



طراحی و ساخت گزینشگر نوترون و استفاده از روش زمان پرواز جهت طیف‌نگاری نوترون حرارتی

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

۱. گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، صندوق پستی: ۳۱۷۱۶-۴۱۱۶۷، دامغان - ایران

۲. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، صندوق پستی: ۹۷۱۷۵-۶۱۵، بیرجند - ایران

*Email: tajik@du.ac.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۴/۱۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۴/۳۱

چکیده

در این پژوهش طراحی و ساخت دستگاه گزینشگر سرعت نوترون مورد مطالعه قرار گرفت. مطالعات تئوری و تجربی نشان داد که برای کاهش وزن، جلوگیری از نابالانسی، و بهبود عملکرد دستگاه گزینشگر در سرعت‌های بالا، بهتر است پره‌ها و محور اصلی دستگاه از الیاف کربن ساخته شوند. پس از طراحی سایر اجزای دستگاه گزینشگر، ساخت قطعات و مونتاژ دستگاه و سپس آزمون خلأ سیستم انجام و فشار خلأ 3×10^{-2} میلی‌بار ثبت شد. در مرحله بعد، آزمون مکانیکی دستگاه در دوره‌های مختلف از ۳۰۰۰ تا ۱۱۰۰۰ دور بر دقیقه انجام و عملکرد پایداری مکانیکی دستگاه مورد تأیید قرار گرفت. اندازه‌گیری نوترون‌های حرارتی گزینش شده، با استفاده از نوترون‌های چشمه ^{252}Cf انجام شد. نتایج تجربی نشان داد که استفاده از این دستگاه برای اندازه‌گیری انرژی نوترون‌ها در محدوده کمتر از ۰.۰۰۱ eV مناسب است. این دستگاه برای عبور نوترون‌های حرارتی با انرژی ۰.۰۲۵ eV نیازمند موتور با سرعت حدود ۳۵۰۰۰ دور بر دقیقه دارای رمزگذار دور بالاست تا خطای ناشی از اندازه‌گیری زمان پرواز را در حد قابل قبول کاهش یابد.

کلیدواژه‌ها: گزینشگر سرعت نوترون، نوترون حرارتی، چشمه ^{252}Cf ، زمان پرواز

Design and construction of a neutron chopper and using the time-of-flight method for thermal neutron spectroscopy

A. Omid¹, M. Tajik^{1*}, E. Bayat²

1. Department of Nuclear Physics, Faculty of Physics, Damghan University, P.O.Box: 31716-41167, Damghan - Iran

2. Department of Physics, Faculty of Science, University of Birjand, P.O.Box: 97175-615, Birjand - Iran

Research Article

Received: 13.3.2024, Revised: 7.7.2024, Accepted: 21.7.2024

Abstract

In this study, the design and construction of the neutron velocity selector were investigated. Theoretical and experimental studies have shown that it is preferable to construct the blades and the main shaft of the device from carbon fibers to reduce weight, prevent imbalance, and improve performance at high speeds. After designing the other components of the device, manufacturing the parts, and assembling the device, the vacuum system was tested, measuring a vacuum pressure of 3×10^{-2} millibars. In the next phase, the device was mechanically tested at various speeds between 3000 and 11000 rpm, confirming the mechanical stability of the device. The measurement of selected thermal neutrons was carried out using neutrons from a ^{252}Cf source. The experimental results show that this device is suitable for measuring the energy of neutrons in the range of less than 0.001 eV. This device requires a high-speed motor with a rotational speed of approximately 35,000 rpm and a high-resolution encoder to allow the passage of thermal neutrons with an energy of 0.025 eV, in order to reduce the error in time-of-flight measurements to an acceptable level.

Keywords: Neutron velocity selector, Thermal neutron, ^{252}Cf source, Time of flight



۱. مقدمه

گزینشگر نوترون دستگاهی است که برای تنظیم و فیلتر کردن ذرات نوترون در سطوح مختلف انرژی استفاده می‌شود. این دستگاه با استفاده از تیغه‌های گزینشگر چرخان، امکان انتخاب نوترون با سرعت‌های مختلف را فراهم می‌کند. این ویژگی به محققان اجازه می‌دهد تا براساس سرعت نوترون‌ها، آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل‌های مختلفی را انجام دهند [۱]. گزینشگرهای نوترون در کاربردهای مختلفی از جمله پزشکی، صنعت و تحقیقات علمی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این کاربردها شامل مطالعات اپتیک نوترونی برای بررسی خواص مغناطیس، تجزیه و تحلیل ساختارهای پروتئینی، بررسی تنش و کرنش در موتورهای جت [۲]، شناسایی دستگاه‌های منفجره ساختگی [۳] و اندازه‌گیری سطح مقطع‌های ناشناخته واکنش‌های هسته‌ای است [۴]. پس از آن‌که فرمی در سال ۱۹۳۴ میلادی اولین برشگر نوترون را طراحی کرد، همواره تحقیق و توسعه برشگرهای فرمی و دیسکی و گزینشگر سرعت نوترون به مدت نزدیک به ۸۰ سال توسط دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی هسته‌ای ادامه داشته است. این تحقیقات تنها به حوزه طراحی مکانیکی دستگاه مرتبط نبوده و علاوه بر آن شامل نوع مواد جاذب متفاوت نیز است [۵]. در مرجع ۶ خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در حوزه برشگرهای نوترون در دهه‌های اخیر ارائه شده است [۶]. با نگاهی اجمالی به تاریخچه تحقیقات ارائه شده می‌توان دریافت که حوزه تحقیقاتی مربوط به برشگرهای نوترون و گزینشگر سرعت نوترون همواره در حال به‌روزرسانی است تا بتوان خروجی مناسب‌تری از آنها دریافت کرد. علاوه بر تحقیقات اشاره شده در کشورهای پیشرفته صنعتی، در ایران، پذیرنده و همکاران در سال ۱۳۷۷ طراحی و ساخت یک برشگر فرمی را انجام دادند [۷]. همچنین در تحقیق دیگری حسینی و همکاران در سال ۱۳۹۷ با استفاده از نرم‌افزار McStas، گزینشگر سرعت نوترون را شبیه‌سازی نمودند [۸]. با توجه به نیاز مراکز علمی و تحقیقاتی کشور به برشگر نوترون، در این پژوهش پس از بررسی دقیق انواع برشگر و گزینشگر سرعت نوترون، سنجش توان، امکانات ساخت و دانش مهندسی داخل کشور، یک گزینشگر سرعت نوترون انتخاب شد. پس از مطالعات نظری و تجربی، برای اولین بار در کشور طراحی و ساخت یک دستگاه گزینشگر نوترون با پره‌ها و محور اصلی از جنس فیبر کربن انجام شد و عملکرد آن در میدان نوترونی چشمه ^{252}Cf مورد سنجش قرار گرفت.

