة اللكسان Lexan وتعيين أبعاد الساحة
الإشعاعية للحزمة باستعمال الكود MCNPX- 2.3.0

توفيق أبو شديد⁽¹⁾

تاريخ الإيداع 2013/07/02

قبل للنشر في 2013/10/02

الملخص

تمثل وسائل البروتونات إنجازاً رئيساً في العلاج الإشعاعي فضلاً عن استخدامها في أنظمة التصوير الإشعاعي، ويعود ذلك إلى التوزيعات الجيدة للجرعة حول الورم، ومن جهة أخرى إلى انخفاض جرعة كامل الجسم بالمقارنة بطرائق العلاج الإشعاعي التقليدي التي تستخدم الفوتونات مثلاً. في هذا العمل استخدمت طريقة مونت كارلو بواسطة الكود MCNPX- 2.3.0 (الذي أنجز ليصبح أداة ملائمة لحساب توزيعات الجرعة في مسائل العلاج الإشعاعي) لحساب المدى وتوزيعات الجرعة في فانتوم يكافئ النسيج العضوي لبروتونات تقع طاقتها بين (50-130 MeV). كما درس أيضاً تأثير إضافة سماكات من مادة اللكسان (Lexan) في تغير مدى البروتونات ضمن النسيج العضوي. وكذلك حُدِّت أبعاد الساحة الإشعاعية عند بداية الفانتوم كتاب لنصف قطر مبعثر الحزمة.

الكلمات المفتاحية: مدى البروتونات، الطاقة المودعة، قمة براغ، مبعثر الحزمة، الساحة الإشعاعية، الكود MCNPX- 2.3.0.

⁽¹⁾ ماجستير في الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سورية

Determination of the range and deposited energy of protons within the organic tissue at energies (E=50-150 MeV), study of Bragg peak distribution as function to Lexan material thickness and determination of the field size using MCNPX- 2.3.0 code

T. Abo-Shdeed⁽¹⁾

Received 02/07/2013

Accepted 02/10/2013

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 lowering 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 and dose distributions in a phantom equivalent to organic tissue with protons energy between (50–130 MeV).

Also the effect of the added thickness of Lexan material on change of protons' range was studied and the field size at the beginning of the phantom was determined.

Key words: Protons range, Deposited energy, Bragg peak, Scatterer, Field size, MCNPX- 2.3.0 code.

⁽¹⁾ MSC., in Physics, Faculty of Sciences, University of Damascus, Syria

المقدمة

تعدُّ مسرعات الجسيمات المشحونة المصدر الرئيس للبروتونات المستخدمة في عملية العلاج الإشعاعي.

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 في مجال العلاج الإشعاعي أهمها:

1- إنتاج نظائر مشعة قصيرة العمر تستخدم للتشخيص الطبي والعلاج.

2- توليد أشعة x المستخدمة في العلاج الإشعاعي.

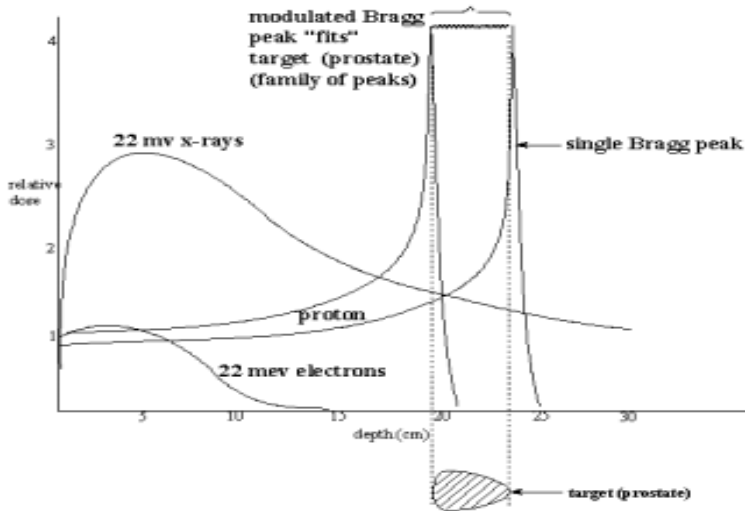
3- الحصول على حزم بروتونات ذات طاقات عالية تستخدم في المعالجة الإشعاعية.

4- الإفادة من تفاعل الجسيمات المشحونة الناتجة عن المسرع مع أهداف محددة (Targets) للحصول على نوترونات تستخدم لأغراض العلاج الإشعاعي.

من المعلوم أن خصائص الأشعة البروتونية تختلف عن خصائص الأشعة التقليدية التي تستخدم في مجال المعالجة الإشعاعية كالفوتونات. في حين تفقد الفوتونات طاقتها داخل النسيج مع زيادة العمق إذ تكون الطاقة المودعة أكبر ما يمكن عند السطح ثم تتخفف أسياً مع العمق، وعلى عكس ذلك نجد أن فقدان البروتونات لطاقتها يزداد مع زيادة العمق داخل النسيج حتى الوصول إلى عمق معين، إذ يلتقط البروتون إلكترونات ويتعادل كهربائياً، وعند هذا العمق يكون فقدان الطاقة أعظمية وهو ما يعرف بقمة براغ (Bragg peak) التي تتشكل في نهاية مسار البروتون ضمن المادة [1].

يتباطأ البروتون ويفقد طاقته في الوسط المادي بنتيجة تأثيره المتبادل مع الذرات (مع الإلكترونات) ومع نواة الذرة. يحدث التأثير المتبادل للبروتون مع الإلكترونات المدارية في معظمه في نهاية مسار البروتون، ويرافق ذلك تحرر طاقة أعظمية ضمن منطقة التفاعل في نهاية هذا المسار [1]. وتعدُّ هذه الخاصية الفيزيائية أساساً لاستخدام البروتونات في المعالجة الإشعاعية إذ تكون الطاقة المودعة أعظمية عند عمق معين داخل نسيج منطقة الورم. ويمكن التحكم بهذا العمق باستخدام معدات وأجهزة خاصة يمكن التطرق إليها في دراسة مستقبلية.

أفيد في هذه الدراسة من الكود MCNPX-2.3.0 في تقدير مدى البروتونات وتوزيع الطاقة ضمن فانتوم مكافئ من حيث تركيبته الكيميائية للنسيج الحي ودراسة تغير مدى البروتونات ضمن النسيج كتابع لسماكة مادة اللكسان. وحُدِّت أيضاً أبعاد الساحة الإشعاعية كتابع لنصف قطر محدد الحزمة، ونظراً إلى عدم توافر إمكانية الإظهار الجرافيكي ضمن الكود MCNPX-2.3.0 فقد أُفيد من الواجهة الرسومية للكود MCNP-5 لتوضيح التصاميم المستخدمة في هذه الدراسة.



Comparison of relative dose (energy deposition) vs body depth for 22 MeV x-rays, 22 MeV electrons and >200 MeV protons

الشكل (1) مقارنة بين الجرعة النسبية (الطاقة المودعة) مقابل العمق في الجسم للأشعة السينية (22 MeV) ولإلكترونات (22 MeV) ولبروتونات التي تزيد طاقتها على 200 MeV.

