



تحلیل ترموهیدرولیکی یک مجتمع سوخت حلقوی در شرایط کاری قلب رآکتور تحقیقاتی تهران

مصطفی حسن‌زاده، مسعود امین مظفری^{*}، فرخ خوش‌احوال، رحمان قراری، حسن اسماعیلی
پژوهشکده‌ی رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۳۶۴-۳۴۸۶، تهران - ایران

*Email: maminmozafari@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۷/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۵

چکیده

هدف از این مقاله، بررسی امکان استفاده از سوخت با هندسه حلقوی (Tubular) در رآکتور تحقیقاتی تهران از دیدگاه ترموهیدرولیکی است. سوخت‌های حلقوی در بسیاری از رآکتورهای تحقیقاتی مدل روسی در چند دهه اخیر با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است. از مهم‌ترین مزایای این سوخت می‌توان به شار نوترونی بالاتر، راکتیویته بیش‌تر و نیاز به بارگذاری سوخت کم‌تر در مقایسه با سوخت صفحه‌ای فعلی اشاره نمود. در این پژوهش با انتخاب یک مجتمع سوخت حلقوی از نوع IRT-4M که از لحاظ هندسی تطابق بیش‌تری با هندسه و ابعاد شبکه نگه دارنده قلب دارد، و مدل‌سازی آن در نرم‌افزار Fluent و همچنین کد RELAP5/Mod3.2، پارامترهای ترموهیدرولیکی این مجتمع در شرایط کاری یک المان سوخت استاندارد محاسبه گردید. نتایج این محاسبات نشان داد که بیشینه دمای غلاف در هر دو ابزار مورد استفاده به اندازه کافی پایین‌تر از مقدار 105°C است که این نشان می‌دهد بدون تغییر در دبی فعلی قلب، می‌توان گرمای تولیدی در سوخت حلقوی را به خوبی برداشت نمود. همچنین بیشینه دمای سوخت حدود 10°C از بیشینه دمای سوخت در المان سوخت فعلی استاندارد کم‌تر است که این موضوع نیز مزیت دیگری برای سوخت حلقوی محسوب می‌شود.

کلیدواژه‌ها: سوخت حلقوی، رآکتور تحقیقاتی تهران، ترموهیدرولیک، نرم‌افزار Fluent، کد RELAP5

Thermal hydraulic analysis of a tubular fuel assembly in the normal operating condition of Tehran Research Reactor core

M. Hasanzadeh, M. Amin Mozafari*, F. Khoshahval, R. Gharari, H. Esmaili

Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11364-3486, Tehran - Iran

Research Article

Received 21.10.2020, Accepted 24.1.2021

Abstract

The purpose of this paper is to investigate the possibility of using tubular fuel assemblies in Tehran Research Reactor (TRR) from the thermal hydraulic perspective. Tubular fuels have been used successfully in many Russian model research reactors in recent decades. The most important advantages of this fuel are higher neutron flux, more reactivity and less fuel loading compared to the current plate fuels. In this study, by selecting a tubular fuel assembly of IRT-4M type that is more geometrically compatible with the geometry and dimensions of the core grid plate, we modeled it using the Fluent software and also the RELAP5/Mod3.2 code. The thermal hydraulic parameters of this assembly have been calculated under the operating conditions of current MTR fuel. The results of the calculations showed that the maximum clad temperature in both calculation tools is sufficiently lower than 105°C , which indicates that without changing the current flow rate of the core, the heat produced in the tubular fuel can be well removed. Moreover, the maximum fuel temperature in tubular fuel is about 10°C lower than the maximum fuel temperature in the current standard fuel element, which is another advantage for this fuel type.

Keywords: Tubular fuel, Tehran Research Reactor, Thermal hydraulic, Fluent software, RELAP5 code



۱. مقدمه

یکی از مهم ترین کاربردهای سوخت حلقوی قرار گرفتن نمونه های پرتو دهی در حفره مرکزی این نوع از سوخت ها است که به ویژه در تولید رادیوایزوتوپ های مختلف حایز اهمیت است. لازم به توضیح است که این نوع سوخت ها اغلب در رآکتورهای با توان بین ۱ تا ۲۰ مگاوات مورد استفاده قرار گرفته اند [۲].

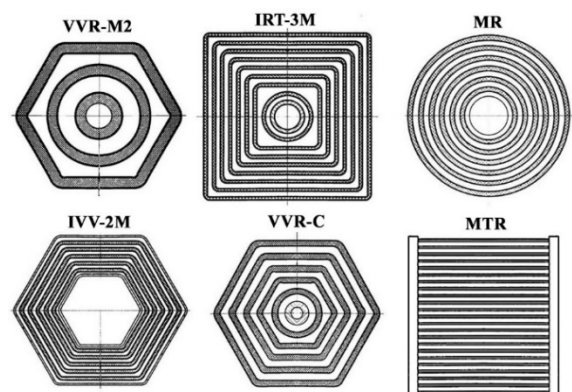
در سال ۲۰۱۵ هانان و گارنر رآکتور تحقیقاتی VVR-K نوع استخری را برای تغییر سوخت از غنای بالا به غنای پایین با استفاده از سوخت های حلقوی از نوع VVR-KN (شکل ۳) مدل سازی نمودند. در این مطالعه متأسفانه بحثی از شیوه گره بندی در کد RELAP5 و یا تقریبات به کار رفته ارایه نشده است، اما نتایج حاکی از تطابق کلی بین پارامترها دارد [۳]. در این پژوهش، با توجه به شکل هندسی شبکه نگه دارنده فعلی قلب رآکتور تحقیقاتی تهران، یک مجتمع سوخت حلقوی از نوع IRT انتخاب و شرایط ترموهیدرولیکی آن در شرایط عادی بهره برداری با کد RELAP5/Mod3.2 و نیز نرم افزار Fluent شبیه سازی و مقایسه شده است.

۲. مواد و روش ها

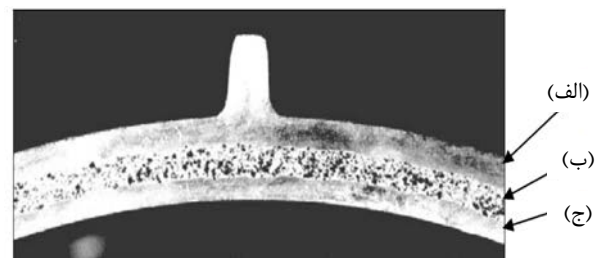
۱.۲ معیارهای طراحی قلب با سوخت حلقوی از نقطه نظر ترموهیدرولیکی در این پژوهش فرض بر این است که با کم ترین تغییرات لازم در ابعاد و هندسه قلب فعلی و نیز سایر پارامترهای کاری بهره برداری، امکان جایگزینی المان های سوخت فعلی با مجتمع سوخت حلقوی بررسی شود. لذا بر مبنای سند SAR^۲ رآکتور تهران، برخی فاکتورهای ایمنی که بایستی در طراحی سوخت لحاظ شود، شامل موارد زیر است [۴]:

۱. دمای سیال خنک کننده باید زیر دمای اشباع باشد.
 ۲. بیشینه دمای غلاف باید زیر ۱۰۵ درجه سانتی گراد باشد تا از بروز خوردگی جلوگیری شود.
 ۳. نسبت شار حرارتی متناظر با وقوع جوشش موضعی در سطح غلاف به شار حرارتی واقعی در همان موضع بیش از ۱/۳ باشد.
 ۴. سرعت سیال باید دو سوم سرعت بحرانی باشد.
 ۵. نسبت شار حرارتی متناظر با وقوع ناپایداری سیال در کانال به شار حرارتی واقعی کانال بیش از ۲ باشد [۵].
- قابل ذکر است که همواره در محاسبه کمینه دبی سیال خنک کننده بایستی این قیود برآورده شوند. جدول ۱ معیارهای طراحی ترموهیدرولیکی رآکتور تهران را نشان می دهد. در طراحی ترموهیدرولیکی قلب یک رآکتور هسته ای تحقیقاتی، محاسبه حداقل مقدار دبی سیال خنک کننده لازم جهت خنک سازی سوخت بسیار حایز اهمیت است.

