

## ساخت و آزمایش آشکارساز ترموپیلی نوترون در ستون حرارتی رآکتور تحقیقاتی تهران

احسان علی بیگی<sup>۱\*</sup>، محمدرضا قاسمی<sup>۲</sup> و مجتبی شمسایی زفرقندی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

<sup>۲</sup> پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

\* تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، کد پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

پست الکترونیکی: Alibeigi@aut.ac.ir

### چکیده

با توجه به نیاز و کاربرد وسیع آشکارسازهای نوترون به‌ویژه در رآکتورهای هسته‌ای و همچنین افزایش تعداد دستگاه‌های شتاب‌دهنده خطی، طراحی و ساخت آن‌ها یک امر ضروری به حساب می‌آید. هدف این مقاله، ساخت آشکارساز نوترون با قابلیت جبران‌سازی پاسخ گاما و دمای محیط است. برای ساخت این آشکارساز از ترموکوپل‌های ویژه‌ای که محل اتصال سیم‌ها (نقطه داغ ترموکوپل) در آن با کاربید بور پوشش‌دهی شده است، استفاده شد. در یک شار نوترونی در محیط، ترموکوپل پوشش داده شده با کاربید بور به دلیل برهم کنش اتم‌های بور با نوترون‌ها و آزاد شدن ذرات آلفای پرانرژی (با انرژی  $MeV 2.31$ ) باعث تولید ولتاژی در دو سر نقطه اتصال ترموکوپل‌ها می‌شود. ولتاژ (سیگنال) ترموکوپل، متناسب است با چگالی ذرات نوترون و برای حذف اثر پرتوهای گاما و دمای محیط از ترموکوپل‌های پوشش‌دهی شده با آلومینیوم به صورت تفاضلی در آشکارساز قرار داده می‌شود، زیرا به لحاظ عدد اتمی، چگالی اتمی و ضریب رسانایی گرمایی و ظرفیت گرمایی به کاربید بور نزدیک می‌باشد. این آشکارساز در ستون حرارتی رآکتور تحقیقاتی تهران مورد آزمایش قرار گرفت و آستانه شار اندازه‌گیری شده به وسیله آن آشکارساز با آزمایش فویل ایندیم  $10^8 \times 526 \text{ n/cm}^2\text{-s}$  به دست آمد.

**کلیدواژگان:** آشکارساز نوترون، ترموپیل، جبران‌سازی پاسخ گاما، فویل ایندیم، ستون حرارتی رآکتور تحقیقاتی تهران.

### ۱. مقدمه

واکنش‌های اصلی که همان جذب است، در ساخت آشکارساز ترموپیلی مورد توجه قرار گرفته است [۱-۲]. این آشکارساز افزایش‌های دمایی را در مواد مبدل نوترون<sup>۱</sup> زمانی که در معرض شار نوترونی قرار می‌گیرند، اندازه می‌گیرد. افزایش دما برای شار نوترون کالیبره می‌شود. ترموپیل‌ها شامل چندین پیوندگاه ترموکوپل هستند که به وسیله یک مبدل نوترون در برگرفته شده‌اند. برهمکنش‌های نوترون نظیر  $(n, \alpha)$ ،  $(n, p)$ ،  $(n, \gamma)$  یا  $(n, \text{Fission})$  در پیوندگاه حساس به نوترون که با توقف ذره

از آنجایی که انسان برای آشکارسازی و اندازه‌گیری پرتوها و ذرات هسته‌ای کاملاً متکی بر دستگاه‌های آشکارسازی است، طراحی و ساخت آشکارسازهای ذرات و پرتوهای هسته‌ای یکی از مهم‌ترین امور مربوط به علوم هسته‌ای است [۱]. اساس کار همه آشکارسازها بر تولید یک سیگنال یا علامتی به ازای هر ذره ورودی استوار است، هر آشکارسازی با توجه به نوع برهمکنش خاص خود کار می‌کند. هرچند برای نوترون مدها یا کانال‌های مختلفی برای برهمکنش با ماده وجود دارد، یکی از مهم‌ترین

1. Neutron converter

یک رآکتور با مواد موردنظر جدید که برای تولید رادیو ایزوتوپ باید تحت بمباران نوترون قرار بگیرند، موردنیاز است. برای اینکه جذب نوترون در ماده بارگذاری شده با الگوی نوترون مدنظر تغییری نکرده باشد، تغییر الگوی نوترون در قلب رآکتور بخصوص در مواقع اختلال شار از اهمیت خاصی در بارگذاری سوخت جدید برخوردار است [۵].

