

آنالیز نوترونیکی - ترموهیدرولیک کانال سوخت راکتور پیشرفته کوچک ماژولار نمونه با

کوپلینگ MCNP و CFX

علی عرفانی نیا*^(۱)، افشین هدایت^(۲)، سید محمد میروکیلی^(۳)

دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته ای

دانشگاه خلیج فارس، مرکز پژوهش های هسته ای

سازمان انرژی اتمی، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته ای

چکیده

راکتور های کوچک ماژولار راکتورهایی هستند که بر اساس تعریف آژانس بین‌المللی انرژی اتمی توان الکتریکی تولیدی آن ها کمتر از ۳۰۰ مگاوات الکتریکی است. هدف این تحقیق ضمن معرفی این نوع راکتورها، آنالیز توان نوترونیکی و ترموهیدرولیکی کانال سوخت یک راکتور کوچک ماژولار نمونه از طریق کوپلینگ کدهای MCNP و CFX است. برای این کار راکتور CAREM25 به عنوان مرجع در نظر گرفته شد. شبیه سازی نوترونیکی قلب راکتور توسط کد مونت کارلو MCNPX انجام پذیرفت. بعد از تعیین کانال های داغ و متوسط، با تقسیم بندی ارتفاع کانال داغ و متوسط به ۱۶ قسمت مساوی کوپلینگ نوترونیکی و ترموهیدرولیک انجام پذیرفت. محاسبات ترموهیدرولیک با استفاده از نرم افزار Ansys CFX انجام پذیرفته است. با همگرایی در توزیع دمای محوری سوخت و خنک کننده، پارامترهای نوترونیکی قلب و پارامترهای ترموهیدرولیکی کانال های به صورت نمودار و گراف ارائه شد.

کلید واژه ها : راکتور کوچک ماژولار، کوپلینگ نوترونیکی و ترموهیدرولیک، MCNP، CFX

۱. مقدمه

راکتور های کوچک ماژولار بر اساس تعریف آژانس بین‌المللی انرژی اتمی به آن دسته از راکتورهای قدرت گویند که توان الکتریکی تولیدی آن ها کمتر از ۳۰۰ مگاوات الکتریکی است. راکتورهای کوچک ماژولار از نظر هزینه های اولیه، سایز و اندازه راکتور، ایمنی و امنیت و انعطاف در جابجایی و نصب نسبت به راکتورهای بزرگ امروزی بسیار مناسب تر و دارای مزیت بیشتری میباشند. واژه "ماژولار" به این موضوع اشاره دارد که اجزا مهم



بیست و سومین کنفرانس هسته‌ای ایران

۱۵ و ۴ اسفند ماه ۱۳۹۵ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات



و اصلی سیستم تولید بخار در کارخانه ساخته میشود و به محل مورد نظر حمل و نصب میگردد. از مزایای این نوع راکتورها می توان به مواردی از قبیل: پایین بودن سرمایه گذاری، انعطاف پذیری در به کارگیری، اثربخشی و بازدهی بالاتر، عدم اشاعه مواد هسته ای، ایجاد بازارهای بین المللی بهتر و بیشتر، ایمنی بالاتر به علت وجود سیستم های پسیو برداش 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 مدولار راکتورهایی با طراحی جدید میباشند که بیشتر در مراحل طراحی و تحقیق به سر میبرند و یا در مراحل ابتدایی ساخت میباشند. در خصوص این راکتور ها مطالعاتی نه چندان زیاد انجام گرفته است که بسیاری از اطلاعات و جزئیات این تحقیقات عملا منتشر نشده اند. از جمله تحقیقات انجام گرفته و منتشر شده در خصوص این راکتورها میتوان به چند مورد زیر اشاره نمود. در سال ۲۰۱۱، بادو مگان و هکارنش گزارشی از پروژه CAREM 25 ارائه دادند که در آن به بیان مزایا 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 به تحلیل مکانیک سیالاتی جریان خنک کننده در قسمت پایین قلب راکتور SMART پرداخته است. آنها به بررسی عددی توزیع میدان سرعت و پارامترهای هیدرودینامیکی در قسمت ورودی قلب راکتور SMART پرداختند [۴]. رامانا در سال ۲۰۱۳ پروژه لایسنس گیری راکتورهای کوچک مدولار رو 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 مدولار برای تولید نیروی رانش کشتی ها پرداخته است و امکانسنجی استفاده از این نوع راکتور هارا در کشتی ها بررسی کردند [۶]. هدف این تحقیق عبارتند از آنالیز نوترونیک و ترموهیدرولیکی یک راکتور کوچک ماژولار نمونه از طریق کویلینگ نوترونیک و ترموهیدرولیک با استفاده از کدهای MCNP و CFX است. از آنجا که کارهای اندکی در خصوص این نوع راکتورها انجام و منتشر شده است این تحقیق در نوع خود جدید بوده و می تواند زمینه ساز تحقیقات هر چه بیشتر این نوع راکتورها در آینده باشد.

