



تحلیل اختلاف ارزش راکتیویته روش‌های مونت کارلو و یقینی در گزارش تحلیل ایمنی راکتور تحقیقاتی تهران و رفع اشکالات موجود

بوستانی، احسان*^(۱) - خوش احوال، فرخ^(۱)

^(۱) سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

چکیده:

ارزش راکتیویته میله‌های ایمنی و راکتیویته قلب یک راکتور نوع سوخت صفحه‌ای به دو روش یقینی و احتمالاتی با استفاده از کدهای *MTR_PC* و *MCNPX* محاسبه شده است. به دلیل اختلاف قابل توجه نتایج *MTR_PC* با *MCNP*، همه مولفه‌های درگیر در مساله بررسی شده‌اند تا علت این اختلاف تحلیل شود. پس از تصحیح تعداد نقاط شبکه، به کار گرفتن تعداد گروه‌های انرژی و استفاده از کتابخانه یکسان در دو روش، ارزش میله‌های کنترل در دو روش همخوانی قابل قبولی با هم پیدا کردند. مشخص شد که اثر نقاط شبکه برای ایجاد تغییر در نتایج محاسبه‌ها بسیار بیشتر از کتابخانه و گروه‌های انرژی است. نتایج در به‌روزرسانی گزارش تحلیل ایمنی راکتور تحقیقاتی تهران جهت اصلاح نتایج قبلی ارائه شده توسط طراح به کار گرفته شده است.

کلمات کلیدی: ارزش راکتیویته، راکتور سوخت صفحه‌ای، روش یقینی، روش احتمالاتی، گروه انرژی، گام شبکه.

مقدمه:

دانستن ارزش دقیق راکتیویته میله ایمنی برای جذب راکتیویته اضافی بسیار مهم است و محاسبه ارزش راکتیویته میله‌های ایمنی در قلب یک راکتور، جنبه‌ای مهم از طراحی یک راکتور هسته‌ای را شامل می‌شود [۱]. روش‌های تئوری محاسبه ارزش میله‌های ایمنی شامل استفاده از کدهای یقینی و احتمالاتی است. از جمله کدهای یقینی می‌توان از بسته نرم افزاری *MTR_PC* که شامل کدهای *WIMS* و *CITATION* است و برای مثالی از کدهای احتمالاتی می‌توان از کد *MCNP* نام برد [۲، ۳]. در یک کار پژوهشی، برای قلب سرد و تمیز و با سوخت اورانیوم غنا بالا، کمیت‌های راکتیویته اضافی، ارزش میله ایمنی، ارزش صفحه بریلومی، حاشیه خاموشی، کسر نوترون تاخیری، زمان بازتولید نوترون سریع و مقادیر شار نوترون برای راکتور تحقیقاتی مینیاتوری شماره ۱ نیجریه با استفاده از کد احتمالاتی *MCNP4C* و کد یقینی *EXTERMINATOR* محاسبه و در برخی موارد با نتایج تجربی مقایسه شده است. اختلاف بین زمان بازتولید نوترون آنی و حاشیه خاموشی محاسبه شده با کد *MCNP* در مقایسه با نتایج تجربی قابل تامل است [۴]. در یک کار پژوهشی دیگر، همخوانی قابل قبولی در ارزش راکتیویته میله‌های ایمنی راکتور مینیاتوری نیجریه که با کدهای یقینی *WIMS* و *CITATION* محاسبه و با آزمایش اندازه‌گیری شده، وجود دارد [۵]. ارزش راکتیویته ارایه شده برای



حالت‌های مختلف قلب راکتور وابستگی زیادی به چندین متغیر دارد که میزان اهمیت هر کدام از این متغیرها بررسی می‌شود.

روش کار :

راکتور تحقیقاتی تهران یک راکتور توان متوسط با سوخت صفحه‌ای است که در سال ۱۳۴۶ با سوخت اورانیوم غنای بالا راه‌اندازی شد. به دنبال برنامه کاهش غنای سوخت راکتورهای تحقیقاتی و آزمونی، غنای سوخت این راکتور در سال ۱۳۷۲ از ۹۳/۵٪ به ۲۰٪ توسط شرکت INVAP SE کاهش داده شد. برخی کمیت‌های مربوط به قلب اول راکتور توسط شرکت آرژانتینی سازنده سوخت‌های جدید با استفاده از بسته MTR_PC محاسبه و در گزارش تحلیل ایمنی و متمم این گزارش آورده شده است [۶]. قلب راکتور روی یک شبکه نگهدارنده به صورت یک آرایه ۹×۶ در استخر آبی به عمق تقریبی ۹/۵ متر شناور است و اجزای اصلی آن شامل مجموعه سوخت استاندارد، مجموعه سوخت کنترلی، محل پرتودهی و گرافیت است. چیدمان قلب اول راکتور تحقیقاتی تهران در شکل ۱ آمده است [۷].

