

## بررسی کاهش مقدار عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو دوز در شبیه‌سازی شتاب‌دهنده خطی بالینی Oncor® با استفاده از تکنیک کاهش واریانس DBS در کدمونت کارلو BEAMnrc

امین اسدی<sup>۱</sup>، ابوالفضل نیک فرجام<sup>۲\*</sup>، کیوان جباری<sup>۳</sup>

### چکیده

مقدمه: مطالعه سودمندی تکنیک کاهش واریانس (DBS) Directional Bremsstrahlung Splitting در کد مونت کارلو BEAMnrc برای شتاب‌دهنده خطی Oncor® در اندازه میدان‌های مختلف دو انرژی ۶ و ۱۸.

روش بررسی: شتاب‌دهنده پزشکی Oncor® با استفاده از کد مونت کارلو BEAMnrc در دو انرژی ۶MV و ۱۸MV در اندازه میدان‌های مختلف شبیه‌سازی شد. این شتاب‌دهنده در دو انرژی ۶MV و ۱۸MV با استفاده از تکنیک DBS در اندازه میدان‌های مختلف شبیه‌سازی و مقدار سودمندی شار فوتون و الکترون و مقدار سودمندی محاسبات مونت کارلو دوز در شتاب‌دهنده Oncor® اندازه‌گیری شد.

نتایج: با استفاده از تکنیک DBS مقدار شار مطلق الکترون و فوتون به ترتیب (۶MV) ۶۲۸/۸ و (۶MV) ۹۸۳/۴ و (۱۸MV) ۲۸۵/۶ و (۱۸MV) ۷۳۷/۸ بار افزایش و مقدار سودمندی شار فضایی الکترون و فوتون (۶MV)  $308/6 \pm 1/35$  و (۶MV)  $480/38 \pm 0/43$ ، (۱۸MV)  $153 \pm 0/9$  و (۱۸MV)  $462/6 \pm 0/27$ ٪ افزایش پیدا کرد. با استفاده از تکنیک DBS مقدار سودمندی محاسبات مونت کارلو درصد دوز عمقی به ترتیب قبل از نقطه دوز ماکزیمم و بعد از نقطه دوز ماکزیمم (۶MV)  $187/8 \pm 0/68$  و (۶MV)  $184/6 \pm 0/65$ ، (۱۸MV)  $156 \pm 0/43$  و (۱۸MV)  $53 \pm 0/37$ ٪ بهبود و نیز سودمندی محاسبات مونت کارلو دوز برای منحنی دوز پروفایل نیز به طور قابل ملاحظه ای به ترتیب در راستای محور مرکزی تابش و در عرض میدان تابشی (۶MV)  $214/6 \pm 0/73$ ، (۱۸MV)  $175 \pm 0/36$  و (۱۸MV)  $181/4 \pm 0/45$ ٪ افزایش پیدا کرد.

نتیجه‌گیری: استفاده از تکنیک کاهش واریانس DBS در شبیه‌سازی شتاب‌دهنده خطی بالینی Oncor® به طور قابل توجهی شار الکترون و فوتون را در شبیه‌سازی مونت کارلو کد BEAMnrc افزایش و در نتیجه مقدار سودمندی محاسبات مونت کارلو دوز را به طور قابل توجهی بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: تکنیک کاهش واریانس (DBS)، شتاب‌دهنده خطی بالینی، کد Dosxyznrc، کد BEAMnrc

۱- گروه فیزیک پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی شهید صدوقی یزد

۲- مرکز تحقیقات پرتودرمانی، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی شهید صدوقی یزد

۳- گروه فیزیک پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان

\* (نویسنده مسئول): تلفن: ۰۳۴۱۰۳۳۵۳۸۲۹۸۳+، پست الکترونیکی: a.nickfarjam@ssu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۴/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۹/۲۹

## مقدمه

سیستم مونت کارلو EGSnrc در سال ۲۰۰۰ میلادی منتشر شد و از سال ۲۰۰۲ میلادی تا اکنون مونت کارلو BEAMnrc از این سیستم به عنوان یک shared library برای فیزیک تراپرد (Transport Physics) ذرات، و داده‌های مربوط به cross sections مواد (Materials) مختلف استفاده می‌کند (۱،۲). کد مونت کارلو BEAMnrc یکی از متداول‌ترین کدهای شبیه‌سازی شتاب‌دهنده‌های پزشکی به خصوص شتاب‌دهنده‌های پرتودرمانی است (۳). این کد به زبان برنامه‌نویسی FORTRAN77 که اختصاصاً در BEAMnrc با نام فایل MORTAN شناخته می‌شود برنامه‌نویسی شده است (۴). کد مونت کارلو BEAMnrc با داشتن انواع متفاوتی از مدل‌ها (Modules)، این اختیار را به کاربر می‌دهد که تمام جزئیات و پارامترهای هندسی و فیزیک شتاب‌دهنده مورد علاقه‌اش را تعریف و شبیه‌سازی کند (۳). کد مونت کارلو BEAMnrc علاوه بر امکان فراهم‌سازی تعریف هندسه و فیزیک شتاب‌دهنده، تکنیک‌هایی را با الگوریتم‌های آماری به منظور کاهش واریانس و عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو برای کاربر فراهم کرده است. این تکنیک‌ها شامل Photon Forcing، Range Reduction، Bremsstrahlung cross sections (BCS) و تکنیک‌های Bremsstrahlung Splitting می‌باشد (۳). تکنیک BS در طی بهینه‌سازی‌ها و تغییراتی زیادی که با گذشت زمان در آن صورت گرفته است، در ابتدا تکنیک (UBS Uniform Bremsstrahlung Splitting)، سپس تکنیک (Selective Bremsstrahlung Splitting) SBS و در سال ۲۰۰۴ آخرین تکنیک از این مجموعه را با عنوان DBS برای کاهش واریانس و عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو به الگوریتم‌های آماری کد مونت کارلو BEAMnrc افزود (۵). تکنیک‌های BS در بخش داده‌های ورودی که از کاربر دریافت می‌کنند مشترکند. اما تکنیک DBS دارای الگوریتم آماری منحصربه‌فردی می‌باشد که قادر است به ترتیب سودمندی شار و دوز را در مقایسه با تکنیک UBS، ۲۰ و ۲۶ بار و در مقایسه با تکنیک SBS، ۸ و ۶ بار افزایش دهد (۵). در تکنیک DBS پارامترهایی مانند

(Number of Bremsstrahlung Splitting) NBR SPL، اندازه میدان (FS)، فاصله هدف تا سطح (SSD) و کلت روسی (Russian Roulette) می‌بایست توسط کاربر تنظیم شوند. تکنیک DBS، ذرات باردار (الکترون یا پوزیترون) را هرباری که دستخوش تابش ترمزی یا حتی پدیده فناشدگی (Annihilation event) می‌شوند به تعداد NBR SPL مجبور به تابش فوتون می‌کند. هریک از فوتون‌های ترمزی پس از تابش، دارای وزن تابشی به اندازه  $1/NBR SPL$  می‌باشند و لذا الگوریتم تکنیک DBS بر اساس این وزن‌دهی‌ها و انرژی فوتون‌ها و نیز با استفاده از توزیع احتمال و سیستم تولید کننده اعداد تصادفی (Random Number Generator) RNG، از تکانه و زاویه فوتون‌های ترمزی نمونه برداری می‌کند (۳). الگوریتم تکنیک بر اساس پارامترهای FS و SSD، یک ناحیه مورد نظر (Region Of Interest) ROI را فرض می‌کند و فوتون‌های تابشی رو به داخل منطقه (nonfat photons) و خارج منطقه (fat photons) تقسیم می‌کند. فوتون‌های خارج منطقه توسط کلت روسی حفظ یا حذف می‌شوند. حذف تعدادی از فوتون‌های خارج منطقه سبب افزایش وزن فوتون‌های باقیمانده (fat photons) می‌شود و بنابراین احتمال برهم کنش کامپتون در این فوتون‌ها افزایش می‌یابد (۳).

