



## بررسی تأثیر احیای قلب راکتور تحقیقاتی MNSR بر روی کیفیت باریکه نوترونی سیستم رادیوگرافی نوترونی

چوپان دستجردی، محمدحسین\* -مختاری، جواد

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

### چکیده:

یک سیستم رادیوگرافی نوترونی با ایجاد یک باریکه نوترون حرارتی خارج از قلب و تانک راکتور تحقیقاتی MNSR راه اندازی شده است. این سیستم در واقع یک سایت پرتودهی خارجی در راکتور با استفاده از قلب راکتور به عنوان چشمه نوترونی سیستم محسوب می‌شود. پس از راه اندازی سیستم رادیوگرافی نوترونی، قلب راکتور به منظور جبران مصرف سوخت و افزایش راکتیویته مازاد از طریق افزودن بازتابنده برلیومی احیا شده است. افزودن بازتابنده برلیومی شرایط فیزیکی قلب راکتور را تغییر می‌دهد. در این مقاله اثر احیای قلب راکتور MNSR بر روی کیفیت باریکه نوترونی مورد ارزیابی قرار گرفت. کیفیت باریکه با استفاده از استاندارد سنجش کیفیت و حساسیت ASTM<sup>۱</sup>:E545 انجام شد. نتایج اندازه گیری‌ها نشان می‌دهد کیفیت باریکه نوترونی پس از احیای قلب راکتور بهبود یافته است.

**کلمات کلیدی:** رادیوگرافی نوترونی، راکتور تحقیقاتی MNSR، استاندارد ASTM، باریکه نوترونی

### مقدمه:

راکتورهای تحقیقاتی هسته‌ای قابلیت تولید شار بالا و پایداری از نوترون و گاما دارند که در زمینه‌های مختلف پرتودهی برای تحقیقات و خدمات آزمایشگاهی و صنعتی کاربرد دارند [۱]. دستیابی به شار نوترون تولید شده در راکتورهای تحقیقاتی از طریق سایت‌های پرتوهای داخل قلب و یا سایت‌های پرتودهی خارج از قلب راکتور امکان‌پذیر است که انتخاب محل پرتودهی وابسته به برخی عوامل نظیر نوع آزمایش، شار مورد نیاز، و ابعاد نمونه‌های تحت آزمایش است. برخی از فعالیت‌ها نظیر تولید رادیوایزوتوپ و تغلیظ سیلیکون بدلیل نیاز به حداکثر شار نوترونی در سایت‌های داخلی راکتور پرتودهی می‌شوند [۲]. از سوی دیگر برخی از فعالیت‌ها نظیر رادیوگرافی نوترونی و پراش نوترونی به دلیل نیاز

<sup>۱</sup> Miniature Neutron Source Reactor

<sup>۲</sup> American Society of Testing and Material



به طراحی باریکه نوترونی مخصوص و بزرگ بودن اجسام تحت آزمایش در سایت‌های خارجی راکتور پرتودهی می‌شوند [۳].

بدلیل مصرف سوخت در قلب راکتورهای هسته‌ای با گذشت زمان مشخصی از کارکرد راکتور بایستی مصرف سوخت جبران گردد. جبران مصرف سوخت در راکتورهای هسته‌ای از طرق مختلفی نظیر افزودن سوخت تازه به قلب، جابجایی مکان مجتمع‌های سوخت در قلب، و یا تغییر بازتابنده‌های قلب انجام می‌شود که در این موارد بدلیل تغییر قلب ممکن است تغییراتی در میزان شار یا طیف در سایت‌های پرتودهی داخلی یا خارجی قلب بوجود آید [۴-۶]. جناح‌نشان داد با تغییر غنای سوخت به مقادیر کمتر و جایگزینی سوخت مصرف شده با سوخت تازه، میزان شار نوترون درون سایت‌های پرتودهی داخلی تغییری نمی‌کند اما طیف نوترون سخت‌تر می‌شود [۴]. زوبی‌نیز نشان داد تغییر قلب راکتور در برخی سایت‌های پرتودهی منجر به کاهش شار نوترون و در برخی دیگر منجر به افزایش شار نوترون می‌شود و حتی میزان میزان نوترون‌های حرارتی نیز تغییر می‌کند [۵]. چیکلر<sup>۵</sup> نشان داد تغییر قلب می‌تواند شار سایت‌های پرتودهی داخلی را حتی بیشتر از سایت‌ها پرتودهی خارجی تحت تاثیر قرار دهد [۶].

