

ارزیابی آلودگی فوتونی ناشی از پرتوهای ترمزی در باریکه های الکترونی یک شتابدهنده خطی پزشکی نپتون مدل PC 10 به روش مونت کارلو

نصراله جباری^۱، بیژن هاشمی ملایری^{۲*}

۱- استادیار گروه تصویربرداری پزشکی، دانشکده پیراپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی ارومیه، ارومیه، ایران.

۲- دانشیار گروه فیزیک پزشکی، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۸۷/۸/۱

تاریخ دریافت: ۸۷/۵/۷

چکیده

مقدمه: در باریکه های الکترونی بالینی، اغلب پرتوهای ترمزی در اثر برخورد الکترونها با ساختارهای مختلف سر شتابدهنده تولید می شوند. شکل هندسی و ترکیب هر یک از ساختارها بر دوز پرتوهای ترمزی موثر است. بنابراین، می توان انتظار داشت که دوز آلودگی فوتونی ناشی از پرتوهای ترمزی در شتابدهنده های مختلف، حتی برای باریکه های الکترونی با انرژیهای یکسان، با هم متفاوت باشد. هدف از این مطالعه شبیه سازی باریکه های الکترونی شتابدهنده نپتون و محاسبه دوز آلودگی فوتونی ناشی از پرتوهای ترمزی در این باریکه ها به روش مونت کارلو بود.

مواد و روشها: در این تحقیق برای شبیه سازی شتابدهنده خطی نپتون 10PC در مد الکترونی از کد مونت کارلوی BEAMnrc استفاده شده است. این شتابدهنده قادر به تولید سه باریکه الکترونی با انرژیهای ۱۰ و ۶۰۸ مگا الکترون ولت است. اطلاعات لازم برای شبیه سازی شتابدهنده، شامل هندسه و ترکیب ساختارهای مختلف سر شتابدهنده، توسط شرکت سازنده فراهم شد. در تمام شبیه سازیها، انرژیهای قطع برای ترابرد الکترون برابر با ۰/۵۲۱ مگا الکترون ولت و برای ترابرد فوتون ۰/۰۱ مگا الکترون ولت در نظر گرفته شد. جهت اعتبارسنجی مدل‌های شبیه سازی شده، مقادیر درصد دوزهای عمقی و پروفایل های دوز محاسبه شده توسط روش مونت کارلو با مقادیر اندازه گیری شده مورد مقایسه قرار گرفت. برای این منظور از آزمون آماری KS استفاده شد. سپس، دوز مربوط به پرتوهای ترمزی برای سه انرژی باریکه های الکترونی شتابدهنده مورد بررسی در میدان مرجع به روش مونت کارلو محاسبه گردید.

نتایج: آزمون آماری KS توافق بسیار خوبی را بین درصد دوزهای عمقی و پروفایل های دوز محاسبه شده و اندازه گیری شده نشان داد. مشخص شد که در سطح فانتوم دوز آلودگی فوتونی ناشی از پرتوهای ترمزی تولید شده از ساختارهای مختلف شتابدهنده نپتون در میدان مرجع برای سه انرژی شتابدهنده در حدود ۰/۵-۰/۲ درصد حداکثر دوز است.

نتیجه گیری: با توجه به همخوانی خوب مشاهده شده بین نتایج حاصل از اندازه گیری و شبیه سازی در این تحقیق می توان گفت که روش شبیه سازی بکار رفته و مقادیر دوز پرتوهای ترمزی محاسبه شده از صحت و دقت خوبی برخوردار می باشند. با توجه به نتایج این تحقیق می توان گفت که دوز مربوط به آلودگی فوتونی در باریکه های الکترونی شتابدهنده نپتون قابل توجه نیست. بنابراین، به نظر می رسد که از این سیستم بتوان در تابش دهی کل پوست با الکترونها استفاده نمود. (مجله فیزیک پزشکی ایران، دوره ۶، شماره ۱، پیاپی (۲۲)، بهار ۸۸: ۳۲-۲۱)

واژگان کلیدی: باریکه های الکترونی، پرتوهای ترمزی، آلودگی فوتونی، مونت کارلو، شتابدهنده خطی پزشکی

* نویسنده مسؤل: بیژن هاشمی ملایری

آدرس: تهران، گروه فیزیک پزشکی، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه

تربیت مدرس تهران bhashemi@modares.ac.ir

تلفن: ۸۲۸۸۳۸۹۲- (۲۱) ۹۸+ شماره: ۸۸۰۰۶۵۴۴- (۲۱) ۹۸+

۱- مقدمه

در کاربردهای بالینی مفیدترین محدوده انرژی برای الکترونها ۶ الی ۲۰ مگا الکترون ولت می باشد. در این انرژیها، باریکه های الکترونی می توانند برای درمان تومورهای سطحی مورد استفاده قرار گیرند. امروزه الکترون تراپی در رادیوتراپی جایگاه مهم و شناخته شده ای دارد [۱]. بهنگام تولید باریکه های الکترونی علاوه بر الکترونها، در اثر پدیده شکست اشعه در ساختارهای مختلف سر درمانی شتابدهنده فوتونهای زیادی نیز تولید می شوند [۲]. دوز آلودگی فوتونی ناشی از پرتوهای ترمزی در باریکه های الکترونی بالینی در نتیجه پرتوهای X تولید شده در باریکه های تابشی و به مقدار کمی در فانتوم یا بدن بیمار است. پرتوهای X در باریکه های الکترونی اغلب در اثر برخورد الکترونها با ساختارهای مختلف شتابدهنده، از جمله پنجره خروجی تیوب شتابدهنده، فویل های پراکننده، اتاقک مونیور، کولیماتورهای پرتو X و اپلیکاتورهای الکترونی تولید می شوند. شکل هندسی و ترکیب هر یک از این ساختارها می تواند نقش موثری در دوز حاصل از پرتوهای X در باریکه های الکترونی ایفا نماید. بنابراین، می توان انتظار داشت که دوز آلودگی فوتونی ناشی از پرتوهای ترمزی در باریکه های الکترونی شتابدهنده های مختلف حتی با انرژیهای مساوی کاملاً متفاوت باشد. به همین دلیل مطالعاتی جهت کاهش دوز پرتوهای X در باریکه های الکترونی شتابدهنده ها صورت گرفته است [۳-۶].

