طراحی و پیاده سازی الگوریتم اختلال مرتبه اول وزن شده با شار الحاقی به روش مونت کارلو

حسین مظاهری بنی – مهدی زنگیان* – عبدالحمید مینوچهر - احمدرضا ذوالفقاری

دانشگاه شهیدبهشتی،دانشکده مهندسی هسته ای،گروه راکتور

چکیده:

آگاهی داشتن ازتغییرات ضریب تکثیر به ازای تغییرات جزئی در پارامترهای مختلف همانند سطح مقاطع، چگالی، دما و ... نقش مهمی در میزان ایمنی راکتورهای هسته‌ای و تاثیرگذاری پارامترهای مختلف در میزان بحرانیت آن دارد. روش مرسوم برای محاسبه این تغییرات استفاده از روش اختلال می‌باشد. با استفاده از این روش می‌توان بدون انجام دوباره محاسبات برای حالت جدید، تخمینی از تاثیرگذاری تغییرات جزئی پارامترهای مختلف بر روی پارامتر مورد بررسی را بدست آورد. در این مقاله ابتدا شار الحاقی به روش IFP[1] با تغییر در سورس کد MCNP5 بدست می‌آید و سپس با استفاده از آن و بهره‌گیری از تئوری اختلال مرتبه اول، تغییرات ضریب تکثیر سیستم را بدست می‌آوریم.

کلیدواژه : *اختلال مرتبه اول ، شار الحاقی ، احتمال تکرار چشمه شکافت، ANISN ، MCNP5*

مقدمه:

ارزیابی حساسیت پاسخ یک سیستم نسبت به سطح مقاطع در گرو یافتن نسبت تغییرات سیستم به تغییرات کوچک سطح مقاطع می‌باشد که این نسبت را می‌توان با تفاضل پاسخ مربوط به حالت اولیه و حالت تغییر یافته (مختل شده) محاسبه کرد[۱]. استفاده از این روش زمانبر بوده و در روش هایی همانند مونت کارلو که با عدم قطعیت آماری روبرو هستیم در اختلالهای کوچک کارساز نمی باشد[۲]. روش اختلال، روش مرسوم برای ارزیابی حساسیت باتمرکز بر تغییرات است. تئوری اختلال روش‌های گوناگونی دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به روش عملگر دیفرانسیلی(DOP)[2] و اختلال مرتبه اول وزن شده با شار الحاقی(AWP)[3] اشاره کرد که حتی برای اختلال‌های بسیار کوچک نیز جواب‌های بسیارخوبی از

[1] Iterated Fission Probability
[2] Differential Operator Method
[3] Adjoint Weighted Perturbation Method

خود نشان می‌دهند. در کد MCNP5 برای محاسبه اختلال از روش عملگر دیفرانسیلی استفاده شده و این ویژگی در این کد با فعال‌سازی کارت Pert انجام می‌پذیرد. هدف اصلی این مقاله محاسبه تغییرات ضریب تکثیر موثر، به روش اختلال مرتبه اول وزن شده با شار الحاقی به وسیله تغییر در سورس کد MCNP5 می‌باشد. دراین مقاله با بهره گیری از روش احتمال تکرار شکافت (IFP) برای محاسبه شار الحاقی و بکارگیری آن در تئوری اختلال مرتبه اول، تغییرات ضریب تکثیر موثر برای سیستم به دست آورده می‌شود. در بخش های بعدی ابتدا به معرفی روش‌های IFP و اختلال مرتبه اول وزن شده با شار الحاقی پرداخته می شود و سپس آزمایش‌های متفاوتی برای راستی آزمایی این روش انجام می‌پذیرد.

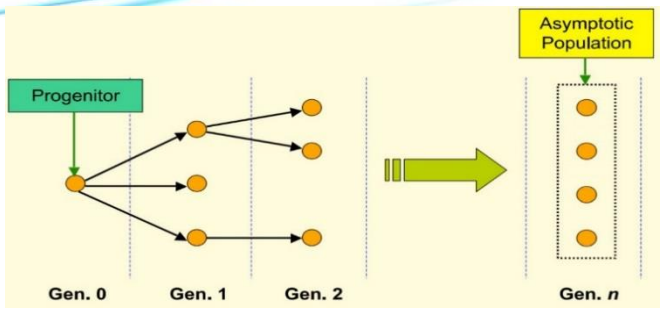
روش کار :