رادیوگرافی نوترونی یک روش آزمون غیرمخرب سودمند است که سیستم‌های مربوط به آن تقریباً در اکثر راکتورهای تحقیقاتی نصب شده است [۳]. هر سیستم رادیوگرافی نیاز به یک چشمه نوترون قوی مانند قلب راکتور هسته‌ای دارد که بتواند در زمان نسبتاً کوتاهی تصاویر رادیوگرافی با کیفیت قابل قبولی تولید کند. یک سیستم رادیوگرافی نوترونی در راکتور تحقیقاتی MNSR<sup>۳</sup> طراحی و نصب شده است [۷]. در این سیستم قلب راکتور به عنوان چشمه نوترون و برای دستیابی به شار نوترون از یک بیم تیوب آلومینیومی خارج از قلب استفاده شده است [۷].

چند ماه پس از راه اندازی این سیستم رادیوگرافی نوترونی، قلب راکتور به منظور جبران مصرف سوخت و افزایش راکتیویته مازاد از طریق افزودن بازتابنده برلیومی احیا شده است. افزودن بازتابنده برلیومی به قلب هم موجب افزایش راکتیویته مازاد قلب و هم موجب تغییر هندسه قلب راکتور می‌شود. در این مقاله تاثیر احیای قلب راکتور بر روی کیفیت باریکه نوترونی سیستم پرتودهی خارجی یعنی سیستم رادیوگرافی نوترونی انجام شده است. برای این منظور با استفاده از استاندارد سنسجش کیفیت و حساسیت رادیوگرافی نوترونی ASTM-E545 با استفاده از مبدل گادولونیومی و فیلم تک لایه استفاده شده است. آزمایشات سنسجش باریکه قبل و بعد از تغییرات در قلب راکتور انجام شدند.

<sup>۳</sup> Jonah

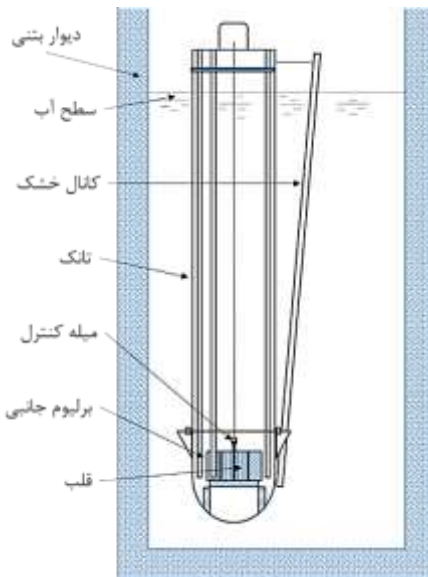
<sup>۴</sup> Xoubi

<sup>۵</sup> Schickler

<sup>۶</sup> Miniature Neutron Source Reactor

## روش کار :

شکل ۱ نمایی از راکتور MNSR را نشان می‌دهد [۷]. راکتور MNSR یک راکتور با حداکثر توان ۳۰kW از نوع تانک درون استخر است که کند کننده و خنک کننده آن آب سبک می‌باشد [۷]. قلب راکتور به شکل استوانه‌ای با قطر و ارتفاع ۲۳cm متشکل از ۳۴۳ میله سوخت حاوی  $UAl_4$  با غنای ۹۰,۲ درصد اورانیوم ۲۳۵ می‌باشد که توسط بازتابنده برلیومی از جانب، بالا و پایین احاطه شده است.



شکل شماره (۱) راکتور MNSR و اجزای آن

در این نوع از راکتور سوخت گذاری جدید برای جبران مصرف سوخت انجام نمی‌شود و راهکار این امر افزودن بازتابنده برلیومی به قسمت بالایی قلب، یا به عبارتی "احیای" راکتور، است. جدول ۱ مشخصات قلب راکتور را پیش از و پس از احیا نشان می‌دهد [۸].

