

دراسة خصائص حزمة الفوتونات 6MV الصادرة عن المسرع الخطي الطبي فاريان IX باستعمال كود مونتي كارلو BEAMnrc

د. ماجدة نحيلي*

د. هيثم جبيلي**

أيهم المحمود***

تاريخ الإيداع 19 / 4 / 2018. قُبل للنشر في 26 / 8 / 2018

□ ملخص □

تم في هذا البحث استخدام الكودات (EGSnrc, BEAMnrc) لمحاكاة حزمة الفوتونات 6MV الصادرة عن المسرع الخطي Varian Ix وبساحات اشعاعية مختلفة (20×20 , 10×10 , 4×4 cm²). تم تخزين بيانات المحاكاة في ملف خرج (phase space) يحتوي هذا الملف على تفاصيل كاملة عن تواريخ كل الجسيمات من خلال تتبع مسارها وتفاعلاتها.

جرى تحليل ملفات (phase space) باستخدام الكود BEAMDP من أجل:

- الحصول على طيف الطاقة وتدفق الطاقة وتوزيع الطاقة الوسطي والتوزيع الزاوي للفوتونات والكترونات التلوث على سطح الجسم المائي وعلى بعد 100cm عن رأس المسرع الخطي.
- دراسة تأثير حجم الساحة الإشعاعية على توزيع طيف الطاقة 6MV.
- دراسة تغير توزيع الطاقة الوسطي بين مركز وحافة الساحة الإشعاعية.
- حساب مساهمة الكترونات التلوث ضمن الحزمة الفوتونية حيث بلغت نسبتها 21%.

الكلمات المفتاحية: حزمة الفوتونات، الكود BEAMDP، الكترونات التلوث، التوزيع الزاوي، تدفق الطاقة.

* أستاذ - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

** أستاذ - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

*** طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

Study of the characteristics of the 6MV photon package from Varian IX linear medical accelerator using BEAMnrc code

Dr. Majeda Nahili*
Dr. Haetham Jbeli**
Aeham AL-Mahmoud***

(Received 19 / 4 / 2018. Accepted 26 / 8 / 2018)

□ ABSTRACT □

The codes (EGSnrc, BEAMnrc) are used to simulate 6MV photon beam produced by Varian ix linear accelerator and different field size (20×20 , 10×10 , $4 \times 4 \text{cm}^2$). The simulation data is stored in a phase space file that contains complete details of the dates of each particle by tracking its path and interactions.

Phase space files were analyzed using BEAMDP code to:

- Obtain energy spectrum, energy flow, distribution of the mean energy and the angular distribution of the photons and contaminant electrons on surface of water phantom and 100cm away from linear accelerator head.
- Study effect of field size on distribution of the energy spectrum 6MV.
- Study of change in distribution of mean energy between center and edge of the field size.
- Calculation the contribution of contaminant electrons within photonic beam at 21%.

Key words: Beam photon, BEAMDP code, contaminant electrons, angular distribution, energy fluence.

* Professor. Department of physics, Faculty of Sciences, University of Damascus.

** Professor. Department of physics, Faculty of Sciences, University of Tishreen.

*** Postgraduate Student, Department of physics, Faculty of Sciences, University of Damascus.

مقدمة

تم انجاز عمل سابق بإجراء نمذجة للمسرّع الخطي فاريان IX المتوفر في مستشفى تشرين الجامعي باللاذقية باستخدام طرائق مونتّي كارلو واعتمدت حزمة الفوتونات 6MV لإجراء حسابات الجرعة الإشعاعية. استخدمت حزمة كودات مونتّي كارلو EGSnrc (BEAMnrc, DOSXYZnrc) في المحاكاة لحساب النسبة المئوية للجرعة في العمق (PDD) ومنحنيات تسطح الجرعة ضمن الجسم المائي (PTW FREIBURG) من أجل ساحة حقلية (20×20, 10×10, 4×4 cm²). قورنت النتائج مع تلك المحسوبة بنظام تخطيط الجرعة TPS، وتم التحقق من جودة الحزمة الإشعاعية quality beam [1].

تعتبر الخوارزميات الموجودة في العديد من الأنظمة التجارية لتخطيط الجرعة الإشعاعية تقريبية وبدقة محدودة، لذلك استخدمت طرائق مونتّي كارلو لحساب جرعة الفوتونات والإلكترونات في العلاج الإشعاعي الحديث [2-5]. ساعد تطور أنظمة الحواسيب السريعة وتقدم خوارزميات مونتّي كارلو في توفر فرصة لاستخدام حسابات مونتّي كارلو في العلاج الإشعاعي [6-8].