۲. روش انجام تحقیق

در این تحقیق برای انجام شبیه سازیها، راکتور CAREM25 به عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود و شبیه سازی بر اساس آن انجام می‌گیرد. پارامترهای نوترونیک از قبیل ضریب تکثیر قلب، توزیع توان و پارامترهای ترموهیدرولیکی از قبیل توزیع دما سیال خنک کننده و سوخت، درکانال مجتمع سوخت محاسبه میشوند. محاسبات مذکور با انجام یک کوپلینگ و ارتباط مابین نتایج محاسبات نوترونیک و ترموهیدرولیک انجام می‌گیرد. انجام محاسبات نوترونیک برای قلب راکتور انجام می‌گیرد و با در نظر گرفتن یک کانال متوسط و همچنین یک کانال داغ محاسبات ترموهیدرولیکی توأم با محاسبات نوترونیک انجام می‌گردد. ساختار قلب، مجتمع های سوخت راکتور مرجع در شکل ۱ نشان داده شده است. قلب، مجتمع سوخت و میله سوخت شبیه سازی شده در شکل ۲ (چپ) نشان داده شده است. راکتور مرجع مذکور بر پایه تکنولوژی راکتورهای آب سبک و توسط کمیسیون ملی انرژی اتمی آرژانتین توسعه داده شده است. که پروژه آن از سال ۱۹۸۴ شروع شده است و اولین سوخت گیری آن قرار است که در سال ۲۰۱۸ انجام گیرد. خلاصه ای از این اطلاعات در شکل ۲ (راست) لیست شده است.

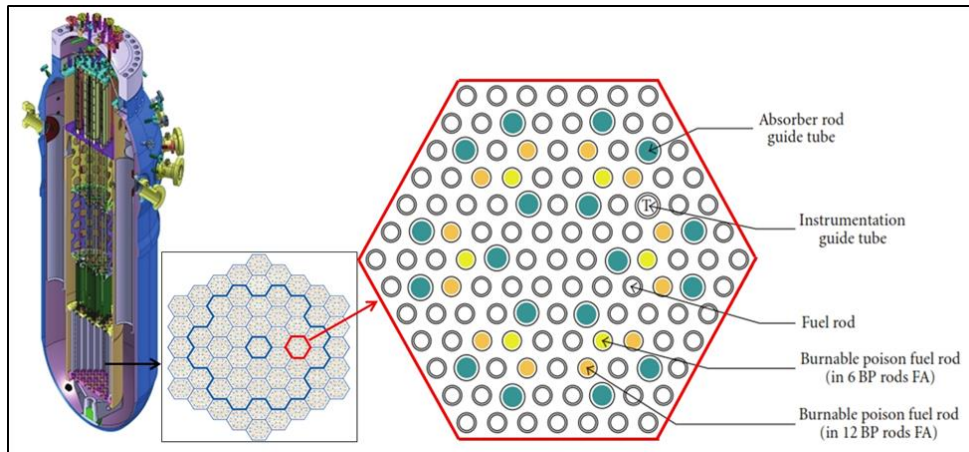
در شکل ۳ نحوه کوپلینگ و انتقال اطلاعات بین دو کد MCNP و CFX در تقسیم بندی ۱۶ گانه محوری کانال سوخت نشان داده شده است. کانال به طول ۱۴۰ سانتیمتر همراه با اسپیسرها شبیه سازی شده است. در شکل ۴ (راست) هندسه و مشبندی کانال سوخت همراه با اسپیسرها ی مدل سازی شده نشان داده شده است.

