

طراحی و بهینه سازی مجموعه شکل دهنده طیف حاصل از راکتور تحقیقاتی تریگای نوع دوم

سعید حمیدی-حسین خلفی^۲- یاسر کاسه ساز - زهرا پاپی^{۱*}

^۱ دانشگاه اراک، دانشکده فیزیک

^۲ سازمان انرژی اتمی ایران، هلدینگ توسعه کاربرد پرتوها

چکیده

BNCT یک روش مؤثر و امید بخش در درمان تومورهای مغزی است. در این روش پس از تزریق داروی حامل بور ۱۰، ناحیه تومور توسط نوترون های با شدت و انرژی مناسب بمباران میشود. چشمه های نوترونی مختلفی از جمله راکتورهای تحقیقاتی در این روش مورد استفاده قرار گرفته است در این مقاله ابتدا محاسبات مربوط به طراحی نوترونیک یک راکتور کوچک قابل نصب جهت انجام BNCT در بیمارستان توسط کد MCNPX انجام شده است. سپس به منظور دستیابی به کیفیت بهتر و شدت بیم بیشتر در روش درمانی با توجه به طیف نوترونی به دست آمده از راکتور تریگای شبیه سازی شده و قرار دادن شار به دست آمده به عنوان چشمه ی نوترونی، شکل دهنده ی طیف (BSA) راکتور نیز شبیه سازی شد.

مقدمه

در سال ۱۹۶۸ دانشمندان ژاپنی پروفیسور هاتاناکا (HATANAKA) با شکافتن استخوان جمجمه و استفاده از نوترون های گرمایی برای افزایش میزان نفوذ نوترون به موفقیت هایی دست پیدا کرد. با استفاده از این روش تعدادی درمان در ژاپن صورت گرفت که باعث توجه جهانی شد. امروزه این کار بدون عمل جراحی و با نوترونهای فوق حرارتی انجام میشود. اصلاح و تغییر راکتورها با افزودن چیدمان منظم یک سری مؤلفه ها با نام مجموعه ی شکل دهنده ی طیف ی BSA, (BEAM SHAPING ASSEMBLY) صورت می گیرد. با تنظیم این مؤلفه ها، قادر خواهیم بود که شار دلخواه خود را با کیفیت مناسب در محل تومور اعمال کنیم. میزان مطلوب $10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$ شار نوترون سریع است که در محل درمان به $10^9 \text{ n/cm}^2 \text{ s}$ شار نوترون فوق حرارتی میرسد.

شبیه سازی راکتور

با توجه به چیدمان اولیه قلب و مقایسه ی داده های آن با راکتورهای تحقیقاتی استاندارد تریگای نوع دوم و تأیید حدودی صحت شبیه سازی انجام شده، چیدمان نهایی قلب به منظور دستیابی به راکتیویته ی اضافی بیشتر برای رسیدن به بهترین وضعیت کارکرد قلب مورد بررسی قرار گرفت.

محاسبه‌ی شار نوترونی در مرکز قلب

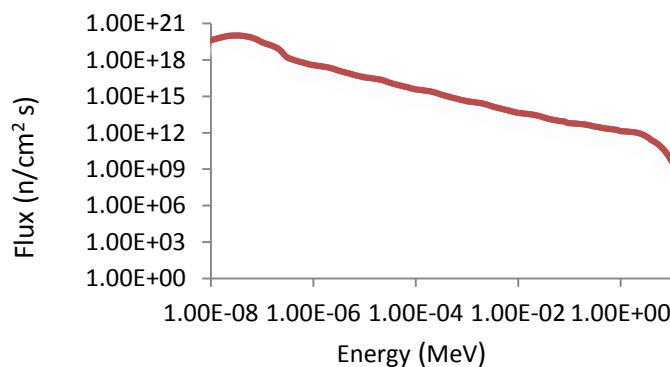
محاسبه‌ی شار با استفاده از تالی F_4 به ترتیب در سه بازه‌ی انرژی برای نوترون‌های حرارتی، نوترون‌های فوق حرارتی و نوترون‌های سریع محاسبه می‌شود. جدول ۱ مقادیر محاسبه شده را در دو موقعیت متفاوت نشان می‌دهد.

