

تحلیل ایمنی پر توده‌ی مجتمع سوخت آزمایشی HWRR در قلب رآکتور تحقیقاتی تهران با استفاده از تجهیز آزمون مدار باز

ابراهیم عابدی، حسین خلفی، سیدمحمد میروکیلی*

پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران-ایران

*Email: mmirvakili@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۷/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۲/۲۱

چکیده

مجتمع HWRR یک مجتمع سوخت از نوع میله‌ای تجهیز شده می‌باشد که با الگوگیری از طرح مفهومی برجام برای رآکتور اراک ساخته شده است. آزمایش‌های درون قلب این سوخت به منظور ارزیابی پارامترهای نوترونی و ترموهیدرولیکی در قلب رآکتور تحقیقاتی تهران و با استفاده از یک وسیله آزمایشی با عنوان تجهیز آزمون مدار باز انجام می‌گردد. تحلیل ایمنی حوادث محتمل این تجهیز آزمایش یکی از مراحل ضروری پیش از عملیاتی شدن آن می‌باشد. به همین منظور، تحلیل سه حادثه وخیم از حوادث محتمل، شامل دو سناریوی حادثه LOFA و سناریوی خنک‌شوندگی مجتمع با استفاده از جریان طبیعی سیال در زمان خاموشی ناگهانی شبیه‌سازی شده است. محاسبات نوترونی برای تعیین توان میله‌های سوخت با استفاده از کد MCNPX و تحلیل ترموهیدرولیکی به روش CFD انجام شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد در دو سناریوی LOFA با وجود فراتر رفتن دمای سطح غلاف و خنک‌کننده از دمای اشباع و تشکیل بر روی غلاف حباب بخار، دمای سوخت و غلاف با حاشیه ایمنی مناسبی همچنان در بازه معیار طراحی قرار داشته و یکپارچگی سوخت به خوبی حفظ می‌شود. در سناریوی خنک‌شوندگی با استفاده از جریان طبیعی سیال نیز دماها در تمام نقاط کم‌تر از دمای اشباع هستند.

کلیدواژه‌ها: مجتمع سوخت تجهیز شده HWRR، تجهیز آزمون مدار باز، رآکتور تحقیقاتی تهران، تحلیل حادثه LOFA

Safety analysis of HWRR test fuel assembly in Tehran Research Reactor core using open loop test facility

E. Abedi, H. Khalafi, S.M. Mirvakili*

1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14155-1339, Tehran-Iran

Research Article

Received 6.10.2020, Accepted 11.3.2021

Abstract

HWRR element is an instrumented fuel assembly constructed based on JCPOA conceptual design parameters for Arak reactor. The in-core experiments of the fuel are carried out in TRR core to evaluate neutronic and thermal-hydraulic parameters using an experimental facility called Open Loop Test Facility (OLTF). Safety analysis of the OLTF anticipated incidents is one of the necessary steps before its implementation. Therefore, three severe anticipated accident scenarios have been simulated, including two LOFA scenarios and the instant post SCRAM cooling by natural circulation. The neutronic calculation has been carried out by MCNPX code to determine fuel rods power and thermal-hydraulic analysis using CFD method. The analysis results show that the clad surface temperature violates coolant saturation temperature and void will arise in both LOFA scenarios. However, both clad and fuel temperatures keep significant margins to their design criteria and fuel rod integrity would be retained completely. The results also show that the coolant temperature remains lower than saturation temperature in the case of decay heat removing via natural cooling scenario.

Keywords: HWRR instrumented fuel assembly, Open loop test facility, Tehran research reactor, LOFA analysis



۱. مقدمه

فنی مجتمع سوخت HWRR و تجهیز آزمون مدار باز، به تحلیل سه حادثه از حوادث شدید محتمل در حین آزمایش سوخت مذکور در این تجهیز آزمون پرداخته شده و نتایج آن ارائه خواهد گردید.

۲. معرفی مجتمع سوخت آزمایشی HWRR

مجتمع سوخت آزمایشی HWRR یک مجتمع سوخت میله‌ای بومی با چیدمان دایره‌ای و با قطر گام دایره ۴۰ mm است. غنای U-235 برای سوخت این مجتمع، ۳٪ بوده و سوخت آن از نوع اکسید اورانیم با فرمول UO_2 است. مشخصات فنی این مجتمع سوخت در جدول ۱ ارائه شده است [۱۲]. شکل ۱ نشان می‌دهد که این مجتمع سوخت از نظر ابعاد و هندسه به گونه‌ای طراحی شده است تا برای بارگذاری در قلب راکتور تهران مناسب باشد.

این مجتمع سوخت از نوع مجتمع‌های سوخت تجهیز شده^۳ می‌باشد. تعداد ۱۰ عدد ترموکوپل با عایق ضدتشنع (نوع k) به منظور اندازه‌گیری دما در زمان پرتوهدی در نقاط مختلف آن نصب گردیده‌اند. تعداد ۵ عدد ترموکوپل بر روی غلاف یکی از میله‌های سوخت و در ارتفاع‌های مختلف به منظور اندازه‌گیری دمای غلاف سوخت، و تعداد ۵ ترموکوپل دیگر نیز در ارتفاع‌های متناظر با ترموکوپل‌های غلاف بر روی میله مرکزی مجتمع و به منظور اندازه‌گیری دمای خنک‌کننده نصب شده‌اند.

جدول ۱. مشخصات فنی مجتمع سوخت آزمایشی HWRR

نام کامل مجتمع سوخت	Mini-HWRR
تعداد میله های سوخت	۱۲
ارتفاع اکتیو	10 ± 25
قطر قرص سوخت	OD=۷,۵۳ mm - ID=۱,۵ mm
قطر میله سوخت	۹,۱ mm
میزان غنا	۳٪
ارتفاع کل مجتمع	۹۸۰ mm
قطر دایره گام میله ها	۴۰ mm
ترکیب شیمیایی سوخت	UO_2
جنس غلاف	Zr-۱٪Nb
تعداد ترموکوپل نصب شده	۱۰



شکل ۱. مجتمع سوخت آزمایشی HWRR

آزمایش یک سوخت هسته‌ای که برای اولین بار طراحی و ساخته شده است، درون قلب یک راکتور هسته‌ای، یکی از مراحل با اهمیت تکنولوژی تولید و سنجش کیفیت سوخت می‌باشد که می‌تواند اطلاعات خوبی در اختیار سازندگان سوخت و توسعه‌دهندگان راکتورهای جدید قرار دهد [۱]. برای این دسته از آزمایش‌ها، نیاز به یک منبع نوترونی با شار نزدیک به راکتوری است که سوخت می‌بایست در آن مورد بهره‌برداری قرار گیرد. در سراسر دنیا به‌طور معمول از شار نوترونی قلب راکتورهای تحقیقاتی برای آزمایش سوخت‌های جدید استفاده می‌گردد [۲-۳]. بدین‌منظور برخی از راکتورهای تحقیقاتی ویژه آزمایش مواد و سوخت هسته‌ای طراحی و ساخته شده‌اند [۴]. با این حال در بسیاری از کشورها، در راکتورهای تحقیقاتی چندمنظوره نیز یکی از کاربردهای اصلی، آزمایش مواد و سوخت هسته‌ای می‌باشد [۵-۶].