کاربردهای مختلف رآکتورهای هسته ای تحقیقاتی سبب شده است که بسته به نوع کاربری آن ها، انواع مختلفی از المان ها (مجتمع های) سوخت در چیدمان قلب مورد استفاده قرار گیرد. یکی از این نوع مجتمع های سوخت، سوخت های حلقوی است که در کشور شوروی سابق طراحی شده اند و در طی چند دهه اخیر در بسیاری از رآکتورهای تحقیقاتی روسیه و سایر کشورها مورد استفاده قرار گرفته اند. انواع مختلف المان های سوخت حلقوی شامل WWR-M2، WWR-M5، IRT-2M، IRT-3M، IRT-4M، MR، MIR، WWR-TS و IVV-2M است که در طیف وسیعی از رآکتورهای تحقیقاتی کشور روسیه با غنای بالای ۲۰٪ به کار گرفته شده است. این نوع سوخت از چندین صفحه سوخت خمیده با مقطع عرضی مربعی، شش ضلعی یا دایروی تشکیل شده است که به صورت هم محور در داخل یک دیگر قرار گرفته اند (شکل ۱). در این شکل مقطع عرضی انواع مجتمع های سوخت حلقوی روسی با مجتمع سوخت صفحه ای آمریکایی (MTR)^۱ جهت مقایسه نشان داده شده است. در هر یک از این صفحات سوخت قسمت گوشت سوخت با دو لایه غلاف از جنس آلومینیم احاطه شده است (شکل ۲) [۱].



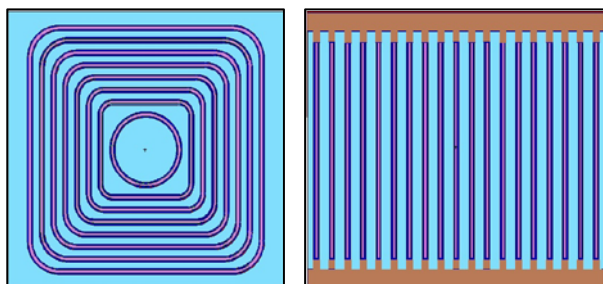
شکل ۱. مقایسه مقطع عرضی انواع مجتمع های سوخت حلقوی روسی با مجتمع سوخت صفحه ای آمریکایی (MTR) [۱].



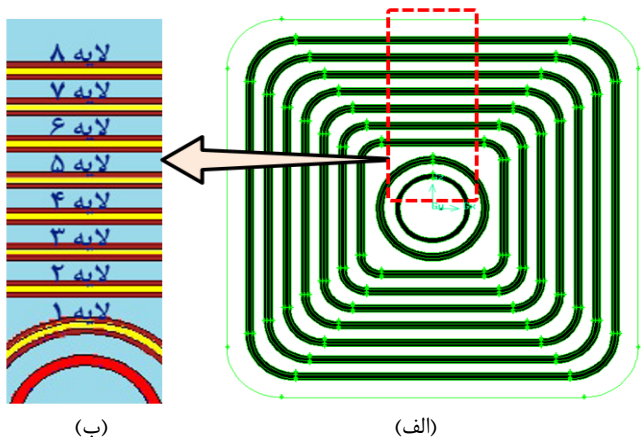
شکل ۲. ساختار سوخت حلقوی از نوع MR (رآکتور MARIA، لهستان): (الف) غلاف بیرونی، (ب) سوخت و (ج) غلاف داخلی [۱].



افزار Fluent منتقل می‌شود. این نرم‌افزار یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارها در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است که بر پایه روش حجم محدود و مقادیر ذخیره شده در مرکز سلول عمل می‌کند و برای تولید شبکه محاسباتی نیازمند Gambit است. مراحل کلی استفاده از این نرم‌افزار به این صورت است که در مرحله اول شبکه مورد نظر توسط Gambit تولید می‌شود. در گام دوم، تنظیمات شبیه‌سازی از قبیل دبی جریان ورودی، روش حل، شرایط اولیه و مرزی تعیین می‌گردد و محاسبات اجرا می‌شود. در مرحله سوم نیز نتایج تحلیل می‌شوند [۶-۱۰]. پارامترهای هندسی لازم جهت مدل‌سازی در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین شماتیکی از هندسه ترسیم شده با Gambit نیز در شکل ۵ نشان داده شده است.



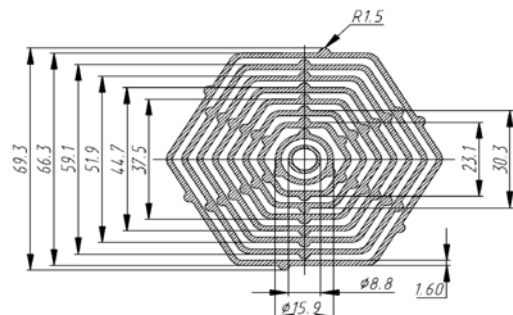
شکل ۴. الف) یک المان سوخت استاندارد رآکتور تهران، (ب) یک مجتمع سوخت حلقوی مربعی در همان ابعاد.



شکل ۵. الف) شماتیکی از مجتمع سوخت مدل شده با Gambit. و ب) نحوه شماره‌گذاری لایه‌های سوخت.

جدول ۲. مشخصات هندسی سوخت IRT-۴M

شماره لایه	حجم سوخت (cm ³)	ارتفاع سوخت (cm)	ضخامت سوخت (cm)
لایه ۱	۲۶,۶۴	۶۱,۵	۰,۰۷
لایه ۲	۴۳,۰۷	۶۱,۵	۰,۰۷
لایه ۳	۵۴,۳۶	۶۱,۵	۰,۰۷
لایه ۴	۶۵,۶۵	۶۱,۵	۰,۰۷
لایه ۵	۷۶,۹۴	۶۱,۵	۰,۰۷
لایه ۶	۸۸,۲۳	۶۱,۵	۰,۰۷
لایه ۷	۹۹,۵۲	۶۱,۵	۰,۰۷
لایه ۸	۱۱۰,۸۱	۶۱,۵	۰,۰۷



شکل ۳. یک مجتمع سوخت حلقوی از نوع VVR-KN [۳]

جدول ۱. معیارهای طراحی ترموهیدرولیکی رآکتور تهران

پارامترهای ترموهیدرولیکی	مقدار
نسبت شروع جوشش هسته‌ای (ONBR ^۱)	بیش‌تر از ۱,۳
نسبت انحراف از جوشش هسته‌ای (DNBR ^۲)	بیش‌تر از ۲
بیشینه دمای سطحی سوخت (غلاف) (°C)	۱۰۵
سرعت بحرانی آب داخل قلب (m/s)	۲۳
بیشینه سرعت آب داخل قلب (m/s)	۱۵,۳
ناپایداری جریان ^۳	بزرگ‌تر از ۲
بیشینه دمای غلاف آلومینیمی جعبه گرافیت (°C)	۱۲۰

در شکل ۴ یک مجتمع سوخت حلقوی از نوع IRT-۴M در مقایسه با یک المان سوخت استاندارد (SFE^۴) مورد استفاده در قلب رآکتور تحقیقاتی تهران نشان داده شده است. ابعاد سوخت حلقوی IRT-۴M نیز بر اساس مقادیر استاندارد موجود انتخاب شده است. لذا همان‌طور که در این شکل نیز مشاهده می‌شود، فضایی در حاشیه مجتمع سوخت باقی می‌ماند. با توجه به این که در مجتمع سوخت حلقوی، همه لایه‌های سوخت از المان سوخت تشکیل شده‌اند و نیازی به صفحات جانبی نگه‌دارنده نمی‌باشد، لذا همه فضای کانال به طور مفید در برداشت حرارت سوخت مؤثر خواهند بود که این مزیت مهمی نسبت به سوخت صفحه‌ای محسوب می‌گردد.

