



طراحی باریکه نوترون حرارتی در راکتور MNSR اصفهان برای تصویربرداری نوترونی

چوپان دستجردی، محمد حسین*^(۱) - مختاری، جواد^(۱) - عسگری، افروز^(۱) - خورسندی، جمشید^(۱)

۱- سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

چکیده:

با طراحی یک باریکه نوترون حرارتی جهت استفاده در پرتونگاری نوترونی، می‌توان کاربردهای راکتور MNSR اصفهان را توسعه داد. با توجه به محدودیت‌های فیزیکی MNSR، دو طراحی عمودی و مایل برای همسوکننده در نظر گرفته شد. به منظور کاهش انرژی نوترون‌ها یک ستون حرارتی از جنس آب سنگین در پشت تانک راکتور قرار داده شد. تمامی طراحی‌ها با در نظر گرفتن حداقل تغییرات در راکتور MNSR اصفهان انجام شده است. نتایج نشان دادند که می‌توان باریکه مناسب نوترون حرارتی با شار $\phi_{th} = 2.53 \times 10^6 \text{ (n.cm}^{-2}.s^{-1})$ در محل تصویربرداری از این راکتور به دست آورد. قطر باریکه خروجی و نسبت همسوکنندگی (L/D) به ترتیب ۲۴ سانتی‌متر و ۹۶ در نظر گرفته شده است. همچنین تغییرات شار نوترون حرارتی در خروجی کمتر از ۵٪ است.

کلمات کلیدی: پرتونگاری نوترونی، راکتور مینیاتوری اصفهان، ستون حرارتی آب سنگین، آزمون غیرمخرب، کد

MCNP

Design of a thermal neutron beam at the Isfahan MNSR for neutron radiography

M. H. Choopan Dastjerdi, J. Mokhtari, A. Asgari, J. Khorsandi
Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, Iran

Abstract

The applications of the Isfahan Miniature Neutron Source Reactor (MNSR) would be expanded through the design of a thermal neutron radiography beamline. Neutron beams are designed based on the vertical and oblique directions according to the physical restrictions of the MNSR. In order to reduce the energy of neutrons, a thermal column is considered behind the reactor vessel. All designs are done by considering the least possible changes in the current MNSR status. Results show that the thermal neutron flux is about $2.53 \times 10^6 \text{ n.cm}^{-2}.s^{-1}$ at the image plane at this reactor. The diameter of the obtained neutron beam and the collimation ration at the image plane are 24 cm and 96, respectively. In addition, the thermal neutron flux fluctuation is $<5\%$.

Keywords: neutron radiography; Isfahan miniature neutron source; heavy water thermal column; non-destructive testing; MCNP code.

مقدمه :

در پرتونگاری با استفاده از نوترون‌های به خوبی هم‌راستا شده، هم پراکندگی و هم جذب نوترون‌ها می‌تواند در شدت باریکه نوترونی خروجی از جسم اثر بگذارد، لذا برخلاف اشعه ایکس نوترون می‌تواند در مواد



سبک مثل هیدروژن به علت پراکندگی و در موادی مثل بور و کادمیوم به علت جذب، عکس‌هایی با کنتراست بالا تولید کند. اهمیت ویژه دیگر پرتونگاری نوترونی آزمایش مواد رادیواکتیو به خصوص سوخت‌های هسته‌ای می‌باشد. بازرسی سرامیک‌ها و مواد کامپوزیت، پیدا کردن خوردگی آلیاژهای آلومینیوم و بازرسی از تیغه‌های توربین موتور هواپیما نمونه‌هایی از کاربردهای مهم پرتونگاری نوترونی است. تشخیص انواع رادیویزوتوپ‌ها، بررسی چگالی مواد، بررسی موتور هواپیما، بررسی مواد منفجره، بررسی لایه‌های چسبنده در مواد کامپوزیت و پلیمرها، بازرسی‌های کنترل کیفیت، بررسی میکرو/نانوشکاف‌ها و بررسی تغییر شکل فلزات از کاربردهای دیگر پرتونگاری نوترونی می‌باشند. [۱-۴].

