



مطالعه و امکان سنجی ساخت آشکارساز نوترونی خودتوان (SPND) به منظور استفاده در مولدهای نوترونی

زهرة کارگر^{۱*}، حسین خلفی^۲، مرضیه ساجدی^۱، مرتضی جعفرزاده^۳، حسین قدس^۴، فرهاد ذنوبی^۴

۱- دانشگاه شیراز، دانشکده علوم، گروه فیزیک

۲- سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، شرکت هلدینگ توسعه کاربرد پرتوها

۳- دانشگاه سیستان و بلوچستان (زاهدان)، دانشکده علوم، گروه فیزیک

۴- سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده علوم هسته‌ای، گروه پژوهشی فیزیک

چکیده: با توجه به قیمت نسبتاً زیاد آشکارسازهای نوترون گازی (BF_3 ، He^3 و ...) و پیچیدگی تکنیک‌های جداسازی نوترون از گاما در آشکارسازهای سوسوزن، توسعه‌ی نوع ساده‌تر و در عین حال ارزان‌تر آشکارساز نوترونی برای اندازه‌گیری پیوسته و تخمینی از شار مولدهای نوترون، در بازه‌ی ($10^7-10^1 n/s$) در دستور کار قرار گرفت. با در نظر گرفتن امکانات موجود و عدم نیاز به فن‌آوری ساخت بسیار بالا، آشکارسازهای خودتوان (SPND) می‌توانند گزینه‌ی مناسبی برای این منظور باشند. در این مقاله به برخی از محاسبات کلیدی و نتایج مقدماتی حاصل از اولین اندازه‌گیری‌ها بر روی نمونه‌ی اولیه، اشاره شده است.

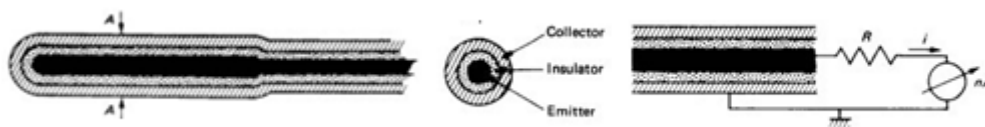
کلمات کلیدی: SPND، گسیلنده، جمع‌کننده، فضای بار، سطح بحرانی

۱- **مقدمه:** آشکارسازهای خودتوان چنانکه از نامشان پیداست، بدون اعمال ولتاژ بیرونی کار می‌کنند. پرتوهای فرودی (نوترون، گاما یا هر دو)، سیگنالی به شکل جریان الکتریکی ایجاد می‌کنند که متناسب با شار فرودی است. این آشکارسازها معمولاً به شکل هم‌محور (شکل ۱) ساخته می‌شوند. رسانای مرکزی گسیلنده^۱ نامیده می‌شود و عامل تولید سیگنال است. جنس گسیلنده از ماده‌ای است که سطح مقطع واکنش (β و n) برای آن نسبتاً زیاد است. قسمت‌های دیگر آشکارساز، از موادی با سطح مقطع گیراندازی نوترون نسبتاً کمی ساخته می‌شوند و در نتیجه با نوترون برهم‌کنش قوی ندارند. رسانای بیرونی، که جمع‌کننده نام دارد، با یک ماده‌ی عایق از گسیلنده جدا می‌شود. این ماده باید در برابر دمای زیاد و محیط تابشی مقاوم باشد. اغلب از اکسید فلزات مختلف مانند اکسید آلومینیوم و اکسید منیزیم برای این منظور استفاده می‌شود. ماده‌ای که برای جمع‌کننده استفاده می‌شود استیل ضد زنگ با خلوص زیاد یا Inconel^۳ می‌باشد.

^۱Emitter

^۲Collector

^۳آلیاژی از نیکل و کروم و آهن



شکل ۱- پیکربندی یک آشکارساز خودتوان

اساس تولید سیگنال در آشکارساز خودتوان، ساده است. در نتیجه‌ی بمباران با تابش، گسیلنده الکترون آزاد می‌کند. این الکترون به سمت عایق رفته و گسیلنده را با بار مثبت رها می‌کند. اگر گسیلنده را با یک مقاومت به جمع‌کننده وصل کنیم (شکل ۱)، جریانی بوجود می‌آید که با اندازه‌گیری آن برآوردی از شار فرودی بدست می‌آید. ذکر این نکته ضروری است که هر بتایی که گسیلنده را ترک می‌کند، صرف نظر از اینکه به جمع‌کننده برسد یا نه، در ایجاد جریان دخالت خواهد داشت.