به طور کلی مطالعاتی بسیار کمی وجود دارند که سودمندی‌های فیزیکی و دوزیمتری حاصل از تکنیک کاهش واریانس DBS را در محاسبات مونت کارلو به صورت مفصل و با جزئیات گسترده مورد بررسی قرار داده باشند. به همین خاطر، در این مطالعه انواع سودمندی‌های فیزیکی و دوزیمتری حاصل از تکنیک DBS در شبیه‌سازی مونت کارلو شتاب‌دهنده خطی بالینی Oncor® در اندازه میدان‌های مختلف دو انرژی ۶MV و ۱۸MV به صورت مفصل بررسی و مقایسه شدند.

## روش بررسی

## تطبيق محاسبات مونت کارلو با اندازه‌گیری‌های تجربی در آب

شبیه‌سازی مونت کارلو سر شتاب‌دهنده خطی بالینی Oncor®

با بکارگیری هندسه واقعی این شتاب‌دهنده با استفاده از کد کاربری مونت کارلو BEAMnrc مبتنی بر سیستم EGSnrc انجام شد. کد مونت کارلو BEAMnrc یک کد مونت کارلو شبیه‌سازی برای شبیه‌سازی سر شتاب‌دهنده‌های خطی پرتودرمانی است که به عنوان بخشی از پروژه OMEGA برای توسعه سیستم طراحی درمان سه بعدی توسعه پیدا کرد. کد BEAMnrc بر روی سیستم کد EGSnrc ساخته می‌شود و کد مونت کارلو BEAMnrc از این سیستم به عنوان یک کتابخانه مشترک برای دسترسی به داده‌های سطح مقطع مواد در هنگام بارگذاری مواد مورد نیاز در شبیه‌سازی قطعات مختلف هندسه استفاده می‌کند (۶،۷). در مطالعه حاضر شبیه‌سازی سر شتاب‌دهنده Oncor® با استفاده از کد مونت کارلو BEAMnrc در محیط Ubuntu مبتنی بر سیستم Debian در سیستم عامل UNIX/LINUX انجام شد. شبیه‌سازی هندسه شتاب‌دهنده با انواع قطعات Target (Modules)، Primarycollimator، Primary، Secondarycollimator، Mirror، Flattening filter and secondary jaws در محیط گرافیکی کد مونت کارلو BEAMnrc مطابق هندسه واقعی سر شتاب‌دهنده Oncor® انجام شد. برای تطبیق و صحت آزمایشی محاسبات مونت کارلو استفاده شده با اندازه‌گیری‌های تجربی انجام شده در فاننوم آب برای شتاب‌دهنده خطی درمانی Oncor®، پارامترهای فیزیکی شبیه‌سازی به ترتیب زیر تعریف شدند. تعداد ده شبیه‌سازی جداگانه با انرژی‌های ۶MV و ۱۸MV در پنج اندازه میدان باز ۱۰×۱۰، ۱۵×۲۰، ۲۵×۲۵، ۳۰×۳۰، با تنظیم فک‌های اولیه و ثانویه انجام شد. برای هر یک از شبیه‌سازی‌های انرژی ۶MV و ۱۸MV در پنج اندازه میدان عدد History Number برابر  $10^9 \times 1$  الکترون تابشی اولیه، انرژی‌های قطع الکترون و فوتون به ترتیب بر روی  $PCUT=10keV$  و  $ECUT=500keV$ ، پارامترهای آستانه انرژی کم برای تولید الکترون‌ها و فوتون‌های ثانویه به ترتیب بر روی  $MeV 0.521$  و  $MeV 0.1$  تنظیم شدند. همچنین صفحه phasespace در فاصله ۱۰۰ cm از هدف تابشی (SSD=100 cm) تنظیم شد.

در مطالعه حاضر پس از شبیه‌سازی شتاب‌دهنده Oncor®

در کد مونت کارلو BEAMnrc در دو انرژی ۶MV و ۱۸MV در پنج اندازه میدان با پارامترهای فیزیکی ذکر شده، فایل‌های phase space در  $SDD=100$  cm تولید شدند و در ادامه این فایل‌ها جداگانه استخراج شدند. در مرحله بعد این فایل‌ها برای استفاده به عنوان منبع تابش دوزیمتری وارد کد مونت کارلو شبیه‌سازی DOSXYZnrc شدند. کد DOSXYZnrc پس از شبیه‌سازی ذرات در فاننوم و محاسبه انرژی واگذار شده در و کسل‌ها، اطلاعات انرژی‌های واگذار شده به همراه مقدار عدم قطعیت محاسبات را در قالب یک ماتریس فضایی مشابه ابعاد و کسل‌های فاننوم، در فایلی با فرمت ASCHII با پسوند 3Ddose، در اختیار کاربر قرار می‌دهد (۸،۹). پس از تعریف ده فایل phase space انرژی‌های ۶MV و ۱۸MV به دست آمده از پنج میدان در کد مونت کارلو شبیه‌سازی دوزیمتری DOSXYZnrc و تنظیم پارامترهای شبیه‌سازی دوزیمتری به ترتیب زیر، فایل‌های 3ddose برای هر یک جداگانه تولید شدند. یک فاننوم آب به شکل مکعب با ابعاد یکسان  $50 \times 50 \times 50$  cm<sup>3</sup> با شبکه‌ای از وکسل‌های با ابعاد برابر  $5 \times 5 \times 5$  mm<sup>3</sup> مدل سازی شد. انرژی قطع برای الکترون و فوتون به ترتیب بر روی  $PCUT=10keV$  و  $ECUT=700keV$  تنظیم شدند. مقدار History number برابر  $10^9 \times 20$  تنظیم شد و منبع تابش نیز جداگانه ده فایل phasespace انرژی‌های ۶MV و ۱۸MV به دست آمده با شبیه‌سازی کد BEAMnrc تعریف شدند. بدین ترتیب شبیه‌سازی دوزیمتری تابش شتاب‌دهنده Oncor® در فاننوم آب انجام شد و فایل‌های 3 Ddose تولید و استخراج شدند. پس از استخراج فایل‌های Ddose3، این فایل‌ها وارد محیط برنامه MATLAB شدند.

در مرحله بعد، به منظور تطبیق و صحت آزمایشی محاسبات مونت کارلو انجام شده برای شتاب‌دهنده خطی درمانی Oncor®، به طور مشابه، در مرکز پرتودرمانی شهید رمضان‌زاده یزد شتاب‌دهنده خطی درمانی Oncor® در دو انرژی ۶MV و ۱۸MV با پنج اندازه میدان باز ۱۰×۱۰، ۱۵×۲۰، ۲۵×۲۵، ۳۰×۳۰ بکار گرفته شد. اندازه‌گیری‌های دوزیمتری تجربی در یک فاننوم بشکه‌ای آب در ابعاد مشابه

cm) تنظیم شد. پس از شبیه‌سازی شتاب‌دهنده Oncor® با استفاده از تکنیک کاهش واریانس DBS در کد مونت کارلو BEAMnrc برای دو انرژی ۶MV و ۱۸MV فایل‌های PHSP در SDD=100 cm تولید شدند، و آن‌ها جداگانه استخراج شدند.

سپس جهت بررسی مشخصات فیزیکی فایل‌های PHSP به دست آمده با تکنیک کاهش واریانس DBS، توزیع شار مطلق الکترون و فوتون و نیز توزیع فضایی شار الکترون و فوتون برای هریک از فایل‌های PHSP با استفاده از کد BEAMdp بررسی شدند. کد BEAMdp در پکیج BEAMnrc قرار دارد، و برای استخراج توزیع شار، توزیع انرژی، میانگین انرژی، توزیع زاویه‌ای و توزیع پراکندگی ذرات اسکور شده از فایل PHSP، مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۰، ۱۱). پس از به دست آمدن توزیع شار الکترون و فوتون از فایل‌های PHSP، شار مطلق الکترون و فوتون و نیز سودمندی توزیع فضایی شار برای فوتون و الکترون در هر انرژی و در اندازه میدان‌های مختلف به طور جداگانه محاسبه و مقایسه شدند.

در ادامه فایل‌های PHSP به دست آمده با بکارگیری تکنیک DBS در شبیه‌سازی شتاب‌دهنده خطی درمانی Oncor® با استفاده از کد مونت کارلو BEAMnrc، جهت اندازه‌گیری مقدار سودمندی کاهش عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو دوز تحویل کد مونت کارلو DOSXYZnrc شدند و در فانتوم آب شبیه‌سازی شدند. مشخصات فیزیکی استفاده شده در شبیه‌سازی با کد مونت کارلو DOSXYZnrc مشابه مرحله صحت‌آزمایی محاسبات مونت کارلو بود.

