



## افزایش شار نوترون سریع در کانال پرتودهی راکتور تحقیقاتی تهران

زارعی، زهرا<sup>(۱)</sup> - امین مظفری، مسعود\*<sup>(۲)</sup> - حسن زاده، مصطفی<sup>(۳)</sup> - محمدی، سعید<sup>(۱)</sup>

<sup>۱</sup> پیام نور مرکز مشهد، گروه فیزیک

<sup>۲</sup> سازمان انرژی اتمی، پژوهشکده علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

### چکیده:

در این تحقیق با هدف افزایش شار نوترون‌های سریع در داخل کانال پرتودهی راکتور تحقیقاتی تهران، به بررسی اثر فیلتر نوترون‌های حرارتی و افزودن صفحه سوخت در دیواره کانال پرتودهی و در نزدیکی نمونه‌های توپاز پرداخته شده است. پارامترهای مختلف نوترونی از جمله ضریب تکثیر مؤثر ( $k_{eff}$ )، شار نوترون ( $\phi$ ) و درصد افزایش شار و همچنین میزان راکتیویته ( $\rho$ ) در راکتور تحقیقاتی تهران توسط کد MCNPX محاسبه شده است. شار نوترون برای نمونه‌ها با غناهای مختلف سوخت، با هم مقایسه گردیده است. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که برای نمونه‌های توپاز، با غناهای پایین و حتی سوختی که نزدیک به زمان خروج از قلب می‌باشد، روی شار نوترون تغییری ایجاد نکرده است، در حالی که اگر هوا به جای آب در اطراف نمونه‌ها در داخل کانال قرار گیرد، میزان شار نوترون سریع به مقدار ۳۶٪ افزایش یافته و شار نوترون حرارتی به مقدار ۵۶٪ کاهش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** ضریب تکثیر مؤثر، راکتیویته، شار نوترون، نوترون‌های سریع، کد MCNPX، راکتور تحقیقاتی تهران

### مقدمه:

یکی از کاربردهای مهم راکتور تحقیقاتی تهران پرتودهی نمونه‌های مختلف جهت تولید رادیوایزوتوپ‌های مورد استفاده در حوزه صنعت و پزشکی می‌باشد. مهمترین فاکتور تأثیرگذار در پرتودهی این نمونه‌ها، میزان شار نوترون است. برای مثال، برخی سنگ‌های قیمتی (توپاز) تحت تابش شار نوترون با طیف انرژی بالای ۱ MeV (شار نوترون سریع) تغییر رنگ می‌دهند که از دید اقتصادی بسیار با ارزش هستند.

راکتور تحقیقاتی تهران با توان ۵MW با کند کننده آب سبک، باتابنده گرافیتی دارای سوخت جامد غیرهمگن از نوع صفحه‌ای می‌باشد که آب درون استخر راکتور، به عنوان حفاظ و خنک کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد. قلب راکتور شامل المان‌های سوختی از نوع MTR<sup>۱</sup> می‌باشد که داخل صفحه مشبکی قرار گرفته است. سوخت این راکتور از نوع

<sup>۱</sup>Material Testing Reactor



اورانیوم با غنای پائین (LEU) است که شامل المان‌های سوخت استاندارد (SFE) و المان‌های سوخت کنترلی (CFE) می‌باشد. هر دو نوع المان سوخت دارای صفحات سوخت از جنس  $U_3O_8-Al$  با غنای ۲۰٪ می‌باشد که در نوع SFE، ۱۹ صفحه سوخت و در نوع CFE، ۱۴ صفحه سوخت قرار می‌گیرد. هر المان CFE شامل دو تیغه کنترلی از جنس Ag-In- $Cd$  است که جهت کنترل راکتیویته قلب و تنظیم شار نوترون به کار می‌روند [۱]. در چیدمان قلب از هر ۲ نوع CFEها و SFEها استفاده شده است و قلب به صورت یک ماتریس  $6 \times 9$  می‌باشد [۲]. در اطراف قلب تعدادی جعبه‌های گرافیتی به عنوان بازتابنده جهت کاهش نشست نوترون از قلب قرار داده شده است [۳]. در این تحقیق، سعی می‌گردد تا با بهینه سازی هندسه و مواد کانال پرتودهی، به منظور بدست آوردن تغییر رنگ در سنگ های قیمتی، نسبت شار نوترونهای سریع به نوترونهای حرارتی تا حد ممکن افزایش یابد.