در این مطالعه، از نرم افزار SolidWorks 2013 برای طراحی بدنه آشکارساز و از کاربرد بور به عنوان ماده با سطح مقطع بالای واکنش با نوترون حرارتی (۶۰۰ بارن) استفاده شد. از آلومینیوم نیز با توجه به نزدیکی عدد اتمی، چگالی اتمی، ضریب رسانش و ظرفیت گرمایی برای جبران سازی پاسخ گاما و دمای محیط و از روش های جوشکاری مقاومتی و تفجوشی برای اتصال پیوندگاه ترموکوپل و پوشش دهی پیوندگاه ترموکوپل نوع k، از سیم های فلزی نیکل-کروم (کروم) و نیکل-آلومینیوم (آلوم) استفاده شد. در ساخت آشکارساز از صفحات فیبر استخوان برای اعمال سیستم چرخشی به مهره ها استفاده شده است تا از هم پوشانی مهره های جاذب بور در یک راستا کاسته شود که باعث بهبود آستانه آشکارسازی می شود. پس از اتمام مراحل ساخت، آشکارساز در ستون حرارتی رآکتور تحقیقاتی تهران مورد آزمایش قرار گرفت و برای به دست آوردن آستانه شار پاسخ دهی آشکارساز نیز از آزمایش فعال سازی فویل استفاده شد.

## ۲. مواد و روش ها

### ۱.۲. مکانیسم عملکرد آشکارساز

نوترون ها هرچه به انرژی های گرمایی یا نزدیک به گرمایی نزدیک تر می شوند، احتمال گیراندازی شان توسط هسته جاذب بیشتر می شود. اگر برهمکنش به صورت جذب باشد، نوترون ناپدید می شود، اما پس از واکنش یک یا تعداد بیشتری از ذرات دیگر طی واکنش های جذبی عبارت اند از  $(n, \alpha)$ ،  $(n, p)$ ،  $(n, \gamma)$  و یا  $(n, \text{Fission})$  ظاهر می شوند. عموماً، واکنش های

ثانویه در ماده همراه است، دما را افزایش می دهد و به همین دلیل، باعث ایجاد یک نیروی محرکه القایی<sup>۱</sup> میان پیوندگاه سرد و گرم می شود که می توان این Emf را بر حسب شار نوترون کالبره کرد.

طراحان اولیه ترموپیل نوترون فار، بارباراز و کورانز، در آزمایشگاه اوکریچ از بور به عنوان مبدل نوترون و ترموکوپل های کروم-آلوم، کروم-مس و پلاتین-مولیبدن استفاده کردند که در ساخت ترموپیل نوترون از ۴۲ پیوندگاه (۲۱ پیوندگاه بدون پوشش دهی و ۲۱ پیوندگاه با پوشش دهی بور) استفاده شد [۳]. لاپسلی در دانشگاه شیکاگو یک ترموپیل ۱۰ واحدی از مبدل نوترون به کاربرد و حساسیت ۱ میلی ولت را در شار  $10^{11} \text{ n/cm}^2\text{-s}$  گزارش کرد [۴]. گزارش دیگری از جاگ، بالنجر و وید ارائه شد که در این آشکارساز دی بوران ( $B_2H_6$ ) به عنوان ماده پوشش دهنده حساس به نوترون پیوندگاه ترموکوپل از جنس کروم-آلوم استفاده شد [۵]. سیرولیتی، گیزلون و ریسپلی در مرکز مطالعات هسته ای ایتالیا به ساخت آشکارساز ترموپیلی با خاصیت جبران سازی پاسخ گاما و حذف اثر دمای محیط با استفاده از مهره های بور و آلومینیوم اقدام کردند [۶].

از آنجایی که در رآکتورها علاوه بر شار نوترون، پرتوهای گاما نیز وجود دارند و آشکارسازها علاوه بر نوترون به گاما نیز حساس بوده و پاسخ آشکارساز را تحت تأثیر قرار می دهند، باید به روشی مناسب پاسخ آشکارساز، برای نوترون و گاما از هم تفکیک شوند. در این روش پاسخ گاما به وسیله مهره هایی که به لحاظ عدد اتمی، چگالی اتمی به هم نزدیک بوده کسر می شوند [۷].

از مزایای آشکارسازهای ترموپیلی می توان به کوچک بودن آن اشاره کرد که در این صورت، می توان از آن به عنوان اسکتر شار نوترون در نواحی مختلف مجموعه رآکتور و یا در پس دیواره های حفاظتی استفاده کرد. این آشکارساز پس از بارگیری

1. Electromotive force

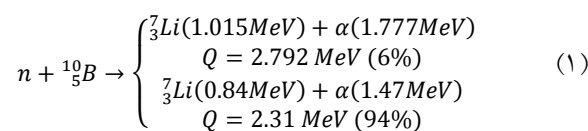
سطح مقطع بالای نوترون افزایش یافته در نتیجه، مقدار گرمای تولید شده در مهره افزایش می‌یابد که منجر به افزایش مقدار ولتاژ تولیدی در دو سر ترموکوپل می‌شود. هرچقدر حساسیت و مشخصات فیزیکی ترموکوپل مناسب‌تر باشد، ولتاژ تولیدی نیز مناسب‌تر خواهد شد.