۲.۲ شبیه‌سازی یک مجتمع سوخت حلقوی توسط نرم‌افزار Ansys-Fluent

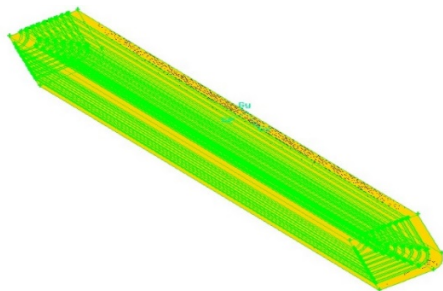
در این بخش نحوه شبیه‌سازی یک مجتمع سوخت حلقوی IRT-۴M با استفاده از نرم‌افزارهای Gambit و Fluent مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نرم‌افزار Gambit یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهای تولید شبکه است که آخرین نسخه آن در سال ۲۰۰۶ منتشر شد. از این نرم‌افزار برای رسم هندسه سوخت حلقوی، مش زدن و مشخص نمودن قسمت‌های سیال و دیواره و نیز شرایط مرزی و تقارن استفاده شده است. در ادامه خروجی این نرم‌افزار به نرم

1. Onset of Nucleate Boiling Ratio
2. Departure from Nucleate Boiling Ratio
3. Flow Instability
4. Standard Fuel Element



همچنین فرض گردید که دبی جرمی خنک کننده ورودی به این مجتمع سوخت، برابر با $8/25 \text{ kg/s}$ (با توجه به مقدار دبی حجمی کل قلب $500 \text{ m}^3/\text{h}$) باشد. شماتیکی از گره بندی مسأله در شکل ۷ نشان داده شده است.



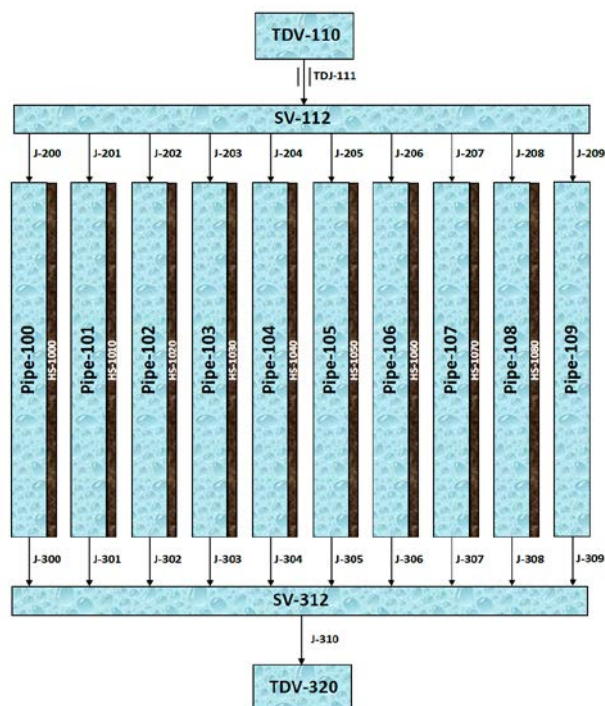
شکل ۶. شماتیکی از سیستم مش زده شده.

جدول ۳. مشخصات ساختاری سوخت و غلاف

غلاف	سوخت	فرمول شیمیایی
Al-۶۰۶۱	U_3O_8	
۲۷۰۰	۴۷۵۹/۱۳	چگالی (kg/m^3)
۸۹۲/۵۹	۴۳۷/۰۵	ظرفیت گرمای ویژه (J/kg.K)
۱۸۰/۰	۱۰/۰	ضریب رسانندگی گرمایی (W/m.K)
۰/۴-۱/۲	-	زبری سطح (μm)

جدول ۴. شرایط مرزی برای ورودی و خروجی مسأله در کد RELAP5

پارامتر	سیال ورودی	سیال خروجی
دما ($^{\circ}\text{C}$)	۳۷/۸	-
فشار (Pa)	-	1.7×10^5
دبی ورودی سیال (kg/s)	۸/۲۵	-



شکل ۷. گره بندی مجتمع سوخت حلقوی ۸ لایه برای کد RELAP5

در این محاسبات از دو میلیون مش با سایز $90 \mu\text{m}$ استفاده شده است. شماتیکی از سیستم مش زده شده در شکل ۶ نشان داده شده است. به منظور کاهش زمان محاسبات و به دلیل متقارن بودن شکل مجتمع، از تقارن یک چهارم بهره گرفته شده است. گام بعدی در نرم افزار Gambit مشخص نمودن محیط های جامد و سیال است. در جدول ۳ و جدول ۴ مشخصات فیزیکی مواد سوخت و غلاف آورده شده است که در قالب فایل SCM به نرم افزار Fluent داده می شود.

۳.۲ شبیه سازی یک مجتمع سوخت حلقوی توسط کد RELAP5

در این بخش نحوه شبیه سازی این مجتمع سوخت با استفاده از کد RELAP5/Mod3.2 ارائه می گردد. در ابتدا باید به این نکته دقت نمود که در کد RELAP5 امکان تعریف سه نوع سوخت صفحه ای، استوانه ای توپر و کروی وجود دارد.

از طرفی در نسخه های در دسترس (۳/۲) امکان تعریف سوخت حلقوی یا به اصطلاح Annular وجود ندارد، زیرا این نوع سوخت از دو طرف خنک سازی می گردد و این موضوع در این نسخه ها تعریف نشده است. لذا در نگاه اول به نظر می رسد که جهت شبیه سازی سوخت حلقوی با مشکل روبه رو شویم. اما با توجه به هندسه و ابعاد مجتمع سوخت حلقوی، مشخص می شود که طول ضلع هر یک از مربع ها در کمترین حالت حداقل ۱۵ برابر از ضخامت هر لایه بیش تر است. این موضوع در لایه های بیرونی حتی تا ۴۲ برابر نیز می رسد. لذا می توان هر یک از مربع ها را به عنوان یک صفحه سوخت تخت در نظر گرفت که عرض این صفحه برابر محیط مربع است. به این ترتیب، با تعریف ۸ لایه سوخت حلقوی به صورت ۸ صفحه سوخت تخت و با تعریف قطر هیدرولیکی دقیق هر یک از این صفحات، می توان تا حد زیادی به فیزیک واقعی مسأله نزدیک تر شد. در مورد گوشه های مربع نیز در صورت نیاز می توان با تقسیم بندی مقطع مربع ها به بخش های کوچک تر هر یک از این بخش ها را جداگانه تعریف نمود که در این شبیه سازی از این موضوع صرف نظر شده است.

ضخامت هر المان سوخت 0.16 cm است که شامل 0.07 cm گوشت سوخت و 0.045 cm برای غلاف در دو طرف است. سوخت از جنس $\text{U}_3\text{O}_8\text{-Al}$ با غنای ۲۰٪ و میانگین چگالی $4759/13 \text{ kg/m}^3$ در نظر گرفته شده است. غلاف نیز از جنس آلیاژ آلومینیم Al-۶۰۶۱ است. دمای ورودی سیال برای هر کانال $37/8$ درجه سانتی گراد لحاظ شده است. مسیر حرکت خنک کننده رو به پایین و در جهت شتاب گرانش تعریف شده است. البته با توجه به این که قلب حدود ۷ متر زیر آب استخر قرار دارد، لذا فشار سیستم در حدود $1/7 \text{ bar}$ در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی سیستم در جدول ۴ آورده شده است.



سرعت سیال در هر کانال بر اساس دو معیار مهم زیر محدود می‌گردد:

۱. سرعت سیال باید به گونه‌ای باشد تا دمای غلاف هر لایه سوخت از ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد فراتر نرود تا از خوردگی غلاف جلوگیری شود [۴، ۱۳].

