



بررسی صحت و دقت محاسبات نرم افزار پیشرفته SuperMC3.2.0 در تحلیل نوترونیک قلب راکتور VVER-1000 نیروگاه بوشهر

زارع گنجانرودی، سعید^۱ - ره گشای، محمد^{۱*} - صاحبی، ندا^۲

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی هسته ای

^۲ Institute of Nuclear Energy Safety Technology, CAS, FDS Team

چکیده:

هدف از انجام این تحقیق، شبیه سازی و محاسبات نوترونیک قلب راکتور VVER-1000، که از انواع راکتورهای آب سبک تحت فشار تیپ روسی است با استفاده از نرم افزار SuperMC3.2.0 و کد MCNPX2.6 می باشد. در این تحقیق، با توجه به مزایای زیاد نرم افزار پیشرفته SuperMC اعم از سادگی مدل سازی، دقت بالا محاسبات و دسترسی به کتابخانه های مختلف، برخی از پارامترهای نوترونیک مانند ضریب تکثیر، راکتیویته مازاد، ارزش انتگرالی و دیفرانسیلی میله کنترل و توزیع شار نوترونی با استفاده از برنامه SuperMC و کد MCNPX بدست آورده شد و نتایج حاصل، با یکدیگر و با FSAR راکتور مطابقت داده شد تا دقت محاسبات و اهمیت استفاده از نرم افزار SuperMC مشخص شود.

کلمات کلیدی: VVER-1000، SuperMC3.2.0، MCNPX2.6، نوترونیک

Investigation of the accuracy and precision of the SuperMC3.2.0 advanced software in neutronic analysis of the VVER-1000 reactor core of Bushehr Power Plant

Zare Ganjaroodi, Saeed¹; Rahgoshay, Mohammad¹; Sahebi, Neda²

¹ Science and Research Branch Islamic Azad University (SRBIAU), Tehran, Department of Nuclear Engineering,

² Institute of Nuclear Energy Safety Technology, CAS, FDS Team

Abstract:

The purpose of this article is to simulate and calculate neutronic parameters of the VVER-1000 reactor core, which is a type of Russian light water reactors, using the SuperMC3.2.0 Advanced software and the MCNPX2.6 code. According to the advantages of SuperMC3.2.0 advanced software, including the simplicity of modeling, the high accuracy of computing and access to various libraries, some of the neutronic parameters such as K-factor, excess reactivity, integral and differential worth of the control rods as well as the distribution of neutron flux were obtained with the use of the SuperMC3.2.0 program and MCNPX2.6 code. At the end, the results were matched with each other and with the FSAR of the reactor to determine the accuracy of the calculation and the importance of using the SuperMC3.2.0 software.

Keywords: VVER-1000, SuperMC3.2.0, MCNPX2.6, Neutronic



مقدمه:

راکتور VVER-1000 نیروگاه بوشهر، یک راکتور آب سبک تحت فشار تیپ روسی می باشد که دارای قدرت حرارتی ۳۰۰۰ مگاوات و قدرت الکتریکی ۱۰۰۰ مگاوات است. در این راکتور از آب سبک به عنوان خنک کننده و کندکننده نوترون استفاده می شود. مدار اولیه یک راکتور آب تحت فشار از آب برای عبور از قلب استفاده می کند که این آب پس از عبور از قلب، به دمای بالایی می رسد اما تحت فشار به جوش نمی آید. این آب داغ تحت فشار در یک مبدل حرارتی، گرما را به مدار دوم که یک چرخه بخار است، منتقل می کند. حال آب به جوش آمده، بخار شده و توربین را می چرخاند و در نهایت توسط یک ژنراتور، انرژی الکتریکی تولید می گردد [۱]، [۲].

