



انجمن حفاظت در برابر اشعه ایران

مقاله کنفرانسی



مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۱۱، شماره ۴، زمستان (ویژه‌نامه) ۱۴۰۱، صفحه ۱۶۱-۱۶۵

ششمین کنفرانس سنجش و ایمنی پرتوهای یون‌ساز و غیریون‌ساز (مردادماه ۱۴۰۰)

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۱۴، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹

اعتبارسنجی و مقایسه نتایج دز فانتوم سر شبیه‌سازی شده با کد مونت کارلوی GATE و دزیمتر ترمولومینسانس در تصویربرداری PET-CT

صدیقه سینا^۱، مهرانوش کریمی پورفرد^{۲*}، مریم صادقی^۲، محمد انتظارمهدی^۲ و مهرالسادات علوی^۳

^۱مرکز تحقیقات تابش، بخش مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شیراز، شیراز، فارس، ایران.

^۲بخش مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شیراز، شیراز، فارس، ایران.

^۳بخش پزشکی هسته‌ای، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، فارس، ایران.

*فارس، شیراز، دانشگاه شیراز، بخش مهندسی هسته‌ای، کدپستی: ۷۱۷۳۸۱۳۱۸۱.

پست‌الکترونیکی: mehrnoosh.karimipor@gmail.com

چکیده

دزیمتری ویژه بیمار یک امر مهم در پزشکی هسته‌ای است که با روش‌های مختلف به صورت کلینیکی و تحقیقاتی انجام می‌گردد. از میان روش‌های ارائه شده تکنیک مونت کارلو به دلیل دقت بالایی که دارد جایگاه ویژه‌ای را دربر گرفته است اما به دلیل زمان محاسباتی بالا هنوز به صورت کلینیکی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. این روش می‌تواند در دزیمتری هندسه‌های پیچیده هم‌چون بیمار مورد استفاده قرار گیرد ولی قبل از آن اعتبار بخشیدن به نتایج این کدها حائز اهمیت می‌شود. این پژوهش به بررسی روند اعتبارسنجی کدهای مونت کارلو می‌پردازد و با اندازه‌گیری عملی در تصویربرداری PET/CT به وسیله فانتوم سر و دزیمتر TLD و مقایسه آن با نتایج شبیه‌سازی کد GATE مرحله‌ی اول را انجام می‌دهد. در مراحل بعدی شبیه‌سازی فانتوم ۱۱۰ ICRP در دو حالت مختلف ریه به ریه و کبد به ریه با توجه به روش MIRD انجام می‌شود و خروجی فاکتور S با کد مونت کارلو GATE و MCNPX به دست می‌آید و با نتایج مطالعات پیشین مقایسه می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری عملی نزدیکی مناسبی را با دقت بالا نشان می‌دهند و به جایگاه ویژه کدهای مونت کارلو در دزیمتری هندسه‌های پیچیده هم‌چون بیمار تأکید می‌کند.

کلیدواژگان: دزیمتری داخلی، فانتوم، شبیه‌سازی، GATE، TLD.

۱. مقدمه

با استفاده از توزیع اکتیویته رادیوداروهای تزریق شده است [۱]. شبیه‌سازی مونت کارلو یک روش دزیمتری بروز است که می‌تواند با دقت بالا و با توجه به آناتومی هر بیمار دز داخلی ارگان‌ها را محاسبه نماید [۲]. این نتایج می‌توانند در روند دزیمتری بیمار مؤثر باشند بنابراین اعتبارسنجی آن‌ها نیز حائز

استفاده از روش‌های پزشکی هسته‌ای نقش مهمی در کاربردهای درمانی و تشخیصی دارد که با تجمع ماده پرتوزا در بدن بیمار همراه است. از این رو یکی از مهم‌ترین موضوعات در زمینه پزشکی هسته‌ای، دزیمتری داخلی ویژه بیمار می‌باشد. هدف از دزیمتری ویژه بیمار، تعیین مقدار دز رسیده به ارگان‌های داخلی

۱.۲. اندازه‌گیری‌های عملی با فانتوم سر

در قسمت اندازه‌گیری عملی، فانتوم سر آورده شده در شکل ۱ استفاده گردید. این فانتوم دارای ۲ حفره است که یکی از حفره‌ها به‌عنوان چشمه حاوی محلول آب و ^{67}Ga با اکتیویته $40 \mu\text{Ci}$ و حفره دیگر محل قرارگیری چیپس‌های TLD است.