بور دارای دو ایزوتوپ  $^{10}\text{B}$  و  $^{11}\text{B}$  است که نسبت  $^{10}\text{B}$  در بور طبیعی در حدود ۱۹/۸ درصد است. از ایزوتوپ  $^{10}\text{B}$  با توجه به سطح مقطع برهمکنش بالا با نوترون حرارتی در آشکارسازی نوترون و حفاظ‌سازی در رآکتور استفاده می‌شود.  $^{10}\text{B}$  به دلیل نزدیکی به  $^3\text{He}$  به لحاظ سطح مقطع گیراندازی نوترون و مقادیر  $Q$  بزرگ‌تر برای ذرات باردار به‌عنوان یکی از بهترین جایگزین‌ها برای  $^3\text{He}$  شناخته شده است؛ هرچند بور در شکل  $\text{BF}_3$  که در دمای اتاق گازی شبیه  $^3\text{He}$  است، به دلیل سمی بودن، در کاربردهایی نظیر مانیتورینگ پرتابل مناسب نیست. عنصر بور و ترکیبات حاوی بور طبیعی، مثل کاربید بور ( $\text{B}_4\text{C}$ )، توسط گروه‌های زیادی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱۲].

از آنجایی که دسترسی به ترکیبات بور غنی شده با توجه به کاربرد نظامی و استفاده در رآکتور محدود است، در این پروژه از ترکیبات حاوی بور موجود در کشور از جمله پودر کاربید بور ۵ میکرونی استفاده شد که نسبت به پودر ۱۰ میکرونی دمای تفجوشی پایین دارد که مانع از سوختن سیم‌های ترموکوپل با ضخامت ۰/۱۸۵ میلی‌متر می‌شود و همچنین در ضخامت‌های بسیار بزرگ‌تر از برد ذرات آلفا، استفاده از ترکیبات خالص بور باعث افزایش خودحفاظی شده که تأثیر عکس بر پاسخ آشکارساز دارد.

برای جبران‌سازی نیز از آلومینیم که عنصری شیمیایی در گروه بور قرار دارد و با توجه به نزدیک بودن عدد اتمی، چگالی، ظرفیت گرمایی و ضریب رسانش می‌تواند در امر جبران پرتوهای گاما و دمای محیط استفاده شود. این ایده اولین بار در سال ۱۹۶۶ توسط سیرولیتی، گیزلون و ریسپلی در مرکز مطالعات هسته‌ای ایتالیا در

گرماگیر برای نوترون‌های سریع، و واکنش‌های گرمازا برای نوترون‌های حرارتی به وقوع می‌پیوندد [۱]. واکنش نوترون حرارتی با بور-۱۰ در رابطه مشاهده می‌شود. (درصدها بیانگر احتمال تولید یا نسبت شاخه‌ای واپاشی است که منظور از نسبت شاخه‌ای، احتمال واپاشی نسبی از یک حالت اولیه مفروض یک سیستم به چند حالت نهایی ممکن است) [۹-۱۱].



با فرض اینکه  $Q$  انرژی انتقال داده شده به مهره کاربید بور توسط برهمکنش یک نوترون حرارتی و ماده حساس (ماده‌ای با سطح مقطع بالا برای نوترون حرارتی) و تولید ذره ثانویه و متوقف شدن آن در مهره کاربید بور باشد، آنگاه محاسبه توان حرارتی به صورت مستقیم از محاسبه واکنش در واحد زمان با رابطه (۲) داده می‌شود.

$$w = m \times Q \quad (2)$$

که در آن،  $m$  آهنگ تولید ( $n, \alpha$ ) یا آهنگ واکنش‌های شکافت در مهره به کاررفته در ساخت آشکارساز است [۶].

اندازه‌گیری انرژی آزاد شده در مهره با استفاده از روش‌های تغییر دما و یا تغییر مقاومت می‌تواند اساس کار آشکارساز باشد [۶]. پس چگالی شار بالای نوترون حرارتی در هسته یک رآکتور هسته‌ای را می‌توان با اندازه‌گیری اثر ماکروسکوپیکی از حرارت تولید شده، زمانی را که تحت بمباران نوترونی قرار می‌گیرد، محاسبه کرد. در یک ترموپیل با اتصالات یک در میان پوشیده با  $^{10}\text{B}$  یا دیگر مواد مناسب ( $^6\text{Li}$  و  $^{235}\text{U}$ ) که می‌توانند به جای  $^{10}\text{B}$  به کار گرفته شوند، می‌تواند در ابعاد نسبتاً کوچک‌تری طراحی شود، این نوع آشکارساز نوترونی برای اندازه‌گیری‌های اسکن شار ایدئال است [۵].

