بالابردن قابلیت‌های راکتور تحقیقاتی تهران با استفاده از یک ابزار پرتودهی جدید

احسان بوستانی[۱]، مصطفی حسن زاده*[۱]، رشید شاه حسینی[۱]

[۱] سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

چکیده:

یکی از مهمترین کاربردهای راکتور تحقیقاتی تهران پرتودهی نمونه برای اهداف پزشکی است. شیوه کنونی پرتودهی نمونه در راکتور تحقیقاتی تهران دارای ظرفیت کمی بوده، سبب پرتوگیری قابل توجه پرسنل هنگام ترخیص نمونه از قلب و ارسال برای آزمایشگاه‌های فرایندی تولید رادیودارو می‌شود. در این تحقیق، ابزاری که دارای ظرفیت زیادی برای پرتودهی نمونه است با استفاده از کد محاسباتی MCNPX طراحی و سپس ساخته شده است. این ابزار امکان پرتودهی همزمان ۲۳ نمونه را فراهم کرده و سبب افزایش ظرفیت پرتودهی حداقل به میزان ٪۳۴ شده است. همچنین به‌کارگیری این ابزار سبب یکنواخت‌تر شدن شار نوترون شده و تاثیر منفی چندانی روی مقادیر ضریب تکثیر موثر و شار نوترون نداشته است.

کلیدواژه: *راکتور تحقیقاتی تهران، ابزار پرتودهی، مولفه‌های نوترونی، تولید رادیوایزوتوپ، کد MCNPX*

Enhancing the capabilities of the Tehran research reactor using a new irradiation tool

Ehsan Boustani[1], Mostafa Hassanzadeh[1] and Rashid Shahhosseini[1]

[1] AEOI, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Reactor and nuclear safety school

Abstract:

One of the most important applications of the Tehran Research Reactor (TRR) is irradiation for medical goals. The current method of sample irradiation in TRR has a limited capacity, causes to distinctive exposure during samples disposal and sending to processing laboratories. In this research, one tool which has considerable capacity for sample irradiation is designed using MCNPX code and constructed. This tool provides the possibility of simultaneous 23 samples irradiation and leads to increasing the irradiation capacity up to 34% at least. Also, the application of this tool gives rise to flat the neutron flux more considering no have negative effect on effective multiplication factor and neutron flux.

Keywords: Tehran research reactor, Irradiation tool, Neutronic parameters, Radioisotope production, MCNPX code

مقدمه:

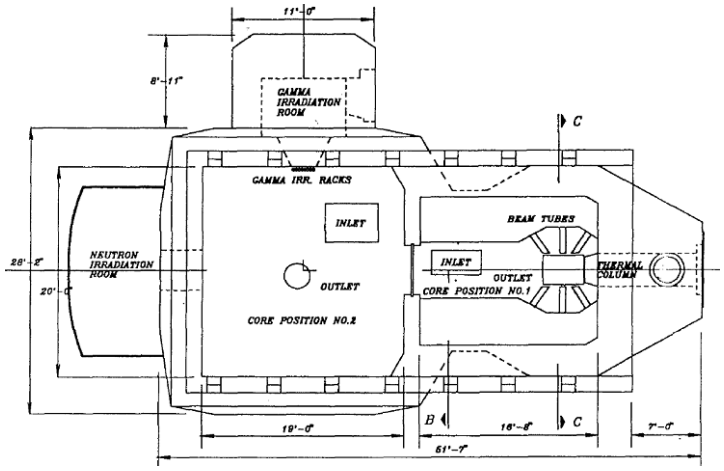
راکتورهای هسته‌ای از نظر قدرت به ۴ دسته مجموعه‌های زیربحرانی، تاسیسات بحرانی، راکتورهای کم‌توان، توان متوسط و توان بالا طبقه‌بندی می‌شوند [۱]. راکتورهای تحقیقاتی از نظر ساختار هم شامل انواع راکتورها ازجمله راکتورهای نوع تریگا[1]، تانکی-استخری[2] و نوع سوخت صفحه‌ای[3] است. راکتورهای سوخت صفحه‌ای گروه بزرگی از راکتورهای تحقیقاتی را تشکیل می‌دهند که سوخت آنها صفحه‌ای، خنک‌کننده و کندکننده آب سبک است و از اکسید اورانیوم یا سیلیکات اورانیوم به عنوان سوخت استفاده می‌کنند. برنامه‌های ارتقا و به‌روزرسانی در بسیاری از راکتورهای تحقیقاتی در سرتاسر دنیا اجرا می‌شود. ازجمله این برنامه‌ها می‌توان به تاسیسات پرتودهی جدید برای کاربردهای زیست درمانی[4] در راکتور RA-3 [۲]، سامانه خودکار برای تحلیل فعال‌سازی نوترونی[5] در ستون حرارتی راکتور IBR-2 [۳]، بهینه‌سازی ابزار کانونی کردن باریکه نوترون برای اندازه‌گیری زمان پرواز هندسه مستقیم در چشمه راکتور FRMII [۴] یا استاندارد کردن تاسیسات شمارش و پرتودهی برای تحلیل فعال‌سازی نوترونی صنعتی در راکتور شماره ۱ نیجریه[6] [۵] اشاره کرد. در این مقاله، یک ایزار پرتودهی جدید به‌منظور پرتودهی نمونه‌ها در داخل قلب راکتور تحقیقاتی تهران پیشنهاد و ساخته شده است. این سامانه جدید ابتدا توسط کد MCNPX شبیه‌سازی شده [۶]، سپس پارامترهای نوترونی مانند میزان شار نوترون‌ها، ضریب تکثیر موثر و راکتیویته در طرح جدید محاسبه شده و با طرح قبلی مقایسه شده است. همچنین در ادامه به منظور امکان استفاده بهتر از این ابزار پرتودهی جدید، ابعاد آن بهینه‌سازی شده است.