1. الكود MCNPX- 2.3.0

يعد الكود MCNPX-2.3.0 إحدى طرائق مونت كارلو MCNP(Monte Carlo N-Particle) الذي يراعي معالجة أنواع الجسيمات جميعها عند الطاقات جميعها. وقد بدأ العمل على هذا الإصدار من الكود MCNP منذ عام 1994 وقد كان الهدف الأساسي لهذا الإصدار هو تأمين وسيلة لمحاكاة تفاعل إنتاج التريتيوم ونمذجته في المسرع. ويشمل الإصدار MCNPX- 2.3.0 الميزات الآتية [2]:

- تحسينات على طرائق الموائمة الفيزيائية (physics simulation models).
- مكتبات للمقاطع العرضية لتفاعل النيوترون والبروتون تصل إلى 150 MeV.
- طرائق جديدة لتخفيض الارتباب.
- إمكانية محاكاة تفاعلات الجسيمات المشحونة وغير المشحونة.
- أداة محاكاة لعملية إنتاج النظائر المشعة اعتماداً على المسرعات.
- استخدامه في معالجة الأورام في مجالي العلاج الإشعاعي بالبروتونات والنيوترونات.
- أداة تستخدم لمحاكاة الأشعة الكونية ودراستها وتدريب الطائرات عند الارتفاعات العالية.
- تقنيات التصوير المعتمدة على المسرعات.
- تجارب التريتيوم.

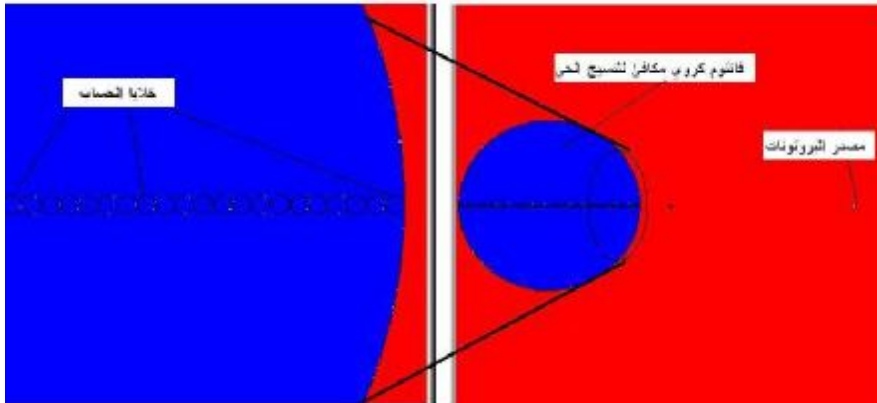
2. الفانتوم المستخدم في الدراسة:

لتقدير الجرعة المودعة في النسيج العضوي لبروتونات تقع طاقتها في المدى (50-130 MeV)، وُصِفَ فانتوم على شكل كرة قطرها 30 cm تكافئ بتركيبها لنسيج حي كثافته 1.04 gr/cm^3 بحسب الـ ICRU وفق النسب الآتية [3]:

الجدول (1) النسب الوزنية لمكونات النسيج العضوي والعظام

العنصر	ICRU Wt%	
	النسيج العضوي	العظام
H	10.7	3.4
C	14.5	15.5
N	2.2	4.2
O	71.2	43.5
Na	0.2	0.1
Mg	-	0.2
P	0.4	10.3
S	0.2	0.2
Cl	0.3	-
K	0.3	-
Ca	-	22.5
الكثافة [gr/cc]	1.04	1.92

كما وُصِفَت الخلايا المستخدمة في حساب الجرعة على شكل كرات قطرها 0.5 cm تمتد حتى عمق 30 cm داخل الفانتوم وحجم كل خلية (0.066 cm^3) ويصل عدد هذه الخلايا إلى نحو 60 خلية كما بالشكل (2).



الشكل (2) الفانتوم المكافئ للنسيج العضوي المستخدم في الدراسة موضح عليه الخلايا المستخدمة في الحساب باستخدام رسام الكود MCNP-5.

3. توصيف مصدر البروتونات

وصف مصدر البروتونات على شكل مصدر قرصي قطره 1cm باستعمال بطاقة المصدر SDEF المتاحة في الكود ويبعد مصدر البروتونات مسافة 50 cm عن مركز الكرة الممثلة للفانتوم كما هو موضح بالشكل (2). تصدر البروتونات (تقع طاقتها في المدى (50-130 MeV)) عن الوجه الأمامي للمصدر القرصي وتتحرك باتجاه الفانتوم. لتقدير كمية الطاقة المودعة للبروتونات داخل الفانتوم ومنه الجرعة المودعة استعملت بطاقة العداد F₆ المتاحة في الكود MCNPX- 2.3.0 التي تمثل متوسط الطاقة المودعة للبروتونات في الخلية بوحدة (MeV/gr) ويعبر عنها رياضياً بالعلاقة الآتية [4]:

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

إذ: ρ_a (atoms/bam.cm) هي كثافة الذرات في الخلية.

m (gr) هي كتلة الخلية و V (cm³) حجمها.

t (sh) هو الزمن (sh: 1 sh=10⁻⁸ s).

E (MeV) هي طاقة البروتون.

Ω (steradian) تمثل الزاوية المجسمة (شعاع الاتجاه).

r (cm) هو شعاع موضع البروتون.

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

$H(E)$ (MeV/colli sion) هو رقم التسخين (Heating number).

$H_t(E)$ (MeV/gr) هي الطاقة الكلية المودعة في الخلية.

$\Psi(r, \Omega, E, t)$ هو معدل التدفق الزاوي للجسيمات له وحدة (particles/cm³/MeV/steradian)

أمّا السبب في اختيار بطاقة العداد F₆ وتفضليه على البطاقات الأخرى (F₁, F₂, F₄, F₅ ...) فيعود إلى أن بطاقة العداد F₆ تعطينا قيمة الطاقة الوسطية المودعة في خلية محددة من النسيج منسوبة إلى كتلة الخلية مما يمكننا من تعيين قيمة الجرعة الممتصة في تلك الخلية، أمّا استخدام البطاقات الأخرى في تعيين الجرعة فمرتبط بشكل أساسي بتوفر معاملات تحويل معدل تدفق الجسيمات إلى جرعة لكي يمكن استخدامها في حساب الجرعة كون البطاقات الأخرى جميعها تعطي معدل تدفق الجسيمات عبر خلية (البطاقة F₄)، أو سطح (F₂)، أو عند نقطة كاشف (البطاقة F₅).

وقدّرت الجرعة الممتصة في كل خلية، وذلك بتحويل الخرج الذي تم الحصول عليه من بطاقة العداد F₆ إلى واحدة (J/kg) أو (Gy) عن طريق الضرب بالمعامل

تدخل في ملف الدخول ليعطينا مباشرة قيمة مكافئ الجرعة (dose equivalent) مقدراً بوحدة (rem/source particle) الذي يأخذ بالحسبان معامل النوعية لكل طاقة للبروتونات الواردة.

وقد أُجريت الحسابات كلها منسوبة إلى كل بروتون.

النتائج والحسابات

يبين الجدول (2) مدى البروتون الموافق للطاقات المختلفة في النسيج المدروس وكمية الطاقة العظمى المودعة في نهاية المسار منسوبة إلى بروتون واحد.

