

طراحی حفاظ نوترون برای استفاده حین پرتودرمانی با شتابدهنده خطی پرنرژری

محمدی، نجمه* - میری حکیم آباد، سید هاشم - رفعت متولی، لاله

دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده علوم - گروه فیزیک

چکیده:

در این مقاله با استفاده از کد MCNPX2.6 برای پرتودرمانی با شتابدهنده خطی پرنرژری 15 MV Siemens Primus حفاظ نوترون طراحی شده است. حفاظ مذکور به شکل یک صفحه و از جنس پلی اتیلن بوراندود به گونه‌ای طراحی شده است که مانع فوتون‌های رسیده به ناحیه درمان نشود. نتایج نشان دادند که حفاظ با ضخامت 5 cm انتخاب مناسبی است. به طوری که با این ضخامت از حفاظ، دز نوترون در خارج میدان تابشی بیش از 70٪ نسبت به حالت بدون حفاظ کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: پرتودرمانی، شتابدهنده خطی پرنرژری، حفاظ نوترون، مونت کارلو

مقدمه :

پرتو درمانی با استفاده از شتابدهنده‌های خطی پرنرژری یکی از روش‌های رایج برای درمان سرطان است. اما در این نوع شتابدهنده‌ها فوتون‌ها انرژی آستانه لازم برای انجام برهم کنش فوتوهسته‌ای را داشته و نوترون تولید می‌شود [۱]. در نتیجه، دز ناخواسته‌ای از نوترون در بدن بیمار ذخیره می‌شود. از آنجایی که نوترون‌ها دارای اثرات بیولوژیکی مخربی در بدن هستند بنابراین لازم است تا حد امکان دز اضافی و نامطلوب نوترون را به حداقل رساند [۲]. تاکنون محققان زیادی آلودگی نوترونی در اتاق درمان را بررسی کرده‌اند، اما مسئله حفاظ‌گذاری و مطالعه اثر حفاظ بر نوترون رسیده به بیمار به طور محدود انجام شده است. به عنوان مثال Rebello و همکارانش برای کاهش دز نوترون ناشی از شتابدهنده واریان با ولتاژ 18 MV، حفاظی از جنس پلی اتیلن بوراندود طراحی کرده‌اند که اطراف سر شتابدهنده را در بر گرفته است [۳]. اما اضافه کردن یک جزء خارجی به سر شتابدهنده، پس از تولید و نصب آن، به دلیل از بین رفتن شرایط ضمانت نامه دستگاه و همچنین محدودیتی که در افزایش وزن دستگاه وجود دارد، به سختی توسط کارخانه سازنده تایید می‌شود. به همین دلیل، اعمال حفاظ خارجی بر سر شتابدهنده با دشواری‌های زیادی همراه است. بنابراین، با توجه به این محدودیت، در این مقاله سعی شده است حفاظ نوترون به گونه‌ای طراحی شود که با شرایط کارخانه سازنده شتابدهنده تداخلی نداشته و به آسانی بتواند توسط کارکنان مرکز پرتو درمانی در اتاق درمان برای کاهش دز نوترون رسیده به بیمار مورد استفاده قرار بگیرد.

روش کار :