روش کار:

راکتور تحقیقاتی تهران یک راکتور با توان حرارتی نامی ۵ مگاوات است که آب سبک در آن به عنوان خنک-کننده، کندکننده و حفاظ استفاده می‌شود. شبکه نگهدارنده قلب این راکتور دارای ۵۴ محل به صورت یک آرایه ۶×۹ است که سوخت‌های استاندارد، سوخت‌های کنترلی، محل‌های پرتودهی و گرافیت را شامل می‌شود [۷]. در هر آرایش قلب چندین محل پرتودهی وجود دارد که برای پرتودهی نمونه از این محل‌ها بیشترین استفاده می-شود. با قرار دادن نمونه‌های مورد نظر درون این محل‌ها و برای مدت زمان لازم، نمونه پرتو دیده با پرتوزایی خواسته شده به‌دست می‌آید. تسهیلات پرتودهی نمونه به دلیل اهمیت فراوانی که در یک راکتور دارند در راکتورهای مختلف به‌روزرسانی، تجهیز و ارتقا داده می‌شوند. نمای بالای سازه راکتور تحقیقاتی تهران در شکل

[1] Training, Research, Isotope and General Atomics (TRIGA)
[2] Pool type
[3] Material Testing Reactor (MTR)
[4] Biomedical
[5] Neutron Activation Analysis (NAA)
[6] Nigeria Research Reactor-1

شماره (۱) نشان داده شده است. پرتودهی نمونه در راکتور تهران به چند طریق صورت می‌گیرد که شامل قرار دادن نمونه‌ها در محل‌های زیر است: محل‌های پرتودهی[1] درون قلب، کانال‌های پرتودهی[2]، ستون حرارتی[3]، اتاق تابش گاما[4] واقع در سمت جنوبی طبقه پایین راکتور[5]، لوله‌های پرتودهی[6] کنار قلب که امکان ارسال نمونه از آزمایشگاه فیزیک نوترون و مرکز تابش گاما را فراهم آورده است.



شکل شماره (۱): نمای بالای سازه راکتور تحقیقاتی تهران

همان‌گونه که از شکل شماره (۱) دیده می‌شود چندین امکان برای پرتودهی با نوترون و گاما در راکتور تحقیقاتی تهران درنظر گرفته شده است، اما بیشترین استفاده جهت پرتودهی نوترون در حال حاضر از محل‌های پرتودهی درون قلب انجام می‌گیرد. برخی از مهمترین مشخصه‌های راکتور تهران در جدول شماره (۱) آمده است.

