



## تعیین توزیع شار نوترون در طول کانال خشک رآکتور MNSR و تعیین طیف انرژی نوترون در این رآکتور

احمد شیرانی<sup>۱\*</sup>، عاطفه سهرابی<sup>۱</sup>، ایرج شهابی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، صندوق پستی: ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶، اصفهان- ایران

۲- پژوهشکده تحقیقات و توسعه رآکتورها و شتاب‌دهنده‌ها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۹-۸۱۴۶۵، اصفهان- ایران

**چکیده:** در این کار، شار نسبی نوترون در امتداد کانال خشک رآکتور مینیاتوری (MNSR) مرکز اتمی اصفهان به روش فعال‌سازی نوترونی اندازه‌گیری شده است. علاوه بر این، با شبیه‌سازی این رآکتور با استفاده از کد محاسباتی MCNP تغییرات شار نوترون در امتداد کانال خشک آن محاسبه و با نتایج اندازه‌گیری‌ها مقایسه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که قله‌ی توزیع شار نوترون در کانال خشک در نقطه‌ای در زیر نزدیک‌ترین نقطه به مرکز قلب رآکتور قرار دارد. علت این امر را می‌توان با بازتاباننده‌ی بریلیمی موجود در کف قلب رآکتور مرتبط دانست. در ادامه، طیف انرژی نوترون در کانال خشک و نیز در کانال‌های پرتودهی داخلی و خارجی این رآکتور محاسبه و درصد نوترون‌های گرمایی در این نواحی تعیین شده است. هم‌چنین طیف انرژی نوترون در یکی از کانال‌های پرتودهی داخلی با نتایج کارهای دیگران مقایسه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** رآکتور MNSR، کد MCNP، طیف انرژی نوترون، فعال‌سازی نوترونی، شار نوترون

## Determination of Neutron Flux Distribution along the Dry-Channel of the MNSR Reactor and Determination of Neutron Energy Spectrum in this Reactor

A. Shirani<sup>1\*</sup>, A. Sohrabi<sup>1</sup>, I. Shahabi<sup>2</sup>

1- Department of Physics, Isfahan University of Technology, P.O. Box: 84156-83111, Isfahan-Iran

2- Reactors and Accelerators Research and Development School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O. Box: 81465-1589, Isfahan -Iran

**Abstract:** In this work, the relative neutron flux was determined experimentally using neutron activation analysis (NAA) method along the length of the dry channel (GUIDE TUBE) of the Isfahan miniature neutron source reactor (MNSR). This reactor was also simulated using the MCNP code, and the neutron flux distribution along the dry channel was calculated and the results were compared with the measured values. The results showed that the neutron flux distribution peak in the dry channel occurs at a point below the nearest point to the center of the reactor core. This is due to presence of the bottom beryllium reflector. In addition, the simulation program was used to determine the neutron energy spectrum in the dry channel and also in the inner and outer irradiation channels of the reactor. Furthermore, the neutron energy spectrum in an inner irradiation channel of the reactor was compared with the previous studies.

**Keywords:** MCNP Code, MNSR Reactor, Neutron Activation, Neutron Energy Spectrum, Neutron Flux

\*email: shirani@cc.iut.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۸۸/۱۱/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۹/۱۱/۲۶



