

Investigating the type of material and coating of neutron chopper blades on the amount of thermal neutron absorption

Amin Omidi¹, Mojtaba Tajik^{*1}, Esmail Bayat²

¹Department of Physics, Damghan University, Damghan, Iran

² Nuclear Science and Technology Research Center, AEOI, Tehran, Iran

Received: 13.02.2024 Final revised:04.05.2024 Accepted: 20.05.2024

Doi: [10.22055/jrmb.2024.19408](https://doi.org/10.22055/jrmb.2024.19408)

Abstract

Neutron choppers, which work with rotating blades and remove neutrons with unwanted energy, can allow neutrons with certain energy to pass through. In the design of a neutron velocity selector and the crucial role of these blades in its operation, simulation and experimental studies were performed to investigate the material and type of coating of the blades in relation to thermal neutron absorption. In this study, blades made of cadmium, aluminum, and carbon fiber with different coatings were exposed to thermal neutrons, and the neutron transmission was calculated using the MCNPX code. Based on the simulation results, blades with cadmium coatings and coatings of B₄C, LiF, and H₃BO₃ with specific thicknesses were designed. The thermal neutron absorption of the constructed blades was measured in a thermal neutron flux from an Am-Be source using a BF₃ detector. The results show that the cadmium blade without coating (1 mm thick), the aluminum blade (0.5 mm thick), and the carbon fiber blade (0.9 mm thick), both with B₄C coatings, have the highest thermal neutron absorption values. The simulation and experimental results show that a B₄C coating with a concentration of 35 – 45 gr/cm^2 is suitable for neutron velocity selector blades.

Keywords: Neutron chopper, Thermal neutron, Blade coating, Neutron absorber

* Corresponding Author: tajik@du.ac.ir



بررسی جنس و نوع پوشش پره‌های برشگر نوترون در میزان جذب نوترون

حرارتی

امین امیدی^۱، مجتبی تاجیک^{۱*}، اسماعیل بیات^۲

^۱ گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

^۲ پژوهشگاه علوم فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴ ویرایش نهایی: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۳۱

Doi: [10.22055/jrmb.2024.19408](https://doi.org/10.22055/jrmb.2024.19408)

چکیده

گزینه‌گر سرعت نوترونی با استفاده از پره‌های چرخان و حذف نوترون‌های دارای انرژی ناخواسته، می‌تواند نوترون‌هایی با انرژی مشخص را عبور دهد. در راستای مراحل ساخت یک دستگاه گزینه‌گر سرعت نوترون و نقش کلیدی این پره‌ها در عملکرد این دستگاه، مطالعات شبیه‌سازی و تجربی، به منظور بررسی جنس و نوع پوشش پره‌ها در میزان جذب نوترون حرارتی انجام شد. در این مطالعه پره‌هایی از جنس کادمیم، آلومینیوم و فیبر کربن با پوشش‌های مختلف در معرض نوترون‌های حرارتی قرار گرفت و میزان عبور نوترون‌ها با استفاده از کد MCNPX محاسبه شد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی به دست آمده، ساخت پره‌ها با پوشش کادمیم و با پوشش‌های B_4C ، LiF و H_3BO_3 با ضخامت‌های مشخص انجام شد. میزان جذب نوترون‌های حرارتی برای پره‌های ساخته شده در یک شار نوترونی حرارتی حاصل از چشمه Am-Bc و با استفاده از آشکارساز BF_3 اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد پره کادمیم با ضخامت ۱mm بدون پوشش، پره آلومینیوم به ضخامت ۰.۵mm، پره فیبرکربن به ضخامت ۰.۹mm هر دو با پوشش B_4C ، به ترتیب بیشترین میزان جذب نوترون‌های حرارتی را دارند. نتایج شبیه‌سازی و تجربی نشان داد که پوشش B_4C با غلظت ۳۵-۴۵ گرم بر سانتی‌متر مربع برای پره‌های گزینه‌گر سرعت نوترون مناسب است.