راکتور تهران یک راکتور تحقیقاتی چندمنظوره است که یکی از کاربردهای اصلی آن آزمایش مواد است و به همین دلیل به آن MTR^۱ نیز گفته می‌شود. این راکتور با شار نوترون حرارتی تا حدود 10^{14} n/cm².s قابلیت انجام آزمایش سوخت را نیز داراست [۷]. در سال‌های اخیر و با تولید چند نوع سوخت صفحه‌ای و میله‌ای در داخل کشور، موضوع کاربرد راکتور تهران برای انجام آزمایش‌های پرتوهدی سوخت مطرح گردید و چندین آزمایش نیز در این زمینه انجام شده است [۸-۹]. اما به‌جز اعمال شار نوترونی مناسب برای آزمایش سوخت، نزدیک کردن شرایط هیدرولیکی و حرارتی آزمایش به شرایط بهره‌برداری سوخت در راکتوری که سوخت برای آن طراحی شده است، بسیار مفید بوده و اطلاعات و نتایج کامل تری از عملکرد سوخت را در اختیار می‌گذارد. در همین راستا، برای اولین بار در راکتور تحقیقاتی تهران تجهیزاتی برای آزمایش سوخت طراحی و ساخته شده است که قابلیت ایجاد یک کانال خنک‌کننده مجزا از سایر مجتمع‌های سوخت با قابلیت کنترل و اندازه‌گیری دقیق دبی و فشار را دارا بوده و تجهیز آزمون مدار باز یا OLTF^۲ نام دارد [۱۰].

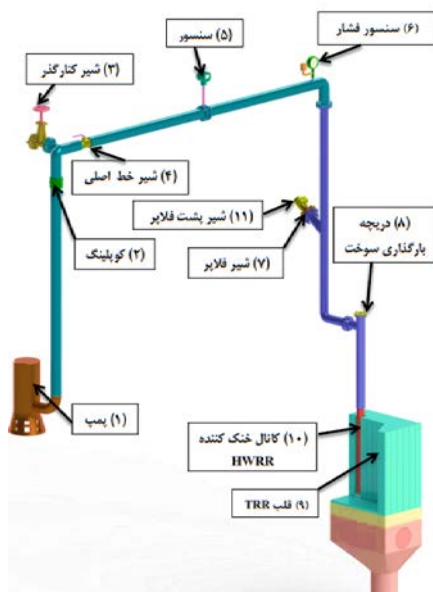
یکی از پروژه‌های در دست اجرا در تجهیز آزمون مدار باز، آزمایش مجتمع سوخت HWRR می‌باشد. این مجتمع سوخت یک مجتمع سوخت میله‌ای و تجهیز شده به ترموکوپل‌های اندازه‌گیری دمای غلاف و دمای سیال می‌باشد که براساس مشخصات فنی ارائه شده در طرح مفهومی برجام برای طراحی جدید راکتور اراک و البته با تفاوت‌هایی به دلیل قابلیت‌ها و امکانات فعلی تولید سوخت در داخل طراحی و ساخته شده است [۱۱]. در این پژوهش پس از معرفی و توصیف مشخصات

1. Material Test Reactor
2. Open Loop Test Facility

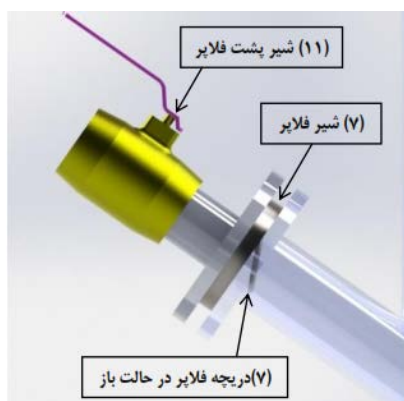


تجهیز خاموش باشد، تیغه‌ی شیر که به صورت آونگی امکان حرکت آزادانه دارد، به دلیل مایل بودن زاویه‌ی نصب و در اثر نیروی وزن خود در حالت باز قرار می‌گیرد. اما زمانی که پمپ شروع به کار کند، به دلیل جریان یافتن سیال و فشار به وجود آمده در داخل لوله، تیغه شیر به سمت بالا حرکت کرده و شیر بسته می‌شود. به این شیر فلاپر تجهیز آزمون گفته می‌شود.

تجهیز آزمون در زمان آزمایش سوخت، مجهز به ۴ سیگنال خاموشی آنی^۳ رآکتور می‌باشد. این سیگنال‌ها عبارتند از (۱) کارکرد پمپ تجهیز، (۲) دبی مدار تجهیز، (۳) دمای خنک‌کننده و (۴) دمای غلاف سوخت. این ۴ سیگنال به سیستم حفاظت رآکتور (RPS)^۴ ارسال شده و در صورت نقض آستانه مجاز از پیش تعریف شده برای هر یک از آن‌ها، سیستم حفاظت، رآکتور را به صورت آنی خاموش خواهد کرد.



