



## ارزیابی ایمنی ترموهیدرولیکی کانال دام شار نوترون رآکتور تحقیقاتی تهران برای انجام آزمون پرتودهی سوخت

سعیده کربلایی<sup>۱</sup>، محمدحسین استکی<sup>۱</sup>، سیدمحمد میروکیلی<sup>۲\*</sup>، سعیده صفائی عرشی<sup>۲</sup>

۱. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶۷-۳۴۴۱، اصفهان-ایران

۲. پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران-ایران

\*Email: mmirvakili@aeoi.org.ir

### مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۹/۸ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۹

### چکیده

در پژوهش‌های انجام شده در خصوص استفاده از پتانسیل رآکتور تحقیقاتی تهران برای تست سوخت‌های تولید داخل، یک چیدمان قلب فشرده شامل یک کانال دام شار نوترون در مرکز قلب به منظور دستیابی به توان خطی مطلوب برای تست سوخت، ارائه شده است. در این پژوهش، به ارزیابی ایمنی بارگذاری محفظه پرتودهی سوخت در کانال دام شار نوترون از نقطه‌نظر ایمنی ترموهیدرولیکی قلب در شرایط پایا، پرداخته شده است. به علت تفاوت کانال بین محفظه پرتودهی و صفحات سوخت مجاور آن با سایر کانال‌های عبور خنک‌کننده در قلب، توزیع خنک‌کننده در قلب در پی بارگذاری محفظه پرتودهی سوخت در کانال دام شار نوترون تغییر خواهد کرد. از این رو در این پژوهش، تأثیر بارگذاری محفظه پرتودهی سوخت بر برداشت حرارت از صفحه سوخت مجاور کانال دام شار نوترون که در واقع داغ‌ترین صفحه سوخت موجود در قلب می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. در این ارزیابی، از نرم‌افزار آنسیس فلوئنت با قابلیت شبیه‌سازی هم‌زمان سوخت‌های میله‌ای داخل محفظه پرتودهی و سوخت‌های صفحه‌ای مجاور کانال دام شار نوترون استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد بیشینه دمای غلاف صفحات سوخت مجاور محفظه پرتودهی حدود ۳۷۰ کلوین خواهد بود که از دمای اشباع در فشار کاری رآکتور و نیز بیشینه دمای مجاز غلاف برای جلوگیری از بروز خوردگی کمتر است. بیشینه دمای سوخت نیز ۳۷۵/۹ درجه کلوین خواهد بود که در محدوده مجاز قرار دارد. این نتایج، عملکرد ایمن قلب رآکتور تهران از نقطه‌نظر ترموهیدرولیکی در صورت بارگذاری محفظه پرتودهی سوخت در کانال دام شار نوترون را نشان می‌دهند.

**کلیدواژه‌ها:** کانال دام شار نوترون، رآکتور تحقیقاتی تهران، محفظه پرتودهی، ایمنی ترموهیدرولیکی

## Thermal-hydraulics safety analysis of neutron flux trap channel of Tehran research reactor for fuel irradiation experiment

S. Karbalai<sup>1</sup>, M.H. Esteki<sup>1</sup>, S.M. Mirvakili<sup>2\*</sup>, S. Safaei Arshi<sup>2</sup>

1. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Physics, Isfahan University, P.O.BOX: 817467-3441, Isfahan – Iran

2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.BOX: 14399-51113, Tehran – Iran

### Research Article

Received: 29.11.2023,

Revised: 7.2.2024,

Accepted: 28.2.2024

### Abstract

In the research conducted on the potential use of the Tehran Research Reactor (TRR) for domestic fuel testing, a compact core configuration has been developed. This configuration includes a central neutron flux trap channel to achieve the desired linear heat rate for fuel testing. In this study, a safety analysis of loading the fuel irradiation capsule in the neutron flux trap channel is performed from a thermal-hydraulics perspective under steady-state conditions. The differences in coolant channels between the irradiation capsule and adjacent fuel plates cause a change in coolant flow distribution in the core after loading the fuel irradiation capsule in the neutron flux trap channel. The study investigates the effect of loading the fuel irradiation capsule on heat removal from the fuel plate adjacent to the neutron flux trap channel, which is the hottest fuel plate in the core. ANSYS Fluent software is used for the analysis, allowing for simultaneous simulation of rod-type fuels within the irradiation capsule and the fuel plates adjacent to the neutron flux trap channel. The simulation results show that the maximum clad temperature of the fuel plates adjacent to the irradiation capsule will be approximately 370K, which is lower than the saturation temperature under the reactor operating pressure and below the maximum permissible clad temperature to avoid corrosion. The maximum fuel temperature is 375.9K, which falls within permissible limits. These results indicate safe operation of the TRR core from a thermal-hydraulics perspective if the fuel irradiation capsule is loaded in the flux trap channel.

**Keywords:** Neutron flux trap channel, Tehran research reactor, Irradiation capsule, Thermal-hydraulics safety

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology

Vol. 46 (1), Serial Number 111, 2025, P 54-63

مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای

دوره ۴۶، شماره ۱، جلد ۱۱۱، بهار ۱۴۰۴، ص ۵۴-۶۳



## ۱. مقدمه

رآکتورهای تحقیقاتی ابزارهای ارزشمندی برای انجام آزمایشات پرتودهی سوخت به منظور بررسی پدیده‌هایی که تأثیر عمده‌ای بر عملکرد سوخت در طی پرتودهی دارند، محسوب می‌شوند. در سراسر دنیا رآکتورهای تحقیقاتی بسیاری برای آزمایش‌های پرتودهی سوخت طراحی و تجهیز شده‌اند. رآکتور تهران تنها رآکتور تحقیقاتی در حال بهره‌برداری در کشور است که قابلیت استفاده برای تست‌های در حین پرتودهی بر روی سوخت‌های هسته‌ای و نیز پرتودهی سوخت تا مقادیر مختلف مصرف سوخت برای انجام تست‌های پس از پرتودهی را دارا می‌باشد [۱]. در جدول ۱ مشخصات اصلی رآکتور تحقیقاتی تهران آورده شده است.