کلیدواژگان: برشگر نوترون، نوترون حرارتی، پوشش پره، جاذب نوترون

مقدمه

برشگرها عمدتاً به سه دسته تقسیم می‌شوند: (۱) برشگرهای فرمی (Fermi Choppers)، (۲) برشگرهای دیسکی (Disk Choppers)، (۳) گزینه‌گرهای سرعت نوترون (Neutron Velocity Selector) [۳]. در طراحی هر سه مدل برشگر، نوترون‌های حرارتی گسیل شده از چشمه که دارای سرعت (انرژی) مناسبی هستند از یک شکاف باریک عبور می‌کنند و بقیه نوترون‌های گسیلی از چشمه با ماده جاذب پوشانیده

برشگرهای نوترون از سال ۱۹۳۴ تاکنون توسط مراکز تحقیقاتی مختلف توسعه داده شده‌اند. این دستگاه‌ها عموماً ابزار مکانیکی دوار هستند که با سرعت زیاد می‌چرخند. این دستگاه با استفاده از دیسک و پره‌های چرخان، انتخاب نوترون‌هایی با سرعت‌های مختلف را فراهم می‌کند و این امر به محققان اجازه می‌دهد تا بر اساس سرعت نوترون‌ها، آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل‌های مختلفی را انجام دهند [۱، ۲].

*نویسنده مسئول: tajik@du.ac.ir

که چه نوترون‌هایی اجازه عبور داشته باشند. تعداد پره‌ها و همچنین ضخامت آنها بر شدت پالس‌های نوترونی تأثیر می‌گذارد. جنس پره‌ها در گزینشگر نوترون بر اساس چند عامل کلیدی شامل خواص جذب نوترون، استحکام و دوام، هدایت حرارتی و وزن تعیین می‌شود. علاوه بر این، پوشش مورد استفاده برای پره‌ها به‌طور قابل توجهی بر میزان جذب نوترون حرارتی تأثیر می‌گذارد. انتخاب نهایی جنس و نوع پوشش پره‌ها به تعادل بین این عوامل ذکر شده بستگی دارد [۲,۶,۷]. در برخی موارد، از مواد ترکیبی برای ساخت پره‌ها استفاده می‌شود تا مزایای چندین ماده را به‌طور همزمان به‌دست آورند.

مطالعات بسیار محدودی در زمینه برشگرهای نوترون در کشور انجام شده است. در سال ۱۳۷۷ مددی و پذیرنده مطالعه‌ای در زمینه یک برشگر فرمی انجام دادند [۸]. با توجه به نیاز مراکز علمی و تحقیقاتی کشور به طیف سنجی و محاسبه سطح مقطع نوترون با مواد مختلف و مطالعه بسیار محدود در این زمینه در کشور، مطالعه نظری و تجربی در بحث برشگرهای نوترون ضروری به‌نظر می‌رسد. با توجه به اینکه پره‌ها نقش اساسی در عملکرد گزینشگر سرعت نوترون دارند. در گام اول تحقیق و در راستای ساخت دستگاه گزینشگر نوترون، نقش جنس و نوع پوشش پره‌ها بر میزان جذب نوترون‌های حرارتی به‌صورت نظری و تجربی بررسی شده است.

کارهای شبیه‌سازی

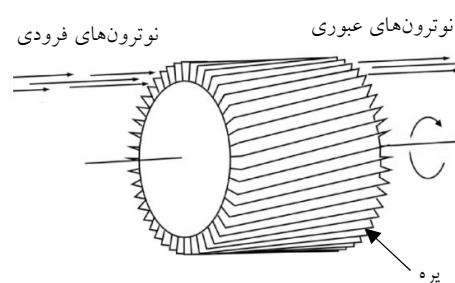
با بررسی و مطالعه کارهای محققین مشخص گردید که جهت جذب نوترون‌های حرارتی عمدتاً از کادمیم (بیشتر در برشگر فرمی)، بور (^{10}B) یا مواد دارای عنصر بور نظیر کاربید بور (B_4C) و اسید بوریک (H_3BO_3)، مواد دارای عنصر لیتیوم مانند فلئورید لیتیوم (LiF)

شده بر روی دیسک و یا پره‌ها جذب می‌شوند در نتیجه ذرات خروجی از دستگاه با دقت مناسبی دارای سرعت (انرژی) یکسان می‌باشند [۳].

برشگرهای نوترونی کاربرد بسیاری در زمینه‌های مختلف از قبیل اندازه‌گیری سطح مقطع نوترون حرارتی با مواد مختلف، مطالعات اپتیک نوترونی برای بررسی خواص مغناطیس، تجزیه و تحلیل ساختارهای پروتئینی و بررسی تنش و کرنش در موتورهای جت دارند [۲,۴,۵].

