مقاله پژوهشی

ارمغان دانش، مجله علمی پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی یاسوج
دوره ۲۶، شماره ٤، مهر و آبان ۱٤۰۰(شماره پی در پی ۱٤۷)

ارزیابی دقت شبیه‌سازی مونت کارلو جهت محاسبه PDD در مغز استخوان فمور در حین مواجهه با پرتوهای کم انرژی

فرزانه السادات خادمی[۱]، مرضیه جعفرزاده[۲] ، فاطمه رضایی[۲] ، ذاکر صالحی[۲*]

[۱]کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی یاسوج، یاسوج، ایران، [۲] گروه پرتوشناسی، دانشگاه علوم پزشکی یاسوج، یاسوج، ایران

تاریخ وصول: ۱۳۹۹/۱۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۰/۰٦/۱٤

چکیده

زمینه و هدف: با توجه به حساسیت بالای مغز استخوان نسبت به اشعه یونیزان و هم‌چنین تعداد زیاد گرافی‌های استخوان، بررسی دوز جذبی در مغز استخوان در حین مواجهه با پرتوهای رادیوگرافی حایز اهمیت است. هدف از این مطالعه تعیین و ارزیابی دقت شبیه‌سازی مونت کارلو جهت محاسبه PDD در مغز استخوان فمور در حین مواجهه با پرتوهای کم انرژی بود.

روش بررسی: این مطالعه توصیفی در سال ۱۳۹۹ در دانشگاه علوم پزشکی یاسوج انجام شد. ۱۰۰ تصویر سی‌تی اسکن فمور انتخاب شد که از این میان ۲۸ تصویر که مربوط به ابتدا تا انتهای فمور بود، استخراج شد. پس از شبیه‌سازی سر دستگاه با انرژی‌های معمول در رادیوگرافی فمور با استفاده از شبیه ساز BEAMnrc، اطلاعات به دست آمده از تصاویر سی‌تی اسکن بیماران با نرم افزار CT CREAT، فانتوم دیجیتال فمور طراحی شد. فانتوم به شکل دیجیتال(با استفاده از شبیه ساز DOSXYX) تحت تابش پرتو ایکس قرار گرفت و درصد دوز جذبی(PDD) به کمک نرم‌افزار STATE DOSE محاسبه شد، در نهایت با استفاده از نرم‌افزار Image Java و Excel اطلاعات تجزیه و تحلیل شد.

یافته‌ها: درصد دوز جذبی در مغز استخوان فمور در انرژی‌های ۷۰ ، ۸۰ و ۹۰ به ترتیب در محدوده ۲ تا ۷۸ درصد، ۵ تا ۷۹ درصد و ۵ تا ۷٦ درصد به دست آمد. هم‌چنین با افزایش عمق در همه‌ی انرژی‌ها میزان درصد دوز جذبی کاهش می‌یابد. برای انرژی ۹۰ کیلوالکترون ولت و تا حدودی برای انرژی ۷۰ و۸۰ کیلوالکترون ولت داده‌ها نشان دهنده یک کاهش ناگهانی در مقادیر درصد دوز جذبی از عمق ٦ میلی‌متری به ۹ میلی‌متری هستند. از عمق ۱/۱ سانتی‌متری تا ۱/۵ سانتی‌متری مقادیر دوز جذب شده در مغز استخوان متناسب با انرژی تغییر می‌کنند.

نتیجه‌گیری: روش شبیه‌سازی مونت کارلو می‌تواند روشی کار آمد در محاسبه دوز جذبی در بافت مغز استخوان باشد. نتایج نشان می‌دهد که محاسبات درصد دوز جذبی تا عمق ۲ سانتی‌متری دقت قابل توجهی دارد. با افزایش عمق میزان دقت محاسبات(به شرط عدم افزایش تعداد ذرات شرکت کننده در شبیه‌سازی) به تدریج کاهش می یابد.

