



## اندازه‌گیری شار نوترون حرارتی در کانال پرتودهی B راکتور تحقیقاتی تهران با روش فعالسازی نوترونی

بنین شاکری جویباری \*، حسین قدس

پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران

چکیده :

در این کار تحقیقاتی کمیت نسبت شار نوترون حرارتی به شار نوترون فوق حرارتی (f)، مقدار شار نوترون حرارتی و همچنین شار نوترون فوق حرارتی در کانال پرتودهی B راکتور تحقیقاتی تهران اندازه‌گیری شد. برای انجام این اندازه‌گیری از روش فعالسازی نوترونی استفاده شد. نسبت شار نوترون حرارتی به شار نوترون فوق حرارتی، به روش نسبت کادمیومی اندازه‌گیری شد. شار نوترون حرارتی نیز به روش فعالسازی نوترونی و با پرتودهی سیم طلا اندازه‌گیری شد. این روش تجربی بر اساس تابش دهی نمونه‌های طلا با نوترون در کانال پرتودهی B راکتور تهران و سپس اندازه‌گیری اکتیویته تابش گامای آنها با استفاده از آشکارساز HPGe قرار دارد. در این تحقیق، روش فعالسازی نوترونی برای آنالیز داده‌ها و اندازه‌گیری شار نوترونی به طور مفصل شرح داده شد. مقدار f و شار نوترون حرارتی در کانال پرتودهی B در توان 100 kW راکتور، به ترتیب برابر ۱۱۸/۳۶ و  $3.27 \times 10^{11} \text{ n. cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  اندازه‌گیری شد.

کلیدواژه‌ها: شار نوترون حرارتی، شار نوترون فوق حرارتی، راکتور تحقیقاتی تهران، روش نسبت کادمیومی، آشکارساز HPGe

### Measurement of the thermal neutron flux at the irradiation channel B of the Tehran Research Reactor using neutron activation method

B. Shakeri Jooybari \*, H.Ghods

Physics & Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), P.O.Box 14395-836, Tehran, Iran.

#### Abstract:

In this work, the thermal to the epithermal neutron flux ratio (f), thermal neutron and epithermal neutron flux was measured using neutron activation method at the channel B of the Tehran Research Reactor. The experimental determination of the thermal to the epithermal neutron flux ratio was performed by Cd-ratio method. The thermal neutron flux was measured using activation method by irradiation of Au-wire. The experimental method is based on the irradiation of Au-foil and measurements of activation  $\gamma$ -lines using a High Purity Germanium detector. This method for data analysis and neutron flux measurement are then described in detail. The thermal to the epithermal neutron flux ratio (f) and thermal neutron flux at channel B of reactor with power of 100 kW were obtained 118.36 and  $3.27 \times 10^{11} \text{ n. cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , respectively.

**Keywords:** thermal neutron flux, epithermal neutron flux, Tehran Research Reactor, Cd-ratio method, High Purity Germanium detector.

## ۱. مقدمه

برای هر منبع نوترونی (مانند چشمه Am-Be، راکتورها، نوترون ژنراتورها)، اندازه‌گیری شار نوترونی و توزیع طیف شار نوترونی آن بسیار مورد توجه است چرا که در بسیاری از آزمایش‌های فیزیک هسته‌ای (تست سوخت، تولید رادیوداروها [۱]، آنالیز فعالسازی نوترونی [۲]، اندازه‌گیری سطح مقطع [۳]، اندازه‌گیری اکتیویته، اندازه‌گیری نیمه عمر و غیره)، شار نوترون به عنوان یکی از متغیرهای ورودی اصلی و مهم در اندازه‌گیری‌ها و محاسبات محسوب می‌شود. راکتور تحقیقاتی تهران یکی از منابع مهم تولید نوترون در داخل کشور محسوب می‌شود که در زمینه‌های تحقیقاتی و پزشکی مورد استفاده فراوان قرار می‌گیرد.

