



بهبود کیفیت باریکه نوترونی در خروجی کانال خشک راکتور مینیاتوری جهت انجام آزمایشات پرتو دهی خارج از قلب

بهرام سلیمانی، جواد مختاری، محمدحسین چوپان دستجردی*

پژوهشکده‌ی راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، اصفهان، ایران.

چکیده:

هدف از این تحقیق افزایش کیفیت باریکه‌ی نوترونی در خروجی کانال خشک راکتور مینیاتوری (MNSR¹) جهت انجام آزمایش‌های پرتو دهی نمونه‌ها در خارج از قلب آن است. رهیافت به کار گرفته شده برای حصول به این امر، طراحی یک فیلتر بهینه برای تعبیه در کانال خشک بود به طوری که بتواند شار نوترون‌های حرارتی (ϕ_{th})، نسبت شار نوترون‌های حرارتی به فوق حرارتی ($\frac{\phi_{th}}{\phi_T}$) و همچنین نسبت شار نوترون‌های حرارتی به آهنگ دز گاما ($\frac{\phi_{th}}{D_\gamma}$) در محل پرتو دهی نمونه‌ها را تا حد امکان افزایش دهد، که از طریق شبیه سازی با کد مونت کارلوی MCNP انجام شد. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که تعبیه‌ی فیلترهای سرب یا بیسموت با ضخامت ۵ mm و قطر حفره‌ی کمتر از ۵ mm در ارتفاعی حداقل ۱۴۰ cm بالاتر از قلب راکتور در کانال خشک، افزایش حدود ۱۰۵ درصدی نسبت $\frac{\phi_{th}}{D_\gamma}$ و کاهش تقریباً ۱۳٪ شار ϕ_{th} را به دنبال خواهد داشت. تغییر چندان محسوسی هم در نسبت $\frac{\phi_{th}}{\phi_T}$ ایجاد نمی‌کند. تفاوت محسوسی هم بین فیلترهای از جنس بیسموت و سرب، از حیث نسبت $\frac{\phi_{th}}{D_\gamma}$ مشاهده نشد. با این حال شار نوترون‌های حرارتی به ازای فیلترهای از جنس بیسموت در حدود ۸٪ بیشتر است.

کلیدواژه‌ها: کیفیت باریکه‌ی نوترونی، فیلتر پرتو گاما، کانال خشک راکتور MNSR، شار نوترون، کد MCNP.

Improving the quality of neutron beams at the dry channel outlet of Iran's MNSR reactor aiming to perform neutron irradiation tests out of the core

B. Soleimani, J. Mokhtari*, M. H. Choopan Dastjerdi

Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, Isfahan, Iran

Abstract:

Improving the quality of neutron beams at the dry channel outlet of Iran's MNSR is the aim of this study, to perform neutron irradiation tests out of the core. The approach followed to achieve this was to design a filter capable of increasing thermal neutron flux (ϕ_{th}), thermal-to-total neutron flux ratio (ϕ_{th}/ϕ_T) and thermal neutron flux-to- γ -Ray dose rate ratio (ϕ_{th}/D_γ), to be embedded in the dry channel. Calculation was performed through Monte Carlo method using MCNP code. The results of this study showed that embedding Lead or Bismuth filters with 5 mm-thickness and hole diameter of less than 5 mm at a height of 140 cm above the core in the dry channel will increase the ϕ_{th}/D_γ ratio by 105% and decrease the ϕ_{th} by 13%. The ϕ_{th}/ϕ_T ratio will remain almost unchanged, too. In terms of ϕ_{th}/D_γ ratio, no significant difference was observed between lead and Bismuth filters. Despite this, the thermal neutron flux obtained per Bismuth filter is ~ 8% higher.

Keywords: Neutron beam quality, γ -Ray filter, MNSR reactor dry channel, neutron flux, MCNP code.

