

۱۶ و ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

آنالیز نوترونیکی قلب رآکتور پیشرفته ماژولار CAREM 25 با استفاده از کدهای WIMS و CITATION

تشکر، سامان^{۱*} - ظریفی، احسان^۲

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، دانشکده فنی و مهندسی، شیراز، ایران

۲- سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشگاه رآکتور

چکیده:

هدف از این تحقیق، آنالیز نوترونیکی قلب رآکتور CAREM 25 می باشد. CAREM 25 یکی از انواع رآکتورهای پیشرفته ماژولار سایز کوچک (SMR: Small Modular Reactor) بوده که در کشور آرژانتین توسعه یافته است. برخی از ویژگی‌های منحصر به فرد این رآکتور شامل سیستم یکپارچه خنک کننده اولیه، سیستم تنظیم کننده فشار داخلی خودبخوبی، برداشت حرارت توسط فرآیند جریان آزاد و سیستم‌های ایمنی منفعل می باشد. در تحلیل انجام شده با بکارگیری کدهای WIMS-D5 و CITATION-LD12 پارامترهای نوترونی این رآکتور نظیر ضریب تکثیر مؤثر، توزیع شار نوترون‌های حرارتی و سریع مورد بررسی قرار گرفته است.

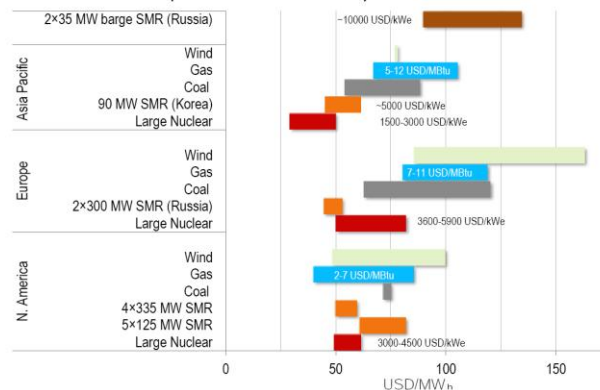
کلمات کلیدی: آنالیز نوترونیکی، CAREM 25، SMR، کد WIMS، کد CITATION

مقدمه:

در سالهای اخیر تحقیق و توسعه در زمینه رآکتورهای ماژولار با ابعاد کوچک و ایمنی بالا بحث‌های جدید و جذابی را در تحقیقات علمی گشوده اند بطوریکه در برخی از کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه از جمله: آمریکا، کانادا، فرانسه، روسیه، چین، ژاپن، کره جنوبی، آرژانتین، برزیل، آفریقای جنوبی و هند، طرح‌های عملیاتی و مفهومی جالبی از این نوع رآکتورها ارائه شده است. از ویژگیهای رآکتورهای ماژولار می توان به طراحی سیستم‌های ایمنی منفعل (Passive)، ایمنی ذاتی بالا، کارایی بیشتر، هزینه بهره برداری کمتر، افزایش زمان کاربری و عملکرد طولانی مدت، عدم نیاز به سوخت گیری به مدت چندین سال، استفاده چندگانه جهت تولید آب شیرین و ... اشاره نمود. همچنین با توجه به ابعاد کوچک این نوع رآکتورها و ساخت آنها به صورت یک واحد یکپارچه، امکان حمل آسان و نصب آن در مناطق دورافتاده و یا در شهرک‌های کوچک نیز امکان پذیر می باشد. در اکثر رآکتورهای ماژولار سیستم‌های تولید بخار (مولدهای بخار) به داخل محفظه تحت فشار رآکتور منتقل شده است. انتقال مولدهای بخار به داخل محفظه تحت فشار علاوه بر افزایش بهره وری آنها منجر به حذف لوله‌های خنک کننده مدار اول می گردد که یکی از پیامدهای این موضوع جلوگیری از مهمترین

۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

حادثه مبنای طرح یعنی حادثه از دست دادن خنک کننده در اثر شکستگی لوله های مدار اول (LOCA) می باشد زیرا در این رآکتور کل مدار اول در داخل محفظه تحت فشار قرار گرفته است. از طرفی در بسیاری از رآکتورهای ماژولار به جز چند نمونه (نظیر رآکتور ماژولار SMART ساخت کره جنوبی)، معمولاً با حذف پمپ های مدار اول از پدیده جریان طبیعی (Natural Circulation) برای برداشت حرارت استفاده می شود. حذف پمپ ها علاوه بر جلوگیری از حوادثی نظیر از کار افتادگی پمپ های مدار اول (LOFA) باعث افزایش ایمنی نیروگاه در برداشت حرارت پسماند واپاشی پس از خاموشی می گردد. بنابراین مجموعه نکات بیان شده و بسیاری از عوامل دیگر باعث افزایش حاشیه ایمنی این نوع رآکتور شده است. نظر به ابعاد کم این نوع رآکتور هزینه ساخت و ساز این رآکتورها به مراتب کمتر از رآکتورهای سایز بزرگ بوده و همچنین با توجه به اینکه تجهیزات اصلی این رآکتور در کارخانه سازنده به طور کامل ساخته شده و اسمبل می گردد و پس از ساخت ساختمان رآکتور در کمترین زمان ممکن (در حدود چندماه) آماده راه اندازی می گردد این باعث می گردد که مقابل زمان بهره برداری رآکتورهای قدرت سایز بزرگ (۵ تا ۷ سال) باعث کاهش ریسک مالی قابل قبول در زمینه این رآکتورها گردد. از طرفی بکارگیری واحدها و ماژولارهای چندگانه این رآکتورها در مقیاس بزرگ می تواند به صورت رقابتی سطح بندی هزینه برق (LCOE: Levelised Cost of Electricity) را بطور قابل ملاحظه ای کاهش داد. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است به عنوان نمونه در آمریکا ۴ واحد ۳۳۵ مگاواتی رآکتورهای ماژولار می تواند از لحاظ اقتصادی با رآکتورهای سایز بزرگ رقابت نماید. بنابراین با توجه به هزینه های سرمایه گذاری کمتر رآکتورهای ماژولار مقیاس بزرگ در مقایسه با رآکتور بزرگ متداول، کوتاه بودن دوره ساخت و ساز این رآکتورها و تاثیر رقابتی واحدهای چندگانه باعث می گردد که هزینه بهره برداری این رآکتورها در مقایسه با رآکتورهای بزرگ متداول در رقابت باشد [۱].



