

شبیه سازی بخش درمان BNCT با استفاده از چشمه مولد نوترونی توسط کد MCNPX

راستگو، مظاهر^۱؛ جهانبخش، حسین^۲؛ محبی نژاد، محسن^۳

^۱ گروه فیزیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران

^۲ گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

^۳ گروه مهندسی هسته ای، دانشگاه اصفهان، اصفهان

چکیده

برای راه اندازی مرکز نوترون تراپی با بور (BNCT)، طراحی بخش درمان با توجه به استاندارد های حفاظ سازی و رعایت حدود مجاز دز خارج از بخش درمانی برای جلوگیری از اثرات مضر تابش و انتخاب چشمه نوترونی مناسب بسیار ضروری است. در این مقاله، طرح بخش درمان با استفاده از کد محاسباتی MCNPX شبیه سازی شده و مقادیر دز در قسمت های مختلف بخش درمان روی فانتوم کروی شکل به شعاع ۱۵ cm، با توجه به انرژی ۲/۴۵ MeV چشمه نوترونی پلاسمای کانونی و حالات مختلف قدرت و موقعیت چشمه محاسبه شده است.

BNCT treatment department simulation using neutron generator source by MCNP Code

Rastgoo, Mazaher¹; Jahanbakhsh, Hosein²; mohebinezhad, Mohsen³

¹ Department of physics, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran

² Department of physics, Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan

³ Department of Nuclear Engineering, Isfahan University, Isfahan

Abstract

For Center Setup of boron neutron Capture therapy (BNCT), Treatment department design is essential According to shield standards and dose allowable limits observance outside the Treatment department to prevent harmful effects of radiation and selection to suitable Neutron Source. In this paper, treatment department plan is simulated using MCNPX computational Code and Dose Values is computed in different parts of treatment department on spherical phantom with radius 15cm, according to the Energy 2.45MeV plasma focus neutron source, and different States power and position of source.

PACS No. 28, 87

تابشی به سمت تومور به دلیل کاهش انرژی در مسیر حرارتی می شوند و به تومور می رسند. ذرات پرنرژی با برد کم ^4He و ^7Li حاصل از اندرکنش نوترون با بور، با تخلیه انرژی خود در محدوده ای با ابعاد ۹ میکرومتر (قابل مقایسه با ابعاد سلولی) باعث نابودی سلول های سرطانی در محدوده واکنش می شوند [۳]. بازه های انرژی نوترون های فوق حرارتی از ۰/۵ eV تا ۱۰ keV می باشد [۴-۳]. تجربه کنونی نشان می دهد که حداقل شدت پرتو نوترون اپی ترمال $10^9 \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ خواهد بود. به طور کلی می توان

مقدمه

یکی از روش های نوین درمان سرطان به خصوص تومورهای مغزی و سرطان پوست استفاده از روش نوترون درمانی با بور (BNCT) می باشد [۱]. در این روش ابتدا داروی حامل ^{10}B با قابلیت جذب بالا در تومور به بیمار تزریق می گردد. سپس ناحیه تومور توسط نوترون های فوق حرارتی با انرژی و شدت مناسب بمباران می شود [۲]. نوترون های فوق حرارتی

از آنها را ارائه می‌دهیم. برای کاهش چشمگیر هزینه‌های حفاظ سازی، تصمیم بر آن شد که بخش درمان BNCT در فاصله‌ی چند متری زیر سطح زمین بنا گردد. در این حالت محاسبه دز در راهرو و روی سقف بخش درمان اهمیت می‌یابد. طرح اولیه شبیه‌سازی بخش درمان بر مبنای حفاظ‌سازی برای پرتو گاما صورت پذیرفته است. با توجه به گامای حاصل از فرآیند پس‌پراکنی نوترون و نظر به اینکه مقدار ضخامت ۲۱ سانتی متر بتن، شار فرودی گاما را ۱۰ برابر کاهش می‌دهد [۷] و حداکثر دز موثر مجاز که توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی $20 \frac{\mu\text{SV}}{\text{h}} \approx 5 \frac{\text{rem}}{\text{year}}$ (برای افراد پرتوکار با ۵۲ هفته کار در سال و ۵ روز در هفته و ۸ ساعت در روز) گزارش شده [۸]، مقدار ضخامت دیوار بتنی برای کاهش شار پرتوی گاما به دز مجاز، بر اساس محاسبات به صورت زیر خواهد بود [۷]:

$$\Gamma = 1.32 \left(\frac{R \cdot \text{m}^2}{\text{Ci} \cdot \text{h}} \right) \quad (۳)$$

$$R \equiv \text{rem} = 0.01 \text{ SV}$$

با توجه به حداکثر اکتیویته ی 10000 Ci کبالت موجود در رادیوتراپی ها و قرار دادن آن در رابطه ی قدرت گسیل ویژه ی گاما در واحد متر مربع به نرخ دوز گاما می رسیم:

$$1.32 \left(\frac{0.01 \text{ SV} \cdot \text{m}^2}{\text{Ci} \cdot \text{s}} \right) \times 10^4 \text{ Ci} \times \frac{1}{1 \text{ m}^2} = 132 \text{ SV/h}$$

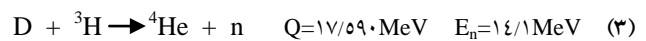
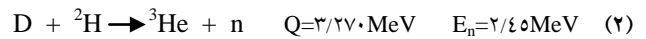
$$\dot{D} = 132 \frac{\text{SV}}{\text{h}} \quad \frac{\dot{D}}{D} = \frac{132 \frac{\text{SV}}{\text{h}}}{20 \mu \frac{\text{SV}}{\text{h}}} \cong 6 \times 10^6 \cong 10^7$$

از اینرو برای کاهش 10^7 برابری دوز گاما برای رسیدن به دوز مجاز به حدود 150 cm بتن نیاز داریم. بتن بکار رفته در این شبیه سازی از عناصر اکسیژن (۵۳٪)، سیلیکن (۳۳/۷٪)، کلسیم (۴/۴٪)، آلومینیوم (۳/۴٪)، سدیم (۱/۶٪)، آهن (۱/۴٪)، پتاسیم (۱/۳٪)، هیدروژن (۱٪)، منیزیم (۰/۲٪) و کربن (۰/۱٪) تشکیل شده است.

نتایج و بحث

پس از محاسبه ی ضخامت لازم برای حفاظ سازی پرتوی گاما، طرح اولیه و ساده ی بخش درمان BNCT شبیه سازی گردید. با توجه به شکل ۱ در طرح اولیه شبیه سازی از وجود حفاظ سایه با ابعاد مشخص شده در شکل استفاده شده است و

چشمه‌های نوترونی مورد استفاده در BNCT را به راکتورهای هسته‌ای، شتاب‌دهنده ها، مولدهای نوترون و رادیوایزوتوپ‌ها دسته‌بندی کرد [۳]. برای شبیه سازی بخش درمان از میان این چشمه‌ها، مولدهای نوترون مناسب شمرده شده است. مولدهای نوترون بر اساس واکنش‌های زیر کار می‌کنند:



در این مقاله برای شبیه سازی بخش درمان چشمه مولد نوترون پلاسمای کانونی به دلیل عدم تابش در حالت خاموشی و قابل تنظیم بودن و کاربرد آسان و امن، هزینه ساخت کم، ابعاد کوچک و قابلیت حمل و جابجایی و داشتن شار خروجی مورد نیاز برای BNCT، در نظر گرفته شده است [۵].

