



## محاسبه نوترونی و بررسی ارزش میله کنترل قلب راکتور پیشرفته ماژولار CAREM-25 با استفاده از

### کد MCNPX 2.6

زارع گنجاوردی، سعید\* - پذیرنده، علی

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

#### چکیده:

راکتور CAREM-25، از انواع راکتورهای ماژولار کوچک پیشرفته آب سبک تحت فشار و تنها راکتور از این نوع در دنیا با غنای سوخت زیر ۴٪ و قدرت زیر ۳۰ مگاوات الکتریک می‌باشد که در کشور آرژانتین طراحی شده است. با توجه به این که ساخت راکتور هنوز به اتمام نرسیده، در این مقاله برای اولین بار برخی از پارامترهای نوترونی در حالت‌های مختلف نظیر ضریب تکثیر، توزیع شار نوترونی، ارزش میله کنترل، توزیع محوری توان و ضریب قله قدرت محوری و مجتمع‌ات سوخت با استفاده از کدهای MCNPX 2.6 و WIMS-D5 & CITATION-LDI2 بدست آورده شد. در نهایت، اطلاعات مربوط به مدلسازی‌ها با یکدیگر و با مقالات و گزارشات موجود مطابقت داده شد.

کلمات کلیدی: CAREM-25، MCNPX 2.6، WIMS-D5 & CITATION-LDI2

## Neutronic Calculations and Investigation on the Worth of Control Rods in CAREM-25 Advanced Modular Reactor Using MCNPX 2.6 Code

Zare Ganjaroodi, Saeed\*; Pazirandeh, Ali

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

#### Abstract:

CAREM-25 is one of the Small Modular Reactors in type of pressurized water reactor that designed in Argentina with enrichment of fuel less than 4% and 30 MWe. Considering that the reactor has not yet been constructed completely, in this paper neutronic parameters such as K-Factor, neutron flux distribution, worth of control rods, axial power distribution in the core and power peaking factors of core and fuel assemblies were calculated by MCNPX 2.6 and WIMS-D5 & CITATION-LDI2 codes. At the end, calculated parameters were compared and checked with available data and reports.

Keywords: CAREM-25, MCNPX 2.6, WIMS-D5 & CITATION-LDI2



#### مقدمه:

با توجه به مزیت‌های متعدد راکتورهای ماژولار با اندازه‌های کوچک (کمتر از ۳۰۰ مگاوات الکتریک) و متوسط (کمتر از ۷۰۰ مگاوات الکتریک) اعم از اندازه، حمل و نقل آسان، ماژولار بودن، راندمان و ایمنی بالا، صرفه اقتصادی و ... می‌تواند نقش مهمی در بسیاری از صنایع و سیستم‌ها نظیر آب شیرین‌کن‌های هسته‌ای، سیستم‌های تولید حرارت و هیدروژن، زیردریایی‌های هسته‌ای و ... داشته باشند [۱].

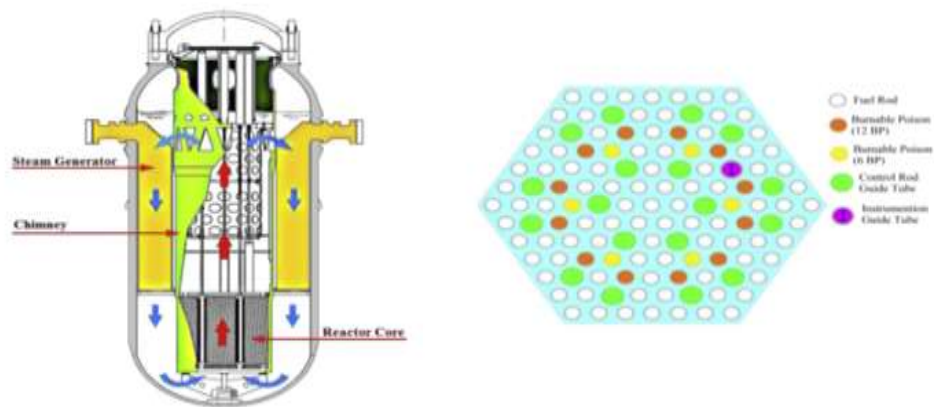
راکتورهای ماژولار کوچک که در انواع مختلف طراحی و ساخته می‌شوند، جز راکتورهای پیشرفته و نسل جدید بوده که در بسیاری از کشورهای پیشرو در صنعت هسته‌ای در جهان مانند آمریکا، روسیه و ژاپن در حال طراحی و ساخت هستند [۱]. راکتور CAREM-25 کشور آرژانتین، یک راکتور ماژولار کوچک آب سبک تحت فشار بوده که توسط سازمان انرژی اتمی آرژانتین (CNEA) با همکاری شرکت‌های 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]، [۴]. 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 [۷]، [۸]. بنا بر گزارشات سازمان انرژی اتمی آرژانتین، اولین سوخت‌گذاری این راکتور در سال ۲۰۱۸ انجام می‌شود [۱].