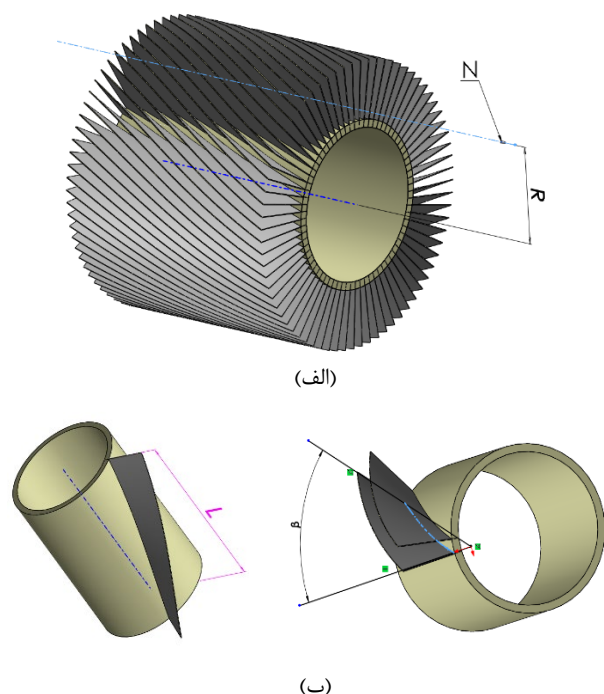
۲. گزینشگر سرعت نوترون

گزینشگر سرعت نوترون دستگاهی آرایه‌ای از شکاف‌های مارپیچی حول یک استوانه مرکزی است که درون آنها ورق‌های نازک با پوشش مواد جاذب نوترون قرار دارد. این استوانه با سرعت زیاد می‌چرخد، محور چرخش معمولاً با جهت اسمی تابش نوترون موازی است. پره‌ها در عملکرد گزینشگر نوترون نقش حیاتی دارند. این پره‌ها به صورت چرخشی عمل کرده، که منجر به گزینش نوترون‌ها با سرعت (انرژی) مشخص می‌شود. سرعت چرخش پره‌ها تعیین می‌کند کدام نوترون‌ها اجازه عبور داشته باشند [۹، ۱۰]. در شکل ۱ طرح‌واره‌ای از پره‌های گزینشگر سرعت نوترون نشان داده شده است.

در شکل ۱ (الف و ب) مهمترین پارامترهای گزینشگر شامل طول پره‌های آن L ، تعداد پره‌ها N ، R فاصله شعاعی ذره از مرکز دوران گزینشگر و β زاویه بین ابتدا و انتهای هر پره (Angle of selector screw) نشان داده شده است [۱۱].

۱.۲ انتخاب سرعت چرخشی بهینه پره‌ها برای گزینش سرعت

در این بخش، به منظور آشنایی با نحوه گزینش سرعت نوترون‌ها، انتخاب سرعت چرخشی بهینه پره‌ها برای گزینش سرعت، نوترون‌های ورودی توضیح داده شده است. برای توضیح رابطه بین سرعت چرخشی دستگاه و سرعت خطی نوترون‌های عبوری، شکل شماتیکی ۲ در نظر گرفته شده است [۱۲].



شکل ۱. الف) شماتیک پره‌های گزینشگر سرعت و پارامترهای مؤثر در طراحی گزینشگر [۹، ۱۰] ب) طول پره و نحوه قرار گرفتن روی محور چرخش و زاویه بین ابتدا و انتهای پره β .



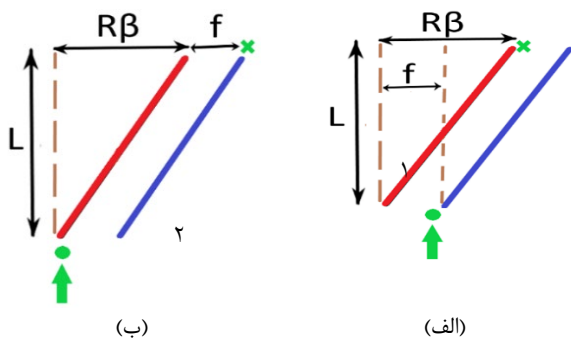
علامت ضربدر برسد. این حالت زمانی رخ می‌دهد که مدت زمان طی مسیر L ، $t_n = \frac{L}{V_n}$ توسط ذره، با مدت زمان چرخش گزینشگر به اندازه $t_d = \frac{R\beta - f}{V_d}$ که در آن $f = \frac{\pi d}{N}$ ، مساوی شود. با مساوی قرار دادن این دو زمان، بیشترین سرعت ذره برای عبور از طریق معادله (۲) به دست می‌آید [۱۳].

$$V_{n \text{ Max}} = \frac{L\pi n}{30(\beta - \frac{2\pi}{N})} \quad (2)$$

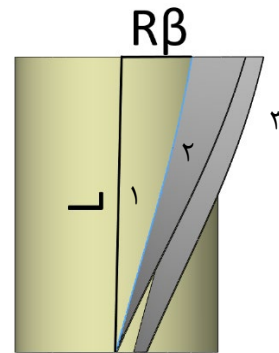
به منظور تعیین کمترین سرعت ذره برای عبور در سرعت چرخشی n ، شکل شماتیکی ۳-ب در نظر گرفته شد. زمانی که سرعت ذره نسبت به سرعت چرخشی کمتر باشد، برای عبور با حداقل سرعت، ذره باید از موقعیت دایره سبز رنگ وارد شود و مسیر ۲ را طی نماید و از مکان با علامت ضربدر خارج شود. اگر اندکی سرعت ذره کمتر باشد در مسیر ۲ به پره‌ها برخورد می‌کند. در این حالت در مدت زمانی که ذره با سرعت V_n طول L را طی می‌کند، گزینشگر به اندازه $R\beta + f$ چرخش می‌کند. بنابراین حداقل سرعتی که ذره می‌تواند داشته باشد تا از گزینشگر عبور کند در صورتی است که دو زمان $t_n = \frac{L}{V_n}$ و $t_d = \frac{R\beta + f}{V_d}$ مساوی باشند. با مساوی قرار دادن این دو زمان، حداقل سرعت ذره برای عبور مطابق رابطه (۳) به دست می‌آید [۱۳].

$$V_{n \text{ Min}} = \frac{L\pi n}{30(\beta + \frac{2\pi}{N})} \quad (3)$$

در روابط ۲ و ۳، N تعداد پره‌های گزینشگر است.