شکل (۱) تخمینی برای رآکتورهای کوچک ماژولار در مقایسه با رآکتورهای سایز بزرگ

۱۶ و ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

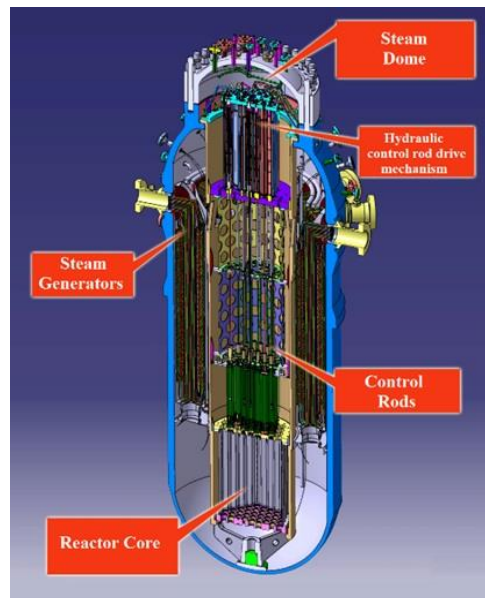
CAREM یک رآکتور ماژولار سایز کوچک از نوع آب تحت فشار بوده که توسط سازمان انرژی اتمی آرژانتین (CNEA) با همکاری شرکت های INVAP و CNEA توسعه یافته است. طرح مفهومی اولیه راکتور CAREM در سال ۱۹۸۴ در کنفرانس رآکتورهای SMR که توسط آژانس بین المللی انرژی اتمی که در لیما پایخت کشور پرو بزرگوار شد، برای اولین بار توسط کشور آرژانتین مطرح گردید و در سالهای بعد با اعمال تغییرات بنیادی و بهینه سازیهای فراوان، طرح آن نهایی شد. این رآکتور هم اکنون در مرحله ساخت قرار دارد و مطابق پیش بینی های انجام شده قرار است در سال ۲۰۱۸ به بهره برداری نهایی برسد [۲]. در سال ۲۰۰۰، ISHIDA طی گزارشی، به روند توسعه نیروگاههای هسته ای جدید از جمله پروژه CAREM پرداخت [۳]. همچنین GOMEZ در جلسه کمیسیون فنی درباره پیشرفت و عملکرد رآکتورهای پیشرفته آب سبک، که در سال ۲۰۰۰ در شهر مونیخ آلمان برگزار گردید، به فعالیتهای توسعه و طراحی نسل جدید رآکتورهای پیشرفته آب سبک در کشور آرژانتین اشاره نمود [۴]. DELMASTRO و همکارانش در سال ۲۰۰۰ طی مقاله ای، با بکارگیری لوپ تحت فشار جریان طبیعی CAPCN، جنبه های ترموهیدرولیکی رآکتور CAREM را مورد ارزیابی قرار دادند [۵]. در سال ۲۰۰۱، ISHIDA و همکارانش طی مقاله ای به بررسی فعالیتهای انجام در زمینه در زمینه پروژه CAREM پرداختند. در این مقاله ضمن بررسی چالشهای تکنیکی و مهندسی در زمینه طراحی رآکتور CAREM، به فعالیتهای انجام شده در زمینه ساخت انواع مجموعه آزمایشگاههای و تست لوپ های مرتبط با این طرح پرداخته شد [۶]. DELMASTRO و همکارانش در سال ۲۰۰۲ طی گزارشی جنبه های مختلف رآکتور CAREM را به عنوان یک راکتور آب تحت فشار پیشرفته تشریح نمودند [۷]. همچنین Mazzi و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۲ طی گزارشی به تشریح توسعه پروژه CAREM پرداختند [۸]. BoadoMagan و همکارانش طی مقاله ای در ژورنال Science and Technology of Nuclear Installations به بررسی وضعیت پروژه CAREM و روند اجرای آن تا سال ۲۰۱۱ پرداختند [۹]. همچنین BoadoMagan و همکارانش در گزارشی در سال ۲۰۱۲ وضعیت ساخت و مجوز نمونه اولیه CAREM را تشریح نمودند [۱۰]. با وجود اینکه در چندین گزارش منتشر شده به جنبه های مختلف فنی رآکتور ماژولار CAREM اشاره شده است اما در خصوص پارامترهای نوترونی قلب این رآکتور در مقالات و گزارشات کمتر اشاره شده است. در این تحقیق، به بررسی رفتار نوترونیکی قلب راکتور ماژولار CAREM 25 پرداخته می شود.

روش کار :

CAREM یک رآکتور سایز کوچک از نوع آب تحت فشار به صورت مجتمع و یکپارچه بوده که تمامی تجهیزات مدار اول آن در داخل محفظه تحت فشار رآکتور قرار داده شده است. توان حرارتی این رآکتور ۱۰۰ MW و توان الکتریکی

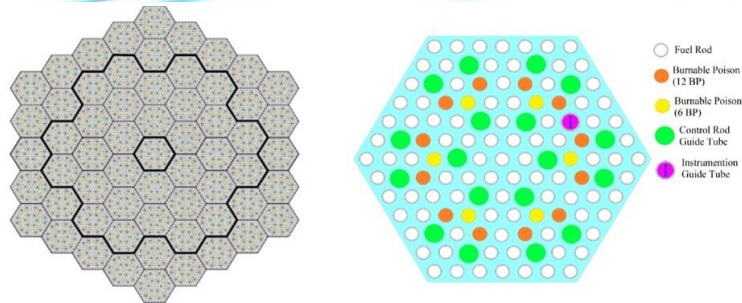
۱۶ و ۱۷ شهریور ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