برای تصویربرداری ایده‌آل با زمان مناسب، شار حرارتی حدود $10^6 (n.cm^{-2}.s^{-1})$ ، نسبت شار حرارتی به دز گامای بالای $10^5 (n.cm^{-2}.mR^{-1})$ ، نسب شار حرارتی به شار کل (TNC) بالای ۵۰ درصد، باریکه نوترونی تقریباً یکنواخت (تغییرات شار کمتر از ۵ درصد) با قطر بزرگتر از ۲۰ سانتی‌متر در محل تصویربرداری و زاویه واگرایی کمتر از ۴ درجه ($2\theta < 4^0$) توصیه شده است. توزیع زاویه‌ای شار نوترونی در خروجی همسوکننده به طول همسوکننده (L) و قطر دیافراگم آن (D) بستگی دارد. نسبت L/D یک پارامتر مشخصه هر همسوکننده است و هرچه این نسبت بزرگتر باشد، شدت شار خروجی کمتر ولی قدرت تفکیک‌پذیری بیشتر می‌شود. نسبت $L/D \geq 90$ برای توزیع یکنواخت شار در محل نمونه توصیه شده است [۵-۸].

تاکنون طراحی و ساخت سیستم نوترون پرتونگاری، برای چندین راکتور تحقیقاتی با توان متوسط انجام شده است [۹-۱۴]. در جدول شماره یک مشخصات سیستم‌های پرتونگاری نوترونی تعدادی از راکتورهای توان متوسط با هم مقایسه شده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود شار نوترون‌های حرارتی در همه راکتورهای اشاره شده بالای $10^6 (n.cm^{-2}.s^{-1})$ است.

جدول شماره (۱): مقایسه سیستم‌های پرتونگاری نوترونی تعدادی از راکتورهای توان متوسط

راکتور	توان (MW)	L/D	$\phi_{th} (n.cm^{-2}.s^{-1})$
CIRUS	40	90	5×10^8
CARR	60	585	5×10^7
ENE A TRIGA	1	44	5×10^6
		108	2.7×10^6
TRR	5	150	6.1×10^6
		250	2.26×10^6

راکتورهای تحقیقاتی با توان پایین به علت ایمنی ذاتی بالا، بهره‌برداری راحت و قیمت پایین برای پرتونگاری نوترونی و آنالیز به روش فعال‌سازی نوترونی مفید هستند. مشخصات سیستم‌های پرتونگاری نوترونی تعدادی از راکتورهای تحقیقاتی توان پایین در جدول شماره دو با هم مقایسه شده است [۱۵-۱۸].



جدول شماره (۲): مقایسه سیستم‌های پرتوننگاری نوترونی تعدادی از راکتورهای توان پایین

راکتور	توان (kW)	L/D	ϕ_{th} ($n.cm^{-2}.s^{-1}$)
TRIGA Mark II	250	50	3×10^5
SLOWPOKE-2	20	100	3×10^4
Syrian MNSR	30	125	2.55×10^5

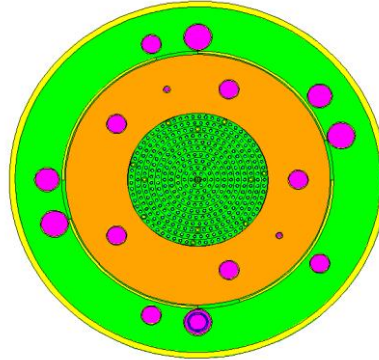
هدف از انجام این تحقیق طراحی یک سیستم پرتوننگاری نوترونی برای راکتور MNSR اصفهان است که بتواند نوترون‌های حرارتی با شار حدود 10^6 ($n.cm^{-2}.s^{-1}$) در محل تصویربرداری تولید کند. برای این منظور یک ستون حرارتی آب‌سنگین در پشت تانک راکتور طراحی شده است.

