

## مطالعه برهم‌کنش‌های نوترون با بافت نرم به روش شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از

### چشمه PF

معصومه نان‌بده<sup>۱</sup>، سید محمود سادات کیایی<sup>۲\*</sup>، مصطفی حسن‌زاده<sup>۲</sup> و علی آقامحمدی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>گروه فیزیک، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران.

<sup>۲</sup>پژوهشکده گداخت و پلاسما، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

\*تهران، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده گداخت و پلاسما، کدپستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵

پست الکترونیکی: sadatkiai@yahoo.com

#### چکیده

مهم‌ترین بخش درمان به روش نوترون‌تراپی ( $NCT^1$ )، دستیابی به باریکه‌ای از نوترون‌های با شدت و انرژی مناسب و با حداقل آلودگی و آسیب است. در این پژوهش به منظور اصلاح طیف نوترون حاصل از هم‌جوشی D-D و استفاده از آن در نوترون‌تراپی، مجموعه‌ای از مواد مختلف، که اصطلاحاً مجموعه شکل‌دهنده طیف نامیده<sup>۲</sup> می‌شود، در مسیر نوترون‌های خروجی با انرژی 2.45 MeV قرار می‌گیرد، به گونه‌ای که باریکه نوترون خروجی آن از نظر شدت و انرژی برای درمان مناسب باشد. در این مقاله، این مجموعه برای یک دستگاه پلاسما کانونی  $IS^3$  توسط کد MCNPX2.6 طراحی و بهینه‌سازی شده است. هم‌چنین در این تحقیق، ضریب بهره کل ذرات تولید شده از چشمه PF  $10^9$  در نظر گرفته شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با توجه به مواد BSA3، بهترین انتخاب برای بازه انرژی نوترون‌های فوق حرارتی می‌باشد.

کلیدواژه‌گان: پلاسما کانونی، نوترون‌تراپی، مجموعه شکل‌دهنده طیف، شار، MCNPX2.6.

#### ۱. مقدمه

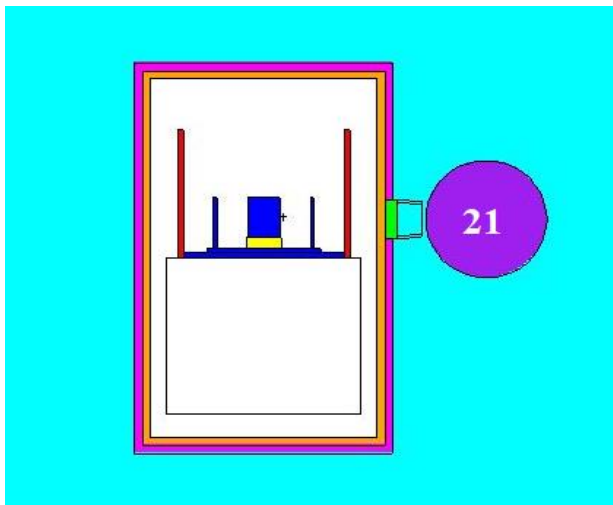
درمان به وسیله گیراندازی نوترون یک روش درمانی قابل قبول برای درمان تومورهای سرطانی است. در این روش بافت نرم توسط باریکه‌ای از نوترون فوق حرارتی تحت تابش قرار می‌گیرد، نوترون‌های خروجی را نمی‌توان به صورت مستقیم برای درمان استفاده کرد، بلکه باید انرژی و شدت نوترون‌های خروجی را بهینه نمود، هم‌چنین آلودگی‌های باریکه نوترونی را به حداقل ممکن رساند. به منظور دستیابی به این محدودیت‌ها، مجموعه‌های از مواد مختلف، که اصطلاحاً مجموعه شکل‌دهنده طیف یا BSA (Beam Shaping Assembly) نامیده می‌شود، در مسیر نوترون قرار می‌گیرد، به گونه‌ای که باریکه نوترون‌های

<sup>1</sup>Neutron Capture Therapy

<sup>2</sup>Beam Shaping Assembly.

<sup>3</sup>IRAN SUN

رنگ صفحه کاتد و کاتد ها به رنگ آبی قابل مشاهده است که به علت هم‌جنس بودن این دو قسمت می‌باشد.



شکل (۱): تصویر بافت نرم و هندسه PF شبیه‌سازی شده توسط کد MCNPX به منظور محاسبه شار نوترون.

