



طراحی و بهینه‌سازی موازی‌سازی نوترونی ستون حرارتی راکتور تحقیقاتی تهران با استفاده از کد هسته‌ای MCNPX

محمد جواد مظفری وانانی^{۱*}، میرشهرام حسینی پناه^۲، یاسر کاسه‌ساز^۲، احمد آخوند^۱، رامون فرناندز آلوارز استرادا^۳

۱. گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، ص. پ. ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران.

۲. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

۳. پژوهشگاه علوم بنیادی دانشگاه مادرید، مادرید، اسپانیا.

چکیده:

به منظور یافتن بهترین هندسه و مواد به منظور بدست آوردن باریکه نوترونی یکنواخت با حداکثر میزان شدت شار، موازی‌سازی و نسبت بالای n/γ در صفحه هدف برای ارتقای کاربردهای ستون حرارتی راکتور تحقیقاتی تهران، دهها هندسه مورد شبیه‌سازی و ۳۵ هندسه منتخب با استفاده از کد هسته‌ای MCNPX2.6 مورد مقایسه با حالت پایه قرار گرفت. در تمام هندسه‌ها بررسی شار نوترون و گاما با حضور ۲ سلول به عنوان آشکارساز به شکل مکعب یکی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ cm و ضخامت ۱ cm و دیگری با ابعاد $90 \times 90 \times 10$ cm و ضخامت ۱ cm در فاصله ۱۰ cm از خروجی ستون حرارتی در دستور کار قرار گرفت. نتایج بدست آمده نمایانگر موازی‌سازی حداکثری شار نوترون از مرکز دهانه‌ی ۱۰ cm خروجی ستون و به صورت یکنواخت روی صفحه هدف (آشکارساز مرکزی) با بالاترین شدت شار نوترونی و کمترین شار گاما در طرح موسوم به M2 است.

کلیدواژه‌ها: راکتور تحقیقاتی تهران، موازی‌سازی نوترون، شار نوترون و گاما، کد MCNPX.

Optimization and designing neutron collimator at the thermal column of TRR by MCNPX computer code

M. J. Mozafari Vanani^{1*}, Mirshahram Hoseinipناه², Yaser Kasesaz², Ahmad Akhond¹, R. F. A. Estrada³

1. Department of Physics, Payame Noor University, P.O.Box 19395-3697, Tehran, Iran.

2. Nuclear Safety Reactor and Research Institute, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran.

3. Institute of Fundamental Sciences, Complutense University of Madrid, Madrid, Spain.

Abstract

Monte Carlo N-Particle eXtended (MCNPX) simulations play a vital role in the calculation of the necessary collimation for neutrons. To obtain the best geometry and materials for the TRR thermal column neutron collimator to access a uniform neutron beam with maximum intensity, collimation and high n/γ ratios on the target plate, 35 new geometries were simulated and compared with using the MCNPX2.6 computational code and the best design was selected. In all geometries, neutron and gamma flux were detected with 2 cells as detector in the form of cubes, first with $10 \times 10 \times 10$ cm and the second with a $90 \times 90 \times 10$ cm dimensions at a distance of 10 cm from the aperture outlet of the thermal column. The measured neutron flux distribution shows the maximum collimation of the neutron flux from the center of outlet of the collimator and uniformly on the target plate (central detector) and the lowest gamma flux in M2 plan.

Keywords: Tehran Research Reactor (TRR), Neutron Collimator, Neutron And Gamma Flux, MCNPX Code.

