

بررسی تاثیر بازتابنده در محاسبات پارامترهای نوترونیکی در راکتور ماژولار کوچک

سعید زارع گنجاوردی^{۱*}، حسین خامه^۱، نازنین زهرا راعی^۱، احسان ظریفی^۲، یاسر کاسه‌ساز^۲

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

۲. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

چکیده:

با توجه به عدم طراحی، توسعه و ساخت کامل بسیاری از راکتورهای ماژولار با اندازه‌های متوسط و کوچک در دنیا، در این مطالعه، برای اولین بار، انواع مواد بازتابنده‌ی نوترونی برای راکتور ماژولار کوچک پیشرفته CAREM-25 کشور آرژانتین با استفاده از شبیه‌سازی کد MCNPX2.7.0 ارزیابی شد. در این مقاله، با پیشنهاد مواد مختلف، پارامترهای نوترونیکی قلب راکتور اعم از ضریب تکثیر، راکتیویته مازاد، توزیع شار محوری و شعاعی در بازه‌های انرژی حرارتی، سریع و کل و نیز توزیع توان محوری محاسبه و تحلیل گردید. نتایج نشان داد که انتخاب برلیوم به عنوان بازتابنده‌ی نوترونی قلب راکتور، به دلیل تعداد گروه‌های بیشتر کسر نوترون‌های تأخیری، ضریب تکثیر قلب و در نتیجه راکتیویته مازاد قلب را افزایش می‌دهد. این در حالی است که آب با کندکنندگی بهتر و جذب نوترون کم‌تر، توزیع شار نوترونی بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین استفاده از انواع بازتابنده اعم از آب، گرافیت و برلیوم می‌تواند راکتیویته مازاد قلب را حدود ۲۵ (mk) و توان حرارتی را تا ۱۴ مگاوات حرارتی افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: راکتورهای ماژولار کوچک، پارامترهای نوترونیکی، راکتور CAREM-25، کد MCNPX2.7.0

Investigating the effect of reflector on the Neutronic parameters calculations of the small modular reactor

S. Zare Ganjaroodi^{1*}, H. Khomeh¹, N. Z. Raei¹, E. Zarifi², Y. Kasesaz²

1. Faculty of Engineering Science and Research Branch, Islamic Azad university, Tehran, Iran

2. Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran

Abstract:

Due to the lack of complete design, development and construction of many Small and medium sized Modular Reactors (SMR) in the world, in this study, some materials for the advanced small modular reactor CAREM-25 from Argentina were evaluated as the reflector using MCNPX2.7.0 code simulation for the first time. In this paper, by proposing different materials, the neutronic parameters of the reactor core, including K-factor, excess reactivity, axial and radial neutron flux distribution (thermal, epithermal and fast) and axial thermal power distribution were calculated and analyzed. Results illustrated that the selection of beryllium as a neutronic reflector increases the K-factor and excess reactivity of the core due to the large number of delayed neutron fraction groups. However, according to the better moderation and lower absorption of the light water a neutron flux distribution will increase. Also, the use of reflectors including light water, graphite and beryllium can increase the excess reactivity of the core to about 25 (mk) and the thermal power up to 14 MW.

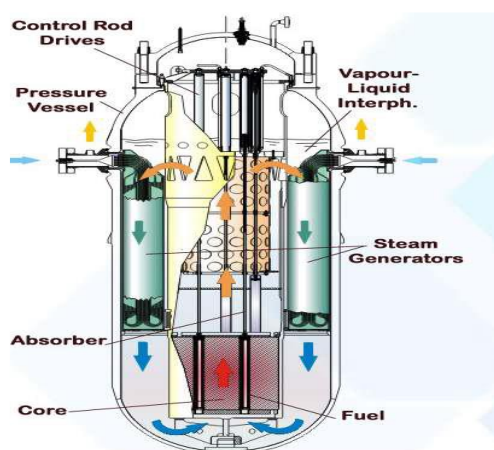
Keywords: Small and Medium sized Modular Reactor (SMR), Neutronic parameters, CAREM-25 reactor, MCNPX2.7.0. code.