روش کار:

برای شبیه‌سازی ۳ بعدی راکتور MNSR از کد MCNP استفاده شد. در هر شبیه‌سازی از ۳۰ سیکل غیرفعال و ۱۰۰ سیکل فعال استفاده شده است. در هر سیکل ۱۰۰۰۰۰۰ ذره دنبال شده است. شبیه‌سازی‌ها در دمای ۱۵ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شده است. برای بدست آوردن شار مطلق از ضریب تبدیل $10^{15} * 2/53$ استفاده شده است. مرکز قلب به‌عنوان مبدأ در نظر گرفته شد.

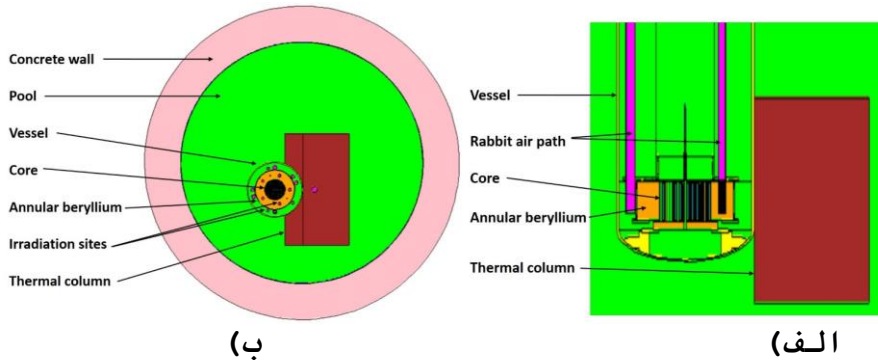
برای به دست آوردن یک باریکه نوترونی مناسب برای پرتوننگاری نوترونی به باید یک شکل‌دهنده باریکه متناسب با ویژگی‌های منبع تولید نوترون طراحی گردد. شکل‌دهنده باریکه می‌تواند از اجزای مختلفی مثل فیلتر نوترون و گاما، همسوکننده، پوشش دیواره و ستون حرارتی تشکیل شود که ممکن است با توجه به نوع منبع به تعدادی از آن‌ها نیازی نباشد [۱۹]. منبع تولید نوترون در این پژوهش راکتور MNSR اصفهان است.

راکتور MNSR اصفهان یک راکتور تحقیقاتی پیشرفته و کوچک از نوع تانک استخری با توان ۳۰ کیلووات است که برای آموزش کارکنان، تولید برخی از رادیو ایزوتوپ‌ها و آنالیز به روش فعال‌سازی نوترونی ساخته شده است. سوخت این راکتور ترکیبی از آلومینیوم و اورانیوم با غنای ۹۰/۲ درصد است. در این راکتور از آب به‌عنوان کندکننده و خنک‌کننده استفاده شده است. این راکتور شامل یک بازتابنده بریلیومی جانبی با ضخامت ۱۰/۲ سانتی‌متر و یک بازتابنده بریلیومی تحتانی با ضخامت ۵/۱ سانتی‌متر می‌باشد. این راکتور دارای ۳۴۳ میله سوخت است که در ده دایره هم‌مرکز مطابق شکل ۱ چیده شده‌اند.

