



## تحلیل نوترونیک قلب راکتور ماژولار کوچک CAREM-25 با استفاده از مقایسه نتایج کد MCNPX2.7.0 و برنامه SuperMC3.2.0

زارع گنجارودی، سعید\*<sup>(۱)</sup> - پذیرنده، علی<sup>(۱)</sup> - کاسه‌ساز، یاسر<sup>(۲)</sup> - خامه<sup>(۱)</sup>، حسین

<sup>۱</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی هسته‌ای

<sup>۲</sup> سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

### چکیده:

هدف از انجام این تحقیق، شبیه سازی تحلیل نوترونیک قلب راکتور ماژولار کوچک CAREM-25 که از انواع راکتورهای ماژولار کوچک از نوع آب تحت فشار با غنای زیر ۴٪ و توان زیر ۵۰ مگاوات الکتریک است، با استفاده از نرم‌افزار پیشرفته SuperMC3.2.0 و کد MCNPX2.7.0 می‌باشد. با توجه به مزایای زیاد نرم‌افزار پیشرفته SuperMC اعم از سادگی مدل‌سازی، دقت بالا محاسبات و دسترسی به کتابخانه‌های مختلف، برخی از پارامترهای نوترونیک برای اولین بار مانند ضریب تکثیر، ارزش میله‌کنترل، توزیع شار نوترونی و توان با استفاده از برنامه SuperMC و کد MCNPX بدست آورده شد و نتایج حاصل با یکدیگر و گزارشات جهت صحت‌سنجی با دقت بالا مطابقت داده شد.

کلمات کلیدی: نوترونیک، CAREM-25، SuperMC3.2.0، MCNPX2.7.0

### مقدمه:

راکتورهای ماژولار کوچک که در انواع مختلف طراحی و ساخته می‌شوند، جز راکتورهای پیشرفته و نسل جدید بوده که در بسیاری از کشورهای پیشرو در صنعت هسته‌ای در جهان مانند آمریکا، روسیه و ژاپن در حال طراحی و ساخت هستند [۱]. راکتور CAREM-25 کشور آرژانتین، یک راکتور ماژولار کوچک آب سبک تحت فشار بوده که توسط سازمان انرژی اتمی آرژانتین (CNEA) با همکاری شرکت های INVAP و CNEA توسعه یافته است. این راکتور ماژولار کوچک که تنها راکتور در حل طراحی در دنیا با قدرت کمتر از ۳۰ مگاوات الکتریک و غنای سوخت کمتر از ۴٪ می‌باشد، برای اولین بار پیشنهاد طراحی و ساخت آن در سال ۱۹۸۴ در کنفرانسی در کشور پرو مطرح گردید [۱،۲]. تاکنون مقالات و گزارشات متعددی که اغلب آن‌ها از کشور آرژانتین و تیم طراح راکتور می‌باشد به چاپ رسیده است. بنا بر مقالات و گزارشات موجود، در سال ۲۰۱۲ مراحل گرفتن گواهی‌نامه برای ساخت راکتور و در سال ۲۰۱۴ ساختن سایت نیروگاهی آغاز شد [۳،۴].

نرم‌افزار پیشرفته SuperMC طراحی تیم FDS کشور چین به مانند کد MCNPX، معادله ترابرد نوترون را به صورت احتمالاتی حل می‌نماید. اما تفاوت و انگیزه استفاده از برنامه SuperMC، مزایای این برنامه نسبت به دیگر کدهای



