مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۱، شمارهٔ ۳، تابستان ۱۳۹۲

محاسبه طیف و شار نوترونی در سه بیم‌تیوب شمالی راکتور تحقیقاتی تهران برای استفاده در نوترون‌تراپی با بور با کد محاسباتی مونت کارلو

مجید زمانی[۱*]، حسین خلفی[۲] و محسن شایسته[۲]

[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 هسته ای، تهران، ایران.

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

پست الکترونیکی: mjzamani@aeoi.org.ir

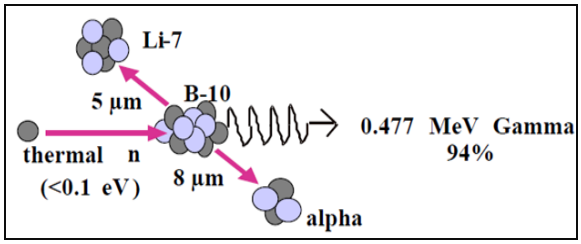
چکیده

به‌منظور بررسی امکان استفاده از بیم‌تیوب‌های راکتور تحقیقاتی تهران در درمان، به‌وسیلهٔ گیراندازی نوترون توسط بور[۱]، لازم است یکی از بیم‌تیوب‌های شش‌گانهٔ راکتور تهران که از نظر شار و طیف نوترونی مناسب‌تر است، انتخاب شود. برای انتخاب مناسب‌ترین بیم‌تیوب، آخرین وضعیت قلب راکتور (قلب شمارهٔ ۵۵) با کد محاسباتی مونت کارلو[۲]، شبیه‌سازی شد و سپس طیف و شار نوترون در ابتدا، میانه و انتهای هر یک از سه بیم‌تیوب شمالی در حالت‌های مختلف داخل‌بودن میله‌های کنترل[۳] محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد با آنکه طیف نوترونی در همهٔ بیم‌تیوب‌ها تقریباً یکسان است، شرایط شار در بیم‌تیوب 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

نوترون‌تراپی با بور، یک روش درمانی مناسب و امیدبخش در درمان بسیاری از سرطان‌ها به‌خصوص 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 ناحیهٔ تومور جذب می‌شود. سپس ناحیهٔ تومور به‌وسیلهٔ یک دسته پرتوی نوترونی مناسب بمباران شده و هسته‌های بور با گیراندازی نوترون، طی واکنش $^{7}Li(n,\alpha)^{10}B$، لیتیوم و ذرات پر انرژی α تولید می‌کنند. برد این ذرات در حدود ابعاد سلولی است؛ بنابراین، با تخلیهٔ 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 موفقیت‌آمیزبودن درمان در این روش، انتخاب چشمهٔ نوترونی مناسب است. امروزه در بیشتر مراکز فعال نوترون‌تراپی با بور، از راکتورهای تحقیقاتی به‌عنوان چشمه‌های نوترونی با شار بالا استفاده می‌کنند. فهرستی از این راکتورها منتشر شده است [۱]. ازجمله

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)

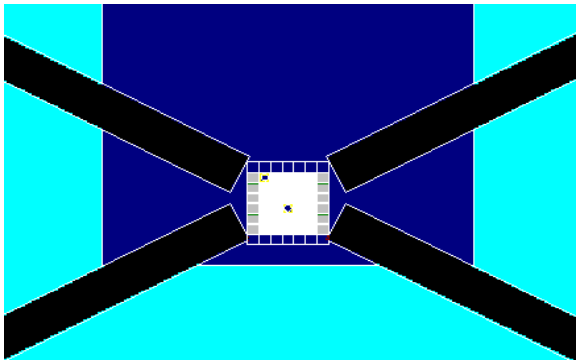
چشمه‌های ممکن دیگری که مورد بررسی قرار گرفته‌اند، می‌توان به مولدهای نوترون و شتاب‌دهنده‌ها اشاره کرد [۲].

