

## بررسی فاکتور پراکندگی Scp شتاب دهنده خطی الکتا مدل Compact با استفاده از کد Geant4

ندا زارعی<sup>۱</sup>، محمدرضا رضایی راینی نژاد<sup>۱\*</sup> و علی جمعه زاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

<sup>۲</sup>دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران.

\*کرمان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای، کدپستی: ۷۶۳۱۸۱۸۳۵۶.

پست الکترونیکی: mr.rezaie@kgut.ac.ir

### چکیده

فاکتور پراکندگی Scp یکی از فاکتورهای مهم در دزیمتری شتاب دهنده‌های پزشکی می‌باشد. تغییر فاکتور پراکندگی یکی از عواملی است که در میزان دز دریافتی بیمار تأثیر دارد. در این تحقیق سعی می‌شود که با استفاده از کد Geant4 هندسه سر شتاب دهنده خطی الکتا مدل compact شبیه سازی شده و با استفاده از داده‌های چشمه الکترون فضای فاز مناسب این شتاب دهنده استخراج شده است. فضای فاز جهت افزایش دقت در محاسبات مونت کارلو نیاز است. داده‌های فضای فاز شامل طیف انرژی و زاویه‌ای پرتوهای گامای تولید شده توسط باریکه ۶ MeV الکترون‌های خروجی با پهنای ۰/۰۷ است. با استفاده از نتایج فضای فاز فاکتور پراکندگی شتاب دهنده لینک مدل compact به دست آمده با مقادیر تجربی مقایسه شده است. هم خوانی بین مقادیر شبیه سازی شده و عملی نشان می‌دهد که فضای فاز معرفی شده چشمه مناسبی برای انجام محاسبات دزیمتری شتاب دهنده خطی الکتا مدل compact است.

کلیدواژه‌گان: شتاب دهنده خطی الکتا Compact، کد Geant4، فاکتور پراکندگی Scp، فضای فاز، دزیمتری.

### ۱. مقدمه

را فراهم می‌کنند. میدان‌های تابشی توسط یک سیستم کولیماتور پیچیده واقع در سر شتاب دهنده LINAC شکل می‌گیرد و میدان‌هایی را به وجود می‌آورد که به صورت جداگانه برای حجم هدف درمانی شکل می‌گیرند. سر شتاب دهنده به گونه‌ای نصب شده است که می‌تواند با زاویه‌های دلخواه به دور بیمار بچرخد. به این ترتیب می‌توان پرتوها را از جهات مختلف تحت تابش قرار داد، بنابراین بافت سالم و اندام‌های مهم را حفظ می‌کند و

پرتودرمانی یک روش درمانی است که نقش اصلی را در مبارزه با سرطان دارد. پرتودرمانی می‌تواند از خارج بدن بیمار (درمان از راه دور) یا با قرار دادن مواد رادیواکتیو در بدن بیمار (برای تراپی) انجام شود. در درمان از راه دور از شتاب دهنده‌های خطی الکترون در محدوده MeV و هم چنین باریکه پروتون و یون‌های سنگین استفاده می‌شود. فوتون‌های تولید شده در اثر توقف الکترون در هدف امکان درمان تومورهای زیر پوست بیمار

شتاب‌دهنده الکتای مدل Compact تعریف و ضریب پراکندگی کل (Scp) محاسبه می‌شود که در ادامه به ذکر چگونگی این کار پرداخته می‌شود.

## ۲. روش انجام تحقیق

از کد Geant4 برای استخراج فضای فاز شتاب‌دهنده الکتا مدل Compact استفاده شد. کد Geometry and Tracking (Geant4) یک نرم‌افزار شبیه‌سازی براساس روش مونت‌کارلو است که به زبان ++C نوشته شده و انواع ذرات را در ردیابی می‌کند و قابلیت شبیه‌سازی میدان‌های مغناطیسی و گرانش، ترابرد فوتون‌های نوری و شبیه‌سازی در ابعاد نانو را دارد. Geant4 دارای کتابخانه‌های زیادی حاوی سطح مقطع ذرات مختلف و در محیط‌های مختلف است. برای استخراج داده‌های مربوط به فضای فاز و فاکتور پراکندگی Scp هندسه سر شتاب‌دهنده و نحوه استخراج نتایج در کد Geant4 براساس شکل ۱ نوشته شد. با توجه به شکل ۱ سر شتاب‌دهنده از قطعات زیر تشکیل شده است:

الف) هدف: استوانه‌ای از تنگستن با شعاع ۲ میلی‌متر.

