

بهینه‌سازی طیف نوترونی در بیم تیوب شمال غربی راکتور تحقیقاتی تهران برای استفاده در روش درمانی نوترون‌تراپی با بور، توسط کد محاسباتی مونت کارلو

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

^۱ دفتر ایمنی هسته‌ای، مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

^۲ پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

* تهران، انتهای خیابان امیرآباد (کارگر شمالی)، سازمان انرژی اتمی ایران، دفتر ایمنی هسته‌ای، گروه دفاتر نمایندگی، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵

پست الکترونیکی: mjzamani@aeoi.org.ir

چکیده

به منظور دستیابی به طیف نوترونی با مؤلفه‌های مناسب برای به‌کارگیری در روش گیراندازی نوترون توسط بور، لازم است مجموعه شکل‌دهنده طیف نوترونی شامل کندکننده، موازی‌کننده، فیلتر نوترون‌های حرارتی و فیلتر پرتوهای گاما در سر راه بیم عبوری قرار داده شود. بیم تیوب شمال غربی راکتور تحقیقاتی تهران به علت دارا بودن بهینه‌ترین شرایط شار، از میان سه بیم تیوب شمالی انتخاب گردید و توسط کد محاسباتی مونت کارلو، مجموعه شکل‌دهنده بیم در طی چهار مرحله مذکور، شبیه‌سازی و بهینه شد. حالت نهایی طراحی بهینه، شامل ۷۸ سانتی‌متر هوا به عنوان فضای خالی، ۴۰ سانتی‌متر آهن و ۵۲ سانتی‌متر آب سنگین به عنوان کندکننده، ۳۰ سانتی‌متر آب معمولی یا معادل ۹۰ سانتی‌متر اکسید آلومینیوم به عنوان بازتابنده، ۱ میلی‌متر لیتیوم به عنوان فیلتر نوترون حرارتی و ۳ میلی‌متر بیسموت به عنوان فیلتر پرتوهای گاما می‌باشد. با این پیکربندی مجموعه شکل‌دهنده طیف نوترونی، بهترین نتایج برای مؤلفه‌های مناسب برای روش گیراندازی نوترون توسط بور به دست می‌آید.

کلیدواژگان: نوترون‌تراپی با بور، راکتور تحقیقاتی تهران، کد محاسباتی مونت کارلو، بهینه‌سازی، فیلتر نوترون، فیلتر گاما.

۱. مقدمه

پاره‌های سنگین و پرنانرژی شکافت تولید می‌کنند. بُرد محصولات واکنش، در حدود ابعاد سلولی است و با تخلیه انرژی خود در سلول‌های سرطانی، آن‌ها را نابود می‌کنند [۱]. راکتورهای تحقیقاتی مولد نوترون‌های گرمایی، فوق‌گرمایی، سریع و تابش‌های گاما هستند، اما در این روش، تنها نوترون‌های فوق‌گرمایی با انرژی و شدت مناسب مورد نیاز است. پرتوهای گاما، نوترون‌های گرمایی و سریع آلودگی محسوب شده و موجب افزایش دُز جذبی بافت‌های سالم بیمار می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد انرژی مناسب نوترون‌ها برای درمان غُد عمقی در حدود ۱۰ مگا الکترون‌ولت است [۲]. نوترون‌هایی با انرژی کمتر، قبل از رسیدن به غده، جذب شده و

یکی از روش‌های نوین در درمان برخی سرطان‌ها به‌خصوص درمان تومورهای مغزی و همچنین سرطان پوست، استفاده از تکنیک نوترون‌تراپی با بور^۱ است. در این روش، از دو مؤلفه اساسی استفاده می‌شود. مؤلفه اول شامل ترکیباتی از بور (^{10}B) است که در محل هدف مورد نظر تمرکز می‌یابد و مؤلفه دوم شامل یک دسته پرتو از نوترون‌های تابشی با طیف مناسب است. پس از تابش دهی، هسته‌های بور با گیراندازی نوترون‌ها طی واکنش هسته‌ای زیر:



نوترون‌های با انرژی بیشتر، در اثر پروتون‌های پس‌زده، باعث افزایش دُز جذبی در بافت سالم می‌شوند [۳]. از آنجاکه دُز جذبی، به زمان پرتودهی بستگی دارد، باید تعداد نوترون‌های فرودی نیز بهینه شوند. اگر شار نوترون کم باشد، زمان پرتودهی باید افزایش یابد؛ این امر باعث افزایش دُز جذبی نامطلوب می‌شود و اگر شار نوترون خیلی زیاد باشد، کنترل درمان مشکل شده و دُز جذبی نامطلوب افزایش می‌یابد. عموماً شار نوترونی از مرتبه $10^9 n/cm^2.s$ و زمان کمتر از یک ساعت، مورد توافق است، لذا برای رسیدن به شرایط مطلوب، لازم است طیف و انرژی منبع نوترونی بهینه شود. میزان مجاز مؤلفه‌های مناسب نوترونی (نسبت شدت نوترون‌های متفاوت و آهنگ دُز مربوط) در جدول (۱) آمده است [۱]. در واقع، هر چقدر پارامترهای نوترونی به این مقادیر نزدیک‌تر باشد، درمان موثرتر خواهد بود.

جدول ۱: حدود پارامترهای نوترونی مناسب برای روش درمانی گیراندازی نوترون توسط بور [۳ و ۱]

پارامترهای نوترونی برای بیم مناسب	حد
$\Phi_{epi} [n/cm^2 - s]$	$\geq 1 \times 10^9$
Φ_{epi} / Φ_{fast}	≥ 20
$\Phi_{epi} / \Phi_{thermal}$	≥ 100
$\dot{D}_{fast} / \Phi_{epi} [Gy cm^2 / n]$	$\leq 2 \times 10^{-13}$
$\dot{D}_{\gamma} / \Phi_{epi} [Gy cm^2 / n]$	$\leq 2 \times 10^{-13}$

۲. روش کار

در این مطالعه، با استفاده از کد محاسباتی مونت کارلو^۲ [۴]، راکتور تحقیقاتی تهران به‌عنوان منبع نوترونی مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته است. هدف کلی از بهینه‌سازی، دستیابی به طیف نوترونی با قیود ذکر شده در جدول (۱) است. بنابراین، در هریک از چهار مرحله بهینه‌سازی، سعی بر آن است تا با به‌کارگیری مواد مختلف با طول، ضخامت و ترتیب چینش متفاوت به بهترین حالت با مؤلفه‌های مجاز بهینه‌شده برسیم.

شکل (۱)، طیف نوترونی را در ابتدای هریک از سه بیم‌تیوب شمالی راکتور نشان می‌دهد. نتایج بررسی‌ها نشان‌دهنده آن است که در حالت قلب تازه،^۳ بیم‌تیوب شمال‌غربی راکتور تهران (B_۳) از نظر طیف و شار نوترونی نسبت به دو بیم‌تیوب شمالی دیگر ارجحیت دارد [۵]. نتایج شبیه‌سازی‌ها در شکل (۱)، مقدار شار و طیف نوترونی را در نزدیکی دهانه هریک از سه بیم‌تیوب شمالی راکتور تحقیقاتی تهران نشان می‌دهد. واضح است که طیف نوترونی در داخل این بیم‌تیوب، مشابه طیف شکافت است. در ادامه، می‌توان با انتخاب بیم‌تیوب شمال‌غربی به‌عنوان بهینه‌ترین بیم‌تیوب، مقدار شار ورودی و شکل طیف نوترونی در داخل آن را به‌عنوان چشمه نوترونی در برنامه شبیه‌سازی مونت کارلو، در تحقیق حاضر در نظر گرفت. به‌عبارت دیگر، خروجی به‌دست‌آمده در برنامه شبیه‌سازی مورد استفاده در مرجع ۵، به‌عنوان ورودی برنامه شبیه‌سازی برای تحقیق پیش رو مورد استفاده قرار گرفته است. به‌منظور بهینه‌سازی طیف نوترونی در چهار مرحله متوالی، یک پیکربندی اولیه شامل لایه‌های استوانه‌ای

