

بهینه‌سازی آشکارساز خود-توان نوترونی رودیومی و وانادیومی به منظور بررسی تأثیر

هندسه و مواد ساختاری بر حساسیت نوترونی آن

INC29-1281

سالار سلیمی، زهرا مرادی، مجید خرسندی

گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران - ایران

چکیده:

آشکارسازهای خود-توان نوترونی (SPND) به طور وسیعی برای نظارت بر شار نوترون در راکتورها استفاده می‌شوند. سادگی ساختار و عملکرد از مهمترین ویژگی‌های آشکارسازهای خود-توان است. در این مطالعه SPND رودیوم و وانادیوم به عنوان گسیلنده‌های تأخیری با استفاده از ابزار مونت کارلو MCNPX مدل‌سازی شده است. در بررسی عملکرد SPND محاسبه میزان حساسیت نوترونی یک پارامتر تعیین‌کننده و کلیدی است که در این مطالعه وابستگی این پارامتر کلیدی به ابعاد و مواد آشکارساز مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش میزان حساسیت نوترونی برای گسیلنده‌های رودیوم و وانادیوم محاسبه شد که به ترتیب برابر با $10 \times 858/3 \text{ (A.cm}^2\text{.s)}^{-20}$ و $10 \times 123/2 \text{ (A.cm}^2\text{.s)}^{-21}$ بدست آمد. این بررسی در ارزیابی رفتار سایر SPND ها خصوصاً SPND های تأخیری کاربردی خواهد بود. نتایج کلی نشان داد که انتخاب شعاع بهینه گسیلنده و ضخامت عایق از منظر افزایش میزان اندرکنش‌های نوترونی در گسیلنده و تأثیر فزاینده بارفضایی در عایق مهم‌تر از سایر پارامترها نظیر ضخامت جمع‌کننده و طول SPND است.

کلیدواژه‌ها: آشکارسازهای نوترونی خود-توان، حساسیت نوترونی، گسیلنده، جمع‌کننده، عایق، شبیه‌سازی MCNPX

Optimizing Rhodium and Vanadium Self-Powered Neutron Detector to Investigate the Effect of Geometry and Structural Materials on its Neutron Sensitivity

S. Salimi, Z. Moradi, M. Khorsandi*

Radiation Application Department, Shahid Beheshti University, P.O.BOX: 1983963113 Tehran, Iran.

Abstract:

Self-powered neutron detectors (SPND) are widely used in reactors to monitor the neutron flux. Simplicity of structure and operation is one of the most important features of self-powered detectors. In this study Vanadium and Rhodium are simulated as delayed emitters using the MCNPX Monte Carlo tool. In the investigation of SPND performance, the calculation of neutron sensitivity is a main and key parameter. In this study, the dependence of this key parameter on detector dimensions and materials has been investigated. The neutron sensitivity of Rhodium and Vanadium's emitters is $3.858 \times 10^{-20} \text{ A.cm}^2\text{.s}$ and $2.123 \times 10^{-21} \text{ A.cm}^2\text{.s}$ respectively. This study will be useful in evaluating the behavior of other SPNDs, especially delayed SPNDs. Overall results showed that in terms of increased neutron's interaction within emitter and space charge effect in insulator, the selection of an optimized emitter radius and the insulator thickness is more important than other factors such as the collector thickness and the length of SPND.

Keywords: Self-powered Neutron Detectors, Neutron sensitivity, Emitter, Collector, Insulator, MCNPX simulation.

۱. مقدمه

مطالعه بر آشکارسازهای خود-توان نوترون از سال ۱۹۶۱ به‌عنوان ابزاری جهت اندازه‌گیری شار نوترون آغاز شده و به‌طور گسترده‌ای تا به امروز ادامه داشته است. در بین سال‌های ۱۹۶۱ تا ۱۹۸۱ بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌ها به‌صورت تحلیلی به بررسی عملکرد این نوع از آشکارساز اختصاص یافته است و مدل‌های محاسباتی نیز بر اساس عملکرد این نوع از آشکارساز ارائه شده است. این پژوهش‌ها شامل؛ بررسی میزان جذب و فرار الکترون از داخل گسیلنده، قطر گسیلنده، ماده‌ی گسیلنده، میزان مصرف گسیلنده، تأثیر بارفضایی ایجاد شده در عایق و مشخصات پاسخ آشکارساز، محاسبات میزان بار تولید شده در آشکارساز، بررسی شار نوترون فرودی بر آشکارساز و نهایتاً بررسی مشخصات عملیاتی آشکارساز تأخیری مانند آشکارسازهای رودیوم و وانادیوم و آشکارسازهای سریع مانند کبالت [1]. بخش دیگری از این مطالعات به‌طور گسترده بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۲ به بررسی نتایج به‌دست آمده از کدها و نرم‌افزارهای کاربردی در این زمینه می‌پردازد و معمولاً نتایج استخراجی با نتایج تجربی به‌دست آمده مقایسه می‌گردد. پژوهش‌های مرتبط با ساخت SPND و الکترونیک وابسته با آشکارساز نیز از همان ابتدا تا به حاضر برای هندسه‌های تخت و استوانه‌ای در ابعاد گوناگون انجام گرفته شده است.