در داخل کشور در سال‌های اخیر مطالعاتی به منظور بهره‌گیری از پتانسیل رآکتور تحقیقاتی تهران برای تست سوخت‌های تولید داخل انجام شده است [۱-۴]. در مراجع [۱] تا [۳] تحلیل ایمنی قلب رآکتور تهران در صورت پرتودهی یک مجتمع تست سوخت در قلب (بدون قرارگیری در محفظه پرتودهی تست لوپ) از دیدگاه ایمنی نوترونیک و ترموهیدرولیک انجام شده و ابزار محاسباتی مورد استفاده برای تحلیل حالات گذرا بهبود داده شده است. در پژوهش ارائه شده در مرجع [۴] یک چیدمان فشرده برای قلب رآکتور تهران که دارای کانال دام شار نوترون در مرکز قلب می‌باشد، به منظور تأمین شرایط مطلوب برای تست سوخت در قلب رآکتور تهران ارائه شده است. کانال دام شار نوترون در واقع یک فضای حاوی خنک‌کننده و خالی از سوخت درون قلب رآکتور است که با مجتمع‌های سوخت احاطه شده است و به دلیل بالا بودن شار نوترون حرارتی در آن، برای مقاصد پرتودهی و تولید رادیوایزوتوپ مورد استفاده قرار می‌گیرد. کانال دام شار نوترون در قلب رآکتور تهران به منظور بارگذاری محفظه پرتودهی لوپ تست سوخت رآکتور تهران در موقعیت مرکزی قلب در نظر گرفته شده است. لوپ تست سوخت رآکتور تهران با فشار نامی ۱۰ بار و دبی حجمی ۲۰ مترمکعب بر ساعت برای ایجاد شرایط ترموهیدرولیکی مورد نظر برای تست‌های حین پرتودهی سوخت طراحی و ساخته شده است [۶]. لوپ تست سوخت حاوی یک محفظه پرتودهی است که می‌توان آن را درون قلب رآکتور تهران در مکان مناسب جهت پرتودهی بارگذاری کرد و به طور خاص برای هر تست پرتودهی با در نظر گرفتن تعداد و اندازه نمونه‌های سوخت، طراحی می‌شود [۶]. در این مقاله به ارزیابی ایمنی قلب رآکتور تهران از نقطه‌نظر ترموهیدرولیکی به منظور

## جدول ۱. مشخصات اصلی رآکتور تحقیقاتی تهران [۵]

| پارامتر        | مقدار                                                                      |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------|
| توان           | ۵ مگاوات                                                                   |
| خنک‌کننده      | آب سبک با دمای ورودی ۳۱۰/۹۵ درجه کلوین و نرخ جریان ۵۰۰ مترمکعب بر ساعت     |
| نوع سوخت       | سوخت صفحه‌ای                                                               |
| مجتمع‌های سوخت | مجتمع سوخت استاندارد (SFE)                                                 |
|                | شامل ۱۹ صفحه سوخت                                                          |
|                | مجتمع سوخت استاندارد (CFE)                                                 |
|                | شامل ۱۴ صفحه سوخت و ۲ عدد صفحه جاذب از جنس Ag-In-Cd و $^{235}\text{U}$ -Al |
| سوخت           | $\text{U}_3\text{O}_8$ -Al با غنای ۲۰٪                                     |
| غلاف           | Al-۶۰۶۱                                                                    |

اطمینان از عملکرد ایمن قلب فشرده رآکتور تهران پس از بارگذاری محفظه پرتودهی در کانال دام شار نوترون پرداخته شده است. در این خصوص، نگرانی اصلی آن است که با توجه به عایق نبودن محفظه پرتودهی از نظر حرارتی، آیا بارگذاری آن در قلب تأثیر نامطلوبی بر برداشت حرارت از سوخت‌های صفحه‌ای که در مجاورت محفظه پرتودهی قرار می‌گیرند، خواهد داشت یا خیر. به علاوه، بارگذاری محفظه پرتودهی توزیع جریان خنک‌کننده درون قلب را تغییر خواهد داد و لازم است تأثیر این تغییر بر برداشت حرارت از قلب بررسی شود. محفظه پرتودهی مورد نظر در این مقاله، محفظه پرتودهی طراحی شده جهت تست پرتودهی بر روی ۳ نمونه سوخت میله‌ای ساخت داخل در تست لوپ رآکتور تهران است.

نرم‌افزار انسیس فلوئنت [۷] بر خلاف کدهای ترموهیدرولیکی هسته‌ای در دسترس، قابلیت شبیه‌سازی هم‌زمان هندسه استوانه‌ای محفظه پرتودهی و سوخت‌های میله‌ای درون آن در کنار هندسه مستطیلی سوخت‌های رآکتور تهران که در مجاورت محفظه پرتودهی در قلب رآکتور قرار می‌گیرند را داراست و همچنین می‌تواند انتقال حرارت از دیواره محفظه پرتودهی به خنک‌کننده عبوری از کانال بین محفظه پرتودهی و سوخت‌های صفحه‌ای مجاور آن را محاسبه نماید. از این‌رو، در این مقاله از نرم‌افزار انسیس فلوئنت جهت ارزیابی ایمنی بارگذاری محفظه پرتودهی ذکر شده در قلب رآکتور تهران از دیدگاه ترموهیدرولیکی در شرایط پایا استفاده شده است.

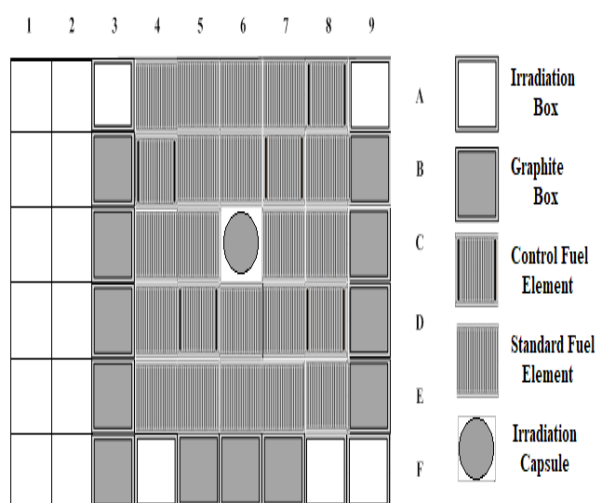


گرفته است. از این رو بررسی این مسئله که آیا توزیع جریان خنک کننده در قلب پس از بارگذاری محفظه پرتودهی برای برداشت حرارت از صفحه سوخت مجاور محفظه کافی است یا خیر، بسیار ضروری است.

هندس در نظر گرفته شده برای انجام این ارزیابی ایمنی، شامل محفظه پرتودهی پرتودهی حاوی ۳ میله سوخت تحت تست به همراه ۲ سوخت صفحه‌ای مجاور محفظه پرتودهی و کانال‌های خنک کننده آنها است که در شکل ۲ نشان داده شده است. فشار خنک کننده درون محفظه پرتودهی ۴/۴ بار، دمای خنک کننده ورودی به محفظه پرتودهی ۳۱۳ درجه کلوین و نرخ جریان خنک کننده عبوری از اطراف میله‌های سوخت ۳/۹ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد. دمای خنک کننده در ورودی قلب رآکتور نیز ۳۱۰/۹۵ درجه کلوین در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. مشخصات سوخت‌های میله‌ای درون محفظه پرتودهی [۴]

| پارامتر               | مقدار                 |
|-----------------------|-----------------------|
| سوخت:                 |                       |
| جنس                   | UO <sub>2</sub> (۳/۳) |
| قطر حفره مرکزی        | ۲ میلی‌متر            |
| قطر خارجی             | ۷/۵۷ میلی‌متر         |
| طول فعال              | ۳۰۰ میلی‌متر          |
| غلاف:                 |                       |
| جنس                   | Zr-۱%Nb               |
| قطر خارجی             | ۹/۱۱ میلی‌متر         |
| قطر داخلی             | ۷/۷۶ میلی‌متر         |
| جنس گاز پر شده        | هلیوم                 |
| فشار اولیه گاز پر شده | ۱/۵ بار               |



شکل ۱. چیدمان قلب فشرده رآکتور تهران و مکان پرتودهی در نظر گرفته شده در این پژوهش.