واژه‌های کلیدی: مونت کارلو، دوز جذبی، مغز استخوان، State Dose ، درصد دوز جذبی

***نویسنده مسئول: ذاکر صالحی،** یاسوج، دانشگاه علوم پزشکی یاسوج، گروه پرتوشناسی

Email: Phyzaker@gmail.com

مقدمه

اشعه یونیزان کاربرد بسیاری در پروتکل‌های تشخیصی پزشکی و درمانی دارد، اما با تأثیر روی سلامت انسان می‌تواند یکپارچگی ژنومی و زنده ماندن سلولی را به خطر بیاندازد و تهدید عمده‌ای برای سلول‌ها به حساب بیاید، هم‌چنین احتمال ایجاد سرطان و بدخیمی با تابش دوزهای تکرارشونده اشعه ایکس افزایش می‌یابد(۱).

مغز استخوان فمور یک اندام خون‌ساز اولیه شناخته می‌شود(۲). زمانی که سلول‌های خون‌ساز مغز استخوان در معرض اشعه یونییزه کننده قرار می‌گیرند، آسیب‌های اشعه باعث آسیب به DNA و کروموزوم می‌شود؛ در نتیجه منجر به مرگ سلولی و اختلال و نارسایی عملکرد خون‌سازی مغز استخوان می‌شود. آسیب‌های متعدد باعث افزایش سندروم تشعشعات حاد ناشی از پرتو می‌شود، در نتیجه مرگ و میر سلول‌های خون‌ساز را افزایش می‌دهد(۳). با توجه به حساسیت بالای مغز استخوان نسبت به اشعه یونیزان کننده به نحوی که حساس‌ترین بافت بعد از گنادها در برابر آسیب‌پذیری اشعه یونیزان می‌باشد و با توجه به اثرات اشعه یونیزان بر این سیستم سبب شده است تا سازمان بهداشت جهانی(WHO) آن را مشکلی بزرگ تلقی کند. در نتیجه بررسی دوز جذبی در مغز استخوان فمور جهت افزایش اطلاعات حاضر در رابطه با رفتار اشعه ایکس در بافت مغز استخوان حایز اهمیت است. یکی از ابزارهای محاسبه و ارزیابی دوز جذبی در بافت‌ها روش مونت کارلو است(٤).

روش مونت کارلو جهت ترابرد باریکه‌های فوتونی در شتاب دهنده‌های پزشکی روش مناسبی می‌باشد. باریکه‌های شبیه‌سازی شده را می‌توان جهت اندازه‌گیری توزیع دوز در فانتوم و بدن بیمار استفاده کرد(٥).

مونت کارلو یک روش مستقیم برای شبیه‌سازی و یکپارچه‌سازی ارایه می‌دهد و از آنجا که ساده و مستقیم است، استفاده از مونت کارلو آسان است(٦).

کد مونت کارلو BEAMnrc یکی از متداول‌ترین کدهای شبیه‌سازی اشعه ایکس تشخیصی است و با داشتن انواع متفاوتی از مدل‌ها امکان فراهم‌سازی تعریف هندسه و فیزیک شتاب دهنده، تکنیک‌هایی را با الگوریتم‌های آماری به منظور کاهش واریانس و عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو برای کاربر فراهم کرده است(۷). این روش تولید فایل‌های 3D Dose به وسیله ثبت مکان، انرژی، مختصات ذره، انحراف از میانگین، اکسپوژر و دوز جذبی که این امکان را به کاربر می‌دهد که از آنها در شبیه‌سازی‌های بعدی استفاده کند هم جزو تکنیک‌های این شبیه‌ساز است(۸). در این تحقیق سعی شده است با محاسبه درصد دوز جذبی(PDD) در مغز استخوان فمور در حین مواجهه با پرتوهای کم انرژی(Kev 90-80-70) به ارزیابی دقت روش مونت کارلو کد BEAMnrc پرداخته شود.