الجدول (2) مدى البروتون وكمية الطاقة العظمى المودعة في النسيج الحي منسوبة إلى كل بروتون محسوبة بالكود MCNPX- 2.3.0 من أجل الطاقات المعتمدة

Error %	الطاقة المودعة العظمى (MeV/gr)/proton	المدى (cm)	الطاقة (MeV)
4.88%	6.57×10^{-3}	1.75	50
4.99%	8.35×10^{-3}	2.75	60
5.24%	7.99×10^{-3}	3.75	70
5.27%	7.16×10^{-3}	4.75	80
5.38%	5.16×10^{-3}	5.75	90
5.66%	6.40×10^{-3}	7.25	100
6.27%	4.57×10^{-3}	8.75	110
6.78%	3.73×10^{-3}	10.25	120
6.90%	3.80×10^{-3}	11.75	130

وتعطي الجداول (3) و(4) و(5) و(6) قيم الطاقة المودعة مقابل العمق داخل الفانتوم مع الخطأ النسبي الموافق محسوبة بالكود MCNPX- 2.3.0 للبروتونات المعتمدة.

الجدول (3) الطاقة المودعة لكل بروتون مقابل العمق داخل الفانتوم والخطأ النسبي الموافق محسوبا بالكود MCNPX- 2.3.0 للبروتونات ذات الطاقة (Ep=50 ,60MeV)

Ep=60 MeV		Ep=50 MeV		العمق (cm)
Error %	E _{deposited} (MeV/gr)/p	Error %	E _{deposited} (MeV/gr)/p	
4.49%	2.91×10^{-3}	4.54%	3.45×10^{-3}	0.25
4.48%	3.04×10^{-3}	4.62%	3.79×10^{-3}	0.75
4.65%	3.35×10^{-3}	4.71%	4.56×10^{-3}	1.25
4.75%	3.77×10^{-3}	4.88%	6.57×10^{-3}	1.75
4.81%	4.52×10^{-3}	6.34%	2.48×10^{-3}	2.25
4.99%	8.35×10^{-3}	0.00%	0	2.75
72.97%	9.78×10^{-6}	0.00%	0	3.25

الجدول (4) الطاقة المودعة لكل بروتون مقابل العمق داخل الفانتوم والخطأ النسبي الموافق محسوباً بالكود MCNPX-2.3.0 للبروتونات ذات الطاقة (Ep=70, 80MeV)

Ep=80 MeV		Ep=70 MeV		العمق (cm)
Error %	E _{deposited} (MeV/gr)/p	Error %	E _{deposited} (MeV/gr)/p	
4.41%	2.23 x10 ⁻³	4.68%	2.54 x10 ⁻³	0.25
4.54%	2.29 x10 ⁻³	4.68%	2.59 x10 ⁻³	0.75
4.58%	2.39 x10 ⁻³	4.78%	2.71 x10 ⁻³	1.25
4.76%	2.52 x10 ⁻³	4.90%	2.98 x10 ⁻³	1.75
4.75%	2.63 x10 ⁻³	5.05%	3.18 x10 ⁻³	2.25
4.91%	2.77 x10 ⁻³	5.11%	3.45 x10 ⁻³	2.75
5.04%	2.93 x10 ⁻³	5.20%	4.31 x10 ⁻³	3.25
5.16%	3.21 x10 ⁻³	5.24%	7.99 x10 ⁻³	3.75
5.20%	3.86 x10 ⁻³	72.97%	3.69 x10 ⁻⁶	4.25
5.27%	7.16 x10 ⁻³	0.00%	0	4.75
28.52%	8.95 x10 ⁻⁵	0.00%	0	5.25

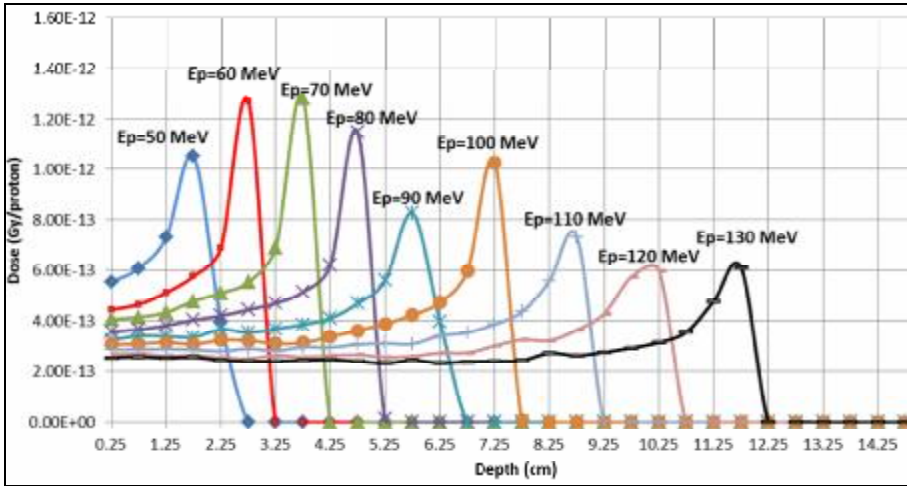
الجدول (5) الطاقة المودعة لكل بروتون مقابل العمق داخل الفانتوم والخطأ النسبي الموافق محسوباً بالكود MCNPX-2.3.0 للبروتونات ذات الطاقة (Ep=90, 100, 110 MeV)

Ep=110 MeV		Ep=100 MeV		Ep=90 MeV		العمق (cm)
Error%	E _{deposited} (MeV/gr)/p	Error%	E _{deposited} (MeV/gr)/p	Error%	E _{deposited} (MeV/gr)/p	
4.46%	1.79 x10 ⁻³	4.44%	1.92 x10 ⁻³	4.40%	2.03 x10 ⁻³	0.25
4.76%	1.79 x10 ⁻³	4.96%	1.93 x10 ⁻³	4.59%	2.13 x10 ⁻³	0.75
5.03%	1.80 x10 ⁻³	4.76%	1.97 x10 ⁻³	5.00%	2.13 x10 ⁻³	1.25
4.95%	1.79 x10 ⁻³	4.71%	1.92 x10 ⁻³	4.62%	2.10 x10 ⁻³	1.75
4.88%	1.75 x10 ⁻³	5.04%	2.02 x10 ⁻³	4.84%	2.29 x10 ⁻³	2.25
5.14%	1.81 x10 ⁻³	5.00%	2.01 x10 ⁻³	4.85%	2.22 x10 ⁻³	2.75
5.12%	1.76 x10 ⁻³	5.16%	1.94 x10 ⁻³	5.06%	2.31 x10 ⁻³	3.25
5.77%	1.85 x10 ⁻³	5.10%	1.96 x10 ⁻³	5.16%	2.41 x10 ⁻³	3.75
5.35%	1.84 x10 ⁻³	5.22%	2.11 x10 ⁻³	5.15%	2.56 x10 ⁻³	4.25
5.55%	1.92 x10 ⁻³	5.39%	2.26 x10 ⁻³	5.24%	2.93 x10 ⁻³	4.75
5.50%	1.94 x10 ⁻³	5.42%	2.43 x10 ⁻³	5.30%	3.49 x10 ⁻³	5.25
5.49%	1.93 x10 ⁻³	5.47%	2.65 x10 ⁻³	5.38%	5.16 x10 ⁻³	5.75
5.73%	2.14 x10 ⁻³	5.51%	2.95 x10 ⁻³	6.93%	2.49 x10 ⁻³	6.25
5.73%	2.21 x10 ⁻³	5.62%	3.73 x10 ⁻³	0.00%	0	6.75
5.84%	2.42 x10 ⁻³	5.66%	6.40 x10 ⁻³			7.25
5.90%	2.73 x10 ⁻³	43.33%	4.44 x10 ⁻⁵			7.75
6.13%	3.48 x10 ⁻³	0.00%	0			8.25
6.27%	4.57 x10 ⁻³					8.75