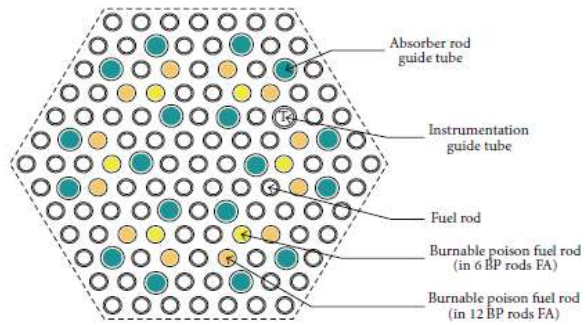
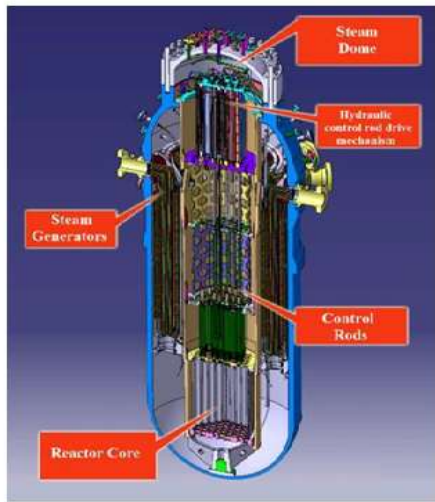
نوترونیک در این زمینه اعم از گرافیک بالای برنامه جهت مشاهده نماهای دوبعدی و سه‌بعدی، دسترسی به کتابخانه‌های مختلف کامل در نسخه اصلی برنامه، صرف زمان کمتر جهت مدلسازی‌های، همبسته‌سازی راحت با دیگر کدهای شبیه‌ساز، کاربردهای مختلف برنامه در پزشکی و مهندسی در ارائه هندسه و مدل‌های آماده جهت کار و همچنین دقت بالا و قابل قبول محاسبات می‌باشد [۲،۱۲]

در سال‌های اخیر، مدلسازی‌های مختلف اما به تعداد محدود با برنامه SuperMC در زمینه‌های گوناگون اعم از مدلسازی راکتور و همبسته‌سازی هندسه‌های مختلف جهت صحت‌سنجی 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.

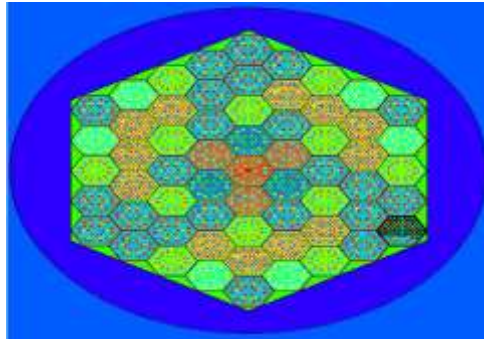
### روش کار :

راکتور مازولار کوچک CAREM-25 کشور آرژانتین، یک راکتور آب سبک تحت فشار یکپارچه با قدرت حرارتی ۱۰۰ مگاوات و قدرت الکتریکی ۲۷ مگاوات می‌باشد. این راکتور دارای ۶۱ مجتمع سوخت هگزگونال بوده که هر کدام دارای ۱۰۸ میله سوخت، ۱۸ میله کنترل و یک کانال اندازه‌گیری است. سوخت این راکتور اکسید اورانیوم با غناهای ۱،۸٪ و ۳،۱٪ می‌باشد. در این راکتور از هیچ کنترل‌کننده شیمیایی نظیر اسید بوریک محلول در آب استفاده نمی‌شود و کنترل قلب راکتور توسط اکسید گادولونیوم با درصدهای معلوم (۹۲٪ مطابق با آخرین گزارش و مدلسازی کنونی در تحقیق اورانیوم اکسید به ۸٪ گادولونیوم اکسید) به صورت مخلوط با سوخت در ۲۴ مجتمع سوخت و میله‌های کنترل تنظیمی و ایمنی در ۲۵ مجتمع سوخت انجام می‌گیرد. همچنین دمای ورود و خروج خنک‌کننده از قلب به ترتیب ۲۸۴ و ۳۲۶ درجه سانتی‌گراد به صورت تکفاز در فشار ۱۲،۲۵ مگاپاسکال می‌باشد [۲،۷].