اندازه‌گیری‌ها در دو حالت انجام شده است. ابتدا یکی از حفره‌ها سورس و حفره دیگر ارگان در نظر گرفته شده و حالت دیگر یکی از حفره‌ها سورس و دزیمترها اطراف آن قرار گرفته‌اند. در دو حالت تصویر PET/CT گرفته شده که بتوان برای شبیه‌سازی از آن استفاده کرد. برای استفاده از دزیمتر TLD ابتدا منحنی‌های کالیبراسیون در دزهای معمول در پزشکی هسته‌ای استخراج گردید. سپس کلیه چیپس‌های تخلیه شده دسته‌بندی و به‌منظور قرارگیری در حفره‌های فانتوم شماره‌گذاری شدند. نکته‌ای که در اندازه‌گیری عملی حائز اهمیت است، کالیبراسیون دقیق چیپس‌ها است. بنابراین می‌تواند به‌عنوان بک سورس ورودی خطا در نظر گرفته شود. از این‌رو این اندازه‌گیری چندین مرتبه با دقت بالا انجام گردیده است.



شکل (۱): فانتوم سر مورد استفاده در اندازه‌گیری.

۲.۲. شبیه‌سازی مونت کارلو

برای شبیه‌سازی فانتوم مورد نظر از کد مونت کارلو GATE v۸.۱ که یکی از تول‌کیت‌های GEANT است استفاده شده است. ابتدا تصاویر CT وارد نرم‌افزار Dslicer ۳ شده و قسمت‌های مختلف فانتوم بعد از یکسان‌سازی تصاویر از لحاظ

اهمیت است. از این‌رو شبیه‌سازی با فانتوم و مقایسه آن با نتایج دزیمترهای رایج مانند چیپس ترمولومینسانس، کدهای معتبر دیگر و فانتوم‌های مورد تأیید ICRP می‌تواند اعتبار نتایج را افزایش دهد و در هندسه‌های پیچیده هم‌چون بدن بیمار مورد استفاده قرار گیرد [۳].

اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی قدم اول در بررسی هندسه‌های پیچیده است که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این پژوهش مقایسه نتایج دز فانتوم سر مورد نظر با دزیمتر ترمولومینسانس (TLD) و برآورد میزان نزدیکی آن و مقایسه نتایج شبیه‌سازی فانتوم ICRP۱۱۰ با مطالعات پیشین در این زمینه است.

۲. روش انجام تحقیق

به‌منظور انجام هر شبیه‌سازی و اعتبارسنجی نتایج آن ۳ مرحله می‌بایست که انجام گردد. این مراحل شامل:

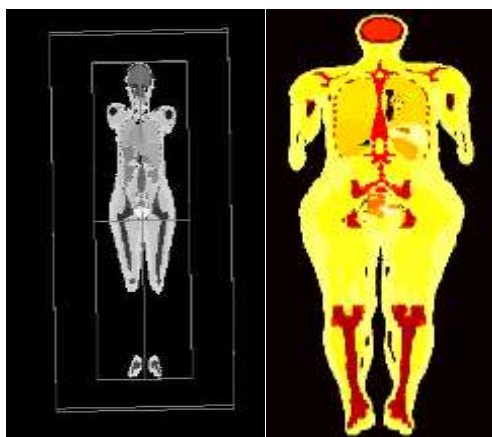
۱- اندازه‌گیری دز سورس به سورس و سورس به هدف با توجه به روش MIRD با استفاده از فانتوم‌های مورد استفاده در پزشکی هسته‌ای و دزیمترهای رایج است.

۲- شبیه‌سازی هندسه‌های مشابه و مقایسه داده‌های محققان مختلف می‌تواند به بالا بردن خروجی‌ها کد مونت کارلو کمک نماید. از این‌رو فانتوم ICRP-۱۱۰ زن و مرد به‌صورت رایج مورد استفاده قرار می‌گیرد و فاکتور S برای ارگان‌های مختلف به‌عنوان خروجی مقایسه می‌گردد.

۳- مقایسه نتایج خروجی کد گیت با کدهای مونت کارلو مورد تأیید مانند EGSnrc، MCNP است. در این مقاله ما به بررسی این روند برای اعتبارسنجی به نتایج خود می‌پردازیم.

