



طراحی باریکه‌های نوترونی جهت درمان و تصویربرداری نوترونی در یک راکتور تحقیقاتی توان پایین

خورسندی^(۱)، جمشید^(۱) - مختاری، جواد*^(۱) - فقیهی، فرشاد^(۲) - عسگری، افروز^(۱)

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

۲- دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته‌ای

چکیده:

در این تحقیق، طراحی باریکه‌های نوترونی جهت درمان و تصویربرداری نوترونی در یک راکتور تحقیقاتی توان پایین انجام شده است. در طراحی این راکتور از سوخت چگال UO_2 با غنای زیر ۲۰٪ استفاده شده است. ایمنی این راکتور با محاسبه پارامترهای نوترونیک مهمی مثل راکتیویته اضافی اولیه، ارزش میله‌های کنترل و ایمنی، ضریب ایمنی راکتیویته، حاشیه ایمنی خاموشی، کسر موثر نوترون‌های تاخیری، ضریب دمایی راکتیویته‌ی کندکننده و سوخت تایید شده است. نتایج نشان دادند که راکتور توان پایین طراحی شده یک راکتور ایمن است که پارامترهای لازم برای درمان به روش نوترون بور، رادیوگرافی نوترونی و آنالیز به روش فعال‌سازی نوترونی را دارد.

کلمات کلیدی: طراحی نوترونیک، راکتور تحقیقاتی توان پایین، سوخت غنای پایین، BNCT، رادیوگرافی نوترونی.

Design of neutron beams for BNCT and neutron radiography in a low power research reactor

Mokhtari, Javad^{1,*}, Khorsandi, Jamshid¹, Faghihi, Farshad²; Asgari, Afroz³;

¹ NSTRI, P.O.Box 81465/1589, Isfahan, Iran

² Department of Nuclear Engineering, School of Mechanical Eng., Shiraz University, 71936-16548 Shiraz, Iran

Abstract:

In this study, the design of two neutron beams for boron neutron capture therapy and neutron radiography in a low power research reactor is done. The core is designed using high density UO_2 fuel with enrichment of below 20%. The safety of the reactor is approved by calculation of important neutronics parameters such as initial excess reactivity, control and safety rods worth, safety reactivity factor (SRF), shut-down margin (SDM), effective delayed neutron fraction, and moderator and fuel temperature coefficient. The results showed that the designed reactor is a safe device for boron neutron capture therapy, neutron radiography, and neutron activation analysis.

Key words: Neutron design, Low power research reactor, LEU fuel, BNCT, Neutron radiography.

مقدمه :

طراحی یک راکتور توان پایین چندمنظوره با ایمنی ذاتی بالا و هزینه ساخت کم با الگوبرداری از راکتور مینیاتوری چشمه نوترونی سودمند و اقتصادی است. راکتور مینیاتوری یک راکتور توان پایین از نوع تانک-استخری است که برای آموزش کارکنان، تولید برخی رادیوایزوتوپ‌ها و آنالیز به روش فعال‌سازی نوترونی



طراحی شده است [۱]. کارایی نسل جدید این نوع راکتور می‌تواند با ایجاد تغییراتی در ساختار آن برای انجام BNCT و رادیوگرافی نوترونی افزایش یابد. در قلب راکتور مینیاتوری از سوخت UAl_4-Al با غنای ۹۰ درصد استفاده شده است. طبق مقررات آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (پیمان عدم گسترش سلاح‌های اتمی، NPT) غنای سوخت راکتورهای جدید بایستی زیر ۲۰٪ باشد [۲ و ۳].

شرایط توصیه‌شده برای باریکه نوترون در خروجی همسوکننده برای رادیوگرافی نوترونی ایده‌آل در جدول ۱ نمایش داده شده است. در این جدول $\phi_{th} / \dot{D}_{gamma}$ نسبت شار حرارتی به نرخ دز گاما، TNC^1 نسبت شار حرارتی به شار کل و L/D نسبت طول همسوکننده (L) به قطر دیافراگم آن (D) است [۴-۷].
جدول ۱: شرایط توصیه‌شده باریکه نوترونی ایده‌آل برای رادیوگرافی نوترونی

$\frac{L}{D}$	TNC	$\frac{\phi_{th}}{\dot{D}_{gamma}} (\frac{n}{cm^2.mR})$	$\phi_{th} (\frac{n}{cm^2.s})$
≥ 90	≥ 0.9	$\geq 10^6$	$\geq 10^6$

پارامترهای باریکه خروجی در محل تصویربرداری راکتور تهران که یک راکتور توان متوسط است با تعدادی از راکتورهای توان پایین در جدول ۲ مقایسه شده است [۴-۷]. برای افزایش شار نوترون حرارتی در راکتورهای توان پایین می‌توان از ستون حرارتی استفاده نمود. در این مطالعه از آب سنگین که جذب نوترون در آن نسبت به آب سبک کمتر است به عنوان ستون حرارتی استفاده شده است.

