

## ایجاد باریکه نوترونی مناسب جهت نوترون درمانی در ستون حرارتی راکتور تهران

یاسر، کاسه ساز\*؛ حسین، خلفی؛<sup>۱</sup> فائزه، رحمانی؛<sup>۲</sup> ارسلان، عزتی؛<sup>۲</sup> مهدی، کیوانی؛<sup>۲</sup> اشکان،

حسینی رخ؛<sup>۲</sup> مهرداد، عزیزی؛<sup>۲</sup> سپیده، امینی<sup>۲</sup>

۱. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای

۲. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته ای

### چکیده:

در این مقاله با در نظر گرفتن ستون حرارتی راکتور تهران، دو باریکه نوترون حرارتی و فوق حرارتی به منظور استفاده در نوترون درمانی به کمک کد MCNPX طراحی گردید. نتایج نشان می دهد که شار نوترونی مناسبی برای هر دو حالت قابل دستیابی است. برای حالت حرارتی، طرح پیشنهادی به صورت عملی مورد آزمون قرار گرفت و پارامترهای باریکه به روش فعال سازی پولک طلا و دزیومتر TLD ۷۰۰/اندازه گیری شد. نتایج نشان می دهد که سطح دز گاما بیشتر از مقدار توصیه شده توسط آژانس بین المللی انرژی اتمی است.

کلید واژه ها: نوترون درمانی، راکتور تهران، ستون حرارتی، طراحی باریکه نوترون، فعال سازی پولک

### مقدمه

مهمترین عامل برای ایجاد یک مرکز تحقیقاتی نوترون درمانی، چشمه نوترون مناسب می باشد. هرچند که تلاش های بسیاری جهت ساخت یک چشمه نوترونی با ایمنی بالا، ارزان تر و قابل نصب در بیمارستان صورت گرفته است اما در تمام آزمون های درمانی گزارش شده، از راکتورهای هسته ای به عنوان چشمه نوترون استفاده شده است [۱]. راکتور تحقیقاتی تهران تنها چشمه نوترونی موجود در کشور است که قابلیت استفاده در نوترون درمانی را دارا می باشد. در این مقاله از ستون حرارتی راکتور تهران برای دستیابی به یک باریکه نوترونی مناسب استفاده شده است و دو نوع باریکه نوترونی مختلف شامل نوترون های حرارتی، مناسب برای درمان تومورهای سطحی و فوق حرارتی، مناسب برای درمان تومورهای عمقی در مغز [۱]، طراحی شد و در ادامه با در نظر گرفتن محدودیت های عملی، باریکه حرارتی ایجاد و پارامترهای آن اندازه گیری شد. جهت انجام محاسبات و طراحی ها از کد MCNPX [۲] استفاده گردید. معیارها و محدودیت های هر دو نوع باریکه نوترون توسط آژانس بین المللی انرژی اتمی معین شده است که مبنای طراحی باریکه های نوترونی در نظر گرفته شد حرارتی [۳]. جدول ۱ این پارامترها را نشان می دهد.

جدول ۱ مشخصات باریکه نوترونی مناسب برای دو حالت حرارتی و فوق حرارتی [۳].

Thermal BNCT		Epithermal BNCT	
Parameter	Recommended value	Parameter	Recommended value
$\Phi_{\text{thermal}} \left( \frac{n}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right)$	$> 10^9$	$\Phi_{\text{epithermal}} \left( \frac{n}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right)$	$> 10^9$
$\frac{\Phi_{\text{thermal}}}{\Phi_{\text{total}}}$	$> 0.9$	$\frac{\Phi_{\text{epithermal}}}{\Phi_{\text{thermal}}}$	$> 20$
$\frac{\dot{D}_{\text{epithermal+fast}}}{\Phi_{\text{thermal}}} (\text{Gy} \cdot \text{cm}^2)$	$< 2 \times 10^{-12}$	$\frac{\dot{D}_{\text{fast}}}{\Phi_{\text{epithermal}}} (\text{Gy} \cdot \text{cm}^2)$	$< 2 \times 10^{-12}$
$\frac{\dot{D}_{\text{gamma}}}{\Phi_{\text{thermal}}} (\text{Gy} \cdot \text{cm}^2)$	$< 2 \times 10^{-12}$	$\frac{\dot{D}_{\text{gamma}}}{\Phi_{\text{thermal}}} (\text{Gy} \cdot \text{cm}^2)$	$< 2 \times 10^{-12}$
Fast energy	$E > 10 \text{ keV}$		
Epithermal energy	$1 \text{ eV} < E < 10 \text{ keV}$		
Thermal energy	$E < 1 \text{ eV}$		

