فناوری و انرژی هسته ای

Journal home page: http://Nucte.sbu.ac.ir

فصلنامه فناوری و انرژی هسته ای، دوره دوم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲، ۱۱-۱۷

بررسی نقش بازتابنده در پارامترهای نوترونیک و کنترلی قلب راکتور ماژولار کوچک با استفاده از مدلسازی به روش مونت کارلو

سعید زارع گنجارودی*[۱]، حسین خامه[۱]، نازنین زهرا راعی[۱]، احسان ظریفی[۲]، کامران سپانلو[۲]

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

[۲] سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته ای، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۱۴

چکیده

به دلیل مزایای فراوان راکتورهای ماژولار کوچک اعم از ایمنی بالا، تجاری سازی راحت تر، راندمان کاری بالاتر و دیگر موارد، جز برنامه های طراحی، توسعه و ساخت بسیاری از کشورهای جهان، به خصوص کشورهای پیشرو در صنعت هسته ای در برنامه تولید انرژی پایدار، ایمن و اقتصادی می باشد. از این رو، در این مقاله، سعی بر آن شده است تا نقش بازتابنده در تعیین پارامترهای کنترلی و نوترونی قلب راکتور ماژولار کوچک پیشرفته CAREM-25 با مدلسازی با استفاده ازکد MCNPX2.7.0 را تحلیل نمود. در این راستا، قلب راکتور در دو حالت وجود و عدم وجود بازتابنده مدلسازی گردید تا ضریب تکثیر، راکتیوته مازاد و توزیع شار نوترون در دو حالت محاسبه و مقایسه گردد. نتایج نشان داد، حجم قابل توجه آب به عنوان بازتابنده تاثیر زیادی در جمعیت نوترونی قلب این راکتور داشته و می تواند راکتیویته مازاد را در حدود 20 (mK) افزایش دهد.

واژه های کلیدی: راکتور ماژولار کوچک، CAREM-25، MCNPX2.7.0، شار نوترون.

۱- مقدمه

انرژی هسته ای نقش عمده ای در تامین انرژی کشورهای مختلف، به خصوص کشورهای پیشرفته سرتاسرجهان از قبیل آمریکا، روسیه، فرانسه و دیگر کشورها دارد. اهمیت و کاربرد روز افزون انرژی و منابع مختلف تهیه آن، در حال حاضر جز رویکردهای اصلی دولت ها و یکی از مظاهر مهم زندگی مدرن می باشد. به عبارت دیگر، از مسائل مهم هر کشور در جهت توسعه اقتصادی و اجتماعی، بررسی، اصلاح و استفاده بهینه از منابع موجود انرژی در آن کشور است. امروزه بحران های سیاسی و اقتصادی، و مسائلی نظیر محدودیت ذخایر فسیلی، نگرانی های زیست محیطی، ازدیاد جمعیت و رشد اقتصادی تمام فکر اندیشمندان را در یافتن راهکارهای مناسب، در حل معضلات انرژی در جهان به خود مشغول کرده است. (زارع گنجارودی.۱۳۹۸)

استفاده از راکتورهای هسته ای برای تولید انرژی در زمینه مختلف همواره، یک پاسخ برای یافتن انرژی برای کشورهای مختلف، به خصوص کشورهای پیشرو در این زمینه بوده است. استفاده از انرژی هسته ای نیز مانند دیگر منابع انرژی دارای نکات مثبت و منفی بوده که دانشمندان در این زمینه سعی بر آن دارند تا با به حداقل رساندن نقاط منفی در استفاده از این منبع انرژی، انرژی هسته ای را به یکی از ایمن ترین و به صرفه ترین منابع انرژی مبدل سازند. در مسیر توسعه و پیشرفت در این زمینه همواره کارهای متفاوتی صورت

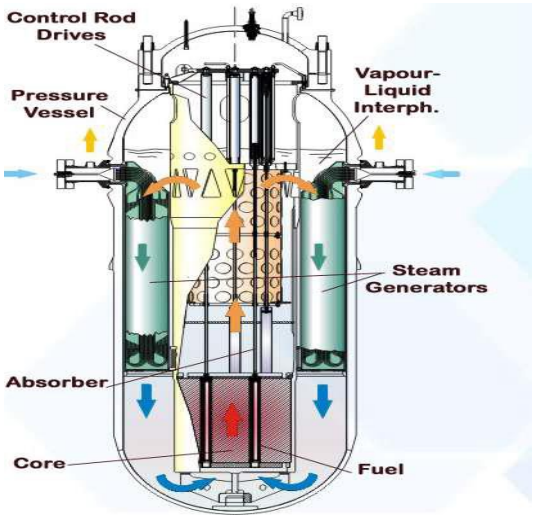
* Corresponding Author E-mail: szareganjaroodi@yahoo.com

گرفته است که یکی از این موارد استفاده از راکتورهای ماژولار اندازه متوسط یا کوچک می باشد. این گونه راکتورها که بنا به تعریف آژانس بین المللی انرژی اتمی دارای توان محدود می باشند دارای مزیت های فراوان از قبیل ایمنی بالاتر، امنیت هسته ای بیشتر، کاربردهای بیشتر، هزینه کمتر، راندمان کاری بالاتر و دیگر موارد می باشند. هم اکنون بسیاری از انواع راکتورهای ماژولار کوچک در دنیا، در حال طراحی، توسعه و ساخت می باشند تا آینده راکتورهای هسته ای را در بسیاری از نقاط دنیا بسازند. (زارع گنجارودی.۱۳۹۸, IAEA group, 2014)

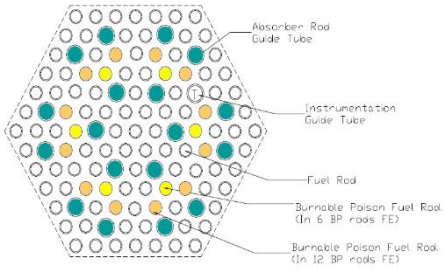
واژه SMR ، برگرفته شده از عبارت Small Modular Reactor به معنای راکتورهای ماژولار کوچک می باشد. بر طبق تعریف آژانس بین المللی انرژی اتمی، راکتورهای ماژولار کوچک و متوسط دارای قدرت محدود بوده که در گزارشات، توان الکتریک کمتر از ۳۰۰ را برای راکتورهای ماژولار کوچک، و توان الکتریک در محدوده ۳۰۰ تا ۷۰۰ را برای راکتورهای متوسط دانسته اند. بنابراین واژه SMR مخفف عبارتی است که برای توصیف یک راکتور ماژولار کوچک و یا متوسط در صنعت هسته ای مورد استفاده قرار می گیرد. این گونه از راکتورها در ابعادی طراحی و ساخته می شوند که در کارخانه موردنظر به صورت ماژولار مونتاژ و سپس به محل و نیروگاه موردنظر حمل می گردند, IAEA group, 2014)، IAEA group, 2018))

راکتور CAREM یکی از اولین راکتورهای ماژولار کوچک در دنیا می‌باشد که بنای اولیه و مفاهیم آن در سال ۱۹۸۴ در یکی از کنفرانس های آژانس بین المللی انرژی اتمی گذاشته شد. بعد از سال ها تحقیق و پژوهش در این زمینه در سال ۲۰۰۱ تصمیم به طراحی مفهومی و آزمایشات مختلف در این زمینه برای راکتور CAREM به‌عنوان اولین راکتورهای نسل چهار گرفته شد که بار مسئولیت توسعه این راکتور بر عهده CNEA که بیانگر نام همان سازمان ملی انرژی اتمی آرژانتین است، بود. سپس در سال ۲۰۰۹ میلادی، سازمان ملی انرژی اتمی آرژانتین اخبار اولیه مربوط به آنالیز ایمنی این راکتور را به سازمان مربوطه در کشور آرژانتین جهت گرفتن گواهینامه ساخت ارائه داد. سپس در سال های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ کارهای عمرانی مربوط به ساخت این راکتور آغاز شد و در فوریه سال ۲۰۱۴ ساخت سایت نیروگاهی و راکتور به صورت رسمی آغاز گشت و طبق پیش‌بینی‌های تئوری انجام شده، در اواسط سال ۲۰۱۸ اولین بارگذاری سوخت در این راکتور انجام خواهد شد. (IAEA group, 2018)و (CNEA and INVAP, 2000), و (ISHIDA, 2000)

با توجه به اینکه این راکتور هنوز ساخته نشده است و بعضی از پارامترها فنی طراحی نظیر هندسه، غنای سوخت، بازتابنده و دیگر موارد مشمول تغییرات خواهد شد. در این مقاله بر اساس آخرین گزارشات رسمی سازمان انرژی اتمی کشور آرژانتین اقدام به محاسبه پارامترهای مختلف گردیده است. اولین قدم در هر طراحی، طراحی مفهومی می‌باشد. یعنی انتظاراتی که از طرح مورد نظر وجود دارد و وظیفه‌ای که برای آن درنظر گرفته شده در این مرحله درنظر گرفته می‌شود. در این صورت روش ساخت، نوع طراحی را تحت تاثیر قرار داده و متناسب با آن طرح، نقشه مورد نظر استخراج می‌شود. پس از طراحی، نوبت به شبیه‌سازی و تحلیل کامپیوتری می‌رسد. که مهمترین فعالیت محسوب می‌شود. با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری پیشرفته تمامی فرآیندها و مکانیزم ها تحلیل شده و نتایج مورد نقد و بررسی قرار می‌گیرد. اطمینان نهایی هنگامی حاصل می‌شود که نمونه‌های واقعی از طرح ساخته شده و آزمایش های لازم بر روی آن ها انجام گیرد. شکل (۱)، نمایی از کل محفظه راکتور یکپارچه CAREM-25 را نشان می دهد.



شکل ۱. نمایی از محفظه تحت فشار راکتور ماژولار کوچک CAREM-25 (Osvaldo Calzetta Larrieu, 2014)

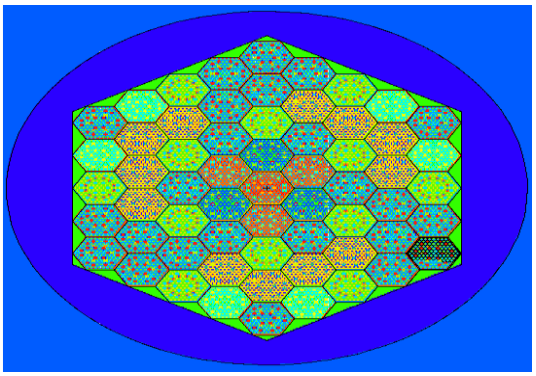


شکل ۲. نمایی از جیدمان میله ها در مجتمع سوخت قلب راکتور ماژولار کوچک CAREM-25 (H. BoadoMagan.et al.2011)

۲. روش انجام تحقیق

راکتور ماژولار کوچک CAREM-25 کشور آرژانتین، یک راکتور آب سبک تحت فشار یکپارچه با قدرت حرارتی ۱۰۰ مگاوات و قدرت الکتریک ۲۷ مگاوات می باشد. این راکتور دارای ۶۱ مجتمع سوخت هگزاگونال بوده که هر کدام دارای ۱۰۸ میله سوخت، ۱۸ میله کنترل و یک کلنال اندازه گیری است. سوخت این راکتور اکسید اورانیوم با غناهای ۱.۸٪ و ۳.۱٪ می باشد. در این راکتور از هیچ کنترل-کننده شیمیایی نظیر اسید بوریک محلول در آب استفاده نمی شود 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 [۱۱]) به صورت مخلوط با سوخت در ۲۴ مجتمع سوخت و میله های کنترل تنظیمی و ایمنی در ۲۵ مجتمع سوخت انجام می گیرد. همچنین دمای ورود و خروج خنک-کننده از قلب به ترتیب ۲۸۴ و ۳۲۶ درجه سانتی گراد به صورت تکفاز در فشار ۱۲.۲۵ مگاپاسکال می باشد.(H. BoadoMagan. et al.2011) و (Diego Ferraro, 2009) و (S. Tashkor et al.2017)

در این پژوهش ابتدا هندسه قلب و سپس مجتمعات سوخت و تمامی میله های موجود در سلول های مشخص مدلسازی گردید و سپس مواد و دما در کتابخانه های مورد نظر موجود تعیین گردید. در نهایت، با تعیین تالی های مشخص و چشمه های بحرانیت، برنامه اجرا شد تا نتایج حاصل از کد حاصل از دو نوع مدلسازی (وجود و عدم وجود بازتلنده نوترونی) مورد ارزیابی و مقایسه قرار گیرد. شکل (۳)، نمایی قلب راکتور مدلسازی شده با استفاده از کد MCNPX2.7.0 را نشان می دهد.



شکل ۳. نمایی قلب راکتور مدلسازی شده با استفاده از کد MCNPX2.7.0

جدول ۱. مشخصات فنی قلب راکتور ماژولار کوچک CAREM-25 (IAEA group, 2014)

Parameter	Value
Technology developer	**CNEA**
Country of origin	**Argentina**
Reactor type	**Integral PWR**
Electrical capacity (MW)	**27**
Thermal capacity (MW)	**100**
Design life (year)	**60**
Coolant/moderator	**Light water**
Primary circulation	**Natural circulation**
Main reactivity control mechanism	**Only by control rods**
RPV height (m)	**11**
RPV diameter (m)	**3.2**
Coolant temperature, core inlet (C)	**326**
Coolant temperature, core outlet (C)	**284**
Power conversion process	**Indirect Rankine cycle**
Passive safety features	**Yes**
Active safety features	**Yes**

Fuel type/assembly array	**UO2 pellets/hexagonal type**
Fuel active length	**1.4**
Number of fuel assembly	**61**
Fuel enrichment (%)	**3.1 (prototype)**
Fuel burn-up (GWd/ton)	**24 (prototype)**
Modules per plant	**1**

۳. بحث و نتایج

۱.۳. محاسبات ضریب تکثیر نوترون

نتایج کد همراه با انتخاب کتابخانه سطوح مقاطع ENDF/B-V داده های ۷۰.C.۴۲, 52.C, 51.C, C در کد MCNPX2.7.0 نشان داد که قلب راکتور در صورت عدم وجود بازتابنده با ورود ده درصد میله های کنترل تنظیمی دارای ضریب تکثیر ۱/۰۲۷۲۱ می باشد. این در حالیست که در شرایط مشابه با حضور بازتابنده این مقدار به ۱/۰۴۵۷۶ می رسد. جدول (۲)، مقادیر ضریب تکثیر قلب راکتور ماژولار کوچک CAREM-25 در شرایط مختلف را نشان می دهد. لازم به ذکر است که، محاسبات در حلت وجود بازتابنده نوترونی در اطراف قلب همخوانی مناسب با نتایج گذشته دارد.

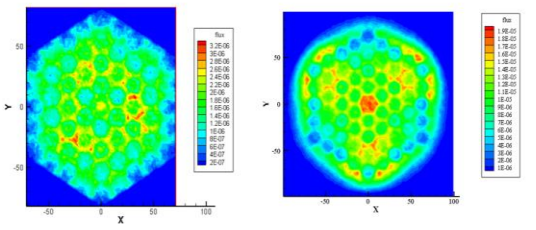
جدول ۲. مقادیر ضریب تکثیر قلب راکتور ماژولار کوچک CAREM-25 در شرایط مختلف

پارامتر	شرایط محاسبات	کد SuperMC	مراجع
ضریب تکثیر	وجود بازتابنده	1.04576 0.00055 Ex. R= 43.75 (mK)	1.05123 [11-10]
ضریب تکثیر	عدم وجود بازتابنده	1.02721 0.00063 Ex. R= 26.48 (mK)	-

همان طور که واضح است، وجود باتابنده نوترونی می تواند به اقتصاد نوترونی قلب راکتور کمک کرده و مانع از عدم فرار نوترون گردد. از این رو، با افزایش جمعیت نوترونی، ضریب تکثیر و در نتیجه راکتیویته مازاد افزایش خواهد یافت. همچنین، قلب راکتور در حالت عدم وجود بازتابنده با ورود ۱۰٪ میله های کنترل ایمنی و ۴۰٪ میله های کنترل تنظیمی به حالت بحرانیت می رسد. این در حالیست که، قلب راکتور در حالت وجود بازتابنده با ورود ۱۰٪ میله های کنترل ایمنی و ۵۰٪ میله های کنترل تنظیمی به حالت بحرانیت خواهد رسید.

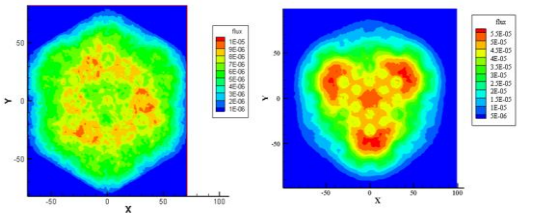
۲.۳. محاسبات توزیع شار نوترون

با ورود میله های کنترل به درون قلب جهت بحرانی نمودن قلب، ارتفاع بیشینه شار نوترون را در حدود ۴۰٪ به سمت پایین انتقال می-یابد [۱۱-۱۰]. مطابق شکل های (۳) و (۴)، توزیع شار نوترون در این راکتور دارای تقارن یک سوم که بیشینه شار نوترون در هر دو حالت وجود و عدم وجود بازتابنده مربوط به مجتمعات مرکزی می باشد. این در حالیست که بیشینه شار نوترون در حالت وجود بازتابنده نوترونی در اطراف قلب به مقدار (#/cm2.sec) 1.60 E+14 می رسد. از سوی دیگر، در شرایط برابر، مقدار بیشینه شار نوترون در حالت عدم وجود بازتابنده معادل (#/cm2.sec) 2.69 E+13 می باشد.



(b) (a)

شکل ۴. نمایی دو بعدی از توزیع شار نوترون حرارتی در قلب راکتور در دو حالت وجود (a) و عدم وجود بازتابنده نوترونی (b)

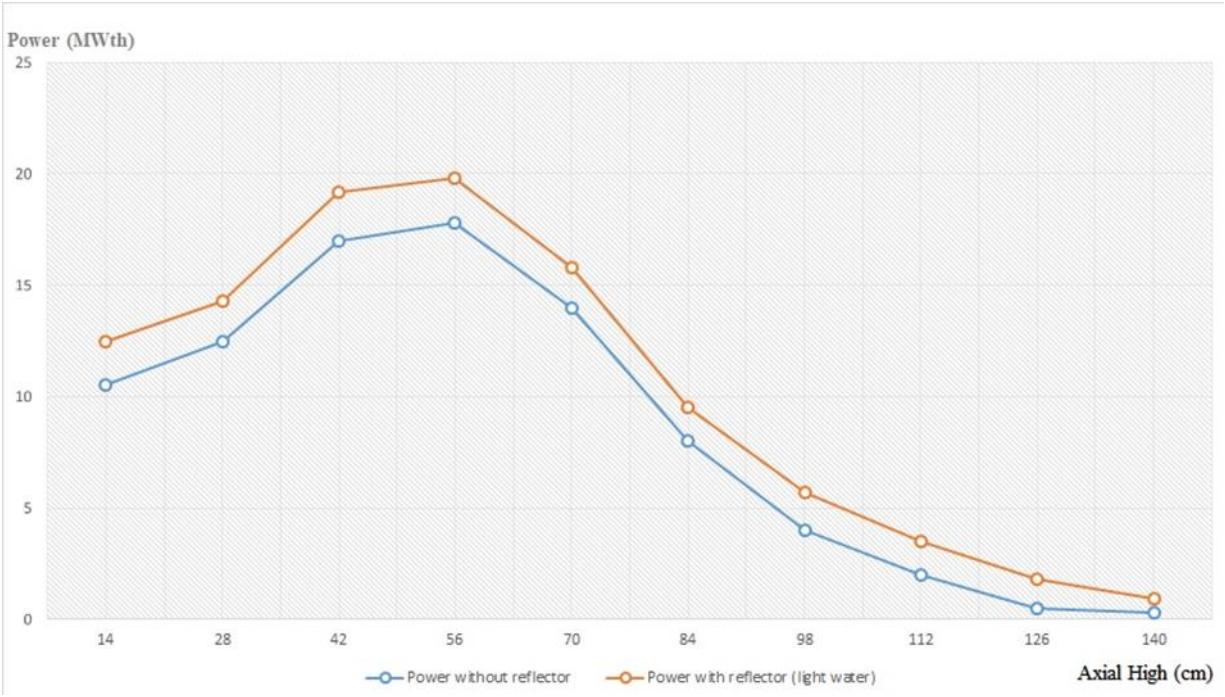


(b) (a)

شکل ۵. نمایی دو بعدی از توزیع شار نوترون کل در قلب راکتور در دو حالت وجود (a) و عدم وجود بازتابنده نوترونی (b)

۳.۳. محاسبات توان

مطابق شـکل (۶)، در صـورت وجود بازتابنده، توان حرارتی تولیدی قلب در حدود ۱۵ مگاوات افزایش می یابد. دلیل این امر، وجود حجم قابل توجهی از آب به عنوان بـازتـابنـده بوده کـه مـانع فرار نوترون و افزایش کندکنندگی می شـود. از این رو، اقتصـاد نوترونی بهبود یافته، نرخ شـکافت بالا رفته و توان حرارتی افزایش می یابد.



شکل ۶. توزیع توان تولیدی در قلب راکتور در دو حالت وجود و عدم وجود بازتابنده نوترونی

۴. نتیجه گیری

هدف از ارائه این مقاله، بررسـی نفش بازتابنده نوترونی در پارامترهای نوترونیک و کنترلی قلب راکتور ماژولار کوچک با اسـتفاده از مدلسـازی به روش مونت کارلو با کد MCNPX2.7.0 می باشـد. برای این منظور، راکتور ماژولار کوچک پیشـرفته CAREM-25 در دو حلت وجود و عدم وجود بازتابنده مدلسـازی گردید و برخی از پارامترهای قلب نظیر، ضریب تکثیر، راکتیویته مازاد، توزیع شار نوترون و توزیع توان در دو حالت وجود و عدم وجود بازتابنده نوترونی محاسـبه و تحلیل گردید. محاسبات حاصل از مدلسازی های انجام شده نشان داد، وجود بازتابنده تاثیر زیادی در جمعیت نوترونی قلب این راکتور داشـته و می تولند راکتیویته مازاد را در حدود 20 (mK) افزایش دهد. بنابراین، حضـور آب سـبک در اطراف قلب به عنوان بازتابنده، شـار نوترون را افزایش می دهد. همچنین، در صـورت وجود بازتابنده، توان حرارتی تولیدی قلب در حدود ۱۵ مگاوات افزایش می یلبد و به مقدار حدود ۱۰۲ مگاوات حرارتی می رسـد. جهت برآورد دقیق و کامل تاثیر حضـور بازتابنده در اطراف قلب، انجام محاسـبات پارامترهای دینامیکی و ترموهیدرولیکی پیشنهاد می گردد.

مراجع

۱.زارع گنجارودی، س.، خوش ذات، ن.، (۱۳۹۸) ، راکتورهای ماژولار کوچک در صنعت هسته ای، سیمای دانش، تهران، ایران.

2. IAEA group, (2014), Advances in small modular reactor technology developments, IAEA TECDOC.

3. IAEA group, (2018), Advances in small modular reactor technology developments, IAEA TECDOC.

4. CNEA and INVAP, (2000), CAREM 25 - Informe Consolidado.

5. ISHIDA, (2000) “Development of New Nuclear Power Plant in Argentina”, Advisory Group Meeting on Optimizing Technology, Safety and Economics of Water Cooled Reactors, Vienna, Austria.

6. Osvaldo Calzetta Larrieu, (2014), CAREM Project, report of Atomic Energy, Argentina.

7.- H. BoadoMagan, D. F. Delmastro, M. Markiewicz, E. Lopasso, F. Diez, M. Gim´enez, A. Rauschert, S. Halpert, M. Chocr ´ on, J. C. Dezzutti, H. Pirani, C. Balbi, A. Fittipaldi, M. Schlamp, G.M. CAREM Murmis, and H. Lis, (2011), Project Status, Science and Technology of Nuclear Installations.

8. Villarino, E., Hergenreder D., Matzkin, S. (2012), Neutronic core performance of CAREM-25 core reactor, INVAP, Argentina.

9. 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 San Carlos Nacional de Energia Atomica, Bariloche, Argantina.

10. S. Tashkor, E. Zarifi, M. Naminazari, (2017), Neutronic simulation of CAREM-25 small modular reactor, journal of progress in nuclear engineer.

11. S. Zare Ganjaroodi and A. Pazirandeh, (2020), Neutronic study of CAREM-25 advanced small modular reactor using Monte carlo simulation, ATW Vol. 65, Issue 8/9 August/September.

12. Pelowitz, D.B, (2008), MCNPXTM Uses manual version 2.6.0, Los Alamos national laboratory

Nuclear Technology and Energy

Journal home page: http://Nucte.sbu.ac.ir

Nuclear Technology and Energy, Vol. 2, No. 1, Spring 2023, 11-17

Investigation of reflector role in neutronic and control parameters of small modular reactor core using Monte Carlo modeling

Saeed Zare Ganjaroodi[a], Hossein Khameh[a], Nazaninzahra Raei[a], Ehsan Zarifi[b], Kamran Sepanloo[b]

[a] Faculty of Engineering Science and Research Branch, Islamic Azad university, Tehran, Iran

[b] Reactor and Nuclear Safety Research school, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Received: 5 - 9 - 2021
Accepted: 5 - 9 - 2022

Abstract

Due to the many advantages of small modular reactors, including high safety, easier commercialization, and higher efficiency, are the design, development and construction plans of many countries, especially the leading countries in the nuclear industry in the Stable, safe and economical energy production program. Hence, in this paper, an attempt has been made to analyze the role of reflectors in determining the control and neutronic parameters of the CAREM-25 advanced small modular reactor core using the code MCNPX2.7.0. code modeling. In this regard, the reactor core was modeled in two states of presence and absence of reflector to calculate and compare the K-factor, excess reactivity and neutron flux distribution in the both two states. Results illustrated that a significant volume of water as a reflector had a large effect on the neutron population of the core of this reactor and could increase the excess reactivity by about 20 (mK).

Keywords: Small Modular Reactor (SMR), CAREM-25, MCNPX2.7.0, Neutron flux.

*** Corresponding Author E-mail: szareganjaroodi@yahoo.com**