جدول ۲: پارامترهای باریکه خروجی سیستم رادیوگرافی نوترونی تعدادی از راکتورها

راکتور	توان (kW)	$\frac{L}{D}$	$\phi_{th} (\frac{n}{cm^2.s})$
RMC SLOWPOKE-2 [۴]	10	100	2×10^4
Syrian MNSR [۵ و ۶]	30	90	3.06×10^5
راکتور تهران [۷]	5000	125	2.55×10^5
		150	6.1×10^6

شرایط توصیه‌شده آژانس بین‌المللی انرژی اتمی برای باریکه نوترون در خروجی BNCT در جدول ۳ نمایش داده شده است [۲]. در این جدول $\dot{D}_{gamma} / \phi_{epi}$ نسبت نرخ دز گاما به شار نوترون‌های فوق‌حرارتی، $\dot{D}_{fast} / \phi_{epi}$ نسبت نرخ دز نوترون‌های سریع به شار نوترون‌های فوق‌حرارتی و ϕ_{epi} / ϕ_{th} نسبت شار نوترون‌های فوق‌حرارتی به شار نوترون‌های حرارتی است.

جدول ۳: شرایط توصیه‌شده آژانس بین‌المللی انرژی اتمی برای BNCT

$\frac{\phi_{epi}}{\phi_{th}}$	$\frac{\dot{D}_{gamma}}{\phi_{epi}} (Gy.cm^2)$	$\frac{\dot{D}_{fast}}{\phi_{epi}} (Gy.cm^2)$	$\phi_{epi} (\frac{n}{cm^2.s})$
>20	$<2 \times 10^{-13}$	$<2 \times 10^{-13}$	$>10^9$

¹ Thermal Neutron Content



پارامترهای باریکه خروجی در محل درمان تعدادی از تحقیقات انجام شده روی راکتور MNSR در جدول ۴ آورده شده است [۸-۱۱]. در این تحقیقات شار نوترون‌های فوق‌حرارتی کمتر از $(\frac{n}{cm^2 \cdot s}) \times 10^9$ است.

جدول ۴: مقایسه تحقیقات انجام شده روی راکتور مینیاتوری به عنوان منبع نوترون برای درمان

$\frac{\phi_{epi}}{\phi_{thermal}}$	$\frac{\dot{D}_\gamma}{\phi_{epi}} (Gy \cdot cm^2 / n)$	$\frac{\dot{D}_{fn}}{\phi_{epi}} (Gy \cdot cm^2 / n)$	$\phi_{epi} (\frac{n}{cm^2 \cdot s})$	سوخت	راکتور
25	1.95×10^{-13}	5.6×10^{-13}	0.4×10^9	UO ₂ (12.5%)	[۸] IHNI
20	1.7×10^{-13}	7.98×10^{-13}	0.28×10^9	UAl ₄ -Al (90%)	[۹] Syrian MNSR
143	0.87×10^{-13}	0.07×10^{-13}	0.635×10^9	UAl ₄ -Al (90%)	[۱۰] Isfahan MNSR
15	1.86×10^{-13}	1.86×10^{-13}	0.5×10^9	UAl ₄ -Al (90%)	[۱۱] Isfahan MNSR

در راکتورهای تحقیقاتی توان پایین استفاده از مبدل‌های شکافت می‌تواند شار فوق‌حرارتی و نسبت شار به توان در محل درمان را افزایش دهد. این مبدل‌ها نوترون‌های حرارتی را جذب می‌کنند و در اثر شکافت نوترون‌های سریع تولید می‌کنند. اگر نوترون‌های سریع به درستی کند شوند، شار فوق‌حرارتی در محل درمان افزایش پیدا می‌کند.

