



تحلیل ترموهیدرولیک قلب راکتور پیشرفته ماژولار کوچک CAREM-25 با استفاده از همبسته-

سازی نتایج برنامه SuperMC3.2.0 با کد COBRA-EN

زارع گنجارودی، سعید* (۱) - پذیرنده، علی (۱) - کاسه‌ساز، یاسر (۲)

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

^۲ پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

چکیده:

در حال حاضر، یکی از جدیدترین نسل راکتورهای هسته‌ای ماژولار کوچک به دلیل مزایای فراوان اعم از راندمان بالاتر، اقتصاد بهتر و سادگی در تجاری‌سازی مورد توجه بسیاری از کشورهای پیشرو در صنعت هسته‌ای قرار گرفته است. یکی از این نوع راکتورها، راکتور CAREM-25 می‌باشد. در این تحقیق، پارامترهای ترموهیدرولیکی قلب این راکتور از جمله دمای خنک کننده، دمای سوخت و فاکتور پیک توان با استفاده از همبسته‌سازی کدهای SuperMC3.2.0 و COBRA-EN محاسبه است. مقایسه نتایج بدست آمده با گزارش‌های موجود نشان دهنده صحت نتایج می‌باشد.

کلمات کلیدی: راکتور CAREM-25، برنامه SuperMC3.2.0، کد COBRA-EN، ترموهیدرولیک

مقدمه:

در سال‌های اخیر، طراحی، توسعه و ساخت راکتورهای ماژولار کوچک به دلایل زیادی اعم از هزینه بهره‌برداری کم، راندمان بالا، ایمنی ذاتی بالا، عدم نیاز به سوخت‌گذاری تا چندین سال، امکان حمل و نقل آسان با توجه به اندازه‌های راکتور و امکان استفاده‌های مختلف برای تولید قدرت، دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن، و دیگر کاربردهای مهم مورد توجه قرار گرفته اند [۱]. هم اکنون حدود ۱۰۰ راکتور از انواع راکتورهای ماژولار کوچک در حدود ۲۰ کشور دنیا در حال طراحی، توسعه و ساخت می‌باشد که از این بین، بیشتر این راکتورها از نوع آب سبک تحت فشار می‌باشند. همچنین در بین کشورهای مختلف، روسیه، آمریکا، ژاپن، کره جنوبی و فرانسه بیشترین تعداد از این راکتورها را دارا هستند [۱]. راکتور ماژولار کوچک CAREM-25 در کشور آرژانتین دارای قدرت حرارتی ۱۰۰ مگاوات و همچنین قدرت الکتریک ۲۷ مگاوات می‌باشد. قلب این راکتور دارای ۶۱ مجتمع هگزاگونال با طول موثر ۱۴۰ سانتی‌متر 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. ساخت و ترکیب مواد در این راکتور با دیگر راکتورهای آب تحت فشار دارای تفاوت‌های بسیار می‌باشد. در این راکتور از هیچ کنترل‌کننده شیمیایی نظیر اسید بوریک محلول در آب استفاده نمی‌شود و تنها از اکسید گادولونیوم با



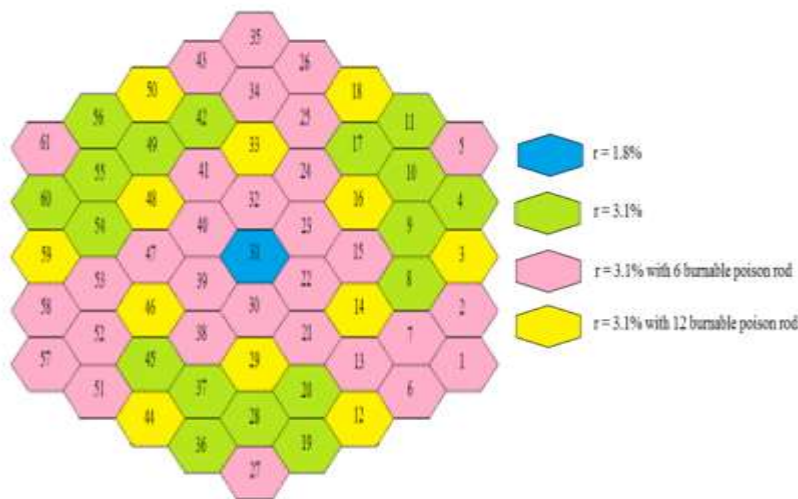
درصدهای معلوم به صورت مخلوط با سوخت در برخی از میله‌های سوخت و مجتمع‌های سوخت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷،۸].