در باریکه های الکترونی در عمق های بعد از حداکثر برد الکترونها تابشی، دوز روی منحنی درصد دوز عمقی (دوز ناحیه دم منحنی های درصد دوز عمقی) تنها در اثر حضور پرتوهای X در این ناحیه ظاهر می شود. بنابراین یک روش برای اندازه گیری دوز آلودگی فوتونی، بدست آوردن دم در منحنی های درصد دوز عمقی برای هر باریکه الکترونی می باشد. یک روش تجربی دیگر جهت برآورد آلودگی فوتونی ناشی از پرتوهای ترمزی تولید شده در سر درمانی شتابدهنده ها استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی قوی برای انعکاس باریکه الکترونی اولیه می باشد [۷]. دو روش جایگزین دیگر،

محاسبه توسط روشهای تحلیلی و شبیه سازی مونت کارلو می باشد [۸].

روش مونت کارلو یک روش شبیه سازی آماری برای مسائل ترابرد پرتوی می باشد. این روش می تواند بطور دقیق فرایندهای فیزیکی دخیل در رادیوتراپی را با هر هندسه پیچیده مدل کند. بطور گسترده پذیرفته شده که شبیه سازی مونت کارلوی ترابرد پرتوها یکی از صحیح ترین روشها برای بیان توزیع های دوز جذبی در پرتودرمانی می باشد [۹].

در عمل دوز پرتوهای ترمزی برای باریکه های الکترونی کمتر از ۲۰ مگا الکترون ولت برای میدانهای ثابت چندان مشکل ساز نمی باشد. با وجود این، در تابش دهی کل پوست با الکترونها^۱ (TSEI) در فواصل بزرگ برای چندین میدان ممکن است دوز پرتوهای ترمزی قابل توجه بوده و به مقدار غیرقابل قبولی بالا باشد. همچنین برای میدانهای بزرگ و در فواصل دور از چشمه پرتو، نسبت دوز پرتو ترمزی به دوز الکترون بویژه برای الکترونها با انرژی پایین همانند آنچه که برای تابش دهی کل پوست با الکترونها مورد استفاده قرار می گیرد افزایش می یابد [۳].

با توجه به اینکه دوز پرتوهای ترمزی در شتابدهنده های مختلف با هم متفاوت است و به انرژی باریکه الکترونی هر شتابدهنده، جنس، ضخامت ساختارهای آن، نحوه قرارگیری ساختارها در مسیر باریکه تابشی و غیره بستگی دارد. لذا هدف از انجام این مطالعه شبیه سازی باریکه های الکترونی شتابدهنده نپتون و محاسبه دوز آلودگی فوتونی ناشی از پرتوهای ترمزی در این باریکه ها به روش مونت کارلو می باشد.

۲- مواد و روشها

۲-۱- شبیه سازی مونت کارلو

در این تحقیق از سیستم کد BEAMnrc که بر اساس کد مونت کارلوی EGSnrc است برای شبیه سازی مد الکترونی

^۱ Total Skin Electron Irradiation (TSEI)

کد EGSnrc وجود دارند که بایستی برای هر شبیه سازی تعریف شوند. از جمله می توان انرژیهای قطع الکترون (ECUT) و فوتون (PCUT) را نام برد. انرژی قطع، مقدار انرژی که در صورت رسیدن انرژی ذره به زیر آن، شبیه سازی مونت کارلو ترابرد ذره را متوقف می کند. ترابرد ذرات همچنین توسط پارامترهای انرژی آستانه برای الکترون (AE) و فوتون (AP) در داده های مربوط به ماده در کد PEGS4 کنترل می شود. اینها انرژیهای قطع برای الکترونها و فوتونها را تعیین می کنند بطوریکه در زیر این مقادیر ذرات ثانویه ایجاد نشوند.

۴- تعریف پارامترهای مربوط به هر یک از مدولهای ساختاری در کد BEAMnrc.

۵- ترجمه کردن^۳ برنامه شبیه سازی شده برای شتابدهنده مورد نظر.

۶- اصلاح خطاهای مشاهده شده.

۷- اجرای برنامه تدوین شده در کد BEAMnrc.

۸- استخراج اطلاعات مورد نیاز از خروجی کد BEAMnrc در شکل ۱ شمایی از شتابدهنده نپتون شبیه سازی توسط کد BEAMnrc نشان داده شده است.

شتابدهنده خطی نپتون 10PC و ترابرد ذرات در مدل شبیه سازی استفاده شده است. ثابت شده که کد مونت کارلوی BEAMnrc برای شبیه سازی هر دو مد الکترونی و فوتونی شتابدهنده های خطی پزشکی مناسب است [۱۰]. به منظور مدل سازی شتابدهنده مورد نظر، اطلاعات هندسی، جنس و ترکیب مواد ساختارهای شتابدهنده از شرکت سازنده فراهم گردید. سپس ساختارهای سر درمائی شتابدهنده بصورت مدولهای ساختاری^۱ (CMs) مدل شدند. مدولهای ساختاری انواع متنوعی از عناصر هندسی هستند که می توانند برای تعریف ساختارهای مختلف یک شتابدهنده در این کد مورد استفاده قرار گیرند. در این تحقیق برای شبیه سازی شتابدهنده مورد نظر با کد BEAMnrc اقدامات زیر انجام گرفت:

۱- انتخاب مدولهای ساختاری مورد نیاز برای تعریف ساختارهای مختلف شتابدهنده در کد BEAMnrc

۲- انتخاب کتابخانه داده های مورد استفاده برای تعریف مواد بکار رفته در شبیه سازیها در کد EGSnrc

داده های سطح مقطع برای کد EGSnrc توسط کد PEGS4 (Preprocessor for EGS) ایجاد می شود. کد PEGS4 یک برنامه کاربردی مستقل است که برای ایجاد فایلهای مربوط به داده های ماده (محتوی اطلاعات سطح مقطع برای مواد مورد نظر در محاسبات) مورد استفاده قرار می گیرد.