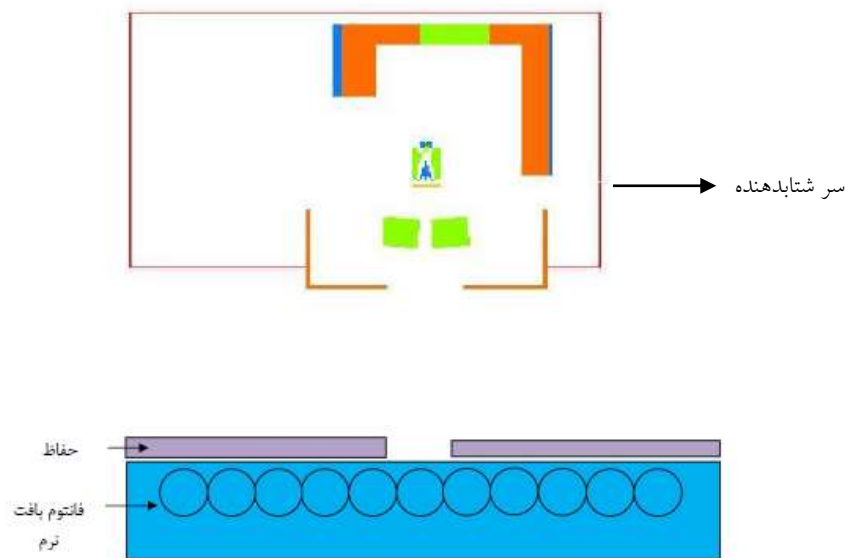
در این مقاله، حفاظ نوترون برای شتابدهنده خطی 15 MV Siemens Primus و با استفاده از کد MCNPX2.6 طراحی شده است [۴] . جزئیات و تایید شبیه‌سازی این شتابدهنده در مطالعه قبلی گزارش شده است [۵] . حفاظ نوترون مورد استفاده در اتاق درمان باید به شکلی باشد که در تحویل دز فوتون‌های درمانی به بیمار اختلال ایجاد نکند و روند پرتو درمانی طبق دستور پزشک ادامه یابد. بنابراین، یکی از عوامل مهم در طراحی حفاظ نوترون شتابدهنده انتخاب شکل حفاظ است. حفاظ نوترون باید بتواند انرژی نوترون‌های فرودی به بیمار را کاهش دهد و همچنین از ماده‌ای تشکیل شده باشد که نوترون‌های حرارتی را جذب کرده و در نتیجه سبب کاهش نوترون رسیده به بیمار تحت پرتو درمانی شود. بنابراین، عامل مهم دیگر در طراحی حفاظ نوترون انتخاب نوع ماده آن است.

برای کاهش دز ناشی از نوترون رسیده به بیمار، شکل حفاظ به صورت یک صفحه انتخاب شده است به طوری که تمام طول و عرض بدن بیمار را در بگیرد. هم چنین، این حفاظ باید به گونه‌ای باشد که مانع پرتوهای فوتون به ناحیه تحت درمان نشود. به همین دلیل حفاظ طوری شبیه سازی شده است که یک دریچه به اندازه میدان تابشی در روی سطح بدن و در ناحیه درمان باز باشد.

برای حفاظ نوترون ماده‌ای باید انتخاب شود که دارای عدد اتمی کوچک باشد. زیرا این مواد، سطح مقطع بزرگی برای پراکندگی نوترون دارند و نوترون‌ها بخش بزرگی از انرژی خود را در اثر پراکندگی کشسان و ناکشسان در یک برخورد از دست داده و حرارتی می‌شوند. بنابراین، مواد هیدروژن دار موثرترین ماده برای کاهش انرژی نوترون هستند، زیرا تقریباً نصف انرژی نوترون‌های سریع در اثر برهم‌کنش پراکندگی به هسته هیدروژن منتقل می‌شود. عنصر بور نیز سطح مقطع بزرگی برای جذب نوترون‌های حرارتی دارد. به طوری که چند میلی‌متر از آن می‌تواند همه نوترون‌های حرارتی رسیده به آن را جذب کند. بنابراین بور می‌تواند به پلی اتیلن اضافه شده و یک حفاظ موثر در مقابل نوترون را تشکیل دهد. از این جهت، ترکیب همگن پلی اتیلن با بور به عنوان حفاظ مناسبی از نوترون معرفی شده است [۶] . در این مطالعه نیز پلی اتیلن بور اندود ۰.۵٪، با چگالی 0.95 gr/cm^3 ، به عنوان ماده حفاظ انتخاب شده است [۷] . زیرا، نوترون‌های فرودی که عمدتاً نوترون‌های سریع با انرژی حدود $1 - 0.5 \text{ MeV}$ هستند [۵] ، انرژی خود را از طریق برهم‌کنش پراکندگی با هسته هیدروژن از دست داده و کند می‌شوند. نوترون‌های کند و حرارتی شده می‌تواند از طریق برهم‌کنش گیراندازی با بور جذب شوند.

