



مقایسه فیلترینگ نوترون سریع کریستال سفایر صفحه ۱۱۲ تأمین خارج کشور و کریستال سفایر صفحه ۱۱۱ ساخت ایران

زهره غلامزاده^{۱*}، رضا ابراهیمزاده^۱، سجاد شاه‌ملکی^۲، علی بیگانه^۳، حمید صائبی^۱

۱. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۵-۸۳۶، تهران - ایران

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، کدپستی: ۱۵۸۷۵۴۴۱۶، تهران - ایران

۳. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران - ایران

*Email: cadmium109@yahoo.com

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۲ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰

چکیده

کریستال‌های فیلتر نوترون به صورت گسترده در صنعت هسته‌ای در راکتورهای تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مهم‌ترین این کریستال‌ها می‌توان به کریستال سفایر اشاره نمود که توسط چندین کشور با کیفیت مطلوب رشد داده می‌شود. در این پژوهش، مقایسه عملکرد نوترونی کریستال سفایر ساخت ایران و کریستال تأمین خارج کشور هدف قرار گرفته است. به منظور بررسی قدرت حذف نوترون‌های سریع توسط این کریستال‌های سفایر از یک چشمه Am-Be در این کار استفاده شده است. همچنین از باریکه نوترون مونوکروماتیک به منظور بررسی تأثیر این کریستال‌ها بر کاهش شدت شار نوترون مونوکروماتیک استفاده شده است. به منظور بررسی دقت کدهای محاسباتی برای شبیه‌سازی رفتار نوترونی چنین کریستال‌های فیلتر نوترونی از کد McStas استفاده شد و نتیجه حاصل از این شبیه‌سازی با مقدار تجربی موجود مقایسه گردید. مقایسه نتایج تجربی و نتایج منتشر شده در دنیا نشان داد کریستال رشد داده شده داخل کشور با نمونه خارجی به‌خوبی رقابت می‌کند. نتایج تجربی حاصل از این کار نشان داد استفاده از ۲٫۵ cm کریستال سفایر، باریکه نوترون تک‌فام با انرژی ۰٫۰۶ eV تنها حدود ۵/۵٪ همچنین نوترون سریع با انرژی بیش از ۲۰۰ keV را در حدود ۳۳٪ تضعیف می‌کند. افزایش ضخامت کریستال تا حدود ۶ cm نیز موجب تضعیف شدت نوترون سریع تا حدود ۶۰٪ و نوترون تک‌فام تا حدود ۱۶٫۵٪ می‌گردد. نتایج این کار نشان داد که اختلاف مقادیر شبیه‌سازی و تجربی می‌تواند به فقدان اطلاعات دقیق مورد نیاز مدل‌سازی کریستال توسط کد محاسباتی مرتبط باشد.

کلیدواژه‌ها: سفایر کریستال، حذف نوترون سریع، عبور نوترون حرارتی مونوکروماتیک، اندازه‌گیری شدت نوترون، شبیه‌سازی کد McStas

Comparison of filtering fast neutrons by externally-purchased sapphire crystal (plane 112) and home-made Iranian sapphire crystal (plane 111)

Z. Gholamzadeh^{*1}, R. Ebrahimzadeh¹, S. Shamaleki², A. Biganeh³, H. Saebi¹

1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.BOX: 14395-836, Tehran – Iran

2. Department of Physics, K.N. Toosi University of Technology, Postal Code: 158754416, Tehran – Iran

3. Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran – Iran

Research Article

Received: 02.09.2024,

Revised: 08.11.2024,

Accepted: 30.11.2024

Abstract

Neutron filter crystals are widely used in the nuclear industry, particularly in research reactors. One of the most important crystals used is sapphire crystal, which is grown in several countries to ensure good quality. This research aims to compare the neutron performance of sapphire crystals made in Iran with those of externally supplied crystals. An Am-Be source was used in this study to assess the ability of these sapphire crystals to remove fast neutrons. Additionally, a monochromatic neutron beam was used to study the impact of these crystals on reducing the intensity of the neutron flux. To verify the accuracy of computational codes in simulating the neutron behavior of these filter crystals, the McStas code was utilized. The results of this simulation were then compared with available experimental data. Comparing the experimental results with those published worldwide revealed that the domestically grown crystals performed comparably to the foreign samples. The experimental findings showed that a 2.5 cm sapphire crystal filtered the monochromatic neutron beam with an energy of 0.06 eV by only about 5.5%, and fast neutrons with an energy of more than 200 keV by about 33%. Increasing the crystal thickness to approximately 6 cm increased the filtration of fast neutrons to about 60% and monochromatic neutrons to about 16.5%. Overall, the results of this study indicated that the discrepancies between the simulation and experimental values may be attributed to the lack of detailed information necessary for crystal modeling in the computational code.

Keywords: Sapphire crystal, Fast neutron removal, Thermal monochromatic neutron passage, Neutron intensity measurement, Simulation by McStas code



۱. مقدمه

راکتور شکافت چشمه بسیار خوبی از نوترون‌های سریع، نوترون‌های حرارتی و تشعشعات گاما است. با این حال، برای بهبود نسبت سیگنال به پس‌زمینه برای آزمایش‌های پراکندگی نوترون حرارتی، نیاز به توسعه فیلترهای نوترون حرارتی است. همان‌طور که محققان بسیاری نشان داده‌اند، لوله‌های راهنمای منحنی^۱، نوترون‌ها را با بازتاب کلی داخلی از یک پوشش سطحی تحت عنوان آینه ^{58}Ni منتقل می‌کنند. ساخت چنین فیلترهای نوترونی حرارتی پرهزینه است و تأسیسات پراکندگی نوترون معمولاً دور از قلب راکتور نصب می‌شوند. با این حال، کریستال‌های سیلیسیم، برلیم، مس و پلی و مونو-کریستال‌های گرافیت اخیراً به عنوان فیلترهای نوترون حرارتی استفاده شده‌اند [۱].

همچنین استفاده از تک‌بلورهای بزرگ و کامل از مواد مختلف به عنوان فیلتر برای پرتوهای نوترونی حرارتی از دیرباز شناخته شده است. مواد مختلفی مانند کوارتز (SiO_2)، بیسموت، سیلیکون، سرب و سفایر (Al_2O_3) به عنوان موفق‌ترین مواد فیلتر پیشنهاد شده‌اند. در انرژی‌های نوترونی بالا، بیشتر از حدود ۱ eV، سطح مقطع کل نوترون (شامل سطح مقطع جذب و پراکندگی) در هر یک از مواد ذکر شده در بالا در محدوده چند بارن است، اما در انرژی‌های حرارتی پایین‌تر، کمتر از ۰.۱ eV، سطح مقطع مؤثر برای نمونه‌های تک‌کریستال بسیار کاهش می‌یابد [۲].