روش IFP :

روش IFP یا احتمال تکرار شکافت بر این فرضیه استوار است که اهمیت یک نوترون با توانایی آن برای ایجاد توان یا به عبارت دیگر شکافت بعدی سنجیده می شود به عبارت دیگر در این روش اهمیت نوترون در هر نقطه از فضای فاز، معادل جمعیت حدی نوترون های حاصل ازآن در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌کنیم یک نوترون در فضای فاز $\theta=(r,E,\Omega)$ وارد قلب راکتور می‌شود و این نوترون به طور تصادفی منجر به شکافت شده و باعث ایجاد نوترون‌هایی در نسل بعدی می شوند که به این نوترون‌ها اولاد[۴] می‌گویند. همچنین این اولاد در واکنش‌های زنجیری شرکت کرده و باعث ایجاد اولاد جدیدی در نسل‌های بعدی می‌شوند. همانطور که تعداد نسل‌ها، λ، افزایش می‌یابد توزیع شار نوترونی، $\phi^{(\lambda)}$ و نوترونهای حاصل از شکافت تولید شده توسط اولاد به یک حد پایداری همگرا می شوند. با فرض اینکه این همگرایی در نسل L رخ دهد، آنگاه توان راکتور درنسل λ، که در آن $\lambda \geq L$ ، به یک سطح مشخصی می‌رسد. این حد نهایی[۵] توان که ناشی از نوترون تعریف شده در θ می باشد را احتمال تکرار چشمه شکافت $IFP(\theta)$، می‌نامند[۲].

در شکل (۱) نمایی از روش IFP نشان داده شده است.

[۴] Progenies
[۵] Asymptotic Population



شکل (۱): طرح شماتیک از زنجیره واکنشهای شکافت و جمعیت نهایی نوترون ها

محاسبه اختلال به روش مرتبه اول وزن شده با شار الحاقی(AWP)

با شروع از معادله ترابرد نوترون و اعمال تئوری اختلال مرتبه اول می‌توانیم به معادله زیر برای محاسبه تغییرات راکتیویته برسیم :

$$\Delta\rho = -\frac{\langle \Psi^{\dagger}, P\Psi \rangle}{\langle \Psi^{\dagger}, F'\Psi \rangle} \qquad (۱)$$

در رابطه بالا ρ، نماد راکتیویته می‌باشد که راکتیویته متناظر برای هر k،ضریب تکثیر موثر، از رابطه زیر بدست می‌آید :

$$\rho = \frac{k-1}{k} \qquad (۲)$$

و نیز تعریف عملگراختلال P به صورت :

$$P = \Delta\Sigma_t - \Delta S - \frac{1}{k}\Delta F \qquad (۳)$$

وهمچنین تعریف عملگر اختلال شکافت F' هم به صورت

$$F' = F + \Delta F \qquad (۴)$$

می‌باشد. با استفاده از روش مونت کارلو و انجام محاسبات با سطح مقاطع پیوسته می‌توانیم صورت و مخرج کسر را به صورت جداگانه محاسبه کرده و سپس از طریق رابطه (۱) تغییرات راکتیویته را بدست آوریم [۳].

نتایج :

آزمایش شماره ۱:

در این آزمایش محاسبات اختلال بر روی یک کره بحرانی به شعاع 5.21 cm با سطح مقاطع یک گروهی که در جدول (۱) آورده شده است انجام می‌پذیرد. در این آزمایش میزان اختلال بسیار ناچیز می‌باشد. سطح مقاطع برای دو اختلال جداگانه در جدول (۲) آورده شده است.

جدول(۱). سطح مقاطع یک گروهی برای آزمایش شماره۱ [۴]

ν	Σ_f	Σ_a	Σ_s	Σ_t	K
3.24	0.0816	0.019584	0.225216	0.3264	1

جدول (۲). سطح مقاطع یک گروهی اختلال یافته برای آزمایش شماره ۱ [۴]

PERT	ν	Σ_f	Σ_a	Σ_s	Σ_t	K
1	3.244049	0.08163	0.019553	0.225217	0.3264	0.9999999900000
2	3.244049	0.0815	0.019690	0.225210	0.3264	1.0000000100000