تؤدي المعرفة الدقيقة لطيف طاقة الفوتونات التي ينتجها المسرّع الخطي فاريان IX دوراً مهماً في دقة الجرعة التي يتلقاها المريض بجميع الإجراءات المعنية في تخطيط المعالجة (توزع الجرعة الإشعاعية في الوسط، جودة الحزمة، معايرة الحزمة)، حيث تساعدنا في تحسين الجرعة المعطاة بدقة.

يعتمد تغير خصائص الحزمة الإشعاعية على معلومات طيف الطاقة، وهناك العديد من الطرائق التجريبية المختلفة المستخدمة لاشتقاق مثل هذه الأطياف [9-13]. ولاتزال طرق مونتّي كارلو الأمل والأكثر دقة للحصول على مثل هذه الأطياف. قدم كل من Mohan وآخرون [14] منذ عدة عقود سلسلة من الأطياف الفوتونية مختلفة الطاقة للمسرّع الخطي فاريان باستخدام محاكاة نماذج مبسطة في تقنية مونتّي كارلو EGS3 ولم تدرس خصائص الجسيمات المشحونة ضمن الحزمة الفوتونية، وفي العمل [15] تم التحقق من بعض خصائص الحزمة الفوتونية 10MV الصادرة عن مسرّع (ELEKTA SL)، وفي العمل [16] تم حساب ومقارنة توزع الجرعة بالعمق وكذلك خصائص الحزمة الفوتونية 6MV الصادرة عن المسرّع Varian 600 unique. ولكن عانت هذه الأطياف بسبب محدودية القدرات الحاسوبية من الضوضاء الإحصائية، لذلك فإن الغرض من هذه الدراسة هو تطوير ومقارنة نموذج مونتّي كارلو للحزمة الفوتونية 6MV الصادرة عن المسرّع الخطي فاريان IX مع قيم مرجعية.

يُستخدم الكود BEAMnrc لمحاكاة الحزم الإشعاعية الصادرة عن وحدات المعالجة الإشعاعية. ويعتمد هذا الكود على منظومة الكود EGSnrc. تم دراسة خصائص حزمة الفوتونات والإلكترونات على نطاق واسع باستخدام الكود BEAMnrc [17].

تتميز تقنية مونتّي كارلو بإتاحة معلومات مفصلة عن تاريخ كل الجسيمات، مع الحصول على بعض المعلومات التي لا يمكن قياسها تجريبياً.

يُعتبر طيف الطاقة والتوزيع الزاوي للفوتونات والجزيئات المشحونة الملوثة (الإلكترونات) الصادرة عن المسرّع الخطي فاريان IX من أهم خصائص حزم فوتونات المعالجة الإشعاعية. تعتبر معرفة خصائص الحزم الإشعاعية ضرورية لقياس الجرعة وتطوير نظام تخطيط الجرعة بشكل دقيق. ومن الصعب الحصول على معلومات عن هذه الخصائص من الناحية التجريبية بسبب القيود المختلفة في البيئة السريرية والكواشف. ذكرت المراجع عدد من التحقيقات التجريبية

لطيف طاقة الفوتون. استخدمت بعض التقنيات للحصول على طيف الطاقة من بيانات انتقال الحزمة الضيقة المقاسة، ويستنتج آخرون طيف الطاقة من التحليل الطيفي لفوتونات كومبتون المتبعثرة. تترافق جميع حزم الفوتونات المستخدمة في العلاج الإشعاعي إلكترونيات تلوث Contaminant electrons منبعثة من تفاعل هذه الأشعة مع المحددات الرصاصية، ومرشحات الحزمة، والهواء الذي ينفذ منه الإشعاع. ويؤثر هذا التلوث الإلكتروني على الجرعة الإشعاعية المسلطة على السطح، وعلى شكل المنحني في منطقة التراكم الإلكتروني، حيث جرى حساب مساهمة هذه الإلكترونات ضمن الحزمة الفوتونية.

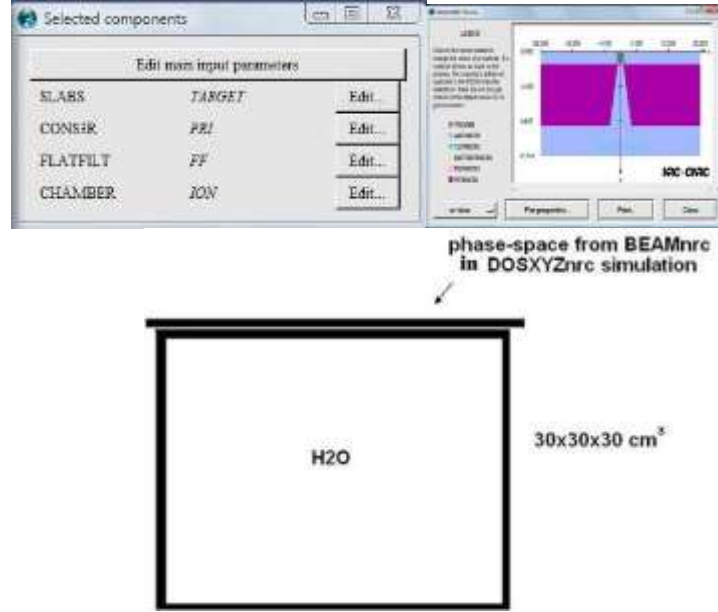
أهمية البحث وأهدافه:

يتلخص غرض البحث بما يأتي:

1. توفير معلومات أكثر شمولاً لحزمة فوتونات العلاج الإشعاعي 6MV الصادرة عن المسرع الخطي فاربان IX المتوفر في مستشفى تشرين الجامعي باللاذقية من أجل ساحات إشعاعية مختلفة (20×20 , 10×10 , $4 \times 4 \text{cm}^2$).
2. دراسة تلوث الحزمة الإشعاعية بالجسيمات المشحونة (الإلكترونات).
3. التأكد من تركيب الحزمة الإشعاعية الفوتونية كونها معيار لإثبات دقة تقنية مونتي كارلو في محاكاة الحزمة الإشعاعية للفوتونات وحساب توزيع الجرعة الإشعاعية.
4. تعتبر هذه المعلومات حساسة لتطوير دقة أنظمة تخطيط العلاج (TPS)، كما تعزز معرفتنا في المعالجة الإشعاعية بحزمة الفوتونات.

طرائق البحث ومواده:

- **الحساب بطريقة مونتي كارلو:** تم استخدام الكود BEAMnrc لمحاكاة حزمة الفوتونات 6MV الصادرة عن المسرع الخطي Varian ix، حيث استندت الأبعاد الهندسية والمواد المستخدمة لبناء نموذج المسرع الخطي فاربان IX على مواصفات الجهاز كما هو منصوص عليه من قبل الشركة الصانعة فاربان. تم بناء نموذج المسرع وفق الترتيب التالي: مادة الهدف (Target) مصنوعة من التنغستن والنحاس، والمحددات الأولية (primary collimator) مصنوعة من (التنغستين)، والفلاتر (flattening filter) وحجيرة تأين (ion chamber) والمرآة العاكسة للساحة الضوئية (mirror) والمحدد ثانوي (jaw) مصنوعة من التنغستين. تم استخدام جميع المواد المستخدمة في المحاكاة من 521ICRU.PEGS4 بيانات المقطع العرضي المتاحة في BEAMnrc لتلبية مواصفات المسرع المقدمة من الشركة الصانعة [18]. ويوضح الشكل (1) مراحل بناء المسرع الخطي باستعمال الكود BEAMnrc والمجسم المائي باستعمال الكود DOSXYZnrc.



الشكل (1): يظهر مراحل بناء المسرع الخطي باستخدام الكود BEAMnrc والمجسم المائي باستخدام الكود DOSXYZnrc.

- تم تخزين بيانات المحاكاة في ملف الخرج (phase space). يتضمن ملف الخرج (phase space) كلا من (الطاقة، الشحنة، الزاوية، الوزن، التوضع للجسيمات)، وتم استخدام ملف الخرج بشكل متكرر لتحليل الحزمة الإشعاعية.
- اعدادات الكود EGSnrc التي تستخدم لتوليد ملف الخرج phase space: نذكر منها طاقة العتبة للإلكترون AE لنمذجة التفاعل الإلكتروني وطاقة العتبة للفوتونات AP لنمذجة التفاعل الإلكتروني، طاقة القطع للإلكترون ECUT وطاقة القطع للفوتونات PCUT، حيث $PCUT=0.01\text{MeV}$, $AE=ECUT=0.7\text{MeV}$.
- أجريت المحاكاة باستعمال حاسب شخصي (core i3, CPU 1.8GHz, RAM 4GB)، نظام التشغيل Linux حزمة 64-bit Ubuntu، عدد الجسيمات التي استخدمت للمحاكاة 1×10^8 جسيم لكل عملية محاكاة والتي استغرقت 20 ساعة.
- الكود BEAMDP: تم استخدامه لتحليل بيانات المحاكاة، حيث استخدم الملف (phase space) كملف دخل للكود BEAMDP للحصول على بيانات عن (طيف الطاقة والتوزيع الزاوي ومنحنيات التدفق ومنحنيات توزيع الطاقة الوسطي على سطح المجسم المائي) [19].