پس از شبیه‌سازی فانتوم آب و اجرای کد، فایل‌های خروجی دوز (File 3Ddose) برای هر یک از شتاب‌دهنده‌های شبیه‌سازی شده با تکنیک DBS، جمع‌آوری و استخراج شدند. به منظور اندازه‌گیری سودمندی کاهش واریانس محاسبات مونت کارلو دوز حاصل از تکنیک کاهش واریانس DBS، فایل‌های 3Ddose به دست آمده از دوزیمتری وارد کد Statdose، که یکی از کدهای OMEGA است (۱۲)، شدند و در محیط سیستم عامل لینوکس این سودمندی کاهش عدم

انجام شد. مطابق پروتوکول، برای انجام دوزیمتری فوتونی از یک دوزیمتر دیودی فوتونی (PFD) به منظور اسکن دوز واگذار شده در فانتوم آب استفاده شد. پس از انجام اندازه‌گیری‌های تجربی، با استفاده از نرم‌افزار RF۳۰۰ منحنی‌های PDD و پروفایل دوز اندازه‌گیری شده شتاب‌دهنده خطی درمانی Oncor®، به منظور تطبیق و مقایسه با منحنی‌های مشابه به دست آمده از محاسبات مونت کارلو، استخراج شدند.

در آخر، به منظور تطبیق و صحت‌آزمایی روش مونت کارلو استفاده شده در شبیه‌سازی شتاب‌دهنده خطی درمانی Oncor® با اندازه‌گیری‌های انجام شده در فانتوم آب، در برنامه MATLAB از فایل‌های 3Ddose انرژی‌های ۶MV و ۱۸MV در پنج اندازه میدان باز ۱۰×۱۰، ۱۵×۲۰، ۱۵×۲۰، ۲۵×۲۵، ۳۰×۳۰ به طور جداگانه برای هریک منحنی‌های نسبت دوز عمقی در راستای محور مرکزی تابش (PDD) و نسبت دوز در راستای محور X مرگزی یا پروفایل دوز، به منظور مقایسه و تطبیق با منحنی‌های مشابه به دست آمده در اندازه‌گیری‌های تجربی استخراج شدند.

### بررسی مشخصات فیزیکی و دوزیمتری تکنیک DBS

پس از اطمینان از صحت محاسبات مونت کارلو انجام شده، سر شتاب‌دهنده خطی بالینی Oncor® با استفاده از تکنیک کاهش واریانس DBS در کد مونت کارلو BEAMnrc شبیه‌سازی شد. پارامترهای فیزیکی شبیه‌سازی سر شتاب‌دهنده با استفاده از تکنیک DBS در کد مونت کارلو BEAMnrc بدین ترتیب بودند. برای استفاده از تکنیک DBS تعداد NBRSP=۱۰۰۰، اندازه میدان‌های مختلف بر روی ۱۰×۱۰، ۱۵×۲۰، ۱۵×۲۰، ۲۵×۲۵، ۳۰×۳۰ سانتی‌متر مربع، عدد History Number برابر  $10^9$  الکترون تابشی اولیه، انرژی‌های قطع الکترون و فوتون به ترتیب بر روی PCUT=10keV و ECUT=500keV و پارامترهای آستانه انرژی کم برای تولید الکترون‌ها و فوتون‌های ثانویه به ترتیب بر روی ۰/۵۲۱MeV و ۰/۰۱MeV تنظیم شدند. هم‌چنین صفحه phasespace در فاصله ۱۰۰ cm از هدف تابشی (SSD=100)

و فوتون از استفاده شد. در این عبارت  $\sigma$  مقدار عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو و  $T$  زمان شبیه‌سازی CPU می‌باشد.

$$\varepsilon = \frac{1}{\sigma^2 T}$$

فرمول ۱: رابطه محاسبه سودمندی کاهش عدم قطعیت

محاسبات مونت کارلو دوز و شار فضایی الکترون و فوتون.

## نتایج

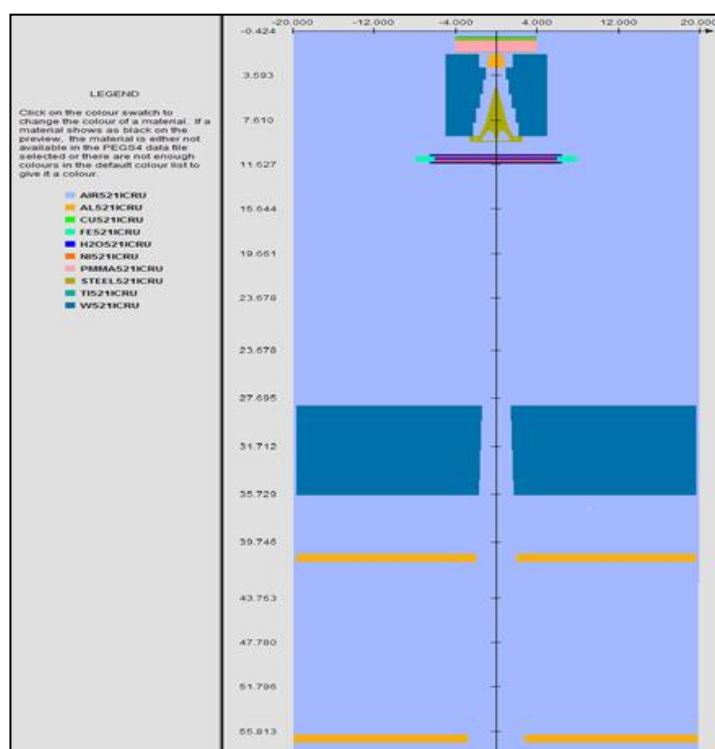
### صحت آزمایشی محاسبات مونت کارلو با اندازه‌گیری‌های

### تجربی

در ابتدا از شتاب‌دهنده شبیه‌سازی شده Oncor®، با استفاده از قابلیت GUI کد BEAMnrc یک تصویر شماتیک استخراج شد).

قطعیت محاسبات مونت کارلو اندازه‌گیری شد. بدین ترتیب، با استفاده از کد Statdose سودمندی کاهش عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو دوز برای منحنینسبت درصد دوز عمقی (PDD) در دو منطقه، قبل از نقطه دوز ماکزیمم و بعد از نقطه دوز ماکزیمم برای انرژی‌های ۶MV و ۱۸MV در اندازه میدان‌های مختلف اندازه‌گیری و مقایسه شد. همچنین با استفاده از کد Statdose مقدار سودمندی کاهش عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو دوز برای منحنی نسبت دوز در راستای محور عرضی یا منحنی پروفایل دوز در دو منطقه، در راستای محور مرکزی تابش و در عرض میدان تابشی در عمق 5 cm فانتوم آب برای انرژی‌های ۶MV و ۱۸MV در اندازه میدان‌های مختلف اندازه‌گیری و مقایسه شد.

در این مطالعه، برای اندازه‌گیری مقدار سودمندی کاهش عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو دوز و نیز شار فضایی الکترون



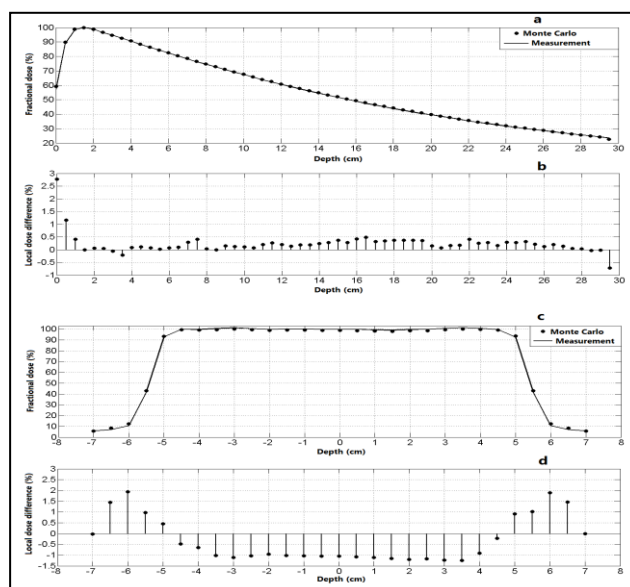
شکل ۱: شتاب‌دهنده شبیه‌سازی شده Oncor® با استفاده از کد BEAMnrc.