طیف نوترون‌های خروجی از قلب راکتورهای تحقیقاتی، ازجمله راکتور تهران، در محدودهٔ وسیعی از انرژی‌ها قرار دارد. ازآنجاکه 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 به‌وسیلهٔ چینش مناسبی از مواد به‌عنوان فیلتر و کندکننده در داخل بیم‌تیوب انجام می‌شود. عموماً پس از قرارگیری این مجموعه، شار نوترون مورد اشاره به‌شدت افت می‌کند؛ لذا لازم است چشمهٔ نوترونی دارای شار نوترونی اولیهٔ بالایی به‌خصوص در ناحیهٔ نوترون‌های سریع باشد. در این تحقیق، برای انتخاب بهترین بیم‌تیوب، شار و طیف نوترون در ابتدا، میانه و انتهای هریک از سه بیم‌تیوب شمالی راکتور تهران در وضعیت‌های مختلف قلب شامل حالاتی که به‌ترتیب حدود ۲۰٪-۱۰٪، ۵۰٪-۴۰٪ و ۷۰٪ میله‌های کنترل داخل قلب باشد، به‌وسیلهٔ شبیه‌سازی با کد محاسباتی مونت کارلو [٤] محاسبه شده است. از مقایسهٔ 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 ٦٩ گروهی (طبق تقسیم‌بندی انرژی کد ویمز) در ابتدا، میانه و انتهای هر یک از بیم‌تیوب‌ها محاسبه شد. برای محاسبهٔ 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 ناحیهٔ نوترون‌های سریع است؛ بنابراین، برای انتخاب بهترین بیم‌تیوب، شار کل و شار نوترون‌های سریع بررسی شده است. شکل (۳) موقعیت برخی از بیم تیوب‌های قلب را نشان می‌دهد.

	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) به‌وسیلهٔ 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 داخل‌بودن 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 رابطهٔ زیر، شار واقعی کل در واحد زمان به‌دست آمد [۳]:

$$S(n/s) = \left(\frac{1\ joule/s}{Watt}\right)\left(\frac{1MeV}{1.602E-13\ joule}\right)\left(\frac{Fission}{180MeV}\right)\left(\frac{\bar{g}_n}{Fission}\right)P(Watt)$$

که در آن:

S: قدرت چشمه؛

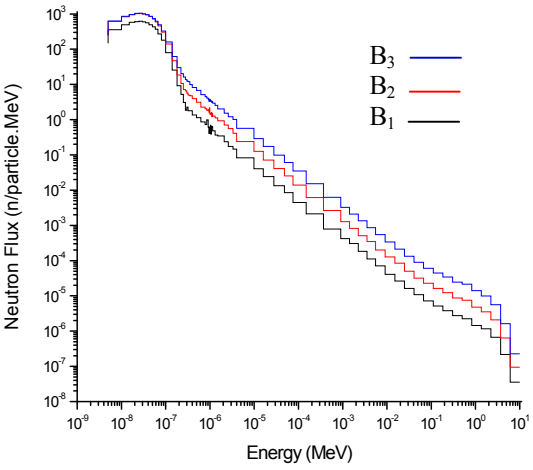
P: توان اسمی راکتور تهران و برابر با ۵ مگاوات) و

$\overline{\vartheta_n}$: تعداد نوترون‌های تولیدی به‌ازای هر شکافت است.

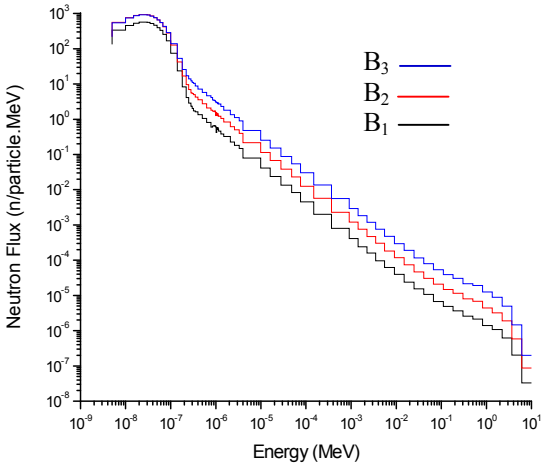
با ضرب خروجی‌های برنامه در عدد بالا، می‌توان شار کل بیم‌تیوب‌های مختلف را در واحد زمان محاسبه کرد.