روش بررسی

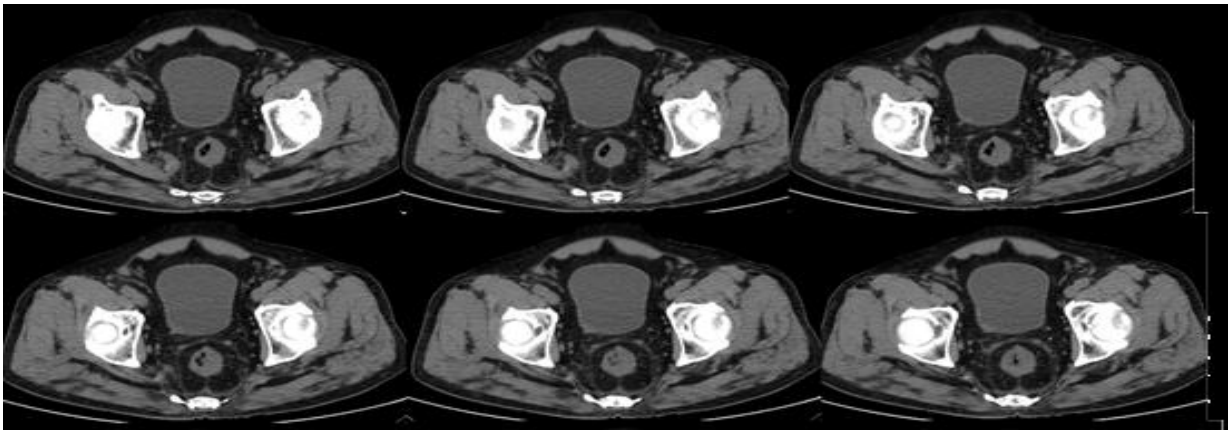
این مطالعه توصیفی در سال۱۳۹۹ در دانشگاه علوم پزشکی یاسوج انجام شد. شبیه‌سازی سر دستگاه

با سه انرژی ۰/۰۷، ۰/۰۸ و ۰/۰۹(مگا الکترون ولت) طی سه تکرار با ۵۰۰ میلیون ذره در مدت سه روز انجام شد. با مراجعه به بخش رادیوگرافی بیمارستان امام سجاد ۱۰۰ تصویر سی‌تی انتخاب شد که از این میان ۲۸ تصویر که مربوط به ابتدا تا انتهای فمور بود(شکل ۱). جهت شبیه‌سازی سر دستگاه در نرم افزار BEAMnrc به کار گرفته شد(۹). در ادامه از این تصاویر جهت ساخت فانتوم دیجیتالی مغز استخوان به کمک نرم‌افزار CT CREATE استفاده شد(۱۰). برای این کار در ابتدا با استفاده از برنامه ایمیج جاوا تصاویر DICOM و تصاویر مربوط به استخوان فمور بیماران آنالیز شده و از نظر مختصات مکانی بررسی شد و داده‌های لازم برای ساخت فانتوم از این بافت استخراج شد. سپس در نرم افزار CT CREAT مختصات تصاویر را به صورت زیر؛ محور X از(۲۲/۲۲۵۶۸- تا ۲۳/۶۷۴۳۴۳)، مختصات محور y از(۱۰/۱۰۵۹۲ــ تا ۳۵/۷۹۴۰۸) و محور Z(از ۵/۱ تا ۱۰/۷) تعریف گردید، هم‌چنین در این فانتوم هوا، ماهیچه، استخوان و مغز استخوان به وسیله چگالی‌های مندرج در جدول ۱ در الگوریتم شبیه‌سازی معرفی شدند و CT number ماکزیمم(بر مبنای آنچه که از برنامه ایمیج جاوا به دست آمد) برای هوا ۱۰۰۰- و ماهیچه‌ها ۱۳۵ و استخوان ۱۴۵۰ در نظر گرفته شد(۱۱). سپس با استفاده از ۱۰ میلیون ذره فانتوم به دست آمده تحت تابش سه انرژی گفته شده قرار گرفت. در ادامه درصد دوز جذبی به کمک نرم‌افزار STATE DOSE محاسبه گردید(۱۲). در مرحله بعد مقادیر دوز جذبی محاسبه شده با نتایج به دست آمده در پژوهش‌های پیشین مقایسه شد تا دقت روش مونت کارلو برای محاسبه دوز جذبی در مغز استخوان مشخص شود.