Thermal Column						
9		IR	IR	IR		
8	IR	S ₃₂	A ₆₁	A ₁₂₀	IR	
7	A ₁₁₄	A ₆₃	S ₂₅	A ₆₆	A ₁₂₆	
6	A ₁₀₆	S ₂₄	A ₁₀₀	S ₂₉	A ₁₁₆	
5	A ₁₅₀	A ₇₅	S ₂₂	A ₁₀₂	IR	
4	IR	A ₁₃₃	A ₁₁₅	IR		
3		IR	IR			
2						
1						
	A	B	C	D	E	F

شکل ۱. چیدمان قلب اول راکتور تحقیقاتی تهران

در این پژوهش علاوه بر بسته نرم افزاری استفاده شده توسط شرکت آرژانتینی، از کد MCNPX استفاده شده است که نسل جدید کدهای ترابرد مونت کارلو مربوط به ۷۰ سال پیش در آزمایشگاه ملی لوس آلاموس است. نسخه MCNPX



به صورت توسعه کدهای MCNP4B و LAHET 2.8 در سال ۱۹۹۴ شروع شد. نسخه MCNPX 2.6.0 در سال ۲۰۰۶ پس از انتشار نسخه MCNPX 2.5.0 در سال ۲۰۰۵ منتشر شد [۲]. بسته نرم‌افزاری MTR_PC شامل چند نرم‌افزار از جمله WIMS، CITATION و واسط‌هایی برای استفاده از خروجی‌های یک بخش به عنوان ورودی بخش دیگر است. کدهای WIMS و CITATION مربوط به دهه ۶۰ میلادی برای حل معادله ترابرد و پخش با استفاده از روش‌های یقینی است [۸، ۹].

نتایج روش یقینی دارای اختلاف قابل توجهی با نتایج روش احتمالاتی است که در جدول ۱ دیده می‌شود [۱۰]. خطای نسبی نتایج داده شده در این جدول برای کد MCNPX کمتر از ۳۰ pcm است.

جدول ۱. راکتیویته گزارش تحلیل ایمنی راکتور و محاسبه شده توسط کد MCNPX

حالت	شرایط	خروج میله‌ها از قلب (%)							اختلاف
		۱ میله	۲ میله	۳ میله	۴ میله	م تنظیمی	راکتیویته (pcm)	راکتیویته (pcm)	
۱	سرد	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۶۹۱۶	۶۹۶۲	٪۱
۲	سرد	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	-۱۲۵۴۱	-۱۵۴۲۰	٪۲۳
۳	سرد	۱۰۰	۰	۰	۰	۱۰۰	-۶۰۰۹	-۷۶۹۲	٪۲۸
۴	سرد	۰	۱۰۰	۰	۰	۱۰۰	-۶۲۷۹	-۷۸۴۷	٪۲۵
۵	سرد	۰	۰	۱۰۰	۰	۱۰۰	-۷۴۵۱	-۹۴۷۵	٪۲۷
۶	سرد	۰	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰	-۷۵۸۰	-۹۵۸۱	٪۲۶

باتوجه به مکانیسم متفاوت حل مساله در روش‌های احتمالاتی و یقینی، وجود مقداری اختلاف در جواب دو روش شاید منطقی به نظر برسد. اختلاف نتایج دو روش برای حالت فوق بحرانی بسیار کم و ناچیز است، درحالیکه این اختلاف برای حالت‌های زیر بحرانی و به عبارتی در حالتی که میله‌های کنترل وارد قلب راکتور شده‌اند، چشمگیر و در محدوده ۲۳ تا ۲۸٪ است که تا حدودی غیرقابل قبول است.

نتایج :

برای پی بردن به دلیل وجود این اختلاف نسبتاً قابل توجه در راکتیویته محاسبه شده با دو روش بیان شده در بخش قبل، عوامل موثر بر نتیجه محاسبات در هر دو روش بررسی و تاثیر هر کدام از این عوامل در ارزش راکتیویته محاسبه شده است.