کدهای BEAMnrc و DOSXYZnrc و اندازه‌گیری‌های تجربی ماشین Oncor® در فانتوم آب استخراج شدند. در مطالعه حاضر بر اساس روش خطا و آزمایش برای انرژی ۶MV در

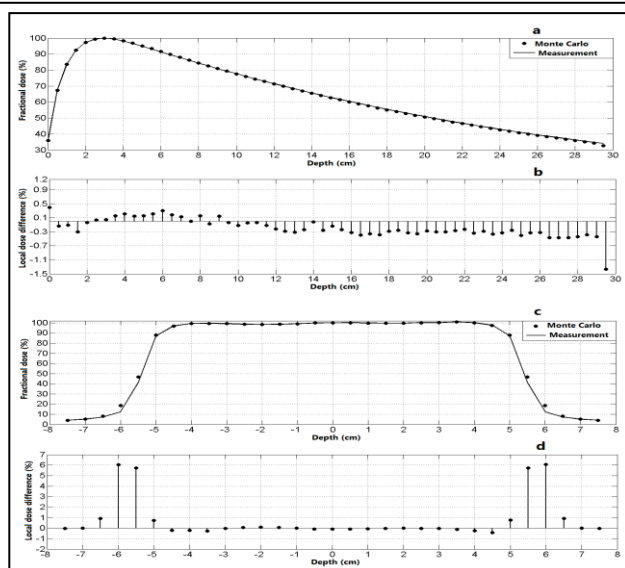
به منظور مقایسه و تطبیق محاسبات مونت کارلو و اندازه‌گیری‌های تجربی، منحنی‌های نسبت درصد دوز عمقی و نسبت درصد دوز جانبی یا پروفایل دوز از محاسبات مونت کارلو

پروفایل دوز محاسبات مونت کارلو و اندازه‌گیری تجربی به دست آمده در فانتوم آب در پنج اندازه میدان باز ذکر شده نسبت به یکدیگر مقایسه و تطبیق داده شدند. بر اساس روش خطا و آزمایش برای انرژی ۱۸MV، در منحنی‌های PDD و پروفایل دوز توافق نتایج محاسبات مونت کارلو با اندازه‌گیری‌های تجربی، باتابش الکترون‌های اولیه از نقطه کانونی به شکل توزیع استوانه‌ای با  $FWHM=0.34\text{ cm}$  و توزیع گائوسی در شار فضایی و نیز توزیع انرژی الکترون‌های اولیه تابشی اتفاق افتاد. در این مطالعه با تنظیم پارامترهای فیزیکی ذکر شده در شبیه‌سازی مونت کارلو ماشین  $\text{Oncor}^{\text{®}}$  برای انرژی ۱۸MV، توافق نتایج محاسبات مونت کارلو با اندازه‌گیری‌های تجربی در فانتوم آب، برای منحنی‌های PDD در منطقه قبل از انبوهش دوز به طور متوسط نزدیک به ۱٪ و در مناطق با دوز بالا زیر ۱٪، و برای پروفایل دوز در منطقه نیم سایه زیر ۲mm و در مناطق با دوز بالا زیر ۲٪ بود.

منحنی‌های PDD و پروفایل دوز توافق نتایج محاسبات مونت کارلو با اندازه‌گیری‌های تجربی در پنج اندازه میدان باز  $10 \times 10$ ،  $15 \times 20$ ،  $25 \times 25$ ،  $30 \times 30$  باتابش الکترون‌های اولیه از نقطه کانونی به شکل توزیع استوانه‌ای با  $FWHM=0.34\text{ cm}$  و توزیع گائوسی در شار فضایی و نیز توزیع مشابه گائوسی در توزیع انرژی الکترون‌های اولیه تابشی اتفاق افتاد. در این مطالعه با تنظیم پارامترهای فیزیکی ذکر شده در شبیه‌سازی مونت کارلو ماشین  $\text{Oncor}^{\text{®}}$  برای انرژی ۱۸MV، توافق نتایج محاسبات مونت کارلو در شش اندازه میدان با اندازه‌گیری‌های تجربی در فانتوم آب، برای منحنی‌های PDD در منطقه قبل از انبوهش دوز به طور متوسط نزدیک به ۱٪ و در مناطق با دوز بالا زیر ۱٪، و برای پروفایل دوز در منطقه نیم سایه زیر ۲mm و در مناطق با دوز بالا زیر ۲٪ بود. به طور مشابه برای صحت آزمایشی شبیه‌سازی مونت کارلو شتاب‌دهنده  $\text{Oncor}^{\text{®}}$  انرژی ۱۸MV، منحنی‌های نسبت درصد دوز عمقی یا PDD و نسبت درصد دوز در راستای محور X یا



نمودار ۱: مقایسه روش مونت کارلو استفاده شده و نتایج اندازه‌گیری‌های تجربی در اندازه میدان باز  $10 \times 10\text{ cm}^2$  در فانتوم آب در  $SSD=100\text{ cm}$  برای انرژی فوتون ۶MV (A) محاسبات دوز عمقی در راستای محور مرکزی تابش، (b) اختلاف دوز وابستگی‌های PDD بین روش مونت کارلو و اندازه‌گیری‌های تجربی، (c) محاسبات دوز در راستای محور مرکزی X در عمق ۵cm فانتوم آب، (d) اختلاف دوز وابستگی‌های منحنی پروفایل دوز بین محاسبات مونت کارلو و اندازه‌گیری‌های تجربی. مقدار میانگین عدم قطعیت برای محاسبات مونت کارلو نسبت دوز عمقی و پروفایل دوز به ترتیب  $\pm 0.16\%$  و  $\pm 0.16\%$  بود.



نمودار ۲: مقایسه روش مونت کارلو استفاده شده و نتایج اندازه‌گیری‌های تجربی در اندازه میدان باز  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  در فانتوم آب در  $\text{SSD}=100\text{cm}$  برای انرژی فوتون  $18\text{MV}$ . (a) محاسبات دوز عمقی در راستای محور مرکزی تابش، (b) اختلاف دوز وابستگی‌های PDD بین روش مونت کارلو و اندازه‌گیری‌های تجربی، (c) محاسبات دوز در راستای محور مرکزی X در عمق  $5\text{cm}$  فانتوم آب، (d) اختلاف دوز وابستگی‌های منحنی پروفایل دوز بین محاسبات مونت کارلو و اندازه‌گیری‌های تجربی. مقدار میانگین عدم قطعیت برای محاسبات مونت کارلو نسبت دوز عمقی و پروفایل دوز به ترتیب  $0.28\% \pm 0.0$  و  $0.26\% \pm 0.0$  بود.

### مشخصات فیزیکی با استفاده از تکنیک DBS

افزایش میدان به طور متوسط شار مطلق الکترون و فوتون به ترتیب  $5/5\%$  و حدود  $1\%$  کاهش پیدا کرد. یافته‌های تجزیه و تحلیل کد برای انرژی  $18\text{MV}$  نشان دادند که به طور متوسط در اندازه میدان‌های مختلف  $10 \times 10$ ،  $15 \times 15$ ،  $20 \times 20$ ،  $25 \times 25$ ،  $30 \times 30$  به ترتیب شار مطلق الکترون و فوتون به طور متوسط  $285/6$  و  $737/8$  بار افزایش پیدا کرد. با این حال در این انرژی با افزایش میدان به طور متوسط شار مطلق الکترون و فوتون به ترتیب  $4/5\%$  و حدود  $1\%$  کاهش پیدا کرد.

برای بررسی تکنیک DBS برای هر یک از شتاب‌دهنده‌های شبیه‌سازی شده با تکنیک DBS، فایل‌های PHSP هر یک از شتاب‌دهنده‌ها در اندازه میدان‌های مختلف  $10 \times 10$ ،  $15 \times 15$ ،  $20 \times 20$ ،  $25 \times 25$ ،  $30 \times 30$  تحویل کد BEAMdp شد. یافته‌های تجزیه و تحلیل با این کد برای انرژی  $6\text{MV}$  نشان داد که به ترتیب شار مطلق الکترون و فوتون، به طور متوسط  $26/8$  و  $4/8$  بار  $983$  بار افزایش پیدا کرده است. همچنین در این انرژی با

جدول ۱: محاسبات مونت کارلو نسبت شار مطلق الکترون و فوتون با استفاده از تکنیک DBS به تکنیک بدون استفاده از DBS در فاصله  $100\text{ cm}$  از هدف شتاب‌دهنده در هوا در اندازه میدان‌های مختلف برای شتاب‌دهنده خطی  $\text{Oncor}^{\text{®}}$  با استفاده از کد BEAMdp.

