

آنالیز داغترین زیرکانال سوخت راکتور کوچک یکپارچه آبی تحت فشار نسل III⁺

علی عرفانی نیا*^{۱,۲}

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

چکیده:

راکتورهای کوچک یکپارچه آبی تحت فشار از نوع راکتورهای کوچک ماژولار هستند که معمولاً دارای توان تولیدی کمتر از ۳۰۰ مگاوات حرارتی می‌باشند. این نوع راکتورها در سالهای اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. هدف از این تحقیق آنالیز داغترین زیرکانال سوخت یک راکتور کوچک یکپارچه آبی تحت فشار نسل III⁺ با انجام محاسبات نوترونیک-ترموهیدرولیک از طریق کوپلینگ کدهای MCNPX و CFX است. برای این کار راکتور CAREM25 به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است. با محاسبه ضرایب پیک توانی مجتمع و میله‌های سوخت، زیرکانال داغ تعیین شد. ضمن محاسبه ضرایب پیک توانی محوری، تغییرات دمایی سوخت و سیال خنک‌کننده در راستای محوری داغترین زیرکانال محاسبه گردید. همچنین توزیع شار نوترون‌های حرارتی در قلب، تغییرات شار گرمای حرارتی بحرانی و DNBR و MDNBR در طول داغترین زیرکانال سوخت محاسبه و گزارش شده است. دمای ماکزیمم سوخت در داغترین میله سوخت ۶۳۴ کلوین محاسبه شد که در مقایسه با یک راکتور نوعی VVER-1000 بسیار کمتر است.

کلیدواژه‌ها: راکتور کوچک یکپارچه آبی تحت فشار نسل III⁺، کوپلینگ نوترونیک-ترموهیدرولیک، زیرکانال داغ.

Hottest Fuel Sub-Channel Analysis in a Generation III⁺ Small Integrated Pressurized Water Reactor

Ali Erfaniania^{*,1,2}

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

Abstract:

Small Integrated Pressurized Water Reactors are a kind of Small Modular Reactors which generates thermal power less than 300 MW_{th}. These reactors are more paid attention during recent years. This paper is aimed at analysis of the hottest fuel sub-channel in a Generation III⁺ Small Integrated Pressurized Water Reactor by neutronic and Thermal hydraulic calculations by using MCNPX and CFX coupling. The CAREM25 was selected as the reference reactor. By calculating the power peaking factors of fuel rods and fuel assemblies, the hot fuel sub-channel was determined. Besides calculating axial power peaking factor of the hottest sub-channel, axial fuel and coolant temperature changes were calculated along the channel. The thermal neutron flux distribution in the core, the changes of the axial heat flux, DNBR and MDNBR were calculated along the hottest fuel sub-channel and reported. The fuel rod maximum temperature was calculated as 634 K which is much lower than that of a typical VVER-1000 reactor.

Keywords: Generation III⁺ Small Integrated Pressurized Water Reactor, Neutronic-Thermal hydraulic Coupling, Hot Sub-Channel.