Email: szareganjaroodi@yahoo.com

۱. 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، حمل‌ونقل آسان، ماژولار بودن، راندمان و ایمنی بالا، صرفه اقتصادی و دیگر موارد می‌تواند نقش مهمی در بسیاری از صنایع و سیستم‌ها نظیر آب‌شیرین‌کن‌های هسته‌ای، سیستم‌های تولید حرارت و هیدروژن، زیردریایی‌های هسته‌ای و دیگر موارد داشته باشند [۱-۲]. به طور کلی واژه ماژولار به این دلیل به این نوع راکتورها اطلاق می‌شود که اجزای مختلف این راکتورها به طور پیش‌ساخته در کارخانه موردنظر ساخته شده و سپس جهت نصب به سایت نیروگاهی منتقل می‌شوند. از این رو، مساله تجاری‌سازی، اقتصاد ساخت و طراحی و امنیت هسته‌ای در این نوع نیروگاه‌ها به مراتب بیشتر می‌باشد [۲].

راکتور CAREM-25 کشور آرژانتین، یک راکتور ماژولار کوچک آب سبک تحت فشار بوده که توسط سازمان انرژی اتمی آرژانتین^۱ با همکاری شرکت‌های وابسته به سازمان دولتی آرژانتین 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 [۴-۵]. شکل (۱)، نمایی از کل محفظه راکتور یکپارچه CAREM-25 را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمایی از راکتور CAREM-25 [۲].

۲. روش کار

راکتور CAREM-25، یک راکتور آب سبک تحت فشار یکپارچه با قدرت ۱۰۰ مگاوات حرارتی و ۲۷ مگاوات الکتریکی می‌باشد. قلب این راکتور دارای ۶۱ مجتمع سوخت هگزگونال با سوخت اکسید اورانیوم با درصد غناهای ۱.۸٪ و ۳.۱٪ می‌باشد. هر مجتمع سوخت این راکتور دارای ۱۰۸ میله سوخت، ۱۸ میله کنترل و یک کانال اندازه‌گیری است. در این راکتور از هیچ نوع کنترل‌کننده‌های شیمیایی نظیر اسید بوریک محلول در آب استفاده نمی‌شود، زیرا کنترل قلب راکتور توسط اکسید گادولونیوم با درصدهای مشخص (مطابق با آخرین گزارش کشور آرژانتین و مدلسازی کنونی در این مقاله، ۹۲٪ سوخت اورانیوم اکسید به ۸٪ گادولونیوم اکسید [۶-۷]) به صورت مخلوط با سوخت در ۲۴ مجتمع سوخت و میله‌های کنترل تنظیمی و ایمنی در ۲۵ مجتمع سوخت انجام می‌گیرد. جنس میله‌های کنترل ایمنی و تنظیمی در این راکتور با هم فرقی نداشته و تنها تفاوت در نحوه چیدمان آن‌ها می‌باشد. به طور کلی، میله‌های کنترلی ایمنی در ۶

1- Commission National energy Argentina (CNEA)

مجموع سوخت و میله های کنترل تنظیمی در ۱۹ مجتمع سوخت (هر مجتمع ۱۸ عدد) در قلب این راکتور وارد می‌شوند [۴-۵].

در این مطالعه، راکتور CAREM-25 یکبار به صورت پیش‌فرض با بازتابنده آب سبک با استفاده از کد MCNPX مدل‌سازی شد. سپس در دفعات بعدی به جای آب با استفاده از مواد برلیوم و گرافیت، تحت شرایط یکسان، مدل‌سازی انجام شد تا تاثیر این مواد در پارامترهای نوترونیکی قلب مشخص شود و در نهایت بتوان با تحلیل داده‌ها، مناسب‌ترین ماده جهت بازتابنده نوترونی را پیشنهاد داد.

