



تعیین مقدار پارامتر α به صورت تجربی در راکتورهایی با طیف نوترون های فوق حرارتی با رفتار $\frac{1}{E^{1+\alpha}}$

شاگری جویباری، بنین* - قدس، حسین

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک و شتابرها

چکیده:

در این مقاله، فاکتور شکل طیف شار نوترون فوق حرارتی (α) در راکتور تحقیقاتی تهران به صورت تجربی اندازه گیری شد. پارامتر α به روش نسبت کادمیومی دو مونیتوری و با پرتودهی آنها در شرایط بدون و با پوشش کادمیومی و سپس ثبت طیف گامای نمونه های اکتیو شده با استفاده از آشکار ساز HPGe، اندازه گیری شد. جهت تابش دهی مونیتورها با نوترون، از کانال پرتودهی B راکتور تحقیقاتی تهران استفاده شد. مقدار پارامتر α محاسبه شده با این روش تجربی برای کانال B پرتودهی در راکتور، ۰/۲۲۶- بوده است.

کلمات کلیدی: فاکتور شکل طیف شار نوترون فوق حرارتی، مونیتور، روش نسبت کادمیومی، راکتور تحقیقاتی تهران

مقدمه:

راکتور تحقیقاتی تهران و راکتور مینیاتوری اصفهان جزء راکتورهای تحقیقاتی در ایران هستند که کاربردها فراوانی از جمله کاربردهای آموزشی و تحقیقاتی، اندازه گیری های سطح مقطع نوترونی، تصویر برداری نوترونی، آنالیز فعالسازی نوترونی، تولید رادیوداروها و .. دارد. در این بین استفاده از این راکتورها برای آنالیز فعالسازی نوترونی (NAA) به منظور آنالیز کمی و کیفی عناصر موجود در نمونه ها مورد توجه خاص می باشد. آنالیز فعالسازی نوترونی به نوبه خود بنابر دقت و عناصر خاص مد نظر برای آنالیز، شامل روش های مختلفی از قبیل آنالیز فعالسازی نوترونی با گامای آنی [۱]، آنالیز فعالسازی نوترونی با گاماهاى تاخیری (INAA) [۲]، آنالیز فعالسازی نوترونی با نوترون فوق حرارتی [۳]، آنالیز فعالسازی نوترونی با استفاده از روش استاندارد سازی k_0 [۴]، آنالیز فعالسازی برای نمونه های حجیم (LSNAA) [۵] می باشد. در همه این موارد پارامترهای وابسته به شار نوترون در دقت آنالیزهای انجام شده نقش بسیار مهمی دارند، از جمله این پارامترها نسبت شار نوترون حرارتی به فوق حرارتی (f)، فاکتور شکل شار نوترون فوق حرارتی^۱ (α)، مقدار دقیق شار نوترون حرارتی، شار نوترون فوق حرارتی و ... هستند. هدف از انجام این مقاله اندازه گیری

^۱ Epithermal neutron flux shape factor



پارامتر α در یکی از کانال‌های پرتودهی راکتور تحقیقاتی تهران به منظور بالا بردن دقت نتایج در آنالیز فعالسازی نوترونی (بهبود ۵ درصدی در نتایج آنالیز در فعالسازی نوترونی به روش استانداردسازی k_0) و همچنین در اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی مربوط به هسته‌ها مانند سطح مقطع انتگرالی رزنانشی می‌باشد.

مباحث نظری و روش کار:

در شرایط ایده‌آل فرض می‌شود شار نوترون فوق حرارتی در راکتور به ازای واحد بازه انرژی، با انرژی رابطه عکس داشته باشد یعنی:

$$\Phi_e(E) = \Phi_e \frac{1}{E} \quad (1)$$

بر اساس شار تعریف شده در بالا، کمیت انتگرال رزنانشی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_0 = \int_{E_{Cd}}^{\infty} \frac{\sigma(E)dE}{E} \quad (2)$$

که در آن انرژی قطع موثر کادمیوم است. مقدار E_{Cd} برای هسته‌هایی که سطح مقطع برهمکنش (n, γ) آنها برای نوترون‌های تا انرژی 1-2 eV دارای رفتار $\sigma(v) \sim 1/v$ هستند، تقریباً برابر 0.55 eV است. در شرایط واقعی و عملی، طیف نوترون فوق حرارتی در راکتورها از معادله زیر تبعیت می‌کنند [۶]:

$$\Phi_e(E) = \Phi_e \frac{1 eV^\alpha}{E^{1+\alpha}} \quad (3)$$

که در آن α ، فاکتور شکل شار نوترونی فوق حرارتی است. این پارامتر مستقل از انرژی است و می‌تواند بر حسب چیدمان راکتور، مقداری مثبت یا منفی داشته باشد.