الف- نقاط شبکه

همان‌طور که می‌دانیم، پوشش آزاد میانگین، متوسط کل فاصله‌ای است که نوترون قبل از اینکه اندرکنشی انجام دهد طی می‌کند. این کمیت برای یک اندرکنش خاص، عکس سطح مقطع ماکروسکوپیک آن اندرکنش است. انتخاب تعداد نقاط شبکه در هر کدام از ناحیه‌های قلب باید با در نظر گرفتن پوشش آزاد میانگین نوترون و طول شبکه در آن ناحیه نسبت به ناحیه‌های مجاور باشد. برای حل مساله با استفاده از روش اختلاف محدود، طول شبکه باید از پوشش آزاد میانگین نوترون در آن ناحیه کمتر باشد [۱۱]. بررسی تاثیر تعداد نقاط شبکه برای ۷ حالت داده شده در گزارش تحلیل ایمنی راکتور تحقیقاتی تهران انجام و نتایج در جدول ۲ به صورت خلاصه آمده است. ارزش‌های راکتیویته نوشته شده در ستون MTR_PC-1 مربوط به گزارش تحلیل ایمنی راکتور است که با استفاده از بسته نرم‌افزاری MTR_PC به دست آمده است [۷]. ارزش‌های راکتیویته نوشته شده در ستون مربوط MTR_PC-2 به محاسبات انجام شده توسط نرم‌افزار MTR_PC پس از در نظر گرفتن تعداد بهینه نقاط شبکه در ناحیه‌های مختلف قلب راکتور است.

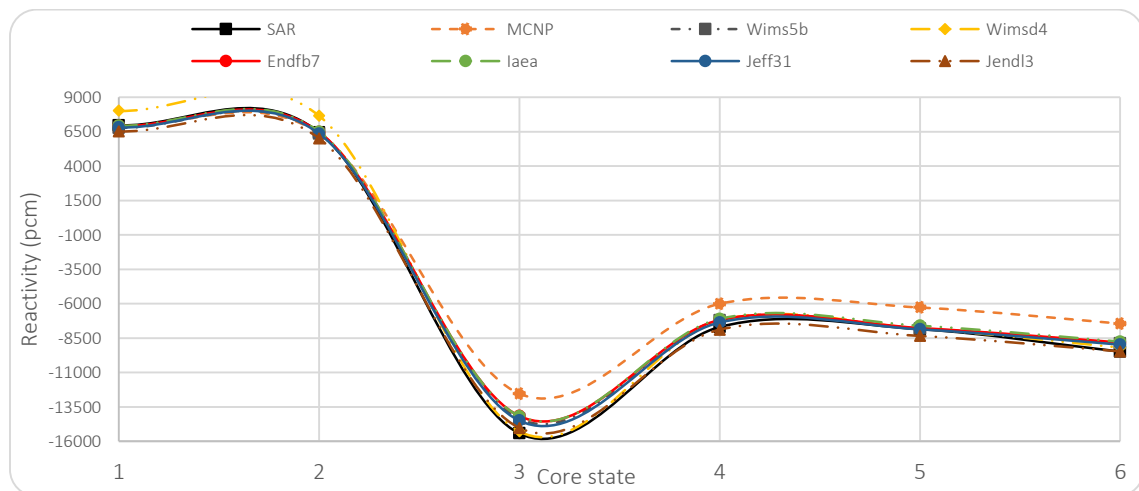
جدول ۲. راکتیویته محاسبه شده توسط کد MCNPX و بسته MTR_PC با در نظر گرفتن نقاط شبکه بهینه

اختلاف MTR_PC-2 نسبت به		راکتیویته (pcm)			حالت
MCNPX	MTR_PC-1	MTR_PC-2	MCNPX	MTR_PC-1	
-۰.۳٪	-۰.۲٪	۶۷۸۵	۶۹۶۲	۶۹۱۶	۱
-۰.۷٪	۰.۱۵٪	-۱۴۳۶۷	-۱۵۴۲۰	-۱۲۵۴۱	۲
-۰.۶٪	۰.۲۰٪	-۷۲۰۱	-۷۶۹۲	-۶۰۰۹	۳
-۰.۱٪	۰.۲۴٪	-۷۸۰۲	-۷۸۴۷	-۶۲۷۹	۴
-۰.۶٪	۰.۱۹٪	-۸۸۷۹	-۹۴۷۵	-۷۴۵۱	۵
-۰.۸٪	۰.۱۶٪	-۸۸۲۱	-۹۵۸۱	-۷۵۸۰	۶

تاثیر قابل تامل تعداد نقاط شبکه آشکارا از نتایج ارائه شده در جدول ۲ دیده می‌شود. در نظر گرفتن این عامل سبب کاهش اختلاف نتایج دو روش محاسباتی از محدوده ۱۵-۰.۲۴٪ برای حالت قبل از بهینه سازی نقاط شبکه به زیر ۰.۸٪ در حالت پس از بهینه‌سازی نقاط شبکه شده است.