النتائج والمناقشة:

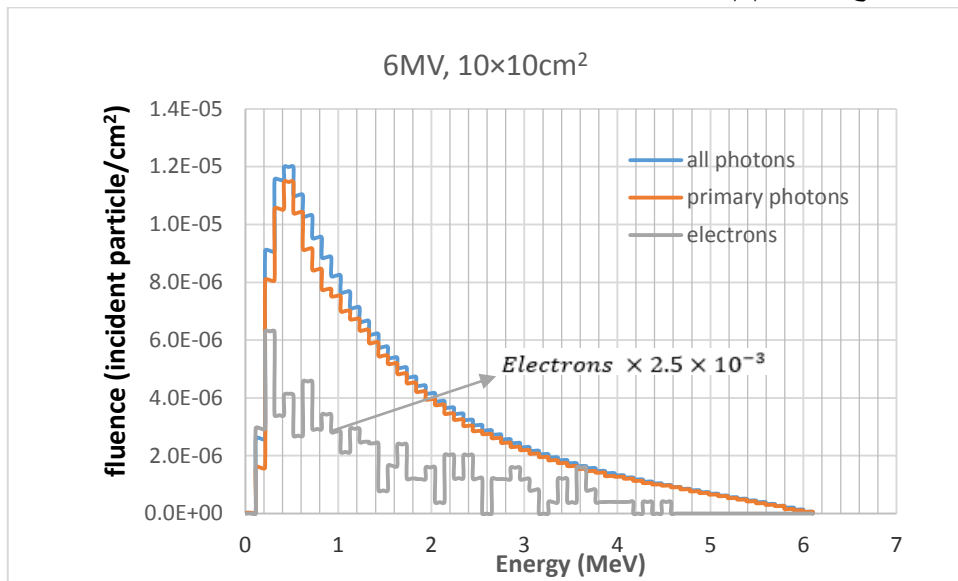
1. دراسة مكونات طيف الطاقة 6MV للفوتونات والإلكترونات التلوث

جرى حساب طيف الطاقة 6MV للفوتونات والإلكترونات التلوث بساحة إشعاعية $10 \times 10 \text{ cm}^2$ عند سطح المجسم المائي (SSD=100cm) باستخدام الكود BEAMDP. ويوضح الشكل (2) طيف الطاقة للفوتونات والفوتونات الأولية والإلكترونات الناجمة عن الحزمة الإشعاعية 6MV عند سطح المجسم المائي (SSD=100cm) والساحة الإشعاعية $10 \times 10 \text{ cm}^2$.

يلاحظ من الشكل (2) أن طيف طاقة الفوتونات يشابه بالشكل وقيمة الطاقة العظمى 0.518 MeV الطيف المدروس في العمل [20] حيث تبلغ قيمة الطاقة العظمى 0.5 MeV، كما وأن طيف الإلكترونات الملوثة يصل إلى ذروته في طاقة منخفضة 0.295 MeV.

من خلال الحسابات التي أجريناها، دلت دراسة تركيب التدفق الفوتوني ضمن الساحة الإشعاعية، أن معظم الفوتونات ضمن الساحة الإشعاعية هي فوتونات الحزمة الأولية (أي الفوتونات التي لم تتفاعل مع أجزاء المسرع)، وأن هذا الطيف يشابه طيف تدفق الفوتونات الكلي (الفوتونات الأولية والفوتونات الناتجة عن التبعثر)، حيث تبلغ نسبة التدفق الفوتوني الأولي 95% والتدفق الفوتوني المتبعثر 5%.

وفضلاً عن ذلك يلاحظ أن مقدار التدفق بوحدة الطاقة بالنسبة للفوتونات أعلى بأربعة أضعاف مما هو للإلكترونات الملوثة كما هو موضح بالشكل (2).