۳. نتایج

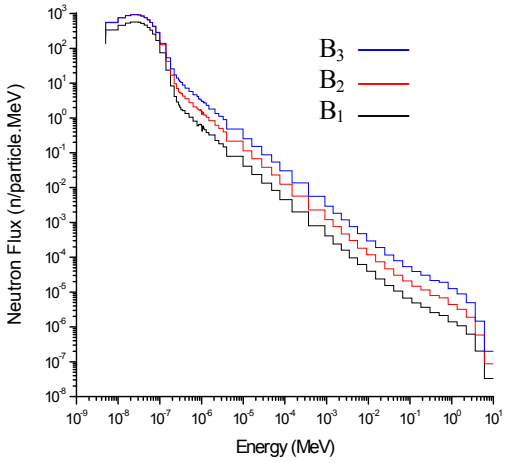
در شکل‌های ٤ تا ٦، ، طیف نوترون‌های خروجی (تعداد ذرات نوترون در واحد حجم سلول بر حسب انرژی بر حسب MeV، به‌ازای یک ذره)، به‌عنوان نمونه فقط در ابتدای بیم‌تیوب‌های مختلف شمالی، به‌ترتیب در موقعیت‌های مختلف میله‌های کنترل و برای بیم‌تیوب‌های متفاوت، نشان داده شده است. همان‌طور که به‌وضوح در این شکل‌ها دیده می‌شود، از نظر طیف نوترون‌ها، تفاوت چشمگیری میان بیم‌تیوب‌های شمالی دیده نمی‌شود و همگی دارای طیفی مشابه طیف شکافت هستند؛ بنابراین از این لحاظ، برتری درخور توجهی میان بیم‌تیوب‌ها وجود ندارد. از سوی دیگر، لازم است وضعیت شار نیز در آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد.



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



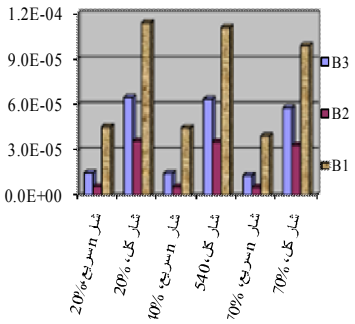
شکل ۵: طیف نوترون در ابتدای بیم‌تیوب‌ها در حالت MOC. نمودارهای عمودی و افقی بر حسب لگاریتم کمیت‌ها رسم شده است.



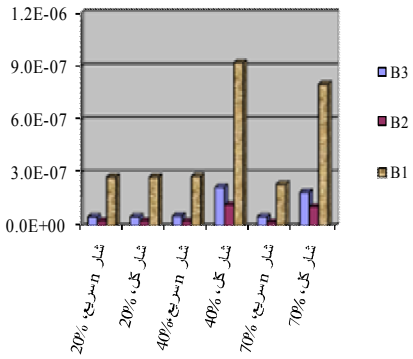
شکل ۶: طیف نوترون در ابتدای بیم‌تیوب‌ها در حالت EOC. نمودارهای عمودی و افقی بر حسب لگاریتم کمیت‌ها رسم شده است.

نمودارهای میله‌ای ۱ تا ۳ مقادیر عددی و نتایج مقایسهٔ 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 بیم‌تیوب 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

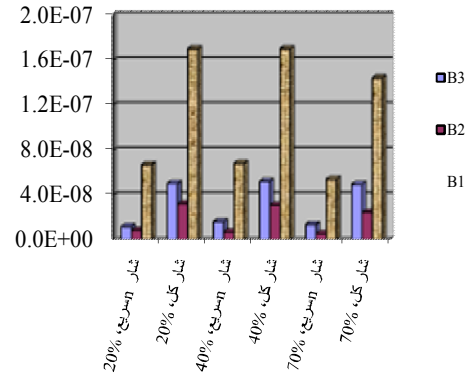
خواهد بود. با استفاده از این نمودارها می‌توان وضعیت کلی شار را ملاحظه و مقایسه کرد.



نمودار ۱: مقایسهٔ 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: مقایسهٔ شار نوترون‌های سریع و شار مجموع در موقعیت MOC، برای بیم‌تیوب‌های مختلف و در حالت‌های مختلف داخل بودن میله‌های کنترل در قلب

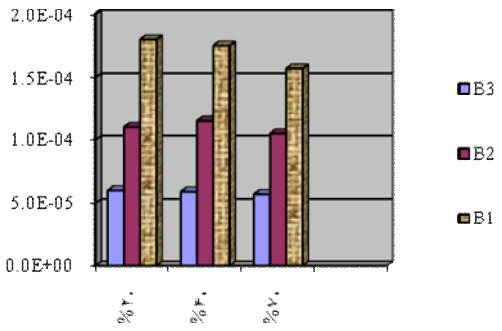


نمودار ۳: مقایسهٔ شار نوترون‌های سریع و شار مجموع در موقعیت EOC، برای بیم تیوب‌های مختلف و در حالت‌های مختلف داخل بودن میله‌های کنترل در قلب