گزینشگر سرعت نوترون شامل آرایه‌ای از شکاف‌های مارپیچی حول یک استوانه مرکزی است که درون آنها ورق‌های (پره‌های) نازک پوشانیده شده با مواد جاذب نوترون قرار دارد. این استوانه با سرعت زیاد می‌چرخد، محور چرخش معمولاً با جهت اسمی تابش پرتو نوترون موازی است [۶,۷].

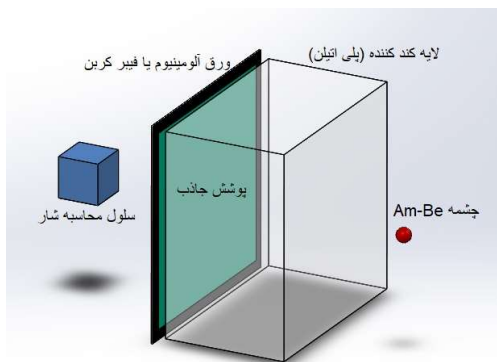
در شکل ۱ شماتیکی از پره‌ها بر روی محور اصلی گزینشگر سرعت نوترون نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیک گزینشگر سرعت نوترون.

پره‌ها نقش اساسی در عملکرد گزینشگر نوترون دارند. پره‌ها به‌صورت چرخشی عمل می‌کنند و به‌طور متناوب مسیر عبور نوترون‌ها را مسدود و باز می‌کنند. این امر منجر به تولید پالس‌های نوترونی با عرض و انرژی مشخص می‌شود. سرعت چرخش پره‌ها تعیین می‌کند

ورقه‌ها در موقعیت سلول فرضی (مطابق با شکل ۲) محاسبه می‌شود. در مرحله اول شبیه‌سازی ورق‌های آلومینیوم و فیبر کربن ابتدا بدون پوشش و در مرحله دوم با پوشش‌های متفاوت و ضخامت‌های مختلف در نظر گرفته شد. به‌منظور دستیابی به خطای محاسباتی کمتر از یک درصد در این شبیه‌سازی‌ها تعداد ذرات برابر 5×10^7 در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی در جداول ۲ و ۳ آورده شده است.



شکل ۲. شماتیکی از چیدمان و هندسه شبیه‌سازی.

آماده‌سازی نمونه‌ها

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی ورقه‌ها با پوشش‌های مختلفی از مواد جاذب نوترون، جهت آزمایش‌های تجربی، نمونه‌های مختلف از جنس آلومینیوم و فیبر کربن در آزمایشگاه ساخته شد. ابتدا ورق آلومینیوم به ضخامت 0.5 mm تهیه گردید سپس با استفاده از دستگاه برش گیوتین به ابعاد $10 \times 10 \text{ cm}$ برش داده شد.

پوشش کادمیم بر روی نمونه‌ها به روش آبکاری الکترولیز انجام شد. بسته به اینکه نمونه چه مدت در وان آبکاری قرار می‌گیرد ضخامت پوشش ایجاد شده بر روی نمونه افزایش خواهد یافت. لذا برای نمونه اول

و مواد دارای عنصر گادولینیوم (Gd) در برشگر استفاده می‌شود [۹-۱۱]. در جدول ۱ سطح مقطع نوترون حرارتی در انرژی 0.0253 eV با معروفترین مواد جاذب نوترون ارایه شده است.

جدول ۱. سطح مقطع جذب عناصر مختلف با نوترون حرارتی [۱۲].

ردیف	نام عنصر	حرارتی	سطح مقطع جذب با نوترون
۱	^{10}B	3840	0.025 eV (بارن)
۲	^{113}Cd	20000	
۳	^{157}Gd	254000	

در برخی از مراجع جهت پوشش دهی B_4C از روش پلاسما اسپری استفاده شده است [۱۳].

اما اغلب برای پوشش دهی موادی مثل LiF و B_4C از مخلوط پودر (دانه بندی کمتر از 70 میکرون) این مواد در رزین اپوکسی با درصد وزنی مناسب (معمولاً 15%) استفاده می‌شود که پس از همگن‌سازی به وسیله اسپری بر روی سطح ورق‌های آلومینیوم و یا فیبر کربن پاشیده می‌شود.

با توجه به روش‌های پوشش دهی ذکر شده و بررسی مواد موجود در آزمایشگاه و مواد قابل تهیه، مواد مطابق جدول ۲ برای شبیه‌سازی انتخاب گردید.