شکل ۳. شماتیکی از نحوه عبور ذره در سرعت چرخشی n گزینشگر، (الف) با حداکثر سرعت، (ب) با حداقل سرعت ذره.



شکل ۲. شماتیکی از مسیر حرکت ذرات عبوری و جذبی در گزینشگر سرعت نوترون.

در شکل ۲ برای ذره‌ای که در مسیر ۱ حرکت می‌کند گزینشگر باید طول کمانی برابر با $R\beta$ بچرخد تا ذره به انتهای پره برسد و با آن برخورد نکند. در مدت زمانی که ذره مسیر L را طی می‌کند گزینشگر باید بتواند به اندازه $R\beta$ دوران کند. اگر مدت زمان طی مسیر توسط ذره $t_n = \frac{L}{V_n}$ و مدت زمان چرخش دستگاه (t_d) برای کمانی به اندازه $R\beta$ با سرعت محیطی $V_d = \frac{\pi d n}{60}$ ، برابر باشند، آنگاه ذره از دستگاه عبور می‌کند [۱۲]. بر این اساس رابطه سرعت چرخش دستگاه و سرعت خطی نوترون و سایر پارامترهای دستگاه برای عبور و گزینش سرعت نوترون طبق رابطه (۱) تعیین می‌شود.

$$\frac{L}{V_n} = \frac{60 R\beta}{\pi d n} \Rightarrow n = \frac{60 R\beta V_n}{\pi d L} = \frac{30 \beta V_n}{\pi L} \quad (1)$$

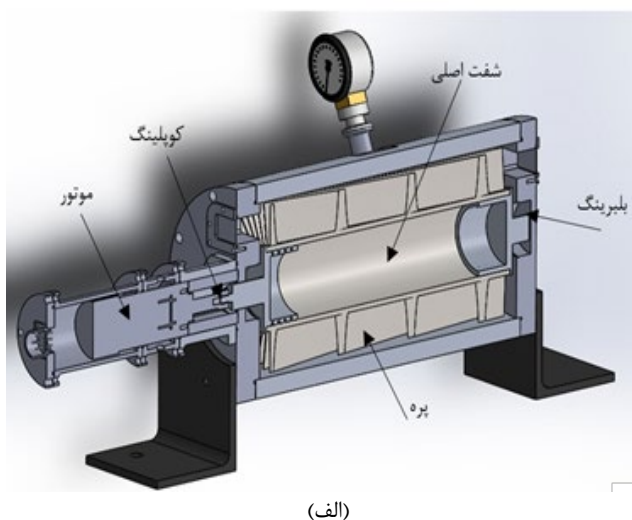
که در آن، n سرعت چرخشی بر حسب V_n rpm، سرعت ذره، d برابر با قطر فاصله گرفته ذره از مرکز یا $d=2R$ و β زاویه بین ابتدا و انتهای پره بر حسب رادیان است. براساس آنچه بیان شد در شکل ۲ تمام ذراتی که مسیر ۱ را طی می‌کنند می‌توانند با چرخش گزینشگر، از دستگاه عبور نمایند و ذرات در مسیرهای ۲ و ۳ با پره‌ها برخورد می‌کنند و جذب می‌شوند. اگر سرعت چرخش مقداری کمتر یا بیشتر شود متناسب با آن تعدادی از ذرات با سرعت خطی V_n مشخص، نمی‌توانند از دستگاه عبور کنند.

به منظور تعیین بیشترین سرعت ذره برای عبور در سرعت چرخشی n ، شکل شماتیکی ۳-الف در نظر گرفته شد. در صورتی که سرعت ذره به اندازه‌ای باشد که مسیر ۱ (قرمز رنگ) طی کند با پره‌ها برخورد می‌کند و نمی‌تواند از گزینشگر عبور کند. محتمل‌ترین مکانی که ذره با حداکثر سرعت می‌تواند عبور کند این است که از محل دایره سبز رنگ به محل

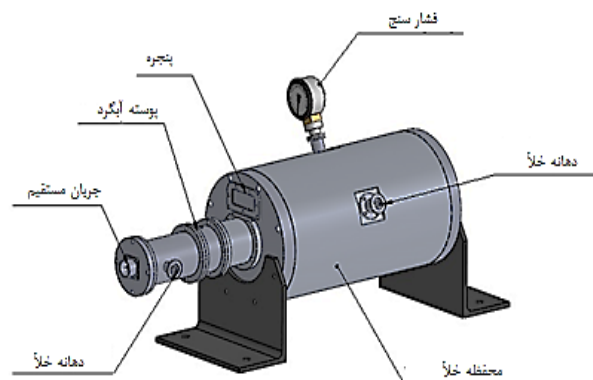


شد. این ضخامت بهینه شده است تا تعادل بین جذب نوترون و ضخامت پنجره را حفظ کند. ضخامت بیشتر می‌تواند جذب یا پراکندگی نوترون را افزایش دهد و ضخامت کمتر می‌تواند استحکام پنجره را کاهش دهد. به منظور کاهش ضخامت پره‌ها و توان موتور، کل سیستم در محفظه خلأ قرار می‌گیرد. پوسته دستگاه در شکل ۴ از جنس آلومینیم طراحی گردید. مطابق با شکل ۴- ب جهت اندازه‌گیری فشار محل نصب فشارسنج بر روی پوسته تعبیه گردید.

از آنجایی که محفظه سیستم در خلأ قرار می‌گیرد، موتور توسط پره انتهایی خنک نمی‌شود. به همین دلیل، برای اطمینان از عملکرد دستگاه در آزمایش‌های طولانی، از سیستم آب‌گردی در قسمت میانی موتور استفاده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۴. الف) نمای برش خورده طرح گزینشگر نوترون، ب) محل قرارگیری اجزاء مختلف دستگاه گزینشگر نوترون.