شکل ۲. نمایی از طرح و اجزا تجهیز آزمون مدار باز (OLTF) و نحوه نصب در قلب رآکتور تحقیقاتی تهران



شکل ۳. دریچه و شیر فلاپر و شیر پشت فلاپر تجهیز آزمون مدار باز (OLTF) جهت تأمین خنک‌کنندگی زمان خاموشی

۳. معرفی تجهیز آزمون مدار باز

تجهیز آزمایش سوخت با عنوان تجهیز آزمون مدار باز، یک ابزار ویژه جهت تأمین شرایط مورد نیاز انجام آزمایش‌های پرتودهی مجتمع سوخت میله‌ای HWRR می‌باشد که در استخر رآکتور تحقیقاتی تهران نصب شده است. شکل ۲ طرح این تجهیز را به صورت سه‌بعدی نمایش می‌دهد. در این تجهیز از آب استخر رآکتور به عنوان منبع خنک‌کننده استفاده می‌شود. یک پمپ غوطه‌ور (که با شماره ۱ در شکل ۲ مشخص شده است) در داخل استخر قرار گرفته و آب را به داخل یک لوله پمپ می‌کند. این لوله، آب را ابتدا به سمت بالای سطح آب استخر رآکتور هدایت می‌کند. در این نقطه یک شاخه کنارگذر از خط اصلی جدا می‌شود که یک شیر کنترل جریان (۳) روی آن نصب شده است.

بعد از انشعاب کنارگذر، یک شیر ربع‌گرد (۴) نیز بر روی خط اصلی نصب گردیده است. تنظیم دبی خنک‌کننده سوخت HWRR توسط این دو شیر انجام می‌شود. برای در اختیار داشتن مقادیر دقیق دبی خنک‌کننده، یک دبی‌سنج (۵) بعد از شیر تنظیم جریان بر روی خط اصلی نصب شده است. هم‌چنین در ادامه خط اصلی، یک حسگر نیز جهت اندازه‌گیری فشار تجهیز نصب شده است. خط اصلی در ادامه به سمت پایین و به طرف داخل استخر امتداد می‌یابد تا به موقعیت قرارگیری مجتمع سوخت در داخل قلب برسد. لوله‌ی تجهیز آزمون تا انتهای پایینی قلب رآکتور امتداد دارد و در آن‌جا با یک نازل به محفظه پلنیوم زیر قلب اتصال هیدرولیکی دارد. جریان خنک‌کننده بعد از عبور از روی سوخت و برداشت حرارت از طریق یک نازل در انتهای لوله‌ی تجهیز آزمون، وارد پلنیوم خروجی قلب رآکتور شده و از آن‌جا با اختلاط با جریان خنک‌کننده‌ی خروجی سایر سوخت‌های قلب به سمت تانک تأخیری و مبدل حرارتی مدار اولیه رآکتور می‌رود تا پس از خنک‌سازی، به داخل استخر پمپ شود. مدار خنک‌کننده این تجهیز در واقع در داخل مدار خنک‌کننده اولیه رآکتور تعبیه شده است که سیال خنک‌کننده در قسمتی از آن مشترک بوده و در بخشی دیگر مجزا می‌گردد و به همین دلیل تجهیز آزمون «مدار باز» نامیده می‌شود.

با توجه به اینکه لوله‌ی تجهیز آزمون، جریان خنک‌کننده سوخت داخل تجهیز آزمون را از آب استخر جدا می‌نماید، به منظور ایجاد یک مسیر همرفت طبیعی در زمان خاموشی، یک شیر یک‌طرفه آونگی ویفری^۱ (۷) بر روی یک انشعاب از خط اصلی به صورت زاویه‌دار و در عمق ۳ متری از سطح استخر نصب شده است. این شیر که در شکل ۳ نمایش داده شده است، عملکردی خودکار^۲ دارد؛ به طوری که در حالتی که پمپ

3. SCRAM

4. Reactor Protection System

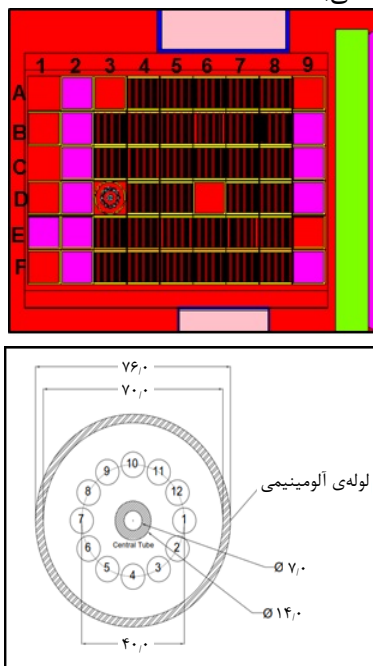
1. Wafer Swing Check Valve

2. Passive



این حالت خنک‌سازی گرمای واپاشی با استفاده از جریان جابجایی طبیعی انجام خواهد شد.

به‌منظور محاسبه دبی تجهیز آزمون در این تحلیل‌ها، شبیه‌سازی هیدرولیکی آن در نرم افزار Pipe Flow Expert [۷] انجام شده است. تمامی اجزای تجهیز شامل لوله‌ها، اتصالات، زانویی‌ها، اجزای ایجادکننده افت فشار مانند شیرها و دبی‌سنج و همچنین مجتمع سوخت مدل شده‌اند. مشخصات پمپ نیز به‌عنوان تأمین‌کننده دبی به نرم‌افزار داده شده است. همچنین طول لوله‌ها و ارتفاع هریک از نقاط ورودی و خروجی نیز با استفاده از مقادیر موجود واقعی مدل شده است. دبی محاسبه شده برای شرایط پایا در کارکرد عادی تجهیز، معادل $22,85 \text{ m}^3/\text{h}$ می‌باشد.



شکل ۴. مدل هندسی شبیه‌سازی شده در کد MCNPX2.6 از قلب رآکتور به‌همراه ابعاد مجتمع سوخت HWRR و تجهیز آزمون بارگذاری شده در موقعیت D3 برای انجام محاسبات نوترونی

جدول ۲. مقادیر محاسبه‌شده برای توان میله‌های ۱۲ گانه مجتمع سوخت آزمایشی HWRR در موقعیت D3 قلب TRR در توان ۵ مگاوات

توان میله (کیلووات)	شماره میله (براساس شماره‌گذاری شکل ۷)
۷,۱۷۲	۱
۷,۱۹۵	۲
۷,۰۱۸	۳
۶,۶۴۱	۴
۶,۴۳۵	۵
۶,۳۶۷	۶
۶,۳۲۹	۷
۶,۳۳۱	۸
۶,۵۴۷	۹
۶,۵۱۹	۱۰
۶,۸۲۱	۱۱
۷,۱۱۲	۱۲

۴. تعیین موقعیت بارگذاری HWRR در قلب و محاسبات حالت پایا

به‌منظور انجام آزمایش سوخت، موقعیتی از قلب مناسب است که از طرفی شار نوترونی مناسبی داشته باشد و از طرف دیگر دسترسی مناسبی برای اتصال لوله ورودی تجهیز آزمون داشته باشد. با انجام محاسبات نوترونی و ارزیابی حالات مختلف و همچنین تحلیل اثرات نوترونی و ترموهیدرولیکی بارگذاری تجهیز آزمون و مجتمع HWRR درون قلب رآکتور، در نهایت موقعیت D3 به‌منظور پرتوهدی انتخاب گردید [۱۱]. محاسبات نوترونی در این پژوهش با استفاده از کد MCNPX2.6 انجام شده است [۱۳].

