

مطالعه مقایسه‌ای روش‌های مختلف تولید ثوابت پخش چند گروهی نوترون بر اساس روش مونت کارلو

پیروزمند، احمد* - محمد حسنی، فاطمه - نعمت‌الهی، محمدرضا

دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته‌ای

چکیده:

هدف این پژوهش پیاده‌سازی و مقایسه روش‌های مختلف برای تولید ثوابت پخش چند گروهی نوترون همچون سطح مقطع پراکندگی و ضریب پخش بر اساس روش مونت کارلو در کد *MCNP* است. برای این منظور روش‌های مختلف موجود با در نظر گرفتن کد *MCNP* به عنوان ابزار محاسباتی پیاده‌سازی شده و نتایج برای یک مسئله استاندارد و همچنین المان سوختی راکتور تحقیقاتی تهران با هم مقایسه می‌گردد. برای ارزیابی از نتایج کد قطعیتی *WIMSD5* به عنوان مرجع استفاده شده است.

کلمات کلیدی: تولید ثوابت پخش چند گروهی، روش مونت کارلو، کد *MCNP*

مقدمه:

پارامترهای چند گروهی نوترون از جمله سطح مقاطع ماکروسکوپی و ضریب پخش نوترون به طور وسیعی در محاسبات فیزیک راکتور مورد استفاده قرار می‌گیرند [1]. ثوابت چند گروهی نوترون پایه و اساس حل معادلات ترابرد و پخش چند گروهی نوترون در کدهای محاسباتی مختلف محسوب می‌شوند و نقش آن‌ها در حل مسائل فیزیک راکتور غیر قابل انکار است [1, 2].

تاکنون روش‌های احتمالاتی برای ایجاد راه حل‌های با دقت بسیار بالای مسائل ترابرد به کار گرفته شده است. تولید ثوابت گروهی به ویژه سطح مقاطع چند گروهی نوترون با استفاده از روش مونت کارلو به واسطه انعطاف پذیری آن در تعریف هندسه، قابلیت بالای محاسباتی و بهره‌گیری از سطح مقاطع انرژی پیوسته نسبت به کدهای شبکه‌ای قطعیتی، از دقت مضاعفی برخوردار بوده و این امر موجب شده است که استفاده از این روش به طور چشمگیری مورد توجه قرار گیرد. به علاوه عدم نیاز به بکارگیری تقریب‌های بزرگ در روش مونت کارلو، این روش را برای تولید سطح مقطع‌های چند گروهی بسیار دقیق و ضرایب پخش مرتبه بالا مناسب می‌سازد. نمونه‌هایی از مطالعات صورت گرفته در زمینه استفاده از روش مونت کارلو برای تولید ثوابت گروهی موجود است [1-6].

در این پژوهش روش‌های مختلف تولید ثوابت گروهی در کد *MCNP* به کار گرفته می‌شود و نتایج حاصل از پیاده‌سازی این روش‌ها برای تولید ثوابت یک مسئله استاندارد و المان سوختی راکتور تحقیقاتی تهران

مورد مقایسه قرار می‌گیرند. برای ارزیابی دقت روش‌های به کار گرفته شده، از نتایج کد قطعی WIMSD5 به عنوان مرجع استفاده می‌گردد.

روش کار :

در این بخش ابتدا به معرفی ثوابت چند گروهی نوترون می‌پردازیم و سپس روش‌های مختلف به کار رفته در تخمین ثوابت گروهی با استفاده از کد MCNP مورد بحث قرار می‌گیرند. ثوابت چندگروهی مورد نیاز برای حل معادلات پخش و ترابرد نوترون به صورت معادلات (۱) تا (۷) تعریف می‌شوند [7]. در معادلات مذکور، g بیانگر گروه انرژی، ϕ_g شار نوترون گروه g برحسب (neutron/cm²s)، سطح مقاطع Σ_{fg} ، Σ_{ag} ، Σ_{tg} ، Σ_{sg} ، $\nu\Sigma_{fg}$ هستند. همچنین سطح مقطع پراکندگی ماکروسکوپی از گروه انرژی g' به گروه انرژی g را برحسب D_g و cm^{-1} ضریب پخش گروه g را برحسب cm نشان می‌دهند. سطح مقاطع چند گروهی برای برهمکنش‌های مستقیم را می‌توان به سادگی از تقسیم نرخ برهمکنش به شار گروهی که با استفاده از تالی‌های F4 و FM4 کد MCNP به دست می‌آیند، محاسبه نمود.