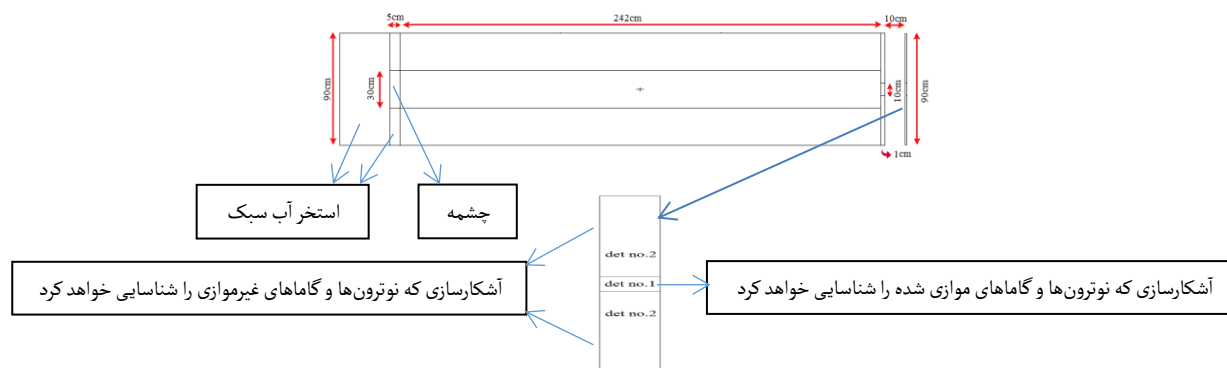
۱. مقدمه

امروزه پرتوهای نوترونی کاربردهای متنوعی در حوزه‌های مختلف صنعت، پزشکی و تحقیقات پیدا کرده است. در اکثر این کاربردها، باریکه‌ای موازی از نوترونی‌های با انرژی و شدت خاص مورد نظر می‌باشد. یک پرتو نوترونی ایده‌آل باید موازی، دارای انرژی یکنواخت، شدت زیاد، عاری از دیگر آلودگی‌های تابشی و سطح مقطع یکنواخت باشد. از آنجا که نوترون ذره‌ای بدون بار است ایجاد باریکه موازی از آن به سادگی قابل انجام نیست و از این رو از دیگر خواص آن برای موازی کردنش بهره گرفته می‌شود از جمله پراکندگی و جذب آن در برخی ایزوتوپها [1]. راکتور تحقیقاتی تهران مهمترین چشمه نوترونی کشور جهت انجام تحقیقات و توسعه کاربردهای مختلف نوترون می‌باشد. این راکتور دارای تعدادی کانال نوترونی جهت توسعه کاربردهای مختلف نوترون می‌باشد. متخصصین صنعت هسته‌ای برای کاربردهای مختلف، موازی‌سازهای نوترونی متعدد با اشکال متفاوت شبیه‌سازی و طراحی می‌کنند. موازی‌ساز نوترون وسیله‌ای است که امکان تضعیف یا حذف بخشی از امواج دریافتی در ورودی را بسته به جهت بردار حرکت نوترون نسبت به دستگاه و انرژی نوترون دارا می‌باشد [2]. انواع موازی‌سازهای ورقه‌ای مستطیلی و حلقوی، حالت جامد، حالت جامد لایه‌ای، مخروطی، پیه‌تی (حباب‌دار)، استوانه‌ای متخلخل، تلسکوپی، مولتی‌لیف و ... تاکنون مورد شبیه‌سازی، ساخت و آزمایش قرار گرفته‌اند [3-6]. موازی‌سازهای نوترونی از حیث جنس مواد سازنده دارای اهمیت بسیار هستند. به کارگیری موادی که بیشترین سازگاری با اهداف موازی‌سازی شار نوترون را دارا باشند باید مورد توجه قرار گیرد. برای مثال چنانچه هدف از ساخت موازی‌ساز عبور و متمرکزسازی نوترون‌های حرارتی باشد لزوماً می‌بایست از موادی استفاده کرد که هم سرعت نوترون‌های ورودی از چشمه را کاهش داده، بخش‌هایی که آلودگی محسوب می‌شوند را حذف و هم بتوانند نوترون‌های سرعت کاهیده را به سمت نمونه مورد نظر در فاصله دلخواه از لبه خروجی کانونی یا موازی کنند. اصولاً جهت انتشار نوترون تنها با برهم‌کنش با هسته اتم تغییر می‌کند [7]. موازی‌سازی عبارتست از فرآیند تولید باریکه نوترونی با حداقل اختلاف درجه نسبت به باریکه کاملاً موازی. ضخامت موازی‌سازها هر اندازه بیشتر باشند نوترون‌های بیشتری را منعکس می‌کنند و نوترون‌ها کمتر پراکنده می‌شوند. با به کارگیری یک موازی‌ساز ضخیم بهتر می‌توان نوترون‌ها را متمرکز کرد؛ البته تا حدی افزایش ضخامت مفید است ولی از یک حدی بالاتر افزایش ضخامت تاثیر زیادی ندارد. طراحی موازی‌ساز خواص پرتو نوترونی را تحت تاثیر قرار می‌دهد [8]. هدف از این پژوهش یافتن بهترین هندسه و مواد به منظور بدست آوردن باریکه نوترونی یکنواخت با حداکثر میزان شدت شار، موازی‌سازی و نسبت بالای n/γ در صفحه هدف است.

