



ارزیابی ایمنی لوپ تست سوخت رآکتور تحقیقاتی تهران در طی حادثه از دست رفتن جریان خنک‌کننده

سعیده صفائی عرشی^{*}، مسعود امین مظفری، سید محمد میروکیلی

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

*Email: ssafaei@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱/۲۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۵/۶

چکیده

لوپ تست سوخت رآکتور تحقیقاتی تهران به منظور ارتقاء کاربری‌های رآکتور تحقیقاتی تهران در زمینه‌ی تست سوخت و مواد هسته‌ای و با توجه به پتانسیل موجود در این رآکتور برای ایجاد شرایط نوترونی و ترموهیدرولیکی مناسب جهت انجام تست‌های پرتودهی بر روی نمونه میله‌های سوخت تولید داخل، طراحی و ساخته شده است. این لوپ با فشار نامی ۱۰ بار و دبی حجمی نامی $20 \text{ m}^3/\text{h}$ به منظور شبیه‌سازی شرایط ترموهیدرولیکی قلب رآکتوری که سوخت در آن مورد بهره‌برداری قرار خواهد گرفت، طراحی شده است. در این پژوهش، یک ارزیابی ایمنی برای بررسی عواقب حادثه از دست رفتن جریان خنک‌کننده به دنبال بروز نقص در پمپ مدار خنک‌کننده اصلی لوپ تست سوخت انجام و عملکرد سیستم‌های ایمنی لوپ برای تأمین پایدار خنک‌کنندگی سوخت‌های تحت تست در زمان وقوع این حادثه و نیز به حداقل رساندن عواقب نامطلوب حادثه ارزیابی شده است. در این راستا، سناریوهای محتمل توسط کد RELAP5 شبیه‌سازی و توانایی تجهیزات ایمنی لوپ برای جلوگیری از بروز هرگونه آسیب به میله‌های سوخت تحت تست، ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد سیستم‌های ایمنی لوپ می‌توانند شرایط ایمن در طی حادثه را فراهم نمایند به نحوی که دمای سوخت و غلاف نمونه‌های تحت تست در طی حادثه در محدوده مجاز باقی بمانند.

کلیدواژه‌ها: رآکتور تحقیقاتی تهران، لوپ تست سوخت، ارزیابی ایمنی، حادثه از دست رفتن جریان خنک‌کننده

Safety assessment of Tehran Research Reactor fuel test loop during loss of flow accident

S. Safaei Arshi*, M. Amin Mozafari, S.M. Mirvakili

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

Research Article

Received 13.4.2021, Accepted 28.7.2021

Abstract

In order to enhance applicability of Tehran Research Reactor (TRR) for irradiation test of nuclear fuels and materials and considering TRR potential to provide required neutronic and thermal-hydraulic conditions for irradiation tests on domestic nuclear fuel samples, TRR fuel test loop is designed and fabricated. This test loop with 10 bar nominal pressure and $20 \text{ m}^3/\text{h}$ nominal volumetric flow rate is designed to simulate thermal-hydraulic conditions of the reactor core in which, the fuels will be used. In this research, safety assessment of the consequences of loss of flow accident in the fuel test loop due to primary pump breakdown is performed and the functions of safety systems to provide continuous cooling for the test fuel samples and also to mitigate any undesirable consequences of this accident are evaluated. In this regard, the probable scenarios are simulated using a RELAP5 model and the ability of the safety features of the loop to prevent any damage to the test fuel rods is evaluated. The results reveal that safety systems of test loop can provide safe condition during the accident in which the meat and clad temperatures of test fuels remain within the permissible limits.

Keywords: Tehran Research Reactor, Fuel test loop, Safety assessment, Loss of flow accident

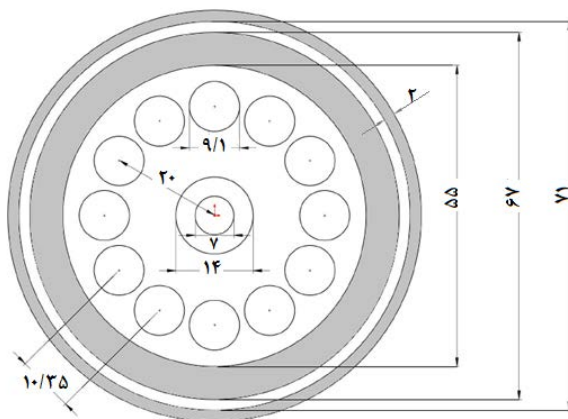


۱. مقدمه

راکتور تهران قرار گرفته‌اند. دو جزء اصلی این بخش عبارتند از: (۱) یک کپسول پرتودهی که نمونه سوخت‌های تحت تست را در خود جای داده است و در یکی از موقعیت‌های پرتودهی داخل قلب راکتور بارگذاری می‌شود. این کپسول پرتودهی بر اساس ابعاد و تعداد نمونه سوخت‌های در نظر گرفته شده برای تست و نیز مکان مورد نظر برای بارگذاری درون قلب، طراحی می‌شود. در این پژوهش، فرض شده است کپسول پرتودهی حاوی یک مجتمع تست دارای ۱۲ میله سوخت UO_2 با غنای 3.22% و غلاف زیرکونیم و 1% نیوبیوم^۶ است. مشخصات اصلی سوخت‌های تحت تست درون کپسول پرتودهی در جدول ۱ ارائه شده است. مقطع عرضی کپسول پرتودهی نیز در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این پژوهش فشار 3.3 bar ، دبی حجمی $12 \text{ m}^3/\text{h}$ و دمای ورودی 321 K به عنوان شرایط عملیاتی و بهره‌برداری خنک‌کننده درون کپسول پرتودهی در شرایط کارکرد پایدار در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. مشخصات اصلی میله‌های سوخت تحت تست درون کپسول پرتودهی

پارامتر	مقدار
قطر حفره داخلی سوخت	۱.۵ mm
قطر خارجی سوخت	۷.۵۷ mm
ارتفاع فعال سوخت	۶۱۵ mm
قطر داخلی غلاف	۷.۷۳ mm
قطر خارجی غلاف	۹.۱ mm
ارتفاع میله سوخت	۷۳۳ mm
فشار هلیوم	۰.۵ bar



شکل ۱. مقطع عرضی کپسول پرتودهی حاوی مجتمع تست دارای ۱۲ میله سوخت (ابعاد برحسب میلی‌متر).