یک مدل محاسباتی برای استفاده از آشکارسازهای خود-توان در راکتور بر اساس جذب نوترون در داخل گسیلنده و تولید هسته‌های بتا‌زا ارائه شده است. در این مدل تأثیر بارفضایی عایق، تغییرات شعاع گسیلنده و ضخامت عایق بر حساسیت نوترونی برای گسیلنده‌های مختلف مانند؛ رودیوم، وانادیوم و کادمیوم گزارش شده است و مقادیر محاسبه شده با نتایج تجربی مقایسه شده است [2]. مدل مونت کارلو دیگری که امکان محاسبات مربوط به هر دو نوع آشکارسازهای تأخیری و سریع را فراهم می‌سازد نیز ارائه شد که میزان حساسیت را برای آشکارسازهای رودیوم، وانادیوم و کبالت به ازای هندسه مشابه را فراهم می‌سازد [3]. پس از آن تحقیقات بسیاری باهدف بهبود دقت مدل پیشنهادی وارن (۱۹۷۱) با استفاده جزئی از شبیه‌سازی‌های مونت کارلو (MC) انجام شده است. لی و همکارانش در سال ۲۰۱۵ میزان حساسیت نوترونی را به‌عنوان نسبت جریان الکتریکی به شار نوترون با بهره‌گیری از روش MC محاسبه کردند [4]. با بهره‌گیری از ابزار مونت کارلو Geant4 نیز آشکارسازهای تأخیری مانند Rh، V، با ابعاد مختلف و آشکارسازهای سریع مانند Co و Hf شبیه‌سازی شده است، سپس وابستگی میزان حساسیت و جریان سریع نسبت به ابعاد آشکارساز به‌طور سیستماتیک مورد مطالعه قرار گرفته است و در نهایت، هندسه‌های SPND بهینه‌سازی شده است [5]. کویی و همکاران نیز در سال ۲۰۲۰ یک روش شبیه‌سازی برای پیش‌بینی عملکرد SPND ها تحت تأثیر پارامترهای مختلف آشکارساز پیشنهاد کردند که در مقایسه با روش‌های پیشنهاد شده توسط محققان در گذشته، این روش شامل فرآیندهای فیزیکی جامع‌تری است و می‌توان از آن برای تجزیه و تحلیل حساسیت و طول عمر یک آشکارساز عملی در شرایط واقعی راکتور استفاده کرد. مقایسه نتایج تحقیق با نتایج تجربی مقایسه شده دارای خطای نسبی کمتر از ۴ درصد است که بهتر از خطای نسبی بزرگ‌تر از ۹ درصد مربوط به تحقیقات گذشته است [6]. حساسیت نوترونی برای آشکارسازهای رودیوم، وانادیوم، هافنیوم و نقره با استفاده از کد مونت کارلو Geant4 نیز در سال ۲۰۲۱ توسط سانگ و همکاران محاسبه شده است [7]. در این مقاله میزان حساسیت نوترونی دو نوع از SPND های تأخیری، به‌عنوان یک پارامتر کلیدی در ارزیابی عملکرد این نوع از آشکارسازها محاسبه شد و وابستگی حساسیت نوترونی به نوع ماده و هندسه انتخابی SPND نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حساسیت نوترونی وابستگی شدیدی به نوع ماده گسیلنده، شعاع گسیلنده و ضخامت عایق دارد. علاوه بر این نتایج کلی نشان داد که انتخاب شعاع گسیلنده و ضخامت عایق از منظر افزایش میزان اندرکنش‌های نوترونی در گسیلنده و تأثیر فزاینده بارفضایی در عایق مهم‌تر از سایر ابعاد مانند ضخامت جمع‌کننده و طول SPND است.

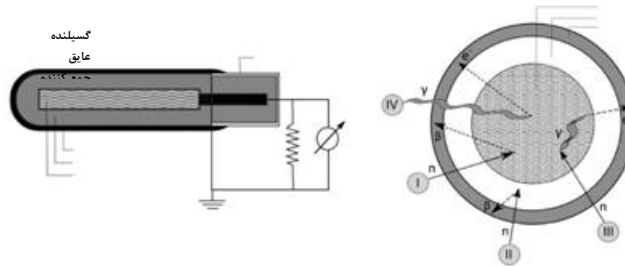
۲. روش کار

در این بخش عملکرد SPND های تأخیری و شیوه‌ی محاسبه میزان حساسیت نوترونی این نوع از آشکارسازها با استفاده از ابزار مونت کارلو MCNPX بحث خواهد شد.