۱. مقدمه

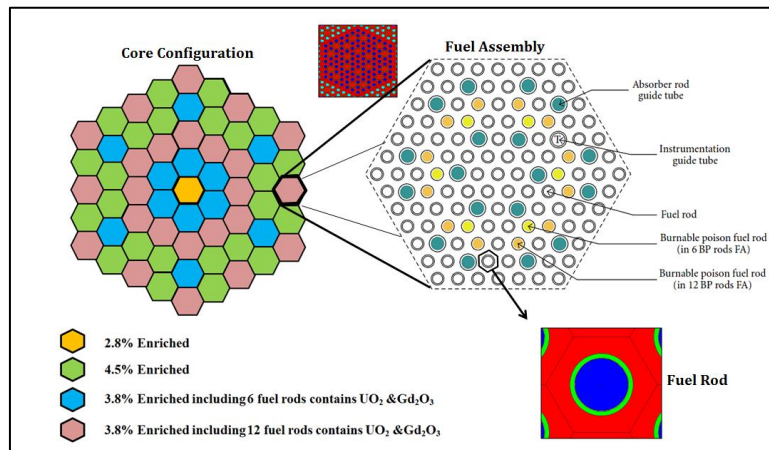
راکتورهای کوچک یکپارچه آبی تحت فشار از نوع راکتورهای کوچک ماژولار هستند که معمولاً دارای توان تولیدی متر از ۳۰۰ مگاوات حرارتی است. راکتورهای کوچک ماژولار از نظر هزینه‌های اولیه، سایز و اندازه راکتور، ایمنی و امنیت و انعطاف در جابجایی نسبت به راکتورهای بزرگ امروزی بسیار مناسب‌تر و دارای مزیت بیشتری می‌باشند. 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 می‌گردد. از مزایای این نوع راکتورها می‌توان به مواردی از قبیل: پایین بودن هزینه سرمایه گذاری، انعطاف پذیری در به کارگیری، اثربخشی و بازدهی بالاتر، عدم اشاعه مواد هسته‌ای، ایجاد بازارهای بین‌المللی بهتر و بیشتر، ایمنی بالاتر به علت وجود سیستم‌های پسیو برداشت حرارت همراه با گردش طبیعی، مقدار مواد رادیو اکتیو موجود کمتر، طراحی ساده و کاهش نواحی خطرناک، یک بودن تمامی تجهیزات در یک محفظه و کاهش سیستم‌های پایپینگ اضافی و... اشاره نمود [۱]. راکتورهای کوچک ماژولار 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 راکتورها مطالعات زیادی صورت پذیرفته و اطلاعات و جزئیات زیادی نیز منتشر نشده است. از جمله تحقیقات انجام گرفته و منتشر شده در خصوص این راکتورها می‌توان 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 سیستم‌های 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 نموده‌اند [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]. راما نا در سال ۲۰۱۳ پروژه لایسنس‌گیری راکتورهای کوچک ماژولار را بررسی و بیان کرده است و به بررسی تفاوت‌های 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 کشتی‌ها پرداخته و امکانسنجی استفاده از این نوع راکتورها را در کشتی‌ها بررسی کردند [۶]. در سال ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ عرفانی‌نیا و همکارانش به مدلسازی نوترونیک و ترموهیدرولیک این نوع راکتورها با چینش سوخت هگزآگونال و مربعی پرداخته‌اند [۷ و ۸]. هدف این تحقیق عبارتند از آنالیز داغترین زیرکانال یک راکتور کوچک یکپارچه آبی تحت فشار نسل سه پلاس که از نوع راکتورهای کوچک ماژولار محسوب شده و بر اساس راکتور کوچک یکپارچه آبی تحت فشار CAREM25 شبیه‌سازی شده است. محاسبات از طریق کوپلینگ نوترونیک- ترموهیدرولیک با استفاده از کدهای MCNPX و AnsysCFX انجام گرفته است. از آنجا که کارهای اندکی در خصوص این نوع راکتورها انجام و منتشر شده است، این تحقیق در نوع خود جدید بوده و می‌تواند زمینه‌ساز تحقیقات هر چه بیشتر این نوع راکتورها در آینده باشد.

۲. روش کار

در این تحقیق برای انجام شبیه‌سازی‌ها، راکتور CAREM25 به عنوان مرجع در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی بر اساس آن انجام گرفته است. پارامترهای نوترونیک از قبیل توزیع شار حرارتی، توزیع توان در مجتمع‌های سوخت و میله‌های سوخت و پارامترهای ترموهیدرولیکی از قبیل توزیع دمای سیال خنک کننده و سوخت در طول زیرکانال سوخت، توزیع شار حرارتی محوری، شار حرارتی بحرانی و $DNBR^1$ در زیر کانال داغ محاسبه شده است. محاسبات مزبور با پیاده‌سازی یک کوپلینگ و ارتباط مابین نتایج محاسبات نوترونیک و ترموهیدرولیک انجام شده است. انجام محاسبات نوترونیک برای قلب راکتور انجام شده و با در نظر گرفتن یک زیرکانال متوسط و همچنین یک زیرکانال داغ،