لوپ‌های تست سوخت به علت قابلیت شبیه‌سازی شرایط نوترونی و ترموهیدرولیکی قلب یک راکتور هسته‌ای به منظور بررسی ویژگی‌های ساختاری و عملکردی سوخت‌های هسته‌ای تحت شرایط مشابه قلب و قبل از بهره‌برداری عملیاتی از سوخت در قلب راکتور، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. از این‌رو، بسیاری از راکتورهای تحقیقاتی در نقاط مختلف دنیا به لوپ‌های تست سوخت مجهز شده‌اند. به عنوان نمونه، راکتورهای هانارو^۱ [۱] در کره جنوبی و هالدن^۲ [۲] در نروژ مجهز به لوپ‌های پیشرفته‌ای برای تست سوخت و مواد هستند. مقالات و گزارشات متعددی در خصوص امکان‌سنجی، طراحی و نصب این لوپ‌ها، تحلیل حوادث مختلف محتمل در آن‌ها و نیز فعالیت‌های انجام گرفته در آن‌ها ارائه شده است [۳-۵].

راکتور تحقیقاتی تهران یک راکتور ۵ مگاوات استخری با میانگین شار نوترون حرارتی حدود $3 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ است [۶] که به دلیل هندسه قلب و میزان مناسب شار نوترون، پتانسیل ایجاد شرایط مناسب جهت انجام آزمایشات در حین پرتودهی بر روی سوخت راکتورهای تحقیقاتی را دارا است. به منظور بهره‌برداری از این پتانسیل و در راستای ایجاد شرایط نوترونی و ترموهیدرولیکی مناسب جهت تست نمونه میله‌های سوخت در معرض شار نوترون و در شرایط نوترونی و ترموهیدرولیکی مشابه شرایطی که میله سوخت در قلب راکتور اصلی با آن مواجه خواهد بود، لوپ تست سوخت راکتور تحقیقاتی تهران با فشار نامی ۱۰ بار و دبی حجمی نامی $20 \text{ m}^3/\text{h}$ طراحی و ساخته شده است. به منظور ارزیابی عملکرد سیستم‌های ایمنی طراحی شده برای لوپ تست سوخت راکتور تحقیقاتی تهران در طی حوادث و وقایع محتمل در زمان کارکرد، تحلیل جامعی از ایمنی لوپ در حوادث محتمل انجام شده است. در این مقاله، عواقب حادثه از دست رفتن جریان خنک‌کننده^۳ به دنبال بروز نقص در پمپ مدار خنک‌کننده اصلی لوپ تست سوخت، بررسی شده و عملکرد سیستم‌های ایمنی لوپ در پاسخ به این حادثه برای تأمین پایدار خنک‌کنندگی سوخت‌های تحت تست و نیز به حداقل رساندن عواقب نامطلوب این حادثه ارزیابی شده است. به طور کلی، لوپ تست سوخت راکتور تحقیقاتی تهران از دو بخش کلی تحت عناوین IPS^4 و OPS^5 تشکیل شده است. بخش IPS شامل تمامی اجزاء لوپ است که داخل قلب و استخر

1. HANARO
2. HALDEN
3. Loss of Flow Accident (LOFA)
4. In-Pile Section
5. Out-Pile Section



مخزن تخلیه در صورت افزایش فشار مدار اول نیز عمل می‌کنند. در مواردی که تخلیه به مخزن‌های ذخیره برای تعدیل فشار لوپ کافی نباشد شیرهای تخلیه اضطراری به تانک پسماند باز خواهند شد و تخلیه به تانک پسماند انجام خواهد شد [۷].

۲. روش انجام پژوهش

در این پژوهش، شبیه‌سازی سناریوهای محتمل در حادثه از دست‌رفتن جریان خنک‌کننده در لوپ تست سوخت و ارزیابی توانایی تجهیزات ایمنی لوپ برای جلوگیری از بروز هرگونه آسیب به سوخت تحت تست در طی این حادثه، با استفاده از کد RELAP5/Mod3.2 [۸] انجام شده است. بدین منظور، در ابتدا فرایند گره‌بندی^۵ بر اساس مدارک طراحی لوپ تست سوخت [۷، ۹] انجام و تمامی اجزاء تشکیل‌دهنده سیستم خنک‌کننده لوپ در قالب عناصر تعریف شده برای کد شامل انشعاب، لوله، ساختارهای گرمایی^۶، شیر، پمپ، حجم وابسته به زمان و غیره، مدل‌سازی شده‌اند. اتصال بین این عناصر نیز برحسب شرایط، در قالب اتصال منفرد^۷، اتصال وابسته به زمان^۸ و یا اتصال چندگانه^۹ معرفی شده است. شکل ۲ گره‌بندی سیستم خنک‌کننده اولیه لوپ تست سوخت و سیستم‌های ایمنی مرتبط با آن (سیستم خنک‌کننده اضطراری و سیستم تخلیه اضطراری) که برای مدل‌سازی حادثه از دست‌رفتن جریان خنک‌کننده مورد استفاده قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد.

در شرایط کارکرد عادی لوپ تست سوخت، پمپ مدار خنک‌کننده اولیه، آهنگ جریان مورد نیاز برای برداشت حرارت تولید شده در کپسول حاوی سوخت تحت تست (که در این مقاله به اختصار IPS نامیده شده است) را فراهم می‌کند. در این مقاله، عواقب قطع شدن جریان خنک‌کننده ناشی از قطع شدن پمپ و نحوه عملکرد سیستم‌های ایمنی در پاسخ به این حادثه و چگونگی خنک‌سازی IPS پس از این حادثه بررسی شده است. به منظور حصول اطمینان از وجود خنک‌کنندگی کافی برای سوخت‌های تحت تست درون کپسول، بیشینه دمای سوخت، غلاف و خنک‌کننده داخل کپسول پرتودهی مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۲ معیارهای ایمنی ترموهیدرولیکی برای سوخت‌های تحت تست و خنک‌کننده درون کپسول پرتودهی آورده شده است. دمای ذوب سوخت و غلاف به عنوان بیشینه دمای مجاز برای سوخت و غلاف و دمای اشباع آب در فشار ۳/۳ bar داخل کپسول به عنوان بیشینه دمای مجاز خنک‌کننده در نظر گرفته شده است.