### روش کار :

در ابتدا نحوه عملکرد قلب فعلی (شکل ۱-الف) بررسی و سپس با کد MCNPX [۴] شبیه سازی شده است. در ادامه به منظور پرتودهی سنگ های قیمتی با طیف انرژی نوترونهای سریع، در سه طرح مختلف میزان شار نوترونهای حرارتی و سریع درون کانال پرتودهی محاسبه گردیده است. در این تحقیق، در مواردی که نامی از آب یا هوا برده نشده است، نمونه‌ها (توپاز) درون آب قرار داده شده‌اند که به صورت ماتریسی  $20 \times 3 \times 3$  از مکعب‌ها فرض شده است و در راستای محوری کانال پنخس شده‌اند.

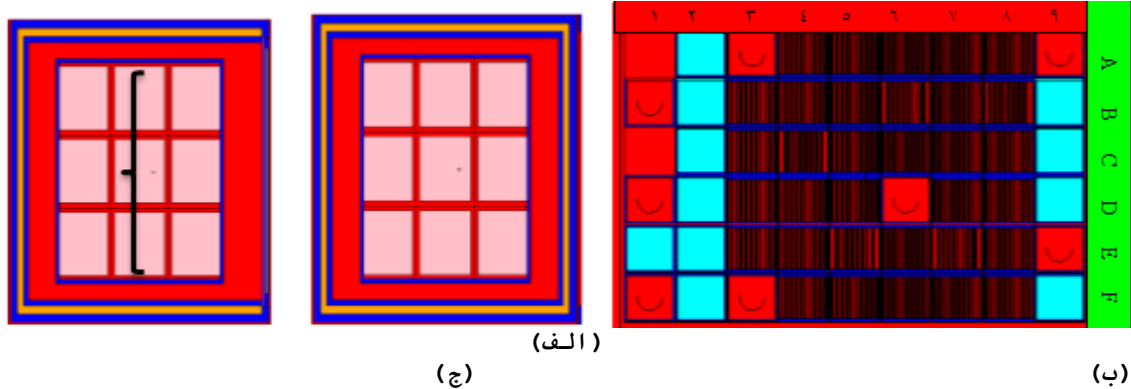
در طرح اول، لایه‌ای از  $B_4C$  در اطراف کانال پرتودهی واقع در  $D1$  شبیه‌سازی گردیده است و نمونه‌ها درون آب قرار دارند (شکل ۱-ب). علت استفاده از  $B_4C$  این است که ایزوتوپ  $^{10}B$  موجود در  $B_4C$ ، به دلیل سطح مقطع جذب بالا حدود  $3800$  بارن برای نوترونهای حرارتی با اندرکنش  $(n, \alpha)$ ، جاذب بسیار مناسبی برای این نوترون‌ها محسوب می‌شود، در حالی که تأثیر محسوسی بر شار نوترونهای سریع ندارد.

در طرح دوم به منظور افزایش شار نوترونهای سریع درون کانال پرتودهی، در یکی از دیواره‌های کانال پرتودهی به جای فیلتر از صفحه سوخت تازه استفاده شده است (شکل ۱-ج). در طرح سوم، فرض گردید که در اطراف نمونه‌ها به جای آب، هوا قرار دارد.

<sup>۱</sup>Low Enriched Uranium

<sup>۲</sup>Standard Fuel Element

<sup>۳</sup>Control Fuel Element



شکل ۱: الف) چیدمان قلب فعلی راکتور تهران، ب) جعبه حاوی نمونه‌ها (توپاز) به همراه فیلتر B<sub>4</sub>C و ج) جعبه به همراه صفحه سوخت

لازم به ذکر است مقدار راکتیویته که معیاری برای میزان وارد کردن میله‌های کنترل درون قلب راکتور است، از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$\rho(\$) = \frac{k_{eff}-1}{k_{eff}} \quad (1)$$

برحسب ضریب تکثیر مؤثر می‌باشد. یکای راکتیویته در این رابطه، \$ می‌باشد که با توجه به اینکه در راکتورهای آب سبک مقدار راکتیویته عددی کوچک بین صفر تا یک می‌باشد، بنابراین با ضرب این عدد در ۱۰<sup>۵</sup> راکتیویته با یکای pcm معرفی می‌گردد.