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 بیم‌تیوب‌های شمالی وجود دارد، به‌ویژه در ابتدا و میانهٔ بیم‌تیوب‌ها. با بررسی نمودارهای ۱ تا ۳ می‌توان دریافت بدون در نظر گرفتن چگونگی وضعیت میله‌های کنترل، شار نوترون‌های سریع و شار کل نوترون‌ها در بیم‌تیوب شمال غربی (B_1) نسبت به بیم‌تیوب شمال شرقی (B_2) و شمالی (B_3) به‌طور قابل توجهی بیشتر است. علت این امر وجود بلوک‌های گرافیتی در مجاورت بیم‌تیوب شمال شرقی راکتور تهران است که باعث جذب نوترون‌ها می‌شود. همچنین می‌توان دریافت که داخل‌بودن میله‌های کنترل در قلب در میزان شار ورودی به بیم‌تیوب‌های شمالی مؤثر است؛ برای مثال، شار در حالت ٤٠ درصد داخل بودن میلهٔ کنترل، کمتر از حالتی است که در آن، ۲۰ درصد میلهٔ کنترل داخل باشد. در واقع، داخل بودن هرچه بیشتر میلهٔ کنترل باعث جذب و کاهش شار نوترون در بیم‌تیوب می‌شود؛ بنابراین، بهتر است برای افزایش شار، تا جایی که به‌طور عملی ممکن است، میله‌های کنترل را از قلب خارج کرد.

ازآنجاکه برای بهینه‌سازی طیف سعی می‌شود مجموعه شکل‌دهنده شار و طیف به چشمه نزدیک‌ترین فاصله را داشته باشد تا افت شار کمتر باشد، برای انتخاب بیم‌تیوب مناسب‌تر، باید شار نوترون در ابتدا و میانهٔ بیم تیوب‌های مختلف نیز با یکدیگر مقایسه شوند. نتایج نشان می‌دهد این وضعیت نیز برای بیم‌تیوب شمال غربی مناسب‌تر بوده و از این لحاظ نیز، این بیم‌تیوب استوانه‌ای مناسب‌تر است.

در نمودار ٤ شار نوترون در ابتدای بیم‌تیوب‌های مختلف شمالی به‌ازای یک ذره با یکدیگر مقایسه شده است.



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

٤. بحث و نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، مزیت نصب مجموعه شکل‌دهندهٔ شار و طیف در بیم‌تیوب منتخب راکتور جهت نوترون‌تراپی با بور آن است که باعث حذف قسمت عمدهٔ نوترون‌هایی غیر از نوترون‌های فوق حرارتی مورد نیاز می‌شود؛ اما در برابر این مزیت، باعث افت شدید این نوترون‌ها نیز می‌گردد. ازآنجاکه 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 ساطع‌شده از چشمه بیشتر باشد، افت شار در بیم‌تیوب نیز کمتر است؛ بنابراین، به‌منظور بهینه‌سازی طیف برای درمان، در مرحلهٔ 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، بیم‌تیوب‌های 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 ٤ نمایش یافته است، نشان می‌دهد بیم‌تیوب شمال غربی (B_1) راکتور تهران، از لحاظ مجموع شار نوترونی و نیز نوترون‌های سریع نسبت به بیم‌تیوب شمال شرقی (B_2) و بیم‌تیوب شمالی (B_3)، از نظر طیف و شار ارجح است. بیشترین شار نیز در ابتدای این بیم‌تیوب وجود دارد؛ بنابراین، برای کاربرد در روش نوترون‌تراپی با بور انتخاب و مورد بررسی بیشتر قرار گیرد.

۵. مراجع

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

[۲] کاسه‌ساز، ی.، شهریاری، م.، «بهینه‌سازی طیف حاصل از مولدهای نوترون به‌منظور استفاده در روش BNCT»، کنفرانس هسته‌ای ایران، اسفند ۸٦ یزد.

[3] The Curent Status of Boron Nutron 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).