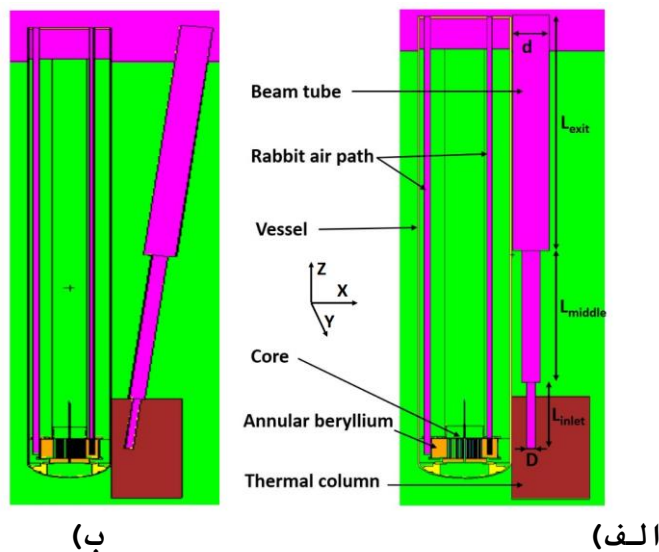


شکل شماره (۱): نمای فوقانی راکتور MNSR اصفهان

تعدادی محدودیت فیزیکی در طراحی شکل دهنده باریکه وجود دارند. با توجه به شکل هندسی ساختار تانک و استخر راکتور، شکل دهنده باید به صورت عمودی یا مایل طراحی شود. همچنین با توجه به این نکته که تانک راکتور در مرکز استخر طراحی نشده است (شکل ۲ مشاهده شود)، تجهیزات پرتونگاری نوترونی بایستی در سمتی که فضای بیشتری وجود دارد، طراحی شود. بنابراین با توجه به محدودیت‌های فوق، دو نوع طراحی عمودی و مایل به ترتیب مطابق شکل ۳ الف و ۳ ب مطرح شد.



شکل شماره (۲): نمای الف (جانبی و ب) فوقانی راکتور MNSR

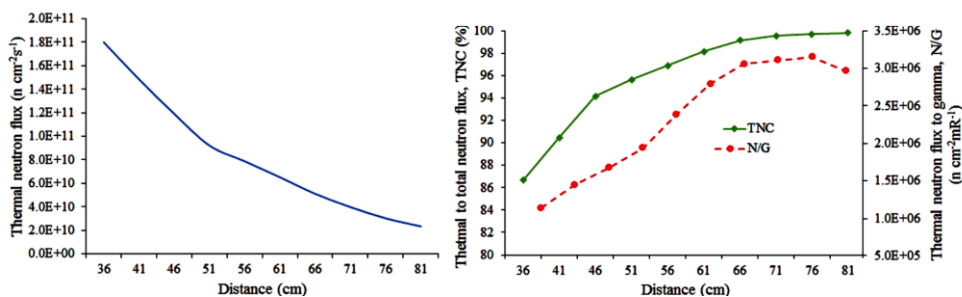


شکل شماره (۳): نمای جانبی تجهیزات طراحی شده الف) طراحی عمودی و ب) طراحی مایل

همسوکننده‌های واگرا و وضوح قابل قبولی برای تصویربرداری فراهم می‌کنند [۱۹]، بنابراین مطابق شکل ۳ از همسوکننده‌ی واگرای تلسکوپی که شامل ۲ یا ۳ قسمت است، در طراحی استفاده شده است. با توجه به هندسه راکتور، دهانه ورودی همسوکننده در ستون حرارتی در مرکز قلب راکتور ($Z=0$) و خروجی آن بالای استخر (برای دسترسی بهتر) قرار داده شده است. مطابق شکل ۲، ستون حرارتی یک تانک آب سنگین است که برای افزایش شار نوترون‌های حرارتی و همچنین افزایش نسبت شار نوترون‌های حرارتی به شار کل نوترون‌ها (TNC) در انتهای استخر و چسبیده به تانک راکتور قرار داده شده است.