¹ Departure from Nucleate Boiling Ratio

محاسبات ترموهیدرولیکی توام با محاسبات نوترونیک انجام پذیرفته است. ساختار قلب، چینش مجتمع های سوخت، میله سوخت و توزیع غنای سوخت در قلب راکتور در شکل ۱ 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 در سال ۲۰۱۹ انجام گرفته است. خلاصه ای از این اطلاعات در شکل ۲ (چپ) لیست شده است. در شکل ۲ (راست) الگوریتم کوپلینگ محاسبات نوترونیک و ترموهیدرولیک و انتقال اطلاعات بین دو کد MCNPX و CFX در مطالعه زیرکانال سوخت نشان داده شده است. کانال سوخت به طول ۱۴۰ سانتیمتر همراه با مهارکننده‌ها شبیه‌سازی شده است.



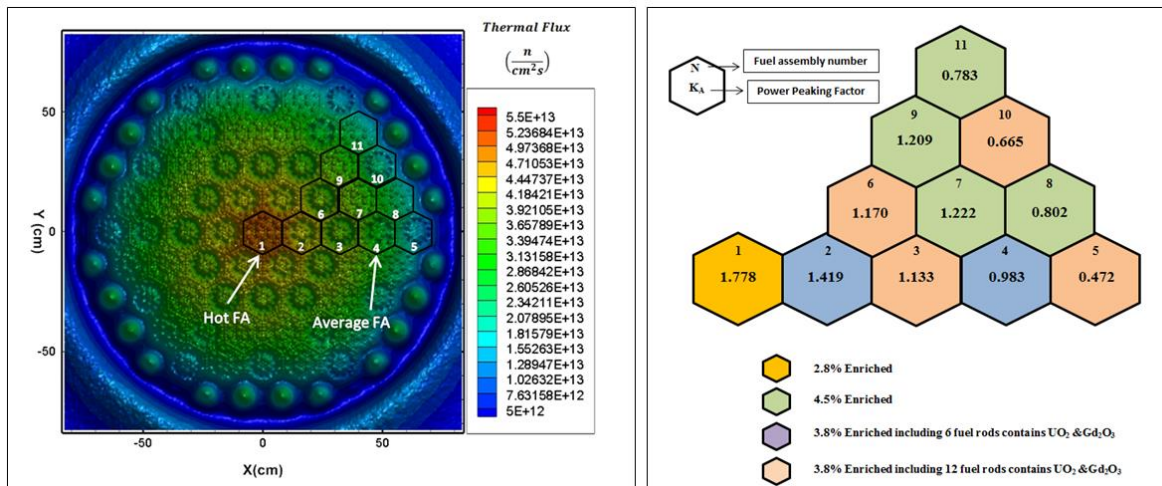
شکل ۱. ساختار قلب، چینش مجتمع های سوخت، میله سوخت و توزیع غنای سوخت در قلب راکتور

Parameter	Value
Reactor Type	Integral PWR
Coolant/Moderator	Light water
System Pressure (MPa)	12.25
Coolant Temperature, Core Outlet (°C)	326
Coolant Temperature, Core Inlet (°C)	284
Primary Circulation	Natural circulation
Thermal Capacity (MW(thermal))	100
RPV Diameter (m)	3.2
RPV Height (m)	11
Fuel Type/Assembly Array	UO pellet/hexagonal
Fuel Active Length (m)	1.4
Number of Fuel Assemblies	61
Fuel Enrichment (%)	2.8-4.5
Fuel Burnup (GWd/ton)	0.15 at BOC
Number of fuel rod in fuel assembly	108
Number of instrumentation guide tube in FA	1
Number of control rod guide tube	18
The pitch of fuel rods (mm)	13.8
The pitch of fuel assemblies (mm)	160
Outer diameter of fuel rod (mm)	9
Fuel pellet diameter (mm)	7.6
Fuel pellet	UO ₂ /UO ₂ -Gd ₂ O ₃
Number of FAs with Burnable Poison	36
Number of FAs without Burnable Poison	25