با توجه به این مسئله که آشکارسازهای ترموپیلی در رده آشکارسازهای شار متوسط به بالا هستند، با افزایش شار نوترون حرارتی تعداد برهمکنش و تعداد ذرات باردار تولیدی در مهره با

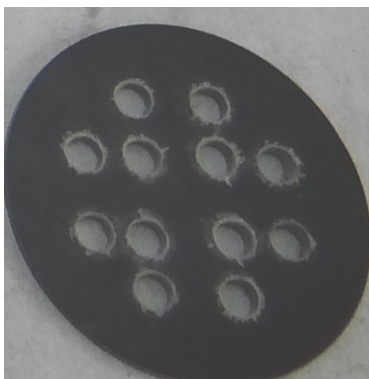
نزدیک شد. برای جلوگیری از سوختن سیم‌ها از غلاف‌های  
سرامیکی که در شکل (۱) نشان داده شده‌اند، استفاده شد.



شکل (۱): پودر کاربرد بور، نمونه‌های کاربرد بور پوشش‌دهی شده و  
غلاف‌های سرامیکی

برای ساخت مهره‌های آلومینیومی نیز از فویل‌های ۰/۲ میلی‌متری که حول پیوندگاه پیچیده شده است، استفاده شد. نمونه‌ها در داخل قالب‌های ساخته شده قرار گرفتند و سپس در داخل کوره‌ای با قابلیت کنترل شرایط محیطی و دمای ۷۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شده و به آرامی تا دمای محیط سرد شد، تا مهره‌های جبران‌سازی پاسخ گاما ساخته شود.

بعد از این مراحل که نمونه‌های آلومینیومی و کاربرد بور آماده شد، برای قرار دادن این مهره‌ها در داخل آشکارساز و برقراری اتصالات سری، نیاز به صفحه‌هایی بود که مهره‌ها را در خود نگه داشته که عایق الکتریکی بین مهره‌های آلومینیومی و همچنین کمترین میزان انتقال حرارت را بین مهره‌ها و بدنه داشته باشد، برای این کار از صفحات فیبر استخوان که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، استفاده شد.



شکل (۲): صفحه فیبر استخوان مورد استفاده

آشکارساز ترموپیلی نوترون با بور پیاده شد [۶]. پارامترهای فیزیکی مربوط به جبران‌سازی پاسخ گاما با استفاده از آلومینیوم در آشکارساز ترموپیلی با کاربرد بور مطابقت بیشتری دارد.

## ۲.۲. تف‌جوشی

تف‌جوشی یا سیتترینگ<sup>۱</sup> یکی از مهم‌ترین روش‌های شکل‌دهی مواد فلزی و سرامیکی می‌باشد. در این روش ابتدا ماده اولیه را که به صورت پودر است، پرس کرده و در کوره قرار می‌دهند. در دماهای بالای کوره، نفوذ اتمی تشدید شده و اتم‌های ذرات مجاور در یکدیگر نفوذ کرده و ذرات را به هم می‌چسبانند. در نتیجه قطعه حجیم با استحکام مناسب از ذرات پودر به دست می‌آید. برای ایجاد پیوند بین ذرات پودری و تهیه یک نمونه یکپارچه و رساندن دانسیته آن‌ها به بالاترین میزان ممکن و بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی، انجام عملیات تف‌جوشی در دما و زمان بهینه اهمیت فوق العاده‌ای دارد [۱۳-۱۵].

## ۳.۲. ساخت مهره‌های کاربرد بور و آلومینیوم

برای ساخت مهره‌ها با استفاده از دستگاه نقطه‌جوش، پیوندگاهی بین ترموکوپل نوع k با ضخامت ۰/۱۸۵ میلی‌متر ایجاد شد، سپس قالب‌های استوانه‌ای سرامیکی به ابعاد ۴ میلی‌متر طول و قطر با استفاده از دستگاه سنگ‌تراش ساخته شد تا پیوندگاه در داخل قالب به همراه کاربرد بور قرار گیرد. پس از آماده شدن، نمونه‌ها برای تف‌جوشی به داخل کوره خودکار انتقال داده شد. با توجه به ضخامت ناچیز سیم‌های ترموکوپل و دمای ذوب بالای کاربرد بور دما و زمان بهینه برای انجام تف‌جوشی ۶۳۰ درجه سانتی‌گراد و ۲ ساعت به دست آمد. برای شکل‌گیری مناسب و قالب‌گیری کاربرد بور برای جداسازی از قالب پس از ۲ ساعت کوره به آرامی و خودکار در مدت زمان ۲۴ ساعت به دمای محیط (۲۷ درجه سانتی‌گراد)

تمامی قطعات به کار رفته در ساخت این سیستم، نويز پایین هستند که کمترین میزان اختلال را جمع‌آوری داده‌ها ایجاد می‌کنند.