جدول ۱: میزان شار نوترونی در دو موقعیت متفاوت از قلب

موقعیت	شار نوترونی مجموع (n/cm ² s)	خطا
قلب راکتور	۱.۵۶E+۱۳	۰.۰۰۳۸
لبه‌ی قلب	۲.۸۲E+۱۲	۰.۰۰۰۱

طیف انرژی نوترونی

شکل ۱ نمودار طیف انرژی نوترونی راکتور طراحی شده را نشان می‌دهد.



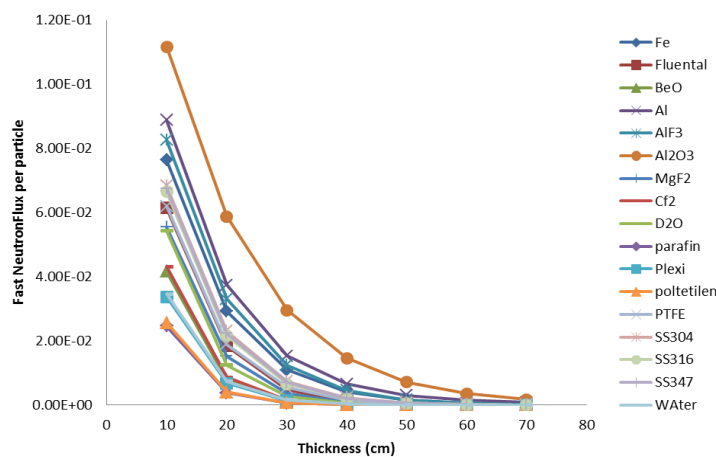
شکل ۱: نمودار طیف انرژی نوترونی راکتور طراحی شده

طراحی مناسب BSA برای راکتور تریگای نوع دوم شبیه‌سازی شده

در این مرحله با توجه به طیف نوترونی به دست آمده از راکتور شبیه سازی شده و قرار دادن شار به دست آمده از راکتور به عنوان چشمه‌ی نوترونی طبق روند زیر شکل دهنده ی طیف (BSA) شبیه سازی شد. مراحل کار به شرح زیر است.

انتخاب کند کننده مناسب

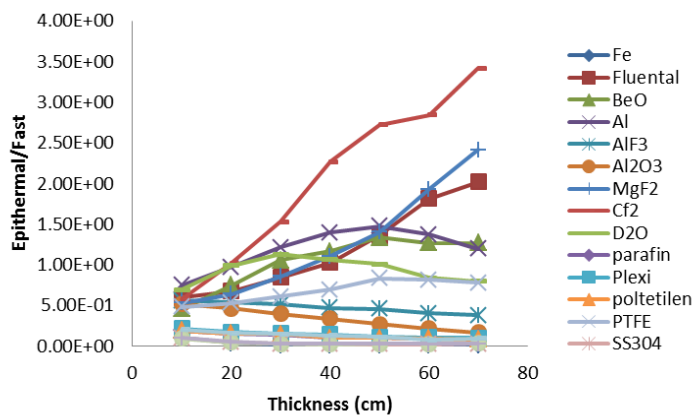
در این مرحله با انتخاب ۱۷ ماده به عنوان کند کننده و مقایسه قدرت کند کنندگی آنها ۳ ماده به عنوان کندکننده‌ی مطلوب انتخاب شد. مواد مورد استفاده شامل Al , Al_2O_3 , Pb , AlF_3 , $PLEXI$, پلی اتیلن، آب آهن، فولاد ۳۴۷، فولاد ۳۱۶ و پارافین. بودند. هر ماده با ضخامت‌های به ترتیب ۲۰، ۱۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ سانتیمتر شبیه‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفتند. شکل ۲ میزان نوترون‌های سریع به ازای ضخامت‌های مختلف مواد مختلف را نشان می‌دهد.



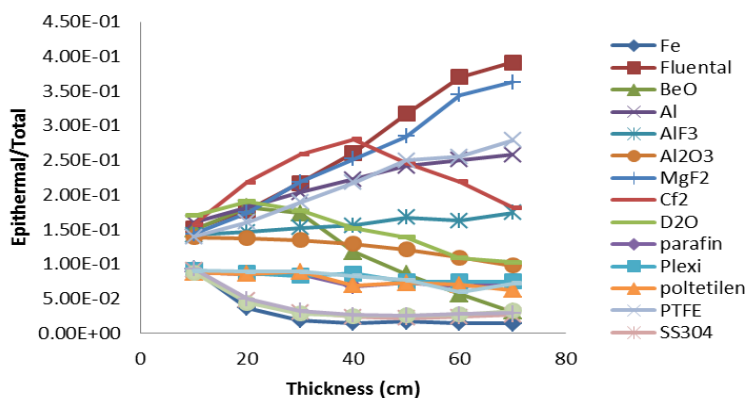
شکل ۲: میزان نوترون‌های سریع به ازای ضخامت‌های مختلف مواد مختلف

قدرت کندکنندگی

مواد کند کننده‌ی مناسب با توجه به این نسبت و همچنین بالا بودن سهم نوترون‌های فوق حرارتی در کل طیف انتخاب شدند. در شکل ۳ و ۴ به ترتیب نمودارهای این دو شرط در هر ۱۷ ماده بررسی شده است.



شکل ۳: میزان نوترون های فوق حرارتی به سریع به ازای ضخامت های مختلف مواد مختلف



شکل ۴: سهم نوترون های فوق حرارتی در طیف به ازای ضخامت های مختلف مواد مختلف

مشاهده می شود که مواد MgF_2 ، $Flualtal$ و Cf_2 با ضخامت ۷۰ سانتی متر از دو نظر مناسب ترین کندکننده می باشند. لذا این سه حالت به عنوان حالت های بهینه برای کندکننده انتخاب شدند. جدول ۲ پارامترهای بیم نوترونی را برای این سه حالت نشان می دهد.

جدول ۲: پارامترهای بیم نوترونی برای سه ماده‌ی کندکننده

	شار حرارتی	شار فوق حرارتی	شار سریع	شار فوق حرارتی به سریع	سهم شار فوق حرارتی در طیف
Cf_2	$2/60E-05$	$6/17E-06$	$1/80E-06$	۲/۴۲	۱۸/۲
MgF_2	$3/37E-05$	$2/51E-05$	$1/04E-05$	۲/۴۱	۳۶/۳
$Flualtal$	$3/82E-05$	$3/60E-05$	$1/78E-05$	۲/۰۲	۳۹/۱

با توجه به جدول ۲ ملاحظه می شود **Fluental** مناسب ترین ماده به عنوان کند کننده است. از آنجایی که شرط دوم (بالا بودن سهم نوترون های فوق حرارتی) به عنوان عامل مهم در درمان محسوب می شود، لذا در این مرحله این ماده را با ضخامت ۷۰ سانتی متر به عنوان حالت بهینه در نظر می گیریم. همان طور که مشاهده می شود این پارامتر برای **Fluental** نزدیک ۴۰ درصد است.

انتخاب بازتابنده ی مناسب

از دو ماده سرب و بیسموت با ضخامت های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی متر برای بازتابنده استفاده گردید. در این مرحله نیز معیار، انتخاب بهترین حالت سهم نوترون های فوق حرارتی در طیف می باشد. جدول ۳ تأثیر بازتابنده را نشان می دهد.

جدول ۳: تأثیر بازتابنده در شرایط بیم نوترونی

		Thermal	Epithermal	Fast	Epithermal/Total
without reflector	۰	۱/۷۸E-۰۵	۲/۶۰E-۰۵	۲/۸۲E-۰۵	۲۹/۱۳
Pb	۱۰	۱/۱۴E-۰۷	۲/۵۸E-۰۶	۱/۸۲E-۰۷	۸۹/۷۱
	۲۰	۱/۴۲E-۰۷	۳/۵۳E-۰۶	۲/۲۵E-۰۷	۹۰/۵۶
	۳۰	۱/۶۰E-۰۷	۳/۹۶E-۰۶	۲/۶۶E-۰۷	۹۰/۲۸
Bi	۱۰	۱/۱۲E-۰۷	۲/۱۵E-۰۶	۱/۱۷E-۰۷	۹۰/۳۹
	۲۰	۱/۵۳E-۰۷	۳/۰۰E-۰۶	۱/۷۱E-۰۷	۹۰/۲۵
	۳۰	۲/۰۶E-۰۷	۳/۴۴E-۰۶	۱/۹۶E-۰۷	۸۹/۵۲

همانگونه که ملاحظه می شود بازتابنده سرب با ضخامت ۲۰ سانتی متر از نظر سهم نوترون های فوق حرارتی در طیف مناسب ترین حالت می باشد. لذا این حالت را به عنوان حالت بهینه برای باز **BNCT** یک روش مؤثر و امید بخش در درمان تومورهای مغزی است. تابنده در نظر می گیریم.

انتخاب فیلترها (نوترون حرارتی، نوترون سریع و گاما)

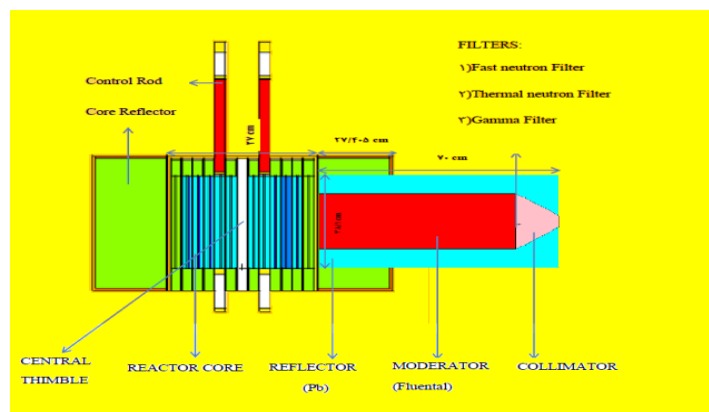
با توجه به نقش هر یک از این سه فیلتر ترتیب قرار گیری آنها ثابت و بدینگونه در نظر گرفته شد که ابتدا فیلتر نوترون های سریع سپس فیلتر نوترون های حرارتی و در نهایت فیلتر گاما. برای فیلتر گاما از بیسموت، برای فیلتر نوترون حرارتی از لیتیم-۶ و برای نوترون های سریع از آهن-۵۶ با ضخامت های ۱ تا ۵ میلیمتر استفاده شد. در هر از این حالت های ۱۲۵ گانه، تمام معیارهای در-هوا مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۴ برخی از حالت های مناسب برای فیلترها را نشان می دهد.

جدول ۴: برخی حالت‌های مناسب برای فیلترها

No.	f_{fast} (mm)	$f_{thermal}$ (mm)	f_{gamma} (mm)	$\frac{\phi_{epi}}{n}$ ($\frac{1}{cm^2 \cdot s}$)	ϕ_{epi}/ϕ_{th}	ϕ_{epi}/ϕ_f	ϕ_{epi}/ϕ_{total}	\dot{D}_f/ϕ_{epi}	\dot{D}_g/ϕ_{epi}
۱	۱	۴	۵	۲/۳۷E-۰۶	۱۴۳/۳۶	۲۰/۳۶	۹۴/۶۹	۳/۹۹E-۱۴	۳/۰۴E-۱۲
۲	۱	۵	۵	۲/۱۷E-۰۶	۱۳۱/۵۲	۱۸/۸۹	۹۴/۲۹	۴/۳۶E-۱۴	۳/۳۲E-۱۲
۳	۲	۳	۵	۲/۶۴E-۰۶	۱۱۲/۹۸	۲۰/۷۹	۹۴/۶۱	۳/۸۶E-۱۴	۲/۵۵E-۱۲
۴	۲	۴	۵	۲/۳۲E-۰۶	۱۱۱/۶۲	۱۸/۹۴	۹۴/۱۹	۴/۱۱E-۱۴	۲/۹۱E-۱۲
۵	۴	۳	۴	۲/۶۷E-۰۶	۹۵/۷۶	۱۹/۸۲	۹۴/۳۶	۴/۴۸E-۱۴	۲/۲۱E-۱۲
۶	۳	۴	۵	۲/۳۵E-۰۶	۹۳/۹۵	۱۹/۶۴	۹۴/۲	۳/۸۰E-۱۴	۲/۷۴E-۱۲

نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده می توان گفت که حالت سوم در جدول ۴ تمام محدودیت های مورد نظر را دارد و مناسب ترین حالت می باشد. شکل ۵ طراحی اولیه شکل دهنده ی طیف شبیه سازی شده را نشان میدهد.



شکل ۵: طراحی اولیه شکل دهنده ی طیف توسط کد MCNP (مجموعه ی قلب و شکل دهنده ی طیف)

مراجع

- 1) Current status of neutron capture therapy, international atomic energy agency IAEA-TECDOC-۱۲۲۳ may ۲۰۰۱
- ۲) Taylor H J, Goldhaber M , Nature (Lond.) , ۱۳۵, pp ۳۴۱- ۳۴۸, ۱۹۳۵