



بررسی حساسیت سطح مقطع‌های نوترون در کربن و سرب با استفاده از کد محاسباتی MCNP و داده‌های تجربی

اکبر پروازیان*^۱، مجتبی صادقی^۲

۱- دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، صندوق پستی: ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶، اصفهان - ایران
۲- مرکز تحقیقات و تولید سوخت هسته‌ای اصفهان، صندوق پستی: ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶، اصفهان - ایران

چکیده: از آنجا که مسایل ایمنی در فناوریهای هسته‌ای از اهمیت بسزایی برخوردار است، داده‌های هسته‌ای که در طراحی نوترونیک سیستم‌های هسته‌ای بکار می‌روند، بایستی از دقت لازم برخوردار باشند. از اینرو ارزشیابی و بهبود داده‌های هسته‌ای، همواره مورد توجه بوده است. در این کار هدف بررسی سطح مقطع‌های برهمکنش نوترون با دو ماده کربن و سرب و نهایتاً بهبود این داده‌ها می‌باشد. با توجه به امکانات موجود در مرکز تحقیقات و تولید سوخت هسته‌ای اصفهان از بلوک‌های گرافیتی و سربی استفاده کرده‌ایم. در مرکز این دو ماده کربن و سرب، چشمه Am-Be قرار گرفت، سپس شار تجربی پشت این محیطها اندازه‌گیری شد. توزیع شار به وسیله کد محاسباتی MCNP محاسبه و با مقادیر تجربی آن مقایسه شد. مقایسه نتایج محاسباتی و تجربی نشان می‌دهد، ضرایب حساسیت برای کربن در انرژی‌های کمتر از ۱ MeV ناچیز ولی در انرژی‌های بالاتر، خاصه در ۵ تا ۶ MeV حدود ۵٪ است. همچنین ضرایب حساسیت سرب در انرژی‌های مختلف بین ۰/۲ تا ۰/۶۷ درصد تغییر می‌کند. سپس با استفاده از تعریف ضرایب حساسیت، مقادیر سطح مقطع این دو عنصر تغییر داده شد. در صورت وجود امکانات بیشتر برای آشکارسازی نوترون‌های سریع می‌توان نتایج را در سایر گروه‌های انرژی نیز نشان داد.

واژه‌های کلیدی: چشمه‌های نوترون، سطوح مقطع، شار نوترون، مجموعه داده‌های هسته‌ای، تجزیه حساسیت، روش مونت کارلو، مگاالکترون ولت

Sensitivity Analysis of Neutron Cross Section for Graphite and Lead by Using MCNP Code and Experimental Data

A. Parvazian*¹, M. Sadeghi²

1- Department of Physics, Isfahan University of Technology, P.O. Box: 84156-83111, Isfahan - Iran
2- Isfahan Production and Research Center, AEOI, P.O. Box: 84156-83111, Isfahan - Iran

Abstract: Because of the importance of safety in a nuclear system, nuclear data which are used in neutronic reactors design must be in a good accuracy. So examination and enhancement of nuclear data are of great importance. The aim of this work is to investigate the neutron cross section with carbon and lead and consequently improving them. In a research program conducted at the Isfahan Production and Research Center, blocks of lead and graphite were used. In the core of lead and carbon blocks, we placed an Am-Be source and then measured the flux of neutron outside of the assembly. The flux distribution was also calculated theoretically by MCNP code and the results were compared with the experiment. Comparison of the computation and the experimental results showed that the carbon sensitivity coefficients in the range of energies lower than 1 MeV are negligible, while for the higher energies, especially between 5 to 6 MeV, these coefficients are nearly 5 percent. Also, lead sensitivity coefficients was varied from 0.2 to 0.67 for different energies. Finally, with the help of defining sensitivity coefficients, the values of cross section were varied. By using more advanced equipment for fast neutron detection, we are able to find better results in the other range of energy groups.

Keywords: Neutron Sources, Cross Sections, Neutron Flux, Nuclear Data Collections, Sensitivity Analysis, Monte Carlo Method, MeV Range

*email: parvazian@cc.iut.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۸۵/۶/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۶/۸/۲۱



۱- مقدمه

محاسبه سطح مقطع هسته‌ای عناصر مختلف در تمام انرژی‌ها و جهت‌های متفاوت، کار پرزحمت و پرهزینه‌ای است. به همین جهت، سطوح مقطع هسته‌ای معمولاً در انرژی‌های معین و چند جهت خاص اندازه‌گیری، سپس با برآزش نمودار از این نقاط سطوح مقطع دیفرانسیلی و کل تعیین می‌شوند. بنابراین در طراحی‌هایی که بر اساس این سطوح مقطع در محیط‌های مادی صورت می‌گیرد، خطاهایی ظاهر می‌شود که عمده آن ناشی از اطلاعات مربوط به سطوح مقطع هسته‌ای است. به همین جهت روش محاسبه آهنگ برهمکنش در مجموعه‌ای از مواد بطور تجربی اندازه‌گیری می‌شوند. و با استفاده از روش محاسباتی می‌توان مجموعه را شبیه‌سازی کرد. با تعیین اختلاف بین تجربه و محاسبه عدم قطعیت در سطوح مقطع تجربی مشخص می‌شود که می‌توان در نواحی خاصی پیشنهاد اصلاح داده‌ها را از طریق تجربه داد. همچنین با تعیین اختلاف بین نتایج اندازه‌گیری آهنگ برهمکنش‌ها و محاسبه این کمیت‌ها به وسیله برنامه محاسباتی مناسب می‌توان از طریق تغییر دادن سطوح مقطع در نواحی انرژی که دارای خطای زیاد هستند به اصلاح سطوح مقطع مربوط به عناصر پرداخت.