راکتور تهران، یک راکتور تحقیقاتی با قدرت اسمی ۵ MW است. این راکتور از نوع استخری می‌باشد که از سال ۱۳۴۹ شروع به فعالیت کرده است که با سه هدف اصلی یعنی آزمایش و تحقیق، تولید رادیوایزوتوپ‌های مختلف دارویی و صنعتی و آموزش دانشجویان در حال فعالیت است. این راکتور از دو استخر مجزا برای قلب راکتور و نگهداری موقت سوخت‌های مصرف شده و سوخت‌های تست با عمق ۹/۷۲ متر تشکیل شده است. قلب راکتور قابل انتقال است. در اطراف قلب راکتور ابتدا آب، سپس دیواره‌های حفاظ و در خارج حفاظها کانال‌های پرتودهی، نوترون‌تراپی، گاما، ستون حرارتی و بیم تیوب‌ها و فراتر از آن اتاق‌های کنترل و غیره قرار دارند، که تماماً در یک محفظه با سقف گنبدی شکل جای گرفته‌اند. قلب راکتور تهران شامل میله‌های سوخت، میله‌های کنترل، بازتابنده‌های نوترون و کانال‌های پرتودهی است. میله‌های سوخت در جای خود ثابتند و از میله‌های کنترل برای تنظیم شار نوترون استفاده می‌کنند. آرایش قلب راکتورهای تحقیقاتی پیوسته تغییر می‌کند. راکتور تهران دارای سه کانال پرتودهی خشک است که کانال مورد استفاده در این کار تحقیقاتی با نام کانال پرتودهی B مربوط به ساختمان فیزیک نوترون می‌باشد. به دلیل اهمیت مشخص بودن مقدار شار نوترون حرارتی در این کانال پرتودهی به منظور استفاده در فعالیت‌های تحقیقاتی، پژوهشی، پزشکی و صنعتی، در این کار تحقیقاتی شار نوترون حرارتی در این کانال به صورت تجربی اندازه‌گیری شد.

## ۲. مباحث نظری اندازه‌گیری شار نوترون حرارتی

یکی از پارامترهای مهم در کانال‌های مختلف پرتودهی در راکتور، پارامتری به نام  $f$  است که در به صورت نسبت شار نوترون حرارتی به نوترون فوق حرارتی ( $f = \frac{\phi_{th}}{\phi_e}$ ) تعریف می‌شود. برای اندازه‌گیری و محاسبه  $f$  می‌توان از روش اندازه‌گیری نسبت کادمیومی تک دیده بان<sup>۲</sup> استفاده کرد. به این ترتیب که به عنوان مثال نمونه ای مانند فویل طلا (Au) بدون پوشش و به همراه پوشش کادمیومی در کانال پرتودهی مورد نظر، تحت تابش نوترون قرار می‌گیرند. سپس پس از مدت زمان خنک‌سازی مناسب و شمارش با آشکارساز HPGe می‌توان پارامتر  $f$  مربوط به این کانال پرتودهی را با استفاده از رابطه زیر اندازه‌گیری کرد [۴]:

$$f = (F_{Cd} R_{Cd} - 1) \cdot \frac{G_e Q_0}{G_{th}} \quad (1)$$

که در آن  $F_{Cd}$ : فاکتور عبور کادمیوم<sup>۳</sup> برای نوترون‌های فوق حرارتی،  $Q_0$ : نسبت سطح مقطع انتگرالی رزناسی به سطح مقطع جذب نوترون حرارتی ( $\frac{I_0}{\sigma_0}$ )،  $G_{th}$ : فاکتور برای تصحیح خودجذبی نوترون حرارتی در نمونه،  $G_e$ : فاکتور برای تصحیح خودجذبی نوترون فوق حرارتی در نمونه هستند. همچنین در این معادله، پارامتری به نام نسبت کادمیومی<sup>۴</sup>،  $R_{Cd}$ ، وجود دارد که عبارت است از اکتیویته یک فویل بدون پوشش کادمیومی به اکتیویته همان فویل هنگامیکه در یک پوشش کادمیومی قرار می‌گیرد. نسبت کادمیومی به صورت رابطه زیر تعریف خواهد شد:

<sup>2</sup> Dual-monitor Cd-Ratio method

<sup>3</sup> Cadmium transmission factor

<sup>4</sup> Cd ratio



$$R_{Cd} = \frac{A_{sp}}{(A_{sp})_{Cd}} \quad (2)$$

کمیت  $A_{sp}$  اکتیویته مشخصه<sup>۵</sup> فویل طلا پس از پرتودهی است که از معادله زیر به دست می‌آید:

$$A_{sp} = \frac{N_p/t_c}{wSDC} \quad (3)$$

که در آن  $N_p$ : شمارش خالص سطح زیر پیک انرژی کامل<sup>۶</sup>،  $t_c$ : زمان شمارش،  $w$ : وزن دیده بانها،  $S = 1 - e^{-\lambda t_{irr}}$ ،  $t_{irr}$ : مدت زمان پرتودهی نمونه‌ها،  $\lambda$ : ثابت واپاشی،  $D = e^{-\lambda t_d}$ ،  $t_d$ : مدت زمان واپاشی (خنک سازی)<sup>۷</sup> و هستند.

بعد از محاسبه پارامتر  $f$  در کانال پرتودهی مورد نظر، می‌توان شار نوترون حرارتی و سپس شار نوترون فوق حرارتی در محل پرتودهی نمونه‌ها را محاسبه و اندازه‌گیری کرد. یکی از روش‌های اندازه‌گیری شار، استفاده از روش فعالسازی است: به این صورت که نمونه‌هایی از جنس طلا و یا ایندیم و غیره (عناصری که اطلاعات در مورد پارامترهای فیزیکی آنها مانند سطح مقطع جذب نوترون حرارتی، سطح مقطع رزنانشی با دقت خوبی در دسترس و موجود باشد) تحت پرتودهی با نوترون در کانال پرتودهی مورد نظر قرار می‌گیرند. سپس با استفاده از رابطه زیر می‌توان شار نوترون حرارتی،  $\phi_{th}$ ، را در محل پرتودهی نمونه به دست آورد<sup>[۵]</sup>:

$$\phi_{th} = \frac{(N_p/t_c)M}{w \theta N_A \epsilon_p(E_\gamma) \gamma \sigma_0 (G_{th} + G_e Q_0) SDC} \quad (4)$$

که در آن  $N_p$ : شمارش سطح زیر پیک انرژی پیک گامای ۴۱۱ keV،  $t_c$ : زمان شمارش،  $S$ : فاکتور اشباع،  $S = 1 - e^{-\lambda t_{irr}}$ ؛  $t_{irr}$ : مدت زمان پرتودهی،  $\lambda$ : مقدار ثابت  $\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$ ،  $T_{1/2}$ : نیمه عمر رادیونوکلئید،  $D = e^{-\lambda t_d}$ ؛  $t_d$ : زمان واپاشی (زمان خنک سازی)<sup>۸</sup>،  $C = (1 - e^{-\lambda t_c})/\lambda t_c$ : فاکتور اندازه‌گیری  $C$ ،  $W$ : وزن عنصر پرتودهی شده (g)،  $\theta$ : فراوانی ایزوتوپی ماده هدف،  $\gamma$ : احتمال واپاشی گاما<sup>۹</sup>،  $\epsilon_p(E_\gamma)$ : بازده آشکارسازی در انرژی گامای اندازه‌گیری شده هستند. است. با استفاده از پارامتر  $f$  محاسبه شده از معادله ۱، می‌توان شار نوترون حرارتی را با استفاده از این معادله اندازه‌گیری کرد. سپس بر اساس تعریف  $f$  و معلوم بودن مقدار آن می‌توان شار نوترون فوق حرارتی را نیز محاسبه کرد. با مطالبی که در بالا ذکر شد می‌توان به این نتیجه رسید که شار نوترون حرارتی در هر کانال پرتودهی راکتور را می‌توان با استفاده از معادله ۴ اندازه‌گیری کرد و سپس با توجه به تعریف پارامتر  $f$  که نسبت شار نوترون حرارتی به نوترون فوق حرارتی است، می‌توان شار نوترون فوق حرارتی را نیز محاسبه کرد.

