

ارزیابی نقش متمرکزکننده در نازل پروتون درمانی با استفاده کد شبیه سازی GATE

هانیه مه‌ری*، پیوند طاهرپرور

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، صندوق پستی: ۴۱۹۳۸۳۳۶۹۷، رشت - ایران

چکیده

پروتون درمانی یکی از روش‌های درمان انواع سرطان به کمک پرتوهای پروتونی است. استفاده از پرتوهای پروتونی به دلیل افزایش دُز در انتهای برد آن است (قله براگ) که معمولاً در محل تومور تنظیم می‌شود. قله براگ یک باریکه پروتونی تک انرژی، برای پوشش کل حجم هدف، باریک است، به منظور ایجاد پوشش عمقی گسترده‌تر، با مدولاسیون چندین پرتو با انرژی‌های متفاوت، می‌توان ناحیه‌ای پهن‌تر به نام SOBP شکل داد. یکی از روش‌های موثر در اینباره، بهره‌گیری از نازل پرتودرمانی و استفاده از چرخ تعدیلگر برد است. در این مطالعه با استفاده از کد شبیه سازی مونت کارلو GATE به شبیه‌سازی یک نازل پروتون درمانی شامل المان‌های متفاوت آن از قبیل چرخ تعدیلگر برد، متمرکز کننده و انواع کولیماتورها پرداخته ایم. در ادامه، با بهینه‌سازی چرخ تعدیلگر، ارزیابی نقش متمرکزکننده در مسیر عبور یک باریکه پروتونی بر توزیع فضایی دُز جذبی مورد توجه قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: پروتون درمانی، پراکنندگی منفعل، SOBP، مونت کارلو، GATE

Evaluation of the role of concentrator in proton therapy nozzle using GATE simulation code

Mehri, Haniyeh; Taherparvar, Payvand

Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, University of Guilan, Rasht, Guilan

Abstract

Proton therapy is a type of different cancer treatment using proton beam. The use of proton particles is due to the increased dose at the end of the range (Bragg peak), which is usually set at the tumor region. Bragg Peak related to a single-energy proton beam is narrow to cover the entire target volume. In order to create a wider depth coverage, a wider area called SOBP can be formed by modulation several beams with different energies. One of the effective methods in this regard is using a nozzle and using a range modulation wheel. In this study, using the Monte Carlo GATE simulation code, we simulated a proton therapy nozzle containing its various elements, such as range modulation wheel, concentrator, and various types of collimators. Then, by optimizing the modulator wheel, the evaluation of the role of the concentrator in the path of a proton beam on the spatial distribution of the absorbed dose is considered.

Keywords: Proton therapy, passive scattering, SOBP, Monte Carlo, GATE.

Email: haniyeh.mehri7@gmail.com

۱. مقدمه

طبق آمار منتشر شده از سازمان بهداشت جهانی (WHO) سرطان علت اصلی مرگ و میر در سراسر جهان است که در حدود ۹/۶ میلیون مرگ در سال ۲۰۱۸ را به دنبال داشته است [۱]. به صورت رایج، افراد مبتلا به سرطان، ترکیبی از تکنیک های درمانی مانند جراحی با شیمی درمانی و / یا پرتودرمانی را تجربه می کنند که به نوع سرطان و میزان پیشرفت آن بستگی دارد. پرتودرمانی به دو نوع اصلی پرتودرمانی خارجی و داخلی تقسیم می گردد.

در پرتودرمانی داخلی، چشمه پرتوزا (به صورت جامد یا مایع) در داخل بدن قرار می گیرد. اما در سال های اخیر، استفاده از پرتودرمانی خارجی و بهره گیری از ذرات یونیزان بسیار مورد توجه قرار گرفته است و تقریباً برای تمام انواع تومورهایی که به شکل سنتی با پرتو ایکس و الکترون درمان می شوند، استفاده شده است. در پرتودرمانی به کمک مقادیر بالایی از دُز پرتویی، سلول های سرطانی را از بین می برد و یا با آسیب رساندن به DNA رشد آنها کند و یا متوقف می شود. یک از رایج ترین روش های پرتودرمانی، پروتون درمانی (پروتون تراپی) است.

پروتون ها همانند ذرات باردار سنگین، با عبور از ماده به دلیل فعل و انفعالات کولنی و هسته‌ای، انرژی خود را به محیط منتقل می کنند. با افزایش عمق، میزان انرژی نهشت یافته و در نتیجه میزان دُز جذب، ابتدا به کندی افزایش می یابد، اما در انتهای برد این افزایش دُز به صورت قله تیزتری ادامه می یابد. این افزایش تند در انتهای برد ذره، قله براگ نامیده می شود. قله براگ یک باریکه پروتونی تک انرژی (که معمولاً در ناحیه درمان تنظیم می شود)، برای پوشش کل حجم هدف، بسیار باریک است. به منظور ایجاد پوشش عمقی گسترده تر، می توان قله براگ را با روی هم قرار دادن چندین پروتو با انرژی های متفاوت، پهن تر نموده و ناحیه ای با نام $SOBP^1$ شکل داد [۲].

به منظور حصول ناحیه $SOBP$ ، از روش های پراکندگی منفعل^۲ و یا پویش پروتو مدادی^۳ استفاده می شود. در روش پراکندگی منفعل، باریکه پروتون از یک فیلتر دندانهای با نام فیلتر ریچ و یا چرخ تعدیل گر برد (RMW)^۴ عبور می کند، تا عملاً یک باریکه تک انرژی فرودی را به برهنه‌ی باریکه‌هایی با انرژی متفاوت تقسیم نماید [۳].

هندسه چرخ تعدیلگر برد استوانه‌ای شکل است، که از لایه هایی با عدداتی بالا (مانند سرب، تنگستن) و با ضخامت متفاوت برای تغییر انرژی باریکه پروتونی تشکیل شده است. از طرفی دیگر، به منظور محدود سازی فضایی عرضی باریکه و نیز تطابق توزیع دُز با شکل تومور، از پراکننده هایی استفاده می شود که موجب می شود توزیع دُز با دقت بالایی در مکان هدف نهشت یابد.

۲. روش کار

یکی از روش های مفید و کاربردی برای شبیه سازی فرآیندهای آماری و شبه آماری استفاده از روش هایی بر پایه تکنیک مونت کارلو است؛ و در این راستا کد شبیه سازی GATE بر پایه کد Geant4 موارد استفاده گسترده ای در کاربردهای اختصاصی پزشکی هسته ای یافته است. در این تحقیق با استفاده از کد شبیه سازی GATE به طراحی کل مجموعه مربوط به نازل پروتون درمانی در روش پراکندگی منفعل و استفاده از چرخ تعدیلگر برد پرداخته ایم و پس از طراحی این چرخ به نحوی که بتواند یک منحنی $SOBP$ نسبتاً هموار را ایجاد نماید ارزیابی نقش متمرکز کننده در توزیع فضایی میزان دُز نهشت یافته مورد توجه قرار گرفته است. به منظور ارزیابی توزیع دُز از وکسل بندی یک فانتوم آبی (به عنوان حجم هدف) بهره برده ایم و نتایج مربوط به توزیع دُز در هر وکسل استخراج و ارزیابی شده است.