۳. طراحی، شبیه‌سازی و ساخت گزینشگر سرعت نوترون

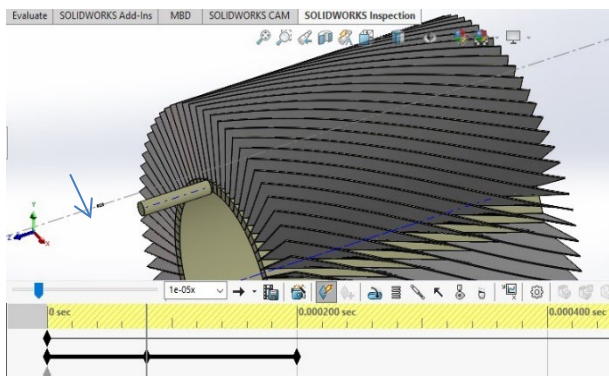
با توجه به مطالب ذکر شده و اصول طراحی مکانیکی دستگاه‌های دوار و مشخصات فنی ارائه شده توسط شرکت‌های معتبر سازنده گزینشگر مانند Astrium، طراحی و شبیه‌سازی و سپس ساخت دستگاه گزینشگر سرعت نوترون انجام شد. با توجه به این‌که عموماً گزینشگرها با سرعت زیادی می‌چرخند جهت کاهش اصطکاک و کاهش ضخامت پره‌ها نیاز به استفاده از خلأ در محفظه نگه‌دارنده پره‌ها است، لذا طراحی و ساخت این دستگاه باید با دقت زیادی صورت پذیرد. جهت انجام طراحی‌های مکانیکی و شبیه‌سازی‌های مورد نیاز، از نرم‌افزار Solidworks استفاده شد [۱۴]. این نرم‌افزار یک ابزار طراحی مکانیکی است که به‌منظور طراحی قطعات، ماشین‌آلات، ابزارآلات و قالب‌های صنعتی مورد استفاده مهندسان مکانیک، کارشناسان طراحی صنعتی قرار می‌گیرد.

۱۰۳ طراحی گزینشگر

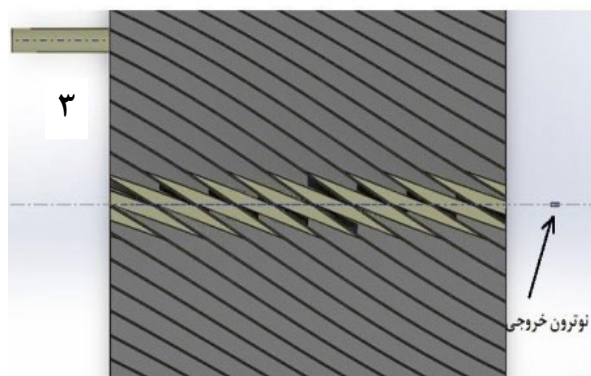
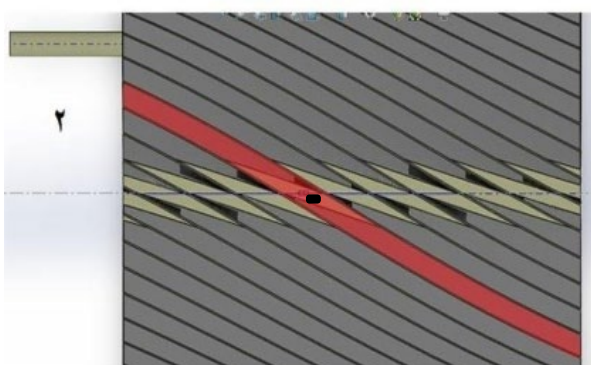
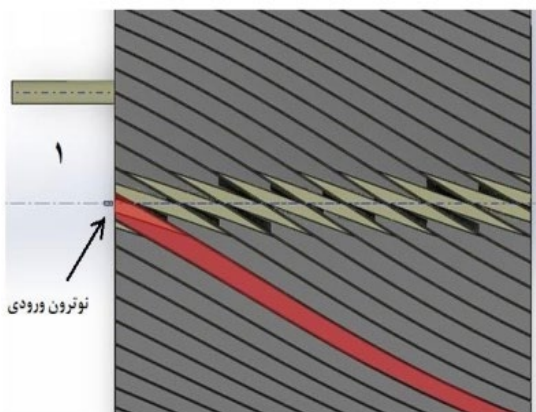
با توجه به این‌که اعمال تغییرات جزئی در ضخامت و طول قطعات، نوع بلبرینگ، توان و دور موتور، زاویه ابتدا و انتهای پره‌ها و سایر پارامترهای طراحی، نیاز به انجام مجدد طراحی را به همراه دارد، و در هر بار تکرار این فرایند، احتمال خطا در محاسبات وجود دارد، بخش طراحی روتور و پره‌ها به صورت یک فایل Excel کد نویسی شد. در مرحله اول، طراحی گزینشگر با شفت فولادی و نگه‌دارنده‌های آلومینیمی مورد مطالعه قرار گرفت. این طراحی در دوره‌های بالای دستگاه، باعث نابالانسی شدید در قطعات و در نتیجه ناپایداری دستگاه می‌شود. به منظور کاهش وزن و جلوگیری از نابالانسی، طراحی جدید با استفاده از فیبرکربن (که دارای چگالی پایین‌تر و استحکام بالاتری است) انجام شد. بدین منظور دو قسمت انتهایی که بلبرینگ‌ها نصب می‌شوند از جنس آلومینیم در نظر گرفته شد. بر روی این دو قسمت سوراخ‌های متعددی تعبیه شد که به‌وسیله رزین پیوند مکانیکی مناسبی بین این دو قطعه و شفت مرکزی کامپوزیتی انجام شود.

طول شفت کامپوزیتی ۳۰۰ mm و قطر بیرونی آن ۸۵ mm در نظر گرفته شد. در شکل ۴- الف نمای برش خورده طرح مورد نظر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود محل قرارگیری بلبرینگ‌ها، موتور، شفت اصلی و پره‌ها، پنجره‌های ورود و خروج ذرات نوترون مشخص شده است. پنجره‌ها از جنس آلومینیم به ضخامت ۰/۴ mm در نظر گرفته





شکل ۵. نحوه شبیه‌سازی حرکت نسبی پره‌ها و ذرات نوترون با استفاده از نرم‌افزار Solidworks.



شکل ۶. نحوه عبور ذرات نوترون از بین پره‌ها.

۲.۳ مطالعات شبیه‌سازی

حرکت ذرات نوترون و پره‌ها در نرم‌افزار Solidworks شبیه‌سازی شد. در این شبیه‌سازی مدل سه‌بعدی شفت مرکزی و پره‌ها با توجه به زاویه محاسبه شده (زاویه β)، ترسیم می‌شود. ذرات نوترون به صورت باریکه‌ای از ذرات و به شکل یک استوانه سه‌بعدی با در نظر گرفتن ذره نوترون مدل‌سازی می‌شوند. در قسمت Solidworks Inspection، یک موتور خطی برای باریکه ذرات نوترون و یک موتور چرخشی برای شفت و پره‌ها تعریف می‌شود. با استفاده از موتورهای تعریف شده، حرکت ذرات و پره‌ها شبیه‌سازی می‌شود. سرعت چرخشی و خطی محاسبه شده در شبیه‌سازی با مقادیر مورد نظر مقایسه می‌شود تا از دقت محاسبات اطمینان حاصل شود. شکل ۵ تصویر سه‌بعدی شبیه‌سازی حرکت چرخشی و خطی دسته ذرات نوترون و پره‌ها را نشان می‌دهد.