## ۱- مقدمه

رآکتور مینیاتوری چشمه‌ی نوترون (MNSR)<sup>(۱)</sup> موجود در پژوهشکده‌ی تحقیقات و توسعه‌ی رآکتورها و شتاب‌دهنده‌ها، یک رآکتور کاربردی-تحقیقاتی با قدرت کم (۳۰kW) و ایمنی ذاتی است که کاربرد اختصاصی آن در تجزیه و تحلیل مواد به روش فعال‌سازی نوترونی (NAA)<sup>(۲)</sup> می‌باشد. قلب این رآکتور از یک مجتمع سوخت شامل ۳۴۳ میله‌ی سوخت (هر یک به قطر ۵/۵ میلی‌متر و طول ۲۳۰ میلی‌متر) تشکیل شده و اطراف این مجموعه را بریلیم به عنوان بازتاباننده فرا گرفته است. سوخت مورد استفاده در این رآکتور،  $^{235}\text{U}$  با غنای ۹۰/۲٪ می‌باشد. در این رآکتور مینیاتوری از آب به عنوان کندکننده و خنک‌کننده با جریان طبیعی در قلب استفاده می‌شود. این رآکتور تنها دارای یک میله‌ی کنترل در مرکز قلب و از جنس کادمیم با پوشش استیل است که به صورت دستی و اتوماتیک کنترل می‌شود. تعداد ۵ کانال پرتودهی داخلی در درون بازتاباننده‌ی بریلیمی و همان تعداد کانال پرتودهی خارجی در بیرون از آن قرار دارند که با انتقال نمونه به داخل آن‌ها عمل پرتودهی انجام می‌پذیرد. شار نوترون گرمایی در حداکثر توان کار رآکتور در کانال‌های پرتودهی داخلی  $10^{12}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  و در کانال‌های خارجی  $5 \times 10^{11}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  است. مخزن رآکتور در درون یک استخر آبی قرار دارد که نقش حفاظتی آن در برابر نوترون‌های ناشی حایز اهمیت است. از اجزای دیگر رآکتور، کانال خشک از جنس آلومینیم به طول ۵۴۲cm و قطر ۵/۵۲cm است که به طور مورب در داخل آب استخر و در نزدیکی مخزن رآکتور قرار دارد. کانال خشک، با داشتن نوترون (و گاما) فضای مناسبی را برای انجام انواع آزمایش‌های متفرقه (از جمله کالیبراسیون آشکارسازها و دزیمترها) در خارج از مخزن رآکتور به وجود آورده است [۱ و ۲]. در این کار تحقیقاتی، برای شناخت رفتار نوترون در امتداد این کانال، شار نسبی نوترون به روش فعال‌سازی نوترونی اندازه‌گیری شده است. علاوه بر این، با استفاده از کد MCNP و شبیه‌سازی رآکتور، توزیع شار نوترون در امتداد کانال خشک محاسبه و با نتایج تجربی مقایسه شده است. پس از آن با استفاده از رآکتور شبیه‌سازی شده طیف انرژی نوترون در کانال خشک و کانال‌های پرتودهی محاسبه و درصد نوترون‌های گرمایی در این محل‌ها تعیین گردیده است.

## ۲- روش انجام کار

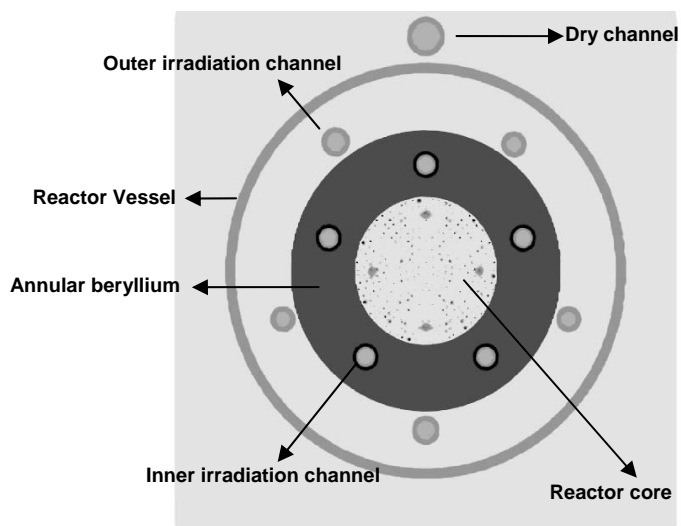
### ۲-۱ اندازه‌گیری شار نسبی نوترون در امتداد کانال خشک