انرژی	اندازه میدان ( $\text{cm}^2$ )	نسبت شار با تکنیک DBS به تکنیک بدون DBS (فوتون)	نسبت شار با تکنیک DBS (الکترون) به تکنیک بدون DBS (الکترون)
$6\text{MV}/\text{Mev}$	$10 \times 10$	۹۹۰	۷۱۰
	$15 \times 15$	۹۸۰	۶۴۰
	$20 \times 20$	۹۹۵	۶۱۰
	$25 \times 25$	۹۷۸	۵۹۰
	$30 \times 30$	۹۷۴	۵۸۴
$18\text{MV}/\text{Mev}$	$10 \times 10$	۷۵۰	۳۲۳
	$15 \times 15$	۷۴۵	۲۸۰
	$20 \times 20$	۷۴۰	۲۶۴
	$25 \times 25$	۷۴۴	۳۰۰
	$30 \times 30$	۷۱۰	۲۶۱

توزیع فضایی شار الکترون و فوتونیز با استفاده از کد BEAMdp در عرض میدان تابشی اسمی استخراج شدند و سودمندی توزیع شار فضایی برای تکنیک DBS در اندازه میدان‌های  $10 \times 10 \times 10, 15 \times 15, 20 \times 20, 25 \times 25, 30 \times 30$  اندازه‌گیری و مقایسه شد. یافته‌های سودمندی توزیع فضایی شار نشان دادند سودمندی توزیع فضایی شار الکترون به طور متوسط برای انرژی  $6MV$  به ترتیب  $30.6 \pm 1.12\%$  و ترتیب  $30.8 \pm 1.35\%$  و به طور میانگین برای توزیع فضایی فوتون به ترتیب  $47.5 \pm 0.39\%$  و  $48.0 \pm 0.43\%$  بر روی محور مرکزی تابش و در عرض میدان تابشی افزایش پیدا کرد. با این حال این سودمندی با افزایش میدان انرژی  $6MV$  به ترتیب

برای الکترون و فوتون به طور متوسط  $4.25\%$  و  $4.45\%$  و  $1.32\%$  و  $1.52\%$  بر روی محور مرکزی تابش و در عرض میدان تابشی به ترتیب کاهش یافت. این سودمندی برای انرژی  $18MV$  به طور متوسط به ترتیب  $15.0 \pm 0.87\%$  و  $15.3 \pm 0.19\%$  برای شار فضایی الکترون و به طور میانگین برای توزیع شار فضایی فوتون به ترتیب  $46.0 \pm 0.25\%$  و  $46.2 \pm 0.27\%$  بر روی محور مرکزی تابش و در عرض میدان تابشی افزایش پیدا کرد. این سودمندی اما با افزایش میدان برای انرژی  $18MV$  به ترتیب برای الکترون و فوتون به طور متوسط  $3.58\%$  و  $3.82\%$  و حدود  $1\%$  و  $1\%$  بر روی محور مرکزی تابش و در عرض میدان تابشی به ترتیب کاهش یافت.

جدول ۲: محاسبات مونت کارلو نسبت سودمندی توزیع شار فضایی الکترون و فوتون با استفاده از تکنیک DBS به تکنیک بدون استفاده از DBS در فاصله  $100\text{cm}$  از هدف شتاب‌دهنده در هوا در اندازه میدان‌های مختلف برای شتاب‌دهنده خطی  $\text{Oncor}^{\text{®}}$  با استفاده از کد BEAMdp.

انرژی	نسبت شار فضایی با تکنیک DBS به تکنیک بدون DBS در عرض میدان تابشی (الکترون)	نسبت شار فضایی با تکنیک DBS به تکنیک بدون DBS در عرض میدان تابشی (فوتون)	
		نسبت شار فضایی با تکنیک DBS به تکنیک بدون DBS در راستای محور مرکزی تابش	نسبت شار فضایی با تکنیک DBS به تکنیک بدون DBS در عرض میدان تابشی
6MV/Mev	$10 \times 10$	$34.6 \pm 2.1\%$	$48.6 \pm 0.47\%$
	$15 \times 15$	$31.3 \pm 1.6\%$	$47.1 \pm 0.45\%$
	$20 \times 20$	$30.4 \pm 1.15\%$	$48.8 \pm 0.37\%$
	$25 \times 25$	$29.2 \pm 0.98\%$	$47.0 \pm 0.33\%$
	$30 \times 30$	$28.7 \pm 0.92\%$	$46.3 \pm 0.32\%$
18MV/Mev	$10 \times 10$	$16.8 \pm 0.98\%$	$46.8 \pm 0.3\%$
	$15 \times 15$	$15.5 \pm 0.92\%$	$46.3 \pm 0.3\%$
	$20 \times 20$	$14.3 \pm 0.9\%$	$45.9 \pm 0.28\%$
	$25 \times 25$	$15.6 \pm 0.89\%$	$46.9 \pm 0.28\%$
	$30 \times 30$	$14.2 \pm 0.84\%$	$45.2 \pm 0.22\%$

### مشخصات دوزیمتری با استفاده از تکنیک DBS

در مرحله بعد فایل‌های  $\text{phsp}$  بدست آمده از تکنیک DBS، با استفاده از کد  $\text{DOSXYZnrc}$  در محیط فانتموم آب شبیه‌سازی و دوزیمتری شدند و سودمندی کاهش واریانس محاسبات مونت کارلو دوز برای منحنی درصد دوز عمقی برای عمق‌های مختلف قبل از نقطه دوز ماکزیمم و بعد از نقطه دوز ماکزیمم اندازه‌گیری و مقایسه شدند. یافته‌ها نشان دادند برای انرژی

$6MV$  در اندازه میدان‌های  $10 \times 10, 15 \times 15, 20 \times 20, 25 \times 25, 30 \times 30$  به طور متوسط سودمندی کاهش عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو دوز برای منحنی نسبت دوز عمقی با استفاده از تکنیک DBS به ترتیب  $18.7 \pm 0.68\%$  و  $18.4 \pm 0.65\%$  در منطقه قبل از دوز ماکزیمم و در منطقه بعد از نقطه دوز ماکزیمم افزایش پیدا کرد. با این حال در این نواحی سودمندی با افزایش میدان در انرژی  $6MV$  به ترتیب  $3.55\%$  و

منطقه قبل از دوز ماکزیمم و در منطقه بعد از نقطه دوز ماکزیمم افزایش پیدا کرد. در این مناطق با این حال سودمندی برای انرژی ۱۸MV با افزایش میدان تابشیه ترتیب ۲/۵۷٪ و ۲/۶۷٪ کاهش پیدا کرد.

کاهش پیدا کرد. سودمندی محاسبات کاهش واریانس دوز برای منحنی نسبت دوز عمقی در راستای محور مرکزی تابش برای انرژی ۱۸MV در اندازه میدان‌های ۱۰×۱۰، ۱۵×۱۵، ۲۰×۲۰، ۲۵×۲۵، ۳۰×۳۰ به طور متوسط با استفاده از تکنیک DBS  $156 \pm 0.43\%$  و  $153 \pm 0.37\%$  به ترتیب در

جدول ۳: محاسبات مونت کارلو نسبت سودمندی اندازه‌گیری‌های دوز عمقی (PDD) در راستای محور مرکزی تابش با استفاده از تکنیک DBS به تکنیک بدون استفاده از DBS در فانتوم آب در  $SSD=100\text{ cm}$  در اندازه میدان‌های مختلف برای شتاب‌دهنده خطی Oncor® با استفاده از کد مونت کارلو DOSXYZnrc.