نرم افزار پیشرفته SuperMC3.2.0 طراحی کشور چین به مانند کد MCNPX2.6، معادله ترابرد نوترون را به صورت احتمالاتی (روش مونت کارلو) حل می نماید. اما تفاوت و انگیزه استفاده از کد و یا برنامه SuperMC3.2.0 برای مدل سازی، برخی از مزایا و برتری این برنامه نسبت به دیگر کدهای نوترونیک در این زمینه اعم از گرافیک بالاتر برنامه جهت مشاهده پلات های دوبعدی و سه بعدی مختلف، دسترسی به کتابخانه های مختلف، دلخواه و کامل تر در نسخه اصلی برنامه، زمان بسیار کمتر جهت مدل سازی های مختلف اعم از هندسه های پیچیده و ساده، مدل سازی بسیار ساده تر و راحت تر، نحوه کوپلینگ ساده تر و راحت تر با برنامه ها و کدهای مختلف، کاربردهای مختلف برنامه در پزشکی و مهندسی در ارائه هندسه و مدل های آماده جهت کار و همچنین دقت بالا و قابل قبول محاسبات می باشد [۴]، [۶].

از ویژگی های بارز این برنامه، نحوه مدل سازی ساده، کوپل ساده برنامه با دیگر کدهای شبیه ساز نظیر MCNPX، FLUKA و Geant می باشد که بدین منظور می توان کدهای نوشته شده دیگر را در محیط این نرم افزار به سادگی اجرا نمود. همچنین این برنامه قادر است تا مدل سازی را در مدها مختلف انجام داده و در صورت دسترسی کامل به کتابخانه های موجود در نسخه اصلی برنامه (ENDF-B-VII و FENDL3.0)، تمامی سطوح مقاطع و دماهای مورد نیاز در دسترس خواهند بود [۴].

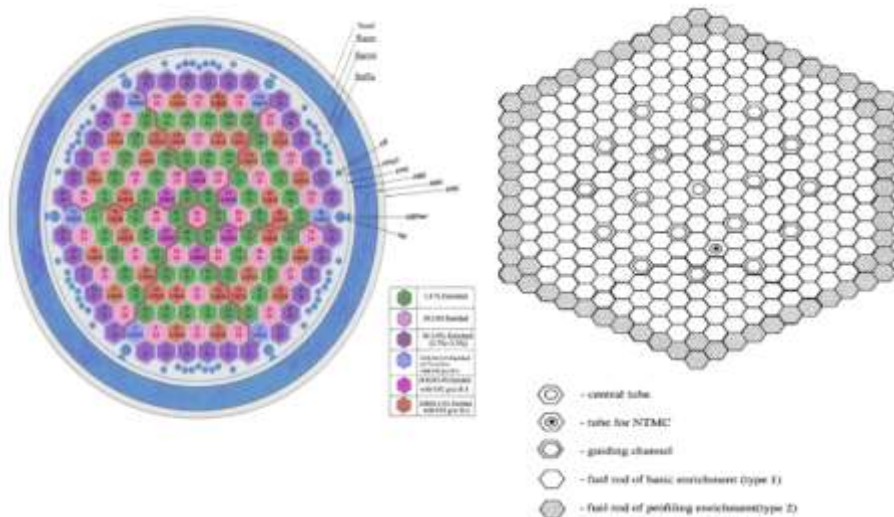
در سال های اخیر، مدل سازی های مختلف اما به تعداد محدود با برنامه SuperMC3.2.0 در زمینه های گوناگون اعم از مدل سازی راکتور و کوپل هندسه های مختلف جهت صحت سنجی نتایج برنامه با دیگر اطلاعات موجود انجام شده است که بیشتر این موارد از سوی تیم طراح برنامه، FDS Team و یا با مشارکت تیم مذکور در برخی از نقاط دنیا بوده است [۴].