برای تعیین شار نوترون در یک رآکتور به روش فعال‌سازی معمولاً از بمباران نوترونی ورقه‌های نازک عناصر مناسب (پولک‌ها) استفاده می‌شود. در خاتمه‌ی پرتودهی فعالیت پرتوایی پولک‌ها تعیین و از روی آن شار نوترونی که در آن قرار گرفته‌اند به دست می‌آید [۳ و ۴]. در این کار پژوهشی از پولک‌های ایندیم با ترکیب ایزوتوپی طبیعی (با درجه‌ی خلوص بیش از ۹۹/۹ درصد) و با غنای ۹۶٪ نسبت به فراوانی ایزوتوپ  $^{115}\text{In}$  استفاده شده است. پولک‌های ایندیم به صورت قرص‌های نازک (هر یک به جرم تقریبی ۱۳ میلی‌گرم و به قطر ۳ میلی‌متر) تهیه و پس از توزین دقیق، به منظور فرستاده شدن در کانال خشک، روی یک میله‌ی آلومینیمی چسبانده شدند. در این راستا، از ۲۱ پولک استفاده شد که ۱۳ پولک اول در فاصله‌ی ۲ سانتی‌متر و ۸ پولک دیگر در فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متر از یک‌دیگر قرار گرفتند. برای تعیین طیف گامای پولک‌های پرتو دیده، از آشکارساز سوسوزن یدور سدیم NaI(Tl) مجهز به تحلیل‌گر چندکاناله (MCA) و کالیبره شده به کمک دو چشمه‌ی  $^{137}\text{Cs}$  و  $^{60}\text{Co}$  استفاده گردید. پولک‌ها پس از ۱۱ دقیقه پرتودهی در شار نوترونی  $1 \times 10^9\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  در کانال خشک بیرون آورده شده و به داخل کپسول‌های از قبل آماده شده منتقل شدند. چون فعالیت پرتوایی پولک‌هایی که دورتر از مرکز قلب قرار داشتند کم‌تر بود، تهیه‌ی طیف با شروع از پولک‌های بالای میله شروع و هر پولک به مدت ۵ دقیقه مورد شمارش قرار گرفت. از این‌رو، فاصله‌ی زمانی بین خاتمه‌ی پرتودهی و شروع شمارش برای پولک‌ها متفاوت بود. تصحیحات مربوط به این امر انجام پذیرفت. طیف پولک‌ها، در شرایط هندسی یکسان (روی سر آشکارساز) و با استفاده از سطح زیر قله‌ی ۱۲۹۳/۵۴keV ایزوتوپ  $^{115}\text{In}^*$  با نیم-عمر ۵۴/۱۵ دقیقه و حاصل از  $^{115}\text{In}$  از راه واکنش  $(n, \gamma)$  تهیه و شار نسبی نوترون از روی سطح زیر قله‌ی مذکور محاسبه گردید [۵].

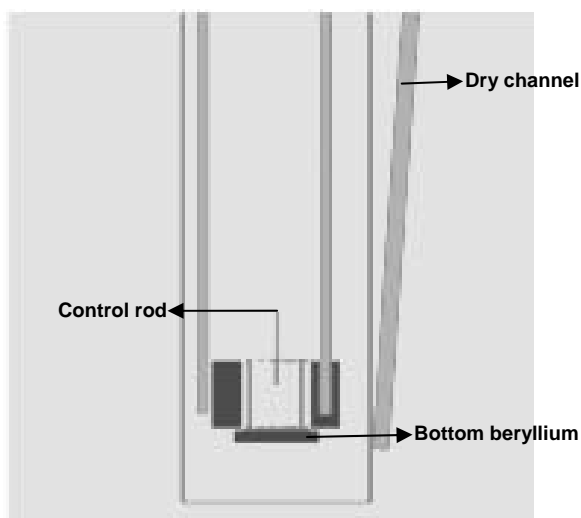
### ۲-۲ شبیه‌سازی رآکتور و محاسبه‌ی توزیع شار نوترون در امتداد

#### کانال خشک

کد MCNP یکی از مهم‌ترین کدهای محاسباتی چندمنظوره براساس روش مونت کارلو است. از ویژگی‌های بارز این کد



شکل ۱- صفحه‌ی  $z=0$ ، نمای مقطع افقی رآکتور.



شکل ۲- صفحه‌ی  $y=0$ ، نمای مقطع قائم رآکتور.

امکان شبیه‌سازی سه‌بعدی مسایل مختلف ترابرد نوترون، الکترون، فوتون و یا ترکیبی از آن‌ها است [۶]. برای شبیه‌سازی رآکتور MNSR با این کد محاسباتی، ابتدا هندسه‌ی رآکتور با آگاهی از توانایی‌های کد MCNP4C [۷] و با در اختیار داشتن اطلاعات ابعادی دقیق اجزای رآکتور [۱]، نحوه‌ی آرایش میله‌های سوخت، چگالی و نسبت اتمی به کار رفته در اجزای مختلف رآکتور تعریف شد. شکل‌های ۱ و ۲ مقاطعی از هندسه‌ی رآکتور را که با بهره‌گیری از امکانات گرافیکی این کد رسم شده‌اند، نشان می‌دهد. بعد از مشخص شدن هندسه‌ی رآکتور، با قرار دادن کارت چشمه‌ی بحرانی KCODE و تنظیم محل قرارگیری میله‌ی کنترل در فایل ورودی مطابق با محل آن در هنگام کار رآکتور (۱۲٫۵cm داخل قلب)، برای محاسبه‌ی شار نوترون در طول کانال خشک و در حالت بحرانی رآکتور، قسمت پایینی این کانال که نزدیک‌تر به قلب قرار دارد به فواصل ۲ سانتی‌متری تقسیم‌بندی شد. برای محاسبه‌ی شار از کارت درخواست F۴ استفاده شد. به‌طور کلی کد MCNP مقدار هر درخواست را به یک ذره‌ی چشمه بهنجار می‌کند. محاسبه‌ی مقدار کل شار با در دست داشتن نتایج MCNP به شکل زیر انجام می‌شود