شکل ۶ نحوه عبور ذرات از بین پره‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل، ذرات نوترون با سرعت خطی مشخص به سمت پره‌ها حرکت می‌کنند. پره‌ها با سرعت زاویه‌ای مشخص می‌چرخند و زاویه آنها نسبت به محور افقی (β) ثابت است. اگر سرعت خطی ذرات نوترون با سرعت چرخشی پره‌ها و زاویه پره‌ها همخوانی داشته باشد، ذرات بدون برخورد با پره‌ها از بین آنها عبور می‌کنند. در این حالت، ذرات با سرعت و انرژی تقریباً یکسان از گزینگر خارج می‌شوند. در غیر این صورت ذرات با سرعت‌های بیشتر به پره جلوتر و ذرات با سرعت کمتر به پره عقب‌تر برخورد خواهند کرد و توسط مواد جاذب پوشانیده شده بر روی سطح پره جذب خواهند شد. در قسمت ۱ الی ۳ در شکل ۶ نحوه حرکت و عبور ذرات نوترون از بین پره‌ها نشان داده شده است.

۳.۳ ساخت شفت (محور اصلی)

مطابق طراحی ارایه در بخش‌های قبلی، به‌خاطر کاهش وزن، محور اصلی از جنس فیبر کربن و محل قرارگیری بلبرینگ‌ها در دو طرف از جنس آلومینیم به‌ترتیب مطابق با شکل ۷ (الف و ب) ساخته و سپس به‌وسیله رزین این قطعات به یکدیگر متصل شد. با توجه به این‌که دستگاه باید در دور بالا کار کند (حدود ۱۲۰۰۰ rpm) لذا استفاده از بلبرینگ فلزی معمولی در این دور امکان‌پذیر نیست. به همین منظور از بلبرینگ‌های هیبریدی استفاده گردید. به جهت کاهش وزن بیشتر دستگاه، داخل محل قرارگیری بلبرینگ تراشکاری گردید و به‌صورت پوسته نازک ساخته شد.



۵.۳ ساخت بدنه دستگاه

آلومینیم به دلیل سطح مقطع پایین برهم کنش با نوترون حرارتی، عدم تخلخل جهت ایجاد خلأ، انتقال حرارت مناسب، قابلیت ماشین کاری و ساخت آسان، وزن کم، قیمت مناسب و در دسترس بودن باعث شده است که اکثر شرکت‌ها در ساخت محفظه گزینشگر سرعت نوترون از این فلز استفاده کنند. بر این اساس مطابق طراحی انجام شده بدنه دستگاه شامل: محفظه خلأ، قسمت آب‌گرد موتور، بدنه نگه‌دارنده موتور و پنجره ورود و خروج نوترون از جنس آلومینیم ساخته شد. بر روی بدنه دستگاه ۲ دهانه استاندارد KF۱۶ برای ایجاد خلأ در قسمت موتور، محور اصلی و پره‌ها و یک دهانه KF۱۶ برای نصب فشارسنج از جنس آلومینیم تعبیه شد. دهانه‌های ورودی و خروجی تجهیزات خلأ باید براساس استاندارد ISO ۲۸۶۱ ساخته شود تا خلأ مناسب ایجاد شود. در شکل ۸ قسمت‌های مختلف بدنه دستگاه از جنس آلومینیم نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۷. الف) شیارهای ایجاد شده بر روی محور اصلی، ب) قطعات آلومینیمی دو سر محور اصلی.

۶.۳ سیستم کنترل دور موتور

همان‌طور که در بخش طراحی ذکر شد برای به چرخش درآوردن شفت از یک اسپیندل موتور استفاده شد. این موتور نوعی الکتروموتور است که برای چرخاندن ابزار با سرعت بالا مانند CNC استفاده می‌شود. دور موتور اسپیندل می‌تواند ۸۰۰۰ الی ۲۵۰۰۰ دور بر دقیقه برسد. این موتور با تغییرات ولتاژ ورودی به راحتی کنترل می‌شوند و نیاز به درایو کنترل خاصی ندارد. به علت تجاری بودن، این موتور دارای قیمت مناسبی است. موتور استفاده شده دارای توان ۳۰۰ وات و سرعت چرخش حداکثر ۱۲۰۰۰ دور بر دقیقه است. این موتور با ولتاژ DC بین ۱۲ الی ۴۸ ولت کار کرده و با تغییر ولتاژ سرعت آن تغییر می‌کند. به همین منظور یک منبع تغذیه ۴۸ ولت در تابلو کنترل دستگاه قرار داده شد که به وسیله یک ولوم دقیق با تعداد دور بالا کنترل می‌شود. جهت کنترل دور موتور سیم‌های کنترل ولتاژ به وسیله یک عدد کانکتور سیلد مخصوص خلأ به داخل محفظه خلأ وارد شد.



شکل ۸. قسمت‌های مختلف بدنه دستگاه گزینشگر سرعت.

پس از ساخت محور اصلی به وسیله دستگاه CNC چهار محور، مطابق با شکل ۷-الف شیارهای محل نصب پره‌ها بر روی آن فرزکاری گردید. طول این شیارها ۳۰۰ mm، عرض آن ۱ mm، عمق آن ۳/۵ mm و زاویه ابتدا و انتهای آن 25° (β) درجه است.

۴.۳ ساخت پره‌ها

الیاف کربن به دلیل مزایای متعددی از جمله استحکام بالا، وزن کم، قابلیت پوشش‌دهی مناسب و اتصال محکم به شفت، ماده‌ای ایده‌آل برای ساخت قطعات مختلف به شمار می‌رود.

اتصال دو قطعه فیبرکربنی به یکدیگر با استفاده از رزین، اتصالی بسیار قوی و مستحکم ایجاد می‌کند. با این حال، اتصال فیبرکربن به فلزاتی مانند آلومینیم یا فولاد، به اندازه اتصال دو قطعه فیبرکربن به یکدیگر قوی نیست.