الجدول (6) الطاقة المودعة لكل بروتون مقابل العمق داخل الفانتوم والخطأ النسبي الموافق محسوبا بالكود MCNPX-2.3.0 للبروتونات ذوات الطاقة (Ep=120, 130 MeV)

Ep=130 MeV		Ep=120 MeV		العمق (cm)
Error%	E _{deposited} (MeV/gr)/p	Error%	E _{deposited} (MeV/gr)/p	
4.50%	1.58 x10 ⁻³	4.52%	1.66 x10 ⁻³	0.25
5.04%	1.61 x10 ⁻³	4.89%	1.68 x10 ⁻³	0.75
4.90%	1.57 x10 ⁻³	4.82%	1.63 x10 ⁻³	1.25
4.85%	1.59 x10 ⁻³	4.78%	1.64 x10 ⁻³	1.75
4.98%	1.52 x10 ⁻³	4.87%	1.59 x10 ⁻³	2.25
5.16%	1.49 x10 ⁻³	4.95%	1.55 x10 ⁻³	2.75
5.00%	1.49 x10 ⁻³	5.45%	1.64 x10 ⁻³	3.25
5.22%	1.52 x10 ⁻³	5.16%	1.60 x10 ⁻³	3.75
5.50%	1.53 x10 ⁻³	5.37%	1.63 x10 ⁻³	4.25
5.37%	1.49 x10 ⁻³	5.55%	1.66 x10 ⁻³	4.75
5.45%	1.44 x10 ⁻³	5.62%	1.59 x10 ⁻³	5.25
5.80%	1.51 x10 ⁻³	5.67%	1.62 x10 ⁻³	5.75
6.42%	1.45 x10 ⁻³	5.77%	1.70 x10 ⁻³	6.25
5.96%	1.48 x10 ⁻³	5.76%	1.71 x10 ⁻³	6.75
5.94%	1.49 x10 ⁻³	5.78%	1.88 x10 ⁻³	7.25
5.93%	1.51 x10 ⁻³	6.07%	2.04 x10 ⁻³	7.75
6.19%	1.70 x10 ⁻³	6.07%	2.02 x10 ⁻³	8.25
6.15%	1.64 x10 ⁻³	6.17%	2.28 x10 ⁻³	8.75
6.18%	1.72 x10 ⁻³	6.18%	2.68 x10 ⁻³	9.25
6.44%	1.83 x10 ⁻³	6.26%	3.58 x10 ⁻³	9.75
6.34%	1.96 x10 ⁻³	6.78%	3.73 x10 ⁻³	10.25
6.45%	2.23 x10 ⁻³	6.78%	3.77 x10 ⁻⁶	10.75
6.61%	2.98 x10 ⁻³	0.00%	0	11.25
6.90%	3.80 x10 ⁻³			11.75
72.39%	1.67 x10 ⁻⁵			12.25
72.39%	7.81 x10 ⁻⁶			12.75

يوضح الشكل (3) المنحنيات البيانية لتوزيع جرعة البروتونات منسوبة إلى بروتون الواحد مقابل العمق داخل الفانتوم محسوبة بالكود MCNPX- 2.3.0 لبروتونات تقع طاقاتها في المدى (50-130 MeV).



الشكل (3) المنحنيات البيانية لتوزيع مركبات جرعة البروتونات منسوبة إلى بروتون الواحد مقابل العمق داخل الفانتوم محسوبة بالكود MCNPX- 2.3.0 لبروتونات تقع طاقتها في المدى (50-130 MeV).

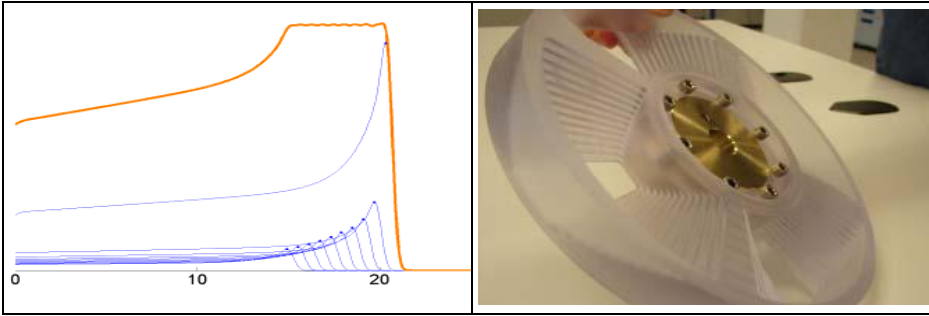
يلاحظ من الشكل (3) زيادة مدى البروتونات داخل النسيج بزيادة طاقتها إذ يصل المدى إلى 12 cm من أجل بروتونات بطاقة 130 MeV. لكن من جهة أخرى هناك انخفاض في كمية الطاقة المودعة في منطقة القمة (قمة براغ) على الرغم من زيادة المجموع الكلي للطاقة المودعة على كامل مسار البروتونات؛ وذلك مع زيادة طاقة البروتونات. يبين الجدول الآتي قيم الطاقة المودعة في منطقة القمة ومجموع الطاقة الكلية المودعة على كامل مسار البروتونات بدءاً من نقطة الدخول إلى الفانتوم وحتى نهاية مسار البروتونات.

الجدول (7) مقارنة بين الطاقة المودعة في منطقة قمة براغ إلى الطاقة المودعة على كامل مسار البروتونات ضمن مجال طاقة البروتونات (50 – 130 MeV)

$E_{\text{peak}}/E_{\text{total}} \%$	Bragg Peak Energy (MeV/gr)/p	Total Energy Deposited (MeV/gr)/p	E_p (MeV)
31.51%	6.57×10^{-3}	2.09×10^{-2}	50
32.20%	8.35×10^{-3}	2.60×10^{-2}	60
26.86%	7.99×10^{-3}	2.98×10^{-2}	70
22.32%	7.16×10^{-3}	3.21×10^{-2}	80
15.07%	5.16×10^{-3}	3.43×10^{-2}	90
16.74%	6.40×10^{-3}	3.83×10^{-2}	100
11.58%	4.57×10^{-3}	3.95×10^{-2}	110
9.07%	3.73×10^{-3}	4.11×10^{-2}	120
9.02%	3.80×10^{-3}	4.22×10^{-2}	130

4. تعيين السماكة المكافئة لمادة اللكسان للنسيج العضوي من أجل بروتونات طاقتها :100 MeV

