



## شبیه سازی گزینش گر سرعت نوترون چند پره ای با استفاده از نرم افزار McStas

معینی رودبالی، حامد\*<sup>(۱)</sup> - سید ابوالفضل<sup>(۱)</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی، گروه مهندسی هسته‌ای

### چکیده

دستگاه گزینش گر سرعت نوترون، قطعه مکانیکی دواری است که با توجه به سرعت چرخش آن، به نوترون‌های با سرعت مشخصی اجازه عبور می‌دهد و در واقع باریکه نوترون‌های تکفام با شار پیوسته تولید می‌کند که می‌تواند در ابزارالات پراکندگی نوترون، جهت مطالعه پراکندگی نوترون از کریستال‌ها و همچنین در اندازه‌گیری سطح مقطع عناصر در انرژی‌های حدود چند میلی‌الکترون‌ولت بکار رود. در این پژوهش، گزینش گر از نوع چند پره‌ای با استفاده از نرم افزار McStas که مبتنی بر روش مونت کارلو توسعه داده شده، شبیه سازی شد. ضریب عبور و قدرت تفکیک گزینش گر به ازای پرتو ورودی کاملاً موازی، به ترتیب  $95.11 \pm 0.05\%$  و  $10.43 \pm 0.05\%$  محاسبه شد که با نتایج تجربی همخوانی خوبی داشت.

کلمات کلیدی: گزینش گر چند پره‌ای، McStas، ضریب عبور، قدرت تفکیک

## Simulation of Multi-Blade Neutron Velocity Selector using McStas<sup>1</sup> Software

Roodbally Moeini, Hamed<sup>1</sup> and Hosseini, Seyed Abolfazl<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sharif University of Technology, Energy Engineering Department, Nuclear Engineering Group

### Abstract

The neutron velocity selector is a rotating mechanical piece that allows for passage of neutrons at a certain speed, according to its rotational speed. In fact, the device produces a beam of monochrome neutrons that can be used in neutron scattering instruments to study the neutron scattering from crystals, as well as to measure the cross-section of elements in energies of about a few meV. In this paper, a multi-blade selector has been simulated using the McStas software developed on the basis of the Monte Carlo method. The transmission factor and resolution for the parallel beam has been calculate  $95.11 \pm 0.05\%$  and  $10.43 \pm 0.05\%$ , respectively, which are consistent with the experimental results.

<sup>1</sup>McStas (Monte Carlo Simulation of Triple Axis Spectrometers)



*Keywords: Multi-Blade Selector, McStas, Transmission factor, Resolution*

## مقدمه

جهت مطالعه پراکندگی نوترون‌های با طول موج بلند از ناخالصی‌ها و نواقص موجود در کریستال‌ها [۱]، و همچنین اندازه‌گیری سطح مقطع نوترونی عناصر در انرژی‌های زیرحرارتی، به نوترون‌های تکفام نیاز است. این نیاز با طراحی و ساخت دستگاهی بنام دستگاه گزینش‌گر سرعت نوترون پاسخ داده شد. از چندین دهه گذشته تا امروز دستگاه‌های گزینش‌گر سرعت نوترون در مدل‌های مختلف، طراحی و ساخته شده است. در سال ۱۹۸۹، والکر<sup>۲</sup> و همکاران، یک گزینش‌گر سرعت نوترون از نوع چند پره‌ای را طراحی کردند که برای نوترون‌های با طول موج‌های بزرگتر از  $4/5$  آنگستروم بکار می‌رفت [۲]. در سال ۱۹۹۲، والکر و همکاران، تایید تجربی‌ای از ویژگی‌های پیش‌بینی شده نمونه‌اولیه گزینش‌گر طراحی شده در سال ۱۹۸۹ ارائه دادند [۳]. در سال ۲۰۰۴، لاسلو<sup>۳</sup> و همکاران، رابطه‌ای را مبنی بر وابستگی طول موج نوترون انتقال‌یافته از گزینش‌گر چند پره‌ای، به شعاع و همچنین زاویه شیب گزینش‌گر، برای باریکه نوترون کاملاً موازی ورودی به گزینش‌گر، بدست آوردند [۴]. در سال ۲۰۰۵، دوهمن<sup>۴</sup> و همکاران، دستگاه گزینش‌گر سرعت نوترون از نوع چند پره‌ای را، با در نظر گرفتن دو هدف، هزینه ساخت کم و تولید اشعه گامای خیلی کم، برای طول موج  $12/5$  آنگستروم، ساختند [۵]. هدف از انجام این پژوهش، شبیه‌سازی گزینش‌گر سرعت نوترون چند پره‌ای و مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی، با نتایج بدست آمده بصورت تجربی، می‌باشد.

## روش کار

## تئوری

<sup>۱</sup>Volker

<sup>۲</sup>László

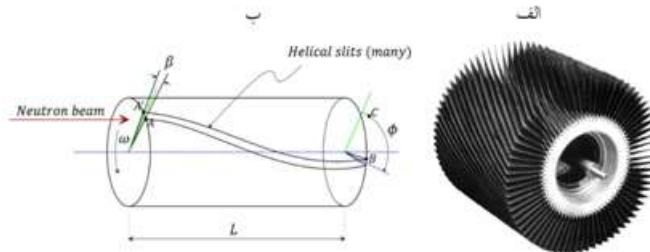
<sup>۳</sup>Dohmen

گزینش‌گر سرعت چند پره‌ای، از تعدادی تیغه‌ی موازی‌ساز جاذب نوترون تشکیل شده، که با چرخش محور گزینش‌گر، به نوترون‌های با سرعت مشخص، اجازه عبور داده می‌شود (شکل (۱)). با توجه به شکل (۱)، مدت زمانی که طول می‌کشد تا نوترونی با سرعت  $V_0$ ، طول  $L$  روتور گزینش‌گر را بپیماید، برابر است با:

$$t = \frac{L}{V_0} \quad (۱)$$

از طرفی در این مدت زمان، روتور به اندازه  $\Delta\theta = \omega t$  چرخیده است که  $\omega$  سرعت زاویه‌ای چرخش روتور می‌باشد. با توجه به شکل (۱)، شرط عبور نوترون از روتور برابر است با:

$$\Delta\theta = \phi \quad (۲)$$



شکل (۱): روتور گزینش‌گر سرعت نوترون چند پره‌ای [۶].

که  $\phi$ ، زاویه پیچش گزینش‌گر نامیده می‌شود. با ترکیب روابط (۱) و (۲) و رابطه دوبروی داریم: (۳)

$$V_0 = \frac{\omega L}{\phi}$$

با توجه به رابطه (۳)، برای نوترونی با سرعت  $V$  که قصد عبور از گزینش‌گر را دارد، زاویه پیچش دیده شده از دید این نوترون تغییر کرده و بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$\phi' = \frac{\omega L}{V} \quad (۴)$$

با توجه به شکل (۱)، نوترون‌هایی که سرعتشان اندکی با  $V_0$  متفاوت است، بسته به موقعیت دقیق تیغه‌های موازی‌ساز روی روتور در هنگام ورود نوترون به گزینش‌گر، یا عبور می‌کنند و یا با برخورد به پره‌ها جذب می‌شوند. احتمال عبور نوترونی با سرعت  $V$ ، از گزینش‌گری با زاویه پیچش  $\phi$  را ضریب عبور گزینش‌گر می‌نامند. برای محاسبه این ضریب، فرض کنید که ضخامت تیغه‌های گزینش‌گر صفر بوده و نوترونی با سرعت  $V$  از نقطه  $A$  (شکل (۱)) وارد گزینش‌گر می‌شود. اگر این نوترون بخواهد از گزینش‌گر عبور کند، گزینش‌گر باید در زمانی که نوترون طول  $L$  را طی کرد، به اندازه‌ای چرخیده باشد ( $\phi'$ ) که لبه‌ی تیغه گزینش‌گر (نقطه  $B$ ) به نقطه  $C$ ، رسیده باشد (نقطه  $A$  و نقطه  $C$  در یک صفحه قرار دارند). در این صورت با توجه به شکل (۱) داریم:



$$\phi - \phi' = \beta \quad (5)$$

که  $\beta$  زاویه بین دو تیغه گزینش گر می‌باشد. اگر همین عمل را برای حالتی که نوترون از نقطه  $A'$  وارد گزینش گر شود، تکرار کنیم، شرط عبور نوترون از گزینش گر، در حالت کلی، بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$|\phi - \phi'| \leq \beta \quad (6)$$

اگر تعداد تیغه های بکار رفته در گزینش گر  $N$  باشد، در آن صورت با توجه به شکل (۱) داریم:

$$\frac{N}{2\pi} |\phi - \phi'| \leq 1 \quad (7)$$

در نهایت ضریب عبور گزینش گر ( $T$ ) بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$T = \begin{cases} 1 - (N/2\pi)|\phi - \phi'| & \text{if } (N/2\pi)|\phi - \phi'| < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