#### روش کار:

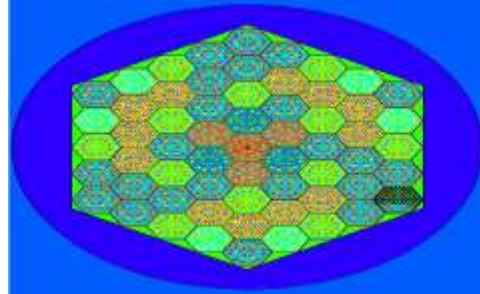
راکتور ماژولار کوچک CAREM-25 کشور آرژانتین، یک راکتور آب سبک تحت فشار یکپارچه با قدرت حرارتی ۱۰۰ مگاوات و قدرت الکتریک ۲۷ مگاوات می‌باشد. این راکتور دارای ۶۱ مجتمع سوخت هگزگونال بوده که هر کدام دارای ۱۰۸ میله سوخت، ۱۸ میله کنترل و یک کانال اندازه‌گیری است. سوخت این راکتور اکسید اورانیوم با غناهای ۱٫۸٪ 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 به صورت مخلوط با سوخت در برخی مجتمع‌های سوخت و

میله های کنترل تنظیمی و ایمنی 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]، [۹].

در این مقاله، قلب راکتور توسط کدهای MCNPX 2.6 و WIMS-D5 & CITATION-LDI2 در حالت‌های مختلف ورود میله‌های کنترل تنظیمی و ایمنی در طول فعال همراه با بازتابنده قلب، منطبق بر داده‌های گزارشات کشور آرژانتین مدل‌سازی گردید و پارامترهای نوترونی قلب نظیر ضریب تکثیر، توزیع شار نوترونی، توزیع توان، ضریب قله قدرت محوری و مجتمع‌ات سوخت و ارزش انتگرالی و دیفرانسیلی میله‌های کنترل تنظیمی محاسبه شد. مدل‌سازی در این مقاله و استخراج اطلاعات با استفاده از کد MCNPX 2.6 با استفاده از چشمة‌های بحرانی با تعداد ذرات ۷۰۰۰۰۰ در ۲۰۰ سیکل انجام شد. با توجه به مدل‌سازی، انحراف از معیار محاسبات در حدود ۰٫۰۰۰۳۰ و خطای اندازه‌گیری پارامترها نوترونی نظیر شار و توان کمتر از ۳٪ می‌باشند. همچنین استفاده از کدهای WIMS-D5 & CITATION-LDI2 تنها به منظور محاسبه ضریب تکثیر و راکتیویته مازاد در حالت‌های مختلف ورود میله‌های کنترل جهت صحت‌سنجی با مقالات مشابه در این مقاله می‌باشد.



شکل (۱): نمایی از محفظه تحت فشار راکتور و مجتمع سوخت CAREM-25 [۱۰]



شکل (۲): نمایی از مجتمعات سوخت در قلب راکتور شبیه‌سازی شده توسط کد MCNPX 2.6

## نتایج:

### محاسبه ضریب تکثیر

با توجه به محاسبه کد، قلب این راکتور با وارد کردن ۱۰٪ میله‌های کنترل تنظیمی ضریب تکثیر  $1/0.4576$  در کد MCNPX 2.6 و  $1/0.4832$  در کدهای WIMS-D5 & CITATION-LDI2 دارد، بنابراین، راکتیویته مازاد تقریبی آن نیز  $45 \text{ mK}$  می‌شود که این مقدار با نتایج موجود در مقالاتی که مدل‌سازی در شرایط تقریباً برابر با استفاده از کدهای MCNPX در کتابخانه سطوح مقاطع ENDF/B-V داده های 42.C, 51.C, 52.C, 70.C انجام شده اند، مطابقت دارد [۹]، [۱۰].