۳. نتایج

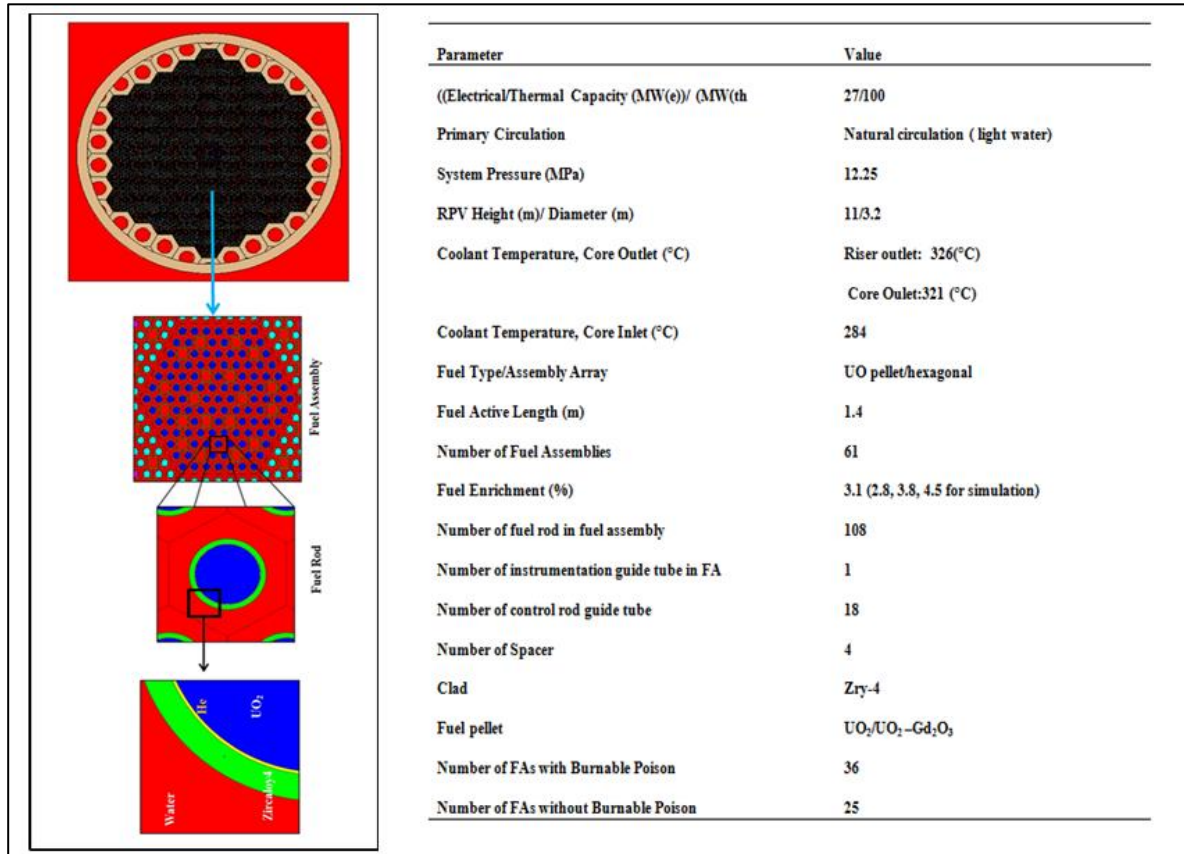
با توجه به توضیحات بالا و انجام محاسبات کوپلینگ نوترونیک و ترموهیدرولیک، با شش مرحله تکرار محاسبات کوپلینگ همگرایی مناسبی ایجاد گردید. از محاسبات نوترونیک ضرائب پیک توانی مجتمع های سوخت محاسبه گردید و مجتمع داغ و متوسط و سپس میله داغ و متوسط در مجتمع های مذکور تعیین گردید. در میله های داغ و متوسط ضرائب پیک توان محوری محاسبه گردید. ضریب پیک توان محوری مجتمع داغ و میله داغ به ترتیب

۱,۷۷۸ و ۱,۸۴۶ محاسبه گردید. ضریب پیک توانی مجتمع و میله سوخت متوسط نیز به ترتیب ۰,۹۸۳ و ۱ محاسبه