## ۲. محفظه پرتودهی و لوپ تست سوخت رآکتور تهران

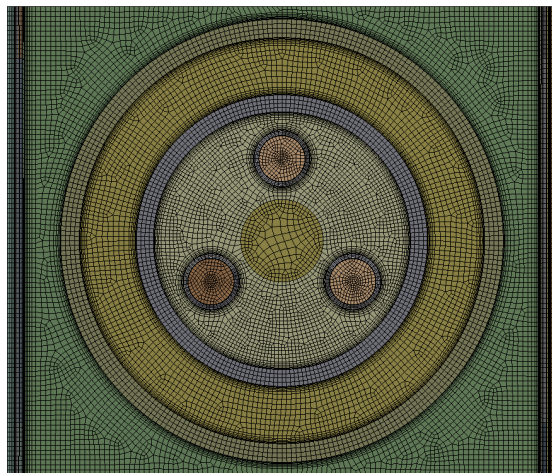
لوپ تست سوخت رآکتور تهران با هدف ایجاد شرایط ترموهیدرولیکی مطلوب برای انجام تست‌های پرتودهی بر روی سوخت‌های تولید داخل طراحی و ساخته شده است [۶]. محفظه پرتودهی یکی از اجزای اصلی لوپ است که درون قلب رآکتور بارگذاری می‌شود و همان‌طور که قبلاً نیز به آن اشاره شد، برای هر تست پرتودهی به صورت خاص طراحی می‌گردد. محفظه پرتودهی که در این پژوهش مدنظر بوده است، از ۲ استوانه هم مرکز آلومینیومی با قطرهای ۴۸ و ۷۳ میلی‌متر تشکیل شده است. خنک کننده از قسمت بالا وارد فضای بین استوانه داخلی و خارجی می‌شود، به سمت پایین حرکت کرده و سپس از قسمت پایین وارد استوانه داخلی شده و به سمت بالا حرکت کرده و از روی ۳ سوخت میله‌ای که بر روی یک صفحه مشبک متصل به یک کانال هدایت کننده مرکزی قرار گرفته‌اند، عبور کرده و در نهایت از بالای محفظه پرتودهی خارج می‌شود. مشخصات موادی و ابعادی سوخت‌های میله‌ای قرار گرفته درون محفظه پرتودهی در جدول ۲ آورده شده است.

## ۳. روش کار

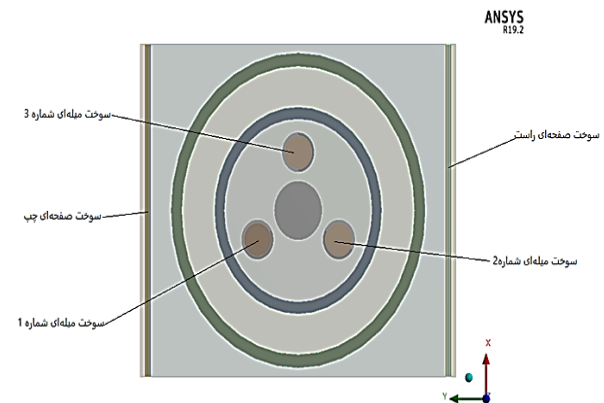
در این بررسی، یک چیدمان فشرده قلب رآکتور تهران شامل ۱۹ مجتمع سوخت استاندارد و ۵ مجتمع سوخت کنترلی در نظر گرفته شده است که در آن، کانال دام شار نوترون در مکان C۶ بین ۲ مجتمع سوخت صفحه‌ای رآکتور تهران قرار گرفته است و چیدمان آن در شکل ۱ نمایش داده شده است.

آب استخر رآکتور به عنوان خنک کننده مدار اول به وسیله گرانش رو به پایین جریان می‌یابد و با دبی ۵۰۰ مترمکعب بر ساعت از روی قلب عبور می‌کند و به تانک تأخیری وارد می‌شود و پس از آن به وسیله پمپ به استخر برگردانده می‌شود [۵]. بارگذاری محفظه پرتودهی در قلب رآکتور تهران منجر به تغییر توزیع جریان خنک کننده عبوری از قلب می‌شود و بر روی برداشت حرارت از مجتمعات سوخت رآکتور تهران اثر می‌گذارد. برای انجام تحلیل‌های مورد نظر در این پژوهش، ابتدا شبیه‌سازی نوترونیک قلب نمایش داده شده در شکل ۱ با استفاده از کد MCNPX انجام شد که براساس نتایج آن، توان تولیدی در مجتمع سوختی که در مجاورت محفظه پرتودهی و در موقعیت C۷ قرار دارد ۲۸۵ کیلووات خواهد بود که این توان، بیشترین توان تولیدی در بین مجتمعات سوخت موجود در این قلب است. به علاوه، داغ‌ترین صفحه سوخت این مجتمع نیز صفحه سوختی است که در مجاورت محفظه پرتودهی قرار





شکل ۳. نمایی از هندسه مورد بررسی به همراه مش آن.



شکل ۴. اجزای هندسه در نظر گرفته شده در این ارزیابی ایمنی ترموهیدرولیکی.

جدول ۳. متوسط دمای خروجی محفظه پرتودهی به ازای تعداد مش‌های مختلف

| تعداد مش            | متوسط دمای خروجی محفظه پرتودهی |
|---------------------|--------------------------------|
| ۴ میلیون و ۵۰۰ هزار | ۳۱۴/۹۸۷                        |
| ۷ میلیون            | ۳۱۵/۰۱۳                        |
| ۸ میلیون و ۲۰۰ هزار | ۳۱۵/۰۱۹                        |
| ۱۰ میلیون           | ۳۱۵/۰۱۹                        |

در جدول ۴ پارامترهای مرتبط با کیفیت مش ارائه شده‌اند. همان‌طور که مقادیر متوسط پارامترها نشان می‌دهد در تعداد کمی از مش‌ها orthogonality کمتر از ۱ است. به علاوه در بیشتر مش‌ها skewness بسیار کوچک و نزدیک صفر است. در خصوص Aspect ratio نیز اکثر مش‌ها مقدار نزدیک به ۱ دارند و فقط در تعدادی از مش‌های لایه مرزی مقادیر بزرگ اتفاق افتاده که با توجه به هندسه قابل قبول می‌باشد.

### ۲.۱.۳ اطلاعات مورد نیاز جهت شبیه‌سازی در انسیس فلوئنت

#### ۲.۱.۳.۱ چشمه گرمایی

توزیع توان در ۳ سوخت میله‌ای و ۲ صفحه سوخت در ۱۰ بازه محوری در قلب بحرانی (۶۶ درصد از میله‌های کنترل خارج قلب قرار داشته‌اند) از محاسبات نوترونیک به‌دست آمده است. یک تابع چند جمله‌ای به هر یک از این توزیع‌های توان برازش شده و به عنوان چشمه حرارتی با استفاده از UDF به انسیس فلوئنت اعمال گردیده است. نمودار برازش منحنی به نتایج حاصل از محاسبات نوترونیک در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

به منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی انجام شده در نرم‌افزار فلوئنت، نتایج به‌دست آمده از این شبیه‌سازی برای سوخت‌های میله‌ای درون محفظه پرتودهی با نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی محفظه پرتودهی توسط کد COBRA-EN [۸] مقایسه شده است.

