



بررسی حادثه LBLOCA با استفاده از کد TRACE در رآکتور VVER-1000

سجاد اکباتانی املشی^۱، امید صفرزاده^{۲*}، امیرسعید شیرانی^۱

۱. دانشکده‌ی مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، کدپستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران - ایران

۲. دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، کدپستی: ۳۳۱۹۱۱۸۶۵۱، تهران - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۷/۲۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۹

چکیده

حادثه از دست رفتن خنک‌کننده ناشی از کاهش حجم سیال خنک‌کننده مدار اول است. عامل مستقیم این حادثه، خرابی یا خستگی مکانیکی ماده تشکیل‌دهنده اجزای مدار اول در هنگام عملکرد نیروگاه است. این حادثه که یک حادثه‌ی مبنای طرح است و عامل مهمی در ارزیابی ایمنی نیروگاه هسته‌ای است. در صورتی که شکست در خط لوله اصلی مدار اول با قطر بیش از ۲۵ درصد سطح مقطع خط لوله رخ دهد، به آن شکست بزرگ اطلاق می‌شود. در این مقاله، حادثه فوق با قطر شکست ۸۵۰ میلی‌متر، با استفاده از کد TRACE در یک رآکتور VVER-1000 مدل‌سازی و تحلیل شده است. کد TRACE به صورت خاص برای حادثه از دست‌رفتن سیال خنک‌کننده طراحی شده است. با این تحلیل می‌توان به‌جای فرضیات محافظه‌کارانه در ارزیابی ایمنی رآکتور برآورد دقیقی از ایمنی رآکتور داشت و ملاحظات اقتصادی قابل توجهی به‌دست آورد. در پایان، نتایج به‌دست آمده از کد TRACE با داده‌های گزارش نهایی تحلیل ایمنی نیروگاه و همچنین نتایج تحقیقات پیشین مبتنی بر RELAP5 مقایسه شده است. نتایج نشان‌گر دقت کد TRACE در مدل‌سازی حادثه شکست بزرگ است.

کلیدواژه‌ها: رآکتور VVER-1000، حادثه‌ی شکست بزرگ، کد TRACE

LBLOCA accident investigation using TRACE code in a VVER-1000 reactor

S. Ekbatani-Amlashi¹, O. Safarzadeh^{2*}, A.S. Shirani¹

1. Faculty of Nuclear Engineering, Shahid Beheshti University, Postalcode: 1983963113, Tehran - Iran

2. Faculty of Engineering, Shahed University, Postalcode: 3319118651, Tehran - Iran

Abstract

The loss of coolant accident is due to the reduction of the coolant fluid volume in the first circuit. The direct cause of this accident is the mechanical failure or fatigue in the material of the first circuit components during the power plant operation. This accident, which is a design-based accident, is an important factor in assessing a nuclear power plant safety. If the break occurs in the main circuit of the first circuit with a diameter greater than 25% of the cross-section area, it shall be referred to as a large break. In this paper, this accident with a break diameter of 850 mm is modeled and analyzed using the TRACE code in a VVER-1000 reactor. The TRACE code is specifically designed for coolant loss accidents. With the help of this analysis, it is possible to have an accurate estimate of the reactor's safety and to obtain significant economic considerations instead of conservative assumptions assessment. Finally, the results of the TRACE code have been compared with the final safety analysis report of the power plant as well as previous research by the RELAP5. The results indicate the accuracy of the TRACE code in modeling the large break accident.

Keywords: VVER-1000 reactor, LBLOCA, TRACE code

*Email: safarzadeh@shahed.ac.ir

۱. مقدمه

در بسیاری از تحقیقاتی که در مورد رآکتور انجام می‌شود، از کد TRACE برای محاسبات تکمیلی و مقایسه‌ای استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، مرجع [۲] از کد TRACE برای بررسی حادثه LOCA^۵ در یک رآکتور آب جوشان استفاده کرد. در مرجع [۳] از کد TRACE برای بررسی حادثه LBLOCA در رآکتور AP1000 استفاده و نتایج ارایه شده توسط ویستینگهاوس صحت‌سنجی شد. نویسندگان مرجع [۴] مطالعات مشابهی برای حادثه SBLOCA در AP1000 انجام دادند. آن‌ها نتایج رفتار مشابه بین پیش‌بینی کد TRACE و نتایج ارایه شده توسط ویستینگهاوس را نشان دادند. مرجع [۵] از این کد برای بررسی حادثه LOCA در رآکتور BWR^۶ تحت شرایط بی‌برقی کامل استفاده کردند. همچنین از این کد برای بررسی حادثه خروج ناگهانی میله کنترل در رآکتور VVER-1000 استفاده شد [۶]. پیش‌تر، حادثه شکست خط لوله در رآکتور SMART با استفاده از کد TRACE انجام شد [۷].

در این مقاله، حادثه شکست بزرگ از دست رفتن سیال که یک حادثه مبنای طرح است، با استفاده از کد TRACE مدل‌سازی و تحلیل شده است. برای این کار محفظه تحت فشار رآکتور، مدارهای اولیه و تجهیزات ایمنی مورد نیاز حادثه و مشخصات ترموهیدرولیکی عملکردی نیروگاه، مدل‌سازی و سپس در حالت پایا نتایج مقایسه شد. پس از آن شرایط حادثه برای کد تعریف شد و پارامترهای مختلف از جمله دمای سطح غلاف سوخت، دمای مرکز سوخت، فشار و . . . استخراج شده در نهایت با نتایج گزارش نهایی تحلیل ایمنی نیروگاه [۸] و همچنین کد RELAP5 [۹] مقایسه شده است.

۲. توسعه مدل سه بعدی

قلب رآکتور در راستای محوری، سمتی و شعاعی گره‌بندی^۷ شده است. در شکل ۱ نحوه نام‌گذاری یک سلول سه‌بعدی نشان داده شده است.

برای هر سلول پارامترهای حجم، سطح و قطر هیدرولیکی محاسبه می‌شود. شکل ۲، نحوه گره‌بندی صورت پذیرفته برای

وقوع حادثه در دنیای صنعتی اجتناب‌ناپذیر است. از آن‌جا که صنعت هسته‌ای با موادی پرتوزا سروکار دارد، ایمنی هسته‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در بررسی ایمنی رآکتورهای هسته‌ای، حادثه از دست‌رفتن سیال خنک‌کننده ناشی از شکست بزرگ در خط لوله مدار اول یکی از مسایل اساسی است. در این حادثه دمای غلاف به بیشینه مقدار ممکن می‌رسد. این حادثه مشخص‌کننده توان بیشینه میله و دسترس‌پذیری دیزل ژنراتور است. در صورتی که شکست در خط لوله‌های متصل به خط لوله اصلی (مانند خط لوله اتصال فشارنده به خط لوله اصلی) رخ دهد، به آن شکست بزرگ اطلاق می‌شود. حادثه شکست بزرگ منجر به پیامدهای زیر می‌شود:

- جت سیال خروجی حاصل از شکست و اعمال نیروی عکس‌العمل آن به سایر سیستم‌های نزدیک به محل شکست؛
 - انتشار موج فشار در مدار اولیه و اعمال نیروهای شدیدی بر اجزای رآکتور؛
 - خشک‌شدن^۱ قلب و عدم‌خنک‌سازی و اخلال در یکپارچگی غلاف سوخت؛
 - انفجار هیدروژن تولیدی به سبب واکنش شیمیایی غلاف با بخار و
 - افزایش فشار در محفظه ایمنی به دلیل وارد شدن جریان سیال خنک‌کننده با انرژی بالا.
- برای این منظور، کدهای محدودی مانند TRACE^۲ و WCOBRA\TRAC توسعه و اعتبارسنجی شده‌اند [۱]. کد TRACE توسط نظام ایمنی هسته‌ای آمریکا^۳ تهیه و توسعه یافته است و به صورت خاص برای بهترین برآورد^۴ حادثه از دست رفتن سیال خنک‌کننده طراحی شده است. علاوه بر این، می‌توان از این سامانه برای بررسی گذارهای عملیاتی، حوادث محتمل، مسایل انتقال حرارت و دیگر موارد استفاده کرد.

5. Loss of Coolant Accident (LOCA)

6. Boiling Water Reactor (BWR)

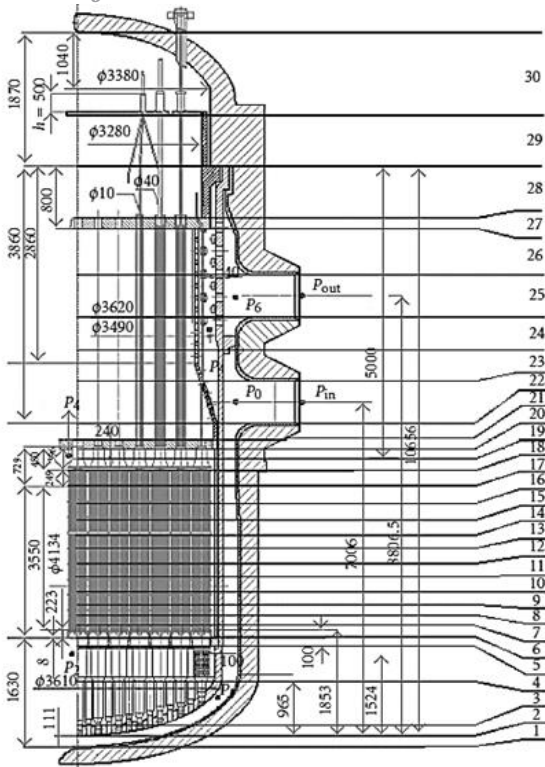
7. Nodalization

1. Dryout

2. TRAC/RELAP Advanced Computational Engine

3. U.S.NRC

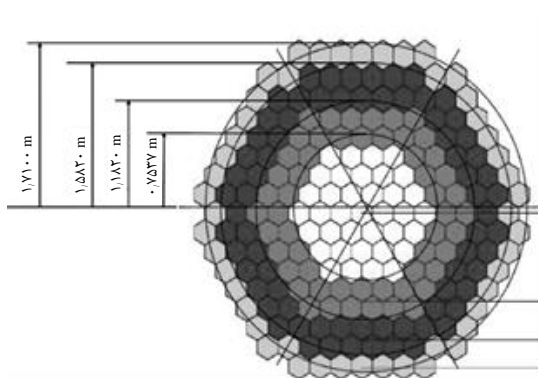
4. Best-Estimate



شکل ۲. گره بندی در راستای محوری.



شکل ۳. مش بندی در راستای سمتی.



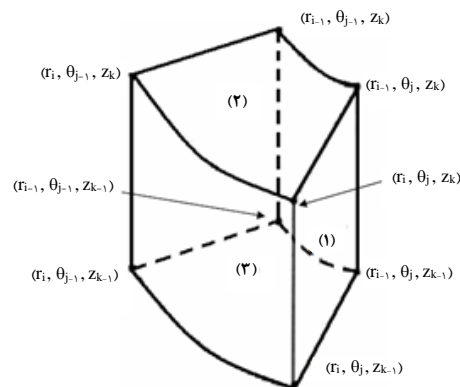
شکل ۴. تقسیم بندی شعاعی قلب رآکتور.

یک رآکتور VVER-1000 نمونه را نشان می دهد. در این جا ۳۰ سطح برای تقسیم بندی محوری به کار برده شده است. همچنین، قلب رآکتور در راستای محوری به ۱۰ ناحیه با فواصل ۰٫۳۵۵ متر مش بندی شد.

قلب رآکتور در راستای زاویه ای با یک تقسیم بندی متقارن به شش ناحیه تقسیم می شود. در این تقسیم بندی که در شکل ۳ آورده شده است، مدار اول به بخش شماره یک، مدار دوم به بخش شماره سه، مدار سوم به بخش شماره چهار و مدار چهارم به بخش شماره شش وارد می شوند.