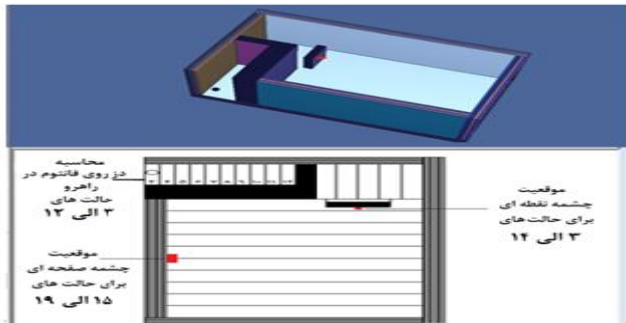
روش کار

برای شبیه سازی بخش درمان BNCT از کد محاسباتی MCNPX Visual Editor (version 2.6) استفاده شده [۶] و محاسبات دز روی فانتوم نماد انسان در راهروی بخش درمان و خارج از آن برای بررسی مجاز بودن دز، در حالت‌های مختلف موقعیت چشمه و شار نوترون بدست آمده است. محاسبات دز برای اطمینان از حفاظ سازی مناسب بخش درمان برای جلوگیری از خروج غیر مجاز تابش‌های نوترون و گاما حاصل از فرآیند درمان BNCT صورت می‌گیرد. در شبیه سازی اولیه بخش درمان و محاسبات و نتایج دز، چشمه نوترونی پلاسمای کانونی به گونه‌ای در نظر گرفته شده که بصورت نقطه‌ای با حداکثر قدرت $10^9 \frac{n}{s}$ و $10^{11} \frac{n}{s}$ و انرژی $2/45 \text{ MeV}$ بدون فیلتر و موازی‌ساز و دریچه به همه جهات پرتو دهی می‌کند. این حالت برای این است که در صورت عدم کارایی مناسب هر یک از اجزای مولد نوترون پلاسمای کانونی نظیر فیلتر، موازی‌ساز و دریچه و...، حفاظ طراحی شده جوابگوی حداکثر شار و انرژی ناشی از چشمه باشد و دز خارج از بخش درمان در حد مجاز باشد. در نهایت، شبیه سازی نهایی را با چشمه سطحی $15 \text{ cm} * 15 \text{ cm}$ با انرژی 10 keV (حداکثر انرژی پرتوهای فوق حرارتی) توسط کد MCNPX2.6 انجام داده و نتایج دوز حاصل



شکل ۳ نمای داخلی (دید از بالا) بخش درمان به همراه فانتم

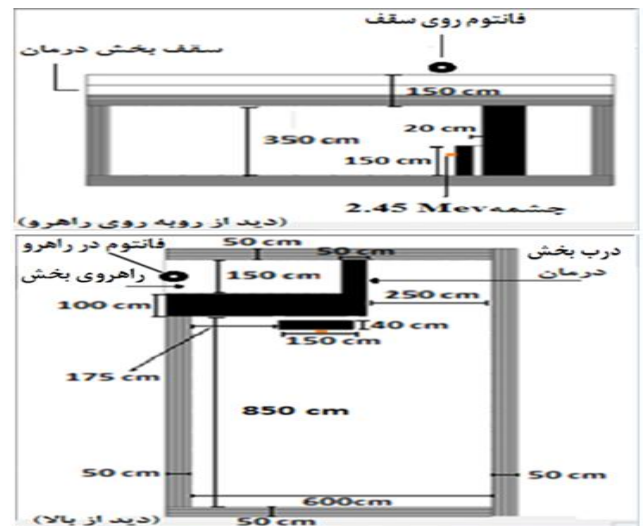
حالات ذیل برای اطمینان از حفاظسازی مناسب بخش درمان بررسی شدند: حالت (۱) و (۲) بترتیب محاسبه دز با وجود حفاظ سایه برای چشمه نقطه ای $2/45\text{ MeV}$ در فانتم ابتدای راهرو و روی سقف (شکل ۲ و ۳).



شکل ۴ موقعیت چشمه نقطه ای (حالت های ۳-۱۴) و حفاظ سایه (حالت های ۱۳-۳) و موقعیت چشمه صفحه ای (حالت های ۱۵-۱۹)

حال برای اطمینان از مجاز بودن دز در راهروی بخش درمان BNCT مکان چشمه نقطه ای و حفاظ سایه را به فاصله نزدیک درب بخش درمان انتقال می دهیم (شکل ۴). حالت (۳) الی (۱۲) محاسبه دز با تغییر مکان حفاظ سایه و چشمه نقطه ای $2/45\text{ MeV}$ در فانتم های ابتدای راهرو تا انتهای آن، که به فاصله 50 cm از هم قرار دارند (نمودار ۱)، حالت (۱۳) محاسبه دز با اضافه کردن سرب و کادمیوم و پلی اتیلن بهمراه بتن در درب برای چشمه $2/45\text{ MeV}$ در فانتم ابتدای راهرو (در این حالت قطر درب از 50 cm به 40 cm کاهش یافته) و حالت (۱۴) محاسبه دز بدون وجود حفاظ سایه برای چشمه $2/45\text{ MeV}$ در فانتم ابتدای راهرو می باشد. برای حالات دیگر موقعیت چشمه را به دیواره بخش انتقال (شکل ۴) می دهیم و از حفاظ سایه استفاده نمی کنیم. این طرح نمایی از یک بخش درمان BNCT با شرایط مناسب قرارگیری چشمه می باشد. در این طرح از یک چشمه ی سطحی $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ با انرژی 10 keV استفاده شده است.