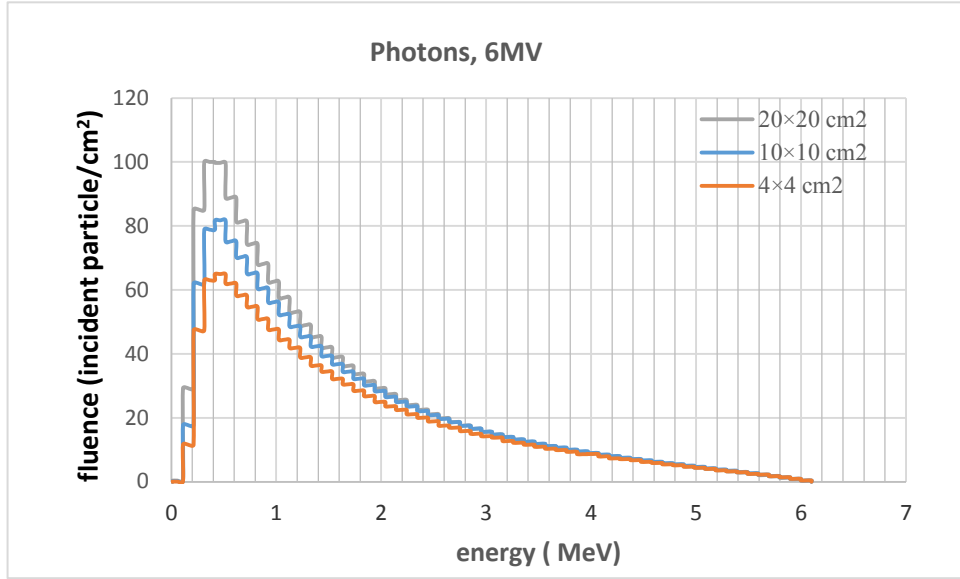


الشكل (2): يوضح طيف الطاقة للفوتونات والفوتونات الأولية والإلكترونات عند سطح الجسم المائي (SSD=100cm) والحزمة الإشعاعية 6MV والساحة الإشعاعية 10x10cm².

2. دراسة طيف التدفق الفوتوني من أجل ساحات إشعاعية مختلفة

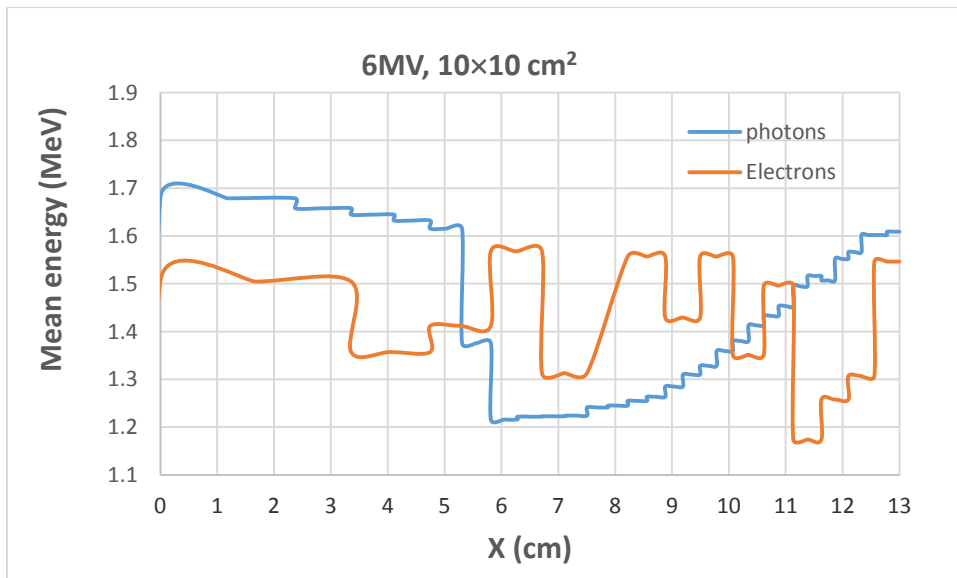
اعتمدت حزمة الفوتونات الصادرة عن المسرع 6MV لدراسة طيف التدفق الفوتوني على الجسم المائي من أجل ثلاث ساحات إشعاعية (20x20, 10x10, 4x4cm²).

يوضح الشكل (3) أطراف التدفقات الفوتونية المحسوبة للساحات الإشعاعية (20x20, 10x10, 4x4cm²). ويلاحظ من الشكل (3) أن التدفق الفوتوني في حالة الساحة الإشعاعية (20x20cm²) أكبر مما هو عليه في حالة الساحة الإشعاعية و (10x10cm²) و (4x4cm²) بنسبة تبلغ 20.14% و 42.57% على الترتيب.



الشكل (3): يوضح مقارنة أطياف الطاقة 6MV من أجل ساحات إشعاعية مختلفة ($20 \times 20, 10 \times 10, 4 \times 4 \text{cm}^2$).

3. دراسة تبعية طاقة الفوتونات والإلكترونات للبعد عن مركز الساحة الإشعاعية
 اعتمدت حزمة الفوتونات الصادرة عن المسرع 6MV لدراسة تبعية طاقة الفوتونات والإلكترونات على الجسم المائي (SSD=100cm) للبعد عن مركز الساحة الإشعاعية $10 \times 10 \text{cm}^2$ وفق المحور ox.
 ويوضح الشكل (4) توزيع الطاقة الوسطي للفوتونات والإلكترونات الملوثة بدلالة البعد عن مركز الساحة الإشعاعية $10 \times 10 \text{cm}^2$ على سطح الجسم المائي (SSD=100cm) وفق المحور ox.
 يلاحظ من الشكل (4) أن توزيع الطاقة الوسطي ثابت في المدى (0-5cm) على طول المحور ox بالنسبة للفوتونات، حيث تتراوح الطاقة الوسطية بين 1.68MeV (عند مركز الساحة الإشعاعية) والقيمة 1.62MeV (عند حافة الساحة الإشعاعية) ويبلغ الفرق بينهما 3.6%. يتناقص معدل الطاقة الوسطي بشكل كبير بالقرب من حافة الساحة الإشعاعية ليصل إلى 1.22MeV.