از میان بانک‌های داده‌های هسته‌ای، بانک اطلاعاتی ENDF^(۱) به علت انعطاف‌پذیری زیاد و فرمت‌های مناسب آن، همچنین وجود انواع برنامه‌های پردازش متناسب با این بانک، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

بانک‌های اطلاعاتی ENDF بر دو نوع می‌باشند: ENDF/A و ENDF/B تمام اطلاعات در هر زمانی می‌توانند به فایل اولیه ENDF/A وارد شوند. پس از مدتی که داده‌های آن با آزمایش‌های مختلف مورد تأیید قرار گرفت، به فایل ENDF/B وارد می‌شود. در نتیجه تا زمانی که یک فایل ENDF/B تغییر نکرده است می‌توان آن را به عنوان مرجع استاندارد به حساب آورد. در این مقاله با توجه به امکانات موجود به بررسی داده‌های هسته‌ای دو عنصر کربن و سرب می‌پردازیم.

با توجه به رابطه $R = \Sigma \phi$ که در آن R آهنگ برهمکنش، ϕ شار نوترون و Σ سطح مقطع ماکروسکوپی جذب می‌باشند، از لحاظ تجربی آهنگ برهمکنش را به وسیله آشکارساز اندازه‌گیری کرده، سپس با استفاده از کد محاسباتی MCNP شار نوترون را حساب می‌کنیم.

با استفاده از بانک اطلاعاتی ENDF سطح مقطع‌های جذب نوترون برای مواد را انتخاب کرده و با به کار بردن نتایج آهنگ برهمکنش که از راه تجربی اندازه‌گیری شده است، شار تجربی حساب می‌شود. معمولاً بین شار محاسباتی و شار تجربی اختلافاتی وجود دارد که قسمت عمده این اختلاف‌ها ناشی از سطح مقطع‌های نوترونی که از بانک‌های اطلاعاتی ENDF استفاده شده است، می‌باشد. تغییراتی به وسیله اختلال در سطوح مقطع نوترونی بوجود می‌آوریم و شار نوترون را برحسب داده‌های مختل شده حساب می‌کنیم، تا آن که اختلاف شار تجربی و شار محاسباتی به حداقل مقدار خود برسد. روش مناسب برای تعیین خطاها استفاده از تئوری ضرایب حساسیت است که در بخش ۳ به آن می‌پردازیم.

۲- بررسی نظریه ترابرد

معادله ترابرد نوترون به صورت زیر است:

$$\left[\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} + \hat{\Omega} \cdot \nabla + \Sigma_t \right] \phi = \int_{4\pi} \int_0^\infty dE' \Sigma_s(E', \hat{\Omega}') \rightarrow E, \hat{\Omega} d\phi d\Omega' + S(r, E, \Omega, t) \quad (1)$$

که در آن ϕ شار نوترون، v سرعت نوترون، Σ_t سطح مقطع ماکروسکوپی کل، Σ_s سطح مقطع ماکروسکوپی پراکنده‌گی و S چشمه نوترون است.

اگر N چگالی اتمی محیط و σ سطح مقطع میکروسکوپی باشد، $\Sigma = N\sigma$ در صورت $\Sigma = N\sigma$ در نظر گرفته می‌شود.

۲-۱ محاسبه شار نوترون

محاسبه شار نوترون به دو صورت امکان‌پذیر است:

- حل عددی معادله ترابرد
- حل به روش مونت کارلو

در اینجا به روش مونت کارلو اشاره مختصری می‌کنیم. در روش مونت کارلو به طور ساده می‌توان بیان کرد که با کاربرد اعداد تصادفی، تعداد معدودی از تاریخچه‌های ذره را می‌توان بررسی کرد. بدین منظور با تولید اعداد تصادفی از تابع توزیع رویدادهایی که ممکن است برای ذره بوجود آیند، نمونه‌یابی می‌شود. هر تاریخچه با نمونه‌برداری از تابع توزیع



غیرالاستیک (n, n')، گسیل ذرات باردار (n, α)، (n, β)، شکافت (n, f) و برهمکنش‌های (n, γ) و (n, π) می‌باشد.

برای اندازه‌گیری سطح مقطع انرژی مواد مختلف به این ترتیب می‌توان عمل کرد که شار ذرات $\phi(E)$ را به طرف ماده مورد نظر هدایت کرده و آشکارساز را در زاویه θ نسبت به جهت ذرات فرودی قرار دهیم. به دلیل آنکه مسأله نسبت به زاویه سمتی $0 < \phi < 2\pi$ متقارن است بنابراین زاویه فضایی $\Delta\Omega$ فقط به زاویه θ بستگی خواهد داشت. چنانچه آشکارساز زاویه فضایی $\Delta\theta$ را در برگیرد می‌توان نوشت:

$$C(E, \theta)\Delta\theta = \zeta(E)\phi(E) \frac{NV}{2\pi} \sigma(E \rightarrow E, \cos\theta)\Delta\Omega \quad (3)$$

در این رابطه کمیت‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند:
 $C(E, \theta)\Delta\theta$: نوترون‌های شمارش شده با انرژی E که تحت زاویه فضایی $\Delta\Omega$ در زاویه $\Delta\theta$ توسط آشکارساز شمارش می‌شوند. $\zeta(E)$: بازده آشکارساز، V : حجم نمونه، K : ضریب تکثیر نوترون، N : چگالی حجمی نمونه
 $\sigma(E \rightarrow E_0, \cos\theta)$: سطح مقطع میکروسکوپی دو گانه^(۲) می‌باشد.