توافق خوبی بین سطح مقاطع نوترونی محاسبه‌شده و تعیین‌شده تجربی برای چندین ماده وجود دارد، به عنوان مثال، در مورد سیلیکون تک‌کریستال در هر دو دمای ۳۰۰ K و ۷۷ هم‌خوانی خوبی بین موارد ذکر شده محاسباتی و اندازه‌گیری وجود داشت. با این حال، تفاوت‌های اساسی بین نتایج سفایر محاسبه شده و نتایج تجربی، به ویژه در انرژی‌های نوترونی بیشتر از ۱۰۰ meV وجود دارد. برخی محققان پیشنهاد کرده‌اند که بهبود کیفیت رشد تک‌بلورهای سفایر می‌تواند این تفاوت‌ها را کاهش می‌دهد و در نتیجه مشکلات مربوط به پراکندگی الاستیک نوترون‌های حرارتی با انرژی بالاتر را کاهش می‌دهد. همچنین محققان شدت نوترون عبوری از تک‌کریستال سفایر را در طیفی از زوایای جهت‌گیری کریستال در بازه $\pm 2^\circ$ درجه را بررسی کرده‌اند و هیچ تغییر قابل توجهی مشاهده نکرده‌اند. آن‌ها دریافته‌اند که یک فیلتر کریستالی سفایر به طول ۹۰ میلی‌متر دارای انتقال حدود ۰.۸ برای طول‌موج‌های

۰.۲۴-۰.۱۲ نانومتر و ۰.۰۷ برای نوترون‌های اپی‌ترمال است [۲].

سفایر یک فیلتر نوترون سریع مؤثر است زیرا عبور آن برای نوترون‌هایی با طول‌موج‌های کمتر از ۰.۰۴ نانومتر در ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر کریستال مورد استفاده کمتر از ۳ درصد است. همچنین فیلتر مؤثری برای نوترون‌های حرارتی با طول‌موج‌های کمتر از حدود ۰.۱ نانومتر است، زیرا چگالی قابل توجه بازتاب‌های مرتبه بالاتر برای پراکنده کردن پرتو فرودی وجود دارد. اکثر کریستال‌های فیلتر نوترون جهت عملکرد مطلوب به خنک‌شوندگی تا دمای نیتروژن مایع (۷۷ K) نیاز دارند حال آن‌که محققان نشان داده‌اند به عنوان مثال برای نوترون‌های ۰.۱۲ نانومتر که از سفایر به ضخامت ۱۰۱ میلی‌متر عبور می‌کردند پس از سرد شدن از ۳۰۰ به ۷۷ کلوین تنها ۱۸ درصد افزایش شار نوترون وجود داشته است. لذا خنک‌کردن فیلتر سفایر به دلیل دمای بالای دبای ۱۰۴۰ K تنها تأثیر کمی بر عبور میزان نوترون‌ها دارد [۳].

هنگام ارزیابی فیلترهای کریستالی که نوترون‌های حرارتی از آن‌ها عبور می‌کنند و هم نوترون‌های سریع و هم پرتوهای γ را حذف می‌کنند، ماده مورد استفاده باید دارای سطح مقطع جذب کوچک باشد. سطح مقطع کل نوترون با یک ماده کریستالی با رابطه ۱ معین می‌گردد [۱]:

$$\sigma = \sigma_{abs} + \sigma_{tds} + \sigma_{Bragg} \quad (1)$$

اولین مورد σ_{abs} برای اکثر عناصر از قانون $1/v$ تبعیت می‌کند که v سرعت نوترون است، دومین عبارت رابطه ۱ یعنی σ_{tds} از دو قسمت سطح مقطع پراکندگی تک-فونونی و سطح مقطع پراکندگی فونونی چندگانه تشکیل شده است. سطح مقطع پراکندگی تک-فونونی زمانی مطرح می‌شود که انرژی نوترون $E \ll K_B \theta_D$ باشد؛ در این رابطه، K_B ثابت بولتزمن و θ_D دمای دبای مشخصه ۲ است. این سطح مقطع پراکندگی نوترون از کریستال از رابطه ۲ مشخص می‌گردد [۱]:

$$\sigma_{sph} = \frac{\sigma_{coherent} + \sigma_{incoherent}}{36A} \left(\frac{\theta_D}{E} \right)^{\frac{1}{2}} \begin{cases} R & \frac{\theta_D}{T} \leq 6 \\ \frac{\theta_D}{T} > 6 \end{cases} \quad (2)$$



سطح مقطع پراکندگی براگ چندکریستالی با رابطه ۸ محاسبه می‌گردد:

$$\sigma_{Bragg} = \frac{N_c \lambda^2}{2} \sum_{\lambda/2 \geq d_{hkl}} F_{hkl}^2 d_{hkl} e^{-2w} \quad (8)$$

که در آن N_c تعداد سلول‌های واحد در سانتی‌متر مکعب است، F_{hkl} ضریب ساختار سلول واحد و e^{-2w} ضریب Debye-Waller است.

سطح مقاطع کل و نیز عبور نوترون با استفاده از کد CRYSBЕ که یک نسخه اقتباس شده از کدهای ISCANF-I و ISCANF-II است و برای محاسبه مواد کریستالی برای انرژی‌های نوترون زیر ۱۰ eV توسعه یافته است، محاسبه می‌گردد [۱].

فیلترهای نوترونی حرارتی به طور معمول برای شکل‌دهی طیف پرتو نوترونی خروجی از کانال‌های شعاعی رآکتورهای تحقیقاتی استفاده می‌شوند. نوترون‌های خروجی از قلب رآکتور دارای طیف انرژی هستند که از محدوده انرژی کم (حرارتی) تا محدوده انرژی بالا (سریع) که نمونه‌ای از نوترون‌های شکافت سریع است، گسترش می‌یابد. در رآکتور PULSTAR دانشگاه ایالتی کارولینای شمالی، فیلترهای سفایر و بیسموت در کانال شعاعی رآکتور برای کاهش اجزای نوترون اپی‌ترمال، سریع و نیز پرتوهای گاما استفاده می‌شوند. هدف اصلی این کار، تولید پرتوهای نوترون حرارتی با نسبت نوترون به گاما بالا است [۴].

همچنین رآکتور TRIGA وین در کانال شعاعی خود از کریستال فیلتر نوترون استفاده کرده است: یک فیلتر بیسموت ۵ سانتی‌متری و یک فیلتر ۱۰ سانتی‌متری و یک فیلتر سفایر ۱۵ سانتی‌متری. بنابراین در این رآکتور می‌توان شار نوترون، شکل طیف نوترون و پس‌زمینه تابش γ را با نصب مجموعه‌های فیلتر مختلف تغییر داد [۵].

طیف‌سنج سه محوره نوترونی حرارتی (TAST) مرکز BNC بر روی کانال نوترونی حرارتی شماره ۸ رآکتور تحقیقاتی بوداپست نصب شده است. این سامانه به‌طور ایدئال برای مطالعه پراکندگی فونون و ماگنون در تک‌بلورها، چگالی فونونی حالت‌ها برای طیف گسترده‌ای از مواد که حاوی هیدروژن هستند، مناسب است. در این سامانه، پرتو نوترون تک‌رنگ توسط یک تک‌کریستال $\text{Cu}[002]$ با قابلیت کانونی‌کنندگی افقی و عمودی با ارتفاع ۹۰ میلی‌متر و عرض ۱۵۰ میلی‌متر ارائه می‌شود. به منظور کاهش شدت نوترون‌های سریع، یک تک‌کریستال سفایر به طول ۱۵ سانتی‌متر در محل شاتر اولیه تعبیه شده است [۶].

