

محاسبه طیف و شار نوترونی در سه بیم تیوب شمالی راکتور تحقیقاتی تهران برای استفاده در نوترون تراپی با بور با کد محاسباتی مونت کارلو

مجید زمانی^{۱*}، حسین خلفی^۲ و محسن شایسته^۳

^۱ امور حفاظت در برابر اشعه کشور، مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

^۲ پژوهشکده توسعه راکتور و شتاب‌دهنده‌ها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

^۳ تهران، انتهای خیابان امیرآباد شمالی (کارگر شمالی)، سازمان انرژی اتمی ایران، امور حفاظت در برابر اشعه کشور، کد پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹

پست الکترونیکی: mjzamani@aeoi.org.ir

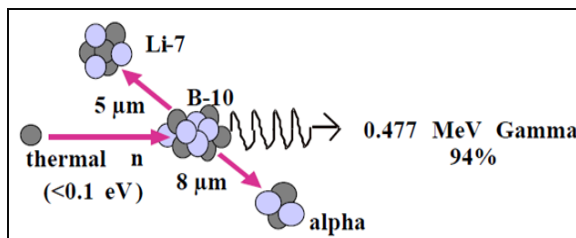
چکیده

به منظور بررسی امکان استفاده از بیم تیوب‌های راکتور تحقیقاتی تهران در درمان، به وسیله گیراندازی نوترون توسط بور^۱، لازم است یکی از بیم تیوب‌های شش‌گانه راکتور تهران که از نظر شار و طیف نوترونی مناسب‌تر است، انتخاب شود. برای انتخاب مناسب‌ترین بیم تیوب، آخرین وضعیت قلب راکتور (قلب شماره ۵۵) با کد محاسباتی مونت کارلو^۲، شبیه‌سازی شد و سپس طیف و شار نوترون در ابتدا، میانه و انتهای هر یک از سه بیم تیوب شمالی در حالت‌های مختلف داخل بودن میله‌های کنترل^۳ محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد با آنکه طیف نوترونی در همه بیم تیوب‌ها تقریباً یکسان است، شرایط شار در بیم تیوب شمال غربی بهتر است؛ لذا برای کاربرد در روش نوترون تراپی با بور^۱، مناسب‌تر است.

کلیدواژگان: نوترون تراپی با بور، راکتور تحقیقاتی تهران، کد محاسباتی مونت کارلو، بیم تیوب شمالی، شار نوترون.

۱. مقدمه

نوترون تراپی با بور، یک روش درمانی مناسب و امیدبخش در درمان بسیاری از سرطان‌ها به خصوص امراضی همچون تومورهای مغزی و سرطان پوست، ملانوما، است. در این روش، ابتدا داروی حامل بور، ^{10}B ، از طریق تزریق وریدی وارد بدن بیمار می‌شود و از طریق سیستم گردش خون، در ناحیه تومور جذب می‌شود. سپس ناحیه تومور به وسیله یک دسته پرتوی نوترونی مناسب بمباران شده و هسته‌های بور با گیراندازی نوترون، طی واکنش $^7Li(n,\alpha)^{10}B$ ، لیتیوم و ذرات پر انرژی α تولید می‌کنند. برد این ذرات در حدود ابعاد سلولی است؛ بنابراین، با تخلیه انرژی خود در سلول‌های هم‌جوار باعث نابودی آن‌ها می‌شوند. شکل (۱) این واکنش را نمایش می‌دهد.

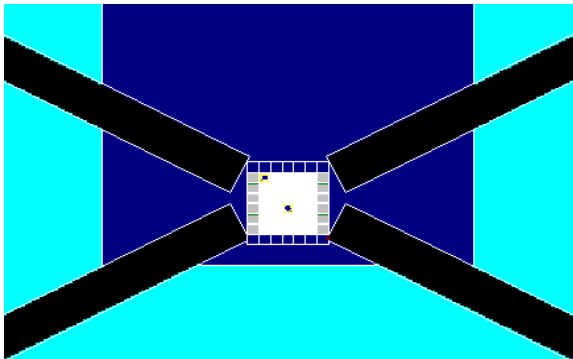


شکل ۱: پاره‌های شکافت تولیدشده در واکنش هسته‌ای BNCT

یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در موفقیت آمیز بودن درمان در این روش، انتخاب چشمه نوترونی مناسب است. امروزه در بیشتر مراکز فعال نوترون تراپی با بور، از راکتورهای تحقیقاتی به‌عنوان چشمه‌های نوترونی با شار بالا استفاده می‌کنند. فهرستی از این راکتورها منتشر شده است [۱]. از جمله

1. Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)
2. Monte Carlo N-Particle Transport Code, V.4C
3. Beginning of the Core (BOC), Middle of the Core (MOC), End of the Core (Fresh core or EOC)

ستون حرارتی						
9	IR	GR	GR	GR	IR	GR
8	SFE	RR	SFE	SFE	SFE	SFE
7	SFE	SFE	SFE	SFE	SR	SFE
6	SFE	SR	SFE	IR	SFE	SFE
5	SFE	SFE	SFE	SFE	SR	SFE
4	SFE	SFE	SR	SFE	SFE	SFE
3	SFE	SFE	SFE	IR	SFE	IR
2	GR	GR	IR	GR	GR	GR
1	GR	GR	GR	GR	GR	GR
	A	B	C	D	E	F



شکل ۳: شبیه‌سازی موقعیت بیم‌تیوب‌های استوانه‌ای (شمال غربی و شرقی) به وسیله کد محاسباتی MCNP در اطراف قلب راکتور تحقیقاتی تهران

پس از شبیه‌سازی کامپیوتری قلب و بیم‌تیوب‌های اطراف آن، شار نوترونی‌های سریع و نیز شار کل برای وضعیت‌های مختلف داخل بودن میله‌های کنترل قلب و نیز در نقاط ابتدا، میانه و انتهای هر یک از بیم‌تیوب‌های شمالی محاسبه شده است. با توجه به اینکه نتایج خروجی کد شبیه‌سازی (تعداد در واحد حجم سلول) به ازای یک نوترون است، با استفاده از رابطه زیر، شار واقعی کل در واحد زمان به دست آمد [۳]:

$$S(n/s) = \left(\frac{1 \text{ joule/s}}{\text{Watt}} \right) \left(\frac{1 \text{ MeV}}{1.602 \times 10^{-13} \text{ joule}} \right) \left(\frac{\text{Fission}}{180 \text{ MeV}} \right) \left(\frac{\bar{q}_n}{\text{Fission}} \right) P(\text{Watt})$$

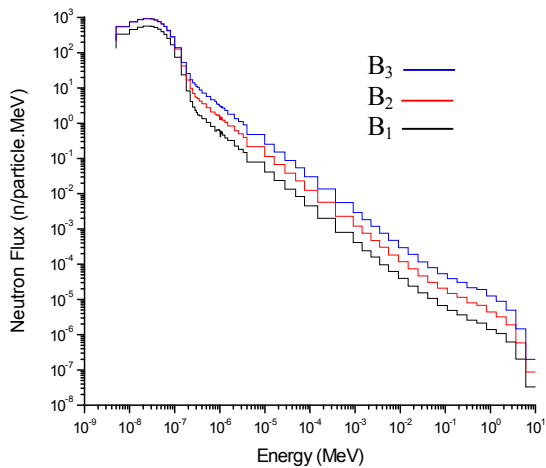
که در آن:

S : قدرت چشمه؛

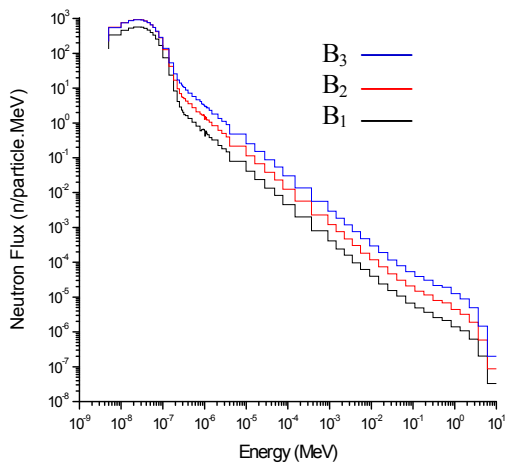
چشمه‌های ممکن دیگری که مورد بررسی قرار گرفته‌اند، می‌توان به مولدهای نوترون و شتاب‌دهنده‌ها اشاره کرد [۲]. طیف نوترون‌های خروجی از قلب راکتورهای تحقیقاتی، از جمله راکتور تهران، در محدوده وسیعی از انرژی‌ها قرار دارد. از آنجاکه برای انجام درمان، نوترون‌های فوق حرارتی با شار نوترونی بالا (از مرتبه $10^9 n.cm^{-1}.s^{-1}$) مورد نیاز است [۳]، لازم است طیف و شار نوترون‌های خروجی قلب، در این ناحیه قرار گیرد. این کار به وسیله چینش مناسبی از مواد به‌عنوان فیلتر و کندکننده در داخل بیم‌تیوب انجام می‌شود. عموماً پس از قرارگیری این مجموعه، شار نوترون مورد اشاره به شدت افت می‌کند؛ لذا لازم است چشمه نوترونی دارای شار نوترونی اولیه بالایی به‌خصوص در ناحیه نوترون‌های سریع باشد. در این تحقیق، برای انتخاب بهترین بیم‌تیوب، شار و طیف نوترون در ابتدا، میانه و انتهای هر یک از سه بیم‌تیوب شمالی راکتور تهران در وضعیت‌های مختلف قلب شامل حالاتی که به ترتیب حدود ۲۰-۱۰٪، ۵۰-۴۰٪ و ۷۰٪ میله‌های کنترل داخل قلب باشد، به وسیله شبیه‌سازی با کد محاسباتی مونت کارلو [۴] محاسبه شده است. از مقایسه شرایط طیف و شار نوترون می‌توان مناسب‌ترین بیم‌تیوب را برای روش نوترون‌تراپی با بور انتخاب کرد.