آن در حدود ۲۷ MW می باشد. در شکل (۲) نمایی از محفظه تحت فشار این رآکتور نشان داده شده است. محفظه تحت فشار رآکتور شامل قلب، مولد بخار، ناحیه پائین رونده (Down-comer)، ناحیه شومینه، مکانیزم هیدرولیکی میله های کنترل، محفظه بخار و کنترل کننده فشار داخلی می باشد. قلب رآکتور CAREM شامل ۶۱ بسته سوخت هگزآگونال با طول فعال ۱۴۰۰ mm می باشد. هر بسته های سوخت شامل ۱۰۸ میله سوخت با غنایی بین ۲ تا ۴ درصد، ۱۸ کانال راهنمای میله کنترل و ۱ کانال اندازه گیری می باشد. بسته های سوخت این رآکتور بسیار مشابه رآکتورهای PWR است اما از لحاظ ساختاری و ترکیب مواد دارای تفاوت های بسیاری می باشند. رآکتیویته قلب رآکتور با استفاده از میله های جاذب سوختنی Gd_2O_3 کنترل می گردد. در این رآکتور از هیچ کنترل کننده شیمایی نظیر اسید بوریک محلول در آب استفاده نمی شود و تنها همین جاذب های سوختنی به همراه میله های کنترل، برای کنترل سیستم استفاده می گردد. در شکل (۳) نمایی از بسته سوخت و قلب این رآکتور نشان داده شده است. محاسبه توزیع توان و ضریب تکثیر مؤثر در محاسبات نوترونیک با محاسبات سلولی و محاسبات قلب رآکتور تعریف می گردد. در مرحله اول با بهره گیری از کد WIMS [۱۱] ضرایب گروهی مورد نیاز کد CITATION [۱۲] محاسبه می شود. به این منظور با توجه به ساختار و چیدمان میله های سوخت در یک بسته سوخت به مدل سازی انواع سلولهای محاسباتی در کد WIMS پرداخته و داده های بدست آمده از این طریق جهت محاسبات شار نوترونی و توان، به کد CITATION با فرمت لازم انتقال داده می شود. نحوه مش بندی قلب رآکتور CAREM در کد CITATION در شکل (۴) نشان داده شده است.

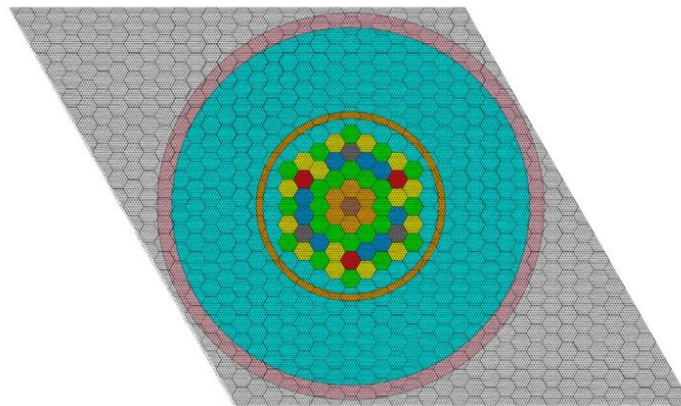


شکل (۲) نمایی از محفظه تحت فشار رآکتور CAREM 25 [۲]

۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد



شکل (۳) نمایی از قلب (شکل چپ) و یک بسته سوخت (شکل راست) رآکتور CAREM [۲]

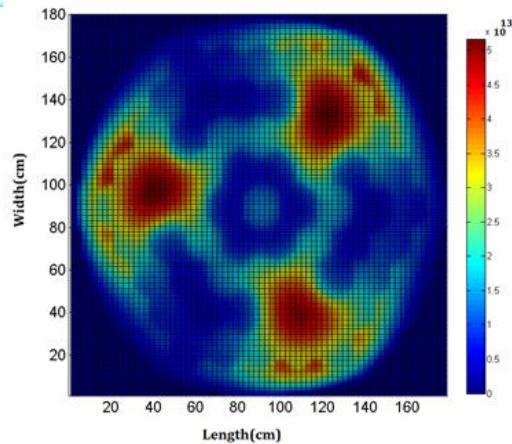


شکل (۴) نحوه مش بندی قلب رآکتور CAREM در کد CITATION

نتایج :