### ۳. روش کار

در این بخش، مواد لازم و روش اجرایی برای اندازه‌گیری تجربی پارامتر  $f$  (نسبت شار نوترون حرارتی به فوق حرارتی) و شار نوترون حرارتی راکتور تهران در کانال پرتودهی B (کانال پرتودهی اختصاصی برای آنالیز فعالسازی نوترونی) شرح داده خواهد شد. برای انجام این اندازه‌گیری  $f$  روش نسبت کادمیومی که در بخش قبل شرح داده شد، استفاده گردید. همچنین با استفاده از معادله (۴) و معلوم بودن  $f$ ، شار نوترون حرارتی اندازه‌گیری شد (به روش نسبت کادمیومی تک دیده بانی و فعالسازی). برای اندازه‌گیری شار نوترون حرارتی در این کار تحقیقاتی، شرایط و مفروضات ذیل لحاظ گردید:

<sup>5</sup> Specified activity  
<sup>6</sup> Net count of full energy peak  
<sup>7</sup> Decay (Cooling) time  
<sup>8</sup> Decay factor  
<sup>9</sup> Cooling time  
<sup>10</sup> Gamma-emission probability

- با انتخاب فویل‌های با جرم کم و ابعاد کوچک، از تصحیح اثرات خود جذب نوترون حرارتی ( $G_{th}$ ) و فوق حرارتی ( $G_e$ ) صرف‌نظر شد.

- برای شمارش، فاصله نمونه از سطح آشکارساز بزرگ در نظر گرفته شد ( $d=13\text{ cm}$ ) تا بتوان از اثرات تجمیع همزمانی واقعی<sup>۱۱</sup> صرف‌نظر کرد.

این اندازه‌گیری شامل سه مرحله اصلی است. مرحله اول: پرتودهی و فعالسازی نمونه‌های مناسب (در اینجا طلا) با و بدون پوشش کادمیومی در کانال پرتودهی B راکتور تحقیقاتی تهران، مرحله دوم: پس از زمان خنک‌سازی مناسب، شمارش و ثبت طیف نمونه‌ها و مرحله سوم: استفاده از طیف‌های ثبت شده برای اندازه‌گیری و محاسبه پارامترهای  $f$  و شار نوترون حرارتی.

- پرتودهی

برای اندازه‌گیری کمیت  $f$ ، نمونه‌های طلا و با و بدون پوشش کادمیومی در توان  $100\text{ kW}$  به مدت  $2$  دقیقه در کانال B راکتور تحت تابش نوترون قرار گرفت. برای اندازه‌گیری شار نیز از یک سیسم طلا استفاده شد که به مدت  $5$  دقیقه در توان  $100\text{ kW}$  در کانال پرتودهی B تحت تابش نوترون قرار گرفت. پرتودهی از طریق رابیت و به صورت اتوماتیک صورت گرفت.

- طیف‌گیری و شمارش

پس از پرتودهی و سپس زمان خنک‌سازی مناسب، نمونه‌های فعال شده در فاصله  $13\text{ cm}$  از سطح آشکارساز شمارش شدند و طیف نمونه‌ها با استفاده از نرم افزار GammaVision ثبت گردید. آشکارساز مورد استفاده در این کار، آشکارساز HPGe، از نوع p با بازده مطلق  $20\%$  است.