جدول شماره (۱) مشخصات راکتور پیش و پس از احیا

پارامتر	راکتیویته مازاد (mk)	حداکثر زمان کارکرد در توان بیشینه (min)	ارتفاع قلب (mm)	تعداد میله‌های سوخت	حداکثر شار نوترون در حداکثر توان ( $n.cm^{-2}.s^{-1}$ )
پیش از احیا	۲,۹۵	۳۰	۲۳۱,۵	۳۴۳	۱۰ <sup>۱۲</sup>
پس از احیا	۳,۹	۱۵۰	۲۳۳	۳۴۳	۱۰ <sup>۱۲</sup>



همانطور که در شکل ۱ پیداست بیم تیوب مربوط به سیستم رادیوگرافی نوترونی، که کانال خشک نامیده می‌شود، خارج از قلب و حتی خارج از تانک راکتور می‌باشد و بنابراین یک سایت پرتودهی خارجی محسوب می‌شود. کانال خشک در واقع یک لوله آلومینیومی با یک انتهای بسته است که زمانی که درون استخر راکتور قرار می‌گیرد یک ستون هوا ایجاد می‌کند و اجازه خروج نوترون‌ها را از نزدیکی قلب تا انتهای کانال می‌دهد. محل انجام آزمایش رادیوگرافی نوترونی در محل خروجی این کانال قرار دارد. شار نوترونی سیستم رادیوگرافی برابر با  $2.9 \times 10^9 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$  می‌باشد [۷].

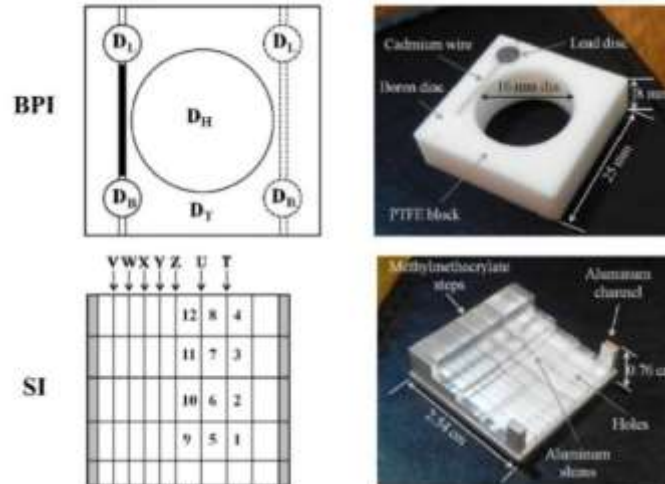
برای انجام آزمایش سنجش کیفیت باریکه نوترونی از شاخص‌های کیفیت تصویر مطابق با استاندارد ASTM-E545 استفاده شده است [۹]. این استاندارد مشتمل بر دو قطعه‌ی شاخص خلوص باریکه  $\text{BPI}^y$  و شاخص حساسیت  $\text{SI}^a$  می‌باشد (شکل ۲).

به‌منظور سنجش کیفیت باریکه نوترونی، این دو قطعه به صورت عمود بر باریکه نوترونی و بین باریکه نوترون و فیلم رادیوگرافی قرار گرفتند و پرتودهی شدند. بدلیل اینکه نوترون بدون بار است برای ایجاد اثر بر روی فیلم از یک لایه با ضخامت  $25\mu\text{m}$  از جنس گادولینیوم فلزی به صورت چسبیده به فیلم رادیوگرافی استفاده شد. فیلم مورد استفاده از نوع تک لایه SC با دانه بندی ریز D3 بود. گادولینیوم در اثر جذب نوترون تابش ثانویه را به صورت الکترون تبدیل داخلی و فوتون گسیل می‌کند [۹].

پس از اتمام پرتودهی، فیلم رادیوگرافی تحت ظهور و ثبوت قرار گرفت و برای تفسیر تصویر، دانسیته نوری نقاط مختلف تصویر  $\text{BPI}$  انجام شد. دانسیته نوری به صورت  $D = \text{Log}(I/I_0)$  تعریف می‌شود که  $I$  و  $I_0$  به ترتیب شدت عبوری و شدت فرودی می‌باشند. برای تشکیل تصویری با کیفیت قابل قبول بر روی فیلم مطابق با استاندارد ASTM، به شدت نوترون در حدود  $10^9 \text{ n.cm}^{-2}$  نیاز است که با توجه به شار نوترونی موجود، مدت زمان پرتودهی در حدود ۶۰ دقیقه محاسبه شد.