ب) کولیماتور اولیه: یک استوانه تنگستن به ارتفاع ۱۰.۲ سانتی‌متر شامل یک مخروط ناقص.

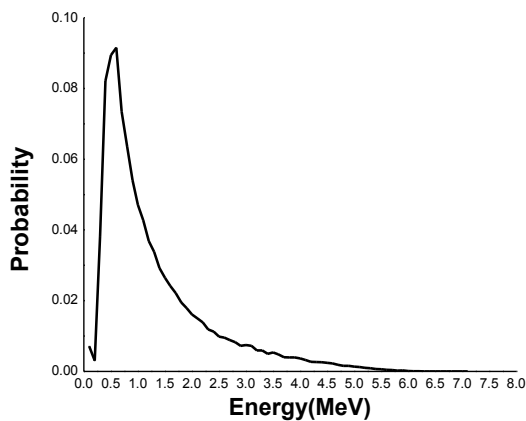
ج) فیلتر تخت: مخروطی از جنس تنگستن با ارتفاع ۱/۷۵ سانتی‌متر، اتاقک یونش: لایه‌های استوانه‌ای نازک از جنس مس، پلاستیک و هوا با ضخامت کلی ۱/۵ سانتی‌متر و شعاع ۳ سانتی‌متر [۸]. آینه: یک استوانه کاپتون با زاویه ۴۵ درجه، حفاظ‌های شکاف‌دار در راستای X و Y: لایه‌هایی از جنس تنگستن برای تنظیم میدان و در نهایت یک فانتوم آب قرار دارد که داخل آن آشکارساز RK304 در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از سطح آب قرار گرفته شده است. چشمه مورد استفاده یک چشمه الکترون با توزیع انرژی گوسی است. شبیه‌سازی با استفاده از یک کامپیوتر ۷ هسته‌ای با رم ۸ گیگابایت و سی‌پی‌یو ۲/۹ گیگا هرتز انجام شده است.

بر روی بافت تومور متمرکز می‌شود [۲،۱]. تحقیقات قبلی نشان داده است که روش‌های مونت‌کارلو برای شبیه‌سازی ترابرد پرتوی فوتون در شتاب‌دهنده‌های خطی پزشکی مناسب هستند. از پرتوهای شبیه‌سازی شده می‌توان برای اندازه‌گیری توزیع دز در فانتوم‌ها و بدن بیماران استفاده کرد. توزیع زاویه‌ای، انرژی و شعاعی مهم‌ترین داده پرتوهای فوتون هستند و می‌توانند برای کاربردهای بالینی شبیه‌سازی استفاده شوند. اگر این داده‌ها دقیق نباشند خطا در محاسبات دز ایجاد می‌شود [۴،۳].

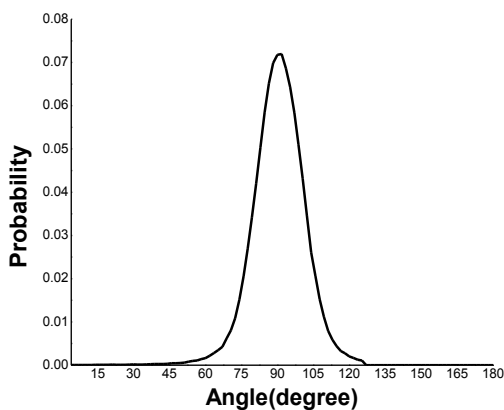
یکی از عوامل مهم در ایجاد خطا در محاسبات مونت‌کارلو، فرایند تولید فوتون در اثر برخورد الکترون به هدف است. برای کاهش خطا به علت بهره پایین تولید فوتون در اثر برهم‌کنش الکترون با هدف [۵] تعداد محاسبات تک ذره باید افزایش یابد. افزایش تعداد محاسبات تک ذره زمان اجرای برنامه را افزایش می‌دهد. جهت رفع این مشکل فضای فاز معرفی می‌شود. مشخصات فضای فاز بعضی از شتاب‌دهنده‌ها توسط آژانس بین‌المللی انرژی هسته‌ای برای سرعت بخشیدن به محاسبات معرفی شده است [۷،۶]. زمان اجرای برنامه با استفاده از فضای فاز باعث تسریع شبیه‌سازی می‌شود. در صورتی‌که جزئیات شبیه‌سازی در کدهای هسته‌ای به‌درستی تعریف و تأثیر داده شود هم‌خوانی بین محاسبات شبیه‌سازی و کار عملی وجود دارد [۸]. این تحقیق در نیز برای بررسی کاربرد فضای فاز در محاسبات دزیمتری شتاب‌دهنده‌های خطی انجام شد. برای تعیین مشخصات فضای فاز شتاب‌دهنده الکتای ۶ MeV مدل Compact از کد Geant4 استفاده شد.