### ۱.۳ ارزیابی ایمنی ترموهیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت

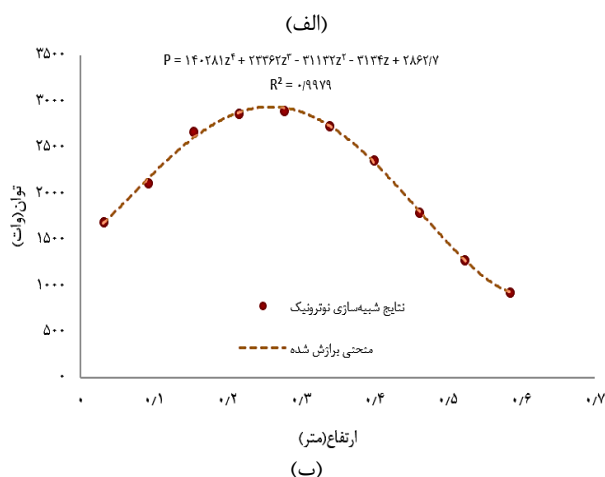
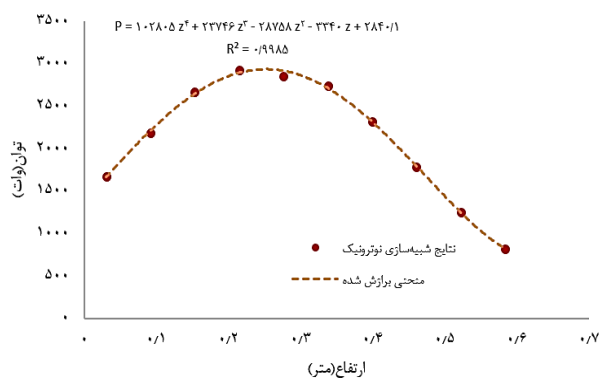
به منظور بررسی اثر بارگذاری محفظه پرتودهی در کانال دام شار نوترون قلب فشرده راکتور تهران بر برداشت حرارت از سوخت‌های صفحه‌ای مجاور محفظه پرتودهی، هندسه نمایش داده شده در شکل ۲ به وسیله نرم‌افزار انسیس فلوئنت شبیه‌سازی شده است. جزئیات شبیه‌سازی توسط انسیس فلوئنت در ادامه آورده شده است.

#### ۱.۱.۳.۱ مش‌زنی

مش‌زنی هندسه توسط انسیس مشینگ انجام شده است و برای کل هندسه از مش ۶ وجهی و برای ناحیه خنک‌کننده بالا و پایین سوخت‌ها از مش مثلثی استفاده شده است. شکل ۳ تصویری از مش هندسه را نشان می‌دهد.

به منظور بررسی استقلال نتایج از مش، مدل‌سازی با مش‌های مختلف انجام شد و نتایج ارائه شده در جدول ۳ برای متوسط دمای خروجی محفظه پرتودهی به ازای مش‌های مختلف به‌دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد مش به بالاتر از ۸/۲ میلیون مش تغییری در نتیجه حاصل نمی‌شود و در نتیجه این مش برای محاسبات نهایی مورد استفاده قرار گرفت.





شکل ۵. توزیع توان در دو صفحه سوخت مجاور محفظه پرتو دهی و نمودار برازش شده به نتایج نوترونیک ((الف) سوخت سمت چپ (ب) سوخت سمت راست).

### ۲.۲.۱.۳ مشخصات فیزیکی

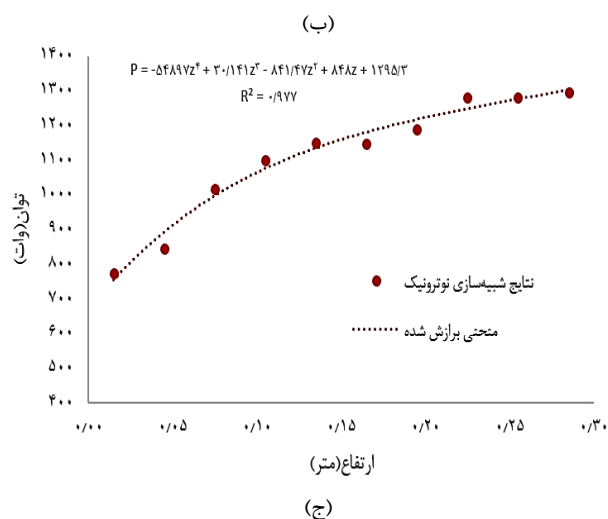
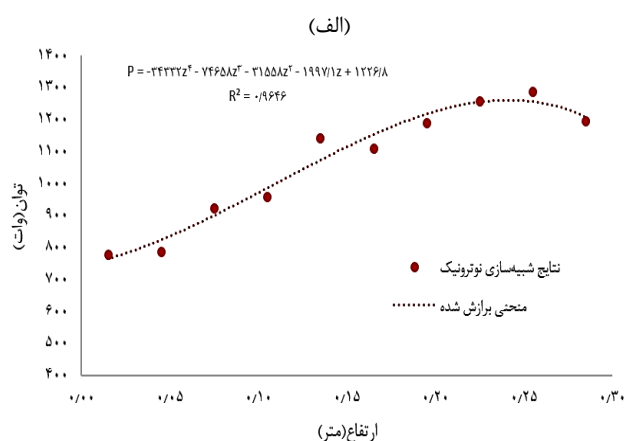
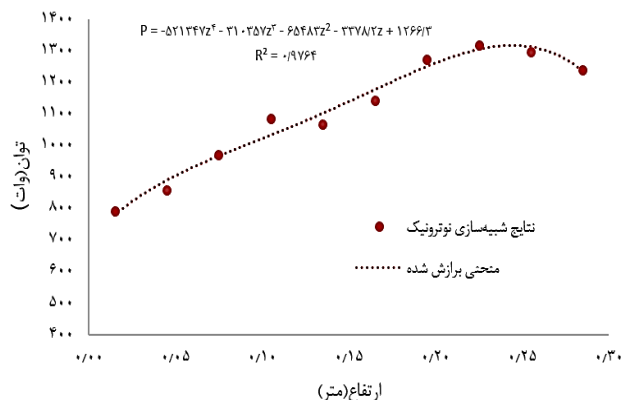
مشخصات فیزیکی سوخت و غلاف که در شبیه‌سازی انسیس استفاده شده است (شامل هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی) در جدول ۵ آورده شده است. لازم به ذکر است خواص وابسته به دما با استفاده از UDF در ورودی اعمال گردیده است.

### ۳.۱.۳ مدل‌سازی

در این پژوهش از نرم‌افزار انسیس فلوئنت ۱۹/۲ با مدل ke و تابع دیواره Enhanced Wall Treatment استفاده شده و پارامترهای ترموهیدرولیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور انتخاب مدل حل مناسب، عدد رینولدز برای نواحی مختلف هندسه محاسبه شد که وجود جریان آشفتگی را نشان می‌داد. در نتیجه باید از مدل‌های جریان آشفتگی استفاده می‌شد. پس از بررسی مدل‌های مختلف، براساس نمودارهای مربوط به باقی‌مانده‌ها و نمودار پارامتر مانیتور شده به منظور اطمینان از هم‌گرایی حل (میانگین دمای غلاف سوخت‌های میله‌ای)، مدل ke انتخاب شد.