پیش تقویت‌کننده AD8221، تقویت‌کننده OP07 و میکروکنترلر ATmega8 که هم وظیفه تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال و هم وظیفه پردازش سیگنال دیجیتال را به‌طور کامل انجام می‌دهد، استفاده شد.

### ۳. ساخت و آزمایش آشکارساز و فویل ایندیم

#### ۱.۳ ساخت آشکارساز

پس از اتمام طراحی‌های انجام‌گرفته برای بدنه آشکارساز، از گرده آلومینیومی به قطر ۷ و طول ۶۰ سانتی‌متر استفاده شد. برای ساخت فلنج‌های طراحی‌شده نیز از همین گرده آلومینیومی استفاده شد. در مرحله بعد جایگذاری مهره‌های آلومینیومی و کاربرد بور در صفحات فیبر استخوان انجام شد و اتصالات بین قطعات ریز آشکارساز برقرار شد. برای ایجاد فضایی که قابلیت خلأ و حفظ گاز را داشته باشد، محل‌های تراش‌کاری شده برای اورینگ با الکل شسته شده و اورینگ‌ها با گریس مخصوص خلأ چرب و در محل موردنظر قرار داده شدند، سپس مازول‌های آشکارساز باهم به حالت سری اتصال داده شد. در مرحله آخر، دو سیم خروجی با هویه به BNC‌های موجود در صفحه فلنجی اتصال داده شد. به منظور آماده‌سازی نمونه برای خلأ و ورود گاز نیز از شیر پنوماتیکی  $\frac{1}{4}$  اینچی استفاده شد. پس از تعبیه شیر، جهت تخلیه هوا به‌دستگاه پمپ خلأ آلکاتل<sup>۲</sup> وصل شد و پس از اتمام فرایند تخلیه، گاز آرگون ۹۹/۹۹٪ به داخل آشکارساز انتقال داده شد.

#### ۲.۳ آزمایش آشکارساز در ستون حرارتی رآکتور

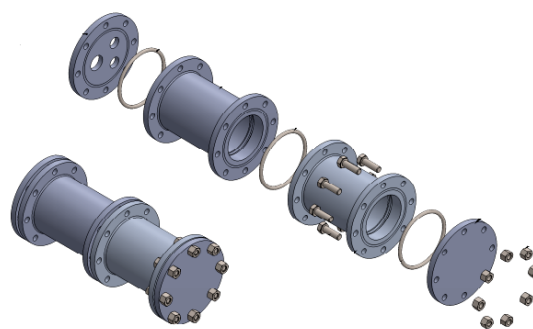
##### تحقیقاتی تهران

پس از انتخاب جنس صفحه نگه‌دارنده، با توجه به این مطلب که در آشکارسازهای نوترون، یکی از عوامل تعیین‌کننده در انتخاب مواد تشکیل‌دهنده بدنه، در نظر گرفتن اکتیو شدگی ماده می‌باشد، آلومینیوم به دلیل واپاشی نسبتاً سریع در مواقع اکتیو شدن، برای بدنه آشکارساز مورد استفاده قرار گرفت.

#### ۴.۲ طراحی بدنه آشکارساز با استفاده از

##### نرم‌افزار SolidWorks2013

سالیدورکس یک مدل‌ساز برای مدل‌سازی جامدات است که مبتنی بر پاراسالید<sup>۱</sup> بوده و از رویکرد پارامتری مبتنی بر ویژگی برای ساخت مدل‌ها و مونتاژها استفاده می‌کند. در این طراحی، از ۴ قطعه آشکارساز با قابلیت نگهداری ۲ صفحه فیبر استخوان با ۱۲ مهره در هر صفحه استفاده شد (در طراحی ۲ قطعه اجزای آشکارساز نمایش داده شده است).



شکل (۳): نمای از بدنه آشکارساز طراحی شده

بانرم‌افزار SolidWorks 2013

#### ۵.۲ سیستم جمع‌آوری داده‌های آشکارساز

با توجه به اینکه مقدار ولتاژ تولید شده در ترموکوپل‌ها به‌ازای تغییرات دمایی بسیار کوچک است، ولتاژ تولید شده نیاز به تقویت دارد. همچنین برای ثبت اطلاعات ارسالی نیازمند استفاده از سیستم پردازنده است.

این سیستم متشکل از بخش‌های پیش‌تقویت‌کننده، تقویت‌کننده و پردازنده سیستم است.