روش کار:

راکتور VVER-1000 دارای قدرت حرارتی ۳۰۰۰ مگاوات و قدرت الکتریکی ۱۰۰۰ مگاوات می باشد. قلب این راکتور دارای ۱۶۳ مجتمع سوخت هگزگونال بوده که هر کدام دارای ۳۱۱ میله سوخت هستند. سوخت این راکتور اکسید

اورانیوم با غناهای ۱,۶٪، ۲,۴٪ و ۳,۶٪ می‌باشد. کنترل این راکتور توسط مکانیسم حرکتی میله‌های کنترل، مواد شیمیایی محلول در آب، اسید بوریک با غلظت معین و سموم با درصدهای مشخص می‌باشد. این راکتور دارای گروه‌های مختلف میله‌های کنترل با ارزش راکتیویته متفاوت می‌باشد که برای رسیدن به حالت بحرانیته در زمان شروع به کار تنها ۱۰٪ از میله‌های کنترل گروه ۱۰ وارد قلب می‌شوند که معادل با ۳۵ سانتی متر از طول فعال آن، در ۶ مجتمع سوخت در قلب می‌باشد [۱]، [۲].

در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار پیشرفته SuperMC3.2.0 راکتور مورد نظر شبیه‌سازی شده و پارامترهای مختلفی اعم از ضریب تکثیر در شرایط مختلف، شار نوترونی در گروه‌های مختلف انرژی و ارزش دیفرانسیلی و انتگرالی میله‌های کنترل محاسبه شد و نمودارهای مورد نظر نیز رسم گردید. بدین منظور، در این برنامه ابتدا هندسه قلب و سپس مجتمعات سوخت و تمامی المنت‌های موجود در سلول‌های مشخص در حالت ابتدای سیکل اول (مشخصات غنای سوخت مربوط به سیکل اول) مدل‌سازی گردید و سپس مواد، دمای میانگین هر المنت اعم از سوخت و خنک‌کننده (۵۷۸ درجه کلوین برای خنک‌کننده، ۱۰۷۳ درجه کلوین سوخت، ۸۷۳ درجه کلوین گپ و ...) در کتابخانه‌های برنامه ENDF-B-VII و FENDL3.0 تعیین گردید. در نهایت، با تعیین تالی‌های مشخص و چشمه‌های بحرانیته، برنامه آماده اجرا شد. در این قسمت می‌توان یکی از سه مدل اجرای برنامه را به صورت دلخواه انتخاب و برنامه را اجرا کرد. همان‌طور که پیشتر در مزایای این برنامه نیز بدان اشاره شد، یکی از مزیت‌های مهم این برنامه سرعت، سادگی و راحتی در مدل‌سازی همراه با دقت بالا می‌باشد، به طوری که سخت‌ترین هندسه‌های موجود را می‌توان در زمان‌های بسیار کوتاه در مقایسه با دیگر کدها و برنامه‌ها از این دست مدل‌سازی نمود.

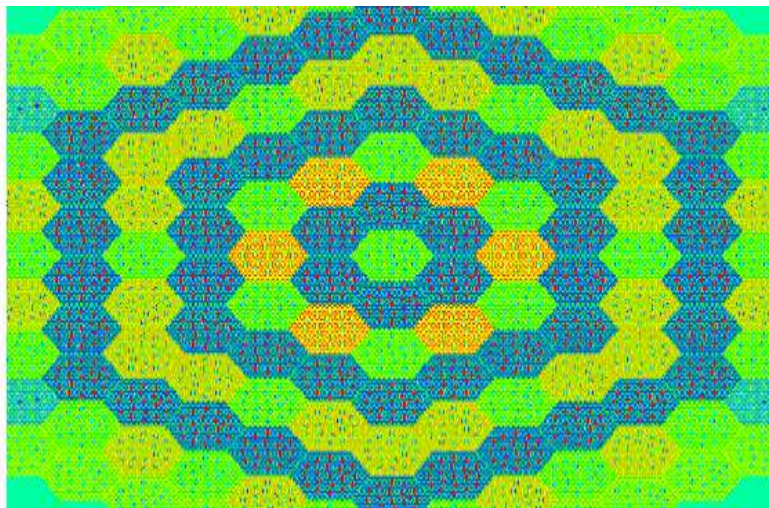


شکل (۱): نمایی از قلب و یک نوع از مجتمعات سوخت قلب راکتور VVER-1000 [۲]