تتشكل قمة براغ في نقطة واحدة من الورم (single Bragg peak) لا تتجاوز الميلي متر. وفي حالة العلاج الإشعاعي بالبروتونات ينبغي أن تتوزع الجرعة العظمى على عمق الورم (مثلاً في حالة سرطان غدة البروستات يبلغ عمق المعالجة نحو 1.2 cm وفقاً للصور الثلاثية البعد المأخوذة لمنطقة المعالجة)، لذلك لابد من تشكيل مجموعة من قمم براغ (Bragg Family) لتغطية منطقة العلاج بشكل تام. ويجري تشكيل هذه المجموعة من القمم على طول المحور المركزي لمنطقة العلاج من خلال ما يسمى بالعجلة المعدلة (modulator wheel) كما هو مبين بالشكل (4). تتألف العجلة المعدلة من عدد من القطاعات (sectors) (الشكل (4)) المصنوعة من مواد محددة ماصة للبروتونات متفاوتة السماكة تفصل بينها فراغات متساوية، وعند دوران العجلة فإن حزم البروتونات التي تعبر من خلال الفراغات بين قطاعات العجلة سوف تقوم بتوليد قمم براغ عند أعظم عمق لمنطقة الورم، في حين الحزم البروتونية التي تعبر القطاعات سوف تنفذ إلى أعماق أقل ضمن منطقة الورم تبعاً لسماكة مادة قطاع العجلة، نتيجة توهين البروتونات ضمن مادة قطاع العجلة، إذ تقوم بتوليد قمم براغ عند هذه الأعماق. وبنتيجة دوران العجلة بمعدل ثابت سوف تتشكل قمم براغ عند أعماق مختلفة وبمعدل ثابت بدءاً من بداية منطقة الورم (الموافق لنفاذ البروتونات عبر السماكة العظمى لقطاع العجلة) إلى أعظم عمق للورم (الموافق لمرور البروتونات ضمن الفراغ بين قطاعات العجلة).

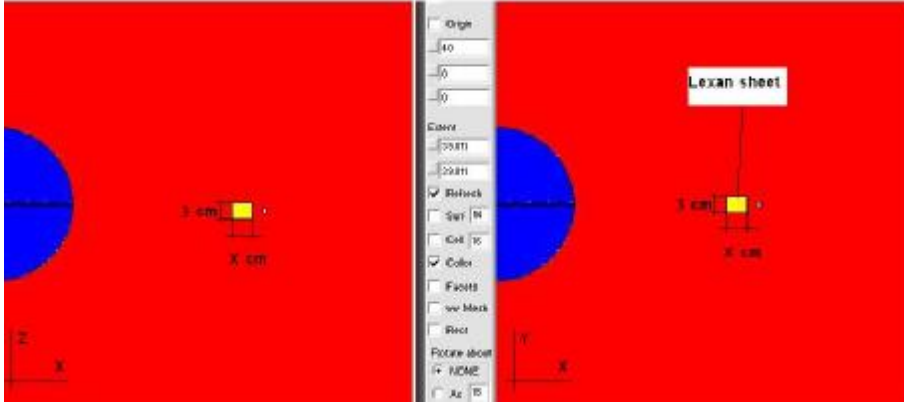


الشكل (4) العجلة المعدلة المستخدمة في تشكيل قمم براغ (Bragg family) [5]

ونظراً إلى عدم إمكانية إجراء محاكاة ديناميكية ضمن الكود MCNPX-2.3.0 لدوران العجلة، سنكتفي فقط بتعيين تغير عمق الجرعة داخل النسيج العضوي بتغير سماكة مادة اللكسان المستخدمة بشكل عام في تصنيع العجلة المعدلة.

لحساب السماكة المكافئة لمادة اللكسان ذات التركيب (C: 75.5749%, H: 5.5494%, O: 18.8757%) والكثافة ($\rho=1.20 \text{ g/cm}^3$) [6] اعتمدنا مصدر البروتونات المستخدم في

الدراسة السابقة (قرص قطره 1cm) ويصدر بروتونات طاقتها 100 MeV (يمكن استخدام أية طاقة) ويبعد مسافة 50 cm عن الوجه الأمامي للفانتوم الموصف سابقاً. أمّا مادة اللكسان فقد مثلت بالمحاكاة على شكل صفيحة تقع في المستوي y,z (y=3 cm, z=3 cm) ومتغيرة السماكة على المحور x كما هو موضّح بالشكل (5).

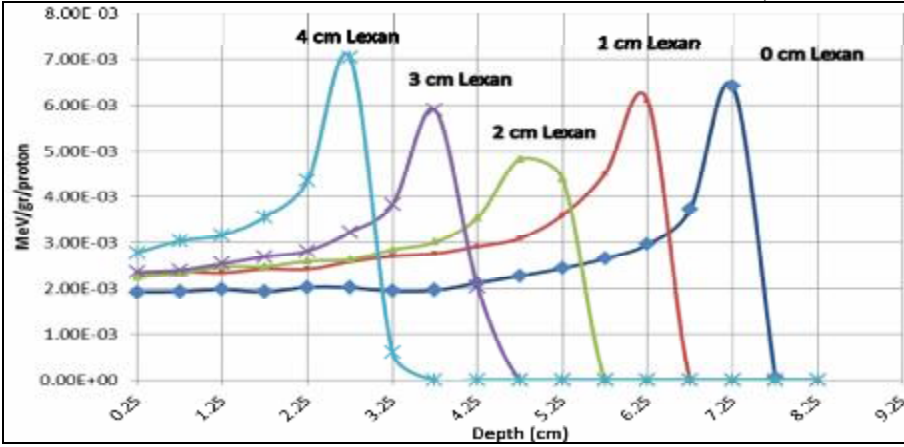


الشكل (5) صفيحة اللكسان المضافة إلى التصميم باستخدام رسام الكود MCNP-5.

الجدول (8) تأثير سماكة صفيحة اللكسان في قيم الطاقة المودعة في الفانتوم ومجال الخطأ النسبي الموافق محسوبة بالكود MCNPX-2.3.0 للبروتونات ذات الطاقة (Ep=100 MeV)

t _{lexan} = 4 cm		t _{lexan} = 3 cm		t _{lexan} = 2 cm		t _{lexan} = 1 cm		العمق (cm)
Error %	E _{deposited} (MeV/gr)/p	Error %	E _{deposited} (MeV/gr)/p	Error %	E _{deposited} (MeV/gr)/p	Error %	E _{deposited} (MeV/gr)/p	
4.85%	2.77 x 10 ⁻³	5.01%	2.34 x 10 ⁻³	4.98%	2.24 x 10 ⁻³	4.81%	2.32 x 10 ⁻³	0.25
4.97%	3.03 x 10 ⁻³	5.09%	2.39 x 10 ⁻³	4.91%	2.32 x 10 ⁻³	4.93%	2.36 x 10 ⁻³	0.75
5.08%	3.16 x 10 ⁻³	5.28%	2.53 x 10 ⁻³	5.11%	2.47 x 10 ⁻³	4.84%	2.33 x 10 ⁻³	1.25
5.15%	3.56 x 10 ⁻³	5.29%	2.68 x 10 ⁻³	5.12%	2.47 x 10 ⁻³	4.95%	2.42 x 10 ⁻³	1.75
5.32%	4.35 x 10 ⁻³	5.37%	2.81 x 10 ⁻³	5.34%	2.59 x 10 ⁻³	4.89%	2.41 x 10 ⁻³	2.25
5.45%	7.03 x 10 ⁻³	5.50%	3.22 x 10 ⁻³	5.33%	2.62 x 10 ⁻³	5.14%	2.58 x 10 ⁻³	2.75
12.72%	5.98 x 10 ⁻⁴	5.47%	3.83 x 10 ⁻³	5.50%	2.84 x 10 ⁻³	5.14%	2.70 x 10 ⁻³	3.25
0	0	5.61%	5.88 x 10 ⁻³	5.50%	3.01 x 10 ⁻³	5.14%	2.75 x 10 ⁻³	3.75
		8.33%	2.03 x 10 ⁻³	5.61%	3.54 x 10 ⁻³	5.17%	2.91 x 10 ⁻³	4.25
		0	0	5.75%	4.82 x 10 ⁻³	5.35%	3.09 x 10 ⁻³	4.75
				6.35%	4.38 x 10 ⁻³	5.52%	3.60 x 10 ⁻³	5.25
				0	0	5.62%	4.52 x 10 ⁻³	5.75
						5.85%	6.09 x 10 ⁻³	6.25
						0	0	6.75