شکل ۴ هندسه تعریف شده قلب رآکتور را پس از بارگذاری سوخت HWRR در این نرم‌افزار نشان داده است. تعداد سوخت‌های قلب رآکتور در این حالت (به‌جز مجتمع سوخت HWRR)، ۲۸ مجتمع سوخت استاندارد و ۵ مجتمع سوخت کنترلی است [۷].

جدول ۲ مقادیر توان تولیدشده در هر یک از میله‌های مجتمع HWRR را براساس شماره‌گذاری شکل ۴ ارائه می‌دهد. بیش‌ترین توان تولید شده متعلق به میله شماره ۲ بوده و برابر با $7,195 \text{ kW}$ می‌باشد. به‌منظور حصول نتایج محافظه-کارانه در محاسبات ترموهیدرولیکی، توزیع محوری توان میله شماره ۲ برای تمام میله‌های مجتمع در سناریوهای تحلیل شده در بخش‌های بعد استفاده می‌گردد. محاسبات توان در MCNPX با استفاده از تالی F7 انجام شده و توزیع محوری توان به کمک مش تالی^۱ استخراج گردیده است.

۵. تحلیل ایمنی حوادث محتمل برای HWRR

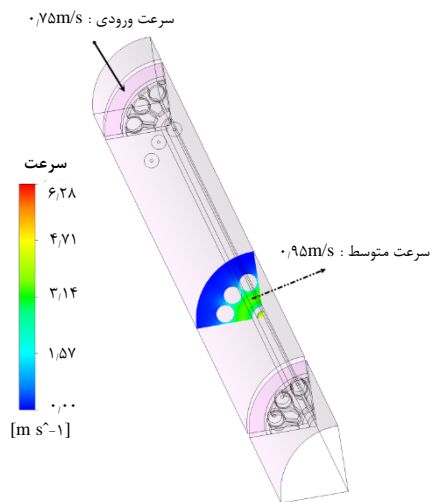
می‌توان گفت با وجود ۴ سیگنال خاموشی آبی شامل دبی، خاموشی پمپ، دمای خنک‌کننده و دمای غلاف در تجهیز آزمون، در صورت هرگونه رخدادی که منجر به از دست رفتن دبی خنک‌کننده یا بالا رفتن دمای غلاف گردد، عمل کردن هر یک از این سیگنال‌های خاموشی آبی رآکتور به سرعت خاموش شده و شرایط تجهیز آزمون و مقادیر دماها از نظر ایمنی در شرایطی کنترل‌شده خواهد بود. در نتیجه بدترین سناریوی حوادث محتمل در این‌جا فعال نشدن هیچ یک از این سیگنال‌ها در صورت بروز حادثه می‌باشد.

سه حادثه برای تحلیل ایمنی این مجموعه در این بخش شبیه‌سازی و نتایج آن ارائه می‌گردد. این سه حادثه جزء حوادث شدید محتمل برای تجهیز آزمون می‌باشند. از این سه حادثه دو سناریو مربوط به حالت‌های مختلف وقوع حادثه LOFA در حالت کارکرد قلب در توان نامی است. علاوه بر این، یک سناریو نیز مربوط به حالت خاموشی آبی رآکتور و قطع هم‌زمان سیستم خنک‌کننده تجهیز آزمون می‌باشد. در

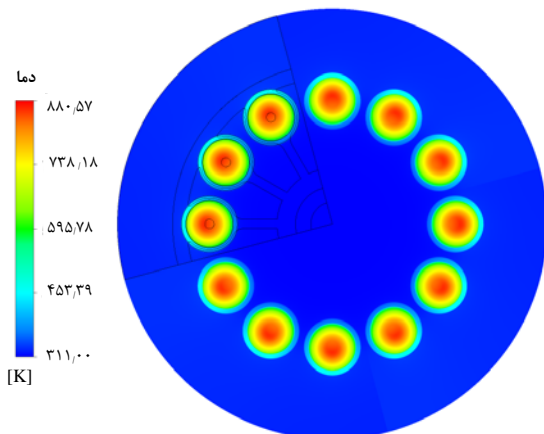
1. Mesh Tally



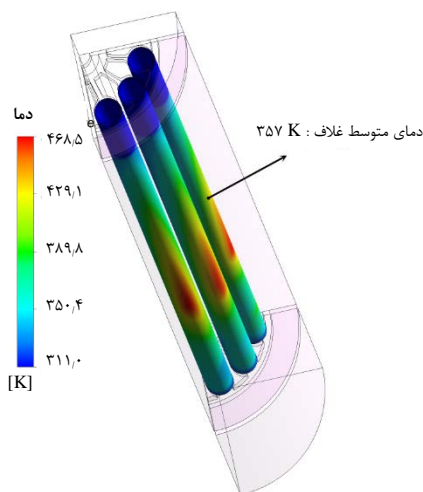
اطمینان داشت که میله سوخت در این حادثه سالم باقی می ماند.



شکل ۵. کانتور توزیع سرعت در مقطع میانی میله‌های سوخت در سناریوی حادثه از دست رفتن پمپ و باز شدن دریچه فلاپر تجهیز آزمون مدار باز



شکل ۶. کانتور توزیع دمای بیشینه در سوخت و خنک‌کننده در سناریوی حادثه از دست رفتن پمپ و باز شدن دریچه فلاپر تجهیز آزمون مدار باز



شکل ۷. کانتور توزیع دمای غلاف سوخت در سناریوی حادثه از دست رفتن پمپ و باز شدن دریچه فلاپر تجهیز آزمون مدار باز

۱.۵ تحلیل حادثه اول

در این سناریو فرض می‌شود که تجهیز آزمون دچار حادثه خرابی و خاموشی پمپ شده و سیگنال خاموشی رآکتور توسط هیچ یک از سیگنال‌های خاموشی آنی تجهیز آزمون صادر نگردد و بنابراین رآکتور با توان ۵ MW به کار خود ادامه دهد. با این فرض بر اساس محاسبات هیدرولیکی مدار تجهیز آزمون، دبی کل گذرنده از مجتمع HWRR معادل $9.5 \text{ m}^3/\text{h}$ می‌باشد که از این مقدار حدود $9.25 \text{ m}^3/\text{h}$ از طریق باز شدن مسیر شیر فلاپر تجهیز شده و در حدود $0.25 \text{ m}^3/\text{h}$ از طریق مسیرهای ورودی تجهیز در بالا، یعنی مسیر ورودی پمپ و مسیر کنارگذر، جریان پیدا می‌کند. این جریان به دلیل هد گرانشی و اختلاف فشار ایجاد شده توسط مکش پلنیوم قلب رآکتور ایجاد می‌گردد.