۲

۱.۲. نتایج

محاسبات ضریب تکثیر نوترونی

با توجه به مدل‌سازی انجام شده و انتخاب کتابخانه سطح مقطع‌های ENDF/B-V داده‌های 42.C, 51.C, 52.C, 70.C در کد MCNPX2.7.0، بیشینه مقدار ضریب تکثیر قلب مربوط به استفاده از برلیوم به عنوان بازتابنده می‌باشد. دلیل این افزایش مقدار وجود ۱۵ گروه نوترون‌های تأخیری، ۶ گروه برای نیا هسته‌ها^۲ و ۹ گروه برای فوتونوترون‌ها برلیوم می‌باشد که می‌تواند منجر به بهبود وضعیت نوترونی شود. این در حالی است، که آب تنها ۷ گروه نوترون تأخیری دارد. همچنین، در صورت استفاده از آب به عنوان بازتابنده در اطراف قلب، قلب راکتور با ورود ۵۰٪ میله‌های کنترل تنظیمی و ۱۰٪ میله‌های کنترل ایمنی به حالت بحرانی می‌رسد [۷-۸-۹].

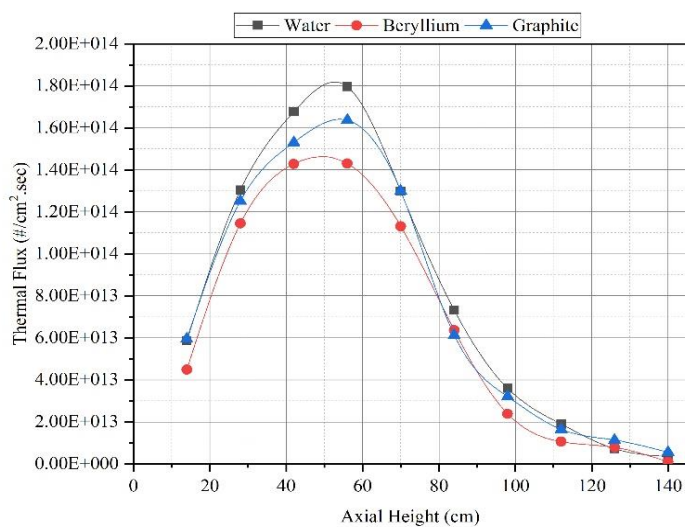
جدول ۱. محاسبات ضریب تکثیر و راکتیویته مازاد قلب راکتور CAREM-25

ماده بازتابنده		پارامتر ضریب تکثیر	
گرافیت	برلیوم	آب	-
k=1.05134 Ex-R=48.83 (mk)	k=1.05831 Ex-R=55.09 (mk)	k=1.04576 Ex-R=43.75 (mk)	ورود ۱۰٪ میله کنترل تنظیمی

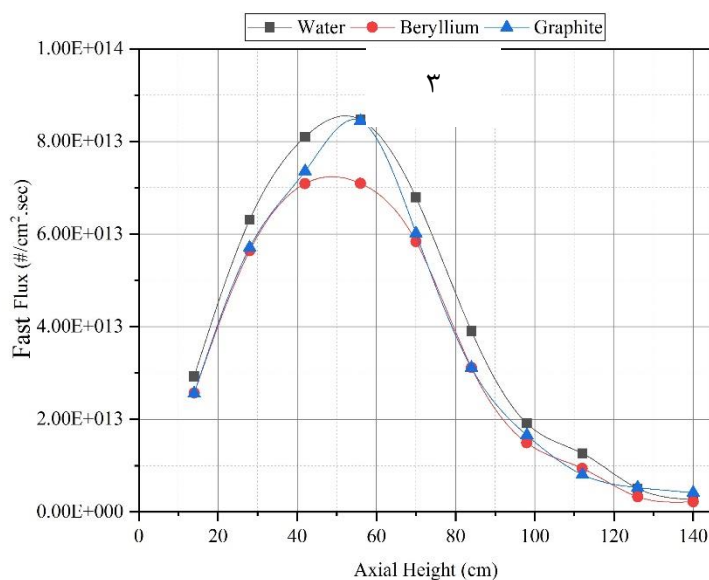
همچنین در صورت عدم استفاده از بازتابنده نوترونی در اطراف قلب، مقدار راکتیویته مازاد راکتور در حدود (mk) ۲۰ تا (mk) ۳۰ کاهش خواهد داشت.