هدف این تحقیق امکان‌سنجی و طراحی یک راکتور تحقیقاتی غنای پایین چندمنظوره با الگوبرداری از راکتور MNSR است. برای تولید شار مناسب در محل مناسب و همچنین برای افزایش ایمنی، تغییرات اساسی در ساختار قلب راکتور MNSR داده شده است.

روش انجام کار :

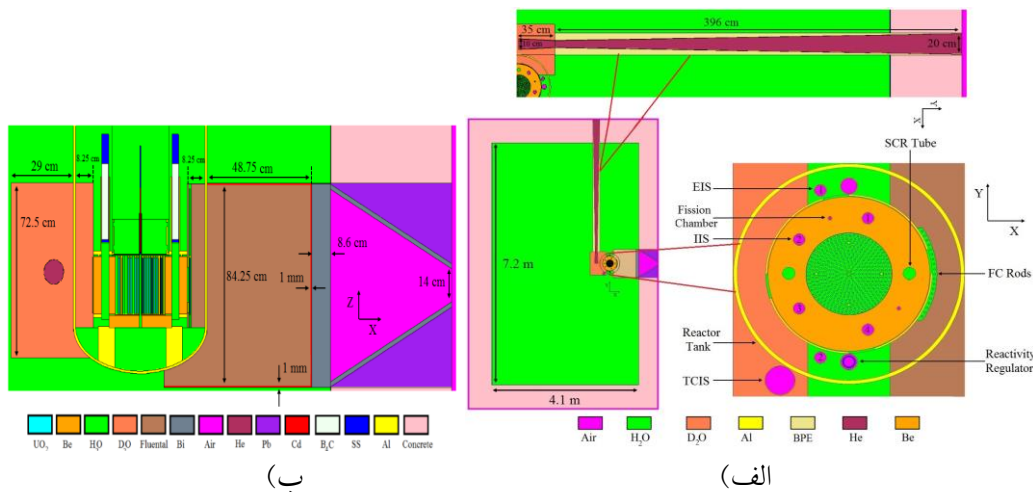
کد MCNPX2.6 برای شبیه‌سازی ۳ بعدی راکتور چندمنظوره به کار گرفته شده است. در شبیه‌سازی‌ها از ۵۰ سیکل غیرفعال و ۵۰۰ سیکل فعال استفاده شده است. در هر سیکل ۳۰۰۰۰۰۰ ذره دنبال شده است. شبیه‌سازی‌ها در دمای ۱۵ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شده است. مرکز قلب به عنوان مبدا مشخصات در نظر گرفته شده است.

نمای فوقانی و جانبی راکتور چندمنظوره در شکل ۱ نمایش داده شده است. راکتور چندمنظوره بر پایه راکتور MNSR و با ۳۴۵ میله سوخت غنای پایین UO₂ و ۵ میله مجازی طراحی شده است. استفاده از ۳۴۵ میله سوخت به این علت است که اگر مشخصات سوخت دریافتی از شرکت‌های تولید سوخت اندکی با مشخصات تئوری آن فرق داشت، بتوان تا ۵ میله به راکتور اضافه کرد و مجبور به تعویض همه میله‌ها نباشیم. راکتور چندمنظوره دارای یک میله کنترل مرکزی^۱ از جنس کادمیوم با قطر ۰/۳۹ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۶/۶ سانتی‌متر است. همچنین برای افزایش ایمنی راکتور چندمنظوره، دو میله کنترل ایمنی^۲ از جنس ماده

^۱ Central control rod (CCR)

^۲ Safety control rod (SCR)

جاذب B₄C با قطر ۳/۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۱/۶ سانتی‌متر داخل بازتابنده جانبی راکتور طراحی شده است. این میله‌ها درون غلاف فولاد ضدزنگ با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر قرار دارند. برای پرتودهی نمونه‌های فعال و بزرگ یک سایت پرتودهی بزرگ با قطر ۸ سانتی‌متر در قسمتی از ستون حرارتی که خارج تانک راکتور قرار دارد، طراحی شده است.



شکل ۱: نمای راکتور چندمنظوره (الف) نمای فوقانی (ب) نمای جانبی

مشخصات کلی راکتور چندمنظوره در جدول ۵ آورده شده است. در راکتور چندمنظوره از ۱۹ میله سوخت با ابعاد برابر با میله‌های سوخت موجود در قلب به‌عنوان مبدل شکافت برای جذب نوترون‌های حرارتی و تولید نوترون‌های سریع استفاده شده است. این میله‌ها در خارج بازتابنده جانبی قرار دارند. در شکل دهنده BNCT از فلوتنتال برای تبدیل کردن نوترون‌های سریع به نوترون‌های فوق‌حرارتی استفاده شده است. اطراف فلوتنتال ۱ mm کادمیوم به‌عنوان جاذب نوترون‌های حرارتی قرار داده شده است.