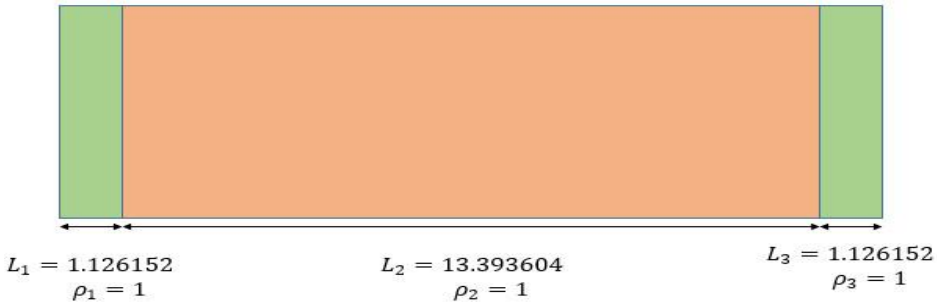
جدول(۳). تغییرات راکتیویته متناظر با اختلال‌های مختلف

PERT	$\Delta\rho_{Refrence}$	$\Delta\rho_{AWP}$
1	-0.00000001000000015	-0.00000014869821109 ± 2e-13
2	0.00000000999999984	0.00000003307383486 ± 3e-12

همانطور که از جدول شماره (۳) م شاهده می شود میزان اختلال ب سیار ناچیز می‌با شد . در اینجا روش AWP تغییرات راکتیویته نا شی از اختلال را با دقت بسیار بالایی محا سبه کرده و در تطابق خوبی با جواب موجود در مرجع شماره (۴) می‌باشد.

آزمایش شماره ۲:

در این آزمایش یک قلب یک بعدی، سه ناحیه ای و دو گروهی همانند شکل(۲) در نظر می‌گیریم. نواحی ۱ و ۳ با ماده شماره ۱ و ناحیه ۲ با ماده شماره ۲ پر شده‌اند. در این شکل طول L و چگالی ρ برای هر ناحیه م شخص شده ا ست. همچنین سطح مقاطع این قلب بحرانی، برای گروه سریع در جدول (۴) و برای گروه حرارتی در جدول (۵) آورده شده است.



شکل (۲). مشخصات قلب دو گروهی و یک بعدی

جدول(۴). سطح مقاطع گروه سریع برای آزمایش شماره ۲

Material	ν_2	Σ_{2f}	Σ_{2c}	Σ_{22s}	Σ_{21s}	Σ_2	χ_2
1	2.50	0.000836	0.001104	0.83892	0.04635	0.88721	1.0
2	0.0	0.0	0.00074	0.83975	0.04749	0.88798	0.0

جدول(۵). سطح مقاطع گروه حرارتی برای آزمایش شماره ۲

Material	ν_1	Σ_{1f}	Σ_{1c}	Σ_{11s}	Σ_{21s}	Σ_1	χ_1
1	2.50	0.029564	0.024069	2.9183	0.000767	2.9727	0.0
2	0.0	0.0	0.018564	2.9676	0.000336	2.9865	0.0

جدول(۶). توضیحات مربوط به اختلال‌های مختلف

PERT	توضیحات
1	$\rho_2' = 1.05\,\rho_2$
2	$\rho_1' = 1.5\,\rho_1$ & $\rho_3' = 1.5\,\rho_3$
3	$M_2' = 0.9\,M_2 + 0.1\,M_1$ & $\rho_2' = 1.05\,\rho_2$

4	$M_2' = 0.9M_2 + 0.1M_1$

در این آزمایش چهار اختلال به صورت جداگانه روی این قلب بحرانی اعمال شده است. در جدول شماره (۶) توضیحات مربوط به اختلال های صورت گرفته بیان شده است. ضریب تکثیر موثر قلب در حالت بدون اختلال برابر با $K = 0.99987$ می‌باشد. در جدول (۷) ضریب تکثیر مربوط به این اختلال ها، که با استفاده از روش AWP و کد ANISN محاسبه شده، نشان داده شده است.