۲. بیشینه سرعت سیال در هر کانال باید به گونه‌ای انتخاب شود تا از ۳۰ درصد سرعت بحرانی کمتر باشد و ارتعاشات مکانیکی در صفحات سوخت مشاهده نشود. به منظور محاسبه سرعت بحرانی سیال از رابطه میلر^۲ استفاده می‌شود [۱۳]:

$$V_{critical} = \sqrt{\frac{15 \times 10^5 E t_p^2 t_w}{\rho W^4 (1 - \theta^2)}} \quad (1)$$

در این رابطه $V_{critical}$ نشان‌دهنده سرعت بحرانی (m/s)، ρ چگالی آب (kg/m^3)، w پهنای کانال آب (cm)، t_w ضخامت کانال آب (cm)، t_p ضخامت سوخت (cm) و E مقدار کشسانی^۳ (bar) و θ نسبت پواسون^۴ و بی‌بعد است. مقدار کشسانی آب ۲/۲ گیگاپاسکال است. با جای‌گذاری پارامترهای مدل‌سازی در این رابطه، سرعت بحرانی برای مجتمع سوخت حلقوی ۱۹ m/s به دست می‌آید. نتیجه این که سرعت در هر کانال نباید از ۲/۳ این مقدار یعنی ۱۲/۶۷ m/s بیش‌تر شود.

جهت محاسبه بیشینه تغییرات دمای سوخت، اندازه‌های مختلف برای مش امتحان گردید که نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است. همان‌طور که مشخص است با انتخاب اندازه مش ۹۰ میکرومتر جواب‌ها به مقدار مناسبی هم‌گرا می‌شوند.

در ادامه محاسبات فرض گردید که دبی جرمی ورودی خنک‌کننده به کل مجتمع سوخت، برابر با ۸/۲۵ kg/s (با توجه به مقدار دبی کل قلب ۵۰۰ m^۳/h) باشد. البته با توجه به این که یک چهارم یک مجتمع سوخت شبیه‌سازی شده است، لذا دبی ورودی برابر ۲/۰۶ kg/s فرض گردید.

شکل ۸ توزیع سرعت در مرکز مجتمع سوخت ($z = 0$) را برای هر کانال نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت در گوشه‌های هر کانال و نیز در مرکز مجتمع سوخت بیش‌ترین مقدار خود را دارد. بیشینه سرعت ۳/۴ m/s است که از مقدار بیشینه مجاز محاسبه شده (۱۲/۶۷ m/s) بسیار کم‌تر است. شکل ۹ بیشینه دما را در لایه‌های مختلف سوخت نشان می‌دهد. به دلیل بیش‌تر بودن سرعت خنک‌کننده در گوشه‌ها، برداشت حرارت از سوخت در گوشه‌ها بیش‌تر بوده و دمای سوخت در این نواحی نسبت به دیگر نقاط کم‌ترین مقدار خود را دارد. بیشینه دمای سوخت و غلاف در مقطع $z = 0$ به ترتیب ۹۳/۸۵°C و ۸۵/۸۶°C بوده و مربوط به لایه سوخت شماره ۷ است.

برای گره‌بندی مسأله هر کانال جریان بین المان‌های سوخت و هم‌چنین کانال مرکزی غیرسوخت به عنوان یک لوله تعریف می‌شود که در مجموع ۱۰ قطعه Pipe تعریف شده (کانال‌های ۱۰۰ تا ۱۰۹) و در جهت محوری به ۲۰ حجم کنترل تقسیم شده‌اند. برای اعمال شرایط مرزی دما و فشار در ورودی و خروجی، از قطعه Time-Dependent Volume استفاده شده است که با شماره ۱۱۰ برای شرایط مرزی ورودی و ۱۲۰ برای شرایط مرزی خروجی مشخص شده‌اند. برای اعمال شرط مرزی دبی ورودی نیز قطعه Time-Dependent Junction تعریف و با شماره ۱۱۱ مشخص شده است.

جهت مدل‌سازی المان‌های سوخت از ساختار گرمایی^۱ کد RELAP5 استفاده می‌شود. بدین‌منظور هر المان سوخت با تقریب یک صفحه مسطح در نظر گرفته شده و در جهت شعاعی برای آن ۱۰ گره شعاعی تعریف می‌شود. هم‌چنین در راستای ارتفاع، هر ساختار گرمایی به ۲۰ قسمت مساوی (هر یک به ارتفاع ۳/۰۷۵ cm) تقسیم شده است. سپس برای هر لایه سوخت توزیع توان و شرایط مرزی مناسب تعریف شده و به کد اعمال می‌شود. لازم به توضیح است که توزیع توان هر یک از ساختارهای گرمایی که از محاسبات نوترونی به دست آمده است [۱۲]، به طور مجزا برای هر یک تعریف می‌گردد.

۳. بحث و تحلیل نتایج

۳.۱ محاسبه فشار، دما و دبی سیال در نواحی مختلف در سوخت‌های حلقوی با نرم‌افزار Fluent

چگالی توان در هر لایه سوخت با استفاده از تالی F6 در کد MCNPX [۱۱] محاسبه شده است که مقادیر آن در جدول ۵ ارائه شده است. در این محاسبات فرض شده است که توان رآکتور ۵ MW بوده و قلب شامل ۱۶ مجتمع سوخت حلقوی باشد [۱۲]. جهت تعریف چگالی توان هر لایه سوخت برحسب ارتفاع از یک تابع مثلثاتی استفاده شده است. توابع به عنوان تابع مشخص شده توسط کاربر به نرم‌افزار Fluent و به زبان برنامه‌نویسی C به عنوان چشمه تولید توان برای هر سوخت داده می‌شود.

از دیگر پارامترهای مهم در ورودی نرم‌افزار Fluent شرایط اولیه و مرزی سیستم است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، دمای سیال ورودی برای هر کانال ۳۷/۸ درجه سانتی‌گراد لحاظ شده است. فشار کاری سیستم، فشار اتمسفری در نظر گرفته شده است و جهت شتاب گرانش در جهت مسیر حرکت خنک‌کننده تعریف شده است. در یک مجتمع سوخت ۸ لایه به طور کلی ۱۰ کانال برای عبور سیال وجود دارد که در نرم‌افزار Fluent سرعت سیال در هر کانال بسته به هندسه مسأله محاسبه می‌شود.

2. Miller

3. Modulus of Elasticity

4. Poisson's Ratio

Journal of Nuclear Science and Technology

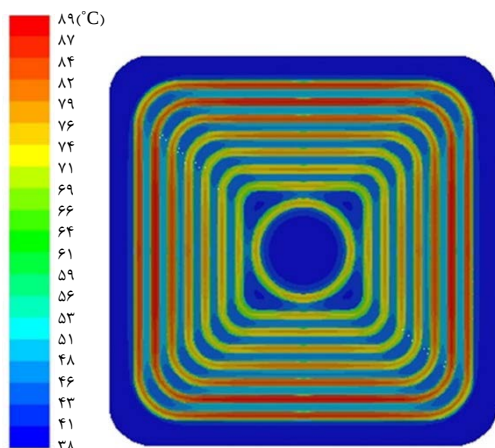
Vol. 100, No 3, 2022, P 114-124

1. Heat Structure



جدول ۵. توزیع چگالی توان برای هر لایه سوخت (W/cm^2)