توزیع شار نوترون

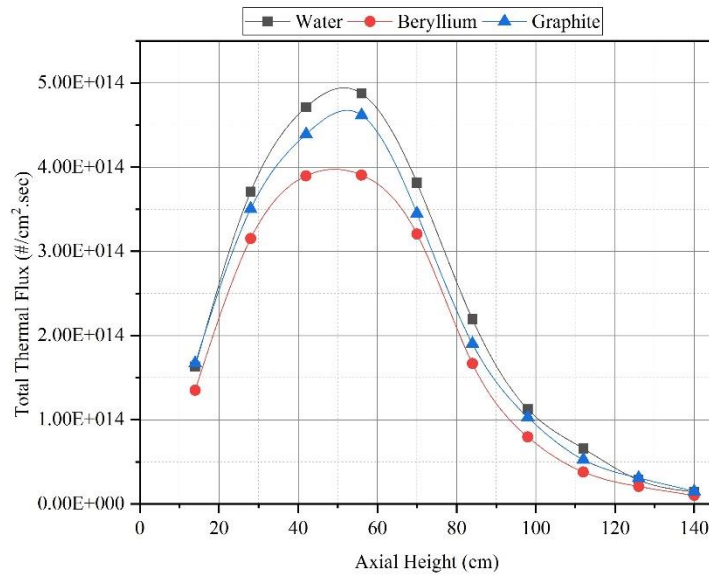
با توجه به شکل‌های ۳، ۴ و ۵ استفاده از آب به عنوان بازتابنده می‌تواند شار راکتور را تا حدودی افزایش دهد که این افزایش به دلیل سطح مقطع جذب پایین و پراکندگی بالا و در نتیجه کندکنندگی مناسب آن می‌باشد. هرچند که تعداد گروه نوترون‌های تأخیری برای برلیوم بیشتر از آب می‌باشد اما پارامتر سطح مقطع نیز بسیار حائز اهمیت بوده و به عبارتی، برآیند همه موارد، نتیجه افزایش یا کاهش شار و دیگر پارامترهای نوترونیکی را توجیه می‌نماید. همچنین، بیشینه شار حرارتی قلب در هر سه حالت مواد بازتابنده مربوط به ارتفاع حدود ۵۷ سانتی‌متری از کف قلب می‌باشد. از این‌رو، ورود هر دو مکانیسم میله‌های کنترل ایمنی و تنظیمی به قلب، ارتفاع بیشینه شار را در حدود ۴۰٪ به سمت پایین انتقال می‌دهد [۹].



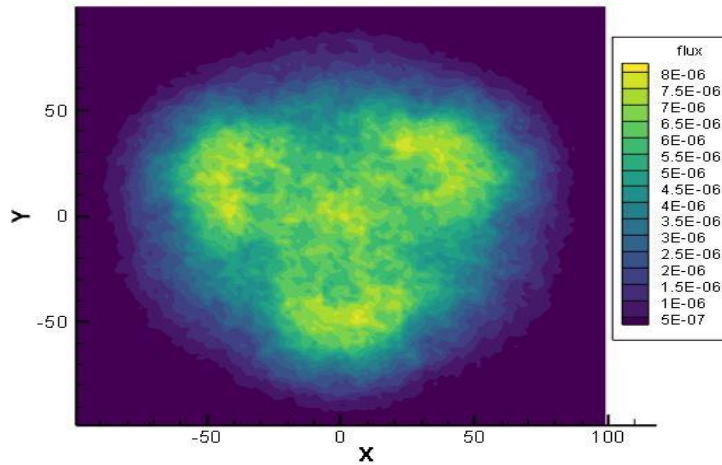
شکل ۲. توزیع محوری شار نوترون حرارتی به ازای سه ماده متفاوت بازتابنده در حالت بحرانی