۱.۲. اصول عملکرد SPND

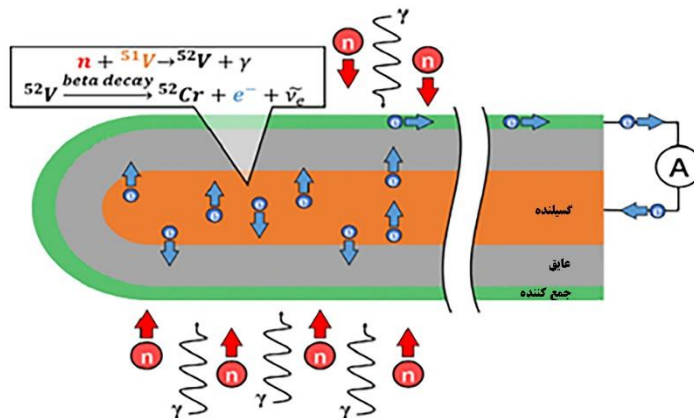
به‌طور معمول SPD به همان روشی ساخته می‌شود که کابل‌های کواکسیال ساخته می‌شوند. یک سیم نازک از مواد گسیلنده در یک تیوب از مواد جمع‌کننده قرار گرفته است. وقتی لایه‌ی گسیلنده در معرض نوترون یا فوتون قرار می‌گیرد الکترون ساطع می‌کند و بار مثبت بالایی به دست می‌آورد. ماده گسیلنده بسته به نوع آن به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که سطح مقطع بالایی در برهم‌کنش با نوترون‌ها یا فوتون‌ها داشته باشد. مواد مورد استفاده در لایه‌های بعدی مانند عایق و جمع‌کننده نیز در برخورد با نوترون ممکن است الکترون یا گاما تولید کنند، بنابراین در هر یک از لایه‌های مختلف امکان تولید الکترون وجود دارد [8]. شکل ۱ طرح‌هایی از SPND ها را با اتصال الکتریکی و برهم‌کنش‌هایی که منجر به گسیل الکترون می‌شود را نشان می‌دهد.

کابل کواکسیال



شکل ۱. اتصالات الکتریکی (سمت چپ) و برهم‌کنش‌های منجر به تولید جریان (سمت راست) [9]

یکی از این برهم‌کنش‌ها گسیل ذرات بتای منفی است که الکترون‌های پرانرژی را آزاد می‌کند. در این فرآیند واکنش جذب نوترون منجر به تشکیل یک دختر هسته رادیواکتیو می‌شود که بتای منفی گسیل می‌کند. سیگنال ناشی از این فرآیند نسبت به تغییر شار فرودی به سرعت تغییر نمی‌کند زیرا گسیل بتا دارای نیمه‌عمر است، بنابراین این نوع از SPND ها به‌عنوان SPND تأخیری شناخته می‌شود و رایج‌ترین نوع SPND ها هستند که در راکتورهای شکافت استفاده می‌شوند. Ag, V, Rh, نمونه‌ای از SPND های تأخیری هستند. شکل ۲ ساختار کلی یک نوع SPND تأخیری وانادیوم را نشان می‌دهد.



شکل ۲. ساختار پایه‌ای یک نوع SPND به همراه فرآیندهای جذب نوترون [6]

الکترون‌های پرانرژی به سمت جمع‌کننده حرکت کرده و بخشی از آن‌ها در جمع‌کننده جمع‌آوری می‌شوند. در ساختار آشکارساز یک عایق از جنس آلومینیوم اکسید و منیزیم اکسید به‌صورت فشرده بین گسیلنده و جمع‌کننده وجود دارد که به دلیل وجود ناخالصی در این عایق یا آسیب تابشی ناشی از قرار گرفتن در معرض شار بالای نوترون، تعدادی از الکترون‌ها در گذار از گسیلنده به جمع‌کننده داخل عایق به دام افتاده و یک میدان الکتریکی ناشی از بار ایجاد شده در

