

تحلیل رفتار نوترونی جایگزینی نسل جدید بسته‌های سوخت TVS-2M با بسته‌های سوخت AFA در راکتور VVER-1000 نیروگاه بوشهر

احسان ظریفی^۱، سعید زارع گنجانرودی^{۲*}

۱. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای
۲. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی هسته‌ای

چکیده:

هدف از انجام این مطالعه، شبیه‌سازی و تحلیل پارامترهای نوترونی قلب راکتور VVER-1000 نیروگاه بوشهر با جایگزینی نسل جدید بسته‌های سوخت TVS-2M با بسته‌های سوخت AFA می‌باشد. در این راستا، قلب راکتور در دو حالت چیدمان بسته‌های سوخت TVS-2M و AFA با استفاده از کد MCNPX2.7.0 و برنامه پیشرفته SuperMC3.4.0 شبیه‌سازی شد و برخی از پارامترهای نوترونی قلب راکتور نظیر ضریب تکثیر موثر، راکتیویته مازاد، تحلیل شار نوترونی و ارزش میله کنترل محاسبه و تحلیل شد. شبیه‌سازی در تمامی حالات به طور یکسان با تعداد ۷۰۰۰۰۰ تاریخچه در هر سیکل ۱۸۰ سیکل فعال با دستور KCODE انجام شد، به طوری که میانگین خطای نسبی محاسبات ضریب تکثیر موثر قلب حدود ۰/۰۰۰۱ به دست آمد. نتایج حاصل از مدلسازی نشان داد، در صورت عدم ورود میله‌های کنترل به داخل قلب راکتور، راکتیویته مازاد قلب راکتور VVER-1000 با چیدمان بسته‌های سوخت TVS-2M در حدود ۱۵ (mK) بیشتر از چیدمان بسته‌های سوخت AFA می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل نوترونی، VVER-1000، TVS-2M، AFA

Neutronic Evaluation of New Generation TVS-2M Fuel Assemblies Replacements with AFA Fuel Assemblies in VVER-1000 Reactor of Bushehr Power Plant

E. Zarifi¹, S. Zare Ganjaroodi^{2*}

1. Reactor and Nuclear Safety Research school, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran
2. Faculty of Engineering Science and Research Branch, Islamic Azad university, Tehran, Iran

Abstract:

The purpose of this study is to simulate and evaluate the neutronic parameters of the VVER-1000 reactor core of Bushehr power plant by replacing the new generation of TVS-2M fuel assemblies with AFA fuel assemblies. In this regard, the reactor core was simulated in two modes of arrangement of TVS-2M and AFA fuel assemblies using the MCNPX2.7.0 code and the SuperMC3.4.0 advanced software. In this way, neutronic parameters of the reactor core such as k-factor, excess reactivity, neutron flux distribution and control rod worth were calculated and analyzed. Simulation was performed in all cases in the equal situation with one hundred thousand histories per 180 active cycles. The mean relative error of the K-factor calculations was about 0.0001. Results showed that in the absence of control rods entering into the reactor core, the VVER-1000 reactor core with TVS-2M fuel arrangement has an excess reactivity of about 15 (mK) more than the AFA fuel arrangement.

Keywords: Neutronic Analysis, VVER-1000, TVS-2M, AFA.

Email: szareganjaroodi@yahoo.com

۱. مقدمه

راکتور VVER-1000 بوشهر، یک راکتور آب سبک تحت فشار نوع روسی می‌باشد که دارای قدرت حرارتی ۳۰۰۰ مگاوات و قدرت الکتریکی ۱۰۰۰ مگاوات است. در این راکتور از آب سبک به عنوان خنک‌کننده و کندکننده نوترون استفاده می‌شود. در مدار اولیه یک راکتور آب تحت فشار از آب سبک برای خنک‌کنندگی قلب استفاده می‌شود که این آب پس از عبور از قلب، به دمای بالایی می‌رسد اما تحت فشار به جوش نمی‌آید. این آب داغ تحت فشار در یک مولد بخار، حرارت را به مدار دوم که یک چرخه بخار است، منتقل می‌نماید. آب در اثر دریافت حرارت از مدار اول به جوش آمده، بخار شده و توربین را می‌چرخاند و در نهایت توسط یک ژنراتور، انرژی الکتریکی تولید می‌گردد [۱-۲].