از دیگر سو، ^{10}B تمایل بالایی به جذب نوترون‌های کند یا حرارتی، با انرژی کمتر از ۰/۱ مگا الکترون‌ولت دارد (سطح مقطع واکنش ۳۸۳۷ بارن است) و مطابق رابطه (۱) بلافاصله به ^{11}B تبدیل می‌شود، به‌طوری‌که یک ذره پرنرژی آلفا و یک دُز پس‌زننده به عقب 7Li قابل تفکیک خواهد بود. بنابراین، به‌منظور بهینه‌سازی طیف نوترونی^۱ و در نتیجه موثر نمودن درمان تومورهای مغزی، لازم است مجموعه شکل‌دهنده شار در داخل بیم‌تیوب و در برابر بیم اولیه راکتور قرار داده شود. این مجموعه شامل کندکننده، بازتابنده، موازی‌ساز و فیلتر نوترون‌های حرارتی و تابش‌های گاما می‌باشد. کندکننده، انرژی

2. Monte Carlo N-Particle Transport Code, V.4C (MCNP4C)

3. Fresh Core

1. Beam Shape Assembling (BSA)

نوترون‌های حرارتی خیلی زیاد شود. از طرفی، اگر عدد جرمی بزرگ باشد، انرژی نوترون به ناحیه فوق حرارتی نمی‌رسد و حالت بهینه مورد نظر است. در جدول (۲)، لیستی از مواد به کار گرفته شده در این مرحله شبیه‌سازی نمایش داده شده است.

جدول ۲: مواد عمومی به کار گرفته جهت طراحی کندکننده (مرحله اول)

MgF ₂	Fe	Fluents (AlF ₃ , Al ₂ O ₃)
D ₂ O	BeO	Al
CF ₂	AlF ₃	Al ₂ O ₃

۳. نتایج

برای انتقال شار نوترونی اولیه راکتور به تقریباً میانه‌های بیم تیوب، ابتدا لازم است فضایی خالی اختصاص یابد. سپس برای انتخاب بهترین حالت (از نظر جنس و ضخامت) در مرحله اول، مواد کندکننده با طول، ضخامت و توالی مختلف در بیش از ۱۸۰ حالت مختلف بررسی شده است. در هر پیکربندی، ابتدا نسبت شار نوترون‌های فوق حرارتی به شار نوترون‌های سریع به عنوان قدرت کندکنندگی در آن حالت، ارزیابی گردیده و سپس به منظور ارزیابی و برآورد میزان کاهش آلودگی ناشی از نوترون‌های حرارتی، کمیت دوم به صورت نسبت شار نوترون‌های فوق حرارتی به شار نوترون‌های گرمایی محاسبه شده است. بنابراین داریم:

$$\frac{J_{epit}}{J_{fast}} = \text{ضریب کندکنندگی} \quad (۲)$$

$$J = \mu \phi(r, E, t) A \quad (۳)$$

$$\frac{J_{epit}}{J_{ther}} = \text{معیار سنجش میزان کاهش شار نوترون‌های حرارتی} \quad (۴)$$

که در آن‌ها:

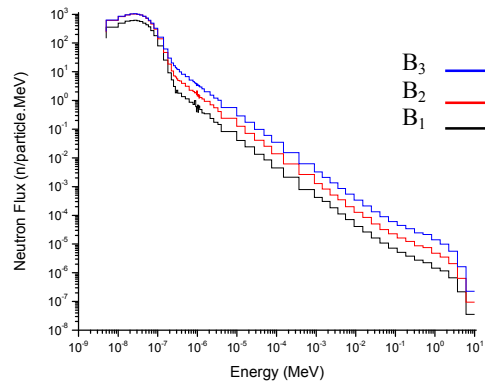
J : تعداد ذرات عبورکننده از سطح (جریان)؛