در عین حال هیچ‌یک از کدهای مونت کارلو قادر به تخمین ماتریس پراکندگی و سطح مقطع ترابرد و متعاقباً ضریب پخش نوترون نیستند. به همین دلیل در این پژوهش روش‌های مختلف تولید ثوابت گروهی اجرا شده در کد MCNP که قادر به محاسبه سطح مقطع پراکندگی و ضریب پخش مورد نیاز برای کاربردهای ترابرد یا پخش هستند، معرفی و سپس ثوابت تولید شده با یکدیگر مقایسه می‌گردند.

$$\Sigma_{ag} = \frac{\int_{E_g}^{E_{g-1}} \Sigma_a(E) \phi(E) dE}{\int_{E_g}^{E_{g-1}} \phi(E) dE} \quad (1)$$

$$\nu\Sigma_{fg} = \frac{1}{\phi_g} \int_{E_g}^{E_{g-1}} \nu(E) \Sigma_f(E) \phi(E) dE \quad (2)$$

$$\Sigma_{tg} = \frac{1}{\phi_g} \int_{E_g}^{E_{g-1}} \Sigma_t(E) \phi(E) dE \quad (3)$$

$$\Sigma_{sg} = \frac{\int_{E_g}^{E_{g-1}} dE \int_{E_g}^{E_{g-1}} dE' \Sigma_s(E' \rightarrow E) \phi(E')}{\int_{E_g}^{E_{g-1}} \phi(E') dE'} \quad (4)$$

$$\Sigma_{sg} = \sum_{g=1}^G \Sigma_{sg} \quad (5)$$

$$\Sigma_{trg} = \Sigma_{tg} - \mu \Sigma_{sg} \quad (6)$$

$$D = \frac{1}{3\Sigma_{tr}} \quad (7)$$

روش اول: استفاده از فایل خروجی PTRAC از کد MCNPX در محاسبه ثوابت گروهی

در این روش سطح مقطع‌های چندگروهی با در دست داشتن شار برای هر گروه انرژی محاسبه می‌گردد. برای محاسبه سطح مقطع پراکندگی از یک فایل خروجی کد MCNP تحت عنوان PTRAC که دربرگیرنده اطلاعاتی از جمله موقعیت ذره، جهت ذره با محورهای مختصات، انرژی و وزن ذره می‌باشد؛ استفاده می‌شود. این فایل از طریق برنامه‌ای مجزا که در MATLAB مورد ارزیابی قرار گرفته، خوانده شده و اطلاعات مورد نیاز از جمله وزن ذره و جهت برخورد ذره در هر برهمکنش استخراج می‌گردد. با استفاده از وزن استخراج شده برای هر گروه انرژی و روش نسبت وزن ذره به شار که بر پایه معادلات پیوستگی استوار

است، سطح مقطع های پراکندگی نوترون محاسبه شده و متوسط کسینوس زاویه پراکندگی که در محاسبه سطح مقطع ترابرد نوترون و متعاقباً ضریب پخش نوترون مورد نیاز است نیز با استفاده از اطلاعات مربوط به جهت پراکندگی ذره که در فایل PTRAC موجود است محاسبه می گردد [3].

روش دوم: روش نسبت وزن ذره به شار و تغییر در سورس کد MCNP

در این روش با افزودن یک تابع اضافی به کد MCNP برای محاسبه سطح مقاطع پراکندگی و استفاده از روش نسبت وزن ذره به شار آنچنانکه در شکل ۱ نشان داده شده، ثوابت گروهی قابل محاسبه می باشند [4].

روش سوم: تولید ثوابت با استفاده از پراکندگی کشسان

در این روش اساس تولید ثوابت سطح مقطع پراکندگی و ضریب پخش چندگروهی نوترون با استفاده از کد MCNP بر مبنای محاسبه نرخ برهمکنش پراکندگی کشسان تمام نوکلیدهای تشکیل دهنده سوخت، خنک کننده و... آنچنانکه در رابطه (۸) مشاهده می شود و همچنین استفاده از روابط (۹) و (۱۰) برای محاسبه سطح مقاطع پراکندگی در حالت سه گروه انرژی استوار است [5]. لازم به ذکر است که در رابطه (۸) برای محاسبه μ از تقریب مقدار 0.667 برای هیدورژن و 0.35 برای سایر نوکلیدها استفاده می گردد.

$$D = \frac{1}{3\Sigma_{tr}} = \frac{1}{3(\Sigma_t - \Sigma_{ela, P1})} = \frac{1}{3\left(\Sigma_t - \sum_i^{-i} \mu \frac{R R_{ela}^i}{\phi}\right)} \quad (8)$$

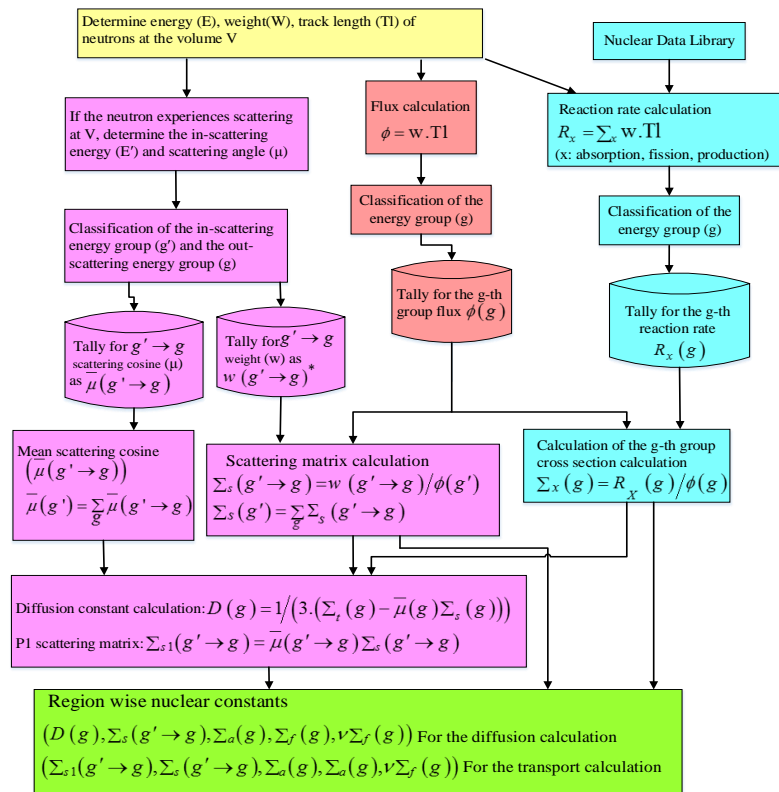
$$\Sigma_{S11 \rightarrow 2} = \frac{\phi_2}{\phi_1} (\Sigma_f 2 + \Sigma_{c2}) + \frac{\phi_3}{\phi_1} (\Sigma_f 3 + \Sigma_{c3}) \quad (9)$$

$$\Sigma_{S12 \rightarrow 3} = \frac{\phi_3}{\phi_2} (\Sigma_f 3 + \Sigma_{c3}) \quad (10)$$

نتایج :

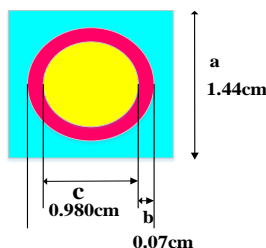
در این بخش روش های مختلف ارائه شده برای تولید ثوابت در کد مونت کارلوی MCNP را برای یک مسئله استاندارد و همچنین المان سوختی راکتور تحقیقاتی تهران مورد مقایسه قرار می دهیم و برای ارزیابی روش های مختلف اجرا شده در کد MCNP در محاسبه پارامتر مهم ضریب پخش از نتایج کد قطعی WIMSD5 به عنوان مرجع در مسئله استاندارد استفاده می کنیم. مسئله استاندارد را که به منظور مقایسه روش های مختلف محاسبه ثوابت شبیه سازی نمودیم مربوط به مدل سازی یک سلول سوخت است که ثوابت

گروهی از جمله ضرایب پنخش سه گروهی نوترون و سطح مقاطع پراکندگی برای این مسئله با هر سه روش توضیح داده شده در بالا تولید شده است. شرایط سلول سوخت مدل شده برای محاسبات ثوابت گروهی در



شکل شماره (۱). شماتیک روش وزن به شار در محاسبه ثوابت [4]

جدول (۱) آورده شده و شکل ۲ هندسه مسئله مورد مطالعه را نمایش می دهد. در جدول (۲) نیز ثوابت سه گروهی تولید شده توسط روش های مختلف اجرا شده در کد MCNP مقایسه می شوند. همچنین در این جدول مقایسه ضرایب پنخش سه گروهی حاصل از روش های به کار گرفته شده در کد MCNP با نتایج متناظر کد WIMSD-5B مرجع مشاهده می شود.



جدول شماره (۱). شرایط محاسبه برای مدل

سلول سوخت [4]

Case	BWR 9x9 UO ₂
Fuel rod pitch (a) [cm]	1.440
Clad thickness (b) [cm]	0.07
Pellet diameter (c) [cm]	0.980
Isotope composition in fuel [barn.cm]	
U-234	9.776E-06

U-235	1.058E-03
U-236	6.513E-06
U-238	2.116E-02
O-16	4.447E-02
Cladding	Natural Zr

شکل شماره (۲). نمایش هندسی سلول

سوخت مورد آنالیز [4]

جدو جدول شماره (۲). مقایسه ثوابت گروهی تولید

شده به روش های مختلف اجرا شده در کد MCNP با یکدیگر برای مسئله سلول سوخت

Group parameters	Method 1	Method 2	Method 3	WIMSD-5B
D ₁ [cm]	1.16E+00	1.23E+00	1.30E+00	1.58E+00
D ₂ [cm]	5.82E-01	6.30E-01	6.21E-01	6.13E-01
D ₃ [cm]	2.91E-01	2.38E-01	3.04E-01	2.75E-01
$\sum_{S1 \rightarrow 2}$ [cm ⁻¹]	4.78E-02	4.40E-02	4.82E-02	-
$\sum_{S2 \rightarrow 3}$ [cm ⁻¹]	9.83E-02	8.66E-02	9.75E-02	-
\sum_{r1} [cm ⁻¹]	5.13E-02	4.75E-02	5.17E-02	-
\sum_{r2} [cm ⁻¹]	1.30E-01	1.18E-01	1.29E-01	-
\sum_{r3} [cm ⁻¹]	1.14E-01	1.09E-01	1.14E-01	-

جدول شماره (۳). مقایسه ثوابت دو گروهی در شرایط متفاوت المان سوخت راکتور تهران بین روش های

مختلف

Comparison of two-group constants computed by different methods (unrodded state)		
Group parameters	Method1	Method 3
D ₁ [cm]	1.17E+00	1.19E+00
D ₂ [cm]	1.66E-01	2.67E-01
\sum_{S1} [cm ⁻¹]	2.76E-02	2.50E-02
\sum_{tr1} [cm ⁻¹]	2.85E-01	2.79E-01
\sum_{tr2} [cm ⁻¹]	2.00E+00	1.25E+00
\sum_{r1} [cm ⁻¹]	3.24E-02	2.98E-02
\sum_{r2} [cm ⁻¹]	9.48E-02	9.48E-02
Comparison of two-group constants for rodded core state (Fully insertion shim & safety control rods)		
D ₁ [cm]	1.16E+00	1.18E+00
D ₂ [cm]	1.66E-01	2.81E-01
\sum_{S1} [cm ⁻¹]	2.50E-02	2.63E-02
\sum_{tr1} [cm ⁻¹]	2.88E-01	2.83E-01
\sum_{tr2} [cm ⁻¹]	2.01E+00	1.18E+00
\sum_{r1} [cm ⁻¹]	3.73E-02	3.86E-02
\sum_{r2} [cm ⁻¹]	1.34E-01	1.34E-01

در گام بعدی سطح مقاطع پراکندگی و ترابرد و متعاقباً ضریب پخش نوترون دو گروهی را با استفاده از روش های اول و سوم توصیف شده در بخش قبل برای المان سوختی راکتور تحقیقاتی تهران در دو حالت

خروج و ورود کامل میله های کنترل محاسبه نموده و با یکدیگر مورد مقایسه قرار می دهیم. نتایج حاصل از این شبیه سازی در جدول (۳) نشان داده می شود.