پس از انتخاب ماده مناسب برای حفاظ نوترون، لازم است که ضخامت بهینه‌ای از حفاظ برای کاهش اثر نوترون‌ها تعیین شود. مکعبی از جنس بافت نرم ICRU با چگالی 1 gr/cm^3 در فاصله 100 cm از هدف سر شتابدهنده (ایزوستر) شبیه‌سازی شد. حفاظ با ضخامت‌های مختلف از پلی اتیلن بور اندود نیز در بالای سطح فانتوم شبیه‌سازی گردید. میدان تابشی نیز $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ شبیه‌سازی شد و به اندازه همین میدان

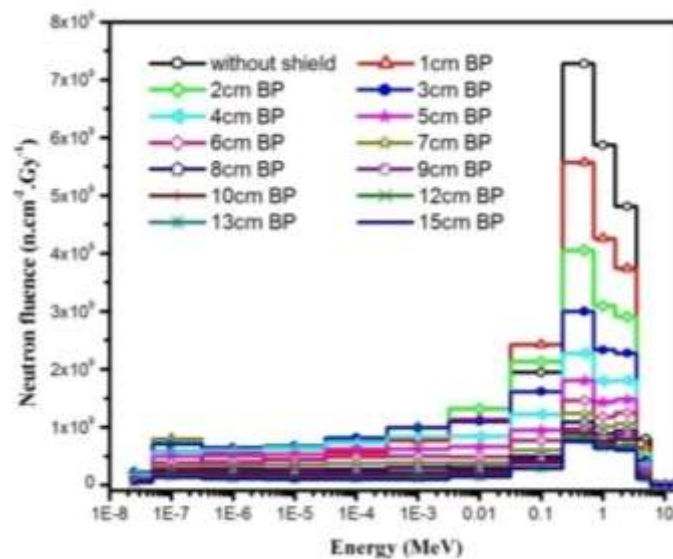
تابشی، در مسیر مستقیم فوتون‌های فرودی از حفاظ شبیه‌سازی شده خالی شده‌است تا سبب تضعیف پرتوهای فوتونی درمانی نشود. کره‌هایی با شعاع ۷ cm نیز در داخل فانتوم مکعبی بافت نرم در فواصل مختلفی از محور مرکزی در نظر گرفته شد تا اثر حفاظ بر دز رسیده در این نقاط بررسی شود. نمایی از حفاظ شبیه‌سازی شده و فانتوم مکعبی بافت نرم به همراه سر شتابدهنده در شکل ۱ نشان داده شده‌است.



شکل ۱: نمایی از شبیه‌سازی سر شتابدهنده و حفاظ نوترون بر روی فانتوم بافت نرم

نتایج :

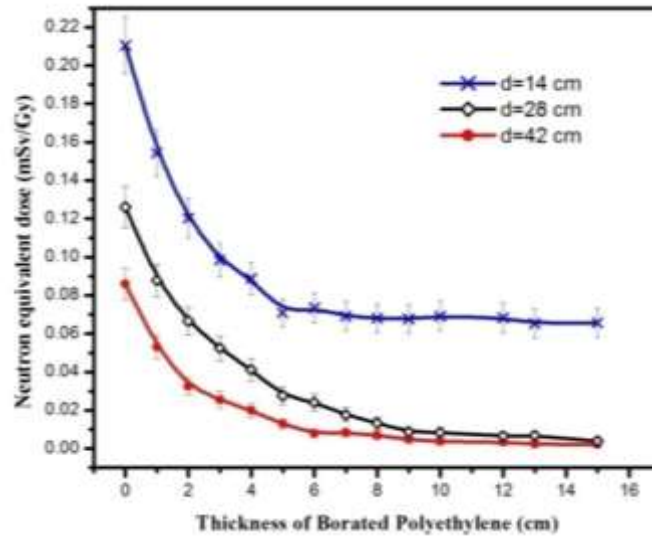
طیف نوترون‌های رسیده به سطح فانتوم، به ازای ۱ Gy دز جذبی فوتون در ایزوستتر، پس از عبور از ضخامت‌های مختلفی از حفاظ در شکل ۲ قابل مشاهده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که با قرار دادن حفاظ با ضخامت ۱ cm، شار نوترون‌های سریع در محدوده انرژی ۰٫۵ - ۱ MeV حدود ۲۵٪ نسبت به حالت بدون حفاظ کاهش یافته‌است. با افزایش ضخامت حفاظ، نوترون‌های سریع با احتمال بیشتری کند می‌شوند، به طوری که با ۵ cm پلی اتیلن بوراندود، نوترون‌های سریع نسبت به حالت بدون حفاظ، حدود ۷۵٪ کاهش یافته‌است. اما با افزایش بیشتر ضخامت حفاظ، نوترون‌های سریع کاهش چندانی نداشته‌است. کاهش شار نوترون با حضور ۵ cm پلی اتیلن بوراندود بسیار چشمگیر است، در حالی که با افزایش ضخامت حفاظ تا ۱۰ cm تنها منجر به افزایش ۱۳٪ دز میزان کاهش نوترون شده‌است. به عبارت دیگر با دو برابر شدن ضخامت حفاظ، میزان کاهش نوترون کمتر از ۱۵٪ بوده‌است.