یافته‌ها

شبیه‌سازی انجام شده در این مطالعه به وسیله ۲۸ اسلایس ۲ میلی‌متری انجام شد که در نتیجه آن فانتوم دیجیتالی معادل فمور به دست آمد، به شکلی که عمق این فانتوم ۵/۶ سانتی‌متر محاسبه شد که از این عمق ۴/۲ سانتی‌متر در محاسبات لحاظ شد. این کار به این علت بود که از ۴/۲ سانتی‌متر به بعد مقادیر به دست آمده، خطای بیش از ۵۰ درصدی داشتند(بر مبنای محاسبه انحراف از میانگین). لازم به ذکر است که این خطا ناشی از مدل شبیه‌سازی شده نیست و صرفاً به دلیل تعداد ذرات شبیه‌سازی است. با توجه به این که در این مدل در مرحله آخر از ۱۰ میلیون ذره استفاده شد تعداد ذراتی که در آخرین لایه‌ها نفوذ می‌کنند چشمگیر نیست و به همین خاطر خطای اندازه‌گیری به واسطه نبود ذره کافی بالا می‌رود. از طرفی افزایش تعداد ذرات نیز باعث می‌شود که سیکل استفاده از ذرات باز تکرار(Recycle) شود که خود باعث افزایش خطای محاسبات خواهد شد. نمودار ۱ مقادیر PDD به دست آمده را برای انرژی‌های مختلف در عمق‌های مختلف تا ۴/۲ سانتی‌متری نشان می‌دهد.

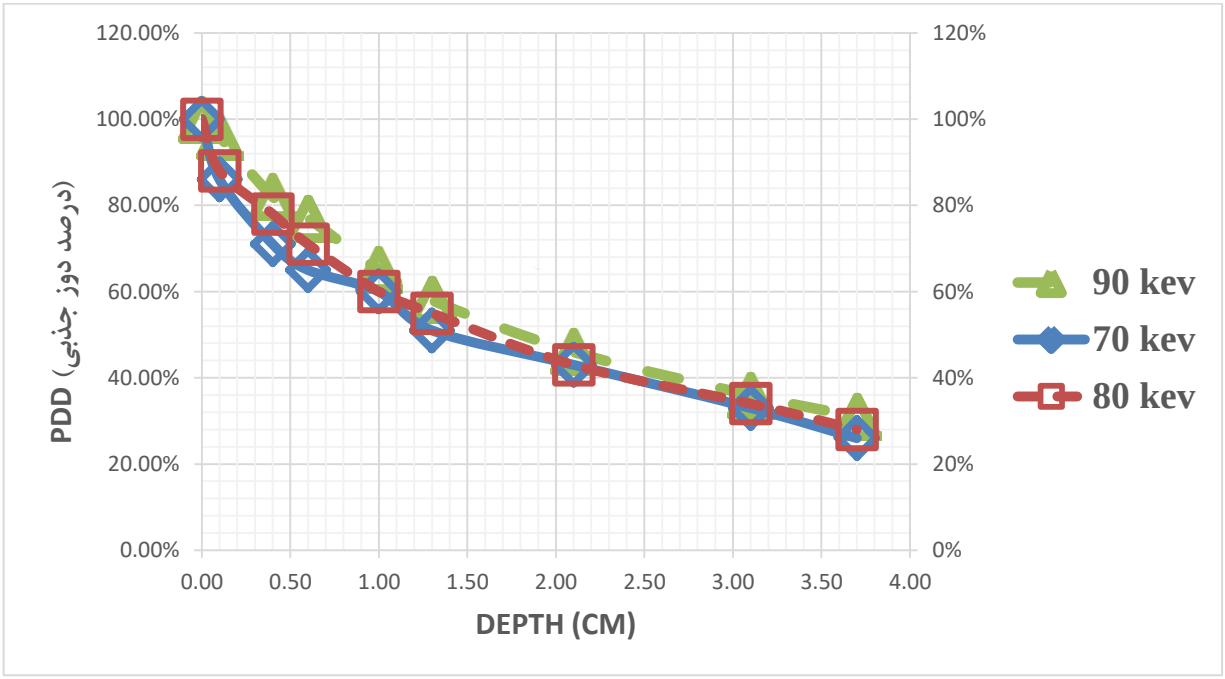
نمودار ۲ به مقایسه دقت نتایج شبیه‌سازی بیم در مطالعه جاری با مطالعه ای که در سال ۲۰۱۴ به وسیله هیل و همکاران نوشته شد می‌پردازد(۱۳).