دلیل اختلاف در مقدار ضریب تکثیر، تنها مربوط به اختلاف جزئی در مدل‌سازی در انتخاب درصد وزنی مواد گادولونیوم اکسید می‌باشد. با توجه به این که این راکتور هنوز ساخته نشده است، در گزارش کشور آرژانتین، نسبت سوخت به گادولونیوم اکسید در میله‌ها، ۹۲٪ به ۸٪ (مدل‌سازی کنونی انجام شده) می‌باشد. این در حالیست که در مرجع شماره [۱۰]، از نسبت ۹۲/۵ به ۷/۵ استفاده شده است که این مقدار در گزارشات به مقدار استفاده شده در این مقاله تغییر یافته است.



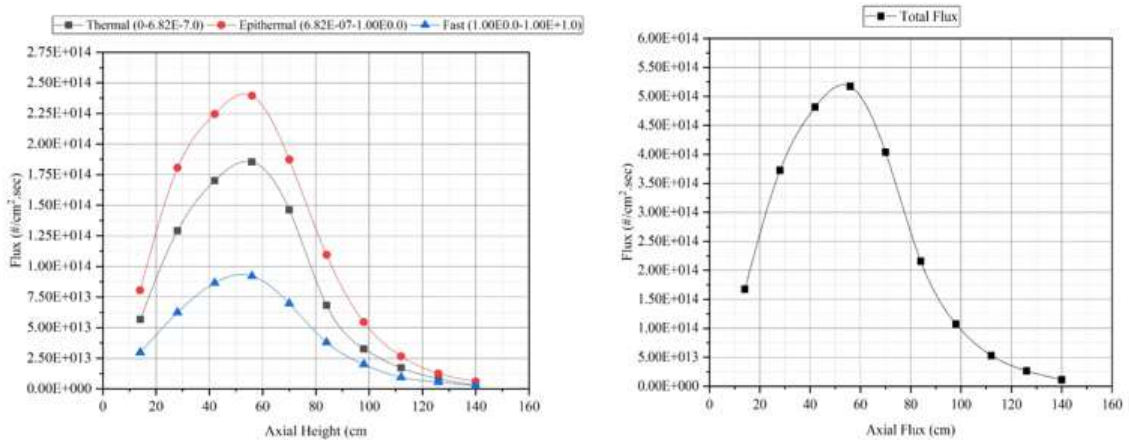
جدول (۱): مقادیر ضریب تکثیر و راکتیویته مازاد در شرایط مختلف ورود میله‌های کنترل تنظیمی

مقدار محاسبه شده در کد MCNPX	مقدار محاسبه شده در کد WIMS-D5 & CITATION-LDI2	مقدار موجود در مقالات و گزارشات	پارامترهای مورد بررسی
ورود ۵۰٪ میله‌های کنترل تنظیمی و ۱۰٪ میله‌های کنترل ایمنی k=1.00176 0.00028	ورود ۵۰٪ میله‌های کنترل تنظیمی و ۱۰٪ میله‌های کنترل ایمنی k=1.00263	ورود ۵۰٪ میله‌های کنترل تنظیمی و ۱۰٪ میله‌های کنترل ایمنی [۹]	شرط رسیدن به حالت بحرانیت
k=1.04576 0.00037 Ex-Reactivity =43.75 (mk)	k=1.04832 Ex-Reactivity =46.09 (mk)	k=1.05171 0.0007 Ex-R =49 (mk) [۱۰]	ضریب تکثیر در حالت ورود ۱۰٪ میله کنترل تنظیمی