در شبیه‌سازی پره‌های برشگر به صورت ورق نازک آلومینیوم و یا فیبر کربن به طول 10 cm و عرض 10 cm در فاصله 10 cm در معرض چشمه نوترون Am-Be مطابق با شکل ۲ قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است نوترون‌های گسیلی از این چشمه به وسیله یک لایه پلی اتیلن به ضخامت 6 cm حرارتی می‌شوند. با استفاده از کد MCNPX2.7 و تالی شار حجمی F4، شار نوترون حرارتی در پشت

برای آماده سازی نمونه‌های بعدی ورق‌های فیبر کربن به ضخامت 0.9 mm تهیه گردید. این ورق‌ها هم به وسیله گیوتین به ابعاد $10 \times 10 \text{ mm}$ برش داده شد. پودر LiF ، B_4C و H_3BO_3 تهیه گردید. با توجه به درشت بودن دانه‌بندی پودرها، ابتدا پودرها آسیاب گردید تا دانه‌بندی آن ریزتر شود سپس از الک با دانه بندی 70 میکرون عبور داده شد، ذرات درشت‌تر جدا گردید. طبق آزمایشات انجام شده وجود ذرات با دانه بندی بزرگتر باعث عدم یکنواختی در سطح پوشش و زبری آن می‌شود.

برای ایجاد پوشش LiF ، B_4C و H_3BO_3 بر روی نمونه‌ها از روش رنگ‌آمیزی با پیستوله رنگ استفاده گردید. بدین منظور رزین اپوکسی (کلر اپوکسی Epcprime 506) به همراه هاردنر (هاردنر اپوکسی پلی امید Epchardnere 865) آن تهیه شد. با نسبت وزنی مختلف رزین، هاردنر و مواد جاذب مورد نظر مخلوط گردید و پس از هم‌زدن و یکنواختی مناسب، محلول حاصل درون پیستوله ریخته شد و بر روی ورق‌های آلومینیوم و فیبر کربن آماده شده اسپری شد. لازم به ذکر است که سطح نمونه‌ها باید کاملاً عاری از چربی باشد و محلول هر چند دقیقه یکبار مجدداً هم زده شود تا ته‌نشین نگردد. در شکل ۴ پوشش‌دهی نمونه‌ها نشان داده شده است.

طبق آزمایشات انجام شده جاذب‌های LiF و B_4C به راحتی با محلول رزین و هاردنر مخلوط شده و محلول کاملاً یکنواخت مناسبی را ایجاد می‌کنند در نتیجه پوشش کاملاً یکنواختی روی سطح نمونه‌ها ایجاد می‌شود. به صورتی که به نظر می‌رسد سطح نمونه‌ها با رنگ پوشش داده شده است. اما H_3BO_3 به راحتی داخل محلول رزین حل نشده و به حالت کلوخه در می‌آید. در نتیجه پس از پوشش‌دهی سطح غیر یکنواخت و دارای پستی و بلندی می‌باشد.

یک طرف نمونه با رزین مخصوص پوشش داده شد تا کادمیم در سطح آن رسوب نکند و فقط در یک سمت آن پوشش کادمیم انجام شود. این قطعه به مدت 40 دقیقه در وان آبکاری قرار داده شد و بر روی یک طرف آن 40 میکرون پوشش کادمیم نشانده شد.

برای نمونه دوم کادمیم، دو طرف ورق آلومینیوم آماده سازی شد و به مدت 50 دقیقه در وان آبکاری قرارداده شد. در نتیجه در هر طرف ورق 50 میکرون و در نتیجه در دو طرف ورق 100 میکرون لایه کادمیم ایجاد گردید. مشاهده گردید که با افزایش زمان لایه کادمیم افزایش نیافته و پوشش ایجاد شده بر روی ورق آلومینیوم پوسته پوسته شده و از آن جدا می‌گردید به همین علت امکان ایجاد پوشش کادمیم بیشتر بر روی ورق آلومینیوم میسر نگردید.

به منظور جلوگیری از اکسید شدن لایه کادمیم، سطح نمونه‌ها کرومات‌ها گردید. در شکل ۳ ورق‌های آلومینیوم پوشش داده شده با کادمیم با ضخامت‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۳. ورق آلومینیوم پوشش داده شده با کادمیم.