۲. روش کار

پس از شبیه‌سازی آخرین چینش قلب راکتور تهران (شکل ۲) و بیم‌تیوب‌های شمالی آن، شار و طیف نوترون ۶۹ گروهی (طبق تقسیم‌بندی انرژی کد ویمز) در ابتدا، میانه و انتهای هر یک از بیم‌تیوب‌ها محاسبه شد. برای محاسبه شار نوترون‌های حرارتی، فوق حرارتی، سریع و نیز مجموع شار بر حسب $n.cm^{-1}.s^{-1}$ از همین روش استفاده شد. عامل تعیین‌کننده در انتخاب بیم‌تیوب مناسب، کمینه‌بودن افت شار در ناحیه نوترون‌های سریع است؛ بنابراین، برای انتخاب بهترین بیم‌تیوب، شار کل و شار نوترون‌های سریع بررسی شده است. شکل (۳) موقعیت برخی از بیم‌تیوب‌های قلب را نشان می‌دهد.



شکل ۵: طیف نوترون در ابتدای بیم تیوبها در حالت MOC. نمودارهای عمودی و افقی بر حسب لگاریتم کمیتها رسم شده است.



شکل ۶: طیف نوترون در ابتدای بیم تیوبها در حالت EOC. نمودارهای عمودی و افقی بر حسب لگاریتم کمیتها رسم شده است.

نمودارهای میله‌ای ۱ تا ۳ مقادیر عددی و نتایج مقایسه شار نوترون‌های سریع و نیز شار نوترونی کل (شامل مجموع شار نوترون‌های حرارتی، فوق حرارتی و سریع) را در وضعیت‌های مختلف میله‌های کنترل نشان می‌دهند. این نمودارها برای هر یک از سه بیم تیوب شمالی راکتور تحقیقاتی تهران و به‌ازای یک ذره از چشمه ساطع شده از قلب راکتور رسم شده است؛ بنابراین، در هر یک از این نمودارها شش حالت برای بررسی وضعیت شار قابل تصور

P : توان اسمی راکتور تهران و برابر با ۵ مگاوات) و

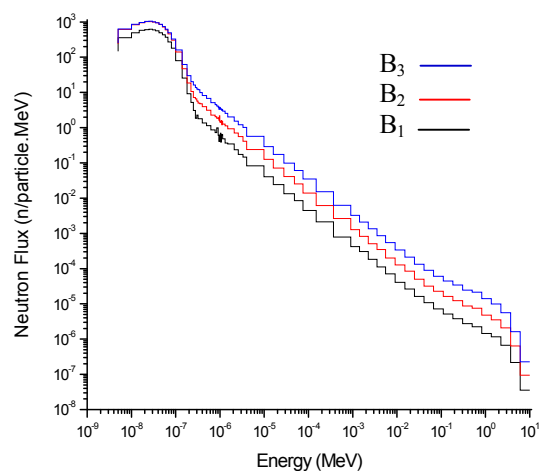
\bar{g}_n : تعداد نوترون‌های تولیدی به‌ازای هر شکافت است.

با ضرب خروجی‌های برنامه در عدد بالا، می‌توان

شار کل بیم تیوب‌های مختلف را در واحد زمان محاسبه کرد.