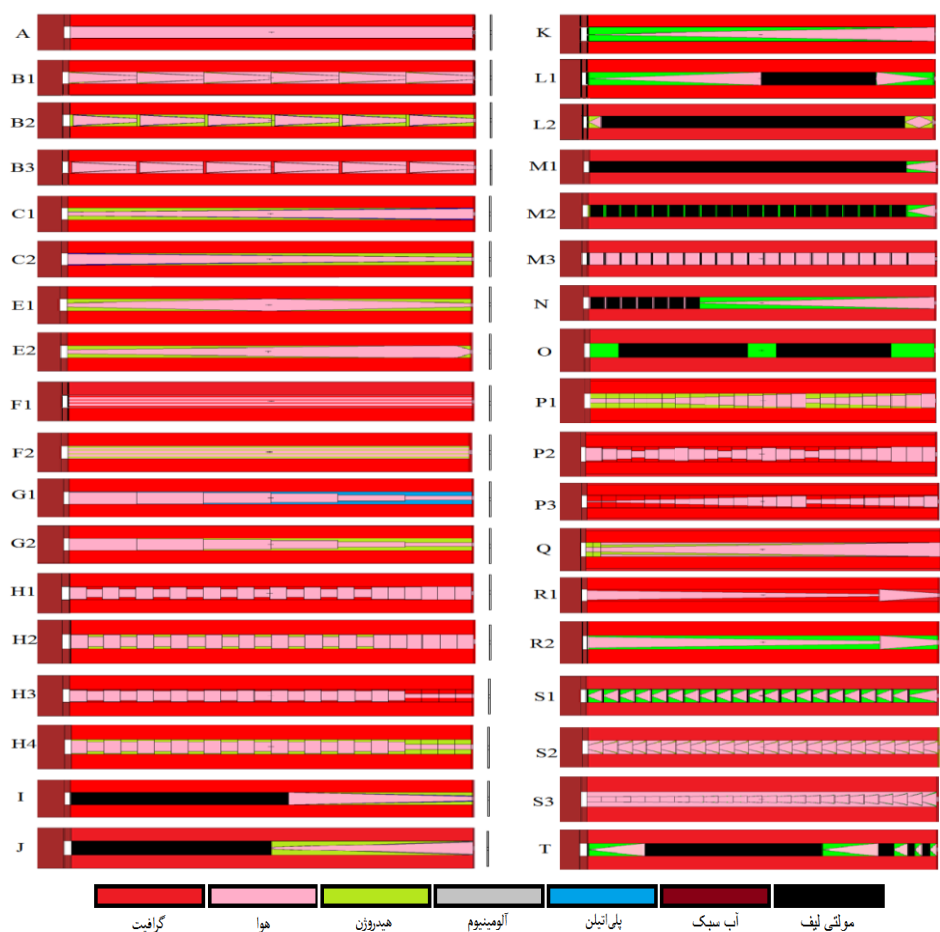
۲. روش کار

در این تحقیق چشمه تابشی برای ستون حرارتی، ذرات حاصل از واکنش‌های شکافت اورانیوم ^{235}U قلب راکتور ۵ مگاواتی تهران است. قسمت اصلی ستون حرارتی محفظه مستطیلی شکلی از بلوک‌های گرافیتی در اندازه‌های $120 \times 10 \times 10$ cm است که از مجاورت قلب تا انتهای حفاظ بتونی راکتور کشیده شده است. ۱۸ عدد از این بلوک‌های گرافیتی متحرک هستند و در هنگام انجام آزمایش خارج شده و مکانی به طول تقریبی ۲۴۰ cm را برای تغییر هندسه فراهم می‌کنند [9]. در این پژوهش دهها هندسه مورد شبیه‌سازی قرار گرفتند که به صورت منتخب، ۳۵ هندسه جدید موازی‌ساز که نسبت به بقیه نتایج به مراتب بهتری نشان می‌دادند با مواد مختلف با استفاده از کد MCNPX2.6 مورد مقایسه با حالت پایه A که هم‌اکنون در محل ستون حرارتی راکتور نصب است (شکل ۲) قرار گرفتند. نمای کلی ابعاد این موازی‌سازها به صورت شکل ۱ است. در این پژوهش به منظور یافتن معیاری از موازی‌سازی دو سلول کوچک و بزرگ یکی (سلول کوچکتر) با ابعاد دهانه خروجی ستون حرارتی و دیگری (سلول بزرگتر) با