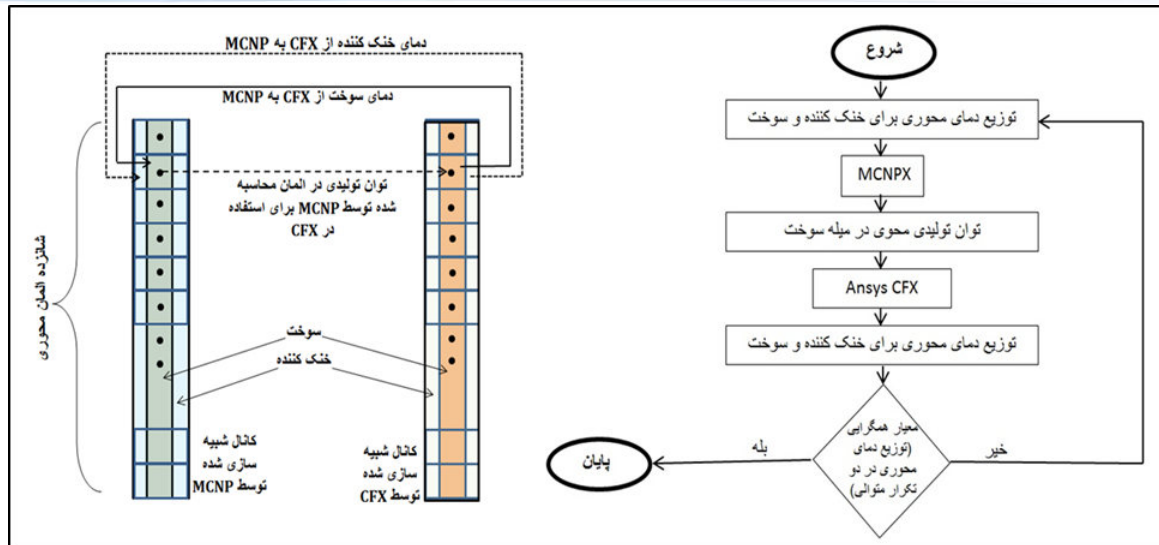
شد.



شکل ۱: قلب راکتور مرجع CAREM25 همراه با ساختار قلب و مجتمع سوخت آن

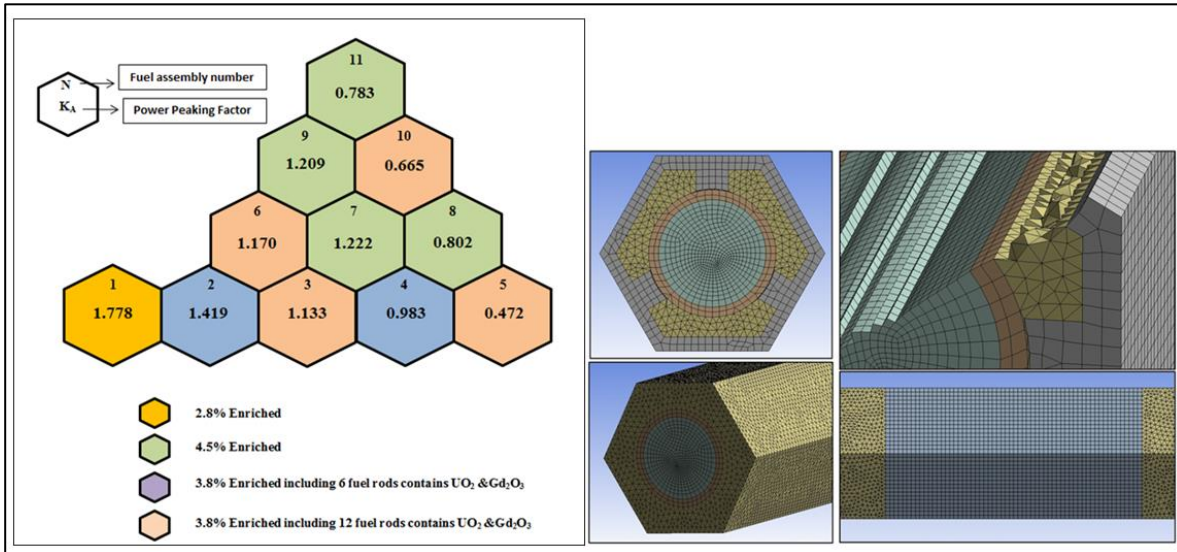


شکل ۲: مشخصات راکتور و شماتیک قلب، مجتمع سوخت و میله سوخت شبیه سازی شده توسط MCNPX