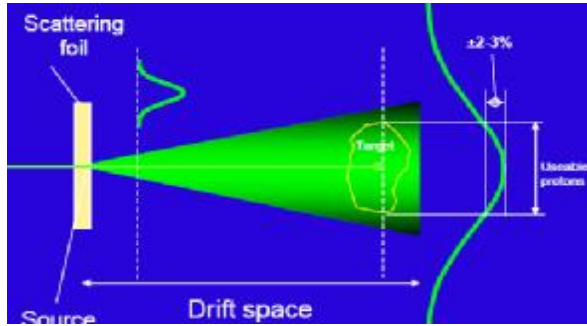
يلاحظ من الشكل (6) أن قمة براغ تتحرك نحو اليمين مع نقصان سماكة طبقة اللكسان، وأن تغير سماكة هذه الطبقة من 0cm إلى 4cm يؤدي إلى توزيع جرعة البروتونات (ذات الطاقة 100 MeV) داخل النسيج على عمق يمتد من 2.25 cm إلى 7.75 cm. ومنه فمدى العمق هذا كافٍ لتوزيع الجرعة على ورم يمتد على مسافة 5 cm في النسيج.



الشكل (6) يبين قيمة الجرعة وقم براغ مقابل العمق في النسيج من أجل سماكات مختلفة لمادة اللكسان محسوبة بالكود MCNPX- 2.3.0

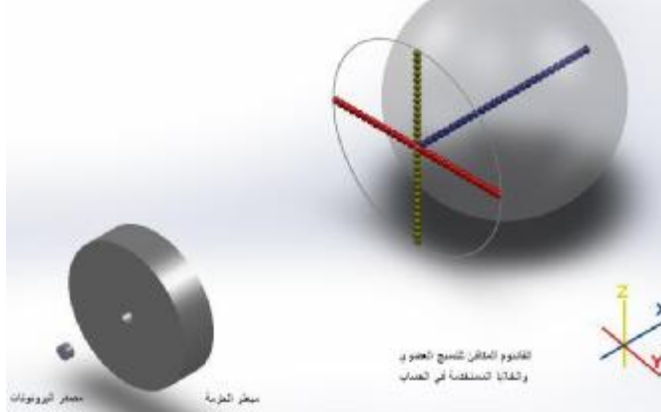
5. تعيين أبعاد الساحة الإشعاعية عند بداية الفانتوم:

تخرج حزمة البروتونات من المسرع بشكل متواز محصورة ضمن نطاق معين ولا يمكن استخدامها مباشرة في العلاج فمن المهم تشكيل الحزمة (إعطاؤها الشكل الغاوسي) بما يتوافق وأبعاد الورم أو المنطقة المعالجة. يستخدم عادة لتوسيع الحزمة وفق التوزيع الغاوسي (Gaussian form) ومن ثم تغطية كامل مقطع الورم ما يسمى بـ (المبعثر الثابت Fixed scatterer) كما مبين في الشكل الآتي:



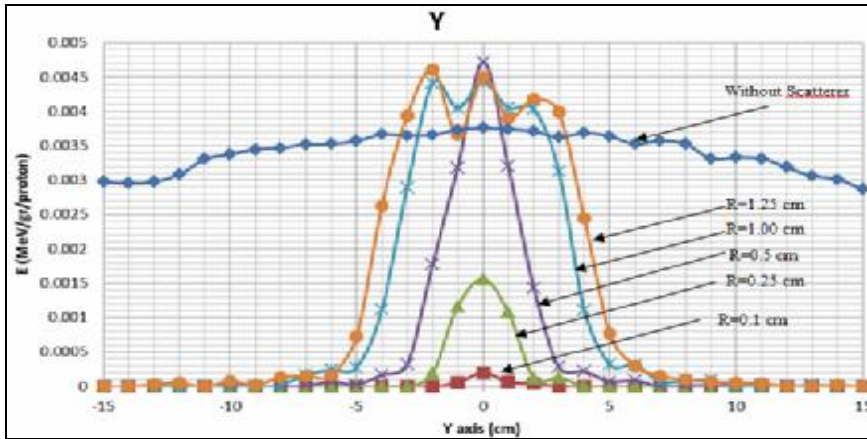
الشكل (7) مبعثر الحزمة المستخدم في تشكيل التوزيع الغاوسي لحزمة البروتونات

مبعثر الحزمة عبارة عن قرص يحتوي على ثقب في منتصفه مصنوع من مواد ماصة للبروتونات. وفي دراستنا هذه اعتمدنا مبعثراً قرصياً من الرصاص بسماكة 5cm يبعد مسافة 5cm عن مصدر البروتونات يحوي في منتصفه ثقباً ذا نصف قطر متغير. لدراسة أبعاد الحزمة البروتونية عند بداية الفانتوم كتابع لنصف قطر فتحة المبعثر اعتمدنا على حساب كمية الطاقة المودعة في خلايا أنشئت على المحاور (x,y,z) وذلك باستعمال بطاقة العداد F6 كما هو موضح في الشكل الآتي.

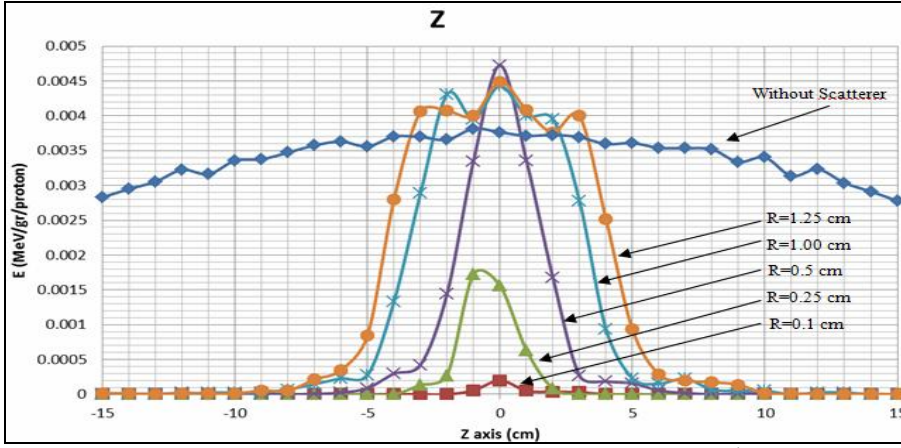


الشكل (8) الفانتوم المكافئ للنسيج العضوي موضحاً عليه الخلايا المستخدمة في حساب أبعاد الحزمة البروتونية على المحاور (x,y,z)

يبين الشكلان (9) و(10) توزيع قيم الطاقة المودعة وأبعاد الساحة الإشعاعية التي تغطيها حزمة البروتونات على المحورين (y,z) كتابع لنصف قطر فتحة المبعثر.