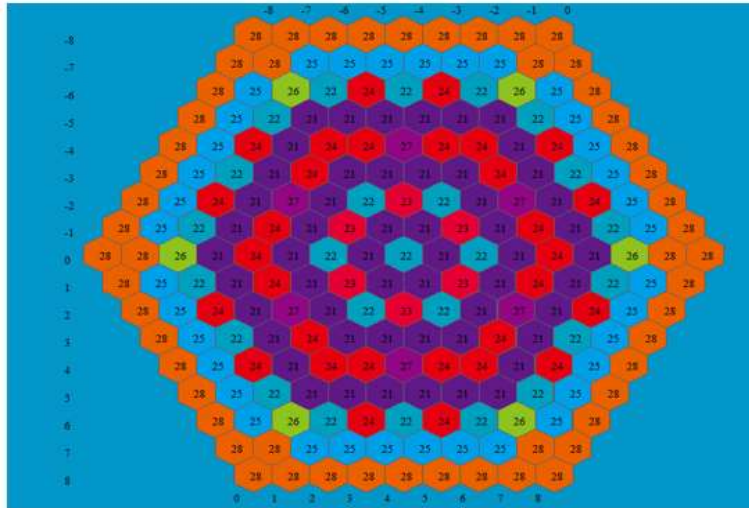


برای مقایسه اطلاعات، تعیین دقت و تشخیص برتری و اهمیت طراحی و استفاده برنامه SuperMC3.2.0، این راکتور یکبار در شرایط یکسان با کد MCNPX2.6 نیز مدل‌سازی شده تا اطلاعات با یکدیگر و در نهایت با FSAR راکتور جهت صحت‌سنجی نتایج مقایسه شود.

شکل (۲)، نمایی از قلب و دیگر اجزای مدل‌سازی شده توسط برنامه SuperMC3.2.0 و کد MCNPX2.6 را نشان می‌دهد.

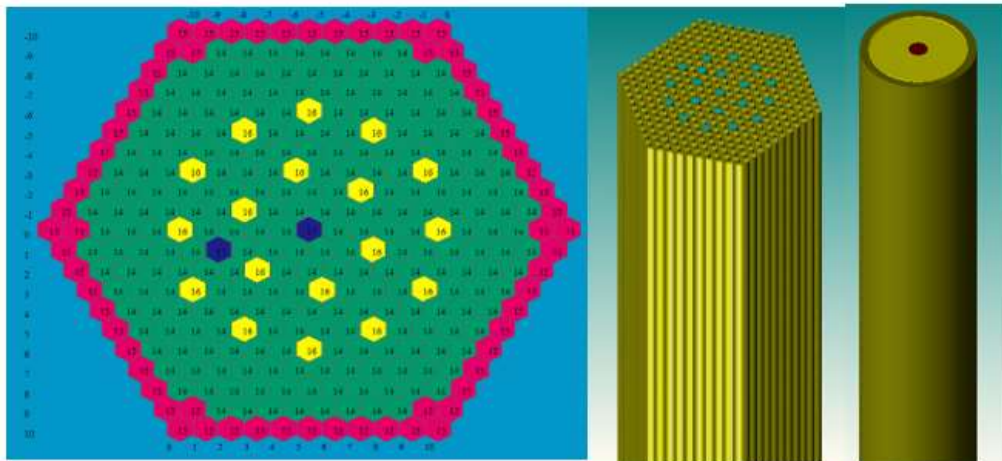


شکل (۲): نمایی از مجتمعات سوخت شبیه‌سازی شده در قلب راکتور توسط کد MCNPX2.6



- U=21: Fuel assembly 16
- U=22: Fuel assembly 24
- U=23: Fuel assembly 24B20
- U=24: Fuel assembly 24B36
- U=25: Fuel assembly 36
- U=26: Fuel assembly 36B36
- U=27: Fuel assembly 24 with control rods
- U=28: Reflector