که در رابطه ۲، سطح مقطع پراکندگی همدوس، سطح مقطع پراکندگی ناهمدوس، دمای کریستال T و عدد جرمی کریستال A در محاسبه سطح مقطع پراکندگی تک-فونونی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پارامتر R نیز با توجه به اعداد برنولی ۱ قابل محاسبه است. سطح مقطع پراکندگی فونونی چندگانه زمانی مطرح می‌شود که $E \gg K_B \theta_D$ باشد. این سطح مقطع از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد [۱]:

$$\sigma_{mph} = (\sigma_{coherent} + \sigma_{incoherent}) \left[\frac{A}{A+1} \right]^2 \left\{ 1 - \exp \left[-\left(\frac{h^2}{2k_B \theta_D} + B_T \right) \right] C_T E \right\} \quad (3)$$

که در رابطه ۳، C_T یک عدد ثابت وابسته به ماده پراکننده، h ثابت پلانک و B_T نیز از رابطه ۴ مشخص می‌گردد [۱]:

$$B_T = \frac{h^2}{k_B \theta_D} \frac{\varphi(x)}{x} \quad (4)$$

سهم پراکندگی براگ σ_{Bragg} در سطح کل مقطع با در نظر گرفتن بازتاب حاصل از صفحات مختلف (hkl) که قادر به دادن بازتاب براگ برای طول موج نوترون λ هستند، محاسبه می‌شود. در مورد یک ماده چند کریستالی، بازتاب‌ها از تمام صفحات با فاصله $d_{hkl} \geq \lambda/2$ هستند، درحالی‌که در مورد یک تک‌کریستال، بازتاب‌ها از صفحات (hkl) هستند که معادله براگ را برآورده می‌کنند:

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta_{hkl} \quad (5)$$

که n مرتبه بازتاب و θ_{hkl} زاویه glancing نسبت به صفحه hkl است.

برای تک‌کریستال سطح مقطع بازتاب براگ از رابطه ۶ محاسبه می‌گردد:

$$\sigma_{Bragg} = \frac{1}{N t_0} \ln \left(\frac{1}{T_{Bragg}} \right) \quad (6)$$

که

$$T_{Bragg} = \prod_{hkl} (1 - P_{hkl}^\theta) \quad (7)$$

در روابط ۶ و ۷، N تعداد اتم‌ها در هر سانتی‌متر مکعب، t_0 ضخامت مؤثر کریستال برحسب سانتی‌متر، T_{Bragg} عبور نوترون حاصل از صفحات مختلف (hkl) و P_{hkl}^θ قدرت بازتابانندگی صفحات مختلف hkl است.



همچنین شبیه‌سازی‌ها و اندازه‌گیری‌های انجام شده در رآکتور تحقیقاتی تهران نشان داده است، استفاده از ۷٫۵ سانتی‌متر کریستال سفایر در ابتدای کانال D رآکتور توانسته است به‌خوبی زمینه نوترون‌های سریع و نیز دز نوترون محل آزمایش را کاهش داده و نیز نسبت سیگنال به نویز را به مقدار قابل توجهی بهبود بخشد. آزمایش‌ها نشان داد میزان دز نوترون پس از نصب کریستال سفایر به میزان ۷۱ درصد کاهش یافت. همچنین دز گامای‌های ثانویه نیز به یک سوم مقدار اولیه کاهش یافت [۱۱-۱۲].

با توجه به استفاده گسترده کریستال سفایر در صنعت هسته‌ای، مقایسه عملکرد نوترونی کریستال سفایر صفحه ۱۱۱ ساخت ایران و ۱۱۲ ساخت چین هدف این کار قرار گرفته است. در این کار می‌توان از آشکارسازهای مانند ^3He ، BF_3 برای نوترون حرارتی و یا تک‌فام و نیز سوسوزن حالت جامد مانند NE_{213} برای آشکارسازی نوترون سریع استفاده کرد. لازم به ذکر است که آشکارسازهای نوترونی سریع معمولی شامل سوسوزن مایع، آشکارسازهای گاز نجیب مبتنی بر ^4He و آشکارسازهای پلاستیکی هستند. آشکارسازهای نوترون سریع با (۱) قابلیت تشخیص نوترون/گاما (از طریق تشخیص شکل پالس) و (۲) حساسیت، از یکدیگر متمایز می‌شوند.

۲. مواد و روش‌ها

به منظور بررسی قدرت تضعیف کریستال سفایر تأمین خارج و ساخت داخل، اندازه‌گیری تغییرات شدت نوترون سریع و حرارتی به‌واسطه نصب این کریستال‌ها در مسیر باریکه نوترون پلی‌کروماتیک ناشی از یک چشمه Am-Be و نیز نوترون مونوکروماتیک کانال D رآکتور تحقیقاتی تهران هدف کار قرار گرفته است. همچنین محاسبات شبیه‌سازی برای کریستال سفایر ۱۱۲ ساخت کشور چین (a-axis) توسط کد McStas و مقایسه آن با مقادیر اندازه‌گیری به منظور بررسی دقت این کدهای اپتیک نوترون هدف کار قرار گرفته است. لازم به ذکر است که کریستال سفایر تولید داخل کشور به روش بریجمن افقی در بوته‌هایی از جنس مولیبدن رشد داده شده است. المان حرارتی استفاده شده در این کار نیز از جنس تنگستن می‌باشد. در این روش، ابتدا مواد داخل بوته ذوب شده سپس به آرامی سرد می‌گردد.

در ویتنام، رآکتور تحقیقاتی هسته‌ای دالات (DNRR) یک رآکتور تحقیقاتی استخری ۵۰۰ کیلوواتی است که استفاده از کریستال سفایر را برای طراحی کانال پرتودهی نوترون حرارتی به منظور مطالعات گیراندازی نوترون توسط مواد مختلف مد نظر قرار داده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده در این کار نشان می‌دهد که فیلتر کریستالی ۲۰ سانتی‌متری سفایر و ۶ سانتی‌متری کریستال بیسموت منجر به دستیابی باریکه نوترون حرارتی که ۹۷٫۹۲٪ از کل شار نوترون را تشکیل می‌دهد، خواهد شد [۷].

تِنانت^۱ (۱۹۸۹ میلادی) نشان داد که کریستال سفایر ۱۰٫۱ سانتی‌متری قرار گرفته در معرض نیتروژن مایع، انتقال نوترون‌های مونوکروماتیک $1.2 \text{ \AA}$ را تا حدود ۱۸٪ افزایش می‌دهد [۸]. ضخامت‌های مختلف این کریستال توسط رآکتورهای تحقیقاتی استفاده می‌شود که عمدتاً به طیف نوترونی موجود در کانال آن‌ها بستگی دارد استاماتلاتوس^۲ و مسلوراس^۳ (۲۰۰۰ میلادی) بهینه‌سازی ضخامت سفایر را که معمولاً در ابزارهای پراش نوترونی استفاده می‌شود، مورد مطالعه قرار دادند. اساس این بهینه‌سازی براساس به حداکثر رساندن انتقال نوترون حرارتی، به حداقل رساندن انتقال نوترون سریع و در نظر گرفتن کاهش پس‌زمینه نوترونی در مجاورت یک ابزار است [۹].