در این تحقیق، پس از مدلسازی رفتار نوترونیک راکتور قلب با کد SuperMC3.2.0 با در نظر گرفتن دمای میانگین خنک‌کننده و دیگر اجزا نظیر سوخت و گپ، توان محوری بسته‌های سوخت در ده ارتفاع محوری محاسبه شده است و سپس با استفاده از کد COBRA-EN، پارامترهای ترموهیدرولیکی نظیر دمای سوخت و خنک‌کننده، بدست آمده است.

روش کار:

نرم‌افزار پیشرفته SuperMC طراحی تیم FDS کشور چین، معادله ترابرد نوترون را به روش مونت کارلو و به صورت احتمالاتی حل می‌نماید که دارای 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 [۳].

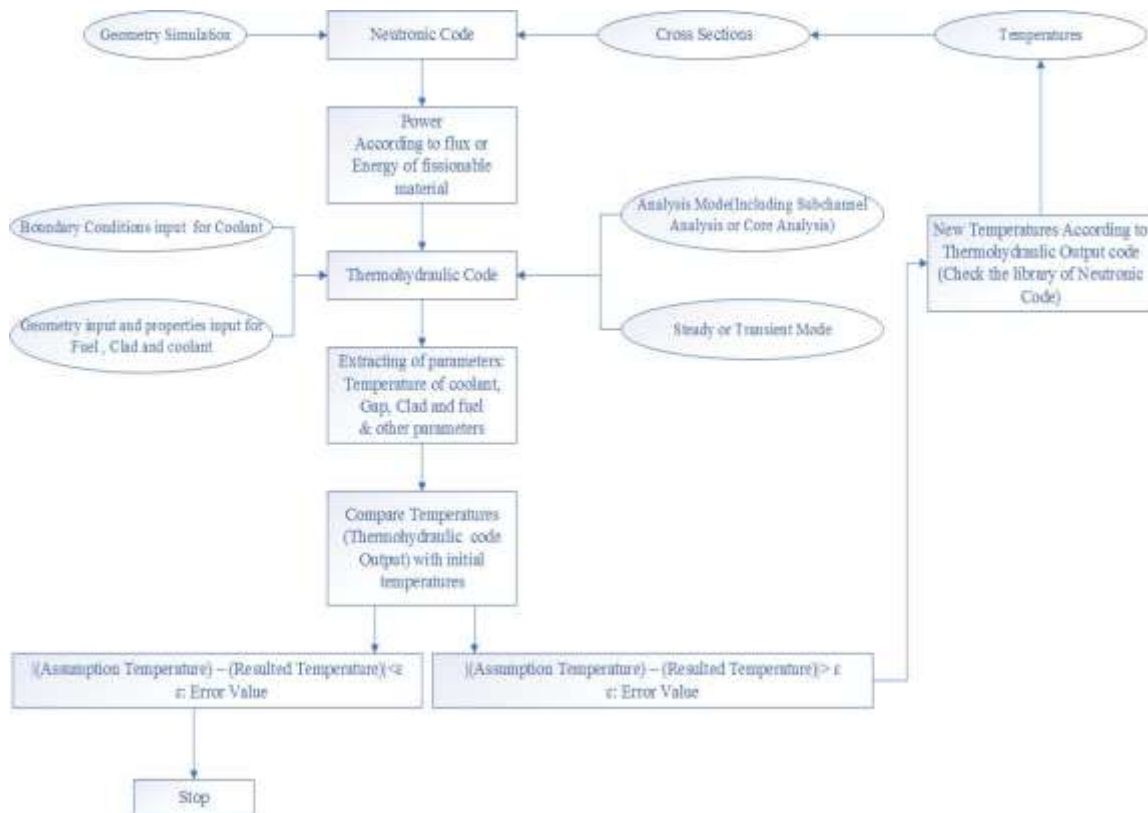
شکل (۱) نمایی از چیدمان بسته‌های سوخت در قلب راکتور ماژولار کوچک CAREM-25 را نشان می‌دهد.



شکل (۱): نمایی از چیدمان مجتمع‌های سوخت در قلب راکتور ماژولار کوچک CAREM-25

پس از مدلسازی رفتار نوترونیک قلب راکتور با کد SuperMC3.2.0 با لحاظ دمای میانگین خنک‌کننده و دیگر اجزا نظیر سوخت و گپ، توان محوری بسته‌های سوخت در ده ارتفاع محوری گرفته شد. سپس با استفاده از کد COBRA-EN، مقادیر توان بسته‌های سوخت، به عنوان ورودی در اختیار این کد قرار گرفت تا پارامترهای ترموهیدرولیکی نظیر دمای سوخت و خنک‌کننده، بدست آید. در نهایت، با مقایسه دماهای بدست آمده با مقادیر موجود در ورودی

کد SuperMC3.2.0، در صورتی که اختلاف دمای بدست آمده از کد ترموهیدرولیک با دمای گمارده شده در ورودی کد نوترونیک مقدار ناچیز تعیین شده در برنامه مبانی طراحی شده جهت همبسته‌سازی محاسبات نوترونیک و ترموهیدرولیک باشد، کوپلینگ کدها با موفقیت انجام شده است و پارامترهای ترموهیدرولیکی دارای دقت و صحت بالایی هستند، در غیر این صورت، این روند آنقدر تکرار می‌شود تا تفاوت دماها به مقدار ناچیز تعیین شده برسد. الگوریتم به کار رفته در این تحقیق در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): الگوریتم همبسته‌سازی کدهای SuperMC3.2.0 و COBRA-EN

نتایج:

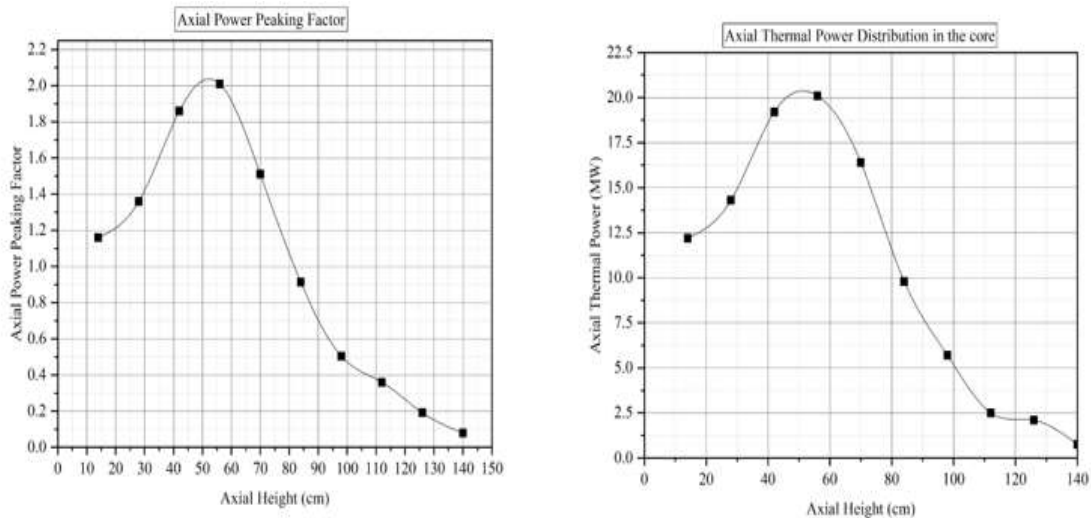
محاسبات ضریب قله قدرت

توان کل تولیدی در قلب پس از همبسته‌سازی کدهای نوترونیک و ترموهیدرولیک SuperMC3.2.0 و COBRA-EN در حدود ۱۰۳،۲۵ مگاوات حرارتی محاسبه شد که در این حالت کمترین مقدار ضریب قله قدرت بسته‌های سوخت ۰،۵۱۵ در برنامه می‌باشد. همچنین بیشترین مقدار برابر با ۱،۶۷۱ در برنامه بوده که مربوط به بسته‌ای است که دارای غنای ۳،۱٪ بوده و مخلوط گادولونیوم اکسید در آن وجود ندارد.