انرژی	اندازه میدان ( $\text{cm}^2$ )	نسبت سودمندی با تکنیک DBS به تکنیک بدون DBS قبل از نقطه دوز ماکزیمم	نسبت سودمندی با تکنیک DBS به تکنیک بدون DBS بعد از نقطه دوز ماکزیمم
۶MV/Mev	۱۰×۱۰	$200 \pm 0.77\%$	$195 \pm 0.71\%$
	۱۵×۱۵	$191 \pm 0.71\%$	$188 \pm 0.67\%$
	۲۰×۲۰	$190 \pm 0.68\%$	$188 \pm 0.65\%$
	۲۵×۲۵	$185 \pm 0.65\%$	$182 \pm 0.64\%$
	۳۰×۳۰	$173 \pm 0.6\%$	$170 \pm 0.61\%$
۱۸MV/Mev	۱۰×۱۰	$162 \pm 0.48\%$	$158 \pm 0.44\%$
	۱۵×۱۵	$160 \pm 0.45\%$	$158 \pm 0.4\%$
	۲۰×۲۰	$159 \pm 0.44\%$	$157 \pm 0.37\%$
	۲۵×۲۵	$153 \pm 0.41\%$	$151 \pm 0.35\%$
	۳۰×۳۰	$146 \pm 0.37\%$	$141 \pm 0.29\%$

کرد. با این حال در این نواحی سودمندی با افزایش میدان در انرژی ۶MV به ترتیب ۲/۶۲٪ و ۲/۹۲٪ کاهش پیدا کرد. افزایش سودمندی محاسبات مونت کارلو دوز در منحنی دوز پروفایل با استفاده از تکنیک DBS در عمق ۵mm برای انرژی ۱۸MV در اندازه میدان‌های ۱۰×۱۰، ۱۵×۱۵، ۲۰×۲۰، ۲۵×۲۵، ۳۰×۳۰ به طور متوسط  $175 \pm 0.36\%$  و  $181.4 \pm 0.45\%$  به ترتیب بر روی محور مرکزی تابش و در عرض میدان تابشی بود. با این حال یافته‌ها نشان دادند در این نواحی سودمندی با افزایش میدان در انرژی ۱۸MV به ترتیب ۲/۲۵٪ و ۲/۹٪ کاهش پیدا کرد.

سودمندی دوز نیز در راستای محور عرضی مرکزی تابش (Lateral Dose Profile) در عمق ۵ mm با استفاده از تکنیک DBS در راستای محور مرکزی تابش و در عرض میدان تابشی برای دو انرژی ۶MV و ۱۸MV در فانتوم آب برای اندازه میدان‌های مختلف اندازه‌گیری و مقایسه شد. یافته‌ها نشان دادند به طور متوسط سودمندی محاسبات مونت کارلو دوز منحنی دوز پروفایل برای انرژی ۶MV در اندازه میدان‌های ۱۰×۱۰، ۱۵×۱۵، ۲۰×۲۰، ۲۵×۲۵، ۳۰×۳۰ با استفاده از تکنیک DBS به ترتیب  $197 \pm 0.66\%$  و  $214.6 \pm 0.73\%$  بر روی محور مرکزی تابش و در عرض میدان تابشی افزایش پیدا

جدول ۴: محاسبات مونت کارلو نسبت سودمندی اندازه‌گیری‌های دوز در راستای محور عرضی مرکزی میدان تابشی (Lateral Dose Profile) با استفاده از تکنیک DBS به تکنیک بدون استفاده از DBS در فانتوم آب در  $SSD=100\text{ cm}$  در اندازه‌های مختلف برای شتاب‌دهنده خطی  $\text{Oncor}^{\text{®}}$  با استفاده از کد مونت کارلو DOSXYZnrc.

انرژی	اندازه میدان ( $\text{cm}^2$ )	نسبت سودمندی با تکنیک DBS به تکنیک بدون DBS در راستای محور مرکزی تابش	نسبت سودمندی با تکنیک DBS به تکنیک بدون DBS در عرض میدان تابشی
۶MV/Mev	۱۰×۱۰	۲۰۵±٪۰/۷۸	٪۰/۸۵ ± ۲۲۵
	۱۵×۱۵	۲۰۲±٪۰/۷۱	٪۰/۷۷ ± ۲۲۰
	۲۰×۲۰	۱۹۹±٪۰/۶۵	٪۰/۷۴ ± ۲۱۸
	۲۵×۲۵	۱۹۵±٪۰/۶۱	٪۰/۶۸ ± ۲۱۰
	۳۰×۳۰	۱۸۴±٪۰/۵۸	٪۰/۶۲ ± ۲۰۰
۱۸MV/Mev	۱۰×۱۰	۱۸۴±٪۰/۴۸	٪۰/۵۵ ± ۱۹۱
	۱۵×۱۵	۱۷۸±٪۰/۴۲	٪۰/۵۱ ± ۱۸۵
	۲۰×۲۰	۱۷۵±٪۰/۳۴	٪۰/۴۵ ± ۱۸۳
	۲۵×۲۵	۱۷۴±٪۰/۳۱	٪۰/۳۹ ± ۱۷۸
	۳۰×۳۰	۱۶۸±٪۰/۲۵	٪۰/۳۵ ± ۱۷۰

## بحث

هدف مطالعه حاضر بررسی سودمندی کاهش عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو توزیع فضایی شار ذرات و مقدار انرژی واگذار شده در فانتوم آب با به کارگیری تکنیک کاهش واریانس DBS در کد مونت کارلو شبیه‌سازی BEAMnrc برای شبیه‌سازی شتاب‌دهنده خطی درمانی  $\text{Oncor}^{\text{®}}$  بود. بدین منظور، در این مطالعه حاضر شتاب‌دهنده خطی درمانی  $\text{Oncor}^{\text{®}}$  با استفاده از کد مونت کارلو شبیه‌سازی BEAMnrc، در دو انرژی 6MV و 18MV برای پنج اندازه میدان مختلف از ابعاد کوچک تا بزرگ با بکارگیری تکنیک کاهش واریانس DBS شبیه‌سازی شد، و مشخصات فیزیکی و دوزیمتری تابش‌های فوتون و الکترون حاصل از تکنیک DBS در جزئیات بالا بررسی و مقایسه شدند.

در مطالعه حاضر با به کارگیری تکنیک کاهش واریانس DBS در شبیه‌سازی با کد مونت کارلو BEAMnrc شار مطلق الکترون و فوتون به طور قابل توجهی در دو انرژی 6MV و 18MV در اندازه میدان‌های تابشی مختلف افزایش یافته است. با در نظر گرفتن الگوریتم آماری تکنیک DBS که هر بار هر یک از ذره‌های الکترون تابشی اولیه‌ای که توسط کاربر تنظیم می‌شود، در پدیده تابش ترمزی یا فنانشدگی به تعداد NBRSPML مجبور به تابش فوتون در سر شتاب‌دهنده می‌شوند،

قابل انتظار بود که با بکارگیری این تکنیک کاهش واریانس DBS به ازای تعداد History Number مشخص الکترون‌های تابشی اولیه، شار مطلق الکترون و به خصوص فوتون افزایش قابل توجهی داشته باشند (۱۳). در تمامی کدهای مونت کارلو شبیه‌سازی ترابرد ذرات در پرتودرمانی، شار بالای ذرات زیراتمی در شبیه‌سازی یک مزیت اساسی و ضروری به حساب می‌آید (۱۴)، چرا که این افزایش توزیع شار سبب کاهش واریانس و عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو می‌شوند و درجه اطمینان به همان اندازه نسبت به یافته‌های محاسبات مونت کارلو افزایش پیدا می‌کند (۱۵). بنابراین مزیت اساسی اضافه شدن تکنیک کاهش واریانس DBS در سال ۲۰۰۴ به کد شبیه‌سازی مونت کارلو BEAMnrc افزایش قابل توجه شار ذرات زیر اتمی مانند الکترون و فوتون و در نتیجه کاهش قطعیت محاسبات بوده است، همچنان که یافته‌های مطالعه حاضر و مطالعه آقای Kawrakow و همکاران گواه این مدعاست (۱۶). شار مطلق ذرات الکترون و فوتون با افزایش میدان و انرژی به طور نسبی قدری کاهش یافته است. این کاهش نسبی با افزایش میدان، می‌تواند ناشی از افزایش شار ذرات الکترون و فوتون به صورت غیرخطی و نیز افزایش پراکندگی‌ها باشد (۱۷) که نسبت شار مطلق با استفاده از

و فوتون حاصل از بکارگیری تکنیک DBS با افزایش میدان و در انرژی ۱۸ MV نسبت به میدان‌های کوچکتر و انرژی ۶ MV قدری کاهش یافته است.