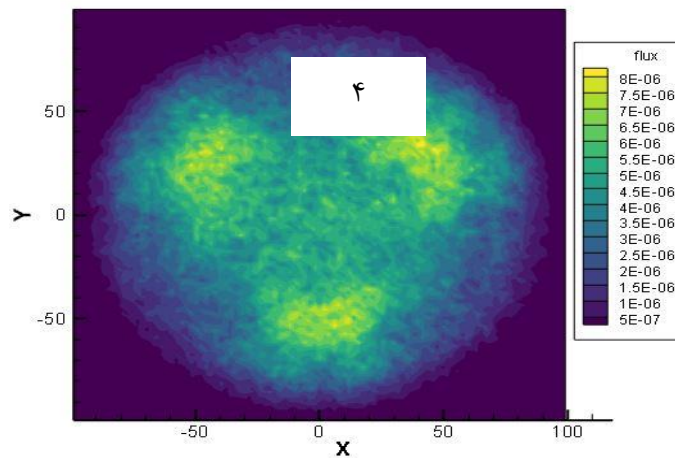
شکل ۳. توزیع محوری شار نوترون سریع به ازای سه ماده متفاوت بازتابنده در حالت بحرانی



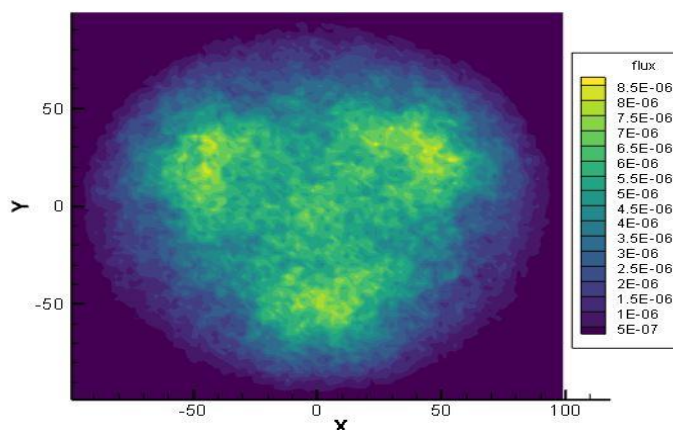
شکل ۴. توزیع محوری شار نوترون کل به ازای سه ماده متفاوت بازتابنده در حالت بحرانی



شکل ۵. نمای دوبعدی از توزیع شار کل نوترون در قلب راکتور با بازتابنده آب به ازای یک ذره نوترون



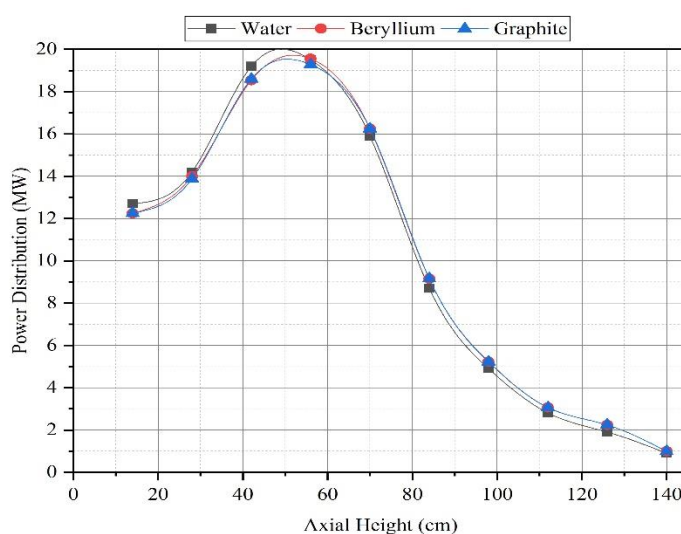
شکل ۶. نمای دوبعدی از توزیع شار کل نوترون در قلب راکتور با بازتابنده برلیوم به ازای یک ذره نوترون



شکل ۷. نمای دوبعدی از توزیع شار کل نوترون در قلب راکتور با بازتابنده گرافیت به ازای یک ذره نوترون همان‌طور که از شکل‌های ۵، ۶ و ۷ واضح است، سوای استفاده از مواد برلیوم، آب و گرافیت جهت بازتابندگی، توزیع شار در این راکتور دارای تقارن یک‌سوم بوده و علت افت شار در برخی از نقاط، ورود میله‌های کنترل تنظیمی و ایمنی در ۲۵ مجتمع سوخت و سموم گادولونیوم‌اکسید با سطح مقطع جذب بالا در ۲۴ مجتمع سوخت می‌باشد.