#### ۴. نتایج آزمایش

- اندازه‌گیری پارامتر  $f$ :

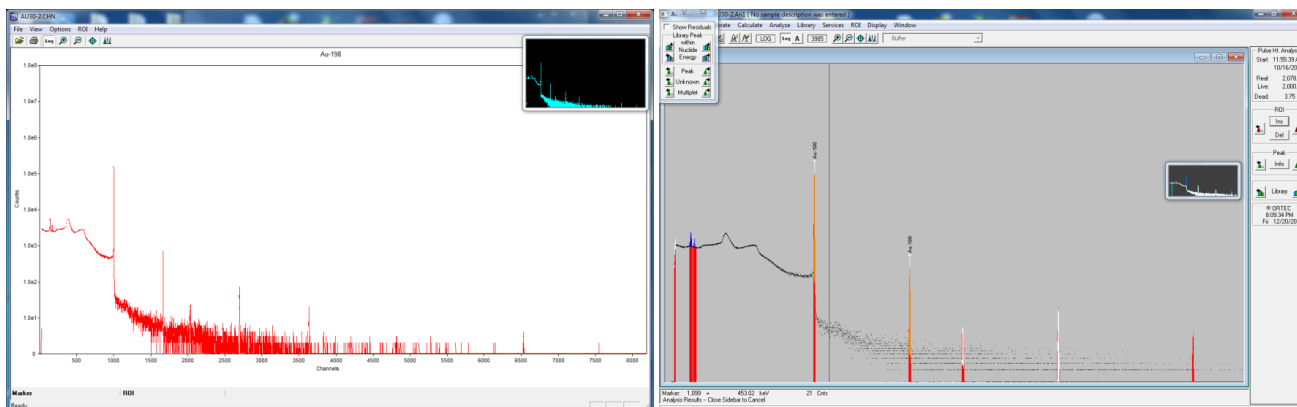
برای اندازه‌گیری پارامتر  $f$  به روش نسبت کادمیومی، ابتدا باید کمیت نسبت کادمیومی ( $R_{Cd}$ ) را محاسبه کنیم. نمونه‌هایی که در این آزمایش استفاده شده‌اند، فویل طلا ( $^{197}\text{Au}$ ) است. علت انتخاب این ایزوتوپ به دلیل وجود داده‌های دقیق [۴] برای سطح مقطع جذب نوترونی ( $\sigma_0$ ) و انتگرال رزناسی ( $I_0$ ) برای این ایزوتوپ می‌باشد. ضخامت پوشش کادمیومی مورد استفاده در این کار  $0.5\text{ mm}$  بوده است. داده‌های هسته‌ای مورد نیاز برای این اندازه‌گیری، در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱. داده‌های هسته‌ای برای طلا

مونیتور	برهمکنش	نیمه عمر (ساعت)	انرژی پرتو گاما (keV)	$F_{Cd}$	$\sigma_0$ (بارن)	$Q_0$
Au	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	۶۴/۶۸۴	۴۱۱	۱/۰۶	۹۸/۶۵	۱۵/۷

فویل‌های طلا با و بدون پوشش کادمیومی در کانال پرتودهی B راکتور تهران (به مدت  $2$  دقیقه و در توان  $100\text{ kW}$ ) تحت پرتودهی نوترون قرار گرفتند. بعد از پرتودهی و سپس زمان خنک‌سازی مناسب، با استفاده از آشکارساز HPGe، فویل‌های طلای فعال شده مورد شمارش قرار گرفتند. مدت زمان شمارش برای نمونه‌های طلا  $2000$  ثانیه در نظر گرفته شد. طیف‌های نوعی ثبت شده برای فویل طلا فعال شده در شکل ۱ ارائه شده است. با استفاده از طیف ثبت شده از دو فویل طلا، ابتدا  $R_{Cd}$  و سپس با استفاده از معادله ۱، پارامتر  $f$  اندازه‌گیری شد.