ابعاد مقطع عرضی ستون حرارتی طراحی گردیدند که به منظور معادل‌سازی با شرایط واقعی از این پس آن‌ها را آشکارساز نامیده‌ایم. طول موازی‌ساز ۲۴۲ cm و فاصله لبه خروجی آن تا آشکارسازها ۱۰ cm است. دهانه خروجی موازی‌ساز (ستون حرارتی) به صورت یک دهانه با ابعاد 10×10 cm طراحی شده است. این محاسبات با استفاده از پردازنده پرقدرت Intel Core i9 10940x@3.3-5.0GHz با در نظر گرفتن چشمه با انرژی $E=0.5\text{eV}$ (نوترون‌های حرارتی) و تعداد ۲ میلیارد نوترون به عنوان تاریخچه انجام شده است که خطای نسبی محاسبات را تا حد نزدیک به صفر کاهش می‌دهد. شار

خروجی محاسبه شده به ازای یک ذره نوترون خروجی از چشمه تا آشکارساز می‌باشد. آب سبک به‌عنوان ماده احاطه‌کننده چشمه، مولتی‌لیف ۳۰۰ لایه‌ای از جنس لایه‌های نازک آلومینیوم با پرکننده‌ی هیدروژن و پلی‌اتیلن از جمله مواد به‌کارگیری شده در شبیه‌سازی‌هاست. ابعاد هندسه شبیه‌سازی شده ستون حرارتی و آشکارسازها و طرح‌های مختلف شبیه‌سازی شده و مواد به‌کارگیری شده در آن‌ها در شکل‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