چشمه $2/45\text{ MeV}$ در فاصله یک متری از سطح زیرین بخش درمان و در کنار حفاظ سایه قرار گرفته است. حفاظ سایه همواره در پشت چشمه قرار دارد. برای دقت در محاسبات و جلوگیری از اتلاف نوترون و حصول نتیجه ی منطقی و نزدیک به واقعیت طرح اولیه توسط کد محاسباتی MCNPX Visual Editor و با تکنیک Cell Splitting به سلول های مختلف و با اهمیت های (دستوری در کد برای اهمیت هر سلول: imp) متفاوت تقسیم بندی شده اند (شکل ۲). در شبیه سازی بخش درمان BNCT، چشمه به دو صورت نقطه ای و صفحه ای در نظر گرفته شده است. برای محاسبه دز از یک فانتم نماد یک انسان که کره ای به شعاع 15 cm محتوی عناصر موجود در بدن ($\text{H}, \text{C}, \text{O}$) استفاده شده است. برای محاسبه دز روی فانتم، از تالی F4 و فاکتور های تصحیح (تبدیل) DE و DF استفاده شده است [۷].



شکل ۱ ابعاد داخلی طرح اولیه شبیه سازی شده بخش درمان توسط کد محاسباتی MCNPX Visual Editor

لازم به ذکر است که در اجرای کد محاسباتی MCNPX خطای همه نتایج حاصل، کمتر از $0/05$ درصد بوده است و برای محاسبه دز، مجموع دز نوترون و دز گاما در نظر گرفته شده است.



شکل ۲ بخش درمان با سلول های مختلف و اهمیت های متفاوت

می‌باشد. فقط برای قدرت چشمه $10^{11} \frac{n}{s}$ در بعضی حالت ها دز غیرمجاز خواهد بود. حالت (۱۴) بدلیل بدون حفاظ سایه بودن چشمه نقطه‌ای بخش درمان در شبیه‌سازی حصول دز غیرمجاز طبیعی می‌باشد. همچنین دز غیرمجاز در چشمه سطحی حالت (۱۶) با اضافه کردن مقداری سرب به درب در حالت (۱۷) به حد مجازی رسیده است. باید توجه داشت در نواحی نزدیک درب بخش درمان (نمودار ۱) بدلیل نزدیکی به چشمه نقطه ای دز مقداری غیرمجاز خواهد بود که این مشکل با اضافه کردن مقداری از مواد جاذب و کندکننده نوترون به حفاظ قابل حل خواهد بود. اما در چشمه سطحی حالت نهایی (۱۹) که طرح واقعی تری برای بخش درمان محسوب می‌شود حفاظ بخش درمان برای هر سه قدرت چشمه کاملاً مناسب می‌باشد. در اکثر حالت ها برای حفاظ بخش درمان از بتن استفاده شده است. برای رسیدن به نتایج بهتر در حفاظ‌سازی بخش درمان و همچنین شبیه سازی واقعی تر و کم هزینه تر می توان علاوه بر بتن از مواد مختلفی مانند اکسید آلومین، گرافیت و پلی اتیلن به عنوان کند کننده نوترون و موادی مانند کادمیوم و تیتانیوم و سرب به عنوان مواد جاذب استفاده کرد.