ب- کتابخانه

برای بررسی اثر کتابخانه، نتایج مربوط به راکتیویته قلب برای ۶ حالت داده شده در جدول ۱ با استفاده از کتابخانه‌های مختلف موجود برای بسته نرم‌افزاری MTR_PC از جمله JendI3، Jeff31، IAEA، ENDFb7 و JendI3 محاسبه و با نتایج حاصل از کد MCNPX مقایسه شده است. این مقایسه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. اثر کتابخانه

بررسی دقیقی نتایج داده شده در شکل ۲ بیانگر همخوانی مناسب خروجی‌های کتابخانه Jeff31 با کتابخانه ENDF7 استفاده شده توسط کد MCNPX است. برای بررسی اثر کتابخانه، ابتدا سطح مقطع کتابخانه Jeff31 برای همه مواد موجود در ورودی MCNPX با استفاده از برنامه NJOY استخراج و در ورودی این کد وارد شده است. پس از یکسان شدن کتابخانه دو کد MCNPX و MTR_PC، خروجی دو روش یقینی و احتمالاتی در جدول ۳ آورده شده است. ستون MCNPX-1 مربوط به کتابخانه ENDF7 و ستون MCNPX-2 مربوط به کتابخانه Jeff31 است. محاسبات MTR_PC هم با استفاده از کتابخانه Jeff31 انجام شده و اختلاف محاسبات روش احتمالاتی با آن در دو ستون آخر آورده شده است.



جدول ۳. راکتیویته محاسبه شده توسط کد MCNPX و بسته MTR_PC با لحاظ کردن اثر کتابخانه

اختلاف نسبت به MCNPX-1		راکتیویته (pcm)			حالت
MTR_PC	MCNPX-2	MTR_PC	MCNPX-2	MCNPX-1	
-۰.۲٪	-۰.۲٪	۶۸۱۲	۶۹۴۰	۶۹۶۲	۱
-۰.۶٪	-۰.۵٪	-۱۴۴۸۶	-۱۵۲۶۲	-۱۵۴۲۰	۲
-۰.۴٪	-۰.۲٪	-۷۳۵۷	-۷۵۰۶	-۷۶۹۲	۳
۰٪	۰.۱٪	-۷۸۵۴	-۷۸۱۲	-۷۸۴۷	۴
-۰.۵٪	-۰.۳٪	-۸۹۶۴	-۹۲۸۲	-۹۴۷۵	۵
-۰.۷٪	-۰.۶٪	-۸۸۷۳	-۹۴۷۵	-۹۵۸۱	۶

همان‌طور که از نتایج داده شده در جدول ۳ دیده می‌شود، استفاده از کتابخانه‌های یکسان در کد MCNPX و بسته نرم‌افزاری MTR_PC منجر به جواب‌های کاملاً یکسان نشده که با توجه به تفاوت‌های این دو ابزار منطقی است.

پ- گروه های انرژی

از آنجا که تجارب قبلی نشان داده است که با افزایش تعداد گروه‌های انرژی، جواب مساله دقیق‌تر می‌شود، برای همه ورودی‌های این مساله معادله ترابرد برای ۱۲ گروه انرژی حل شده است و تغییرات در جواب بررسی شده است. اختلاف بین نتایج هر کدام از خروجی‌های بسته نرم‌افزاری MTR_PC (MTR_PC-1) برای گروه‌بندی مطابق گزارش تحلیل ایمنی و MTR_PC-2 برای گروه‌بندی ۱۲ تایی انرژی) با کد MCNPX در دو ستون آخر جدول ۴ گزارش شده است.

