



امکان سنجی استفاده از راکتور مینیاتوری به عنوان چشمه پایدار نوترون جهت کالیبره کردن دزیومتر و آشکارسازهای نوترونی

جواد مختاری، افروز عسگری*، محمدحسین چوپان دستجردی

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

چکیده

هدف از این مطالعه امکان‌سنجی استفاده از راکتور مینیاتوری به عنوان چشمه پایدار نوترون جهت کالیبره کردن دزیومترهای نوترون می‌باشد. در اولین قدم کد MCNP با خطای کمتر از ۳ درصد اعتبارسنجی شد، سپس میزان دز نوترون در گروه‌های مختلف انرژی در سایت داخلی، خارجی و کانال خشک راکتور مینیاتوری محاسبه گردید. طبق نتایج، با انتخاب زمان پرتودهی و توان راکتور می‌توان به دز نوترون با گستره $3/5 \mu Sv$ (با احتساب ۱ ثانیه پرتودهی در توان ۳۰ وات در بالای کانال خشک راکتور) تا $1/6 e 7 Sv$ (با احتساب ۲/۵ ساعت پرتودهی در توان نامی سایت داخلی راکتور، که این میزان می‌تواند در چندین بار روشن کردن راکتور تا میزان بالاتری افزایش یابد) دست یافت.

کلید واژه: راکتور مینیاتوری، دزیومتر نوترون، چشمه نوترون کالیبره، سایت پرتودهی، کانال خشک.

مقدمه

دزیمتری فردی و محیطی نوترون‌ها به دلیل تولید ذرات باردار مختلف در ماده توسط نوترون‌ها و مخلوط بودن آنها با پرتوها گاما با دشواری همراه است [۱]. در ایران دزیمتری فردی نوترون‌های سریع توسط دزیومتر TLD و دز حرارتی توسط دزیومتر "نوترایران" و فیلم‌های رادیوگرافی تعیین می‌شود. به منظور کالیبره کردن هر یک از دزیومترهای نوترونی نیاز به یک چشمه نوترونی می‌باشد. منشأ تولید نوترون‌ها رادیوایزوتوپ‌هایی مانند $^{241}Am-Be$ و ^{252}Cf و شتابدهنده‌ها هستند. همچنین می‌توان از بیم‌های راکتور به عنوان چشمه نوترون استفاده کرد. راکتور مینیاتوری چشمه نوترون^۱ MNSR مجهز به پنج سایت داخلی، پنج سایت خارجی و یک کانال خشک می‌باشد. بنابراین می‌توان از راکتور مینیاتوری به عنوان چشمه پایدار نوترون جهت کالیبره دزیومتر و آشکارسازهای نوترونی استفاده نمود. راکتور مینیاتوری اصفهان به خاطر ایمنی ذاتی، حفاظ آب سبک، نسبت شار به توان بالا، آزاد کردن مواد رادیواکتیو کم و ایجاد شار نوترون پایدار در کل جهان مورد قبول است. راکتور مینیاتوری، یک راکتور از نوع تانک استخری با قدرت ۳۰ kW و ایمنی ذاتی است. قلب این راکتور حاوی ۳۴۳ میله سوخت می‌باشد و اطراف آن را برلیوم به عنوان بازتابنده فرا گرفته است. میله کنترل از جنس کادمیوم با پوشش استیل در مرکز قلب قرار دارد. راکتیویته مازاد حالت سرد بین ۳/۵ تا ۴ mk می‌باشد و می‌توان روزانه