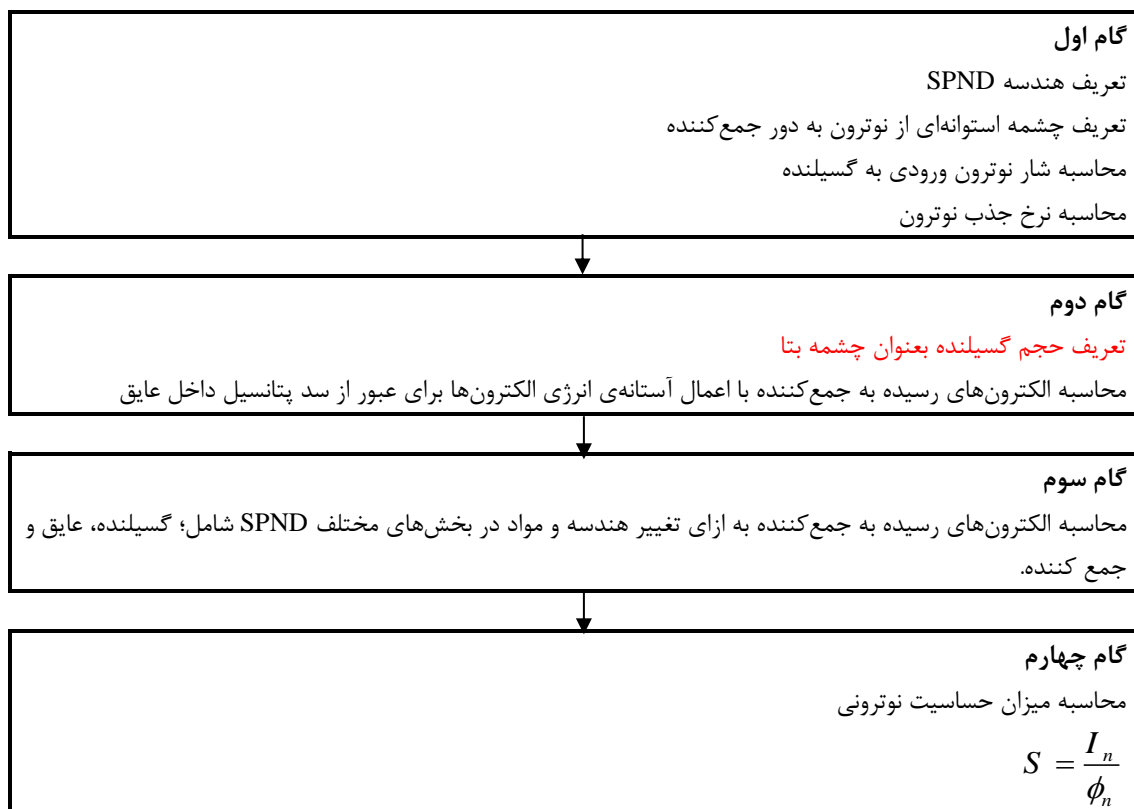
این قسمت به وجود می‌آید، بنابراین تنها الکترون‌هایی می‌توانند در جریان سهمیم باشند و خود را به جمع‌کننده برسانند که بتوانند از سد پتانسیل داخل عایق عبور کنند.

۲.۲. محاسبه میزان حساسیت

نسبت جریان الکتریکی خروجی به شار نوترون واردشده به گسیلنده را حساسیت SPND می‌نامند که از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود [10]:

$$S = \frac{I_n}{\phi_n} \quad (1)$$

که در آن S حساسیت نوترون، I_n جریان الکتریکی ناشی از برهم‌کنش‌های نوترونی و ϕ_n شار نوترون ورودی به گسیلنده. محاسبات حساسیت نوترونی در این مطالعه، مطابق هندسه شکل ۴، برای آشکارسازهای با گسیلنده رودیوم و وانادیوم با ابعاد و هندسه قرارگرفته در جدول ۱، توسط کد مونت‌کارلو MCNPX انجام شده است. شکل ۴ دیاگرام چگونگی محاسبه حساسیت نوترونی توسط MCNPX را نشان می‌دهد.

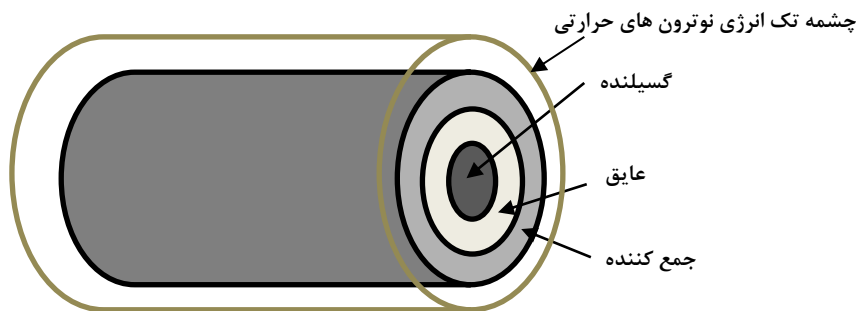


شکل ۳. دیاگرام محاسبه حساسیت نوترونی در SPND تأخیری.

پس از گیراندازی نوترون‌ها توسط الکتروده گسیلنده از جنس وانادیوم یا رودیوم، V^{51} تبدیل به V^{52} و Rh^{103} تبدیل به Rh^{104m} می‌شود که هر دو بتازا هستند. از آنجاییکه در کد MCNPX امکان تولید بتاهای ناشی از واکنش هسته‌ای جذب نوترون در ماده گسیلنده وجود ندارد لذا این فرآیند را باید با تعریف یک چشمه بتا در حجم الکتروده گسیلنده شبیه‌سازی نمود. طیف انرژی بتاهای گسیلی از V^{52} و Rh^{104} نیز بر اساس طرح واپاشی آنها تعریف شده است.

جدول ۱. ابعاد بخش‌های مختلف SPND رودیوم و وانادیوم.