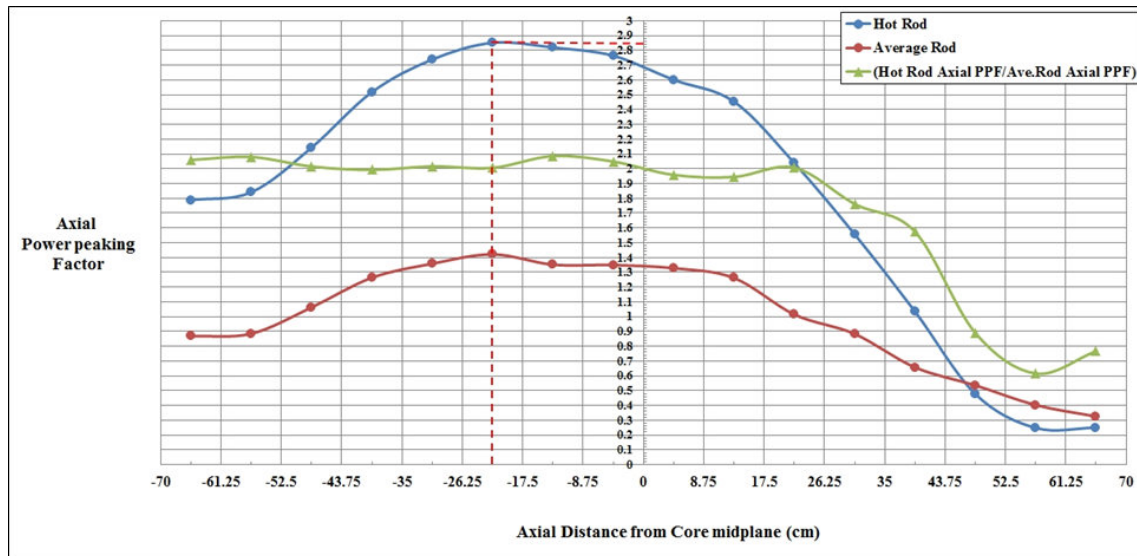


شکل ۳: الگوریتم و نحوه محاسبات کوپلینگ و انتقال اطلاعات بین دو کد MCNP و CFX

در شکل ۴ (چپ) ضرائب پیک توانی مجتمع های سوخت موجود در یک هشتم قلب (به علت تقارن) و در شکل ۵ ضرائب پیک توان محوری میله سوخت داغ و متوسط بعد از ۶ تکرار کوپلینگ نوترونیکی و ترمو هیدرولیک نشان داده شده است. در شکل ۵ نسبت ضرائب پیک توانی میله داغ و متوسط سوخت نیز نشان داده شده است. این نسبت عملاً برای محاسبه مقدار ماکزیمم شار حرارتی در کانال داغ و محاسبه MDNBR مورد استفاده قرار می گیرد. همانطور که پیداست در بیش از ۷۰ درصد ارتفاع قلب این نسبت نزدیک به ۲ میباشد. در شکل ۶ و ۷ به ترتیب پروفایل دمایی مرکز سوخت و دمای متوسط سیال خنک کننده (نمودارهای فیت شده) در راستای محوری کانال داغ در طی ۶ تکرار کوپلینگ نوترونیکی و ترمو هیدرولیک نشان داده شده است. همانطور که از اشکال بالا پیداست با انجام محاسبات تومان نوترونیکی و ترمو هیدرولیک دمای تولیدی در راستای محوری سوخت به صورت تابع کسینوسی است و پروفایل دمای سیال خنک کننده نیز با این توزیع دمایی بنا به مفاهیم تئوری و روابط انتقال حرارتی و سیالات کاملاً مطابقت دارد. ماکزیمم دمای محوری سوخت که در نزدیکی وسط ارتفاع میله سوخت اتفاق افتاده است ۶۳۴ درجه کلوین است، که در مقایسه با راکتور بزرگ نوعی VVER-1000 3000 مگاواتی که ماکزیمم دمای مرکز سوخت میله داغش حدود ۱۷۰۰ درجه کلوین است، مقدار خیلی کوچکتري است.