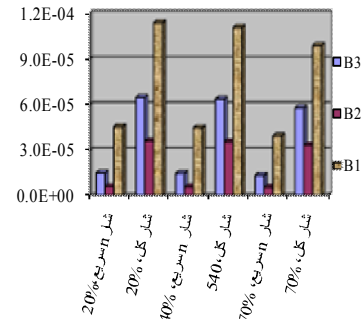
۳. نتایج

در شکل‌های ۴ تا ۶، طیف نوترون‌های خروجی (تعداد ذرات نوترون در واحد حجم سلول بر حسب انرژی بر حسب MeV، به‌ازای یک ذره)، به‌عنوان نمونه فقط در ابتدای بیم تیوب‌های مختلف شمالی، به‌ترتیب در موقعیت‌های مختلف میله‌های کنترل و برای بیم تیوب‌های متفاوت، نشان داده شده است. همان‌طور که به‌وضوح در این شکل‌ها دیده می‌شود، از نظر طیف نوترون‌ها، تفاوت چشمگیری میان بیم تیوب‌های شمالی دیده نمی‌شود و همگی دارای طیفی مشابه طیف شکافت هستند؛ بنابراین از این لحاظ، برتری درخور توجهی میان بیم تیوب‌ها وجود ندارد. از سوی دیگر، لازم است وضعیت شار نیز در آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

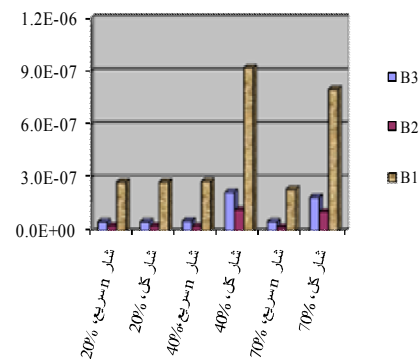


شکل ۴: طیف نوترون در ابتدای بیم تیوبها در حالت BOC. نمودارهای عمودی و افقی بر حسب لگاریتم کمیتها رسم شده است.

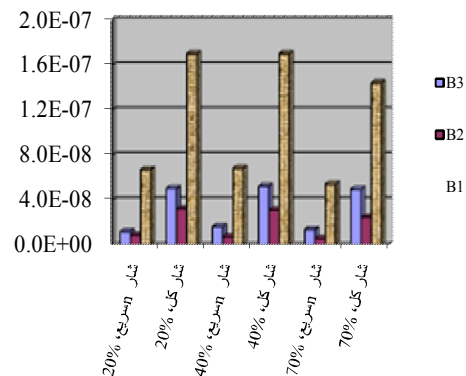
خواهد بود. با استفاده از این نمودارها می توان وضعیت کلی شار را ملاحظه و مقایسه کرد.



نمودار ۱: مقایسه شار نوترون‌های سریع و شار مجموع در موقعیت BOC، برای بیم تیوب‌های مختلف و در حالت‌های مختلف داخل بودن میله‌های کنترل در قلب



نمودار ۲: مقایسه شار نوترون‌های سریع و شار مجموع در موقعیت MOC، برای بیم تیوب‌های مختلف و در حالت‌های مختلف داخل بودن میله‌های کنترل در قلب

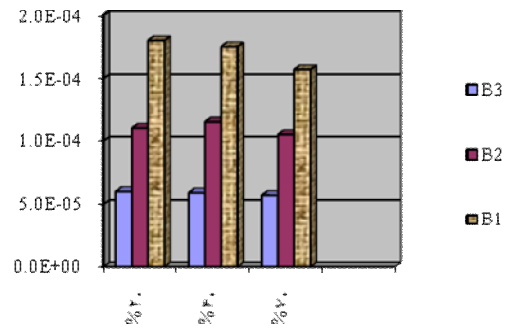


نمودار ۳: مقایسه شار نوترون‌های سریع و شار مجموع در موقعیت EOC، برای بیم تیوب‌های مختلف و در حالت‌های مختلف داخل بودن میله‌های کنترل در قلب