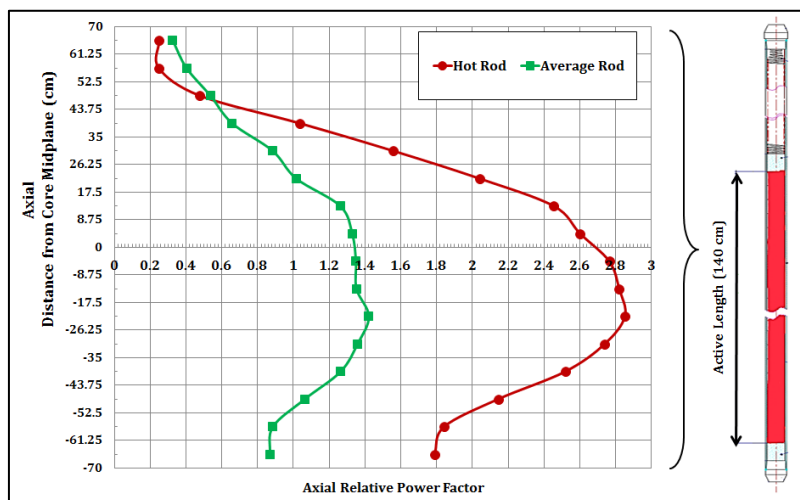
شکل ۲. (چپ) خلاصه ای از اطلاعات راکتور مرجع مورد بررسی، (راست) الگوریتم کوپلینگ محاسبات نوترونیک و ترموهیدرولیک و انتقال اطلاعات بین دو کد MCNPX و CFX در بررسی زیرکانال سوخت.

۳. نتایج

با توجه به توضیحات بالا و انجام محاسبات همبسته نوترونیک-ترموهیدرولیک، با انتخاب شرایط اولیه مناسب، طی شش مرحله تکرار محاسبات همبسته‌سازی، همگرایی مناسبی ایجاد گردید. از محاسبات نوترونیک ضرایب پیک توانی مجتمع‌های سوخت محاسبه گردید و مجتمع داغ و متوسط و سپس میله داغ و متوسط در مجتمع‌های مزبور تعیین گردید. در میله‌های داغ و متوسط ضرایب پیک توان محوری محاسبه گردید. ضریب پیک توان محوری 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. در شکل ۳ (چپ) توزیع شار نوترون حرارتی (نوترون‌هایی با انرژی کمتر از ۳ الکترون‌ولت) به تصویر کشیده شده است و ضرایب پیک توانی مجتمع‌های سوخت موجود در یک ششم قلب (تقارن یک ششم قلب) بعد از انجام ۶ تکرار کوپلینگ نوترونیک-ترموهیدرولیک در شکل ۳ (راست) نشان داده شده است. در شکل ۴ تغییرات توان نسبی در راستای محوری میله داغ و متوسط به صورت ضرایب 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 پایین تر از خط میانی میله سوخت رخ می‌دهد.



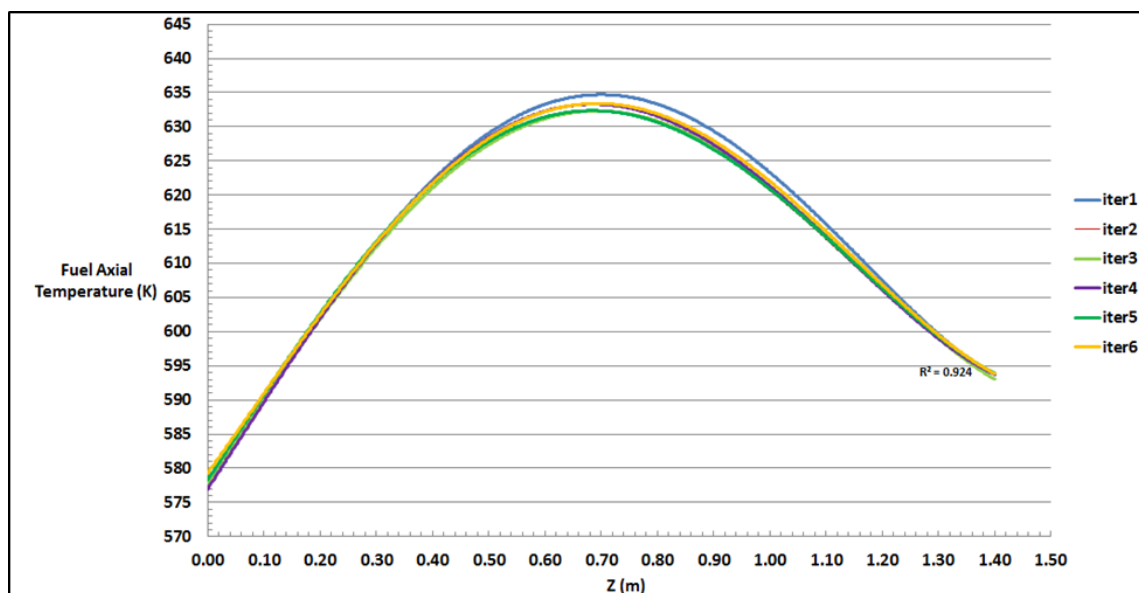
شکل ۳. (چپ) توزیع شار نوترون‌های حرارتی (نوترون‌هایی با انرژی کمتر از ۳ الکترون‌ولت). (راست) ضرایب پیک توانی مجتمع‌های سوخت موجود در یک ششم قلب (به علت تقارن).