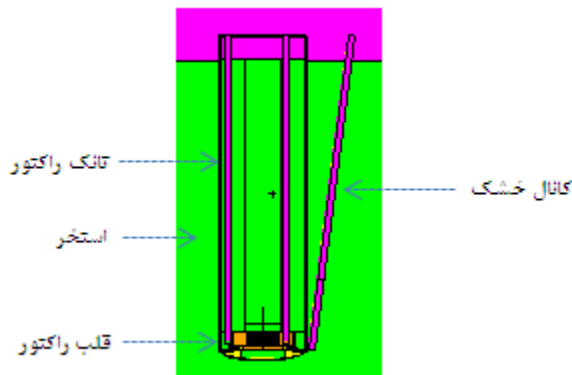
Email: mdastjerdi@aeoi.org.ir

¹ Miniature Neutron Source Reactor

۱. مقدمه

راکتور چشمه نوترونی مینیاتوری (MNSR) از جمله‌ی راکتورهای تحقیقاتی می‌باشد که اولین بار در سال ۱۹۹۱ توسط کشور چین، با الگوبرداری از راکتور SLOWPOKE کانادا و با هدف استفاده به عنوان چشمه نوترون در آنالیز نوترونی مواد به روش NAA، تولید رادیوایزوتوپ‌های کوتاه عمر و متوسط، تحقیقات هسته‌ای و نیز آموزش مباحث فیزیک راکتور، طراحی و ساخته شد. تا کنون ۷ راکتور از این نوع در دنیا راه‌اندازی شده که از جمله‌ی آنها راکتور MNSR اصفهان ایران است. ساختار این راکتورها به صورت تانک استخری است به طوری که قلب قرار گرفته در انتهای وسل راکتور در عمق $4/8$ متری استخر قرار دارد، شکل ۱. سوخت آنها هم به صورت آلیاژ UAl₄ Al با غنای اورانیوم ۹۰٪ ~ است که به صورت ۳۴۳ تا ۳۴۹ (در راکتورهای مختلف متفاوت است) میله سوخت با طول ۲۳ cm و قطر ۵ mm در ۱۰ ردیف دایره‌ای هم مرکز با گام $1/0.29$ cm، درون قلب راکتور توزیع شده است. خنک شدن این راکتورها به روش گردش طبیعی سیال و حداکثر زمان کار آنها در بیشینه توان (۳۰ kW) حدود ۲/۵ h است [۱].

مشخصه‌ی اصلی راکتورهای MNSR پایداری شار نوترون و نیز نسبت بالای شار نوترون حرارتی به فوق حرارتی در سایت‌های پرتودهی تعبیه شده در درون و بیرون بازتابنده‌ی برلیومی اطراف قلب آنها است. این ویژگی به همراه ایمنی ذاتی بالا و هزینه بهره‌برداری و راه‌اندازی بسیار کمتر در مقایسه با دیگر راکتورها، این راکتورها را به ابزاری ایده‌آل برای کاربردهای مبتنی بر پرتودهی نمونه‌ها با نوترون‌های حرارتی تبدیل کرده است. شار نوترون‌های حرارتی در سایت‌های داخلی و خارجی این راکتور در بیشینه توان به ترتیب 10^{11} و 10^{12} $n\ cm^{-2}\ s^{-1}$ است [۱-۲]. علی‌رغم این قابلیت‌ها، به سبب محدودیت‌های ساختاری راکتور، امکان استفاده از شار نوترونی سایت‌های داخلی و خارجی برای آزمایش‌های پرتودهی خارج از قلب وجود ندارد و نمونه‌ها صرفاً باید به درون سایت‌های پرتودهی منتقل شوند. با این وجود ساختار تانک- استخری راکتورهای MNSR این امکان را به وجود آورده است که بتوان با نصب یک کانال خشک^۲ در استخر راکتور، نوترون‌های مجاور قلب راکتور را جهت انجام آزمایش‌های پرتودهی خارج از قلب، به بالای استخر راکتور منتقل کرد.