الشكل (4): يظهر تغير الطاقة الوسطية للفوتونات والإلكترونات بدلالة البعد عن مركز الساحة الإشعاعية $10 \times 10 \text{cm}^2$.

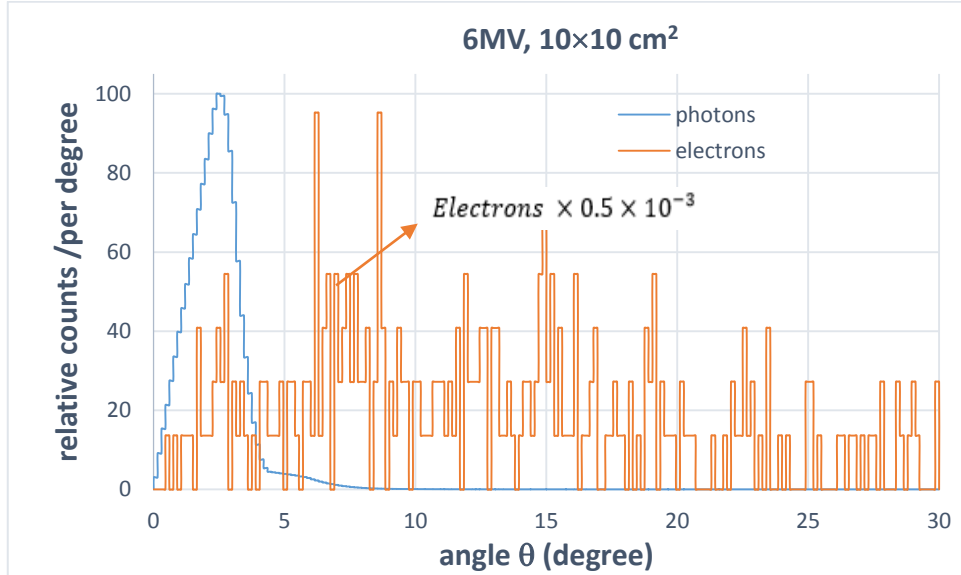
كما هو ملاحظ بالشكل (4) أنه بزيادة البعد عن حافة الساحة الإشعاعية (5cm) تزداد الطاقة الوسطية للفوتونات، ويرجع هذا التأثير إلى قساوة الحزمة الإشعاعية (الطاقة العالية للحزمة) الناجم عن وجود المحددات وفلاتر التسطح التي تخفف الفوتونات منخفضة الطاقة وتبقي فوتونات الطاقة العالية.

وفي حالة الإلكترونات تتناقص الطاقة الوسطية ضمن الساحة الإشعاعية كلما ابتعدنا عن المركز وبمستوى أخفض مقارنة بحزمة الفوتونات، ويرجع السبب إلى انخفاض تدفق الإلكترونات في الحزمة الإشعاعية .

4. دراسة التوزيع الزاوي للفوتونات والإلكترونات على سطح الجسم المائي

اعتمدت حزمة الفوتونات الصادرة عن المسرع 6MV لدراسة التوزيع الزاوي للفوتونات والإلكترونات على سطح الجسم المائي (SSD=100cm) من أجل الساحة الإشعاعية $10 \times 10 \text{ cm}^2$.

يوضح الشكل (5) التوزيع الزاوي للفوتونات والإلكترونات التلوث على سطح الجسم المائي والحزمة الإشعاعية. ويلاحظ من الشكل (5) أن التوزيع الزاوي للفوتونات يتركز بالاتجاه الأمامي ويزوايا تتراوح من 0° إلى 5° (كما هو في حالة المصدر النقطي)، بينما تظهر الإلكترونات الملوثة انتشاراً زاوياً واسعاً مما يعني أن الكثير منها يتولد أو يكون مبعثراً في فجوة الهواء بين رأس المسرع وسطح الجسم المائي.