¹ Spread-out Bragg Peak

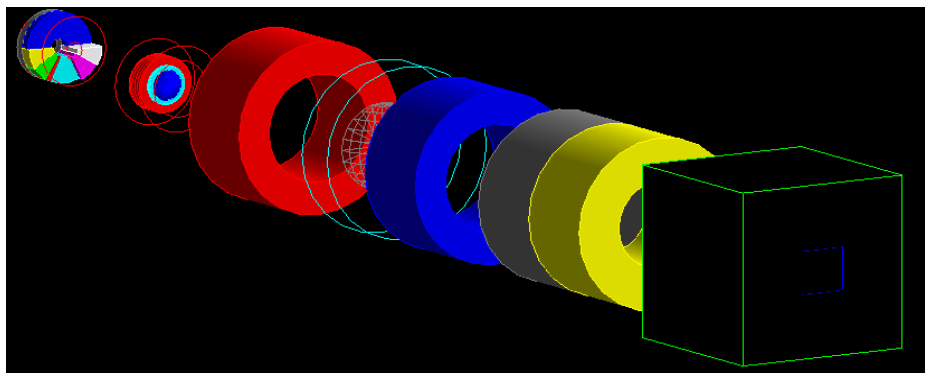
² Passive scattering

³ Pencil beam scanning

⁴ Range Modulation Wheel

چشمه پروتونی به صورت یک باریکه گاوسین با انرژی 200 MeV و انحراف معیار 0.1 MeV انتخاب شده است و ابعاد حجم آبی به صورت مکعبی با ابعاد 40 سانتیمتر در نظر گرفته شد. در ابتدا منحنی دُز جذبی عمقی در این فانتوم با در نظرگیری وکسل‌هایی به ضخامت 1 میلی‌متر محاسبه گشت.

پس از محاسبه اولیه مربوط به تعیین قله براگ مربوط به باریکه پروتونی تک‌انرژی، به طراحی و شبیه‌سازی اجزای یک نازل پروتون درمانی اقدام شد. این مجموعه شامل یک محفظه پوشش، پراکننده اول (S_1)، چرخ مدولاسیون دامنه، پراکننده دوم (S_2)، چندین کولیماتور، متمرکز کننده و روزنه است که به منظور افزایش میزان دُز جذبی در قسمت محوری و کاهش آن در قسمت‌های عرضی و نیز کاهش پرتوهای پراکنده تعبیه می‌شود. نحوه طراحی و شبیه‌سازی آنها در کد GATE و نیز چگونگی فرارگیری آنها در شکل ۱ به نمایش درآمده است. پراکننده اول (RMW) که S_1 نامگذاری شده، شامل ۷ قطعه از جنس سرب و لگزان است که دارای ضخامت‌های متفاوتی می‌باشد، با فرارگیری هر قطعه در برابر چشمه پروتونی یک پیک براگ تشکیل شده است. قطعه چهارم در بخش نازل (شکل ۱) یک متمرکز کننده می‌باشد که به منظور افزایش میزان دُز جذبی در قسمت محوری و کاهش آن در قسمت‌های عرضی تعبیه می‌شود.



شکل ۱. نمایی از هندسه نازل پروتون‌درمانی شبیه‌سازی شده در محیط GATE

نتایج حاصل از میزان دُز جذبی در یک فانتوم آبی در ضخامت‌های 1 میلی‌متری در راستای عمقی با تعداد ذره 10^7 محاسبه شده است. با توجه به اینکه طول قطاع هر یک از این هفت قطعه، درصد وزنی شدت هر پرتو را در میزان دُز نهایی تشکیل می‌دهد، بهینه‌سازی آن بخش مهمی از بهبود عملکرد نازل را تشکیل خواهد داد. به منظور بهینه‌سازی؛ در ابتدا، قله براگ حاصل هر کدام از قطاع‌ها به صورت مجزا محاسبه می‌گردد،