به دلیل اهمیت کریستال سفایر برای کاهش پس‌زمینه در موقعیت آزمایش پراکندگی، کارهای تجربی و شبیه‌سازی زیادی برای شناسایی ویژگی‌های کریستال در شرایط محیطی مختلف و منابع نوترونی مختلف انجام شده است. عبدالحمید و همکاران (۲۰۱۹) توضیح داد که کریستال‌های سفایر به عنوان فیلتر نوترون‌های سریع و همچنین گامای پرنرژی برای چندین تأسیسات هسته‌ای مانند فعال‌سازی نوترون-گاما آئی، پراش نوترون و تصویربرداری نوترونی نصب شده در رآکتورهای تحقیقاتی مختلف استفاده می‌شود. آن‌ها توضیح دادند که در کد مبتنی بر روش مونت‌کارلو مورد استفاده، مواد کریستالی یا ساختارهای دیگر در نظر گرفته نشده‌اند اما کارت mt برای اصلاح سطح مقطع نوترون حرارتی برای برخی مواد استفاده شده است. آن‌ها از کد NJOY برای تولید چند سطح مقطع نوترونی برای کریستال سفایر در دمای ۳۰۰ K استفاده کردند. نتایج آن‌ها مطابقت خوبی با داده‌های تجربی موجود نشان داد [۱۰].

1. Tennant
2. Stamatelatos
3. Messoloras

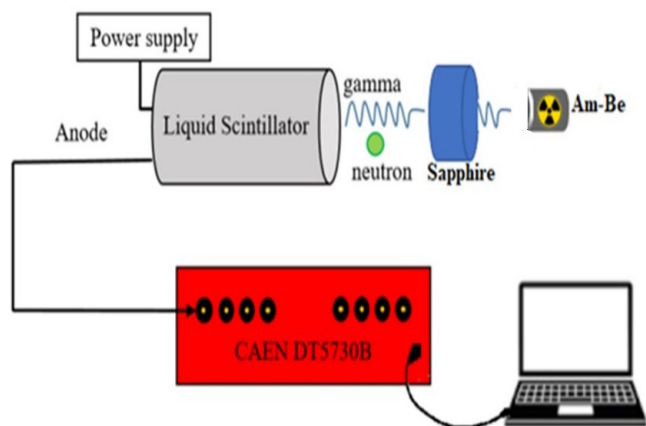


که در آن، QL و QS به ترتیب نمایانگر شارژها در دروازه‌های ادغام بلند و کوتاه هستند.

این روش کالیبراسیون و تمایز سطح بالایی از اطمینان و قابلیت اطمینان را در تمایز نوترون‌های سریع از گاماها در میدان‌های تابش ترکیبی فراهم می‌کند و اندازه‌گیری‌های دقیقی را برای کاربردهای مختلف امکان‌پذیر می‌سازد [۱۳].

در شکل ۲، نمایی از آزمایش اندازه‌گیری تغییرات شدت نوترون سریع با حضور و عدم حضور کریستال در محل دهانه خروجی نوترون‌های حاصل از چشمه Am-Be قرار گرفته در داخل تانک آب دارای کانال‌های شعاعی توخالی نشان داده شده است.

کریستال‌های ساخت داخل به ترتیب پشت سرهم نصب گردیدند تا بتوان تأثیر افزایش ضخامت کریستال سفایر بر قدرت تضعیف نوترون سریع توسط این کریستال‌ها بررسی گردد. سوسونز مایع NE۲۱۳ و دیجیتایزر (CAEN DT۵۷۳۰) مجهز به سیستم‌افزار تشخیص شکل پالس (PSD) در اندازه‌گیری شدت نوترون مورد استفاده قرار گرفت. دیجیتایزر مستقیماً از سیگنال آند آشکارساز نمونه‌برداری می‌کند. این تکنیک براساس این واقعیت ایجاد شد که وقتی آشکارساز NE-۲۱۳ توسط تابش نوترون و گاما تحریک می‌شود، سیگنال‌ها از نظر زمان ظهور و فروپاشی متفاوت هستند لذا تفکیک نوترون و گاما به‌خوبی صورت می‌پذیرد [۱۴].



شکل ۱. شماتیک چیدمان سیستم آشکارسازی نوترون‌های سریع.

۱.۲ اندازه‌گیری تغییرات شدت نوترون توسط کریستال سفایر

در ابتدا با استفاده از چشمه Am-Be که دارای طیف نوترون سریع می‌باشد، میزان تضعیف نوترون سریع توسط کریستال سفایر ساخت چین با قطر ۱۶ cm و ضخامت ۲/۵ cm و نیز کریستال سفایر ساخت داخل با ابعاد مختلف و ضخامت‌های به ترتیب ۲/۵ cm، ۱/۸ و ۱/۸ توسط آشکارساز سوسونز مایع اندازه‌گیری شد. آشکارسازی نوترون‌های سریع با استفاده از آشکارساز سوسونز مایع NE۲۱۳ به این صورت انجام می‌شود که نوترون‌های سریع به مایع NE۲۱۳ برخورد کرده و با هسته‌های هیدروژن یا کربن واکنش نشان می‌دهند، که نتیجه آن آزاد شدن پروتون‌هاست. این پروتون‌ها در اثر انرژی برخورد، فوتون تولید می‌کنند. فوتون‌های تولید شده به وسیله یک PMT جمع‌آوری شده و به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌شوند. این سیگنال‌ها سپس پردازش می‌شوند تا تعداد و انرژی نوترون‌های آشکار شده تعیین گردد. این روش به دلیل حساسیت و دقت بالا در تشخیص نوترون‌ها و تفکیک تابش‌های گاما، در تحقیقات هسته‌ای و کاربردهای صنعتی بسیار مفید است. در شکل ۱ شماتیک چیدمان سیستم آشکارسازی نوترون‌های سریع نشان داده شده است.

تنظیمات کالیبراسیون و اطمینان تمایز برای نوترون‌های سریع با استفاده از منابع گاما برای کالیبراسیون انرژی و بهینه‌سازی روش تمایز شکل پالس (PSD) برای جداسازی نوترون-گاما انجام شد. کالیبراسیون انرژی با استفاده از لبه‌های کمپتون گاما از منابع شناخته‌شده مانند ^{137}Cs (۴۷۷ keV) و ^{60}Co (۹۶۳ و ۱۱۱۷ keV) و ^{22}Na (۳۴۰ و ۱۰۶۱ keV) انجام شد. این کار مقیاسی به واحد معادل الکترون (keVee) فراهم کرد. لبه کمپتون در ۷۵٪ از نقطه ماکزیمم در هر طیف تعریف شد که این امر مقیاس انرژی دقیقی را تا ۳ MeVee تضمین می‌کند. آستانه پایین کالیبراسیون بر روی ۲۰۰ keVee با استفاده از گاماها با انرژی پایین از منابع ^{60}Co و ^{241}Am تنظیم شد.

تمایز نوترون‌های سریع با استفاده از روش تمایز شکل پالس (PSD) براساس تکنیک مقایسه شارژ به دست آمد. در این روش، دو دروازه ادغام (کوتاه و بلند) برای گرفتن اجزای سریع و کند سیگنال‌های سینتیلاتور استفاده شد، که در آن جزء سریع به برهم‌کنش‌های گاما و جزء کند به برهم‌کنش‌های نوترون مرتبط است. پارامتر PSD با استفاده از رابطه ۹ محاسبه شد:

$$PSD = \frac{QL - QS}{QL} \quad (9)$$

1. keV Electron Equivalent





شکل ۲. چیدمان آزمایش اندازه‌گیری تغییرات شدت نوترون سریع با حضور کریستال سفایر فیلتر نوترون سریع در مسیر باریکه نوترون خروجی از یک چشمه Am-Be.

یافته است. این نرم‌افزار به صورت رایگان در دسترس است [۱۶].