محاسبات تحلیل ترموهیدرولیکی حادثه با استفاده از نرم افزار ANSYS Fluent 17.2 با در نظر گرفتن شرایط توان میله مطابق با حالت پایا و جریان دبی خنک‌کننده محاسبه شده، انجام گردید [۱۴]. روابط انتخاب شده جهت انجام تحلیل و مقادیر ورودی نرم‌افزار در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج این تحلیل با ارایه کانتورهای سه بعدی در شکل ۵ تا ۷ تشریح شده است. شکل ۵ توزیع سرعت در مجتمع سوخت را نشان می‌دهد که مقدار سرعت متوسط خنک‌کننده در مقطع میله‌ها برابر 0.98 m/s می‌باشد.

شکل ۶ و شکل ۷ نیز به ترتیب توزیع دما در سطح مقطع بیشینه در مجتمع و توزیع محوری دما بر روی سطح غلاف سوخت را به صورت سه بعدی نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشینه دمای سوخت در این حادثه به بیش از 880 K (607°C) می‌رسد. بیشینه دمای غلاف نیز به 468.5 K (195.5°C) می‌رسد که نشان می‌دهد در این حادثه، دمای سیال خنک‌کننده در برخی نقاط روی سطح غلاف به بالای نقطه جوشش رسیده است، در حالی که دمای متوسط توده سیال بسیار پایین‌تر از دمای اشباع در فشار کاری تجهیز آزمون (116°C) می‌باشد. اما با توجه به اینکه این تحلیل در شرایط حادثه بوده و معیار مدنظر در زمان حوادث از عدم جوشش سیال و پارامترهای وابسته به آن مثل DNBR به معیار اطمینان از حفظ یکپارچگی غلاف میله سوخت و عدم آسیب به قرص تغییر می‌یابد [۷]، بنابراین با در نظر گرفتن دماهای ذکر شده و با توجه به اینکه معیار طراحی دمای بیشینه مجاز برای غلاف سوخت مجتمع HWRR در حدود 1200°C و برای قرص سوخت حداقل 1700°C می‌باشد (مطابق با معیار طراحی سوخت [۱۵]). بنابراین می‌توان

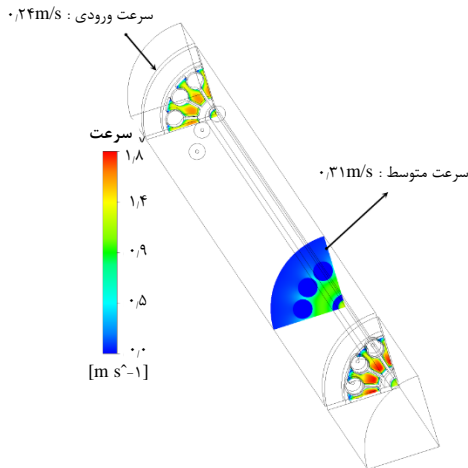
1. Pump Failure

۲. با توجه به یکسان بودن ترکیب شیمیایی و ابعاد قرص سوخت و همچنین غلاف میله سوخت این مجتمع با میله سوخت یک رآکتور VVER (رآکتور بوشهر)، معیار طراحی این سوخت مشابه سوخت یک رآکتور VVER در نظر گرفته شده است.

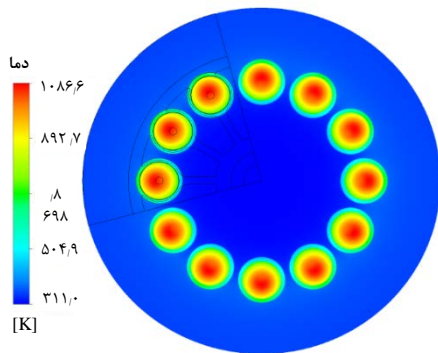


شکل ۸ تا شکل ۱۰ نتایج شبیه‌سازی این سناریو را در قالب کانتورهای سه‌بعدی ارایه کرده است.

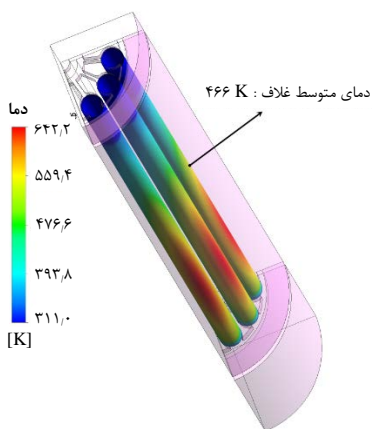
شکل ۸ توزیع سرعت در مجتمع سوخت را نشان می‌دهد. بر این اساس مقدار متوسط سرعت در مقطع میله‌ها برابر 0.31 m/s است. مقدار بیشینه سرعت نیز در قسمت نازل‌های ورودی و خروجی تا 1.8 m/s می‌رسد.