تا قدرت ۴ مگاواتی شروع به کار کرد. بعد از خاموشی رآکتور نیز دریافت اطلاعات برای اطمینان از پاسخ‌گیری همچنان ادامه داشت. آشکارساز قابلیت ثبت داده از قدرت ۱/۵ مگاوات را در میکروکنترلر داشته است که مقدار ۲۰ میلی‌ولت تغییرات را در بازه ۱/۵ تا ۲ مگاوات ثبت کرده است.

### ۳.۳. آزمایش فویل‌های ایندیم در ستون حرارتی

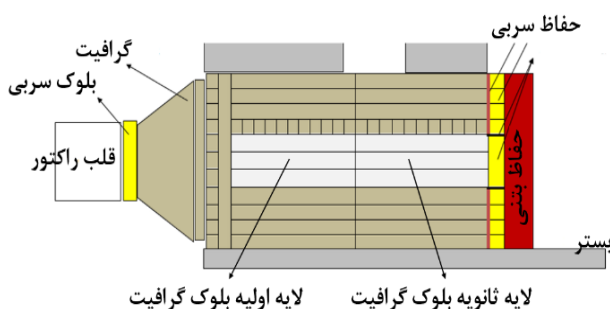
برای به‌دست‌آوردن آستانه عملکرد آشکارساز، آزمایش دیگری برای محاسبه شار در محل آشکارساز با استفاده از ۲ فویل ایندیمی، یکی بدون کاور و دیگری با کاور کادمیمی انجام شد. فویل ایندیمی با کاور برای محاسبات شار نوترون فوق حرارتی و فویل بدون کاور برای محاسبات شار نوترون حرارتی و فوق حرارتی می‌باشد. نمونه‌ها روی نگه‌دارنده‌ای از جنس مقوا نصب شد و در مکان قرارگیری آشکارساز قرارداد شد، سپس نمونه‌ها به مدت یک ساعت در قدرت ۲ مگاواتی تحت تابش قرار گرفت و بعد از خاموش کردن رآکتور، ستون حرارتی رآکتور تخلیه و پولک‌ها در داخل کن<sup>۱</sup> به آزمایشگاه فیزیک نوترون انتقال داده شد. نمونه با کاور با گذشت یک نیمه‌عمر شمارش شد و به دلیل اکتیویته بالا نمونه بدون کاور بعد از گذشت ۵ نیمه‌عمر مورد شمارش قرار گرفت و تصحیح زمانی نیمه‌عمرهای سپری شده در فعالیت فویل‌ها اعمال شد تا از روی اکتیویته نمونه، شار نوترون حرارتی در ستون حرارتی در محل قرارگیری آشکارساز به‌دست آید.



شکل (۶): بارگذاری فویل‌های ایندیم در محل قرارگیری آشکارساز در ستون حرارتی رآکتور تحقیقاتی تهران

پس از بررسی‌های انجام‌گرفته درباره انجام شرایط آزمایش و با توجه به این مطلب که آشکارساز ترموپیلی در رده آشکارسازهای شار متوسط به بالا می‌باشد، ستون حرارتی رآکتور تحقیقاتی تهران برای بارگذاری آشکارساز انتخاب شد.

ساختار ستون حرارتی به‌گونه‌ای است که می‌توان به راحتی تعداد ۹ عدد بلوک گرافیتی را از لایه اول خارج کرد تا یک ستون خالی به طول ۱۳۰ سانتی‌متر با مقطع مربعی به ضلع ۳۰ سانتی‌متر ایجاد گردد. در این آزمایش، لایه اولیه که شامل ۹ عدد بلوک گرافیتی است، برداشته شد و در لایه دوم نیز برای ایجاد تونلی از شار نوترون حرارتی و انتقال شار بیشینه، بلوک گرافیتی مرکزی و بالایی برای آزمایش آشکارساز و فویل برداشته شد (شکل ۶ نمای حذف بلوک‌های گرافیتی را از ابتدای ستون حرارتی نشان می‌دهد) [۱۶-۱۷].



شکل (۴): ساختار رآکتور تحقیقاتی تهران برای ستون حرارتی [۱۷]



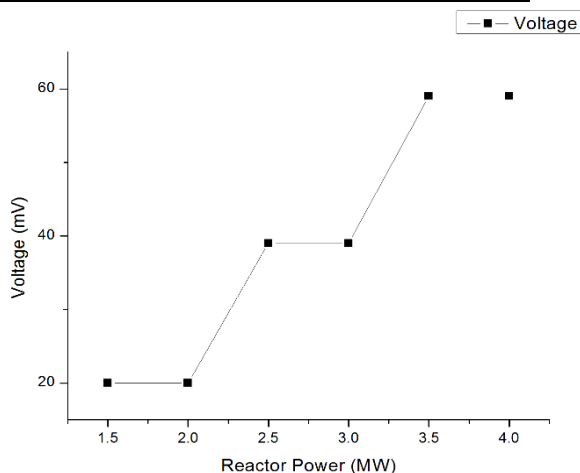
شکل (۵): بارگذاری آشکارساز ترموپیلی در ابتدای ستون حرارتی