۲) یک تانک تأخیری برای ایجاد تأخیر زمانی مناسب بین خروج آب از کپسول پرتودهی و ورود آن به بخشی از لوپ تست سوخت که بیرون از استخر رآکتور قرار دارد. از آن‌جا که عبور خنک‌کننده از روی میله‌های سوخت داخل کپسول باعث تولید ^{16}N و در نتیجه گسیل پرتوهای گاما پر انرژی می‌شود، ایجاد تأخیر زمانی مناسب توسط یک تانک تأخیری برای کاهش دز گاما در اطراف لوله‌های بخش OPS لوپ تست سوخت که خارج از استخر رآکتور قرار دارند ضروری است.

بخش OPS لوپ، تمام سیستم‌ها و تجهیزاتی را شامل می‌شود که خارج از استخر رآکتور نصب شده‌اند و برای ایجاد شرایط ترموهیدرولیکی مورد نظر در لوپ و تأمین عملکرد ایمن لوپ طراحی شده‌اند. سیستم خنک‌کننده اولیه و ثانویه، سیستم خنک‌کننده اضطراری، سیستم تخلیه اضطراری و یک سیستم تصفیه یونی اجزاء بخش OPS لوپ هستند. دو پمپ، یک مبدل حرارتی، یک گرم‌کن الکتریکی و یک فشارنده^۱، اجزاء اصلی سیستم خنک‌کننده لوپ تست سوخت رآکتور تحقیقاتی تهران را تشکیل می‌دهند. در خط لوله خنک‌کننده، یک مسیر بای‌پس بین خروجی پمپ و ورودی مبدل حرارتی برای کنترل آهنگ عبور خنک‌کننده از کپسول پرتودهی در نظر گرفته شده است و تنظیم آهنگ عبور خنک‌کننده به وسیله دو شیر کنترلی نصب شده روی خط لوله اصلی و مسیر بای‌پس انجام می‌شود.

سیستم خنک‌کننده اضطراری، متشکل از دو مخزن ذخیره^۲ مجزا است که یکی به خط لوله سرد^۳ و دیگری به خط لوله گرم^۴ متصل است. حدود ۸۰ درصد از کل حجم هریک از این دو مخزن با آب پر شده و فضای بالای آن حاوی نیتروژن تحت فشار است. در شرایط در نظر گرفته شده در این پژوهش که در آن فشار کاری کپسول پرتودهی حدود ۳/۳ bar است، فشار دو مخزن ذخیره روی ۲/۵ bar تنظیم می‌شود. بر اساس منطق کنترلی تست لوپ، چنان‌چه فشار در خط لوله ورودی به کپسول پرتودهی به کم‌تر از ۲/۳ bar افت کند شیرهای تزریق از مخزن ذخیره شماره ۲ باز شده و خنک‌کننده از مخزن شماره ۲ به سمت کپسول پرتودهی جریان می‌یابد. در مسیر خط لوله خروجی از کپسول پرتودهی نیز در صورت افت فشار به کم‌تر از ۲/۳ bar تزریق از مخزن شماره ۱ آغاز می‌شود. باز بودن شیرهای تزریق از مخزن‌های ۱ و ۲ تا زمانی ادامه می‌یابد که فشار به حد مجاز بازگردد یا سطح سیال درون مخزن به حداقل مقدار مجاز (۰/۵ m) برسد. حداقل مقدار مجاز سیال درون مخزن‌ها، به نحوی تعیین شده است که از ورود نیتروژن به مدار خنک‌کننده لوپ جلوگیری شود. دو مخزن ذخیره به عنوان

5. Nodalization

6. Heat Structure

7. Single Junction

8. Time Dependent Junction

9. Multiple Junction

Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 102, No 1, 2023, P 50-58

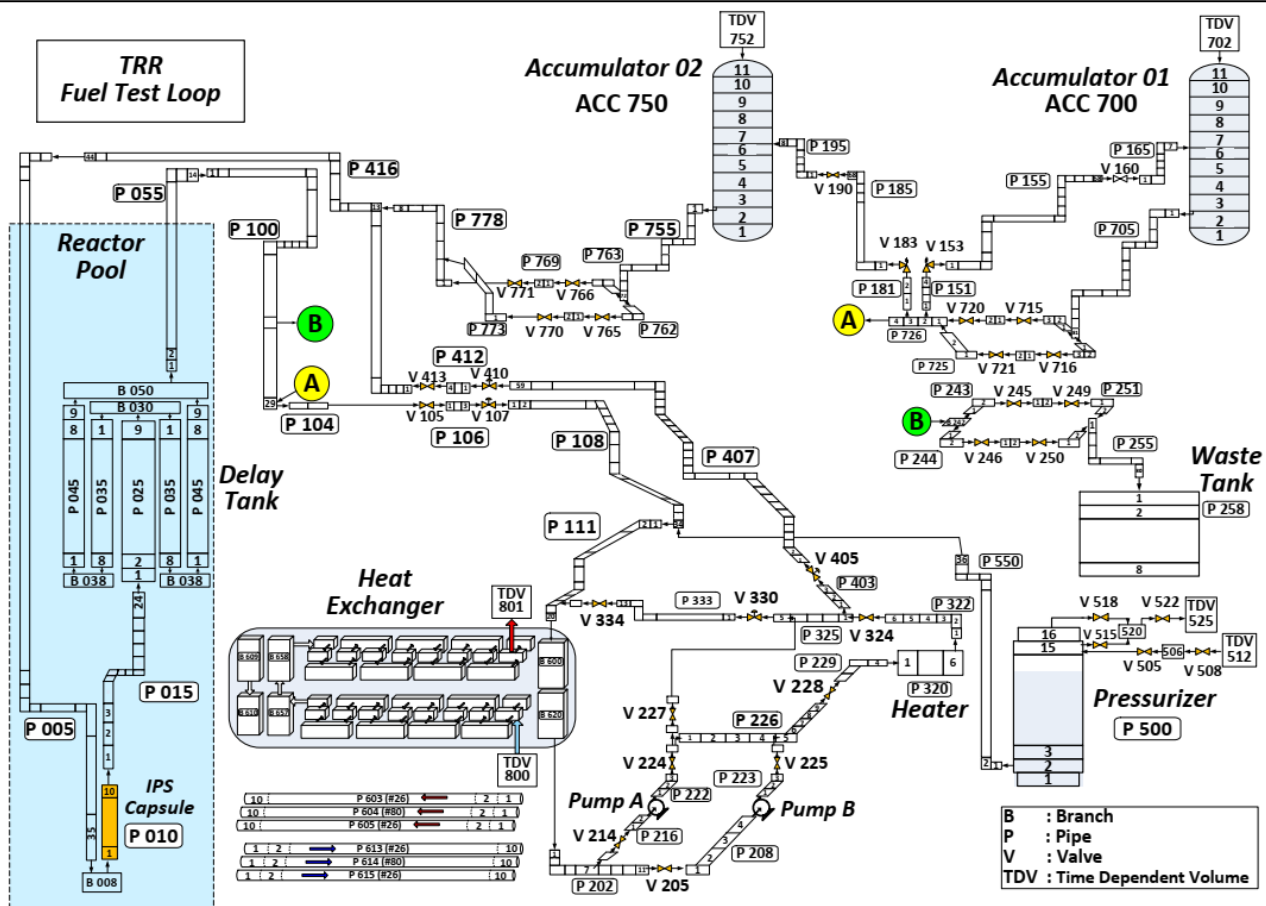
1. Pressurizer (PRZ)