مواد مربوط به کندکننده، فیلتر و بازتابنده در جداول ۱، ۲ و ۳ بیان شده است [8,9]. این مجموعه شامل کندکننده، بازتابنده، موازی‌ساز و فیلتر نوترون‌های حرارتی و تابش‌های گاما می‌باشند. کندکننده، انرژی نوترون‌های سریع را کاهش می‌دهد تا به انرژی مناسب برسند. بازتابنده از خروج نوترون‌های پراکنده شده از سیستم جلوگیری نموده و آن‌ها را به درون سیستم باز می‌گرداند. موازی‌کننده مخروطی شکل، نقش کانونی کردن نوترون‌های باریکه خروجی روی هدف را به عهده دارد. فیلترها، با جذب نوترون‌های حرارتی و پرتوهای گاما، اجازه‌ی عبور به آن‌ها نداده و موجب کاهش دز پرتوگیری خواهد شد [10].

جدول (۱): مواد به کار رفته در BSA1

سولول	ماده	ضخامت (cm)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )
بازتابنده	H <sub>2</sub> O	2	1
موازی‌ساز	Air	9	0.001205
فیلتر	Bismuth	3	9.78
کند کننده	Fe	2	0.669

خروجی برای درمان مناسب باشد. مجموعه شکل‌دهنده طیف شامل کندکننده، موازی‌کننده، بازتابنده، فیلتر گاما می‌باشد.

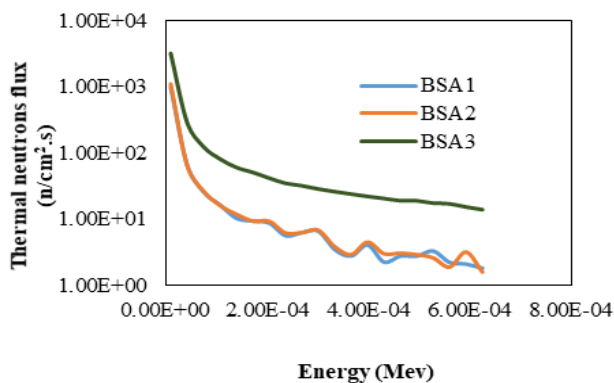
برای رسیدن به این هدف کد مونت‌کارلو، MCNPX، برای به دست آوردن حداکثر شار یکنواخت نوترونی در خروجی موازی‌ساز، با توجه به ویژگی‌های هندسی و استراتژی محافظت از تابش مناسب که مطابق با قوانین حفاظت رادیولوژیک است، مورد استفاده قرار گرفته است [1,2,3,4].

## ۲. مواد و روش کار

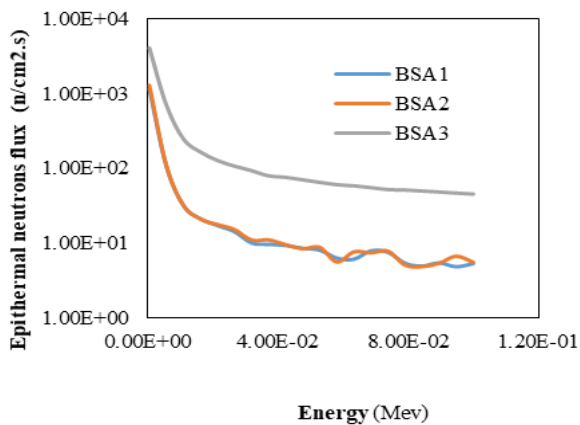
در این مطالعه از نرم افزار شبیه‌سازی MCNPX2.6 که دارای کتابخانه‌ی بسیار دقیق و گسترده‌ای از سطوح مقطع برای برای شبیه‌سازی هندسه سلول‌های مورد نظر، چشمه، بافت نرم استفاده شده است. لازم به ذکر است کد از فایل کتابخانه ENDF/B-IV برای محاسبات پارامترها استفاده می‌کند. در این کد انواع خروجی‌ها شامل جریان، شار، انرژی و دز... قابل تعریف است. در این مقاله، با استفاده از این کد شار نوترون در سه بازه انرژی نوترون‌های حرارتی، فوق حرارتی و سریع با استفاده از چشمه PF بررسی شده است. در این برنامه با استفاده از ماکروبادیها (RPP,RCC) و به کمک کارت TRn برای دوران و انتقال استفاده شده است. همچنین با استفاده از تعریف سطوح در کد، ساختار هندسی دستگاه PF طراحی شد. در این تحقیق علاوه بر ساختار هندسی این دستگاه، قسمت‌های مربوط به کندکننده نوترون، بازتابنده و فیلتر نوترون و در نهایت موازی‌ساز و بافت نرم شبیه‌سازی شد که در شکل ۱ تصویر آن با استفاده از نرم‌افزار ویژوال ادیتور نمایش داده شده است [5,6,7]. در این نرم‌افزار قسمت‌های مختلف هندسه با رنگ‌های متفاوتی نمایش داده می‌شوند که در تفکیک هندسی کمک بسیاری انجام می‌دهد به طور مثال