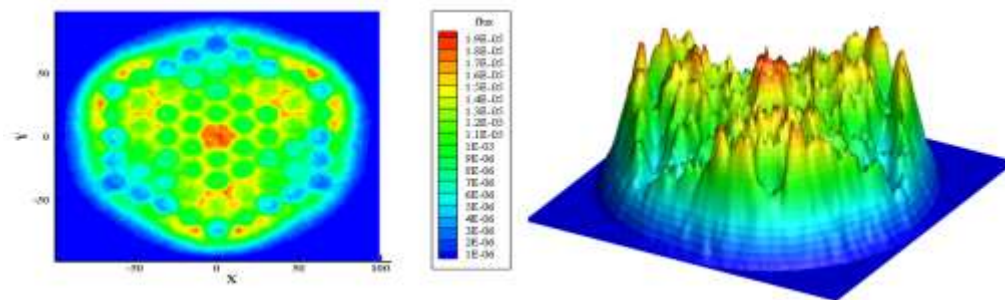
همچنین اگر محاسبه تنها برای هند سه قلب بدون وجود آب به عنوان بازتابنده انجام گیرد، قلب راکتور تنها دارای  $mk$  ۲۷ راکتیویته مازاد خواهد بود. بنابراین، حجم قابل توجه آب به عنوان بازتابنده تاثیر زیادی در جمعیت نوترونی قلب این راکتور داشته و می‌تواند راکتیویته مازاد را در حدود  $mk$  ۲۰ افزایش دهد.

#### محاسبه شار نوترونی

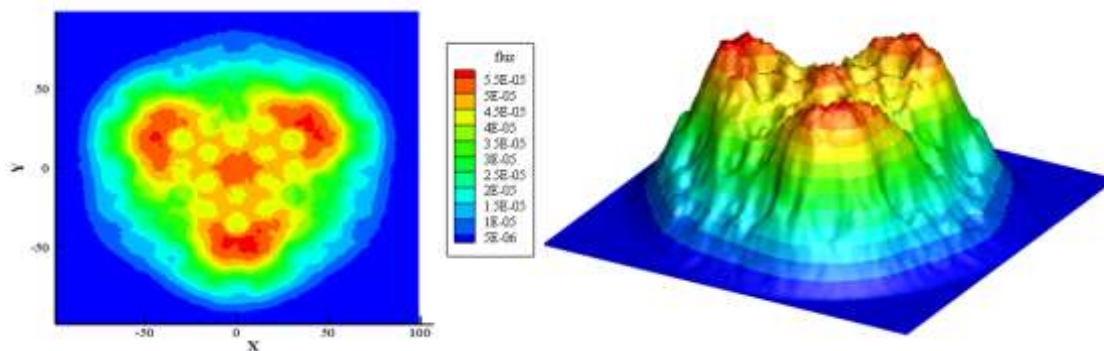
با توجه به محاسبه شار با تعداد  $7000000$  ذره ردگیری در  $200$  سیکل ( $50$  سیکل اول خارج از محاسبه) در کانال اندازه‌گیری مجتمع مرکزی در سه بازه انرژی در حالت بحرانیت مشخص می‌گردد که، بیشینه شار حرارتی مربوط به ارتفاع حدود  $57$  سانتی‌متری از کف قلب می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ورود میله‌های کنترل به درون قلب، ارتفاع بیشینه شار را در حدود  $40\%$  به سمت پایین انتقال می‌دهد [۹]، [۱۰].



شکل (۳): توزیع محوری شار حرارتی و کل در قلب راکتور CAREM-25 با استفاده از کد MCNPX 2.6



شکل (۴): شار نوترونی در بازه حرارتی در کل قلب به ازای یک ذره نوترون در حالت بحرانی

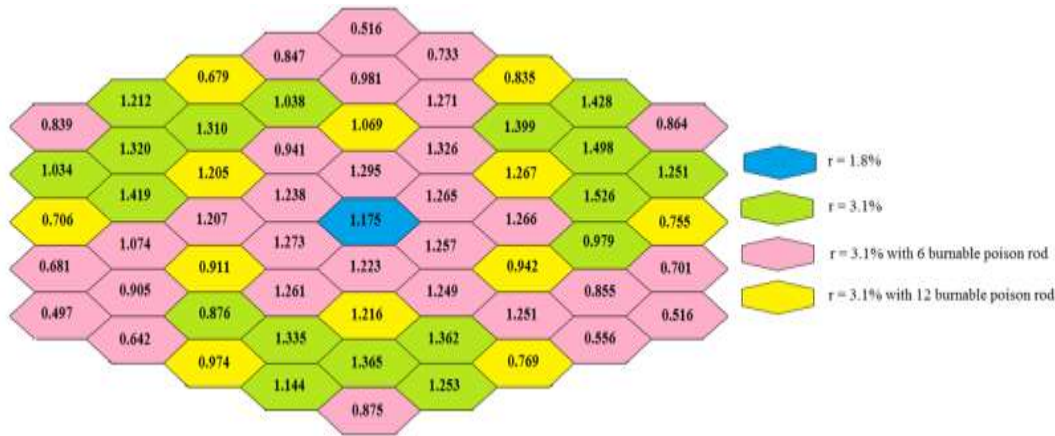


شکل (۵): شار نوترونی کل در کل قلب به ازای یک ذره نوترون در حالت بحرانی

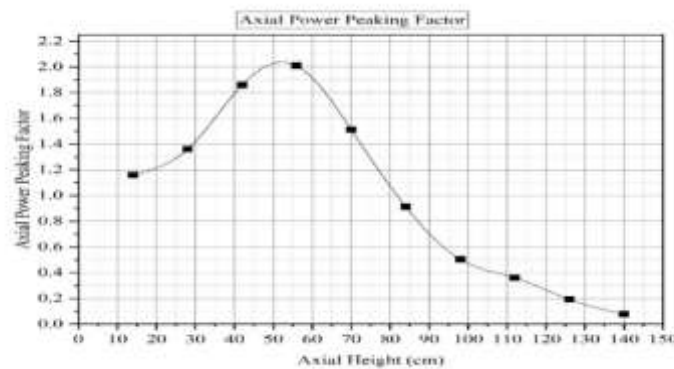
همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، توزیع شار نوترونی در این راکتور دارای تقارن یک سوم بوده و علت افت شار در برخی از نقاط، ورود میله های کنترل و سموم گادولونیوم اکسید با سطح مقطع جذب بالا می‌باشد.

### محاسبه ضریب قله قدرت

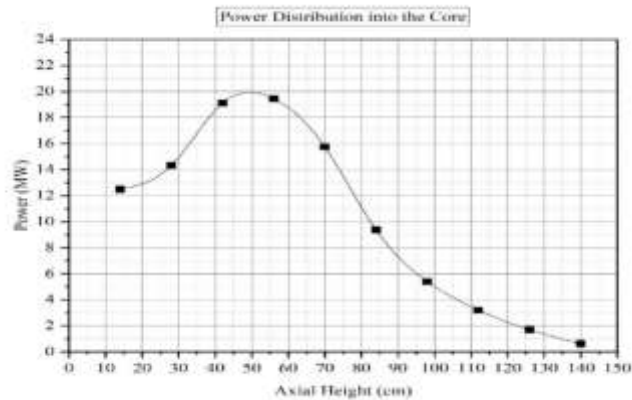
با توجه به مدل‌سازی قلب در ابتدای سیکل در حالت بحرانی، ضریب قله قدرت مجتمعات سوخت محاسبه شد. با توجه به شکل (۵)، کمترین مقدار ضریب قله قدرت مجتمعات ۰,۴۹۷ می‌باشد. بیشترین مقدار نیز ۱,۴۱۹ بوده که مربوط به مجتمعی است که دارای غنای ۳,۱٪ بوده و گادولونیوم اکسید در آن وجود ندارد.



شکل (۶): ضریب قله قدرت مجتمعات سوخت راکتور CAREM-25



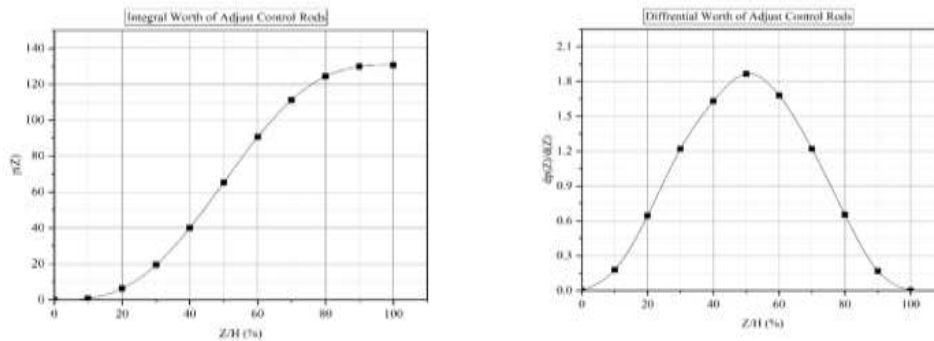
شکل (۷): ضریب قله قدرت محوری قلب راکتور CAREM-25



شکل (۸): توزیع محوری توان در قلب راکتور CAREM-25

### محاسبه ارزش انتگرالی میله کنترل تنظیمی

مجموع راکتیویته در طول میله کنترل تا نقطه مورد نظر را از نقطه نظر تئوری، ارزش انتگرالی و راکتیویته موجود در هر واحد از طول میله کنترل را ارزش دیفرانسیلی میله کنترل گفته می‌شود. در ادامه، نمودار ارزش انتگرالی و دیفرانسیلی میله کنترل تنظیمی در قلب راکتور CAREM-25 رسم شده است. با توجه به محاسبه کد، ارزش کل راکتیویته میله‌های کنترل تنظیمی نیز،  $130,74$  mK می‌باشد. با توجه به نمودار، تقریباً در وسط ارتفاع موثر، مقدار ارزش دیفرانسیلی به مقدار بیشینه می‌رسد.



شکل (۸): نمودار ارزش انتگرالی و دیفرانسیلی میله کنترل تنظیمی راکتور CAREM-25



## بحث و نتیجه گیری:

هدف از این تحقیق، انجام محاسبه نوترونی و بررسی ارزش میله‌های کنترل قلب راکتور CAREM-25، با استفاده از شبیه سازی با کد مونت کارلو MCNPX 2.6 (همچنین کدهای WIMS-D5 & CITATION-LDI2 تنها جهت محاسبه ضریب تکثیر به منظور صحت سنجی با مرجع) می‌باشد. نتایج محاسبه کد حاکی از آن است که 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. همچنین حجم قابل توجه آب به عنوان بازتابنده، راکتیویته مازاد قلب را تا حدود ۲۰ mK افزایش داده و تاثیر زیادی در جمعیت نوترونی قلب دارد. توزیع شار محوری نیز نشان می‌دهد که بیشینه شار حرارتی در زمان بحرانی در ارتفاع حدود ۵۷ سانتی متری از کف قلب راکتور می‌باشد و ورود میله‌های کنترل می‌تواند ارتفاع بیشینه شار را در حدود ۴۰٪ به سمت کف قلب انتقال دهد. بنا بر محاسبه کد، ارزش کل میله کنترل تنظیمی ۱۳۰,۷۴ mK می‌باشد. با توجه به مدل سازی، بیشترین و کمترین مقدار ضریب قله قدرت مربوط به مجتمعات سوخت، به ترتیب ۱,۴۱۹ و ۰,۴۹۷ می‌باشند. ذکر این نکته ضروری است که جهت برآورد کاملتر از رفتار نوترونی، تحلیل رفتار ترموهیدرولیک با استفاده از مقایسه نتایج دو کد ترموهیدرولیکی انجام شده است.

## مراجع:

- [1] NEA (2011) Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors, NUCLEAR ENERGY AGENCY, OECD.
- [2] IAEA (2015), Advanced in Small Modular Reactors Technology Developments, A supplement to IAEA advanced reactors information system (ARIS).
- [3] CNEA and INVAP (2000) CAREM 25 - Informe Consolidado.
- [4] 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.
- [5] Delmastro, D., et al., (2002), 'CAREM: An Advanced Integrated PWR'. In IAEA, Small and Medium Sized Reactors: Status and Prospects, IAEA.
- [6] Mazzi, R., et al. (2002), 'CAREM Project Development'. In IAEA, Small and Medium Sized Reactors: Status and Prospects, IAEA.
- [7] H. Boado Magana, D., et al. (2012) CAREM Prototype Construction and Licensing Status, IAEA.



- [8] BoadoMagan, H., et al. (2011), 'CAREM Project Status', Science and Technology of Nuclear Installations.
- [9] Villarino, E., Hergenreder D., Matzkin, S. (2012) NEUTRONIC CORE PERFORMANCE OF CAREM-25 REACTOR, INVAP, Argentina.
- [10] S. Tashkor, E. Zarifi, M. Naminazari, (2017), Neutronic simulation of CAREM-25 small modular reactor, progress in nuclear engineer.
- [11] 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, Argantina.