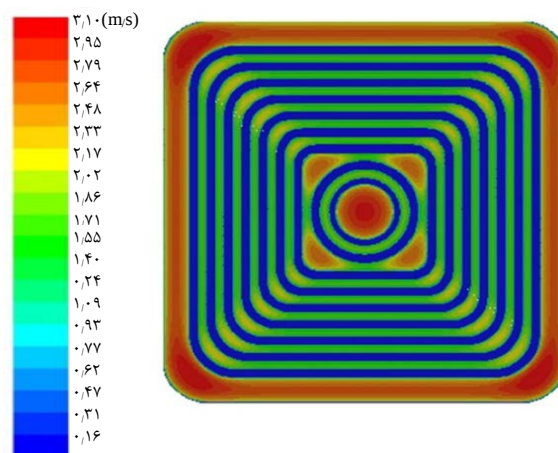
Tube ۸	Tube ۷	Tube ۶	Tube ۵	Tube ۴	Tube ۳	Tube ۲	Tube ۱	z (cm)
۴۱۹	۳۷۰	۳۴۵	۳۲۶	۳۲۰	۳۱۴	۳۱۹	۳۳۸	۲۹,۲۱۲۵
۴۴۲	۳۸۶	۳۴۸	۳۲۶	۳۰۹	۳۰۶	۳۱۲	۳۳۵	۲۶,۱۳۷۵
۵۳۱	۴۶۵	۴۱۶	۳۹۰	۳۷۲	۳۶۹	۳۸۲	۴۰۵	۲۳,۰۶۲۵
۶۲۰	۵۴۴	۴۹۰	۴۵۱	۴۳۴	۴۲۵	۴۳۸	۴۸۲	۱۹,۹۸۷۵
۶۹۸	۶۰۷	۵۴۲	۵۱۲	۴۸۹	۴۷۸	۴۹۳	۵۳۰	۱۶,۹۱۲۵
۷۶۵	۶۶۳	۵۹۷	۵۵۶	۵۳۸	۵۲۸	۵۳۷	۵۷۷	۱۳,۸۳۷۵
۸۱۹	۷۱۴	۶۴۳	۵۹۷	۵۷۲	۵۶۳	۵۷۵	۶۲۰	۱۰,۷۶۲۵
۸۶۷	۷۵۰	۶۸۰	۶۲۶	۶۰۴	۶۰۳	۶۱۰	۶۴۲	۷,۶۸۷۵
۸۹۳	۷۷۴	۷۰۳	۶۵۵	۶۲۵	۶۱۱	۶۲۳	۶۷۶	۴,۶۱۲۵
۹۱۳	۷۸۷	۷۱۷	۶۶۶	۶۳۷	۶۳۲	۶۳۹	۶۸۹	۱,۵۳۷۵
۹۱۳	۷۸۴	۷۱۱	۶۶۴	۶۳۹	۶۳۰	۶۴۱	۶۸۸	-۱,۵۳۷۵
۸۸۹	۷۸۰	۷۰۳	۶۵۳	۶۲۴	۶۲۰	۶۳۴	۶۹۰	-۴,۶۱۲۵
۸۷۰	۷۵۸	۶۸۳	۶۳۶	۶۰۹	۵۹۸	۶۰۹	۶۶۱	-۷,۶۸۷۵
۸۲۳	۷۱۶	۶۴۹	۶۰۲	۵۷۲	۵۶۶	۵۸۰	۶۲۷	-۱۰,۷۶۲۵
۷۶۷	۶۶۳	۵۹۸	۵۵۸	۵۳۸	۵۳۲	۵۴۲	۵۸۳	-۱۳,۸۳۷۵
۶۹۹	۶۰۹	۵۵۱	۵۱۶	۴۹۳	۴۸۴	۴۹۳	۵۳۴	-۱۶,۹۱۲۵
۶۲۱	۵۳۸	۴۸۳	۴۵۱	۴۳۱	۴۲۵	۴۳۳	۴۶۷	-۱۹,۹۸۷۵
۵۲۸	۴۵۷	۴۱۵	۳۸۵	۳۷۴	۳۶۱	۳۷۰	۴۰۰	-۲۳,۰۶۲۵
۴۴۳	۳۸۲	۳۴۸	۳۲۶	۳۱۳	۳۰۵	۳۱۳	۳۳۶	-۲۶,۱۳۷۵
۴۲۴	۳۷۹	۳۴۹	۳۳۱	۳۲۴	۳۱۶	۳۲۲	۳۴۶	-۲۹,۲۱۲۵

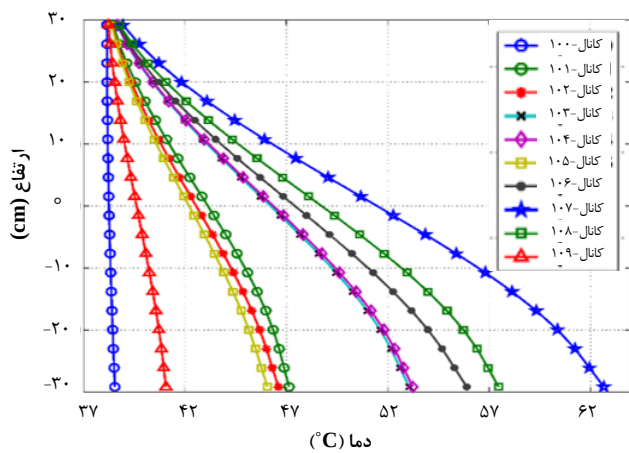
شکل ۹. توزیع عرضی دما در مقطع مرکز مجتمع سوخت ($Z = 0$).

در شکل ۱۰ تغییرات دمای مجتمع و نیز سرعت سیال در راستای محوری مجتمع در یک برش محوری از مرکز مجتمع نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در طول کانال، سیال با افت فشار تقریباً $64/6 \text{ kPa}$ مواجه می‌شود. با توجه به توزیع تقریباً کسینوسی چگالی توان بیش‌ترین دما در نزدیکی مرکز مجتمع سوخت مشاهده می‌شود. متوسط دمای سیال خروجی نیز $49/65^\circ\text{C}$ به‌دست آمد.

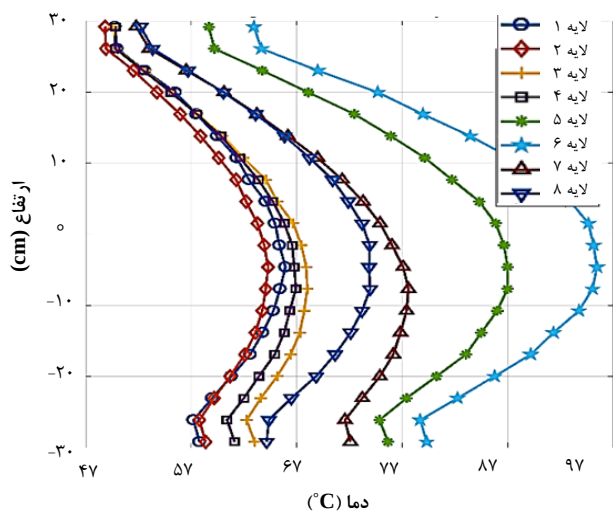
جدول ۶. اثرات اندازه مش بر روی نتایج

اندازه مش (μm)	۹۰	۱۰۰	۲۰۰	۴۰۰	۶۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰
تعداد مش ($1 \times$ میلیون)	۲,۱	۲,۰	۱,۹	۱,۴	۱,۲	۰,۸	۰,۵
بیشینه دمای سوخت ($^\circ\text{C}$)	۸۸,۳	۸۸,۲	۸۷,۹	۸۴,۹	۸۲,۶	۸۱,۲	۸۰,۶
متوسط دمای سیال خروجی ($^\circ\text{C}$)	۴۹,۷	۴۹,۳	۴۹,۰	۴۷,۲	۴۶,۹	۴۵,۱	۴۴,۵

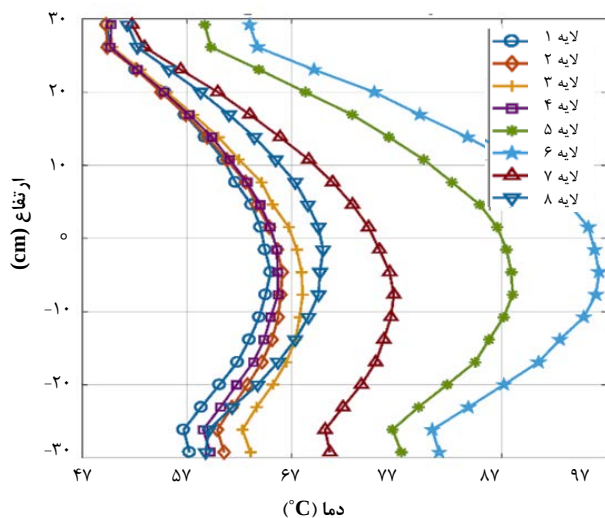
شکل ۱۰. توزیع سرعت در مقطع مرکز مجتمع سوخت ($Z = 0$).



شکل ۱۱. توزیع محوری دمای سیال در طول کانال‌های مختلف.



شکل ۱۲. توزیع محوری دمای سطح درونی غلاف در لایه‌های مختلف سوخت.