۳- تعریف پارامترهای اصلی ورودی در کد شبیه سازی از جمله: نوع ذره تابشی، مشخصات چشمه تابشی (انرژی باریکه و توزیع آن)، تعداد ذرات مورد نیاز برای ترابرد، انرژیهای قطع ذرات، محاسبه دوز کلی یا دوز مربوط به ساختارهای مختلف، تعداد سطوح ثبت، مکان و اندازه سطوح ثبت، و پارامترهای مربوط به کد EGSnrc، همچون الگوریتم های مربوط به ترابرد ذرات.

در کلیه شبیه سازیها از الگوریتم PRESTA-II^۲ برای ترابرد الکترونها استفاده شد. انواعی از پارامترهای ترابرد در

شکل ۱- شمایی از شتابدهنده نپتون شبیه سازی شده

¹ Component Modules (CMs)

² Parameter reduced electron-step transport algorithm

³ Compile

دوز، اسکن در امتداد محور X انتخاب می شود. ابعاد وکسل ها به ترتیب برای محاسبه منحنی های درصد دوز عمقی و پروفایل های دوز برابر با $1 \times 1 \times 0.2$ و $0.2 \times 0.2 \times 0.2$ سانتی متر انتخاب شد.

توزیع های دوز محاسبه شده توسط DOSXYZnrc در فایل های خروجی با پسوندهای `egslst`، `3ddose` و `pardose` یافت می شود. فایل `egslst` مهمترین فایل خروجی است. این فایل نه تنها شامل داده های دوز و محاسبات آماری است بلکه حاوی اطلاعات در باره هندسه شبیه سازی شده، تعداد تاریخچه ها و مدت زمان اجرای برنامه است.

در این تحقیق از یک رایانه دارای پردازشگر دوتایی `ADM Athlon™ 64*2`، با سرعت پردازش `GHZ 3800` و `RAM` برابر با `1 GB` تحت سیستم عامل `Windows XP®` برای شبیه سازیها استفاده شد.

۲-۲- اندازه گیریهای تجربی

در این تحقیق اندازه گیریهای تجربی بر اساس پروتکل `TRS-398` آژانس بین المللی انرژی اتمی (IAEA) انجام گرفت [۱۱]. ابزارهای مورد استفاده در این مرحله از تحقیق شامل موارد زیر بود.

۲-۲-۱- شتابدهنده خطی پزشکی نپتون 10PC

این شتابدهنده بصورت کامپیوتری کنترل می شود و به همین علت `PC` را در کنار مدل آن ذکر می کنند. تمام اعمال سیستم های کنترلی بوسیله ریزپردازنده ها کنترل می گردند. تفنگ الکترونی آن از نوع نیمه هادی و انرژی الکترونیهای خروجی از آن در محدوده `45-60` کیلو الکترون ولت است. در این تحقیق از مد الکترونی شتابدهنده مورد نظر استفاده شده است. شتابدهنده در این مد درمانی قادر است پرتوهای الکترونی با انرژیهای `10` و `6.8` مگا الکترون ولت تولید نماید. در این مد حداکثر آهنگ دوز^۱ در فاصله ایزوستتر و در عمق حداکثر دوز، معادل `300 MU/min` است. لازم به یادآوری است که مقادیر `50`، `100` و `200 MU/min` نیز بسته به مورد می توانند

در خروجی کد `BEAMnrc` ده فایل ظاهر می شود. فایل اصلی در خروجی با پسوند `egslst` مشخص می شود که شامل تمامی نتایج دوز و شار شبیه سازی است. همچنین در این فایل خلاصه ای از پارامترهای اصلی ورودی، اطلاعات مربوط به مدولهای ساختاری، مواد بکار رفته در آنها و غیره وجود دارد.

فایل مهم دیگر در خروجی کد `BEAMnrc`، `Phase space` space فایلی است که با پسوند `egsphsp1(2 or 3)` مشخص می شود. این فایل محتوی تمامی اطلاعات `Phase space` برای تمامی ذرات عبوری از سطوح ثبت (اطلاعات مکان، جهت، بار و انرژی) است.

۹- استفاده از فایل های `Phase space` حاصل از کد `BEAMnrc` به عنوان ورودی در کد محاسبه دوز (`DOSXYZnrc`).

از فایل های `Phase space` می توان بعنوان یک چشمه در ورودی کد محاسبه دوز (`DOSXYZnrc`) استفاده نمود. کد `DOSXYZnrc` مسیر ذرات چشمه را از میان سلولها یا وکسل های تعریف شده با دانسیته و ترکیب متفاوت در یک فانتوم شبیه سازی می کند. علاوه بر این، در این کد محاسبه دوز، امکان تعریف چشمه با هندسه و انرژیهای مختلف وجود دارد. در کد `DOSXYZnrc` برای تعریف فانتوم شبیه سازی سه مرحله وجود دارد. اولین مرحله تعیین ابعاد وکسل در جهات `x`، `y` و `z` است. برای این منظور می توان وکسل ها را بصورت تکی با مشخص کردن مکان شروع و انتهای هر وکسل تعریف نمود. همچنین ممکن است ابعاد را بصورت گروهی با مشخص کردن تعداد وکسل ها در هر گروه و پهنای هر وکسل در گروه تعریف نمود. مرحله بعدی تعریف مواد مورد استفاده در فانتوم است. مرحله آخر انتخاب وکسل هایی که ثبت دوز در آنها مورد نظر است. در این مرحله جهت اسکن در وکسل ها نیز انتخاب می شود. بدین ترتیب که برای بدست آوردن درصد دوز عمقی، اسکن وکسل ها در امتداد محور `Z` و برای بدست آوردن پروفایل

¹ Max dose rate

سیستم عامل ویندوز میکروسافت سازگار است و مراحل اندازه گیری آن در محیط گرافیکی انجام می شود. این نرم افزار اغلب پروتکل های دوزیمتری را دارا می باشد.

۲-۳- اعتبارسنجی برنامه شبیه سازی شده

همانطوریکه در بالا بیان شد هدف از انجام این تحقیق شبیه سازی باریکه های الکترونی شتابدهنده نپتون و محاسبه دوز ناشی از پرتوهای ترمزی در این باریکه ها به روش مونت کارلو بود. برای انجام این کار ابتدا شتابدهنده مورد نظر با استفاده از کد مونت کارلوی BEAMnrc در میدان مرجع و درسه انرژی مگا الکترون ولت ۱۰ و ۸، ۶، شبیه سازی گردید. دوز جذبی یک فانتوم آب به ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ سانتی متر، همانند آنچه که برای اندازه گیری تجربی مورد استفاده قرار می گیرد، توسط سیستم مونت کارلو DOSXYZnrc که آن هم بر اساس کد مونت کارلوی EGSnrc است، شبیه سازی گردید. برای محاسبه منحنی های دوز عمقی، در داخل فانتوم شبیه سازی شده آشکارسازهایی به ابعاد ۱×۱×۰/۲ سانتی متر طوری تعریف شدند که مرکز آشکارسازها در امتداد محور مرکزی باریکه الکترونی باشد.