در این روش، مشخصات مکانی، زاویه‌ای و طیف انرژی اشعه ایکس تولید شده در اثر برخورد باریکه الکترون به هدف تنگستن با استفاده از خروجی‌های کد Geant4 استخراج و اطلاعات آن به‌عنوان فضای فاز معرفی شده است. اطلاعات طیفی فضای فاز به‌عنوان چشمه اشعه ایکس کد Geant4 سر

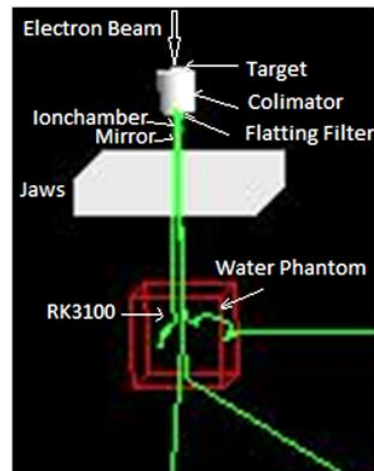
۱۰ cm و در میدان  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  با چشمه تابشی الکترونی بعد از اجرای برنامه به ۵ ساعت ناپیوسته و دارای خطای زیادی است. بنابراین جهت محاسبات دزیمتری با دقت بیشتر، باید برنامه چندین روز اجرا شود. جهت رفع این مشکل باید فضای فاز شتاب‌دهنده محاسبه شده و در برنامه کد Geant4 تعریف شود. فضای فاز شامل اطلاعات مکانی، انرژی و زاویه‌ای فوتون‌های ثانویه رسیده به نقطه مناسب داخل سر شتاب‌دهنده است که با تعریف چشمه و اجرای کد توزیع انرژی و طیف زاویه‌ای پرتوهای ایکس در قسمت‌های مختلف سر شتاب‌دهنده به دست آمده است (شکل‌های ۴ و ۵). طیف زاویه‌ای و انرژی فوتون‌های اشعه ایکس عبوری از در شکل‌های ۴ و ۳ نشان داده شده است. طیف زاویه‌ای فضای فاز یک طیف گوسی با انحراف استاندارد  $9/45$  درجه است.



شکل (۳): طیف انرژی اشعه ایکس تولید شده بعد از هدف در سر شتاب‌دهنده الکتا مدل Compact.



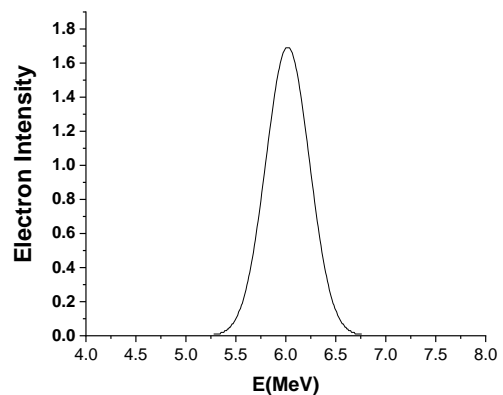
شکل (۴): توزیع زاویه‌ای اشعه ایکس تولید شده بعد از هدف در سر شتاب‌دهنده الکتا مدل Compact.



شکل (۱): هندسه سر شتاب‌دهنده الکتا مدل Compact.

### ۳. نتایج

جهت اجرای شبیه‌سازی به طیف الکترونی چشمه شتاب‌دهنده نیاز داریم. چشمه الکترونی دارای توزیع گوسی با متوسط انرژی  $6 \text{ MeV}$  و پهنا در نیمه ارتفاع برابر است با  $3\%$  انرژی متوسط یا انحراف استاندارد  $0/07$  است که در نمودار شکل ۲ نشان داده شده است [۱۰، ۱۱].