۳.۲. شبیه‌سازی فانتوم ICRP ۱۱۰

فانتوم ICRP ۱۱۰ که به صورت زن و مرد در دسترس است یک مرجع مناسب برای مقایسه نتایج کدهای مختلف می‌باشد. این فانتوم دارای ۱۲ ارگان است که می‌توان در هر شبیه‌سازی آن را به صورت سورس به سورس یا سورس به ارگان تغییر دهیم و فاکتور S را محاسبه کنیم. شکل ۳ فانتوم زن شبیه‌سازی شده در کر گیت را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی یک بار ریه به عنوان سورس در نظر گرفته شده است و دز ریه به ریه اندازه‌گیری شده و یک بار کبد به عنوان سورس مورد بررسی قرار گرفته است و دز کبد به ریه محاسبه شده است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی با خروجی شبیه‌سازی ویلینگ و همکارانش و کد مورد تأیید MCNPx مقایسه شده است [۶، ۷].



شکل (۳): فانتوم ICRP110 در کد گیت.

۳. نتایج و بحث

خروجی شبیه‌سازی GATE در محیط MATLAB مورد بررسی قرار گرفت و میزان توزیع دز میانگین آن با توجه به شدت پیکسل‌های تصویر در حفره‌های مورد محاسبه گردید. شکل ۴ و ۵، نقشه توزیع دز در فانتوم سر را نشان می‌دهد و تغییرات شدت دز را در ناحیه سورس و ارگان را نمایان کرده است.

ابعاد ماتریس بخش‌بندی گردید (شکل ۲). انجام پیش پردازش روندی مهم در اقدامات قبل از شبیه‌سازی است که با فیلترینگ تصاویر، بخش‌بندی، هم‌سایز کردن و بررسی ماسک‌های ایجاد شده برای قسمت‌های مختلف فانتوم و دادن کد شناسایی ویژه به هر قسمت انجام شده است.

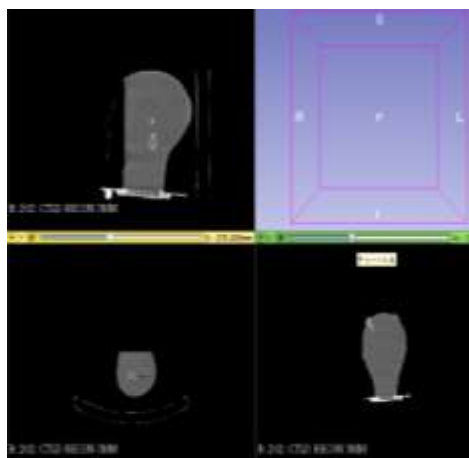
در مرحله بعد در محیط نرم‌افزار MATLAB تصاویر PET و CT فانتوم به فرمت‌های مناسب تبدیل شد و به عنوان فانتوم وکسلایز شده و سورس وکسلایز شده در کد مونت کارلو تعریف گردید.

کلیه اطلاعات تصاویر در هدر فایل وارد شد و با توجه به کمی بودن تصاویر PET میزان اکتیوته به شدت تصویر تخصیص داده شد. در این شبیه‌سازی از اکتور DOSE استفاده شده است و خروجی که از کد مونت کارلو به دست آمده فاکتور S است که در فرمول یک (۴) توضیح داده شده است:

$$SAF = \frac{\text{Absorbed Fraction (k} \leftarrow \text{h)}}{mk} \quad (1)$$

در این فرمول فاکتور S محاسبه می‌شود اما هدف از شبیه‌سازی به دست آوردن دز است که با توجه به فرمول ۲ به اکتیوته انباشته شده نیاز دارد [۵]. این فاکتور از منحنی اکتیوته- زمان استخراج می‌شود که برای فانتوم ثابت است و می‌توان گفت خروجی مد مونت کارلو همان نقشه دز است:

$$\bar{D} = \bar{A} \times S \quad (2)$$



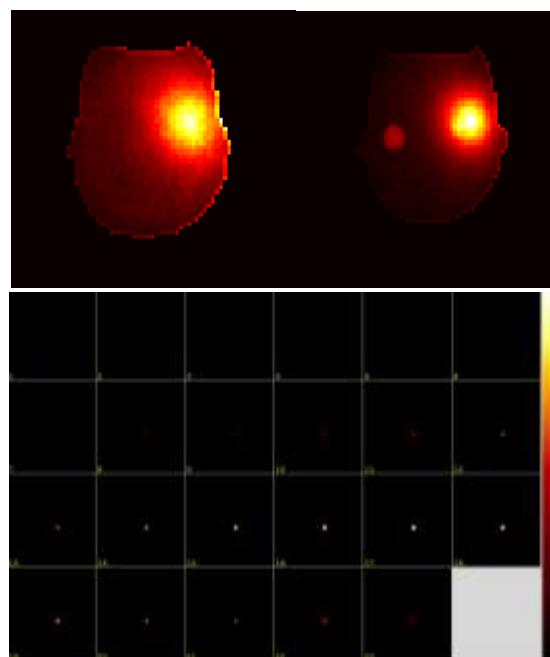
شکل (۲): تصویر PET-CT یکسان‌سازی شده از نماهای مختلف.