جدول ۴. راکتیویته محاسبه شده توسط کد MCNPX و بسته MTR_PC با گروه انرژی متفاوت

اختلاف نسبت به MCNP		راکتیویته (pcm)			حالت
MTR_PC-2	MTR_PC-1	MTR_PC-2	MTR_PC-1	MCNPX	
۰.۱٪	۰٪	۷۰۰۷	۶۹۳۰	۶۹۶۲	۱
-۰.۸٪	-۰.۷٪	-۱۴۲۰۳	-۱۴۳۵۶	-۱۵۴۲۰	۲
-۰.۸٪	-۰.۵٪	-۷۰۴۶	-۷۲۷۳	-۷۶۹۲	۳
-۰.۲٪	-۰.۱٪	-۷۷۲۲	-۷۷۹۸	-۷۸۴۷	۴
-۰.۸٪	-۰.۶٪	-۸۷۳۳	-۸۹۲۱	-۹۴۷۵	۵
-۰.۱۰٪	-۰.۸٪	-۸۶۳۸	-۸۸۱۶	-۹۵۸۱	۶



اختلاف بین نتایج دو روش برای گروه‌بندی انرژی مطابق با گزارش تحلیل ایمنی ۰-۸٪ و برای گروه‌بندی انرژی ۱۲ تا ۱-۱۰٪ است. مقایسه این نتایج نشان‌دهنده اختلاف بیشتر بین دو برنامه پس از گروه‌بندی ۱۲ تایی انرژی و همخوانی قابل قبول بین نتایج کد MCNPX با بسته نرم‌افزاری MTR_PC است.

بحث و نتیجه گیری :

در این پژوهش، بررسی دقیق عوامل تاثیرگذار مثل کتابخانه‌های استفاده شده، تعداد گروه‌های انرژی و تعداد نقاط شبکه در هر ناحیه انجام شده است. تعداد نقاط شبکه در هر ناحیه تاثیر چشمگیری روی نتایج دارد، که اصلاح و بهینه‌سازی آن با توجه به مشخصات فیزیکی هر ناحیه و مناطق کناری آن انجام شده است. اثر کتابخانه با یکسان نمودن کتابخانه دو کد با استفاده از کد NJOY انجام شده است. کتابخانه تاثیری در محدوده ۲٪ داشته و استفاده از کتابخانه‌های یکسان در دو کد می‌تواند سبب نزدیک بودن جواب‌های به دست آمده شود. با بررسی ۳ مولفه گفته شده، محاسبات انجام و نتایج هر مرحله به همراه معرفی عامل تعداد نقاط شبکه به‌عنوان مهمترین مولفه در تغییر ارزش راکتیویته میله‌های کنترل آورده شده است. تغییر در ارزش‌های راکتیویته محاسبه شده با افزایش تعداد گروه‌های انرژی به‌گونه‌ای است که به نتایج کد MCNPX نزدیک می‌شود.

مراجع:

1. Varvayanni, M., P. Savva, and N. Catsaros, *Control rod worth calculations using deterministic and stochastic methods*. Annals of Nuclear Energy, 2009. 36(11-12): p. 1718-1725.
2. LANL, *MCNPXTM User's Manual*. Los Alamos National Laboratory, April 2008. USA.
3. Villarino, E.A., *MTR_PC v3.0. neutronic, thermal hydrolic and sheilding calculating on personal computers*. 2006. INVAP SE, Argentina.
4. Jonah, S., J. Liaw, and J. Matos, *Monte Carlo simulation of core physics parameters of the Nigeria Research Reactor-1 (NIRR-1)*. Annals of nuclear energy, 2007. 34(12): p. 953-957.
5. Balogun, G., *Automating some analysis and design calculations of miniature neutron source reactors at CERT (I)*. Annals of Nuclear Energy, 2003. 30(1): p. 81-92.
6. Abbate P., G.A., Lovotti O., Belloso J., Rubo R. and Villarino E., *TRR Amendment of the Safety Report*. December 1989
7. AEOI, *Safety Analysis Report for Tehran Research Reactor*. 2009. Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran.



بیست و ششمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۸۰۷ اسفندماه ۱۳۹۸ - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران



8. ORNL, *RSICC Computer Code Collection, ANISN-PC, Multigroup One- Dimensional Discrete Ordiantes Transport Code System with Anisotropic Scattering*. Oak Ridge National Laboratory, 1994. USA.
9. ORNL, *CITATION-LDI 2*. Oak Ridge National Laboratory, 1999. USA.
10. Boustani, E. and S. Khakshournia, *Impact of mesh points number on the accuracy of deterministic calculations of control rods worth for Tehran research reactor*. *Kerntechnik*, 2016. 81(6): p. 616-620.
11. Glasstone, S. and A. Sesonske, *Nuclear Reactor Engineering*. 1994. Forth Edition, Vol. 1, New York: p. 512.