جدول ۴. پارامترهای مرتبط با کیفیت مش

| پارامتر       | مقدار کمینه              | مقدار بیشینه | مقدار متوسط             |
|---------------|--------------------------|--------------|-------------------------|
| orthogonality | $1.2563 \times 10^{-3}$  | ۱            | ۰.۹۴۶۱۴                 |
| skewness      | $1.3078 \times 10^{-10}$ | ۰.۹۸۷۴       | $9.0803 \times 10^{-2}$ |
| Aspect ratio  | ۱.۰۱۳۴                   | ۸۴.۱۷۷       | ۸.۵۳۶۳                  |



شکل ۴. توزیع توان در ۳ سوخت میله‌ای و منحنی برازش شده به نتایج شبیه‌سازی نوترونیک ((الف) سوخت میله‌ای شماره ۱، (ب) سوخت میله‌ای شماره ۲، (ج) سوخت میله‌ای شماره ۳).



جدول ۵. خواص فیزیکی سوخت و غلاف

| نوع ماده                          | چگالی                                                                                                                         | هدایت حرارتی (k)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | ظرفیت گرمایی ویژه (Cp)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Zr-۱۰/Nb [۱۰]                     | برای دمای بین ۳۰۰ و ۱۱۰۰ درجه کلوین:<br>(۲) $\rho = 6636 - 0.286T$<br>$\rho$ برحسب کیلوگرم بر متر مکعب و دما برحسب کلوین است. | برای دمای بین ۳۰۰ و ۱۱۰۰ درجه کلوین:<br>(۳) $k = 23.5 - 0.192T + 1.68 \times 10^{-5}T^2$<br>برای دمای بین ۱۱۰۰ و ۱۶۰۰ درجه کلوین:<br>(۴) $k = 1.5 + 0.2T$<br>k برحسب W/m.K و دما برحسب کلوین است.                                                                                                                                                                                | برای دمای بین ۳۰۰ و ۱۱۰۰ درجه کلوین:<br>(۷) $C_p = 238 + 0.159T$<br>برای دمای بین ۱۱۰۰ و ۲۰۰۰ درجه کلوین:<br>(۸) $C_p = 281 + 0.663T$<br>Cp برحسب J/kg.K و دما برحسب کلوین است.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| UO <sub>2</sub>                   | ۱۰۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب                                                                                                     | برای دمای بین صفر تا ۱۶۵۰ درجه سانتی گراد:<br>(۵) $k = p[K_1 / (K_1 + T) + K_2 e^{(K_3/T)}]$<br>برای دمای بین ۱۶۵۰ تا ۲۸۴۰ درجه سانتی گراد:<br>(۶) $k = p[K_4 + K_5 e^{(K_6/T)}]$<br>K برحسب W/cm.K و p فاکتور تصحیح تخلخل است. ثوابت معادله عبارتند از:<br>$K_1 = 40.4$<br>$K_2 = 464$<br>$K_3 = 1.216 \times 10^{-4}$<br>$K_4 = 1.867 \times 10^{-3}$<br>$K_5 = 0.191$<br>[۱۱] | برای دمای بین ۳۰۰ تا ۴۰۰۰ کلوین [۱۱]:<br>(۹) $C_p = \frac{K_1 \theta^2 e^{(\theta/T)}}{T^2 (e^{\theta/T} - 1)^2} + K_2 T + \left( \frac{O/M}{2} \right) \frac{K_3 E_D}{RT^2} e^{-E_D/RT}$<br>Cp برحسب J/kg.K و دما برحسب کلوین است. O/M نسبت اکسیژن به فلز است که مقدار آن بین ۲ و ۲.۱۵ است. ظرایب ثابت عبارتند از:<br>فاکتور تصحیح تخلخل است. ثوابت معادله عبارتند از:<br>$K_1 = 2967$ (J/kg.K)<br>$K_2 = 2.43 \times 10^{-2}$ (J/kg.K <sup>2</sup> )<br>$K_3 = 8.745 \times 10^7$ (J/kg)<br>$E_D = 1.577 \times 10^5$ (J/mol)<br>$\theta = 535.285$ (K)<br>$R = 8.3143$ (J/mol.K) |
| U <sub>2</sub> O <sub>8</sub> -Al | [۵] ۴۷۶۰ (kg/m <sup>3</sup> )                                                                                                 | [۵] ۱۰ (W/m.K)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | $C_p, U_2O_8 - Al = (1 - W_u / 0.848) C_p, Al + (W_u / 0.848) C_p, U_2O_8$<br>$= 0.892 + 0.0046T - W_u (0.734 + 0.0019T)$<br>(۱۰)<br>Cp برحسب J/g.K و دما برحسب کلوین است [۱۱]. W <sub>u</sub> کسر وزنی اورانیم و برای راکتور تهران ۶۲/۲۳٪ است [۵].                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| آلومینیم                          | [۵] ۲۷۰۰ (kg/m <sup>3</sup> )                                                                                                 | [۵] ۱۸۰ (W/m.K)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | [۱۰] ۸۹۷ (J/kg.K)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

فشار:  $1.7 - 5.8$  بار

قطر هیدرولیکی:  $0.5 - 1.28$  سانتی متر

#### ۴. نتایج و بحث پیرامون آنها

در این بخش نتایج تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش، ارائه شده است. کانتور دمای سطح غلاف در ۳ میله سوخت درون محفظه پرتودهی در شکل ۶ نشان داده شده است.

شکل ۷ توزیع دمای سوخت در ۳ میله سوخت تحت تابش را در مقطعی که بیشینه دما رخ داده نشان می‌دهد. در شکل ۸ توزیع سرعت خنک‌کننده در محفظه پرتودهی نمایش داده شده است که دمای بالای غلاف در ناحیه نزدیک به دیواره محفظه پرتودهی را توجیه می‌نماید.

برای اعمال توزیع توان در ۳ میله سوخت و ۲ سوخت صفحه‌ای و خواص فیزیکی سوخت و غلاف از UDF استفاده شده است. جهت اطمینان از ایمنی ترموهیدرولیکی، پارامتر MDNBR برای سوخت‌های صفحه‌ای مجاور محفظه پرتودهی با استفاده از رابطه Mirshak [۹] که در ادامه آورده شده است و با در نظر گرفتن پارامترهای ترموهیدرولیکی به دست آمده توسط نرم‌افزار انسیس فلونت، محاسبه شده است.