حال اگر ضخامت هر تیغه  $d$  در نظر گرفته شود، کفایت ضریب عبور محاسبه شده در رابطه (۸) را در ضریب:

$$\left(1 - \frac{Nd}{2\pi r_{average}}\right) \quad (9)$$

ضرب کنیم، که  $r_{average}$  فاصله میانگین نوترون از محور چرخش در نقاط ورود و خروج نوترون از روتور گزینش گر می‌باشد. جهت اعمال اثر واگرایی افقی و عمودی پرتو ورودی به گزینش گر، کافی است در رابطه (۸)، به جای  $V$  از  $V_z$  و بجای  $\phi$  از  $\phi + \psi$  استفاده شود، که  $V_z$  سرعت نوترون در راستای محور  $z$  و  $\psi$  اختلاف زاویه ناشی از واگرایی می‌باشد که در زاویه پیچش دیده شده از دید نوترون ورودی اثر می‌گذارد. با در نظر گرفتن تمام موارد فوق الذکر، ضریب عبور گزینش گر بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T = \begin{cases} 1 - A & \text{if } A < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

که

$$A = \frac{Nd}{2\pi r_{average}} + \left(\frac{N}{2\pi}\right)\left(1 - \frac{Nd}{2\pi r_{average}}\right) \left|\phi + \psi - \frac{\omega L}{V_z}\right| \quad (11)$$

که  $A$  در واقع ضریب جذب گزینش گر می‌باشد.

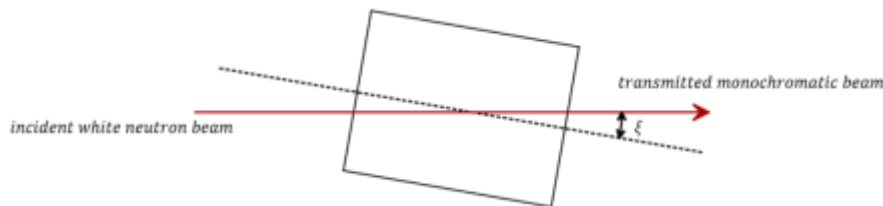
با توجه به رابطه ۴، جهت عبور نوترون‌های با انرژی بالاتر (طول موج‌های کوتاه‌تر)، بهترین راه حل افزایش سرعت چرخش روتور می‌باشد. اما به دلیل محدودیتی که در سرعت چرخش روتورها وجود دارد، این دستگاه‌ها نوعاً در محدوده انرژی‌های میلی الکترون‌ولت بکار می‌روند. البته می‌توان جهت نیل به این هدف (عبور نوترون‌های با انرژی بالاتر)، طول روتور بزرگتر و یا زاویه پیچش کوچکتری را انتخاب نمود. در انتخاب مورد اول، محدودیت فضای اشغال شده توسط روتور وجود دارد. اما در مورد دوم، در ادامه اثبات می‌شود که زاویه پیچش کوچکتر، منجر به افت قدرت تفکیک گزینش گر می‌شود. ( $R$ )



اگر محور گزینش گر به اندازه زاویه  $\xi$ ، در صفحه افقی، نسبت به جهت پرتو نوترونی کج شود (شکل (۲))، در این حالت زاویه پیچش دیده شده از دید نوترون ورودی به گزینش گر تغییر می‌کند. با توجه به شکل (۲)، میزان تغییرات زاویه پیچش، بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\phi_{eff} = \phi + \delta = \phi + \frac{\xi L}{radius} \quad (12)$$

که  $radius$ ، فاصله مرکز روزنه ورودی گزینش گر تا محور چرخش گزینش گر و  $\phi_{eff}$ ، زاویه پیچش مؤثر دیده شده از دید نوترون ورودی می‌باشد و باید جایگزین  $\phi$  در تمامی روابط بیان شده شود.



شکل (۲): نمای از بالای گزینش گر سرعت که به اندازه زاویه  $\xi$  در صفحه افقی کج شده است [۷].

## شبیه‌سازی

با توجه به تئوری بیان شده در بخش قبل، شبیه‌سازی گزینش گر نشان داده شده در شکل (۱)، مطابق با پارامترهای بیان شده در مرجع [۲] با استفاده از نرم افزار McStas انجام شد. این نرم افزار بر مبنای روش مونت کارلوست که جهت شبیه‌سازی ابزارالات پراکنده‌کننده نوترون در محدوده طول موجی آنگستروم، بکار می‌رود. ساختار کلی نرم‌افزار بدین صورت است که ابتدا شبیه‌سازی مورد نظر در زبان مخصوص McStas نوشته شده و سپس کامپایلر<sup>۵</sup> McStas بصورت خودکار، این کد را به زبان C ترجمه می‌کند و در نهایت کد C کامپایل شده، توسط کامپایلرهای C قابل اجراست. شبیه‌سازی انواع چشمه‌ها، آشکارسازها، هدایت‌گرها و ... نوترونی با این نرم افزار قابل انجام می‌باشد.

## نتایج

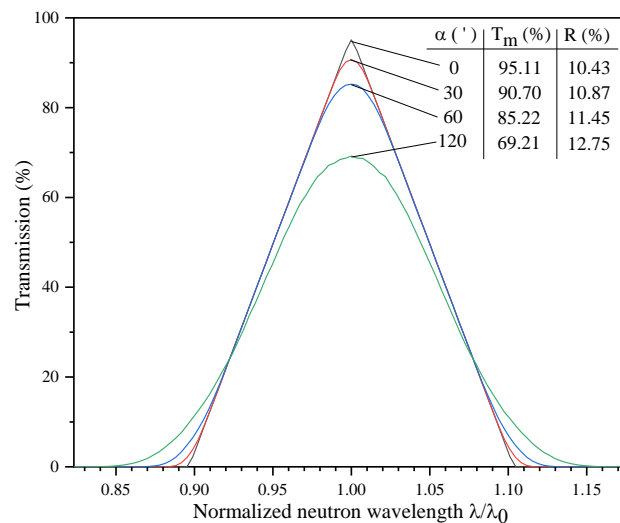
<sup>۵</sup>Compiler

<sup>۶</sup>Guide



ضریب عبور و قدرت تفکیک گزینش‌گر شبیه‌سازی شده، به ازای پرتو نوترونی ورودی به گزینش‌گر با مشخصات: توزیع طول موجی یکنواخت، توزیع زاویه‌ای یکنواخت با زاویه واگرایی  $\alpha$ ، برای سه حالت مورد بررسی قرار گرفت. زاویه واگرایی پرتو ورودی: ضریب عبور و قدرت تفکیک، به ازای زوایای واگرایی (برحسب دقیقه قوسی) مختلف پرتو ورودی به گزینش‌گر در شکل (۳) رسم شده است. این نمودارها همان‌گونه که از رابطه (۱۰) انتظار می‌رفت، کاهش ضریب عبور گزینش‌گر با افزایش زاویه واگرایی پرتو ورودی به گزینش‌گر را نشان می‌دهند. زاویه کجی<sup>۸</sup> ( $\xi$ ): با توجه به روابط (۴) و (۱۲)، و همچنین با فرض ثابت بودن سرعت چرخش روتور گزینش‌گر ( $\omega$ )، بسته به زاویه  $\xi$ ، نوترون‌های با سرعت مشخصی از گزینش‌گر عبور می‌کنند. این مطلب به ازای  $\xi$  های مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است.

ارتفاع پرتو ورودی به گزینش‌گر: ضریب عبور و قدرت تفکیک گزینش‌گر، به ازای دو ارتفاع پرتو نوترون ورودی به گزینش‌گر در شکل (۵) نشان داده شده است. این نمودارها نشان می‌دهند که هرچه ارتفاع پرتو ورودی به گزینش‌گر کوچکتر باشد، ضریب عبور گزینش‌گر، افزایش می‌یابد. علاوه بر این، محدوده زاویه کجی (FWHM) افزایش می‌یابد، که این نتیجه نیز دور از انتظار نیست.

