

## بررسی میزان حساسیت شار نوترون با تغییر چگالی ماده نمونه در راکتور تحقیقاتی تهران

داریوش رضایی اوچبلاغ<sup>۱</sup>، مهسا عسگری<sup>۱\*</sup>، مسعود امین مظفری<sup>۲</sup>، مصطفی حسن زاده<sup>۲</sup>

۱. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳، تهران- ایران

۲. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران- ایران

### چکیده:

آگاهی از عوامل و پارامترهایی که بر میزان حساسیت شار نوترون در قلب راکتور تاثیر می‌گذارند یکی از مهم‌ترین مباحث در فیزیک راکتور است. در اغلب مطالعات اعتبار سنجی که توسط کدهای شبیه‌سازی برای قلب راکتور انجام می‌شود، شار نوترون مورد توجه قرار می‌گیرد؛ اما میزان حساسیت شار نوترون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. عوامل زیادی هستند که می‌توانند بر میزان حساسیت شار نوترون اثر بگذارند، از جمله: مکان فضایی قرارگیری نمونه، توان راکتور، میزان انباشتی سم زینان در قلب راکتور، مکان میله‌های کنترل و چگالی ماده نمونه. در این مقاله اثر حضور نمونه و نیز تغییرات چگالی آن بر روی میزان حساسیت شار نوترون بررسی شده است. در این مقاله ایندیوم به عنوان ماده نمونه مورد مطالعه و شبیه‌سازی با کد MCNPX2.7 قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد که با حضور ایندیوم، میزان حساسیت شار نوترون‌های حرارتی تغییرات بیشتری خواهد داشت و همچنین میزان حساسیت ناشی از تغییرات چگالی ماده نمونه معادل 5.5% است.

کلمات کلیدی: حساسیت، شار نوترون، MCNPX2.7، ایندیوم، راکتور

## Investigation of neutron flux sensitivity by changing the density of the sample material in TRR

D. Rezaei Ochbelagh<sup>1</sup>, M. Asgari<sup>1\*</sup>, M. Amin Mozafari<sup>2</sup>, M. Hasanzadeh<sup>2</sup>

1. Department of Nuclear Engineering, Energy Engineering and Physics Faculty, Amirkabir University of Technology, 15875-4413, Tehran- Iran
2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Institute of Nuclear Science and Technology, 14155-1339, Tehran- Iran

### Abstract:

Awareness of factors and parameters affecting on neutron flux sensitivity in reactor core is one of the most important topics in reactor physics. Neutron flux has been considered in most validation studies performed by simulation codes for reactor cores; however, neutron flux sensitivity has been received less attention. There are many factors that can affect neutron flux sensitivity, including: spatial location of sample, reactor power, Xenon accumulation in reactor core, location of control rods and density of sample material. In this paper, the effect of sample and its density changes on neutron flux sensitivity are investigated. In this paper, indium is studied and simulated as a sample material with the MCNPX2.7 code. The results showed that with the presence of indium, thermal neutron flux sensitivity will change more and also the sensitivity due to changes in the density of the sample material is equal to 5.5%.