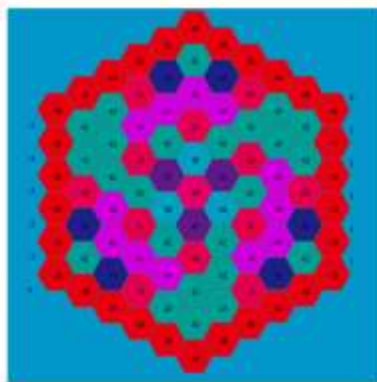
ابتدا هندسه قلب و سپس مجتمعات سوخت و تمامی میله‌های موجود در سلول‌های مشخص مدلسازی گردید و سپس مواد، دما در کتابخانه‌های موردنظر موجود تعیین گردید. در نهایت، با تعیین تالی‌های مشخص و چشمه‌های بحرانی، برنامه اجرا شد تا نتایج حاصل از کد و برنامه مورد ارزیابی و مقایسه قرار گیرد.



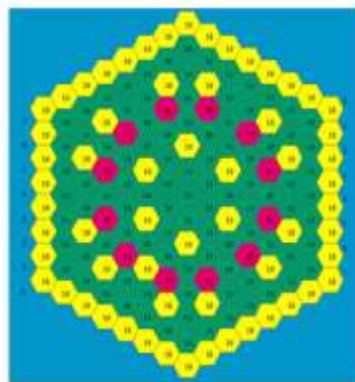
شکل (۱): نمایی از محفظه تحت فشار راکتور و مجتمع سوخت CAREM-25 [۸]



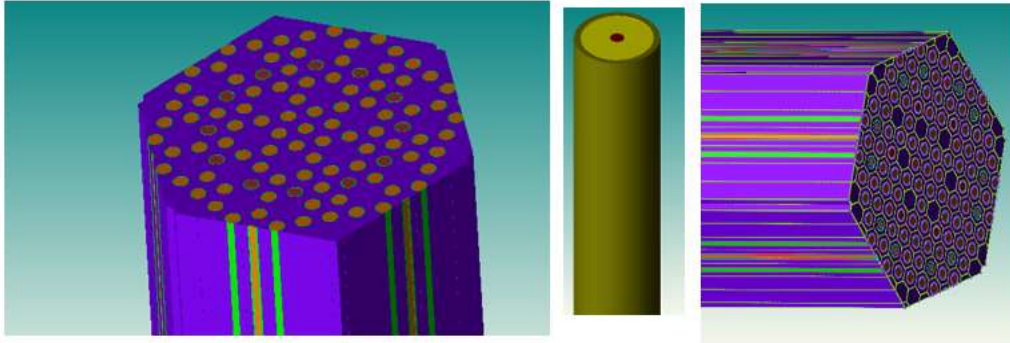
شکل (۲): نمایی از مجتمع سوخت در قلب راکتور شبیه‌سازی شده توسط کد MCNPX 2.7.0



قلب راکتور



مجتمع سوخت



شکل (۳): نمایی از اجزای شبیه‌سازی شده با برنامه SuperMC3.2.0

## نتایج:

### ضریب تکثیر

با توجه به شبیه‌سازی انجام شده و انتخاب کتابخانه سطوح ENDF/B-V داده‌های 42.C, 51.C, 52.C, 70.C در کد MCNPX2.7.0 و همچنین کتابخانه سطوح FENDL3.0 و ENDF-B-VII داده‌های 71.C, 72.C و 30.y در برنامه SuperMC3.2.0، قلب این راکتور ماژولار کوچک با وارد کردن ۱۰٪ میله‌های کنترل تنظیمی ضریب تکثیر  $1/0.4576$  در کد MCNPX 2.7.0، و  $1/0.4971$  در برنامه SuperMC3.2.0 دارد، بنابراین، راکتیویته مازاد تقریبی آن نیز ۴۵ mK می‌شود که این مقادیر حاکی از همخوانی کد و برنامه و همچنین مطابقت با نتایج موجود در مقالات و گزارشات دارد [۹،۱۰].