جدول ۵: مشخصات فنی راکتور چندمنظوره

مقدار	پارامتر
30 kW / MNSR / تانک-استخری	راکتور (نوع / کلاس / توان)
Cd , B ₄ C / D ₂ O / Be / H ₂ O / Al / UO ₂	مواد (سوخت / غلاف / کندکننده / بازتابنده / ستون حرارتی / کنترل)
23 cm / 23 cm / استوانه‌ای	قلب (شکل / ارتفاع / قطر)
0.6 cm / 0.43 cm / 23 cm / 12.4% / 10.5 (g/cm ³)	سوخت (چگالی / غنا / ارتفاع / قطر گوشت / ضخامت غلاف)
19 / 5 / 4 / 345	تعداد المان (سوخت / نگهدارنده / مجازی / مبدل شکافت)
72.84 / 1322.69 / 3.834 g	جرم اورانیوم ۲۳۵ در (میله سوخت / قلب / مبدل‌های شکافت)
514.61 / 9344.17 / 27.08 g	جرم اورانیوم ۲۳۸ در (میله سوخت / قلب / مبدل‌های شکافت)
109.5 / 102 / 51 mm	ضخامت بازتابنده (تحتانی / جانبی / فوقانی)

در راکتور چندمنظوره برای افزایش شار نوترون‌های حرارتی از ستون حرارتی آب‌سنگین با عرض ۷۰، ضخامت ۳۶/۲۵ و ارتفاع ۷۲/۵ سانتی‌متر مطابق شکل ۱ (الف) استفاده شده است. این سیستم از دو



همسوکننده همگرا و واگرا تشکیل شده است. همسوکننده همگرا یک مقطع مخروطی است که از $Y=0$ با قطر ۱۰ cm شروع می‌شود و به $Y=35$ cm با قطر ۴/۴ cm ختم می‌شود. همسوکننده واگرا از روزنه به قطر ۴/۴ cm شروع می‌شود و به دهانه خروجی با قطر ۲۰ cm در $Y=431$ cm ختم می‌شود. دیواره همسوکننده-ها از آلومینیوم به ضخامت ۱ mm ساخته شده است. اطراف همسوکننده واگرا، پلی اتیلن بوردار قرار دارد. درون همسوکننده‌ها از گاز هلیوم پر شده است.

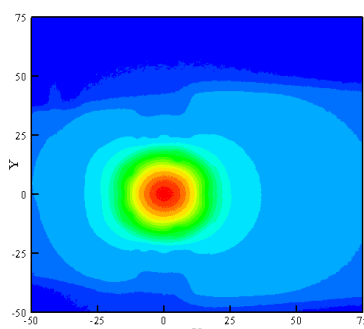
نتایج :

