



طراحی باریکه‌ی نوترون گرمایی عمودی در رآکتور مینیاتوری اصفهان به منظور پرتونگاری نوترونی

جمشید خورسندی، افروز عسگری*، پروین کاویانی، جواد مختاری

پژوهشکده‌ی رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۹-۸۱۴۶۵ اصفهان - ایران

چکیده: امکان استفاده از چشمه‌ی نوترون رآکتور مینیاتوری اصفهان (MNSR) به عنوان چشمه‌ی نوترون گرمایی برای پرتونگاری نوترونی بررسی شده است. برای تولید باریکه‌ای با شدت و کیفیت مناسب، از آلومینیم به ضخامت ۰٫۷ cm به عنوان صافی نوترون تند و از بیسموت و سرب به ضخامت ۱ cm به عنوان صافی پرتو گاما بهره برده شده است. نسبت L/D سامانه‌ی پرتونگاری نوترونی شبیه‌سازی شده برابر ۹۰ و زاویه‌ی واگرایی برابر ۲٫۱ درجه است. در این طراحی شار نوترون گرمایی در محل تصویرگیری $1,47 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ، نسبت شار نوترون گرمایی به دز گاما $2,96 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ mR}^{-1}$ و نسبت شار نوترون گرمایی به شار کل نوترون‌ها ۹۲٫۵٪ محاسبه شد. با طراحی این باریکه‌ی نوترون گرمایی می‌توان به بسیاری از کاربردهای علمی یک سامانه‌ی پرتونگاری نوترونی دست یافت.

کلیدواژه‌ها: چشمه‌ی نوترون رآکتور مینیاتوری، پرتونگاری نوترونی، باریکه‌ی نوترون گرمایی عمودی

Design of Esfahan MNSR Vertical Thermal Neutron Beam for Neutron Radiography

J. Khorsandi, A. Asgari*, P. Kaviani, J. Mokhtari

Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 81465-1589, Esfahan-Iran

Abstract: In this paper, the MCNPX code is applied for feasibility study of using the Esfahan MNSR as a neutron source to be used for neutron radiography. To produce a good neutron beam, in terms of intensity and quality, aluminum (Al) with a thickness of 0.7 cm, bismuth (Bi), and lead (Pb) with a thickness of 1 cm are used as a fast neutron filter, and the gamma filter, respectively. The L/D ratio of the designed neutron radiography facility is 90 and the diverging angle is 2.1 degree. The thermal neutron flux, the ratio of thermal neutron to gamma dose rate, and the thermal neutron content at the beam exit plane are evaluated to be $1.47E+05 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$, $2.96E+06 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{mR}$, and 92.5%, respectively. It was realized that if such a thermal neutron beam is built in Esfahan MNSR, many practical and scientific applications of the NR can be realized.

Keywords: MNSR, Neutron Radiography, Vertical Thermal Neutron Beam

*Email: aasgari@aeoi.org.ir



۱. مقدمه

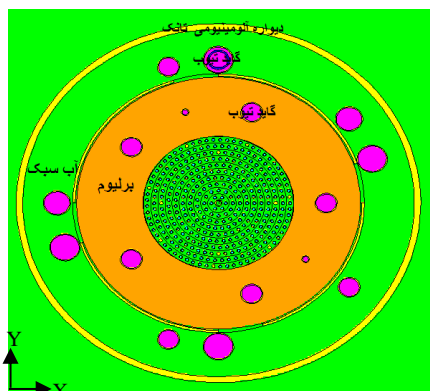
عمودی و افقی طراحی شده است [۷، ۸]. اخیراً سامانه‌ی پرتونگاری نوترونی با کیفیت بسیار مناسب با رآکتور تحقیقاتی تهران طراحی و ساخته شده است [۱۰-۱۳].

هدف این مطالعه و بررسی، طراحی سامانه‌ی پرتونگاری نوترونی با رآکتور اصفهان است. اجزای سامانه به گونه‌ای طراحی شده است که بتوان شار نوترون گرمایی بالای $10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ با نسبت شار گرمایی به کل بالای ۹۰ درصد و شار نوترون گرمایی به دز گامای مناسب در محل تصویرگیری در اختیار داشت.

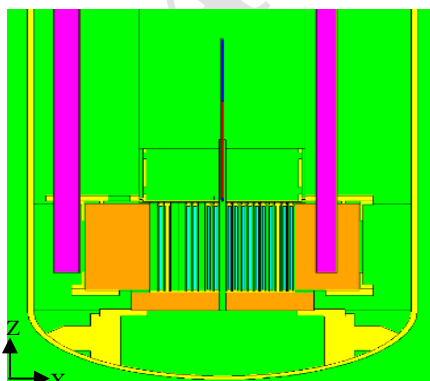
۲. مواد و روش‌ها

۲.۲ مدل‌سازی و شبیه‌سازی رآکتور اصفهان

امروزه استفاده از روش مونت کارلو برای شبیه‌سازی ترابرد ذره‌ها [۱۴، ۱۵] و ابزارهای پزشکی هسته‌ای [۱۶] بسیار رایج است. به منظور طراحی و محاسبه‌ی پارامترهای نوترونی باریکه‌ی نوترون، ابتدا رآکتور اصفهان با استفاده از کد محاسباتی MCNP شبیه‌سازی شد. در شکل ۱ نمای از رآکتور اصفهان شبیه‌سازی شده با استفاده از کد MCNPX نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱. الف) نمای بالایی و ب) نمای جانبی رآکتور اصفهان شبیه‌سازی شده توسط MCNPX.