μ : کسینوس زاویه بین راستای خروج ذره و بردار نرمال؛

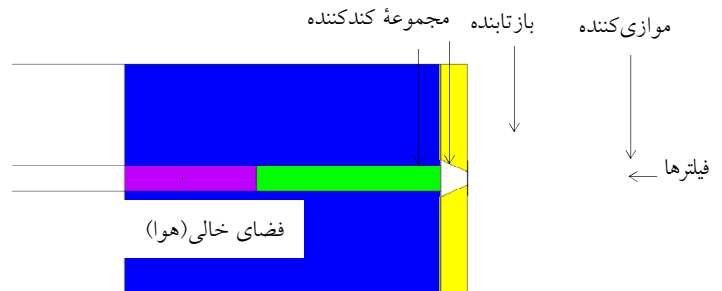
A : سطح مقطع عبوری نوترون

و $\phi(E, r, t)$: شار نوترون با انرژی E ، موقعیت r در لحظه t است. از میان این حالت‌ها، تعداد ۱۰ حالت با بالاترین میزان قدرت کندکنندگی (کمیت اول) و بیشترین میزان کاهش شار نوترون‌های حرارتی (کمیت دوم) انتخاب شد. این ۱۰ پیکربندی در جدول

(دیسک‌هایی با ضخامت، جنس و طول متفاوت) در نظر گرفته شد و به کمک کد محاسباتی، شبیه‌سازی گردید. نمای کلی این پیکربندی در شکل (۲) نشان داده شده است. تعداد ده حالت از بهینه‌ترین حالت‌ها در هر مرحله، به عنوان کاندیدا برای مرحله بعد مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱: طیف نوترون در ابتدای بیم تیوب‌های شمالی راکتور تهران در حالت قلب تازه. محورهای نمودار برحسب لگاریتم کمیت‌ها رسم شده است [۵].



شکل ۲: نمونه پیکربندی طراحی شده به وسیله کد محاسباتی مونت کارلو در مراحل مختلف بهینه‌سازی در داخل بیم تیوب

در اولین گام، دسته‌ای از مواد که معمولاً به عنوان کندکننده در اکثر راکتورهای فعال در روش نوترون درمانی توسط بور در دنیا به کار گرفته شده است، برای طراحی کندکننده استفاده شد. این مواد باید جرمی نزدیک به جرم نوترون داشته و دارای سطح مقطع جذب کم برای نوترون‌های فوق حرارتی و سطح مقطع پراکندگی بالا برای نوترون‌های سریع باشند. این مواد نباید در صورت تابش‌های با شدت بالا از هم متلاشی شده یا مواد سمی انتشار دهند. به این ترتیب، مواد کندکننده با عدد جرمی کم باعث می‌شوند تا نوترون‌ها به سرعت کند شوند. با وجود این، اگر عدد جرمی مواد خیلی کم باشد، باعث می‌شود آلودگی به

در هریک از این حالات، بازتابنده مخروطی شکل شامل دو دیسک با قطر بزرگ و کوچک است که به یکدیگر متصل شده‌اند (مطابق شکل ۲). قطر بزرگ‌تر مخروط بازتابنده، کمی بیشتر از قطر بیم‌تیوب و قطر کوچک آن تقریباً مساوی با قطر دهانه خروجی سیستم (۱۰ سانتی‌متر) انتخاب شده است.

جدول ۵: بهترین طراحی‌ها در مرحله نصب موازی‌ساز بیسموتی (مرحله سوم)

ترتیب چینش مواد (سانتی‌متر) در مرحله نصب موازی‌ساز، از چپ به راست مطابق شکل (۲)		J_{epit}	J_{ther}
Bi+آب(۳۰)+آب‌سنگین(۵۲)+آهن(۴۰)+هوا(۷۸)		۱۳/۹۰	۰/۰۷
Bi+آب(۳۰)+آب‌سنگین(۵۰)+آهن(۴۰)+هوا(۷۸)		۱۴/۶۷	۰/۰۵
Bi+AL ₂ O ₃ (۸۰)+آب‌سنگین(۶۰)+آهن(۵۰)+هوا(۷۸)		۱۲/۰۸	۲/۲۳

نتایج جدول (۵) مبین آن است که بهترین حالت، استفاده از بازتابنده‌هایی بیسموتی است. در گام آخر (چهارم)، فیلترهای مختلف برای پرتوهای گاما و نوترون حرارتی در مقابل هریک از این ۳ حالت منتخب قرار داده شد. برای فیلتر گاما، از بیسموت و برای فیلتر نوترون‌های حرارتی از لیتیوم جاذب قوی نوترون‌های حرارتی، استفاده شده است. با اجرای برنامه و محاسبه کمیت‌های قبلی، نتایج با معیارهای جدول (۱) مقایسه شد و ۳ حالت از بهترین نتایج در جدول (۶) آورده شده است. مشخص است که نتایج جدول (۶)، در محل دریچه خروجی سیستم و محل قرارگیری سر بیمار خواهد بود. معیار ارزیابی طیف در این مرحله، محدودیت‌های مقدار دز پرتوگیری از مولفه‌های مختلف نوترونی است که در جدول (۱) آمده است.