پارامترهای نوترونیک راکتور چندمنظوره در جدول ۶ نمایش داده شده است. راکتیویته اضافی قلب سرد و بدون سموم برای سوخت UO_2 با غنای ۱۲/۴٪، $4/56$ mk است. راکتورهای معمولی MNSR، فقط یک میله کنترل مرکزی دارند. اگر میله کنترل راکتور MNSR در بالاترین وضعیت گیر کند، راکتیویته $3/6$ mk به راکتور وارد می‌شود. در این حالت توان تا حدود ۱۰۰ kW بالا می‌رود و نهایتاً فیدبک دمایی منجر به خاموش شدن راکتور می‌شود. از آنجایی که راکتور چندمنظوره کاربرد بیمارستانی هم دارد، ثابت ماندن میزان شار در محل درمان اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد و نمی‌توان منتظر ماند تا فیدبک دمایی منجر به خاموش شدن راکتور شود. بنابراین برای غلبه بر این مشکل، در راکتور چندمنظوره روی پیک شار نوترون در بازتابنده جانبی ۲ میله کنترل ایمنی از جنس B_4C که ارزش هریک از آن‌ها از کسر نوترون‌های تأخیری بیشتر است طراحی شده است. نکته جالب در مورد این میله‌ها این است که اگر کاملاً از قلب خارج شوند (سر میله‌های ایمنی دقیقاً بالای قلب و در موقعیت $Z=11/5$ cm قرار گیرد) راکتیویته اضافی حدود $4/1$ mk خواهد شد ولی اگر ۵ سانتی‌متر بالاتر از قلب قرار گیرند، راکتیویته حدود $4/56$ mk خواهد شد. این اختلاف راکتیویته در صورت نیاز می‌تواند برای غلبه بر مصرف سوخت در مقیاس کوچک، غلبه بر فیدبک دمایی و یا در آزمایشات فیزیک راکتور استفاده شود. ضریب ایمنی راکتیویته (نسبت بین ارزش راکتیویته همه میله‌های کنترل به راکتیویته اضافی حالت سرد و بدون زینان) در راکتورهای تحقیقاتی باید بزرگ‌تر از ۱/۵ باشد. ضریب ایمنی راکتیویته راکتور چندمنظوره ۵/۰۸ است که الزام ایمنی طراحی راکتور تحقیقاتی را ارضا می‌کند. حاشیه ایمنی خاموشی مقدار راکتیویته منفی در حالت سرد و بدون زینان است هنگامی که ارزشمندترین میله کنترل بالاست و بقیه میله‌های کنترل داخل هستند. حاشیه ایمنی خاموشی راکتور چندمنظوره $9/82$ mk- است، این به‌عنوان یک پارامتر ایمنی بدان معنی است که با بیرون کشیدن هر یک از میله‌های کنترل به تنهایی راکتور بحرانی نمی‌شود. مقایسه‌ی نتایج پارامترهای باریکه خروجی سیستم رادیوگرافی نوترونی راکتور چندمنظوره در جدول ۶ با نتایج تحقیقات مشابه روی راکتورهای توان پایین در جدول ۲، نشان می‌دهد که راکتور چندمنظوره شار نوترون حرارتی مناسب برای تصویربرداری ایده‌آل را فراهم می‌کند. مقایسه‌ی نتایج پارامترهای باریکه خروجی سیستم BNCT در جدول ۶ با نتایج جدول ۳، نشان می‌دهد که سیستم BNCT طراحی شده کلیه الزامات آژانس را برآورده می‌کند.

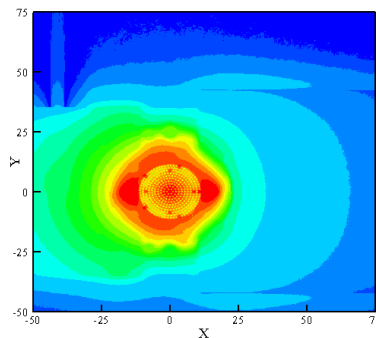
جدول ۶: پارامترهای نوترونیکی راکتور چندمنظوره

مقدار	پارامتر
قلب	
5.08 / -9.82 / 4.56 (mk)	راکتیویته اضافی حالت سرد / SRF / SDM
-8.01 / -8.77 / -6.37 (mk)	ارزش میله کنترل (مرکزی / ایمنی شماره ۱ / ایمنی شماره ۲)
2.65 / 2.97 (mk)	ارزش راکتیویته (مبدل‌های شکافت / ستون حرارتی)
0.00784	کسر نوترون‌های تأخیری
-0.247 / -0.223 / -0.166 / -0.134 / -0.0913 (mk/°C)	ضریب دمایی خنک‌کننده (°C) (۱۵-۳۰ / ۳۰-۴۵ / ۴۵-۶۰ / ۶۰-۷۵ / ۷۵-۹۰)
-0.008 / -0.01 / -0.011 (mk/°C)	ضریب دمایی سوخت (°C) (۲۰-۳۰۰ / ۳۰۰-۶۰۰ / ۶۰۰-۹۰۰)
2.9 mk	راکتیویته تعادلی زینان ۱۳۵
0.946 / 0.997 / 0.986 / 0.947 ($10^{12} n.cm^{-2}.s^{-1}$)	$\bar{\phi}_{thermal}$ در سایت داخلی شماره (۱ / ۲ / ۳ / ۴)
3.52 / 6.36 ($10^{11} n.cm^{-2}.s^{-1}$)	$\bar{\phi}_{thermal}$ در سایت خارجی شماره (۱ / ۲)
$3.52 \times 10^{11} (n.cm^{-2}.s^{-1})$	$\bar{\phi}_{thermal}$ در سایت ستون حرارتی شماره ۲
BNCT	
0.042 / 1.03 $\times 10^9 (n.cm^{-2}.s^{-1})$	$\phi_{thermal} / \phi_{epi}$ / ϕ_{epi}
1.18 / 1.80 ($10^{-13} Gy.cm^2 / n$)	$\dot{D}_{fn} / \varphi_{epi}$ / $\dot{D}_{\gamma} / \varphi_{epi}$
رادیوگرافی نوترونی	
92.13 / 2.78 $\times 10^6 (n.cm^{-2}.s^{-1})$ / 90	TNC% / $\phi_{thermal}$ / L/D
2.58 $\times 10^6 (n.cm^{-2}.mR^{-1})$	$\phi_{thermal} / \dot{D}_{\gamma}$