از سال ۱۹۶۴ تا کنون بیش از ۶۹ راکتور VVER ساخته شده است و در حال حاضر ۶۰ راکتور در حال بهره‌برداری می‌باشد. جهت افزایش بهره‌وری این راکتورهای VVER، شرکت سازنده سوخت روسیه با همکاری مراکز تحقیقاتی نظیر کورچاتو^۱ نسل‌های جدیدی از سوخت‌ها تحت عنوان TVS را توسعه داده‌اند [۳-۴]. از مهمترین مزیت‌های نسل جدید سوخت‌های TVS نظیر TVS-2M نسبت به سوخت استاندارد فعلی (AFA)، بالاتر بودن مقاومت فیزیکی و شیمیایی و بیشتر بودن طول عمر مفید، بیشتر بودن طول فعال سوخت و محتوی مواد شکافت‌پذیر، امکان افزایش طول سیکل کاری راکتور از حدود ۱۰ ماه به ۱۲ تا ۱۸ ماه و همچنین افزایش سطح توان کل راکتور از ۱۰۰۰ مگاوات به ۱۲۰۰ مگاوات، افزایش زمان کاربری کل و عملکرد طولانی مدت راکتور، بهره‌وری بیشتر سوخت، جایگزینی جاذب سوختی Gd_2O_3 با CrB_2+Al ، هزینه بهره‌برداری کمتر و دیگر موارد می‌باشد [۱-۲-۳-۴-۵-۶]. طرح استفاده از سوخت‌های TVS در راکتورهای VVER از سال ۱۹۹۷ مطرح گردید و در سال ۲۰۰۳ در واحد یک نیروگاه بالاکووا^۲ مورد استفاده قرار گرفت [۳].

تاکنون برخی مطالعات در این زمینه در دنیا انجام شده است. هسیتو در طی دو مقاله در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ میلادی به بررسی سوخت‌های TVSM و TVSA در راکتور VVER-1000 با استفاده از کد ORIGEN-S پرداخت [۶-۷]. پلامن و همکارانش در بلغارستان طی مقاله‌ای در ژورنال Nuclear Engineering and Design به تحلیل گرمای واپاشی در سوخت‌های TVSM و TVSA در راکتور VVER-1000 پرداختند [۸]. کوسوروف و همکارانش از انسیتو تحقیقاتی کورچاتو طی مقاله‌ای در هشتمین کنفرانس بین‌المللی سوخت‌های راکتورهای VVER، چرخه سوخت راکتورهای VVER-1000 را در نتیجه بکارگیری نسل جدید سوخت‌های TVS از لحاظ اقتصادی و فنی مورد بررسی قرار دادند [۹]. ذکر این نکته ضروری است که این چیدمان تاکنون برای برخی از راکتورهای هسته‌ای در دنیا در روسیه و بلغارستان و دیگر موارد [۴-۵-۷] انجام شده و شان داده است که ضرایب راکتیویته در محدوده ایمنی طراحی باقی می‌مانند.

۲. روش کار

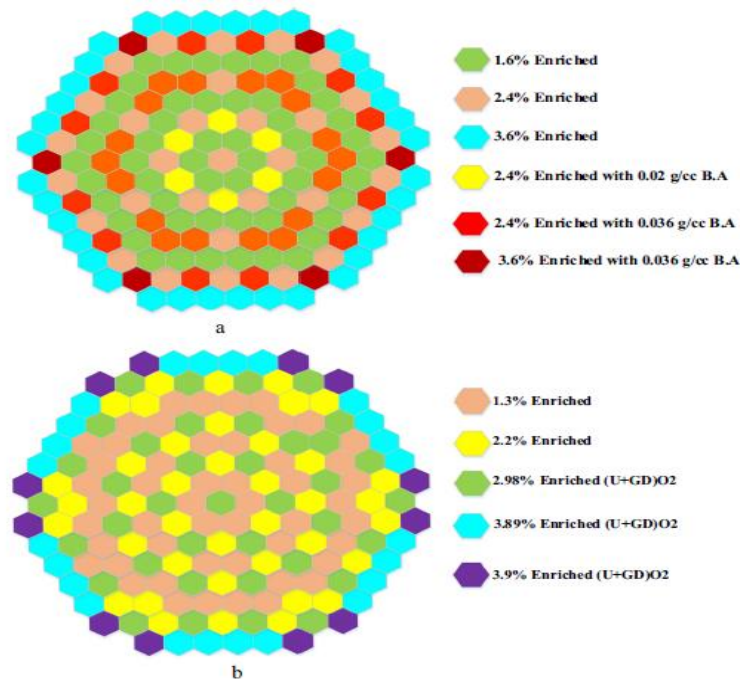
قلب یک راکتور VVER-1000 با بسته‌های سوخت AFA دارای ۱۶۳ مجتمع سوخت هگزگونال بوده که هر کدام دارای ۳۱۱ میله سوخت می‌باشند. بسته‌های سوخت AFA این راکتور اکسید اورانیوم با غناهای ۱.۶٪، ۲.۴٪ و ۳.۶٪ می‌باشد. کنترل این راکتور توسط میله‌های کنترل، مواد جاذب شیمیایی محلول در آب نظیر اسید بوریک با غلظت معین و سموم نوترونی با درصد‌های مشخص می‌باشد [۱-۲].

قلب راکتور VVER-1000 با سوخت‌های TVS-2M همانند سوخت‌های AFA دارای ۱۶۳ مجتمع سوخت هگزگونال است با این تفاوت که هر مجتمع یک میله سوخت نسبت به سوخت AFA بیشتر دارد. از لحاظ هندسی نیز بسته‌های سوخت جدید TVS-2M با سوخت AFA تقریباً یکسان هستند مگر در ساختار ابتدا و انتهای بسته‌های سوخت و مهمترین عامل طول فعال سوخت بوده که از ۳۵۳ میلیمتر به ۳۶۸ میلیمتر افزایش یافته است. با این شرایط، موجودی

1- Kurchatov

2- Balakova

مواد شکاف‌پذیر در قلب رآکتور افزایش یافته است، که این کار باعث افزایش زمان بهره‌وری سوخت، افزایش سیکل کاری رآکتور از ۱۰ ماه به ۱۲ تا ۱۸ ماه می‌شود. به علاوه با توجه به افزایش رآکتیویته مازاد قلب جایگزینی جاذب سوختنی Gd_2O_3 با CrB_2+Al ، هزینه بهره‌برداری را کاهش می‌دهد [۳-۴-۵-۶]. در شکل (۱)، دو نما از چیدمان قلب رآکتور با استفاده از بسته‌های سوخت AFA و TVS-2M را نشان می‌دهد. همچنین، در جدول (۱)، مقایسه پارامترهای دو نوع بسته سخت آورده شده است.



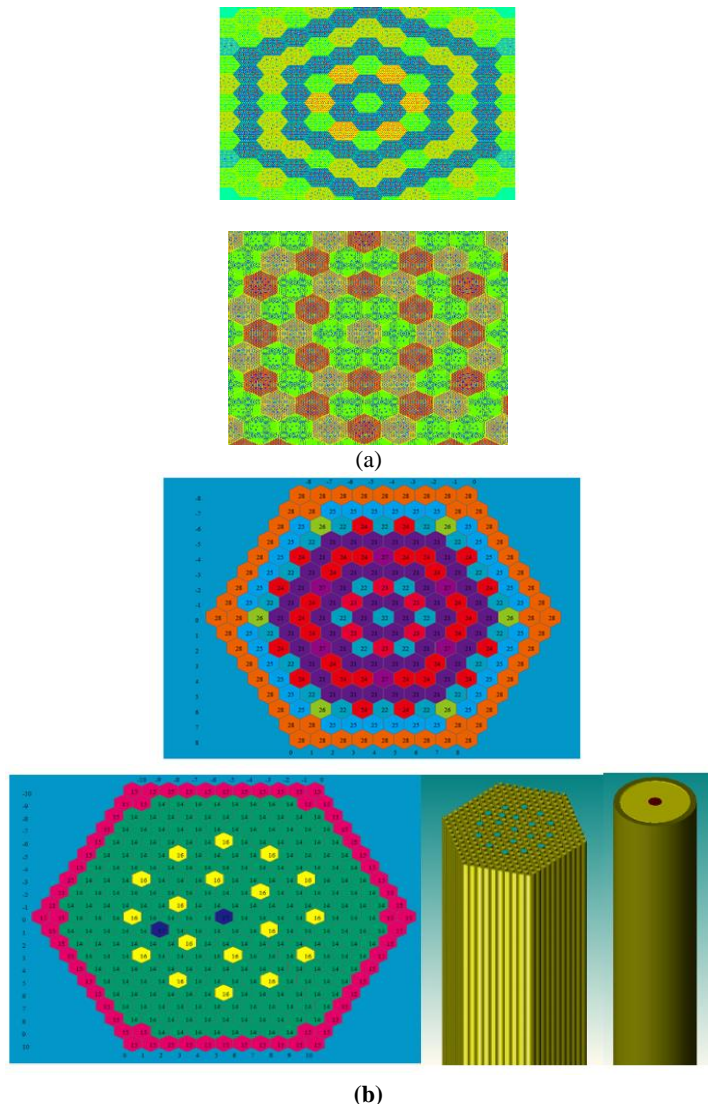
شکل ۱. نمایی از چیدمان AFA (a) و TVS-2M (b) در قلب رآکتور

جدول ۱. مشخصات بسته‌های سوخت AFA و TVS-2M

مقدار		مشخصات
سوخت TVS-2M	سوخت AFA	
شش ضلعی (هگزگونال)		شکل مجتمع سوخت
۲۳۵.۱		بیشینه ابعاد مجتمع سوخت با در نظر گرفتن قاب (mm)
۴۵۷.۰		ارتفاع مجتمع سوخت (mm)
۳۶۸.۰	۳۵۳.۰	طول فعال میله سوخت (mm)
۹.۱	۹.۱	- قطر خارجی غلاف سوخت (mm)
۷.۷۳	۷.۷۳	- قطر داخلی غلاف سوخت (mm)
۷.۶	۷.۵۷	- قطر خارجی قرص سوخت (mm)
۱.۲	۱.۵	- قطر داخلی قرص سوخت (mm)
۳۱۲	۳۱۱	تعداد میله های سوخت و میله های جاذب
دارد	ندارد	تعداد میله های دارای ماده جاذب گادولونیوم در هر مجتمع
یا UO2 UO2+Gd2O3	UO2	ماده سوخت
۵.۰	۴.۴	بیشینه مقدار اورانیوم غنی شده (%)

در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار پیشرفته SuperMC3.4.0 و کد MCNPX رآکتور شبیه‌سازی شده و پارامترهای مختلف رفتار نوترونی قلب محاسبه گردید. نرم‌افزار پیشرفته SuperMC طراحی FDS team کشور چین به مانند کد

MCNPX، معادله ترابرد نوترون را به صورت احتمالاتی (روش مونت کارلو) حل می‌نماید. اما تفاوت و انگیزه استفاده از برنامه SuperMC برای مدل‌سازی، برخی از مزایای این برنامه نسبت به دیگر کدهای نوترونی در این زمینه اعم از گرافیک بالاتر جهت مشاهده پلات‌های دو و سه بعدی، دسترسی به کتابخانه‌های مختلف، زمان بسیار کمتر جهت مدل‌سازی‌های مختلف، کوپلینگ ساده‌تر و راحت‌تر با کدهای مختلف، کاربردهای مختلف در پزشکی و مهندسی در ارائه هندسه و مدل‌های آماده جهت کار و همچنین دقت بالا و قابل قبول محاسبات می‌باشد [۱۲]. شکل (۲)، نمایی از مدل‌سازی قلب رآکتور VVER-1000 بوشهر با نرم‌افزار پیشرفته SuperMC3.4.0 و کد MCNPX را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمایی از مدل‌سازی مختلف انجام شده با نرم‌افزار پیشرفته (a) SuperMC و کد (b) MCNPX

۳. نتایج

۱.۳ محاسبات ضریب تکثیر

با توجه به شبیه‌سازی‌های و انتخاب کتابخانه سطوح مقاطع ENDF/B-V داده‌های 42.C, 51.C, 52.C, 70.C در کد MCNPX2.7.0 و کتابخانه سطوح مقاطع FENDL3.0 و ENDF-B-VII داده‌های 71.C, 72.C و 30.y در برنامه SuperMC3.4.0، قلب این رآکتور با چیدمان مجتمع‌های سوخت استاندارد AFA در حالت عدم ورود میله‌های کنترل، ضریب تکثیر ۱/۰۱۲۸۱ در کد MCNPX 2.7.0، و ۱/۰۱۵۴۳ در برنامه SuperMC3.4.0 دارد. از سوی دیگر، در شرایط یکسان شبیه‌سازی قلب این رآکتور با چیدمان مجتمع‌های سوخت TVS-2M در حالت عدم ورود میله‌های کنترل، ضریب تکثیر ۱/۰۲۷۳۲ در کد MCNPX 2.7.0 و ۱/۰۳۱۴۳ در برنامه SuperMC3.4.0 خواهد داشت. به