شکل ۲: طیف نوترون‌های فرودی به سطح فانتوم با حضور ضخامت‌های مختلف از حفاظ

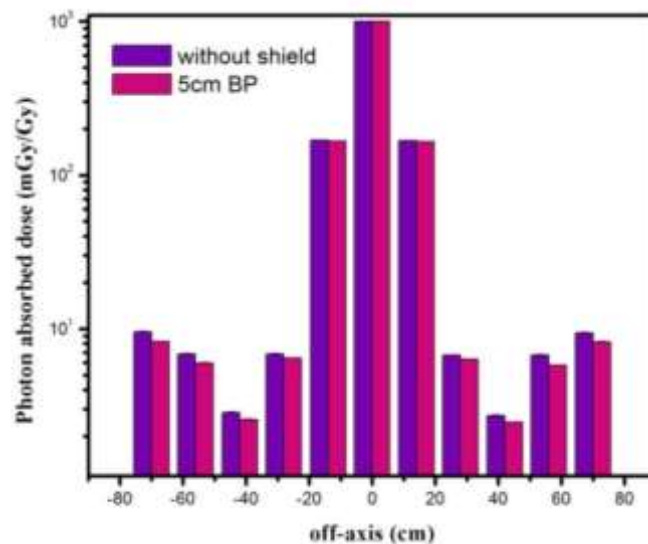
با توجه به این‌که حفاظ نوترون به‌گونه‌ای طراحی شده‌است که در مسیر فوتون‌های فرودی به ناحیه درمان نباشد، دز نوترون در میدان تابشی تغییری نکرده‌است. با این وجود، بیشترین تاثیر قرار دادن حفاظ، کاهش دز نوترون رسیده به بافت‌ها و اندام سالم خارج میدان تابشی خواهد بود. به همین دلیل دز معادل نوترون نیز به ازای ۱ Gy دز جذبی فوتون در ایزوستتر برای سه فاصله مختلف ۱۴ cm، ۲۸ cm، و ۴۲ cm از محور مرکزی و با حضور ضخامت‌های مختلفی از حفاظ در شکل ۳ نشان داده شده‌است. برای هر سه فاصله با افزایش ضخامت حفاظ، دز معادل نوترون کاهش یافته‌است. به طوری‌که در فاصله ۱۴ cm از محور مرکزی، قرار دادن ۵ cm پلی اتیلن بور اندود دز معادل نوترون را حدود ۷۰٪ کاهش می‌دهد. اما پس از آن میزان کاهش دز معادل نوترون، افزایش چشمگیری ندارد و مشاهده می‌شود که اثر حفاظ به اشباع رسیده‌است. در فواصل ۲۸ cm و ۴۲ cm از محور مرکزی نیز برای این حفاظ، حدود ۸۰٪ کاهش در دز معادل نوترون مشاهده می‌شود. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده، پلی اتیلن بوراندود با ضخامت ۵ cm به عنوان ضخامت بهینه برای حفاظ نوترون انتخاب شد.