الف



ب

ج

شکل (۳) نمایی از اجزای شبیه‌سازی شده با برنامه SuperMC3.2.0 الف: قلب ب: نمای دوبعدی و سه‌بعدی از مجتمع سوخت ج: میله سوخت

نتایج:

با توجه به محاسبات کد، قلب این راکتور در شرایط اولیه سوخت تازه با ورود ۱۰٪ میله‌های کنترل گروه ۱۰ به حالت بحرانیت می‌رسد که این مقدار کاملاً با مقادیر موجود در گزارشات مطابقت دارد. همچنین در صورتی که تمامی میله‌های کنترل بالا باشند، محاسبات برنامه SuperMC3.2.0 ضریب تکثیر ۱/۰۱۵۴۳ و کد MCNXP2.6 ضریب تکثیر ۱/۰۱۲۸۱ را نشان می‌دهد که با توجه به مقادیر موجود در FSAR، راکتور، نتایج برنامه SuperMC3.2.0 دارای خطای



کمتری می‌باشد. با توجه به شباهت کد و برنامه استفاده شده، تعداد ذرات و سیکل‌های موجود لحاظ شده در مدل‌سازی مشابه بوده و از ۲۰۰ سیکل با ردگیری ۷۰۰۰۰۰ ذره در هر سیکل (۵۰ سیکل خارج از محاسبات) در تمامی محاسبات پارامترهای نوترونیکی استفاده شده است.

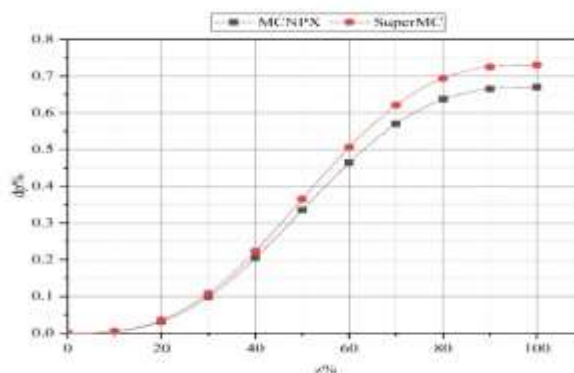
جدول (۱): مقادیر ضریب تکثیر محاسبه شده توسط برنامه SuperMC3.2.0 و کد MCNPX

FSAR	K- Factor		درصد ورود میله کنترل
	SuperMC3.2.0	MCNPX2.6	
-	1.01543	1.01281	-
1.018	0.00018	0.00027	0%

با توجه به این که در برنامه SuperMC3.2.0، مقادیر تمامی هندسه‌ها و فواصل به صورت مستقیم وارد شده و این برنامه توانایی گرفتن پلات‌های دوبعدی و سه بعدی جهت نشان دادن هندسه‌های رسم شده دارد، احتمال بروز خطا در هندسه مدل شده بسیار کمتر می‌باشد. همچنین با در نظر گرفتن این نکته که در برنامه دسترسی به کتابخانه‌های مختلف ENDF-B-VII و FENDL3.0 در دماها و سطوح مقاطع مختلف وجود دارد، محاسبات انجام شده داری تقریب کمتری می‌باشند. با توجه به درصد‌های متفاوت ورود میله‌های کنترل گروه ۱۰ به درون قلب راکتور، ارزش انتگرالی میله کنترل گروه ۱۰ به صورت زیر محاسبه شده است. نمودار زیر در صد تغییرات راکتیویته اعمالی بر حسب در صد ورود میله کنترل گروه ۱۰ نشان می‌دهد.

جدول (۲): محاسبات ارزش انتگرالی میله کنترل گروه ۱۰

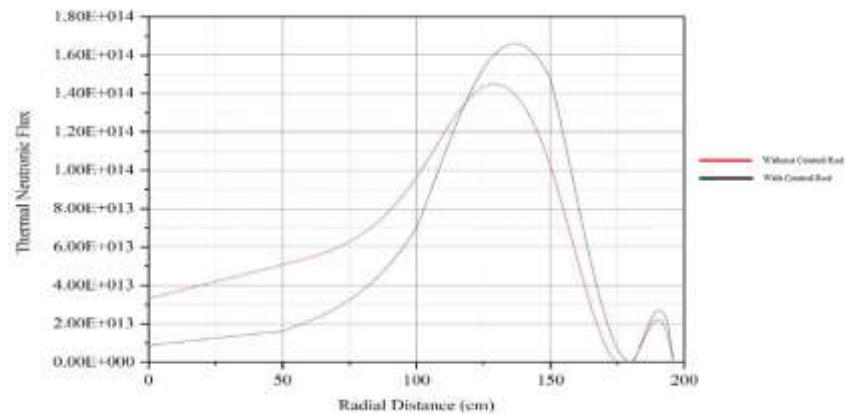
FSAR	Integral Worth	
	MCNPX2.6	SuperMC3.2.0
0.77	0.67	0.73



شکل (۴): ارزش انتگرالی میله کنترل گروه ۱۰ با استفاده از برنامه SuperMC3.2.0 و کد MCNPX2.6

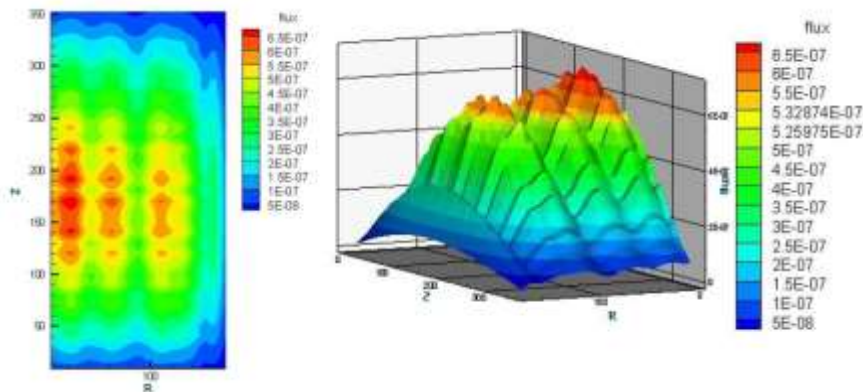


نمودار (۶)، شار شعاعی حرارتی در دو حالت ورود (نمودار آبی) و عدم ورود (نمودار قرمز) میله‌های کنترل گروه ۱۰ و نمودار (۷)، شار حرارتی دوبعدی و سه بعدی را در کل قلب راکتور در زمان بحرانیّت را با در نظر گرفتن ۲۰۰ سیکل با ردگیری ۷۰۰۰۰۰ ذره در هر سیکل (۵۰ سیکل خارج از محاسبات) بر حسب $(\#/cm^2.s)$ نشان می‌دهد. هدف از رسم این نمودارها، بررسی تغییرات شار حرارتی همراه با ورود میله‌های کنترل گروه ۱۰ و بررسی رفتار بحرانیّت در ابتدای کارکرد با سوخت تازه می‌باشد. یکی از دلایل اختلاف مربوط به محاسبات دو مدل‌سازی این است که در نرم‌افزار SuperMC3.2.0 محاسبات کامل اجزای هندسه به صورت خودکار توسط برنامه انجام می‌شود تا از این رو بتوان اشتباهات دستی را کم نمود. همچنین انحراف از معیار و خطای اندازه‌گیری شده در تمامی محاسبات کمتر از ۳٪ در کد و برنامه می‌باشد.



شکل (۵): شار حرارتی شعاعی در حالت‌های ورود و عدم ورود میله کنترل گروه ۱۰ با SuperMc3.2.0

مقادیر بدست آمده از محاسبات کد و برنامه به ازای یک ذره نوترون می‌باشد که باید در شدت چشمه متناسب با راکتور مدل‌سازی شده ضرب گردد و برای نرمال‌سازی نمودار نیز باید در طیف تعریفی به عنوان، طیف حرارتی، فوق حرارتی و سریع نوترون در قلب تقسیم گردد که این مواد در نمودار بالا لحاظ شده است.