می شود آلودگی به نوترون های حرارتی خیلی زیاد شود. از طرفی، اگر عدد جرمی بزرگ باشد، انرژی نوترون به ناحیه فوق حرارتی نمی رسد و بنابراین حالت بهینه بایستی در نظر گرفته شود.

بنابراین با توجه به این که معمولا در نوترون تراپی برای درمان از شار نوترون های فوق حرارتی استفاده می شود لذا شکل ۳ با توجه به مواد BSA3، بهترین انتخاب برای این بازه انرژی نوترون ها می باشد. همچنین شکل ها نشان می دهند که با افزایش انرژی نوترون ها مقدار شار عبوری کاهش می یابد.



شکل (۲): شار نوترون های حرارتی در مجموعه شکل دهنده طیف.



شکل (۳): شار نوترون های فوق حرارتی در مجموعه شکل دهنده طیف.

بایستی یادآوری کرد که در جدول ۲ بدون تغییر در ضخامت آن ها، ماده بازتابنده را تغییر داده و سرب (Pb) را جایگزین H<sub>2</sub>O و Air در پوسته موازی ساز شده و در جدول ۳ ماده کندکننده را تغییر داده و آلومینیوم جایگزین آهن شده است.

جدول (۲): مواد به کار رفته در BSA2.

چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	ضخامت (cm)	ماده	سلول
11.34	2	Pb	بازتابنده
11.34	9	Pb	موازی ساز
9.78	3	Bismuth	فیلتر
0.669	2	Fe	کند کننده

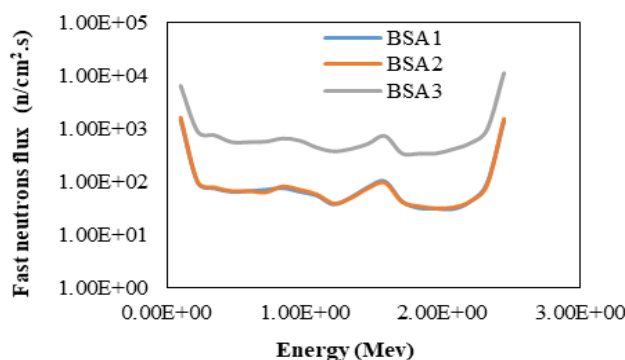
جدول (۳): مواد به کار رفته در BSA3.

چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	ضخامت (cm)	ماده	سلول
11.34	2	Pb	بازتابنده
11.34	9	Pb	موازی ساز
9.78	3	Bismuth	فیلتر
2.70	2	AL	کند کننده

در این مطالعه با استفاده از تالی F2 موجود در کد شار نوترون های عبوری از سطح بافت نرم محاسبه شده که در شکل های ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. شکل های ۲، ۳ و ۴ به ترتیب بیانگر شار نوترون در سه بازه نوترون ها حرارتی، فوق حرارتی و سریع می باشند.

در انتخاب این مواد، باید جرمی نزدیک به جرم نوترون داشته و سطح مقطع جذب کم برای نوترون های فوق حرارتی و سطح مقطع پراکندگی بالا برای نوترون های سریع دارا باشند. این مواد نباید در صورت تابش های با شدت بالا از هم متلاشی شده یا مواد سمی انتشار دهند. به این ترتیب، مواد کندکننده با عدد جرمی کم باعث می شوند تا نوترون ها به سرعت کند شوند. با وجود این، اگر عدد جرمی مواد خیلی کم باشد، باعث