پره‌ها از جنس الیاف کربن ساخته شد. بدین منظور ۴۸ عدد پره به طول ۲۹۵ mm، عرض ۴۳ mm و ضخامت ۱ mm ساخته شد. سپس ۴ mm پایین آنها با چسب کاغذی پوشانیده شده و بقیه قسمت‌ها با محلول رزین و B₄C پوشش داده شد. پوشش با غلظت ۳۵ gr/m^۲ و در هر دو طرف پره‌ها انجام شد [۱۵]. پس از خشک شدن پره‌ها به مدت ۲۴ ساعت پایینی به رزین آغشته گردید و پره‌ها در شیارهای ایجاد شده نصب گردیدند. ضخامت یکنواخت پره‌ها و همچنین یکنواختی پوشش در کاهش نابالانسی دستگاه بسیار مؤثر است.



۷.۳ سیستم خلأ

با توجه به این که روتور اصلی جهت کاهش اصطکاک با هوا باید در محفظه خلأ چرخش کند بدین منظور بین کلیه فلنج‌ها و قطعات دستگاه ارینگ‌های مناسب به کار گرفته شد. از طریق لوله‌های خرطومی استیل دهانه‌های خلأ به پمپ خلأ روتاری دو مرحله‌ای با سرعت تخلیه $2/5 \text{ m}^3/\text{h}$ متصل گردید.

در شکل ۹- الف تصویر دستگاه گزینشگر سرعت نوترون ساخته شده از نمای نزدیک و در شکل ۹- ب دستگاه گزینشگر سرعت نوترون به همراه تابلو کنترل و پمپ خلأ نشان داده شده است. پس از مونتاژ دستگاه آزمون خلأ سیستم انجام شد و فشار خلأ 3×10^{-2} میلی بار ثبت گردید. جهت اطمینان از عملکرد دستگاه، آزمون خلأ ۵ بار تکرار شد و در هر بار فشار مورد نیاز برای کارکرد دستگاه حاصل شد. سپس آزمون مکانیکی دستگاه در دوره‌های مختلف از ۳۰۰۰ الی ۱۱۰۰۰ دور بر دقیقه در هر ۱۰۰۰ دور به مدت ۵ دقیقه انجام شد. تا صحت عملکرد مکانیکی دستگاه بررسی شود. دستگاه با دقت ± 5 دور در دوره‌های تنظیم شده با پایداری قابل قبولی کار کرد.



(الف)



(ب)

شکل ۹. الف) تصویر دستگاه گزینشگر سرعت نوترون ساخته شده از نمای نزدیک، ب) تصویر دستگاه گزینشگر سرعت نوترون به همراه تابلو کنترل و پمپ خلأ.

۴. مطالعات تجربی دستگاه گزینشگر نوترون به منظور

اندازه‌گیری طیف انرژی نوترون‌های حرارتی

دستگاه گزینشگر سرعت نوترون پس از ساخت و انجام آزمایش‌های خلأ و دور موتور و اطمینان از صحت عملکرد، مطالعات تجربی و اندازه‌گیری طیف انرژی نوترون‌ها انجام شد.

در این مطالعات با استفاده از آشکارساز BF_3 شمارش نوترون‌های حرارتی گزینش شده انجام شد. جهت کندسازی نوترون‌های گسیلی از چشمه ^{252}Cf با اکتیویته 9.7 mCi (و هندسه استوانه‌ای به ارتفاع 15 mm و قطر 7 mm)، جلوی حفره خروجی محافظ چشمه، ۵ سانتی‌متر تفلون قرار داده شد. به نحوی که اغلب نوترون‌های ورودی به دستگاه گزینشگر سرعت، نوترون‌های حرارتی هستند. قسمت جلویی محافظ چشمه و اطراف آشکارساز BF_3 کاملاً با ورق کادمیم به ضخامتی پوشانیده شد تا از ورود نوترون‌های پراکنده به آشکارساز جلوگیری شود.

چیدمانی مطابق شکل ۱۰ به منظور بررسی عملکرد گزینشگر سرعت نوترون انجام شد. دستگاه گزینشگر در هر مرحله از آزمایش با سرعت مشخصی (سرعت‌های ذکر شده در ستون دوم جدول ۱) می‌چرخد. مدت زمان انجام اندازه‌گیری ۱۵۰۰ ثانیه و هر اندازه‌گیری دو بار تکرار گردید. در شکل ۱۱ طیف ارتفاع پالس ثبت شده با استفاده از آشکارساز BF_3 ، برای نوترون‌های حرارتی عبوری از گزینشگر نوترون در سرعت چرخشی 9000 rpm نشان داده شده است. در جدول ۱ نتایج شمارش نوترون‌ها برای حالتی که گزینشگر سرعت نوترون بین آشکارساز و چشمه قرار ندارد (ردیف ۱) و حالتی که گزینشگر سرعت نوترون مقابل چشمه و آشکارساز قرار گرفته، (ردیف ۲ تا ۷) ارائه شده است.



شکل ۱۰. چیدمان آزمایش به منظور بررسی عملکرد گزینشگر سرعت نوترون.





شکل ۱۲. تصویر دیسک آلومینیمی برشگر نوترون.

دیسک آلومینیمی ساخته شده به ضخامت ۲ mm است که بر روی آن یک شیار باریک به طول ۳۰ mm و عرض ۲ mm ایجاد شده است و بر روی آن جاذب B_4C پوشانیده شد. شیار ایجاد شده دقیقاً در مقابل پنجره عبور نوترون در دستگاه گزینشگر سرعت قرار می‌گیرد. در شکل ۱۳ روش نصب دیسک آلومینیمی بر روی دستگاه نشان داده شده است.

با نصب این دیسک بر روی دستگاه فقط زمانی که شیار دیسک از مقابل پنجره دستگاه می‌گذرد ذرات نوترون عبور می‌کنند و در بقیه حالت‌ها جذب می‌شوند، یعنی خروجی ذرات از دستگاه از حالت پیوسته به حالت پالسی تغییر می‌کند. خروجی آشکارساز به یک اسیلوسکوپ دیجیتال وصل گردید. با هر بار رسیدن شیار مقابل پنجره خروجی نوترون یک پیک بر روی اسیلوسکوپ نمایش داده می‌شود. در این روش با ایجاد وقفه در عبور ذرات، می‌توان زمان پرواز نوترون‌ها را اندازه گرفت. در این روش زمان، بین دو پیک (t_2) بر روی اسیلوسکوپ شامل دو زمان است:

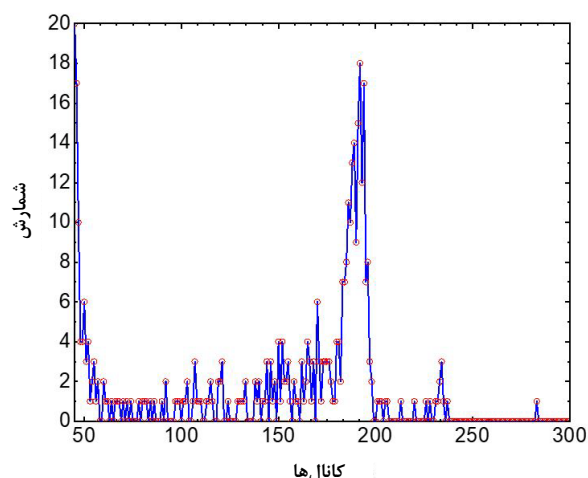
۱. زمان یک دور چرخش دیسک که با توجه به سرعت چرخش متغیر است و باید برای هر سرعت محاسبه شود (t_1).
۲. زمان پرواز نوترون در فاصله بین شکاف تا آشکارساز (t) یعنی زمانی که نوترون فاصله ۱ متر (در این آزمایش) را طی می‌کند.