الشكل (9) تغير الأبعاد والطاقة المودعة لحزمة البروتونات وكميتها عند بداية الفانتوم على المحور (Y) كتابع لنصف قطر فتحة مبعثر الحزمة.



الشكل (10) تغيير أبعاد والطاقة المودعة لحزمة البروتونات وكميتها عند بداية الفانتوم على المحور (Z) كتابع لنصف قطر فتحة مبعثر الحزمة.

مما سبق نلاحظ الاختلاف في شكل الحزمة الإشعاعية وأبعادها نتيجة وجود مبعثر حزمة أمام المصدر مباشرة. مع زيادة قطر فتحة المبعثر سيزداد قطر المنطقة (أبعاد الساحة الإشعاعية) التي تغطيها حزمة البروتونات وفق الآتي:

الجدول (9) تغيير أبعاد الساحة الإشعاعية كتابع لنصف قطر فتحة المبعثر

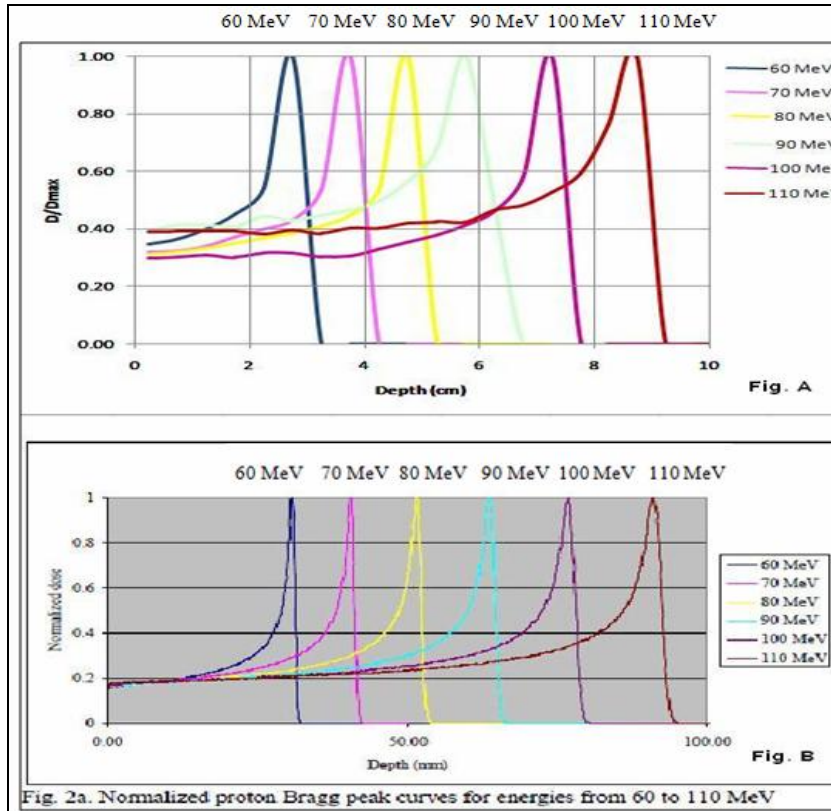
أبعاد الساحة الإشعاعية المربعة المكافئة للساحة الدائرية		نصف قطر المنطقة التي تغطيها حزمة البروتونات عند بداية الفانتوم (cm)	نصف قطر فتحة المبعثر R (cm)
a (cm)	b (cm)		
2.83	2.83	2	0.1
4.24	4.24	3	0.25
7.07	7.07	5	0.50
9.90	9.90	7	1.00
11.31	11.31	8	1.25

كما يلاحظ أيضاً من الشكلين (9) و (10) اختلاف في كمية الطاقة المودعة في المنطقة المركزية للحزمة مع تغيير نصف قطر فتحة المبعثر. عند أنصاف أقطار لفتحة المبعثر أكبر من 0.50 cm يلاحظ أن الطاقة المودعة في المنطقة المركزية للحزمة تتجاوز كمية الطاقة المودعة ضمن المنطقة نفسها دون مبعثر للحزمة وهذا مرده إلى انحسار طيف البروتونات أي زيادة كثافة البروتونات في الوسط نتيجة التبعثر إلى المركز. وتتعلق أبعاد الساحة الإشعاعية بالبعد بين المصدر المشع والجسم، وكذلك بالبعد بين المصدر المشع ومبعثر الحزمة.

الساحة الإشعاعية: هي طول الحزمة الإشعاعية وعرضها عند المسافة (Source to Skin Distance SSD). وتحسب أبعاد الساحة المربعة المكافئة للساحة الدائرية (أي الخرج الإشعاعي من ساحة مربعة مكافئ للخرج الإشعاعي للساحة الدائرية) من العلاقة: $a=b \approx 1.414 \times R$ إذ: R: نصف قطر الساحة الدائرية

مقارنة النتائج

1- للتحقق من صحة النتائج التي حصلنا عليها أجرينا مقارنة مع نتائج أحد الأعمال المنشورة [7]. استعمل الكود GEANT4 في العمل [7] لنمذجة حزمة من البروتونات تقع طاقتها في المدى (50-250 MeV) وتعيين مدى هذه البروتونات ضمن فانتوم مائي أسطواني (L=100 cm, Diameter=30 cm) ومنه حساب الطاقة المودعة منسوبة إلى طاقة قمة براغ (Bragg peak). قمنا بتكرار ما ورد في العمل [7] ولكن باستعمال الكود MCNPX-2.3.0 وباستخدام الفانتوم المعتمد في بحثنا (الشكل 2) وحصلنا على النتائج الموضحة بالشكل (11).

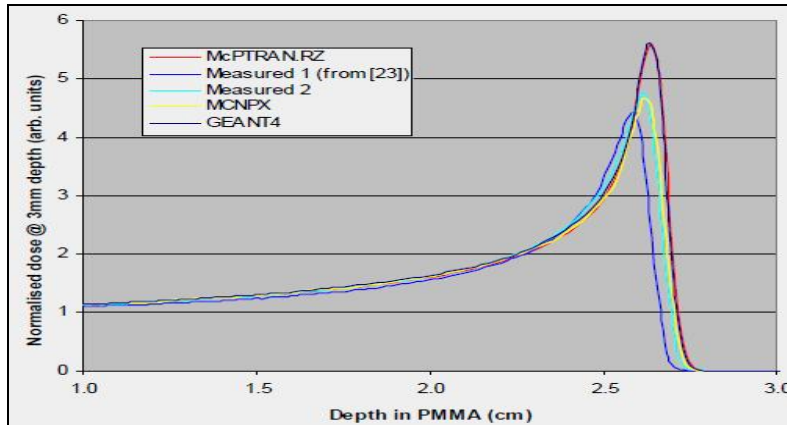


الشكل (11) الطاقة المودعة منسوبة لطاقة القمة والعمق المقابل في الفانتوم المحسوبة بالكودين MCNPX-2.3.0 (الشكل 11.A) و GEANT4 (الشكل 11.B) [7] لبروتونات تتغير طاقتها من 60 MeV إلى 110 MeV.