شکل ۴. تغییرات توان نسبی در راستای محوری میله داغ و متوسط به صورت ضرایب پیک توان محوری

به منظور انجام محاسبات ترموهیدرولیک، هندسه کانال سوخت شبیه سازی و مشبندی شد. مشبندی با ماژول ICEM در نرم افزار انسیس انجام گرفت. با انجام محاسبات استقلال از مش و احراز معیارهای مناسب مشبندی به منظور رسیدن به همگرایی مناسب در حل، شرایط مرزی و حاکم بر دامنه مسئله اعمال شده و شبیه سازی های ترموهیدرولیکی کانال سوخت با محاسبات CFD انجام پذیرفت. از مدل توربالانسی $k - \epsilon$ استاندارد استفاده شده است و حل عددی تا رسیدن به معیار همگرایی 10^{-5} ادامه یافت. با در نظر گرفتن دبی جرمی ورودی 0.08 کیلوگرم بر ثانیه در ورودی کلنل (طبق داده های طراحی) و لحاظ شنواری در حل عددی عملا گردش طبیعی سیال در نظر گرفته شد. از شرط سرعت در ورودی و فشار در خروجی برای محاسبات استفاده شده است.

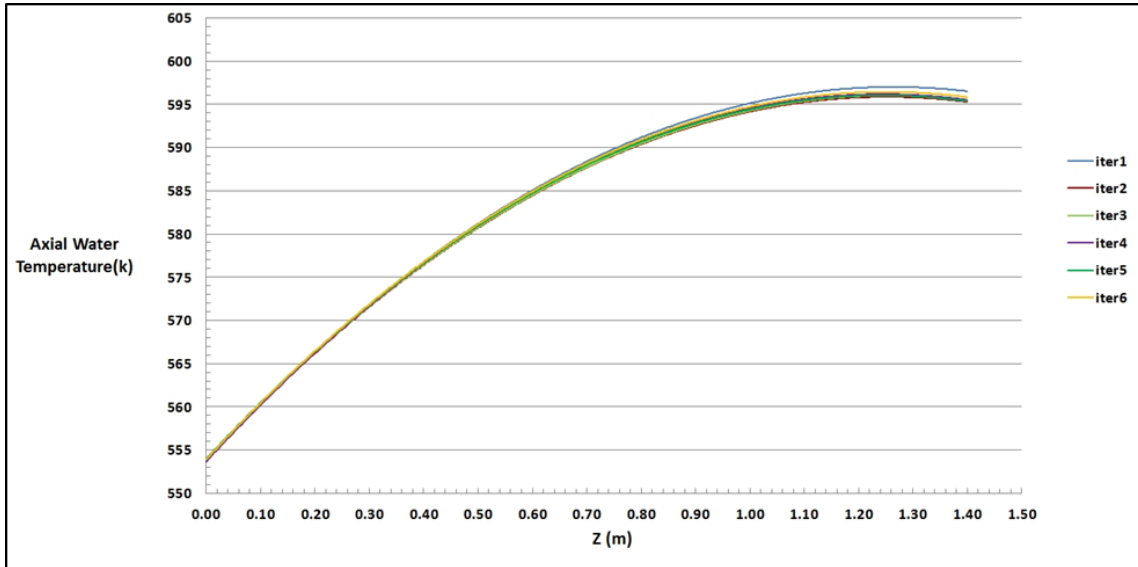
در شکل ۵ و ۶ به ترتیب پروفایل دمایی مرکز سوخت و دمای متوسط سیال خنک کننده (نمودارهای فیت شده) در راستای محوری زیر کانال داغ در طی ۶ تکرار کوپلینگ نوترونیک-ترموهیدرولیک نشان داده شده است. همانطور که از تصاویر بالا پیداست با انجام محاسبات توامان نوترونیک و ترموهیدرولیک دمای سوخت در راستای محوری سوخت به 