چشمه‌ی نوترون رآکتور مینیاتوری^(۱) (MNSR) اصفهان در سال ۱۹۸۴ توسط کشور چین و براساس الگوبرداری از رآکتور کانادایی SLOWPOKE به منظور تجزیه به روش فعال‌سازی نوترونی، آموزش کارکنان، انجام آزمایش‌های فیزیک رآکتور و تولید برخی از رادیوایزوتوپ‌های کوتاه‌عمر طراحی شده است. رآکتور اصفهان، یک رآکتور تحقیقاتی پیشرفته از نوع استخری آب سبک قدرت پایین (۳۰kW) است. شار نوترون گرمایی در حداکثر توان کار رآکتور در مکان پرتودهی داخلی $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ و در مکان پرتودهی خارجی $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ است [۱-۳]. کاربردهای رآکتور اصفهان با افزودن سامانه‌ی پرتونگاری نوترونی می‌تواند افزایش یابد.

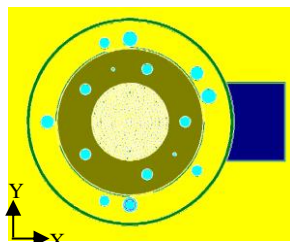
پرتونگاری نوترونی یک ابزار مهم برای آزمون غیرمخرب در زمینه‌های صنعت، پزشکی، سوخت هسته‌ای و بازرسی مواد منفجره است [۴]. در پرتونگاری نوترونی، جسم مورد آزمایش در معرض باریکه‌ی نوترونی موازی شده قرار می‌گیرد و نقشه‌ی نوترون‌های خارج شده از جسم به واسطه‌ی واکنش‌های جذب و پراکندگی نوترون با مؤلفه‌های مختلف، تغییر می‌کند. برخلاف پرتو ایکس، نوترون می‌تواند در مواد سبک مثل هیدروژن به واسطه‌ی پراکندگی و در موادی مثل بور و کادمیم از طریق جذب، عکس‌هایی با وضوح بالا تولید کند. دیگر اهمیت ویژه‌ی پرتونگاری نوترونی آزمون سوخت‌های هسته‌ای تازه و مصرف شده است.

رآکتورهای با شار بالا برای پرتونگاری نوترونی بسیار مناسب‌اند. کیفیت سامانه‌ی پرتونگاری نوترونی علاوه بر کیفیت باریکه (شار نوترون گرمایی مناسب، نسبت شار نوترون گرمایی به کل و نسبت شار نوترون گرمایی به دز گاما) به عامل‌هایی هم‌چون سیستم آشکارسازی، سیستم تصویرگیری (فیلم یا دوربین)، زمان پرتوگیری و ... وابسته است. طراحی و ساخت سامانه‌ی پرتونگاری نوترونی با رآکتورهای بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است [۵-۱۰]. از جمله مطالعه‌های انجام شده، طراحی هم‌سوکننده‌ی پرتونگاری نوترونی با رآکتور ACRP^(۲) است [۵]. با رآکتور تحقیقاتی دانشگاه ایالتی اهایو OSURR^(۳) از نوع استخری با توان ۵۰۰ کیلووات، سامانه پرتونگاری نوترونی طراحی و ساخته شده است. هم‌چنین برای چشمه‌ی نوترونی رآکتور مینیاتوری سوریه سامانه پرتونگاری نوترونی به صورت

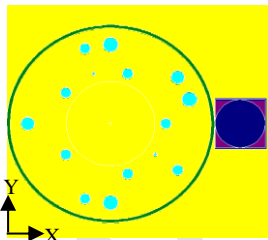
۲.۲. طراحی باریکه‌ساز

درصد بور برای جذب نوترون‌های پراکنده شده، استفاده شده است.

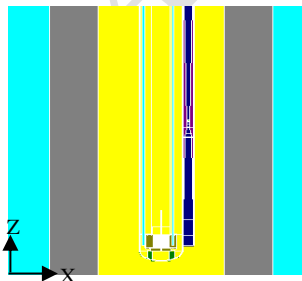
به منظور بالا بردن شار نوترون در باریکه‌ی خروجی، طراحی به صورتی انجام شد که مطابق شکل ۲ در نزدیکی قلب، کانال خشک دارای یک انحنای کاملاً چسبیده به تانک رآکتور باشد و در ارتفاع‌های بالاتر، شکل باریکه‌ساز به صورت مکعب مستطیل است. مطابق شکل ۲، باریکه‌ساز به صورت عمودی و موازی با قلب رآکتور و دو باریکه‌ساز همگرا و سپس واگرا در کانال خشک راست-گوشه قرار دارد. ابعاد مختلفی از باریکه‌سازها و در نتیجه محل قرارگیری روزنه بررسی شد، که بهترین طراحی برای باریکه‌ساز پرتونگاری نوترونی در جدول ۱ نشان داده شده است [۲۰]. در جدول ۱ پارامترهای L_1 طول باریکه‌ساز همگرا، L_2 طول باریکه‌ساز واگرا، D قطر دهانه‌ی ورودی باریکه‌ساز و اگر، d_1 قطر ورودی باریکه‌ساز همگرا، d_2 قطر دهانه‌ی خروجی باریکه‌ساز-واگرا است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲. الف) شکل هندسی باریکه‌ساز در نزدیکی قلب (در ارتفاع پایین استخر)، ب) شکل هندسی باریکه‌ساز در ارتفاع بالاتر از قلب (در ارتفاع بالای استخر)، ج) نمایی از باریکه‌ساز در نزدیکی قلب رآکتور به صورت عمودی و موازی با قلب رآکتور.