۳-۱ بررسی خطای پارامترهای هسته‌ای با استفاده از روش اختلال

روش مستقیم برای اندازه‌گیری خطای روی هر پارامتر هسته‌ای ناشی از داده‌های هسته‌ای، مقایسه بین مقدار اندازه‌گیری شده با مقدار محاسبه شده برای آن کمیت می‌باشد، امروزه با وجود کامپیوترهای پیشرفته و گسترش برنامه‌های محاسباتی برای حل معادلات انتگرال-دیفرانسیلی، همچنین دقت بالای وسایل اندازه‌گیری عمده‌ترین عامل خطا در تعیین شار نوترون مربوط به سطح مقطع نوترونی می‌باشد، لذا اختلاف بین دو مقدار مذکور، خطای ناشی از داده‌های هسته‌ای است.

چنانچه مقدار تجربی هر داده هسته‌ای مورد توجه باشد، با استفاده از بررسی روش حساسیت به صورت محاسباتی می‌توان میزان حساسیت پارامترهای مختلف را که در طراحی نوترونی حائز اهمیت است، نسبت به عوامل مختلف از جمله سطوح مقطع به دست آورد [۲ و ۳].

آهنگ برهمکنش^(۳) ذرات نوترون را به صورت پارامتر انتگرالی R_K نمایش می‌دهیم که تابعی از سطح مقطع نوترون می‌باشد [۴].

چشمه برای تعیین مکان، انرژی و جهت اولیه ذره شروع می‌شود. نمونه‌یابی از داده‌های سطح مقطع مشخص خواهد کرد که یک ذره پراکنده شده است، یا با هسته خاصی برخورد کرده است و احتمال این که ذره گیراندازی شده باشد چقدر است؟

اگر ذره گیراندازی شده باشد تاریخچه آن پایان یافته است. اگر حالت پراکندگی اتفاق افتاده باشد این مطلب مورد بررسی قرار می‌گیرد که اگر برخورد کشسان باشد انرژی تغییر نکرده است و اگر برخورد غیرکشسان باشد انرژی نوترون حتماً تغییر کرده است. این کار آنقدر انجام می‌شود تا ذره گیراندازی شود و یا از سیستم مسأله مورد نظر ما خارج گردد.

با دنبال کردن یک ذره می‌توان متوجه شد که میانگین کمیت آماری مورد نظر چقدر خواهد شد. این کمیت آماری در مسأله مورد نظر ما آهنگ برهمکنش‌ها و شار می‌باشد که به صورت میانگین گیری روی R_n انجام می‌گیرد یعنی:

$$\hat{R} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N R_n \quad (2)$$

که در آن R_n سهم n ام تاریخچه آهنگ برهمکنش است. عدم قطعیت در اندازه‌گیری با افزایش تعداد تاریخچه‌ها متناسب می‌باشد، در بیشتر حالات عدم قطعیت با $N^{-1/2}$ متناسب است. شار در روش مونت کارلو به طور عادی در یک نقطه محاسبه نمی‌شود. بلکه از تعداد برخوردهای طول رد ذره یا کمیت‌های دیگر در المان $\Delta r \Delta \Omega \Delta E$ تخمین زده می‌شود. بنابراین اگر حجم V مسأله مورد نظر را به قسمت‌های کوچکتری تقسیم‌بندی کنیم آنگاه می‌توان شار را در هر یک از سلول‌ها بدست آورد. برای به دست آوردن شار نوترون به روش مونت کارلو باید تکنیک‌های نمونه‌یابی و تابع توزیع احتمال یک متغیر تصادفی را در نظر گرفت. کد MCNP توان محاسبه شار نوترون در مجموعه‌های پیچیده را داراست و توانایی بالایی برای تولید متغیرهای تصادفی و محاسبه تابع توزیع احتمال برای چند متغیر را دارد. در این کار برای محاسبه شار از کد MCNP استفاده می‌گردد [۱].

۳- اندازه‌گیری سطح مقطع

برهمکنش نوترون با ماده ممکن است در حالت‌های مختلفی اتفاق بیفتد. برهمکنش‌های اصلی نوترون در انرژی‌های زیر ۲۰ MeV شامل پراکندگی الاستیک (n, n)، پراکندگی



مقطع Σ_R را به Σ_{RP} تغییر دهیم آن گاه کلیه کمیت‌ها از جمله ضرایب حساسیت R_k را مورد بررسی قرار می‌دهیم:

$$\Delta C = \frac{\Delta \Sigma_R(\vec{r}, E)}{\Sigma_R(\vec{r}, E)} \quad (9)$$

با اعمال تغییرات کوچک در سطح مقطع Σ_{RP} حاصل می‌شود $(\Sigma_R \rightarrow \Sigma_{RP})$ آنگاه ϕ شار و R نیز به صورتهای زیر تغییر می‌کنند:

$$\phi_p(r, E, \hat{\Omega}) = \phi(r, E, \hat{\Omega}) + \Delta \phi(r, E, \hat{\Omega}) \quad (10)$$

حال اگر از روابط فوق استفاده کنیم، داریم:

$$\begin{aligned} \Delta R_k = R_{kp} - R_k &= \iiint \Sigma_{RP}(\vec{r}, \vec{E}) \phi_p(\vec{r}, E, \Omega) d\vec{r} dE d\Omega - \\ &\iiint \Sigma_R(\vec{r}, E) \phi(\vec{r}, E, \Omega) d\vec{r} dE d\Omega = \\ &\iiint (\Sigma_{RP} \phi_p - \Sigma_R \phi) d\vec{r} dE d\Omega \end{aligned} \quad (11)$$

در رابطه (11) کمیت $(\Sigma_{RP} \phi_p - \Sigma_R \phi)$ باید بر حسب کمیت‌های دیگر مشخص شود لذا از معادله ترابرد و مزدوج الحاقی⁽⁶⁾ آن استفاده می‌کنیم و می‌توان نوشت [5]:

$$\Delta R_k = \iiint \left[-\phi \Delta C \phi^* \Sigma_R + \iiint \phi \Delta C \Sigma_R(\vec{r}, \Omega \rightarrow \Omega', E \rightarrow E') \phi^* dE' d\Omega' \right]$$

$$d\vec{r} dE d\Omega + \iiint [\phi \Delta C \Sigma_R] d\vec{r} dE d\Omega$$

اگر تغییری در کل سطح مقطع گروه‌های انرژی یک ماده ایجاد شود می‌خواهیم ببینیم چه تغییری در ضریب حساسیت کل و چه تغییری در کمیت R_k ایجاد می‌شود. البته این فرض را باید در نظر داشت که ضریب همبستگی بین $\Sigma_{g'}$ ، Σ_g برابر یک می‌باشد. از اینرو ضرایب حساسیت انتگرالی را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$S_{\Sigma_R} = \sum_g P_{\Sigma_{g,k}} = \frac{\delta R_k / R_k}{\Delta C} \quad (13)$$

$$R_k = F(\Sigma_g) \quad (4)$$

اگر اختلال⁽⁴⁾ مرتبه اول را بر روی R_k اعمال کنیم می‌توان نوشت:

$$\Delta R_k = \sum_g \frac{\delta R_k}{\delta \Sigma_g} \Delta \Sigma_g \quad (5)$$

که اندیس g در رابطه فوق بیانگر گروه انرژی می‌باشد.

۲-۳ روش محاسبه ضرایب حساسیت

در رابطه (5) کمیت $\frac{\delta R_k}{\delta \Sigma_g}$ را ضریب حساسیت⁽⁴⁾ می‌نامیم و

برای گروه‌های مختلف انرژی به صورت $\frac{\delta R_k}{\delta \Sigma_{g'}}$ ، $\frac{\delta R_k}{\delta \Sigma_g}$ می‌نویسیم. ضریب حساسیت نسبی را به صورت زیر تعریف می‌کنیم [5]:

$$P_{\Sigma_{g,k}} = \frac{\frac{\delta R_k}{\delta \Sigma_g} R_k}{\Sigma_g} \quad (6)$$

رابطه (6) ضریب حساسیت نسبی در گروه g بیانگر آن است که با تغییر سطح مقطع در گروه g چه تغییری در کمیت R_k ایجاد می‌شود. پارامترهای انتگرالی R_k به صورت چشم‌داشتی حاصلضرب سطح مقطع در شار موردنظر می‌باشد یعنی:

$$R_k = \langle \Sigma_R, \phi \rangle \quad (7)$$

که در رابطه انتگرالی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$R_k = \langle \Sigma_R, \phi \rangle = \iiint \Sigma_R(\vec{r}, E) \phi(\vec{r}, E, \hat{\Omega}) d\vec{r} dE d\Omega \quad (8)$$

در رابطه فوق Σ_R به عنوان سطح مقطع ماکروسکوپی یک برهمکنش می‌باشد و تابع تبدیلی است که شار نوترون را به پارامترهای R_k مرتبط می‌کند. حال فرض می‌کنیم که سطح



که ΔC ، $P_{\Sigma_{g,k}}$ به صورت زیر تعریف می‌گردد [۶]:

که در این رابطه شاخص g میانگین کمیت را در یک بازه انرژی مشخص می‌کند.

$$P_{\Sigma_{g,k}} = \frac{\frac{\delta R_k}{R_k}}{\frac{\Delta \Sigma_g}{\Sigma_g}} = \frac{\delta R_k / R_k}{\Delta C_g} \quad (14)$$

بنابراین با توجه به روابط (۱۳) و (۱۴) داریم:

۴- آزمایشها و نتایج

محیطی شامل کربن و سرب را آماده کردیم و در مرکز این محیط چشمه Am-Be را قرار دادیم سپس شار تجربی را به کمک آشکارساز BF_3 اندازه گیری نمودیم. ابعاد و مشخصات محیط کربن و سرب به شرح زیر می‌باشد.

۴-۱ محیط کربن

محیط گرافیتی شامل دو بلوک با ابعاد $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 20\text{cm}$ می‌باشد که این دو بلوک تشکیل مکعب مستطیلی به ابعاد $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 40\text{cm}$ را خواهند داد. در مرکز هر یک از بلوک‌ها، استوانه‌ای قرار دارد که متحرک و قابل برداشتن از این محیط می‌باشد. شعاع این استوانه $3/25\text{cm}$ است. این گرافیت‌ها که استاندارد می‌باشند و مصارف هسته‌ای دارند شامل $98/85\%$ از اتم‌های ^{12}C و $1/115\%$ از اتم‌های ^{13}C هستند.

$$S_{\Sigma_R} = -\frac{1}{R_k} \int \phi \Sigma_R \phi^* dr dE d\Omega + \frac{1}{R_k} \int \phi \left[\int \Sigma_R f(r, E \rightarrow E', \Omega \rightarrow \Omega') \phi(r, E', \Omega') dE' d\Omega' dr \right] dr dE d\Omega + \frac{1}{R_k} \int \phi \Sigma_R \bar{r} dE d\Omega \quad (15)$$

رابطه (۱۵) کلیه تغییرات ناشی از سطح مقطع را بر روی کمیت‌های مختلف نشان می‌دهد.

۴-۲ محیط سرب

محیط سربی از قطعاتی بلوکی شکل تشکیل شده است که همه این قطعات داخل هم فرو می‌روند. این قطعات در هم فرورفته تشکیل مکعب مستطیلی می‌دهند که ابعاد این محیط سربی $30/5\text{cm} \times 30/5\text{cm} \times 42\text{cm}$ می‌باشد و به عنوان حفاظی اطراف گرافیت می‌باشد. ضخامت هر یک از بلوک‌های سربی برابر $5/2\text{cm}$ است که ابعاد خارجی این محیط سربی $35/7\text{cm} \times 35/7\text{cm} \times 42\text{cm}$ می‌باشد. در قرار دادن این قطعه سرب‌ها باید دقت کرد تا هیچ فرورفتگی یا انفصالی در محیط به وجود نیاید. لذا چارچوبی فلزی درست کرده‌ایم تا آن که ابعاد مکعب مستطیل را با 4 وجه سرب به طور دقیق پر کند.

جمله اول: بیانگر جذب نوترون‌ها در نقطه $(\vec{r}, E, \hat{\Omega})$ از فضای فاز است.

جمله دوم: معرف پراکندگی نوترون‌ها در فضای فاز از نقطه (r, E, Ω) به (r', E', Ω') می‌باشد.

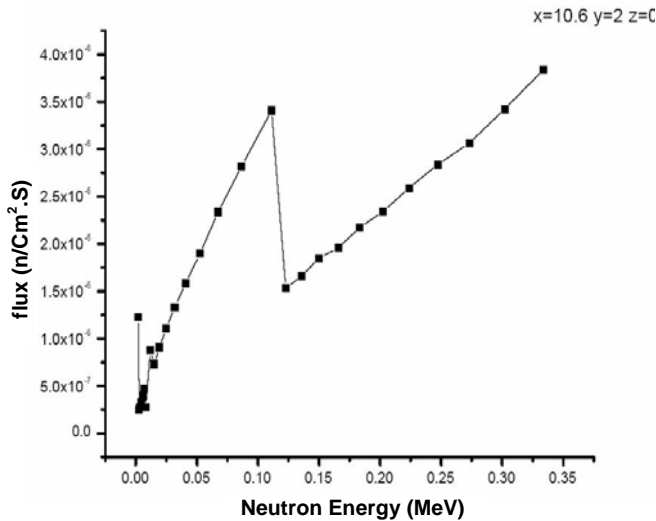
جمله سوم: اثر مستقیم سطح مقطع روی کمیت R_k را نشان می‌دهد اگر R_k تابعی صریح از سطح مقطع نباشد این جمله صفر خواهد شد.

با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۵) می‌توان ضرایب حساسیت نسبی $P_{\Sigma_{g,k}}$ را که برای هر گروه g تعریف می‌شود به صورت زیر نوشت [۶]:

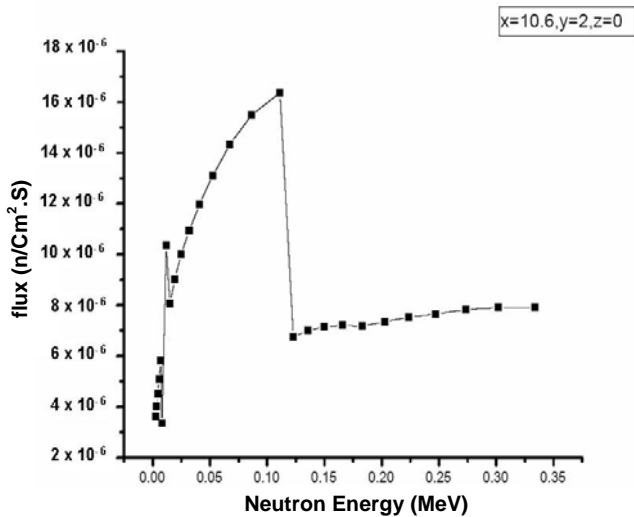
$$P_{\Sigma_{g,k}} = -\frac{1}{R_k} \int \phi^g \Sigma_R^g \phi^{g*} dr d\Omega + \frac{1}{R_k} \int \phi_g \left[\int \Sigma_{g'}^g R^{g \rightarrow g'}(r, \Omega \rightarrow \Omega') \phi^{g*}(r, \Omega') dr d\Omega \right] + \frac{1}{R_k} \int \phi^g \Sigma_R^g \bar{r} d\Omega \quad (16)$$

۴-۳ نتایج اندازه‌گیری

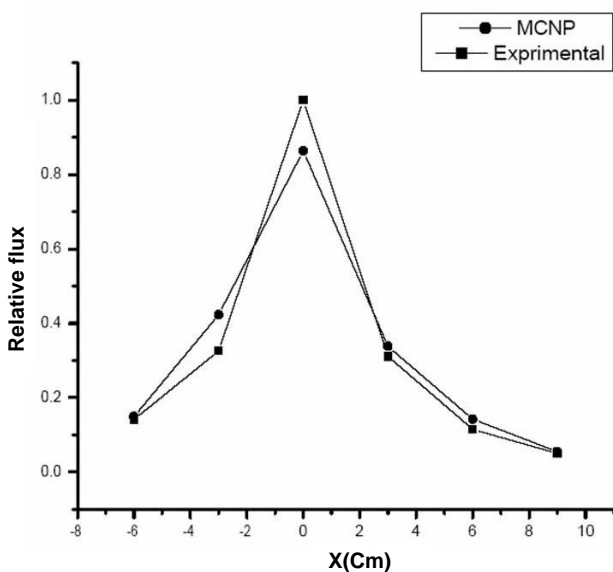
طیف انرژی چشمه Am-Be در گستره انرژی صفر تا 12MeV می‌باشد. با توجه به هندسه مسأله در آزمایشگاه که شامل محیط‌های کربن، هوا و سرب می‌باشد ابتدا با استفاده از



شکل ۲- نمودار شار محاسبه شده کربن برحسب انرژی.



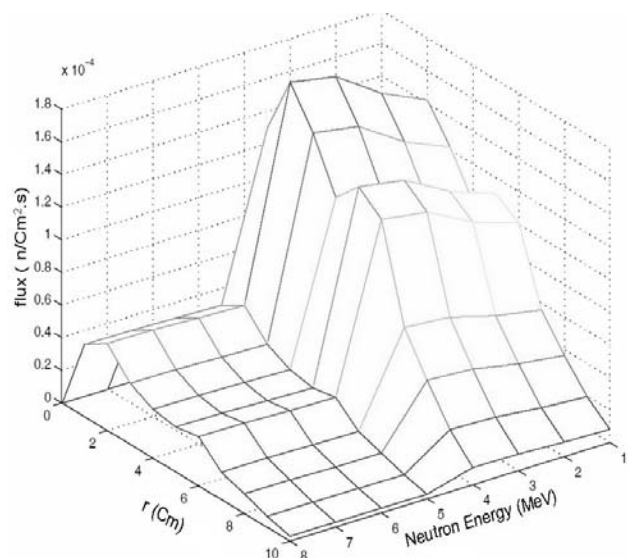
شکل ۳- نمودار محاسبه مزدوج شار در ناحیه کربن برحسب انرژی.



شکل ۴- شار نسبی در ناحیه کربن برای نوترون‌های حرارتی.

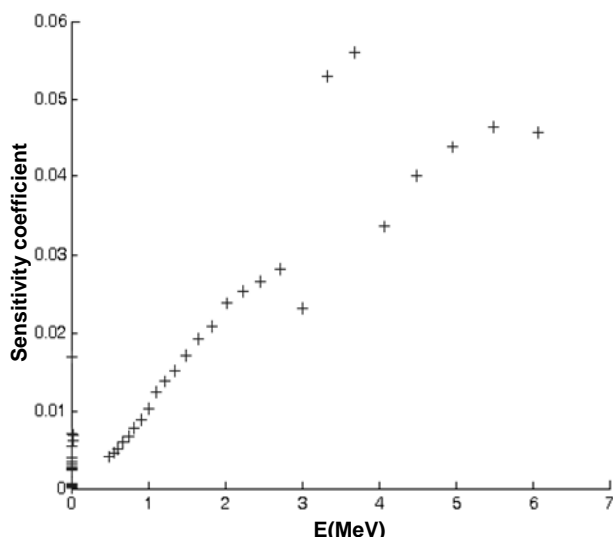
کد MCNP 4C شار نوترون در گستره انرژی تا ۱۵ MeV حساب شد. کتابخانه داده‌های نوترونی موجود در کد بر اساس فایل ENDF/B-VI است [۷ و ۸]. داده‌های این کتابخانه آخرین داده‌های گردآوری شده است که در اختیار عموم می‌باشد. نمودار رفتار شار نوترون برحسب انرژی و فاصله از چشمه در محیط آزمایش در شکل ۱ دیده می‌شود.

همچنین محاسبه شار نوترون و محاسبه مزدوج شار نوترون برحسب انرژی به کمک کد MCNP4C انجام گرفت، (شکل‌های ۲ و ۳). نتایج اندازه‌گیری شده تجربی برای به دست آوردن شار نسبی در محیط در شکل ۴ رسم شده است و با نتایج حاصل از کد MCNP مقایسه گردیده است. با توجه به افت سریع شار در فواصل دور از چشمه قسمت مؤثر شار نسبی محاسباتی و تجربی در شکل ۲ آورده شده است. در انرژی‌های حدود الکترون ولت نتایج آزمایش به کمک آشکارساز BF3 اندازه‌گیری شد. برای انرژی‌های بالا در دو انرژی ۳/۸ MeV و ۴/۹ MeV به کمک روش فعال‌سازی پولک‌های Al مقادیر شار تعیین گردید. همین مسأله از طریق کد MCNP 4C در دو انرژی ۳/۸ MeV و ۴/۹ MeV با قرار دادن آشکارساز در مکان معین محاسبه و با هم مقایسه شد که در انرژی ۳/۸ MeV تفاوت نتایج تجربی با محاسبه ۴/۷ درصد و در انرژی ۴/۹ MeV این تفاوت در شار نسبی برابر ۷/۲ درصد می‌باشد.



شکل ۱- توزیع شار محاسباتی نوترون در مجموعه کربن و سرب.

۵- تحلیل نتایج



شکل ۵- ضرایب حساسیت سطح مقطع پراکنده‌گی کربن.

کمتر از نیم درصد، در نواحی انرژی ۰/۵ تا ۲/۸ MeV این حساسیت افزایش می‌یابد تا به ۳ درصد می‌رسد و پس از یک کاهش نیم درصدی در انرژی ۳ MeV باز ضرایب حساسیت افزایش می‌یابد تا در انرژی‌های بین ۳ تا ۴ MeV به حدود ۶ درصد می‌رسد و در ناحیه بین ۵ تا ۶ MeV در حدود ۵ درصد می‌باشد. بنابراین ضرایب حساسیت در انرژی‌های پایین بسیار کوچک‌اند و این مؤید این واقعیت است که سطوح مقطع نوترونی کربن در انرژی‌های پایین در ناحیه کمتر از ۰/۵ MeV به اندازه کافی قابل اعتماد است ولی در نواحی بالای ۱ MeV قابل توجه و خاصه در نواحی انرژی حدود چند میلیون الکترون ولت بسیار محسوس است. این مسأله از این واقعیت حاصل می‌شود که کار با عنصر کربن طی سال‌های متعدد در نواحی انرژی پایین خاصه در رآکتورهای نسل اول باعث شده که آزمایش‌های زیادی برای اندازه‌گیری سطوح مقطع این عنصر در نواحی الکترون ولت تا چند کیلو الکترون ولت انجام گیرد و نتایج زیاد و قابل اعتماد بدست آید ولی در نواحی انرژی بالای چند MeV این کار به علت آنکه نوترون‌های سریع مورد توجه نبوده‌اند کمتر صورت گرفته است.

جدول ۱ ضرایب حساسیت سرب را به ازاء اعمال ۱٪ اختلال در سطوح مقطع سرب نشان می‌دهد که حساسیت سطح مقطع‌ها را در نواحی انرژی ۳ تا ۸ MeV از ۱/۹ تا ۴/۸ درصد تغییر نشان می‌دهد و در انرژی‌های ۱۰-۹ MeV این حساسیت به ۰/۲ تا ۰/۶۷ درصد تغییر می‌کند لذا سطوح مقطع نوترونی سرب در انرژی‌های پایین حساس‌تر از انرژی‌های بالا می‌باشد.

منظور اصلی از انجام این آزمایش بررسی حساسیت سطح مقطع‌های نوترون با روش تجربی و مقایسه آنها با نتایج محاسباتی است. در نتیجه عدم قطعیت سطح مقطع‌ها روشن می‌شود.

در شکل ۱ نمودار شار نوترون برحسب انرژی و فاصله از چشمه با استفاده از کد MCNP بر پایه ابعاد و بلوک‌های کربن و سرب رسم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود شار نوترون در انرژی‌های کمتر از ۲ MeV و در نزدیکی چشمه دارای بیشترین مقدار یعنی $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ است و این مقادیر با رفتار سطح مقطع کل نوترون در کربن (موجود در کتابخانه ENDF/B-VI) در نواحی انرژی پایین که ۵ بارن در ۱ eV تا ۲ بارن در ۱ MeV است سازگاری دارد [۷ و ۸]. در نواحی بالای ۱ MeV سطح مقطع کل کربن از ۲ بارن در ۱ MeV به ۰/۷ بارن در ۱۰ MeV کاهش می‌یابد که این اثر در شار نوترون مشاهده می‌شود و شار نوترون در نواحی با انرژی بالای ۵ MeV به حدود 4×10^{-5} در نزدیکی چشمه افت می‌نماید هر چه از چشمه دور می‌شویم شار نسبت به مکان چشمه کاهش می‌یابد و این نیز به علت برخورد نوترون در محیط و دور از چشمه قابل انتظار است.

سطح مقطع کل نوترون در سرب (بر اساس ENDF/B-VI) نیز در نواحی انرژی ۱۰^۴-۱۰^۳ eV برابر ۱۲ بارن و در ۱ MeV-۱۰^۴ eV از ۱۰ بارن به ۴ بارن می‌رسد [۷ و ۸]. در ۵ MeV-۱ از ۴ به ۷ بارن و بالای ۵ MeV از حدود ۷ بارن به ۴/۵ بارن کاهش می‌یابد. در شکل ۲ با توجه به مقایسه نتایج شار محاسبه شده با کد MCNP بر پایه ENDF/B-VI و مقایسه با شار تجربی به صورت شار نسبی برحسب فاصله در دو طرف چشمه نتایج مشاهده می‌شود که با دور شدن از چشمه افت شار قابل پیش‌بینی است و اختلاف موجود به علت وجود اختلاف در سطح مقطع نوترون ارزیابی می‌شود.

نمودار شماره ۳ شار نوترون در مجموعه سرب و کربن برحسب انرژی را نشان می‌دهد که افت و خیز آن برحسب انرژی با رفتار سطح مقطع نوترونی مجموعه یعنی کربن و سرب سازگار است. نمودار شکل ۴ با تغییر جای چشمه و تابع پاسخ به دست آمده است. با اعمال یک درصد اختلال در سطوح مقطع کربن در کتابخانه ENDF/B-VI ضرایب حساسیت کربن محاسبه و در شکل ۵ نشان داده شده است. بطوری که در این شکل مشاهده می‌شود ضرایب حساسیت در انرژی‌های کمتر از ۰/۵ MeV

**پی‌نوشت‌ها:**

- ۱- ENDF: Evaluated Nuclear Data File
- ۲- Double Differential Cross Section
- ۳- Reaction Rate
- ۴- Perturbation
- ۵- Sensitivity Coefficient
- ۶- Adjoint

References:

1. C.E. Burgart, "Capabilities of morse multigroup monte carlo code in solving reactor eigenvalue problems," December (1971).
2. P.M. Song, M.Z. Youssef, M.A. Abdou, "A new approach and computational algorithm for sensitivity/ uncertainty analysis for SED and SAD with application to beryllium integral experiment," Nucl. Sci. Eng. 113-339 (1993).
3. H.B. Choi, T.J. Downar, "Sensitivity theory for the closed nuclear fuel cycle," Nucl. Sci. Eng. 111-205 (1992).
4. M.Z. Yossef, W. Conn, C.W. Maynard, "Impact of cross-section uncertainties on the nuclear design," Nucl. Technol. Fusion, 2 (1982).
5. C.R. Weisbin, C.M. Oblow, J.H. Marable, R.W. Peele, J.L. Lucius, "Application of sensitivity and uncertainty methodology to fast reactor integral experiment analysis," Nuc. Sci. Eng. 66-307 (1978).
6. D.G. Cacusi, "Global optimization and sensitivity analysis," Nucl. Sci. Eng. 104-78 (1990).
7. "MCNP4C monte carlo N-Particle transport code system," Los Alamos National Laboratory, April (2000).
8. M.E. Dunn, P.B. Fox, N.M. Greene, L.M. Petrie, "ENDF/B-VI library generation and testing for the scale code system," Oak Ridge Tennessee, USA (2005).

جدول ۱- ضرایب حساسیت سرب.

انرژی (MeV)	ضرایب حساسیت
۱	۰/۰۴۹
۲	۰/۰۵۲۶۶
۳	۰/۰۴۸۹۴
۴	۰/۰۴۳
۵	۰/۰۳۸۲۶
۶	۰/۰۳۸۶۶
۷	۰/۰۱۹۳۲
۸	۰/۰۱۲۲۶
۹	۰/۰۰۶۶۸
۱۰	۰/۰۰۲۷۷

۶- نتیجه‌گیری

همانگونه که در مقدمه این مقاله بیان شد تاکنون روش نظری جامعی که بتواند تمامی سطح مقطع‌های هسته‌ای را به دست دهد وجود ندارد. لذا سطوح مقطع هسته‌ای به صورت ترکیبی از اندازه‌گیری‌های تجربی و مدل‌های هسته‌ای در بانک‌های اطلاعاتی گردآوری می‌گردد. در فناوریهای هسته‌ای از این فایل‌ها استفاده می‌گردد و چون این داده‌ها حاوی مقداری خطا هستند، نتایج محاسباتی قابل اطمینان نیستند. استفاده از روش حساسیت‌سنجی که در این کار مطرح گردید روش مناسبی برای مقایسه نتایج تجربی پارامترهای یک محیط هسته‌ای یعنی آهنگ برهمکنش‌ها، آهنگ انتقال انرژی و شار ذرات می‌باشد. یک مجموعه مواد مورد نیاز در رآکتور با ساختار ساده ساخته می‌شود تا شرایط مشابه در رآکتور فراهم گردد. با اندازه‌گیری آهنگ برهمکنش‌ها در این مجموعه و مقایسه آن با نتایج محاسباتی که از طراحی مجموعه حاصل شده است، اطلاعات لازم در مورد عدم قطعیت در سطوح مقطع هسته‌ای را در انرژی‌های معین نوترون مشخص می‌کند؛ بنابراین برای یک رآکتور معین می‌توان این عدم قطعیت را شناسایی و خطای موجود در کمیت‌های دستگاه را کاهش داد. این کار یک روش کلی است. نتایج به دست آمده تنها در ناحیه محدودی از انرژی بررسی شد.

تشکر و قدردانی

از همکاری صمیمانه کلیه همکاران عزیز در مرکز تحقیقات و تولید سوخت هسته‌ای اصفهان به ویژه بخش مهندسی هسته‌ای تشکر می‌نمایم.