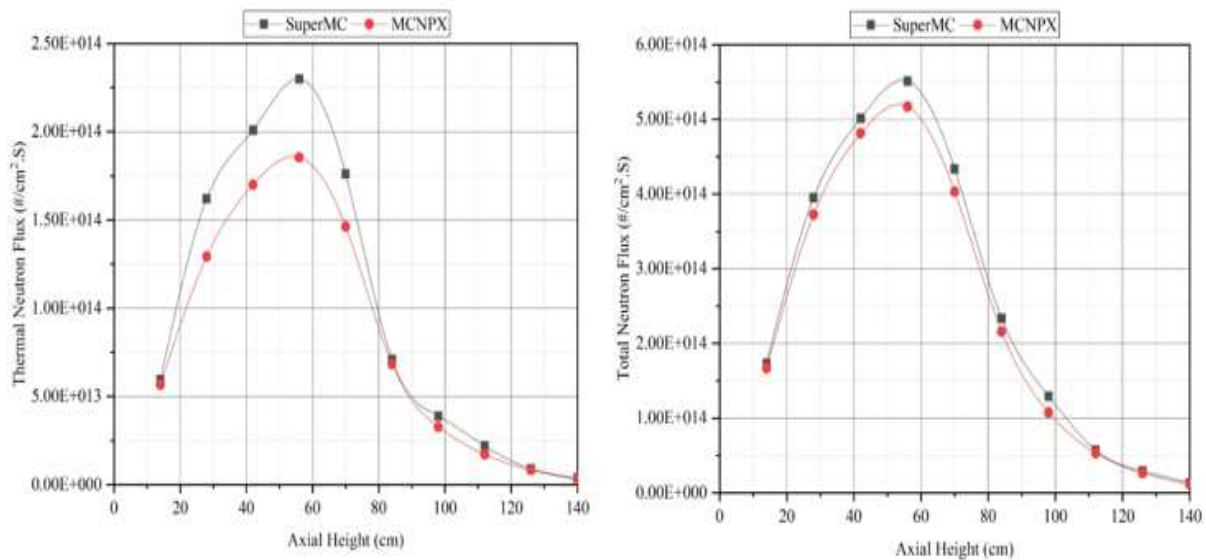
جدول (۱): مقادیر ضریب تکثیر و راکتیویته مازاد در شرایط مختلف ورود میله‌های کنترل تنظیمی

مقالات و گزارشات	SuperMC3.2.0	MCNPX2.7.0	پارامترهای مورد بررسی
ورود ۵۰٪ میله‌های کنترل تنظیمی و ۱۰٪ میله‌های کنترل ایمنی [۹]	ورود ۵۰٪ میله‌های کنترل تنظیمی و ۱۰٪ میله‌های کنترل ایمنی k=1.00127 0.00049	۵۰٪ میله‌های کنترل تنظیمی و ۱۰٪ میله‌های کنترل ایمنی k=1.00176 0.00028	حالت بحرانبیت
k=1.05171 0.0007 Ex-R =49 (mk) [۱۰]	k=1.04971 0.00055 Ex-Reactivity =47.35 (mk)	k=1.04576 0.00037 Ex-Reactivity =43.75 (mk)	۱۰٪ میله کنترل تنظیمی