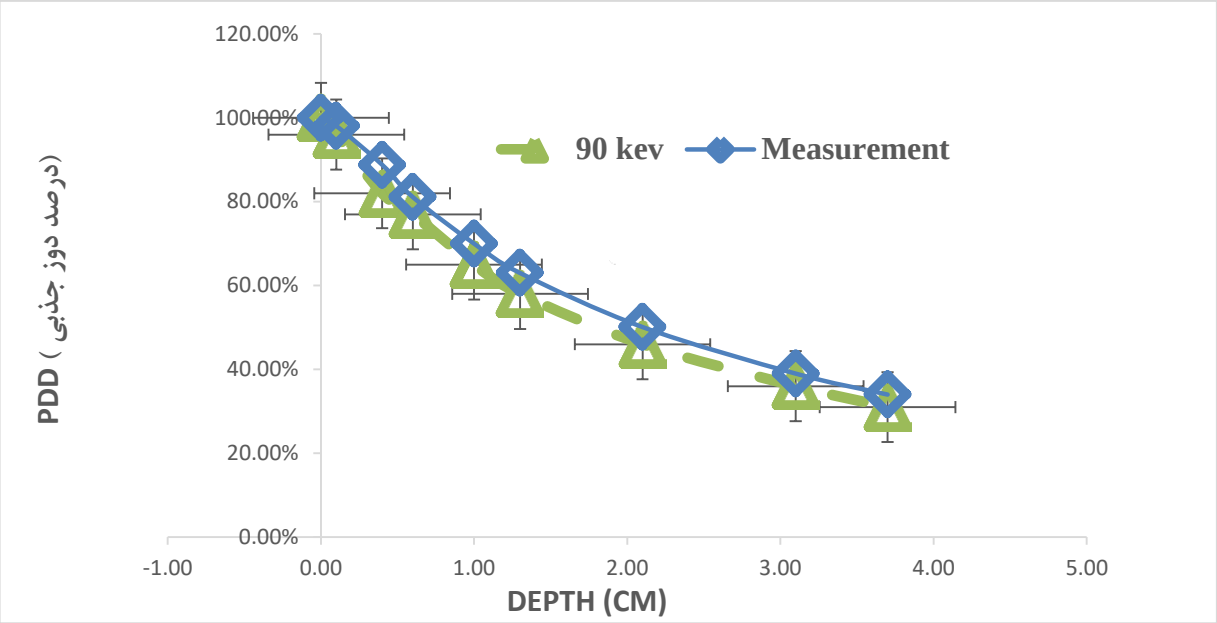
شکل ۱: اسلایس‌های سی‌تی که برای شبیه‌سازی استفاده شدند. شبیه ساز بیم از ۲۸ اسلایس برای شبیه‌سازی عمقی استفاده می‌کند که در شکل ٦ اسلایس مورد استفاده جهت ساخت فانتوم فمور نشان داده شده است.

جدول ۱: چگالی‌های مورد استفاده جهت شبیه‌سازی برای بافت‌های مختلف موجود در شبیه‌سازی(۱۱)

بافت	دانسیته(گرم بر سانتی‌متر مربع)	
	پایینتر	بالاتر
هوا	۰/۰۰۱	۰/۰٤٤
ماهیچه	۱/۰۱	۱/۱
استخوان اسفنجی	۱/۱	۱/۱٤
استخوان قشری	۱/۱٤	۲/۰۸۸
مغز استخوان	۱/۰۳	۱/۰۳



نمودار ۱: PDD برای انرژیهای ۷۰، ۸۰ و ۹۰ کیلوالکترون ولت



نمودار ۲: مقایسه دقت نتایج شبیه‌سازی بیم در مطالعه جاری با مطالعه سال ۲۰۱٤ (۱۳)

بحث

با توجه به حساسیت بالای مغز استخوان نسبت به اشعه یونیزان و همچنین تعداد زیاد گرافی‌های استخوان، بررسی دوز جذبی در مغز استخوان در حین مواجهه با پرتوهای رادیوگرافی حائز اهمیت است(۱٤). ثابت شده است که الگوریتم مونت کارلو برای محاسبه دوز جذبی پرتو ایکس در بافت روشی بسیار موثر است(۱۵). هدف از این مطالعه تعیین و ارزیابی دقت شبیه سازی مونت کارلو جهت محاسبه PDD در مغز استخوان فمور در حین مواجهه با پرتوهای کم انرژی بود.