شکل ۱. نمای جانبی راکتور MNSR اصفهان شبیه‌سازی شده با کد MCNP در مقیاس ابعادی غیر واقعی

اندازه‌گیری‌های انجام شده نشان می‌دهد که در نقاط مجاور قلب کانال خشک، شار نوترون‌های حرارتی در بیشینه توان راکتور در حدود 10^9 $n\ cm^{-2}\ s^{-1}$ است. وجود چنین شاری برای به‌کارگیری کانال خشک به عنوان چشمه‌ی نوترون در آزمایش‌هایی همچون رادیوگرافی نوترونی، تست حفاظ‌های نوترونی و ... در خارج از استخر راکتور، بسیار وسوسه‌انگیز است. بر همین اساس بود که در راکتور MNSR اصفهان تاسیساتی برای رادیوگرافی نوترونی در بالای استخر راکتور طراحی و راه‌اندازی گردید [۳]. اما باید توجه داشت که چنین کاربردهایی به میزان هم‌راستا بودن نوترون‌های باریکه‌ی نوترونی، میزان شار نوترون‌های حرارتی (Φ_{th}) و درصد آنها از کل شار باریکه

² Dry channel



$\left(\frac{\phi_{th}}{\phi_T}\right)$ و همچنین نسبت شار نوترون‌های حرارتی به آهنگ دز پرتوهای گامای درون باریکه $\left(\frac{\phi_{th}}{D_Y}\right)$ در محل پرتودهی نمونه‌ها بستگی دارد. به عنوان نمونه یک باریکه نوترونی ایده‌آل برای رادیوگرافی نوترونی، باید شرایط سخت‌گیرانه آمده در جدول ۱ را داشته باشد [۴].

جدول ۱. شرایط توصیه شده‌ی باریکه‌ی نوترونی ایده‌آل برای رادیوگرافی نوترونی

$\frac{\phi_{th}}{\phi_{total}}$	$(n \text{ cm}^{-2} \text{ mR}^{-1})\frac{\phi_{th}}{D_Y}$	$(n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1})\phi_{th}$
≥ 0.9	$\geq 10^6$	$\geq 10^5$

شبهه‌سازی‌های انجام شده نشان داد که در بالای کانال خشک با شعاع داخلی ۲/۵ cm با ضخامت ۱ mm و موقعیت ورودی (۱۷/۴-، ۰، ۳۵، نسبت به مرکز قلب، ϕ_{th} ، $\frac{\phi_{th}}{D_Y}$ و $\frac{\phi_{th}}{\phi_T}$ به ترتیب $1/95 \times 10^5 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ، $1/05 \times 10^6 \text{ n cm}^{-2} \text{ mR}^{-1}$ و $0/89$ می‌باشند. هدف از انجام این تحقیق طراحی یک فیلتر بهینه برای تعبیه در کانال خشک به منظور کاهش گاما در خروجی کانال خشک و لذا افزایش نسبت بدون کاهش محسوس ϕ_{th} ، جهت انجام آزمایشات خارج قلب است.

۲. روش کار

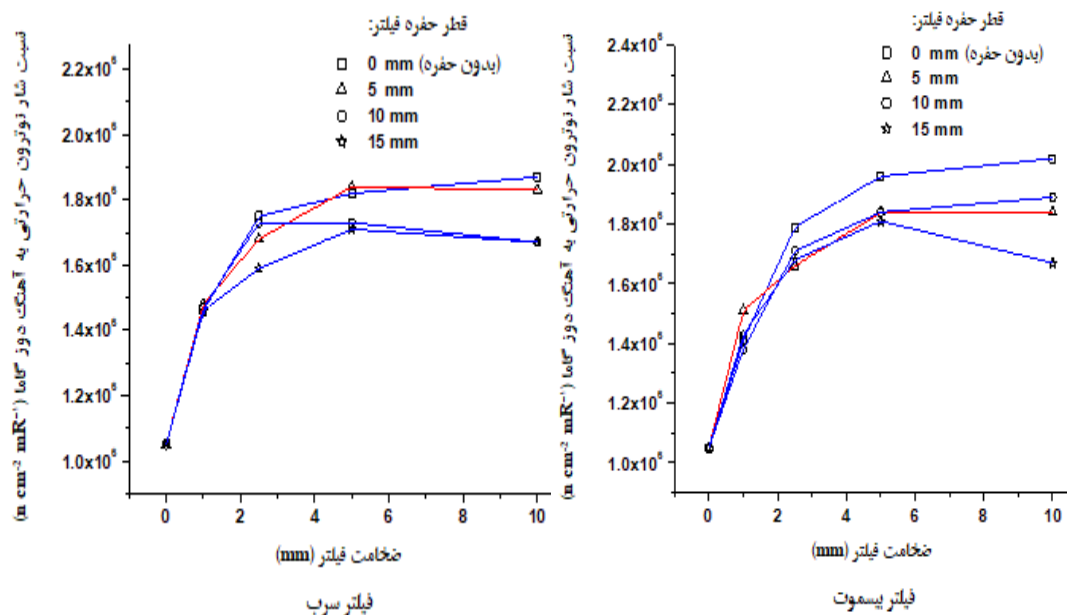
همانطوری که در بخش مقدمه هم اشاره گردید، ایده‌ی این تحقیق برای بهبود کیفیت پرتو در بالای کانال خشک راکتور MNSR، طراحی یک فیلتر بهینه برای تعبیه در آن است به طوری که شار نوترون‌های حرارتی در محل پرتودهی نمونه‌ها تا حد امکان کاهش نیابد و نسبت $\frac{\phi_{th}}{D_Y}$ تا حد امکان افزایش یابد.