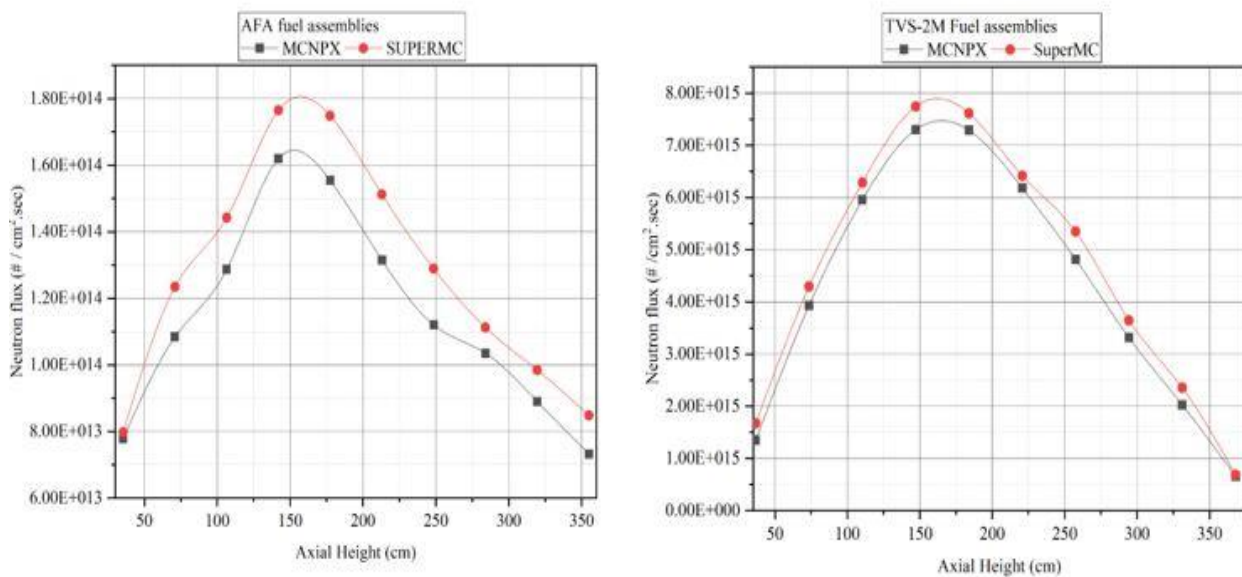
عبارت دیگر، راکتیویته مازاد تقریبی نسبت به حالت قبل حدود ۱۵ (mK) افزایش می‌یابد. به طور کلی، مقادیر حاکی از همخوانی کد و برنامه و اختلاف جزئی ۲.۵٪ با یکدیگر و همچنین مطابقت با نتایج موجود در مقالات و گزارشات دارد [۲-۱].

جدول ۲. ضریب تکثیر قلب با جیدمان های بسته‌های سوخت TVS-2M و AFA

مقدار				پارامتر
TVS-2M		AFA		
MCNPX2.7.0	SuperMC3.4.0	MCNPX2.7.0	SuperMC3.4.0	
K= 1.02732	K= 1.03143	K= 1.01281	K= 1.01543	عدم ورود میله کنترل
EX.R= 26.59 (mK)	EX.R= 30.47 (mK)	EX.R= 12.64 (mK)	EX.R= 15.19 (mK)	
K= 1.01688	K= 1.01433	K= 1.00276	K= 1.00118	۱۰٪ میله کنترل گروه دهم
EX.R= 16.59 (mK)	EX.R= 14.12 (mK)	EX.R= 2.75 (mK)	EX.R= 1.17 (mK)	