طول SPND (mm)	جمع کننده		عایق		گسیلنده		نوع
	ضخامت (mm)	ماده	ضخامت (mm)	ماده	شعاع (mm)	ماده	
۴۰۰	۰/۲۵۰	اینکونل-۶۰۰	۰/۳۰۵	آلومینیوم اکسید	۰/۲۳۰	رودیوم	Rh
۴۰۰	۰/۲۵۰	فولاد ضدزنگ	۰/۳۰۵	آلومینیوم اکسید	۰/۲۳۰	رودیوم	Rh
۴۰۰	۰/۲۵۰	اینکونل-۶۰۰	۰/۳۰۵	منیزیم اکسید	۰/۲۳۰	رودیوم	Rh
۴۰۰	۰/۲۵۰	اینکونل-۶۰۰	۰/۳۰۵	آلومینیوم اکسید	۰/۲۳۰	وانادیوم	V
۴۰۰	۰/۲۵۰	فولاد ضدزنگ	۰/۳۰۵	آلومینیوم اکسید	۰/۲۳۰	وانادیوم	V
۴۰۰	۰/۲۵۰	اینکونل-۶۰۰	۰/۳۰۵	منیزیم اکسید	۰/۲۳۰	وانادیوم	V



شکل ۴- ساختار SPND شبیه‌سازی شده در این پژوهش.

میزان حساسیت برای هر دو نوع SPND رودیوم و وانادیوم بر اساس هندسه و ابعاد جدول ۱ و طبق دیاگرام شکل ۳ محاسبه شده است. به منظور اعتبارسنجی نتایج، مقادیر به دست آمده با نتایج مراجع [۵] و [۷] در جدول ۲ مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، حساسیت نوترونی محاسبه شده در این مطالعه در مقایسه با دیگر مراجع، دارای اختلاف قابل قبول بین ۲ تا ۴ درصد است.

جدول ۲- اعتبارسنجی نتایج به دست آمده برای حساسیت نوترونی در مقایسه با نتایج گزارش شده در مراجع [۵] و [۷]*

نوع	حساسیت نوترونی ناشی از واپاشی بتا (A.cm ² .s)		
	شبیه‌سازی انجام شده در این مطالعه	شبیه‌سازی انجام شده توسط دیگران	میزان اختلاف (%)
Rh	$3/858 \times 10^{-20}$	$3/91 \times 10^{-20}$	۱/۳
V	$6/577 \times 10^{-23}$	$6/65 \times 10^{-23}$	۱/۱

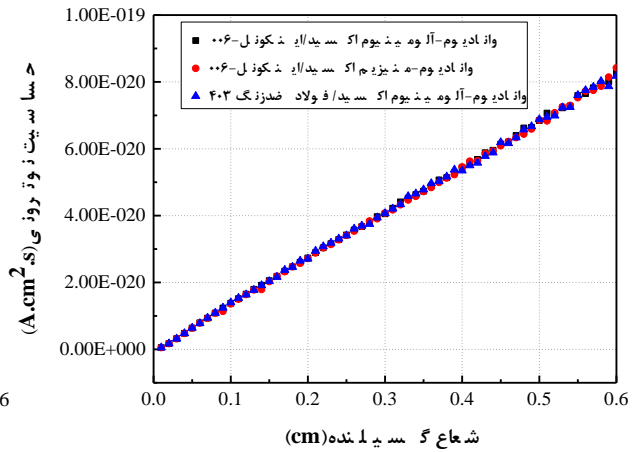
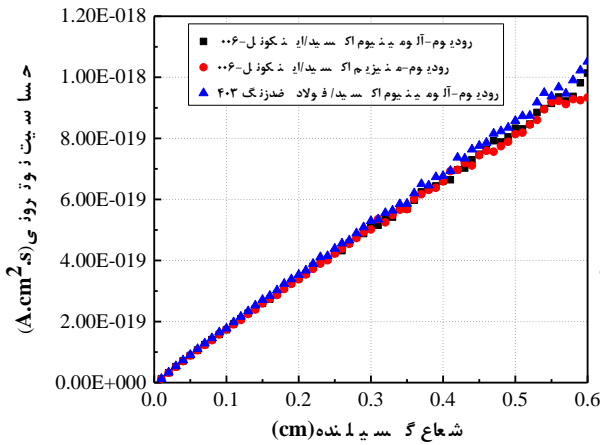
* شبیه‌سازی انجام شده برای محاسبه میزان حساسیت نوترونی بر اساس ابعاد و مواد انتخابی SPND رودیومی مطابق با مرجع [۵] و برای SPND وانادیومی مطابق با مرجع [۷] است.