¹ Miniature Neutron Source Reactor

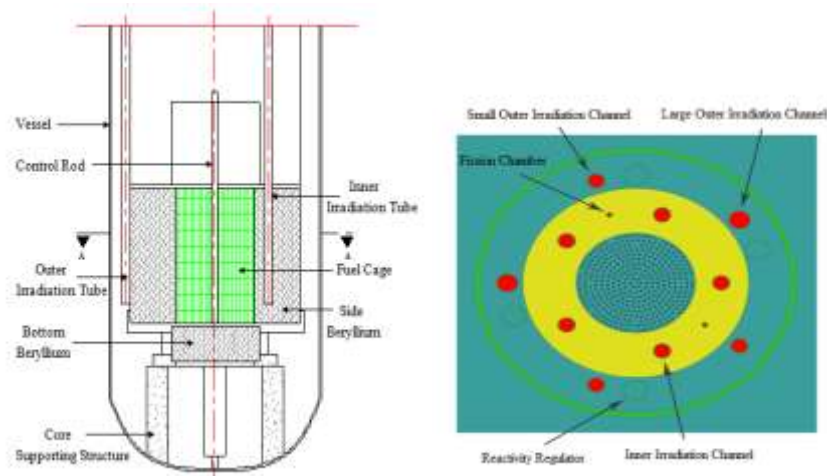
به مدت ۲/۵ ساعت از حداکثر شار حرارتی در سایت‌های داخلی $10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ بهره‌برداری نمود [۲-۷]. هدف از این مطالعه امکان سنجی استفاده از راکتور مینیاتوری به عنوان چشمه پایدار نوترون جهت کالیبراسیون دزیمتر نوترونی می‌باشد. در این راستا میزان دز نوترون در گروه‌های انرژی مختلف در سایت‌های پرتودهی و کانال خشک با استفاده از کد MCNP محاسبه گردید.

روش کار

در یک راکتور می‌توان از بیم‌های آن به عنوان چشمه نوترون استفاده کرد. شار نوترون در سایت‌های پرتودهی و کانال خشک پایدار و کاملاً یکنواخت است، به صورتیکه غیر یکنواختی شار کمتر از ۳٪ می‌باشد [۴]. همچنین شار نوترون در عبور از کانال خشک به ارتفاع حدود ۵۰۰ سانتیمتر، در محل خروجی به صورت یک بیم نوترونی کاملاً موازی شده، یکنواخت و پایدار است. این نوع خصوصیت شار در مقابل شار نوترونی چشمه‌های رادیوایزوتوپی که به صورت همسانگرد و غیر موازی در تمام جهات تابش می‌کنند، باعث شده است که راکتور مینیاتوری به عنوان یک چشمه پایدار برای کالیبراسیون دزیمترهای نوترونی بر تمام چشمه‌های نوترونی برتری یابد. هدف از این مطالعه محاسبه دز نوترون توسط کد MCNP در سه کانال ذکر شده، به منظور استفاده در کالیبراسیون دزیمترهای نوترونی است.

راکتور مینیاتوری چشمه نوترون

قلب راکتور مینیاتوری چشمه نوترون اصفهان به شکل استوانه‌ای با ارتفاع و قطر ۲۳ سانتی متر، مشتمل بر ۳۴۳ میله سوخت از جنس UAl_4 با غنای ۹۰/۲٪ و ارتفاع ۲۳ سانتی متر و ضخامت ۰/۴ سانتی متر می‌باشد. قلب این راکتور توسط بازتابنده نوترونی از جنس برلیوم، در اطراف و بالا و پایین قلب، احاطه شده است. در شکل ۱ نمای کلی راکتور MNSR نمایش داده شده است [۲-۷].



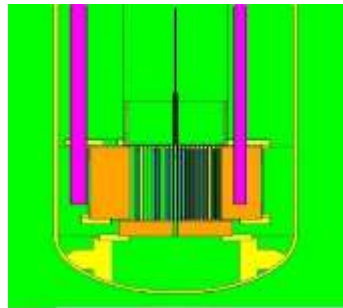
(الف)

(ب)

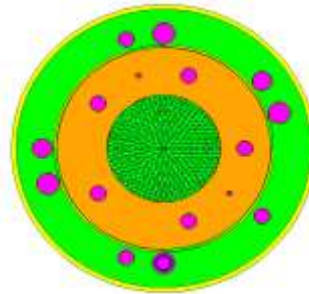
شکل ۱. نمای راکتور MNSR (الف) نمای جانبی (ب) نمای فوقانی

محاسبات و شبیه سازی توسط کد MCNP

برای اعتبارسنجی از مدل شبیه سازی شده از قلب راکتور با کد MCNP، ابتدا شار در سایت های داخلی و خارجی، همچنین ضریب تکثیر موثر و ارزش میله کنترل برای سوخت تازه در حالت سرد و بدون زینان محاسبه و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شد. در هر شبیه سازی از ۲۰ سیکل غیرفعال و ۲۰۰ سیکل فعال با یک میلیون ذره استفاده شد. شبیه سازی ها در دمای ۱۵ درجه ی سانتی گراد انجام شد. نمای فوقانی و جانبی راکتور مینیاتوری اصفهان شبیه سازی شده توسط کد MCNP در شکل ۲ نمایش داده شده است. محاسبات بحرانیات راکتور با استفاده از کارت KCODE انجام شد.