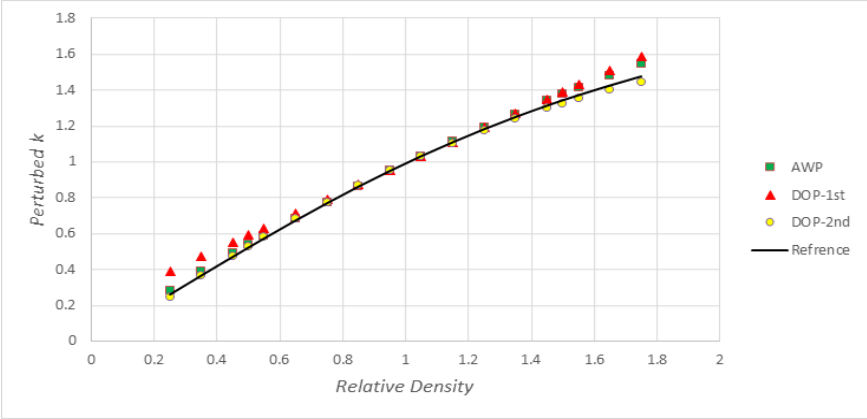
جدول (۷). ضریب تکثیر اختلال یافته متناظر با اختلال‌های مختلف

PERT	K_{ANISN}	K_{AWP}	$Error_{AWP}$
1	1.02157	1.021570311	9.188913E-6
2	1.02277	1.022610311	8.0137025E-6
3	0.9792507	0.979714644	1.922005E-5
4	0.95812	0.957901831	9.0108015E-6

با مقایسه نتایج بد ست آمده از روش AWP و کد ANISN می‌توانیم به دقت بالای این روش پی ببریم. همانطور که در این آزمایش مشاهده می‌کنیم الگوریتم پیاده‌سازی شده سازگاری مناسبی با سطح مقاطع گسسته را دارا می‌باشد.

آزمایش شماره ۳ :

ابتدا توسط کد MCNP5 کره بحرانی، Godiva را شبیه‌سازی می‌کنیم. Godiva یک کره بحرانی به شعاع $8.74cm$ شکل با ترکیب سوخت $93\,wt\%\,U^{235}$ و $7\,wt\%\,U^{238}$ می‌باشد.در این آزمایش به محاسبه اختلال ناشی از تغییر چگالی در کره می‌پردازیم. در این آزمایش چگالی سوخت از ۲۵٪ به ۱۷۵٪ مقدار اولیه تغییر داده می‌شود.



شکل(۳) : نمودار تغییرات ضریب تکثیر اختلال یافته بر حسب چگالی نسبی

نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۳ مشاهده می شود. در این شکل، نمودار Refrence حاصل از محاسبه مستقیم ضریب تکثیر با در نظر گرفتن چگالی اختلال یافته به عنوان چگالی اصلی سوخت می‌باشد[۵]. همانطور که مشاهده می شود ضریب تکثیرهای بدست آمده از روش AWP بسیار نزدیک به مقادیر Ref می‌باشد و همچنین می‌توان دریافت که هر چه اختلال کمتر باشد جوابهای به دست آمده از روش اختلال برای هر دو روش به جواب واقعی نزدیک تر می باشند.

بحث و نتیجه گیری :

همانطور که مشاهده شد روش AWP، در محاسبات اختلال بسیار روش قدرتمندی بوده و می تواند میزان تغییرات راکتیویته را تا دقت زیادی محاسبه کند. همانطور که اشاره شد این روش با تغییر در سورس کد MCNP5 پیاده سازی شده و سازگار با سطح مقاطع گسسته و پیوسته و انواع هندسه ها می باشد.

مراجع :

1. Bell, G.I. and S. Glasstone, *Nuclear reactor theory*. Vol. 252. 1970: Van Nostrand Reinhold NewYork.
2. Nauchi, Y. and 2.T. Kameyama, Development of calculation technique for iterated fission probability and reactor kinetic parameters using continuous-energy Monte Carlo method. Journal of Nuclear Science and Technology, 2010. 47(11): p. 977-990
3. Kiedrowski, B., et al,.MCNP5-1.60 Feature Enhancements & Manual Clarifications-LA-UR-10-06217, 2010, Los Alamos.

4. Sood, A., R.A. Forster, and D. Kent Parsons, Analytical benchmark test set for criticality code verification. Progress in Nuclear Energy, 2003. 42(1): p. 55-106.
5. Kiedrowski, B.C. and F.B. Brown. Comparison of the Monte Carlo adjoint-weighted and differential operator perturbation methods. in Joint Int. Conf. on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010.