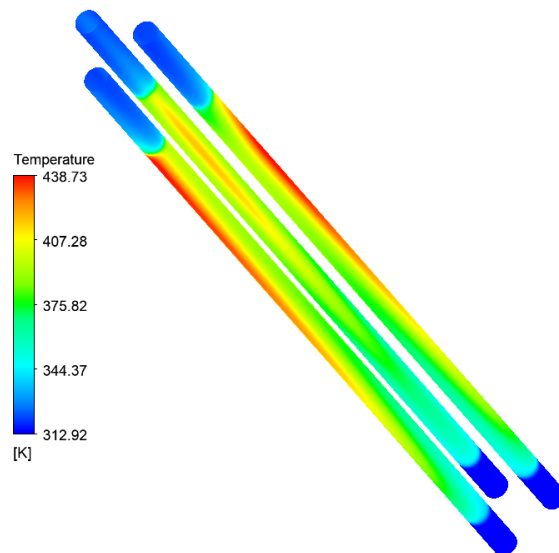
رابطه Mirshak:

$$q_c = 151(1 + 0.1198V)(1 + 0.00914\Delta T_{sub})(1 + 0.19P) \quad (۱)$$

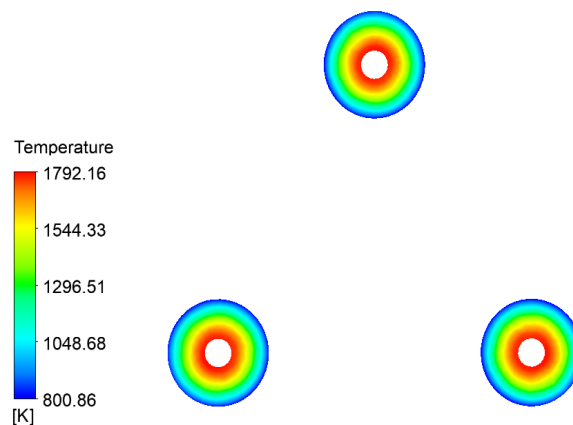
که در آن  $q_c$  شار حرارتی بحرانی برحسب وات بر سانتی متر مربع،  $V$  سرعت خنک‌کننده برحسب متر بر ثانیه،  $\Delta T_{sub}$  دمای زیر اشباع ( $T_{sat} - T_{liquid}$ ) و  $P$  فشار برحسب بار می‌باشد. محدوده اعتبار این رابطه به صورت زیر است:  
سرعت: ۱۳۰۰-۱۵۰۰ سانتی متر بر ثانیه



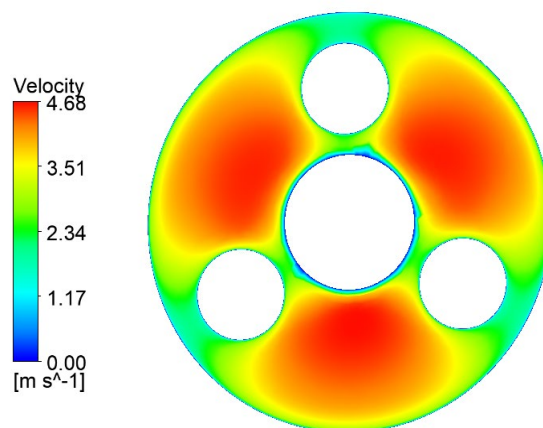
به منظور صحت‌سنجی شبیه‌سازی انجام شده در نرم‌افزار فلوئنت، در شکل ۹ نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی با نرم‌افزار فلوئنت برای تغییرات دمایی محوری در سطح خارجی غلاف ۳ میله سوخت درون محفظه پرتودهی با نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی توسط کد COBRA-EN مقایسه شده است. با توجه به آن‌که در کد COBRA-EN، در هر بازه محوری روی سطح غلاف تنها یک دما به عنوان دمای متوسط آن بازه محاسبه می‌شود، متوسط مقادیر به‌دست آمده از فلوئنت برای تمام مش‌های موجود در هر بازه محوری با مقادیر به‌دست آمده از COBRA-EN در همان بازه محوری مقایسه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، نتایج شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار فلوئنت همخوانی خوبی با نتایج COBRA-EN دارند و اختلاف موجود به آن علت است که در مدل‌سازی توسط COBRA-EN دقیقاً داده‌های نوترونیک توزیع توان مورد استفاده قرار گرفته است ولی در فلوئنت، منحنی برازش شده به این داده‌ها استفاده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود پروفیل توزیع‌های دمایی محوری به‌دست آمده از فلوئنت، مشابه پروفیل منحنی‌های برازش شده به داده‌های نوترونیک توان تولیدی میله‌های سوخت درون محفظه پرتودهی می‌باشند. همچنین، بیشینه دمای سوخت در ۳ میله سوخت درون محفظه پرتودهی براساس نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی توسط کد COBRA-EN معادل ۱۷۵۴ درجه کلون و براساس نتایج شبیه‌سازی توسط فلوئنت ۱۷۹۲ درجه کلون می‌باشد که نشان‌دهنده تطابق نتایج به‌دست آمده از دو شبیه‌سازی است. لازم به ذکر است بیشینه دمای مجاز سوخت در میله‌های سوخت درون محفظه پرتودهی طبق اعلام شرکت طراح سوخت ۲۵۱۳ درجه کلون است و در نتیجه، دمای سوخت محاسبه شده توسط هر دو کد با حاشیه خوبی در محدوده مجاز قرار دارند.



شکل ۶. توزیع دمای سطح غلاف ۳ سوخت میله‌ای درون محفظه پرتودهی.



شکل ۷. توزیع دمای سوخت در ۳ میله سوخت درون محفظه پرتودهی در مقطعی که بیشینه دما رخ داده.

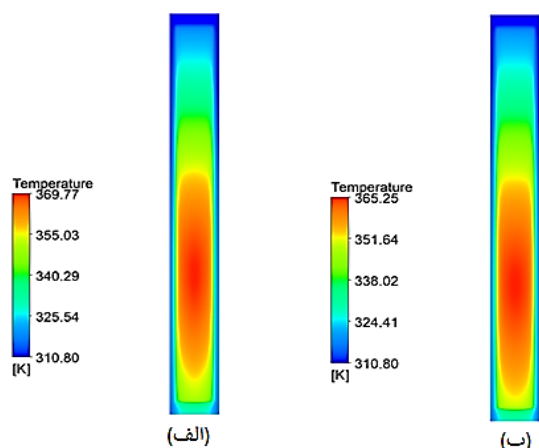


شکل ۸. کانتور سرعت خنک‌کننده در محفظه پرتودهی.