آشکارسازهای خودتوان به دو گروه "حساس به نوترون" و "حساس به گاما" و همچنین به زیرگروه‌های با پاسخ آنی و پاسخ تاخیری، تقسیم می‌شوند. آشکارسازهای نوترونی خودتوان با پاسخ تاخیری، بر اساس اندازه‌گیری مستقیم جریان بتا که نتیجه‌ی گیراندازی نوترون‌ها می‌باشد، کار می‌کنند. این جریان با نرخ نوترون‌هایی که در آشکارساز گیراندازی می‌شوند، متناسب است. در آشکارسازهای نوترونی خودتوان با پاسخ آنی، گسیلنده یک نوترون جذب می‌کند و در لحظه‌ی گیراندازی، یک گاما گسیل می‌شود. این گاماها، عامل ایجاد سیگنال می‌باشند و چون در لحظه‌ی گیراندازی نوترون گسیل می‌شوند، پاسخ آشکارساز آنی است. البته در آشکارسازهای با پاسخ تاخیری هم یک مولفه آنی وجود دارد که متناظر با گیراندازی پرتوهای گامای گسیل شده در اثر گیراندازی نوترون در این مواد است. اما سیگنال مربوط به آن، در مقایسه با سیگنال جریان بتا خیلی کوچکتر است [۱ و ۲].

۲- ساخت نمونه اولیه

۲-۱ انتخاب ماده گسیلنده: موادی که می‌توانند به‌عنوان گسیلنده در آشکارسازهای نوترونی خودتوان مورد استفاده قرار گیرند، عبارتند از: وانادیوم، رودیوم، کبالت، هافنیم، نقره و پلاتینیوم. کبالت، هافنیم و پلاتینیوم در آشکارسازهای نوترونی خودتوان آنی و رودیوم، وانادیوم و نقره در SPND های تاخیری مورد استفاده قرار می‌گیرند. مشخصات این SPND های نوعی در جدول ۱ مشخص شده است.

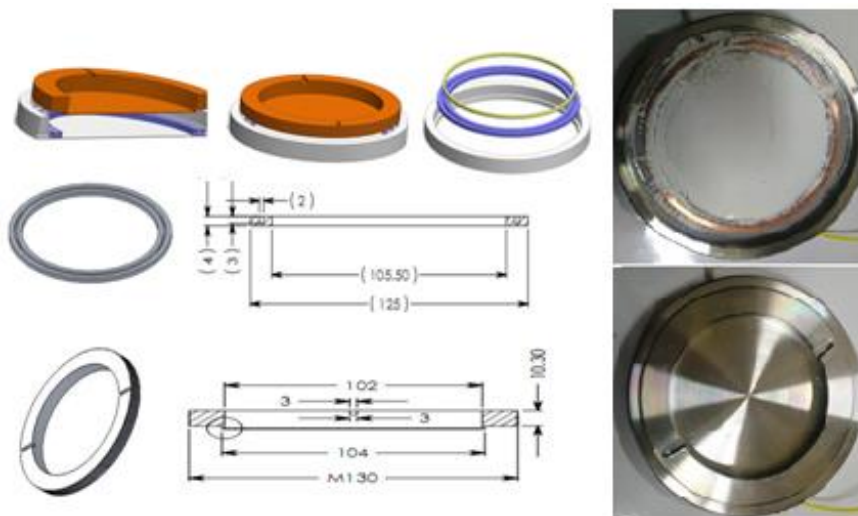
کلید کارایی آشکارساز، در انتخاب ماده‌ی گسیلنده می‌باشد. پس از بررسی مواد مختلف، نهایتاً نقره‌ی طبیعی با خلوص ۹۲/۵٪ به‌عنوان ماده گسیلنده انتخاب شد. فاکتورهایی که نقره را به‌عنوان یک گسیلنده‌ی ایده‌آل معرفی می‌کند، عبارتند از: سطح مقطع گیراندازی نوترون نسبتاً بالا، چگالی کم، زمان پاسخ سریع (در مقایسه با SPND های تاخیری دیگر) و قابلیت چکش‌خواری.