۲.۳ محاسبات شار نوترون

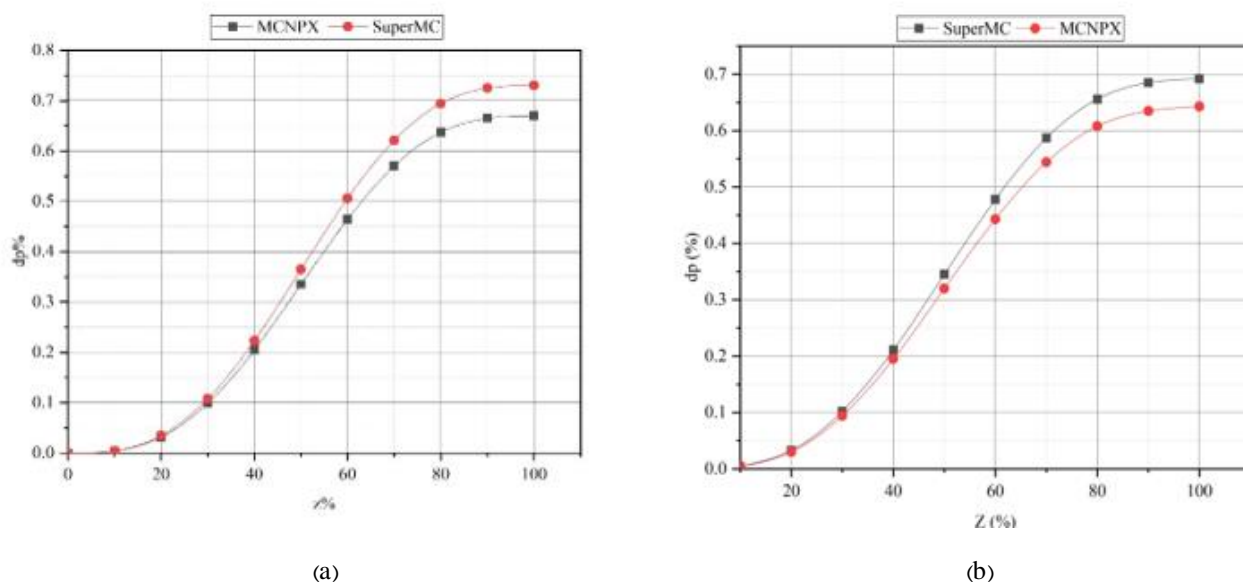
با توجه به شکل (۳)، محاسبه شار نوترون در حالت بحرانیت نشان می‌دهد که بیشینه شار حرارتی محوری مربوط به ارتفاع حدود ۱۴۲ سانتی‌متری از کف قلب در چیدمان بسته‌های سوخت AFA و ارتفاع حدود ۱۴۹ سانتی‌متری در چیدمان بسته‌های سوخت TVS-2M می‌باشد. که این مقدار با مراجع و گزارشات پیشین مطابقت کامل دارد [۱-۲]. بنابراین، با ورود میله‌های کنترل به درون قلب، ارتفاع بیشینه شار را در حدود ۴۰٪ به سمت پایین انتقال می‌یابد و علت افت شار در برخی از نقاط، ورود میله‌های کنترل و سموم گادولونیومی با علت سطح مقطع جذب بسیار بالای آن در چیدمان قلب TVS-2M می‌باشد.



شکل ۳. توزیع شار نوترونی حرارتی در دو حالت چیدمان بسته‌های سوخت TVS-2M و AFA

۳.۳ محاسبات ارزش میله کنترل

با توجه به درصدهای متفاوت ورود میله‌های کنترل گروه ۱۰ به درون قلب راکتور، ارزش انتگرالی میله کنترل گروه ۱۰ برای هر دو حالت چیدمان‌های بسته‌های سوخت AFA و TVS-2M (برای اولین بار) محاسبه شده است.



شکل ۴. ارزش انتگرالی میله کنترل محاسبه شده با نرم‌افزار پیشرفته SuperMC و کد MCNPX در دو حالت چیدمان بسته‌های سوخت TVS-2M (b) و AFA (a)