جدول ۲ مقادیر زمان پرواز (t) را برای هر سرعت چرخش دستگاه نشان می‌دهد. این مقادیر با استفاده از اختلاف زمانی $t_2 - t_1$ محاسبه شده‌اند. پس از انجام آزمایش و اندازه‌گیری زمان پرواز نوترون، انرژی نوترون با استفاده از معادله ۴ [۱۶] محاسبه شد. نتایج تجربی به‌دست آمده در جدول ۲ ارائه شده است.

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، برای اندازه‌گیری زمان پرواز نوترون‌های حرارتی با انرژی ۰/۰۲۵ eV به چرخش دستگاه با سرعت ۳۰۴۰۰ rpm نیاز است. با این حال، حداکثر سرعت چرخش دستگاه ساخته شده ۱۲۰۰۰ rpm است. به دلیل این محدودیت، زمان پرواز نوترون‌ها با انرژی ۰/۰۲۵ eV به صورت تجربی اندازه‌گیری نشده است.

جدول ۱. نتایج اندازه‌گیری شمارش نوترون‌ها برای گزینشگر سرعت نوترون در سرعت‌های مختلف چرخش

ردیف	سرعت چرخش (rpm)	تعداد نوترون شمارش شده	درصد خطا (%)
۱	---	۷۷۲	۳/۵
۲	۰	۳۶۰	۵/۲
۳	۱۰۰۰	۳۱۴	۵/۶
۴	۳۰۰۰	۳۲۰	۵/۵
۵	۶۰۰۰	۳۰۷	۵/۷
۶	۹۰۰۰	۳۲۴	۵/۵
۷	۱۱۰۰۰	۲۹۱	۵/۸



شکل ۱۱. طیف ارتفاع پالس ثبت‌شده با استفاده از آشکارساز BF_3 ، برای نوترون‌های حرارتی عبوری از گزینشگر نوترون در سرعت چرخشی ۹۰۰۰ rpm.

با توجه به این‌که دستگاه ساخته شده دارای حداکثر سرعت چرخش ۱۱۰۰۰ rpm است براساس رابطه ۲ نوترون‌های عبوری حداکثر انرژی ۰/۰۳۳ eV خواهند داشت. براساس این معادله برای عبور نوترون‌های حرارتی با انرژی ۰/۰۲۵ eV دستگاه باید سرعت دورانی معادل ۳۰۴۰۰ rpm داشته باشد.

۱۰۴ آزمایش زمان پرواز

برای اندازه‌گیری تجربی زمان پرواز نوترون‌ها و به‌دست آوردن انرژی نوترون‌های عبوری از دستگاه نیازمند وسیله‌ای هستیم که یک وقفه زمان در عبور نوترون‌ها ایجاد کند تا بتوانیم زمان پرواز را اندازه‌گیری نماییم. پس از بررسی روش‌های مختلف اندازه‌گیری زمان پرواز و امکانات موجود در آزمایشگاه تصمیم گرفته شد که یک برشگر دیسکی به ابتدای گزینشگر سرعت نوترون اضافه شود [۱۶، ۱۷]. آشکارساز در فاصله ۱ متری پنجره خروجی نوترون از دستگاه قرار داده شد. در شکل ۱۲ دیسک ساخته شده، نشان داده شده است.



محور) بر روی موتور استفاده شود تا به وسیله آن بتوان زمان عبور شکاف از مقابل پنجره عبور دستگاه را به تنهایی محاسبه کرد. با این کار خطای اندازه گیری زمان پرواز و در نتیجه خطای محاسبه انرژی نوترون های حرارتی را می توان کاهش داد. با بالا رفتن دور موتور، استفاده از بلبرینگ های مغناطیسی ضروری به نظر می رسد. در این صورت می توان باریکه نوترون تکفام مناسبی به دست آورد که در تحقیقات اندازه گیری سطح مقطع جذب نوترون حرارتی با مواد مختلف، پراش سنجی، پرتودرمانی و سایر کاربردها مورد استفاده قرار گیرد.

۵. نتیجه گیری

در این مطالعه طراحی، شبیه سازی و ساخت یک دستگاه گزینشگر نوترون به صورت تئوری و تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. سپس عملکرد دستگاه در میدان نوترونی حاصل از نوترون های از چشمه نوترون های ^{252}Cf به صورت تجربی آزموده شد. مطالعات شبیه سازی و ساخت نشان می دهد استفاده از جاذب B_4C برای جذب نوترون های حرارتی با توجه به امکان تهیه، قیمت مناسب، روش کار آسان (حلالیت مناسب در رزین) جهت پوشش پره های گزینشگر سرعت، مناسب است. با توجه به سرعت چرخش بالای محور و پره های آن استفاده از فیبرکربن با توجه به وزن کم و استحکام بالا پیشنهاد می گردد. برای ایجاد خلأ مناسب، بردن موتور به داخل محفظه خلأ و کوپل مستقیم آن مناسب است. میزان خلأ باید در محدوده $10^{-2} \times 8$ الی $10^{-2} \times 3$ میلی بار پایدار شود. در غیر این صورت موتور و پره ها آسیب خواهند دید. نتایج به دست آمده از دستگاه گزینشگر سرعت نوترون ساخته شده و محاسبات تئوری نشان می دهد جهت فیلتر نمودن نوترون های حرارتی با انرژی 0.25 eV نیازمند چرخش با سرعت حدوداً 30000 rpm هستیم که این خود مستلزم استفاده از موتور قوی تر با دور بیشتر و هزینه بالاتر است (حداکثر دور دستگاه ساخته شده 12000 rpm است). نتایج تجربی اندازه گیری زمان پرواز نوترون های حرارتی نشان می دهد با افزایش سرعت (انرژی) نوترون ها نسبت به سرعت چرخش دیسک، خطای اندازه گیری زمان پرواز افزایش می یابد. به عبارتی برای چرخش 11000 rpm ، زمان چرخش دیسک، از مرتبه میلی ثانیه و زمان پرواز نوترون ها با انرژی 0.25 eV و بیشتر در فاصله پروازی 1 متر، از مرتبه میکروثانیه است. این اختلاف فاحش باعث می شود خطای اندازه گیری زمان پرواز افزایش یابد. بنابراین استفاده از این دستگاه برای اندازه گیری زمان پرواز نوترون های حرارتی با انرژی کمتر از 0.01 eV مناسب است.