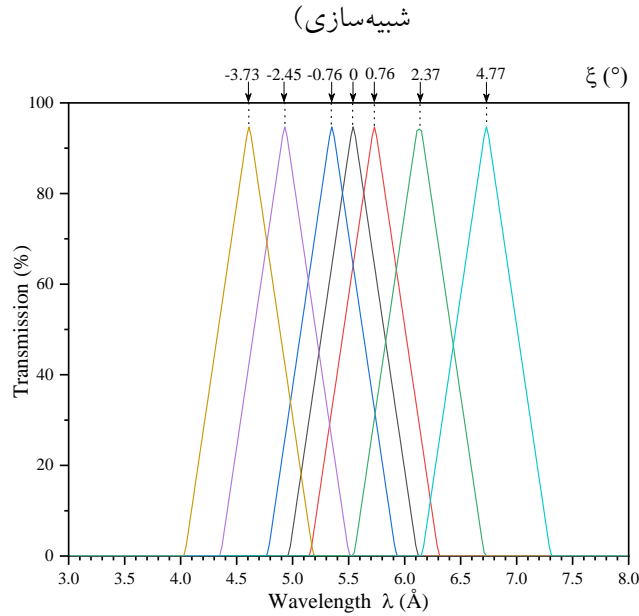


<sup>۸</sup>Minute of arc

<sup>۹</sup>Tilt angle

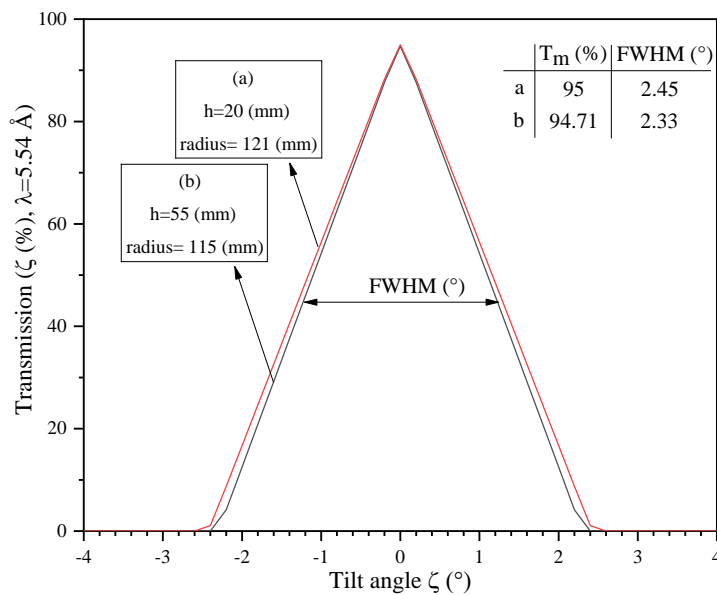


شکل (۳): ضریب عبور بیشینه ( $T_m$ ) و قدرت تفکیک ( $R$ ) گزینش‌گر به ازای زوایای واگرایی مختلف (محاسبه شده از



شکل (۴): تاثیر زاویه کجی ( $\xi$ ) بر طول موج نوترون عبوری از گزینش‌گر (محاسبه شده از شبیه‌سازی). اندازه‌گیری‌ها

برای سرعت چرخش ثابت ۲۳۰۰۰ دور بر دقیقه و  $\alpha = 0.1^\circ$  انجام شده است.





شکل (۵): تاثیر ارتفاع پرتو ورودی به گزینش گر بر ضریب عبور و قدرت تفکیک به ازای  $\alpha = 0.1^\circ$

### بحث و نتیجه گیری

مشخصات گزینش گر طراحی شده در این پژوهش، با هدف راستی آزمایشی نتایج شبیه سازی انجام شده با نتایج گزارش شده در مراجع [۲] و [۳] مطابق با مرجع [۲]، انتخاب شد. نتایج محاسبه شده از شبیه سازی با نرم افزار McStas، با دقت بسیار خوبی (با خطای حدود ۰/۰۵٪) نزدیک به نتایج گزارش شده در مراجع [۲] و [۳] بود. بنابراین، می توان نتیجه گیری کرد که نرم افزار ذکر شده می تواند جهت طراحی، بهینه سازی و ساخت گزینش گر سرعت نوترون که از اهداف آتی پژوهش فعلی است، مورد استفاده قرار گیرد.

### مراجع

- [1] C. Clark, E. Mitchell, D. Palmer, and I. Wilson, "The design of a velocity selector for long wavelength neutrons," *Journal of Scientific Instruments*, vol. 43, p. 1, 1966.
- [2] H. Friedrich, V. Wagner, and P. Wille, "A high-performance neutron velocity selector," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 156, pp. 547-549, 1989.
- [3] V. Wagner, H. Friedrich, and P. Wille, "Performance of a high-tech neutron velocity selector," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 180, pp. 938-940, 1992.
- [4] L. Rosta, J. Füzi, and L. Homanyi, "Neutron physical properties of a multiblade neutron velocity selector," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 350, pp. E711-E716, 2004.
- [5] L. Dohmen, J. Thelen, and B. Alefeld. "The Neutron Velocity Selector at the Focusing Small Angle Scattering Instrument in Jülich." *Journal of Neutron Research* 13.4 (2005).
- [6] *Elements of Slow-Neutron Scattering (Basics, Techniques, and Applications)* (Chapter 7).
- [7] National Institute of Standards and Technology (NIST) Website.