همان‌طور که بیان شد حفاظ نوترون باید به‌گونه‌ای باشد که دز فوتون رسیده به ناحیه مورد درمان دستخوش تغییر نشود. به همین منظور در شکل ۴ دز جذبی فوتون به ازای ۱ Gy دز جذبی فوتون در ایزوستتر در فواصل مختلف از ناحیه درمان با حالتی که از حفاظ نوترون استفاده نشده، مقایسه شده‌است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت و در طراحی حفاظ در نظر گرفته شده بود، دز فوتون در داخل ناحیه تابشی تغییری نداشته است. زیرا در مسیر فوتون‌های فرودی به سطح فانتوم ماده‌ای قرار نگرفته‌است.



شکل ۳: اثر ضخامت‌های مختلف از حفاظ بر دز معادل نوترون در فواصل مختلف از محور مرکزی

اما با فاصله گرفتن از ناحیه تابش، دز فوتون اندکی نسبت به حالت بدون حفاظ کاهش نشان می‌دهد. به این معنی که در حضور حفاظ، دز جذبی فوتون مقدار کمی کاهش یافته‌است. این کاهش به دلیل تضعیف فوتون‌های پراکنده شده پرنرژی از سر شتابدهنده و رسیدن آن‌ها به فانتوم می‌باشد. هم‌چنین در نتیجه برهم‌کنش نوترون با هیدروژن و بور، به ترتیب پرتوهای گاما با انرژی ۲٫۲۲ MeV و ۰٫۴۸ MeV نیز تولید می‌شود. اما، تعداد این گاماهاى ثانویه، به دلیل فراوانی کم نوترون‌های ناشی از برهم‌کنش فوتوهسته‌ای در مقایسه با فوتون‌های درمانی فرودی به بیمار، اثر چندانی بر طیف فوتون فرودی به بیمار نداشته‌اند.



شکل ۴: اثر ۵ cm پلی اتیلن بور اندود (BP) بر دز جذبی فوتون در فواصل مختلف از محور مرکزی

بحث و نتیجه گیری :

در این مطالعه با استفاده از کد MCNPX2.6 برای شتابدهنده خطی پرنرژری 15 MV Siemens Primus حفاظ نوترون طراحی شده است. شکل حفاظ باید به صورتی باشد که دز فوتون‌های رسیده به ناحیه درمان را کاهش ندهد. به همین دلیل حفاظ به صورت صفحه ای از جنس پلی اتیلن بوراندود انتخاب شد تا با کاهش انرژی نوترون‌ها و حرارتی کردن آن‌ها دز نوترون در بدن بیمار کاهش یابد. ضخامت‌های مختلفی از حفاظ بر روی فانتوم بافت نرم قرار داده شد. محاسبات نشان دادند که ضخامت ۵ cm دز نوترون را تا ۷۰٪ در خارج ناحیه تابشی کاهش می‌دهد. بنابراین ۵ cm به عنوان ضخامت بهینه برای حفاظ نوترون انتخاب شد.

مراجع :

- [1] Vega-Carrillo HR, Hernandez-Almaraz B, Hernandez-Davila VM, Ortiz-Hernandez A, Neutron spectrum and doses in a 18 MV LINAC. J Radioanal Nucl Chem 283:261–265, 2010
- [2] Pena J, Franco L, Gomez F, Iglesias A, Pardo J, Pombar M, Monte Carlo study of Siemens PRIMUS photoneutron production. Phys Med Biol 50:5921–5933, 2005
- [3] Rebello W, Silva A, and Facure A, Multileaf shielding design against neutrons produced by medical linear accelerators. Radiation protection dosimetry 128(2): 227-233, 2008
- [4] Pelowitz DB MCNPXTM user's manual, Version 2.6.0. Los Alamos National Laboratory Report LA-CP- 07-1473, 2008
5. Mohammadi N, Miri-Hakimabad H, Rafat-Motavalli L, Akbari F, Abdollahi S, Neutron spectrometry and determination of neutron contamination around the 15 MV Siemens Primus LINAC. J Radioanal Nucl Chem 304:1001–1008, 2015
- [6] McGinley PH, Shielding techniques for radiation oncology facilities, Medical Physics Pub. 1998
- [7] Karimi-Shahri K, Rafat-Motavalli L, Miri-Hakimabad H, Finding a suitable shield for mixed neutron and photon fields based on an Am–Be source. J Radioanal Nucl Chem 298(1): 33-39, 2013