جدول ۱- مشخصات SPND های نوعی مورد استفاده در رآکتور [۳]

Emitter material	Rhodium	Vanadium	Cobalt	Hafnia (HfO ₂)	Silver	Platinum
Emitter Diameter (mm)	۰,۴۶	۲,۰	۲,۰	۱,۲۴	۰,۶۵	۰,۵۱
Emitter Length (mm)	۴۰۰	۱۰۰	۲۱۰	۷۰۰	۷۰۰	۳۰۵۰
Insulator Type	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	MgO	Al ₂ O ₃
Collector material	Inconel	Inconel	Inconel	Stainless Steel	Stainless Steel	Inconel
Collector Diameter (mm)	۱,۵۷	۳,۵	۳,۵	۳,۰	۳,۰	۱,۶
Thermal Neutron Sensitivity $\frac{A}{nV}$	$۳,۶ \times ۱۰^{-۲۰}$	$۴,۸ \times ۱۰^{-۲۱}$	$۵,۴ \times ۱۰^{-۲۱}$	$۷,۹ \times ۱۰^{-۲۰}$	$۴,۲ \times ۱۰^{-۲۰}$	$۲,۵ \times ۱۰^{-۲۲}$
Co-۶۰ Gamma Sensitivity $\frac{A}{R/HR}$	$۷,۰ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۴,۰ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۵,۶ \times ۱۰^{-۱۷}$	$۲,۸ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۱۳,۵ \times ۱۰^{-۱۶}$	$۳,۴ \times ۱۰^{-۱۶}$
Response Time (۰-۶۳٪)	۱,۱ min	۵,۵ min	Prompt	Prompt	۰,۵ min	Prompt

۲-۲ انتخاب ماده عایق: ویژگی های عایق نیز مهم اند؛ عایق باید در دمای اتاق مقاومتی در حدود $۱۰^{۱۲}$ اهم و در دمای کار رآکتور، مقاومتی حدود $۱۰^۹$ اهم داشته باشد. اکسید منیزیم (MgO) و اکسید آلومینیوم (Al₂O₃) دو عایقی هستند که معمولاً مورد استفاده قرار می گیرند. آزمایشات نشان داده است که مقاومت MgO بر اثر پرتوگیری کاهش می یابد، حال آنکه مقاومت Al₂O₃ تغییری نمی کند. به این دلیل، معمولاً Al₂O₃ به عنوان عایق در آشکارسازهای خودتوان مورد استفاده قرار می گیرد [۱]. از اینرو در آشکارساز مورد ساخت، اکسید آلومینیوم به عنوان ماده عایق انتخاب شد.

۳-۲ هندسه ی نمونه: نمونه اولیه ی این نوع آشکارساز به منظور استفاده در چشمه های نوترونی مبتنی بر شتابگر الکترواستاتیک (همانند نمونه ی موجود در آزمایشگاه فیزیک نوترون سازمان انرژی اتمی) مطابق شکل ۲ با محفظه ای از جنس استیل ضد زنگ طراحی و ساخته شد.



شکل ۲- طرح و ابعاد آشکارساز

۳- اثرات فضای بار: در محاسبه‌ی حساسیت آشکارساز، باید اثرات بار در ناحیه‌ی عایق در نظر گرفته شود. وجود عایق بین گسیلنده و جمع‌کننده موجب می‌شود عایق مانند یک مخزن الکترونی عمل کند. پس از گذشت زمان محدودی، به دلیل ساختار عایق، بار الکتریکی در داخل آن انباشته می‌شود که به آن فضای بار می‌گویند. هنگامی که میدان الکتریکی فضای بار به اندازه‌ی کافی قوی شد، پتانسیل الکتریکی در یک نقطه از عایق ماکزیمم می‌شود. در این مکان، میدان الکتریکی صفر شده و جهت آن تغییر می‌کند. این مکان را سطح بحرانی می‌نامیم. الکترون‌هایی که قبل از رسیدن به این قله‌ی پتانسیل، انرژی جنبشی خود را از دست می‌دهند، به داخل گسیلنده دفع می‌شوند. در نتیجه، تنها الکترون‌هایی در جریان آشکارساز شرکت می‌کنند که قادرند خود را به سطح بحرانی یا بالاتر برسانند [۴].