۳. بررسی وابستگی حساسیت نوترونی SPND به هندسه و مواد

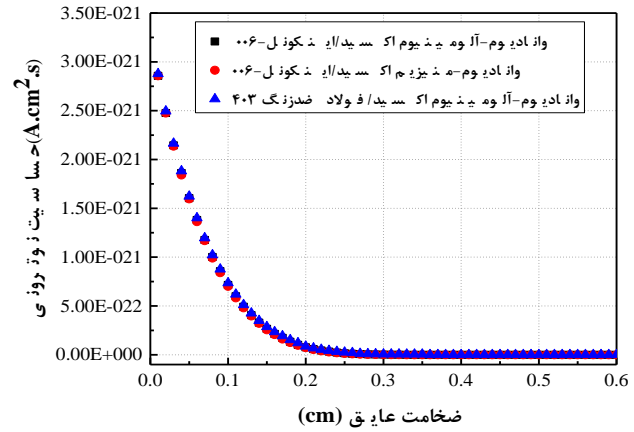
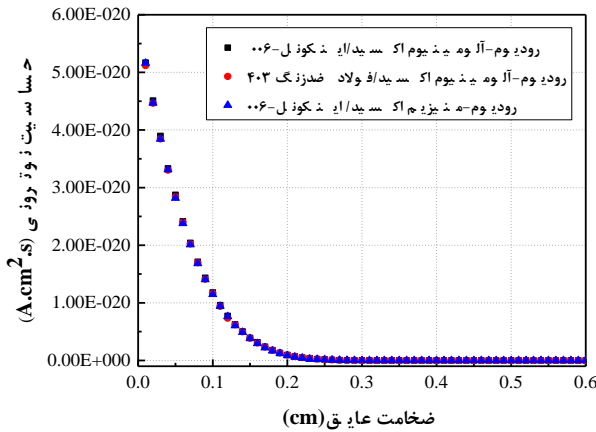
در این بخش وابستگی میزان حساسیت نوترونی برای دو نوع SPND رودیوم و وانادیوم بر اساس افزایش شعاع گسیلنده، افزایش ضخامت عایق و جمع کننده و نهایتاً تأثیر مواد عایق و جمع کننده به منظور بررسی و انتخاب پارامترهای تأثیرگذار بر میزان حساسیت نوترونی تحقیق شده است.

۱.۲. شعاع گسیلنده

شعاع گسیلنده از ۰/۰۱ سانتی‌متر تا ۰/۰۶ سانتی‌متر با گام ۰/۰۱ سانتی‌متر افزایش داده شده است. شکل ۵ روند سریع افزایشی را برای هر دو نوع گسیلنده رودیوم و وانادیوم نشان می‌دهد. افزایش شعاع گسیلنده با توجه به سطح مقطع



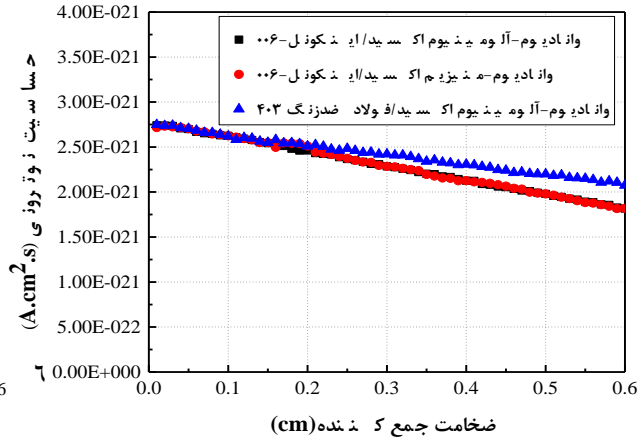
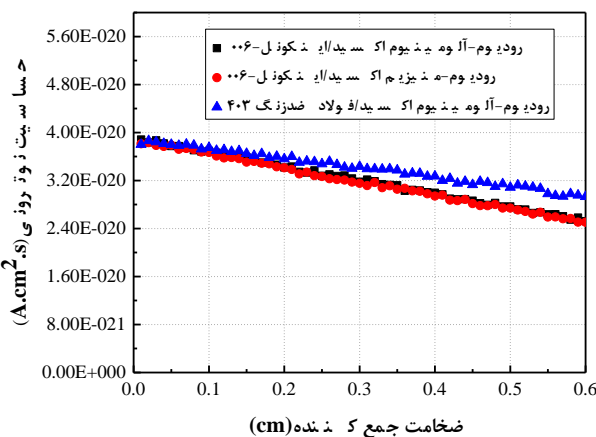
بالایی که معمولاً ماده گسیلنده در جذب نوترون و تبدیل به هسته‌های بتازا دارد منجر به افزایش میزان حساسیت



می‌شود. شکل ۵ علاوه بر اینکه روند افزایشی میزان حساسیت نوترونی با افزایش شعاع گسیلنده را نشان می‌دهد، شامل مقایسه‌ای برحسب تأثیر تغییر ماده عایق و جمع‌کننده در میزان حساسیت نوترونی نیز می‌شود. این مقایسه نشان می‌دهد که حساسیت نوترونی آشکارسازهای خود-توان نوترون بیش از هر پارامتر دیگری تابع ماده و ابعاد گسیلنده است. این وابستگی در شعاع‌های کوچک‌تر ماده گسیلنده کم‌تر و با افزایش شعاع و به دنبال آن افزایش شمار برهم‌کنش‌ها و ذرات تولیدی در شعاع‌های بزرگ‌تر ماده گسیلنده افزایش یافته است.