### شار نوترون

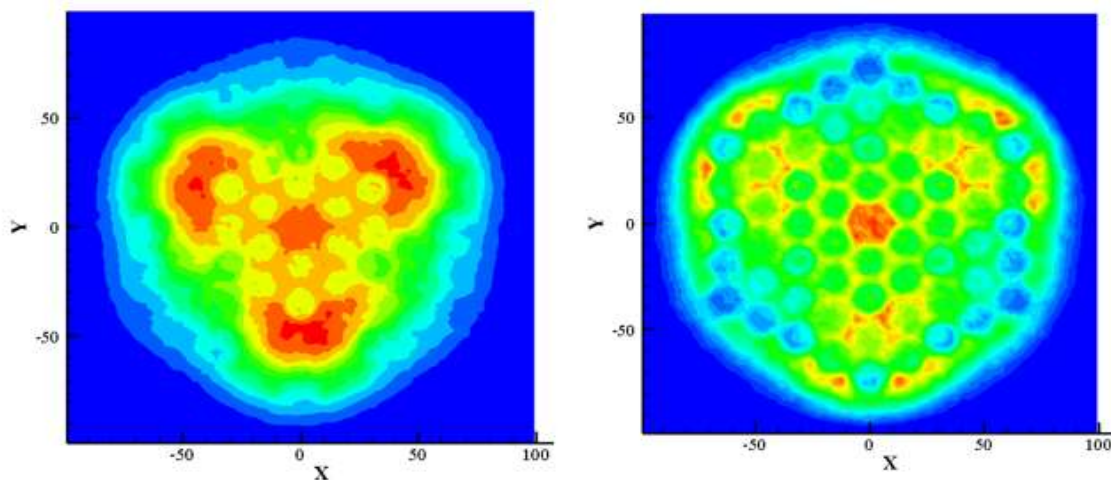
با توجه به محاسبات شار نوترون در کد و برنامه با تعداد ۷۰۰۰۰۰۰ ذره ردگیری در ۲۰۰ سیکل در سه بازه انرژی در حالت بحرانبیت مشخص می‌گردد که بیشینه شار حرارتی مربوط به ارتفاع حدود ۵۷ سانتی‌متری از کف قلب می‌باشد.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ورود میله‌های کنترل به درون قلب، ارتفاع بیشینه شار را در حدود ۴۰٪ به سمت پایین انتقال می‌دهد [۹،۱۰].



شکل (۴): توزیع محوری شار حرارتی و کل در قلب راکتور CAREM-25

توزیع شار نوترونی در این راکتور دارای تقارن یک سوم بوده و علت افت شار در برخی از نقاط، ورود میله‌های کنترل و سموم گادولونیوم اکسید با سطح مقطع جذب بالا می‌باشد.



شکل (۵): شار نوترونی حرارتی و کل در قلب راکتور ماژولار به ازای یک ذره نوترون در حالت بحرانبیت

محاسبات توان

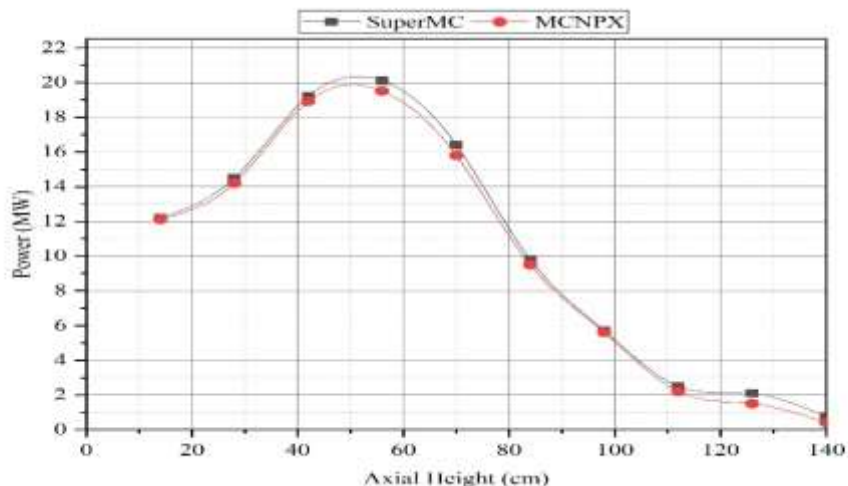


توان کل تولیدی در قلب در حدود ۱۰۴ مگاوات حرارتی می باشد که محاسبات حاکی از مطابقت کد و برنامه با یکدیگر و نتایج گزارشات دارد [۹،۱۰].

کمترین مقدار ضریب قله قدرت مجتمعات ۰،۴۹۷ در کد MCNPX و ۰،۵۱۵ در برنامه SuperMC می باشد. بیشترین مقدار نیز ۱،۴۱۹ در کد MCNPX و ۱،۶۷۱ در برنامه SuperMC بوده که مربوط به مجتمعی است که دارای غنای ۳،۱٪ بوده و گادولونیوم اکسید در آن وجود ندارد.