جدول ۶: سه پیکربندی نهایی پس از نصب فیلتر نوترون حرارتی و گاما که نزدیک‌ترین مقادیر به معیارهای ارائه‌شده در جدول ۱ را دارند.

\dot{D}_γ	\dot{D}_{fast}	Φ_{epi}	Φ_{ther}	Φ_{fast}	Φ_{epi}	\dot{D}_γ
$1/42 \times 10^{-13}$	$2/44 \times 10^{-10}$	۸۵/۷۱	۱۷/۳۳	۵/۸۳	10^{-7}	۱
$1/۷۶ \times 10^{-13}$	$1/۹۷ \times 10^{-10}$	۸۲/۹۹	۱۴/۱۹	۷/۶۲	10^{-7}	۲
$1/۱۶ \times 10^{-13}$	$1/۴۳ \times 10^{-10}$	۸۷/۶۳	۱۸/۸۳	۸/۸۱	10^{-7}	۳

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج آورده‌شده در جدول (۶)، نشان‌دهنده آن است که بهینه‌ترین حالت (پیکربندی ۳) شامل ۷۸ سانتی‌متر هوا برای

(۳) آمده است. مطابق جدول (۱)، کمیت‌های محاسبه‌شده در جدول (۳) باید به‌ترتیب، به مقادیر آرمانی ۲۰ و ۱۰۰ میل کنند.

جدول ۳: بهترین پیکربندی مربوط به طراحی‌کننده (مرحله اول)

ترتیب چینش مواد (سانتی‌متر) در مرحله نصب موازی‌ساز، از چپ به راست در شکل (۲)		J_{epit}	J_{ther}
آب‌سنگین(۴۵) + آهن(۴۰) + هوا(۷۸)		۸/۹۴	۰/۸۴
آب‌سنگین(۵۲) + آهن(۴۰) + هوا(۷۸)		۸/۵۰	۰/۵۹
آب‌سنگین(۵۰) + آهن(۴۰) + هوا(۷۸)		۷/۵۶	۰/۶۵
آب‌سنگین(۵۳) + آهن(۴۰) + هوا(۷۸)		۷/۳۷	۰/۵۴
آب‌سنگین(۴۰) + آهن(۴۰) + هوا(۷۸)		۶/۱۹	۱/۰۳
آب‌سنگین(۳۰) + آهن(۴۵) + هوا(۷۸)		۵/۳۰	۲/۰۹
آب‌سنگین(۳۰) + آهن(۵۰) + هوا(۷۸)		۵/۰۹	۱/۷۳
آب‌سنگین(۴۵) + آهن(۳۵) + هوا(۷۸)		۴/۵۴	۰/۸۵
فلوئنتال(۵۰) + آلومینیوم(۷۲) + هوا(۷۸)		۴/۳۰	۱/۱۱

در مرحله دوم با استفاده از کد محاسباتی و به‌کارگیری هریک از ده پیکربندی جدول (۳)، مواد مختلف (آب و اکسید آلومینیوم) با ضخامت‌های مختلف، به‌عنوان بازتابنده بررسی شده است. در اینجا نیز با محاسبه کمیت‌های قبلی، ۱۰ مورد از بهترین نتایج، در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴: ده پیکربندی برتر در مرحله نصب بازتابنده (مرحله دوم)