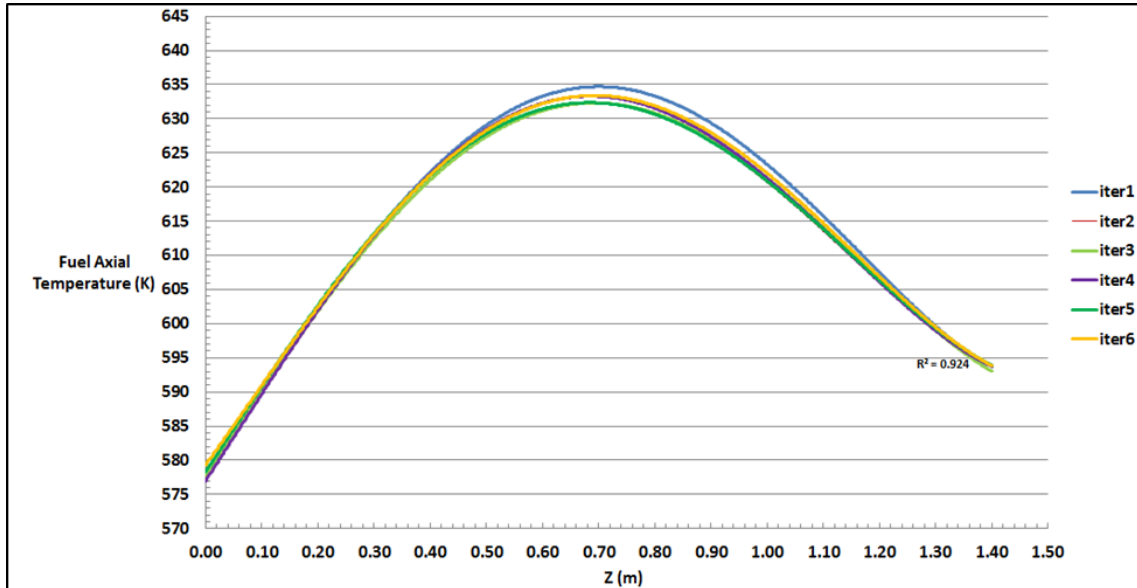
شکل ۴: ضرائب پیک توانی مجتمع های سوخت در یک هشتم قلب شبیه سازی شده همراه با غنای سوخت و شماره مجتمع سوخت



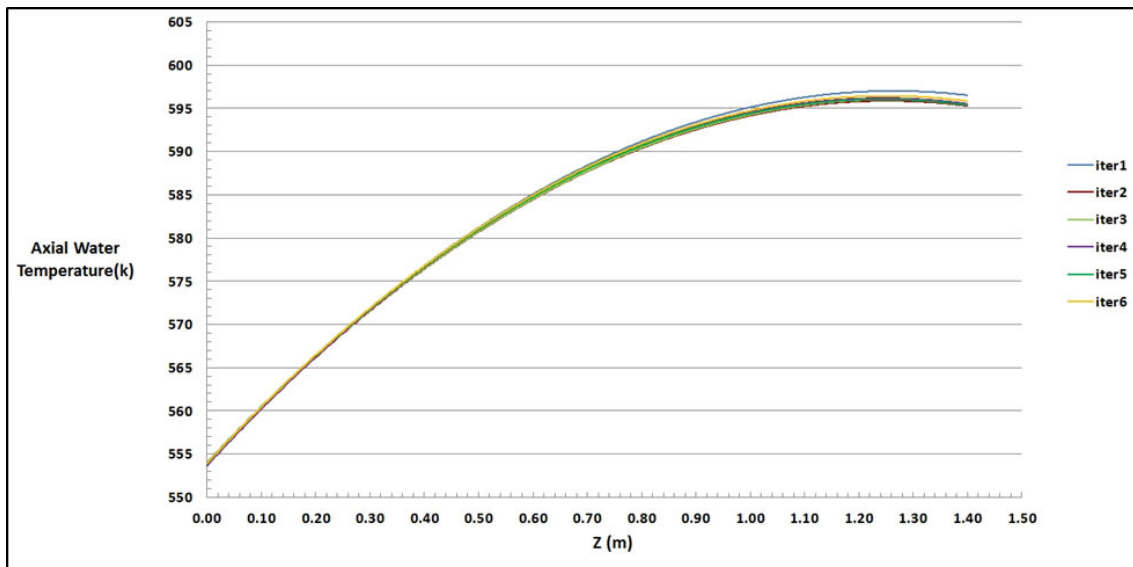
شکل ۵: ضرائب پیک توان محوری میله داغ و میله متوسط سوخت و نسبت آنها

با توجه به فشار کارکردی سیستم که ۱۲,۲۵ مگاپاسکال است و دمای جوش آب در این فشار ۶۰۰ درجه کلوین میباشد، دمای آب در طول کانال به دمای جوش نمیرسد و جوششی اتفاق نمی افتد. لازم به ذکر است که سیال خنک کننده با دمای ۵۹۴ درجه کلوین از کانال خارج میگردد و بعد از عبور از رایزر (riser) بالای قلب وارد مولد

بخار می‌گردد.



شکل ۶: پروفایل دمای محوری مرکز میله سوخت داغ برای شش تکرار کوپلینگ نوترونیک-ترموهیدرولیک



شکل ۷: پروفایل دمای متوسط محوری سیال خنک کننده در راستای محوری کانال داغ برای شش تکرار کوپلینگ نوترونیک-ترموهیدرولیک

با تعیین میله سوخت داغ در مجتمع داغ، ماکزیمم توان خطی در این میله سوخت مقدار $\left(\frac{kW}{m}\right)$ ۲۰,۱۸ محاسبه شده است؛ که در مقایسه با یک راکتور VVER-1000 3000 مگاواتی که دارای ماکزیمم توان خطی میله سوخت داغ $\left(\frac{kW}{m}\right)$ ۴۴,۸ است، مقدار کمتری است. از آنجا که سوخت در این نوع راکتور ها در دمای کمتری در شرایط کارکرد نرمال قلب قرار دارد، حاشیه های ایمنی بهتری را برای این نوع راکتور مهیا می‌سازد. برای کانال متوسط نیز محاسبات انجام پذیرفت و ماکزیمم دمای محوری سوخت که در نزدیکی وسط ارتفاع میله سوخت اتفاق افتاده است ۵۹۶ درجه کلوین است، که در مقایسه با ماکزیمم دمای میله سوخت داغ که در قسمت قبل بیان شد ۳۸ درجه کلوین پایین تر است. سیال خنک کننده با دمای ۵۷۸ درجه کلوین از کانال متوسط خارج میگردد که نسبت به دمای خروجی کانال داغ ۱۶ درجه کلوین کمتر است.

۴. بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق با بهره گیری از کد محاسبات نوترونیکی MCNPX و کد دینامیک سیالات محاسباتی ANSYS CFX15 ، محاسبات کوپل شده نوترونیکی و ترموهیدرولیک برای کانال مجتمع سوخت قلب راکتور کوچک ماژولار انجام پذیرفت. با انتخاب راکتور کوچک ماژولار CAREM25 به عنوان مرجع، شبیه سازی های نوترونیکی و ترموهیدرولیک برای قلب پیشنهادی انجام پذیرفت. در این تحقیق با محاسبات نوترونیکی ضرائب پیک توانی مجتمع های سوخت و میله های سوخت محاسبه شد و با محاسبات ترموهیدرولیک تغییرات دمایی سوخت، سیال خنک کننده، انجام پذیرفت. در کوپلینگ نوترونیکی و ترموهیدرولیک انجام شده، همگرایی بر اساس همگرایی در پروفایل دمای متوسط محوری سیال خنک کننده و دمای موری مرکز سوخت در تکرارهای متوالی تعریف شده است.

مراجع

- [1] IAEA. Advances in Small Modular Reactors Technology Developments. Austria, 2011.
- [2] Boado, magan,H., Delmastro,D,F., Markiewicz,M. CAREM Project Status. Project Report: Hindawi Publishing Corporation, 2011.
- [3] Kyung, Min., Kim, Byoung., In, Lee., Hyung, Hee, Cho. "Numerical study on thermo-hydrodynamics in the reactor internals of SMART". Nuclear Engineering and Design, vol 241, 2011, pp2536-2543.

- [4] Youngmin, Bae., YoungIn, Kim., Cheon, Tae Park. "CFD Analysis of flow distribution at the core inlet of SMART". Nuclear Engineering and Design, vol 258, 2013, pp19-25.
- [5] Ramana, M.V., Laura, Berzak Hopkins., Alexander, Glaser. "Licensing small modular reactors". Energy, vol 61, 2013, pp555-564.
- [6] Hirdaris, S.E., Cheng, Y.F., Shallcross, P. "Considerations on the potential use of Nuclear Small Modular Reactor (SMR) technology for merchant marine propulsion". Ocean Engineering, vol 79, 2014, pp101-130.