### نتایج :

نتایج محاسبات مربوط به پارامترهای نوترونی ضریب تکثیر مؤثر و راکتیویته در جدول ۱ ارائه شده است. مقایسه نتایج مربوط به قلب فعلی و طرح مبنا نشان می‌دهد که جایگذاری نمونه‌ها جهت پرتودهی در خارج از چیدمان قلب، تأثیر بسیار ناچیزی (در حد ۷pcm) در راکتیویته قلب ایجاد می‌کند که کاملاً قابل چشم‌پوشی است. اما با افزودن فیلتر B<sub>4</sub>C در این کانال پرتودهی، راکتیویته اضافی قلب به میزان ۲۵۹pcm کاهش می‌یابد که اثر مستقیم وجود فیلتر را در این کانال نشان می‌دهد. جایگزینی یک طرف فیلتر توسط یک صفحه سوخت، موجب افزایش راکتیویته قلب در حدود ۱۰۰pcm می‌گردد. پیش بینی می‌شد که وجود این صفحه سوخت موجب افزایش شار نوترون‌های سریع گردد. اما نتایج این محاسبات نشان داد که در میزان شار سریع نسبت به طرح اول، تغییر قابل توجهی ایجاد نگردید. علت این امر، وجود آب در داخل کانال پرتودهی است که موجب کند شدن نوترون‌های حاصل از شکافت تولید شده در این صفحه سوخت

