

## ارزیابی سیستم جدید رادیوگرافی نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران از نظر ایمنی پرتویی

یاسر کاسه‌ساز\*، بهروز رکرک و حسین چوپان دستجردی

پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، اصفهان، ایران.

\*تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، کدپستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳

پست الکترونیکی: ykasesaz@aeoi.org.ir

### چکیده

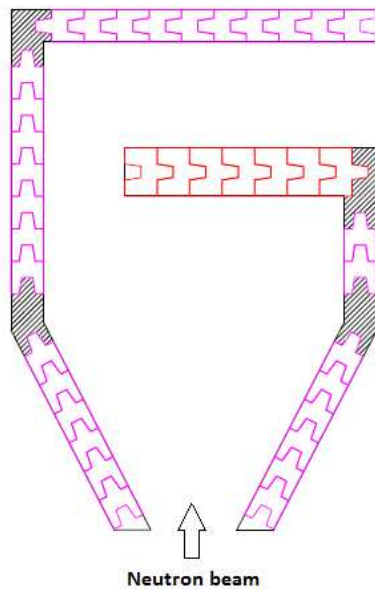
اخیرا یک کولیماتور جدید برای رادیوگرافی نوترونی بر پایه استفاده از کانال پرتو دهی E راکتور تحقیقاتی تهران طراحی، ساخته و با موفقیت تست شده است. آزمون‌های اولیه نشان می‌دهد که این سیستم قابلیت استفاده صنعتی جهت تصویربرداری از نمونه‌های مختلف را دارد. یک گام مهم و اساسی در این مسیر طراحی و ساخت یک اتاق با ابعاد مناسب و با در نظر گرفتن ملاحظات ایمنی پرتویی می‌باشد. پژوهش حاضر در مورد آنالیز اتاق پیشنهاد شده از نظر ملاحظات دزیمتری است که با استفاده از کد MCNPX انجام شده است. به این منظور بعد از شبیه‌سازی کامل هندسه اتاق، کف اتاق و نیز دیوار استخر راکتور، دز در قسمت‌های مختلف بیرون اتاق و پشت دیوارها محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد که دیوارها و چیدمان در نظر گرفته شده می‌تواند دز در بیرون اتاق را تا حد ۱۰ میکروسیورت بر ساعت کاهش دهد که این مقدار از نظر ملاحظات ایمنی پرتویی قابل قبول می‌باشد.

**کلیدواژگان:** راکتور تحقیقاتی تهران، سیستم رادیوگرافی نوترونی جدید، حفاظت‌سازی، دزیمتری، کد MCNPX.

### ۱. مقدمه

می‌توان به تصویربرداری از صفحات و میله‌های سوخت قبل و بعد از پرتو دهی اشاره نمود که برای آنالیز ساختار فیزیکی سوخت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. ساختار داخلی کانال نوترونی تصویربرداری نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران در شکل (۱) نمایش داده شده است. شار نوترون حرارتی در دهانه خروجی این سیستم برابر  $6 \times 10^6$  نوترون بر سانتی مربع بر ثانیه است [۱].

اخیرا یک باریکه نوترونی به منظور رادیوگرافی نوترونی یا تصویربرداری نوترونی در کانال E راکتور تحقیقاتی تهران در قالب یک رساله دکترا طراحی، ساخته و با موفقیت مورد آزمایش قرار گرفته است [۱-۳]. روش تصویربرداری نوترونی یک روش مکمل روش تصویربرداری پرتوی ایکس است که قادر به تفکیک ایزوتوپی است و کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف از جمله صنعت هسته‌ای دارد. از جمله کاربردهای این سیستم در صنعت هسته‌ای