جدول (۲): مقایسه محاسبات توان قلب راکتور ماژولار توسط کد MCNPX2.7.0 و برنامه SuperMC3.2.0

مراجع	توان حرارتی کل قلب		فاکتور پیک توان	
	MCNPX	SuperMC	MCNPX	SuperMC
104 [9,10]	100.7	103.25	Maximum=1.419 Minimum=0.497	Maximum=1.671 Minimum=0.515



شکل (۶): توزیع محوری توان در قلب راکتور CAREM-25

### بحث و نتیجه گیری:

هدف از این تحقیق، ارزیابی نوترونیک قلب راکتور CAREM-25، با استفاده از شبیه‌سازی برنامه پیشرفته SuperMC3.2.0 و کد MCNPX 2.7.0 می باشد. استفاده از برنامه SuperMC برای مدل‌سازی قلب راکتورهای ماژولار برای اولین بار به دلیل مزایای فراوان برنامه اعم از سادگی مدل‌سازی، دقت بالا محاسبات، گرافیک بالای برنامه جهت ارائه نماهای مختلف و دسترسی به کتابخانه‌های مختلف، در این تحقیق انجام شده است که محاسبات حاکی از مطابقت نتایج کد و برنامه با یکدیگر و نتایج گزارشات می باشد. با ورود ۱۰٪ میله‌های کنترل تنظیمی به داخل، قلب دارای مقدار



حدودی ۴۵ mK راکتیویته اضافی خواهد بود که دلیل این امر می‌تواند سیکل طولانی کاری این راکتور که در حدود ۱۴ ماه است، باشد. توزیع شار محوری نیز در برنامه و کد نشان می‌دهد که بیشینه شار حرارتی در زمان بحرانی در ارتفاع حدود ۵۷ سانتی‌متری از کف قلب راکتور می‌باشد و ورود میله‌های کنترل می‌تواند ارتفاع بیشینه شار را در حدود ۴۰٪ به سمت کف قلب انتقال دهد. ارزش کل میله کنترل تنظیمی ۱۳۰٫۷۴ mK و توان محاسبه شده توسط کد و برنامه در حدود ۱۰۴ مگاوات حرارتی می‌باشد که مقایسه نتایج حاکی مطابقت کد و برنامه دارد.

#### مراجع:

- [1] NEA (2011) Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors, NUCLEAR ENERGY AGENCY, OECD.
- [2] DELMASTRO, D. (2000) "Thermal-hydraulic aspects of CAREM reactor", IAEA TCM on Natural Circulation Data and Methods for Innovative Nuclear Power Plant Design, Vienna, Austria.
- [3] H. Boado Magana, D., et al. (2012) CAREM Prototype Construction and Licensing Status, IAEA.
- [4] BoadoMagan, H., et al. (2011), 'CAREM Project Status', Science and Technology of Nuclear Installations.
- [5] The IAEA Nuclear Data Section, FENDL-2.1 Fusion Evaluated Nuclear Data Library, INDC (NDS)-467, Vienna, Austria, 2004, December.
- [6] IAEA (2015), Advanced in Small Modular Reactors Technology Developments, A supplement to IAEA advanced reactors information system (ARIS).
- [7] Villarino, E., Hergenreder D., Matzkin, S. (2012) NEUTRONIC CORE PERFORMANCE OF CAREM-25 REACTOR, INVAP, Argentina.
- [8] S. Tashkor, E. Zarifi, M. Naminazari, (2017), Neutronic simulation of CAREM-25 small modular reactor, progress in nuclear engineer.
- [9] Mazzi, R., et al. (2002), 'CAREM Project Development'. In IAEA, Small and Medium Sized Reactors: Status and Prospects, IAEA.
- [10] Diego Ferraro, (2009), caculo de la exposicion de estructuras interiores y recipiente de presion del CAREM-25 mediante MCNP, Institute Balsiero, Universidad Nacional de Cuyo, Comision Nacional de Energia Atomica, San Carlos Bariloche, Argentina.
- [11] Pelowitz, D.B, (2008), MCNPXTM Uses manual version 2.6.0, Los Alamos national laboratory.
- [12] FDS Team, china, SuperMC User Manual-EN.