بررسی میزان جذب نوترونهای حرارتی ورقه‌ها

به منظور بررسی میزان جذب نوترونهای حرارتی ورق‌های آلومینیوم و فیبر کربن با پوشش‌های مختلف چیدمانی مطابق با شکل ۵ در آزمایشگاه تهیه شد. در این چیدمان چشمه نوترون Am-Be با آهنگ تابش حدود 10^4 الی 10^5 نوترون در ثانیه در داخل محفظه پلی اتیلنی به قطر ۸۰ سانتی متر قرار داده شده است. برای کند کردن نوترون‌های بر روی دهانه خروجی محفظه از ورق پلی اتیلن به ضخامت ۶cm استفاده شد. با فاصله یک سانتی متر از ورق‌های تفلونی یک آشکارساز BF_3 جهت شمارش نوترون‌های عبوری از ورق با پوشش جذب قرار داده شد. این آشکارساز نوترونی BF_3 مدل ۲۰۲۹ ساخت شرکت LND با هندسه استوانه‌ای شکل دارای طول ۳۱/۱۱ cm و قطر ۲/۴۳ cm می‌باشد.

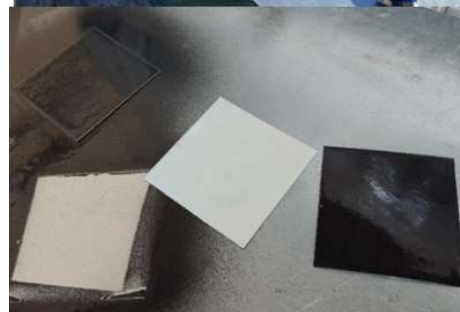
مطابق با چیدمان شکل ۵ و چیدمان الکترونیکی شکل ۶، برای هر نمونه سه بار اندازه‌گیری انجام شد. در هر بار تعداد ذرات عبور کرده از ورق نمونه در مدت ۱۲۰ ثانیه با استفاده از آشکارساز BF_3 شمارش گردید. پس از میانگین‌گیری از مقادیر هر سه بار اندازه‌گیری، شار عبوری از هر ورقه به دست آمد. این نتایج در جدول ۴ آمده است.



شکل ۵. چیدمان اجزای آزمایش به منظور اندازه‌گیری شار عبوری از جاذب‌های مختلف.

لازم به ذکر است جهت آماده‌سازی محلول ابتدا باید رزین با ماده جاذب مخلوط شود و خوب هم زده شود سپس هاردنر به محلول اضافه گردد، در غیر این صورت اگر هاردنر از ابتدا اضافه شود، با توجه به زمان بالای مورد نیاز برای هم زدن و یکنواخت کردن محلول، محلول سفت و غیر قابل استفاده می‌گردد. نمونه‌ها جهت خشک شدن باید بر روی سطح کاملاً صاف قرارداده شوند در غیر این صورت محلول قبل از خشک شدن در جهت شیب میز کار یا سطح زمین حرکت خواهد کرد و ضخامت پوشش در قسمت‌های مختلف، متفاوت خواهد شد.

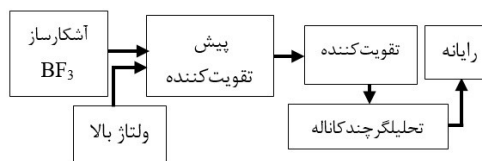
نمونه‌های پوشش داده شده پس از ۲۴ ساعت، جهت انجام تست‌های آزمایشگاهی آماده می‌باشند.



شکل ۴. ایجاد پوشش بر روی نمونه‌ها با پیستوله و نمونه‌های آماده شده.

جدول ۲. شار عبوری نوترون حرارتی از جاذب‌های مختلف به‌ازای یک ذره گسیلی.

ردیف	جنس پوشش	جنس پره - ضخامت	ذره/cm ²
۱	بدون پوشش	ورق کادمیم - ۱ mm	۰,۰۵۸۰۰۴۶
۲	پوشش اپوکسی + ۱۵% B ₄ C	ورق فیبر کربن - ۱mm	۰,۰۶۲۱۴۲۷
۳	پوشش اپوکسی + ۱۵% LiF	ورق فیبر کربن - ۱mm	۰,۰۶۲۲۶۹
۴	پوشش اپوکسی + ۱۵% B ₄ C	ورق آلومینیوم - ۰,۵mm	۰,۰۶۲۵۷۹
۵	پوشش ۱۰۰ میکرون کادمیم	ورق آلومینیوم - ۰,۵ mm	۰,۰۶۲۷۳۹۳
۶	پوشش اپوکسی + ۱۵% LiF	ورق آلومینیوم - ۰,۵mm	۰,۰۶۲۷۰۶۸
۷	پوشش اپوکسی + ۱۵% H ₃ BO ₃	ورق آلومینیوم - ۰,۵mm	۰,۰۶۳۶۷۶
۸	پوشش ۴۰ میکرون کادمیم	ورق آلومینیوم - ۰,۵mm	۰,۰۶۵۱۴۴۳
۹	بدون پوشش	ورق فیبر کربن - ۱mm	۰,۰۶۶۹۶۰۷
۱۰	بدون پوشش	ورق آلومینیوم - ۰,۵mm	۰,۰۶۷۰۶۲۹
۱۱	بدون پوشش	بدون ورق	۰,۰۶۷۷۸۹۶