آشکارساز در ۳۰ سانتی‌متری از ابتدای ستون حرارتی قرار داده شد و اتصالات برقرار شد. سپس رآکتور از حالت خاموش

مقدار شار نوترون حرارتی در ستون حرارتی در مکان مدنظر  $10^8 \times 1.034735 \times 10^{-2} \text{ n/cm}^2\text{-s}$  به دست آمد، نسبت کاور کادمیمی که معادل نسبت اکتیویته فویل ایندیم بدون کاور به فویل ایندیم با کاور است، نیز ۴۴۰ به دست آمد. داده‌های مربوط به شار نوترون حرارتی در قدرت‌های مختلف رآکتور تحقیقاتی تهران به صورت جدول (۴) به دست می‌آید که حاکی از آستانه پاسخ‌گویی آشکارساز در شار  $10^8 \times 1.0526 \text{ n/cm}^2\text{-s}$  است و با توجه به افزایش مقدار ولتاژ تولیدی در بازه‌های ۱/۵-۲/۵، ۲/۵-۳/۵ و ۳/۵-۴ مگاواتی نتایج نشان از این مطلب دارد که عملکرد آشکارساز نسبت به افزایش قدرت رآکتور، خطی می‌باشد.

جدول(۴): داده‌های شار نوترون حرارتی و مقادیر ولتاژ متناسب بر حسب قدرترآکتور تحقیقاتی تهران

قدرت رآکتور	شار نوترون حرارتی ( $\text{n/cm}^2\text{-s}$ )	مقدار ولتاژ (mV)
۱/۵ مگاوات	$1.0526 \times 10^8$	۲۰
۲ مگاوات	$2.0347 \times 10^8$	۲۰
۲/۵ مگاوات	$2.0543 \times 10^8$	۳۹
۳ مگاوات	$3.0521 \times 10^8$	۳۹
۳/۵ مگاوات	$3.067 \times 10^8$	۵۹
۴ مگاوات	$4.0694 \times 10^8$	۵۹



شکل (۷): عملکرد آشکارساز نسبت به قدرت رآکتور

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

آشکارساز ترموپیلی نوترون ساخته شده با قابلیت جبران سازی پاسخ پرتوهای گاما، در رآکتور تحقیقاتی تهران مورد آزمایش قرار گرفت. پاسخ آشکارساز نسبت به شار نوترون حرارتی

۱.۳.۳. نتایج حاصل از آنالیز داده‌های آزمایش فویل ایندیم نتایج حاصل از آزمایش فویل‌های ایندیم در جداول (۱)، (۲) و (۳) آورده شده‌اند.

جدول(۱): آنالیز داده‌های به دست آمده از ایندیم بدون کاور

پهنای نیم بیشینه بر حسب keV	مجموع شمارش‌ها	شمارش زمینه	انرژی مرکزی قله	هسته اتم
۱/۷۶۶	۴۵۸۷۸	۳۷۱۸	۱۰۹۷/۲۷	In-116m
۱/۹۲	۵۸۰۰۵	۱۰۵۹	۱۲۹۳/۵۸	In-116m

جدول(۲): آنالیز داده‌های به دست آمده از ایندیم با کاور کادمیمی

پهنای نیم بیشینه بر حسب keV	مجموع شمارش‌ها	شمارش زمینه	انرژی مرکزی قله	هسته اتم
۱/۶۹۴	۶۳۰۹	۴۷۹	۱۰۹۷/۲۷	In-116m
۱/۸۹۲	۸۱۲۹	۱۰۳	۱۲۹۳/۵۸	In-116m

جدول(۳): اکتیویته به دست آمده برای فویل‌ها از آزمایش

نوع فویل	اکتیویته زمان شمارش (بکرل)	اکتیویته تصحیحی (بکرل)
ایندیم بدون کاور	$1.7505 \times 10^6$	$1.0834 \times 10^7$
ایندیم با کاور	$1.3422 \times 10^4$	$2.4676 \times 10^4$

برای به دست آوردن بازده شمارش گاما، از چشمه استاندارد  $^{152}\text{Eu}$  استفاده شد. طیف سنجی گاما با استفاده از آشکارساز  $\text{HPGe}^1$  صورت گرفت. نرم‌افزار مورد استفاده برای آنالیز داده‌های به دست آمده، OMNIGAM و نرم‌افزار مورد استفاده برای آنالیز طیف به دست آمده، Mastro می‌باشد که پس از انجام محاسبات مربوط به فعال‌سازی:

$$A = N\lambda = n\sigma\phi(1 - e^{-\lambda t_0}) = A_s(1 - e^{-\lambda t_0}) \quad (3)$$

$A$  اکتیویته فویل،  $\lambda$  ثابت واپاشی نمونه پرتوزا،  $N$  تعداد اتم‌های پرتوزا،  $n$  تعداد اتم‌های هدف،  $\phi$  شار نوترون و  $A_s$  اکتیویته اشباع است.