شکل (۲): طیف با انرژی متوسط  $6 \text{ MeV}$  و انحراف استاندارد  $0/07$  الکترونی شتاب‌دهنده.

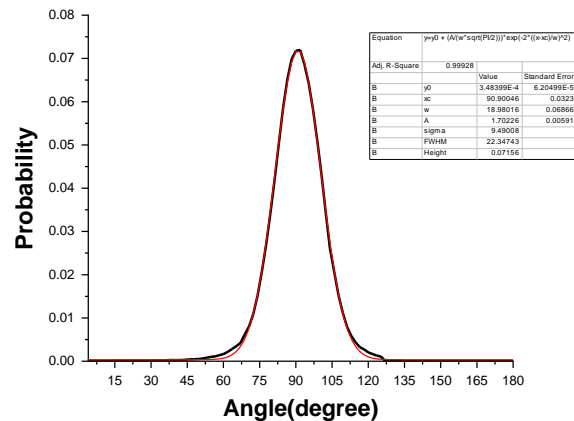
الکترون‌ها در هدف متوقف شده و اشعه ایکس تولید می‌شود طیف زاویه‌ای، طیف انرژی اشعه ایکس عبوری از هدف و توزیع مکانی اشعه ایکس خارج شده از هدف را می‌توان به‌عنوان مشخصات چشمه فاز در نظر گرفت. اشعه ایکس با عبور از قسمت‌های مختلف به‌علت جذب فوتون‌ها و تولید فوتون‌های ثانویه ناشی از برهم‌کنش فوتوالکتریک فوتون‌ها با ماده تغییر می‌کند و شدت آن مقداری کاهش می‌یابد. توزیع دز در عمق

با افزایش اندازه میدان Scp بزرگ‌تر می‌شود. علت آن پراکندگی فوتون‌ها توسط Jaws و دیگر اجزای سر شتاب‌دهنده است. مقادیر Scp با مقادیر اندازه‌گیری شده همخوانی بالای ۹۳ درصد دارد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه محاسبه فاکتور پراکندگی کل (Scp) هدف از این مطالعه محاسبه فاکتور پراکندگی کل (Scp) شتاب‌دهنده الکترا مدل Compact با استفاده از کد Geant4 و مقایسه آن با نتایج عملی است. جهت محاسبات مونت‌کارلو با استفاده از نتایج خروجی کد Geant4، مشخصات فضای فاز شتاب‌دهنده خطی Elekta مدل Compact استخراج و به‌عنوان چشمه ثانویه در کد معرفی شده است.

برای این کار ابتدا هندسه شتاب‌دهنده خطی الکترا در با کد Geant4 شبیه‌سازی و چشمه فضای فازی که پارامترهای منبع فوتونی را تولید می‌کند به عنوان چشمه استفاده شد. نتایج محاسبه ضریب پراکندگی کل (Scp) استخراج شده با این فضای فاز ۹۳٪ با نتایج عملی همخوانی دارد. در نتیجه مشخصات فضای فاز شتاب‌دهنده خطی Elekta مدل Compact می‌تواند به‌عنوان چشمه ثانویه در محاسبات دزیمتری شتاب‌دهنده مورد استفاده قرار گیرد.



شکل (۵): معادله گوسی برازش شده با انحراف استاندارد ۹/۴۵ درجه بر توزیع زاویه‌ای اشعه ایکس تولید شده بعد از هدف در سر شتاب‌دهنده الکترا مدل Compact.

توزیع زاویه‌ای اشعه ایکس تولید شده با توجه به شکل یک توزیع گوسی است که دارای انحراف استاندارد ۹/۴۵ درجه است. توزیع مکانی فوتون‌های ساطع شده از هدف نشان می‌دهد که توزیع مکانی دارای توزیع یکنواخت در راستای X و Y عمود بر محور شتاب‌دهنده است. با تعریف چشمه فضای باز کد Geant4، ضریب Scp در عمق ۱۰ سانتی‌متری فانتوم آب در میدان‌های مختلف محاسبه و در جدول ۱ نشان داده شده است. Scp با توجه به تعریف برابر با نسبت دز در عمق ۱۰ سانتی‌متری برای هر میدان به دز در عمق ۱۰ سانتی‌متری میدان مرجع  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  است  $(Scp = \frac{D_{10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}}}{D_{10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}}})$ .