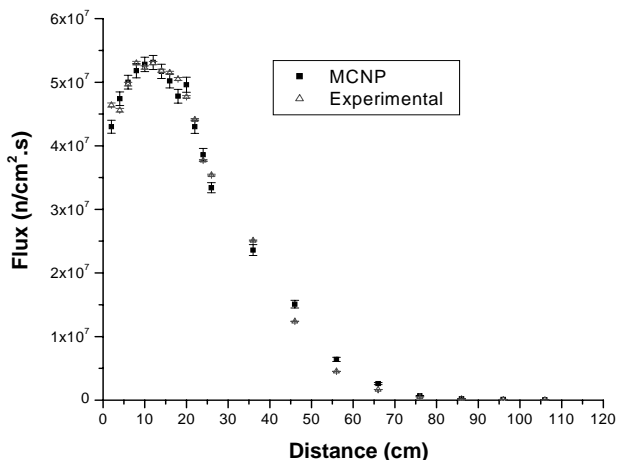
$$P_{\text{watt}} \frac{J}{\text{Sec}} \frac{\text{MeV}/J}{\text{Watt}} \frac{\text{fission}}{1.602 \times 10^{-13}} \frac{v_{\text{neutrons}}}{200 \text{MeV}} \frac{\text{neutrons}}{\text{fission}} = 3.12 \times 10^{10} \text{Pv} \frac{\text{neutrons}}{\text{sec}}$$

بنابراین کافی است که نتیجه‌ی حاصل از محاسبات MCNP به ازای یک توان مشخص  $P$  و  $\nu=2.43$  (مربوط به  $^{235}\text{U}$ ) در عدد بالا ضرب شود.

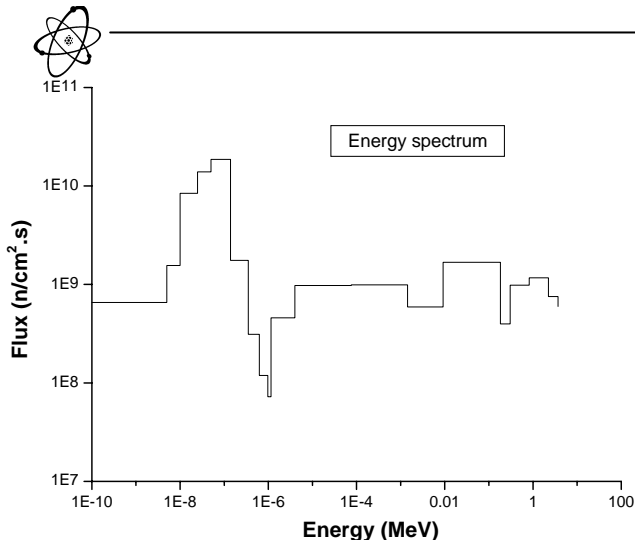
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱ توزیع تجربی شار نوترون در امتداد کانال خشک

با استفاده از نتایج حاصل از پرتوده‌ی همه‌ی ۲۱ پولک ایندیم، توزیع شار نوترون در امتداد کانال خشک تعیین گردید (شکل ۳). نکته‌ی قابل توجه در این شکل آن است که مقدار قله‌ای توزیع شار نوترون در فاصله‌ی ۱۲ سانتی‌متری از انتهای کانال خشک مشاهده می‌شود و این در حالی است که انتظار می‌رود این قله در نزدیک‌ترین نقطه‌ی کانال خشک به مرکز قلب رآکتور، که در فاصله‌ی ۱۷٫۵ سانتی‌متر از انتهای کانال خشک قرار دارد، دیده شود. علت این جابه‌جایی قله و نزدیک‌تر شدن آن به انتهای کانال خشک حضور بازتاباننده‌ی بریلیمی در کف قلب رآکتور می‌باشد.



شکل ۳- شار نوترون به صورت تابعی از فاصله از انتهای کانال خشک.



شکل ۴- طیف انرژی نوترون در کانال خشک.