ترتیب چینش مواد (سانتی‌متر) در مرحله نصب بازتابنده، از چپ به راست، مطابق شکل (۲)		J_{epit}	J_{ther}
آب(۳۰)+آب‌سنگین(۵۲)+آهن(۴۰)+هوا(۷۸)		۱۸/۶۴	۰/۰۱
آب(۴۰)+آب‌سنگین(۴۵)+آهن(۴۰)+هوا(۷۸)		۱۸/۲۵	۰/۰۲
آب(۳۰)+آب‌سنگین(۵۰)+آهن(۴۰)+هوا(۷۸)		۱۶/۷۵	۰/۰۲
آب(۴۰)+آب‌سنگین(۵۳)+آهن(۴۰)+هوا(۷۸)		۱۳/۲۹	۰/۰۱
AL ₂ O ₃ (۸۰)+آب‌سنگین(۷۰)+آهن(۵۰)+هوا(۷۸)		۱۳/۲۲	۰/۹۰
آب(۴۰)+آب‌سنگین(۵۰)+آهن(۴۰)+هوا(۷۸)		۱۳/۱۲	۰/۰۲
AL ₂ O ₃ (۹۰)+آب‌سنگین(۶۰)+آهن(۵۰)+هوا(۷۸)		۱۲/۹۸	۱/۰۲
AL ₂ O ₃ (۸۰)+آب‌سنگین(۶۰)+آهن(۶۰)+هوا(۷۸)		۱۲/۹۷	۰/۹۸
AL ₂ O ₃ (۸۰)+آب‌سنگین(۶۰)+آهن(۵۰)+هوا(۷۸)		۱۲/۰۳	۱/۰۴
آب(۲۰)+آب‌سنگین(۵۲)+آهن(۴۰)+هوا(۷۸)		۱۴/۶۴	۰/۰۸

در مرحله سوم، پس از نصب موازی‌ساز (که عمدتاً از جنس بیسموت انتخاب می‌شود) برای هریک از حالات مختلف جدول (۴) و بررسی نتایج، سه حالت که بالاترین نسبت‌های جدول (۱) را داشتند، انتخاب شده‌اند. نتایج در جدول (۵) آورده شده است.

محاسبه کرد؛ برای مثال، شار نوترون‌های فوق حرارتی (اپی ترمال) در بیم تیوب شمال غربی برابر است با:

$$\varphi_{epi} = 3.46E17 \times 8.81E-7 = 3.04E10 \quad (7)$$

واضح است که محاسبات فوق، نتایج را در محل دریچه خروجی سیستم به دست می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی انجام شده مبین آن است که برخی نتایج ذکر شده در جدول (۶)، با محدودیت‌های مورد نظر برای طیف در جدول (۱)، تفاوت اندکی دارند. از سوی دیگر، با توجه به اینکه معمولاً شار نوترون فوق حرارتی لازم برای درمان در خروجی سیستم می‌بایست مضربی از 10^9 ذره بر سانتی‌متر مربع در هر ثانیه باشد [۱]، بنابراین با توجه به رابطه (۷)، راکتور تحقیقاتی تهران از لحاظ تئوری، امکان به‌کارگیری در روش درمانی گیراندازی نوترون توسط بور را دارد؛ البته مشکل کاهش شار، یک مشکل اساسی در طراحی مجموعه شکل‌دهنده طیف و شار در مراکز گیراندازی نوترون توسط بور است. یک روش برای حل این مشکل، استفاده از صفحات تکثیرکننده نوترون در طراحی مجموعه شکل‌دهنده طیف و شار یا بالابردن توان اسمی راکتور است. از سوی دیگر، در صورت به‌کارگیری مواد ترکیبی جدید در طراحی‌های آینده مجموعه، با توجه به ضخامت بالای مواد به‌کاررفته در این تحقیق، می‌توان مشکلات فنی و مهندسی مربوط به نصب و راه‌اندازی سیستم و هزینه‌های تهیه مواد مربوط را نیز کاهش داد.

می‌توان با استفاده از نتایج آزمایش‌های تجربی، طیف انرژی و توزیع فضایی نوترون‌های مختلف را با استفاده از روش فعال‌سازی پولک‌هایی از جنس طلا و نقره و نیز سیم مسی اندازه‌گیری کرد [۶]. نتایج این آزمایش‌ها نشان‌دهنده آن است که میان نتایج عملی و شبیه‌سازی انجام شده در این تحقیق، اختلاف‌هایی وجود دارد. این اختلاف ناشی از خطاهای موجود در اجرای برنامه و تقریب‌های زیادی است که در زمان شبیه‌سازی، مورد استفاده قرار گرفته است.