**Keywords:** Sensitivity, Neutron Flux, MCNPX2.7, Indium, TRR

## ۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین پارامترهای فیزیکی در راکتورهای هسته‌ای، شار نوترون است که به عنوان یک کمیت اسکالر شناخته می‌شود. این کمیت در فیزیک راکتور به ویژه در محاسبه و اندازه‌گیری سایر مولفه‌های نوترونی و ترموهیدرولیک نقش اساسی دارد. برای کارگردانی راکتور، مخصوصاً در یک راکتور تحقیقاتی، بسیار مهم است که جزییات توزیع شار نوترون را در کل نواحی قابل دسترس در راکتور داشته باشیم. از این رو تحقیق و بررسی جزییات توزیع شار نوترون یک مولفه بسیار مهم در راکتورهای هسته‌ای است. در بسیاری از راکتورهای تحقیقاتی رادیوایزوتوپ‌هایی تولید می‌شوند که می‌توانند هم به‌طور مستقیم در پرتو درمانی<sup>۱</sup> و عکس‌برداری یا به‌طور غیرمستقیم در رادیوداروها استفاده می‌شود [1]. کارایی تولید این رادیوایزوتوپ‌ها تحت تاثیر دانش شار نوترون و میزان تاثیر بر حساسیت آن است [1]. به‌علاوه مطالعات تابش مواد می‌تواند در یک شار به خوبی شناخته شده انجام شود به‌طوری‌که آسیب تابش و گرمایش هسته‌ای قابل بررسی باشد. [2] یک توصیف کامل از طیف‌های نوترون مربوط به یک چنین اندازه‌گیری‌ای می‌تواند برای هر دو روش عملیاتی و آزمایشی استفاده شود [3]. یکی از عواملی که با کمک آن می‌توان به بررسی میزان حساسیت شار نسبت به چگالی ماده نمونه پرداخت، تغییر چگالی ماده نمونه است. با اعمال یک سری شرایط خاص (مانند تغییر دما و تغییر حالت ماده) می‌توان چگالی ماده را تغییر داد [4]. اندازه‌گیری شار مطلق نوترون‌ها به دو صورت انجام می‌گیرد: ۱- استفاده از اتاقک شکافت<sup>۲</sup> که در آن ذرات حاصل از شکافت اورانیوم باعث یونیزاسیون می‌گردند و جهت آشکارسازی نوترون به کار می‌روند. ۲- آشکارسازهای  $BF_3$  که در اثر بمباران نوترونی هسته بور و تولید ذره آلفا حاصل از واکنش  $(n, \alpha)$  گاز داخل آشکارساز یونیزه می‌گردد و در نهایت جهت آشکارسازی نوترون استفاده می‌شود. در این پژوهش از کد MCNPX2.7 برای شبیه‌سازی استفاده شده است. در این مقاله به بررسی بعضی از پارامترهای موثر بر میزان حساسیت اندازه‌گیری شار نوترون و محاسبه میزان تاثیر آنها در راکتور تحقیقاتی تهران می‌پردازیم.

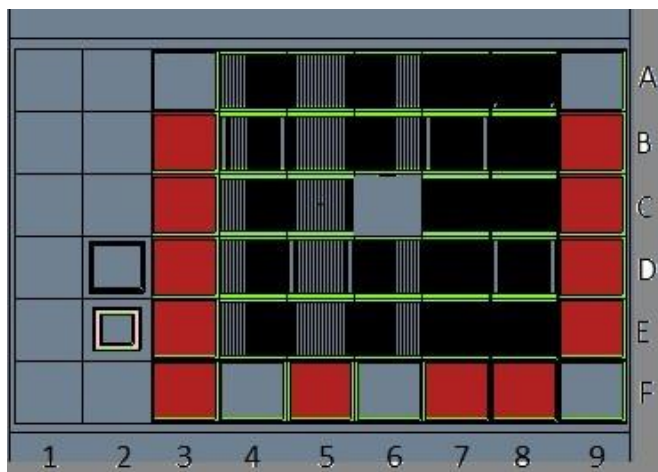
## روش کار:

قلب راکتور تحقیقاتی تهران از یک صفحه نگه‌دارنده تشکیل یافته است که یک شبکه آلومینیومی به ابعاد  $46\text{cm} \times 75\text{cm}$  و با ضخامت  $13\text{cm}$  است که دارای ۵۴ محل برای قرارگیری بسته‌های سوخت و دیگر اجزای قلب می‌باشد [5]. تعداد مجتمع‌های سوخت، میله‌های کنترل (مجموع Safety rod و Reg-rod)، بسته‌های بازتابنده گرافیتی و IR-Box ها در قلب فشرده شماره ۶ راکتور تهران، به ترتیب برابر است با: ۱۹، ۵، ۱۲ و ۶ عدد. در این مقاله ابتدا با استفاده از کد مونت کارلو MCNPX2.7 شار نوترون را برای قلب راکتور تحقیقاتی تهران در کانال F6، بدون حضور نمونه، به دست می‌آوریم. سپس همین شبیه‌سازی را این‌بار با حضور نمونه، که در اینجا ایندیم<sup>۳</sup> می‌باشد، تکرار می‌کنیم. در اینجا تاثیر حضور یک ماده که جاذب نوترون می‌باشد و خود دچار شکافت هسته‌ای نمی‌شود، آشکار می‌گردد. در شکل ۱ چیدمان قلب راکتور تحقیقاتی تهران را مشاهده می‌کنید.