جدول شماره (۱): برخی از مهمترین مشخصه‌های راکتور تحقیقاتی تهران

کمیت	مقدار
توان حرارتی (مگاوات)	۵
نوع و غنای سوخت	اکسید اورانیوم ٪۱۹/۷۵
سامانه خاموشی	۴ میله از جنس ایندیم، قلع و جیوه
جنس میله تنظیمی	فولاد ضدزنگ
خنک‌کننده و کندکننده	آب سبک
جنس غلاف	آلومینیوم ۶۰۶۱
گام شبکه (سانتی‌متر)	۸/۱ × ۷/۷۱
تعداد صفحه‌های سوخت	۱۹ صفحه در مجموعه سوخت استاندارد

[1] Irradiation Box (IR Box)
[2] Beam tube
[3] Thermal column
[4] Gamma room
[5] Beam Hall Floor (BHF)
[6] Rabbit

پرتودهی نمونه در شرایط فعلی راکتور تحقیقاتی تهران از طریق قراردادن میله‌های توخالی استوانه‌ای بزرگ حاوی نمونه‌ها در محل‌های پرتودهی قلب انجام می‌گیرد. میله‌های استوانه‌ای دارای قطر داخلی ۳ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر است، امکان پرتودهی دو عدد از این میله‌ها که مطابق شکل شماره (۲) الف مجاور یک خط کش ۵۰ سانتی‌متری قرار داده شده است، به‌طور همزمان در قلب وجود دارد. امکان بارگذاری تعداد بیشینه ۵ عدد نمونه به‌صورت کپسول‌های با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و قطر کمتر از ۳ سانتی‌متر در این میله‌ها میسر است. در صورتی که کپسول‌های پرتودهی سبک باشند، برای جلوگیری از شناور شدن کپسول‌های نمونه از یک میله توپر جاذب که در ابتدا و انتهای این میله‌ها قرار داده می‌شود، استفاده می‌شود. مواد قابل بارگذاری در کپسول می‌تواند شامل همه موادی که برای کارهای پژوهشی، تولیدی و پزشکی استفاده می‌شود، باشد. برای مثال لوتوسیم، مولیبدن، طلا و یا مس. باتوجه به نیازهای دارویی و پژوهشی کشور، یک ابزار پرتودهی جدید پیشنهاد و طراحی شده است. محاسبات این تحقیق با استفاده از کد احتمالاتی MCNPX انجام شده است. پارامترهای نوترونی مانند میزان شار نوترون‌ها، ضریب تکثیر موثر و راکتیویته در طرح جدید محاسبه و با طرح قبلی مقایسه شده است. همچنین در ادامه به منظور امکان استفاده بهتر از این ابزار پرتودهی جدید، ابعاد آن بهینه‌سازی شده است. ارتقای سامانه پرتودهی نمونه با سامانه جدید سبب بهبود در چندین مولفه می‌شود که برخی از آنها در این تحقیق بررسی شده‌اند. طرح پیشنهادی در شکل شماره (۲) نشان داده شده است، ابعاد ظاهری آن همانند مجموعه‌های سوخت[1] بوده و دارای ظرفیت بارگذاری ۲۳ کپسول برای پرتودهی است. همان‌طورکه در این شکل دیده می‌شود، کپسول‌های نمونه در این طرح به‌صورت افقی پرتودهی می‌شوند که متفاوت از آرایش آنها در طرح قبلی است.

الف ب

شکل شماره (۲): الف- طرح پرتودهی فعلی راکتور تحقیقاتی تهران، ب- طرح پرتودهی پیشنهادی ساخته شده

[1] Fuel Elements (FEs)

نتایج:

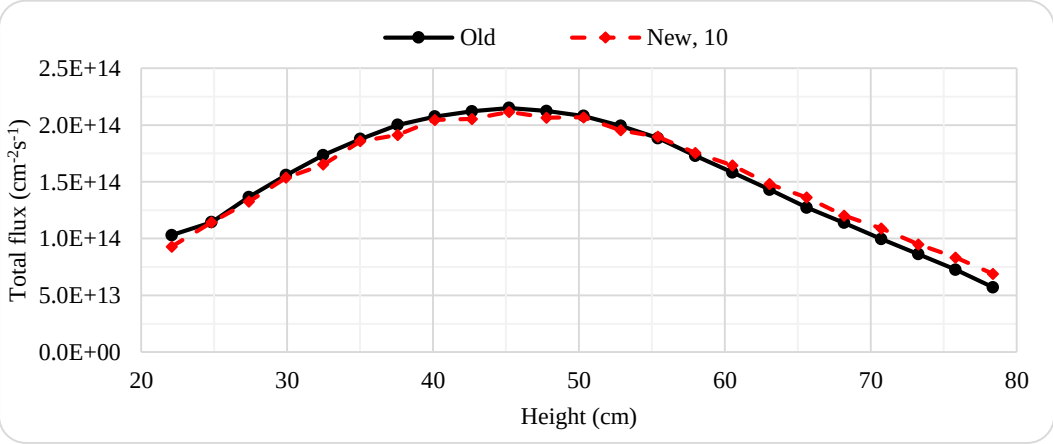
باتوجه به ظرفیت ۲۳ عددی برای نمونه‌های ۷ سانتی‌متری این طرح و بیشینه تعداد پرتودهی در طرح قبلی که ۱۰ عدد نمونه ۱۰ سانتی‌متری برای نمونه‌های سنگین و ۸ عدد برای نمونه‌های سبک است، میزان افزایش ظرفیت پرتودهی در این طرح برای نمونه‌های سبک و سنگین باتوجه به اطلاعات داده شده به‌ترتیب ٪۶۱ و ٪۳۴ است.