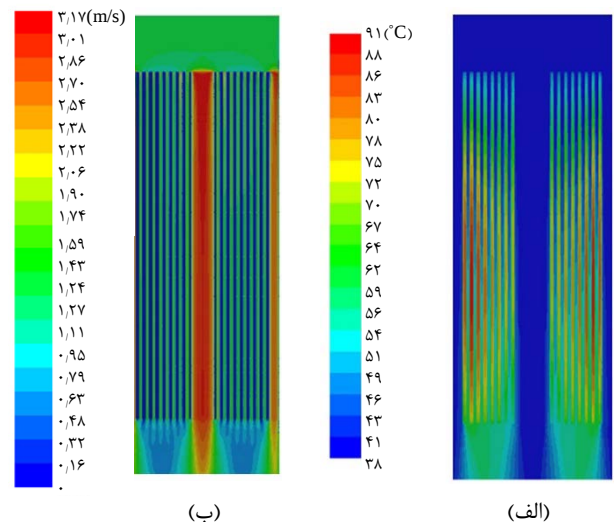
شکل ۱۳. توزیع محوری دمای سطح بیرونی غلاف در لایه‌های مختلف سوخت.

۲.۳ محاسبه توزیع دما و سرعت سیال در نواحی مختلف سوخت

حلقوی با کد RELAP5

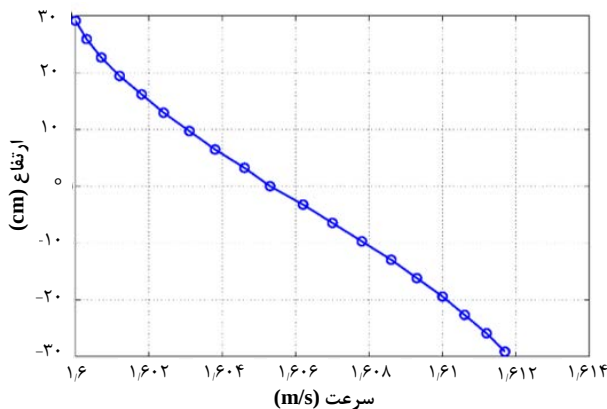
در این بخش نتایج محاسبات مربوط به توزیع دما و سرعت سیال با استفاده از کد RELAP5 جهت مقایسه با نتایج نرم افزار Fluent ارایه شده است که در ابتدا، نتایج مربوط به دبی جریان ورودی 8.25 kg/s ارایه می‌شود. در شکل ۱۱ دمای سیال در ۱۰ کانال جریان مختلف در راستای ارتفاع نشان داده شده است. واضح است که کمترین گرادیان دما مربوط به داخلی‌ترین کانال (۱۰۰) و خارجی‌ترین کانال (۱۰۹) خواهد بود، زیرا کانال ۱۰۰ در داخل لوله راهنما قرار دارد که هیچ حرارتی در آن تولید نمی‌شود. کانال ۱۰۹ نیز به دلیل این که فقط از داخل به یک المان سوخت مجاور می‌باشد، تغییر دمایی در حد 3°C دارد. بیشترین اختلاف دما به کانال ۱۰۷ تعلق دارد که حدود 25°C است. این کانال در بین المان‌های سوخت ۶ و ۷ قرار دارد که بیشترین دمای سوخت را دارا هستند.

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ دمای سطح درونی و بیرونی غلاف در المان‌های مختلف سوخت در راستای ارتفاع نشان داده شده است. بیشینه دمای سطح غلاف مربوط به المان شماره ۶ است که در حدود 95°C است. این مقدار همچنان 10°C درجه پایین‌تر از معیار 105°C است.



شکل ۱۴. توزیع دما (الف) و سرعت سیال (ب) در راستای محوری مجتمع سوخت.





شکل ۱۵. تغییر سرعت سیال در کانال ۱۰۶ در راستای ارتفاع.

جدول ۷. سرعت متوسط سیال در کانال‌های مختلف جریان در مجتمع سوخت حلقوی

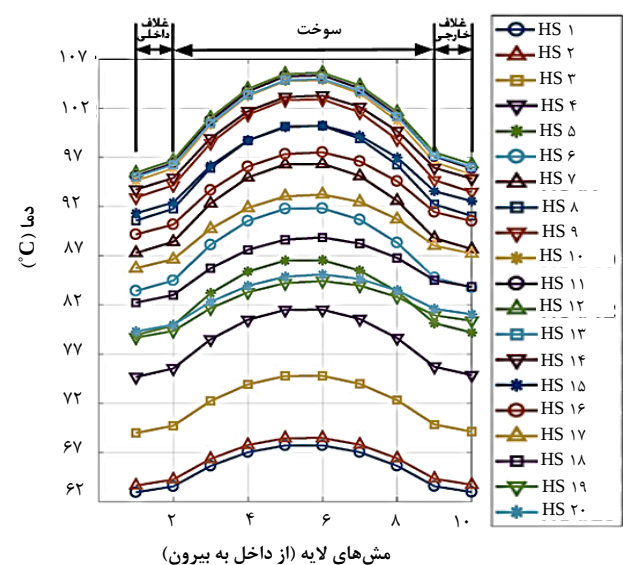
کانال	قطر هیدرولیکی (cm)	سطح مقطع (cm ²)	سرعت متوسط سیال (m/s)	عدد رینولدز
کانال-۱۰۰	۱٫۰۲	۱٫۱۳	۲٫۷۵	۴۵۰۴۸
کانال-۱۰۱	۰٫۴۱	۱٫۰۳	۱٫۶۱	۱۰۶۰۱
کانال-۱۰۲	۰٫۴۶	۲٫۶۱	۲٫۱۱	۲۱۸۹۰
کانال-۱۰۳	۰٫۴۰۳	۲٫۲۸	۱٫۶۱	۱۰۴۲۰
کانال-۱۰۴	۰٫۴۰۲	۲٫۸۰	۱٫۶۰	۱۰۳۲۹
کانال-۱۰۵	۰٫۴۰۱	۳٫۳۲	۱٫۵۹	۱۰۲۳۹
کانال-۱۰۶	۰٫۴۰۱	۳٫۸۴	۱٫۶۱	۱۰۳۶۸
کانال-۱۰۷	۰٫۴۰۱	۴٫۳۷	۱٫۶۲	۱۰۴۳۲
کانال-۱۰۸	۰٫۴	۴٫۸۹	۱٫۶۱	۱۰۳۴۲
کانال-۱۰۹	۱٫۰۲	۱۴٫۷	۲٫۵۹	۴۲۴۲۷

۳.۳ محاسبه حداقل دبی لازم جهت برداشت گرما از صفحات سوخت حلقوی

در ادامه محاسبات ترموهیدرولیکی، به منظور محاسبه کم‌ترین جریان سیال جهت برداشت گرما از لایه‌های سوخت مجتمع حلقوی، دبی‌های مختلف به عنوان ورودی برای هر دو کد در نظر گرفته شد که نتایج آن برای کد RELAP5 در جدول ۸ ارائه شده است. با توجه به مقادیر این جدول حداقل مقدار دبی ورودی لازم برای خنک‌کردن المان‌های سوخت ۷ kg/s است که معادل ۱٫۱۳ m/s برای سرعت سیال در ورودی است. کم‌ترین مقدار سرعت سیال برای برداشت حرارت از مجتمع سوخت در نرم‌افزار Fluent نیز ۱٫۲ m/s به دست آمد که در این حالت افت فشار سیال در طول مجتمع سوخت ۳۴ kPa محاسبه گردید.