برای حفظ شکاف ۵ سانتی متری هوا بین دهانه پایینی اپلیکاتورها و سطح بدن بیمار کلیه محاسبات مونت کارلو و اندازه گیریهای تجربی در SSD برابر با ۱۰۵ cm انجام گرفت. پارامترهای فیزیکی مربوط به فایل ورودی در کد شبیه سازی شامل پارامترهای: چشمه، انرژی قطع پرتوها، الگوریتم ترابرد پرتویی و غیره، بطور مناسب در شبیه سازیهای مورد نظر انتخاب شدند.

در محاسبات این تحقیق برای تمامی مدل‌های ساختاری در کد BEAMnrc مقادیر ثابت برای AE=ECUT=0.521 و P=PCUT=0.01 مگا الکترون ولت و Mگا الکترون ولت و جهت اعتبارسنجی مدل‌های شبیه سازی، تعداد الکترون‌ها برای هر کدام از چشمه های تابشی ۱۰۰ میلیون در نظر گرفته شد، ولی با توجه به اینکه راندمان تولید پرتوهای ترمزی در باریکه های الکترونی پایین

انتخاب شوند. ابعاد میدان درمانی در مد الکترونی توسط اپلیکاتورها تعیین می شود. طبق تعریف خان^۱ به میدانهای کوچکتر از میدان مرجع (۱۰×۱۰ سانتی متر) میدانهای کوچک گفته می شود به همین ترتیب به میدانهای بزرگتر از میدان مرجع، میدان بزرگ گفته خواهد شد [۱].

۲-۲- فانتوم آب RFA 300

فانتوم آب مورد استفاده از نوع RFA 300^۲ با ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ سانتی متر مکعب بود. این فانتوم از ماده پلکسی گلاس ساخته شده است و یکی از ابزارهای استاندارد سیستم های دوزیمتری در شتابدهنده ها بشمار می رود، که در اندازه گیریهای روزمره، کنترل کیفی و غیره بکار گرفته می شود. در فانتوم آب مورد نظر می توان انواع آشکارسازهای گازی و نیمه هادی را نصب نمود. تغییر موقعیت آشکارسازها در داخل فانتوم به دو حالت، کنترل دستی توسط اپراتور و یا کنترل اتوماتیک توسط کامپیوتر انجام می شود.

۲-۳- آشکارسازهای نیمه هادی

آشکارسازهای نیمه هادی و یا آشکارسازهای دایودی ابزارهای حالت جامدی برای اندازه گیری دوز هستند که اغلب از سیلیکون ساخته شده اند [۱]. یک دایود سیلیکونی ضد آب از نوع P⁺، که ضخامت تراشه سیلیکونی آن ۰/۵ میلی متر و قطر ناحیه حساس آن ۲ میلی متر بود، برای اندازه گیریها مورد استفاده قرار گرفت. همچنین در هنگام اندازه گیریها یک آشکارساز دایودی بعنوان آشکارساز مرجع در اطراف میدان تابش قرار داده می شد.

۲-۲-۴- نرم افزار دوزیمتری RFA plus

برای دوزیمتری در شتابدهنده نپتون از یک بسته نرم افزاری پیشرفته بنام Scanditronix RFA plus استفاده شد که می توان دوزیمتری نسبی، مطلق و کنترل کیفی شتابدهنده ها را با آن انجام داد [۱۲]. این نرم افزار با

¹ Khan

² IBA Scanditronix Medical AB, Uppsala, Sweden

³ Scanditronix Medical AB, EFD-3G

سپس منحنی های دوز عمقی برای چشمه های مورد نظر محاسبه و با مقادیر اندازه گیری تجربی مقایسه و در نهایت شاخص کیفیت چشمه الکترونی اولیه مناسب، با بررسی همخوانی مقادیر R_{50} اندازه گیری و محاسباتی حاصل از چشمه های مورد آزمون (مطابق با پروتکل TRS-398 آژانس بین المللی انرژی اتمی) برای هر سه انرژی شتابدهنده انتخاب شد [۱۱].

بنابراین، بر اساس نتایج حاصل از این مرحله، برای محاسبات مونت کارلوی باریکه های الکترونی ۱۰ و ۶،۸ مگا الکترون ولت به ترتیب از چشمه های الکترونی اولیه با مشخصات باریکه مدادی با قطر ۲ میلی متر و با انرژیهای ۱۰/۴ و ۸/۴۲ و ۶/۵ مگا الکترون ولت تک انرژی، که روی محور مرکزی تابش قرار می گرفتند، استفاده شد. به این ترتیب مقادیر منحنی های دوزهای عمقی در امتداد محور مرکزی^۲ و همچنین در صفحات عمود بر محور مرکزی^۳ در میدان مرجع و در فانتوم آب شبیه سازی شده، برای سه انرژی شتابدهنده مورد نظر که دارای خصوصیات ساختاری مشابهی بودند، محاسبه شد. همچنین منحنی های دوزهای عمقی در امتداد محور مرکزی و عمود بر محور مرکزی برای حالت های مشابه با روش محاسباتی در فانتوم آب RFA 300 و با استفاده از آشکارسازهای دایودی بطور تجربی اندازه گیری شدند. آزمون آماری KS برای مقایسه آماری دو گروه که علاوه بر میانگین در سایر موارد با همدیگر اختلاف داشته باشند روش آماری مناسب و شناخته شده ای می باشد. در این روش تابع توزیع داده ها بصورت نقطه به نقطه مورد مقایسه قرار می گیرند [۱۵، ۱۴].