2. Accumulator

3. Cold Leg

4. Hot Leg





شکل ۲. گره بندی لوپ تست سوخت رآکتور تهران برای مدل سازی توسط کد RELAP۵.

نیز برای باز شدن شیرهای موجود در مسیر بای پس پمپ ارسال نماید.

سناریو ۲: فرض شده است پس از بروز حادثه مسیر بای پس پمپ بسته باشد.

سناریو ۳: فرض شده است مشابه سناریو ۱، به دنبال از کار افتادن پمپ و خاموش شدن اضطراری رآکتور، شیرهای موجود در مسیر بای پس پمپ باز شوند ولی در این سناریو به دلیل بروز یک نقص فنی نظیر بروز شکستگی در خط لوله تزریق از دو مخزن ذخیره و یا بروز نقص در شیرهای مسیر تزریق از مخزن‌ها و در نتیجه باز نشدن آن‌ها، هیچ‌گونه تزریقی از مخزن‌های ذخیره به مدار انجام نشود.

برای مدل سازی پمپ تست لوپ، داده‌های مورد نیاز در ورودی کد شامل سرعت، دبی، هد^۱ و گشتاور پمپ بر اساس مشخصات در دسترس از پمپ تست لوپ در کد اعمال شده‌اند ولی به علت در دسترس نبودن اطلاعات کافی برای تولید منحنی‌های مشخصه‌ی پمپ، از مدل‌های پمپ موجود در کد RELAP۵ برای این منظور استفاده شده است.

جدول ۲. معیارهای ایمنی ترموهیدرولیکی برای سوخت‌های تحت تست و خنک کننده درون کپسول پرتوده‌ی

مقدار مجاز	پارامتر
$136^{\circ}\text{C} >$	دمای خنک کننده
$[10] 2850^{\circ}\text{C} >$	دمای سوخت
$[10] 1837^{\circ}\text{C} >$	دمای غلاف

به منظور در نظر گرفتن محافظه کارانه ترین شرایط، فرض شده است جریان برق پمپ A مدار خنک کننده اولیه (شکل ۲) قطع شده و بلافاصله پمپ A به طور کامل از کار بیفتد. در نتیجه، کاهش تدریجی دبی نیز در نظر گرفته نشده است. به علاوه، پمپ رزرو B نیز وارد عمل نشود. از کار افتادن پمپ سیگنالی برای خاموش کردن اضطراری رآکتور ارسال می کند و رآکتور خاموش می شود. به منظور بررسی تمامی شرایط محتمل در صورت بروز این حادثه، سه سناریو زیر شبیه سازی و تحلیل شده‌اند:

سناریو ۱: فرض شده است از کار افتادن پمپ علاوه بر ارسال سیگنال برای خاموش کردن اضطراری رآکتور، سیگنالی



۳. نتایج و بحث پیرامون آن‌ها

۱.۳ سناریو ۱

در این سناریو فرض شده است لوپ تا لحظه ۱۰۰۰ s در شرایط کارکرد پایدار قرار داشته است. در لحظه ۱۰۰۰ s ناگهان برق پمپ A قطع شده است. در اثر از کار افتادن پمپ و ارسال سیگنال خاموشی اضطراری راکتور، راکتور خاموش شده و مسیر بای‌پس پمپ (شیرهای شماره ۳۳۰ و ۳۳۴ در شکل ۲) نیز باز شده است. افت جریان خنک‌کننده در مسیر خط لوله سرد باعث افت فشار در این خط لوله می‌شود. همان‌طور که قبلاً نیز به آن اشاره شد، بر اساس منطق کنترلی حاکم بر تست لوپ، رسیدن فشار این خط لوله به کم‌تر از ۲/۳ bar باعث باز شدن شیرهای تزریق از مخزن ذخیره شماره ۲ (شیرهای شماره ۷۶۵، ۷۶۶، ۷۷۰ و ۷۷۱) و جریان یافتن خنک‌کننده از مخزن شماره ۲ به سمت IPS می‌شود. در مسیر خط لوله گرم نیز با رسیدن فشار به کم‌تر از ۲/۳ bar تزریق از مخزن شماره ۱ آغاز می‌شود. مجموع خنک‌کننده تزریق شده از مخزن‌ها وارد فشارنده می‌شود. به منظور جلوگیری از ورود گاز نیتروژن به درون لوپ، شیرهای تزریق از مخزن‌های ذخیره با رسیدن ارتفاع آب درون مخزن به کم‌تر از ۰/۵ m بسته می‌شوند. در نتیجه، جریان یافتن خنک‌کننده از مخزن‌های ذخیره به سمت فشارنده تا رسیدن سطح آب درون مخزن‌ها به کمینه مقدار مجاز ادامه می‌یابد. پس از اتمام تزریق از مخزن ذخیره، جریان از لوله ۱۰۸ به سمت فشارنده متوقف می‌شود و خنک‌کننده از طریق لوله ۱۱۱ و سپس مسیر بای‌پس پمپ به سمت مسیر خط لوله سرد رفته و مجدداً وارد IPS می‌شود. بدین‌ترتیب یک جریان مثبت کوچک ناشی از گردش طبیعی در یک مسیر بسته تا مدت زمان طولانی پس از قطع شدن پمپ و خاموشی راکتور در مدار برقرار می‌ماند که با توجه به کاهش قابل توجه گرمای واپاشی در زمان‌های طولانی، برای برداشت حرارت از IPS کافی است.