<sup>1</sup> Radiation Therapy

<sup>2</sup> Fission Chamber

<sup>3</sup> Indium



شکل (۱): چیدمان قلب راکتور تحقیقاتی تهران

همچنین در ادامه جهت بررسی تاثیر تغییرات چگالی ایندیوم بر شار نوترون، با فرض اینکه تمامی میله‌های کنترل در جایگاه خود ثابت شده اند و تغییر نمی‌کنند، میزان چگالی ماده نمونه را تا ۱۰ درصد کمتر و بیشتر از مقدار چگالی ماده مورد استفاده در این تحقیق تغییر می‌دهیم و شار نوترون را برای همه حالتها محاسبه می‌کنیم.

در تمام طول آزمایش مقدار توان و دمای راکتور ثابت بوده و راکتور به صورت Full Power یعنی با توان 5MW در حال کار می‌باشد. دمای متوسط آب استخر  $37.8^{\circ}\text{C}$  در نظر گرفته شده است.

## نتایج

به منظور اعتبارسنجی<sup>۴</sup> شبیه‌سازی انجام شده، میزان  $k_{\text{eff}}$  به دست آمده در نتایج شبیه‌سازی برای شار را با میزان آن که در SAR ذکر شده مقایسه می‌کنیم. در این شبیه‌سازی میله‌های کنترل اصلی به میزان 80% و رگراد به میزان 50% خارج از قلب قرار دارند. در شبیه‌سازی انجام شده، این مقدار معادل 1.03460 به دست آمد. دلیل بزرگ بودن نسبی این عدد این است که اثرات راکتیویته زینان در آن در نظر گرفته نشده است. طبق مقدار ذکر شده در SAR<sup>۵</sup> برای راکتور تحقیقاتی تهران مقدار عددی که باید برای راکتیویته زینان در حال تعادل در نظر بگیریم و از عدد به دست آمده کم کنیم برابر است با: [6].3230 pcm با این حساب برای  $k_{\text{eff}}$  خواهیم داشت: 1.0023 که به مقدار واقعی در راکتور تهران بسیار نزدیک است.