همان‌طور که از نتایج مشخص است، با افزایش عمق در همه انرژی‌ها، میزان درصد دوز جذبی کاهش می‌یابد(نتیجه‌ای قابل انتظار بر مبنای مفهوم درصد دوز جذبی). برای انرژی ۹۰ کیلوالکترون ولت داده‌ها نشان دهنده یک کاهش ناگهانی در مقادیر درصد دوز جذبی از عمق ٦ میلی‌متری به ۹ میلی‌متری هستند که این میزان کاهش در عمق بعدی(۱/۱ سانتی‌متری) دیده نمی‌شود. علت را می‌توان ورود اشعه از استخوان کورتکس به استخوان اسفنجی(که دارای رگه‌هایی از مغز استخوان است) دانست. این الگو برای انرژی ۷۰ و ۸۰ کیلوالکترون ولت هم تاحدودی دیده می‌شود. از عمق ۱/۱ سانتی‌متری تا ۱/۵ سانتی‌متری مقادیر جذب شده در مغز استخوان متناسب با انرژی تغییر می‌کنند. یعنی مقدار درصد دوز جذبی(PDD) برای انرژی ۸۰

کیلوالکترون ولت اندکی از ۷۰ بیشتر است و برای ۹۰ کیلوالکترون ولت اندکی از ۸۰ بیشتر، ولی با افزایش عمق این الگوی وابستگی به انرژی دیده نمی‌شود، تا جایی که می توان فرض کرد(با احتساب خطای محاسبات) در عمق های بالاتر از ۲ سانتی‌متر مقادیر درصد دوز جذبی(PDD) برای انرژی‌های مختلف تقریباً یکسانند. این مقایسه نشان می‌دهد که در عمق‌های بیشتر میزان اختلاف نتایج از ۱۵ درصد تجاوز می کند، ولی از سطح پوست تا عمق ۲ سانتی‌متری خطای شبیه‌سازی کمتر از ۵ درصد می‌باشد. اختلاف بین نتایج احتمالاً به دلیل تعداد ذرات مورد استفاده در شبیه‌سازی است(۱۳). لازم است همین جا به این نکته اشاره کنیم که تعداد ذرات گسیل شده در حین رادیوگرافی فمور، بسیار بیشتر از ده میلیون ذره‌ای است که در این شبیه سازی استفاده شده است. مثلاً برای گرافی ۱۰۰ میلی‌آمپرثانیه ای حدود $۱۰^{۱۸}$ ذره گسیل می‌شود که تقریباً ۱۰۰ میلیارد برابر بیش از آن چیزی است که در این شبیه‌سازی استفاده شده است. در نتیجه لازم است هر نوع مدل‌سازی را به نسبت تعداد ذراتی که در آن استفاده شده و زمانی که شبیه‌سازی به طول انجامیده، مطالعه کرد. مقایسه نتایج با مطالعه انجام شده به وسیله دوزیمتر TLD(۱۶)نشان می‌دهد که تا عمق ۱/۵ سانتی‌متری داده‌ها دقت قابل قبولی از خود نشان می‌دهند و به مرور با افزایش دوز اختلاف داده‌ها بیشتر می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که ICRP برای دوزیمتری اشعه ایکس کم انرژی تا ۱۵ درصد عدم قطعیت داده را تایید نموده است(۱۷)که با در نظر گرفتن این نکته، داده‌های به دست آمده تا عمق ۲/۶ سانتی‌متری دقت قابل قبولی از خود نشان می‌دهند.