روش مونت کارلو ابزار مناسبی برای طراحی باریکه‌ساز است [۵، ۷، ۸، ۱۷، ۱۸]. شار نوترون، دز گاما، نسبت شار نوترون به دز گاما و بسیاری از پارامترهای دیگر با استفاده از روش مونت کارلو شبیه‌سازی و محاسبه می‌شوند. هدف این مطالعه طراحی یک باریکه‌ی نوترون گرمایی آرمایی [۱۷]، با شدت 10^5 تا $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [۵، ۱۸]، نسبت شار به دز گامای حداقل برابر $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ mR}^{-1}$ [۵]، نسبت شار به شار کل دست کم ۹۰٪ [۵]، ضریب واگرایی (L/D) کمینه‌ی ۹۰ [۵] و زاویه‌ی واگرایی کم‌تر از ۴ درجه است [۵].

چندین عامل در کیفیت باریکه‌ی نوترون تأثیر گذارند، که در ادامه به بررسی موردهایی از آن‌ها پرداخته می‌شود.

عامل اول نسبت باریکه‌سازی پرتونگاری نوترونی است؛ این پارامتر براساس واگرایی باریکه‌ی نوترون تعریف می‌شود، که به صورت نسبت L/D است. در این جا L طول و D قطر روزنه‌ی ورودی باریکه‌ساز واگرا است. وضوح تصویر با افزایش نسبت L/D بهبود می‌یابد [۵].

عامل دوم زاویه‌ی واگرایی است، که باید کوچک‌تر از ۴ درجه باشد [۵] این پارامتر، با رابطه‌ی زیر بیان می‌شود

$$\theta = \tan^{-1} \frac{d-D}{2L} \quad (1)$$

که در آن d ، L و D به ترتیب، قطر دهانه‌ی خروجی، طول و قطر ورودی باریکه‌ساز واگرا هستند [۸].

مقدار عدم تیزی هندسی^(۴) تصویر (U_g) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۱۹]

$$U_g = \frac{t}{L/D} \quad (2)$$

که در آن t فاصله‌ی جسم تا فیلم، L و D به ترتیب طول و قطر ورودی باریکه‌ساز واگرا هستند. برای کاهش مقدار عدم تیزی هندسی باید نسبت L/D افزایش یابد، به عبارت دیگر بهتر است D به اندازه‌ی کافی کوچک باشد. از طرف دیگر به منظور افزایش شار، دهانه‌ی ورودی باریکه‌ساز باید سطح مقطع بیشتری از رآکتور را ببیند؛ این مستلزم یک باریکه‌ساز با دهانه‌ی ورودی بزرگ و دهانه‌ی خروجی کوچک به عنوان باریکه‌ساز همگرا است. به منظور باریکه‌سازی همگرا و سپس واگرایی نوترون گرمایی از لوله‌ای از جنس پلی‌اتیلن دارای ۵



جدول ۱. ابعاد باریکه‌ساز طراحی شده

θ (درجه)	$d_r \times d_r$ (mm×mm)	$d_1 \times d_1$ (mm×mm)	L/D	D (mm)	$L = L_r - L_1$ (mm)	L_r (mm)	L_1 (mm)
۲,۰۹۱۵	۱۵۰×۱۵۰	۲۳۰×۲۳۰	۹۰	۳۵	۳۱۵۰	۴۹۸۸	۱۸۳۸

هم‌چنین سرب منجر به کاهش زیادی در شار نوترون گرمایی می‌شود، اما بیسموت تأثیر کمی بر آن دارد [۲۰]. بنابراین در طراحی‌ها بیسموت در مسیر باریکه و سرب در اطراف آن قرار گرفته است.

۳. یافته‌ها

با شبیه‌سازی رآکتور توسط کد MCNPX، طیف خروجی رآکتور بر روی بدنه محاسبه و با داده‌های تجربی حاصل از طیف تجربی نوترون گرمایی رآکتور اصفهان تعیین شده به روش فعال‌سازی نوترونی مقایسه شد [۲۱] (شکل ۳). نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی در تطابق خوبی با نتیجه‌های تجربی بوده و می‌توان به نتیجه‌های به دست آمده از کد MCNPX اعتماد نمود. برای ساده‌سازی و کاهش زمان اجرای فایل‌ها، طیف خروجی رآکتور به عنوان طیف چشمه‌ی نقطه‌ای در بررسی‌های اولیه در نظر گرفته شد. در ادامه برای دست‌یابی به جواب نهایی، مسأله به صورت شکل واقعی شامل باریکه‌ساز پرتونگاری نوترونی و رآکتور اصفهان شبیه‌سازی شد.

به منظور بررسی دیواره‌ی باریکه‌ساز، شار گاما بهتر است در تمام نقطه‌های مشخص شده در قسمت ۲.۲ مخصوصاً نقطه‌های انتهایی باریکه‌ساز (C و D) کمینه باشد، از تحلیل نمودارهای شکل ۴، فولاد ضدزنگ به عنوان دیواره، مناسب است. شار نوترون گرمایی باید در بالا و پشت دیواره (D) کمینه بوده ولی در بالا و درون باریکه‌ساز (C) کاهش چندانی نداشته باشد، طبق شکل ۵ آلومینیم برای این منظور مناسب است. با توجه به نمودار C مربوط به آلومینیم و فولاد ضدزنگ در شکل ۵ شار گرمایی با افزایش ضخامت آلومینیم با شیب کم‌تری نسبت به فولاد کاهش می‌یابد، هم‌چنین شار گرمایی هنگام استفاده از آلومینیم نسبت به فولاد بیش‌تر است، با توجه به موارد فوق، چگالی کم‌تر آلومینیم نسبت به فولاد و موجود بودن در بازار، ضخامت ۰,۵ cm از آلومینیم برای باریکه‌ساز انتخاب شد.