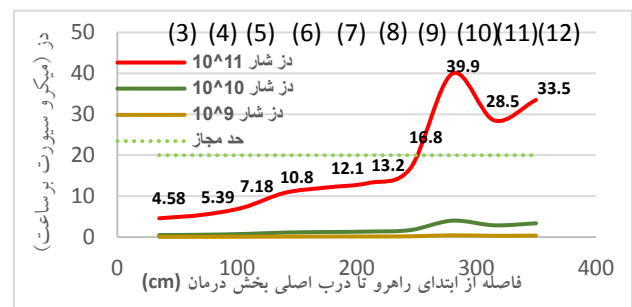
مراجع

- [۱] Barth, R.F, A.H. Soloway, R.G. Fairchild, et al, Boron neutron capture therapy for cancer. Realities and prospects. Cancer, 70(12), 1992, 2995- 3007.
- [۲] Kimura Y, Ariyoshi Y, Shimahara M, et al. Boron neutron capture therapy for recurrent oral cancer and metastasis of cervical lymph node. Appl Radiat Isot; 67(Suppl.): S47-S49, 2009.
- [۳] International Atomic Energy Agency(IAEA), Current status of neutron capture therapy, in IAEA-Tecdod-1223, IAEA: Wien, May 2001, 1-11.
- [۴] Nigg, D., Current trends and progress in the physics of BNCT, in Frontiers in Neutron Capture Therapy, Kluwer Academic / Plenum Publishing Corporation: New York, 2001, 13-21.
- [۵] V. Benzi, F. Mezzetti, F. Rocchi, M. Sumini. Feasibility analysis of a Plasma Focus neutron source for BNCT treatment of transplanted human liver. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Volume 213, January 2004 , 611-615.
- [۶] A.L. Schwarz , R.A. Schwarz, and L.L. Carter, MCNP/MCNPX Visual Editor Computer Code Manual, MCNPX version 2.6, February, 2008.
- [۷] Cember, Herman, Thomas E. Johnson. "Introduction to health physics." Medical Physics, 2008, 551-563.
- [۸] مرتضی محمد حسینی طرقي، مجموعه قوانین و مقررات انرژی هسته ای، سازمان انرژی اتمی ایران، سال ۱۳۸۰، صفحه ۱۵۹.

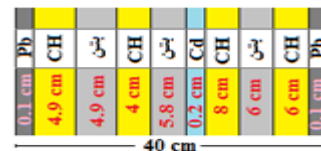
حالت (۱۵) و (۱۶) بترتیب محاسبه دز برای چشمه 10 KeV فانتوم موجود در ابتدای راهرو و انتهای آن، حالت (۱۷) محاسبه دز با اضافه کردن ۰/۱ سرب به درب برای بهبود حفاظ حالت ۱۶ برای چشمه 10 KeV در فانتوم در انتهای راهرو، حالت (۱۸) محاسبه دز برای چشمه 10 KeV در فانتوم در بالای سقف و حالت (۱۹) که در آن درب بخش درمان حالت ۱۵ از انتهای راهرو به ابتدای آن انتقال یافته است.

جدول ۲ محاسبه دز حالت های مختلف (قسمت های قرمز دز غیرمجاز)

حالات	وضعیت برای قدرت چشمه $10^{10} \frac{n}{s}$			
	دز مجموع $(\frac{\mu\text{SV}}{h})$	دز گاما $(\frac{\mu\text{SV}}{h})$	دز نوترون $(\frac{\mu\text{SV}}{h})$	وضعیت برای قدرت چشمه
۱	۰/۰۲۶۴	۰/۰۴۲۵	۰/۰۴۵۱۴	دز مجموع $(\frac{\mu\text{SV}}{h})$
۲	۰/۰۰۰۰۸۱	۰/۰۰۱۶۹	۰/۰۰۱۷۷	دز مجموع $(\frac{\mu\text{SV}}{h})$
۱۳	۰/۰۲۴	۰/۰۹۶۱	۰/۱۲۰	دز مجموع $(\frac{\mu\text{SV}}{h})$
۱۴	۰/۲۲۷	۰/۱۸۸	۰/۴۱۵	دز مجموع $(\frac{\mu\text{SV}}{h})$
۱۵	۰/۰۰۱۹	۰/۰۲۷۸	۰/۰۲۹۷	دز مجموع $(\frac{\mu\text{SV}}{h})$
۱۶	۰/۰۲۹۲	۰/۲۰۲	۰/۲۳۱	دز مجموع $(\frac{\mu\text{SV}}{h})$
۱۷	۰/۰۱۸۴	۰/۱۷۴	۰/۱۹۲	دز مجموع $(\frac{\mu\text{SV}}{h})$
۱۸	۰/۰۰۰۰۲۵	۰/۰۰۰۳۱	۰/۰۰۰۳۳	دز مجموع $(\frac{\mu\text{SV}}{h})$
۱۹	۰/۰۰۳۹	۰/۰۴۲۵	۰/۰۴۶۴	دز مجموع $(\frac{\mu\text{SV}}{h})$



نمودار ۱ توزیع دز در راهروی بخش درمان از ابتدا تا انتهای آن (حالت ۱۲-۳)



شکل ۵ مواد بکار رفته در درب حالت (۱۳)

نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده و محاسبات انجام شده توسط کد محاسباتی MCNPX مقدار حفاظ بخش درمان BNCT برای چشمه های با قدرت $10^9 \frac{n}{s}$ و $10^{10} \frac{n}{s}$ و $10^{11} \frac{n}{s}$ کاملاً مناسب