شکل ۸. کانتور توزیع سرعت در مقاطع نازل ورودی، نازل خروجی و میانه میله‌های سوخت در سناریوی حادثه از دست رفتن پمپ و باز نشدن دریچه فلاپر تجهیز آزمون مدار باز



شکل ۹. کانتور توزیع دما در مقطع بیشینه برای سوخت و خنک‌کننده در سناریوی حادثه از دست رفتن پمپ و باز نشدن دریچه فلاپر تجهیز آزمون مدار باز



شکل ۱۰. کانتور توزیع دمای غلاف سوخت در سناریوی حادثه از دست رفتن پمپ و باز نشدن دریچه فلاپر تجهیز آزمون مدار باز

جدول ۳. مقادیر ورودی نرم‌افزار ANSYS Fluent

عنوان	مقدار یا حالت
الگوریتم حل	SIMPLE
مدل گرانیوی	k-ε, Standard
رفتار نزدیک دیواره	Scalable wall function
دمای خنک‌کننده (ورودی)	۳۲۱K
چگالی خنک‌کننده (ورودی)	۹۹۳ kg/m ^۳
هدایت حرارتی خنک‌کننده	۰.۶ W/m-K
هدایت حرارتی گاز (داخل میله)	متغیر با دما(خطی)
چگالی گاز	۰.۰۷۵ kg/m ^۳
چگالی سوخت	۱۰۵۰۰ kg/m ^۳
هدایت حرارتی سوخت	متغیر با دما
هدایت حرارتی غلاف	۱۸.۵ W/m-K

در تکمیل تحلیل این حادثه، لازم است ذکر شود تحلیل صورت گرفته با چشم‌پوشی برخی سازوکارهایی بوده است که در واقعیت متضمن دماهای کم‌تری از دماهای محاسبه شده می‌باشد. نخست این‌که در این تحلیل از تبادل حرارتی بین جداره لوله تجهیز با آب بیرونی آن (آب استخر رآکتور) صرف نظر شده است، در صورتی‌که با بالا رفتن دمای داخلی جداره، دمای متوسط قلب رآکتور که دمای جداره بیرونی با آن برابر است، در حدود 45°C می‌باشد. بنابراین شار حرارتی قابل - توجهی از داخل دیواره به بیرون برقرار خواهد گردید که در خنک‌سازی خنک‌کننده داخل و در نتیجه میله‌های سوخت تأثیر خواهد داشت. نکته دوم در خصوص اثر تشکیل حباب^۱ بر روی سطح غلاف HWRR بر توان رآکتور است که باعث تزریق راکتیویته منفی به قلب و کاهش توان رآکتور خواهد شد که به کاهش توان میله‌های سوخت خواهد انجامید. در نهایت افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی (h) در گذار از ناحیه تک فاز به دو فاز که در این تحلیل در نظر گرفته نشده است، به کاهش بیش‌تر دمای غلاف کمک خواهد کرد. بنابراین می‌توان ادعا نمود محاسبه عددی انجام شده در شرایط کاملاً محافظه‌کارانه انجام شده است.

۲.۵ تحلیل حادثه دوم

در دومین سناریو، همانند سناریوی اول، اتفاق شروع‌کننده حادثه خرابی و توقف پمپ تجهیز آزمون است و تمامی فرض های دیگر سناریوی اول نیز صادق باشند با این تفاوت که در این حادثه شیر فلاپر تجهیز نیز باز نشود. با این فرض براساس محاسبات هیدرولیکی دبی کل گذرنده از مقطع آزمایش HWRR برابر با $2.54 \text{ m}^3/\text{h}$ می‌باشد.

محاسبات تحلیل ترموهیدرولیکی حادثه با استفاده از نرم افزار ANSYS Fluent 17.2 با در نظر گرفتن شرایط توان میله مطابق با حالت پایا و جریان دبی خنک‌کننده محاسبه شده انجام گردید.

1. Void



شکل ۹ و شکل ۱۰ به ترتیب کانتور توزیع دما در کل مقطع مجتمع سوخت (شامل قرص سوخت، غلاف و سیال خنک‌کننده) در مقطع بیشینه دما و توزیع سه‌بعدی دما بر روی غلاف میله سوخت را نشان می‌دهند. مطابق این داده‌ها، بیشینه دمای سوخت یعنی دمای مرکز سوخت در این حادثه بیش از 1086 K (813°C) می‌باشد که نسبت به سناریوی اول با توجه به کاهش نسبی دبی سیال خنک‌کننده در این سناریو محتمل و مورد انتظار است.

بیشینه دمای غلاف نیز در شرایط وقوع این سناریو به 642 K (369°C) می‌رسد که نشان می‌دهد در این حادثه نیز دمای سیال خنک‌کننده در تماس با غلاف به بالای نقطه جوش می‌رسد. اما همان‌گونه که در سناریوی اول نیز مطرح شد، معیار مدنظر در این تحلیل حادثه نیز مانند حادثه اول، اطمینان از حفظ یکپارچگی غلاف میله سوخت و عدم آسیب به قرص سوخت است. این معیارها با وجود فراتر رفتن دما از مقادیر محاسبه شده در سناریوی حادثه اول، کماکان با مقادیر معیار طراحی در نظر گرفته شده برای سوخت و غلاف فاصله قابل توجهی دارد. بنابراین می‌توان اطمینان داشت که میله سوخت در این حادثه نیز سالم (یکپارچه) باقی می‌ماند. علاوه بر این، تمامی شرایط در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی حادثه اول که منجر به یک محاسبه محافظه‌کارانه گردید مانند تبادل حرارتی لوله تجهیز با آب استخر و اثر تولید حباب بر توان رآکتور، در این حادثه نیز برقرار بوده است.

برای تحلیل این شرایط یک مدل CFD آماده شده است. به منظور محاسبه توان میله‌ها از کد ORIGEN2.1 [۱۶] استفاده شده است. نتایج محاسبه این کد نشان می‌دهد توان هر میله در لحظه خاموشی در حدود 350 W می‌باشد که تقریباً معادل 5% توان نامی بیشینه میله‌ها می‌باشد. این توان با فرض کارکرد یک هفته کامل رآکتور با توان 5 MW به دست آمده است. برای سادگی و محافظه‌کارانه‌تر شدن نتایج، این توان با توزیع محوری کسینوسی و با مقدار ثابت در نظر گرفته شده است. در بخش هیدرولیکی نیز دمای آب استخر برابر با 38°C به عنوان ورودی از طریق پلنوم (نازل انتهایی تجهیز) به داخل تجهیز آزمون فرض شده است.

در این مدل نیز همانند مدل‌های CFD تحلیل سناریوهای قبلی از مدل توربولانس $k-\epsilon$ برای سیال استفاده شده است و علاوه بر آن از مدل جابه‌جایی طبیعی Bossinesq و مش‌بندی از نوع Scalable Mesh استفاده شده است. هم‌چنین مرز حرارتی دیواره لوله‌ی تجهیز همسانگرد فرض شده است. بنابراین از تبادل حرارتی بین دیواره لوله با منبع آب استخر نیز صرف‌نظر شده است.