سرب و بیسموت قدرت بالایی از حیث تضعیف پرتوهای گاما دارند. ضریب تضعیف نوترونی آنها هم کوچک است [۵]. به علاوه، در مقایسه با سایر مواد ارزان‌تر و عملیاتی‌تر هستند. از این رو در این تحقیق فیلترهای از جنس سرب و بیسموت برای تعبیه در کانال خشک مد نظر قرار گرفت. همچنین با اقتباس از سیستم‌های رادیوگرافی نوترونی که در آنها افزایش نسبت L/D موازی‌ساز (L و D به ترتیب طول و قطر ورودی موازی‌ساز می‌باشد) افزایش کیفیت تصویر را به دنبال دارد [۶]، در این تحقیق ایده‌ی به‌کارگیری فیلترهای با یک حفره‌ی مرکزی دنبال شد که در آن حفره همان نقش ورودی موازی‌ساز را خواهد داشت. برای انجام محاسبات هم از رهیافت شبهه‌سازی با کد مونت‌کارلوی MCNP استفاده شد. به این ترتیب که ابتدا ساختار فیزیکی راکتور MNSR به همراه کانال خشک نصب شده در استخر آن بر اساس اندازه‌های ذکر شده در گزارش SAR راکتور و مبتنی بر دستورالعمل‌های ورژن X2.6 کد MCNP مدل‌سازی شد (شکل ۱ ملاحظه گردد). سپس شار نوترون‌های حرارتی و دز پرتوهای گاما در بالای کانال خشک در بیشینه توان راکتور، به ازای حالت‌های مختلف فیلتر تعبیه شده در کانال از حیث جنس (سرب یا بیسموت)، ضخامت، قطر حفره و همچنین ارتفاع محل نصب آن نسبت به بالای قلب، به کمک تالی‌های F5 و کارت DF شبهه‌سازی گردید. نهایتاً نتایج به دست آمده، با هدف دستیابی به فیلتری با ساختار فیزیکی بهینه تحلیل شدند که نتایج آن در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