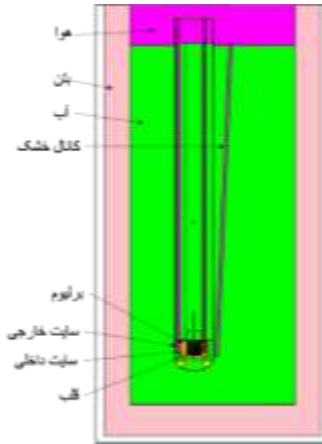
(ب)



(الف)

شکل ۲. نمای راکتور MNSR اصفهان، (الف) نمای فوقانی، (ب) نمای جانبی

در ادامه کار پس از اعتبارسنجی کد محاسباتی MCNP، مقدار دز نوترون در گروه های مختلف انرژی با استفاده از کد MCNP محاسبه گردید. همانگونه که در شکل ۳ پیداست این مدل شامل کلیه اجزای راکتور شامل استخر، تانک، اجزای داخلی تانک، سایت های پرتو دهی و کانال خشک می باشد. کانال خشک راکتور در واقع یک لوله آلومینیومی است که خارج از تانک راکتور و داخل استخر راکتور به گونه ای قرار می گیرد که انتهای بسته آن در مجاورت قلب و انتهای باز آن بالای سطح آب استخر قرار می گیرد. کانال خشک در واقع مانند یک ستون هوا در میان آب استخر است که اجازه ترابرد نوترون و گاما به خارج از حفاظ راکتور را برای برخی آزمایشات می دهد. طول کانال خشک در حدود ۵۰۰ cm و قطر آن در حدود ۵ cm است.



شکل ۳. مدل سه بعدی MCNP از راکتور MNSR شامل سایت های پرتودهی و کانال خشک

نتایج

ضریب تکثیر موثر و ارزش میله کنترل برای سوخت تازه در حالت سرد و بدون زینان محاسبه و با مقادیر آزمایشگاهی طبق جدول ۱ مقایسه شده است.

جدول ۱. اعتبارسنجی شبیه‌سازی راکتور مینیاتوری اصفهان توسط کد MCNP

ضریب تکثیر	ارزش میله کنترل	شار سایت داخلی	شار سایت خارجی	نتایج آزمایشگاهی
۱/۰۰۳۸۵	-۷ mk	۱/۰۰e+۱۲	۵/۰۰e+۱۱	
۱/۰۰۳۹۴	-۷/۰۴ mk	۱/۰۳e+۱۲	۵/۱۲e+۱۱	MCNP
۰/۰۰۹	۰/۵۷	۳	۲/۴	خطای نسبی (%)

از مقایسه خطاهای نسبی می‌توان نتیجه گرفت، که نتایج حاصل از شبیه‌سازی در تطابق خوبی با نتایج تجربی بوده و کد MCNP به کار رفته در شبیه‌سازی راکتور صحیح است.

میزان دز نوترون حرارتی در توان ۳۰ کیلووات، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی در گروه‌های انرژی مختلف در سایت پرتودهی داخلی، خارجی، در پایین و محل خروجی کانال خشک مطابق جدول ۲ محاسبه گردید.

جدول ۲. میزان دز نوترون در توان ۳۰ کیلووات در گروه‌های انرژی حرارتی، با استفاده از کد MCNP

گروه انرژی (eV)	دز نوترون در سایت داخلی (Sv/h)	دز نوترون در سایت خارجی (Sv/h)	دز نوترون در سایت کانال خشک (Sv/h)	دز نوترون در پایین کانال خشک (Sv/h)	دز نوترون در محل خروجی کانال خشک (Sv/h)
۰-۰/۰۲۵	۸/۵۷E+۰۳	۵/۵۴ E +۰۳	۴/۹۵ E +۰۲	۱/۴۰ E -۰۳	
۰/۰۲۵-۰/۱	۲/۵۳ E +۰۴	۱/۴۳ E +۰۴	۱/۲۸ E +۰۳	۳/۷۸ E -۰۳	



۶/۸۵ E -۰۴ ۲/۶۵ E +۰۲ ۳/۳۵ E +۰۳ ۹/۰۱ E +۰۳ ۰/۱ -۰/۶۲۵

میزان دز نوترون فوق حرارتی در توان ۳۰ کیلووات مطابق جدول ۳، با استفاده از نتایج شبیه سازی در گروه‌های انرژی مختلف در درون سایت پرتودهی داخلی، خارجی، در پایین و محل خروجی کانال خشک محاسبه گردید.

جدول ۳. میزان دز نوترون در توان ۳۰ کیلووات در گروه‌های انرژی فوق حرارتی، با استفاده از کد MCNP

گروه انرژی (keV)	دز نوترون در سایت داخلی (Sv/h)	دز نوترون در سایت خارجی (Sv/h)	دز نوترون در پایین کانال خشک (Sv/h)	دز نوترون در محل خروجی کانال خشک (Sv/h)
۰/۰-۰۰۰۶۲۵/۰۰۱	۱/۱۸E+۰۳	۲/۳۷E+۰۲	۱/۴۱E+۰۲	۳/۰۹E-۰۵
۰/۰-۰۰۱/۰۱	۵/۸۵E+۰۳	۱/۱۳E+۰۳	۵/۳۱E+۰۱	۹/۱۰E-۰۵
۰/۰۱ -۰/۱	۵/۸۸E+۰۳	۱/۰۰E+۰۳	۴/۷۵E+۰۱	۱/۱۰E-۰۴
۰/۱ -۱	۵/۹۵E+۰۳	۸/۵۷E+۰۲	۳/۸۴E+۰۱	۶/۹۴E-۰۵
۱ -۱۰	۶/۳۶E+۰۳	۷/۳۵E+۰۲	۳/۴۵E+۰۱	۷/۴۰E-۰۵

میزان دز نوترون سریع در توان ۳۰ کیلووات، با استفاده از نتایج شبیه سازی در گروه‌های انرژی مختلف در درون سایت پرتودهی داخلی، خارجی، در پایین و محل خروجی کانال خشک محاسبه گردید، که در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴. میزان دز نوترون در توان ۳۰ کیلووات در گروه‌های انرژی سریع، با استفاده از کد MCNP

گروه انرژی (MeV)	دز نوترون در سایت داخلی (Sv/h)	دز نوترون در سایت خارجی (Sv/h)	دز نوترون در پایین کانال خشک (Sv/h)	دز نوترون در محل خروجی کانال خشک (Sv/h)
۰/۰۱ -۰/۱	۲/۳۱E+۰۴	۲/۱۵E+۰۳	۱/۰۹E+۰۲	۲/۴۱E-۰۴
۰/۱ -۰/۵	۱/۱۵E+۰۵	۱/۰۹E+۰۴	۶/۰۶E+۰۲	۱/۳۶E-۰۳
۰/۵ - ۱	۱/۲۳E+۰۵	۱/۳۸E+۰۴	۱/۰۶E+۰۳	۱/۵۹E-۰۳
۱ - ۲/۵	۲/۰۶E+۰۵	۲/۶۱E+۰۴	۲/۲۸E+۰۳	۲/۳۴E-۰۳
۲/۵ - ۵	۷/۰۷E+۰۴	۸/۸۳E+۰۳	۱/۲۹E+۰۳	۶/۴۵E-۰۴
۵ - ۷	۱/۴۶E+۰۴	۲/۴۳E+۰۳	۳/۹۲E+۰۲	۲/۷۸E-۰۴
۷ - ۱۰	۴/۰۲E+۰۳	۶/۸۱E+۰۲	۱/۲۶E+۰۲	۱/۹۸E-۰۵
۱۰ - ۱۴	۴/۸۱E+۰۲	۹/۲۴E+۰۱	۱/۸۷E+۰۱	۸/۹۷E-۰۳
۱۴ - ۲۰	۵/۱۲E+۰۱	۳/۹۸E+۰۰	۳/۷۱E+۰۰	۱/۳۴E-۰۱



میزان دز نوترون مطابق جدول ۵، با استفاده از نتایج شبیه سازی در گروه های انرژی حرارتی، فوق حرارتی، سریع و کل در درون سایت پرتودهی داخلی، خارجی، در پایین و محل خروجی کانال خشک محاسبه گردید.

جدول ۵. میزان دز نوترون حرارتی، فوق حرارتی، سریع و کل در توان ۳۰ کیلووات، با استفاده از نتایج کد MCNP

گروه انرژی	دز نوترون در سایت داخلی (Sv/h)	دز نوترون در سایت خارجی (Sv/h)	دز نوترون در پایین کانال خشک (Sv/h)	دز نوترون در محل خروجی کانال خشک (Sv/h)
حرارتی	$4/28E+04$	$2/34E+04$	$2/04E+03$	$5/87E-03$
فوق حرارتی	$2/52E+04$	$3/73E+03$	$1/88E+02$	$3/75E-04$
سریع	$5/56E+05$	$6/49E+04$	$5/88E+03$	$6/47E-03$
کل	$6/24E+05$	$9/20E+04$	$8/11E+03$	$1/27E-02$

با توجه به نتایج فوق، می توان با انتخاب دو فاکتور زمان پرتودهی و توان به دز نوترون با گستره $3/53 \mu Sv$ (با احتساب ۱ ثانیه پرتودهی در توان ۳۰ وات در بالای کانال خشک راکتور) تا $1/56E6 Sv$ (با احتساب ۲/۵ ساعت پرتودهی در توان نامی سایت داخلی راکتور، که این میزان می تواند در چندین بار روشن کردن راکتور تا میزان بالاتری افزایش یابد) دست یافت.

بحث و نتیجه گیری

شار نوترون در عبور از کانال خشک تعبیه شده در استخر آب به ارتفاع حدود ۵۰۰ سانتیمتر، در محل خروجی به صورت یک باریکه نوترونی کاملا موازی شده، یکنواخت و پایدار است. این نوع خصوصیت شار در مقابل شار نوترونی چشمه های رادیوایزوتوپی که به صورت همسانگرد و غیر موازی در تمام جهات تابش می کنند، باعث شده است که راکتور مینیاتوری به عنوان یک چشمه پایدار با قدرت مناسب و قابل کنترل برای کالیبراسیون دزیمترهای نوترونی بر تمام چشمه های نوترونی برتری یابد. با توجه به نتایج بدست آمده، با انتخاب دو فاکتور زمان پرتودهی و توان راکتور می توان به دز نوترون با گستره $3/53 \mu Sv$ (با احتساب ۱ ثانیه پرتودهی در توان ۳۰ وات در بالای کانال خشک راکتور) تا $1/56E6 Sv$ (با احتساب ۲/۵ ساعت پرتودهی در توان نامی سایت داخلی راکتور، که این میزان می تواند در چندین بار روشن کردن راکتور تا میزان بالاتری افزایش یابد) دست یافت.

بنابراین راکتور مینیاتوری می تواند با رنج وسیعی از شار نوترون در انرژی های مختلف را به عنوان یک چشمه نوترون پایدار و یکنواخت برای کالیبراسیون دزیمترهای نوترون معرفی کرد.

مراجع

1. Neutron dosimetry for biology and medicine, ICRU report 26, 1978.



2. T Daozhu, Iran Miniature Reactor Pure Water Production System, China Institute of Atomic Energy, 1990.
3. G Jijin, General Description of Miniature Neutron Source Reactor, China Institute of Atomic Energy, 1990.
4. Safety Analysis Report, Esfahan Miniature Neutron Source Reactor (MNSR), Nstri-Dr-04-Sar-02, Reactor School, 2014.
5. Mokhtari, J., Faghihi, F., Khorsandi, J., & Hadad, K. 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, 70-77, 2017.
6. Mokhtari, J., Faghihi, F., Khorsandi, J., & Hadad, K., 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, 70-77, 2017.
7. Dastjerdi, M. C., Mokhtari, J., Asgari, A., & Ghahremani, E. A neutron radiography beamline relying on the Isfahan Miniature Neutron Source Reactor. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 928, 20-25, 2019.