پارامترهای شبیه‌سازی به این شکل تعریف شده است: چشمه به صورت یک چشمه سطحی دایره‌ای با شعاع ۸ سانتی‌متر تعریف شده است. از آنجایی که چشمه طیف خروجی نوترون‌ها از بیم تیوب D رآکتور تحقیقاتی تهران می‌باشد، طیف نوترون به‌دست آمده به صورت یک چشمه پیوسته جامع (Source gen) در ۶۱۲ گروه انرژی تعریف شده است. در کانال دیفرکتومتری پس از کریستال سفایر کلیماتور اول سامانه دیفرکتومتری قرار دارد. کلیماتور در واقع یک قطعه استیل با طول ۱۲۰ cm است که داخل آن سه کانال هوا تعبیه شده است. ورقه‌های کادمیوم با ضخامت ۰/۰۱ cm سه کانال هوا را از یکدیگر جدا نموده و به عنوان موازی‌ساز نوترون عمل می‌کند. پنجره این کلیماتور دارای ابعاد ۲/۲×۷ cm است و اطراف آن استوانه‌ای از جنس بتن باریتی به عنوان نگه‌دارنده قرار دارد. پس از کلیماتور اول یک مونوکروماتور نوع $PG^1(002)$ قرار دارد. طول کلیماتور دوم ۶۰ سانتی‌متر و پنجره این کلیماتور دارای ابعاد ۲/۲×۶ سانتی‌متر است. کریستال مورد آزمایش در مقابل باریکه نوترون تک‌فام خروجی از کلیماتور دوم قرار گرفته است. کتابخانه‌های سطح مقطع برای کریستال سفایر از کتابخانه موجود در کد McStas استفاده شده است. از دو نمایشگر حساس به طول‌موج (L monitor) به منظور بررسی میزان تضعیف کریستال سفایر استفاده شده است.

باریکه نوترون مونوکروماتیک سامانه پراش‌سنجی رآکتور تحقیقاتی تهران دارای طول‌موج ۰/۱۱ نانومتر (معادل انرژی ۰/۰۶ eV) می‌باشد [۱۵] که این طول‌موج برای بررسی رفتار کریستال‌های سفایر در مقابل باریکه نوترون مونوکروماتیک مورد استفاده قرار گرفت. نمایی از چیدمان آزمایش میزان تضعیف باریکه نوترون مونوکروماتیک توسط کریستال‌های سفایر مورد استفاده در شکل ۳ نشان داده شده است. در این آزمایش یک آشکارساز 3He با قطر ۲ cm که داخل یک استوانه پلی‌اتیلن با قطر ۴۰ cm قرار داده شده است، استفاده شد. اطراف آشکارساز 3He یک ورق کادمیوم ۱ mm به منظور جذب نوترون‌های زمینه پیچیده شده است لذا فقط نوترون‌هایی که از مقابل (مسیر باریکه نوترون مونوکروماتیک) به پنجره آشکارساز می‌رسند ثبت خواهند شد.

۲.۲ محاسبات تغییرات شدت نوترون پس از کریستال سفایر توسط کد McStas

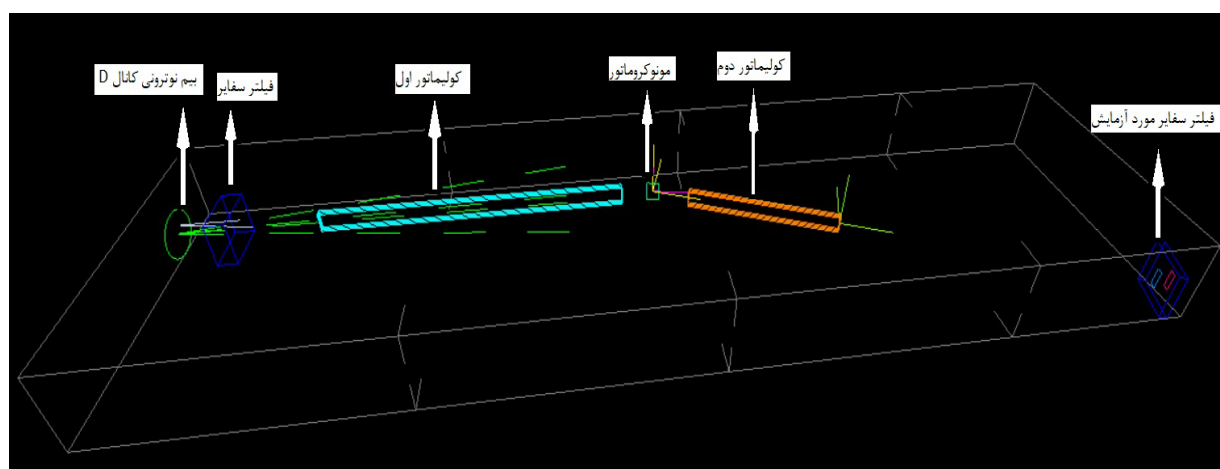
در این محاسبات از کد اپتیک نوترون برای مدل‌سازی کریستال a-axis در سامانه پراش‌سنجی نوترون رآکتور تحقیقاتی تهران استفاده شد. نمایی از این سامانه در شکل ۴ نشان داده شده است.

کد McStas یک ابزار عمومی برای شبیه‌سازی ابزارها و آزمایش‌های پراکندگی نوترون است. این نرم‌افزار به طور فعال توسط DTU Physics, NBI KU, ESS, PSI و ILL پشتیبانی می‌شود. در واقع McStas یک پروژه در حال انجام برای ایجاد یک ابزار کلی برای شبیه‌سازی سامانه‌های پراکندگی نوترون است. این پروژه با همکاری مراکز تحقیقاتی فوق‌الذکر از طریق برنامه‌های متعدد اتحادیه اروپا تأمین مالی شده و توسعه





شکل ۳. چیدمان آزمایش اندازه‌گیری تغییرات شدت نوترون حرارتی با حضور کریستال سفاير در مسیر باریکه نوترون مونوکروماتیک خروجی از سامانه کانال D رآکتور تحقیقاتی تهران.



شکل ۴. نمای سه‌بعدی از شبیه‌سازی سیستم دیفرکتومتری رآکتور تحقیقاتی تهران با استفاده از کد McStac.

بیشتر سفاير ۱۱۲ موجود نبود در جدول ۱ تنها موارد مربوط به کریستال سفاير ۱۱۱ در ضخامت‌های بیشتر نیز ارائه شده است. این اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد با استفاده از ضخامت حدود ۶ cm یعنی سه قطعه (۲٫۵، ۱٫۸ و ۱٫۸) در مقابل طیف نوترون چشمه Am-Be، حدود ۶۰٪ نوترون‌های با انرژی بیش از ۲۰۰ keV فیلتر شده‌اند یا به عبارتی شدت آن‌ها کاهش یافته است.

جدول ۱. مقایسه قدرت فیلترینگ اندازه‌گیری شده نوترون سریع ($E_n > 200 \text{ keV}$) توسط کریستال‌های سفاير ساخت خارج (صفحه ۱۱۲) و داخل کشور (صفحه ۱۱۱)

ضخامت (cm)	تضعیف کریستال ۱۱۱ (%)	تضعیف کریستال ۱۱۲ (%)
۲٫۵	۳۳٫۶۱	۳۶٫۵۲
۴٫۳	۴۹٫۱۰	
۶٫۱	۶۰٫۴۳	

۳. بحث و نتایج

در ادامه به بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری و شبیه‌سازی کریستال‌های سفاير شرح داده شده پرداخته خواهد شد.