با تعریف شار به صورت رابطه (۳)، انتگرال رزنانشی را می‌توان به صورت رابطه زیر بازنویسی کرد:

$$I_0(\alpha) = \int_{E_{Cd}}^{\infty} \frac{\sigma(E) eV^\alpha dE}{E^{1+\alpha}} \quad (4)$$

با حل این معادله انتگرالی، رابطه بین I_0 و $I_0(\alpha)$ به صورت زیر خواهد بود:

$$I_0(\alpha) = (I_0 - 0.429)(\bar{E}_r)^{-\alpha} + \sigma_0 C_\alpha \quad (5)$$

که در آن:

$$C_\alpha = \frac{0.429}{(2\alpha+1) \times 0.55^\alpha} \quad (6)$$

^۱ Effective Cd cut-Off energy

^۲ Reactor configuration



و \bar{E}_r انرژی رزنانس موثر می باشند.

یکی از روش ها اندازه گیری پارامتر شکل طیف نوترون فوق حرارتی، α ، استفاده از روش نسبت کادمیومی دو مونیتری^۴ است. به عنوان مثال می توان از مونیتر طلا (^{197}Au) و مولیبدن (^{98}Mo) برای این منظور استفاده کرد. طبق این روش، هر یک از مونیترها به همراه و بدون پوشش کادمیومی در یکی از کانال های پرتودهی راکتور (کانال پرتودهی که برای فعالسازی نوترونی در نظر گرفته شده است) تحت پرتودهی نوترون قرار می گیرند. پس از پرتودهی با نوترون و زمان خنک سازی مناسب، طیف مونیترها با آشکار ساز HPGe ثبت می گردد. بر اساس طیف های ثبت شده، اکتیویته مشخصه مونیترها را می توان با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد [۴]:

$$A_{sp} = \frac{N_p/t_c}{wSDC} \quad (7)$$

که در آن N_p : شمارش خالص سطح زیر پیک انرژی کامل^۵، t_c زمان شمارش، w وزن مونیترها، $S = 1 - e^{-\lambda t_{irr}}$ مدت زمان پرتو دهی نمونه ها، λ : ثابت واپاشی، $D = e^{-\lambda t_d}$ ، t_d : مدت زمان واپاشی (خنک سازی)^۶ و $C = (1 - e^{-\lambda t_c})/\lambda \cdot t_c$ هستند.

پارامتری به نام نسبت کادمیوم^۷، R_{Cd} ، وجود دارد که عبارتند از اکتیویته یک پولک بدون پوشش کادمیوم به اکتیویته همان پولک هنگامیکه در یک پوشش کادمیومی قرار می گیرد. طبق این تعریف، نسبت کادمیوم به صورت رابطه زیر تعریف خواهد شد:

$$R_{Cd} = \frac{A_{sp}}{(A_{sp})_{Cd}} \quad (8)$$

با استفاده از معادلات بالا، فاکتور شکل شار نوترون فوق حرارتی را می توان از معادله زیر محاسبه کرد:

$$\frac{[R_{Cd}F_{Cd-1}]_{Au}}{[R_{Cd}F_{Cd-1}]_{Mo}} = \frac{[(Q_0-0.429)_{Mo}](\bar{E}_{r,Mo})^{-\alpha}+C\alpha}{[(Q_0-0.429)_{Au}](\bar{E}_{r,Au})^{-\alpha}+C\alpha} \quad (9)$$

که در آن $Q_0 = \frac{I_0}{\sigma_0}$ نسبت سطح مقطع انتگرال رزنانسی به سطح مقطع نوترون حرارتی می باشد. و همچنین F_{Cd} ، فاکتور عبور کادمیومی^۸ است.

^۴Dual-monitor cadmium ratio

^۵ Specified activity

^۶ Net count of full energy peak

Decay(Cooling) time

^۷Cd ratio

^۸Cadmium transmission factor



در این کار تحقیقاتی، پارامتر شکل طیف نوترون فوق حرارتی، α ، به روش نسبت کادمیومی دو مونیتوری اندازه گیری شد. دو مونیتوری که در این آزمایش استفاده شده اند، مونیتور طلا (^{197}Au) و مولیبدن (^{98}Mo) می باشند. علت انتخاب این دو مونیتور به دلیل وجود داده های دقیق برای سطح مقطع جذب نوترونی (σ_0) و انتگرال رزنانشی (I_0) برای این دو عنصر می باشد. هریک از مانیتورها با و بدون پوشش کادمیومی در یکی از کانال های پرتو دهی (در کانال B) راکتور (به مدت ۲ دقیقه و در توان 100 kWh) تحت پرتو دهی نوترون قرار گرفتند. بعد از پرتو دهی و سپس زمان خنک سازی مناسب، با استفاده از آشکارساز HPGe نمونه ها مورد شمارش قرار گرفتند. مدت زمان شمارش برای نمونه های طلا ۲۰۰۰ ثانیه و برای مولیبدن ۵۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. برای شمارش و اندازه گیری سطح زیر پیک طیف های ثبت شده از نرم افزارهای MAESTRO و GammaVision استفاده شده است.