ضرایب تکثیر موثر و راکتیویته قلب برای طرح‌های پرتودهی فعلی و جدید محاسبه شده که در **Error! Reference source not found.** آمده است. همان‌طورکه این **Error! Reference source not found.** نشان می دهد، استفاده از طرح جدید اثر چندانی روی ضریب تکثیر موثر قلب ندارد که از جمله نقاط قوت این طرح است.

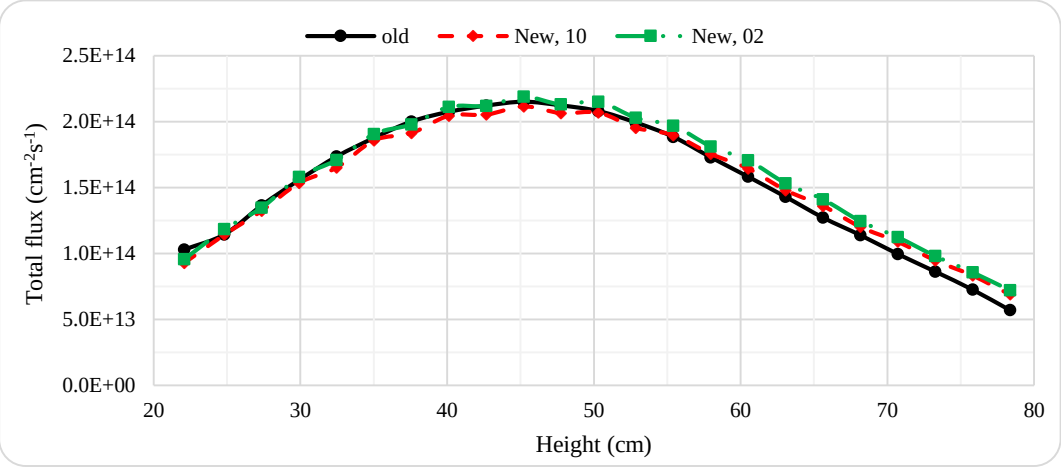
جدول شماره (۲): ضرایب تکثیر موثر و راکتیویته طرح‌های فعلی و جدید

مولفه	طرح فعلی	طرح جدید
ضریب تکثیر موثر	۰/۹۹۷۸۳ ± ۰/۰۰۰۱۱	۰/۹۹۷۹۳ ± ۰/۰۰۰۱۲
راکتیویته	-۲۱۷	-۲۰۷

ازطرفی، میزان شار کل نوترون‌ها برای نمونه‌های پرتودیده در طرح پرتودهی قبلی و پس از بهینه‌سازی طرح پرتودهی جدید بررسی شده که در شکل شماره (۳) با هم مقایسه شده است. همان‌طورکه این شکل شماره (نشان می‌دهد، این طرح با ضخامت دیواره ۱۰ میلی‌متر (New, 10) سبب توزیع شار یکنواخت‌تر شده است. همچنین شکل شماره (۴) اثر کاهش ضخامت دیواره روی توزیع شار کل نوترون‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل شماره (، با کاستن از ضخامت دیواره آلومینیومی طرح جدید به ۲ میلی‌متر (New, 02)، ضمن بهتر شدن یکنواختی شار، بهبود در مقادیر شار نیمه بالایی این طرح مشهود است. علاوه براین، افزایش شار نوترون‌ها باعث کاهش زمان و هزینه پرتودهی نمونه‌ها می‌گردد که در طرح جدید در نظر گرفته شده است.



