

مطالعه نوترونیکی قلب راکتور پیشرفته آبی تحت فشار کوچک ماژولار نسل III⁺

INC29-1043

عرفانی نیا، علی*^(۱) - افشین هدایت^۲

۱. دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته‌ای، مرکز تحقیقات ایمنی هسته‌ای

۲. سازمان انرژی اتمی، پژوهشکده راکتور

چکیده:

راکتورهای کوچک ماژولار جز نسل‌های سه پلاس و چهارم راکتورها می‌باشند که دارای توان تولیدی کمتر از ۳۰۰ مگاوات حرارتی بوده و در سالهای اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. هدف از این تحقیق مطالعه نوترونیکی قلب یک راکتور پیشرفته آبی تحت فشار کوچک ماژولار نسل سه پلاس بوده که بر اساس راکتور CAREM25 شبیه‌سازی شده است. ضرایب راکتیویته سوخت و خنک‌کننده، توزیع شار نوترونی حرارتی، شبه حرارتی و سریع، توزیع توان در مجتمع‌های سوخت و داغترین میله سوخت بوسیله شبیه‌سازی مونت کارلو بوسیله کد MCNPX2.7 انجام گرفته است.

کلمات کلیدی: راکتور کوچک ماژولار نسل سه پلاس، نوترونیک، CAREM25، ضرایب راکتیویته

Neutronic Study of a Generation III⁺ Small Modular Advanced Pressurized Water Reactor Core

Erfaninia, Ali^{1,*}

¹ Shiraz University, School of Mechanical Engineering, Department of Nuclear Engineering, Nuclear Safety Research Center

Abstract:

Small Modular Reactors (SMRs) belong to the generation III⁺ and IV of nuclear reactors which generate thermal power less than 300 MW_{th} and have been paid more attention during recent years. The aim of this paper is neutronic study of a generation III⁺ small modular advanced pressurized water reactor core which is simulated based on CAREM25 reactor. The fuel and moderator coefficients of reactivity, thermal to fast neutron flux distribution and power distribution in fuel assemblies as well as in the hottest fuel rod were calculated using MCNPX2.7 monte-carlo code.

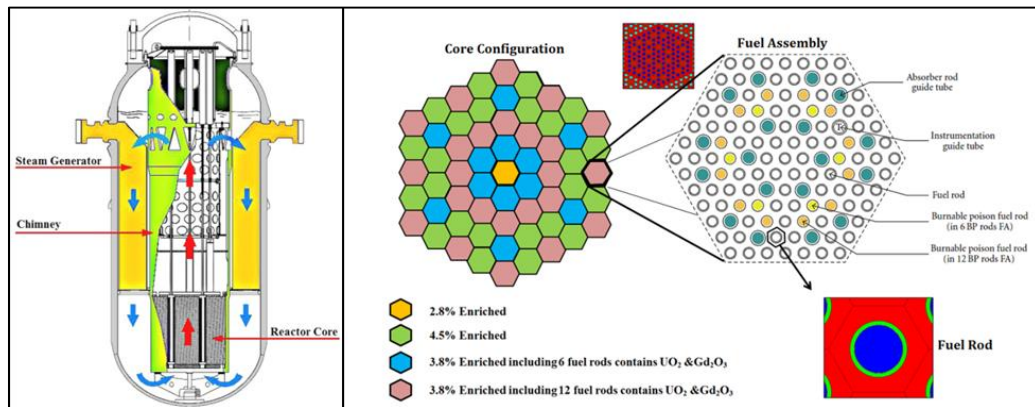
Key words: Generation III⁺ small modular reactor, Neutronic, CAREM25, Reactivity Coefficient

۱. مقدمه:

راکتورهای کوچک ماژولار متعلق به راکتورهای نسل سه پلاس و چهار راکتور ها بوده که معمولا دارای توان تولیدی کمتر از ۳۰۰ مگاوات حرارتی می باشند. راکتورهای کوچک ماژولار از نظر هزینه های اولیه، سایز و اندازه راکتور، ایمنی، امنیت وانعطاف در جابجایی نسبت به راکتورهای بزرگ امروزی بسیار مناسبتر و دارای مزایای بیشتری می باشند. واژه "ماژولار" به این موضوع اشاره دارد که اجزا مهم و اصلی سیستم تولید بخار در کارخانه ساخته شده و تمامی تجهیزات مدار اول درون یک محفظه قرار گرفته و به محل مورد نظر حمل و نصب می گردد. از مزایای این نوع راکتورها می توان به مواردی از قبیل: پایین بودن هزینه سرمایه گذاری، انعطاف پذیری در به کارگیری، اثربخشی و بازدهی بالاتر، عدم اشاعه مواد هسته‌ای، ایجاد بازارهای بین المللی بهتر و بی شتر، ایمنی بالاتر به علت وجود سیستم های پسیو برداشت حرارت همراه با گردش طبیعی، مقدار مواد رادیو اکتیو موجود کمتر، طراحی ساده و کاهش نواحی خطرناک، پک بودن تمامی تجهیزات در یک محفظه و کاهش سیستم های پایپینگ اضافی و... اشاره نمود [۱]. راکتور های کوچک ماژولار راکتورهایی با طراحی جدید می باشند که بیشتر در مراحل طراحی و تحقیق به سر می برند و اخیرا در کره جنوبی و آرژانتین و آمریکا در مراحل اولیه ساخت یا بهره برداری رسیده اند. در سالهای اخیر این نوع راکتورها مورد توجه زیادی قرار گرفته و تحقیقاتی در خصوص آنها انجام شده است. از جمله تحقیقات انجام گرفته و منتشر شده در خصوص این راکتورها می توان به چند مورد زیر اشاره نمود. در سال ۲۰۱۱، رونسر و همکارانش گزارشی از پروژه CAREM 25 ارائه دادند که در آن به بیان مزایای سیستم های ایمنی و چگونگی کارکرد راکتور پرداخته شده است [۲]. در سال ۲۰۱۱ کیم و همکارانش به محاسبات عددی ترموهیدرولیک درون قلب راکتور SMART پرداختند و تغییرات سرعت و فشار و سایر پارامترهای ترموهیدرولیکی را تحت شرایط نامی قلب محاسبه نموده اند [۳]. یونگمین بای و همکارانش در سال ۲۰۱۳ تحلیل مکانیک سیالاتی جریان خنک کننده در قسمت پایین قلب راکتور SMART را انجام داده و به بررسی عددی توزیع میدان سرعت و پارامترهای هیدرودینامیکی در قسمت ورودی قلب راکتور SMART پرداختند [۴]. رمانا در سال ۲۰۱۳ پروژه لایسنس گیری راکتورهای کوچک ماژولار را بررسی و بیان کرده است و به بررسی تفاوت های کشورهای مختلف در لایسنس دهی به این نوع راکتورها پرداخته است [۵]. در سال ۲۰۱۴ هیرداریس و همکارانش به بررسی استفاده از راکتورهای کوچک ماژولار برای تولید نیروی رانش کشتی ها پرداخته و امکانسنجی استفاده از این نوع راکتور ها را در کشتیها بررسی کردند [۶]. در سال ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ عرفانی نیا و همکارانش به مدل سازی نوترونیک و ترموهیدرولیک این نوع راکتورها با چینش سوخت هگزگونال و مربعی پرداخته اند [۷ و ۸]. در سال ۲۰۱۸ اکبری و همکارانش استفاده از سوخت توریومی در راکتورهای کوچک ماژولار را با استفاده از شبیه سازی نوترونی بررسی نمودند [۹]. در سال ۲۰۲۰ نودوست و همکارانش توجه خود را به مطالعه نوترونیک طول سیکل و مصرف سوخت در قلب راکتور Nuscale آمریکایی معطوف نمودند [۱۰]. در سال ۲۰۲۰، دکتر هدایت مطالعه مروری ای را در خصوص راکتورهای کوچک ماژولار انجام داده اند [۱۱]. هدف این پژوهش عبارتند از شبیه سازی و مطالعه نوترونیک قلب یک راکتور آبی تحت فشار کوچک ماژولار نسل سه پلاس که بر اساس راکتور کوچک ماژولار CAREM25 می باشد. با شبیه سازی قلب راکتور با سوخت تازه و شرایط کاری ابتدای سیکل بوسیله کد MCNPX2.7، ضرایب راکتیویته سوخت و خنک کننده، توزیع شار نوترونی حرارتی، شبه حرارتی و سریع و همچنین توزیع توان در مجتمع های سوخت و داغترین میله سوخت محاسبه گزارش می گردد.

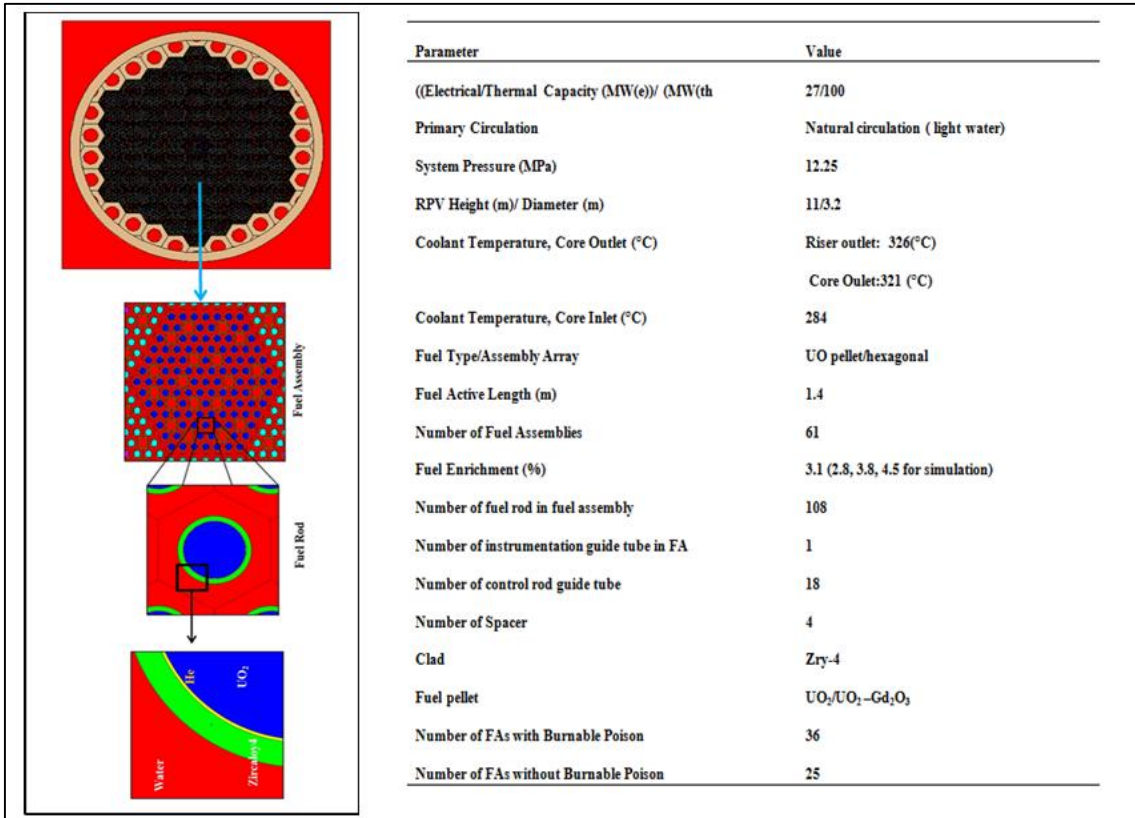
۲. روش کار:

در این تحقیق برای انجام شبیه‌سازیها، راکتور CAREM25 به عنوان مرجع در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی بر اساس مشخصات قلب این راکتور توسط کد MCNPX2.7 انجام پذیرفته است. طراحی این راکتور بر پایه تکنولوژی راکتورهای آب سبک و توسط کمیسیون ملی انرژی اتمی آرژانتین از سال ۱۹۸۴ شروع شده و قرار بوده که اولین سوخت‌گیری آن در سال ۲۰۲۰ انجام گیرد. ساختار قلب، چینش مجتمع‌های سوخت، میله سوخت و توزیع غنای سوخت در قلب راکتور در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱) ساختار قلب، چینش مجتمع‌ها، میله سوخت و توزیع غنای سوخت در قلب راکتور مرجع

در شکل ۲ مشخصات راکتور و همچنین شماتیک مدل‌سازی MCNP از قلب، مجتمع سوخت و میله‌های سوخت نشان داده شده است. در شبیه‌سازی به منظور در نظر گرفتن تغییرات دمایی در راستای محوری قلب، ارتفاع قلب به ۱۶ قسمت مساوی تقسیم شده و در هر قسمت دمای متوسط مربوطه در سلول تعریف شده در کد MCNPX لحاظ گردیده تا برای انجام محاسبات ترابرد نوترون از کتابخانه سطح مقطع مربوط به آن دما استفاده نماید. این کار با تنظیم چگالی سیال خنک‌کننده در هر سلول و همچنین استفاده از دستور TMP در کد MCNPX انجام گرفته است. سیال خنک‌کننده با دمای ۲۸۴ درجه سانتیگراد وارد قلب شده و با دمای ۳۲۱ درجه سانتیگراد قلب را ترک می‌نماید و وارد فضای بالای قلب موسوم به رایزر میگردد.



شکل (۲) مشخصات راکتور و شماتیک قلب، مجتمع و میله سوخت شبیه سازی شده توسط MCNPX

۳. نتایج:

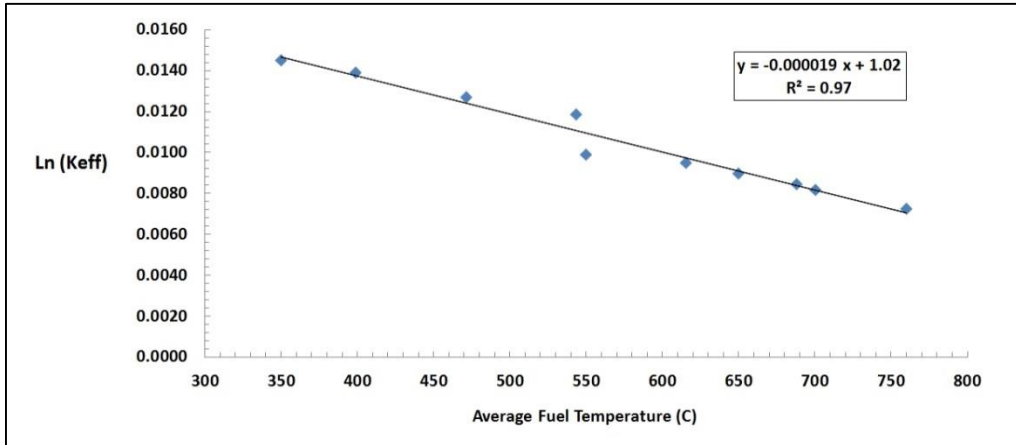
۱- ضرائب دمایی راکتیویته سوخت (داپلر) و خنک کننده

بعد از انجام شبیه سازی ها بر اساس مشخصه های قلب راکتور مرجع، برای اعتبار بخشی به انجام محاسبات ضرایب راکتیویته دمایی سوخت و خنک کننده محاسبه شد و با نتایج گزارش شده توسط آژانس بین المللی انرژی اتمی برای راکتور CAREM25 مقایسه گردید که تطابق بسیار خوبی همراه با خطای قابل قبولی ملاحظه گردید. نتایج در جدول ۱ آورده شده است. ضریب داپلر و ضریب دمایی راکتیویته خنک کننده توسط رابطه های زیر تعریف می شوند.

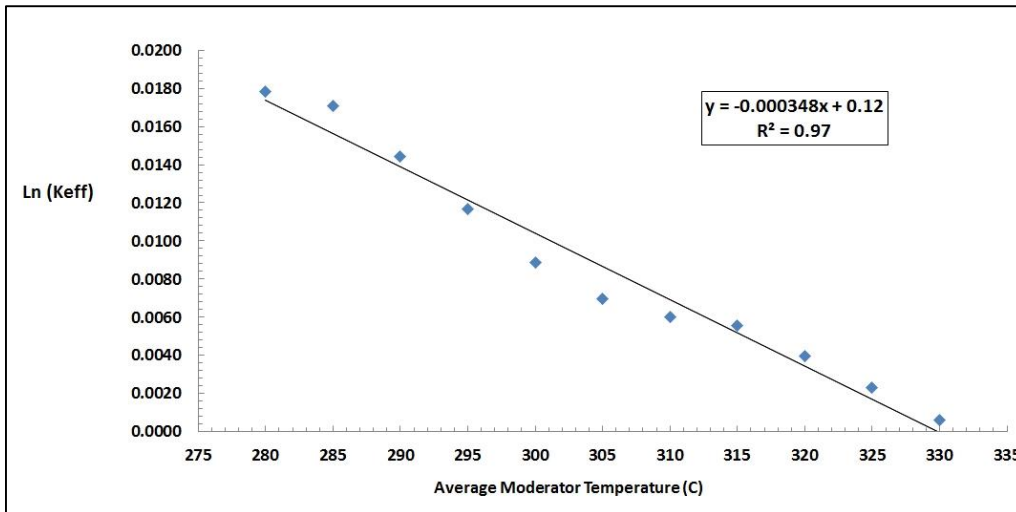
$$Doppler Coefficient = DC = \frac{1}{k_{eff}} \frac{\partial k_{eff}}{\partial T_{fuel}} = \frac{\partial \ln(k_{eff})}{\partial T_{fuel}}$$

$$Moderator Temperature Coefficient of Reactivity = MTC = \frac{1}{k_{eff}} \frac{\partial k_{eff}}{\partial T_{coolant}} = \frac{\partial \ln(k_{eff})}{\partial T_{coolant}}$$

بنابر رابطه های بالا برای محاسبه ضرایب دمایی راکتیویته، ضریب تکثیر قلب برای دمای های متوسط سوخت و همچنین خنک کننده محاسبه گردید. با رسم لگاریتم ضریب تکثیر محاسبه شده بر حسب دماهای متوسط در یک نمودار و محاسبه شیب خط می توان ضرایب دمایی راکتیویته را محاسبه نمود. تغییرات ضریب تکثیر موثر قلب نسبت به دمای متوسط سوخت و خنک کننده در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است. بر روی هر یک از تغییرات یک نمودار خطی برازش شده است که شیب این نمودار بیان کننده ضرایب راکتیویته می باشد. ضریب داپلر مقدار $-1.9(pcm/°C)$ و ضریب دمایی راکتیویته خنک کننده مقدار $-34.8(pcm/°C)$ محاسبه گردید.



شکل (۳) تغییرات ضریب تکثیر قلب نسبت به دمای متوسط سوخت و نمودار فیت شده بر آن



شکل (۴) تغییرات ضریب تکثیر قلب نسبت به دمای متوسط خنک کننده و نمودار فیت شده بر آن

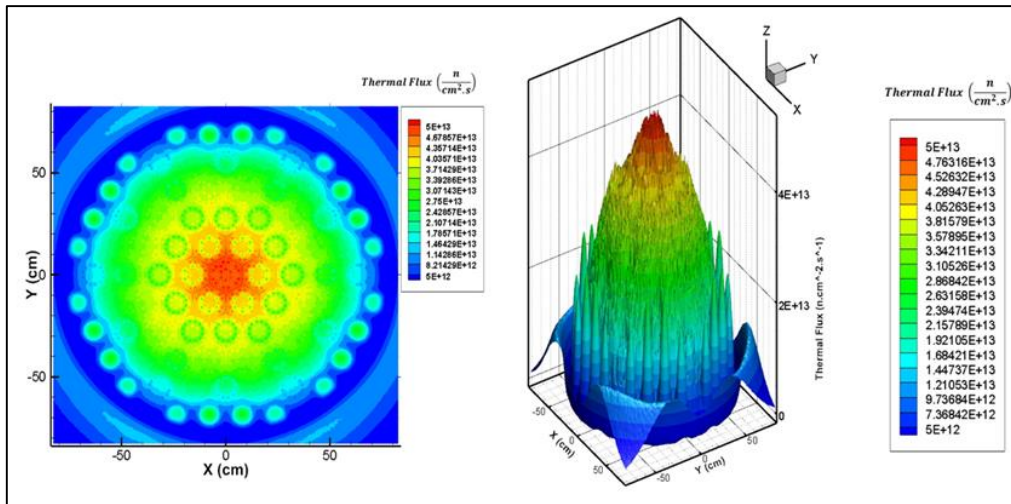
جدول (۱) مقایسه ضرائب راکتیویته محاسبه شده و گزارش شده توسط IAEA برای راکتور مرجع

پارامتر	شبه سازی	گزارش IAEA	درصد خطا
ضریب داپلر ($pcm/^\circ C$)	-1.9	-2.1	9.5
ضریب دمایی راکتیویته خنک کننده ($pcm/^\circ C$)	-34.8	-40	13

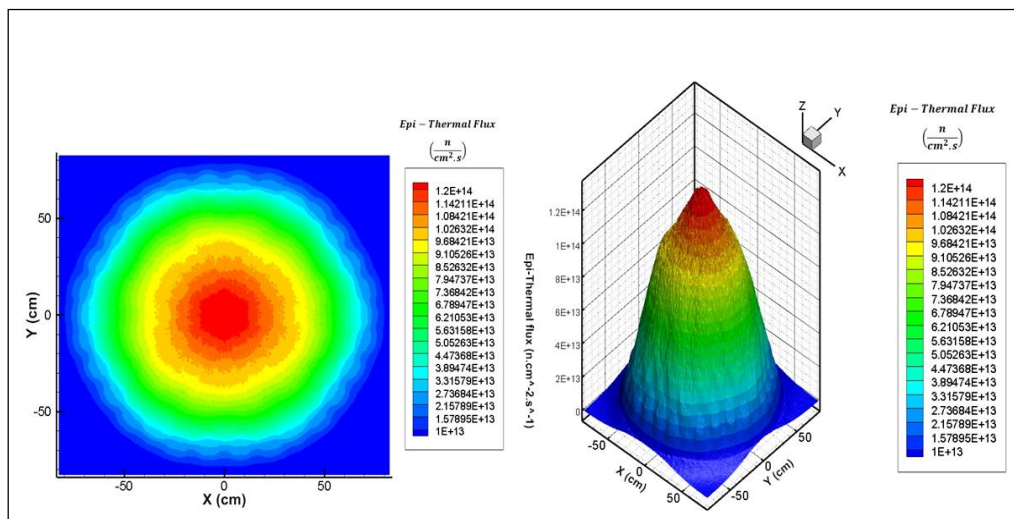
۲- شارنوترون های حرارتی، شبه حرارتی و سریع

شکل ۵، ۶ و ۷ به ترتیب توزیع سه بعدی شار نوترون های حرارتی، شبه حرارتی و سریع را در قلب راکتور با واحد نشان می دهد. نوترون های با انرژی پایین تر از ۳ الکترون ولت به عنوان نوترون های حرارتی، نوترون های با انرژی مابین ۳ الکترون ولت و ۰،۱ مگاالکترون ولت به عنوان نوترون های شبه حرارتی و نوترون های با انرژی بیشتر از ۰،۱ مگاالکترون ولت به عنوان نوترون های سریع در نظر گرفته شده اند. در نظر گرفته شده اند. شکل نشان میدهد که شار نوترون های حرارتی، شبه حرارتی و سریع از مرتبه 10^{13} و 10^{14} میباشد که مقدار آن ها در مرکز قلب زیاد است و در راستای شعاعی به صورت متقارن از مقدار آن کاسته می شود.

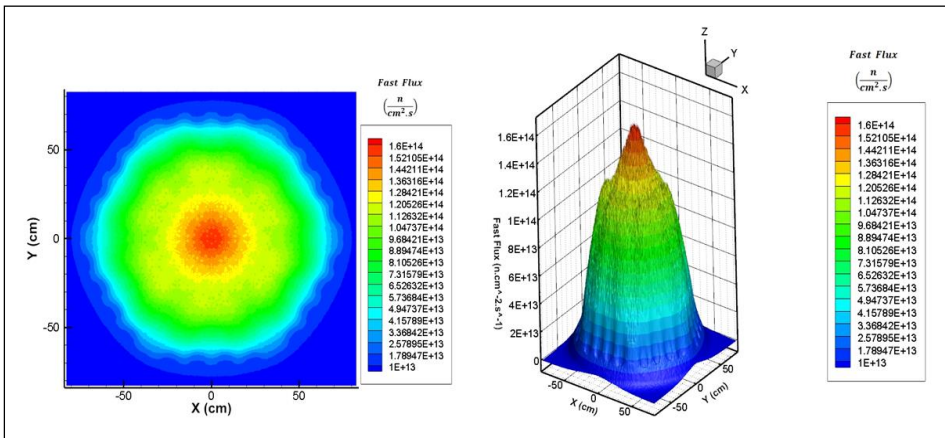
شکل ۸ نیز تغییرات شار نوترهای حرارتی و شبیه حرارتی و سریع را در مقطع قلب و در صفحه $x=0$ نشان می‌دهد. اثر برل و بغل برای جلوگیری از فرار نوترون‌ها و برگرداندن آنها به قلب مشخص است که به صورت یک افزایش در مقدار شار حرارتی نمایان است. مقدار شار در مجتمع سوخت مرکزی بیشینه است که به تبع آن مقدار شکافت و توان تولیدی نیز در این مجتمع بیشینه است.



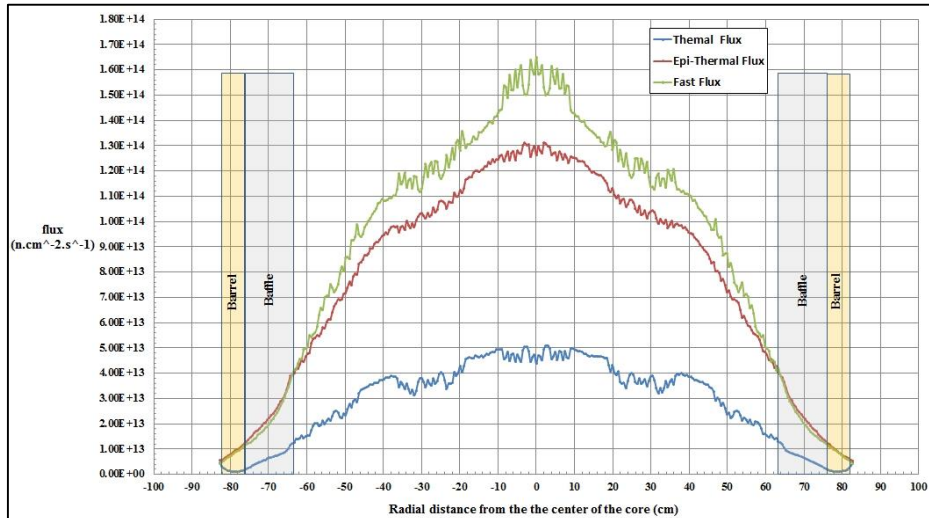
شکل (۵) توزیع شار نوترون‌های حرارتی در قلب راکتور



شکل (۶) توزیع شار نوترون‌های شبه حرارتی در قلب راکتور



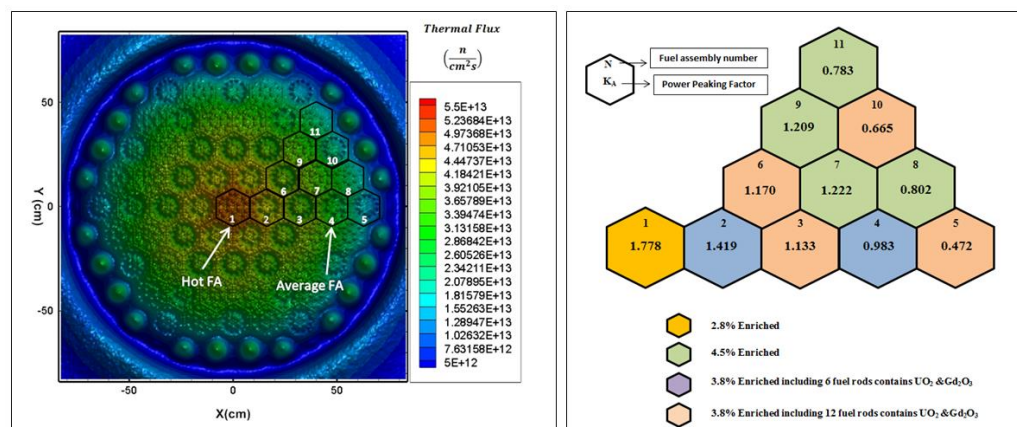
شکل (۷) توزیع شار نوترون های سریع در قلب راکتور



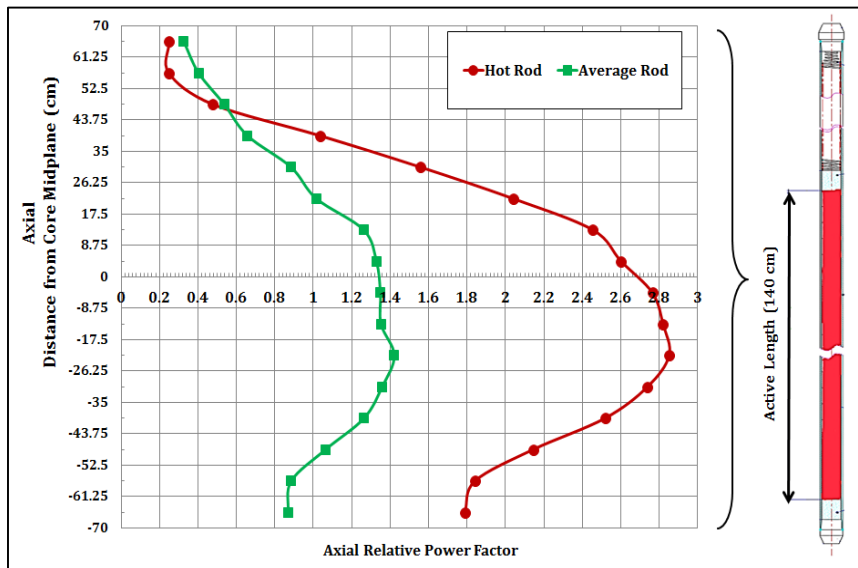
شکل (۸) توزیع شار نوترون حرارتی، شبه حرارتی و سریع در مقطع قلب و در صفحه $x=0$

۳- توزیع توان در مجتمع های سوخت و داغترین میله سوخت

از محاسبات نوترونیکی ضرایب پیک توانی مجتمع های سوخت محاسبه گردید و مجتمع داغ و متوسط و سپس میله داغ و متوسط در مجتمع های مزبور تعیین گردید. در میله های داغ و متوسط ضرایب پیک توان محوری محاسبه شد. ضریب پیک توان مجتمع داغ و میله داغ به ترتیب ۱,۷۷۸ و ۱,۸۴۶ محاسبه شد.



شکل (۹) (چپ) توزیع شار نوترون های حرارتی و مشخص نمودن مجتمع سوخت داغ و متوسط. (راست) ضرایب پیک توانی مجتمع های سوخت موجود در یک ششم قلب (به علت تقارن).



شکل (۱۰) تغییرات توان نسبی در راستای محوری میله داغ و متوسط به صورت ضرائب پیک توان محوری

ضریب پیک توانی مجتمع و میله سوخت متوسط نیز به ترتیب ۰,۹۸۳ و ۱ محاسبه شد. در شکل ۹ (چپ) توزیع شار نوترون حرارتی (نوترون‌هایی با انرژی کمتر از ۳ الکترون ولت) به تصویر کشیده شده است و ضرایب پیک توانی مجتمع‌های سوخت موجود در یک ششم قلب (تقارن یک ششم قلب) در شکل ۹ (راست) نشان داده شده است. در شکل ۱۰ تغییرات توان نسبی در راستای محوری میله داغ و متوسط به صورت ضرائب پیک توان محوری نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان دریافت که ماکزیمم توان تولیدی و به تبع آن ماکزیمم دمای سوخت در موقعیتی پایین‌تر از خط میانی میله سوخت رخ می‌دهد.

بحث و نتیجه‌گیری:

در این مقاله مطالعه نوترونیک قلب یک راکتور آبی تحت فشار کوچک ماژولار نسل سه پلاس با استفاده از شبیه‌سازی MCNPX2.7 انجام گرفته است. شبیه‌سازی‌ها بر اساس راکتور ماژولار CAREM25 به عنوان مرجع، انجام پذیرفته است. تغییرات دمایی در راستای محوری قلب در محاسبات لحاظ گردیده است. تمامی محاسبات برای سوخت تازه و شرایط کاری ابتدای سیکل انجام پذیرفته است. ارتفاع فعال این قلب ۱,۴ متر است که در مقایسه با راکتورهای توان بزرگ سائیزی همچون VVER-1000 بسیار کوچک است.

با محاسبه ضرایب راکتیویته سوخت و خنک‌کننده و مقایسه آنها با مقادیر گزارش شده از راکتور مرجع تطابق خوب بین نتایج نشان از معتبر بودن شبیه‌سازی‌ها دارد. منفی بودن ضرایب راکتیویته تضمین‌کننده ایمنی راکتور بر اساس محدوده‌های اساسی طراحی قلب می‌باشد.

شار نوترون‌های حرارتی، شبه‌حرارتی و سریع محاسبه گردید و به صورت سه‌بعی و دو‌بعی نمایش داده شد. شارهای نوترونی در قلب این راکتور از مرتبه 10^{13} و 10^{14} میباشند که مقدار آن‌ها در مرکز قلب زیاد است و در راستای شعاعی به صورت متقارن از مقدار آن کاسته می‌شود.

ضریب پیک توان مجتمع داغ و میله داغ به ترتیب ۱,۷۷۸ و ۱,۸۴۶ محاسبه شد. ضریب پیک توانی مجتمع و میله سوخت متوسط نیز به ترتیب ۰,۹۸۳ و ۱ محاسبه شد. تغییرات توان نسبی در راستای محوری میله داغ و متوسط به صورت ضرائب پیک توان محوری محاسبه گردید و به صورت گراف نشان داده شد.

مراجع:

- [1] IAEA. Advances in small modular reactor technology developments (2018).
- [2] R. Rosner, and S. Goldberg, Small modular reactors– key to future nuclear power generation in the US, Energy Policy Institute at Chicago, The University of Chicago, Chicago (2011).
- [3] M. Kyung, et al., Numerical study on thermo-hydrodynamics in the reactor internals of SMART. Nuclear Engineering and Design, 241, 2536-2543(2011).
- [4] B. Youngmin, et al., CFD Analysis of flow distribution at the core inlet of SMART. Nuclear Engineering and Design. 258, 19-25 (2013).
- [5] M. Ramana, et al., Licensing small modular reactors. Energy, 61, 555-564 (2013).
- [6] S. E. Hirdaris, et al., Considerations on the potential use of Nuclear Small Modular Reactor (SMR) technology for merchant marine propulsion. Ocean Engineering, 79, 101-130(2014).
- [7] A. Erfaninia, A. Hedayat and S. Mirvakili. Neutronic study of a new generation of the small modular pressurized water reactor using monte-carlo simulation. Progress in Nuclear Energy, 93, 218–230 (2016).
- [8] A. Erfaninia, A. Hedayat and S. Mirvakili. Neutronic-thermal hydraulic coupling analysis of the fuel channel of a new generation of the small modular pressurized water reactor including hexagonal and square fuel assemblies using mcnp and cfx. Progress in Nuclear Energy, 98:213–227 (2017).
- [9] Reza Akbari Jeyhouni, Dariush Rezaei Ochbelagh, Jose R. Maiorino, Francesco D'Auria, Giovanni Laranjo de Stefani. The utilization of thorium in Small Modular Reactors – Part I: Neutronic assessment. Annals of Nuclear Energy. 120:422-430(2018).
- [10] A. Sadegh-Noedoost, F. Faghihi, A. Fakhraei, M. Amin-Mozafari. Investigations of the fresh-core cycle-length and the average fuel depletion analysis of the NuScale core. Annals of Nuclear Energy. 136:1-19 (2020).
- [11] Afshin Hedayat. A review of advanced SMRs particularly iPWRs regarding safety features, economy issues, innovative concepts, and multi-purpose deployment. Radiation Physics and Engineering. 1(4):29–53 (2020). ش