



بررسی نقش هدایتگر S-مانند در سامانه هدایت نوترون با چشمه $^{241}\text{Am-Be}$

اسماعیل طیب‌فرد*، محسن شایسته، روح‌اله رضوی‌نژاد و مهدی عشقی

دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

پست الکترونیکی: e_tayebfard@ihu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۵/۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۹/۷)

چکیده

هدایتگرها نقش اساسی در تمرکز باریکه نوترونی و افزایش شار، برای یک سامانه هدایت نوترون دارند. در این پژوهش، به بررسی نقش پارامترهای شعاع انحناء و طول، بر شدت نوترون روی نمونه، برای هدایتگر S-مانند پرداخته شده و نتایج حاصل از آن برای سه نوع هندسه متفاوت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در این کار، از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو با نرم‌افزار McStas استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد در یک شعاع ثابت با افزایش طول، هدایتگر به سمت خمش بیشتر پیش می‌رود و نوترون‌های با انرژی کمتر را از خود عبور می‌دهد و بر عکس در یک طول ثابت با افزایش شعاع، هدایتگر کم‌کم از حالت خمیده خارج و به سمت هدایتگر مستقیم میل می‌کند و همه محدوده طیف انرژی نوترون را عبور می‌دهد. شعاع انحناء ۷۰ متر و طول ۴ متر به دلیل عبور دادن محدوده بیشتری از شار نوترون‌های حرارتی برای هدایتگر S-مانند انتخاب شد. شعاع هدایتگر می‌تواند منجر به یک طول موج قطع برای نوترون‌ها شود. همچنین این هدایتگر می‌تواند موجب حذف نوترون‌های سریع و پرتوهای گاما می‌شود.

واژه‌های کلیدی: هدایتگرها، باریکه نوترونی، کد McStas

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه هدایت نوترون و تمرکز آن روی نمونه‌های هدف انجام گرفته است. تمرکز نوترون‌ها روی نمونه‌های هدف با شار بالا و محدوده انرژی دلخواه، نیازمند طراحی سامانه هدایت نوترونی است. این سامانه خود از اجزاء اپتیکی مختلفی تشکیل شده که هر کدام وظیفه خاصی دارند. هدایتگر یکی از این اجزاء اپتیکی است که به وسیله بازتابنده‌هایی که در درون سطح آن قرار داده شده از

کاربرد فراوان نوترون‌ها در زندگی روزمره بشر از قبیل، شناسایی مواد، تولید رادیوایزوتوپ‌ها در درمان بیماری‌ها، رطوبت سنج نوترون، تشخیص ناخالصی‌های میکروسکوپی در نیمه‌هادی‌ها و تصویربرداری‌های غیر مخرب، نوترون‌ها را به ابزار با ارزشی، به دلیل خشی بودن و عمق نفوذ زیاد، در مقایسه با سایر پرتوها در زندگی بشر تبدیل کرده است. تا آنجایی که،

این محدوده طول موج‌ها میسر نیست؛ ولی می‌توان آن را برای نوترون‌های حرارتی با بازتابنده نیکل و یک ابرآینه حساب کرد. به عنوان مثال، زاویه پراکندگی بحرانی برای نیکل طبیعی $\theta_c = \lambda [A^\circ] \times \frac{1}{A}$ ، برای نیکل ۵۸ حدود $\theta_c = \lambda [A^\circ] \times \frac{12}{A}$ است [۵] و برای یک ابرآینه $\theta_c = m\lambda [A^\circ] \times \frac{1}{A}$ بوده که بسته به مقدار m می‌تواند مقادیر متفاوتی داشته باشد [۱۲]. در اینجا، مقدار m به صورت نسبت اندازه بردار پراکندگی بحرانی یک ابرآینه به اندازه بردار پراکندگی بحرانی نیکل به صورت رابطه زیر داده می‌شود:

$$m = \frac{q_c^{mirror}}{q_c^{Ni}} = \frac{\gamma k \sin \theta_{c, mirror}(\lambda)}{\gamma k \sin \theta_{c, Ni}(\lambda)} = \frac{\sin \theta_{c, mirror}(\lambda)}{\sin \theta_{c, Ni}(\lambda)}, \quad (2)$$

با توجه به این که اندازه بردار پراکندگی بحرانی از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$q_c = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta_c, \quad (3)$$

بنابراین، اندازه بردار پراکندگی بحرانی نیکل به صورت زیر خواهد شد:

$$q_c^{Ni} = \gamma k \sin \theta_{c, Ni}(\lambda) \xrightarrow{k = \frac{2\pi}{\lambda}} q_c^{Ni} = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta_{c, Ni}(\lambda) \quad (4)$$

که مقدار $q_c^{Ni} = 0.218 A^{-1}$ است [۱۳ و ۱۴]. در اینجا، مقدار کمیت m برای برخی مواد مختلف در جدول ۱ داده شده است [۱۵].

آندریاس هوبن^۳ و همکاران به طراحی مفهومی یک هدایتگر نوترونی بیضوی به منظور تمرکز شار روی نمونه‌های کوچک پرداختند. در این طراحی از برشگر به عنوان جزء اپتیکی، از ابرآینه‌هایی با ضریب $m = 3$ به عنوان مواد بازتاب دهنده و از چشمه راکتور تحقیقاتی آلمان، استفاده شده است. در این تحقیق، روش انجام کار شبیه‌سازی، کد

خروج نوترون‌ها به بیرون ممانعت می‌کند و نوترون‌ها را به سمت نمونه مورد نظر هدایت و جهت‌دهی می‌کند. این هدایت و جهت‌دهی نوترون‌ها به شدت وابسته به نوع ماده بازتاب دهنده است. هرچه ماده بازتاب دهنده قوی‌تر باشد، (یعنی سطح مقطع جذب آن کمتر و سطح مقطع پراکندگی آن بیشتر) تمرکز نوترون روی هدف بیشتر خواهد بود. در کد McStas ضخامت ماده تعریف نمی‌شود، بلکه ضریب بازتابی به نام m در داخل هدایتگر تعریف می‌شود که مقدار آن برای مواد بازتابنده‌های مختلف، متفاوت است. هر چه ضریب بازتاب بیشتر باشد، ماده بازتابنده قوی‌تری است.

نیکل طبیعی یکی از موادی است، که به عنوان بازتاب دهنده نوترون در هدایتگرها استفاده می‌شود. از طرف دیگر، علی‌رغم استفاده از تکفام سازها^۱ در متمرکز کردن نوترون [۴-۱]، استفاده از ابرآینه‌ها هم امکان پذیر شده است. ابرآینه‌ها می‌توانند نوترون‌ها را تا m (ضریب بازتاب) برابر زاویه پراکندگی بحرانی نیکل طبیعی بازتاب دهند [۵]. زاویه پراکندگی بحرانی، زاویه‌ای است که در آن بازتاب کلی برای نوترون‌ها رخ می‌دهد، به عبارتی، عبور نوترون‌ها از سطح به صفر می‌رسد [۶-۹]. زاویه پراکندگی بحرانی از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۰]:

$$\theta_c = \lambda \gamma_c = \lambda \sqrt{\frac{bN}{\pi}}, \quad (1)$$

که θ_c بر حسب درجه، $\gamma_c = \sqrt{\frac{bN}{\pi}}$ به عنوان چگالی طول پراکندگی نوترون است که فقط به مواد بازتابنده روی سطح هدایتگر بستگی دارد [۱۱]، b طول پراکندگی همدوس^۲ بر حسب فمتومتر و N چگالی اتمی مواد بر حسب تعداد بر سانتی‌متر مکعب است. در اینجا، ابعاد عبارت زیر رادیکال عکس طول موج، $\frac{1}{A}$ ، است.

با توجه به پیوسته بودن محدوده طیف انرژی چشمه نوترونی آمرسیوم-بریلیوم که از صفر تا حدود ۱۱/۳ مگا الکترون ولت است، محاسبه زاویه پراکندگی بحرانی برای همه

۱. Monochromator

۲. Coherent Scattering Length

۳. Andreas Houben

جدول ۱. مقادیر ضریب بازتاب برای مواد مختلف.

نوع ماده	ضریب بازتاب m
شیشه / سیلیکون دی اکسید	۰/۶۵
سیلیکون	۰/۴۷
نیکل طبیعی	۱
بریلیوم	۱/۰۱
الماس	۱/۱۲
نیکل ۵۸	۱/۱۸
ابر آینه	۲-۶

شعاع انحناء هم، طبق رابطه تجربی زیر تعریف می‌شود [۲۷]:

$$\lambda_c(R) = \frac{1.02}{R^{0.666}}, \quad (5)$$

که R نشان دهنده شعاع انحناء برحسب متر است که یکی از پارامترهای مؤثر در هدایتگر خمیده است. $\lambda_c(R)$ نشان دهنده طول موج قطع وابسته به شعاع انحناء هدایتگر برحسب آنگستروم است.

برای ارائه رابطه طول موج قطع، نیاز به زاویه مشخصه است. بر همین اساس، زاویه مشخصه φ_c برای یک هدایتگر خمیده که فقط وابسته به ابعاد هدایتگر است به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$\varphi_c = \sqrt{\frac{\gamma w}{R}}, \quad (6)$$

که w پهنای هدایتگر برحسب متر است. بنابراین، طول موج قطع برحسب شعاع از تقسیم رابطه (۵) بر چگالی طول پراکندگی نوترون، رابطه (۱)، به صورت رابطه زیر ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned} \lambda_c(R) &= \frac{\varphi_c}{\gamma_c} \\ &= \frac{\sqrt{\frac{\gamma w}{R}}}{\sqrt{\frac{bN}{\pi}}} \\ &= \frac{\sqrt{\gamma \pi w}}{\sqrt{bNR}} \\ \alpha &= \sqrt{\frac{\gamma \pi w}{bN}} \\ &\rightarrow \frac{\alpha}{R^{0.5}}, \end{aligned} \quad (7)$$

طبق رابطه‌های (۵) و (۷) نوترون‌هایی اجازه عبور از هدایتگر را دارند که آستانه طول موج قطع را رد کنند. به عنوان مثال، اگر محدوده طول موج نوترون‌ها بین ۱ تا ۲۰ آنگستروم باشد و طول موج قطع ۱۰ آنگستروم باشد، نوترون‌های زیر مقدار ۱۰ آنگستروم اجازه عبور ندارند. بر اساس رابطه (۵)، با افزایش شعاع انحناء هدایتگر خمیده، طول موج قطع کاهش می‌یابد و محدوده بیشتری از طول موج چشمه وارد هدایتگر می‌شود.

پارامتر مؤثر دیگر در هدایتگر خمیده، طول آن است که حداقل کمترین طول برای آن، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_k = \frac{h^2}{2m\lambda^2} \text{ بوده و طبق رابطه دوبروی } E_k [MeV] \approx \frac{11.8}{\lambda^2 [A^\circ]}$$

محدوده طول موج استفاده شده ۱ تا ۲/۴ آنگستروم معادل با انرژی ۱۴/۲ تا ۸۱/۸ میلی‌الکترون ولت بوده است [۱۳]. گروه دیگری از محققان، روی هندسه‌های مختلف هدایتگر نوترونی (بیضوی شکل، سهموی و مستقیم) تحقیقاتی انجام دادند و یافته‌های اولیه این است که عملکرد هندسه‌های بیضوی و سهموی تقریباً به یک اندازه بوده و به طور قابل توجهی نسبت به هندسه‌های دیگر برتری دارند [۱۶]. گروهی دیگر از محققان، روی هندسه‌های مختلف هدایتگر نوترونی، تحقیقاتی با استفاده از کد مونت‌کارلویی VITESS و McStas به منظور تمرکز شار نوترون و همگرایی آن روی نمونه موردنظر انجام دادند [۱۷-۲۵]. جهت کمک به تمرکز بیشتر باریکه نوترونی، باید اجزاء مناسب اپتیکی در طراحی مورد استفاده قرار گیرد که یک نمونه از این اجزاء اپتیکی، هدایتگر خمیده است که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته شده است، و یک روش معمول برای ممانعت از دید مستقیم چشمه نوترون و نمایشگر است. از این روش می‌توان برای حذف نوترون‌های سریع و پرتوهای گاما نیز استفاده کرد [۲۶]. چون تقریباً اطمینان داریم که نوترون‌ها حداقل یک برخورد در درون هدایتگر انجام خواهند داد و مستقیماً به سمت آشکارساز حرکت نخواهند کرد. بنابراین، احتمال برخورد نوترون‌ها در درون این هدایتگر، وابسته به شعاع انحناء بوده و طول موج قطع وابسته به

که شعاع انحناء و L طول هدایتگر S - مانند است. در ادامه، با استفاده از کد McStas، به طراحی سه نوع پیکربندی مختلف با هدایتگر نوترونی S - مانند می‌پردازیم.

۲. معرفی کد McStas

طراحی مؤثر و بهینه‌سازی هدایتگرهای نوترونی با توجه به کثرت پارامترها در طراحی، چالش بزرگی دارد که با روش شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلویی حل می‌شوند. یکی از نرم‌افزارهای قوی و جامع برای شبیه‌سازی و ردیابی نوترون، کد McStas است. خصوصیات زبان کد، توسط کاربران نوشته شده و به طور خودکار به کدهای شبیه‌سازی کارآمد در ISO-C ترجمه می‌شود. هسته بسته کد McStas در ISO-C با ابزارهای مختلف بر اساس زبان‌های Perl و Python نوشته شده است [۱۵]. اساس کار این کد، هم مثل کد MCNPX، بر مبنای روش مونت‌کارلو است، با این تفاوت که کد McStas فقط مخصوص نوترون است و سایر ذرات دیگر را ردیابی و شبیه‌سازی نمی‌کند. در کد McStas سطح و سلول تعریف نمی‌شوند، چون اساس تعریف هندسه در آن متفاوت از MCNPX است. اشکال هندسی آماده‌ای در کد وجود دارد که با وارد کردن اندازه ابعاد و مشخصات آنها، هندسه مورد نظر تعریف می‌شود. بنابراین، تعریف هندسه شامل چشمه، هدایتگرها و صفحه نمایش کاملاً متفاوت از کد MCNPX تعریف می‌شود. لذا، در این کد یک سری چشمه‌های آماده‌ای با عناوین متفاوت از قبیل چشمه Source gen، Source Maxwell، Source div، Source simple و غیره وجود دارد که ما مشخصات چشمه دلخواه خود را در کد تعریف و اعمال می‌کنیم. همچنین، انواع هدایتگرهایی با شکل‌های مستقیم، سهموی، بیضوی و خمیده وجود دارد که بر طبق هندسه انتخابی، نوع و شکل هدایتگر مشخص می‌شود. به عنوان مثال، اگر هدف تعریف یک هدایتگر خطی یا مستقیم در کد باشد، اولاً این هدایتگر به صورت یک مکعب مستطیل در کد تعریف می‌شود که طول، عرض و ارتفاع دارد. ثانیاً نوع ماده بارتابنده آن با تعیین مقدار ضریب بازتاب m تعیین می‌شود. هندسه S - مانند در کد به صورت ترکیب دو هدایتگر

$$L_{min} = \sqrt{\lambda RW}, \quad (8)$$

که W پهنای پنجره هدایتگر است.

هدایتگر S - مانند به دلیل خصوصیات فیزیکی آن از جمله خمیدگی و داشتن شعاع انحناء، باعث ایجاد یک فاصله عمودی در موقعیت نمونه، آشکارساز، و دیگر اجزاء اپتیکی سامانه نوترونی می‌شود، که این فاصله هم به پارامترهای هندسی شعاع و طول هدایتگر وابسته است. با فرض مسیر حرکت ذره در راستای محور Z برای موقعیت x ، فاصله عمودی از رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$x = \sum_{i=1}^2 R_i \left[1 - \cos\left(\frac{L_i}{R_i}\right) \right], \quad (9)$$

که R_i شعاع انحناء و L_i طول هدایتگر است. حد سیگما i از ۱ تا ۲ مربوط به دو هدایتگر خمیده است و بسته به تعداد هدایتگرهای خمیده، حد بالای سیگما می‌تواند متفاوت هم باشد.

با توجه به این که محدوده تغییرات طبق $\cos\left(\frac{L_i}{R_i}\right) \ll 1$ است، با فرض کوچک بودن این تغییرات، آن را بسط می‌دهیم. با بسط تابع کسینوس تا مرتبه دوم برای دو هدایتگر خمیده یکسان، خواهیم داشت:

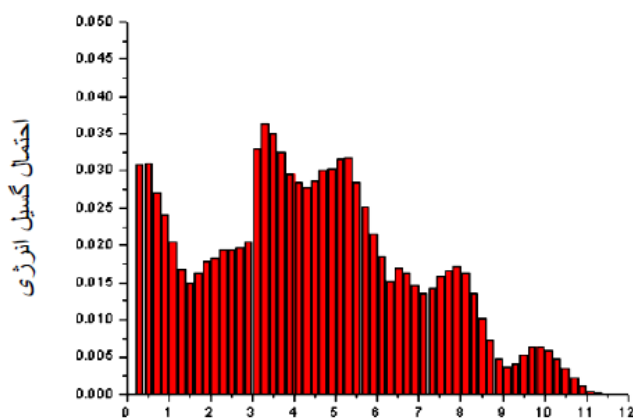
$$\begin{aligned} x &= \sum_{i=1}^2 R_i \frac{\left(\frac{L_i}{R_i}\right)^2}{2} \\ &= \sum_{i=1}^2 \frac{L_i^2}{2R_i} \\ &= \frac{L_1^2}{2R_1} + \frac{L_2^2}{2R_2} \\ &= \frac{L^2}{R}, \end{aligned} \quad (10)$$

بنابراین، تعریف موقعیت عمودی اجزاء سامانه نسبت به مسیر اولیه پرتو، در کد McStas به صورت رابطه بالا انجام می‌شود. همچنین، شعاع انحناء هدایتگر خمیده، باعث ایجاد یک زاویه چرخش نسبت به موقعیت اولیه مسیر پرتو از چشمه می‌شود که این زاویه، در کد McStas، به صورت زیر مقداردهی می‌شود:

$$\varphi_y = \frac{180 \times L}{\pi \times R}, \quad (11)$$

جدول ۲. مقادیر عدم قطعیت برای تاریخچه‌های مختلف.

تاریخچه	دقت (درصد)
۱۰ ^۳	۱۰
۱۰ ^۴	۲/۵
۱۰ ^۵	۱
۱۰ ^۶	۰/۲۵
۱۰ ^۷	۰/۰۵



شکل ۱. طیف انرژی نوترون‌های گسیلی از چشمه (MeV)

شکل ۱. طیف انرژی چشمه نوترونی آمرسیوم بریلیوم.

ثانیه که در داخل کیسولی از جنس استیل به قطر ۳/۳ و طول ۱۰ سانتی‌متر قرار گرفته، استفاده می‌شود.

محدوده انرژی نوترون‌های گسیلی از این چشمه بین صفر تا ۱۱/۳ مگا الکترون ولت بوده و طیف انرژی گسیلی این چشمه در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین طیف انرژی این چشمه در خروجی هدایتگر در شکل ۲ آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که در خروجی هدایتگر نوترون‌های زیر یک مگا الکترون ولت که عمدتاً نوترون‌های حرارتی هستند، عبور کرده‌اند و نوترون‌های با انرژی بیشتر عبور نکرده‌اند. برای دستیابی به شار نوترون‌های حرارتی بالا روی نمونه، از کندکننده‌ها استفاده می‌شود.

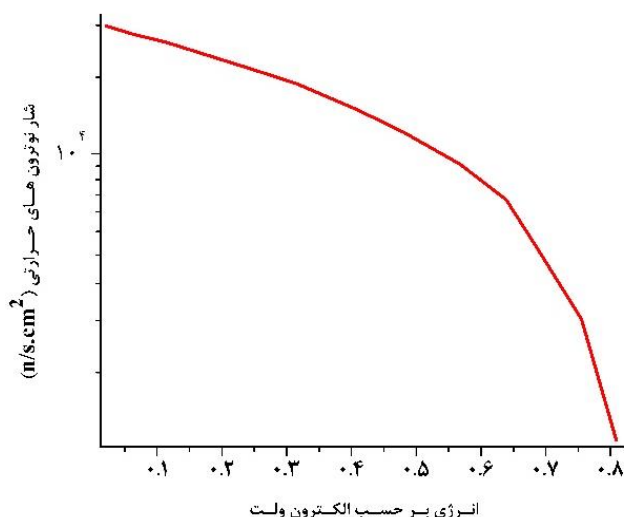
در این پژوهش، به جای استفاده از کندکننده‌ها، از تکنیک هدایتگر S^k - مانند برای دستیابی به محدوده انرژی نوترون‌های حرارتی استفاده شده است. استفاده از هدایتگر خمیده، باعث

خمیده در کد تعریف می‌شود و مقداری آن در کد طبق رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) موجود در مقاله مقداری می‌شود.

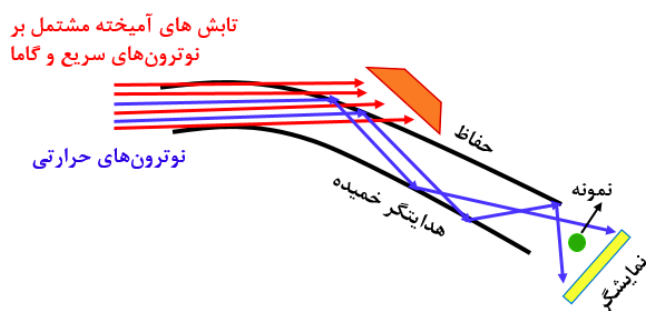
اغلب مقالات حال حاضر دنیا، شبیه‌سازی‌هایشان با استفاده از این کد، مربوط به راکتورها بوده و ما این کار را برای چشمه نوترونی آمرسیوم-بریلیوم موجود در آزمایشگاه انجام می‌دهیم. عدم قطعیت در تمام محاسبات ما حدود یک درصد بوده است. عدم قطعیت در کد به صورت جدول ۲ است و ما تاریخچه را برابر ۱۰^۷ گرفتیم که بنا بر منوال خود کد خطا کمتر از یک درصد است.

۲.۱. هدایتگر ترکیبی

جهت طراحی پیکربندی مناسب مشتمل بر هدایتگرهای ترکیبی در کد McStac، چشمه نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ با فعالیت حدود ۵ کوری، نیمه عمر ۴۳۳ سال و شدت 3×10^7 نوترون بر



شکل ۲. شار چشمه نوترونی آمرسیوم برلیوم در خروجی هدایتگر.

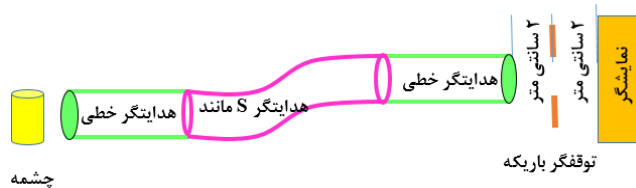


شکل ۳. نمایی از حذف پرتو گاما و انعکاس نوترون‌های حرارتی در یک هدایتگر خمیده [۲۸].

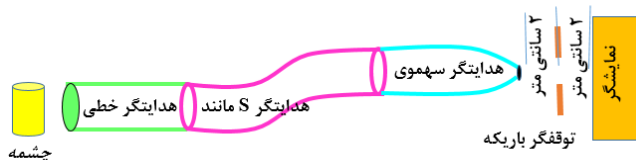
شده و تبدیل به نوترون‌های حرارتی شوند.

هدایتگرهای نوترونی هم در مورد نوترون‌های حرارتی، سرد و فوق سرد به کار می‌روند [۲۹-۳۳]. درست است که زاویه بحرانی برای نوترون‌های حرارتی با بازتابنده نیکل حدود یک دهم درجه است، ولی در این پژوهش از ابرآینه با ضریب بازتاب حدود سه برابر نیکل، برای انتقال نوترون‌های حرارتی استفاده می‌شود. اگرچه وابستگی خطی زاویه بحرانی و طول موج نوترونی در معادله (۱) حکم می‌کند که نوترون‌های سردتر به دلیل طول موج بزرگ‌تر و در نتیجه زاویه پراکندگی بزرگ‌تر آسان‌تر از نوترون‌های حرارتی منتقل شوند، ولی این به معنای عدم استفاده از هدایتگر برای نوترون‌های حرارتی نیست. لذا از هدایتگرها برای انتقال هر دو نوع نوترون سرد و حرارتی استفاده می‌شود.

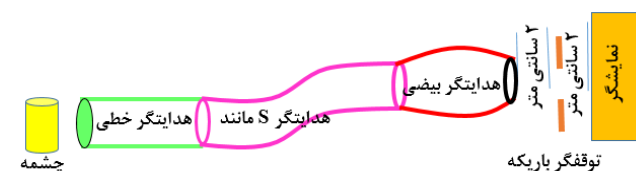
می‌شود که دید مستقیم چشمه به نمایشگر مسدود شود و نوترون‌های در محدوده انرژی حرارتی با برخورد به دیواره‌های داخلی هدایتگر منعکس و به سطح نمایشگر برسند. نوترون‌های سریع و گاما هم از هدایتگر عبور کرده و توسط حفاظ‌های مربوط به نوترون و گاما که در بیرون هدایتگر قرار دارند، جذب می‌شوند. شکل ۳ گویای این مطلب است. هر چه انرژی جنبشی نوترون‌ها بیشتر باشد، احتمال این که در یک هدایتگر نوترونی منعکس شوند، کمتر است و بنابراین نوترون‌های حرارتی، به دلیل داشتن سطح مقطع برهم کنش بالا، با دیواره‌های داخلی هدایتگر بهتر و بیشتر منعکس می‌شوند. همچنین این احتمال هم وجود دارد که در اثر برخورد بعضی از نوترون‌های سریع با دیواره‌های هدایتگر از انرژی آنها کاسته



شکل ۴. پیکربندی اول مشتمل بر ترکیبی از هدایتگرهای خطی، S-مانند و خطی



شکل ۵. پیکربندی دوم مشتمل بر ترکیبی از هدایتگرهای خطی، S-مانند و سهموی.



شکل ۶. پیکربندی سوم مشتمل بر ترکیبی از هدایتگرهای خطی، S-مانند و بیضوی.

۲.۱.۱. پیکربندی

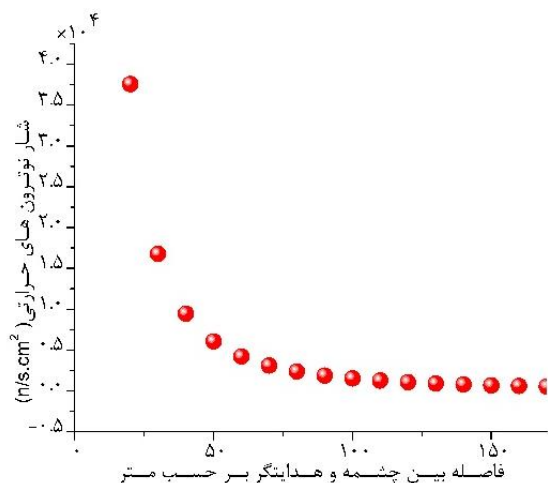
پیکربندی‌های دوم و سوم شبیه پیکربندی اول هستند، با این تفاوت که به جای آخرین هدایتگر (هدایتگر خطی در پیکربندی اول) به ترتیب از هدایتگرهای بیضوی و سهموی با دهانه ورودی مشابه 20×20 سانتی متر مربع و طول یک متر استفاده می‌شود. لازم به توضیح است که به جای جزء اپتیکی توقفگر باریکه در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ از جزء اپتیکی برشگر فرمی استفاده می‌شود.

به منظور انتخاب پیکربندی مناسب، در گام اول، ابتدا طول هدایتگر خطی اول، L ، را برابر با ۱ متر و فاصله آن تا چشمه، d ، را برابر با ۲ متر در نظر می‌گیریم. دهانه ورودی هدایتگر را متغیر در نظر فرض کرده و از مقدار صفر تا 40 سانتی متر مربع تغییر می‌دهیم. بر طبق نتایج شکل ۷ نتیجه بهتر برای دهانه ورودی هدایتگر را 20×20 سانتی متر مربع، درست در جایی که بیشترین شار را داریم انتخاب می‌کنیم که این نتیجه، مربوط به زاویه فضایی دربردارنده هدایتگر و چشمه است که تا حد زیادی وابسته به دهانه ورودی هدایتگر است.

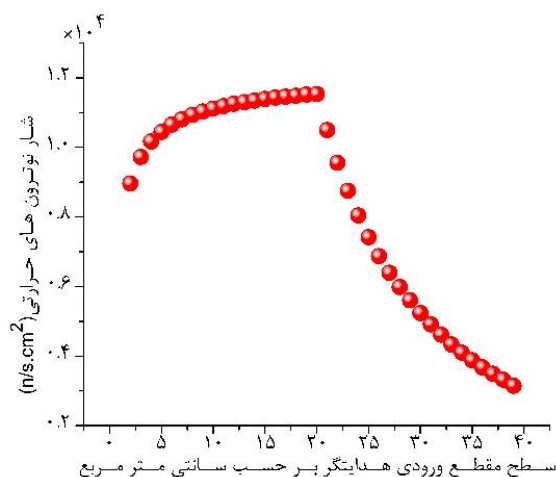
در گام دوم همچنان، طول هدایتگر خطی را برابر با ۱ متر و

پیکربندی اول، شامل سه هدایتگر است که ترکیبی از هدایتگرهای خطی، S-مانند و خطی است و در شکل ۴ نشان داده شده است. این پیکربندی در فاصله ۱ متری از چشمه نوترون قرار داده می‌شود. در ادامه شکل از یک توقفگر باریکه^۱ با ابعاد 2×2 سانتی متر مربع به عنوان اجزاء اپتیکی هدایتگر، جهت کمک به تمرکز بیشتر نوترون‌ها و حذف نوترون‌های پس‌زمینه استفاده می‌شود. فاصله توقفگر باریکه از انتهای هدایتگر سوم ۲ سانتی متر بوده و جنس آن از ماده‌ای است که جاذب نوترون است. سطح داخلی دیواره‌های هدایتگر، با مواد بازتابنده $m = 3$ لایه‌نشانی شده و درون آن خلأ در نظر گرفته شده است. برای نمایشگر و توقفگر معمولاً ضخامتی در کد در نظر گرفته نمی‌شود و فقط پهنا و ارتفاع برای آنها تعریف می‌شوند. در نهایت، یک نمایشگر (حساس به نوترون) با اندازه 20×20 سانتی متر مربع در انتهای ترکیب و در فاصله ۲ سانتی متری از توقفگر باریکه، جهت اندازه‌گیری شدت نوترون قرار داده می‌شود.

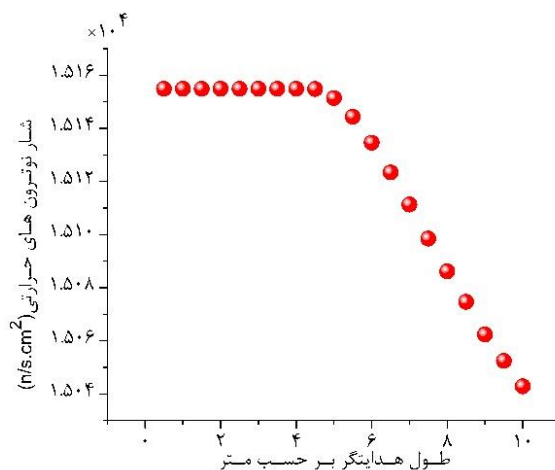
۱. Beam stop



شکل ۸. شار نوترون بر حسب فاصله بین چشمه و هدایتگر



شکل ۷. شار نوترون بر حسب سطح مقطع ورودی هدایتگر



شکل ۹. شار نوترون بر حسب طول هدایتگر خطی.

طول ۱ متر را به عنوان طول بهتر انتخاب می‌کنیم. با افزایش طول هدایتگر خطی، احتمال برخورد های نوترونی و واگرایی آنها در درون هدایتگر افزایش می‌یابد، که این برخوردها منجر به کاهش انرژی نوترون، جذب آنها و کاهش شار می‌شود. نتایج انتخاب بهتر برای هدایتگر خطی اول در جدول ۳ آمده است.

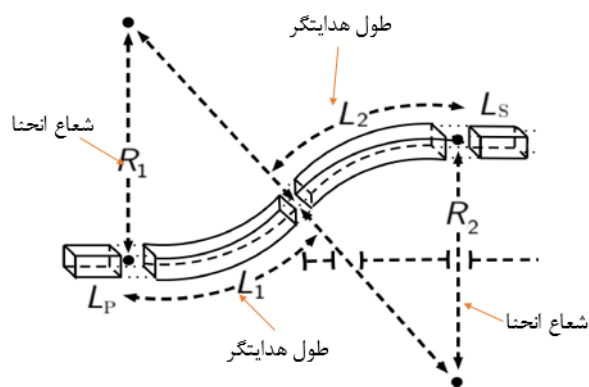
در گام چهارم، هدایتگر S-مانند با ابعاد ۲۰×۲۰ سانتی‌متر مربع و طول‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ متر بعد از هدایتگر خطی با مشخصات نهایی ذکر شده در جدول ۳ قرار داده می‌شود. برای روشن شدن بهتر مطالب، ابتدا نمایی از هدایتگر S-مانند را در شکل ۱۰ نشان داده‌ایم که R شعاع انحنا و

دهانه ورودی هدایتگر را برابر با ۲۰×۲۰ سانتی‌متر مربع، در نظر گرفته و فاصله بین چشمه و هدایتگر را تغییر می‌دهیم. شکل ۸ نشان می‌دهد شار نوترون در فاصله حدود ۸۰ تا ۱۸۰ سانتی‌متر، به علت ثابت بودن زاویه فضایی دربرگیرنده چشمه و هدایتگر، تقریباً ثابت است. در ادامه کار، فاصله هدایتگر تا چشمه، $d = 1$ متر را انتخاب می‌کنیم.

در گام سوم، با در نظر گرفتن دهانه ورودی هدایتگر ۲۰×۲۰ سانتی‌متر مربع، و فاصله هدایتگر تا چشمه $d = 1$ متر به انتخاب طول بهتر برای هدایتگر می‌پردازیم. نتایج شکل ۹ نشان می‌دهد که شار نوترون، در طول هدایتگر، L، در اندازه‌های ۵/۵ تا ۴/۵ متر تقریباً ثابت است و بر همین اساس،

جدول ۳. نتایج انتخاب بهتر برای هدایتگر خطی اول.

پارمترهای هدایتگر	مقدار
طول هدایتگر	۱ متر
دهانه ورودی هدایتگر	۲۰×۲۰ سانتی متر مربع
فاصله بین هدایتگر تا چشمه نوترون	۱ متر



شکل ۱۰. هدایتگر S-مانند با طول و شعاع انحنا.

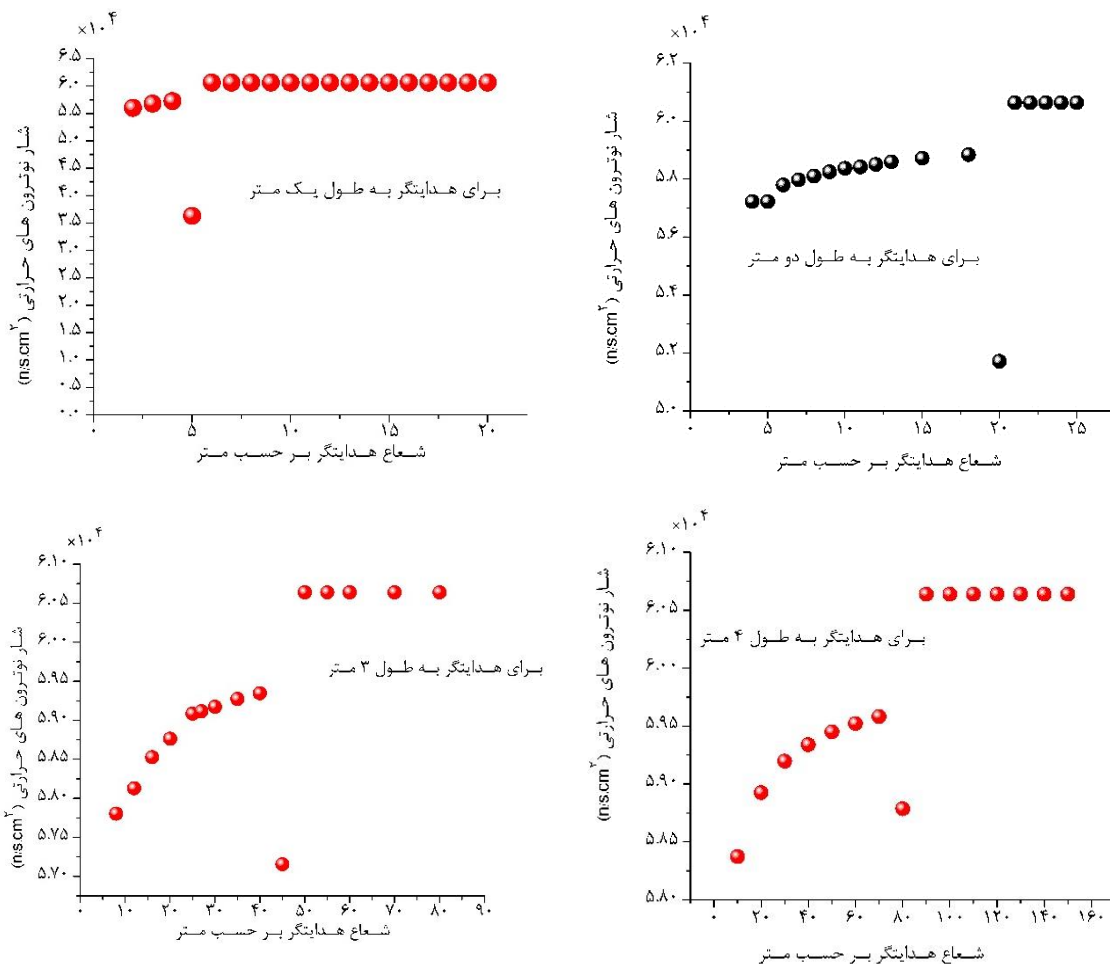
سمت هدایتگر مستقیم می‌رود. متناسب با هر طول هدایتگر خمیده، نقطه شکست انحنایی وجود دارد که از آن به بعد، هدایتگر کاملاً مستقیم بوده و همه محدوده طیف انرژی چشمه را دربر دارد. ثابت بودن مقدار شار در نقاط بالاتر از این شعاع، گویای همین مطلب هستند.

در گام پنجم طول هدایتگر S-مانند را برابر با ۴ متر و دهانه ورودی آن را برابر ۲۰×۲۰ سانتی متر مربع در نظر می‌گیریم و شار نوترون بر حسب طول موج را برای شعاع‌های متفاوت در شکل ۱۲ رسم کرده‌ایم. این شکل نشان می‌دهد که در یک طول یکسان هدایتگر، هر چه شعاع بزرگ‌تر شود، هدایتگر به سمت مستقیم بودن پیش رفته و شار نوترون افزایش، و طول موج قطع کمتر خواهد شد. برعکس، در یک طول یکسان هدایتگر، هر چه شعاع کوچک‌تر شود، هدایتگر به سمت خمش بیشتر پیش رفته و شار نوترون کاهش، و طول موج قطع بیشتر خواهد شد. به عبارتی، نوترون‌های با انرژی کمتر را از خود عبور خواهد داد.

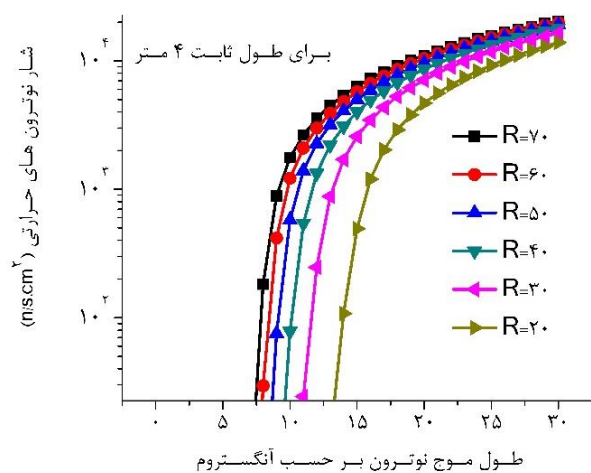
در گام ششم، شعاع هدایتگر S-مانند را برابر ۷۰ متر و دهانه ورودی آن را برابر ۲۰×۲۰ سانتی متر مربع و طول آن را

L طول آن است، این شعاع‌ها و طول‌ها می‌توانند متغیر باشند. با ثابت نگه داشتن طول و ابعاد هدایتگر S-مانند، شعاع انحناء را تغییر می‌دهیم و شعاع بهتر را انتخاب می‌کنیم. به این ترتیب، ابتدا طول هدایتگر را برابر با ۱ متر قرار داده و سپس با افزایش یک متری طول هدایتگر، آن را برابر با ۲ متر قرار داده و همین طور با افزایش‌های بعدی طول هدایتگر تا ۳ و ۴ متر، شعاع مناسب را برای هر کدام از طول‌های انتخاب شده برمی‌گزینیم. نتایج این کار در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

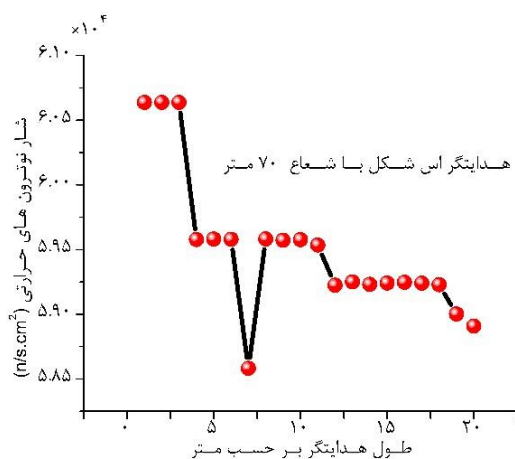
شکل ۱۱ نشان می‌دهد در یک طول ثابت با افزایش شعاع، به تدریج هدایتگر از حالت خمیده بودن خارج می‌شود و به سمت هدایتگر مستقیم میل می‌کند و باعث می‌شود که محدوده انرژی بیشتری از نوترون‌ها وارد هدایتگر بشوند. به عبارتی، با این کار، همه طیف انرژی چشمه نوترون وارد هدایتگر شده و شار نوترون به تدریج افزایش یافته و در جایی مقدار شار ثابت می‌شود، یعنی هدایتگر کاملاً از حالت خمیده خارج شده و به سمت هدایتگر مستقیم، پیش خواهد رفت. نقطه‌ای که در آن یک افت شدید مشاهده شده، جایی است که شکست انحنا رخ داده و هدایتگر از آن به بعد کاملاً از حالت منحنی خارج و به



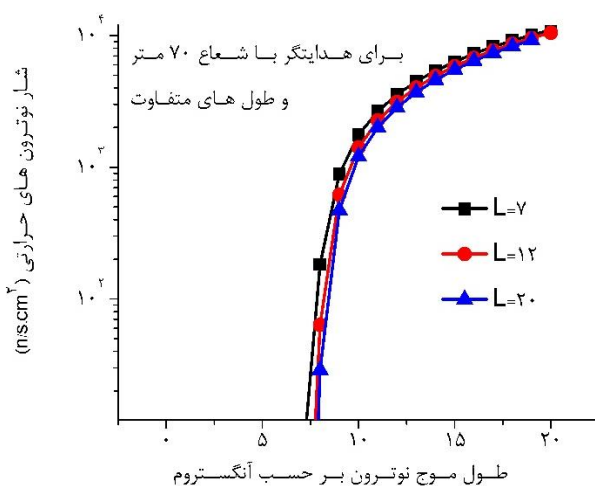
شکل ۱۱. شار نوترون بر حسب شعاع انحناء هدایتگر S - مانند برای طول‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ متر.



شکل ۱۲. شار نوترون حرارتی بر حسب طول موج نوترون حرارتی برای شعاع‌های مختلف ۲۰ تا ۷۰ سانتی‌متر.



شکل ۱۳. شار نوترون بر حسب طول هدایتگر S - مانند برای شعاع انحنا $R = 70m$.



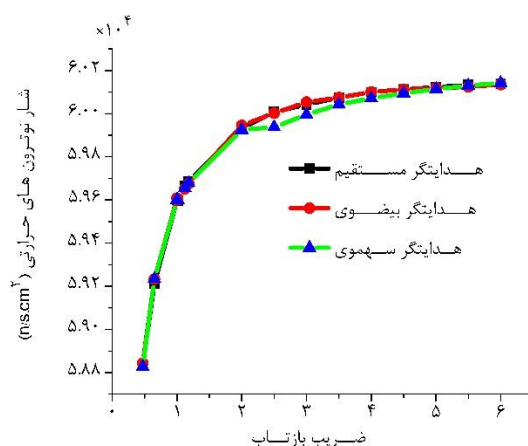
شکل ۱۴. شار نوترون بر حسب طول موج هدایتگر S - مانند برای شعاع انحنا ۷۰ متر و طول های متفاوت.

باشد، خمش کمتر و محدوده انرژی بیشتری وارد هدایتگر می شود و برعکس. با توجه به روند تغییرات شکل ۱۲، شعاع ۷۰ متری و طول ۴ متری به دلیل عبور دادن محدوده بیشتری از شار نوترون های حرارتی، برای ادامه کار مشخص شد.

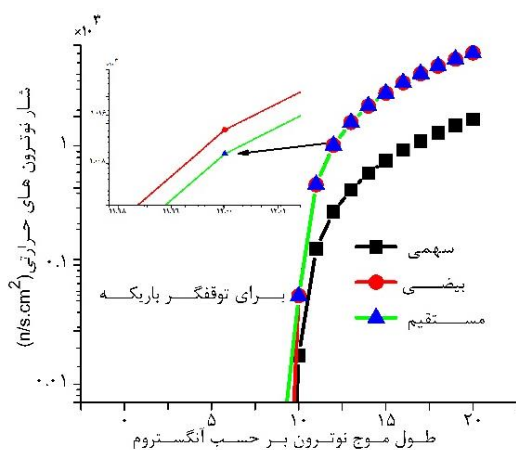
در گام هشتم، به بررسی شار بر حسب ضریب بازتاب برای سه پیکربندی بیان شده در شکل های ۴، ۵ و ۶ پرداخته می شود و نتایج آن در شکل ۱۵ رسم شده است. با توجه به شکل ۱۵، بیشترین مقدار شار مربوط به هندسه های خطی و بیضوی است. دلیل نزدیک بودن برخی نقاط در شکل ۱۵، پیرامون ضریب بازتاب ۱، به خاطر مواد بازتابنده ای مثل نیکل، بریلیوم و الماس است که ضرایب بازتاب نزدیک به هم دارند. مقادیر

متغیر و از مقدار ۱ تا ۲۰ متر با گام های ۱ متری افزایش و تغییر می دهیم که نتایج آن در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد که در یک شعاع یکسان این هدایتگر، هر چه طول بزرگ تر شود، هدایتگر به سمت خمش بیشتر پیش می رود و نوترون های با یک محدوده انرژی کمتر را از خود عبور داده، در نتیجه، شار نوترون به صورت پلکانی کاهش می یابد.

