

## تأثیر سیستم هدایتگرهای نوترونی مستقیم و بیضوی با پوشش نیکل بر توزیع شدت نوترون

کامران کشیری<sup>۱</sup>، روح‌اله رضوی‌نژاد<sup>۲\*</sup>، محسن شایسته<sup>۳</sup>، مهدی عشقی<sup>۴</sup>، اسماعیل طیب‌فرد<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- دانشیار، ۳- پژوهشگر و ۴- دانشجوی دکتری، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۷/۰۵/۱۳، پذیرش: ۹۷/۱۰/۰۴)

### چکیده

متمرکز نمودن نوترون‌های خروجی از چشمه‌های نوترونی بر روی هدف با توزیع انرژی و شدت مشخص در کاربردهای مختلف نقش مهمی را ایفا می‌کند. در این مقاله، تأثیر سیستم هدایتگر مستقیم و بیضوی جهت تمرکز شدت نوترونی حاصل از چشمه نوترونی استوانه‌ای با توزیع ماکسولی و در بازه طول موج ۰/۵ تا ۵ آنگستروم تا ۵ آنگستروم روی نمونه بررسی شده است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از کد شبیه‌سازی مونت کارلو McStas انجام شده و تأثیر پارامترهای مختلف هدایتگر نوترونی مستقیم و بیضوی بر روی شدت نوترون‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. سپس نتایج سیستم هدایتگر مستقیم و بیضوی با یکدیگر مقایسه شده است. بررسی نقش طول هدایتگر مستقیم و بیضوی نشان می‌دهد که با افزایش طول هدایتگر شدت خروجی افزایش یافته و پس از رسیدن به یک طول بهینه، کاهش می‌یابد. برای هدایتگر مستقیم، بهینه‌سازی فاصله چشمه تا هدایتگر بیش‌ترین تأثیر در شدت نوترون‌های خروجی برحسب طول موج را داشته، درحالی‌که برای هدایتگر بیضوی، بهینه‌سازی شعاع چشمه بیش‌ترین تأثیر در شدت نوترون‌های خروجی برحسب طول موج را دارد. در نهایت نتایج نشان می‌دهد که پس از بهینه‌سازی عملکرد هدایتگر بیضوی بهتر از هدایتگر مستقیم است.

**کلیدواژه‌ها:** تمرکز نوترونی، شدت نوترونی، هدایتگر نوترونی، McStas

## The Effect of Straight and Elliptic Neutron Guides with Nickel Coating on the Neutron Intensity Distribution

K. Kashiri, R. Razavi\*, M. Shayesteh, M. Eshghi, E. Tayebfard

Imam Hossein Comprehensive University

(Received: 04/08/2017; Accepted: 25/12/2018)

### Abstract

Neutron focusing with specific energy and intensity distribution from neutron source plays an important role in various applications. In this paper, the effect of straight and elliptical guide systems for focusing on the neutron intensity on the target has been investigated for a neutron source as a Maxwell distribution in the range of wavelength from 0.5 to 5 angstroms. The simulations were performed using the Monte Carlo simulation code McStas and the effects of different parameters of straight and elliptical neutron guides on the neutrons intensity have been obtained. Then, the results of straight and elliptical guide systems are also compared. Studying the role of the straight and elliptical guide's length shows that increasing the guide length, the output intensity increases and after an optimal length, it decreases. The results show that for the straight guide, optimization of the distance between the source to the guide has the greatest effect on the intensity of the output neutrons versus wavelength, while for the elliptic guide, optimization of the source radius has the greatest effect. Finally, the results show that the performance of the elliptical guide is better than the straight guide.

**Keywords:** Neutron Focusing, Neutron Intensity, Neutron Guide, McStas.

## ۱. مقدمه

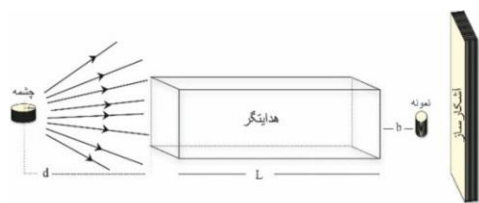
عملکرد یک سیستم طراحی شده را محاسبه و داده‌های استخراج شده در این سیستم‌ها را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهند. نرم‌افزار شبیه‌ساز McStas مورد استفاده این تحقیق بوده که بر اساس روش مونت‌کارلو و مسیر پرتو، قادر به شبیه‌سازی انواع پراکندگی نوترون است [۹-۷]. McStas بر مبنای meta-language مخصوصی است که برای شبیه‌سازی نوترون طراحی شده است. هسته بسته McStas در ISO-C با ابزارهای مختلف بر اساس Perl و Python نوشته شده است. کد McStas به‌طور اختصاصی فقط قابلیت ردیابی ذره نوترون را دارا است.

در این پژوهش، با استفاده از کد McStas، سیستم‌های هدایتگر نوترونی مستقیم و بیضوی طراحی شده و تأثیر پارامترهای مختلف بر روی شدت نوترون‌های متمرکز شده در نمونه هدف مورد بررسی قرار گرفته است و پارامترهای بهینه را استخراج می‌کنیم. در نهایت، نتایج مربوط به دو هدایتگر با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

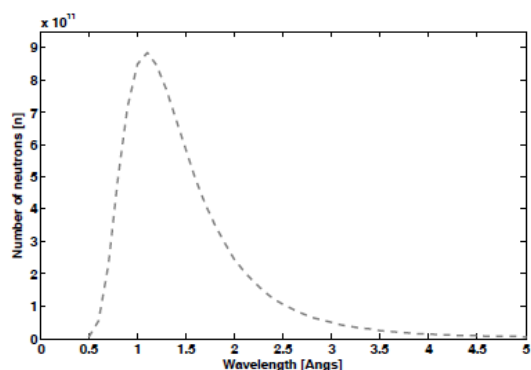
## ۲. روش تحقیق

## ۲-۱. هدایتگر مستقیم (مکعب شکل)

طرح‌واره طراحی شده برای سیستم هدایتگر مستقیم در نرم‌افزار McStas مطابق شکل (۱) نشان داده شده است که شامل: الف) چشمه نوترونی استوانه‌ای به شعاع R، با توزیع تقریباً ماکسولوی، در بازه طول موج ۰.۵ تا ۵ آنگستروم که طیف چشمه نوترونی طراحی شده به صورت شکل (۲) نشان داده شده است، ب) هدایتگر به طول L و دارای پوشش داخلی نیکل در فاصله d از چشمه، پ) نمونه در فاصله b از هدایتگر نوترونی مستقیم و ت) آشکارساز است.



شکل ۱. سیستم هدایتگر نوترونی مستقیم



شکل ۲. طیف انرژی چشمه نوترونی

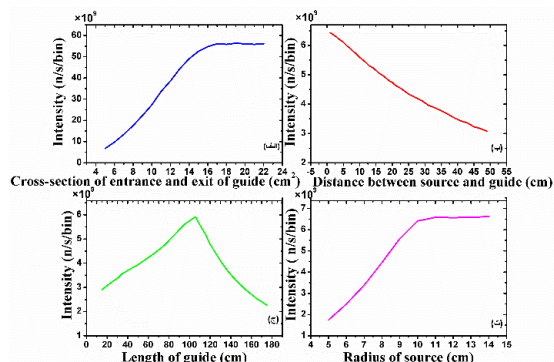
نوترون یکی از ذرات هسته‌ای اتم است که دارای بار الکتریکی خنثی است و به همراه پروتون در داخل هسته اتم اصل جرم اتم را تشکیل می‌دهند. با توجه به بدون بار بودن آن در صنایع مختلف می‌توان کاربردهای زیادی برای آن در نظر گرفت. به‌عنوان مثال رادیوگرافی نوترون یک ابزار مفید برای تصویربرداری است. با توجه به عدد اتمی بالای بسیاری از مواد (مانند پین‌های هسته‌ای)، آن‌ها از طریق اشعه ایکس بررسی می‌شوند. ولی بازیابی اشعه ایکس دقت پایینی در تشخیص اطلاعات مکانی مواد دارد؛ زیرا احتمال جذب اشعه ایکس مشخصه در بین مسیر، بالا بوده و نطفه زیادی برای مواد متراکم ایجاد می‌نماید. این در حالی است که تصویربرداری نوترون می‌تواند برخی از این چالش‌ها را با توجه به اهمیت ویژه تصویربرداری نوترونی در حوزه‌های صنعتی و دفاعی کاهش دهد. از آنجاکه نوترون‌ها با هسته اتم نمونه هدف واکنش می‌دهند و نه با ابر الکترون‌ها، در نفوذ و ارائه اطلاعات در مورد نمونه هدف نیز بسیار مؤثرتر هستند [۱]. روش‌هایی که بتوانند پرتوهای نوترونی را با ایتیکی مناسب جهت ایجاد چگالی جریان نوترونی بالاتر متمرکز کنند اهمیت فراوانی دارند [۲]. این روش‌ها شامل پراش (مانند عدسی‌های Fresnel)، شکست (مانند عدسی‌های biconcave [۳]) و بازتاب (مانند آینه‌های نوترون) می‌شوند. اکنون انگیزه بالایی برای اندازه‌گیری‌هایی که پرتو نوترون با شدت بالا بر روی نمونه‌های هدف کوچک متمرکز شده‌اند، وجود دارد که منجر به اهمیت بالای روش‌های تمرکز نوترون در طیف‌سنجی شده است. در ضمن پرتوهای نوترونی متمرکز برای آزمایش‌های پراکندگی ناکشسان اهمیت بسزایی دارند و افزایش شدت نوترون‌های خروجی موجب کاهش زمان اندازه‌گیری و افزایش آمار اندازه‌گیری می‌شود.

امروزه هدایتگرهای نوترونی به‌عنوان صافی برای انرژی نوترون، واگرایی، قطبی کردن و متمرکز کردن نوترون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴]. هدایتگرها، نوترون‌ها را به‌طور مؤثر در محدوده گسترده طول موج و فاصله‌های طولانی هدایت می‌کنند. برای پراکندگی نوترون کنترل شدت ضروری است [۵]. هدایتگرها دارای هندسه‌های قابل انعطاف هستند که هرکدام از هندسه‌ها دارای قابلیت منحصر به فرد خود به‌منظور متمرکز کردن نوترون‌ها هستند [۶]. از آنجاکه شدت نوترون‌های تولید شده از یک چشمه نوترون با پرتوهای گاما و نوترون‌های با انرژی غیر مطلوب همراه است، این کار مستلزم طراحی سیستمی است که بتواند تابش‌های ناخواسته را تا حد امکان حذف کرده و مستقیماً نوترون‌های با انرژی مورد نظر را در یک نقطه و یا در نمونه هدف متمرکز نماید.

از طرف دیگر، شبیه‌سازی‌ها می‌توانند جنبه‌های مختلفی از

بر روی نمونه هدف استخراج می‌گردد. در ادامه تأثیر پارامترهای مختلف سیستم شبیه‌سازی شده، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بعد از اجرای شبیه‌سازی، تأثیر پارامترهای ابعاد دهانه، فاصله چشمه تا هدایتگر، طول هدایتگر و شعاع چشمه استوانه‌ای بر روی شدت نوترون‌های خروجی به ترتیب در شکل‌های (۴-الف) تا (۴-ت) نمایش داده شده است.

در شکل (۴-الف)، مشاهده می‌شود که در ابتدا با افزایش هم‌زمان دهانه (ورودی و خروجی) هدایتگر مستقیم تا ابعاد تقریبی ۱۵ سانتیمتر مربع، شدت نوترون‌های خروجی از هدایتگر تقریباً به صورت خطی افزایش یافته و سپس با ادامه افزایش ابعاد دهانه، شدت نوترون‌های خروجی تقریباً ثابت می‌شود. در حقیقت، با افزایش ابعاد دهانه هدایتگر، شدت نوترون‌های خروجی تغییر نداشته و به حالت اشباع خود می‌رسد. از لحاظ فیزیکی هنگامی که ابعاد دهانه هدایتگر کوچک است تمامی نوترون‌های خروجی از چشمه وارد هدایتگر نمی‌شوند و تعدادی از نوترون‌ها از اطراف هدایتگر بدون انجام دادن اندرکنش عبور می‌نمایند و با افزایش ابعاد دهانه هدایتگر میزان ورود نوترون‌های خروجی از چشمه به هدایتگر افزایش می‌یابد تا اینکه در یک ابعاد مشخص از دهانه تمامی نوترون‌های خروجی از چشمه وارد هدایتگر می‌شوند و با ادامه روند افزایش ابعاد دهانه تأثیری در میزان نوترون‌های ورودی به هدایتگر ندارد و شار نوترون‌های خروجی از هدایتگر ثابت می‌ماند.



شکل ۴. شدت نوترون‌های خروجی از هدایتگر  $(\frac{n}{s.cm^2})$ : (الف) برحسب ابعاد دهانه ورودی و خروجی سیستم هدایتگر نوترونی مستقیم، (ب) برحسب فاصله بین چشمه تا هدایتگر نوترونی مستقیم، (ج) برحسب طول هدایتگر نوترونی مستقیم، (ت) برحسب شعاع چشمه استوانه‌ای

همان‌گونه که در شکل (۴-ب) مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله بین چشمه و هدایتگر شدت نوترون‌های خروجی به دلیل برخورد نوترون‌ها با مولکول‌های هوا به صورت تقریباً خطی کاهش یافته و هرچه فاصله هدایتگر به چشمه نزدیک‌تر باشد شدت بیشتری حاصل می‌شود که ما در این شبیه‌سازی فاصله یک

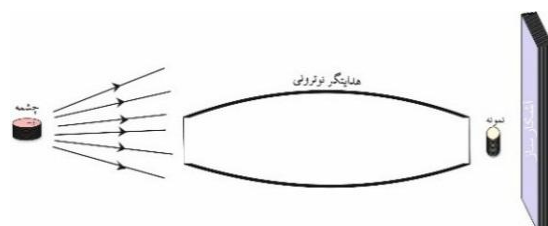
در شبیه‌سازی‌هایی که صورت می‌گیرد فرض اولیه این است که شعاع چشمه استوانه‌ای برابر با ۱۰ سانتی‌متر است و دهانه ورودی هدایتگر در فاصله ۱ سانتی‌متری از چشمه قرار دارد و طول هدایتگر برابر با ۱ متر است سپس برای بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای سیستم هدایتگر نوترونی، آن پارامتر مورد بررسی تغییر داده خواهد شد و اندازه و مقدار بقیه پارامترها به صورت همان مقدار فرض اولیه ذکر شده در نظر گرفته می‌شوند و شبیه‌سازی‌ها به تعدادی صورت می‌پذیرند تا به خوبی روند تغییرات پارامتر مورد بررسی نمایان گردد.

در این سیستم طراحی شده، با تغییر ابعاد سیستم هدایتگر نوترونی و فاصله هر کدام از اجزاء از دیگری تأثیر پارامترها بر روی شدت نوترون‌های خروجی بررسی می‌شود.

در هدایتگر نوترونی یک‌لایه پوشش‌دهنده داخلی قرار داده شده تا خروج نوترون‌ها را کاهش دهد و کسری از نوترون‌ها هنگام برخورد با این لایه بازتاب می‌شوند و کسری دیگر جذب لایه پوشش‌دهنده داخلی می‌شوند که در اینجا، هدایتگر نوترونی دارای پوشش داخلی نیکل با ضریب بازتاب  $m = 1$  در  $m = 1$  در McStas نشان‌دهنده این است که ماده بکار رفته به‌عنوان پوشش داخلی در هدایتگر، نیکل است) است.

## ۲-۲. هدایتگر بیضوی

طرح‌واره طراحی شده برای هدایتگر بیضوی در نرم‌افزار McStas مطابق شکل (۱) بوده و با این تفاوت که صرفاً به‌جای هدایتگر مستقیم، هدایتگر بیضوی جایگزین و در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. سیستم هدایتگر نوترونی بیضوی

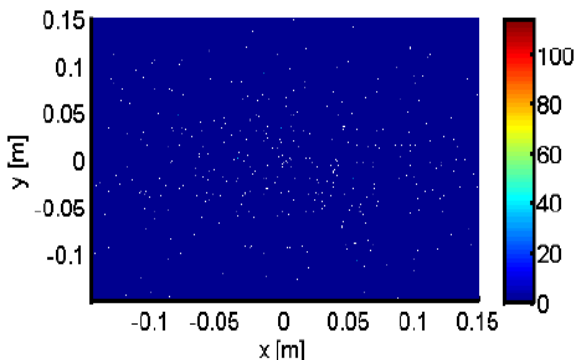
در این سیستم طراحی شده، ابعاد سیستم هدایتگر نوترونی و فاصله هر کدام از اجزاء از دیگری تغییر داده می‌شود و تأثیر پارامترها بر روی شدت نوترون‌های خروجی بررسی می‌شود.

## ۳. نتایج و بحث

### ۳-۱. هدایتگر مستقیم

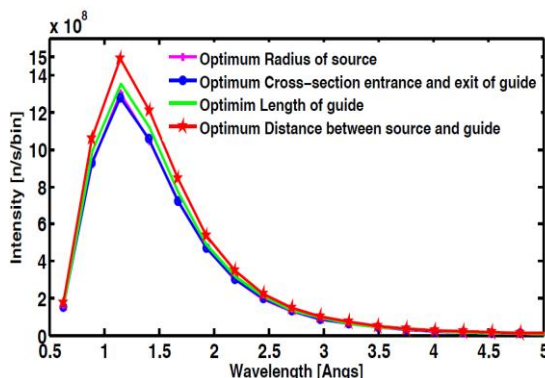
در ابتدا سیستم هدایتگر نوترونی مستقیم با دهانه ورودی و خروجی یکسان در نظر گرفته شده و شدت نوترون‌های خروجی

یک مثال از نحوه توزیع نوترون‌های خروجی از هدایتگر مستقیم بر روی نمونه موردنظر، در حالتی که فقط طول هدایتگر نوترونی مستقیم بهینه‌شده نیز ارائه گردیده است.



شکل ۵. توزیع نوترون‌های خروجی بر روی نمونه هدف در طول بهینه هدایتگر نوترونی مستقیم (فاصله مرکز توزیع نوترون‌ها تا مرکز نمونه ۰/۲۸ سانتی‌متر)

در ادامه شدت نوترون‌های خروجی از هدایتگر برحسب طول موج برای سیستم هدایتگر مستقیم، به ازای پارامترهای بهینه، بررسی شده و در شکل (۶) نمایش داده شده است.



شکل ۶. شدت نوترون‌ها ( $\frac{n}{s \cdot cm^2}$ ) برحسب طول موج نوترون‌های خروجی از هدایتگر مستقیم برای پارامترهای بهینه

با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود که بعد از بهینه‌سازی پارامترهای مختلف، بیش‌ترین شدت نوترون‌ها تقریباً در طول موج ۱/۲ آنگستروم به دست می‌آید که دلیل آن ماکسولی بودن توزیع نوترون‌های خروجی از هدایتگر بوده و بیش‌ترین شدت نوترون‌ها برحسب طول موج هنگامی به دست می‌آید که فاصله چشمه تا هدایتگر بهینه شود.

همچنین می‌توان مشاهده نمود که بیشینه شدت نوترون‌ها هنگامی که شعاع چشمه بهینه شود تقریباً با هنگامی که دهانه ورودی و خروجی هدایتگر بهینه شوند یکسان است و شدت نوترون‌ها هنگامی که طول هدایتگر بهینه می‌شود بیشتر از حالتی است که شعاع چشمه و دهانه هدایتگر (ورودی و خروجی) بهینه شود.

سانتیمتر را به‌عنوان فاصله بهینه چشمه تا هدایتگر در نظر گرفتیم.

با توجه به شکل (۴-ج)، بستگی شدت خروجی نوترون‌ها به طول هدایتگر نشان می‌دهد که در ابتدا با افزایش طول هدایتگر تا رسیدن به طولی که در آن عمل موازی‌سازی و متمرکز نمودن نوترون‌های خروجی به‌طور کامل صورت پذیرد شدت خروجی افزایش یافته و پس از رسیدن به یک شدت بیشینه در طول مشخصی، با افزایش طول هدایتگر به دلیل افزایش تعداد برخوردها و اندرکنش‌های نوترون‌ها با دیواره هدایتگر، شدت نوترون‌های خروجی از هدایتگر کاهش می‌یابد که شیب روند کاهشی شدت نوترون‌های خروجی بیشتر از شیب روند افزایشی است. در رابطه با شدت بیشینه نوترون‌های خروجی در طول مشخص می‌توان گفت که این طول، بیش‌ترین شدت خروجی نوترون‌ها از هدایتگر را داشته که این طول به‌عنوان «طول بهینه» بیان می‌گردد که مقدار طول بهینه برای این سیستم طراحی شده برابر ۱۰۶ سانتی‌متر به دست می‌آید.

درنهایت در شکل (۴-ت)، تأثیر شعاع چشمه بر شدت نوترون‌های خروجی از هدایتگر بررسی شده و مشاهده می‌شود که در ابتدا با افزایش شعاع چشمه، شدت نوترون‌های خروجی به‌صورت خطی افزایش یافته و پس از رسیدن به یک شعاع تقریبی برابر ۱۱ سانتیمتر، شدت نوترون‌های خروجی از هدایتگر تقریباً ثابت می‌شود. توجیه فیزیکی این شکل مانند توجیه شکل (۴-الف) است که بحث پیرامون زاویه فضایی است و افزایش شعاع چشمه مطابق با همان افزایش ابعاد دهانه هدایتگر است که در توضیح شکل (۴-الف) دلیل آن ذکر گردید. با توضیحات ارائه‌شده در مورد شکل (۴)، به‌طور خلاصه، اندازه ابعاد دهانه ورودی و خروجی هدایتگر، طول بهینه هدایتگر، شعاع بهینه چشمه و فاصله هدایتگر تا چشمه نوترونی به ترتیب برابر با ۱۵ سانتیمتر مربع، ۱۰۶، ۱۱ و ۱ سانتی‌متر است.

اکنون با توجه به شکل (۱) در نظر داریم توزیع نوترون‌های خروجی از هدایتگر بر روی نمونه هدف را در حالت‌های بهینه پارامترهای بررسی شده که در بالا استخراج گردید مورد بررسی قرار دهیم. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که فاصله مرکز توزیع نوترون‌ها تا مرکز نمونه در حالت‌های بهینه ابعاد دهانه ورودی و خروجی هدایتگر، فاصله چشمه تا هدایتگر، طول هدایتگر و شعاع چشمه به ترتیب ۱۵، ۱۳، ۰/۲۸، ۰/۴ و ۰/۲۸ سانتیمتر است. به عبارتی، در تمامی حالت‌های بهینه‌شده، مرکز توزیع نوترون‌های خروجی از هدایتگر تقریباً در مرکز نمونه هدف قرار گرفته که در مقایسه بین این حالت‌های بهینه، دهانه ورودی و خروجی بیش‌ترین نزدیکی به مرکز نمونه را دارا است. شکل (۵)، به‌عنوان

چشمه و هدایتگر شدت نوترون‌های خروجی به صورت ثابت بوده و سپس در فاصله ۴۲ سانتیمتر، شدت نوترون‌های خروجی تقریباً به طور خطی کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل (۷-ج)، بستگی شدت خروجی نوترون‌ها به طول هدایتگر نشان می‌دهد که در ابتدا با افزایش طول هدایتگر شدت نوترون‌های خروجی افزایش یافته و پس از رسیدن به یک شدت بیشینه در طول ۷۶ سانتیمتر، کاهش می‌یابد.

در ادامه در شکل (۷-ت)، روند تغییرات مانند شکل (۴-ت) بوده و ملاحظه می‌شود که تنها تفاوت شکل (۷-ت) با شکل (۴-ت)، این است که در شکل (۷-ت) روند افزایش شدت نوترون‌های خروجی از هدایتگر تا شعاع ۱۳ سانتیمتر ادامه دارد در حالی که در شکل (۴-ت) این روند افزایشی تا شعاع ۱۱ سانتیمتر ادامه داشت و سپس با ادامه افزایش آن، شدت نوترون‌های خروجی تقریباً ثابت می‌شود.

دلایل فیزیکی نتایج به دست آمده از شکل (۷) همانند دلایل فیزیکی ذکر شده در مورد شکل (۴) است با این تفاوت که در شکل (۷-ب) در ابتدا با افزایش فاصله بین چشمه و دهانه ورودی هدایتگر، شدت نوترون‌های خروجی از هدایتگر ثابت می‌ماند و بعد از یک فاصله مشخص، با افزایش فاصله بین چشمه و دهانه ورودی هدایتگر، شدت نوترون‌های خروجی از هدایتگر کاهش می‌یابد. دلیل این تفاوت می‌تواند سه عامل زاویه فضایی، برخورد با مولکول‌های هوا و بخشی از نوترون‌هایی که از کنار وارد هدایتگر بیضوی شده و بدون اندرکنش از آن خارج می‌گردند نیز باشد.

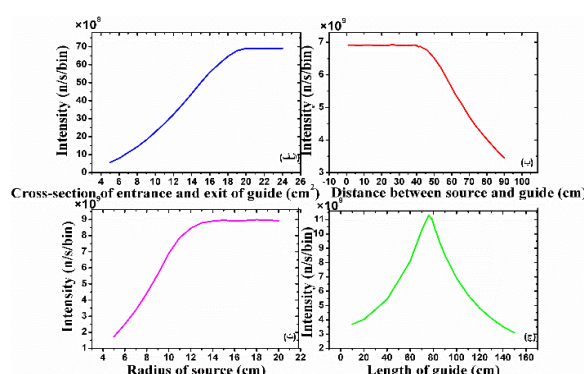
از شکل (۷-ب) به نظر می‌رسد در ابتدا با افزایش فاصله بین چشمه و دهانه ورودی هدایتگر، این سه عامل ذکر شده نقش یکدیگر را خنثی می‌کنند و بنابراین شار نوترون‌های خروجی از هدایتگر ثابت می‌ماند اما در ادامه با افزایش فاصله بین چشمه و دهانه ورودی هدایتگر، عامل برخورد نوترون‌ها با مولکول‌های هوا نقش بیشتری ایفا می‌نماید و با افزایش این فاصله، شدت نوترون‌های خروجی از هدایتگر، کاهش می‌یابد.

در نهایت، توزیع نوترون‌های خروجی از هدایتگر بر روی نمونه هدف در حالت بهینه پارامترهای بررسی شده هدایتگر بیضوی به منظور بررسی فاصله مرکز توزیع نوترون‌ها تا مرکز نمونه استخراج شده و نتایج نشان می‌دهد که فاصله مرکز توزیع نوترون‌ها تا مرکز نمونه در حالت‌های بهینه ابعاد دهانه، فاصله چشمه تا هدایتگر، طول هدایتگر و شعاع چشمه به ترتیب ۰/۱۷، ۰/۳۳ و ۰/۶۶ سانتی‌متر است. شکل (۸) به عنوان یک مثال از نحوه توزیع نوترون‌های خروجی از هدایتگر بیضوی بر روی نمونه مورد نظر، در حالتی که فقط طول هدایتگر نوترونی

بر اساس شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، اندازه شدت نوترون‌های خروجی در طول بهینه، فاصله بهینه چشمه و هدایتگر، شعاع بهینه چشمه و ابعاد بهینه دهانه هدایتگر (ورودی و خروجی) به ترتیب  $1.3/55 \times 10^8 \frac{n}{s.cm^2}$ ،  $1.4/91 \times 10^8 \frac{n}{s.cm^2}$  و  $1.3/0.4 \times 10^8 \frac{n}{s.cm^2}$  است. در ضمن گستره طیف نوترون‌های رسیده به هدف تقریباً یکسان است.

### ۳-۲. هدایتگر بیضوی

محاسبه و بررسی کلیه پارامترها و کمیت‌های انجام گرفته در بخش ۳-۱، در این بخش نیز تکرار می‌شود. به همین علت به جهت رعایت اختصار، صرفاً به ذکر نتایج اکتفا می‌کنیم.

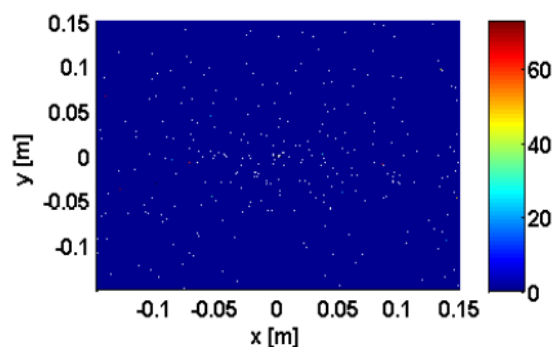


شکل ۷. الف) شدت نوترون‌ها بر حسب  $\left(\frac{n}{s.cm^2}\right)$  ابعاد دهانه ورودی و خروجی هدایتگر نوترونی بیضوی، ب) بر حسب فاصله بین چشمه تا هدایتگر نوترونی بیضوی، ج) بر حسب طول هدایتگر نوترونی بیضوی، د) بر حسب شعاع چشمه

شدت نوترون‌های خروجی از هدایتگر بیضوی بر روی نمونه هدف با فرض اینکه ابعاد دهانه ورودی و خروجی هدایتگر یکسان بوده، محاسبه شده و تأثیر پارامترهای مختلف از جمله: ابعاد دهانه، فاصله چشمه تا هدایتگر، طول هدایتگر و شعاع چشمه بر روی شدت نوترون‌های خروجی از هدایتگر بیضوی بررسی شده است، شکل‌های (۷-الف) تا (۷-ت).

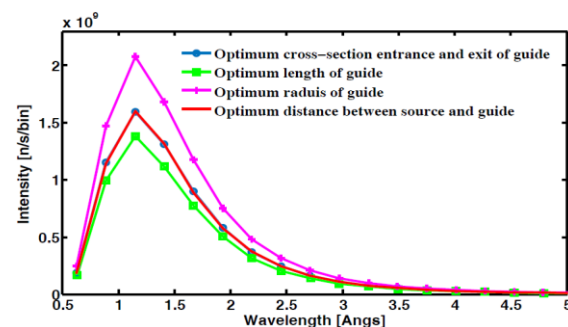
در شکل (۷-الف)، مشاهده می‌شود روند تغییرات شدت نوترون‌های خروجی بر حسب ابعاد دهانه ورودی و خروجی هدایتگر همانند شکل (۴-الف) بوده یعنی در ابتدا با افزایش هم‌زمان دهانه (ورودی و خروجی) هدایتگر، شدت نوترون‌های خروجی از هدایتگر تقریباً به صورت خطی افزایش یافته و سپس با ادامه افزایش ابعاد دهانه، شدت نوترون‌های خروجی تقریباً ثابت می‌شود. تنها تفاوت شکل (۷-الف) با شکل (۴-الف)، این است که در شکل (۷-الف) روند افزایش شدت نوترون‌های خروجی از هدایتگر تا ابعاد ۲۰ سانتیمتر مربع ادامه دارد در حالی که در شکل (۴-الف) این روند تا ابعاد ۱۵ سانتیمتر مربع ادامه داشت. در شکل (۷-ب) ملاحظه می‌شود که ابتدا با افزایش فاصله بین

بیضوی بهینه‌شده نیز ارائه گردیده است.



شکل ۸. توزیع نوترون‌های خروجی بر روی نمونه هدف در طول بهینه هدایتگر نوترونی بیضوی (فاصله مرکز توزیع نوترون‌ها تا مرکز نمونه ۰/۳۳ سانتی‌متر)

لازم به ذکر است که مرکز توزیع نوترون‌ها تقریباً در مرکز نمونه بوده و در حالتی که فاصله بین چشمه و هدایتگر نوترونی بیضوی بهینه‌شده، مرکز توزیع نوترون‌ها بیش‌ترین نزدیکی به مرکز نمونه را دارا است. در ادامه شدت نوترون‌های خروجی از هدایتگر بیضوی برحسب طول موج، به ازای پارامترهای بهینه بررسی شده و در شکل (۹) نمایش داده شده است.



شکل ۹. شدت نوترون‌ها ( $\frac{n}{s.cm^2}$ ) برحسب طول موج نوترون‌های گسیلی از هدایتگر بیضوی برای پارامترهای بهینه

با توجه به شکل (۹) مشاهده می‌شود که بعد از بهینه‌سازی پارامترهای مختلف، بیش‌ترین شدت نوترون‌ها برحسب طول موج نوترون‌های خروجی از هدایتگر بیضوی هنگامی به دست می‌آید که شعاع چشمه بهینه شود. همچنین می‌توان مشاهده نمود که بیشینه شدت نوترون‌ها هنگامی که فاصله بین چشمه و هدایتگر بهینه شود، تقریباً با هنگامی که دهانه ورودی و خروجی هدایتگر بهینه شود یکسان است. اندازه شدت نوترون‌های خروجی در طول بهینه، فاصله بهینه چشمه و هدایتگر، شعاع بهینه چشمه و ابعاد بهینه دهانه هدایتگر به ترتیب  $1/13 \times 10^{-10} \frac{n}{s.cm^2}$ ،  $6/9 \times 10^{-9} \frac{n}{s.cm^2}$ ،  $8/9 \times 10^{-9} \frac{n}{s.cm^2}$  و  $6/91 \times 10^{-9} \frac{n}{s.cm^2}$  است (جدول ۱). مقایسه نتایج شدت نوترون‌های خروجی از هدایتگرها نشان می‌دهد که هدایتگر بیضوی عملکرد بهتری نسبت به هدایتگر مستقیم دارد که در تطابق با نتایج دیگر محققان است [۱۰-۱۱].

جدول ۱. شدت بهینه نوترون‌های خروجی از هدایتگرهای مستقیم و بیضوی ( $\frac{n}{s.cm^2}$ ) به ازای پارامترهای بررسی شده در سیستم هدایتگرهای نوترونی

پارامترهای بررسی شده	شدت بهینه نوترون‌های خروجی از هدایتگر بیضوی ( $\frac{n}{s.cm^2}$ )	شدت بهینه نوترون‌های خروجی از هدایتگر مستقیم ( $\frac{n}{s.cm^2}$ )
طول هدایتگر	$1/13 \times 10^{-10}$	$13/55 \times 10^{-8}$
فاصله چشمه و هدایتگر	$6/9 \times 10^{-9}$	$14/91 \times 10^{-8}$
شعاع چشمه	$8/9 \times 10^{-9}$	$13/04 \times 10^{-8}$
ابعاد دهانه ورودی و خروجی هدایتگر	$6/91 \times 10^{-9}$	$12/91 \times 10^{-8}$

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، سیستم هدایتگر نوترونی مستقیم و بیضوی با پوشش داخلی نیکل با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز McStas شبیه‌سازی شده و سپس بهینه شدت نوترون‌های خروجی با تغییر ابعاد دهانه هدایتگر مستقیم و بیضوی، فاصله بین چشمه تا هدایتگر، طول هدایتگر مستقیم و بیضوی و شعاع چشمه تعیین گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که با افزایش دهانه هدایتگر مستقیم و بیضوی شدت نوترون‌های خروجی افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به یک طول بهینه، تقریباً ثابت می‌گردد و نتایج بهینه‌سازی هدایتگر بیضوی بهتر از هدایتگر مستقیم است. با افزایش فاصله بین چشمه و هدایتگر شدت نوترون‌های خروجی برای هدایتگر مستقیم کاهش می‌یابد ولی برای هدایتگر بیضوی ابتدا با افزایش فاصله بین چشمه و هدایتگر شدت خروجی ثابت مانده و پس از رسیدن به یک فاصله بهینه، کاهش می‌یابد. بررسی نقش طول هدایتگر مستقیم و بیضوی نشان می‌دهد که با افزایش طول هدایتگر شدت خروجی افزایش یافته و پس از رسیدن به یک طول بهینه، کاهش می‌یابد اما لازم به ذکر است که نتایج بهینه‌سازی هدایتگر بیضوی بسیار بهتر از هدایتگر مستقیم است. برای هر دو هدایتگر مستقیم و بیضوی افزایش شعاع چشمه نیز باعث افزایش شدت خروجی شده و پس از رسیدن به یک شعاع بهینه، شدت خروجی تقریباً ثابت می‌شود. برای هدایتگر مستقیم بهینه‌سازی فاصله چشمه تا هدایتگر بیش‌ترین تأثیر در شدت نوترون‌های خروجی برحسب طول موج را داشته و طول هدایتگر در مرتبه دوم تأثیرگذاری قرار دارد در حالی که برای هدایتگر بیضوی بهینه‌سازی شعاع چشمه بیش‌ترین تأثیر در شدت نوترون‌های خروجی برحسب طول موج را داشته و تأثیر بهینه‌سازی فاصله بین چشمه تا هدایتگر و همچنین دهانه ورودی و خروجی نیز یکسان هستند. شدت نوترون‌های خروجی با استفاده از هدایتگر بیضوی بیشتر از هدایتگر مستقیم است که با نتایج دیگر محققان همخوانی دارد [۱۲].

## ۵. مرجع‌ها

- [1] Taylor, M.; Sengbusch, E.; Seyfert, C.; Moll, E.; Radel, R. "Thermal Neutron Radiography Using a High-Flux Compact Neutron"; *Physics Proc.* 2017, 88, 175 – 183.
- [2] Mildner, D. F. R.; Gubarev, M. V. "Wolter Optics for Neutron Focusing"; *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2011, 634, 7–11.
- [3] Eskildsen, M. R.; Gammel, P. L.; Isaacs, E. D.; Detlefs, C.; Mortensen, K.; Bishop, D. J. "Compound Refractive Optics for the Imaging and Focusing of Low-Energy Neutrons"; *Nature* 1998, 391, 563–566.
- [4] Stahn, J.; Panzer, T.; Filges, U.; Marcelot, C.; Boni, P. "Study on a Focusing, Low-Background Neutron Delivery System"; *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2011, 634, 12–16.
- [5] Stuber, N.; Hofmann, T. "On the form Invariant Volume Transformation in Phase Space by Focusing Neutron Guides: an Analytic Treatment"; *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2013, 727, 84–89.
- [6] Komarek, A. C.; Boni, P.; Braden, M. "Parabolic Versus Elliptic Focusing – Optimization of the Focusing Design of a Cold Triple-axis Neutron Spectrometer by Monte-Carlo Simulations"; *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2011, 647, 63–72.
- [7] Willendrup, P.; Farhi, E.; Knudsen, E.; Filges, U.; Lefmann, J. "User and Programmers Guide to the Neutron Ray-Tracing Package McStas, Version 2.4.1"; *Phys. Dep. DTU* 2017.
- [8] Lefmann, K.; Nielsen, K. "McStas, A General Software Package for Neutron Ray-Tracing Simulations"; *Neutron News* 1999.
- [9] Willendrup, P. K.; Farhi, E.; Lefmann, K. "McStas 1.7-a New Version of the Flexible Monte Carlo Neutron Scattering Package"; *Physica B.* 2004, 350, 735.
- [10] Martin Rodriguez, D.; DiJulio, D. D.; Bentley, P. M. "Systematic Study on the Performance of Elliptic Focusing Neutron Guides"; *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2016, 808, 101–108.
- [11] Erko, A.; Idir, M.; Krist, T.; Michette, A. G. "Modern Developments in X-Ray and Neutron Optics"; [Springer Series in Optical Sciences](#), 2008, 123-124.
- [12] Kaspar H. K.; Klaus L.; Ken H. A.; Kim L. "Systematic Performance Study of Common Neutron Guide Geometries"; *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2012, 696, 75–84.