نتایج :

برای یافتن بهترین مکان برای قرار گرفتن ورودی همسوکننده، شار نوترون‌های حرارتی، نسبت شار نوترون‌های حرارتی به شار کل نوترون‌ها (TNC) و نسبت شار نوترون‌های حرارتی به نرخ دز گاما (N/G) در ورودی همسوکننده بر حسب فاصله افقی آن از مرکز قلب محاسبه و در شکل ۴ نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، شار نوترون‌های حرارتی در نزدیکی تانک راکتور دارای بیشترین مقدار است. از طرفی مقدار TNC و N/G با افزایش فاصله از تانک افزایش پیدا می‌کنند. بنابراین با توجه به پارامترهای لازم برای پرتونگاری نوترونی، $41 \leq X \leq 46$ سانتی متر بهترین مکان برای قرار دادن مرکز ورودی همسوکننده در ستون حرارتی است.



شکل شماره (۴): مقادیر ϕ_{th} ، TNC و ϕ_{th}/\dot{D}_γ بر حسب فاصله ورودی همسوکننده از مرکز قلب

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد طراحی‌ها به دو نوع طراحی عمودی و طراحی مایل طبقه‌بندی شدند. برای طراحی عمودی بسته به تعداد قسمت‌های همسوکننده و ابعاد آن، ۴ نوع طراحی مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شده است.

جدول شماره (۳): مشخصات هندسی اجزای ۴ نوع طراحی عمودی انتخابی (ابعاد بر حسب سانتی متر است)

Type	L_{inlet}	L_{middle}	L_{exit}	L	D_{inlet} (D)	D_{middle}	D_{exit} (d)	L/D	2θ
First design	80	160	285	525	5	15	25	105	2.073
Second design	80	160	285	525	5.7	12	24	92.11	1.997
Third design	62	178	285	525	5.8	12	24	90.51	1.986
Fourth design	62	-	463	525	5.8	-	24	90.51	1.986

¹ Thermal Neutron Content



در جدول ۴ پارامترهای باریکه در خروجی همسوکننده برای ۴ حالت عمودی با هم مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که مقادیر شار نوترون‌های حرارتی و TNC برای حالت چهارم دارای بیشترین مقدار هستند. همچنین نسبت شار نوترون‌های حرارتی به نرخ دز گاما در حالت چهارم برای تصویربرداری ایده‌آل است.

جدول شماره (۴): پارامترهای باریکه نوترونی برای ۴ حالت عمودی مطرح شده در جدول ۳.

Type	ϕ_{th} (n.cm ⁻² .s ⁻¹)	TNC (%)	ϕ_{th}/\dot{D}_γ (n.cm ⁻² .mR ⁻¹)
First design	6.01×10^5	92.21	7.31×10^5
Second design	8.49×10^5	92.67	1.11×10^6
Third design	1.2×10^6	93.80	1.27×10^6
Fourth design	2.15×10^6	95.47	6.21×10^5

با توجه به هندسه راکتور، در طراحی مایل دسترسی به خروجی باریکه از بالای استخر راحت‌تر است. علاوه بر آن امکان نصب سایر تجهیزات لازم برای رادیوگرافی در حالت مایل وجود دارد. به همین دلیل دو طراحی مایل مطابق جدول ۵ مورد بررسی قرار گرفتند. مشخصات باریکه نوترونی در محل تصویر برای این دو حالت مایل در حالتی که همسوکننده از هوا یا هلیوم پر شده است در جدول ۶ گزارش شده است.

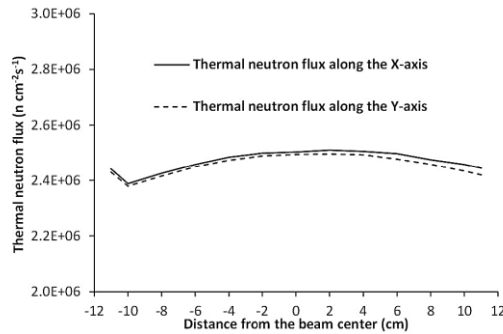
جدول شماره (۵): مشخصات هندسی اجزای ۲ نوع طراحی مایل انتخابی (ابعاد بر حسب سانتی‌متر است)

Type	L _{inlet}	L _{middle}	L _{exit}	L	D _{inlet} (D)	D _{middle}	D _{exit} (d)	L/D	2θ
First design	62	178	305	545	5.8	12	24	94	1.986
Second design	62	-	495	557	5.8	12	24	96	1.986

جدول شماره (۶): پارامترهای باریکه نوترونی برای ۲ حالت مایل مطرح شده در جدول ۳.