جهت اعتبارسنجی، مقادیر دوزهای حاصل از روش شبیه سازی مونت کارلو و اندازه گیریهای تجربی منحنی های درصد دوز عمقی و پروفایل های دوز در انرژیهای مختلف از نظر آماری بصورت نقطه به نقطه مورد مقایسه قرار

می باشد، تعداد الکترونها در چشمه های تابشی برای محاسبه دوز پرتوهای ترمزی ۸۰۰ میلیون در نظر گرفته شد، تا اطمینان حاصل شود که عدم قطعیت آماری خوبی در محاسبات دوز جذبی فراهم می شود. محاسبات دوزهای عمقی بدین صورت انجام می گرفت که ابتدا ذرات در شتابدهنده مدل شده توسط کد BEAMnrc ترابرد می شدند و در پایان هر ترابرد اطلاعات هر کدام از ذرات (مکان، جهت، بار و انرژی) در یک فایل Phase space ذخیره می شد. سپس از این اطلاعات بعنوان داده های ورودی در سیستم DOSXYZnrc برای محاسبه دوزهای عمقی استفاده می شد.

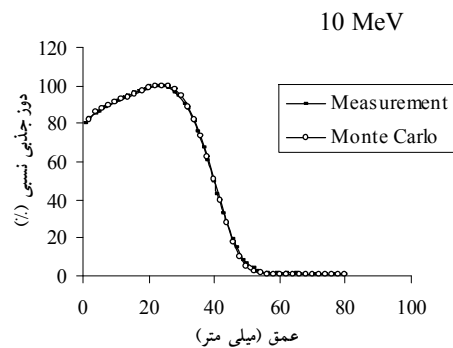
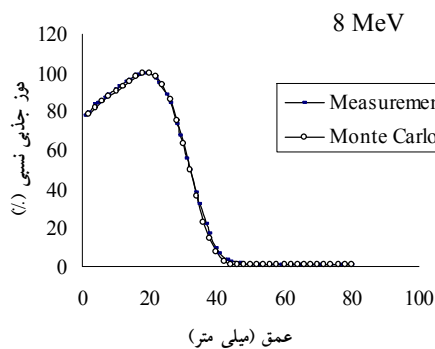
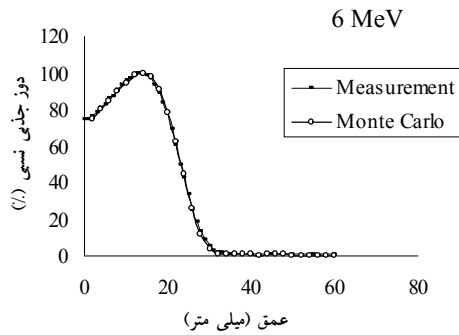
با توجه به اینکه شرکت های سازنده شتابدهنده های خطی پزشکی انرژی اسمی باریکه های الکترونی را بیان می کنند، از طرفی شتابدهنده ها در موقع نصب در محل بهره برداری توسط مهندسین تنظیم می گردند، لذا انرژی پرتو الکترونی مورد استفاده بطور دقیق معادل با انرژی اسمی اعلام شده توسط سازنده نخواهد بود [۱۳]. بنابراین اگر شبیه سازی شتابدهنده ها در انرژی اسمی انجام گیرد، بسیار محتمل است که کیفیت باریکه (beam quality) شبیه سازی شده معادل کیفیت پرتو شتابدهنده مورد بررسی نباشد. در این تحقیق برای تعیین شاخص کیفیت باریکه های الکترونی شتابدهنده مورد بررسی آزمون سعی و خطا مورد استفاده قرار گرفت. برای این کار از چشمه های الکترونی اولیه با مشخصات زیر استفاده گردید.

- ۱- چشمه نقطه ای تک انرژی مستقر روی محور مرکزی
- ۲- چشمه نقطه ای با توزیع انرژی گوسی مستقر روی محور مرکزی با FWHM برابر با ۰.۵٪ محتمل ترین انرژی ۴
- ۳- چشمه های باریکه مدادی^۱ تک انرژی به قطرهای ۴ و ۲ میلی متر روی محور مرکزی
- ۴- چشمه های باریکه مدادی مستقر روی محور مرکزی به قطرهای ۴ و ۲ میلی متر و با توزیع های انرژی گوسی با FWHM برابر با ۰.۵٪ محتمل ترین انرژی

² Percent depth dose

³ Beam profiles

¹ Pencil beam



شکل ۲- مقایسه منحنی های درصد دوز عمقی اندازه گیری شده و محاسبه شده در میدان مرجع و در سه انرژی شتابدهنده مورد نظر جهت اعتبارسنجی مدل شبیه سازی شده.

در شکل ۳ منحنی های دوز اندازه گیری شده و محاسبه شده به روش مونت کارلو در امتداد عمود بر محور مرکزی در میدان مرجع برای سه انرژی باریکه های الکترونی حاصل از شتابدهنده مورد بررسی نشان داده شده است. مشاهده می شود که منحنی های دوز محاسبه شده در امتداد عمود بر محور مرکزی همچون مقادیر اندازه گیری شده مقارن هستند، که نشانگر مقارن بودن هندسه

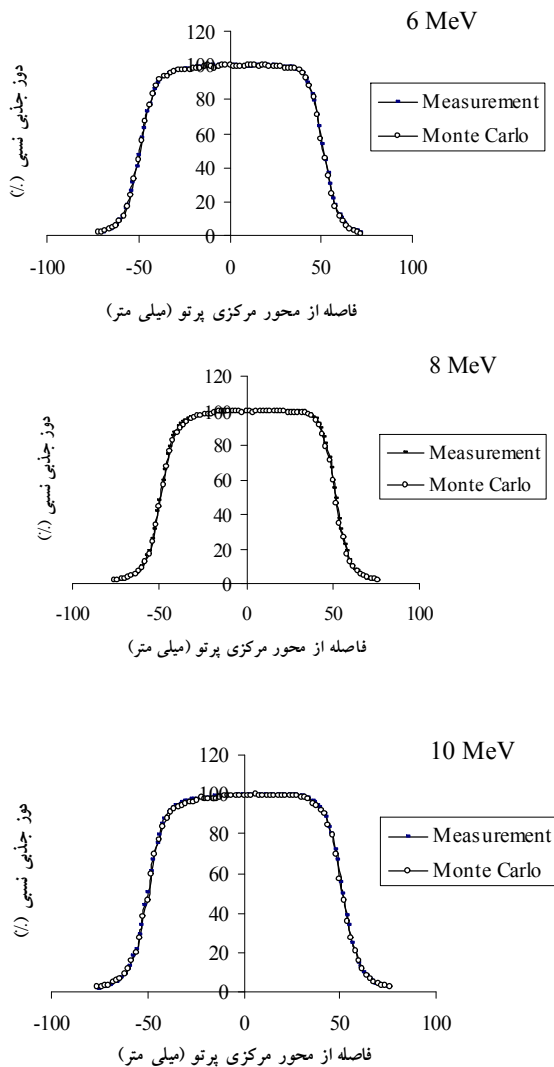
گرفتند. لذا برای مقایسه مقادیر دوزهای محاسباتی و اندازه گیری از آزمون آماری کولموگروف اسمیرنوف (KS) استفاده شد.