شکل ۶. چیدمان الکترونیکی آزمایش.

در صورتی که تعداد ذرات شمارش شده برای هر ورقه جاذب را بر تعداد کل ذرات شمارش شده در حالت بدون جاذب (ردیف ۱۱ جدول ۴) تقسیم کنیم، درصد ذرات عبوری از جاذب‌های مختلف (مطابق جدول ۵) به‌دست می‌آید.

نتایج و بحث

نتایج شبیه‌سازی‌ها بر اساس میزان عبور و جذب نوترون برای پره‌ها با جنس و پوشش‌های مختلف در جداول ۲ و ۳ آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهد پره‌های کادمیم با ضخامت ۱mm بدون پوشش با ۱۴,۵ درصد جذب، بیشترین جذب نوترون‌های حرارتی را دارد. پره‌های ورق فیبر کربن به ضخامت ۱mm با پوشش‌های اپوکسی همراه با ۱۵ درصد B₄C و اپوکسی با ۱۵ درصد LiF و پره‌های ورق آلومینیوم به ضخامت ۰,۵mm با پوشش‌های اپوکسی همراه با ۱۵ درصد B₄C به ترتیب با ۸,۴، ۸,۲ و ۷,۷ درصد بیشترین میزان جذب نوترون‌های حرارتی در بین ۱۱ نمونه تعریف شده برای پره‌ها، در جدول ۲ را دارند.

جدول ۳. نتایج شبیه‌سازی درصد عبور نوترون حرارتی از جاذب‌های مختلف.

ردیف (مطابق جدول ۲)	درصد عبور (%)	درصد خطا (%)
۱	۸۵٫۵	۰٫۰۰۰۳
۲	۹۱٫۶	۰٫۰۰۰۲
۳	۹۱٫۸	۰٫۰۰۰۲
۴	۹۲٫۳	۰٫۰۰۰۲
۵	۹۲٫۵۵	۰٫۰۰۰۲
۶	۹۲٫۵	۰٫۰۰۰۲
۷	۹۳٫۹	۰٫۰۰۰۲
۸	۹۶	۰٫۰۰۰۲
۹	۹۸٫۷	۰٫۰۰۰۲
۱۰	۹۸٫۹	۰٫۰۰۰۲
۱۱	۱۰۰	۰٫۰۰۰۲

جدول ۴. نتایج تجربی شار عبوری نوترون حرارتی از جاذب‌های مختلف.

ردیف	نوع ورق	پوشش جاذب	ضخامت پوشش	میانگین ذرات شمارش شده
۱	کادمیم	بدون پوشش	۱ میلی‌متر	۲۴۶
۲	آلومینیوم ۰٫۵mm	B ₄ C	۲۰ گرم بر متر مربع - دو طرف ورق	۳۹۲
۳	فیبرکربن ۰٫۹ mm	B ₄ C	۳۵ گرم بر متر مربع	۴۰۰
۴	آلومینیوم ۰٫۵mm	B ₄ C	۳۵ گرم بر متر مربع	۴۰۴
۵	آلومینیوم ۰٫۵mm	Cd	۱۰۰ میکرون	۴۰۵
۶	فیبرکربن ۰٫۹ mm	LiF	۴۵ گرم بر متر مربع	۴۲۲
۷	آلومینیوم ۰٫۵mm	H ₃ BO ₃	۳۵ گرم بر متر مربع	۴۲۶
۸	آلومینیوم ۰٫۵mm	Cd	۴۰ میکرون	۴۲۹
۹	فیبرکربن ۰٫۹ mm	بدون پوشش	-	۴۳۴
۱۰	آلومینیوم ۰٫۵mm	بدون پوشش	-	۴۳۹
۱۱	بدون ورق	بدون پوشش	-	۴۷۳