Type	Filling gas	ϕ_{th} (n.cm ⁻² .s ⁻¹)	TNC (%)	ϕ_{th}/\dot{D}_γ (n.cm ⁻² .mR ⁻¹)
First design	Air	1.15×10^6	91.63	1.34×10^6
	He	1.44×10^6	94.36	1.70×10^6
Second design	Air	2.05×10^6	96.22	6.84×10^5
	He	2.53×10^6	96.13	7.68×10^5

یکنواختی باریکه خروجی برای حالت دوم مایل با محاسبه شار نوترون حرارتی در جهت محور X و محور Y در محل تصویر بررسی شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، بیشینه تغییرات شار نوترون حرارتی در جهت X و Y باریکه خروجی برابر ۴/۶۸۳ درصد است. این مقدار کمتر از ۵ درصد است و برای تصویربرداری ایده‌آل است.



شکل شماره (۵): توزیع شار نوترون حرارتی در جهت محور X و محور Y در محل تصویر

با مقایسه نتایج جدول ۶ برای حالت دوم مایل با کارهای انجام شده روی راکتورهای توان پایین که در مقدمه به آن‌ها اشاره شده است، می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از ستون حرارتی آب‌سنگین و بدون نیاز به هیچ‌گونه فیلتری در همسوکننده‌ها، می‌توان به شار حرارتی حدود $2.5 \times 10^6 \text{ (n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}\text{)}$ در محل نمونه رسید که برای راکتورهای توان پایین دستاورد بی‌نظیری است. همچنین سایر پارامترهای باریکه خروجی برای پرتونگاری نوترونی ایده‌آل است.

بحث و نتیجه‌گیری :

بررسی‌های حاصل از این پژوهش که توسط کد MCNP انجام شده است، نشان دادند که راکتور مینیاتوری بدون تغییر در ساختار درون تانک راکتور، با اضافه کردن ستون حرارتی آب‌سنگین در استخر راکتور می‌تواند برای پرتونگاری نوترونی به کار برده شود. تمامی طراحی‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی و هندسی راکتور انجام شدند. نتایج نشان دادند که تقریباً تمام باریکه‌های طراحی شده دارای مشخصات مناسب برای پرتونگاری نوترونی هستند. برای دسترسی بهتر از بالای استخر، طراحی مایل با همسوکننده تلسکوپی دارای ۲ قسمت به عنوان طراحی نهایی انتخاب شد. این طراحی دارای نسبت همسوکنندگی ۹۶ است و باریکه نوترون حرارتی با قطر ۲۴ سانتی‌متر و شار $2.5 \times 10^6 \text{ (n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}\text{)}$ در محل تصویربرداری تولید می‌کند. ساخت چنین تجهیزاتی در راکتور MNSR می‌تواند دریچه‌ای برای انجام کاربردهای علمی گسترده‌ای به روی دانشمندان کشور باز کند. در تحقیقات آینده ما قصد داریم تجهیزات لازم برای ساخت این سیستم تصویربرداری را به راکتور مینیاتوری اصفهان اضافه کنیم.

مراجع :

- [1] Berger, H. (2004). Advances in neutron radiographic techniques and applications: a method for nondestructive testing. Applied radiation and isotopes, 61(4), 437-442.
- [2] Lewis, W. J., Andrews, W. S., Bennett, L. G. I., & Beeley, P. A. (1990). Measurements in support of a neutron radiography facility for the SLOWPOKE-2 at RMC. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 299(1-3), 430-433.