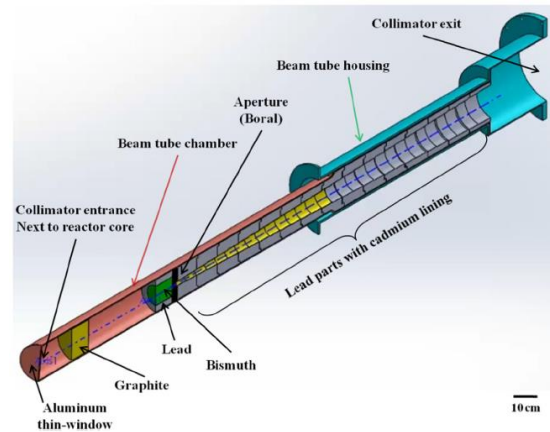


شکل (۲): طرح پیشنهادی برای اتاق پرتودهی تصویربرداری نوترونی.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. هندسه سیستم

شکل (۳) هندسه شبیه‌سازی شده در کد MCNPX [۵] را نشان می‌دهد. این هندسه شامل دیوارهای اتاق، دیوار استخر، کف اتاق (به منظور در نظر گرفتن اثر پراکندگی از بتن کف اتاق) و تعدادی کره در مکان‌های مختلف که دز در آن‌ها محاسبه خواهد شد. یکی از ملاحظات مهم در ساخت اتاق، چنانچه مورد تاکید مدیریت بهره‌برداری راکتور تحقیقاتی تهران بود، سهولت در برچیدن سیستم است. به این ترتیب نمی‌توان دیوارها را به صورت یک پارچه ساخت بلکه باید به صورت بلوک‌هایی ساخته شوند که مانند قطعات پازل روی یکدیگر قرار می‌گیرند. طراحی نهایی به صورتی است که قطعات از یک طرف دارای تورفتگی و از طرف دیگر دارای برآمدگی هستند، به گونه‌ای که هر دو قطعه در کنار یکدیگر درون هم گیر کنند. اما این قطعات از بالا و پایین تخت هستند. لذا پیش بینی شد که بین این قطعات یک دهم میلیمتر فاصله قرار داشته باشد و این مسئله در شبیه‌سازی‌ها لحاظ گردید. هر چند که این درزها عملاً با گچ قابل پوشاندن هستند.



شکل (۱): ساختار داخلی کانال نوترونی تصویربرداری نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران.

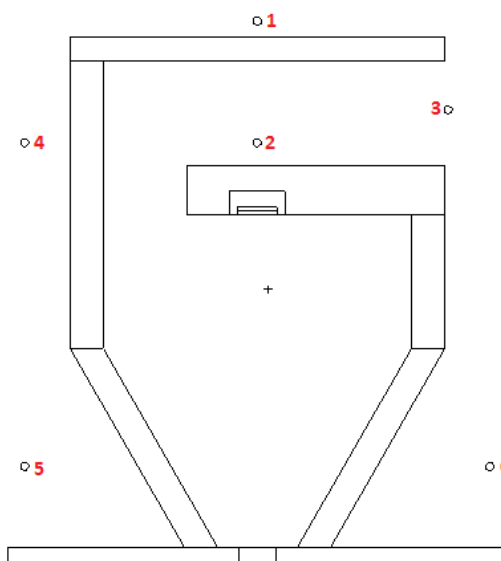
پس از انجام آزمون‌های اولیه و اطمینان از مناسب بودن کیفیت تصاویر و با توجه به کاربرد این سیستم جهت تصویربرداری از میله‌ها و صفحات سوخت هسته‌ای، صنعتی کردن آن در دستور کار پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای قرار گرفت. در این راستا اولین گام طراحی و ساخت یک اتاق با ابعاد مناسب و با در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به ایمنی پرتویی بود. به این منظور با در نظر گرفتن شرایط فیزیکی ساختمان راکتور تحقیقاتی تهران و محدودیت‌های آن و با الهام از اتاق‌های مشابه در دیگر مراکز تصویربرداری نوترونی طراحی که در شکل (۲) نمایش داده شده است از نظر فنی و مهندسی مورد پذیرش کمیته فنی ناظر قرار گرفت. در این طرح ضخامت دیوارهای بتونی در همه جا برابر ۴۰ سانتی‌متر و برای دیوار مقابل دهانه خروجی برابر ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد. ارتفاع تمام دیوارها نیز برابر ۲ متر می‌باشد. در گام بعد، ضمن بررسی کارایی دیوارها از نظر حفاظت‌سازی، یک متوقف‌کننده باریکه نوترونی در دیوار مقابل دهانه خروجی طراحی و مورد ارزیابی قرار گرفت که در ادامه روش انجام این کار و نتایج آن گزارش می‌شود.