<sup>y</sup>Beam Purity Indicator

<sup>a</sup>Sensitivity Indicator



شکل شماره (۲) قطعات BPI و SI [۹]

پارامترهای باریکه نوترونی که توسط ارزیابی تصاویر حاصل از شاخص خلوص باریکه BPI تعیین شدند عبارتند از: درصد نوترون های حرارتی  $NC^9$ ، درصد گاما  $\gamma$ ، درصد پراکندگی  $S^1$ ، درصد تولید زوج  $P^1$ ، و پارامترهایی که توسط شاخص  $G$  سا سیت SI تعیین شدند عبارتند از: کوچکترین حفره قابل مشاهده  $H^2$  و باریکترین شیار قابل مشاهده  $G^3$ . پارامترهای  $NC$ ،  $\gamma$ ،  $S$ ، و  $P$  از روابط ۱ تا ۴ محاسبه شدند [۹]:

$$NC = \frac{D_H - (higher D_B + \Delta D_L)}{D_H} \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

$$S = \left( \frac{\Delta D_B}{D_H} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۲}$$

$$\gamma = \frac{(D_T - lower D_L)}{D_H} \times 100 \quad \text{رابطه ۳}$$

$$P = \left( \frac{\Delta D_L}{D_H} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

<sup>۹</sup> Neutron Content

<sup>۱۰</sup> Scattering

<sup>۱۱</sup> Pair production

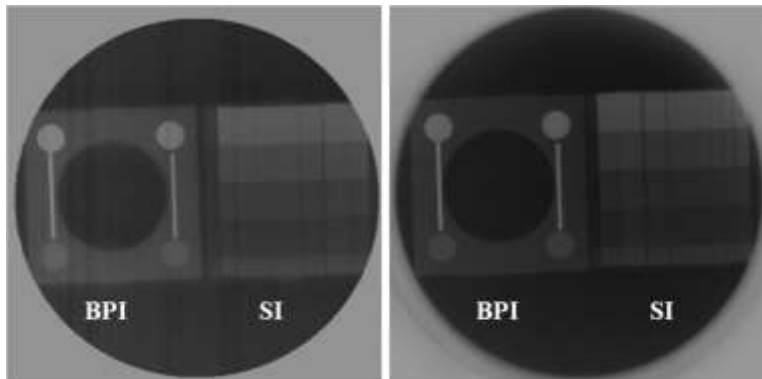
<sup>۱۲</sup> Hole

<sup>۱۳</sup> Gap

که مقادیر  $D_T$ ,  $D_L$ ,  $D_B$ ,  $D_H$  مقادیر اندازه‌گیری شده دانسیته نوری در محل‌های مشخص شده در شکل ۲ هستند. حداکثر دانسیته نوری در هر اندازه‌گیری متعلق به  $D_H$  است. آزمایشات سنجش باریکه نوترونی قبل و بعد از تغییرات در قلب راکتور مطابق با روش مذکور در محل خروجی کانال خشک انجام شدند.

### نتایج :

شکل ۳ تصاویر رادیوگرافی نوترونی BPI و SI حاصل از باریکه نوترونی را قبل و بعد از احیای راکتور نشان می‌دهد. این تصاویر پس از ظهور و ثبوت به صورت دیجیتال تبدیل شده‌اند تا قابل نمایش باشند.



شکل شماره (۳) تصاویر رادیوگرافی نوترونی BPI و SI قبل (چپ) و بعد (راست) از احیای راکتور

پارامترهای حاصل از ارزیابی باریکه که از تفسیر تصاویر تعیین شدند نیز در جدول ۲ آورده شده است. پارامترهای  $NC$ ،  $\gamma$ ،  $S$ ، و  $P$  از اندازه‌گیری دانسیته نوری نقاط مختلف تصویر BPI و استفاده از روابط ۱ تا ۴ تعیین شده‌اند. همچنین پارامترهای  $H$  و  $G$  کوچکترین حفره قابل مشاهده و باریکترین شیار قابل مشاهده در تصویر SI هستند.