- [3] Chankow, N. (2012). Neutron radiography. INTECH Open Access Publisher.
- [4] Rezazadeh, M., Jafari, H., Fegghi, S. A. H., Omid, Z., & Gholamzadeh, Z. (2016). Optimization study of some neutron imaging parameters in a reactor based neutron radiography facility. *Progress in Nuclear Energy*, 87, 20-25.
- [5] Burgio, N., & Rosa, R. (2004). Monte Carlo design for a new neutron collimator at the ENEA Casaccia TRIGA reactor. *Applied radiation and Isotopes*, 61(4), 663-666.
- [6] Dinca, M., Pavelescu, M., & Iorgulis, C. (2006). Collimated neutron beam for neutron radiography. *Romanian Journal of Physics*, 51(3/4), 435.
- [7] Mishra, K. K., Hawari, A. I., & Gillette, V. H. (2006). Design and performance of a thermal neutron imaging facility at the North Carolina State University PULSTAR reactor. *IEEE transactions on nuclear science*, 53(6), 3904-3911.
- [8] Schillinger, B., Calzada, E., Grünauer, F., & Steichele, E. (2004). The design of the neutron radiography and tomography facility at the new research reactor FRM-II at Technical University Munich. *Applied radiation and isotopes*, 61(4), 653-657.
- [9] Cheul-Muu, S., Ki-Yong, N., In-Cheol, L., Chang-Hee, L., & Ha-Lim, C. (2004). Characterization of HANARO neutron radiography facility in accordance with ASTM standard E545-91/E803-91 for KOLAS/ISO17025. *Applied radiation and isotopes*, 61(4), 631-638.
- [10] Shaikh, A. M. (2009). Neutron Radiography Facility at CIRUS Reactor for NDE Applications. In *Proceedings of the national Seminar & Exhibition on Nondestructive Evaluation, ISNT-NDE* (pp. 148-151).
- [11] Chen, D. F., Liu, Y. T., Gou, C., & Ye, C. T. (2006). Development of neutron scattering on 60MW research reactor in CIAE. *Physica B: Condensed Matter*, 385, 966-967.
- [12] Turkoglu, D., Burke, J., Lewandowski, R., & Cao, L. R. (2012). Characterization of a new external neutron beam facility at the Ohio State University. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 291(2), 321-327.
- [13] Rosa, R., Andreoli, F., Mattoni, M., & Palomba, M. (2009). Neutron collimator for neutron radiography applications at tangential port of the TRIGA RC-1 reactor. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 605(1), 57-61.
- [14] Dastjerdi, M. C., Khalafi, H., Kasesaz, Y., Mirvakili, S. M., Emami, J., Ghods, H., & Ezzati, A. (2016). Design, construction and characterization of a new neutron beam for neutron radiography at the Tehran Research Reactor. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 818, 1-8.
- [15] Koerner, S., Schillinger, B., Vontobel, P., & Rauch, H. (2001). A neutron tomography facility at a low power research reactor. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 471(1), 69-74.
- [16] Bennett, L. G. I., Lewis, W. J., & Macgillicvray, G. M. (2001). Enhancements to the neutron radiology system on the SLOWPOKE-2 facility at RMC. *Nondestructive Testing And Evaluation*, 16(2-6), 177-189.
- [17] Shaaban, I. (2014). Design calculation of a horizontal thermal neutronic beam for neutron radiography at the Syrian MNSR. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 301(1), 41-48.



- [18] Shaikh, A. M. (2009). Neutron Radiography Facility at CIRUS Reactor for NDE Applications. In Proceedings of the national Seminar & Exhibition on Nondestructive Evaluation, ISNT-NDE (pp. 148-151).
- [19] Domanus, J. C., & Markgraf, J. C. (1987). Collimators for thermal neutron radiography: An overview.