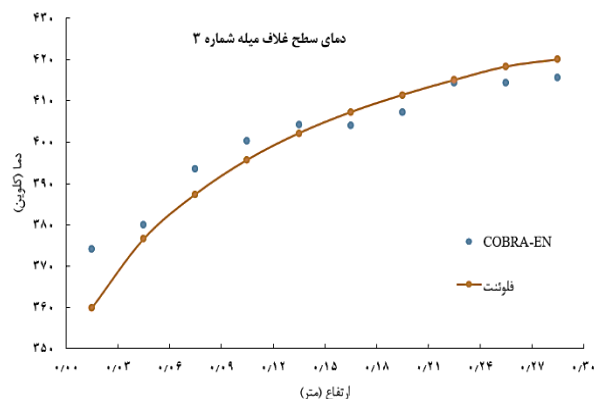
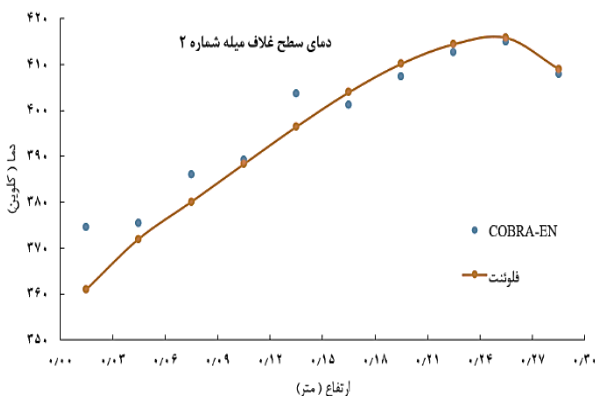
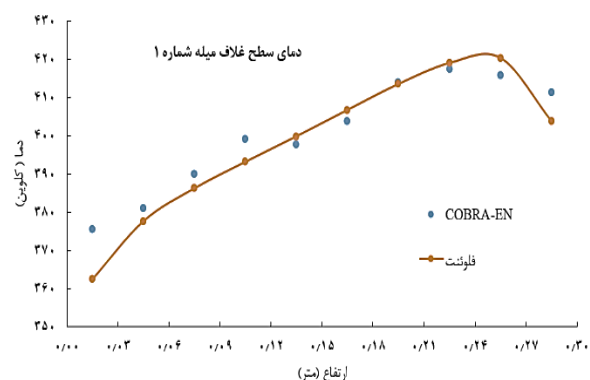


قلب ۳۷۸ درجه کلون می‌باشد. بنابراین برداشت حرارت مؤثر از سوخت‌های صفحه‌ای مجاور کانال دام شار نوترون پس از بارگذاری محفظه پرتودهی صورت خواهد گرفت. علاوه بر این، بیشینه دمای غلاف در ۲ سوخت صفحه‌ای (۳۷۰ درجه کلون) کمتر از دمای اشباع خنک‌کننده در فشار حدود ۱٫۷ بار در قلب رآکتور تهران (۳۸۹ درجه کلون) است. بنابراین، رخ دادن پدیده آغاز جوشش هسته‌ای نیز غیرممکن خواهد بود. شکل ۱۲ کانتور سرعت خنک‌کننده در خارج از محفظه پرتودهی و همچنین اطراف دو سوخت صفحه‌ای مجاور محفظه پرتودهی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود سرعت خنک‌کننده در کانال بین سوخت‌های صفحه‌ای و محفظه پرتودهی کمتر از سمت دیگر سوخت‌های صفحه‌ای است. در نتیجه، دمای سمتی از سوخت‌های صفحه‌ای که روبه‌روی محفظه پرتودهی قرار دارند، بیشتر از سمت دیگر آنها است ولی با وجود این، همچنان در محدوده ایمن قرار دارند.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که دمای خنک‌کننده درون محفظه پرتودهی در حین عبور از روی سوخت‌های میله‌ای، ۲ درجه افزایش خواهد داشت. شکل ۱۳ کانتور دمای خنک‌کننده در خروجی محفظه پرتودهی را نشان می‌دهد. بنابراین، افزایش دمای خنک‌کننده در محفظه پرتودهی به قدری پایین است که تأثیر به‌سزایی بر دمای خنک‌کننده اطراف محفظه پرتودهی و در نتیجه اثری بر انتقال حرارت از سوخت‌های صفحه‌ای نمی‌گذارد. شکل ۱۴ کانتور دمای خنک‌کننده در خارج از محفظه پرتودهی و در خروجی کانال را نشان می‌دهد.



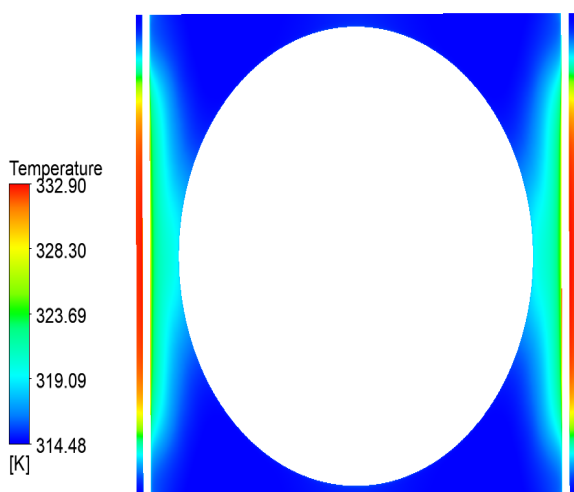
شکل ۱۰. کانتور دما در دو سمت سوخت صفحه‌ای سمت چپ محفظه پرتودهی (الف) سمت محفظه پرتودهی (ب) سمت دیگر آن.



شکل ۹. مقایسه نتایج COBRA-EN و Flouint برای تغییرات دمایی محوری در سطح خارجی غلاف ۳ میله سوخت درون محفظه پرتودهی.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، بیشینه دمای سوخت در دو سوخت صفحه‌ای مجاور محفظه پرتودهی، حدود ۳۷۵٫۹ درجه کلون است که از بیشینه دمای مجاز سوخت در سوخت‌های صفحه‌ای رآکتور تهران (۶۷۳ کلون [۵]) کوچک‌تر است. توزیع دمای غلاف در ۲ سمت سوخت‌های صفحه‌ای مجاور محفظه پرتودهی، در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سمتی از سوخت صفحه‌ای که نزدیک محفظه پرتودهی قرار دارد بیشترین دما را دارد و دمای آن به ۳۷۰ درجه کلون می‌رسد. براساس گزارش ارزیابی ایمنی رآکتور تهران [۵] بیشینه دمای مجاز برای غلاف در سوخت‌های صفحه‌ای به منظور جلوگیری از خوردگی در طی کارکرد عادی



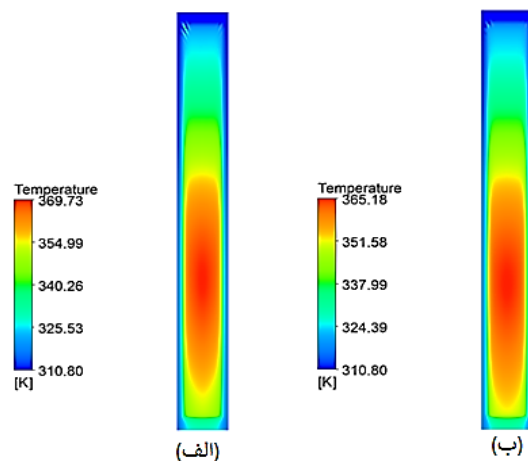


شکل ۱۴. کانتور دمای خنک‌کننده در خارج از محفظه پرتودهی و در خروجی کانال.