در مطالعه حاضر همچنین، مشخصات دوزیمتری و مقدار افزایش سودمندی کاهش عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو دوز در فانتوم آب، حاصل از بکارگیری تکنیک کاهش واریانس DBS بررسی و مقایسه شد. جدول مربوط به افزایش سودمندی‌ها حاصل از تکنیک DBS برای منحنی PDD دیده می‌شود، مقدار سودمندی کاهش واریانس محاسبات مونت کارلو دوز هم قبل از نقطه دوز ماکزیمم و هم بعد از نقطه دوز ماکزیمم برای تمامی انرژی‌ها و اندازه میدان‌ها به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. در این مطالعه مشابه نیز این افزایش بسیار سودمندی‌های محاسبات مونت کارلو دوز برای منحنی نسبت دوز عمقی با بکارگیری تکنیک کاهش واریانس DBS گزارش شد. در این مطالعه نیز به آن پرداخته شد (۵)، سودمندی حاصل از تکنیک DBS به طور نسبی قبل از نقطه دوز ماکزیمم نسبت به بعد از نقطه دوز ماکزیمم بیشتر است. این افزایش نسبی می‌تواند ناشی از ناکافی بودن شار ذرات واگذار شده در فانتوم آب قبل از استفاده از تکنیک DBS باشد چرا که بیشتر ذراتی که در عمق‌های سطحی قبل از نقطه دوز ماکزیمم انرژی خود را واگذار می‌کنند ذراتی کم‌انرژی هستند که بیشتر از کناره‌های میدان پراکندگی‌ها سرچشمه می‌گیرند. با افزایش میدان تابشی و در انرژی ۱۸ MV این کمبود شار ذرات کم انرژی، به دلیل افزایش پراکندگی‌ها تا حدودی جبران شده است (۱۷) و سودمندی کاهش واریانس محاسبات مونت کارلو دوز حاصل از تکنیک DBS نسبت به میدان‌های کوچکتر و انرژی ۶ MV به طور نسبی قدری کاهش یافته است. در این مطالعه همچنین این افزایش قابل توجه سودمندی حاصل از تکنیک کاهش واریانس DBS برای محاسبات مونت کارلو دوز، در این مطالعه نیز مشاهده شد (۱۶) برای منحنی دوز پروفایل نیز در تمامی نقاط، هم در راستای محور مرکزی تابش و هم در عرض میدان تابشی مشاهده شد. در اینجا نیز مشابه یافته‌های مربوط به توزیع سودمندی شار فضایی ذرات، مقدار سودمندی کاهش واریانس محاسبات مونت

تکنیک DBS به تکنیک بدون استفاده از DBS در اندازه میدان‌های بزرگتر و انرژی ۱۸ MV نسبت به اندازه میدان‌های کوچک و انرژی ۶ MV کاهش یافته است، در این مطالعه انجام گرفته نیز این کاهش نسبی شار مطلق ذرات الکترون و فوتون با افزایش میدان و انرژی در بکارگیری تکنیک DBS مشاهده و گزارش شد (۵). در مطالعه حاضر، همچنین با بکارگیری تکنیک کاهش واریانس DBS در شبیه‌سازی مونت کارلو ماشین Oncor® افزایش سودمندی کاهش عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو شار فضایی الکترون و فوتون در راستای عرضی میدان تابشی و در راستای محور مرکزی تابش مطالعه شد. در این مطالعه یافته‌های مشابه مشاهده شد (۱۸)، با بکارگیری تکنیک DBS در کد مونت کارلو BEAMnrc توزیع شار فضایی الکترون و فوتون در تمامی مناطق به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرد و سودمندی کاهش واریانس محاسبات مونت کارلو توزیع فضایی شار ذرات الکترون و فوتون به طور اساسی بهبود پیدا کرد این سودمندی در کناره‌های میدان تابشی نسبت به راستای محور مرکزی تابش افزایش یافته است، همچنین این مطالعه نیز این اثر مشاهده شد (۵). این افزایش بیشتر سودمندی کاهش عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو توزیع شار ذرات الکترون و فوتون در کناره‌ها نسبت به مرکز می‌تواند ناشی از کمبود بیشتر توزیع شار فضایی ذرات الکترون و فوتون در کناره‌های میدان تابشی باشد که با بکارگیری تکنیک کاهش واریانس DBS این کمبود توزیع فضایی شار ذرات در کناره‌ها به طور قابل توجهی جبران شده است و مقدار سودمندی عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو توزیع شار فضایی در کناره‌های میدان تابشی به نسبت راستای محور مرکزی تابش بیشتر بهبود یافته است. با افزایش میدان و انرژی، این کاهش توزیع شار فضایی الکترون و فوتون به دلیل افزایش پراکندگی ذرات فوتون در سیستم سر شتاب‌دهنده، کلیماتورها، فک‌ها و فیلتر مسطح کننده قرار گرفته در مسیر عبور تابش فوتون‌های اولیه (۱۹،۲۰)، در کناره‌های میدان تابشی تا حدودی جبران شده است (۱۷) و افزایش سودمندی کاهش عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو شار فضایی الکترون

انجام شده در فانتوم آب مقایسه و تطبیق داده شد. در این مطالعه نیز مشخصات فیزیکی و دوزیمتری تابش‌های فوتون و الکترون تولید شده و مقدار سودمندی محاسبات مونت کارلو شار فضایی و دوز واگذار شده در فانتوم آب با استفاده از تکنیک کاهش واریانس DBS برای شتاب‌دهنده خطی Oncor® در دو انرژی ۶MV و ۱۸MV و در اندازه میدان‌های مختلف اندازه‌گیری و مقایسه شدند. یافته‌های مطالعه نشان دادند که با بکارگیری تکنیک کاهش واریانس DBS در کد مونت کارلو BEAMnrc در شبیه‌سازی ماشین Oncor® برای انرژی ۶MV سودمندی محاسبات مونت کارلو توزیع شار فضایی الکترون و فوتون به ترتیب  $30.8/6 \pm 1/35$  و  $48.0/38 \pm 0/43$  و برای انرژی ۱۸MV سودمندی توزیع شار فضایی به طور متوسط  $15.3 \pm 0/9$  و  $46.0/3 \pm 0/25$ ، بار، و نیز سودمندی کاهش واریانس محاسبات مونت کارلو دوز به ترتیب در منحنی‌های نسبت دوز عمقی و دوز پروفایل برای انرژی ۶MV،  $30.8/6 \pm 1/35$  و  $48.0/38 \pm 0/43$ ، و برای انرژی ۱۸MV به ترتیب  $30.8/6 \pm 1/35$  و  $48.0/38 \pm 0/43$  افزایش پیدا کردند. در نتیجه‌گیری این مطالعه، به دلیل افزایش قابل توجه شار الکترون و فوتون و در نتیجه کاهش عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو شار فضایی و دوز در پی بکارگیری تکنیک کاهش واریانس DBS، این تکنیک، تکنیک بسیار سودمندی برای کاهش زمان شبیه‌سازی و در عین حال بهبود قابل توجه محاسبات مونت کارلو دوز در شبیه‌سازی با کد DOSXYZnrc است. همچنین از الگوریتم آماری تکنیک کاهش واریانس DBS می‌توان در سایر کدهای شبیه‌سازی مونت کارلو در جهت افزایش شار ذرات زیراتمی، کاهش عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو و بهبود نتایج شبیه‌سازی‌ها استفاده کرد.

کارلو ناشی از بکارگیری تکنیک DBS در کناره‌های میدان تابشی منحنی دوز پروفایل بیشتر از راستای محور مرکزی تابش به طور نسبی افزایش پیدا کرده است. به طور مشابه، این اثر می‌تواند ناشی از کمبود شار برای واگذاری انرژی ذرات در کناره‌های میدان باشد که با بکارگیری تکنیک DBS این کمبود شار به طور قابل توجهی نسبت به راستای محور مرکزی تابش به طور نسبی جبران شده است که البته در اینجا، با افزایش میدان تابشی و انرژی، به دلیل افزایش پراکندگی‌های دوز (۲۱)، این کاهش شار در کناره‌ها تا حدودی جبران می‌شود و به خاطر همین است که سودمندی تکنیک DBS در میدان‌های بزرگتر و انرژی ۱۸MV نسبت به میدان‌های کوچکتر و انرژی ۶MV به طور نسبی قدری کاهش یافته است، همچنان که در این مطالعه نیز این اثر مشاهده شد (۵).