بودن خطاهای محاسباتی کد نتیجه بخش نبود. به عنوان یک راه حل، محاسبات در دو فاز انجام شد. در فاز اول طیف نوترون و گاما در خروجی کانال نوترونی محاسبه گردید و در فاز بعد، طیف های محاسبه شده به عنوان چشمه در برنامه ای که تنها شامل اتاق، دیوار استخرو کف راکتور بود، تعریف گردید. جدول (۱) میزان شار نوترون و گاما را در بازه های مختلف انرژی به ازای یک نوترون چشمه نشان می دهد که در محل خروجی باریکه محاسبه شده اند.

جدول (۱): شار نوترون و گاما در بازه های مختلف انرژی به ازای یک نوترون چشمه.

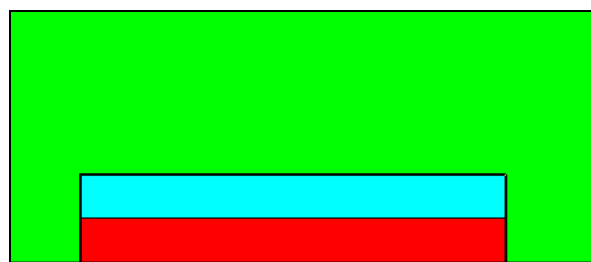
Photon		Neutron	
E (MeV)	Flux (1/cm <sup>2</sup> .s)	E (MeV)	Flux (1/cm <sup>2</sup> .s)
1.00E-02	3.81E-16	4.00E-07	8.37E-12
5.00E-02	2.17E-14	1.00E-04	9.61E-13
1.00E-01	1.22E-13	1.00E-02	9.23E-13
5.00E-01	1.14E-12	2.00E-02	1.30E-13
1.00E+00	5.15E-13	3.00E-02	9.70E-14
2.00E+00	1.94E-12	4.00E-02	5.44E-14
3.00E+00	1.80E-12	5.00E-02	5.95E-14
4.00E+00	7.92E-13	1.00E-01	2.01E-13
5.00E+00	4.40E-13	5.00E-01	1.47E-12
6.00E+00	1.95E-13	1.00E+00	2.28E-12
7.00E+00	6.98E-14	2.00E+00	4.44E-12
8.00E+00	5.48E-14		
9.00E+00	2.25E-15		
1.00E+01	2.76E-16		

پس از محاسبه طیف انرژی در دهانه خروجی کانال، این اطلاعات به عنوان چشمه در برنامه دوم در نظر گرفته شد. در برنامه دوم چشمه به صورت دایره ای به قطر ۲۰ سانتی متر با طیف انرژی مشخص شده در جدول ۱ تعریف گردید. لازم به ذکر است که این کار یک بار برای نوترون و یک بار دیگر برای گاما انجام شد (چشمه پرتو یک بار نوترون و بار دیگر گاما در نظر گرفته شد). در مورد چشمه نوترون فرض شد که نوترون ها بدون واگرایی و عمود بر دیسک چشمه گسیل می شوند. اما در مورد گاما چشمه به صورت همگن تعریف گردید که ذرات را به صورت همگن در زوایای صفر تا ۹۰ درجه گسیل می دارد.



شکل (۳): هندسه شبیه سازی شده اتاق پرتو دهی تصویربرداری نوترونی شامل ۶ آشکارساز جهت محاسبه دز در آن ها.