<sup>11</sup> True-coincidence summing



طیف ۱. طیف Au-198 ثبت شده

- اندازه‌گیری شار نوترون حرارتی ( $\Phi_{th}$ )

برای اندازه‌گیری شار نوترون حرارتی با روش فعالسازی، از سیم‌های طلا تابش دهی شده با نوترون استفاده شد. سیم طلا نیز به مدت ۵ دقیقه در توان ۱۰۰ kW در کانال پرتو دهی B تحت تابش نوترون قرار گرفت.

همانطور که از معادله ۴ واضح است یکی از پارامترهای مهم این معادله برای اندازه‌گیری شار نوترون حرارتی، اندازه‌گیری بازده آشکارسازی آشکارساز HPGe (در انرژی ۴۱۱ keV) مورد استفاده در این آزمایش در موقعیت هندسی که سیم طلا شمارش شده‌است، می‌باشد. برای آگاهی از نحوه اندازه‌گیری بازده آشکارسازی به مرجع [۶] مراجعه شود.

چشمه مورد استفاده برای کالیبراسیون بازده در این کار، چشمه نقطه ای  $^{152}\text{Eu}$  است. مشخصات این چشمه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات چشمه  $^{152}\text{Eu}$  مورد استفاده برای اندازه‌گیری بازده آشکارسازی

نوع چشمه	تاریخ تولید	اکتیویته در زمان تولید	تعدادی از انرژی گامای گسیل شده از چشمه با بیشترین احتمال واپاشی
Eu-152	01/03/1991	45.6 kBq	121.78(28.37 %), 344.29(26.58%) 778.92 (12.96 %), 964.11(14.62%) 1112.08(13.50%), 1408.01(20.85%)

چون همه شمارش‌ها و اندازه‌گیری‌ها در این کار برای نمونه‌های فعال شده، در ارتفاع ۱۳ cm ای نمونه از سطح آشکارساز صورت می‌گیرد، بازده آشکارسازی هم برای این فاصله بین چشمه-آشکارساز اندازه‌گیری شد.

بازده آشکارسازی محاسبه شده با استفاده طیف ثبت شده برای Eu، برای تعدادی از پیک‌های گاما در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. بازده آشکارسازی اندازه‌گیری شده برای آشکارساز در فاصله چشمه-آشکارساز ۱۳ cm

انرژی گاما $^{152}\text{Eu}$	121.96	344.26	964.30	1112.25	1408.01
بازده آشکارسازی	$5.0235 \times 10^{-3}$	$2.6996 \times 10^{-3}$	$1.0632 \times 10^{-3}$	$9.8093 \times 10^{-4}$	$7.6584 \times 10^{-4}$
خطا $\pm$	0.5854%	2.0396%	4.6980%	1.0996%	1.9814%

با برازش معادله چند جمله‌ای به این نقاط، منحنی بازده آشکارسازی برای آشکارسازمان در هندسه مد نظر به دست آمد. معادله دو جمله‌ای منحنی کالیبراسیون به دست آمده عبارتند از:

$$\ln(\epsilon) = -5.22611 + 0.489679 \ln(E) + (-0.104607) \ln(E)^2 \quad (5)$$

بازده آشکارسازی برای انرژی‌های مختلف در این کار تحقیقاتی را می‌توان با استفاده از این منحنی به دست آورد. در ضمن این منحنی برای گستره انرژی ۱۲۱/۹۶ keV تا ۲۵۰۰ keV صادق است.