طیف شار نوترون‌های فوق حرارتی برای درمان از طریق دستگاه پلاسما کانونی IS توسط کد MCNPX2.6 طراحی و شبیه‌سازی شده است. در این تحقیق، ضریب بهره کل ذرات تولید شده از چشمه PF  $10^9$  در نظر گرفته شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با توجه به مواد BSA3، بهترین انتخاب برای این بازه انرژی نوترون‌ها می‌باشد. البته قابل ذکر است که پارامترهای بسیاری در بهینه‌سازی مجموعه شکل‌دهنده طیف سهمیم هستند، از جمله شکل هندسی، جنس و ضخامت مواد، ترتیب قرارگیری آن‌ها و غیره. با توجه به تعداد این پارامترها، نمی‌توان همه آن‌ها را به صورت هم‌زمان بهینه نمود، لذا در این تحقیق ابتدا یکی از پارامترها را بهینه شده است و در ادامه این پژوهش با توجه به نتایج بدست آمده، پارامترهای دیگری بهینه خواهند شد.



شکل (۴): شار نوترون‌های سریع در مجموعه شکل‌دهنده طیف.

در نهایت می‌توان گفت که پارامترهای بسیاری در طراحی یک BSA (مجموعه شکل‌دهنده طیف) سهمیم هستند، از جمله شکل هندسی، جنس و ضخامت مواد، ترتیب قرارگیری آن‌ها و غیره. با توجه به تعداد این پارامترها، نمی‌توان همه آن‌ها را به صورت هم‌زمان بهینه نمود، لذا در هر فاز، یکی از پارامترها را بهینه کرده و در فاز بعدی با توجه به نتایجی که از مرحله قبل به دست آمده، پارامتر دیگری بهینه می‌گردد. لذا در این مقاله فقط مواد مختلف به منظور بهینه‌سازی شار نوترون‌های فوق حرارتی از طریق چشمه PF انجام شده است. لازم به ذکر است در تمام محاسبات مقدار خطای حاصل از کد کم‌تر از 0.001 بوده است.

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله، مجموعه‌ای از مواد مختلف، به منظور بهینه‌سازی

#### ۵. مراجع

- [1]. Kiai SS, Adlparvar S, Sheibani S, Elahi M, Safarien A, Farhangi S, Zirak AR, Alhooie S, Mortazavi BN, Khalaj MM, Khanchi AR. Design a 10 kJ IS Mather Type Plasma Focus for Solid Target Activation to Produce Short-Lived Radioisotopes  $^{12}\text{C}(\text{d}, \text{n})^{13}\text{N}$ . Journal of fusion energy. 2010 Oct 1;29(5):421-6.
- [2]. R.A. Schwarz, L.L. Carter, "Visual Editor to Create and Display MCNP Input Files," Trans. Amer. Nucl. Soc., 77, 311-312 American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois (1997).
- [3]. R.A. Schwarz, L.L. Carter, K.E. Hillesland, V.E. Roetman, "Advanced MCNP Input File Creation Using the Visual Editor," Proc. Am. Nucl. Soc. Topical, Technologies for the New Century, 2, 317-324, April, 1998, Nashville TN
- [4]. D.B. Pelowitz, "MCNPX User's Manual Version 2.6.0", LA-CP-07-1473, April 2008, page: H7-8
- [5]. Verbeke, Jérôme M., Jasmina L. Vujic, and Ka-Ngo Leung. "Neutron beam optimization for boron neutron capture therapy using the DD and DT high-energy neutron sources." Nuclear technology 129.2 (2000): 257-278.
- [6]. Lavelle, C. M., et al. "Neutronic design and measured performance of the Low Energy Neutron Source (LENS) target moderator reflector

- assembly." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 587.2-3 (2008): 324-341..
- [7]. Durisi, E., et al. "Design of an epithermal column for BNCT based on D-D fusion neutron facility." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 574.2 (2007): 363-369.
- [8]. R. A. Schwarz, L. L. Carter, and N. Shrivastava, "Creation of MCNP Input Files With a Visual Editor," Proceedings of the 8th International Conference on Radiation Shielding, Arlington, Texas, April 24-27, 1994, pp 454-459, American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois (1994).
- [9]. L.L. Carter, R.A. Schwarz, "Visual Creation of Lattice Geometries for MCNP Criticality Calculations," Transactions of the American Nuclear Society, 77, 223 American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois (1997).
- [10]. Kasesaz, Yaser, Hossein Khalafi, and Faezeh Rahmani. "Design of an epithermal neutron beam for BNCT in thermal column of Tehran research reactor." Annals of Nuclear Energy 68 (2014): 234-238.