شکل شماره (۳): توزیع شار کل نوترون‌ها در طرح‌های پرتودهی فعلی و جدید



شکل شماره (۴): توزیع شار کل نوترون‌ها در طرح پرتودهی فعلی و طرح‌های جدید

در ادامه این تحقیق، از آنجایی که طرح جدید ظرفیت پرتودهی ۲۳ نمونه را دارد، اثر جایگذاری ابزار پرتودهی جدید در دو محل متفاوت محاسبه و در جدول شماره (۳) آورده شده است. یادآوری می‌شود که محل ۱ در وسط قلب و محل ۲ در کناره‌های قلب واقع شده و برای حالت‌هایی شامل ۱۱ و ۲۳ نمونه بررسی شده است.

جدول شماره (۳): ضرایب تکثیر موثر و راکتیویته در محل‌های ۱ و ۲ در طرح جدید

مولفه	محل ۱		محل ۲	
	۱۱	۲۳	۱۱	۲۳
ضریب تکثیر موثر	۱/۰۰۱۸۶ ± ۰/۰۰۰۱۱	۱/۰۰۵۲۲ ± ۰/۰۰۰۱۱	۰/۹۹۷۸۶ ± ۰/۰۰۰۱۱	۰/۹۹۷۶۵ ± ۰/۰۰۰۱۱
راکتیویته (pcm)	۱۸۶ ± ۱۱	۵۱۹ ± ۱۱	-۲۱۴ ± ۱۱	-۲۳۶ ± ۱۱

همان‌طورکه در جدول شماره (۳) دیده می‌شود، اثر حضور ۱۱ و ۲۳ نمونه در ابزار پرتودهی جدید در قلب راکتور هنگامی که در وسط قلب قرار گیرد افزایش ضریب تکثیر قلب به اندازه ۳۹۳ و ۷۲۶pcm است، ولی در محل‌های کناری کمتر از ۳۰pcm است. با توجه به این میزان کم تاثیر در راکتیویته قلب، امکان بارگذاری و برداشتن مجموعه پرتودهی در قلب بدون نیاز به خاموشی در راکتور امکانپذیر است که مزیت مهمی از نظر بهره‌برداری است. در انتها پژوهشی تجربی برای راستی‌آزمایی محاسبات انجام شده است و مقادیر شبیه‌سازی و تجربی برای پرتودهی اکسید ساماریم در یکی از محل‌های پرتودهی به ترتیب ۲۶۵۹ و ۲۵۰۰ میلی‌کوری بوده که اختلاف آن حدود ۶٪ است.

بحث و نتیجه‌گیری:

در این تحقیق، طرحی جدید که دارای ظرفیت زیادی برای پرتودهی نمونه‌ها است با استفاده از کد محاسباتی MCNPX طراحی و ساخته شده است. این طرح امکان پرتودهی همزمان ۲۳ نمونه ۷ سانتی متری را دارد. باتوجه به بیشینه تعداد پرتودهی در طرح قبلی که ۱۰ عدد نمونه ۱۰ سانتی‌متری سنگین یا ۸ عدد نمونه سبک بوده است، میزان افزایش ظرفیت پرتودهی در طرح جدید برای نمونه‌های سبک و سنگین به‌ترتیب ٪۶۱ و ٪۳۴ است. با توجه به نتایج، طراحی و اجرای این طرح ضمن افزایش توان پرتودهی در این راکتور، ایمنی راکتور را افزایش داده و سبب کاهش در میزان تولید پسمان ناشی از فعالیت‌های پرتودهی طرح قدیم شده است.

مراجع:

۱. Villarino, E. and A. Doval, *INVAP's research reactor designs*, Science and Technology of Nuclear Installations, (2010). 2011.
۲. Miller, M., et al., *New irradiation facility for biomedical applications at the RA-3 reactor thermal column*, Applied Radiation and Isotopes, (2009). 67(7): p. S226-S229.
۳. Pavlov, S.S., A.Y. Dmitriev, and M.V. Frontasyeva, *Automation system for neutron activation analysis at the reactor IBR-2, Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*, Journal of radioanalytical and nuclear chemistry, (2016). 309(1): p. 27-38.
۴. Rasmussen, N., G. Simeoni, and K. Lefmann, *Optimizing a neutron-beam focusing device for the direct geometry time-of-flight spectrometer TOFTOF at the FRM II reactor source*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, (2016). 816: p. 106-112.
۵. Jonah, S., et al., *Standardization of NIRR-1 irradiation and counting facilities for instrumental neutron activation analysis*, Applied Radiation and Isotopes, (2006). 64(7): p. 818-822.
۶. LANL, *MCNPX^{TM} User's Manual*, Los Alamos National Laboratory, (April 2008). USA.
۷. AEOI, *Safety Analysis Report for Tehran Research Reactor*, (2009). Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran.