

بررسی اثر ضخامت اجزای یک آشکارساز نوترونی خود-تغذیه (SPND) بر میزان حساسیت

آن با استفاده از کد MCNPX

INC29-1247

علی عادل‌ی احمدآبادی*، مجید خرسندی

گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران - ایران

چکیده:

یکی از آشکارسازهای مورد استفاده در مکانی که شار بالای نوترونی وجود دارد مانند قلب راکتور، آشکارسازهای نوترونی خود تغذیه (SPNDها) هستند. ویژگی این آشکارسازها عدم نیاز به منبع تغذیه، ساختار ساده و مقاوم در برابر تابش، اندازه نسبتاً کوچک، مقاومت خوب در شرایط دما و فشار بالا و مقاومت زیاد در برابر آسیب پرتویی، اشاره کرد. به علت وجود گوناگون SPND ها تحقیقات برای انتخاب بهترین نوع از آن‌ها و به دست آوردن ابعاد بهینه ادامه دارد. یکی از پارامترهای مورد محاسبه برای SPND ها حساسیت است به طوری که حساسیت بیشتر به معنای عملکرد بهتر برای SPND مورد نظر است. در این تحقیق با استفاده از کد مونت کارلوی MCNP اثر تغییر ضخامت اجزای SPND بر حساسیت آشکارساز بررسی شده است و نتایج به دست آمده در مقایسه با نتایج دو مرجع مختلف مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده برای مقدار بهینه برای SPND رودیومی به این صورت است که هرچه شعاع گسیلنده بیشتر باشد، ضخامت عایق کمتر و طول SPND بیشتر باشد بهتر است. همچنین ضخامت جمع کننده تأثیر چندانی بر مقدار حساسیت ندارد.

کلیدواژه‌ها: آشکارساز نوترونی خود تغذیه، جذب نوترون، کد MCNPX، گسیلنده رودیومی، گسیلنده وانادیومی

Investigation on the Effect of Components' Thickness of a Self-Powered Neutron Detector (SPND) using MCNPX code

Ali Adeli Ahmadabadi*, Majid Khorsandi

Department of Radiation Application, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

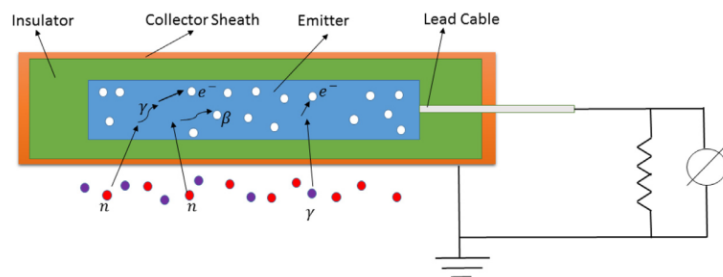
Abstract:

Self-powered neutron detectors (SPNDs) are used devices that used in regions with a high neutron flux, such as the reactor core. The characteristics of these detectors are that they do not require a power supply, simple and radiation-resistant structure, relatively small size, good resistance in conditions high temperature and pressure and high resistance to radiation damage. Because of the variety of SPNDs, research is ongoing to determine the appropriate type and optimal collection. Sensitivity is one of the parameters that is calculated for SPNDs so that more sensitivity means better detector performance. In this work, MCNPX Monte Carlo code was used to evaluate the effect of varying the thickness of SPND's components on the sensitivity and the results have been validated by comparing with literatures. The results obtained for the optimal value for rhodium SPND are that the larger the emitter radius, the smaller the insulation thickness and the longer the SPND length, the better. Also, the thickness of the collector does not have much effect on the sensitivity value.

Keywords: SPND, Neutron Capture, MCNPX code, Rhodium emitter, Vanadium emitter.

۱. مقدمه

بیش از بیست و پنج سال است که از آشکارسازهای نوترونی خود-تغذیه (SPND) به عنوان حسگرهای پایش شار نوترون در داخل قلب راکتورهای هسته‌ای آب سبک، آب سنگین و گرافیتی استفاده می‌شوند. یکی از پارامترهای مهم در انتخاب آشکارسازهای خود تغذیه نوع گسیلنده^۱ به کاررفته در آن‌هاست، زیرا پاسخ زمانی مناسب و حساسیت به تابش، به جنس ماده گسیلنده بستگی دارد. از جمله مزیت‌های این آشکارسازها می‌توان به عدم نیاز به منبع تغذیه، ساختار ساده و مقاوم در برابر تابش، اندازه نسبتاً کوچک برای استفاده در قلب راکتور، مقاومت خوب در شرایط دما و فشار بالا و مقاومت زیاد در برابر آسیب پرتویی، اشاره کرد. با این وجود مواردی مانند پایین بودن سطح سیگنال جریان خروجی تولیدشده، میزان پس‌زمینه بالا و پاسخ زمانی کند (برای برخی از گسیلنده‌ها) از محدودیت‌های SPND ها بشمار می‌روند. انواع مواد گسیلنده رایج در SPND ها شامل رودیم، وانادیم، کبالت، هافنیوم، پلاتین و نقره است. از آنجایی که این عناصر دارای دمای ذوب و سطح مقطع نسبتاً بالا با نوترون‌های حرارتی هستند، در SPND استفاده می‌شوند. شکل ۱ برهم‌کنش نوترون با گسیلنده و تولید ذرات ثانویه احتمالی را نشان می‌دهد [۱].



شکل ۱. برهم‌کنش‌های حاصل از نوترون با گسیلنده و ذرات ایجادشده [۲].

یکی از تحقیقات در مورد SPND، مطالعه بر روی ضخامت اجزای این آشکارساز است. سقفی و همکاران [۳] در مقاله‌ای، پارامترهای SPND نقره را بررسی کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از کد MCNP و روش محاسباتی پارامترهای بهینه را به دست آوردند و سپس با آزمایش تجربی نتایج را اعتبارسنجی نموده‌اند. ضخامت گسیلنده و ارتفاع گزارش شده توسط آن‌ها به ترتیب برابر با ۶۰۰ μm و ۱۰ cm است در حالی که ضخامت عایق را برابر با ۷۵ nm، مقاومت آن ۳۰۰ kΩ و ضخامت جمع کننده را نیز ۴۰۰ μm به دست آورده‌اند.

در مقاله‌ی ژانگ^۲ و همکاران [۴]، شرایط بهینه برای SPND رودیمی با استفاده از کد Geant4 بررسی و اندازه‌گیری شده است. آن‌ها برای مقادیر ثابت از جدول ۱ استفاده کردند. ژانگ با توجه به نتایج به دست آمده برای حساسیت، مقدار بهینه نسبت به حساسیت را این گونه بیان کرد که هرچه شعاع گسیلنده بیشتر، ضخامت عایق کمتر و طول SPND بیشتر باشد، بهتر است. آن‌ها همچنین نشان دادند که ضخامت جمع کننده تأثیر چندانی ندارد. علاوه بر این، آن‌ها نرخ جریان سریع را برای هر پارامتر نیز مورد بررسی قرار دادند که در نهایت برای SPND رودیمی، شعاع بهینه گسیلنده ۱/۲ mm، ضخامت عایق ۲/۲ mm، ضخامت جمع کننده ۰/۲۵ mm و طول SPND ۴۰ cm گزارش شده است.

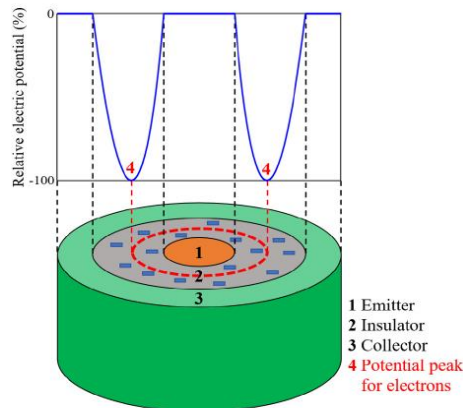
جدول ۱. مواد و ساختار آشکارساز SPND

مؤلفه‌های آشکارساز	مواد	چگالی (g/cm ³)	شعاع خارجی (cm)	طول (cm)
گسیلنده	رودیم (Rh)	۱۲/۴	۰/۰۲۳	۴۰
عایق	آلومینا	۳/۵۶۹	۰/۰۵۳۵	۴۰
جمع کننده	اینکونل-۶۰۰	۸/۴۴	۰/۰۷۸۵	۴۰

۱. Emitter

۲. Qingmin Zhang

در پژوهشی دیگر، کویی^۱ و همکارانش [۵] با شبیه‌سازی یک SPND، مقدار حساسیت آن را برای گسیلنده‌های وانادیمی و رودیمی (V و Rh) به دست آوردند. نتایج آن‌ها تطابق خوب حساسیت به دست‌آمده با مقادیر عملی را نشان می‌داد. شکل ۲ هندسه آشکارساز طراحی شده توسط کویی و همکارانش را نشان می‌دهد که در آن استوانه‌های شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب گسیلنده، عایق و جمع‌کننده هستند. هدف از پژوهش حاضر، بهینه‌سازی ضخامت اجزای SPND با استفاده از شبیه‌سازی با کد مونت کارلو MCNP و محاسبه مقادیر آن‌هاست.



شکل ۲. نسبت پتانسیل الکتریکی در مکان‌های مختلف از آشکارساز

۲. روش کار

یکی از پارامترهای مورد محاسبه برای SPND ها حساسیت می‌باشد. هرچه حساسیت بیشتر باشد، SPND مورد استفاده از عملکرد بهتری برخوردار است. با استفاده از کد MCNPX می‌توان جذب نوترون در سیم گسیلنده را محاسبه کرد تا میزان بتاهای تولید شده به دست آید. همچنین می‌توان ترابرد ذرات بتا را انجام داده و در نتیجه میزان بتاهای رسیده به جمع‌کننده^۲ به دست می‌آید. تعداد بتاهای رسیده به جمع‌کننده متناسب با جریان ($I = nq$) است. حساسیت ماده مورد نظر با توجه به معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$S = \frac{I}{\phi_0 \times L} \quad (1)$$

در معادله (۱)، ϕ_0 شار نوترون‌های حرارتی اطراف آشکارساز و L طول آشکارساز هست. با طراحی هندسه آشکارساز و گرفتن تالی‌های مناسب می‌توان مقدار حساسیت را به دست آورد.

۳. شبیه‌سازی SPND

در این مقاله شبیه‌سازی توسط کد MCNPX انجام شده است. تعریف مواد در شبیه‌سازی با توجه به داده‌های مرجع [۶] انجام شد. در این شبیه‌سازی ابتدا میزان جذب نوترون در گسیلنده محاسبه شد و سپس در مکان گسیلنده، چشمه بتا تعریف گردید. در نهایت میزان بتاهای رسیده به جمع‌کننده محاسبه شد.

۳.۱. شبیه‌سازی جذب نوترون

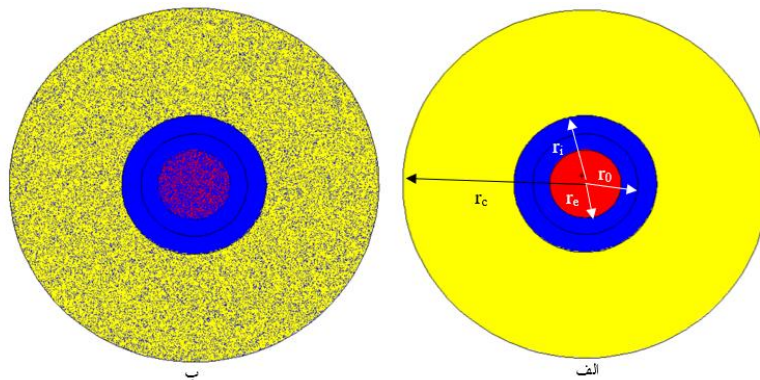
چشمه نوترون به صورت چشمه صفحه‌ای که محاط به SPND است، در شبیه‌سازی تعریف شد به طوری که صفحه جانبی استوانه جمع‌کننده نیز به عنوان چشمه در نظر گرفته شده است. انرژی نوترون حرارتی نیز برابر با 0.025 eV در نظر گرفته شد. چشمه شبیه‌سازی شده به صورت جهت‌دار و روبه‌داخل در نظر گرفته شده است لذا نتایج به دست‌آمده در تالی می‌بایست تقسیم بر ۲ گردد.

^۱. Tongyuan Cui

^۲. Collector

در مرجع [۵] مقدار شار کل نوترون‌ها و تعداد نوترون‌های جذب‌شده در گسیلنده و انادیمی به ترتیب $0.0614/cm^2$ و 0.0195 گزارش شده است. در شبیه‌سازی با گسیلنده و انادیمی با کد MCNP، مقدار شار با استفاده از تالی F4 در سلول گسیلنده و تعداد نوترون‌های جذب‌شده در واحد حجم با استفاده از تالی f4 و کارت m محاسبه شد. بدین ترتیب شار نوترون برابر با $0.000098/cm^2 \pm 0.05771/cm^2$ و میزان نوترون‌های جذب‌شده برابر با $2/92 \times 10^{-6}$ به دست آمد.

برای گسیلنده رودیمی نیز شار نوترون $7/31 \times 10^{-5}/cm^2 \pm 0.4302845/cm^2$ به دست آمد. تعداد نوترون‌های جذب‌شده نیز برابر با $6/27 \times 10^{-5} \pm 0.369$ محاسبه شد. نتایج به دست آمده در این پژوهش در مقایسه با نتایج مرجع [۵]، در جدول (۲) خلاصه شده است. شکل ۳ برش مقطعی از استوانه SPND را نشان می‌دهد که در آن شعاع گسیلنده، r_0 شعاع بحرانی، r_i شعاع عایق و r_e شعاع جمع کننده است. پس از اینکه نسبت جذب نوترون به شار آن محاسبه شد، میزان بتاهای رسیده به جمع کننده به دست می‌آید.



شکل ۳. الف) برش مقطعی از یک SPND ب) پخش نوترون در SPND.

۲.۲ شبیه‌سازی بتا

در این بخش، چشمه بتا طوری تعریف گردیده است که مکان چشمه در سلول گسیلنده و تابع انرژی آن باشد. برای محاسبه میزان بتاهای رسیده به جمع کننده از تالی F1 و کارت c استفاده شد. در شبیه‌سازی بتاهایی که از شعاع r_0 عبور کرده باشند، در شمارش بتاهای جمع کننده در نظر گرفته شده‌اند [۵]. به همین علت مقدار خالص الکترون‌های عبور کرده از سطح بیرونی استوانه با شعاع r_0 محاسبه شد. شعاع r_0 به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$r_0 = r_i \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{r_e}{r_i}\right)^2 - 1}{2 \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}} \quad (2)$$

که در آن شعاع گسیلنده و r_i شعاع عایق است. تعداد خالص بتاها با تعداد الکترون‌های عبور کرده از سطح r_0 منهای الکترون‌های برگشتی از آن سطح، برابر است. در مرجع [۵] نسبت الکترون‌های رسیده به جمع کننده برای SPND و انادیمی $57/32\%$ و برای رودیمی $33/71\%$ گزارش شده است.

در پژوهش حاضر نسبت الکترون‌های عبور کرده از سطح جانبی استوانه و انادیمی و رودیمی با شعاع r_0 به ترتیب برابر $3/6 \times 10^{-3} \pm 0.5595$ و $3/2 \times 10^{-3} \pm 0.3348$ به دست آمد که معادل $55/95\%$ و $33/48\%$ است. پارامتر دیگری که مورد بررسی قرار گرفت مقدار حساسیت SPND ها است. مقدار حساسیت با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد.

$$S = \frac{\epsilon_n \times e \times \epsilon_e}{L} \quad (3)$$

که در آن S حساسیت، ϵ_n نسبت جذب نوترون به شار نوترون، ϵ_e نسبت الکترون‌های رسیده به جمع کننده، e بار الکترون (c) 1.6×10^{-19} و L طول SPND (cm) ۴۰ می‌باشد.

در جدول ۲ نتایج به دست آمده در شبیه‌سازی‌های پژوهش حاضر با نتایج گزارش شده در مرجع [۵] مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، بیشینه اختلاف نتایج به دست آمده در این پژوهش در مقایسه با داده‌های مرجع [۵] در حدود ۱۲٪ است.

جدول ۲. مقایسه نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر با نتایج گزارش شده در مرجع [۵].

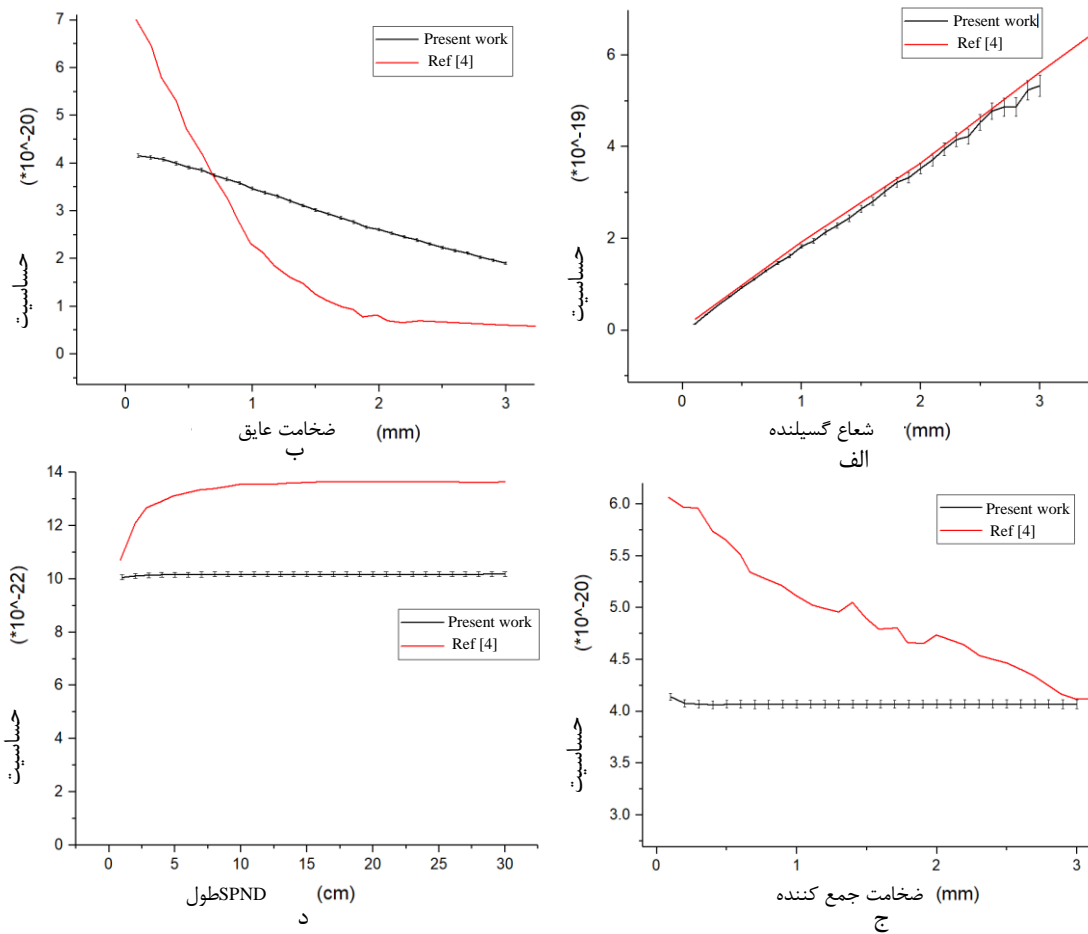
عناصر	مقادیر	شار نوترون (1/cm ²)	جذب نوترون	نسبت جذب نوترون (1/cm ²)	نسبت الکترون‌های رسیده (%)	مقدار حساسیت ($\times 10^{-22} A/nvcm$)
مرجع [۵]	۰/۰۶۱۴	۰/۰۰۱۹۵	۰/۰۳۱۸	۵۷/۳۲	۰/۷۴	
وانادیم	پژوهش حاضر	۰/۰۵۷۷۱	۰/۰۰۱۷۲	۰/۰۲۹۸	۵۵/۹۵	۰/۶۶۷
اختلاف نسبی	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۱۰	
مرجع [۵]	۰/۰۴۳۳	۰/۰۳۷۲	۰/۸۵۹	۳۳/۷۱	۱۱/۵۸	
رودیم	پژوهش حاضر	۰/۰۴۳	۰/۰۳۶۹	۰/۸۵۸	۳۳/۴۸	۱۱/۴۹
اختلاف نسبی	۰/۰۰۷	۰/۰۰۸	۰/۰۰۱	۰/۰۰۷	۰/۰۰۸	

۴. تغییر پارامتر

برای ساخت یک آشکارساز SPND به دست آوردن ابعاد بهینه ضروری است که این کار با تغییر پارامترهای SPND حاصل می‌شود. برای چگونگی تغییر پارامترها و همچنین ارزیابی پاسخ‌ها مرجع [۴] مورد استناد قرار گرفت. برای تغییر دادن پارامترها از مقادیر ثابت جدول ۱ استفاده شد. شعاع گسیلنده، ضخامت عایق و ضخامت جمع کننده از مقدار mm ۰/۱ تا mm ۳ با گام mm ۰/۱ تغییر داده شد. طول SPND از مقدار ۱ cm تا ۳۰ cm با گام ۱ cm تغییر داده شد. در شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی با تغییر شعاع گسیلنده، ضخامت عایق و جمع کننده با مرجع [۴] مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۴ قسمت (الف) تا (د) دیده می‌شود، با افزایش شعاع گسیلنده، حساسیت به صورت خطی افزایش پیدا کرده است، در حالی که با افزایش ضخامت عایق، حساسیت به صورت تابع $\frac{1}{x}$ کاهش می‌یابد. با افزایش ضخامت جمع کننده نیز حساسیت تقریباً ثابت و به مقدار جزئی کاهش می‌یابد. با افزایش طول SPND نیز در ابتدا مقدار حساسیت افزایش می‌یابد ولی برای طول بیشتر از ۱۰ cm تغییری در حساسیت ایجاد نمی‌شود و مقدار آن تقریباً ثابت می‌ماند.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله علاوه بر شبیه‌سازی SPND با گسیلنده رودیمی و وانادیمی، تغییر حساسیت SPND با تغییر پارامترهایی نظیر شعاع گسیلنده، ضخامت عایق و جمع کننده برای یک SPND با گسیلنده رودیمی نیز بررسی شد. نتایج نشان داده که حساسیت به صورت خطی با شعاع گسیلنده رابطه مستقیم و با ضخامت عایق رابطه معکوس دارد. اگرچه از مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مرجع [۴] اختلاف کمی مشاهده می‌گردد اما روند تغییرات در نمودار همخوانی دارد و اختلاف موجود می‌تواند ناشی از تفاوت‌های جزئی باشد که در شبیه‌سازی وجود داشته است. با این وجود، در عمل برای انتخاب یک SPND بهینه پارامترهای دیگری نظیر قیمت، طول عمر، قدرت سیگنال، نسبت سیگنال به نویز، سرعت پاسخ‌دهی و استفاده از مدار الکترونیک مناسب نیز مطرح است که در این پژوهش مدنظر نبوده است.



شکل ۴. تغییرات حساسیت نوترون به ازای تغییرات: الف) شعاع گسیلنده، ب) ضخامت عایق، ج) ضخامت جمع کننده، د) طول SPND در مقایسه با نتایج مرجع [۴].

۶. مراجع

- 1 Todt, W.H. *Characteristics of self-powered neutron detectors used in power reactors*. in *Proc. of a Specialists' Meeting on In-core Inst. and Reactor Core Assessment*, NEA Nuclear Science Committee. 1996.
- 2 Khoshahval, F., P. Zhang, and D. Lee, *Analysis and comparison of direct inversion and Kalman filter methods for self-powered neutron detector compensation*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020. 969: p. 164.۰۹۷
- 3 Saghafi, M., S.M. Ayyoubzadeh, and M.S. Terman, *Simulation, design optimization, and experimental validation of a silver SPND for neutron flux mapping in the Tehran MTR*. Nuclear Engineering and Technology, 2020. 52(12): p. 2852-2859.
- 4 Zhang, Q., et al., *Numerical optimization of rhodium self-powered neutron detector*. Annals of Nuclear Energy, 2018. 113: p. 519-525.
- 5 Cui, T., et al., *A Monte-Carlo simulation method for the study of self-powered neutron detectors*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020. 954: p. 161383.
- 6 McConn, R.J., et al., *Compendium of material composition data for radiation transport modeling*. 2011, Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).