در این تحقیق دوز پرتوهای ترمزی ناشی از کل ساختارهای شتابدهنده و فانتوم آب مورد استفاده، برای سه انرژی باریکه الکترونی شتابدهنده مورد نظر در میدان مرجع با استفاده از کدهای شبیه سازی BEAMnrc و DOSXYZnrc محاسبه گردید. برای این منظور دوز ناشی از پرتوهای ترمزی در سطح فانتوم که نمایانگر دوز ناشی از ساختارهای شتابدهنده بوده و در عمق های مختلف فانتوم با استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو محاسبه شد.

۳- نتایج

در شکل ۲ منحنی های دوز عمقی محور مرکزی اندازه گیری شده (بطور تجربی) و محاسبه شده (به روش مونت کارلو) برای سه انرژی باریکه های الکترونی حاصل از شتابدهنده خطی نپتون 10PC در میدان مرجع نشان داده شده است. هر مقدار تجربی میانگین سه مقدار اندازه گیری شده است.

بزرگترین اختلاف ما بین داده های محاسباتی و اندازه گیری شده (۳٪ بر میلی متر) برای انرژی ۸ مگا الکترون ولت بدست آمد که در ناحیه نزولی منحنی درصد دوز عمقی ما بین R_{p} و R_{50} قرار گرفته است. به نظر می رسد با افزایش تعداد تاریخچه ذرات مورد استفاده برای شبیه سازی بتوان این اختلاف را به حداقل رساند. در سایر نواحی و انرژیها اختلاف کوچکتر بوده و بیش از ۲٪ نمی باشد. بایستی خاطر نشان شد که حتی در ناحیه بیلداپ اختلاف کمتر از ۲٪ است.



شکل ۳- مقایسه منحنی های پروفایل دوز اندازه گیری شده و محاسبه شده در میدان مرجع و در سه انرژی شتابدهنده مورد نظر جهت اعتبارسنجی مدل شبیه سازی شده

شبیه سازی شده است. همخوانی مقادیر پروفایل های دوز محاسباتی و اندازه گیری شده در اطراف محور مرکزی در حدود ۱/۵ درصد بوده و در اطراف لبه های میدان این اختلاف به ۲٪ می رسد باز هم در اینجا به نظر می رسد که با افزایش تعداد تاریخچه ذرات مورد استفاده برای شبیه سازی بتوان منحنی های پروفایل دوز صاف تری را بدست آورده و به یک همخوانی در محدوده ۱٪ رسید.

برای مقایسه مقادیر محاسباتی و اندازه گیری از آزمون آماری کولموگروف اسمیرنوف استفاده شد. مقادیر P -value بدست آمده از این آزمون برای منحنی های دوز عمقی محور مرکزی و عمود بر محور مرکزی برای سه انرژی باریکه های الکترونی شتابدهنده مورد نظر در جدول ۱ نشان داده شده است.

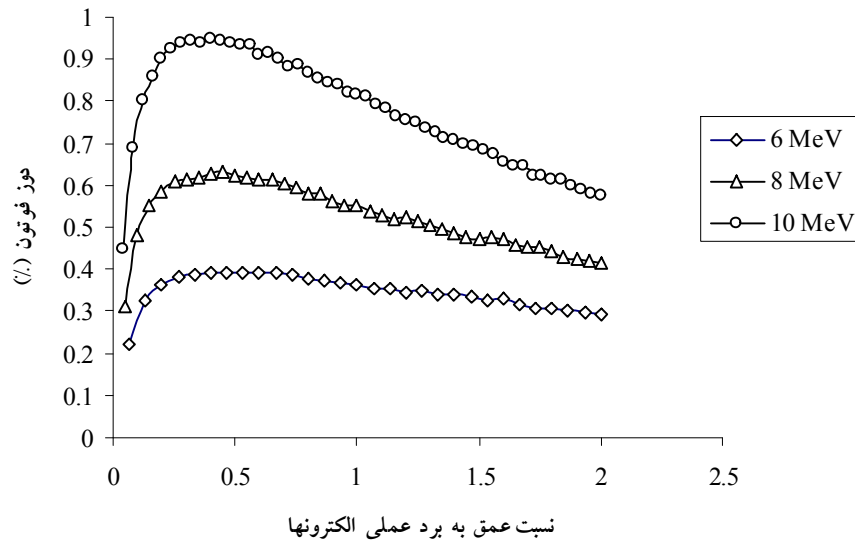
در این تحقیق برای اعتبارسنجی مدل های شبیه سازی شده فرض صفر با سطح خطای ۵٪ با استفاده از آزمون KS مورد ارزیابی قرار گرفت. از لحاظ آماری فرض صفر مبتنی بر تساوی مقادیر منحنی های درصد دوز عمقی و پروفایل دوز محاسباتی با مقادیر اندازه گیری شده بود. با توجه به اینکه مقادیر P -value آزمون صفر در تمامی مقایسه ها بزرگتر از ۰/۰۵ بدست آمد، لذا نتایج آزمون KS بیانگر تائید فرض صفر، یعنی تساوی مقادیر محاسباتی مونت کارلو و اندازه گیری تجربی از نظر آماری بود.