با قابلیت چرخش، به منظور افزایش سیگنال و جذب حداکثری نوترون‌های حرارتی موجود در مسیر آشکارساز است. تشابه نتایج به دست آمده برای شار نوترون حرارتی در ستون حرارتی رآکتور تحقیقاتی تهران با نتایج آزمایشی مشابه توسط گروه کاسه‌ساز و همکاران مورد تأیید قرار گرفت [۱۴].

### ۵. تشکر و قدردانی

در اینجا لازم است که از همه کارکنان پژوهشکده فیزیک و شتابگر تهران و کرج، الکترونیک هسته‌ای کرج و پژوهشکده رآکتور تهران که در ساخت و انجام آزمایش‌ها صمیمانه همکاری کردند، تشکر و قدردانی شود.

به صورت پلکانی بوده، به طوری که می‌توان گفت برای شار بالاتر از  $1.0 \times 10^{26} \text{ n/cm}^2\text{-s}$  (آستانه پاسخ‌دهی آشکارساز)، به ازای افزایش شار به مقدار  $10^8 \text{ n/cm}^2\text{-s}$ ، ولتاژ خروجی آشکارساز تقریباً ۲۰ میلی‌ولت افزایش می‌یابد. آستانه پاسخ‌دهی این آشکارساز ۶/۶۶ برابر نسبت به پایین‌ترین آستانه گزارش شده توسط آشکارسازهای مشابه، کمتر است. کاهش آستانه پاسخ‌دهی، ناشی از بهینه‌سازی انجام شده در ساخت مهره‌های کاربید بور، با استفاده از پودر ۵ میکرونی این ماده و به روش تف‌جوشی در دمای بهینه ۶۳۰ درجه سلسیوس و به کارگیری صفحات متوالی و

### ۶. مراجع

- [1] N. Tsoulfanidis, S. Landsberger. Measurement and detection of radiation, CRCpress, (2013).
- [2] G.F. Knoll. Radiation detection and measurement, John Wiley & Sons, (2010).
- [3] G. Barbaras, J. Farr, J. Kuranz. Design and construction of boron coated thermocouple for use neutron field, Public Domain, Google-digitized, 2485 (1949).
- [4] A.C.A. Lapsley. Compact neutron-sensitive thermopile, Argonne National Lab, 4869 (1952).
- [5] T.A.J. Jaques, H. A. Ballinger, F. Wade. Neutron detectors for reactor instrumentation, Proceedings of the IEE-Part I: General, 100 (1953) 110-116.
- [6] R. Cervellati, R. Gislou, B. Rispoli. A study on some models of neutron thermopiles, Nuclear Instruments and Methods, 45 (1966) 221-232.
- [7] Y. K. Guskov, A. V. Zvonarev. Inst. and Exp, Tech, 5 (1959).
- [8] A. Mary et al. Development of a gamma compensated boron lined ionization chamber for reactor safety and control applications, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 580 (2007) 1395-1399.
- [9] S.D. McGregor, et al. Design considerations for thin film coated semiconductor thermal neutron detectors— I, basics regarding alpha particle emitting neutron reactive films, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 500 (2003) 272-308.
- [10] I.D. Garber, R.R. Kinsey. Neutron cross sections. Volume II, Curves, Brookhaven National Lab, (1976).
- [11] V. McLane, C.L. Dunford, P.F. Rose. Neutron cross sections: Volume 2, Neutron cross section curves, Brookhaven National Lab, (1988).
- [12] G. Gervino, et al. Preliminary results of a new boron coated neutron detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 718 (2013) 143-144.
- [13] M. Barsoum, M.W. Barsoum. Fundamentals of ceramics, CRC Press, (2002).
- [14] N.M. Rahaman. Sintering of Ceramics, New York, Plenum Press, (2008).
- [15] Y.M. Chiang, D.P. Kingery. Physical Ceramics Principles for Ceramic Science and Engineering, New York, John Wiley & Sons, (2007).
- [16] Y. Kasesaz, et al. A feasibility study of the Tehran research reactor as a neutron source for BNCT, Applied Radiation and Isotopes, 90 (2014) 132-137.
- [17] Y. Kasesaz, et al. Design and construction of a thermal neutron beam for BNCT at Tehran Research Reactor, Applied Radiation and Isotopes, 94 (2014) 149-151.