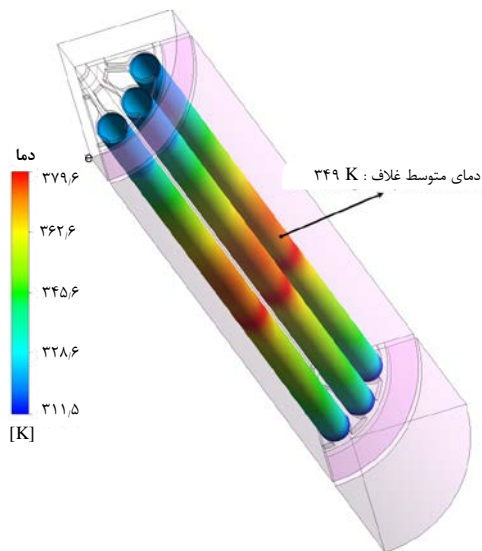
شکل ۱۱ توزیع و مقادیر سرعت سیال در این سناریو را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشینه سرعت به صورت موضعی تا 0.2 m/s نیز در برخی نقاط نازل‌های ورودی و خروجی مجتمع سوخت رسیده است؛ در صورتی که متوسط سرعت در مقطع میله‌ها در حدود 0.05 m/s می‌باشد. در ادامه در شکل ۱۲ توزیع دما در کل دامنه حل شامل میله سوخت و سیال قابل مشاهده است که نشان می‌دهد مقدار بیشینه دما در سوخت در این حالت به 401 K (128°C) می‌رسد.

در نهایت شکل ۱۳ کانتور توزیع دمای غلاف را نشان می‌دهد که مقدار بیشینه‌ای برابر با 379.6 K (106.6°C) به صورت نقطه‌ای خواهد داشت. با وجود بالابودن نسبی دمای بیشینه غلاف، دمای غلاف از دمای اشباع در این شرایط کم‌تر

شکل ۹ و شکل ۱۰ به ترتیب کانتور توزیع دما در کل مقطع مجتمع سوخت (شامل قرص سوخت، غلاف و سیال خنک‌کننده) در مقطع بیشینه دما و توزیع سه‌بعدی دما بر روی غلاف میله سوخت را نشان می‌دهند. مطابق این داده‌ها، بیشینه دمای سوخت یعنی دمای مرکز سوخت در این حادثه بیش از 1086 K (813°C) می‌باشد که نسبت به سناریوی اول با توجه به کاهش نسبی دبی سیال خنک‌کننده در این سناریو محتمل و مورد انتظار است.

۳.۵ تحلیل سناریوی خنک‌کنندگی زمان خاموشی در ادامه تحلیل حوادث، در این بخش سناریوی مربوط به خنک‌شوندگی مجتمع سوخت پس از خاموشی رآکتور در صورت از دست رفتن پمپ تجهیز آزمون تحلیل می‌گردد. از کارکردهای اصلی شیر فلاپر نصب شده بر روی تجهیز آزمون مدار باز در زیر سطح آب استخر رآکتور، برقراری تبادل هیدرولیکی بین آب داخل تجهیز، که با مجتمع سوخت تحت آزمایش در ارتباط است، با آب استخر رآکتور به منظور ایجاد امکان یک جابه‌جایی همرفتی طبیعی و خنک‌سازی گرمای واپاشی مجتمع سوخت در زمان خاموشی ناگهانی و توأم قلب رآکتور و پمپ تجهیز می‌باشد. در شرایط بهره‌برداری طبیعی از تجهیز پس از خاموشی قلب رآکتور، پمپ تجهیز به همراه پمپ مدار اول رآکتور تا زمان مشخصی به کار ادامه خواهند داد تا میزان تولید حرارت واپاشی مجتمع سوخت به حدی برسد که با جابه‌جایی طبیعی به راحتی قابل برداشت و خنک‌سازی باشد. پس از آن با استفاده از برقراری مدار جابه‌جایی طبیعی سیال با باز شدن شیر فلاپر تجهیز آزمون (به همراه باز شدن دریچه





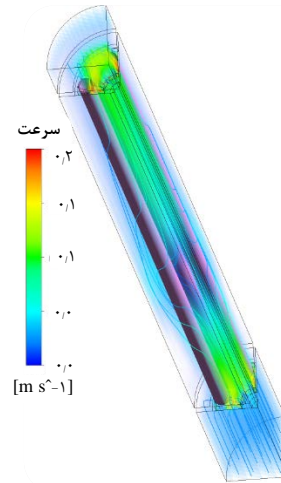
شکل ۱۳. کانتور توزیع دمای غلاف سوخت در سناریوی خنک‌شوندگی پس از خاموشی با جابه‌جایی طبیعی سیال.

۶. نتیجه‌گیری

جدول ۴ نتایج به‌دست آمده برای بیشینه دمای سوخت، غلاف و حاشیه ایمنی هریک را در سه حادثه تحلیل شده نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، می‌توان گفت به‌دلیل ماهیت مدار باز طراحی تجهیز آزمون، در صورت وقوع بدترین حوادث ممکن برای این تجهیز و حتی با فرض خاموش نشدن رآکتور و ادامه کار در توان نامی، این طراحی باعث شده است که در صورت از دست رفتن کامل جریان پمپ تجهیز، مقداری از آب استخر به‌صورت خودکار وارد مدار خنک‌کننده این تجهیز شده و خنک‌کنندگی مجتمع سوخت تحت آزمایش ادامه یابد تا از رسیدن به دماهایی که باعث وارد آمدن صدمه به غلاف سوخت می‌گردد، جلوگیری شود.

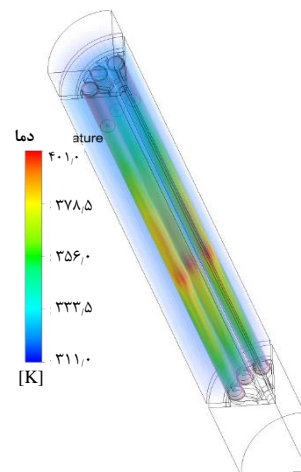
مزیت دوم طراحی مدار باز این تجهیز آزمون در این است که حتی در صورت بروز حوادث و بالا رفتن دما تا مقادیری که باعث جوشش سیال و تولید بخار داخل تجهیز گردد، این تولید بخار باعث بالا رفتن فشار (که خود یک خطر بالقوه می‌باشد) نشده و آب استخر می‌تواند جایگزین آب تبخیر شده در داخل مدار تجهیز شود. از سوی دیگر در صورت باقی ماندن و تجمع بخار درون مدار تجهیز، با توجه به موقعیت قرارگیری بخش آزمون تجهیز در موقعیت‌های داخلی قلب با ارزش راکتیویته بالا و وجود ضریب راکتیویته منفی خلأ در رآکتور، این بخار باعث تزریق راکتیویته منفی به قلب رآکتور شده و توان حرارتی کل قلب را کاهش خواهد داد.