۴. نتیجه‌گیری

طراحی سوخت‌های TVS بر اساس قابلیت اطمینان و اعتبار راه‌حل‌های مهندسی بوده و ویژگی‌های عملکردی آن در طول دوران بهره‌برداری مشخص شده است. توسعه سوخت‌های TVS بر اساس افزایش محتوای اورانیوم موجود در سوخت و استفاده از شبکه‌های نگهدارنده موثر برای اطمینان از افزایش شار نوترون حرارتی بحرانی و اجرای موثرتر چرخه سوخت اقتصادی‌تر با افزایش توان مجاز میله‌های سوخت می‌باشد. در این مقاله سعی بر آن شد تا با بکارگیری روش مونت‌کالو برخی از پارامترهای نوترونی قلب راکتور نظیر ضریب تکثیر موثر، راکتیویته مازاد، توزیع شار نوترونی و ارزش میله کنترل محاسبه و تحلیل شود. در این راستا، جهت شبیه‌سازی راکتور از کد MCNPX2.7.0 و برنامه پیشرفته و قدرتمند SuperMC3.4.0 استفاده شد. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی قلب راکتور VVER-1000 با بسته‌های سوخت جدید TVS-2M با استفاده از برنامه SuperMC3.4.0 برای اولین بار در این مقاله انجام شده است. در نهایت، مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده با یکدیگر و گزارشات منتشر شده در این خصوص نشان داد که ضریب تکثیر موثر و رفتار توزیع شار همخوانی خوبی با یکدیگر و مراجع دارند و از درصد خطای کمی برخوردار می‌باشند. همچنین نتایج حاصل نشان داد، با استفاده از بسته‌های سوخت TVS-2M شار نوترونی و راکتیویته مازاد قلب را تا حدودی نسبت به زمان استفاده از بسته‌های سوخت AFA افزایش می‌یابد که این افزایش راکتیویته امکان افزایش طول سیکل و زمان بهره‌برداری سوخت را منجر خواهد شد. در ادامه، می‌توان جهت برآورد دقیق‌تر از پارامترهای نوترونی و ترموهیدرولیکی قلب راکتور، انجام کوپلینگ آنلاین کدهای نوترونی و ترموهیدرولیکی و محاسبات ضرایب راکتیویته جهت تایید مارژین ایمنی قلب را پیشنهاد داد.



۵. مراجع

- [1] Bushehr Nuclear Power Plant, Final Safety Analysis Report (FSAR) (2003), Technical Report, Chapter 4.
- [2] Preliminary Safety Analysis Report, (PSAR) of Nuclear Power Plant (1976), Iran 1 and 2, Vol. 1 and 2, KWU.
- [3] S.M. Dmitriev, S.S. Borodin, A.V. Varentsov, M.A. Legchanov, V.D. Sorokin, A.E. Khrobostov. Experimental study of local coolant hydrodynamics in TVS-Kvadrat PWR reactor fuel assembly using mixing spacer grids with different types of deflectors. Nuclear Energy and Technology 1 (2015) 296–303.
- [4] Yu. G. Dragunov, S. B. Ryzhov, I. N. Vasil'chenko, and S. N. Kobelev. DEVELOPMENT AND ADOPTION OF TVS-2M FOR ADVANCED FUEL CYCLES. Atomic Energy, Vol. 99, No. 6, 2005.
- [5] Generation 2 fuel assembly TVS-2M. 21, Ordzhonikidze Street, 1421103 Podolok, Moscow region, Russia Federation.
- [6] D. V. Hristov, "Preparation and verification of libraries for ORIGEN-S module in SCALE4.4a, with cross-sections for WWER-1000 TVSM fuel", 15th Symposium of AER, Znojmo, Czech Republic, 3-7 October 2005.
- [7] D. V. Hristov, "Preparation of libraries for ORIGEN-S module in SCALE4.4a, with cross-sections for WWER-1000 TVSA fuel", 11th Meeting of AER Working Group E, Hrotovice, Czech Republic, 11-12 April 2006.
- [8] Plamen V. Petkov*, Danail V. Hristov. VVER-1000/V320 decay heat analysis involving TVS-M and TVSA fuel assemblies. Nuclear Engineering and Design 238 (2008) 3227–3239.
- [9] Nuclear fuel for VVER reactors. TVEL JSC 49, Kashirskoye Shosse, Moscow, 115409, Russia.
- [10] Dragunov Yu.G., Ryzov S.B., Vasilchenko I.N., Kobelev S.N. Development and introduction of TVS-2M in perspective fuel cycles. Journal of Atomic Energy, 2005, Vol.99 (6), pp.432-437.
- [11] Pelowitz, D.B, (2008), MCNPXTM Uses manual version 2.6.0, Los Alamos national laboratory.
- [12] FDS Team, china, SuperMC User Manual-EN.