فرض می‌کنیم فضای بار موجود در عایق توزیع یکنواختی داشته باشد. با حل معادله‌ی پواسون در ناحیه‌ی عایق خواهیم داشت:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad \frac{d^2 V}{dz^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (1) \quad V = -\frac{\rho}{2\epsilon} z^2 + A.z + B. \quad (2)$$

در محاسبات بالا، گسیلنده و جمع‌کننده را دو صفحه‌ی بی‌نهایت در نظر گرفته‌ایم. از اینرو پتانسیل تنها تابعی از ضخامت (z) می‌باشد. با اعمال شرایط مرزی $V(\frac{d_e}{r}) = V(\frac{d_e}{r} + d_i) = 0$ خواهیم داشت: d_e ضخامت گسیلنده و d_i ضخامت عایق می‌باشد. همچنین مرکز گسیلنده به عنوان مبدا مختصات انتخاب شده است.

$$V = -\frac{\rho}{2\epsilon} z^2 + \frac{\rho}{\epsilon} (d_e + d_i)z - \frac{\rho}{\epsilon} d_e (d_e + d_i) \quad (3)$$

بنابراین میدان الکتریکی برابر خواهد بود با:

$$E = -\nabla V \quad E(z) = -\frac{dV}{dz} = \frac{\rho}{\epsilon} z - \frac{\rho}{\epsilon} (d_e + d_i) \quad (4)$$

میدان الکتریکی در مکان z (سطح بحرانی) صفر می‌شود. فاصله‌ی این مکان تا مرکز گسیلنده برابر است با:

$$z. = \frac{d_e + d_i}{2} \quad (5)$$

در SPND طراحی شده داریم:

$$d_e = 0.5 \text{ mm} \quad d_i = 0.75 \text{ mm} \quad z. = 0.625 \text{ mm}$$

می نیم انرژی که الکترون روی سطح گسیلنده نیاز دارد تا بتواند مسافت 0.625 mm را در اکسید آلومینوم طی کند، تقریباً برابر با 400 KeV می باشد.

۴- محاسبات: تعداد هسته های گسیلنده که در واحد زمان با نوترون اندرکنش می کنند با رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$N. = n\sigma\Delta X\Phi \quad (6)$$

در این رابطه، n تعداد هسته های گسیلنده (نقره) در واحد حجم؛ σ سطح مقطع گیراندازی نوترون حرارتی؛ ΔX ضخامت فویل نقره و Φ شار نوترون حرارتی می باشد. در نتیجه، تعداد الکترون های گسیل شده در واحد زمان برابر است با:

$$\text{no. of electrons per unit time} = N.(1 - e^{-\lambda t}) \quad (7)$$

فویل نقره مورد استفاده در این آشکارساز، دیسکی به قطر 10 سانتی متر و ضخامت 0.5 میلی متر می باشد. در نقره ی طبیعی فراوانی ایزوتوپ ^{107}Ag ، 51.82% و فراوانی ایزوتوپ ^{109}Ag ، 48.18% می باشد. بنابراین، بعد از گذشت 300 ثانیه خواهیم داشت (جدول ۲):

جدول ۲- تعداد الکترون های گسیل شده در واحد زمان در واحد شار در SPND طراحی شده

	تعداد الکترون های گسیل شده در واحد زمان در واحد شار $\left(\frac{\text{electron}}{\text{sec-nv}}\right)$
نقره-۱۰۷	۳/۴۴
نقره-۱۰۹	۹/۹۸
نقره طبیعی	۱۳/۴۲

برای محاسبه ی جریان از کد MCNP4C استفاده شد. در این کد، فویل نقره به عنوان یک چشمه ی الکترون با شار محاسبه شده در قسمت قبل در نظر گرفته شده و جریان خروجی برای دو حالت برآورد شد. حالت اول مربوط به شرایطی است که عایق اشباع نشده است. در این حالت فرض می شود که تمام الکترون هایی که خود را به سطح گسیلنده می رسانند، در تشکیل جریان شرکت می کنند. در حالت دوم، تنها الکترون هایی که خود را به سطح بحرانی می رسانند منجر به تشکیل جریان می شوند. نتایج محاسبات در جدول ۳ آورده شده است.