۳. شرح نتایج

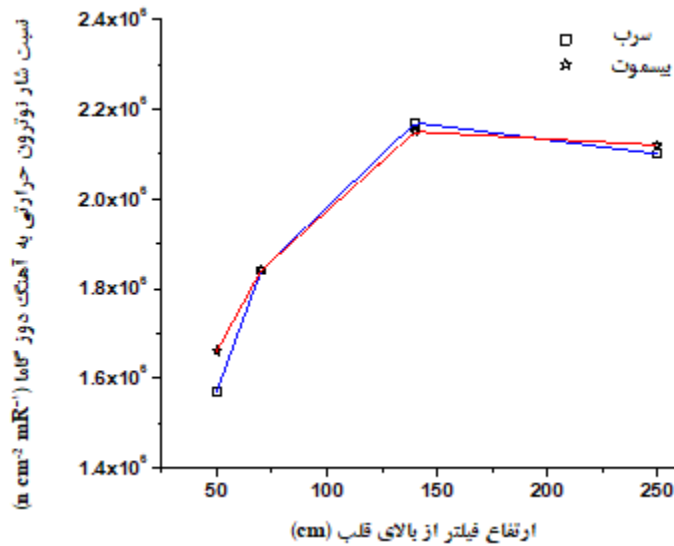
در شکل ۲ تغییرات نسبت $\frac{\phi_{th}}{D_Y}$ در بالای کانال خشک راکتور MNSR، نسبت به تغییرات ضخامت و قطر حفره‌ی فیلترهای سرب و بیسموت تعبیه شده در ارتفاع ۷۰ cm کانال از بالای قلب، نشان داده شده است. به وضوح مشهود است که ضخامت اشباع هر دو نوع فیلتر از حیث نسبت $\frac{\phi_{th}}{D_Y}$ ۵ mm است. همچنین به ازای ضخامت اشباع (و حتی دیگر ضخامت‌ها) هر دو نوع فیلتر، بیشترین مقدار نسبت $\frac{\phi_{th}}{D_Y}$ مربوط به قطر حفره‌ی ۵ mm است. این موضوع به‌خصوص در مورد فیلتر سرب به وضوح در شکل ۱ مشهود است. همانطوری

که ملاحظه می‌شود مقادیر $\frac{\Phi_{th}}{D_Y}$ به دست آمده برای فیلتر سرب با قطر حفره‌ی ۵ mm، تقریباً برابر مقادیر فیلتر بدون حفره است. این در حالی است که با افزایش قطر حفره به ۱۰ mm، نسبت $\frac{\Phi_{th}}{D_Y}$ در بالای کانال خشک به شدت افت می‌کند. با توجه نکات مطالب مذکور، برای حصول یک باریکه‌ی نوترونی با بیشترین مقدار ممکن نسبت $\frac{\Phi_{th}}{D_Y}$ در بالای کانال خشک راکتور MNSR اصفهان، باید از فیلترهای سربی یا بیسموتی با ضخامت و حداکثر قطر حفره‌ی ۵ mm استفاده کرد که در ادامه از حیث تغییرات کمیت‌های Φ_{th} ، D_Y و $\frac{\Phi_{th}}{D_Y}$ نسبت به ارتفاع محل نصب آنها از بالای قلب راکتور در کانال خشک مورد بررسی قرار می‌گیرند.



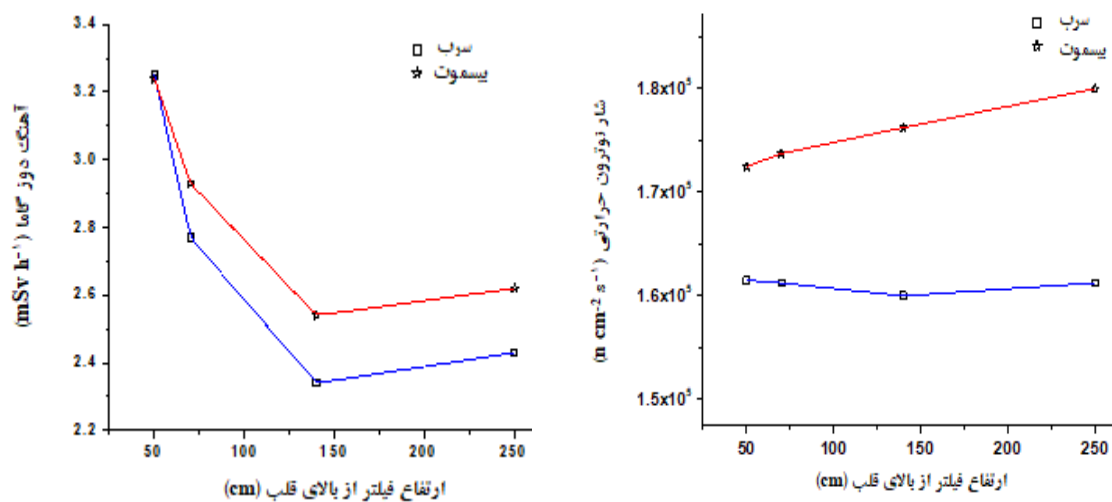
شکل ۲. تغییرات نسبت شار نوترون حرارتی به آهنگ دز گامای بالای کانال خشک، نسبت به ضخامت و قطر حفره فیلتر، به ازای فیلترهای سرب و بیسموت نصب شده در ارتفاع ۷۰ cm بالای قلب