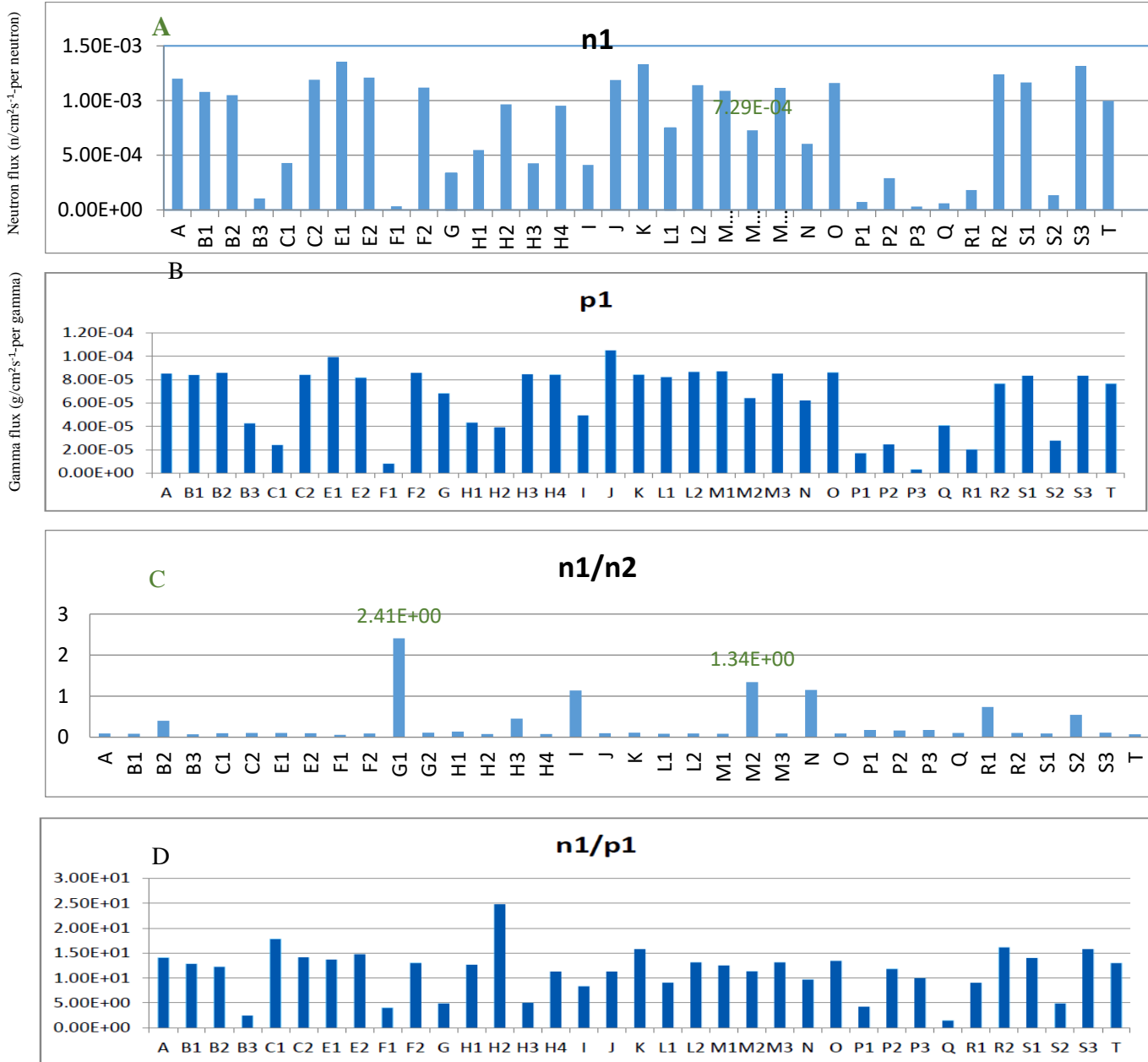


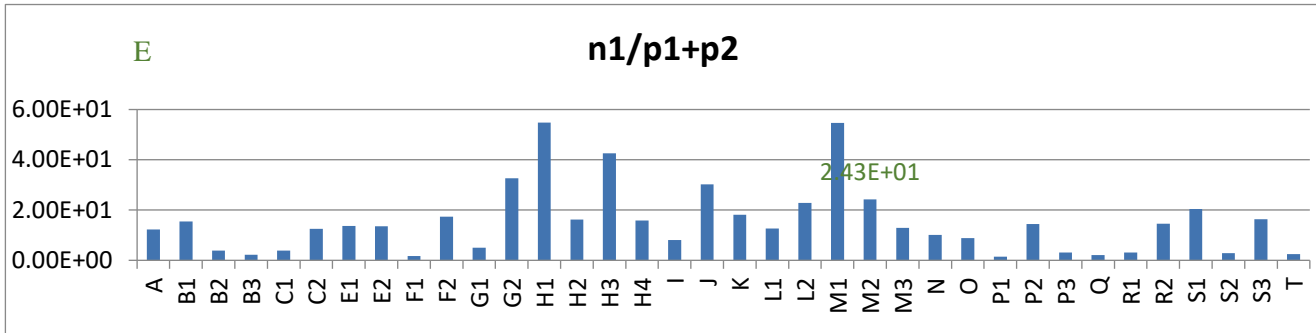
شکل ۱. ابعاد هندسه شبیه‌سازی شده ستون حرارتی و آشکارسازها در حالت گرافیکی کد MCNPX.



شکل ۲. طرح‌های مختلف شبیه‌سازی شده با استفاده از کد MCNPX2.6 و مواد به‌کارگیری شده در آن‌ها.

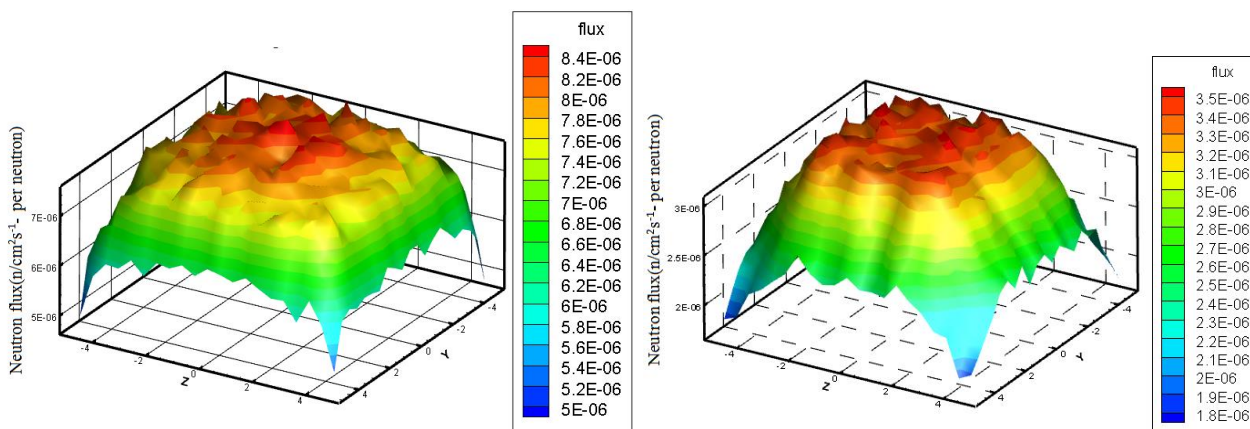
برای ارزیابی نتایج به دست آمده از کل شبیه‌سازی‌ها و مقایسه میزان شار نوترونی در صفحه هدف، میزان موازی‌سازی و نسبت n/γ نمودارهای شکل ۳ به دست آمد. شار نوترون ورودی به ابتدای ستون حرارتی به صورت همگن در کل فضا در نظر گرفته شده است. $n1$ نشان‌دهنده نوترون‌هایی است که در مسیر باریکه قرار گرفته‌اند و موازی شده‌اند که هر چه بیشتر باشد به هدف این پژوهش نزدیک‌تر است. $p1$ نیز گاما‌هایی هستند که در مسیر باریکه قرار دارند و به همراه $n1$ به صفحه آشکارساز مرکزی می‌رسند. $n2$ و $p2$ نیز به ترتیب نوترون‌ها و گاما‌هایی هستند که در مسیر باریکه قرار نگرفته‌اند و به آشکارساز بزرگ برخورد می‌کنند.





شکل ۳. مقایسه (A) شار نوترون خروجی موازی شده، (B) شار گامای خروجی در مسیر باریکه، (C) میزان موازی سازی شار نوترون، (D) نسبت شار نوترون‌های موازی به شار گامای در مسیر باریکه، (E) نسبت شار نوترون‌های موازی به شار گامای کل در ۳۵ هندسه‌ی شبیه‌سازی شده.