هدایت نوترون‌ها به اواسط بیم تیوب، مجموعاً ترکیب ۴۰ سانتی‌متر آهن و ۵۲ سانتی‌متر آب سنگین به‌عنوان کندکننده، ۳۰ سانتی‌متر آب معمولی یا معادل ۹۰ سانتی‌متر اکسید آلومینیوم به‌عنوان بازتابنده، ۱ میلی‌متر لیتیوم به‌عنوان فیلتر نوترون‌های حرارتی و ۳ میلی‌متر بیسموت به‌عنوان فیلتر پرتوهای الکترومغناطیس گاما می‌باشد. به‌عبارت دیگر، با توجه به چینه‌ساز، قلب راکتور تحقیقاتی تهران (شماره ۵۵) و مشخصات بیم تیوب شمال غربی، بهینه‌ترین طیف نوترونی برای درمان با روش گیراندازی نوترون توسط بور، توسط پیکربندی سوم به دست خواهد آمد.

از آنجاکه شار نوترون‌های فوق حرارتی در درمان مورد نیاز است و اینکه نتایج و خروجی محاسبات با استفاده از کد محاسباتی مونت‌کارلو به‌ازای یک نوترون خروجی از چشمه انجام گرفته است، قدرت چشمه (در حالت ۵ مگاوات حرارتی) به‌معنای تعداد کل ذرات ساطع شده از چشمه، در واحد زمان را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد [۱]:

$$S(n/s) = \left(\frac{1 \text{ joule/s}}{\text{Watt}}\right) \left(\frac{1 \text{ MeV}}{1.602E-13 \text{ joule}}\right) \left(\frac{\text{Fission}}{180 \text{ MeV}}\right) \left(\frac{\bar{g}_n}{\text{Fission}}\right) P(\text{Watt}) \quad (8)$$

در این رابطه،

S : قدرت چشمه؛

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

\bar{g}_n : متوسط نوترون‌های تولیدی به‌ازای هر شکافت و برابر با ۲ است.

با فرض بیشینه توان ۵ مگاواتی راکتور تهران و با عددگذاری در رابطه بالا، قدرت چشمه نوترون راکتور تهران برابر است با:

$$S(n/s) = 3.46E17 \quad (9)$$

با در نظر گرفتن پیکربندی سوم در جدول (۶)، واضح است که با ضرب نمودن خروجی کد محاسباتی در قدرت چشمه نوترونی راکتور تهران، می‌توان شار کل نوترون‌های مختلف و همچنین نسبت‌های ذکر شده در جدول (۶) (ستون ۱ تا ۴ از سمت چپ) را در بیم تیوب شمال غربی، در واحد زمان،

۵. مراجع

- [1] IAEA. The Current Status of Boron Neutron Captures Therapy, IAEA Tecdoc 1223, Vien, Austria, (2001).
- [2] E.J. Hall, A.J. Giaccia. Radiobiology for Radiologist. Lippincott Williams & Wilkins Publishing, Westford, USA, (2006). Part II, Section 7, 14 & 27.
- [3] ICRP. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures, ICRP Report 116, Amsterdam-New York, USA (2010).
- [4] J.F. Briesmeister. A general Monte Carlo NParticle Transport Code Manual, Version 4C, Volume I, Los Alamos National Laboratory, USA, (2010).
- [۵] زمانی، مجید. کاسه‌ساز، یاسر. خلفی، حسین. شایسته، محسن. مقایسه بین طیف و شار نوترونی در بیم‌تیوب‌های شمالی راکتور تحقیقاتی تهران با کد محاسباتی مونت کارلو جهت استفاده در BNCT. مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۳، شماره ۱، (۱۳۹۲) ۴۱-۴۵.
- [6] Y. Kasesaz, H. Khalafi, F. Rahmani, A. Ezzati. A feasibility study of the Tehran research reactor as a neutron source for BNCT, Elsevier, Applied Radiation and Isotopes (2014)132-137.