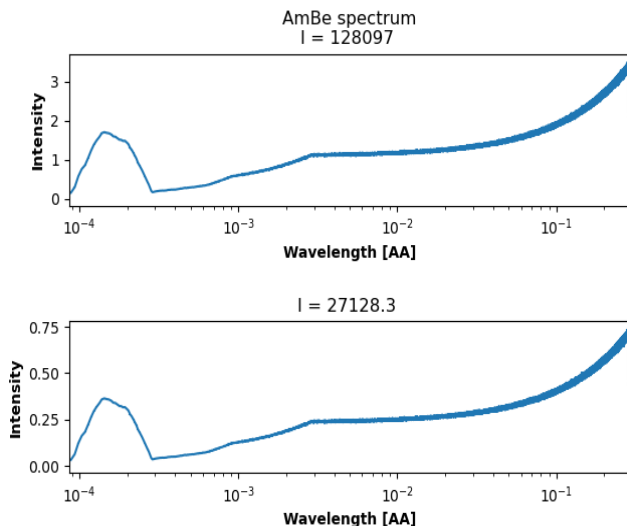
۱۰۳ اندازه‌گیری عبور نوترون سریع از کریستال‌های سفاير با استفاده از طیف چشمه Am-Be

اندازه‌گیری‌های انجام شده نشان داد رفتار کریستال سفاير صفحه ۱۱۲ تأمین خارج از کشور و کریستال سفاير صفحه ۱۱۱ تأمین داخلی در مورد قدرت فیلترینگ نوترون سریع تقریباً مشابه می‌باشد. اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط چشمه Am-Be نشان داد کریستال سفاير ۱۱۲ با ضخامت ۲٫۵ cm توانسته است نوترون‌های سریع بالاتر از انرژی ۲۰۰ keV را به میزان ۳۶٫۵۲٪ تضعیف کرده است و همین ضخامت از کریستال سفاير ۱۱۱ توانسته است ۳۳٫۶۱٪ نوترون‌های سریع بالاتر از انرژی ۲۰۰ keV را تضعیف کند. از آنجایی که ضخامت‌های



جدول ۲. مقایسه قدرت فیلترینگ اندازه‌گیری شده نوترون مونوکروماتیک ($E_n = 0.06 \text{ eV}$) توسط کریستال‌های سفایر ساخت خارج (صفحه ۱۱۲) و داخل کشور (صفحه ۱۱۱)

ضخامت (cm)	تضعیف کریستال ۱۱۱ (%)	تضعیف کریستال ۱۱۲ (%)
۲٫۵	۵٫۴۸	۵٫۴۷
۴٫۳	۹٫۷۱	-
۶٫۱	۱۶٫۵۰	-



شکل ۶. رفتار طیف چشمه Am-Be پس از عبور از کریستال سفایر ۱۱۱ با ضخامت ۶٫۱ سانتی‌متر در کد McStas.

جدول ۳. شبیه‌سازی قدرت فیلترینگ نوترون توسط کریستال‌های سفایر ساخت داخل کشور (صفحه ۱۱۱)

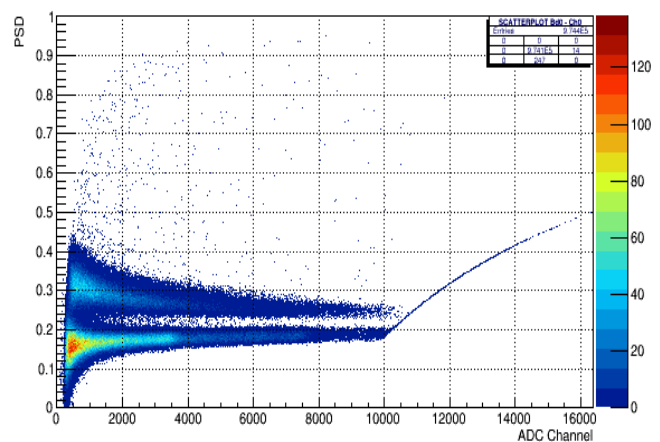
ضخامت (cm)	تضعیف $E_n > 200 \text{ keV}$ (%)	تضعیف $E_n = 0.06 \text{ eV}$ (%)
۲٫۵	۴۶٫۹	۷٫۳۴
۴٫۳	۶۶٫۴۱	۱۲٫۸۶
۶٫۱	۷۸٫۶۴	۱۹٫۵۷

مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی در این کار نشان داد در مورد کریستال ۱۱۱ کاهش نوترون مونوکروماتیک طبق اندازه‌گیری ۵٫۴۸٪ و طبق محاسبات کد McStas برای ضخامت ۲٫۵ cm حدود ۷٫۳۴٪ است که اختلاف نسبی اندازه‌گیری و تجربی حدود ۳۴٪ است. در مورد ضخامت ۶٫۱ cm مقدار تجربی ۱۶٫۵٪ و مقدار محاسباتی توسط کد اپتیک مورد استفاده ۱۹٫۵۷٪ بود که اختلاف نسبی مقادیر تجربی و محاسباتی برای کریستال سفایر ۱۱۱ با این ضخامت حدود ۱۹٪ است. در مورد رفتار این کریستال ۱۱۱ ۲٫۵ cm در مقابل طیف

در شکل ۵، طیف آشکارساز مورد استفاده در اندازه‌گیری‌های فوق‌الذکر ارائه شده است. که در آن نمودار پراکندگی پارامتر جداسازی نوترون و گاما (PSD) در مقابل کانال ADC نشان داده شده است.

۲.۳ اندازه‌گیری عبور نوترون مونوکروماتیک از کریستال‌های سفایر با استفاده از طیف نوترون کانال D رآکتور تحقیقاتی تهران
در اندازه‌گیری‌های نوترون مونوکروماتیک مشخص گردید رفتار تضعیف نوترون تک‌فام برای کریستال ساخت داخل و نمونه خرید خارجی در ضخامت ۲٫۵ cm مشابه است و اختلاف نسبی مقادیر تضعیف شدت نوترون در انرژی نوترون تک‌فام (0.06 eV) بسیار ناچیز است (جدول ۲).

۳.۳ شبیه‌سازی عبور نوترون سریع از کریستال سفایر ۱۱۱ با استفاده از طیف چشمه Am-Be
از آنجایی که سطح مقاطع و برخی پارامترهای اپتیکی نمونه کریستال ۱۱۲ در کد McStas موجود نبود، تنها شبیه‌سازی کریستال سفایر ۱۱۱ در این قسمت انجام گردید. در شکل ۶ رفتار طیف چشمه Am-Be پس از عبور از کریستال سفایر ۱۱۱ با ضخامت ۶٫۱ سانتی‌متر در کد McStas نشان می‌دهد، مشاهده می‌گردد که شدت باریکه نوترونی در کل طیف چشمه Am-Be نزدیک به ۸۰ درصد کاهش می‌یابد. از آنجایی که طیف چشمه Am-Be مربوط به نوترون‌های سریع می‌باشد تغییری محسوسی در شکل طیف به وجود نیامده است. درحالی که در طیف‌های که شامل نوترون‌های سریع و حرارتی باشد شکل طیف نیز پس از عبور از کریستال سفایر تغییر می‌یابد. همچنین نتایج محاسبات و شبیه‌سازی توسط کد McStas برای کریستال ۱۱۱ ساخت داخل در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۵. طیف گامای آشکارساز سوسوزن مایع NE۲۱۳ به منظور اندازه‌گیری تغییر شدت نوترون سریع پس از کریستال سفایر فیلتر نوترون.