در شکل ۱۴ دمای نقاط مختلف المان سوخت در داغ‌ترین لایه (لایه سوخت ۶) در راستای ارتفاعی و نیز شعاعی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیش‌ترین دما مربوط به ساختار گرمایی بخش ۱۲ (حدود ۷ cm پایین‌تر از مرکز مجتمع سوخت) بوده که در حدود ۱۰۵ °C است. در این شکل هر یک از نمودارها نشان‌دهنده تغییر دما در راستای شعاعی است که مش ۱ مربوط به سطح غلاف داخلی و مش ۱۰ مربوط به سطح بیرونی غلاف خارجی است. هم‌چنین همان‌طور که قبلاً نیز بیان گردید، برای محاسبات دقیق‌تر، هر ساختار گرمایی به ۲۰ قسمت ارتفاعی تقسیم شده است که منظور از HS #۱ در این شکل، بالاترین بخش ساختار گرمایی و HS #۲۰ پایین‌ترین قسمت آن است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، به دلیل ضخامت کم المان سوخت، بین دو سطح غلاف داخلی و بیرونی تفاوت دمایی جزئی وجود دارد. هم‌چنین شکل ۱۵ نحوه تغییر سرعت سیال در راستای ارتفاع در طول کانال ۶ را نشان می‌دهد که این تفاوت مقدار در ابتدا و انتهای کانال به دلیل تغییر دمای سیال و در نتیجه تغییر چگالی آن است.

همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، تغییرات سرعت در هر کانال بسیار جزئی است. اما واضح است که به دلیل تفاوت سطح مقطع کانال‌های مختلف سرعت سیال در آن‌ها متفاوت است. در جدول ۷ سرعت متوسط سیال در هر یک از کانال‌ها به همراه قطر هیدرولیکی آن‌ها ارائه شده است. با توجه به این‌که قطر هیدرولیکی کانال‌های ۱۰۳ تا ۱۰۸ تقریباً برابر است، لذا سرعت سیال نیز در این کانال‌ها مشابه خواهد بود. افزایش دمای خنک‌کننده در حین عبور از کل مجتمع سوخت ۹٫۳ °C به دست آمده است.



شکل ۱۴. دمای نقاط مختلف در داغ‌ترین لایه سوخت (لایه ۶م) در راستای ارتفاعی و نیز شعاعی.



در کد RELAP5 مقدار ناپایداری جریان ۲/۲۱ به دست آمد که به اندازه کافی از ۲ بیش تر است.

۶.۳ مقایسه نتایج نرم افزار Fluent با کد RELAP5

در این گزارش تحلیل ترموهیدرولیکی یک مجتمع سوخت ۸ لایه با استفاده از نرم افزار Ansys-Fluent و نیز کد RELAP5/Mod3.2 انجام گردید. در جدول ۹ نتایج حاصل از دو کد جهت مقایسه ارائه شده است. در جدول ۱۰ نتایج محاسبات مقدار سرعت متوسط سیال در کانال های مختلف جریان در ارتفاع $Z=0$ یک مجتمع سوخت حلقوی با هر دو کد نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، اختلاف نتایج حدود ۸ درصد است.

با توجه به مقادیر جدول فوق و نیز نتایج محاسبات به دست آمده، نکات زیر قابل توجه است:

- بیشینه دمای غلاف محاسبه شده در هر دو ابزار محاسباتی، به اندازه کافی پایین تر از مقدار 105°C است که این نشان می دهد با دبی فعلی 8.25 kg/s می توان برداشت گرمای تولیدی در سوخت حلقوی را به خوبی انجام داد. این مقدار در داغ ترین مجتمع SFE قلب فعلی با سوخت صفحه ای حدود 99°C است [۴].

جدول ۹. مقایسه نتایج حاصل از نرم افزار Fluent و کد RELAP5

پارامتر	RELAP5	Fluent	اختلاف (%)
برای دبی 8.25 kg/s :			
- بیشینه دمای غلاف ($^{\circ}\text{C}$)	۹۷.۳۵	۸۵.۸۶	۱۳.۳۸
- بیشینه دمای سوخت ($^{\circ}\text{C}$)	۱۰۵.۴۵	۹۳.۸۵	۱۲.۳۶
- ΔT سیال در کل مجتمع ($^{\circ}\text{C}$)	۹.۳	۱۱.۸۵	۲۱.۵۲
- سرعت متوسط سیال در کانال 106 (m/s)	۱.۶۱	۱.۶۵	۲.۴۲
- افت فشار در طول مجتمع سوخت (kPa)	-	۶۴	-
حداقل سرعت سیال جهت خنک سازی المان های سوخت (105°C)	۱.۱۳	۱.۲	۵.۸
(دمای سطح غلاف برابر 105°C)			

جدول ۱۰. سرعت متوسط سیال در کانال های مختلف جریان در ارتفاع $Z=0$ مجتمع سوخت حلقوی

سرعت متوسط سیال در $Z=0$ (m/s)		کانال
RELAP5	Fluent	
۲.۷۵	۲.۳۹	کانال-۱۰۰
۱.۶۱	۱.۵۰	کانال-۱۰۱
۲.۱۱	۱.۹۴	کانال-۱۰۲
۱.۶۱	۱.۵۴	کانال-۱۰۳
۱.۶۰	۱.۵۴	کانال-۱۰۴
۱.۵۹	۱.۵۳	کانال-۱۰۵
۱.۶۰	۱.۵۵	کانال-۱۰۶
۱.۶۲	۱.۵۲	کانال-۱۰۷
۱.۶۱	۱.۵۹	کانال-۱۰۸
۲.۵۹	۲.۷۷	کانال-۱۰۹

جدول ۸. بیش ترین دمای سطح غلاف در کل مجتمع سوخت حلقوی به ازای دبی ورودی مختلف در کد RELAP5

دبی ورودی (kg/s)	بیشینه دمای سطح غلاف ($^{\circ}\text{C}$)
۸.۲۵	۹۷.۳۵
۷.۵	۱۰۱.۷۵
۷	۱۰۵.۱۵

۴.۳ محاسبه انحراف از جوشش هسته ای برای کمینه مقدار سرعت در کد Fluent

شار حرارت بحرانی بر اساس گزارش تحلیل ایمنی رآکتور تهران از رابطه زیر محاسبه می شود [۴]:

$$Q_c = 151 \times (1 + 0.1198 \times U) (1 + 0.00914 \times \delta T_{sub}) (1 + 0.19 \times P) \quad (2)$$

در این رابطه Q_c شار حرارت بحرانی (W/cm^2)، P فشار مطلق (bar)، U سرعت (m/s) و δT_{sub} دمای زیر اشباع در خروجی مجتمع ($^{\circ}\text{C}$) است.

با محاسبه شار حرارت بحرانی و داشتن شار محلی کمینه، مقدار DNB برای سرعت کمینه $1/2$ متر بر ثانیه و برای داغ ترین کانال (کانال شماره ۷) با استفاده از نرم افزار Fluent، برابر $2/1$ به دست آمد که شرط ایمنی بیش تر از ۲ را برآورده می کند. لازم به توضیح است که با توجه به پایین بودن فشار کاری، این نسخه از کد RELAP5 قادر به محاسبه این پارامتر نمی باشد. همچنین مقدار اختلاف فشار در دو مجتمع نیز با این کد قابل محاسبه نیست.

۵.۳ محاسبه پارامتر ناپایداری جریان

این پارامتر که به صورت نسبت شار حرارتی در شروع ناپایداری سیال به بیشینه شار حرارت واقعی تعریف می شود، همان طور که در جدول ۱ نیز بیان گردید، بایستی بیش تر از ۲ باشد. به منظور محاسبه این پارامتر، مقدار شار حرارتی در شروع ناپایداری سیال از رابطه Whittle-Forgan به دست می آید که این رابطه برای کانال های گرم شده باریک به صورت زیر است [۱۴]:

$$P = \frac{(T_{sat} - T_{in}) \rho \cdot V \cdot A \cdot C_p}{1 + 3.221 \times \frac{D_h}{L_h} \times (\rho V)^{0.29}} \quad (3)$$

در این رابطه T_{sat} دمای اشباع سیال ($^{\circ}\text{C}$)، T_{in} دمای ورودی سیال ($^{\circ}\text{C}$)، ρ چگالی سیال خنک کننده (g/cm^3)، V سرعت سیال (cm/s)، A سطح مقطع سیال (cm^2)، C_p ظرفیت گرمای ویژه ($\text{J/g}^{\circ}\text{C}$)، D_h قطر هیدرولیکی (cm)، L_h طول گرم شده (cm) است. با جای گذاری مقادیر در رابطه فوق و نیز با توجه به مقدار به دست آمده برای بیشینه شار حرارت محلی