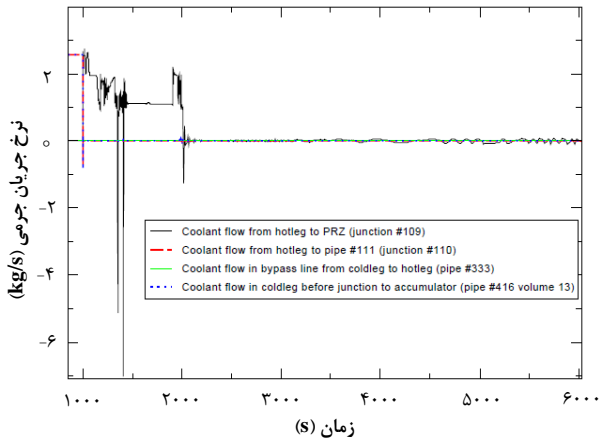
۲.۳ سناریو ۲

در این سناریو شرایط مشابه حالت قبل است با این تفاوت که فرض شده است در اثر از کار افتادن پمپ، راکتور خاموش شده ولی مسیر بای‌پس پمپ بسته باشد. در این حالت، مسیر بسته‌ای برای جریان خنک‌کننده وجود ندارد و پس از توقف تزریق از مخزن‌های ذخیره، جریان خنک‌کننده در لوپ تقریباً متوقف می‌شود که باعث می‌شود دمای خنک‌کننده درون IPS به دمای اشباع برسد و درون IPS بخار تشکیل شود. در شکل‌های ۳ تا ۸، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی سناریو ۱ و ۲ با هم مقایسه شده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی

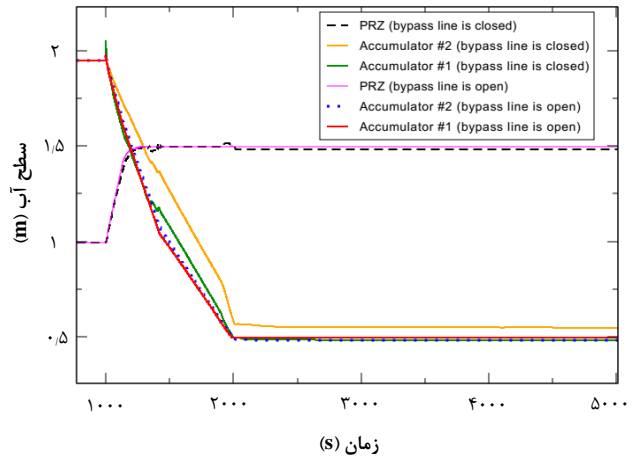
حادثه، در هر دو سناریو، به دنبال افت جریان خنک‌کننده در مسیر خط لوله سرد در اثر از کار افتادن پمپ و در نتیجه افت فشار در این خط لوله به کم‌تر از ۲/۳ bar تزریق از مخزن شماره ۲ و در اثر افت فشار در مسیر خط لوله گرم تزریق از مخزن شماره ۱ انجام می‌شود. مجموع آب تزریق شده به مدار به فشارنده وارد می‌شود. در نتیجه سطح آب درون مخزن‌های ذخیره کاهش و سطح آب فشارنده افزایش می‌یابد تا جایی که کل حجم فشارنده پر شده و مابقی آب تزریق شده به مخزن مجاور فشارنده سرریز می‌شود. در شکل ۳ تغییرات ارتفاع آب موجود در مخزن‌ها و فشارنده پس از قطع شدن پمپ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در هر دو سناریو، در مدت زمان بسیار کوتاهی پس از آغاز حادثه ابتدا تزریق از مخزن شماره ۲ و سپس تزریق از مخزن شماره ۱ آغاز می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در هر دو حالت، بلافاصله پس از آغاز حادثه، جریان خنک‌کننده عبوری از IPS به شدت افت می‌کند ولی پس از آغاز تزریق از مخزن‌ها تا حدودی ثابت می‌ماند. پس از اتمام تزریق آب از مخزن‌ها، مجدداً جریان خنک‌کننده عبوری از IPS کمی افت کرده و سپس تا مدت زمان طولانی پس از شروع حادثه تقریباً ثابت می‌ماند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، باز بودن مسیر بای‌پس باعث ایجاد یک مسیر بسته و در نتیجه حفظ یک جریان کوچک و مثبت با آهنگ حدود ۰/۰۵ kg/s در IPS می‌شود که نقش بسیار مهمی در برداشت حرارت از IPS دارد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در حالتی که مسیر بای‌پس بسته باشد، ارتفاع آب درون مخزن ۲ به حداقل مقدار مجاز (۰/۵ m) نرسیده است. در نتیجه، شیرهای روی مسیر تزریق از مخزن ۲ بسته نشده‌اند و امکان برگشت آب به مخزن ۲ وجود دارد. از طرفی با توجه به بسته بودن مسیر بای‌پس و نیز بسته شدن مسیر تزریق از مخزن ۱، عملاً تنها مسیر جریان موجود، مسیر بین مخزن ۲ و فشارنده است. با توجه به آن‌که فشارنده تنظیم فشار مدار را بر عهده دارد، جریان خنک‌کننده بین فشارنده و مخزن ۲ وجود دارد که باعث می‌شود در لحظاتی جریان در جهت عکس در IPS برقرار شود. در صورتی که در سناریو ۱ به دلیل رسیدن ارتفاع آب درون هر دو مخزن به حداقل مقدار مجاز (۰/۵ m)، شیرهای روی مسیر تزریق از هر دو مخزن بسته شده‌اند و در نتیجه با توجه به باز بودن مسیر بای‌پس، جریان مثبت ناشی از گردش طبیعی در مدار برقرار می‌شود.

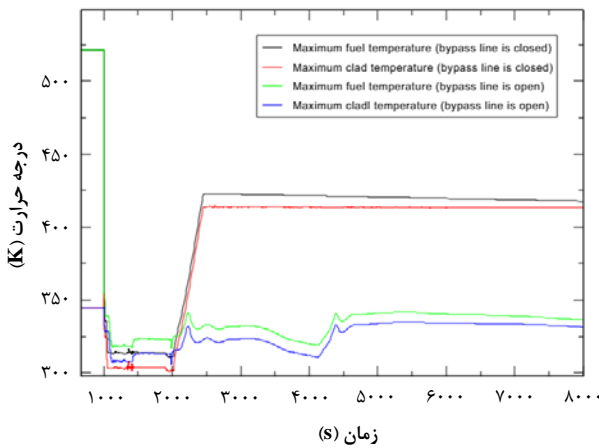




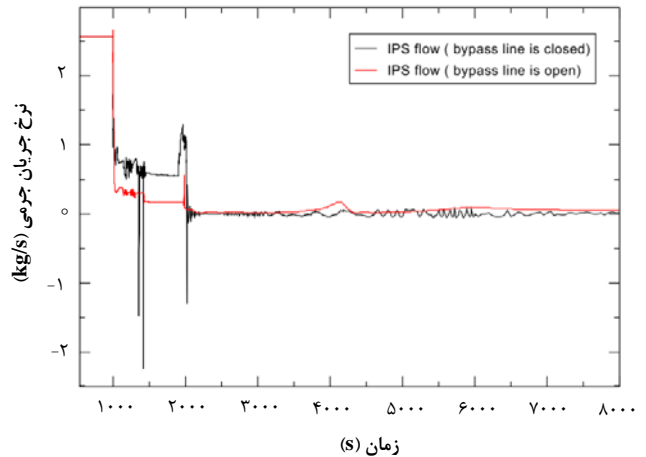
شکل ۲. آهنگ جریان خنک‌کننده در برخی اتصالات لوپ در سناریو ۲ حادثه LOFA



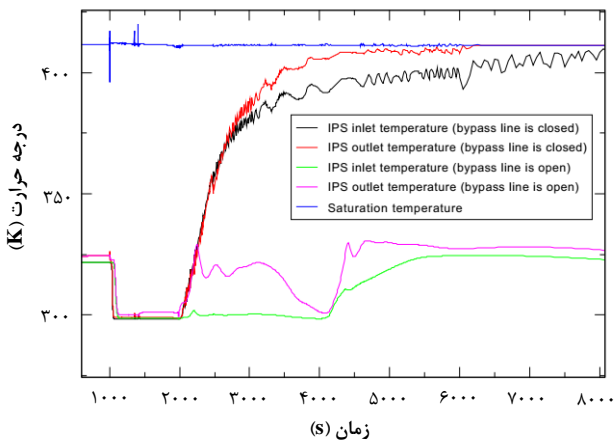
شکل ۳. تغییرات ارتفاع آب موجود در مخزن‌ها و فشارنده در سناریو ۱ و ۲.



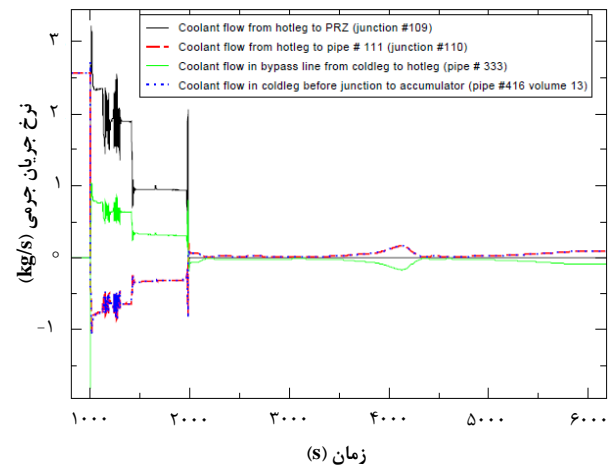
شکل ۴. آهنگ عبور جریان خنک‌کننده از IPS در سناریو ۱ و ۲.



شکل ۵. آهنگ جریان خنک‌کننده درون IPS در سناریو ۱ و ۲.



شکل ۶. تغییرات دمای خنک‌کننده درون IPS در سناریو ۱ و ۲.



شکل ۷. تغییرات دمای خنک‌کننده درون IPS در سناریو ۱ و ۲.

در شکل ۵ و شکل ۶، آهنگ جریان خنک‌کننده در تعدادی از اتصالات تست لوپ به ترتیب در سناریو ۱ و سناریو ۲ نشان داده شده است. بر اساس این اطلاعات می‌توان مسیر جریان خنک‌کننده در لوپ در طی این حادثه را مشخص کرد. در سناریو اول بلافاصله پس از قطع شدن پمپ و باز شدن مسیر



و پس از آن با توجه به کاهش گرمای واپاشی، دما تقریباً ثابت می‌ماند. در این حالت به علت گردش طبیعی برقرار شده در لوپ از طریق مسیر بای‌پس، افزایش شدید دما مشاهده نشده و دما در محدوده ایمن باقی می‌ماند. ولی در حالتی که مسیر بای‌پس بسته است، از حدود ۲۰۰۰ ثانیه که تزریق از مخزن ذخیره خاتمه یافته و مسیری نیز برای گردش طبیعی وجود ندارد افزایش شدید دما تا رسیدن به نزدیکی دمای اشباع آب رخ می‌دهد.

در شکل ۸، دمای خنک‌کننده درون IPS در سناریو ۱ و ۲ با دمای اشباع تحت شرایط موجود در IPS مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در حالتی که مسیر بای‌پس بسته است، دمای خنک‌کننده به دمای اشباع آب می‌رسد و در نتیجه درون IPS بخار تشکیل می‌شود.