شکل ۵- تغییرات حساسیت نوترونی ناشی از واپاشی بتا برحسب افزایش شعاع گسیلنده به ازای دو نوع ماده عایق و جمع‌کننده برای گسیلنده رودیوم (سمت چپ) و وانادیوم (سمت راست).

شکل ۶- تغییرات حساسیت نوترونی ناشی از واپاشی بتا برحسب افزایش ضخامت عایق به ازای دو نوع ماده عایق و جمع‌کننده برای گسیلنده رودیوم (سمت چپ) و وانادیوم (سمت راست).



شکل ۷- تغییرات حساسیت نوترونی ناشی از واپاشی بتا برحسب افزایش ضخامت جمع‌کننده به ازای دو نوع ماده عایق و جمع‌کننده گسیلنده رودیوم (سمت چپ) و وانادیوم (سمت راست).

۲.۳. ضخامت عایق

برای ماده عایق، ضخامت از ۰/۰۱ تا ۰/۶ سانتی‌متر با گام ۰/۰۱ سانتی‌متر افزایش یافته است. شکل ۶ کاهش میزان حساسیت نوترونی را برای دو نوع SPND رودیوم و وانادیوم برحسب افزایش ضخامت عایق نشان می‌دهد. این کاهش در ضخامت‌های کوچک سریع‌تر و به میزان بیشتر و در ضخامت‌های بزرگ‌تر معمولاً ثابت است. در این مطالعه میزان حساسیت نوترونی به ازای ضخامت‌های بزرگ‌تر از ۰/۲۵ سانتی‌متر به صفر رسیده است. در واقع با افزایش ضخامت عایق تعداد بیشتری از الکترون‌های ثانویه ناشی از برهم‌کنش Rh-103 در عبور از عایق ازدست‌رفته و به دام می‌افتند و اثر بارفضایی نیز به شکل فزاینده‌ای افزایش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش ضخامت عایق به‌عنوان لایه بیرونی‌تر نسبت به گسیلنده، تعداد نوترونی‌های کمتری به گسیلنده رسیده و تعداد اندرکنش‌های نوترونی با گسیلنده و نرخ جذب و به دنبال آن نرخ الکترون‌های تولیدی نیز کاهش می‌یابد. این نمودار به‌منظور مقایسه میزان بستگی حساسیت نوترونی به ماده عایق و جمع‌کننده و تأثیرپذیری آن از افزایش ضخامت عایق نیز نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۶ حساسیت نوترونی و تغییرات آن برحسب افزایش ضخامت عایق وابستگی قوی به انتخاب ماده عایق و جمع‌کننده نخواهد داشت.

۳.۳. ضخامت جمع‌کننده

ضخامت جمع‌کننده نیز از ۰/۰۱ تا ۰/۶ سانتی‌متر با گام ۰/۰۱ سانتی‌متر افزایش یافت. شکل ۷ روند کاهش میزان حساسیت نوترون برحسب افزایش ضخامت جمع‌کننده را نشان می‌دهد. با افزایش ضخامت جمع‌کننده شار نوترون رسیده به گسیلنده کاهش می‌یابد بنابراین میزان حساسیت نوترونی نیز ناشی از تعداد اندرکنش‌های کمتری که اتفاق می‌افتد، کاهش می‌یابد. روند کاهش حساسیت نوترونی برحسب افزایش ضخامت جمع‌کننده در مقایسه با روند کاهش حساسیت نوترونی برحسب افزایش ضخامت عایق کندتر است. کند بودن روند کاهش حساسیت نوترونی در این حالت نشان می‌دهد که برای بهینه‌سازی ابعاد آشکارساز به‌منظور بیشترین میزان حساسیت نوترونی کافی است تمرکز بر انتخاب شعاع گسیلنده و ضخامت عایق باشد. در این بخش نیز مقایسه‌ای بین مواد مختلف عایق و جمع‌کننده انجام شده است، این مقایسه نشان می‌دهد؛ تأثیر انتخاب مواد عایق و جمع‌کننده زمانی که ضخامت جمع‌کننده در حال افزایش است در ضخامت‌های بزرگ‌تر ملموس‌تر خواهد بود. شکل ۷ نشان می‌دهد که به ازای ابعاد ثابت برای هر دو نوع رودیوم و وانادیوم،