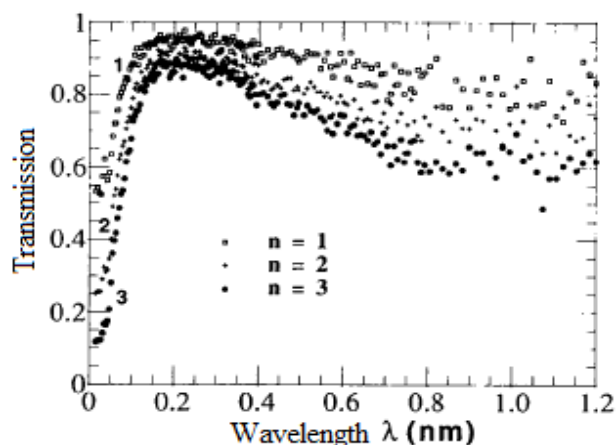


($2/54 \times 2/54 \times 2/7 \text{ cm}^3$) در دمای اتاق را اندازه‌گیری کرده‌اند. اندازه‌گیری‌ها در محدوده طول‌موج نوترونی $0/5-1/2 \text{ nm}$ ($0/056-0/327 \text{ eV}$) قرار داشت. نتایج این محققان نشان داد که چنین فیلتری برای طول‌موج‌های بیشتر از حدود $0/1 \text{ nm}$ با حداکثر انتقال در حدود $0/2 \text{ nm}$ مفید است. همچنان که شکل ۷ نشان می‌دهد بیشینه عبور نوترون تک‌فام در طول‌موج $0/2 \text{ nm}$ ($0/02 \text{ eV}$) بین 85% الی 98% متغیر است [۲].

همچنان که جدول ۲ نشان می‌دهد، $2/5 \text{ cm}$ کریستال سفایر ساخت داخل حدود 5% نوترون تک‌فام را تضعیف می‌کند یعنی حدود 94% نوترون تک‌فام را عبور داده است و نتایج اندازه‌گیری با مقادیر شکل ۷ تقریباً هم‌خوان است که در طول‌موج $0/118 \text{ nm}$ ($0/06 \text{ eV}$) عبور نوترون‌ها بیش از 90% است (خط قرمز رسم شده بر روی شکل).

۴. نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر استفاده از کریستال‌های فیلتر نوترون در کانال‌های شعاعی رآکتورهای تحقیقاتی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این کریستال‌ها می‌توانند به‌ویژه برای سامانه‌های باریکه نوترون مونوکروماتیک عملکرد بسیار خوبی را از خود نشان دهند زیرا نوترون تک‌فام حرارتی را با بیشترین بازده از خود عبور داده و نوترون‌های با انرژی کمتر و بیشتر را فیلتر می‌کنند. البته قدرت فیلترینگ این کریستال‌ها برای نوترون‌های سریع (طول‌موج‌های کوتاه‌تر) بسیار بیشتر است. از میان کریستال‌های مختلف، سفایر به دلیل امکان استفاده در دمای اتاق بدون نیاز به خنک‌کنندگی نیتروژن مایع و سایر ویژگی‌ها مورد توجه و استفاده فراوان رآکتورهای تحقیقاتی قرار گرفته است. در این پژوهش، رفتار کریستال ساخت داخل و تأمین خارج در مقابل باریکه نوترون سریع (حاصل از چشمه Am-Be)



نوترون سریع نیز بررسی‌ها نشان می‌دهد مقدار تضعیف تجربی با عدد $33/61\%$ کمتر از مقدار محاسباتی با عدد $46/9\%$ است؛ اختلاف نسبی مقادیر تجربی و محاسباتی در این حالت نیز حدود 39% است. در مورد ضخامت حدود 6 cm نیز مقدار تجربی $60/43\%$ با مقدار محاسباتی $78/64\%$ اختلاف نسبی حدود 30% دارد. در تمامی موارد، مقدار محاسباتی بیش از مقادیر تجربی می‌باشد که این موضوع به عوامل مختلفی بستگی دارد که عبارتند از فاکتور موزائیکی کریستال که در مورد هر دو کریستال تأمین خارج و ساخت داخل این پارامتر اپتیکی از سوی تأمین‌کننده مشخص نگردیده بود. عامل دیگر عدم وجود سطح مقطع‌های اندازه‌گیری شده نوترون برای کریستال سفایر در کد محاسباتی McStas می‌باشد؛ سطح مقاطع موجود در کد برحسب محاسبات کد NJOY در کتابخانه کد McStas قرار داده شده‌اند.

نتایج اندازه‌گیری و بررسی قدرت فیلترینگ کریستال سفایر در این کار نشان می‌دهد با استفاده از حدود 6 سانتی‌متر از ضخامت کریستال، شار نوترون سریع به بیش از نصف کاهش یافته است درحالی که شار نوترون تک‌فام حدود 16% کاهش داشته است. در ادامه آزمایش‌های تجربی انجام شده در برخی رآکتورها در مورد رفتار این کریستال در طیف نوترون بررسی و مقایسه می‌گردد. لازم به ذکر است با این‌که این کریستال‌ها بیش از 30 سال است که در رآکتورهای تحقیقاتی در دنیا مورد استفاده قرار گرفته‌اند، با این حال داده‌های تجربی زیادی که به مطالعه رفتار این کریستال‌ها در طیف‌های مختلف نوترونی پرداخته باشد وجود ندارد.

رآکتور 1 MW PULSTAR از یک کلیماتور در کانال شعاعی خود استفاده می‌کند که طراحی اولیه کولیماتور یک فیلتر سفایر تک‌کریستالی (Al_2O_3) به ضخامت 3 اینچ ($7/62 \text{ cm}$) و قطر 5 اینچ ($12/7 \text{ cm}$) است که در نزدیکی ورودی کانال سمت قلب رآکتور نصب شده است. با مقایسه نتایج اندازه‌گیری پس از نصب کریستال و موارد موجود قبل از نصب کریستال، به‌خوبی مشاهده گردید شار نوترون سریع در محل کریستال تک‌فام‌کننده کانال تقریباً با ضریب 5 کاهش یافته است، در حالی که محتوای حرارتی حدود 10% کاهش یافته است. نسبت Th/F به حدود $17/6$ افزایش یافته است که تقریباً $4/4$ برابر بیشتر از کولیماتور قدیمی است [۱۷].

میلدندر^۱ و همکاران (۱۹۹۳) وابستگی احتمال انتقال طول‌موج پرتوی نوترون را از طریق سفایر تک‌کریستال

1. Mildner



است کریستال در آن محل نصب گردد و یا شکل طیف نوترون کانال باریکه نوترونی، متفاوت باشد. بدیهی است انتخاب ضخامت‌های بیشتر به معنی کاهش بسیار قابل ملاحظه شدت شار نوترون سریع می‌باشد با این وجود شار نوترون حرارتی و تک‌فام نیز کاهش می‌یابد.