نتایج اندازه‌گیری‌های تجربی بر اساس میزان عبور و جذب نوترون برای پره‌ها با جنس آلومینیوم و فیبر کربن و پوشش‌های B₄C، کادمیم، LiF و H₃BO₃ در جدول ۴ آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهد پره‌های کادمیم با ضخامت ۱mm بدون پوشش با ۴۸ درصد جذب، بیشترین جذب نوترون‌های حرارتی را دارد. پره‌های از جنس آلومینیوم به ضخامت با ۰٫۵mm با پوشش‌های B₄C و پره‌های از جنس فیبر کربن به ضخامت با ۰٫۹mm با پوشش B₄C به ترتیب با ۱۷٫۸ و ۱۵٫۵ درصد در رده‌های بیشترین میزان جذب نوترون‌های حرارتی در بین ۱۱ نمونه را دارند.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تجربی در شکل ۷ نشان مقایسه شده است. همخوانی نمودار نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی نشانگر صحت روش ساخت نمونه‌ها و اندازه‌گیری‌های انجام شده را نشان می‌دهد. اختلاف مشاهده شده در نتایج تجربی و شبیه‌سازی به‌خاطر در نظر نگرفتن جزئیات شبیه‌سازی شامل اجزای و ساختار محیط آزمایشگاه شامل میزها، دیوارها

آلومینیوم یا فیبر کربن، نحوه عملکرد برشگرهای نوترون در تعیین جنس و نوع پوشش جاذب نیز مؤثر است. برای برشگر فرمی استفاده از ورق خالص کادمیم به ضخامت ۰/۷ الی ۱ میلی‌متر (نتایج حاصل از ردیف ۱ جدول ۴) مناسب است. در این برشگر ورق کادمیم در شیارهای تعبیه شده در دستگاه قرار می‌گیرد لذا امکان تغییر شکل و ایجاد نابالانسی را ندارد.

برای برشگر دیسکی استفاده از دیسک آلومینیومی و فیبر کربن ترکیب B₄C و رزین اپوکسی، اسپری شده بر روی دیسک با غلظت ۳۵-۴۵ gr/cm² (نتایج حاصل از ردیف ۲ و ۳ جدول ۴) مناسب است.

برای گزینشگر سرعت نوترون به علت سرعت دورانی بالای دستگاه نیازمند کاهش وزن و داشتن استحکام بیشتر در پره‌ها هستیم به همین دلیل پره‌ها عمدتاً از جنس فیبرکربن می‌باشند لذا ترکیب B₄C و رزین اپوکسی اسپری شده بر روی پره با غلظت ۳۵-۴۵ gr/cm² به عنوان ماده جاذب (نتایج حاصل از ردیف ۳ جدول ۴) مناسب است [۱۴].

در برشگرهای دیسکی و گزینشگر سرعت نوترون سرعت دورانی دستگاه در حدود ۲۰۰۰-۸۰۰۰ RPM می‌باشد. بدیهی است استفاده از ورق کادمیم به صورت یکپارچه به علت خواص مکانیکی ضعیف و چگالی بالا، در ساخت پره‌ها و دیسک‌ها میسر نمی‌باشد زیرا سرعت دورانی بالا موجب تغییر شکل ورق کادمیم و ایجاد نابالانسی می‌شود. نابالانسی ایجاد شده موجب ارتعاش زیاد دستگاه و از بین رفتن بلبرینگ‌ها، موتور و تخریب دستگاه خواهد شد.

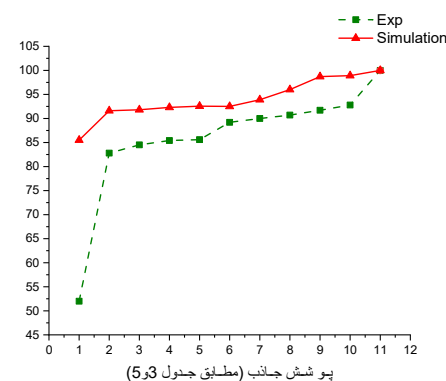
نتیجه‌گیری

یکی از اجزای بسیار مهم در ساخت برشگر نوترون جنس و نوع پوشش پره‌های این برشگر می‌باشد که نقش بسیار مهمی در فیلتر کردن انرژی باریکه نوترون

می‌باشد. این اجزا باعث پراکندگی متعدد نوترون‌ها در محیط آزمایشگاه و تغییر شار نوترون می‌شوند.

جدول ۵. نتایج تجربی درصد عبور نوترون حرارتی از جاذب‌های مختلف.