در نمودار (A) تعداد نوترون‌های موازی شده که توسط آشکارساز مرکزی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ cm (هم‌تراز با ابعاد دهانه‌ی خروجی ستون حرارتی) شمارش شده‌اند برای همه هندسه‌ها به ازای یک نوترون ورودی از چشمه نشان داده شده است. نمودار (B) نیز نمایش دهنده تعداد گاماها‌ی شمارش شده توسط آشکارساز مرکزی است. نمودار (C) نسبت تعداد نوترون‌های موازی رسیده به آشکارساز مرکزی بر تعداد نوترون‌های غیرموازی شمارش شده توسط آشکارساز بزرگ با ابعاد 90×90 cm برای کل هندسه‌هاست که اصلی‌ترین معیار میزان موازی سازی باریکه نوترونی در این پژوهش بوده است و هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد فرایند موازی سازی نوترون بهتر انجام شده است. دیگر پارامتر مورد ارزیابی هندسه‌ها نسبت n/γ یا همان تعداد نوترون‌های رسیده به صفحه هدف به تعداد گاماهاست که در نمودار (D) این نسبت به صورت تعداد نوترون‌های موازی شده بر شار گاما در صفحه آشکارساز مرکزی و در نمودار (E) به صورت تعداد نوترون‌های موازی شده به شار کل گاما (شار گاما در آشکارساز کوچک بعلاوه شار گاما در آشکارساز بزرگ) نمایش داده شده است. از مقایسه نتایج در شکل (A) که مقایسه شار نوترون خروجی در کل هندسه‌های موازی سازهاست درمی‌یابیم که بالاترین شار نوترون در صفحه هدف متعلق به E1 با رقم $1.36E-3$ (n/cm²s⁻¹-per neutron) می‌باشد و بعد از آن طرح‌های K و S3 به ترتیب با مقادیر $1.33E-3$ (n/cm²s⁻¹-per neutron) و $1.32E-3$ (n/cm²s⁻¹-per neutron) بالاترین شار نوترونی را در صفحه هدف به دست می‌دهند. در شکل (C) به وضوح و با اختلاف بهترین نسبت موازی سازی که از تقسیم شار نوترون‌ها در آشکارساز شماره ۱ (شمارنده نوتون‌های موازی) بر شار نوترون‌ها در آشکارساز شماره ۲ (شمارنده نوترون‌های غیرموازی) به دست می‌آید متعلق است به طرح G1 با مقدار عددی 2.41 که بهترین نتیجه از این حیث محسوب می‌شود. از این نمودار مشخص است که بهترین نتیجه نسبت شار نوترون به شار گاما متعلق است به هندسه‌ی H1 با مقدار عددی ۵۴/۸۴ و پس از آن M1 با مقدار عددی ۵۴/۶۵. هندسه G1 که بالاترین نرخ موازی سازی را در بین هندسه‌ها (بدون در نظر گرفتن شار مضر گاما) داراست، ۲۶ برابر بیشتر نسبت به حالت پایه A نوترون‌ها را موازی می‌کند. از آن جا که هدف از این پژوهش یافتن بهترین هندسه و مواد برای ستون حرارتی نوترونی به منظور بدست آوردن باریکه نوترونی یکنواخت با حداکثر میزان شدت، موازی سازی و نسبت n/γ بالا در صفحه هدف است، می‌بایست هر سه نمودار با یکدیگر مقایسه گردند. از مقایسه هر سه نمودار آن طرحی که همزمان بتواند شار نوترونی بالا، موازی سازی مطلوب و شار گامای کم ایجاد کند طرح M2 می‌باشد که شار نوترونی آن $7.29E-4$ (n/cm²s⁻¹-per neutron) نسبت موازی سازی 1.34 و نسبت شار نوترون موازی شده به شار گامای کل $2.43E+1$ بدست آمده است که بیش از ۱۴ برابر نسبت به حالت پایه A نوترون‌ها را موازی می‌کند. گرافیک سه بعدی توزیع شار نوترونی هندسه‌های G1 و M2 زمانی که چشمه در تماس با لبه ورودی و صفحه مش‌تالی شامل آشکارسازهای کوچک و بزرگ در فاصله ۱۰ cm از لبه خروجی موازی ساز است در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۴. توزیع مکانی شار نوترون در فاصله ۱۰ cm از لبه دهانه خروجی موازی‌ساز برای هندسه‌های G1 (راست) و M2 (چپ).