۴. جمع بندی

در این مقاله، امکان استفاده از سوخت با هندسه حلقوی در شرایط کاری فعلی رآکتور تحقیقاتی تهران از دیدگاه ترموهیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا با تعریف هندسه یک مجتمع سوخت از نوع IRT-۴M در نرم افزار Fluent و همچنین کد RELAP5\Mod3.2 و انتخاب پارامترهای شرایط کاری یک المان سوخت استاندارد مانند دبی و دمای سیال ورودی و نیز فشار کاری آن، این شرایط در هر دو کد اعمال شد و محاسبات لازم جهت به دست آوردن توزیع دما و سرعت در یک مجتمع سوخت حلقوی صورت گرفت. نتایج این محاسبات نشان داد که با فرض این که دبی جرمی خنک کننده در ورودی مجتمع برابر 8.25 kg/s باشد (که معادل دبی حجمی $500 \text{ m}^3/\text{h}$ برای کل قلب است)، بیشینه دمای غلاف محاسبه شده در هر دو کد به اندازه کافی پایین تر از مقدار 105°C است که این نشان می دهد بدون تغییر در دبی فعلی قلب، می توان گرمای تولیدی در سوخت حلقوی را به خوبی برداشت نمود. همچنین در این شرایط بیشینه دمای سوخت حدود 10°C از بیشینه دمای سوخت در المان سوخت SFE فعلی کم تر است که این موضوع نیز مزیت دیگری برای سوخت حلقوی محسوب می شود. علی رغم این که در کد RELAP5 به دلیل معادلسازی سوخت حلقوی با سوخت صفحه ای، نسبت به مدل فیزیکی واقعی محدودیت ایجاد شده است، اما نتایج آن در مقایسه با نتایج نرم افزار Fluent قابل قبول است. در مجموع با توجه به نتایج به دست آمده از دیدگاه ترموهیدرولیکی، می توان بدون ایجاد تغییر در دبی فعلی قلب از سوخت حلقوی به جای سوخت فعلی استفاده نمود. بدیهی است که با شبیه سازی کل قلب و نیز آنالیزهای ایمنی این نوع سوخت در نهایت می توان در مورد امکان جایگزینی این سوخت به جای سوخت صفحه ای فعلی اظهار نظر نمود.

- در محاسبات انجام شده توسط نرم افزار Fluent، مقدار بیشینه دمای سوخت برای دبی 8.25 kg/s در المان شماره ۷ و برابر 93.85°C به دست آمد. این مقدار در محاسبات RELAP5 در المان شماره ۶ و برابر 105.45°C به دست آمد. این مقدار در داغ ترین مجتمع SFE قلب فعلی با سوخت صفحه ای حدود 114°C است [۴].
- مقدار حداقل سرعت سیال جهت خنک سازی المان های سوخت توسط نرم افزار Fluent حدود 1.13 m/s به دست آمد، در حالی که این مقدار در کد RELAP5 معادل 1.2 m/s حاصل گردید.
- دلایل تفاوت نتایج محاسبات حاصل از دو ابزار محاسباتی را می توان به صورت زیر جمع بندی نمود:
 - با توجه به این که در نرم افزار Fluent فیزیک دقیق مسأله شبیه سازی شده است، لذا نحوه تقسیم انتقال حرارت بین دو غلاف داخلی و خارجی هر لایه و به ویژه تأثیر گوشه های مربع هر لایه به خوبی قابل شبیه سازی است، در حالی که در کد RELAP5 به دلیل معادلسازی فیزیک مسأله و نیز عدم شبیه سازی گوشه های مربع، نتایج حالت بدبینانه ای دارد. همان طور که قبلاً نیز بیان گردید، سرعت در گوشه ها بیش ترین مقدار خود را داشته و برابر 3.4 m/s است. لذا انتقال حرارت بهتری در این قسمت ها صورت می گیرد و در نتیجه دما در ناحیه سوخت کم تر از مقدار به دست آمده در محاسبات RELAP5 خواهد بود. لذا محاسبات انجام شده با نرم افزار Fluent تطبیق بیشتری با فیزیک مسأله داشته و به واقعیت نزدیک تر است. بنابراین طبیعی است که نتایج حاصل از کد RELAP5 به ویژه برای دما بیش تر از مقادیر متناظر آن در Fluent باشد.
 - با توجه به این که اطلاعات دقیقی در مورد اجزاء داخلی مجتمع سوخت به ویژه نازل های ورودی به مجتمع در دسترس نبود، در همه شبیه سازی ها فرض گردید که سیال ورودی به مجتمع پس از طی مسافتی حدود 10 cm به میان لایه های مختلف سوخت وارد می شود. لذا نتیجه تقسیم جریان بین کانال های مختلف توسط خود کد محاسبه شده است.
 - در محاسبه مقدار سرعت متوسط سیال در کانال های مختلف جریان در ارتفاع $z=0$ با توجه به این که در کد RELAP5 هندسه مسأله با صفحات تخت معادلسازی شده است، لذا اثر گوشه های مربع در محاسبات دیده نشده است. از این رو مقادیر نسبت به نتایج به دست آمده از نرم افزار Fluent بیش تر خواهد بود. اما در حالت کلی تطابق مناسبی میان نتایج دو کد ملاحظه می شود.

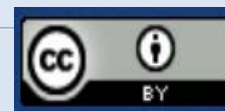


مراجع

1. V. Rozhikov, et al., *Design and Manufacture of Fuel Assemblies for Russian Research Reactors*, In *Safety Related Issues of Spent Nuclear Fuel Storage*, Springer, 95-105 (2007).
2. K.A. Konoplev, et al., *LEU WWR-M2 fuel qualification*, In *Proceedings of this Conference*, (2002).
3. N.A. Hanan, P.L. Garner, *Neutronic, steady-state, and transient analyses for the Kazakhstan VVR-K reactor with LEU fuel: ANL independent verification results* (No. ANL/RTR/TM-15/7). Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States) (2015).
4. AEOI, *Safety Analysis Report for Tehran Research Reactor, Chapter 5*. (Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran, 2009).
5. EL Khatib, H.H.A., *Ph.D Thesis*, Benha University, 2013. Retrieved from: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:46135156.
6. B.R. Munson, et al, *Fluid mechanics*, Singapore: Wiley (2013).
7. F.U. Manual, *Fluent Inc*, Chapter, 6, 14-16 (2003).
8. E. Saadati, M. Zainul Abedini, *Principles of basic and advanced simulation of computational fluid dynamics using FLUENT and CFX software*, First Edition, (1394) (In Persian).
9. J.H. Ferziger, M. Peric, *Computational methods for fluid dynamics*, (1996), *Physics Today*, 50(3), 80-84 (1981).
10. J.J. Chattot, *Computational aerodynamics and fluid dynamics: an introduction*, Springer Science & Business Media (204).
11. D.B. Pelowitz, *MCNPX 2.7.0 manual*, LANL, LA-CP-07-1473, Los Alamos National Laboratory, (2008).
12. M. Hasanzadeh, et al., *Neutronic conceptual design of Tehran Research Reactor using tubular fuel*, *JonSat*. (In Press) 10.24200/nst.2020.614.1423 (In Persian).
13. D.R. Miller, *Critical flow velocities for collapse of reactor parallel-plate fuel assemblies*, *Journal of Engineering for Power*, 82(2), 83-91 (1960).
14. R.H. Whittle, R. Forgan, *A Correlation for the Minima in the Pressure Drop Versus Flow-Rate Curves for Subcooled Water Flowing in Narrow Heated Channels*, *Nuclear Engineering and Design*, 6, 89-99 (1967).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

مصطفی حسن‌زاده، مسعود امین مظفری، فرخ خوش‌احوال، رحمان قراری، حسن اسماعیلی (۱۴۰۱)، تحلیل ترموهیدرولیکی یک مجتمع سوخت حلقوی در شرایط کاری عادی قلب راکتور تحقیقاتی تهران، ۱۰۰، ۱۱۴-۱۲۴

DOR: 20.1001.1.17351871.1401.43.2.13.8

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1390.html