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده، باز بودن مسیر بای‌پس پمپ پس از بروز حادثه قطع شدن پمپ، شرایط ایمن‌تری را برای تست لوپ در این حادثه ایجاد خواهد کرد به نحوی که دمای مرکز سوخت و سطح غلاف بسیار پایین‌تر از دمای ذوب بوده و دمای خنک‌کننده موجود در IPS نیز در محدوده ایمن و کم‌تر از دمای اشباع خنک‌کننده باقی خواهند ماند تا جوشش در IPS رخ ندهد. اگرچه، حتی در صورت بسته بودن مسیر بای‌پس، جریان آب از مخزن‌ها می‌تواند تا حدود ۵۰۰۰ ثانیه پس از قطع شدن پمپ دمای IPS را کم‌تر از دمای اشباع نگه دارد تا اپراتور وارد عمل شده و اقدامات اصلاحی لازم را انجام دهد.

۳.۳ سناریو ۳

به منظور در نظر گرفتن شرایط محافظه‌کارانه، در این سناریو فرض شده است برق پمپ در لحظه ۱۰۰۰ s قطع شود و در اثر از کار افتادن پمپ، راکتور به طور اضطراری خاموش شده و مسیر بای‌پس پمپ (شیرهای شماره ۳۳۰ و ۳۳۴) نیز باز شود ولی به دلیل بروز یک نقص فنی تزریقی از مخزن‌ها به مدار انجام نشود. در شکل ۹ آهنگ عبور جریان خنک‌کننده از IPS در شرایط در نظر گرفته شده برای سناریو ۳ در حادثه از دست رفتن جریان خنک‌کننده نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این حالت نیز به علت باز بودن مسیر بای‌پس یک جریان مثبت کوچک با آهنگ حدود 0.7 kg/s در IPS برقرار خواهد بود. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ جریان مثبت کوچک برقرار شده در IPS برای برداشت گرمای واپاشی کفایت و موجب می‌شود دمای خنک‌کننده کم‌تر از دمای اشباع بوده و دمای سوخت و غلاف نیز در محدوده مجاز باقی بمانند.

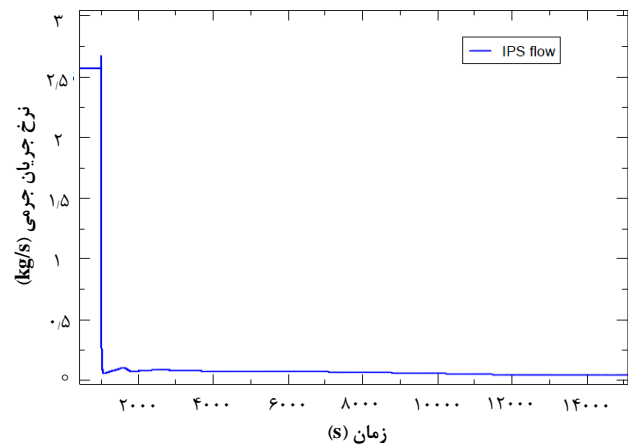
بای‌پس، جریان از خط لوله گرم به مسیر بای‌پس وارد شده و سپس از طریق خط لوله سرد مجدداً وارد IPS می‌شود. پس از باز شدن شیرهای تزریق از مخزن شماره ۲، خنک‌کننده تزریق شده از مخزن در محل اتصال با خط لوله سرد در دو مسیر جریان می‌یابد: بخش عمده آن به سمت IPS رفته و پس از عبور از آن و جریان یافتن در خط لوله گرم به دو بخش تقسیم شده که یا وارد فشارنده می‌شود و یا از طریق لوله ۱۱۱ وارد مسیر بای‌پس و سپس خط لوله سرد می‌شود. بخش بسیار کوچکی نیز از محل اتصال خط لوله تزریق از مخزن به خط لوله سرد به سمت لوله ۴۰۷ رفته، وارد مسیر بای‌پس شده و از طریق لوله ۱۱۱ و اتصال ۱۰۹ وارد فشارنده می‌شود. پس از پایان تزریق از مخزن‌ها، خنک‌کننده خروجی از IPS به سمت فشارنده نرفته و از طریق مسیر بای‌پس وارد خط لوله سرد شده و مجدداً وارد IPS می‌شود و بدین ترتیب یک جریان مثبت بسیار کوچک تا مدت زمان طولانی پس از قطع شدن پمپ و خاموشی راکتور در مدار برقرار می‌ماند. لازم به ذکر است در شکل ۵، منفی بودن آهنگ جریان در اتصال ۱۱۰ (اتصال بین لوله ۱۰۸ و ۱۱۱) و حجم ۱۳ از لوله ۴۱۶ به علت برعکس بودن جهت جریان عبوری نسبت به جهت مثبت تعریف شده در ورودی کد است.

در سناریو دوم به علت باز نبودن مسیر بای‌پس، پس از باز شدن شیرهای تزریق از مخزن شماره ۲، خنک‌کننده تزریق شده از مخزن در محل اتصال با خط لوله سرد تنها به سمت IPS رفته و پس از عبور از آن و جریان یافتن در خط لوله گرم از اتصال ۱۰۹ وارد فشارنده می‌شود و در اتصال ۱۱۰ جریان صفر خواهد بود. پس از توقف تزریق از مخزن‌ها، به علت بسته بودن مسیر بای‌پس مسیر بسته‌ای برای جریان خنک‌کننده به سمت IPS وجود ندارد ولی به علت وجود جریان جزئی از فشارنده به مخزن ۲ و بالعکس برای تنظیم فشار سیستم، نوساناتی در جریان خنک‌کننده درون IPS دیده می‌شود.

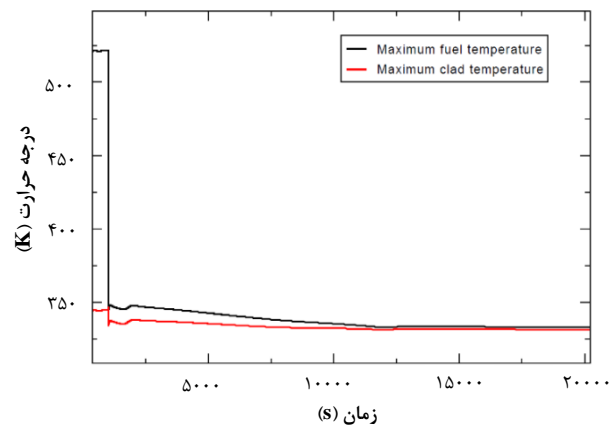
در شکل ۷ روند تغییرات بیشینه دمای سوخت و غلاف در راستای محوری در داغ‌ترین میله سوخت تحت تست درون کپسول پرتوهدی در سناریو ۱ و ۲ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، پس از خاموش شدن راکتور، دمای سوخت و غلاف به شدت افت می‌کند ولی پس از آن به علت وجود گرمای واپاشی درون سوخت و نیز کم بودن آهنگ عبور جریان خنک‌کننده تزریق شده از مخزن ذخیره، دما کمی افزایش می‌یابد و سپس تقریباً ثابت می‌ماند تا وقتی که تزریق آب از مخزن به اتمام برسد. پس از اتمام تزریق مخزن، در حالتی که مسیر بای‌پس باز است اندکی افزایش دما رخ می‌دهد