با استفاده از سطح زیر پیک اندازه‌گیری شده برای سیم طلا، بازده آشکارسازی اندازه‌گیری شده در انرژی ۴۱۱ keV، پارامتر  $f$  اندازه‌گیری شده و دیگر پارامترهای فیزیکی معلوم در معادله ۴، شار نوترون حرارتی در کانال پرتودهی B اندازه‌گیری شد. بر اساس تعریف  $f$  که نسبت شار نوترون حرارتی به فوق حرارتی است، با معلوم بودن  $f$  و سپس شار نوترون حرارتی، می‌توان شار نوترون فوق حرارتی را نیز اندازه‌گیری و محاسبه است. مقادیر  $f$ ، شار نوترون حرارتی و فوق حرارتی اندازه‌گیری شده در این کار تحقیقاتی در کانال پرتودهی B در توان ۱۰۰ kW در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. شار نوترون حرارتی و فوق حرارتی در کانال B پرتودهی راکتور تهران

نمونه	نسبت کادمیومی $R_{Cd}$	نسبت شار حرارتی به فوق حرارتی $f = \phi_{th}/\phi_e$	شار نوترون حرارتی $\phi_{th}$ ( $n. cm^{-2}.s^{-1}$ )	شار نوترون فوق حرارتی $\phi_e$ ( $n. cm^{-2}.s^{-1}$ )
Au	$۸/۰۵ \pm ۰/۳۶$	۱۱۸/۳۶	$۳/۲۷ \times ۱۰^{۱۱}$	$۲/۷۶ \times ۱۰^۹$

## ۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

پارامتر  $f$ ، شار نوترون حرارتی و شار نوترون فوق حرارتی با استفاده از روش نسبت کادمیومی و روش فعالسازی در کانال پرتودهی B راکتور تحقیقاتی تهران اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری پارامتر  $f$  از روش نسبت کادمیومی با پرتودهی دو فویل طلا بدون و با پوشش کادمیومی استفاده شد. نسبت شار نوترون حرارتی به فوق حرارتی در کانال پرتودهی B، ۱۱۸/۳۶ به دست آمد. این نشان می‌دهد شار نوترون قلب در محل پرتودهی B به میزان مطلوبی حرارتی شده است. شار نوترون حرارتی در راییت B، در توان ۱۰۰ kW برابر با  $n. cm^{-2}.s^{-1}$   $۳/۲۷ \times ۱۰^{۱۱}$  به دست آمد که اگر بخواهیم این شار را به توان معمول راکتور تهران که در بازه ۴ تا ۵ مگاوات است، نسبت دهیم، مرتبه شار نوترون حرارتی در توان کاری معمول راکتور از مرتبه تقریباً  $۱۰^{۱۲}$  خواهد بود. این مرتبه شار نشان می‌دهد که راکتور تحقیقاتی تهران در گروه راکتورهای با مقدار شار نوترون حرارتی متوسط است که می‌توان از شارهایی با این مرتبه، برای فعالیت‌های تحقیقاتی مانند آنالیز فعالسازی نوترونی، اندازه‌گیری برخی سطح مقطع‌ها، تولید رادیودارها و غیره استفاده کرد.



## مراجع

- [1] B. Neacsu et al. *Radionuclidic purity-an essential parameter in quality control of radiopharmaceuticals*, Rom. Rep. Phys. **65(1)**, 155 (2013).
- [2] S. I. Kafala, and T. D. MacMahon, *Comparison of neutron activation analysis methods*, J. Radioanal. Nucl. Chem. **271(2)**, 507 (2007).
- [3] T. H. Nguyen et al. *Measurement of the thermal neutron cross section and resonance integral of the  $^{187}\text{Re}(n, \gamma)^{188}\text{Re}$  reaction*, Eur. Phys. J. Plus **135(4)**, 384 (2020).
- [4] F. Corte, 1987. The K0-Standardization Method.
- [5] M. Di Luzio, et al. *Vertical variations of flux parameters in irradiation channels at the TRIGA Mark II reactor of Pavia*, Prog. Nucl. Energy **113**, 247 (2019).
- [6] G. Gilmore, (2011). *Practical gamma-ray spectroscopy*. John Wiley & Sons.