مراجع

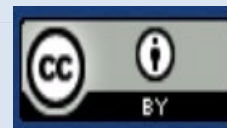
1. Wahba M. On The Use of Beryllium as Thermal Neutron Filter. *Egypt. J. Sol.* 2002;25(2):215-227. Doi:org/10.21608/ejs.2002.150479.
 2. Adib M, Kilany M, Habib N, Fathallah M. Neutron Transmission of Single-Crystal Sapphire Filters. 4th Conference on Nuclear and Particle Physic. *Fayouni, Egypt*. 2003 Oct 11-15.
 3. Mildner D.F.R, Arif M, Stone C.A. The Neutron Transmission of Single-Crystal Sapphire Filters. *J. Appl Cryst.* 1993;26:438-447. Doi: org/10.1107/S0021889893000433.
 4. Hawari A.I, Al-Qasir I.I, Mishra K.K. Accurate Simulation of Thermal Neutron Filter Effects In the Design of Research Reactor Beam Applications. *PHYSOR 2006; ANS Topical Meeting on Reactor Physics, Organized and hosted by the Canadian Nuclear Society. Vancouver, BC, Canada.* 2006 September 10-14.
 5. Wilfried Mach I. Installation of a neutron beam instrument at the TRIGA reactor in Vienna. *PhD thesis*. 2018.
 6. <https://bnc.hu/tast/>.
 7. Anh T.T.T, Quyet P.D, Son P.N, Hieu P.B.Q, Sang N.T.M, Vu C.D. Design and simulation of a thermal neutron beam for neutron capture studies at the Dalat research reactor. *Communications in Physics*. 2023;33(2):185-193. Doi: org/10.15625/0868-3166/17445.
 8. Tennant D.C. Performance of a cooled sapphire and beryllium assembly for filtering of thermal neutrons. *Rev. Sci. Instrum.* 1988;59:380-381.
 9. Stamatelatos I.E, Messoloras S. Sapphire filter thickness optimization in neutron scattering instruments. *Rev. Sci. Instrum.* 2000;71(1):70-73.
 10. Abdelhamid J, Hamid A, Abdelouahed C, Ouadie K, Abdelhamid S. Generation of thermal scattering cross sections for Sapphire (Al_2O_3) and Bi Crystal filters used in nuclear facilities. *Physics AUC*. 2019;29:45-49.
 11. Gholamzadeh Z. Computational study of the effect of sapphire neutron filter on reducing the neutron and secondary-gamma dose rate around the main shield of D channel in TRR. *Radiation Physics and Engineering*. 2023;4(2):25-33. Doi:org/10.22034/rpe.2022.353820.1099.
- شکل ۷. احتمال انتقال به عنوان تابعی از طول موج برای اعداد مختلف n کریستال‌های Al_2O_3 hemex با ضخامت ۲۷ cm در دمای محیط [۳].
- و نوترون مونوکروماتیک (حاصل از سامانه پراش‌سنجی و پراکندگی رآکتور تحقیقاتی تهران) با یکدیگر مقایسه شد. اندازه‌گیری‌های شدت نوترون عبوری از کریستال‌ها و محاسبه درصد تضعیف با استفاده از شمارش آشکارساز در شرایط حضور و عدم حضور کریستال در مسیر باریکه نوترون نشان داد کریستال ساخت داخل به‌خوبی با نمونه تأمین خارجی رقابت می‌کند. استفاده از کد اپتیک نوترون (McStas) نیز نشان داد این کد قادر است رفتار این کریستال‌ها را مقابل باریکه‌های نوترونی و طیف‌های نوترونی مختلف با دقت قابل قبولی تحلیل و بررسی کند. نتایج تجربی حاصل از این کار نشان داد استفاده از ۲٫۵ cm کریستال سفایر تنها حدود ۵/۵٪ باریکه نوترون تک‌فام با انرژی ۰٫۶ eV را تضعیف می‌کند که این نتیجه با مورد تجربی انتشار یافته توسط محققان دیگر هم‌خوانی بسیار خوبی دارد. همچنین استفاده از این ضخامت موجب تضعیف نوترون سریع $En > 200$ keV در حدود ۳۳٪ می‌گردد که این کاهش زمینه نوترون سریع در آزمایشگاه‌های پراش‌سنجی نوترون بسیار مطلوب است. بررسی‌های انجام شده در این کار نشان داد اختلاف معناداری بین رفتار اپتیک نوترون کریستال رشد داده شده داخل کشور و خریداری شده از خارج کشور وجود ندارد. همچنین استفاده از ضخامت بیشتر این کریستال موجب می‌گردد شدت نوترون سریع تا حدود ۶۰٪ نیز کاهش یابد حال آنکه شدت نوترون تک‌فام حدود ۱۶/۵٪ کاهش می‌یابد. محاسبات انجام شده توسط کد McStas نشان داد این کد می‌تواند رفتار این کریستال‌ها را در مقابل طیف‌های مختلف نوترونی به‌خوبی پیش‌بینی کند. لازم به ذکر است که مقادیر محاسباتی بین حدود ۱۹٪ الی ۳۹٪ بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری در این کار بود که بیشتر بودن درصد تضعیف محاسباتی توسط کد می‌تواند به فقدان سطح مقطع تجربی کریستال‌های مختلف در کتابخانه‌های مورد استفاده توسط کد مذکور، فقدان اطلاعات دقیق اپتیکی کریستال نظیر فاکتور موزائیکی، بازتابانندگی و ... مربوط باشد. لازم به ذکر است که انتخاب ضخامت بهینه کریستال سفایر برای هر آزمایشگاه آنالیز نوترونی می‌تواند با توجه به محدودیت کاهش شدت شار نوترون تک‌فام (آزمایشگاه پراش‌سنجی نوترون) یا نوترون حرارتی (آزمایشگاه رادیوگرافی نوترون، آزمایشگاه آنالیز به روش فعال‌سازی و ...)، میزان نیاز به کاهش دز نوترون/گاما در محیط آزمایشگاه، قطر کانالی که قرار



12. Gholamzadeh Z, Bavarnegin E, Ebrahimzadeh R, Mokhtari J, Jafari M, Choopan Dastjerdi M.H. Experimental evaluation of transition rate of sapphire crystal for thermal and fast neutrons using MNSR vertical neutron beam line. *Heliyon*. 2024;10(2):e24160. Doi: [org/10.1016/j.heliyon.2024.e24160](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24160).
13. DT5730 Digital Pulse Processing-Pulse Shape Discrimination (DPP-PSD), *CAEN user manual UM4380, Rev. 7*, April 3rd. 2023.
14. Biganeh A, Azizi M, Kakuee O, Rafi-Kheiri H, Sedaghati Boorkhani M, Ghasemi B. Digital signal processing for neutron-gamma discrimination using a liquid scintillator detector. *Journal of Instrumentation*. 2003;18(03):03039.
15. Gholamzadeh Z, Ebrahimzadeh R. Investigation of Pyrolytic graphite single-crystal neutron monochromator fine tuning effect on the reflected neutron spectra. *ICNST 2024 nuclear conference*.
16. <https://www.mcstas.org/about/>.
17. DiJulio D.D, Hawari A.I. Characteristics and performance of the neutron powder diffractometer at the NC State university PULSTAR reactor. *International Conference on the Physics of Reactors "Nuclear Power: A Sustainable Resource, Casino-Kursaal Conference Center, Interlaken, Switzerland. 2008 September 14-19.*

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

غلامزاده، زهره، ابراهیمزاده، رضا، شاهملکی، سجاد، بیگانه، علی، صائبی، حمید. (۱۴۰۴)، مقایسه فیلترینگ نوترون سریع کریستال سفایر صفحه ۱۱۲ تأمین خارج کشور و کریستال سفایر صفحه ۱۱۱ ساخت ایران. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*، ۱۱۲(۲)، ۱۷۹-۱۸۹. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1665.2051>

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1699.html