\*Per cent mille

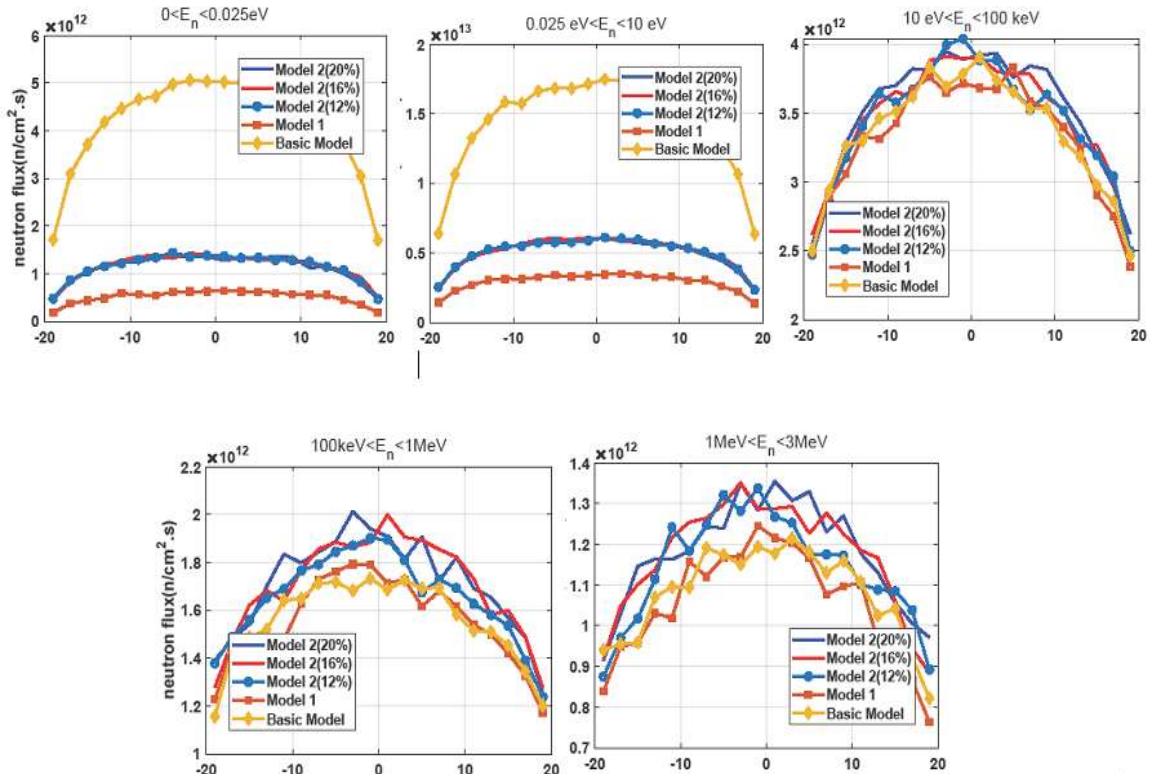


می‌گردد. همچنین تغییر غنای سوخت این صفحه، تأثیر چندانی در مقدار راکتیویته کل قلب ندارد. از سوی دیگر، در حالتی که آب داخل کانال پرتودهی با هوا جایگزین گردد و محاسبات برای طرح سوم با همان صفحه سوخت با غنای ۲۰٪ تکرار گردد، راکتیویته قلب در مقایسه با طرح دوم، حدود ۱۰۰ pcm کاهش می‌یابد که دلیل این موضوع، حذف خنک کننده در داخل کانال پرتودهی و در نتیجه کاهش میزان کند کنندگی در داخل کانال است.

جدول ۱: مقدار ضریب تکثیر مؤثر و راکتیویته قلب در طرح‌های مختلف با کانال پرتودهی D1

پارامتر	قلب فعلی	طرح مینا	طرح اول	طرح دوم با غنای سوخت:			طرح سوم
				۱۲٪	۱۶٪	۲۰٪	
$k_{eff}$ ( $\pm 0.00008$ )	۱/۰۵۵۶۲	۱/۰۵۵۵۴	۱/۰۵۲۶۶	۱/۰۵۳۷۰	۱/۰۵۳۹۰	۱/۰۵۳۸۳	۱/۰۵۲۷۳
$\rho$ (pcm)	۵۲۶۹	۵۲۶۲	۵۰۰۳	۵۰۹۶	۵۱۱۴	۵۱۰۸	۵۰۰۹
$\rho\Delta$ (pcm)	-	-	-۲۵۹	-۱۶۵	-۱۴۷	-۱۵۴	-۲۲۶