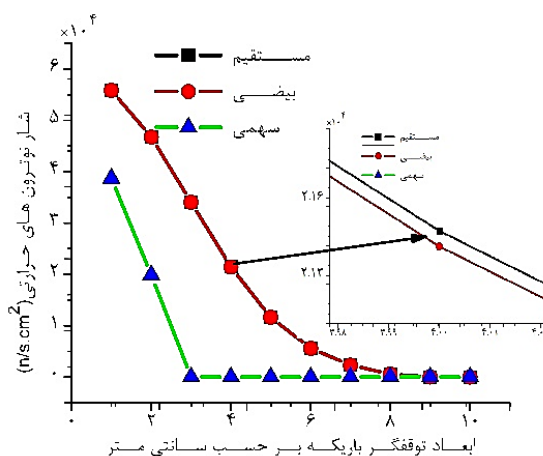
در گام هفتم، شعاع انحنا و ابعاد هدایتگر S - مانند گام ششم را در نظر گرفته و شار نوترون بر حسب طول موج را برای طول های متفاوت در شکل ۱۴ رسم می کنیم. این شکل نشان می دهد که در یک شعاع ثابت هر چه طول هدایتگر کوچک تر



شکل ۱۵. شار نوترون بر حسب ضریب بازتاب برای سه پیکربندی متفاوت.



شکل ۱۷. شار نوترون‌های حرارتی بر حسب طول موج نوترون فرودی برای سه پیکربندی متفاوت با جزء اپتیکی توقفگر باریکه.



شکل ۱۶. شار نوترون‌های حرارتی بر حسب ابعاد توقفگر باریکه برای سه پیکربندی متفاوت.

است.

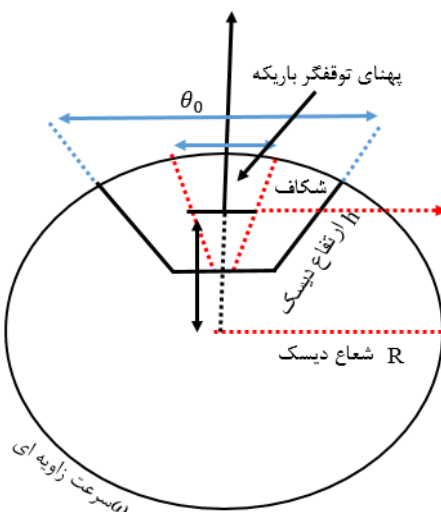
در گام **دهم**، جزء اپتیکی برشگر^۱ فرمی را در انتهای هدایتگر سوم به جای جزء اپتیکی توقفگر باریکه قرار داده و شار نوترون را بر حسب ارتفاع برشگر فرمی، شعاع برشگر و طول موج را برای سه پیکربندی اشاره شده محاسبه می‌کنیم. لازم به توضیح است که مشخصات و ویژگی‌های یک برشگر را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- برشگر، نقشی مشابه با کلید در مدارهای الکترونیکی را برای هدایتگر نوترونی بازی می‌کند.
- برای قطع یک پرتو نوترونی پیوسته به تپ‌های کوتاه، یا

این ضرایب در جدول ۱ آمده است. با افزایش ضریب بازتاب، احتمال بازتاب در درون هدایتگر افزایش یافته و شار نوترون‌های حرارتی هم متناسب با آن افزایش می‌یابد.

در گام **نهم**، جزء اپتیکی توقفگر باریکه را در انتهای هدایتگر سوم قرار می‌دهیم و شار نوترون بر حسب ابعاد توقفگر و طول موج نوترون ورودی را برای سه پیکربندی متفاوت محاسبه می‌کنیم. مطابق شکل ۱۶، بیشترین مقدار شار بر حسب ابعاد توقفگر باریکه مربوط به پیکربندی‌های خطی و بیضوی است. شکل ۱۷ نشان می‌دهد که بیشترین مقدار شار بر حسب طول موج مربوط به هندسه‌های خطی و بیضوی است که تغییرات ناچیز آنها در شکل با بزرگنمایی نشان داده شده

۱. Chopper



شکل ۱۸. نمایی از یک برشگر فرمی [۳۴]

هدایتگر سهموی است.

۴. شار نوترون در محدوده طول موج بین ۱ تا ۱۰ آنگستروم برای هر سه حالت تقریباً ثابت و برابر با صفر است، به عبارتی، طول موج قطع برای این نمودارها برابر با ۱۰ آنگستروم است و از محدوده طول موج بین ۱ تا ۱۰ آنگستروم برای دو حالت خطی و بیضوی اختلاف ناچیز است، که این اختلاف با بزرگنمایی در شکل نشان داده شده است.

استفاده از هدایتگر S⁻ - مانند برای شکل ۲۱ باعث شده که متناسب با شعاع انحنای این هدایتگر یک طول موج قطع در حدود ۱۰ آنگستروم به وجود بیاید و نوترون‌های با طول موج کمتر از این مقدار عبور نکنند و شار آنها به صفر برسد.

۳. نتیجه گیری

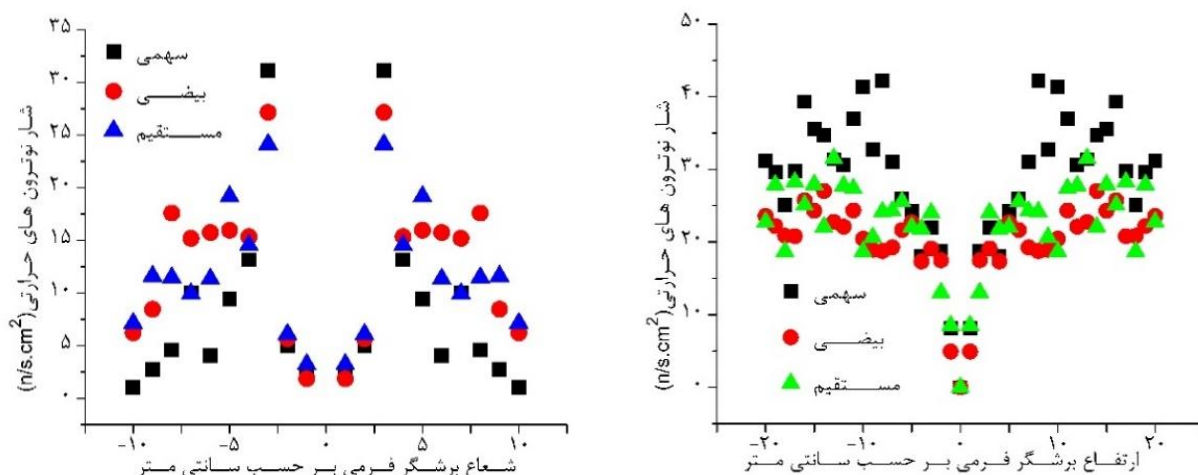
نتایج این پژوهش، نشان می‌دهد که پارامترهای هندسی از قبیل شعاع و طول هدایتگر، نقش اساسی در هدایتگر S⁻ - مانند بازی می‌کنند. بنابراین در یک شعاع ثابت، با افزایش طول هدایتگر، هدایتگر به سمت خمش بیشتر پیش می‌رود و نوترون‌های با انرژی کمتر را از خود عبور می‌دهد و به عبارتی، به سمت یک محدوده انرژی نوترون‌ها پیش می‌رود و بر عکس، در یک طول ثابت با افزایش شعاع هدایتگر، هدایتگر

برای کنترل شکل تپ (در زمان) از یک چشمه تپی، می‌توان از یک برشگر چرخان استفاده کرد. محور چرخش برشگر موازی با باریکه نوترونی است.