جدول (۱): محاسبات فاکتور پیک توان مجتمعات سوخت قلب راکتور

Thermal Power (MW_{th})		Power Peaking Factor (PPF)	
Reference	Calculated	Min	Max
104 [7,10]	103.25	0.515	1.671

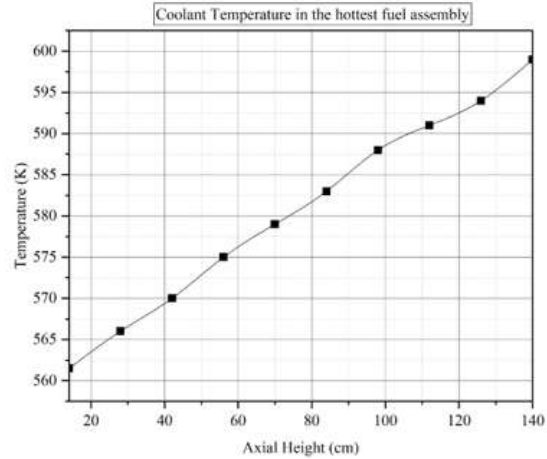
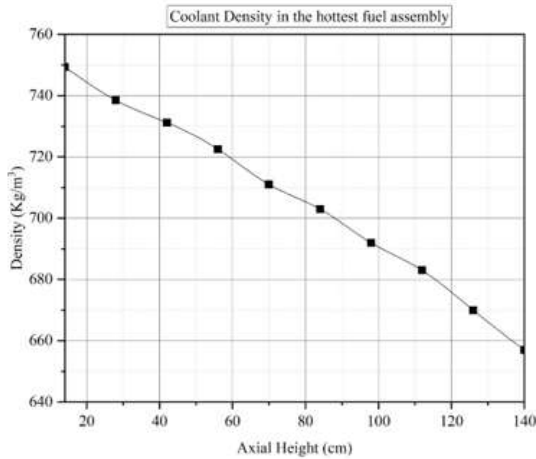
با توجه به شکل (۳)، توان نیز به مانند شار در حالت بحرانی در ارتفاع حدود ۵۷ سانتی‌متری از کف قلب به مقدار بیشینه می‌رسد که مطابقت کامل با مقالات و گزارشات قبلی دارد [۷۸].



شکل (۳): توزیع محوری توان و فاکتور پیک توان در قلب راکتور CAREM-25

دما و چگالی سیال خنک‌کننده

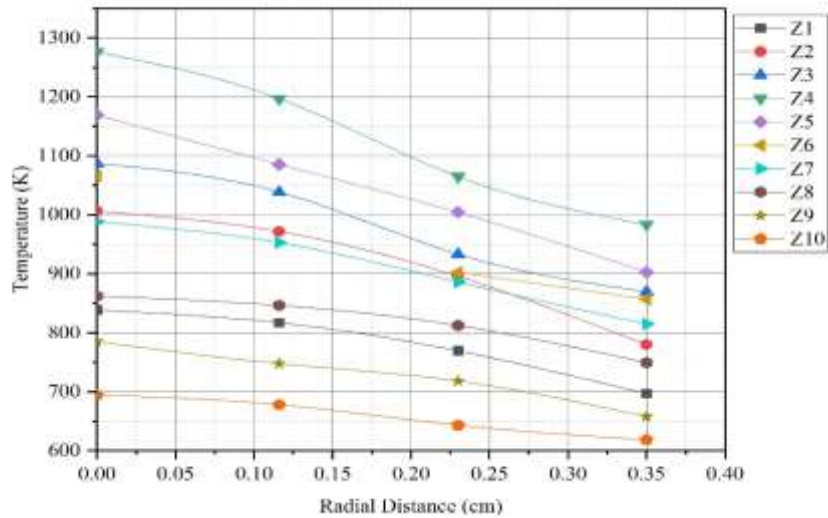
با توجه به مش‌بندی محوری انجام شده در گرم‌ترین بسته سوخت، دمای خنک‌کننده در این بسته از حدود ۲۸۹ درجه سانتی‌گراد در ورود تا حدود ۳۲۶ درجه سانتی‌گراد در خروجی می‌باشد. همچنین با توجه به سیر صعودی دما خنک‌کننده، چگالی خنک‌کننده نیز از مقدار حدودی ۷۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در ورود تا مقدار حدودی ۶۵۷ کیلوگرم بر مترمکعب در خروج کاهش می‌یابد.