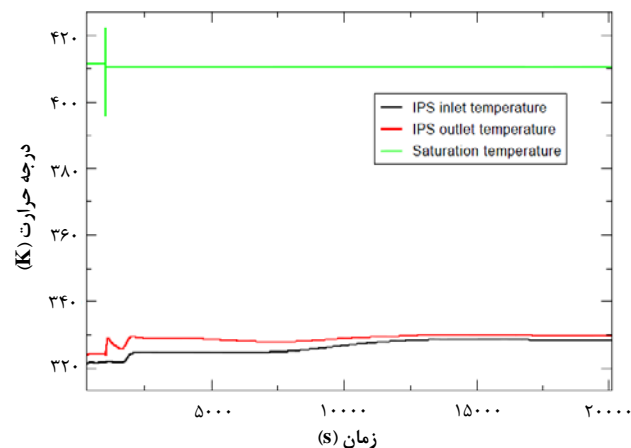
قالب سه سناریو توسط کد RELAP5 مدل سازی و نتایج حاصل ارایه شده است. از سه سناریو بررسی شده برای حادثه از دست رفتن جریان خنک کننده در لوپ تست سوخت رآکتور تهران، در سناریو ۲ که در آن مسیر بای پس پمپ بسته است، جریان خنک کننده در لوپ پس از اتمام تزریق از مخزن ها تقریباً متوقف می شود و این مسأله باعث افزایش دمای خنک کننده درون کپسول IPS و رسیدن آن به دمای اشباع می شود. در نتیجه، باز بودن مسیر بای پس پمپ پس از بروز حادثه قطع شدن پمپ، شرایط ایمن تری را برای لوپ در این حادثه ایجاد خواهد کرد. اگرچه، حتی در صورت بسته بودن مسیر بای پس، جریان آب از مخزن های ذخیره می تواند تا حدود ۵۰۰۰ ثانیه پس از قطع شدن پمپ، دمای کپسول را کم تر از دمای اشباع نگه دارد. در شرایط محافظه کارانه سناریو ۳، اگرچه به دلیل بروز یک نقص فنی تزریق از مخزن های ذخیره به مدار انجام نمی شود ولی به علت باز بودن مسیر بای پس هم چنان یک جریان مثبت کوچک در کپسول برقرار خواهد بود. از مقایسه نتایج این سناریو با سناریو شماره ۱ که در آن تزریق از مخزن های ذخیره انجام می شود می توان نتیجه گرفت تزریق از مخزن های ذخیره که تا حدود ۱۰۰۰ ثانیه پس از شروع حادثه در سناریو ۱ ادامه پیدا می کند باعث می شود دمای سوخت، غلاف و خنک کننده در سناریو ۱ نسبت به سناریو ۳ به طور متوسط حدود ۱۳ درجه کم تر باشد. در نتیجه حتی در صورت عدم وجود تزریق از مخزن های ذخیره چنانچه در حادثه از دست رفتن جریان خنک کننده، رآکتور به طور اضطراری خاموش شود و مسیر بای پس پمپ نیز باز باشد کپسول پرتو دهی در شرایط ایمن قرار خواهد داشت. از نتایج این شبیه سازی برای تعیین معیارهای مربوط به باز و بسته شدن شیرهای مسیر بای پس در منطق کنترلی حاکم بر لوپ استفاده شده است.



شکل ۹. آهنگ عبور جریان خنک کننده از IPS در سناریو ۳.



شکل ۱۰. تغییرات بیشینه دمای سوخت و غلاف در سناریو ۳.



شکل ۱۱. تغییرات دمای خنک کننده درون IPS در سناریو ۳.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، عملکرد سیستم های ایمنی لوپ تست سوخت رآکتور تهران در پاسخ به حادثه از دست رفتن جریان خنک کننده برای تأمین پایدار خنک کنندگی سوخت های تحت تست و نیز به حداقل رساندن عواقب نامطلوب این حادثه ارزیابی شده است. شرایط مختلف محتمل در صورت بروز این حادثه، در

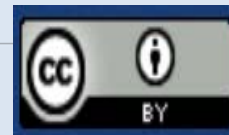


مراجع

1. S.H. Ahn, et al., *In: Proceedings of International Conference on Research Reactors, IAEA Sydney, 270-271* (2007).
2. W. Wiesenack, T. Tverberg, *The OECD Halden reactor project fuels testing programme: methods, selected results and plans, Nucl. Eng. Des., 207*, 189 (2001).
3. B.S. Sim, et al., <https://www.igorr.com/Documents/1998-TAEJON/36024322.pdf>.
4. J.Y. Kim, D.Y. Chi, https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/045/30045517.pdf.
5. IAEA-TECDOC-1635, https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE_1635_CD/PDF/TE_CDOC_1635.pdf.
6. AEOI, *Final Safety Analysis Report of Tehran Research Reactor* (2018).
7. E. Abedi, H.R. Zare, *Process description, TRR-FTL-PR-RPT-06* (2016).
8. SCIENTECH, Inc., *RELAP5/MOD3 code manual, (Rockville, Maryland Idaho Falls, Idaho, 1998)*.
9. E. Abedi, H.R. Zare, V. Keyvani, *Piping and instrument diagram, TRR-FTL-PR-PID-02* (2016).
10. IAEA, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/IAEA-THPH_web.pdf.

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

سعیده صفائی عرشی، مسعود امین مظفری، سید محمد میروکیلی (۱۴۰۱)، ارزیابی ایمنی لوپ تست سوخت رآکتور تحقیقاتی تهران در طی حادثه از دست رفتن جریان خنک‌کننده، ۱۰۲، ۵۰-۵۸

DOI: 10.24200/nst.2022.1466

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1270.html