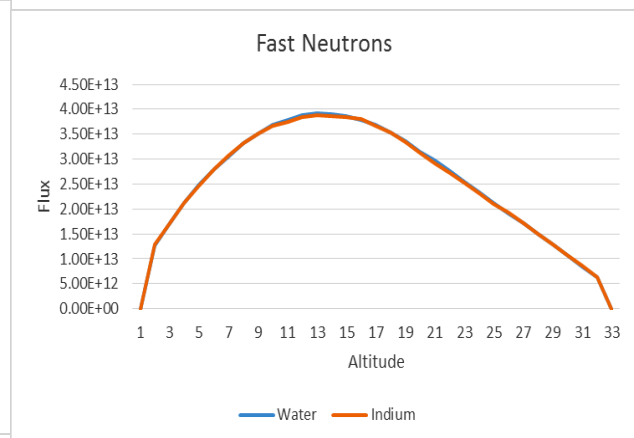
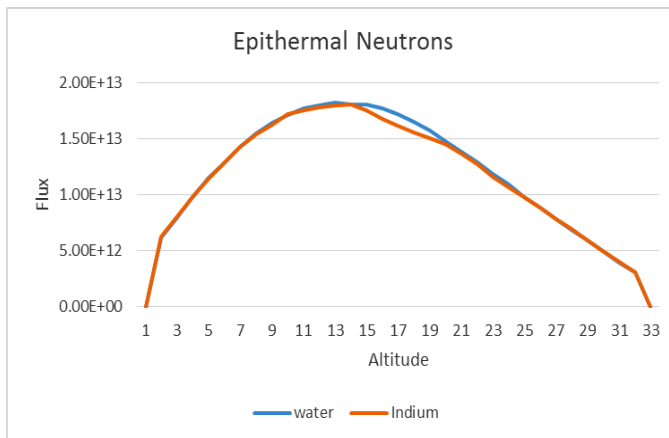
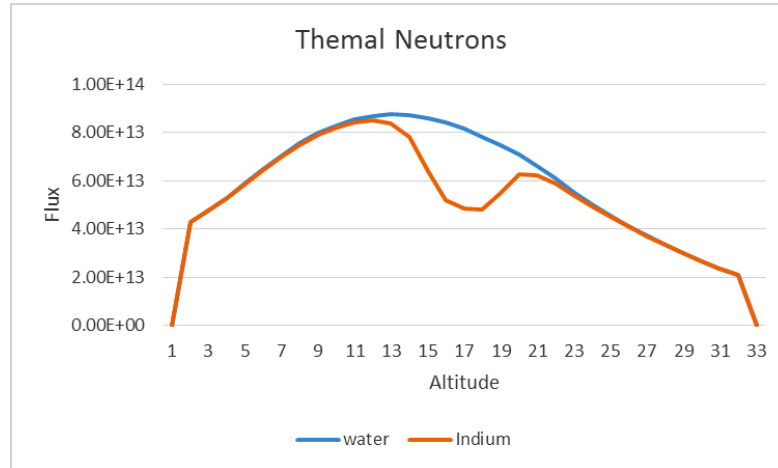
مقادیر شار نوترون در هر سه انرژی حرارتی، فوق حرارتی و سریع به دست آمده در راستای کانال پرتو دهی F6 برای حالتی که نمونه ایندیوم در قلب قرار ندارد و در کانال پرتو دهی<sup>۶</sup> F6 فقط آب موجود است و همچنین در حالتی که نمونه در این کانال قرار دارد، با استفاده از کد MCNPX2.7 محاسبه شده است. برای اینکه مقدار شار به طور دقیق در هر قسمت از کانال پرتو دهی به دست آید، ارتفاع آن را به چند قسمت<sup>۷</sup> تقسیم بندی می‌کنیم و شار در هر کدام از این قسمت‌ها به دست می‌آید.

<sup>4</sup> Validation

<sup>5</sup> Safety Analysis Report

<sup>6</sup> Irradiation Box

<sup>7</sup> Segment



کل (۲): تفاوت شار به دست آمده با و بدون حضور نمونه برای نوترون‌های حرارتی و فوق حرارتی و سریع

در شکل ۲ تفاوت مقدار شار زمانی که ایندیوم در قلب راکتور قرار دارد، برای نوترون‌های حرارتی و فوق حرارتی و سریع ارائه شده است. میزان میانگین شار و انحراف معیار برای شار، در حالتی که داخل کانال پرتودهی فقط آب و همچنین زمانی که ایندیوم قرار دارد، برای نوترون‌های حرارتی، فوق حرارتی و سریع در جدول ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است که این مقادیر در قسمت میانی کانال F6 محاسبه شده‌اند.