همان‌طور که از نمودارها ملاحظه می‌شود، برخلاف حالت قبل که از نظر طیف، تفاوت چشمگیری وجود نداشت، در این حالت، از نظر شار تفاوت قابل توجهی میان بیم تیوب‌های شمالی وجود دارد، به‌ویژه در ابتدا و میانه بیم تیوب‌ها. با بررسی نمودارهای ۱ تا ۳ می‌توان دریافت بدون در نظر گرفتن چگونگی وضعیت میله‌های کنترل، شار نوترون‌های سریع و شار کل نوترون‌ها در بیم تیوب شمال غربی (B_۱) نسبت به بیم تیوب شمال شرقی (B_۲) و شمالی (B_۳) به‌طور قابل توجهی بیشتر است. علت این امر وجود بلوک‌های گرافیتی در مجاورت بیم تیوب شمال شرقی راکتور تهران است که باعث جذب نوترون‌ها می‌شود. همچنین می‌توان دریافت که داخل بودن میله‌های کنترل در قلب در میزان شار ورودی به بیم تیوب‌های شمالی مؤثر است؛ برای مثال، شار در حالت ۴۰ درصد داخل بودن میله کنترل، کمتر از حالتی است که در آن، ۲۰ درصد میله کنترل داخل باشد. در واقع، داخل بودن هرچه بیشتر میله کنترل باعث جذب و کاهش شار نوترون در بیم تیوب می‌شود؛ بنابراین، بهتر است برای افزایش شار، تا جایی که به‌طور عملی ممکن است، میله‌های کنترل را از قلب خارج کرد.

از آنجاکه برای بهینه‌سازی طیف سعی می‌شود مجموعه شکل‌دهنده شار و طیف به چشمه نزدیک‌ترین فاصله را داشته باشد تا افت شار کمتر باشد، برای انتخاب بیم تیوب مناسب‌تر، باید شار نوترون در ابتدا و میانه بیم تیوب‌های مختلف نیز با یکدیگر مقایسه شوند. نتایج نشان می‌دهد این وضعیت نیز برای بیم تیوب شمال غربی مناسب‌تر بوده و از این لحاظ نیز، این بیم تیوب استوانه‌ای مناسب‌تر است. در نمودار ۴ شار نوترون در ابتدای بیم تیوب‌های مختلف شمالی به‌ازای یک ذره با یکدیگر مقایسه شده است.

افت شار در بیم تیوب نیز کمتر است؛ بنابراین، به منظور بهینه‌سازی طیف برای درمان، در مرحله بعد، مناسب‌تر است. بدین سبب است که عموماً میزان شار نوترون‌های سریع یک چشمه جهت ارزیابی اولیه، برای به‌کارگیری در این روش درمانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه در حال حاضر، بیم تیوب‌های جنوبی راکتور تحقیقاتی تهران، یا به علت مشکلات فنی یا به علت اختصاص یافتن آن‌ها از قبل برای فعالیت‌های تحقیقاتی دیگری همچون رادیوگرافی، پرتودهی نمونه‌ها و... قابلیت به‌کارگیری در روش نوترون‌تراپی با بور را ندارند، نتایج این محاسبات که به‌طور خلاصه در نمودار ۴ نمایش یافته است، نشان می‌دهد بیم تیوب شمال غربی (B_1) راکتور تهران، از لحاظ مجموع شار نوترونی و نیز نوترون‌های سریع نسبت به بیم تیوب شمال شرقی (B_2) و بیم تیوب شمالی (B_3)، از نظر طیف و شار ارجح است. بیشترین شار نیز در ابتدای این بیم تیوب وجود دارد؛ بنابراین، برای کاربرد در روش نوترون‌تراپی با بور انتخاب و مورد بررسی بیشتر قرار گیرد.



نمودار ۴: مقایسه شار مجموع نوترون‌ها به‌ازای یک ذره از چشمه در ابتدای بیم تیوب‌های مختلف (شمالی، شمال غربی و شمال شرقی)

۴. بحث و نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، مزیت نصب مجموعه شکل‌دهنده شار و طیف در بیم تیوب منتخب راکتور جهت نوترون‌تراپی با بور آن است که باعث حذف قسمت عمده نوترون‌هایی غیر از نوترون‌های فوق حرارتی مورد نیاز می‌شود؛ اما در برابر این مزیت، باعث افت شدید شدت این نوترون‌ها نیز می‌گردد. از آنجاکه این عامل بر زمان پرتودهی بیمار فوق‌العاده تأثیر می‌گذارد و باعث افزایش دز دریافتی بیمار در طول پرتودهی می‌شود، واضح است که هر چه میزان شار نوترون‌های سریع اولیه ساطع شده از چشمه بیشتر باشد،

۵. مراجع

[1] www.naweb.iaea.org/neutroncap_the_list.htm

[۲] کاسه‌ساز، ی.، شهریاری، م.، «بهینه‌سازی طیف حاصل از مولدهای نوترون به‌منظور استفاده در روش BNCT»، کنفرانس هسته‌ای ایران، اسفند ۸۶، یزد.

[3] The Current Status of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT), IAEA-Tecdoc-1223, May 2001. Vien, Austria.

[4] MCNP- A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory by: X-5 Monte Carlo Team, April 24, 2003 (Revised 10/3/05).