۵- تست اولیه ی آشکارساز: نمونه اولیه آشکارساز با دو چشمه ی نوترون مختلف تست گردید. همچنین برای اطمینان از صحت قرائت جریان از یک الکترومتر کالیبره (که قادر به اندازه گیری جریان های کمتر از 10^{-10} A می باشد) استفاده شد.

(۱) شتابگر الکترواستاتیک با بیشینه انرژی 150KeV که در آزمایشگاه فیزیک نوترون سازمان انرژی اتمی موجود است، می تواند به عنوان مولد نوترون استفاده گردد. انرژی نوترون های تولید شده در این شتابگر از واکنش $D-D$ تقریباً $2/5\text{MeV}$ و شار آن متناسب با جریان باریکه ی دوتریوم ورودی از مرتبه ی 10^7-10^8n/s است. به دلیل برخی محدودیت ها از لحاظ تکنیکی و فیزیکی بهداشت، تست اولیه ی آشکارساز ساخته شده در شار بیش از 10^6n/s میسر نبود. لذا آزمایش های اولیه با این شار انجام گرفت که به ازای آن ضخامت مناسب پارافین برای حداکثر نمودن شار نوترون حرارتی در محل آشکارساز، با استفاده از کد $\text{MCNP}\epsilon\text{C}$ حدود $45/5\text{mm}$ برآورد شد. در این حالت شار نوترون حرارتی در فویل نقره از مرتبه ی $10^2\text{n/sec} - \text{cm}^2$ محاسبه گردید.

(۲) سیستم رادیوگرافی نوترون رآکتور تحقیقاتی تهران؛ شار نوترون حرارتی در محل قرارگیری نمونه هایی که مورد آزمون رادیوگرافی با نوترون قرار می گیرند، از مرتبه ی $10^4\text{n/sec} - \text{cm}^2$ می باشد.

نتایج بدست آمده در جدول ۳ بیان شده است:

جدول ۳- نتایج

چشمه نوترون	تغییر جریان ایجاد شده (fA)	حساسیت اندازه گیری شده $S\left(\frac{fA}{nv}\right)$	حساسیت محاسبه شده $S\left(\frac{fA}{nv}\right)$	
			حالت اول	حالت دوم
مولد نوترون	۰/۵	50×10^{-4}	$69/49 \times 10^{-4}$	$9/14 \times 10^{-4}$
سیستم رادیوگرافی نوترون	۳۳۰۰	3300×10^{-4}	$69/49 \times 10^{-4}$	$9/14 \times 10^{-4}$

۶- نتیجه گیری: با توجه به نتایج اندازه گیری های اولیه به نظر می رسد استفاده از این نوع آشکارساز برای مولدهای نوترونی در بازه ی کاری نامی آن ها یعنی 10^7-10^8n/s می تواند با دقت مناسبی تخمینی از شار نوترون به هنگام کار مولد نوترون ارائه دهد. اما به دلیل محدودیت در اندازه گیری جریان های در محدوده ی 10^{-10}A ، استفاده از این آشکارساز در بازه ی کمتر از 10^7n/s چندان مناسب نمی باشد. لازم به ذکر است توسعه و بهینه سازی این آشکارساز و ساخت سیستم های الکترونیکی مرتبط با آن (فمتو آمپرمتر) در دست اقدام است.

۷- مراجع:

[۱] Tsoulfanidis, N. ,*Measurement and detection of radiation*, ۲nd edition. Washington, Taylor & Francis; Ch.۱۴, ۵۱۱-۵۱۹, ۱۹۹۵.

[۲] Knoll, G. F. ,*Radiation detection and measurement*, ۳rd edition. John Wiley & Sons, Inc; Ch.۱۴, ۵۲۸-۵۳۳, ۱۹۹۹.

[۳] William H. Todt, Sr. ,*Characteristics of Self-Powered Neutron Detectors used in power reactors*, Imaging and Sensing Technology Corporation, Horseheads, New York, ۱۹۸۵, USA.

[۴] Warren, H. D. ,*Calculation Model for Self-Powered Neutron Detector*, Nuclear Science and Engineering; ۴۸, ۳۳۱-۳۴۲, ۱۹۷۲.