جدول ۱- نتایج آزمون آماری KS مربوط به منحنی های درصد دوز عمقی و پروفایل دوز مورد استفاده برای اعتبارسنجی در میدان مرجع و در سه انرژی شتابدهنده مورد بررسی

انرژی باریکه الکترونی (مگا الکترون ولت)	P-Value برای منحنی های درصد دوز عمقی	P-Value برای منحنی های پروفایل دوز
۶	۰/۸۱۹	۰/۷۸۲
۸	۰/۳۵۸	۰/۱۱۶
۱۰	۰/۳۴۶	۰/۱۴۷

بهرتر نتایج، سهم پرتوهای ترمزی به عمق (نسبت به برد عملی الکترونها) و به حداکثر دوز هر باریکه الکترونی بهنجار شده اند.

در شکل ۴ سهم دوز آلودگی فوتونی ناشی از پرتوهای ترمزی ساختارهای مختلف شتابدهنده در میدان مرجع و سه انرژی شتابدهنده نشان داده شده است. جهت نمایش



شکل ۴- سهم دوز پرتوهای ترمزی ناشی از کل ساختارهای مختلف شتابدهنده و فانتوم آب در سه انرژی و میدان مرجع شتابدهنده مورد بررسی

۴- بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق برای شبیه سازی سر درمانی شتابدهنده نپتون 10PC از کد مونت کارلوی BEAMnrc و برای شبیه سازی فانتوم آب مورد استفاده (RFA 300) از کد مونت کارلوی DOSXYZnrc استفاده شد، که هر دو بر اساس کد مونت کارلوی EGSnrc هستند. بعد از تعریف ساختارهای مختلف شتابدهنده در کد مونت کارلوی BEAMnrc اولین قدم در اعتبارسنجی مدل‌های محاسباتی طراحی شده تعیین شاخص کیفیت باریکه های الکترونی بود. در این تحقیق همخوانی خوب مقادیر محاسباتی و تجربی مورد استفاده جهت تعیین شاخص کیفیت باریکه های الکترونی برای انرژیهای ۱۰ و ۶،۸ مگا الکترون ولت شتابدهنده مورد بررسی به ترتیب در انرژیهای برابر با ۱۰/۴ و ۸/۴۲ و ۶/۵ مگا الکترون ولت بدست آمد. پس از محاسبه منحنی های دوز عمقی و پروفایل های دوز به روش مونت کارلو به منظور مقایسه مقادیر دوز های عمقی و پروفایل های دوز محاسباتی و اندازه گیری تجربی

نتایج محاسبات نشان داد که در سطح فانتوم دوز آلودگی فوتونی ناشی از کل ساختارهای مختلف شتابدهنده در میدان مرجع برای سه انرژی شتابدهنده بین ۰/۵-۰/۲ درصد است. در حالیکه با افزایش عمق در داخل فانتوم تا نزدیکی عمق حداکثر دوز، مقدار دوز آلودگی فوتونی افزایش یافته و بعد از آن کاهش می یابد که ناشی از تولید پرتوهای ترمزی در اثر برخورد الکترونها تابشی با آب داخل فانتوم است.

مشاهده می شود که در سطح فانتوم دوز آلودگی فوتونی ناشی از کل ساختارهای مختلف شتابدهنده در میدان مرجع برای انرژیهای ۶ و ۸ مگا الکترون ولت به ترتیب در حدود ۰/۲ و ۰/۳ درصد حداکثر دوز بوده و در انرژی ۱۰ مگا الکترون ولت به ۰/۵ درصد حداکثر دوز می رسد. در این مطالعه حداکثر دوز ناشی از آلودگی فوتونی (در حدود ۱٪) در عمق حداکثر دوز برای انرژی ۱۰ مگا الکترون ولت بدست آمد که ناشی از آلودگی های فوتونی شتابدهنده و فانتوم آب بود.

باریکه الکترونی افزایش می یابد. بطوریکه الخطیب و همکاران دوز پرتو ترمزی حاصل از یک شتابدهنده Clinac 2100c را با تغییر اتاقک یونیزان عبوری و فویل های پراکننده شتابدهنده تا ۵۰٪ کاهش دادند [۳].

در شتابدهنده مورد بررسی فویل های پراکننده و اتاقک مونیتور از ساختارهایی هستند که بطور مستقیم در مسیر باریکه الکترونی قرار می گیرند. با توجه به اینکه جنس فویل های پراکننده در این شتابدهنده از سرب و اتاقک مونیتور از کپتون، هوا و آلومنیوم ساخته شده است، لذا احتمال وقوع پدیده ترمزی در فویل های پراکننده بیشتر از سایر ساختارها خواهد بود. این در حالی است که کل دوز آلودگی فوتونی ناشی از ساختارهای شتابدهنده چندان قابل توجه نمی باشد، زیرا ضخامت فویل های پراکننده بکار رفته در این شتابدهنده بسیار کم است و از طرف دیگر انرژی باریکه های الکترونی شتابدهنده مورد بررسی چندان بالا نمی باشد. با وجود این مشخص شد که با افزایش انرژی، دوز آلودگی فوتونی ناشی از ساختارهای شتابدهنده هم در سطح فانتوم و هم در داخل آن افزایش می یابد.

به منظور بررسی تغییرات دوز پرتوهای ترمزی ناشی از کل ساختارهای مختلف شتابدهنده با تغییرات انرژی از آزمون آماری تحلیل واریانس یک طرفه استفاده شد. نتایج آزمون آماری مربوطه با $P=0/0001$ نشان داد که دوز آلودگی فوتونی محاسبه شده با تغییرات انرژی باریکه های الکترونی شتابدهنده مورد بررسی بطور معنی داری تغییر می کند.

بطور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش انرژی دوز آلودگی فوتونی حاصل از کل ساختارهای شتابدهنده و فانتوم آب افزایش می یابد. این یافته با مطالعات انجام گرفته توسط سایر محققین [۲، ۷، ۸] همخوانی دارد. همچنین مشخص شد که دوز آلودگی فوتونی ناشی از پرتوهای ترمزی در شتابدهنده مورد بررسی قابل توجه نمی باشد. در بالین برای تابش دهی کل پوست با الکترونها، بیشتر از باریکه های الکترونی کم انرژی استفاده می شود [۱۷]. اما حضور پرتوهای ترمزی در درمان با

از آزمون آماری KS استفاده شد. آزمون آماری KS همخوانی خوب مقادیر منحنی های دوز عمقی و پروفایل های دوز محاسباتی را با اندازه گیریهای تجربی نشان داد. با عدم قطعیت آماری کمتر از ۱ درصد در محاسبات مونت کارلو، اختلاف ضریب تغییرات بین مقادیر محاسباتی مونت کارلو و اندازه گیری تجربی در محدوده ۲ درصد بود. بنابراین، اعتبار مدل های محاسباتی مونت کارلو طراحی شده در این مرحله از تحقیق برای محاسبات دوز ناشی از پرتوهای ترمزی در مراحل بعدی تحقیق مورد تأیید قرار گرفت.