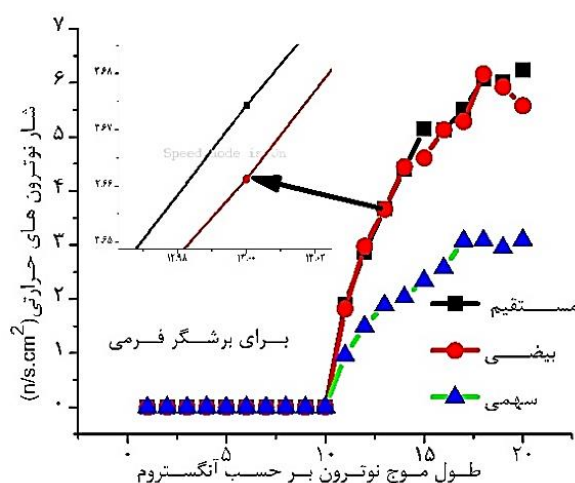
○ برشگر، شامل مواد جاذب نوترون است. برای تشکیل تپ‌ها، برشگر حفره‌هایی دارد که از طریق آن نوترون‌ها می‌توانند عبور کنند. نوترون‌هایی که در محدوده حفره نیستند، در بدنه برشگر توسط مواد جاذب نوترون جذب می‌شوند.

○ برشگر شامل پارامترهای هندسی از قبیل شعاع، ارتفاع، تعداد شکاف‌ها و زاویه برشگر است. نمایی از برشگر فرمی در شکل ۱۸ آورده شده است. نتایج این محاسبات به ترتیب در شکل‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ نشان داده شده است. خلاصه نتایج به شرح زیر بیان می‌شود:

۱. بیشترین مقدار شار برحسب ارتفاع مربوط به هدایتگر سهموی و بعد از آن به ترتیب هدایتگرهای خطی و بیضوی است.
۲. بیشترین مقدار شار برحسب شعاع مربوط به هدایتگر سهموی و بعد از آن به ترتیب هدایتگرهای بیضوی و خطی است.
۳. همچنین، بیشترین مقدار شار برحسب طول موج مربوط به هدایتگرهای بیضوی و خطی و کمترین مقدار مربوط به



شکل ۱۹. شار نوترون‌های حرارتی برحسب ارتفاع برشگر فرمی. شکل ۲۰. شار نوترون‌های حرارتی برحسب شعاع برشگر فرمی برای سه پیکربندی متفاوت.



شکل ۲۱. شار نوترون‌های حرارتی برحسب طول موج برای سه پیکربندی متفاوت که در آن از جزء اپتیکی برشگر فرمی استفاده شده است.

و گاما هم از هدایتگر عبور کرده و توسط حفاظ‌های مربوط به نوترون و گاما جذب می‌شوند. پس هر چه انرژی جنبشی نوترون‌ها بیشتر باشد، احتمال این که در یک هدایتگر نوترونی منعکس شوند کمتر است. بنابراین، نوترون‌های حرارتی به دلیل داشتن سطح مقطع برهم‌کنش بالا با دیواره‌های داخلی هدایتگر بهتر و بیشتر منعکس می‌شوند.

هدایتگرهای نوترونی، هم در مورد نوترون‌های سرد و فوق سرد به کار می‌روند و هم در مورد نوترون‌های حرارتی که آنها را به کمک ابرآینه‌ها با ضریب بازتاب چند برابر نیکل منتقل می‌کنیم. بنابراین می‌توانیم با توجه به رابطه بین شعاع انحنای

کم‌کم از حالت خمیده خارج و به سمت هدایتگر مستقیم میل می‌کند و همه محدوده طیف انرژی نوترون را از خود عبور می‌دهد.

شعاع هدایتگر می‌تواند منجر به یک طول موج قطع برای نوترون‌ها یا یک محدوده انرژی عبوری شود. همچنین، این هدایتگر موجب حذف نوترون‌های سریع و پرتوهای گاما می‌شود؛ زیرا استفاده از هدایتگر خمیده، باعث می‌شود که دید مستقیم چشمه به نمایشگر مسدود شده و نوترون‌های در محدوده انرژی حرارتی با برخورد به دیواره‌های داخلی هدایتگر و بازتاب داخل آن به سطح نمایشگر برسند. نوترون‌های سریع

هدایتگر خمیده و طول موج قطع نوترون یک محدوده انرژی خاص را برای اهداف خاص عبور دهیم.

مراجع

1. V T Em, et al., *Instruments and Experimental Techniques* **60**, 4 (2017) 526.
2. M Adib, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **347** (2015) 58.
3. K Z Lin, and V G Syromyatnikov, *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques* **10**, 4 (2016) 687.
4. M Adib, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **747** (2014) 87.
5. C P Cooper-Jensen, et al., *In. Journal of Physics: Conference Series* **528**, 1 (2014) 012005.
6. F Cousin, and A Menelle, *In. EPJ Web of Conferences* **104** (2015) 01005.
7. J Jackson Andrew, *NIST Center for Neutron Research* (2008) 1-24.
8. R Pynn, Los Alamos Neutron Science Center, Los Alamos Science (1989).
9. R Pynn, "Neutron scattering—a non-destructive microscope for seeing inside matter", In Neutron applications in earth, energy and environmental sciences, Springer, Boston, MA., (2009).
10. A P Souza, et al., *Journal of Instrumentation* **15**, 4 (2020) P04011.
11. D F R Mildner, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **290**, 1 (1990) 189.
12. K Ikeuchi, et al., *Journal of the Physical Society of Japan* **82** (2013) SA038.
13. A Houben, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **680** (2012) 124.
14. S Holm-Dahlin, et al., *Quantum Beam Science* **3**, 3 (2019) 16.
15. <http://www.mcstas.org>.
16. K H Klen, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **696** (2012) 75.
17. K Lefmann, "Niels Bohr Institute", University of Copenhagen (2007) 1.
18. D M Rodriguez, D D DiJulio, and P M Bentley, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **808** (2016) 101.
19. Y Wang, et al., *Physics Procedia*, **88** (2017) 354.
20. H Jacobsen, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **717** (2013) 69.
21. C Zendler, D Nekrassov and K Lieutenant, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **746** (2014) 39.
22. P Böni, *In. Journal of Physics: Conference Series*, **502**, 1 (2014) 012047.
23. A Hilger, et al. *Optics express* **23**, 1 (2015) 301.
24. K Lieutenant, and L D ussen, *Journal of Neutron Research* **18**, 4 (2015) 127.
25. P Cheng, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **821** (2016) 17.
26. T C Huang, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **669** (2012) 14.
27. L P de Oliveira, et al., *Journal of Instrumentation* **15**, 01 (2020) P01012.
28. https://indico.frm2.tum.de/event/51/contributions/859/attachments/162/209/IAEA_AUNIRA_Summer_School_Schillinger-Instrumentation_for_Neutron_Imaging.pdf.
29. B Schillinger, *Nondestructive Testing and Evaluation* **16**, 2-6 (2001) 141.
30. A P Souza, et al., *Journal of Instrumentation* **15**, 04 (2020) P04011.
31. S Kennedy, R Robert and H Brett, *JAERI-Conf* (2001) JP0150507.
32. D C Evans, "HFIR Thermal Neutron Beam Guide Hall Upgrade", (1997)1-94 Chancellor's Honors Program Projects, https://trace.tennessee.edu/utk_chanhonoproj/212.
33. O Kirstein, et al., *In. Materials Science Forum* **571** (2008) 213.
34. E Farhi and P Willendrup, *École thématique de la Société Française de la Neutronique* **12** (2011) 303.