$$D = \sum_i w_i D_i(x) \quad (1)$$

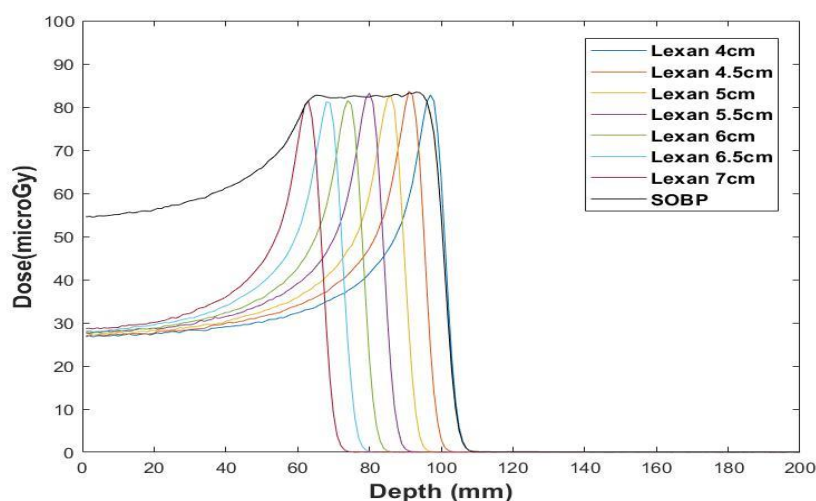
که در رابطه فوق w_i درصد وزنی شدت هر باریکه و $D_i(x)$ دُز فیزیکی حاصل از باریکه پروتونی نام در مکان x است. با حل معادله فوق می‌توان مقادیر w_i ها را یافت، که از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود: سپس درصدهای وزنی شدت هر پرتو، برای دستیابی به مقدار دُز ثابت در مکان x که محل رخداد ناحیه SOBP است به کمک رابطه (۲) تعیین می‌شود [۳].

$$w_n = D \sum_m ((D^T)^{-1})_{m,n} \quad (2)$$

که D^T ، ترانهاد ماتریس D است؛ که درایه‌های $D_{m,n}$ آن، مقدار دُز مربوط باریکه پروتونی n ام در مکان X_m می‌باشد، و اندیس m ، به تعداد پرتوهای دخیل در تشکیل ناحیه SOBP اشاره دارد. با محاسبه w_i زاویه هر قطاع به کمک رابطه $360^\circ * w_i$ قابل محاسبه خواهد بود.

۴. نتایج

در ابتدا و به منظور بررسی اندازه قطاع مناسب برای ابعاد متفاوت لگزان، ضخامت‌های ۴ تا ۷ سانتیمتری برای لگزان با افزایش ۰/۵ سانتیمتری در نظر گرفته شد و پیک براگ مربوط به هر یک از آنها محاسبه شد که در شکل (۲) قابل مشاهده است. سپس به کمک رابطه (۲)، سهم وزنی هر یک از قطاع‌ها برای طراحی پراکننده اول تعیین گردید و این‌المان در کد GATE شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از محاسبه w_i ها که در نهایت منجر به تعیین زاویه هر قطاع خواهد شد نشان می‌دهد که بیشترین زاویه قطاع به نازکترین لایه (با زاویه قطاع ۱۵۳/۵ درجه) اختصاص می‌یابد و زوایای مربوط به سایر لایه‌ها به ترتیب ۵۶/۶۹، ۴۱/۳۱، ۳۲/۳۰، ۲۸/۴۸، ۲۲/۴۱ و ۲۵/۳۳ درجه می‌باشد. نتایج حاصل از SOBP حاصل از طراحی چنین چرخشی در شکل (۲) به نمایش گذاشته شده است که تا حد زیادی به یک SOBP نسبتاً هموار نزدیک است.