تأثیر دو ماده‌ی آلومینیم و فولاد ضدزنگ به عنوان دیواره‌ی باریکه‌ساز بر شار گاما و نوترون گرمایی بررسی شد. درون یک باریکه‌ساز فرضی حاوی هوا و به ارتفاع ۱۰۰ cm، در وسط و درون باریکه‌ساز (۰، ۵۰، ۰) A، وسط و پشت باریکه‌ساز (۱۵، ۵۰، ۰) B، در خروجی و درون باریکه‌ساز (۰، ۱۰۰، ۰) C و در خروجی و پشت دیواره‌ی باریکه‌ساز (۰، ۱۰۰، ۱۵) D مقادیرهای شار گاما و نوترون گرمایی محاسبه شد.

تأثیر هوا، هلیوم و آرگون در شرایط فشار متعارف، پنج و ده برابر آن و در شرایط چگالی متعارف، پنج و ده برابر آن بر شار نوترون گرمایی و تند در خروجی باریکه‌ساز بررسی شد.

تأثیر بازتاباننده‌ی بریلیم و آلومینیم بر شار نوترون در نزدیکی قلب رآکتور و بر روی دیواره‌ی باریکه‌ساز اول، برای ضخامت‌های ۰,۳، ۰,۵ و ۱ cm بررسی شد.

مواد پراکننده‌ی نوترون تند نظیر D_2O ، Ni، AlF_3 ، Al_2O_3 ، SiO_2 و Al به منظور کاهش نوترون‌های تند به کار می‌روند. به منظور دست‌یابی به بهترین ماده و چیدمان آن، مواد فوق با ضخامت و چیدمان‌های مختلف شبیه‌سازی شدند. چیدمان مختلف به سه صورت نزدیک رآکتور، در ابتدای باریکه‌ساز دوم و در انتهای باریکه‌ساز دوم شبیه‌سازی شد.

بیسموت و سرب مناسب‌ترین مواد برای کاهش دز گاما هستند. آرایش‌های مختلفی از بیسموت و سرب شبیه‌سازی شد؛ در این‌جا تنها به دو آرایش برتر اشاره می‌شود. آرایش اول شامل بیسموت به قطر ۲ cm در مرکز دهانه‌ی باریکه‌ساز و سرب به قطر ۱,۵ cm است. آرایش دیگر بیسموت به قطر ۳ cm در مرکز دهانه‌ی باریکه‌ساز و سرب به قطر ۰,۵ cm است.

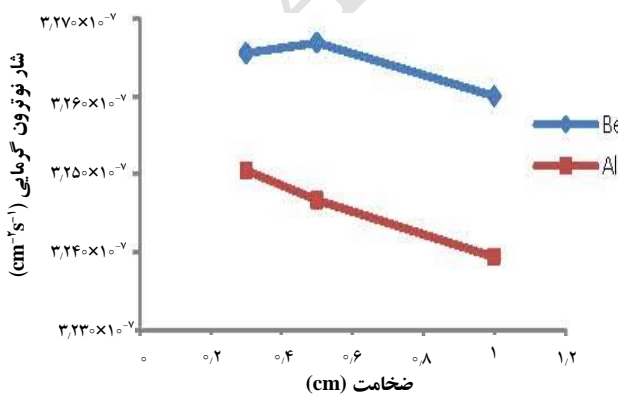
از آن‌جایی که برهم‌کنش نوترون با صافی منجر به واکنش گیراندازی پرتوزا- (γ, n) می‌شود، لازم است صافی‌های گامای قرار گرفته در مسیر باریکه‌ی نوترون در ارتفاع‌های مختلف شبیه‌سازی شود. طبق نتیجه‌ها، محل قرارگیری صافی گاما ۲ متر بالاتر از قلب رآکتور (ابتدای باریکه‌ساز واگرا) انتخاب شد.

جدول ۲ تأثیر هوا، هلیوم و آرگون در شرایط فشار متعارف، پنج و ده برابر آن را نشان می‌دهد. افزایش فشار هوا باعث کاهش شار نوترون‌های گرمایی و تند می‌شود، علت این موضوع افزایش پراکندگی به علت افزایش فشار هوا است. در مورد هلیوم و آرگون افزایش فشار تأثیر چندانی بر شارهای نوترون ندارد، علت این موضوع سطح مقطع پراکندگی پایین این عناصر برای نوترون است. بنابراین می‌توان از هوا با فشار متعارف و یا هلیوم و آرگون با فشار دلخواه استفاده کرد. در مقایسه با هوا شار نوترون برای هلیوم و آرگون بیش‌تر است که در این پژوهش از هلیوم با فشار معمولی استفاده شد.

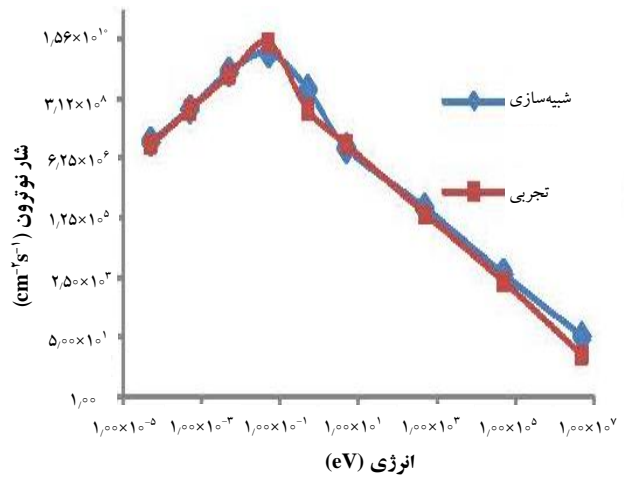
شکل ۶ شار نوترون را برای ضخامت‌های ۰/۳، ۰/۵ و ۱ cm بریلیم و آلومینیم به عنوان بازتاباننده نشان می‌دهد. تغییرهای شار نوترون گرمایی برحسب ضخامت بریلیم بسیار اندک است و عملاً تأثیری بر شار نوترون ندارد، ولی بریلیم با ضخامت ۰/۵ cm به طور دلخواه (شار نوترون گرمایی ایجاد شده به ازای ۰/۵ cm بریلیم کمی بیش‌تر است) انتخاب شد. در نتیجه بریلیم در سه طرف باریکه‌ساز و هم ارتفاع با قلب به کار رفت.