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 کاملا مطابقت دارد. ماکزیمم دمای محوری سوخت که در نزدیکی وسط ارتفاع میله سوخت اتفاق افتاده است 634 درجه کلوین است، که در مقایسه با یک راکتور بزرگ نوعی VVER-1000 با توان 3000 مگاوات حرارتی، که ماکزیمم دمای مرکز سوخت میله داغش حدود 1700 درجه کلوین است، مقدار خیلی کوچکتري است. با توجه به فشار کاری سیستم که 12.25 مگاپاسکال است و دمای جوش آب در این فشار 600 درجه کلوین می باشد، دمای آب در طول کانال به دمای جوش نمی رسد و جوششی اتفاق نمی افتد. لازم به ذکر است که سیال خنک کننده با دمای 594 درجه کلوین از زیر کلنل (قلب) خارج می گردد و بعد از عبور از رایزر (riser) که در بالای قلب قرار دارد، وارد مولد بخار می شود.



شکل ۵. پروفایل دمای محوری مرکز میله سوخت داغ برای شش تکرار کوپلینگ نوترونیک-ترموهیدرولیک

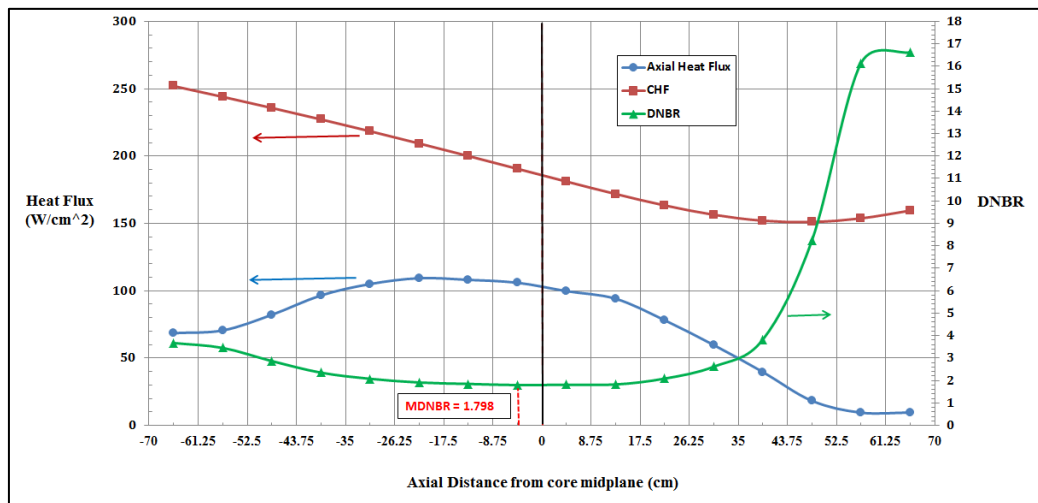
با تعیین داغترین میله سوخت واقع در مجتمع داغ، ماکزیمم توان خطی در این میله سوخت مقدار $20.18 \left(\frac{kW}{m} \right)$ محاسبه شده است؛ که در مقایسه با یک راکتور نوعی VVER-1000 با توان 3000 مگاوات حرارتی که دارای

ماکزیمم توان خطی میله سوخت داغ $44.8 \left(\frac{kW}{m}\right)$ 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.