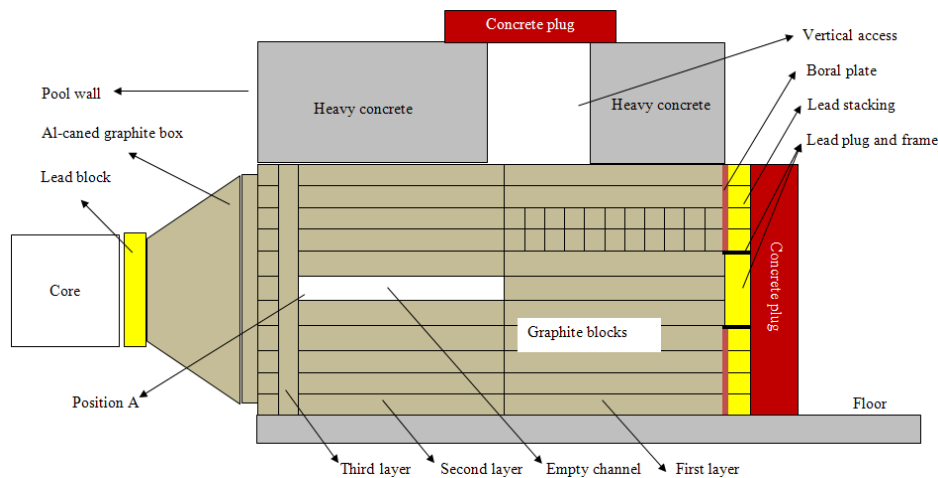
## مواد و روش ها

### ۱- ساختار ستون حرارتی راکتور تهران

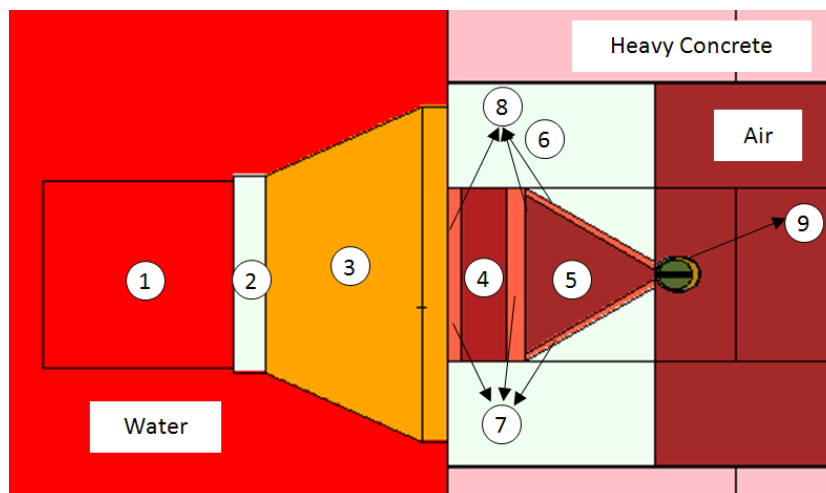
ساختار ستون حرارتی راکتور در شکل ۱ نشان داده شده است. این ستون توسط بلوک های گرافیتی پر شده است. این بلوک ها در چهار لایه با چیدمان های مختلف در ستون قرار گرفته اند. بلوک ها در لایه اول به گونه ای قرار گرفته اند که می توان تعداد نه عدد از بلوک ها را از داخل ستون بیرون کشید بدون آنکه بلوک های بالایی فرو بریزند. همچنین در قسمت مرکزی در لایه دوم جای یک بلوک خالی است. به این ترتیب با برداشتن نه بلوک لایه اول یک کانال خالی به طول تقریبی ۲۶۰ سانتی متر ایجاد می گردد که از آن برای پرتودهی نمونه ها در میدان نوترون های حرارتی استفاده می شود.

### ۲- طرای باریکه فوق حرارتی

با در نظر گرفتن خالی بودن ستون حرارتی، مجموعه ای از مواد با هندسه و چیدمان مورد نظر جایگزین گرافیت ها گردید با استفاده از کد MCNPX نوع مواد و ضخامت آنها در قسمت های مختلف بهینه گردید. شکل ۲ هندسه شبیه سازی شده را نشان می دهد.



شکل ۱: ساختار ستون حرارتی راکتور



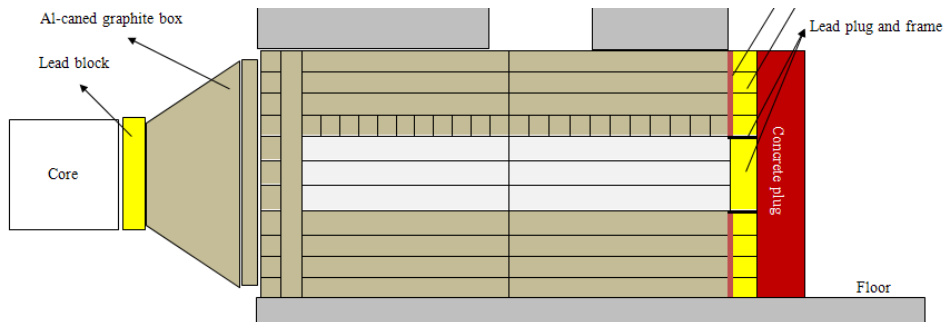
شکل ۲: نمایی از طراحی شده نهایی: (۱) قلب راکتور، (۲) بلوک سربی، (۳) قطعه گرافیتی، (۴) کندکننده آلومینیومی، (۵) موازی ساز، (۶) بازتابنده سربی، (۷) لایه های بیسموت فیلتر گاما، (۸) لایه های کادمیوم فیلتر نوترون حرارتی، (۹) فانوم سر

مواد مندرج در جدول ۲ برای قسمت کندکننده مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین از  $Pb$  و  $PbF_2$  به عنوان بازتابنده، بیسموت به عنوان فیلتر گاما و کادمیوم به عنوان فیلتر نوترون های حرارتی استفاده گردید. همچنین یک مخروط ناقص به طول ۵۰ سانتی متر به عنوان موازی ساز در انتهای مجموعه در نظر گرفته شد. هر چند که مجموعه طراحی شده برای باریکه فوق حرارتی نتایج مناسبی دارد اما ساخت و جایگزینی چنین مجموعه ای درون ستون حرارتی راکتور کار بسیار مشکلی بود. مهمترین چالش، بالا بودن سطح دز درون ستون حرارتی حتی در حالت خاموشی قلب راکتور بود که علت آن فعال شدن عناصر مختلف پیرامون قلب و استخراج در طول زمان های طولانی است. در چنین شرایطی باید ستون حرارتی تخلیه و مجموعه طراحی شده درون آن قرار گیرد که از نظر ایمنی و فیزیک بهداشت، کار مخاطره آمیزی تشخیص داده شد. لذا تصمیم گرفته شد

تا زمان یافتن یک راه حل مناسب و اساسی، ساخت این مجموعه صورت نگیرد و در عوض باریکه حرارتی طراحی گردد.

### ۳- طراحی باریکه حرارتی

ارزیابی های اولیه نشان می داد که میزان شار حرارتی درون ستون حرارتی بسیار مناسب است و می توان با طراحی یک مجموعه جدید، باریکه ای مناسب برای درمان ایجاد نمود. لذا با در نظر گرفتن چیدمان گرافیت ها، طرحی پیشنهاد گردید که بتوان بدون ایجاد تغییرات اساسی در ساختار ستون حرارتی، باریکه مناسبی از نوترون های حرارتی ایجاد نمود. در این طرح پس از تخلیه کامل لایه اول گرافیت ها، گرافیت های لایه دوم به گونه ای چیده شدند تا بتوان تعداد ۹ بلوک گرافیتی را از درون آن بیرون کشید بدون آنکه بلوک های بالایی فرو بریزند. شکل ۳ این طرح را نشان می دهد.



شکل ۳: چیدمان جدید لایه دوم گرافیت ها

این طرح پیشنهادی با موفقیت به صورت عملی آزموده شد و چیدمان گرافیت های لایه دوم به صورت مورد نظر چیده شد به گونه ای که اکنون می توان به راحتی علاوه بر ۹ بلوک لایه اول، همین تعداد بلوک را از لایه دوم بیرون کشید و ستونی از هوا به طول ۲۶۰ سانتی متر و سطح مقطع ۳۰ در ۳۰ سانتی متر ایجاد کرد. با ساخت یک موازی ساز مخروطی شکل به طول ۵ سانتی متر و نصب آن در محل خروجی نوترون و نیز ساخت یک دیوار سربی به ضخامت ۱۰ سانتی متر، شار حرارتی و نسبت کادمیومی در محل مورد نظر با استفاده از جفت پولک طلا به صورت لخت و کادمیوم دار اندازه گیری شد. همچنین از دزیومتر TLD۷۰۰ جهت اندازه گیری دز گاما استفاده شد.

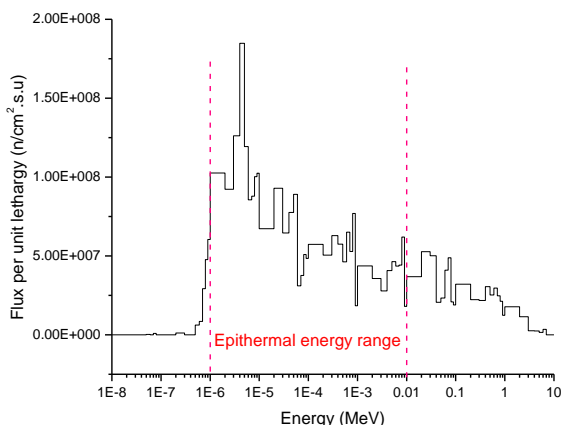
### نتایج

جدول ۳ پارامترهای باریکه نوترون فوق حرارتی را در مراحل مختلف طراحی نشان می دهد. همچنین شکل ۳ طیف نوترون نهایی بدست آمده را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می گردد، طراحی مورد نظر تمام محدودیت های مورد نیاز را برآورده می کند. اما همانطور که ذکر شد، ساخت آن نیازمند در نظر گرفتن

ملاحظات جدی ایمنی و و فیزیک بهداشت است. جدول ۳ نتایج اندازه گیری در حالت حرارتی را نشان می دهد.

جدول ۲: پارامترهای باریکه نوترون در طراحی باریکه فوق حرارتی

		$\Phi_{epithermal}$ (n/cm <sup>2</sup> .s)	$\Phi_{thermal}/ \Phi_{epi}$	$D_{gamma}/ \Phi_{epi}$ (10 <sup>-13</sup> Gy cm <sup>2</sup> )	$D_{fast}/ \Phi_{epi}$ (10 <sup>-13</sup> Gy cm <sup>2</sup> )
TRR	۱	کند کننده	۱,۲۳	۲۳,۵	---
	۲	۱ + فیلتر نوترون حرارتی	۱,۳۳	۰,۰۸	---
	۳	۲ + بازتابنده و موازی کننده	۱,۳۱	۰,۲	---
	۴	۳ + فیلتر گاما و لایه کادمیوم	۰,۶۵	۰,۰۴	۲,۱
THOR [۴]		۱,۶۹		۰,۹	۲,۸
FiR-۱ [۴]		۱,۲		۱۲,۶	۳,۳
IAEA		>۱	<۰,۰۵	<۲	<۲



شکل ۴ طیف نوترون خروجی از BSA طراحی شده

جدول ۳: نتایج اندازه گیری پارامترهای مورد نظر باریکه نوترون برای قدرت ۵ MW

Parameter	Recommended value	Measurements
$\Phi_{thermal} \left( 10^9 \frac{n}{cm^2.s} \right)$	> ۱	۱,۱۴ (Au foils)
Cd ratio	**	۱۱۲
$\frac{\dot{D}_{gamma}}{\Phi_{thermal}} (10^{-13} Gy.cm^2)$	< ۲	۹۴ (Au foils)



## بحث و نتیجه گیری

نتایج نشان می دهد که ستون حرارتی راکتور قابلیت بسیار خوبی جهت استفاده در نوترون درمانی دارد. برای حالت فوق حرارتی بزرگترین چالش، بالا بودن سطح دز گاما در عمق ستون حرارتی خالی است. همچنین برای حالت حرارتی، هر چند که شار مناسبی از نوترون های حرارتی تولید شده است اما سطح دز گاما بسیار بزرگتر از مقدار توصیه شده است که امید است در ادامه با طراحی و ساخت یک فیلتر مناسب گاما، این مشکل حل گردد.

## مراجع

1. Barth, R.F., et al., *Current status of boron neutron capture therapy of high grade gliomas and recurrent head and neck cancer*. Radiat Oncol, ۲۰۱۲. ۷(۱۴۶): p. ۱-۲۱.
2. Hendricks, J., *MCNPX ۲.۶. ۰ Manual*, ۲۰۰۸, Los Alamos National Laboratory, Tech. Report, LA-CP-۰۷-۱۴۷۳.
3. IAEA-TECDOC-۱۲۲۳, *Current status of neutron capture therapy*. ۲۰۰۱: p. ۶.
4. Liu, Y.W.H., et al., *Renovation of epithermal neutron beam for BNCT at THOR*. Applied Radiation and Isotopes, ۲۰۰۴. ۶۱(۵): p. ۱۰۳۹-۱۰۴۳.