بحث و نتیجه گیری :

در این پژوهش روش های مختلف تولید ثوابت پخش چند گروهی نوترون از جمله ضریب پخش نوترون و سطح مقطع پراکندگی براساس روش انرژی پیوسته مونت کارلو (کد MCNP) پیاده سازی و مورد مقایسه قرار گرفت. برای این منظور روش های مختلفی در کد MCNP به عنوان یک ابزار محاسباتی پیاده سازی شده و نتایج حاصل از آن ها برای یک مسأله استاندارد پین - سل و همچنین المان سوختی راکتور تحقیقاتی تهران مورد مقایسه قرار گرفت. برای ارزیابی روش های مونت کارلو در محاسبه پارامتر مهم ضریب پخش نوترون نتایج کد قطعی WIMSD5 به عنوان مرجع استفاده شد. در روش های اول و سوم نسبت به روش دوم علاوه بر اینکه نیاز به هیچگونه تغییر مستقیمی در کد MCNP وجود ندارد، ثوابت چند گروهی تولید شده و به ویژه ضرایب پخش از دقت خوبی برخوردارند و با در نظر گرفتن تعداد نسبتاً پایین ذرات نیز می توان به پاسخ قابل قبولی در محاسبات دست یافت. علی رغم اینکه در محاسبه ثوابت با روش سوم از تقریب بزرگی استفاده شده است، اما مقایسه اجمالی نتایج نشان می دهد که این روش را می توان یک روش کاربردی و موفق در تولید ثوابت با استفاده از کد MCNP معرفی نمود. مقایسه ثوابت گروهی تولید شده به روش های مختلف با نتایج کد قطعی WIMSD5 نیز بیانگر قابل قبول بودن نتایج حاصل از استفاده از روش مونت کارلو (کد MCNP) در تولید ثوابت گروهی نوترون می باشد (جدول ۳).

اختلافات مشاهده شده در نتایج اساساً به واسطه اختلاف در نوع روش های به کار گرفته شده در محاسبه ثوابت می باشد. به طور کلی ثوابت چند گروهی تولید شده با روش های اول و سوم برای استفاده در کدهای محاسبات پخش از جمله کد PARCS برای بررسی حالت های پایا و گذرای راکتیویته از دقت لازم برخوردار هستند.

مراجع :

- [1] Hoogenboom, J.E., Khotylev, V.A., Tholammakkil, J.M. "Generation of Multigroup Cross Sections and Scattering Matrices with the Monte Carlo Code MCNP5". Joint International Topical Meeting on Mathematics & Computation and Supercomputing in Nuclear Applications. American Nuclear Society, California, pp. 1-8, 2007.
- [2] Redmond II, E. L. "Multigroup Cross Section Generation via Monte Carlo Methods". Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, pp. 1-172, 1990.
- [3] Pirouzmand, A., Mohammadhasani, F. "Multi-group neutron cross sections and scattering matrix calculations via Monte Carlo method". J. Polytech, 18, pp. 235-240, 2015.

- [4] Yoshioka, K., Ando, Y. "Multigroup scattering matrix generation method using weight-to-flux ratio based on a continuous energy Monte Carlo technique". Journal of Nuclear Science and Technology, 47(10), pp. 908-916, 2010.
- [5] Tohjoh, M., Watanabe, M., Yamamoto, A. "Application of continuous-energy Monte Carlo code as a cross-section generator of BWR core calculations". Annals of Nuclear Energy, 32(8), pp. 857-875, 2005.
- [6] Pirouzmand, A., Mohammadhasani, F. "PARCS code multi-group neutron diffusion constants generation using Monte Carlo method". Progress in Nuclear Energy, 86, pp. 71-79, 2016.
- [7] Duderstadt, J. J., Hamilton, L. J. "Nuclear Reactor Analysis". John Wiley & Sons, New York, 1976.