جدول ۲. تأثیر هوا، هلیوم و آرگون درون باریکه‌ساز بر شار نوترون گرمایی و تند در شرایط متعارف و پنج و ده برابر آن

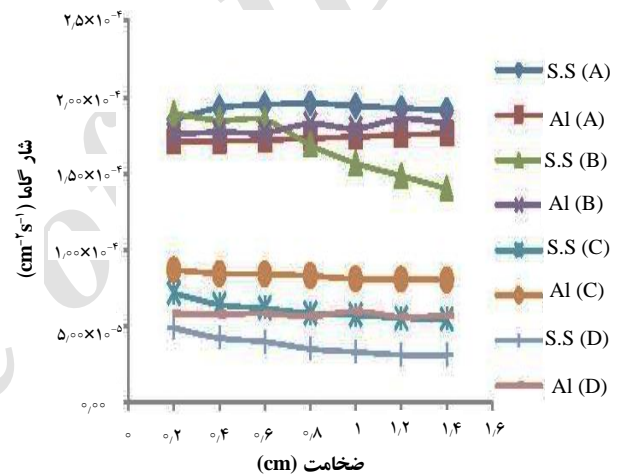
نوع گاز	فشار	شار گرمایی نسبی ($\times 10^{-2}$)	شار تند نسبی ($\times 10^{-3}$)
هوا	متعارف	۵,۳۸	۴,۴۰
	پنج برابر متعارف	۴,۶۸	۴,۲۵
	ده برابر متعارف	۴,۳۴	۴,۲۳
هلیوم	متعارف	۵,۴۵	۴,۴۱
	پنج برابر متعارف	۵,۴۵	۴,۴۰
	ده برابر متعارف	۵,۴۶	۴,۳۶
آرگون	متعارف	۵,۴۷	۴,۴۱
	پنج برابر متعارف	۵,۴۰	۴,۳۷
	ده برابر متعارف	۵,۳۶	۴,۳۱



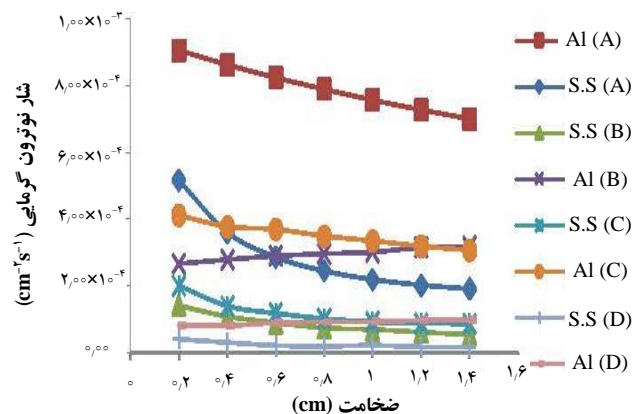
شکل ۶. تأثیر ضخامت‌های مختلف بریلیم و آلومینیم به عنوان بازتاباننده بر شار نوترون گرمایی خروجی.



شکل ۳. طیف خروجی رآکتور بر روی بدنه با استفاده از نتیجه‌های تجربی و شبیه‌سازی.



شکل ۴. رابطه‌ی بین شار گاما و ضخامت و جنس ماده‌ی دیواره‌ی باریکه‌ساز.



شکل ۵. شار نوترون گرمایی به صورت تابعی از ضخامت و جنس ماده‌ی دیواره‌ی باریکه‌ساز.



نوترونی پیشنهادی رآکتور اصفهان با تعدادی از رآکتورهای موجود در جهان مقایسه شده است [۱۰، ۲۲، ۲۳]. شار نوترون‌های گرمایی در محل تصویر در سیستم پیشنهادی با توجه به توان این رآکتور قابل قبول است.

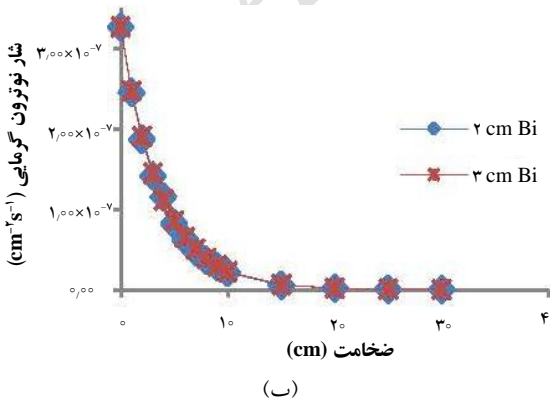
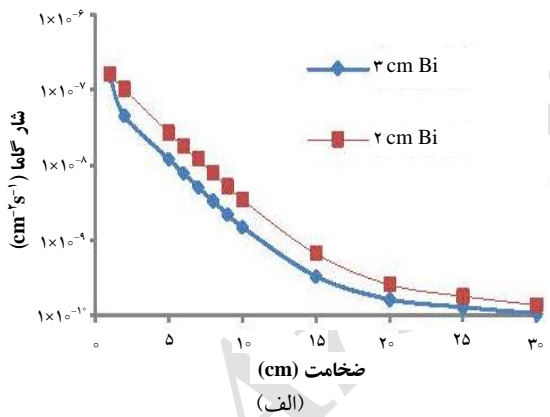
جدول ۳. شار نوترون گرمایی به شار کل از چیدمان‌های مختلف Al و Al_2O_3 به عنوان صافی نوترون تند