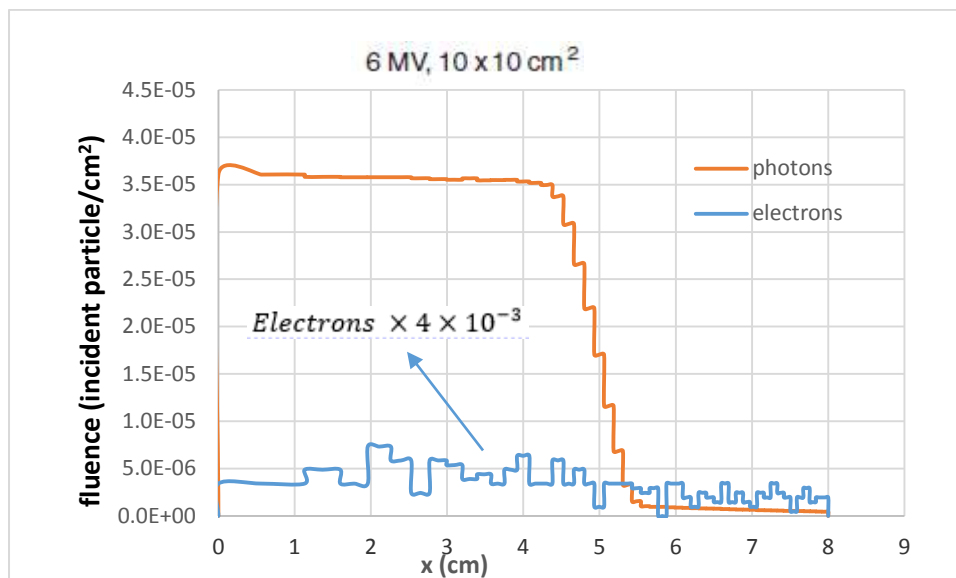


الشكل (5): يوضح التوزيع الزاوي للفوتونات والإلكترونات على سطح الجسم المائي من أجل الساحة $10 \times 10 \text{ cm}^2$ والحزمة الإشعاعية 6MV.

5. دراسة تدفق الفوتونات والإلكترونات في وحدة طاقة الحزمة على سطح الجسم المائي

جرى دراسة تدفق الفوتونات والإلكترونات التلوث في وحدة طاقة الحزمة على سطح الجسم المائي (SSD=100cm) بدلالة البعد عن مركز الساحة الإشعاعية $10 \times 10 \text{ cm}^2$ وفق المحور ox من أجل الحزمة الفوتونية 6MV الصادرة عن المسرع الخطي فاربان IX كما هو موضح بالشكل (6).

يلاحظ من الشكل (6) أن تدفق الفوتونات ثابت بالتقريب في مدى الساحة الإشعاعية ويهبط بسرعة عند حافتيها، بينما لا يلاحظ ذلك لإلكترونات التلوث كونها مبعثرة ولا تأخذ توزيع منتظم بعكس الفوتونات، وتبلغ نسبة مساهمة الكثرونات التلوث 21% من الجرعة الكلية على سطح الجسم المائي، وهذه القيمة قريبة من القيمة 29% المحسوبة في العمل [20]، ويُفسر هذا الاختلاف بين القيمتين باختلاف نوع المسرع ومكوناته وباختلاف البعد عن رأس المسرع وكذلك حجم الساحة الإشعاعية لهذا البحث عن العمل [20].



الشكل (6): يوضح تدفق الطاقة للفوتونات والكترونات التلوث بدلالة البعد عن مركز الساحة الإشعاعية.

الاستنتاجات والتوصيات:

- جرى حساب طيف الطاقة الفوتونية وتوزع الطاقة الوسطي والتوزع الزاوي وتدفق الطاقة للفوتونات والكترونات التلوث عند مسافة 100cm بين رأس المسرع الخطي و سطح المجسم المائي، من أجل الحزمة الفوتونية 6MV الصادرة عن المسرع الخطي فاربان ix ومن خلاله:
- تحققنا أن قمم الطيف للفوتونات والكترونات التلوث قريبة من القيم المرجعية.
- ولاحظنا وجود تباين واضح عند الطاقات التي أصغر من 2MeV عند دراسة تأثير حجم الساحة الإشعاعية على توزيعات أطيف الطاقة.
- تم تحديد نسبة تغير توزع الطاقة الوسطي بين مركز وحافة الساحة الإشعاعية بالنسبة للفوتونات والكترونات التلوث.
- لوحظ أن التوزع الزاوي للفوتونات كما لو أنه صادر عن منبع نقطي تصدر عنه الفوتونات بزوايا تتراوح من 0° إلى 5°، بعكس الـكترونات التلوث التي تظهر انتشاراً زاوياً واسعاً.
- إن نسبة مساهمة الـكترونات التلوث في الحزمة الفوتونية (21%) وهذه النسبة تختلف باختلاف البعد عن رأس المسرع الخطي وباختلاف حجم الساحة الإشعاعية.
- نوصي بدراسة خصائص الحزمة الإشعاعية الصادرة عن المسرع الخطي Varian ix باستعمال الكودات (EGSnrc ,BEAMnrc) لتشمل جسيمات أخرى كالـبوزترونات ونسبة مساهمة هذه الجسيمات.
- كما نوصي بدراسة هذه الخصائص عند طاقات مختلفة وساحات اشعاعية مختلفة الأبعاد باعتبار هذه المعلومات تعزز معرفتنا العديد من جوانب العلاج الإشعاعي بحزمة الفوتونات.