توزیع توان

توان تولیدی در قلب در صورت استفاده از بازتابنده آب در حدود ۱۰۱/۸ مگاوات حرارتی می‌باشد [۹]. این در حالی است که اگر از برلیوم و گرافیت استفاده گردد، توان تولیدی به ترتیب ۱۰۳/۳ و ۱۰۲/۸ مگاوات حرارتی خواهد شد.



شکل ۸. توزیع محوری توان به ازای سه ماده متفاوت بازتابنده

همان‌طور که بدان نیز اشاره شد، برلیوم دارای ۱۵ گروه نوترون‌های تأخیری، ۶ گروه برای نپاهسته‌ها و ۹ گروه برای فوتونوترون‌ها می‌باشد، که این مورد می‌تواند باعث افزایش راکتیویته مازاد تولیدی و در نتیجه توان راکتور گردد. از سوی دیگر، ذکر این نکته ضروری است که، تولید توان یکی از پارامترهای مورد بحث در انتخاب ماده مناسب جهت بازتابندگی نوترون در قلب راکتور ماژولار بوده و باید تمامی موارد، اعم از ایمنی، اقتصاد و موارد کنترلی نیز مورد تحلیل قرار گیرند.

۵. نتیجه‌گیری

هدف از انجام این مطالعه، ارزیابی و انتخاب مناسب‌ترین ماده جهت بازتابندگی نوترون در راکتورهای ماژولار کوچک می‌باشد. راکتور ماژولار کوچک CAREM-25 کشور آرژانتین که از انواع راکتورهای آب تحت فشار می‌باشد، به عنوان

راکتور پایه جهت مدلسازی با استفاده از کد MCNPX2.7.0 انتخاب شده است. در این مقاله، پس از مدلسازی راکتور، علاوه بر آب سبک به عنوان ماده پیش‌فرض، مواد برلیوم و گرافیت جهت بازتابندگی در اطراف قلب راکتور انتخاب و مدل شدند تا بتوان تاثیر مواد را بر روی پارامترهای نوترونیکی قلب اعم از ضریب تکثیر، راکتیویته مازاد، توزیع شار نوترون و توان تحلیل نمود. محاسبات کد نشان داد، به دلیل وجود ۱۵ گروه نوترون‌های تأخیری برای برلیوم، استفاده از برلیوم به عنوان بازتابنده می‌تواند ضریب تکثیر را افزایش دهد که این به مفهوم بهتر بودن خاصیت بازتابندگی نوترونی این ماده در مقایسه با سایر مواد بازتابنده‌ی نوترون مورد استفاده در قلب می‌باشد. همچنین گرافیت نیز ماده مناسبی با توجه به جذب پایین نوترون می‌باشد. توزیع شار در این راکتور دارای تقارن یک‌سوم بوده و ورود هر دو مکانیسم میله‌های کنترل ایمنی و تنظیمی به قلب، در هر سه حالت استفاده از بازتابنده‌های مختلف، ارتفاع بیشینه شار را در حدود ۴۰٪ به سمت پایین انتقال می‌دهد. استفاده از برلیوم و گرافیت به عنوان بازتابنده می‌تواند راکتور را در حدود دو مگاوات افزایش دهد. از این رو به، منظور انتخاب مناسب‌ترین ماده‌ی بازتابنده‌ی نوترونی، ملاحظات ترموهیدرولیکی و ایمنی باید برآورده شده باشد.

۶. 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] 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.
- [4] H. Boado Magana, D., et al. (2012) CAREM Prototype Construction and Licensing Status, IAEA.
- [5] BoadoMagan, H., et al. (2011), 'CAREM Project Status', Science and Technology of Nuclear Installations.
- [6] Advances in small modular reactor technology developments, (2018), IAEA TECDOC.
- [7] Villarino, E., Hergenreder D., Matzkin, S. (2012) NEUTRONIC CORE PERFORMANCE OF CAREM-25 REACTOR, INVAP, Argentina.
- [8] 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.
- [9] S. Tashkor, E. Zarifi, M. Naminazari, (2017), Neutronic simulation of CAREM-25 small modular reactor, progress in nuclear engineer.
- [10] Pelowitz, D.B, (2008), MCNPXTM Uses manual version 2.6.0, Los Alamos national laboratory.