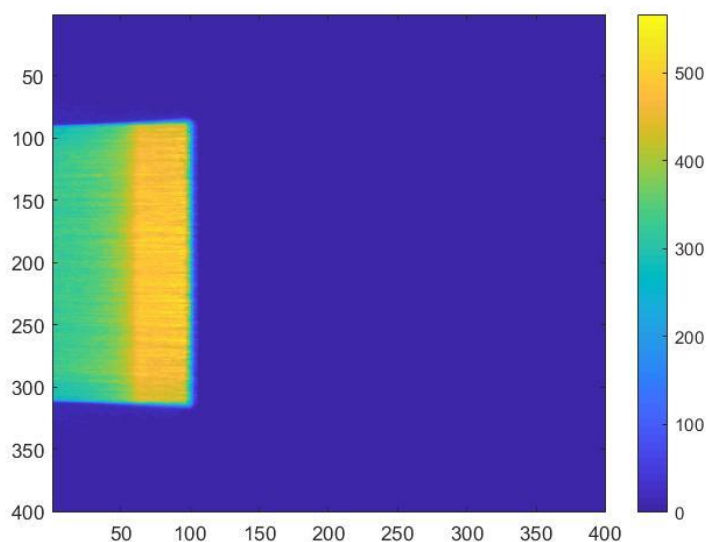


شکل ۲. مقایسه توزیع دُز پرتو پروتونی برای ضخامت‌های مختلف لگزان و نمودار SOBP

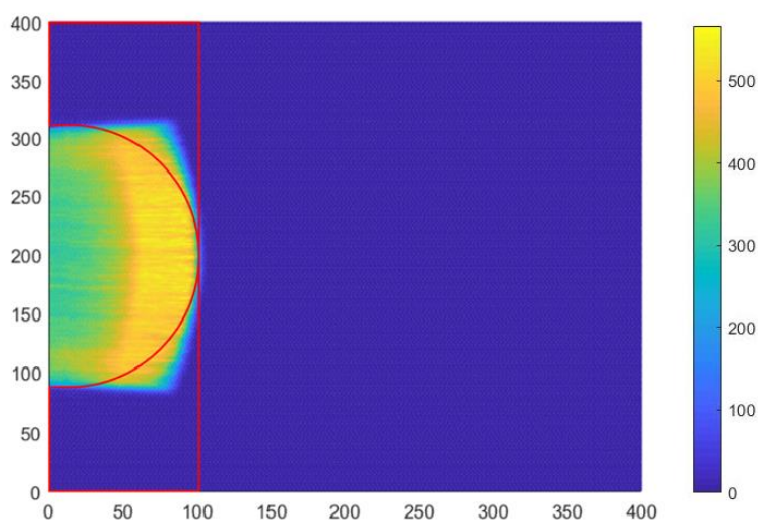
در ادامه و پس از طراحی پراکننده اول، نقش متمرکزکننده در نازل مورد ارزیابی قرار گرفت. قطعه چهارم در بخش نازل (شکل ۱) یک متمرکز کننده می‌باشد که به منظور افزایش میزان دُز جذبی در قسمت محوری و کاهش آن در قسمت‌های عرضی تعبیه می‌شود. به منظور ارزیابی نقش این‌المان، شبیه‌سازی با در نظرگیری و بدون در نظرگیری این قطعه صورت پذیرفت و به دلیل آنکه این قطعه بر توزیع فضایی (عرضی) دُز تأثیرگذار است، توزیع سه بعدی دُز در فانتوم آبی مورد توجه قرار گرفت. نمودار توزیع دُز بدون در نظرگیری این‌المان در شکل (۳) نشان دهنده عدم انحراف توزیع در محورهای عمود بر راستای باریکه است. درحالی‌که با افزودن این قطعه به نازل، بخش میانی باریکه توزیع دُز را در عمق

بیشتری از فانتوم به نهشت می‌گذارد و در مرزهای باریکه، این توزیع دُز در عمق‌های کمتری خواهد بود، که شکل قوس را در انتهای توزیع دُز تداعی می‌کند (شکل ۴).

به منظور درک بهتر شرایط، هندسه این قطعه به نمودار توزیع دُز (شکل ۴) نیز اضافه شده است. عقب‌نشینی توزیع دُز در مرزها، به واسطه عبور از ضخامت بیشتری از این قطعه کاملاً قابل توجیه است، اما باید دقت داشت این قطعه به صورت کاملاً ایده‌آل شکل توزیع دُز را به شکل خود قطعه تغییر نخواهد داد. افزودن این قطعه سبب عقب‌نشینی توزیع دُز در حدود ۳۰ میلی‌متر به عقب می‌گردد. از طرفی دیگر، محاسبه کل دُز نهشت یافته در فانتوم آبی نشان می‌دهد که میزان دُز جذبی به اندازه ۷ درصد در هنگام اضافه شدن قطعه پراکننده، کاهش می‌یابد، که این امر به دلیل اتلاف باریکه در گذر از این قطعه می‌باشد. از طرفی دیگر، وجود این قطعه و به خصوص کولیماتورهای موجود سبب گشته تا توزیع دُز از شعاع ۲۰ سانتیمتری فراتر نرود.