المراجع

- [1] نحيلي، ماجدة. جبيلي، هيثم. المحمود، أيهم. نمذجة المسرع الخطي فاربان IX باستخدام كود مونتني كارلو EGSnrc. مجلة جامعة دمشق للعلوم الأساسية. سورية. 2017. P16.
- [2] SHEU R., CHUI C., LOSASSO T., LIM S., KIROV A. *Accurate and Efficient Monte Carlo Dose Calculation for Electron Beams*. Medical Physics., 2006 Jun 1. SU-FF-T-79. 33(6), 2067.
- [3] VERHAEGEN F., SEUNTJENS J. *Monte Carlo modelling of external radiotherapy photon beams*. Physics in medicine and biology., 2003 Oct 17. 48(21), R107.
- [4] MA CM., JIANG SB. *Monte Carlo modelling of electron beams from medical accelerators*. Physics in medicine and biology., 1999 Dec. 44(12), R157.
- [5] SHEIKH-BAGHERI D., ROGERS D.W., ROSS C.K., SEUNTIJENS J.P. *Comparison of measured and Monte Carlo calculated Dose distributions from the NRC linac*. Med Phys., 2000. 27(10), 2256–66.
- [6] FRAGOSO M., KAWRAKOW I., FADDEGON B.A., SOLBERG T.D., CHETTY I.J. *Fast accurate photon beam accelerator modeling using BEAMnrc a systematic investigation of efficiency enhancing methods and cross-section data*. Medical physics., 2009 Dec 1. 36(12), 5451-66.
- [7] HASENBALG F., FIX M.K., BORN E.J., MINI R., KAWRAKOW I. *VMC++ versus BEAMnrc: A comparison of simulated linear accelerator heads for photon beams*. Medical physics., 2008 Apr 1. 35(4): 1521-31.
- [8] ROGERS D.W., MOHAN R. *Questions for comparison of clinical Monte Carlo codes*. In The Use of Computers in Radiation Therapy. Springer Berlin Heidelberg, 2000. (pp. 120-122).
- [9] NATH R., SCHULZ R.J. *Determination of high-energy x-ray spectra by photoactivation*. Medical physics., 1976 May 1. 3(3), 133-41.
- [10] HUANG P.H., KASE K.R., BJÄRNGARD B.E. *Spectral characterization of 4 MV bremsstrahlung by attenuation analysis*. Medical physics., 1981 May 1. 8(3), 368-74.
- [11] HUANG P.H., KASE K.R., BJÄRNGARD B.E. *Simulation studies of 4-MV x-ray spectral reconstruction by numerical analysis of transmission data*. Medical physics., 1982 Sep 1. 9(5), 695-702.
- [12] HUANG P.H., KASE K.R., BJÄRNGARD B.E. *Reconstruction of 4-MV bremsstrahlung spectra from measured transmission data*. Medical physics., 1983 Nov 1. 10(6), 778-85.
- [13] LAMBERT R.P., JURY J.W., SHERMAN N.K. *Measurement of bremsstrahlung spectra from 25 MeV electrons on Ta as a function of radiator thickness and emission angle*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research., 1983 Sep 1. 214(2-3), 349-60.
- [14] MOHAN R., CHUI C., LIDOFKY L. *Energy and angular distributions of photons from medical linear accelerators*. Medical physics., 1985 Sep 1. 12(5), 592-7.
- [15] VAN DER ZEE W AND WELLEWEERD J. *Calculating photon beam characteristics with Monte Carlo techniques*. Med.Phys., 1999. 26 1883–92.
- [16] SATYAJIT PRADHAN., LALIT.M.AGGARWAL, ET AL. *Monte Carlo calculation of 6MV Varian linac photon beam spectral characteristics using the BEAM code.*, International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 11, Number 14 (2016) pp 8185-8194
- [17] ROGERS D.W.O., WALTERS B.R.B., KAWRAKOW I. *BEAMnrc Users Manual.*, 2013. NRC report PIRS – 0509(A) revK.

- [18] ROGERS D.W., FADDEGON B.A., DING G.X., M.A C.M., W.E J, MACKIE T.R. *BEAM: a Monte Carlo code to simulate radiotherapy treatment units*. Medical physics., 1995 May 1. 22(5): 503-24.
- [19] MA CM., ROGERS D.W. *BEAMDP users manual*. NRC Report, 1995. PIRS-0509 (D).
- [20] DING, G.X. *Energy spectra, angular spread, fluence profiles and dose distributions of 6 and 18 MV photon beams: results of monte carlo simulations for a varian 2100EX accelerator*. Phys Med Biol., 2002. 47, 1025-1046.