جدول (۱): مقایسه نتایج حاصل از محاسبه تجربی و تئوری Scp با استفاده از چشمه فضای فاز.

اندازه میدان ( $\text{cm}^2$ )	فاکتور پراکندگی (Scp)		درصد هم‌خوانی
	فضای فاز	نتایج عملی [۱۳]	
۵×۵	۰.۹۸	۰.۸۰	۷۷%
۱۰×۱۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۱۰۰%
۲۰×۲۰	۱.۲۱	۱.۱۸	۹۷%
۲۵×۲۵	۱.۲۳	۱.۱۹	۹۶%
۳۰×۳۰	۱.۲۵	۱.۲۰	۹۵%

## ۵. مراجع

1. A. Jemal, F. Bray, M. M. Center, J. Ferlay, E. Ward, E., D. Forman. Global cancer statistics. *CA: A Cancer J. Clin.* 61 (2) (2011) 69-90.
2. F. M. Khan, J. P. Gibbons. *Khan's the Physics of Radiation Therapy*. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2014.
3. P. Hejazi, Bijan Hashemi, M. Shahriari, Anoshirvan Kazemnejad. Monte Carlo stimulation of the angular, radial and energy distribution of a medical linear accelerator using MCNP4C code. *Koomesh J.* 8 (2) (2007) 101-110.
4. S. Gholampourkashi, J. E. Cygler, J. Belec, M. Vujcic, E. Heath. Monte Carlo and analytic modeling of an Elekta Infinity linac with Agility MLC: Investigating the significance of accurate model parameters for small radiation fields. *J. Appl. Clin. Med. Phys.* 20 (1) (2019) 55-67.
5. K. Elmasri, T. Giaddui, S. Abugrain. Monte Carlo modeling of 6 MV photon beam produced by the elekta precise linear accelerator of Tripoli medical center using beamnrc/dosexyznrc, Arab Conference on the Peaceful uses of Atomic Energy. Khartoum, INIS-SD--523 (2012) 23-27.
6. R. Capote, R. Jeraj, C. M. Ma, D.W.O. Rogers, F. Sánchez-Doblado, J. Sempau, J. Seuntjens, J. V. Siebers. Phase-space database for external beam radiotherapy. Summary report of a consultants' meeting (No. INDC (NDS)-0484). International Atomic Energy Agency, 2006.
7. J. C. Martins, R. Saxena, S. Nepl, A. Alhazmi, M. Reiner, S. Veloza, K. Parodi. Optimization of Phase Space files from clinical linear accelerators. *Phys. Med.* 64 (2019) 54-68.
8. D. E. Krim, A. Rrhioua, M. Zerfaoui, D. Bakari, Y. Oulhouq, M. Bouta. Simulation of the patient-dependent part 6 MV Elekta linac photon beam using GATE. In 2019 Int. Conf. Intel. Sys. Adv. Comput. Sci. (ISACS), Taza, Morocco (2019) 1-6.
9. M. T. Bahreyni-Toosi, S. Nasser, M. Momennezhad, F. Hasanabadi, H. Gholamhosseinian. Monte Carlo Simulation of a 6 MV X-Ray Beam for Open and Wedge Radiation Fields, Using GATE Code. *J. Med. Signals Sensors* 4 (4) (2014) 267-273.
10. H. R. Sadoughi, S. Nasser, M. Momennezhad, H. R. Sadeghi, M. H. Bahreyni-Toosi. A comparison between GATE and MCNPX Monte Carlo codes in simulation of medical linear accelerator. *J. Med. Signals Sensors* 4 (1) (2014) 10-17.
11. D. McLaughlin. Energy spectra comparisons for matched clinical electron beams on Elekta linear accelerators using a permanent magnet spectrometer. Masters Thesis. Louisiana State University, Baton Rouge, LA, 2013.
12. M. T. Batiar, M. Mohammadi, M. Behmadi, M. Ghorbani. Development of a Phase Space Generator software for Medical Linear Accelerator Applications. *Iran. J. Med. Phys.* 15 (2018) p. 11.
13. M. A. Al Mashud, M. Tariquzzaman, M. J. Alam, G. A. Zakaria. Photon beam commissioning of an Elekta Synergy linear accelerator. *Polish J. Med. Phys. Eng.* 23(4) (2017) 115-119.