توزیع دوبعدی شار نوترون‌های حرارتی و فوق‌حرارتی در ارتفاع میانی قلب راکتور چندمنظوره توسط Mesh Tally محاسبه و در نرم‌افزار Tecplot رسم شده است. تأثیر ستون حرارتی روی افزایش تعداد نوترون‌های حرارتی و تأثیر مبدل‌های شکافت و فلونتال روی افزایش نوترون‌های فوق‌حرارتی به ترتیب در شکل‌های ۲ (الف) و (ب) به وضوح مشخص است. بیشینه ضریب بازگشت (آلبیدو) در بازتابنده جانبی در شکل ۲ (الف) مشخص است. همچنین در شکل ۲ (الف) محل قرارگیری صحیح میله‌های ایمنی در بازتابنده، به وضوح مشخص است.



(ب)



(الف)

شکل ۲: توزیع دوبعدی شار نوترون‌ها (الف) شار حرارتی، (ب) شار فوق‌حرارتی.



بحث و نتیجه‌گیری :

بررسی‌های حاصل از این پژوهش که توسط کد MCNP انجام شده است، نشان دادند که راکتور چندمنظوره یک راکتور توان پایین ایمن است که می‌تواند برای BNCT، رادیوگرافی نوترونی و آنالیز به روش فعال‌سازی نوترونی به کار برده شود. با توجه به کوچک بودن قلب این راکتور و پایین بودن توان آن، مقدار شار نوترون‌های حرارتی به دست آمده برای رادیوگرافی نوترونی و شار نوترون‌های فوق‌حرارتی به دست آمده برای BNCT در دنیا کم‌نظیر است.

مراجع :

- [1] Zarifi, E., Tashakor, S., & Khorsandi, J. (2016). Steady state and transient analyses of MNSR reactor using RELAP5 code. *Kernstechnik*, 81(1), 25-33.
- [2] Mokhtari, J., Faghihi, F., Khorsandi, J., & Hadad, K. (2017). Conceptual design study of the low power and LEU medical reactor for BNCT using in-tank fission converter to increase epithermal flux. *Progress in Nuclear Energy*, 95, 70-77.
- [3] Mokhtari, J., Faghihi, F., & Khorsandi, J. (2017). Design and optimization of the new LEU MNSR for neutron radiography using thermal column to upgrade thermal flux. *Progress in Nuclear Energy*, 100, 221-232.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Shaaban, I. (2010). Design of the thermal neutron beam for neutron radiography at the Syrian MNSR. *Annals of Nuclear Energy*, 37(11), 1588-1594.
- [7] 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.
- [8] Yiguo, L., Pu, X., Xiao, W., Fuquan, K., Qiang, H., Ziwei, D. & Shuguang, Z. (2010). Start-up of the first in-hospital neutron irradiator (IHNI-1) & presentation of the BNCT development status in China. *Lieberman S. New challenges in neutron capture therapy*, 371-374.
- [9] Shaaban, I., & Albarhoum, M. (2015). Design calculation of an epithermal neutronic beam for BNCT at the Syrian MNSR using the MCNP4C code. *Progress in Nuclear Energy*, 78, 297-302.
- [10] Monshizadeh, M., Kasesaz, Y., Khalafi, H., & Hamidi, S. (2015). MCNP design of thermal and epithermal neutron beam for BNCT at the Isfahan MNSR. *Progress in Nuclear Energy*, 83, 427-432.

[۱۱] هاجر توکلی زانیانی، سید ظفر الله کلانتری و محمد نامی نظری، مجله پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۴، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۳.