بوده و بنابراین می‌توان ادعا کرد که خنک‌کننده در هیچ نقطه‌ای به دمای اشباع نمی‌رسد. بنابراین با توجه به نتایج تحلیل این سناریو، می‌توان از خنک‌کنندگی کافی مجتمع سوخت در شرایط بعد از خاموشی حتی در صورت خاموشی ناگهانی و هم‌زمان رآکتور و پمپ خنک‌کننده تجهیز مطمئن بود.

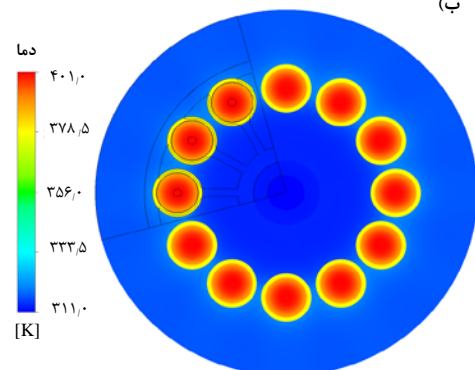


شکل ۱۱. کانتور توزیع سرعت به‌همراه نمایش خطوط جریان در سناریوی خنک‌کنندگی پس از خاموشی با جابه‌جایی طبیعی سیال.

(الف)



(ب)



شکل ۱۲. کانتور توزیع دما در میله‌ها و سیال به‌صورت برش عرضی (الف) و نمایش توزیع دما به‌صورت طولی (ب) در سناریوی خنک‌کنندگی پس از خاموشی با جابه‌جایی طبیعی سیال.



6. S. Ahn et al., *Development of Fuel Test Loop in HANARO, JAEA Conference-2008*, (2008).
7. AEOI, *Final Safety Analysis Report of Tehran Research Reactor*, (2009).
8. S.S. Arshi, H. Khalafi, and M.M. Mirvakili, *Assessment of safety aspects of first rod-type fuel irradiation at Tehran research reactor, Part I: Neutronic analysis*, *Progress in Nuclear Energy* **79**, 56-63 (2015).
9. S.S. Arshi, H. Khalafi, and M.M. Mirvakili, *Preliminary thermal-hydraulic safety analysis of Tehran research reactor during fuel irradiation experiment*, *Progress in Nuclear Energy* **79**, 32-39 (2015).
10. Iran and E3+3, *Joint Comprehensive Plan of Action-JCPOA*, (2015).
11. D. B. Pelowitz, *MCNPX User's Manual, Version 2.6.0*, (2008).
12. Daxesoft Ltd., *PIPE FLOW EXPERT User Guide*, <http://www.pipeflow.co.uk>, (2016).
13. ANSYS, *ANSYS-fluent User's Guide. Release 17.0*, (2016).
14. A. G. Grofft, *A user manual for the ORIGEN2.1 computer code*, *ORNL/TM-7175 Oak Ridge National Laboratory*, (1980).
15. Ministry of Russian Federation of Atomic Energy, *Final Safety Analysis Report (FSAR), BUSHEHR VVER-1000 reactor*, unit 1(2007) Ch. 4.
16. Grofft, A. G., *A user manual for the ORIGEN2.1 computer code*, *Rep. ORNL/TM-7175 Oak Ridge National Laboratory* (1980).

جدول ۴. مقایسه مقادیر بیشینه دمای سوخت و غلاف در سه حادثه و حاشیه‌های ایمنی آن‌ها.

شماره حادثه	دمای بیشینه غلاف (K)	حاشیه ایمنی دمای غلاف	دمای بیشینه سوخت (K)	حاشیه ایمنی دمای سوخت
حادثه اول	۴۶۸.۵	۳.۱۴	۸۸۰	۲.۲۴
حادثه دوم	۶۴۲	۲.۲۹	۱۰۸۶	۱.۸۱
حادثه سوم	۳۷۹.۶	۳.۸۷	۴۰۱	۴.۹۲

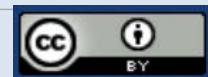
بنابراین می‌توان گفت این تجهیز از یک ایمنی ذاتی و سازوکار منفعل برخوردار بوده و این ایمنی در کنار استفاده از سوخت میله‌ای با غلاف از جنس زیرکونیم (که معیار بهره برداری دمایی بسیار بالاتری نسبت به سوخت استاندارد خود قلب رآکتور دارد) و همچنین مجهز بودن این تجهیز به انواع سیگنال‌های ایمنی شامل دبی، فشار و دمای سوخت و غلاف می‌تواند ایمنی بالایی را جهت انجام آزمایش‌های پرتودهی در اختیار بهره‌بردار قرار دهد.

مراجع

1. N. F. Harrison, *AECL'S Experimental Fuel and Materials Test Loops in NRU, IAEA-TECDOC-CD-1726, International Atomic Energy Agency* (2013) 123-131.
2. B.G. Kim, J. M. Sohn, K.N. Choo, *Development Status of Irradiation Devices and Instrumentation for Material and Nuclear Fuel Irradiation Tests in HANARO, Nuclear Engineering and Technology*, **42** (2009) 203-210.
3. W. Wiesenack, T. Tverberg, *The OECD Halden reactor project fuels testing programme: methods, selected results and plans, Nuclear Engineering and Design*, **207** (2001) 189-197.
4. M. Ishihara, and et al., *Current Status Of Jmtr. 6th International Symposium on Material Testing Reactors, Bariloche, Río Negro, Argentina* (2013) 28-31.
5. M.A. Fütterer, and et al., *Next generation fuel irradiation capability in the High Flux Reactor Petten. Journal of Nuclear Materials*, **392** (2009) 184-191.

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

ابراهیم عابدی، حسین خلفی، سیدمحمد میروکیلی (۱۴۰۰)، تحلیل ایمنی پرتودهی مجتمع سوخت آزمایشی HWRR در قلب رآکتور تحقیقاتی تهران با استفاده از تجهیز آزمون مدار باز، ۹۷، ۸۹-۹۷

DOI: 10.24200/nst.2021.1300

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1300.html