در کانال خشک در ناحیه‌ی گرمایی قرار دارد. در یک اندازه‌گیری تقریبی (با پرتوهای یک پولک ایندیم بدون پوشش کادمیم و پرتوهای نمونه مشابه دیگری با پوشش کادمیم در فاصله‌ی ۱۲ سانتی متری از انتهای کانال خشک) درصد نوترون‌های گرمایی در این نقطه حدود ۹۰ درصد به دست آمد که با نتایج این بخش مطابقت نسبتاً خوبی را نشان می‌دهد.

### ۳-۴ طیف انرژی نوترون‌ها در کانال‌های پرتوهای

از آن‌جا که پرتوهای نمونه‌ها در کانال‌های پرتوهای داخلی و خارجی انجام می‌شود برای تکمیل نتایج فوق طیف انرژی نوترون در این محل‌ها نیز محاسبه شد. در طیف‌های به دست آمده، همانند طیف انرژی نوترون در کانال خشک، سه گروه نوترون‌های گرمایی، میانی و تند به وضوح قابل مشاهده بودند. نتایج به دست آمده نشان داد که در کانال پرتوهای داخلی ۵۰ درصد نوترون‌ها در ناحیه‌ی گرمایی (با انرژی کم‌تر از ۱eV)، ۳۲ درصد در ناحیه‌ی میانی (۱eV تا ۰٫۱MeV) و ۱۸ درصد در ناحیه‌ی تند (با انرژی بزرگ‌تر از ۰٫۱MeV) قرار دارند. در کانال پرتوهای خارجی ۸۰ درصد نوترون‌ها در ناحیه‌ی گرمایی، ۱۳ درصد در ناحیه‌ی میانی و ۷ درصد در ناحیه‌ی تند یافت می‌شوند. هم‌چنین طیف انرژی به دست آمده در این کار پژوهشی در یک کانال پرتوهای داخلی (در نقطه‌ای که شار نوترون بیشینه است) با طیف انرژی اندازه‌گیری شده برای رآکتور MNSR پاکستان [۸] در شکل ۵ مقایسه شده که موافقت خوبی را نشان می‌دهد.

### ۲-۳ توزیع شار نسبی نوترون حاصل از محاسبه، در امتداد کانال خشک و مقایسه با مقدار تجربی

توزیع شار نوترون حاصل از محاسبات شبیه‌سازی رآکتور در طول کانال خشک به ازای  $P=30\text{ W}$  (متناظر با شار  $10^9\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ) که اندازه‌گیری‌ها در آن انجام شده‌اند) در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل تنها خطاهای آماری لحاظ شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مطابقت نتایج محاسبات با نتایج اندازه‌گیری‌ها خوب است. در رابطه با نتایج محاسبات لازم به ذکر است که شار اندازه‌گیری شده در هر نقطه شار نسبی است و این در حالی است که شار محاسبه شده شار مطلق می‌باشد. برای به دست آوردن شکل ۳ و مقایسه‌ی بهتر دو توزیع، مقدار شار تجربی در هر نقطه در عدد ثابت ۲۵ (برابر با نسبت سطح زیر نمودار محاسباتی به سطح زیر نمودار تجربی) ضرب شده است.

### ۳-۳ طیف انرژی نوترون‌ها در کانال خشک

مطابقت خوب نتایج محاسبات با نتایج تجربی تعیین شار نوترون در کانال خشک رآکتور MNSR، نشان می‌دهد که رآکتور شبیه‌سازی شده دارای دقت کافی برای انجام هر گونه محاسبه از جمله تعیین طیف انرژی نوترون در نقاط مختلف این رآکتور می‌باشد. در ادامه طیف انرژی نوترون در گستره‌ی انرژی از  $10^{-10}$  تا  $10\text{ MeV}$  در داخل کانال خشک، با استفاده از کارت En در فاصله‌ی ۱۲cm از انتهای کانال خشک رآکتور، جایی که مقدار قله‌ای شار نوترون حاصل می‌شود، به دست آمد. نتایج حاصل از محاسبات برای توان  $P=30\text{ kW}$  (حد اکثر توان رآکتور) در شکل ۴ ارائه شده‌اند. در این شکل، سه گروه نوترون‌های گرمایی (با انرژی کم‌تر از ۱eV)، میانی (با انرژی بین ۱eV و ۰٫۱MeV) و تند (با انرژی بیش‌تر از ۰٫۱MeV)، که از مشخصات طیف انرژی نوترون در این نوع رآکتورها می‌باشند، به خوبی قابل مشاهده‌اند. هم‌چنین مشاهده می‌شود که به علت جذب نوترون‌های گرمایی در آب رآکتور و در نتیجه‌ی عدم تبعیت این نوترون‌ها از توزیع ماکسولی، قله نوترون‌های واقع در ناحیه‌ی گرمایی در انرژی‌های بالاتر از ۰٫۲۵eV و در حوالی ۰٫۱eV قرار دارد. در این طیف ۸۵ درصد نوترون‌ها در ناحیه‌ی گرمایی، ۹ درصد در ناحیه‌ی میانی و ۶ درصد در ناحیه‌ی تند قرار دارند. همان‌گونه که انتظار می‌رود، بیش‌ترین درصد نوترون