در شکل ۳ تغییرات کمیت $\frac{\Phi_{th}}{D_Y}$ فیلترهای سرب و بیسموت با ضخامت و قطر حفره‌ی ۵ mm نسبت به ارتفاع محل نصب در کانال خشک نشان داده شده است. نکته قابل ذکر این است که از حیث مقادیر به دست آمده برای $\frac{\Phi_{th}}{D_Y}$ تفاوت چندانی محسوس بین فیلترهای سرب و بیسموت مشاهده نمی‌شود. همچنین با افزایش ارتفاع محل نصب فیلترها از ۲۰ به ۱۴۰ cm بالای قلب، کمیت $\frac{\Phi_{th}}{D_Y}$ با یک افزایش ۷۰٪ و رسیدن به حدود $1.0^6 \times 2/17 \text{ n cm}^{-2} \text{ mR}^{-1}$ اشباع خواهد شد و با افزایش بیشتر ارتفاع محل نصب فیلتر تغییر محسوس چندانی محسوس در آن ایجاد نخواهد شد، به ویژه در مورد فیلتر بیسموت. با این حال همانطوری که در شکل ۴ هم به وضوح مشهود است، در مقایسه با فیلتر سربی، به ازای فیلتر بیسموت Φ_{th} در بالای کانال خشک بیش از ۸٪ بیشتر است. با افزایش ارتفاع محل نصب فیلتر هم مقدار آن اندکی افزایش می‌یابد در حالی که به ازای فیلتر سربی، افزایش ارتفاع تاثیر محسوس در Φ_{th} ندارد.



شکل ۳. تغییرات نسبت نوترون حرارتی به آهنگ دز گامای بالای کانال خشک، نسبت به ارتفاع محل نصب فیلتر از بالای قلب راکتور، به ازای فیلترهای سرب و بیسموت با قطر و ضخامت ۵ mm

شکل ۴ همچنین نشان می‌دهد که به ازای فیلترهای سرب و بیسموت با ضخامت و قطر حفره مشابه ۵ mm، با افزایش ارتفاع محل نصب فیلترها نسبت به بالای قلب از ۲۰ تا حدود ۱۴۰ cm، آهنگ دز گامای بالای کانال خشک (\dot{D}_γ) با یک کاهش حدود ۴۰٪ به 0.4 mSv h^{-1} افت می‌کند و با افزایش بیشتر ارتفاع دیگر تغییر چندانی محسوس نخواهد داشت. مقایسه‌ی نمودارهای شکل ۳ و ۴ به وضوح نشان می‌دهند که سهم عمده‌ی افزایش $\frac{\phi_{th}}{D_\gamma}$ با افزایش ارتفاع محل تعبیه فیلتر در کانال خشک، حاصل افت آهنگ دز پرتوهای گاما است تا تغییرات شار نوترون‌های حرارتی. همچنین ملاحظه می‌شود که قدرت افت دز گامای فیلتر سرب اندکی بیشتر از فیلتر بیسموت است که خود ناشی از ضریب تضعیف بزرگتر پرتوهای گاما در سرب در مقایسه با بیسموت است [۵].