شکل (۶): نمودار دوبعدی و سه بعدی شار حرارتی راکتور به ازای یک ذره نوترون در حالت بحرانیّت جهت رسم نمودار دوبعدی و سه بعدی، به صورت مستقیم محاسبات استخراج و با نرم افزار رسم نمودار کوپل شده است، از این رو، به ازای یک ذره نوترون می باشد و باید شدت چشمه در آن لحاظ گردد. با توجه به نمودارهای رسم شده و همچنین وجود مخلوط آب و اسید بوریک به صورت یکنواخت در کل قلب، دلیل افت شار در برخی از نقاط، ورود میله های کنترل گروه ۱۰ و میله های حاوی جاذب نوترون می باشد.

نتیجه گیری:

با توجه به اهمیت دقت در محاسبات نوترونیک قلب راکتور هسته ای و همچنین مزایای برنامه پیشرفته SuperMC3.2.0 در تحلیل رفتار نوترونیک اعم از دقت بالا، سادگی در مدل سازی، صرف زمان کمتر، گرافیک بالاتر برنامه در مقایسه با کدهای شبیه سازی از این دست، و دسترسی به کتابخانه های مختلف جهت انتخاب دما و سطوح مقاطع، در این تحقیق قلب راکتور VVER-1000 نیروگاه بوشهر با استفاده از این برنامه مدل سازی گردید. برای تعیین دقت و صحت نتایج این برنامه، قلب راکتور در شرایط یکسان با کد MCNPX2.6 نیز شبیه سازی گردید تا نتایج حاصل از کد و برنامه با یکدیگر و FSAR راکتور مقایسه شوند. با توجه به مدل سازی، توسط برنامه SuperMC3.2.0، قلب راکتور با سوخت تازه در ابتدای سیکل دارای ضریب تکثیر $1/0.1543$ می باشد. این در حالیست که کد MCNPX2.6 ضریب تکثیر $1/0.1281$ را نشان می دهد که دارای خطای بیشتری است. همچنین ارزش انتگرالی میله کنترل گروه ۱۰ نیز در برنامه SuperMC3.2.0 0.73 محاسبه شده است که در مقایسه با محاسبات کد دارای دقت بالاتری می باشد. بیشینه شار حرارتی در قلب در حالت بحرانیّت در حدود ارتفاع ۱۴۵ سانتی متری از کف قلب می باشد. همچنین مقدار بیشینه شار حرارتی در قلب نیز با مش بندی کروی، مقدار $1.63E14$ می باشد.



مراجع:

- [1] Pelowitz, D.B, (2008), MCNPXTM Uses manual version 2.6.0, Los Alamos national laboratory.
- [2] Bushehr Nuclear Power Plant, Final Safety Analysis Report (FSAR) (2003), Technical Report, Chapter 4.
- [3] Preliminary Safety Analysis Report, (PSAR) of Nuclear Power Plant (1976), Iran 1 and 2, Vol. 1 and 2, KWU.
- [4] FDS Team, china, SuperMC3.2.0 User Manual-EN.
- [5] G.Y. Sun, J. Song, H.Q. Zheng, (2013), Benchmark of neutron transport simulation capability of Super Monte Carlo Calculation Program SuperMC3.2.0 2.0, Atom. Eng. Sci.Technol. 47 520–525 (in Chinese).
- [6] The IAEA Nuclear Data Section, FENDL-2.1 Fusion Evaluated Nuclear Data Library, INDC (NDS)-467, Vienna, Austria, 2004, December.
- [7] E.K. Lee, et al., (2005), New dynamic method to measure rod worth in zero power physics test at PWR startup. Annals of Nuclear Energy 32 1457–1475.
- [8] F. Faghihi, et al., (2007), Reactivity coefficients simulation of the Iranian VVER-1000 nuclear reactor using WIMS and CITATION codes. Progress in Nuclear Energy 49 68-78.