فولاد ضدزنگ (stainless steel) به‌عنوان جمع‌کننده منجر به حساسیت نوترونی بزرگ‌تری در ضخامت‌های بالاتر می‌شود. چنانچه ضخامت جمع‌کننده در بررسی عملکرد SPND ثابت در نظر گرفته شود، اهمیت انتخاب جمع‌کننده نیز کمتر خواهد شد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه میزان حساسیت نوترونی دو نوع SPND، رودیوم و وانادیوم به‌عنوان معمول‌ترین نوع آشکارسازهای خود-توان تأخیری ناشی از واپاشی بتا محاسبه شده است. مقایسه میزان حساسیت نوترونی رودیوم و وانادیوم با ابعاد یکسان نشان داد که حساسیت نوترونی ناشی از واپاشی بتا مربوط به گسیلنده رودیوم بزرگ‌تر از گسیلنده وانادیوم است. سطح مقطع جذب نوترون‌های حرارتی، نرخ مصرف و انرژی بتاهای گسیلی پارامترهای مهمی در انتخاب نوع ماده گسیلنده است. سطح مقطع بالای جذب نوترون در رودیوم در مقایسه با وانادیوم منجر به حساسیت بزرگ‌تری در رودیوم شده است. علاوه بر نوع ماده گسیلنده که حساسیت گسیلنده را تحت تأثیر قرار داده است، هندسه، شامل ابعاد گسیلنده و سایر قسمت‌های SPND مانند عایق و جمع‌کننده نیز حساسیت SPND را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بررسی انجام‌گرفته در این مطالعه نشان داد که حساسیت نوترونی وابستگی بسیاری به تغییرات شعاع گسیلنده و ضخامت عایق در مقایسه با ضخامت جمع‌کننده و طول SPND دارد. بنابراین برای بررسی عملکرد بهینه آشکارسازهای خود-توان نوترون انتخاب هندسه شامل ابعاد گسیلنده و عایق تأثیر بسیاری بر حساسیت نوترونی خواهد داشت. انتخاب شعاع گسیلنده و ضخامت عایق از منظر افزایش میزان اندرکنش‌های نوترونی در گسیلنده و تأثیر فزاینده بارفضایی در عایق مهم‌تر از سایر ابعاد مانند ضخامت جمع‌کننده و طول SPND خواهد بود. **تغییرات طول SPND منجر به تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در حساسیت نوترونی نمی‌شود و با توجه به نتایج مرجع ۵، با افزایش طول آشکارساز میزان وابستگی حساسیت نوترونی به آن بسیار ناچیز خواهد شد. بنابراین در بهینه‌سازی ابعاد انتخابی SPND طول آن پارامتر مهمی نخواهد بود.** در این بررسی شعاع گسیلنده و ضخامت عایق تا ۰/۶ سانتی‌متر افزایش یافت که روند حساسیت نوترونی بر اساس شعاع گسیلنده افزایشی و در مورد عایق در ضخامت نزدیک به ۲/۵ میلی‌متر به صفر رسید. علاوه بر ابعاد، دو نوع ماده گسیلنده (رودیوم و وانادیوم)، دو نوع عایق؛ یعنی Al_2O_3 و MgO و نوع ماده جمع‌کننده (آلیاژ اینکونل-۶۰۰ و فولاد) نیز بررسی شد و تأثیر قابل توجهی در خصوص تغییر نوع عایق و جمع‌کننده بویژه در شعاع‌های کوچک گسیلنده و ضخامت‌های کم عایق و جمع‌کننده مشاهده نشد.

۵. مراجع

- [1] R. B. Shields, "Self-powered flux detectors," Atomic Energy of Canada Ltd., 1983.
- [2] H. D. Warren, "Calculational model for self-powered neutron detector," *Nucl. Sci. Eng.*, vol. 48, no. 3, pp. 331–342, 1972.
- [3] N. P. Goldstein, "A Monte-Carlo calculation of the neutron sensitivity of self-powered detectors," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 20, no. 1, pp. 549–556, 1973.
- [4] H. Lee, S. Choi, K.-H. Cha, K. Lee, and D. Lee, "New calculational model for self-powered neutron detector based on Monte Carlo simulation," *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 52, no. 5, pp. 660–669, 2015.
- [5] Q. Zhang, X. Liu, B. Deng, L. Cao, and C. Tang, "Numerical optimization of rhodium self-powered neutron detector," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 113, pp. 519–525, 2018.
- [6] T. Cui, Y. Yang, H. Xue, and H. Kuang, "A Monte-Carlo simulation method for the study of self-powered neutron detectors," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A*

Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. 954, p. 161383, 2020.

- [7] Y. Sang *et al.*, “Development and verification of a simulation toolkit for Self-Powered Neutron Detector,” *Ann. Nucl. Energy*, vol. 150, p. 107784, 2021.
- [8] P. Raj, “Development and Testing of Self-Powered Detectors for Nuclear Measurements in Fusion Reactors.” Dissertation, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2019, 2019.
- [9] V. Verma, L. Barbot, P. Filliatre, C. Hellesen, C. Jammes, and S. J. Svärd, “Self powered neutron detectors as in-core detectors for sodium-cooled fast reactors,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 860, pp. 6–12, 2017.
- [10] S. Y. Jeong, J. W. Kim, Y. S. Kim, H. Y. Joo, and J. H. Moon, “Sentiment analysis of nuclear energy-related articles and their comments on a portal site in Rep. of Korea in 2010–2019,” *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 53, no. 3, pp. 1013–1019, 2021.