جدول (۱): میانگین شار و انحراف معیار برای نوترون‌های حرارتی، فوق حرارتی و سریع در حالت حضور و عدم حضور نمونه

انحراف معیار میانگین	شار میانگین	انرژی نوترون
3.72E-03	6.08E+13	حرارتی
3.77E-03	5.53E+13	
4.83E-03	1.24E+13	فوق حرارتی
4.84E-03	1.22E+13	
3.78E-03	2.66E+13	سریع
3.79E-03	2.65E+13	

میزان انحراف معیار میانگین در حقیقت از جمع تمام انحراف معیارهای به‌دست آمده در شبیه‌سازی برای قسمت‌های مختلف تقسیم بندی شده (تقسیم‌بندی ارتفاع کانال پرتو دهی) و تقسیم این مقدار بر تعداد قسمت‌ها به‌دست آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود تفاوت چشمگیری در میزان انحراف معیار در این دو حالت وجود ندارد. همینطور شار میانگین همان‌طور که در شکل ۱ هم مشخص است) در هر دو مورد برای نوترون‌های فوق حرارتی و سریع تقریباً یکسان است ولی مقدار آن برای نوترون‌های حرارتی به میزان بیشتری تغییر می‌کند.

## اثر تغییر چگالی

برای اینکه ببینیم تغییر چگالی ماده چه میزان حساسیتی در شار ایجاد می‌کند چگالی را تا ۱۰٪ تغییر دادیم. در هر گام چگالی را به اندازه ۱٪ تغییر و شبیه‌سازی را انجام دادیم. این کار را هم برای افزایش میزان چگالی و هم کاهش آن انجام دادیم. در جدول ۲ میانگین شار و انحراف معیار آن در حالی که چگالی ماده در حال افزایش است به ترتیب برای هر سه حالت نوترون‌های حرارتی، فوق حرارتی و سریع آورده شده است.

جدول (۲): شار و انحراف معیار میانگین در حالی که چگالی در حال افزایش است برای نوترون‌های حرارتی، فوق حرارتی و سریع

انحراف معیار میانگین	شار میانگین	انرژی نوترون	درصد تغییر چگالی
3.78E-03	5.51E+13	حرارتی	2%
4.85E-03	1.22E+13	فوق حرارتی	
3.79E-03	2.65E+13	سریع	
3.77E-03	5.53E+13	حرارتی	6%
4.84E-03	1.22E+13	فوق حرارتی	
3.79E-03	2.65E+13	سریع	
3.78E-03	5.53E+13	حرارتی	10%
4.84E-03	1.22E+13	فوق حرارتی	
3.79E-03	2.65E+13	سریع	

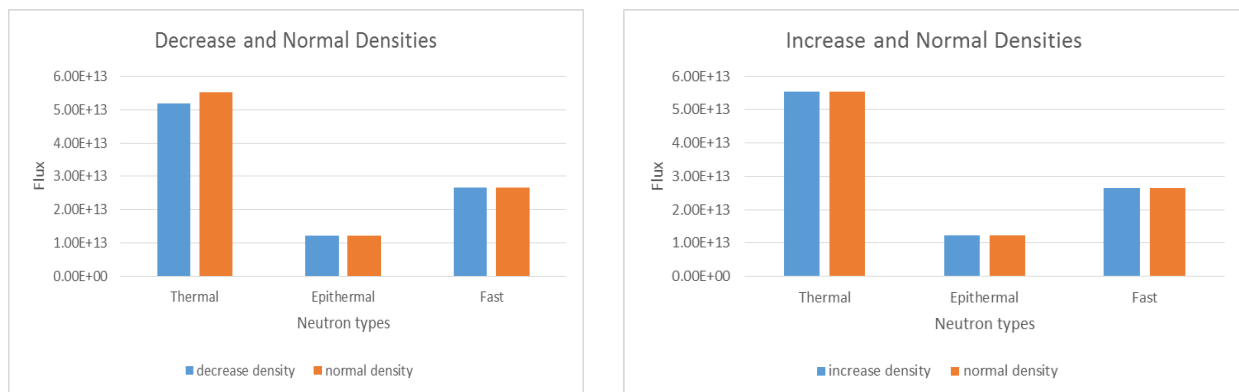
در جدول ۴ میانگین شار و انحراف معیار آن در حالی که چگالی ماده در حال کاهش است به ترتیب برای هر سه حالت نوترون‌های حرارتی و فوق حرارتی و سریع آورده شده است.