هم چنین متوقف کننده باریکه درون دیوار ۶۰ سانتی متری دیده می شود. این قسمت به صورت یک قطعه استوانه ای شکل به قطر ۷۰ سانتی متر در نظر گرفته شد که از چند لایه شامل ۵ سانتی متر هوا (به صورت تو رفتگی در دیوار مقابل باریکه)، ۵ سانتی متر پلی اتیلن بور دار (شامل ۵ درصد بور-۱۰)، ۱ میلی متر کادمیوم و ۲۰ سانتی متر سرب تشکیل شده است. این مجموعه درون یک غلاف سربی به ضخامت ۱۰ سانتی متر قرار دارد. شکل (۴) نمایی از این قطعه را نشان می دهد.



شکل (۴): نمایی از هندسه متوقف کننده باریکه (سبز: سرب، قرمز: هوا، آبی: پلی اتیلن بور دار).

## ۲.۲. تعریف چشمه

در آزمون های اولیه سعی شد تا با در نظر گرفتن کامل ترین هندسه شامل راکتور، استخرو، کانال نوترونی و اتاق پرتو دهی، میزان دز در اطراف اتاق محاسبه گردد، اما این روش به دلیل بالا

## ۳،۲. محاسبات دزیمتری

جدول (۲) میزان دز ناشی از پرتوهای گاما ( $\mu\text{Sv/h}$ ).

شماره آشکارساز	گامای اولیه	گامای ثانویه	گامای کل
	گامای اولیه	گامای ثانویه	
1	0.03	1.90	1.93
2	0.40	111.00	111.40
3	0.24	2.10	2.35
4	0.14	0.94	1.09
5	2.60	3.03	5.63
6	2.59	3.09	5.68

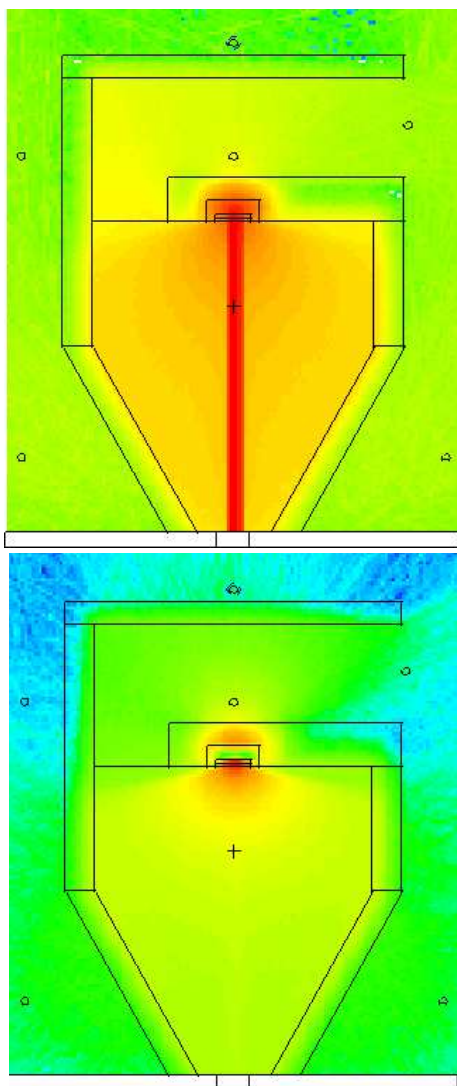
جهت محاسبه دز از روش تبدیل شار به دز استفاده گردید. به این منظور از تالی ۴ به همراه کارت DF4 و توابع تبدیل شار به دز براساس استاندارد [۶] ICRP-21 استفاده شد که خروجی آن میزان دز برحسب سیورت بر ساعت می باشد. نتایج به گونه‌ای بهنجار گردید که شار نوترون‌های حرارتی برابر مقدار گزارش شده در مرجع [۱] باشد.

دز کل دارای سه مولفه است که شامل دز ناشی از نوترون، دز ناشی از گاماهاى اولیه و دز ناشی از گامای ثانویه که از برهم کنش‌های نوترون با مواد مختلف تولید می گردند. این سه مولفه به صورت جداگانه محاسبه شدند.