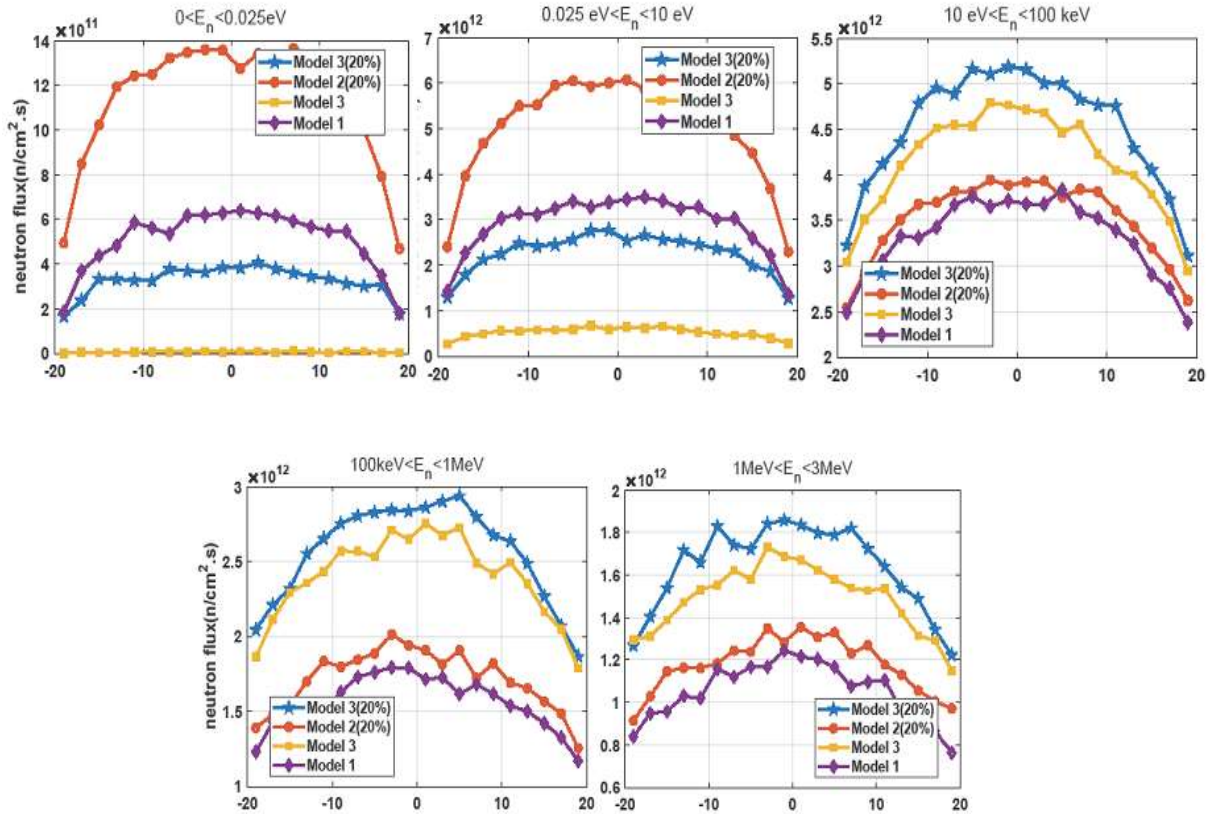
نتایج محاسبات مربوط به شار نوترون در داخل نمونه‌ها برای طرح مینا، طرح اول و طرح دوم برای پنج گروه انرژی در شکل ۲ ارائه شده است. اولین نمودار در شکل ۲ بازه انرژی صفر تا ۰/۰۲۵ eV به عنوان شار نوترون‌های حرارتی و آخرین نمودار، انرژی‌های بیشتر از ۱ MeV به عنوان شار نوترون‌های سریع (به منظور پرتودهی سنگ‌های قیمتی) در نظر گرفته شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با اضافه شدن فیلتر  $B_4C$  به کانال پرتودهی، شار نوترون‌های حرارتی تا حدود ۱۰ برابر کاهش می‌یابد، در حالی که تأثیر زیادی در سه گروه دیگر انرژی ایجاد نمی‌شود. لذا از این نمودارها چنین بر می‌آید که حضور فیلتر  $B_4C$  موجب کاهش قابل توجه شار نوترون‌های حرارتی می‌گردد که از این دیدگاه بسیار مناسب است. لازم به توضیح است که این نمودارها برای مکعب‌های واقع در مرکز کانال پرتودهی و در راستای محوری کانال ارائه شده است، ردیف مورد بررسی در شکل ۱-ج مشخص شده است.



شکل ۲: شار نوترون در ۵ گروه انرژی در جعبه پرتودهی، مقایسه بین فیلتر B4C و تغییر غنا با حالت پرتودهی

### نمونه‌ها در کانال D1.

مقایسه شار نوترون در ۵ گروه انرژی به خصوص در آخرین نمودار، نشان می‌دهد که با تغییر غنا از ۱۲٪ به ۲۰٪، تغییر قابل توجهی مشاهده نمی‌گردد. حال اگر در طرح سوم، به جای آب در اطراف نمونه‌ها، هوا قرار داده شود، به دلیل کم شدن آب در فضای داخل کانال و در نتیجه، کاهش کند کنندگی نوترون‌ها، شار نوترون سریع بیشتری به نمونه‌ها خواهد رسید. نتایج این محاسبات در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳: شار نوترون در ۵ گروه انرژی در مکان D1 برای طرح‌های اول و سوم با آب و هوا.

جدول ۲: نسبت و درصد تغییرات شار در کانال D1 برای نمونه‌های ردیف وسط.

نوع طرح	طرح اول	طرح دوم (صفحه سوخت و تغییر غنا)			طرح سوم
		D1 12% FP	D1 16% FP	D1 20% FP	
مشخصات	D1 Filter	D1 12% FP	D1 16% FP	D1 20% FP	D1 20% FP with air
$\frac{\overline{\Phi F}}{\overline{\Phi T}}$	۲/۰۷۶۰	۰/۹۹۷۹	۱/۰۱۹۲	۱/۰۴۱۹	۵/۰۲۸۸
میزان تغییرات شار سریع نسبت به طرح اول	-	٪۹	٪۱۱	٪۱۲	٪۵۶
میزان تغییرات شار حرارتی نسبت به طرح اول	-	٪۱۲۶	٪۱۲۶	٪۱۲۳	-٪۳۶

شکل ۳ نشان می‌دهد که شار نوترون‌های سریع طرح سوم نسبت به طرح اول، ۵۶٪ افزایش و شار نوترون‌های حرارتی، ۳۶٪ کاهش یافته است. ردیف اول در جدول ۲ نسبت شار نوترون‌های سریع به حرارتی در همان طرح، ردیف دوم



درصد افزایش نوترون‌های سریع و ردیف آخر میزان تغییرات شار نوترون‌های حرارتی در مقایسه با طرح اول را نشان می‌دهد.

### بحث و نتیجه گیری:

در راکتور تحقیقاتی تهران با هدف افزایش شار نوترون‌های سریع نسبت به حرارتی به منظور پرتودهی سنگ‌های قیمتی، در طرح اول به منظور حذف نوترون‌های حرارتی، لایه‌ای از کریید بور در جعبه پرتودهی قرار داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نسبت میانگین شار نوترون‌های سریع به حرارتی مقدار ۵۲٪ می‌باشد که نسبت به طرح مبنا به شدت افزایش داشته است. در طرح سوم درون جعبه پرتودهی با فیلتر کرییدبور و صفحه سوخت به جای آب، هوا قرار داده شده است، میانگین شار نوترون‌های سریع به حرارتی در آن طرح حدود ۵ برابر می‌باشد. در طرح سوم نسبت به طرح اول، شار نوترون‌های سریع ۳۶٪ افزایش و شار نوترون‌های حرارتی ۵۶٪ کاهش را نشان می‌دهد. بنابراین همانطور که نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، استفاده از صفحه سوخت در یک طرف فیلتر چندان تأثیر محسوسی بر شار نوترون‌های سریع ندارد. اما جایگزین کردن هوا به جای کندکننده آب درون جعبه پرتودهی، شار نوترون‌های سریع را به شدت افزایش می‌دهد. از این رو، در صورت برآورده شدن خنک‌کنندگی نمونه‌ها با هوا، می‌توان چنین ادعا نمود که کانال پرتودهی پیشنهادی، مکان مناسبی جهت پرتودهی نمونه‌های مختلف با شار نوترون‌های سریع بالا فراهم می‌کند.

### مراجع :

- Lashkari, A., Khalafi, H., Mirvakili, S.M., Forughi, S., 2012. Neutronic analysis for Tehran Research Reactor mixed-core. Prog. Nucl. Energy 60, 31–37.
- Zandi, N., Afarideh, H., Aboudzadeh, M. R., & Rajabifar, S. (2018). Study on a new design of Tehran Research Reactor for radionuclide production based on fast neutrons using MCNPX code. Applied Radiation and Isotopes, 132, 67-71.
- Balafi, H., Gharib, M., 2005. Optimization of  $^{60}\text{Co}$  production using neutron flux trap in the Tehran research reactor. Ann. Nucl. Energy 32, 331–341.
- Aboudzadeh, M.R., Moassesi, M.E., Amiri, M., Shams, H., Alirezapour, B., Sadeghi, M., Fakhraei Sari, M., Keyvani, M., 2015. Preparation and Characterization of Chitosan capped Radioactive Gold Nanoparticles: Neutron Irradiation Impact on Structural Properties.... Safety Analysis Report for the Tehran Research Reactor (HEU), Tehran-Iran (13, 339-345.AEOI, 1966).



بیت و ششمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۸۰۷ اسفندماه ۱۳۹۸ - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران



---

MCNPX User's manual, 2002. Version 2.4.0, Los Alamos National Laboratory, New Mexico.