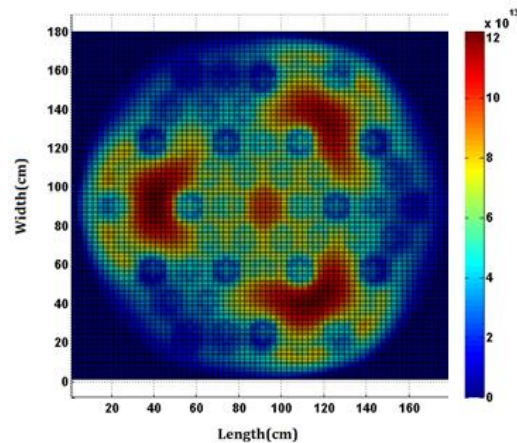
محاسبات نشان دادند که قلب این رآکتور با وارد کردن ۱۰٪ میله های کنترل تنظیمی، دارای ضریب تکثیر مؤثری در حدود ۱/۰۵۸۷ (معادل ۵۵ mk) می باشد. در شکل (۵) توزیع شار نوترونهاي حرارتی در قسمت بالای طول فعال سوخت نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می گردد توزیع شار در این رآکتور دارای تقارن یک سوم می باشد. علت افت شار در برخی از نواحی به علت وارد شدن میله های در این ناحیه از قلب رآکتور می باشد.

۱۶ و ۵ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد



شکل (۵) توزیع شار نوترونیهای حرارتی در بالای قلب رآکتور

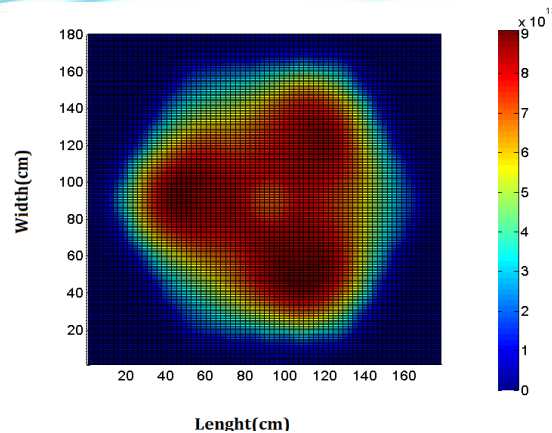
محاسبات نشان دادند که ماکزیمم شار حرارتی در ارتفاع تقریبی ۵۱ cm از پایین قلب رآکتور می باشد. در شکل (۶) توزیع شار حرارتی در داغ ترین صفحه نشان داده شده است. همانند شکل (۴) ملاحظه می گردد که توزیع شار همچنان تقارن یک سوم خود را حفظ می نماید اما برخلاف نمودار قبل در این ناحیه هیچ میله کنترلی وارد نمی گردد و دلیل افت شار در برخی از نواحی به علت وجود سموم قابل مصرف نظیر Gd_2O_3 می باشد.



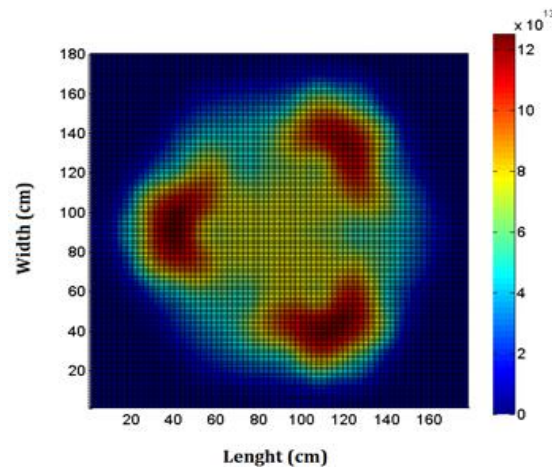
شکل (۶) توزیع شار نوترونیهای حرارتی در داغ ترین قلب رآکتور

در شکل های (۷) و (۸) به ترتیب توزیع شار نوترونیهای سریع در قسمت بالای قلب و در داغ ترین صفحه نشان داده شده است.

۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد



شکل (۷) توزیع شار نوترونیهای سریع در بالای قلب رآکتور



شکل (۸) توزیع شار نوترونیهای سریع در دماغ ترین صفحه قلب رآکتور

بحث و نتیجه گیری :

هدف از این تحقیق بررسی رفتار نوترونی قلب رآکتور ماژولار CAREM 25 می باشد. نتایج نشان می دهند که قلب این رآکتور با ۱۰٪ وارد کردن میله های کنترل دارای رآکتیویته مازادی در حدود ۵۵mk می باشد که دلیل این میزان رآکتیویته مازاد سیکل طولانی رآکتور (بیش از ۱۴ ماه) می باشد و به دلیل عدم وجود سموم در ابتدای کار رآکتور توصیه شده است که جهت نزدیک شدن به حالت بحرانی ۵۰٪ میله های کنترل تنظیمی و در حدود ۱۰٪ میله کنترل ایمنی وارد قلب رآکتور گردد [۱۳]. توزیع شار محوری نشان می دهد که به دلیل وارد نمودن ۱۰٪ میلههای کنترل در قلب رآکتور ماکزیمم شار از مرکز قلب به ۳۷٪ طول فعال رآکتور شیفتمی یابد. در محل میله های کنترل به دلیل وجود جاذب شاهد

۱۶ و ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

افت شدید شار در این نواحی می‌باشیم. در محل ماکزیمم شار نقاط افت مربوط سموم سوختی قابل مصرف می‌باشد. جهت برآورد صحیح تری از توزیع شار نوترونه توصیه می‌گردد که محاسبات ترموهیدرولیک نیز انجام شده تا نتایج به مقدار پیش بینی شده نزدیک گردند.

مراجع :

1. NEA (2011) Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors, NUCLEAR ENERGY AGENCY, OECD.
2. CNEA and INVAP (2000) CAREM 25 - Informe Consolidado.
3. ISHIDA, M. (2000) "Development of New Nuclear Power Plant in Argentina", Advisory Group Meeting on Optimizing Technology, Safety and Economics of Water Cooled Reactors, Vienna, Austria.
4. GOMEZ, S. (2000) "Development activities on advanced LWR designs in Argentina", Technical Committee Meeting on Performance of Operating and Advanced Light Water Reactor Designs, Munich, Germany.
5. 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.
6. ISHIDA, M., et al. (2001) "CAREM project development activities". International Seminar on Status and Prospects for Small and Medium Size Reactors, Cairo, Egypt.
7. Delmastro, D., et al., (2002), 'CAREM: an Advanced Integrated PWR'. In IAEA, Small and Medium Sized Reactors: Status and Prospects, IAEA-CSP-14/P, 224-231.
8. Mazzi, R., et al. (2002), 'CAREM Project Development'. In IAEA, Small and Medium Sized Reactors: Status and Prospects, IAEA-CSP-14/P, 232-243.
9. Boado Magana, H., et al. (2011), 'CAREM Project Status', Science and Technology of Nuclear Installations, Article ID 140373.
10. H. Boado Magana, D., et al. (2012) CAREM Prototype Construction and Licensing Status, IAEA-CN-164-5S01.
11. NEA-1507 (1999) WIMSD-5B [98/11], Deterministic Multi-group Reactor Lattice Calculations.
12. Fowler, T.B. (1999) CITATION-LDI2 Nuclear Reactor Core Analysis Code System. CCC-643, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
13. Villarino, E., Hergenreder D., Matzkin, S. (2012) NEUTRONIC CORE PERFORMANCE OF CAREM 25 REACTOR, INVAP, Argentina.