## ۳. نتایج

جدول (۲) نتایج محاسبه دز ناشی از گاماهاى اولیه، گاماهاى ثانویه و دز کل ناشی از همه پرتوهای گاما را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود دز ناشی از گاماهاى ثانویه سهم قابل توجهی نسبت به گاماهاى اولیه دارند که این به دلیل این است که باریکه نوترونی ساخته شده برای تصویر برداری نوترونی از نظر آلودگی گاما دارای شرایط مناسبی است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که دز در محل آشکارساز شماره ۲ بسیار بالاست که قابل پیش‌بینی نیز بود زیرا این محل دقیقاً روبروی دهانه خروجی باریکه قرار دارد. بدیهی است که در هنگام پرتودهی حضور پرسنل در این محل کاملاً ممنوع است.

شکل (۵) توزیع مکانی دز ناشی از نوترون و گامای ثانویه را مکان‌های مختلف اتاق نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد میزان دز با عبور از دیوارها و پشت آن‌ها کاهش چشمگیری دارد.



شکل (۵) توزیع دز نوترون (بالا) و گاما (پایین) در اتاق پرتودهی و اطراف آن.

جدول (۳) دز نوترون، گاما و دز کل را در پشت دیوارهای مختلف اتاق نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که میزان دز کل در آشکارسازهای ۵ و ۶ بیش‌تر از مقدار ۱۰ میکروسیورت بر ساعت

#### ۴. نتیجه گیری

هر چند که نتایج این تحقیق نشان می دهد که اتاق پیشنهاد شده برای سیستم تصویربرداری نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران در بعضی نقاط نمی تواند مقدار دز مجاز را تامین کند اما پیشنهاد می گردد که تصمیم گیری برای انجام هر گونه تغییر در ابعاد اتاق و ضخامت دیوارها بعد از ساخت و اندازه گیری های ضروری صورت گیرد و پس از آن در صورت نیاز لایه ای از پلی اتیلن بردار، سرب، بتن یا ترکیبی از آنها، بسته به این که دز نوترون یا گاما بالا باشد، به دیوارهای جانبی اضافه گردد. همچنین طراحی و ساخت یک درب مناسب برای اتاق پیشنهاد شده ضروری می باشد.

است که نشان می دهد که ایستادن در این دو مکان با خطر پرتوگیری همراه است. همان طور که قبلا نیز اشاره گردید میزان دز در محل آشکارساز ۲ بالاست اما شرایط بهره برداری از سیستم به گونه ای است که در هنگام پرتو دهی نمونه ها، حضور پرسنل درون اتاق مطلقا ممنوع می باشد.

جدول (۳) میزان دز در اطراف اتاق ( $\mu\text{Sv/h}$ ).

شماره آشکارساز	گامای کل	نوترون	مجموع
1	1.93	0.53	2.46
2	111.40	182.98	294.38
3	2.35	6.60	8.95
4	1.09	3.41	4.50
5	5.63	8.19	12.51
6	5.68	9.26	13.80

## ۵. مراجع

- [1] Dastjerdi, MH Choopan, et al. "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 (2016): 1-8.
- [2] Dastjerdi, Mohammad Hossein Choopan, and Hossein Khalafi. "Design of a thermal neutron beam for a new neutron imaging facility at Tehran research reactor." *Physics procedia* 69 (2015): 92-95.
- [3] Dastjerdi, MH Choopan, et al. "The quality assessment of radial and tangential neutron radiography beamlines of TRR." *Journal of Instrumentation* 12.07 (2017): P07008.
- [4] Dastjerdi, Mohammad Hosein Choopan, et al. "Inspection of domestic nuclear fuel rods using neutron radiography at the Tehran Research Reactor." *Materials Testing* 58.9 (2016): 763-766.
- [5] Waters, Laurie S. "MCNPX user's manual." Los Alamos National Laboratory (2002).
- [6] Grande, P., and M. C. O'Riordan. "ICRP committee 3 task group. Data for protection against ionizing radiation from external sources (ICRP-21)." (1971).