چیدمان صافی نوترون تند	درصد شار نوترون گرمایی
بدون صافی نوترون تند	۸۹,۲۸
۲ سانتی‌متر Al_2O_3	۸۶,۴۰
۱ سانتی‌متر D_2O + ۲ سانتی‌متر Al_2O_3	۸۲,۳۸
۱ سانتی‌متر Al + ۲ سانتی‌متر Al_2O_3	۸۶,۴۶
۰,۵ سانتی‌متر Al + ۲ سانتی‌متر Al	۸۹,۶۷
۲ سانتی‌متر Al + ۲ سانتی‌متر Al	۸۹,۷۸
۰,۵ سانتی‌متر Al + ۱ سانتی‌متر Al	۸۹,۴۸
۰,۵ سانتی‌متر Al + ۰,۵ سانتی‌متر Al	۸۹,۴۳
۲ سانتی‌متر Al + ۲ سانتی‌متر Al + ۲ سانتی‌متر Al	۸۹,۹۶
۱ سانتی‌متر Al + ۱ سانتی‌متر Al + ۱ سانتی‌متر Al	۸۹,۸۳
۰,۵ سانتی‌متر Al + ۰,۵ سانتی‌متر Al + ۰,۵ سانتی‌متر Al	۸۶,۰۹
۰,۷ سانتی‌متر Al + ۰,۷ سانتی‌متر Al + ۰,۷ سانتی‌متر Al	۹۱,۰۴
۰,۷ سانتی‌متر Al + ۰,۶ سانتی‌متر Al + ۰,۵ سانتی‌متر Al	۹۰,۷۷
۰,۷ سانتی‌متر Al_2O_3 + ۰,۷ سانتی‌متر Al_2O_3 + ۰,۷ سانتی‌متر Al_2O_3	۸۶,۲۴
۰,۷ سانتی‌متر Al_2O_3 + ۰,۶ سانتی‌متر Al_2O_3 + ۰,۵ سانتی‌متر Al_2O_3	۸۶,۷۸

به منظور دست‌یابی به بیش‌ترین نسبت شار نوترون گرمایی، آرایش‌های مختلف Al و Al_2O_3 بررسی شد، که نتیجه‌های آن در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به داده‌های جدول ۳، آرایش ۰,۷ سانتی‌متر آلومینیم + ۰,۷ سانتی‌متر آلومینیم + ۰,۷ سانتی‌متر آلومینیم با بیش‌ترین نسبت شار نوترون گرمایی به کل (۹۱,۰۴٪) بهترین نوع صافی نوترون تند و بهترین نوع آرایش آن انتخاب شد. نتیجه‌های مربوط به تأثیر صافی گاما بر شار گاما و شار نوترون گرمایی در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷ شار گاما با افزایش ضخامت صافی گاما (بیسموت و سرب) تا ۲۰ cm به شدت کاهش می‌یابد، اما به کار بردن آرایش دوم کاهش بیش‌تری را نشان می‌دهد. بنابراین آرایش دوم، صافی گامای مناسب‌تری خواهد بود. از طرفی افزایش ضخامت صافی گاما باعث کاهش شار نوترون گرمایی نیز خواهد شد، بنابراین باید ضخامت بهینه‌ای از آرایش دوم انتخاب شود تا بیش‌ترین نسبت شار نوترون گرمایی به دز گاما ایجاد شود. تأثیر ضخامت‌های ۱، ۲، ۳، ۴ cm بیسموت و سرب بر درصد شار نوترون گرمایی، شار نوترون و شار نوترون گرمایی به دز گاما در خروجی باریکه‌ساز در جدول ۴ آورده شده است. طبق جدول ۴ ضخامت ۱ cm صافی گاما انتخاب شد.

به منظور بررسی یکنواختی شار نوترون گرمایی در خروجی باریکه‌ساز یا به عبارتی هم‌سویی باریکه، شار نوترون گرمایی بر روی محور $Y=0$ برای X های مختلف نسبت به مرکز باریکه‌ساز $X=38,801$ (مرکز باریکه‌ساز) برای Y های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. شایان ذکر است که مرکز قلب رآکتور به عنوان مرکز مختصات در نظر گرفته شده است. از نمودارهای شکل ۸ پیدا است که شار در خروجی باریکه‌ساز بر روی دو محور دارای هم‌سویی خوبی است.

محاسبات نهایی مربوط به خروجی سامانه‌ی پرتونگاری نوترونی در جدول ۵ گزارش شده است، طبق جدول ۵ با طراحی سامانه‌ی فوق در استخر رآکتور و دور از قلب رآکتور، تغییر زیادی در مقدار ضریب تکثیر مؤثر قلب ($k=1,0396$) ایجاد نشده است. برنامه‌ی اجرا شده برای شار گرمایی (۰ تا ۰,۶۲۵ keV)، فوق گرمایی (۰,۶۲۵ تا ۱۰ keV)، تند (۱۰ تا ۲۰ MeV)، کل و گاما به ترتیب دارای خطای محاسبات در حدود ۲,۵، ۹,۴، ۱۰,۰، ۲,۳ و ۵,۴ درصد است. هر یک از برنامه‌های شبیه‌سازی شده، با ۱۰۵۰ سیکل و با تعداد ذرات ۲۰۰۰۰ در هر دوره اجرا شد. در جدول ۶ پارامترهای باریکه‌ی نوترونی سامانه‌ی پرتونگاری

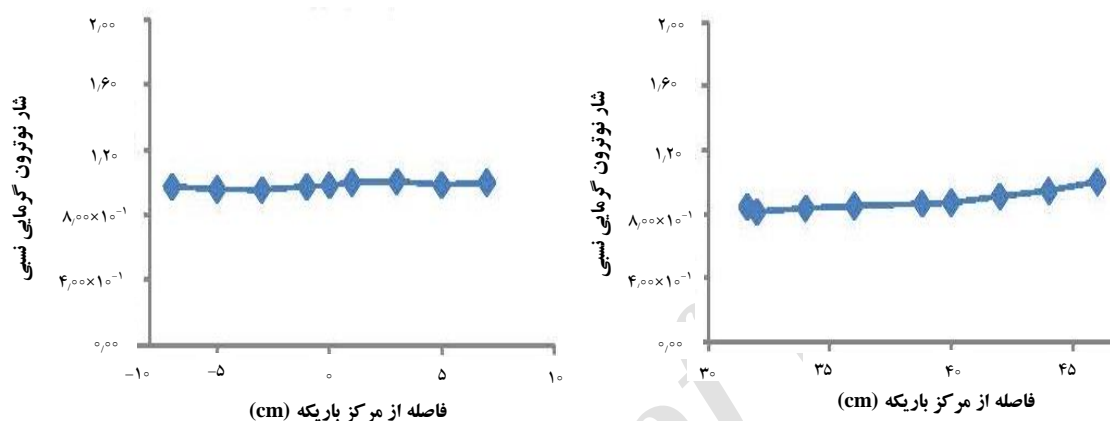


شکل ۷. الف) رابطه‌ی بین ضخامت صافی گاما و شار گاما برای دو چیدمان؛ ب) رابطه‌ی بین ضخامت صافی گاما و شار نوترون گرمایی برای دو آرایش.



جدول ۴. مقدارهای شار نوترون و نسبت شار گرمایی به دز گاما در خروجی باریکه برحسب ضخامت‌های مختلف صافی گاما

ضخامت سرب و بیسموت (سانتی‌متر)	شار گرمایی ($10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	شار فوق گرمایی ($10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	شار تند ($10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	شار کل ($10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	شار گرمایی به دز گاما ($10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ mR}^{-1}$)	درصد شار نوترون گرمایی
۴	۰,۸۷	۶,۱۸	۳,۹۰	۰,۹۵	۱,۱	۸۹,۷
۳	۱,۱۵	۸,۹۵	۴,۲۸	۱,۲۸	۲,۱۰	۸۹,۷
۲	۱,۵۷	۱۱,۱۰	۵,۵۹	۱,۷۴	۲,۹۷	۹۰,۴
۱	۱,۴۷	۸,۳۰	۳,۶۷	۱,۵۹	۲,۹۶	۹۲,۵



شکل ۸. الف) توزیع شار نوترون گرمایی بر روی محور $Y = 0$ برای X های مختلف نسبت به مرکز باریکه‌ساز؛ ب) توزیع شار نوترون گرمایی در خروجی باریکه‌ساز بر روی محور $X = 38,801$ (مرکز باریکه‌ساز) برای Y های مختلف.

جدول ۵. محاسبات نهایی مربوط به خروجی سیستم پرتونگاری نوترونی حاصل از شبیه‌سازی

درصد شار نوترون گرمایی	شار گرمایی به دز گاما ($\text{cm}^{-2} \text{ mR}^{-1}$)	شار کل ($\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	شار تند ($\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	شار فوق گرمایی ($\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	شار گرمایی ($\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	$K = 1,00396$
-	-	$2,69 \times 10^{12}$	$8,06 \times 10^{11}$	$6,57 \times 10^{11}$	$1,23 \times 10^{12}$	جای گاه پرتودهی داخلی
۸۲,۲	$4,27 \times 10^5$	$4,65 \times 10^{10}$	$4,73 \times 10^9$	$3,54 \times 10^9$	$3,82 \times 10^{10}$	ورودی موازی ساز NR
۹۲,۵	$2,96 \times 10^6$	$1,59 \times 10^5$	$3,67 \times 10^3$	$8,30 \times 10^3$	$1,47 \times 10^5$	خروجی موازی ساز NR

جدول ۶. مقایسه‌ی سامانه‌ی پرتونگاری نوترونی پیشنهادی رآکتور اصفهان با سایر رآکتورها

شار گرمایی به دز گاما ($\text{cm}^{-2} \text{ mR}^{-1}$)	درصد شار نوترون گرمایی	شار گرمایی ($\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	L/D	توان (MW)	رآکتور
$4,8 \times 10^5$	۷۰	$6,1 \times 10^6$	۱۵۰	۵	رآکتور تحقیقاتی تهران
-	۹۵	3×10^5	۵۰	۰,۲۵	رآکتور تیریکا ^{(۵)۲}
-	۵۰	3×10^4	۱۰۰	۰,۰۲	رآکتور اسلوپوک ^{(۶)۲}
$2,96 \times 10^6$	۹۲,۵	$1,47 \times 10^5$	۹۰	۰,۰۳	کار حاضر



مرجع‌ها

- [1] T. Daozhu, Iran Miniator Reactor Pure Water Production System, China Institue of Atomic Energy, (1990).
- [2] G. Jijin, General Description of Miniature Neutron Source Reactor, China Institute of Atomic Energy, (1990).
- [3] J. Mokhtari, F. Faghihi, J. Khorsandi, K. Hadad, 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 (2017) 70-77.
- [4] C.O. Fischer, J. Stade, W. Bock, In: Proceedings of Fifth World Conference on Neutron Radiography, June 17±20, Berlin, Germany. DGZFP, (1997).
- [5] M. Dinca, M. Pavelescu, Collimated neutron beam for neutron radiography, Rom. Journ. Phys, 51, 3-4 (2006) 435-441.
- [6] J. Turkoglu, Design, Construction and Characterization of an External Neutron Beam Facility at the Ohio State University Nuclear Reactor Laboratory, Graduate Program in Nuclear Engineering, (2012).
- [7] I. Shaaban, Design of the thermal neutron beam for neutron radiography at the Syrian MNSR, Annals of Nuclear Energy, 37 (2010) 1588-1594.
- [8] I. Shaaban, Design calculation of a horizontal thermal neutronic beam for neutron radiography at the Syrian MNSR, J. Radioanal Nucl Chem, (2014).
- [9] J. Mokhtari, F. Faghihi, J. Khorsandi, Design and optimization of the new LEU MNSR for neutron radiography using thermal column to upgrade thermal flux, Progress in Nuclear Energy, 100 (2017) 221-232.
- [10] M.H. Choopan Dastjerdi, H. Kalafi, Y. Kasesaz, Design construction and characterization of a new neutron beam for neutron radiography at the Tehran Research Reactor, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, (2016) 1-8.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

باریکه‌ساز طراحی شده، دارای ابعاد $D = 3/5$ cm, $L = 315$ cm و نسبت $L/D = 90$ ، شامل دیواره‌ی آلومینیمی به ضخامت $0/5$ cm و $0/5$ cm بریلیم به عنوان بازتاباننده، پلی اتیلن حاوی بور عنوان هم‌سوکننده، بیسموت به قطر 3 cm به همراه سرب با قطر خارجی $3/5$ cm و به ضخامت 1 cm به عنوان صافی گاما و آلومینیم به عنوان صافی نوترون تند است. برای این طراحی، شار نوترون گرمایی در خروجی باریکه‌ساز $1/47 \times 10^5$ cm⁻² S⁻¹ و شار نوترون گرمایی به دز گاما $2/96 \times 10^6$ cm⁻² mR⁻¹ و نسبت شار گرمایی به شار کل $92/5\%$ محاسبه شد. بدین ترتیب، سامانه‌ی پرتونگاری نوترونی طراحی شده، قادر به تصویرگیری با نوترون گرمایی طبق استانداردهای ارایه شده در قسمت ۲.۲ است.

پی‌نوشت‌ها

1. Miniature Neutron Source Reactor
2. Annual Core Pulse Reactor
3. Ohio State University Research Reactor
4. Geometric Unsharpness
5. TRIGA Mark II
6. SLOWPOKE-2



- [11] M.H. Choopan Dastjerdi, H. Khalafi, Design of a thermal neutron beam for a new neutron imaging facility at Tehran research reactor, *Physics procedia*, 69 (2015) 92-95.
- [12] M.H. Dastjerdi, A. Movafeghi, H. Khalafi, Y. Kasesaz, The quality assessment of radial and tangential neutron radiography beamlines of TRR, *Journal of Instrumentation*, 12, 07 (2017) P07008.
- [13] M.H.C. Dastjerdi, H. Khalafi, Y. Kasesaz, A. Movafeghi, Inspection of domestic nuclear fuel rods using neutron radiography at the Tehran Research Reactor, *Materials Testing*, 58-9 (2016) 763-766.
- [14] S. Agosteo, C. Birattari, A. Foglio Para, M. Silari, FLUKA simulations and measurements for a dump for a 250 GeV/c hadron beam, *Math. Comput. Simul.*, 55, 1-3 (2001) 3-14.
- [15] H. Nilsson, E. Dubaric, M. Hjelm, Monte Carlo simulation of the transient response of single photon absorption in X-ray pixel detectors, *Math. Comput. Simul.*, 62, 3-6 (2003) 471-478.
- [16] H. Zaidi, Relevance of accurate Monte Carlo modeling in nuclear medical imaging, *Med. Phys*, 26 (1999) 64-75.
- [17] K. Kishore, Development of a Thermal Neutron Imaging Facility at the N.C. State University PULSTAR reactor, (2005).
- [18] IAEA-TECDOC-1604, Neutron Imaging: A Non-Destructive Tool for Materials Testing, Report of a coordinated research project, (2003–2006).
- [19] J. John, Jr. Callinan, Radiography in Modern Industry, fourth edition of Radiography in Modern Industry, EASTMAN KODAK COMPANY, (1980).
- [20] J. Khorsandi, A. Asgari, P. Kavyani, The feasibility and design of the neutron radiography system for the MNSR reactor, report, Reactor and Nuclear Safety Research School, Esfahan, (2015), In Farsi.
- [21] H. Ghasemi, A. Shirani, Determination of the neutron energy spectrum in the MNSR reactor, (2002), In Farsi.
- [22] S. Koerner, B. Schillinger, P. Vontobel, H. Rauch, A neutron tomography facility at a low power research reactor. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrom, Detect. Assoc. Equip.* 471, 1 (2001) 69-74.
- [23] L.G.I. Bennett, W.J. Lewis, G.M. Macgillicvray, Enhancements to the neutron radiology system on the SLOWPOKE-2 facility at RMC. *Nondestruct, Test. And Eval.* 16, 2-6 (2001) 177-189.