۳. نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی شد بیشترین موازی‌سازی نوترونی در ستون حرارتی راکتور تحقیقاتی تهران شبیه‌سازی شود. با در نظر گرفتن خالی بودن مرکز ستون حرارتی، ۳۵ موازی‌ساز با مواد مختلف طراحی و با هندسه پایه A مورد مقایسه قرار گرفت و بهترین طرح که در مجموع بهینه‌ترین هندسه می‌باشد به نام M2 انتخاب گردید. هندسه G1 که بهترین موازی‌ساز (بدون در نظر گرفتن شار مضر گاما) در این پژوهش است نسبت به هندسه پایه ۲۶ برابر بهبود عملکرد نشان می‌دهد؛ از طرفی هندسه M2 با در نظر گرفتن ملاحظات بیولوژیکی و از نظر شار کمتر گامای خروجی با برتری ۱۴ برابری نسبت به هندسه پایه A از دیگر نتایج برجسته این پژوهش است که البته با طراحی شیلدینگ می‌تواند به مراتب بیشتر بدرخشد. به دلیل آنکه تخلیه کامل ستون از بلوک‌های گرافیتی در حال حاضر دشوار است نیاز به پژوهش‌های گسترده‌تر احساس می‌شود. این شبیه‌سازی با در نظر گرفتن هوا به جای خلأ به جهت در نظر گرفتن اندرکنش نوترون‌های کم انرژی با هوا، آب سبک اطراف چشمه همانند شرایط واقعی و مواد با دسترسی آسان و ارزان قیمت به شرط عملیاتی شدن تمام محدودیت‌های مورد نیاز را برآورده می‌کند. به عنوان یک کاربرد بالقوه با توجه به نتایج این تحقیق امید است موازی‌سازهای طراحی شده بتواند در درمان بیماران به روش BNCT و دیگر کاربردها در این محدوده بکارگیری شود.

۴. مراجع

- [1] C.G. Shull, Phys. Rev. 179 (1969) 752.
- [2] Yaser Kasesaz, Hossein Khalafi, Faezeh Rahmani, Design of an epithermal neutron beam for BNCT in thermal column of Tehran research reactor, Annals of Nuclear Energy 68 (2014) 234–238.
- [3] F.J. Landkammer, Z. Phys. 189 (1966) 113.
- [4] Y. Kasesaz, et al, A feasibility study of the Tehran research reactor as a neutron source for BNCT, Applied Radiation and Isotopes, 90 (2014) 132-137.
- [5] Y. Kasesaz, et al, Design and construction of a thermal neutron beam for BNCT at Tehran Research Reactor, Applied Radiation and Isotopes, 94 (2014) 149-151.
- [6] M. Monshizadeh, Y. Kasesaz, H. Khalafi, S. Hamidi, MCNP design of thermal and epithermal neutron beam for BNCT at the Isfahan MNSR, Progress in Nuclear Energy 83 (2015) 427-432.
- [7] H. Kurz, H. Rauch, Z. Phys. 220 (1969) 419.
- [8] H. Rauch, W. Treimer, U. Bonse, Phys. Lett. A 47 (1974) 369.
- [9] M.H. Choopan Dastjerdi, H. Khalafi, Y. Kasesaz, S.M. Mirvakili, J. Emami, H. Ghods and A. Ezzati, Design, construction and characterization of a new neutron beam for neutron radiography at the Tehran Research Reactor, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.02.040>.