نتایج:

ابتدا اکتیویته مشخصه هر یک از نمونه های اکتیو شده را با استفاده از معادله ۷ محاسبه می کنیم. سپس با استفاده از معادلات ۸ و ۹، نسبت کادمیومی مونیتورهای طلا و مولیبدن و همچنین فاکتور شکل شار نوترونی فوق حرارتی (α) در کانال پرتو دهی B راکتور تحقیقاتی تهران را محاسبه می کنیم. برای محاسبه پارامتر α از نرم افزار Maple استفاده شده است. داده های هسته ای مورد نیاز در این مقاله برای انجام محاسبات، در جدول ۱ ارائه شده اند.

جدول ۱. داده های هسته ای برای مونیتورهای طلا و مولیبدن

مونیتور	برهمکنش	نیمه عمر (ساعت)	انرژی پرتو گاما (keV)	\bar{E}_r	F_{Cd}	Q_0
Au	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	۶۴/۶۸۴	۴۱۱/۰	۵/۴۷	۱/۰۶	۱۵/۷
Mo	$^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$	۶۵/۹۴	۱۴۰/۵۱۱	۲۱۱	۱	۵۳/۲
		۶/۰۱۵	۱۸۱/۰۶۸			
	$^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}(\beta^-)^{99m}\text{Tc}$		۷۳۹/۵۰۰			
			۱۴۰/۵۱۱			



مقادیر نسبت کادمیومی و فاکتور شکل محاسبه شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. پارامتر شار نوترون راکتور تهران در کانال پرتودهی B

مونیتور	نسبت کادمیومی	فاکتور شکل شار نوترون فوق حرارتی
Au	$۸/۰ \pm ۱۰/۳۴$	-۰/۲۲۶
Mo	$۱/۰ \pm ۹۸/۱۲$	

بحث و نتیجه گیری :

محاسبه و اندازه گیری فاکتور شکل طیف نوترون فوق حرارتی در کانال پرتودهی B راکتور تحقیقاتی تهران انجام شد. فاکتور α برای طیف نوترون فوق حرارتی به روش نسبت کادمیومی دو مونیتوری با استفاده از مونیتورهای طلا و مولیبدن اندازه گیری شد. پارامتر به دست آمده از این روش، مقداری منفی و برابر با $-۰/۲۲۶$ به دست آمده است. این نتیجه نشان می دهد رفتار شار نوترون فوق حرارتی در کانال پرتودهی B راکتور از رفتار ایده آل آن $(\Phi_e(E) \sim \frac{1}{E})$ تفاوت قابل ملاحظه ای دارد. بنابراین اعمال تصحیح این فاکتور در روابط و محاسبات مربوط به تعیین غلظت عناصر به روش فعالسازی نوترونی (به ویژه در آنالیز فعالسازی نوترونی به روش استانداردسازی k_0) باعث افزایش دقت آنالیزها خواهد شد (در حدود ۵ تا ۱۰ درصد). نسبت کادمیومی اندازه گیری شده برای فویل طلا، یعنی $R_{Cd}=8.10$ ، نشان می دهد، در کانال پرتودهی B راکتور تحقیقاتی تهران، شار نوترون حرارتی سهم بزرگی در مقایسه با شار نوترون فوق حرارتی (و در نتیجه شار نوترون کل) دارد.

مراجع :

- [1] Nair, A. G. C., et al. "Analysis of alloys by prompt gamma-ray neutron activation." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 516.1 (2004): 143-148.
- [2] Orvini, E., and M. Speziali. "Applicability and limits of instrumental neutron activation analysis: state of the art in the year 2000." *Microchemical journal* 59.1 (1998): 160-172.
- [3] Brunfelt, A. O., and E. Steinnes. "Instrumental activation analysis of silicate rocks with epithermal neutrons." *Analytica Chimica Acta* 48.1 (1969): 13-24.
- [4] De Corte, F., et al. "Recent advances in the k_0 -standardization of neutron activation analysis: extensions, applications, prospects." *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry* 169.1 (1993): 125-158.



بیست و ششمین کنفرانس هسته‌ای ایران



۸۰۷ اسفندماه ۱۳۹۸- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران

[5] Advances in Neutron Activation Analysis of Large Objects with Emphasis on Archaeological Examples, 2018, IAEA-TECDOC-1838.

[6] Ryves, T. B. "A new thermal neutron flux convention." *Metrologia* 5.4 (1969): 119.