شکل ۱۳. نصب دیسک برشگر بر روی دستگاه گزینشگر سرعت نوترون.

جدول ۲. مقایسه زمان پرواز تئوری و اندازه گیری شده برای نوترون های حرارتی

انرژی ذره عبوری (eV)	چرخش دیسک (rpm)	t_1 (ms)	t_2 (ms)	زمان پرواز تجربی (ms)	زمان پرواز تئوری (ms)	درصد خطا (%)
۰.۰۰۰۰۲۷	۱۰۰۰	۶۰	۷۵	۱۵	۱۴.۴	۴
۰.۰۰۰۰۲۴	۳۰۰۰	۲۰	۲۵.۵	۵.۵	۴.۸	۱۲.۷
۰.۰۰۰۰۹۷	۶۰۰۰	۱۰	۱۳	۳	۲.۳	۲۳.۳
۰.۰۰۰۲۲	۹۰۰۰	۶.۶	۸	۲.۴	۱.۵	۳۷.۵
۰.۰۰۰۳۳	۱۱۰۰۰	۵	۷	۲	۱.۲	۴۰

به منظور بررسی میزان دقت اندازه گیری های تجربی، زمان پرواز نوترون های حرارتی با انرژی های مشخص، به صورت تئوری با استفاده رابطه ۴ برای فاصله 1 متری محاسبه شد. این زمان های پرواز در ستون ۶ جدول ۲ ارائه شده است.

$$t(\mu s) = \frac{v_{252} L(m)}{\sqrt{E(eV)}} \quad (4)$$

در رابطه بالا، L فاصله پرواز و E انرژی نوترون است. مقایسه زمان های پرواز تجربی و تئوری در جدول ۲ نشان می دهد در سرعت های پایین (انرژی بسیار پایین) این روش خطای تقریباً مناسبی دارد ولی با افزایش سرعت نوترون سهم زمان پرواز نسبت به زمان چرخش دیسک کوچک می شود در نتیجه مقدار خطا افزایش می یابد. دستگاه ساخته شده در اندازه گیری زمان پرواز نوترون های حرارتی با انرژی کمتر از 0.01 eV با خطای حدود ۴ درصد همراه است. در اندازه گیری زمان پرواز نوترون های حرارتی با انرژی 0.033 eV خطای اندازه گیری تجربی به حدود ۴۰٪ می رسد. این خطا به دلیل اختلاف در زمان یک دور چرخش دیسک و زمان پرواز نوترون ها در فاصله 1 متر است. به همین دلیل پیشنهاد می گردد از یک رمز گذار دور بالا (دستگاه تشخیص موقعیت، سرعت و جهت گردش

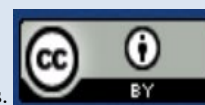


مراجع

1. Lu J, Sabharwall P, Heidrich B, Christensen R. Advanced Manufacturing and Instrumentation for Neutron Chopper Design. *Journal of Young Investigators*. 2020 Dec 1;38(6).
2. Soldner T. Neutron Optics. Fundamental Neutron Physics Summer School 2015, *University of Tennessee*.
3. Pesente S, Lunardon M, Nebbia G, Viesti G. Detection of Improvised Explosives Devices (IED) by using Tagged Neutron Beams. In Detection and disposal of improvised explosives. *Dordrecht: Springer Netherlands*. 2006 Jun 5;69-85.
4. Mobley C.M. The construction of a Fermi neutron chopper for cross section measurements. 1966.
5. Crawford R.K. Neutron scattering instrumentation. A guide to future directions. 2001.
6. Gholamzadeh Z, Mirvakili S.M. Neutron powder diffractometry. *Tehran: Aindeh-Saz Publishing*. 2019 [In Persian].
7. Madadi Sh, Pazirandeh A. Design and construction of neutron cutter and measurement of thermal neutron spectrum. *Tehran: University of Tehran*. 1998 [In Persian].
8. Moeini Roodbally H, Hosseini A.S. Simulation of multi-blade neutron velocity selector using Mcstas software. *Tehran: Sharif University of Technology*. 1397 [In Persian].
9. Lowde R.D. The principles of mechanical neutron-velocity selection. *Journal of Nuclear Energy. Part A. Reactor Science*. 1960 Feb 1;11(2-4):69-80.
10. Kabir M.R. The development of manganite-based materials for thermoelectric power generation. *Doctoral dissertation, UNSW Sydney*.
11. Greci N, Cortes D, Flaska M. Design of an epithermal neutron velocity selection system for the Penn State Breazeale Reactor. *Journal of Instrumentation*. 2023 Jun 29;18(06):P06035.
12. Lowde R.D. The principles of mechanical neutron-velocity selection. *Journal of Nuclear Energy. Part A. Reactor Science*. 1960 Feb 1;11(2-4):69-80.
13. Bacon G.E. X-Ray and Neutron Diffraction: The Commonwealth and International Library: Selected Readings in Physics. *Elsevier*. 2013 Sep 3.
14. Solidworks: Engineering 4.0. www.tecnetinc.com. Retrieved September 5, 2023.
15. Omid A, Tajik M, Bayat E. Investigation of the type of material and coating of neutron chopper blades on the amount of thermal neutron absorption. *Journal of Research on Many-body Systems*. 2024;14(2):27-36 [In Persian].
16. Appel M, Frick B, Magerl A. A flexible high speed pulse chopper system for an inverted neutron time-of-flight option on backscattering spectrometers. *Scientific Reports*. 2018 Sep 11;8(1):13580.
17. Lin C.M. Parameter optimisation of a vacuum plasma spraying process using boron carbide. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2012 Sep;21:873-81.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

امیدی، امین، تاجیک، مجتبی، بیات، اسماعیل. (۱۴۰۴). طراحی و ساخت گزینشگر نوترون و استفاده از روش زمان پرواز جهت طیفنگاری نوترون حرارتی. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*. ۱۱۱(۱)، ۱۲۷-۱۱۸. **DOI:** <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1544.2007>

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1665.html