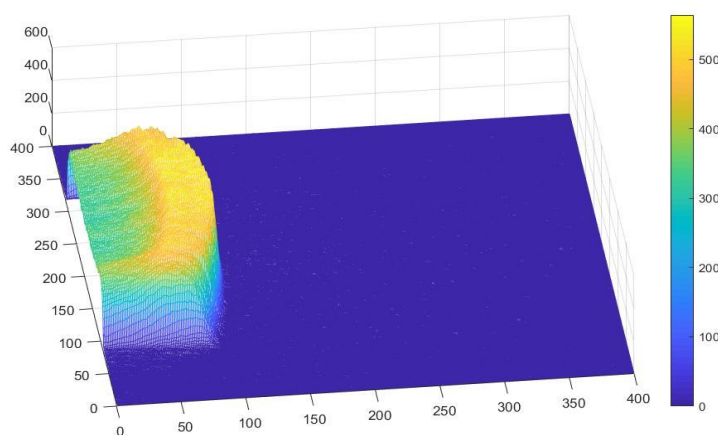


شکل ۳. مقایسه توزیع دُز توزیع سه بعدی دُز در فانتوم آبی بدون متمرکز کننده در نازل پروتون درمانی



شکل ۴. مقایسه توزیع دُز توزیع سه بعدی دُز در فانتوم آبی با متمرکز کننده در نازل پروتون درمانی به همراه تصویرقطعه پراکننده

در نمودار سه-بعدی موجود در شکل ۵ نیز تصویر سه بعدی از توزیع دُز حاصل در فانتوم آبی به کمک هندسه طراحی شده در شکل ۱ و قطاع‌های تعیین شده، به تصویر کشیده شده است. ناحیه SOBP به همراه توزیع فضایی قوس مانند در این نمودار نهشت انرژی به وضوح قابل مشاهده است.



شکل ۵. نمودار توزیع سه بعدی دُز در حضور پراکننده در نازل پروتون درمانی

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، با استفاده از کد شبیه‌سازی مونت کارلو GATE به شبیه‌سازی یک نازل پروتون درمانی در مسیر عبور یک باریکه پروتونی و محاسبه میزان دُز جذبی آن در یک فانتوم آبی به صورت سه بعدی پرداخته شده است. در ابتدا به کمک نتایج حاصل از میزان دُز جذبی جداگانه هر یک از قطاع‌ها، میزان زاویه قطاع‌ها بهینه سازی شده است. نمودارها نشان می‌دهد که در روش پراکندگی منفعل، نقش چرخ RM در توزیع دُز نهایی به شدت تاثیرگذار است و البته با در نظرگیری قطاع‌های بیشتر برای این چرخ، می‌توان به منحنی هموارتری برای SOBP دست یافت. در ادامه نقش قطعه



متمرکزکننده در نازل پروتون‌درمانی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده تغییر پروفایل دُز جذبی وابسته به انحنای این قطعه است، اگرچه به صورت منطبق با شکل این قطعه رفتار نمی‌کند. نتایج نشان می‌دهد کولیماتورها و محافظ‌ها در محدود سازی فضایی توزیع دُز کاملاً موفق عمل می‌کنند.

۶. مراجع

- [1] F. M. Khan's, Khan's the physics of radiation therapy, Lippincott Williams & Wilkins/Wolters Kluwer, Fifth edition, 677-697, 2014.
- [2] H. Paganetti, Proton Therapy Physics, Taylor and Francis, 18-57, 2011.
- [3] Y. Song, J. Shin, S. Cho, S. Yoo, I. Cho, E. Kim, W. Jung, A comparison study of ridge filter parameter using FULKA and GEANT4 simulation code, 1-13, 2015.
- [4] F. Guan, Design and simulation of a passive-scattering nozzle in proton beam radiotherapy, 1-100, 2009.
- [5] T. Kanai et al, Irradiation of mixed beam and design of spread-out Bragg peak for heavy-ion radiotherapy, Radiat. Res. 147, 78-85, 1997.
- [6] S. Jan, et al "GATE: a simulation toolkit for PET and SPECT", Phys. Med. Biol., 1-61, 2004.