از محدودیت‌های این پژوهش طولانی بودن زمان اجرای مطالعه، قطع و وصل برق شهری که حین اجرای طرح، چندین مرتبه منجر به تکرار شبیه‌سازی شد. لذا پیشنهاد می‌شود شبیه‌سازی را توسعه دهیم در واقع برای نقاط دیگری که اطراف فمور وجود دارند، شبیه سازی انجام شود. شبیه‌سازی را با تعداد ذرات بیشتری انجام دهیم، ریسک سرطان خون با استفاده از کشت سلولی و روش‌های رادیوبیولوژی و روش‌های ژنتیک محاسبه شود. در واقع در این مطالعه، میزان دوز جذبی محاسبه شده است و تأثیر این دوز جذبی در ایجاد سرطان و ابنرمالیتی‌های دیگر محاسبه نشده است. محققان می‌توانند از دوز جذبی استفاده کنند و ریسک سرطان خون را محاسبه کنند. شبیه‌سازی طیف اشعه ایکس برای انرژی های بیشتری انجام شود.

نتیجه‌گیری

روش شبیه‌سازی مونت کارلو می‌تواند روشی کار آمد در محاسبه دوز جذبی در بافت مغز استخوان می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که محاسبات درصد دوز جذبی تا عمق ۲ سانتی‌متری دقت قابل توجهی دارد. با افزایش عمق میزان دقت محاسبات(به شرط عدم

افزایش تعداد ذرات شرکت کننده در شبیه‌سازی) به تدریج کاهش می‌یابد.

تقدیر و تشکر

این مقاله بر گرفته از پایان‌نامه مدرک دکتری حرفه ای پزشکی با کد اخلاق IR.YUMS.REC.1399.094 دانشگاه علوم پزشکی یاسوج می‌باشد. بدین وسیله از همه کسانی که در مراحل مختلف نگارش این مقاله همراهی کردند تقدیر می‌شود.

REFERENCES

1.Hill KD, Einstein AJ. New approaches to reduce radiation exposure. Trends Cardiovasc Med 2016; 26(1): 55-65.
2.Balan M, Kiefer F. A novel model for ectopic, chronic, intravital multiphoton imaging of bone marrow vasculature and architecture in split femurs. Intravital 2015; 4(2): e1066949.
3.Kiang JG, Zhai M, Liao PJ, Ho C, Gorbunov NV, Elliott TB. Thrombopoietin receptor agonist mitigates hematopoietic radiation syndrome and improves survival after whole-body ionizing irradiation followed by wound trauma. Mediators Inflamm 2017; 2017: 7582079.
4.Spezi E, Lewis G. An overview of monte carlo treatment planning for radiotherapy. Radiat Prot Dosimetry 2008; 131(1): 123-9.
5.Ay MR, Zaidi H. Development and validation of MCNP4C-based monte carlo simulator for fan- and cone-beam x-ray CT. Phys Med Biol 2005; 50(20): 4863-85.
6.Bonate PL. A brief introduction to monte carlo simulation. Clin Pharmacokinet 2001; 40(1): 15-22.
7.Jabbari K, Anvar HS, Tavakoli MB, Amouheidari A. Monte carlo simulation of siemens oncor linear accelerator with beamnrc and dosxyznrc code. J Med Signals Sens 2013; 3(3): 172-9.
8.Kumar A, Kaur R, Dong MG, Sayyed MI, Tekin HO. Radiation interaction parameters of dosimetric importance for some commonly used compensators in IMRT using Monte Carlo simulation code. J Radiol Prot 2018; 38(4): 1321-43.
9.Ma CM, Rogers DWO, BEAMDP Users Manual. Ionizing Radiation Standards, NRCC Report PIRS-0509©revA , National Research Council of Canada. Ottawa: Canada 2006-2007; 1-35.
10.Walters B, Kawrakow I, Rogers DWO . PIRS-794 rev B: DOSXYZnrc Users Manual. Ionizing Radiation Standards: Ottawa; 2011: 1-109
11.Zhao E, Xu H, Wang L, Kryczek I, Wu K, Hu Y, et al. Bone marrow and the control of immunity. Cellular & Molecular Immunology 2012; 9(1): 11-9.
12.McGowan HCE, Faddegon BA, Ma CM. STATDOSE For 3D Dose distributions. Ionizing radiation standards. NRC edition: Ottawa, Canada 2007; 1-12.
13.Hill R, Healy B, Holloway L, Kuncic Z, Thwaites D, Baldock C. Advances in kilovoltage x-ray beam dosimetry. Phys Med Biol 2014; 9(6): 24584183.
14.Green DE, Rubin CT. Consequences of irradiation on bone and marrow phenotypes, and its relation to disruption of hematopoietic precursors. Bone. 2014;63:87-94.
15. Lee C, Park B, Lee S-S, Kim J-E, Han S-S, Huh K-H, et al. Efficacy of the Monte Carlo method and dose reduction strategies in paediatric panoramic radiography. Scientific reports. 2019;9(1): 1-10.
16.SALEHI Z, Kamil W, Biswal B, Yusoff A. Monte Carlo radiography simulation for assessment of absorbed radiation dose in femur bone marrow during X-ray radiography for constant mAs and AEC techniques. 2015.
17.ICRU. Patient Dosimetry for X-rays used in Medical Imaging, Technical Report ICRU. Journal of ICRU 2005; 45: 5.