با توجه به این که این پژوهش بر روی فانتوم انجام می‌گردد می‌توان دریافت که فاکتور اکتیوته انباشته شده بی‌تأثیر است. خروجی حاصل از کد مونت کارلو با توجه به شکل ۲ که توزیع دز را نشان می‌دهد به‌دست آمده و مقادیر دز آن در حفره‌ها محاسبه شده است. با توجه به منحنی کالیبراسیون TLD میزان دز دزیمترها نیز میانگین‌گیری شده و برای حفره‌ها به دست آمده است که می‌توان نزدیکی مقادیر دز را نسبت به تغییرات فاصله از چشمه دریافتی در حالتی که دز چشمه به چشمه و دز چشمه به حفره محاسبه شده است روند کاهشی دز مشاهده می‌شود و با وجود عدم قطعیت ۹۵٪ در شبیه‌سازی و منابع مختلفی که در اندازه‌گیری عملی موجود است میزان اختلاف در حدود ۲٪ مشاهده شده است که با توجه به مقادیر میانگین‌گیری شده در حجم حفره چشمه و سورس به‌دست آمده است.

مقادیر میانگین حاصل از توزیع دز در حفره ارگان با میانگین‌گیری در حجم $2/5 \times 10^{-2}$ برآورد گردید که این مقدار در اندازه‌گیری عملی با اختلاف ۲۰٪ گزارش گردید. جدول ۱ نتایج حاصل از اندازه‌گیری عملی با دزیمتر TLD و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در مرحله بعد فانتوم نتایج حاصل از شبیه‌سازی فانتوم ICRP۱۱۰ با مد مونت‌کارلو GATE و MCNPX را می‌بینیم که با نتایج پژوهشی معتبر در این زمینه مقایسه شده است.

ناحیه‌ی مورد اندازه‌گیری	Mean dose values of TLD dosimeter (mGy)	Mean dose values of (mGy)
اطراف چشمه رادیواکتیو	69.84	72.02
ناحیه‌ای که به عنوان هدف در نظر گرفته شده است	16.89	17.58

جدول (۱): نتایج حاصل از اندازه‌گیری عملی با دزیمتر TLD و شبیه‌سازی گیت.

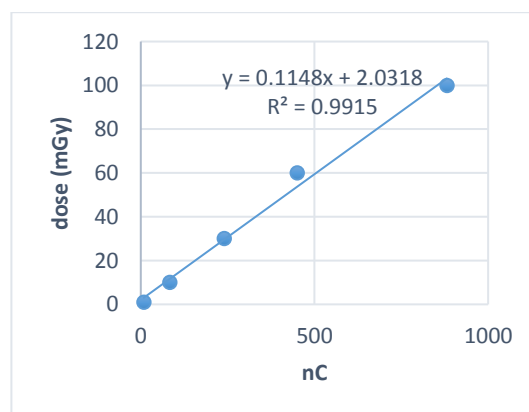


شکل (۴): نقشه توزیع دز در فانتوم سر.



شکل (۵): نتایج حاصل از توزیع دز در حفره فانتوم منطبق بر تصاویر CT.

هم‌چنین هر کدام از دزیمترهای TLD خوانده شد و نتایج حاصل از آنها با توجه به منحنی کالیبراسیون شکل ۶ به‌دست آمد.



شکل (۶): نمودار کالیبراسیون TLD.