جدول (۳): شار و انحراف معیار میانگین در حالی که چگالی در حال کاهش است برای نوترون‌های حرارتی

انحراف معیار میانگین	شار میانگین	انرژی نوترون	درصد تغییر چگالی
3.78E-03	5.20E+13	حرارتی	2%
4.85E-03	1.22E+13	فوق حرارتی	
3.80E-03	2.65E+13	سریع	
3.77E-03	5.19E+13	حرارتی	6%
4.84E-03	1.22E+13	فوق حرارتی	
3.79E-03	2.66E+13	سریع	
3.78E-03	5.18E+13	حرارتی	10%
4.85E-03	1.22E+13	فوق حرارتی	
3.80E-03	2.65E+13	سریع	

از مقایسه مقادیر شار به دست آمده در جداول ۲ و ۳ با جدول ۱ (که شار مرجع محسوب می‌شود) مشخص می‌گردد که با افزایش چگالی ماده نمونه، شار میانگین نوترون‌های حرارتی به میزان کمی (در حدود 1.002%) تغییر می‌کند و شار میانگین نوترون‌های فوق حرارتی و سریع تقریباً ثابت هستند. اما وقتی چگالی ماده نمونه کاهش می‌یابد میزان تغییر در میانگین شار نوترون‌های حرارتی بیشتر از زمانی است که چگالی ماده افزایش می‌یابد (در حدود 1.066%) ولی شار میانگین نوترون‌های فوق حرارتی و سریع، همانند زمانی که چگالی ماده در حال افزایش است، تغییرات زیادی نسبت به شار مندرج در جدول ۱ ندارد.

در شکل (۳)، میزان شار برای هر سه نوع نوترون، در حالی که میزان چگالی کم و زیاد شده است، در مقایسه با چگالی در حالت نرمال نمایش داده شده است.



شکل (۳): مقایسه شار در حالی که چگالی ماده نمونه کم یا زیاد شده است

میزان حساسیت ناشی از تغییرات چگالی به میزان ۱۰ درصد، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\delta\phi}{\phi} = 5.5\%$$

### بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت شار نوترون در قلب راکتور و لزوم آگاه بودن به میزان دقیق آن، در این مقاله به بررسی تاثیر دو عامل حضور ماده جاذب نوترون در قلب و همچنین تغییرات چگالی ماده با استفاده از کد MCNPX2.7 پرداختیم. همانطور که از نتایج به دست آمده مشخص است شار نوترون‌های فوق حرارتی و سریع در هر دو حالت حضور و عدم حضور نمونه تقریباً ثابت است و تغییر چندانی ندارد اما شار نوترون حرارتی تغییرات بیشتر و در نتیجه حساسیت ناشی از تغییرات چگالی بیشتری (در حدود ۱٪) دارد. همچنین تغییرات چگالی ماده به میزان ۱۰٪، میزان حساسیت شار به اندازه 5.5% تغییر می‌دهد.

### مراجع

- [1] E. L. MacConnachie, D. Novog, and S. Day, "Quantification of system uncertainties in activation experiments at nuclear research reactors," *Ann. Nucl. energy*, vol. 134, pp. 432–440, 2019.
- [2] D. Chandler, et al, "Nuclear transmutations in HFIR's beryllium reflector and their impact on reactor operation and reflector disposal," *Nucl. Technol.*, vol. 177, no. 3, pp. 395–412, 2017, doi: 10.13182/NT12-A13483.



- [3] L. Snoj, et al, “Analysis of neutron flux distribution for the validation of computational methods for the optimization of research reactor utilization,” *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 69, no. 1, pp. 136–141, 2011, doi: 10.1016/j.apradiso.2010.08.019.
- [4] C. Guminski, “Chapter nine-Determination of phase diagrams with reactive or volatile elements,” in *Methods for phase diagrams*, 2007, pp. 293–337.
- [5] M. Gharib, M. Arkani, and H. Khalafi, *Nuclear Reactors Experiments (In Persian)*. .
- [6] AEOI, “Safety Analysis Report for the Tehran Research Reactor- Chapter 5,” .