شماره جاذب (مطابق جدول ۴)	درصد عبور (%)	درصد خطا (%)
۱	۵۲	۷/۳
۲	۸۲/۸	۸/۴
۳	۸۴/۵	۵/۲
۴	۸۵/۴	۶/۶
۵	۸۵/۶	۴/۶
۶	۸۹/۲	۳/۸
۷	۹۰	۵/۱
۸	۹۰/۷	۴/۷
۹	۹۱/۷	۷/۴
۱۰	۹۲/۸	۳/۲
۱۱	۱۰۰	۳/۴



شکل ۷. نتایج مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی برای میزان عبور نوترون‌های حرارتی از جاذب‌های مختلف.

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی علاوه بر در نظر گرفتن پارامترهایی مثل قیمت جاذب، امکان تهیه و نحوه پوشش دهی جاذب بر روی

Physica B: Condensed Matter, 156 (1989) 547-549. [https://doi.org/10.1016/0921-4526\(89\)90727-8](https://doi.org/10.1016/0921-4526(89)90727-8)

[7] A. Poutchkov, Optimization of velocity monochromators for low-power research reactors, Small angle neutron scattering, (2006) 83.

[8] A.P. Sh.Madadi, Design and construction of chopper spectrometer and thermal neutron spectrum measurement, University of Tehran, Tehran, (1998). [In Persian]

[9] R. Becker, S. Bunker, Method for depositing boron-rich coatings, Google Patents, (2005).

[10] D.C. Halverson, G.W. Billings, G.M. Johnston, High neutron absorbing refractory compositions of matter and methods for their manufacture, Google Patents, (1993).

[11] R. Lu, S. Chandrasekaran, W.L. Du Frane, R.L. Landingham, M.A. Worsley, J.D. Kuntz, Complex shaped boron carbides from negative additive manufacturing, Materials & Design, 148 (2018) 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.03.026>

[12] N.J. Carron, An introduction to the passage of energetic particles through matter, Taylor & Francis (2006). DOI 1201/9781420012378

[13] C.-M. Lin, Parameter optimisation of a vacuum plasma spraying process using boron carbide, Journal of thermal spray technology, 21 (2012) 873-881. <https://doi.org/10.1007/s11666-012-9734-5>

[14] A. Omid, M. Tajik, E. Bayat, Design and construction of a neutron chopper and using the time-of-flight method for thermal neutron spectroscopy Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology, In Press. [In Persian] <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1544.2007>

دارند. با هدف ساخت یک برشگر نوترون، مطالعه‌ای به‌صورت تئوری و تجربی به‌منظور بررسی جنس و نوع پوشش پره‌های برشگر نوترون در میزان جذب نوترون حرارتی انجام شد. براساس امکانات موجود و مطالعات قبلی محققین، پره‌هایی با جنس و پوشش‌های مختلف در برشگرهای نوترون مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل برای پره‌ها با پوشش‌های جاذب، با پوشش‌های جاذب استفاده شده به‌وسیله شرکت‌های معتبر سازنده برای انواع برشگر نوترون مطابقت دارد. در پژوهش آینده با توجه به‌نتایج به‌دست آمده، طراحی و ساخت یک دستگاه گزینشگر سرعت نوترون با پره‌هایی از جنس فیبرکربن با پوشش جاذب B_4C انجام خواهد شد.

مرجع‌ها

[1] R. Crawford, Neutron scattering instrumentation. A guide to future directions, (2001).

[2] J. Lu, P. Sabharwall, B. Heidrich, R. Christensen, Advanced manufacturing and instrumentation for neutron chopper design, Journal of Young Investigators, 38 (2020).

[3] R. Lowde, The principles of mechanical neutron-velocity selection, Journal of Nuclear Energy. Part A. Reactor Science, 11 (1960) 69-80. [https://doi.org/10.1016/0368-3265\(60\)90017-7](https://doi.org/10.1016/0368-3265(60)90017-7)

[4] R.F. Álvarez-Estrada, M.L. Calvo, Neutron optics: fundamentals, Advances in Neutron Optics, CRC Press, (2019) 3-78.

[5] E. Fermi, J. Marshall, L. Marshall, A thermal neutron velocity selector and its application to the measurement of the cross section of boron, Physical Review, 72 (1947) 193. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.72.193>

[6] H. Friedrich, V. Wagner, P. Wille, A high-performance neutron velocity selector,