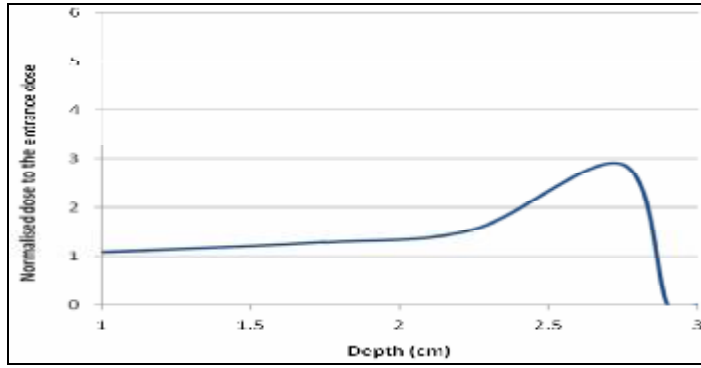
وتجدر الإشارة إلى أن كلاً من الكودين MCNP و GEANT4 يعملان بالطريقة نفسها في معالجة مختلف أنواع الجسيمات وعند الطاقات جميعها.

نلاحظ من الشكل (11) أن هناك توافقاً في القيم المحسوبة لمدى البروتونات في النسيج الحي باستعمال الكود MCNPX-2.3.0 مع النتائج المحسوبة لقيم الطاقة نفسها للبروتونات باستعمال الكود (GEANT4). لكن يلاحظ أيضاً من الشكل السابق أن هناك اختلافاً في قيم الطاقة المودعة، ففي الشكل (11.A) نلاحظ أن قيم الطاقة المودعة للبروتونات في النسيج الحي عند نقطة دخولها إلى الفانتوم تصل إلى (20%-40%) من الطاقة المودعة في منطقة الذروة، في حين يلاحظ في الشكل (11.B) أن الطاقة المودعة من البروتونات عند الدخول أقل من 20% من الطاقة المودعة في منطقة الذروة. وهذا الاختلاف في قيم الطاقات المودعة يعود إلى اختلاف التصميم الهندسي المستخدم في الحساب لكل من الفانتوم وخلايا الحساب (Voxels) فضلاً عن الاختلاف في بعد مصدر البروتونات عن سطح الفانتوم وشدة البروتونات المستخدمة في الحساب وقطر حزمة البروتونات المستخدمة.

2- لزيادة التحقق من صحة النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام الكود MCNPX-2.3.0 قورنت النتائج التي توصلنا إليها في حساب مدى البروتونات ضمن النسيج العضوي للفانتوم الموصف نفسه في الشكل (2) ومن أجل برتونات بطاقة 60 MeV مع إحدى النتائج المنشورة في العمل [8] الذي اشتمل على مقارنة لمدى البروتونات ضمن فانتوم مركب من مادة الـ PMMA وباستخدام برتونات متوسط طاقتها نحو 60 MeV عند مخرج محدد الحزمة (beam collimator) وقد أجريت المقارنة في العمل [8] بين نتائج الكود MCNPX والكود GEANT4 وبعض النتائج التجريبية الأخرى الوارد ذكرها ضمن العمل [8].



الشكل (12) المدى وجرعة البروتونات منسوبة إلى الجرعة عند نقطة الدخول على فانتوم من الـ PMMA وفق العمل [8] المحسوبة وفق الكود MCNPX والكود GEANT4 وبعض النتائج التجريبية.



الشكل (13) المدى وجرعة البروتونات منسوبة إلى الجرعة عند نقطة الدخول على الفانتوم الموصف في هذه الدراسة والمحسوبة وفق الكود MCNPX-2.3.0.

والملاحظ من الشكل (12) والشكل (13) أن هناك توافقاً جيداً في قيمة المدى للبروتونات المحسوب وفق الكود MCNPX-2.3.0 والكود GENAT4 والنتائج التجريبية للعمل [8]، لكن هناك فرقاً في كمية الطاقة المودعة في منطقة القمة (Bragg peak) واختلافاً في عرض القمة (FWHM) بين النتائج، هذا الاختلاف مرده إلى وجود أجهزة أخرى في العمل [8] لم نتطرق لها في هذه الدراسة منها محدد الحزمة فضلاً عن اختلاف شدة مصدر البروتونات المستخدم وأبعاده في كلتا الحالتين والشكل الهندسي للفانتوم.

الخلاصة

نُرس مدى البروتونات ضمن فانتوم مكافئ للنسيج العضوي عند الطاقات (Ep=50-130MeV) إذ يلاحظ تغير في مدى البروتونات ضمن النسيج العضوي من 1.75cm إلى 11.75cm عند تغير طاقة البروتونات من 50MeV وحتى 130MeV على الترتيب.

كما دُرس تأثير السماكة المضافة من مادة الليكسان في توزيع قمم براغ ضمن النسيج عند طاقة بروتونات 100 MeV، وقد وجد أنه عند تغير سماكة الليكسان من 0.0 cm وحتى 4.0 cm أنه يمكن تشكيل قمم براغ على عمق يصل إلى 5.0 cm (المحور X). في حين يمكن تغيير أبعاد الحزمة على المحاور (Y, Z) ومن ثم أبعاد الساحة الإشعاعية (من 3x3 cm² إلى 11x11 cm²) باستخدام مبعثر حزمة موضوع أمام الهدف مباشرة؛ وذلك بتغيير نصف قطر فتحة المبعثر (من 0.1 cm إلى 1.25 cm).

ومن ثمّ فالملاحظ أن البروتونات كأشعة مستخدمة في مجال العلاج الإشعاعي ذات فعالية عالية من حيث تخفيض جرعة الأنسجة السليمة المحيطة بالورم، وتمتاز بمرونة التحكم في الحزمة (طاقاتها وأبعادها) مقارنة بالأشعة التقليدية المستخدمة حالياً في العلاج الإشعاعي. إلا أن الكلفة العالية التي تتطلبها شروط المعالجة بالبروتونات من حيث تسريع البروتونات والوصول بها إلى طاقات عالية مناسبة للعلاج تعدّ العائق الوحيد لاستخدامها بشكل واسع.

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 Rogers, Patty Montoya, Barbara Olguin, Arlene Lopez, and Jean Harlow. (2002). mcnp^x™ 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, 2001 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] http://ptcog.web.psi.ch/PTCOG49/presentationsEW/17-2-2_passive.pdf
Access 9/6/2013 11.00 PM
- [6] Charles D. Harmon, Robert D. Bush and Judith F. Briesmeister (1994). Criticality Calculations with MCNP A primer, LA-12827-M.
- [7] <http://www.aapm.org/meetings/amos2/pdf/34-8159-78594-298.pdf>
Access 9/6/2013 12.00 AM
- [8] David R Shipley, Hugo Palmans, Colin Baker and Andrzej Kacperek. (2005). Geant4 Simulation Of An Ocular Proton Beam And Benchmark Against Other Monte Carlo Codes, American Nuclear Society Topical Meeting in Monte Carlo, Chattanooga.