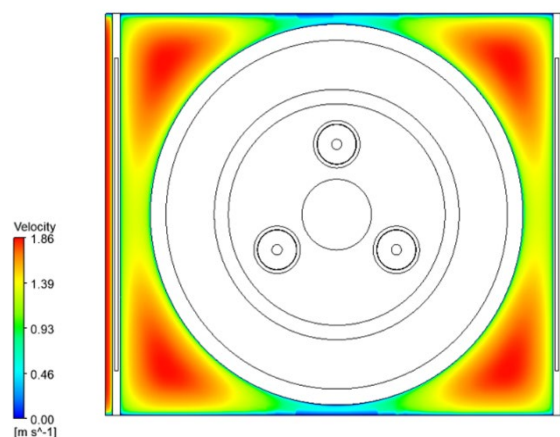
پارامتر MDNBR براساس معادله Mirshak برای سوخت‌های صفحه‌ای مجاور محفظه پرتودهی و با در نظر گرفتن پارامترهای حاصل از شبیه‌سازی، معادل ۱۱/۰۳ به‌دست آمده است. براساس گزارش ارزیابی ایمنی رآکتور تهران [۵] مقدار مجاز این پارامتر برای سوخت‌های رآکتور تهران مقادیر بزرگتر از ۲ است و در نتیجه پارامتر محاسبه شده با حاشیه بسیار خوبی در محدوده ایمن قرار دارد.

#### ۵. نتیجه‌گیری

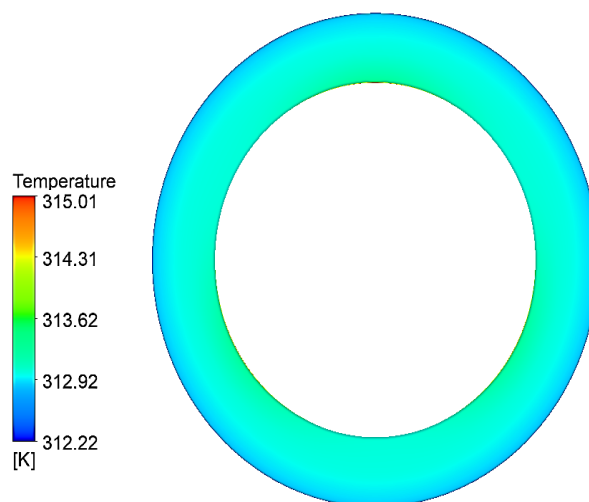
در این پژوهش، اثر بارگذاری محفظه پرتودهی سوخت در کانال دام شار نوترون موجود در موقعیت مرکزی قلب رآکتور تهران، بر برداشت حرارت از سوخت‌های صفحه‌ای رآکتور تهران که در مجاورت محفظه پرتودهی قرار می‌گیرند، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این ارزیابی از نرم‌افزار انسیس فلوئنت با قابلیت شبیه‌سازی هم‌زمان ۳ سوخت میله‌ای داخل محفظه پرتودهی و سوخت‌های صفحه‌ای مجاور محفظه پرتودهی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی در شرایط پایا نشان می‌دهد که بیشینه دمای سوخت در دو صفحه سوخت مجاور محفظه پرتودهی، حدود ۳۷۶ درجه کلوین است که از بیشینه دمای مجاز سوخت رآکتور تهران (۶۷۳ درجه کلوین) کوچکتر است. بیشینه دمای غلاف این دو صفحه سوخت نیز ۳۷۰ درجه کلوین است که از دمای اشباع خنک‌کننده در فشار کاری قلب رآکتور تهران (۳۸۹ درجه کلوین) و نیز بیشینه دمای مجاز برای جلوگیری از خوردگی در غلاف سوخت‌های صفحه‌ای (۳۷۸ درجه کلوین) کمتر است. بنابراین، نه تنها پدیده جوشش



شکل ۱۱. کانتور دما در دو سمت سوخت صفحه‌ای سمت راست محفظه پرتودهی (الف) سمت محفظه پرتودهی (ب) سمت دیگر آن.



شکل ۱۲. کانتور سرعت خنک‌کننده در بیرون محفظه پرتودهی.



شکل ۱۳. کانتور دمای خنک‌کننده در خروجی محفظه پرتودهی.



4. Safaei Arshi S, Jozvaziri A, Mirvakili S.M, Keyvani M. A methodology to enhance thermal neutron flux in Tehran Research Reactor core for domestic fuel test purposes. *Progress in Nuclear Energy*. 2021a;136:103726.
5. AEOI. Final Safety Analysis Report of Tehran Research Reactor. 2018.
6. Safaei Arshi S, Mozafari M.A, Jozvaziri A, Mirvakili S.M. Investigation of safety aspects during steady state operation of Tehran research reactor fuel test loop. *Progress in Nuclear Energy*. 2021b;140:103895.
7. ANSYS, Inc., Release 19.2. *ANSYS Fluent User's Guide*. 2018 August.
8. Basile D, Beghi M, Chierici R, Salina E, Brega E. COBRA-EN, an Upgraded Version of the COBRA3CIMIT Code for Thermal-Hydraulic Transient Analysis of Light Water Reactor Fuel Assemblies and Cores. *Report No. 1010/I*. 1999.
9. Abbate P. TERMIC V 4.1: A Program for the Calculus and Thermal-Hydraulic Design of Research Reactor Cores. *INVAP*. 2003.
10. NUREG/CR-0497. MATPRO-Version 11, A handbook of materials properties for use in the analysis of light water reactor fuel rod behavior. *Idaho National Engineering Laboratory, Department of Energy*. 1979.
11. IAEA. Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data. *VIENNA*. 2008.

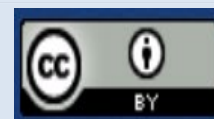
هسته‌ای رخ نخواهد داد بلکه شرایط از نظر جلوگیری از خوردگی غلاف نیز مناسب است. به علاوه، پارامتر MDNBR برای سوخت‌های صفحه‌ای مجاور محفظه پرتودهی نیز با حاشیه بسیار خوبی در محدوده ایمن قرار دارد. در نتیجه، در صورت بارگذاری محفظه پرتودهی سوخت در کانال دام شار نوترون، تمام پارامترهای ایمنی ترموهیدرولیکی در محدوده مجاز قرار خواهند داشت و برداشت حرارت مؤثر از سوخت‌های صفحه‌ای مجاور کانال دام شار نوترون صورت خواهد گرفت.

## مراجع

1. Safaei Arshi S, Khalafi H, Mirvakili S.M. Assessment of safety aspects of first rod-type fuel irradiation at Tehran research reactor, Part I: Neutronic analysis. *Progress in Nuclear Energy*. 2015;79:56-63.
2. Safaei Arshi S, Khalafi H, Mirvakili S.M. Preliminary thermal-hydraulic safety analysis of Tehran research reactor during fuel irradiation experiment. *Progress in Nuclear Energy*. 2015;79:32-39.
3. Safaei Arshi S, Mirvakili S.M, Khalafi H, Ezati A, Tajbakhsh A. Experimental validation of a modified RELAP5 model for transient analysis of Tehran research reactor mixed-core during fuel irradiation experiments. *Progress in Nuclear Energy*. 2017;100:11-21.

## 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

کربلایی، سعیده، استکی، محمدحسین، میروکیلی، سیدمحمد، صفایی عرشی، سعیده. (۱۴۰۴)، ارزیابی ایمنی ترموهیدرولیکی کانال دام شار نوترون رآکتور تحقیقاتی تهران برای انجام آزمون پرتودهی سوخت. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*، ۱۱(۱)، ۵۴-۶۳. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1636>

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1636.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1636.html)