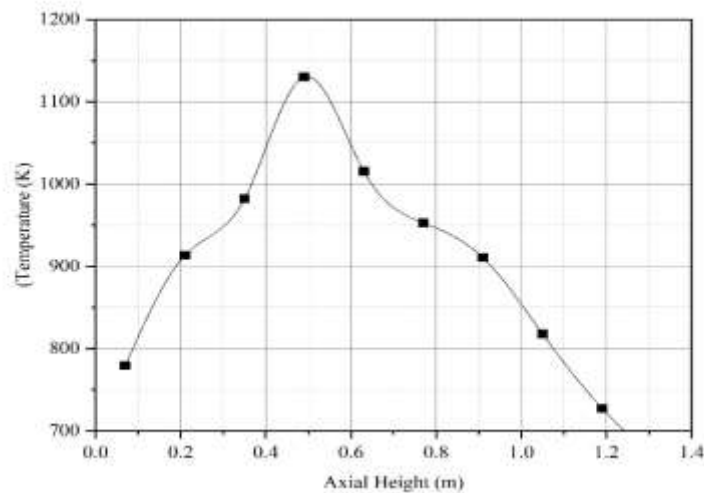
شکل (۴): تغییرات دما و چگالی سیال خنک‌کننده در گرم‌ترین مجتمع سوخت قلب راکتور

دمای میله سوخت

با توجه به ارتفاع بیشینه شار و توان در زمان بحرانیت، بیشینه دمای سوخت نیز در گرم‌ترین بسته سوخت در حدود ۱۲۷۰ درجه کلوین در ارتفاع ۵۷ سانتی‌متری (مش محوری چهارم) از کف قلب با احتساب طول فعال می‌باشد. شکل (۵) و (۶) به ترتیب، دمای میله سوخت با مش‌بندی شعاعی-محوری و دمای متوسط میله سوخت را در گرم‌ترین بسته سوخت قلب راکتور نشان می‌دهند.



شکل (۵): دمای میله سوخت با مش‌بندی شعاعی-محوری در گرم‌ترین مجتمع سوخت قلب راکتور



شکل (۶): دمای متوسط میله سوخت در گرم‌ترین مجتمع سوخت قلب راکتور

بحث و نتیجه‌گیری:



هدف از این تحقیق، ارزیابی ترمونوترونیک قلب راکتور CAREM-25، با استفاده از همبسته‌سازی برنامه پیشرفته SuperMC3.2.0 با کد COBRA-EN می‌باشد. استفاده از برنامه SuperMC برای همبسته‌سازی مدل‌سازی رفتار نوترونیک و ترموهیدرولیک 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. با توجه به کوپل محاسبات، بیشینه مقدار ضریب قله قدرت بسته سوخت حدود ۱,۶۷۱ خواهد بود که مربوط به مجتمعی است که فاقد گادولونیم اکسید مخلوط با سوخت می‌باشد. بیشینه دمای سوخت نیز در گرم‌ترین مجتمع سوخت در حدود ۱۲۷۰ درجه کلوین در ارتفاع ۵۷ سانتی‌متری (مش محوری چهارم) از کف قلب با احتساب طول فعال قلب می‌باشد. همچنین دمای آب خنک‌کننده در گرم‌ترین مجتمع سوخت قلب از مقدار ۵۶۱,۵۶ درجه کلوین در ورود به مقدار ۵۹۹,۸ درجه کلوین در خروج خواهد رسید.

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] FDS Team, china, SuperMC User Manual-EN.
- [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 interiors 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] ENEL SpA, Milano, 2001, COBRA-EN Manual: Code System for Thermal-Hydraulic Transient Analysis of Light Water Reactor Fuel Assemblies and Cores, OAKRIDGE national laboratory