شکل ۶. پروفایل دمای متوسط محوری سیال خنک کننده در راستای محوری کانال داغ برای شش تکرار کوپلینگ نوترونیک-ترموهیدرولیک

در شکل ۷، توزیع شارحرارتی محوری، شارحرارتی بحرانی و کمیت DNBR، جدایش از جوشش هسته ای، برای داغترین زیرکانال سوخت در شرایط ابتدای قلب محاسبه شده و به تصویر کشیده شده است. کمترین مقدار DNBR، یا همان $MDNBR^1$ نیز برابر با ۱.۷۹۸ محاسبه شده است که در نزدیکی مرکز قلب و ۴.۳۵ سانتیمتری زیر سطح میانی قلب رخ می دهد.



شکل ۷. شارحرارتی محوری، شارحرارتی بحرانی و کمیت DNBR برای زیرکانال داغ

¹ Minimum Departure from Nucleate Boiling Ratio

مقایسه پارامترهای راکتور مورد مطالعه با یک راکتور VVER-1000 نوعی با توان ۳۰۰۰ مگاوات حرارتی در جدول زیر بیان گردیده است. هر چند که راکتور مورد مطالعه از نظر ساختار، غنای سوخت و توان با راکتورهای بزرگ متداولی همچون راکتور VVER-1000 متفاوت است ولی بیان و مقایسه پارامترها میتواند به مخاطب دید بهتری از این نوع راکتورها ارائه دهد.

جدول ۱. مقایسه پارامترهای راکتور مورد مطالعه با یک راکتور VVER-1000 نوعی با توان ۳۰۰۰ مگاوات حرارتی

Parameter	Present IPWR	VVER-1000 [۹]
Coolant/Moderator	Light water	Light water
System Pressure (MPa)	12.25	15.7
Coolant Temperature, Core Outlet (°C)	326	321
Coolant Temperature, Core Inlet (°C)	284	290
Thermal Capacity (MW(th))	100	3000
Fuel Type/Assembly Array	UO ₂ pellet/hexagonal	UO ₂ pellet/hexagonal
Fuel Active Length (m)	1.4	3.55
Number of Fuel Assemblies	61	163
Fuel Enrichment (%)	2.8-4.5	1.6 – 3.7
Fuel Burnup (GWd/ton)	0.15 at BOC	0.531 at BOC
Number of fuel rod in fuel assembly	108	311
The pitch of fuel rods (mm)	13.8	12.75
The pitch of fuel assemblies (mm)	160	236
Outer diameter of fuel rod (mm)	9	9.1
Average mass flow rate through one sub-channel (kg/s)	0.08	0.32
Linear power density of the hot rod (kw/m)	20.0185	33.7
Linear power density of the average rod (kw/m)	10.845	16.67
Maximum fuel centerline temperature (K)	633	1693.7
MDNBR	1.798	1.86

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق با بهره‌گیری از محاسبات کوپل شده نوترونیک- ترموهیدرولیک که بوسیله کد هسته ای MCNPX و نرم افزار Ansys CFX 14 برای قلب راکتور کوچک یکپارچه آبی تحت فشار نسل سه پلاس و زیرکانالهای سوخت آن انجام پذیرفته، محاسبات نوترونیک ضرایب پیک توانی مجتمع‌های سوخت و میله‌های سوخت و همچنین ضرایب پیک توانی محوی میله سوخت داغ و متوسط محاسبه شد و با محاسبات ترموهیدرولیک تغییرات دمایی سوخت، سیال خنک کننده، در داغ ترین زیر کانال سوخت در قلب راکتور انجام پذیرفت. محاسبات شار حرارتی، شار حرارتی بحرانی و MDNBR و DNBR در زیر کانال داغ انجام شد و نتایج به صورت نمودار ارائه گردید.

۵. 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] F. Faghihi et al., Neutronics and sub-channel thermal-hydraulics analysis of the Iranian VVER-1000 fuel bundle. Progress in Nuclear Energy, 87:39-46 (2016).