Lungs ← Lungs SAFs(Kg ⁻¹)		
E (MeV)	Villoing et al (GATE)	This work (GATE)
0.05	1.34×10 ⁻⁰¹	1.33×10 ⁻⁰¹
0.10	7.66×10 ⁻⁰²	7.64×10 ⁻⁰²
0.50	7.68×10 ⁻⁰²	7.65×10 ⁻⁰²
1.00	6.82×10 ⁻⁰²	6.80×10 ⁻⁰²

Lungs ← Liver SAFs(Kg ⁻¹)		
E (MeV)	Villoing et al (GATE)	This work (GATE)
0.05	2.44×10 ⁻⁰²	2.42×10 ⁻⁰²
0.10	1.76×10 ⁻⁰²	1.71×10 ⁻⁰²
0.50	1.50×10 ⁻⁰²	1.45×10 ⁻⁰²
1.00	1.39×10 ⁻⁰²	1.35×10 ⁻⁰²

Lungs ← Liver SAFs(Kg ⁻¹)		
E (MeV)	This work (MCNPX)	This work (GATE)
0.05	2.44×10 ⁻⁰²	2.42×10 ⁻⁰²
0.10	1.66×10 ⁻⁰²	1.71×10 ⁻⁰²
0.50	1.46×10 ⁻⁰²	1.45×10 ⁻⁰²
1.00	1.39×10 ⁻⁰²	1.35×10 ⁻⁰²

جدول (۲): نتایج حاصل از شبیه‌سازی کدهای گیت و MCNPX و مقایسه آن با خروجی پژوهش ویلونگ و همکارانش.

جدول ۲ نتایج حاصل از شبیه‌سازی فانتوم ۱۱۰ ICRP و مقایسه آن با پژوهش‌های پیشین را نشان می‌دهد. میزان اختلاف خروجی گیت حدود ۲٪ و اختلاف شبیه‌سازی آن با کد MCNPX در حد ۵٪ است. این نتایج نشان‌دهنده نزدیکی خروجی‌های کدهای مختلف است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مقایسه آن با داده‌های عملی و کدهای معتبر با هندسه مشابه اولین قدم در شبیه‌سازی و دزیمتری ویژه بیمار است. اگر روش شبیه‌سازی بخواهد به صورت کلینیکی مورد استفاده قرار گیرد، می‌بایست معتبر باشد که می‌تواند از روش‌های انجام شده در روند این مطالعه استفاده شود.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان دریافت کد مونت‌کارلو می‌تواند ابزار حائز اهمیتی در دزیمتری ویژه بیمار باشد و با دقت بالا دزیمتری را در هندسه‌های پیچیده انجام دهد. در ادامه می‌توان به مواردی که می‌تواند خطا را وارد شبیه‌سازی و اندازه‌گیری عملی کند اشاره کرد که از جمله آن‌ها: بخش‌بندی نامناسب فانتوم، عدم بررسی تغییرات شدت تصاویر PET و نامتناسب بودن آن با تغییرات اکتیویته و کالیبراسیون نامناسب دزیمترها می‌باشد. این پژوهش می‌تواند با کدهای مونت‌کارلو دیگر و هندسه‌های پیچیده‌تر انجام گردد و نتایج آن مقایسه شود.

۵. مراجع

- L. Ferrer, N. Chouin, A. Bitar, A. Lisbona, M. Bardiès. Implementing dosimetry in GATE: Dose-point kernel validation with GEANT4 4.8. 1. *Cancer Biother. Radiopharm* 22 (1) (2007) 125-129.
- A. A. Parach, H. Rajabi, M. A. Askari. Assessment of MIRD data for internal dosimetry using the GATE Monte Carlo code. *Radiat. Environ. Biophys.* 50 (3) (2011) 441-450.
- R. C. Walker, G. T. Smith, E. Liu, B. Moore, J. Clanton, M. Stabin. Measured human dosimetry of 68Ga-DOTATATE. *J. Nucl. Med.* 54 (6) (2013) 855-860.
- A. E. Besemer, Y. M. Yang, J. J. Grudzinski, L. T. Hall, B. P. Bednarz. Development and validation of RAPID: A patient-specific Monte Carlo three-dimensional internal dosimetry platform. *Cancer Biother. Radiopharm* 33 (2018) 155-165.
- J. A. Thie. Understanding the standardized uptake value, its methods, and implications for usage. *J. Nucl. Med.* 45 (9) (2004) 1431-1434.
- S. Neira, J. Guiu-Souto, P. Díaz-Botana, P. Pais, C. Fernández, V. Pubul, Á. Ruibal, C. Candela-Juan, A. Gago-Arias, M. Pombar, J. Pardo-Montero. Quantification of internal dosimetry in PET patients: individualized Monte Carlo vs generic phantom-based calculations. *Med Phys.* 47 (9) (2020) 4574-4588.
- H. Cramer. *Mathematical Methods of Statistics*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1999.