نتایج محاسبات این تحقیق نشان داد که در سطح فانتوم دوز آلودگی فوتونی ناشی از کل ساختارهای مختلف شتابدهنده در میدان مرجع برای سه انرژی شتابدهنده بین ۰/۵ - ۰/۲ درصد حداکثر دوز است. در حالیکه با افزایش عمق در داخل فانتوم تا نزدیکی عمق حداکثر دوز، مقدار دوز آلودگی فوتونی افزایش یافته و بعد از آن کاهش می یابد که ناشی از تولید پرتوهای ترمزی در اثر برخورد الکترونها تابشی با آب داخل فانتوم است.

مطالعه ای که راجرز و همکاران روی فاکتورهای خروجی باریکه های الکترونی شتابدهنده Siemens MD انجام دادند نشان داد که دوز آلودگی فوتونی به کل خروجی برای باریکه های الکترونی کم انرژی در حدود ۱٪ و برای باریکه الکترونی ۱۳ مگا الکترون ولت در حدود ۳٪ است [۲]. از طرفی رستگی و راجرز دوز پرتو ترمزی ایجاد شده در سر درمانی شتابدهنده واریان با انرژی ۱۸ مگا الکترون ولت را در $SSD = 100 \text{ cm}$ و در عمق حداکثر دوز ۳/۹٪ برآورد کردند [۱۶].

بایستی توجه داشت که عدد اتمی و ضخامت مواد مختلف بکار رفته در ساختارهای مختلف شتابدهنده که در مسیر باریکه الکترونی قرار می گیرند و انرژی جنبشی باریکه های الکترونی شتابدهنده نقش مهمی را در پرتوهای ترمزی تولید شده در باریکه های الکترونی ایفا می کنند. زیرا احتمال وقوع برخورد های ترمزی با افزایش عدد اتمی محیط و انرژی جنبشی

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان برخود لازم می دانند از دانشگاه تربیت مدرس برای حمایت های مالی و همچنین از پزشکان و مسئولین بخش رادیوتراپی بیمارستان امام خمینی تبریز به لحاظ همکاری بی دریغ آنان که در انجام این تحقیق مبذول شد نهایت تشکر و قدردانی خود را ابراز کنند.

باریکه های الکترونی بویژه در روش تابش دهی کل پوست با الکترونها مشکلاتی را به همراه دارد. لذا با توجه به نتایج این تحقیق، که حاکی از ناچیز بودن دوز مربوط به آلودگی فوتونی در شتابدهنده مورد بررسی است، به نظر می رسد که بتوان از این سیستم در تابش دهی کل پوست با الکترونها استفاده کرد.

منابع

1. Khan FM. The physics of radiation therapy. 3rd ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2003:297-356.
2. Rogers DWO, Cygler J, Mackie TR. Monte Carlo investigation of electron beam output factors vs size of square cutout. Med Phys 1999; 26(5):743-50.
3. El-Khatib EE, Scrimger J, Murray B. Reduction of bremsstrahlung component of clinical electron beams: implications for electron arc therapy and total skin electron irradiation. Phys Med Biol 1991; 36(1):111-8.
4. Morawska - Kaczynska M, Huizenga H. Numerical calculation of energy deposition by broad high-energy electron beams: II. Multi-Layered geometry. Phys Med Biol 1992; 37(11):2103-16.
5. El-Khatib E, Antolak J, Scrimger J. Radiation dose distributions for electron arc therapy using electrons of 6- 20 MeV. Phys Med Biol 1992; 37(6):1375-84.
6. Janssen JJ, Korevaar EW, Storchi PRM, Huizenga H, Numerical calculation of energy deposition by high-energy beams: III-B. Improvements to the 6D phase space evolution model. Phys Med Biol 1997; 42(7):1441-49.
7. Sorcini BB, Hyodynmaa S, Brahme A. The role of phantom and treatment head generated bremsstrahlung in high-energy electron beam dosimetry. Phys Med Biol 1996; 41(12):2657-77.
8. Klevenhagen SC. An algorithm to include the bremsstrahlung contamination in the determination of the absorbed dose in electron beams. Phys Med Biol 1994; 39(7):1103-12.
9. Ma CM, Jiang SB. Monte Carlo modeling of electron beams from medical accelerators. Phys Med Biol 1999; 44(12):R157-R189.
10. Rogers DWO, Faddegon BA, Ding GX, Ma CM, We J, Mackie TRA. BEAM: a Monte Carlo code to simulate radiotherapy treatment units. Med Phys 1995; 22: 503-24.
11. International Atomic Energy Agency (IAEA). Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water. IAEA Technical Report Series TRS-398, Austria, IAEA. 1999.
12. Scanditronix Medical AB. Software handbook to RFAplus Version 5.2. Uppsala, Sweden, Scanditronix Medical AB. 2001.
13. Followill DS, Davis DS, Ibbott GS. Comparison of electron beam characteristics from multiple accelerators. Int J Radiation Oncology Biol Phys 2004; 59(3):905-10.
14. Holmes EW, Kahn SE, Molnar PA, Bermes EW Jr. Verification of Reference Ranges by Using a Monte Carlo Sampling Technique. Clin Chem 1994; 40(12):2216-22.
15. Jabbari N, Hashemi Malayeri B, Farajollahi A, Kazemnejad A, Shafaie A, Jabbari S. Comparison of MCNP4C and EGSnrc Monte Carlo codes in depth-dose calculation of low energy clinical electron beams. J Phys D Appl Phys 2007; 40(15):4519-24.

16. Rustgi SN, Rodgers JE. Analysis of bremsstrahlung component in 6-18 MeV electron beams. Med phys 1987; 14(5):884-8.
17. Hogstrom KR, Almond PR. Review of electron beam therapy physics. Phys Med Biol 2006; 51(13):R455-R489.