Armaghane-danesh, Yasuj University of Medical Sciences Journal (YUMSJ)

Original Article

Evaluation of Monte Carlo Simulation Accuracy to Calculate PDD in Femoral Bone Marrow during Exposure to Low Energy Rays

Khademi FS[1], Jafarzadeh M[2], Rezaei F[2], Salehi Z[2*]

[1]Student Research Committee, Yasuj University of Medical Sciences, Yasuj, Iran, [2]Departments of Radiology, Yasuj University of Medical Sciences, Yasuj, Iran

Received: 02 Mar 2021 Accepted: 05 July 2021

Abstract:

Background & aim: Due to the high sensitivity of the bone marrow to ionizing radiation as well as the large number of bone graphs, it is important to evaluate the absorbed dose in the bone marrow during exposure to radiographic rays. The aim of the present study was to determine and evaluate the accuracy of Monte Carlo simulations to calculate PDD in the femoral bone marrow during exposure to low energy rays.

Methods: The present descriptive study was conducted in 2020 at Yasuj University of Medical Sciences. 100 CT scan images of the femur were selected, of which 28 images were extracted from the beginning to the end of the femur. After simulating the head of the device with normal energies in femoral radiography using BEAMnrc simulator, the information obtained from CT scan images of patients with CT CREAT software, digital femoral phantom was designed. The phantom was digitally irradiated (using DOSXYX simulator) and the absorbed dose percentage (PDD) was calculated using STATE DOSE software. Finally, the data were analyzed using Image Java and Excel software.

Results: The percentage of absorbed dose in femoral bone marrow at energies of 70, 80 and 90 was in the range of 2 to 78%, 5 to 79% and 5 to 76%, respectively. Also, with increasing depth in all energies, the percentage of absorbed dose decreases. For energies of 90 kV and to some extent for energies of 70 and 80 kV, the data show a sudden decrease in the percentage of absorbed dose from a depth of 6 mm to 9 mm. From a depth of 1.1 cm to 1.5 cm, the dose absorbed in the bone marrow varies according to energy.

Conclusion: Monte Carlo simulation method can be an effective method in calculating the absorbed dose in bone marrow tissue. The results show that the calculations of the percentage of absorbed dose up to a depth of 2 cm are significantly accurate. As the depth increases, the accuracy of the calculations (provided that the number of particles participating in the simulation does not increase) gradually decreases.

Keywords: Monte Carlo, Absorption Dose, Bone Marrow, State Dose, Absorption Dose Percentage

[*]**Corresponding Author: Salehi Z,** Departments of Radiology, Yasuj University of Medical Sciences, Yasuj, Iran
Email: Phyzaker@gmail.com

Please cite this article as follows:
Khademi FS, Jafarzadeh M, Rezaei F, Salehi Z. Evaluation of Monte Carlo Simulation Accuracy to Calculate PDD in Femoral Bone Marrow during Exposure to Low Energy Rays. Armaghane-danesh 2021; 26(4):527-535.