شکل ۴. تغییرات شار نوترون‌های حرارتی (ϕ_{th}) و آهنگ دز گامای (\dot{D}_γ) بالای کانال خشک، نسبت به ارتفاع محل نصب فیلتر از بالای قلب راکتور، به ازای فیلترهای سرب و بیسموت با قطر و ضخامت ۵ mm

نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که علی‌رغم قابلیت‌هایی که نصب فیلتر در کانال خشک راکتور MNSR برای افزایش قابل توجه نسبت $\frac{\phi_{th}}{D_y}$ به میزان ۱۰۵٪ دارد، تغییر محسوسی در نسبت $\frac{\phi_{th}}{\phi_T}$ باریکه‌ی نوترونی ایجاد نمی‌کند. محاسبات انجام شده در این تحقیق نشان داد که نسبت $\frac{\phi_{th}}{\phi_T}$ باریکه‌ی نوترونی رسیده به بالای کانال خشک، با و بدون نصب فیلتر در کانال در حدود ۰/۹ است. به‌علاوه نصب فیلتر سرب و بیسموت در کانال خشک، ϕ_{th} باریکه‌ی نوترونی رسیده به آن را، در مقایسه با حالت بدون فیلتر، به ترتیب ۱۷ و ۱۳٪ کاهش و آن را به $۱۰۵ \times ۱/۶۰$ و $۱۰۵ \times ۱/۷۳$ خواهد رساند که البته همچنان بیش از حداقل مقدار مورد نیاز ($۱۰^۵ \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) برای کاربردهایی همچون رادیوگرافی نوترونی است [۷].

۵. نتیجه‌گیری

هدف از تحقیق انجام شده ارتقا کیفیت باریکه‌ی نوترونی در بالای کانال خشک راکتور مینیاتوری اصفهان از طریق طراحی یک فیلتر بهینه برای تعبیه در این کانال بود. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که ایده به‌کارگیری فیلتر صرفاً برای افزایش نسبت $\frac{\phi_{th}}{D_y}$ باریکه‌ی نوترون جواب می‌دهد به طوری که می‌تواند آن را تا بیش از ۲ برابر هم افزایش دهد، البته به شرطی که ضخامت فیلتر و قطر حفره‌ی آن حداکثر ۵ mm باشد و در ارتفاع بیش از ۱۴۰ cm بالای قلب نصب شده باشد. استفاده از فیلتر شار نوترون‌های حرارتی را نیز در مقایسه با حالت بدون فیلتر در حدود ۱۳ و ۱۷٪ (به ترتیب به ازای فیلترهای بیسموت و سرب) کاهش می‌دهد ولی تغییر محسوسی در نسبت $\frac{\phi_{th}}{\phi_T}$ ایجاد نمی‌کند. همچنین مشخص شد که عملکرد فیلترهای سرب و بیسموت از حیث مقادیر به دست آمده برای نسبت $\frac{\phi_{th}}{D_y}$ تقریباً مشابه است در حالیکه از حیث ϕ_{th} ، فیلترهای از جنس بیسموت عملکرد بهتری دارند.

۶. مراجع

1. Jijin, G. (1992). General Description of Miniature Neutron Source Reactor. CIAE Technical Report, Code MNSR-Training Material, No. 2.
2. Soleimani, B., Rezvanifard, M., & Ahmadi, M. (2019). Determination of neutron flux parameters (f , α , ϕ_{th} and ϕ_e) of the irradiation sites of Isfahan MNSR reactor using empirical and MCNPX2. 6 simulation approaches. Applied Radiation and Isotopes, 148, 80-86.
3. Mokhtari, J., Faghihi, F., Dastjerdi, M. C., & Khorsandi, J. (2020). Neutronic feasibility study of using a multipurpose MNSR for BNCT, neutron radiography, and NAA. Applied Radiation and Isotopes, 109147.
4. Dinca, M., Pavelescu, M., & Iorgulis, C. (2006). Collimated neutron beam for neutron radiography. Romanian Journal of Physics, 51(3/4), 435.
5. Cember, H. (1969). Introduction to health physics. Introduction to health physics.
6. Brenizer, J. S. (2013). A review of significant advances in neutron imaging from conception to the present, Physics Procedia, 43, 10-20.
7. Heller, A. K., & Brenizer, J. S. (2009). Neutron radiography. In Neutron imaging and applications (pp. 67-80). Springer US.