جدول شماره (۲) پارامترهای باریکه نوترونی سیستم رادیوگرافی پیش و پس از احیا

پارامتر	NC	$\gamma$	S	P	H	G	$D_H$
پیش از احیا	۴۴	۷	۸	۶	۵	۵	۱,۳
پس از احیا	۵۵	۶	۸	۶	۵	۵	۲
حدود استاندارد (خوب تا بد)	۴۵ تا ۶۵	۷ تا ۳	۵ تا ۶	۷ تا ۳	۳ تا ۶	۵ تا ۶	۱,۲ تا ۲,۵



## بحث و نتیجه گیری :

همانطور که از شکل ۳ پیداست، تصویر رادیوگرافی پس از احیا نسبت به قبل از آن دارای کنتراست بهتری است و به عبارتی تصویر دانسیته نوری بالاتری دارد (جدول ۲). پیش از احیا، راکتور تنها قادر بود تا ۳۰ دقیقه حداکثر شار نوترون را تولید کند اما پس از احیا امکان کارکرد راکتور تا ۱۲۰ دقیقه با تولید حداکثر شار نوترون امکان پذیر شد. این امر موجب افزایش شدت نوترون فرودی بر روی فیلم تا حتی یک مرتبه بزرگی و افزایش دانسیته نوری (با توجه به رابطه لگاریتمی دانسیته نوری و شدت نوترون) و کنتراست تصویر شد.

پارامترهای H و G در جدول ۲ به عبارتی بیانگر مشخصات هندسی باریکه نوترونی است که وابسته به ابعاد کانال خشک، یعنی قطر و طول کانال خشک، هستند. بدلیل اینکه قبل و بعد از احیای راکتور هیچ تغییری در کانال خشک ایجاد نشد، در این دو پارامتر نیز هیچ تغییری ایجاد نشد و به عبارتی حساسیت باریکه نوترونی بدون تغییر ماند. افزایش میزان نوترون‌های حرارتی باریکه یعنی NC و کاهش میزان گامای باریکه یعنی  $\gamma$  را می‌توان با توجه به افزودن یک لایه ۱,۵ میلیمتری به بالای قلب راکتور توجیه کرد زیرا برلیوم مطابق با دو واکنش  $(n, \alpha n)$  و  $(\gamma, n)$  هم با جذب نوترون‌های شکافت و هم با جذب پرتوهای گامای شکافت تکثیر نوترونی انجام می‌دهد. افزایش NC و کاهش  $\gamma$  هر دو حاکی از افزایش کیفیت باریکه نوترونی هستند که موجب افزایش کیفیت تصاویر رادیوگرافی نوترونی شده‌اند.

## مراجع :

- [1] International Atomic Energy Agency, IAEA Nuclear Energy Series No. Np-T-5.3, Applications of Research Reactors, Vienna, (2014).
- [2] International Atomic Energy Agency, Neutron Transmutation Doping of Silicon at Research Reactors, IAEA-TECDOC-1681, IAEA, Vienna (2012).
- [3] International Atomic Energy Agency, Neutron Imaging: A Non-Destructive Tool for Materials Testing, IAEA-TECDOC-1604, IAEA, Vienna (2008).
- [4] Jonah, S.A., Ibrahim, Y.V., Ajuji, A.S. and Onimisi, M.Y., 2012. The impact of HEU to LEU conversion of commercial MNSR: Determination of neutron spectrum parameters in irradiation channels of NIRR-1 using MCNP code. Annals of Nuclear Energy, 39(1), pp.15-17.
- [5] Xoubi, N., Darda, S.A., Soliman, A.Y. and Abulfaraj, T., 2019. An investigative study of enrichment reduction impact on the neutron flux in the in-core flux-trap facility of MTR research reactors. Nuclear Engineering and Technology.
- [6] Schickler, R.A., Marcum, W.R. and Reese, S.R., 2013. Comparison of HEU and LEU neutron spectra in irradiation facilities at the Oregon State TRIGA® Reactor. Nuclear Engineering and Design, 262, pp.340-349.
- [7] Dastjerdi, M.C., Mokhtari, J., Asgari, A. and Ghahremani, E., 2019. A neutron radiography beamline relying on the Isfahan Miniature Neutron Source Reactor. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 928, pp.20-25.



بیت و ششمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۸۰۷ اسفندماه ۱۳۹۸- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران



[۸] آزمایشگاه راکتور مینیاتوری اصفهان، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، دومین عملیات احیای راکتور MNSR، زمستان ۱۳۹۷.

[9] Dastjerdi, M.C., Movafeghi, A., Khalafi, H. and Kasesaz, Y., 2017. The quality assessment of radial and tangential neutron radiography beamlines of TRR. Journal of Instrumentation, 12(07), p.P07008.