در این مطالعه، یافته‌ها نشان دادند که بکارگیری تکنیک کاهش واریانس DBS برای شبیه‌سازی شتاب‌دهنده خطی درمانی Oncor® با کد مونت کارلو BEAMnrc در کاهش عدم قطعیت محاسبات مونت کارلو شار فضایی ذرات الکترون و فوتون و نیز محاسبات دوز و بهبود محاسبات مونت کارلو نقش چشمگیری داشت. به همین خاطر پیشنهاد می‌شود، که از الگوریتم آماری این تکنیک در سایر کدهای شبیه‌سازی مونت کارلو که به صورت متن باز (open source) هستند، مانند کد مونت کارلو GATE و MCNP، برای بهبود محاسبات مونت کارلو و کاهش عدم قطعیت محاسبات استفاده شود و یافته‌های آن‌ها با یکدیگر و این مطالعه مقایسه بشوند.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مدل مونت کارلو ماشین شتاب‌دهنده خطی پزشکی Siemens Oncor® با استفاده از کدکاربری شبیه‌سازی BEAMnrc مبتنی بر سیستم مونت کارلو EGSnrc شبیه‌سازی شد و نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو با اندازه‌گیری‌های تجربی

### References:

1- Kawrakow I, Rogers D. *EGSnrc user manual*. National Research Center of Canada Report PIRS-701 2001.

- 2- Kawrakow I, Rogers D. *The EGSnrc code system*. NRC Report PIRS-701, NRC, Ottawa 2000.
- 3- Rogers D, Ma C, Ding G, Walters B, Sheikh-Bagheri D, Zhang G. *BEAMnrc users manual*. NRC report PIRS 2001.
- 4- Treurniet J, Walters B, Rogers D. *BEAMnrc, DOSXYZnrc and BEAMDP GUI user's manual*. NRC Report PIRS 2001; 623.
- 5- Kawrakow I, Rogers D, Walters B. *Large efficiency improvements in BEAMnrc using directional bremsstrahlung splitting*. Medical physics 2004; 31(10): 2883-98.
- 6- Kawrakow I. *egspp: the EGSnrc C++ class library*. NRCC Report PIRS-899. National Research Council of Canada 2005.
- 7- Kawrakow I, Mainegra-Hing E, Rogers D. *EGSnrcMP: the multi-platform environment for EGSnrc*. National Research Council of Canada, Ottawa 2006.
- 8 -Walters B, Kawrakow I, Rogers D. *DOSXYZnrc users manual*. Nrc Report Pirs 2005;794.
- 9 -Kawrakow I, Walters B. *Efficient photon beam dose calculations using DOSXYZnrc with BEAMnrc*. Medical physics 2006; 33(8): 3046-56.
- 10- Ma C, Rogers D. *BEAMDP users manual*. NRC Report PIRS-0509 (D) 1995.
- 11- Ma C, Rogers D. *BEAMDP as a general-purpose utility*. NRC Report PIRS 509e (rev A). 2004.
- 12- McGowan H, Faddegon B, Ma C. *STATDOSE for 3D dose distributions* 2007.
- 13- Rogers D, Walters B, Kawrakow I. *BEAMnrc users manual*. Nrc Report Pirs 2009; 509: 12.
- 14- Jabbari K, Anvar HS, Tavakoli MB, Amouheidari A. *Monte carlo simulation of siemens oncor linear accelerator with beamnrc and dosxyZnrc code*. J medical signals and sensors 2013; 3(3):172.
15. Romano PK, Forget B. *The OpenMC monte carlo particle transport code*. Annals of Nuclear Energy. 2013;51:274-81.
16. Wang X, Zhu L, Zhang Y, Liu X. *An investigation of the efficiency in simulating 6 MV medical accelerator using OMEGA/BEAM*. Nuclear Techniques 2013; 36(2).
- 17- Khan FM, Gibbons JP. *Khan's the physics of radiation therapy*: Lippincott Williams & Wilkins; 2014.
- 18- Feng Z, Yue H, Zhang Y, Wu H, Cheng J, Su X. *Monte Carlo simulation of beam characteristics from small fields based on TrueBeam flattening-filter-free mode*. Radiation Oncology 2016; 11(1): 30.
- 19- Fu G, Li M, Song Y, Dai J. *A dosimetric evaluation of flattening filter-free volumetric modulated arc therapy in nasopharyngeal carcinoma*. J medical physics/Association of Medical Physicists of India 2014; 39(3): 150.
- 20- Ashokkumar S, Raj NAN, Sinha SN, Yadav G, Thiyagarajan R, Raman K, et al. *Comparison of head scatter factor for 6MV and 10MV flattened (FB) and unflattened (FFF) photon beam using indigenously designed columnar mini phantom*. Journal of medical physics/Association of Medical Physicists of India 2014; 39(3): 184.
- 21- Almberg S, Frengen J, Lindmo T. *Monte Carlo study of in field and out of field dose distributions from a*

*linear accelerator operating with and without a flattening filter.* Medical physics 2012; 39(8): 5194-203.

# Investigation of Reduction of the Uncertainty of Monte Carlo Dose Calculations in Oncor® Clinical Linear Accelerator Simulation Using the DBS Variance Reduction Technique in Monte Carlo Code BEAMnrc

Amin Asadi<sup>1</sup>, Abolfazl Nikfarjam<sup>\*2</sup>, Keyvan Jabari<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Medical Physics, Faculty of Medicine, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences and Health Services, Yazd

<sup>2</sup> Radiation Research Center, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences and Health Services, Yazd

<sup>3</sup> Department of Medical Physics, Faculty of Medicine, Isfahan University of Medical Sciences

Received: 19 Dec 2016

Accepted: 6 Jul 2017

## Abstract

**Introduction:** The benefits of Directional Bremsstrahlung Splitting (DBS) dose variance reduction technique in BEAMnrc Monte Carlo (MC) code for Oncor® linac at 6MV and 18 MV energies were studied.

**Methods:** An MC model of Oncor® linac was simulated using BEAMnrc MC Code and verified by the measured data for 6 MV and 18 MV energies of various field sizes. Then, Oncor® machine was modeled running DBS technique, and the efficiency of total fluency and spatial fluency for electron and photon, and the efficiency of dose variance reduction of MC calculations was measured.

**Results:** With applying DBS technique, the total fluency of electron and photon increased in turn 626.8 (6 MV), 983.4 (6 MV), 285.6 (18 MV) and 737.8 (18 MV); the spatial fluency of electron and photon improved in turn  $308.6 \pm 1.35\%$  (6 MV),  $480.38 \pm 0.43\%$  (6 MV),  $153 \pm 0.9\%$  (18 MV), and  $462.6 \pm 0.27\%$  (18 MV). Moreover, by running DBS technique, the efficiency of dose variance reduction for PDD MC dose calculations before maximum dose point and after dose maximum point enhanced  $187.8 \pm 0.68\%$  (6 MV) and  $184.6 \pm 0.65\%$  (6 MV),  $156 \pm 0.43\%$  (18MV) and  $153 \pm 0.37\%$  (18MV), respectively; the efficiency of MC calculations for lateral dose profile remarkably on the central beam axis and across the treatment field raised in turn  $197 \pm 0.66\%$  (6 MV),  $214.6 \pm 0.73\%$  (6 MV),  $175 \pm 0.36\%$  (18 MV) and  $181.4 \pm 0.45\%$  (18 MV).

**Conclusion:** Applying dose variance reduction technique of DBS for modeling Oncor® linac with using BEAMnrc MC Code surprisingly improves the fluency of electron and photon, and it therefore enhances the efficiency of dose variance reduction for MC calculations.

**Key words:** BEAMnrc, DOSXYZnrc, Linear Clinical accelerator, Directional Bremsstrahlung Splitting

### This paper should be cited as:

Forat Yazdi M, Giahi Yazdi M, Sorbi MH. Investigation of Reduction of the Uncertainty of Monte Carlo Dose Calculations in Oncor® Clinical Linear Accelerator Simulation Using the DBS Variance Reduction Technique in Monte Carlo Code BEAMnrc. J Shahid Sadoughi Univ Med Sci 2017; 25(7): 512-25 .

\*Corresponding author: Tel: +983538203410, email: a.nickfarjam@ssu.ac.ir