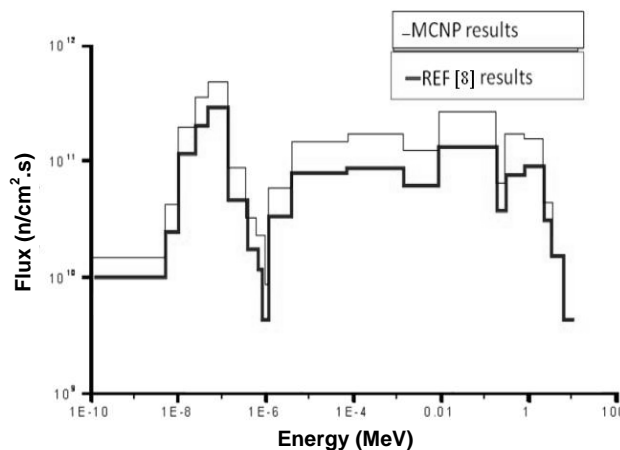


### پی‌نوشت‌ها:

- ۱- MNSR: Miniature Neutron Source Reactor  
 ۲- NAA: Neutron Activation Analysis

### References:

1. G. Jijin, "General description of miniature neutron source reactor," China Institute of Atomic Energy (1990).
2. T. Daozhu, "Iran miniature reactor pure water production system," China Institute of Atomic Energy (1990).
3. International Atomic Energy Agency, "Neutron frounce measurements," Vienna (1970).
4. F. Knoll, "Radiation detection and measurement," Michigan University (1989).
5. A. Sohrabi, "Calculation of gamma ray dose distribution and neutron flux distribution in the dry channel of the MNSR reactor using the MCNP code and comparison with experimental values," M. Sc Thesis, Faculty of Physics, Isfahan University of Technology (2008).
6. R. Johnston, "A general monte carlo neutron code," Los Alamos Scientific Laboratory Report (1963).
7. "MCNP4C monte carlo N-particle transport code system," Los Alamos National Laboratory (2000).
8. M. Iqbal, A. Muhammad, T. Mahmood, N. Ahmed, "On comparison of experimental and calculated neutron energy flux spectra at miniature neutron source reactor (MNSR)," Annals of Nuclear Energy, 209-215 (2008).



شکل ۵- طیف انرژی نوترون در کانال پرتودهی داخلی و مقایسه‌ی آن با نتایج تجربی دیگران.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این کار توزیع شار نوترون در امتداد کانال خشک رآکتور مینیاتوری اصفهان با استفاده از روش فعال‌سازی نوترونی اندازه‌گیری و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط کد MCNP مقایسه شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که در کانال خشک، شار نوترون در فاصله‌ی ۱۲ سانتی‌متری از انتهای آن به مقدار قله‌ای خود می‌رسد. سپس، با توجه به سازگاری خوب نتایج شبیه‌سازی و تجربی و اطمینان از عملکرد درست برنامه‌ی شبیه‌سازی، طیف انرژی نوترون‌ها در کانال خشک و هم‌چنین در کانال‌های پرتودهی داخلی و خارجی این رآکتور با استفاده از کد تعیین و درصد نوترون‌های گرمایی در این محل‌ها تعیین شد. نتایج نشان داد که درصد نوترون‌های گرمایی در کانال‌های پرتودهی داخلی، خارجی و کانال خشک به ترتیب ۵۰، ۸۰ و ۸۵ درصد است، و (همان‌گونه که انتظار می‌رود) با دور شدن از قلب رآکتور (اگرچه شار نوترون‌ها کاهش می‌یابد) درصد نوترون‌های گرمایی به طور نسبی افزایش می‌یابد. این اطلاعات در هنگام پرتودهی نمونه‌ها در داخل این نوع رآکتورها حایز اهمیت می‌باشند.