در راستای شعاعی نیز همانند راستای محوری و سمتی، باید تقسیم بندی شود. تقسیم بندی صورت پذیرفته در شکل ۴ نمایش داده شده است. گام شبکه برابر با ۲۳٫۶ سانتی متر است. حلقه اول شامل ۳۷ مجتمع، حلقه دوم شامل ۵۴ مجتمع و حلقه سوم شامل ۷۲ مجتمع است. در این صورت با محاسبه سطح مجتمع در هر حلقه و برابر قرار دادن با مساحت دایره، شعاع هر حلقه (شکل ۴) محاسبه خواهد شد. همچنین، شعاع های بیرونی برای بازتابنده برابر با ۱٫۷۱ متر، برل برابر با ۱٫۸۱ متر و بازتابنده بیرونی برابر با ۲٫۰۶۷ متر است.

برای محاسبه حجم سیال در هر ناحیه لازم است که حجم ساختار (که شامل سوخت، غلاف و دیگر موارد) به دست آید. به عنوان نمونه، محاسبه حجم سیال و ساختار در یکی از مش های شعاعی، سمتی و محوری در ادامه آورده می شود.



شکل ۱. سلول سه بعدی.

که

$$d_p: \text{ قطر میله}$$

$$y^t: \text{ نمایه راستا و معرف راستای محوری و شعاعی}$$

$$N_i^{yt}: \text{ تعداد میله‌ها در حلقه } i \text{ ام}$$

$$A_{t,j}^{yt}: \text{ سطح کل در ناحیه } j \text{ ام}$$

$$A_{l,j}^{yt}: \text{ سطح سیال در ناحیه } j \text{ ام}$$

$$A_{s,j}^{yt}: \text{ سطح جامد در ناحیه } j \text{ ام}$$

مقدار سطح در راستای سمتی و محوری، به صورت زیر قابل

محاسبه است:

$$A_{t,j}^{xr} = \frac{\sum \pi r_i}{S} h_z \quad (7)$$

$$A_{s,j}^{xr} = N_i^{xr} d_p h_z \quad (8)$$

$$A_{l,j}^{xr} = A_{t,i}^{xr} - A_{s,i}^{xr} \quad (9)$$

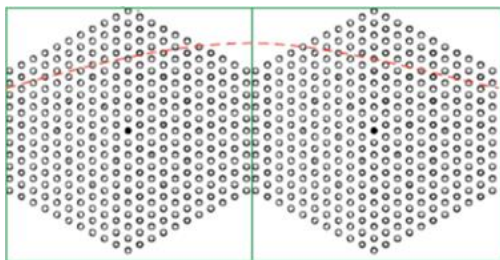
که

$$x^r: \text{ نمایه راستا و معرف راستای محوری و سمتی}$$

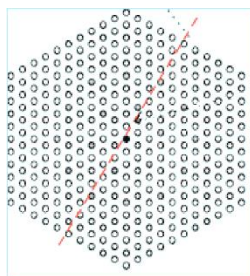
$$N_i^{xr}: \text{ تعداد میله‌ها در حلقه } i \text{ ام}$$

$$A_{t,j}^{xr}: \text{ سطح کل در ناحیه } j \text{ ام}$$

$$A_{l,j}^{xr}: \text{ سطح سیال در ناحیه } j \text{ ام}$$

$$A_{s,j}^{xr}: \text{ سطح جامد در ناحیه } j \text{ ام}$$


شکل ۵. تعداد میله‌ها بین مش سمتی (راستای شعاعی و محوری).



شکل ۶. تعداد میله‌ها بین مش سمتی (راستای شعاعی و محوری).

در اولین مش شعاعی، تعداد مجتمع‌ها ۳۷ بود و در نتیجه در هر مش سمتی به تعداد یک ششم این مقدار، مجتمع سوخت قرار می‌گیرد. هر مجتمع شامل ۳۳۱ میله است که قطر آن‌ها در حدود ۴/۶ میلی‌متر است. بنابراین، حجم کل سیال و جامد به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_{t,j} = \frac{\pi(r_i^2 - r_{i-1}^2)}{S} h_z \quad (1)$$

$$V_{s,j} = \frac{B_i}{S} N \pi r_p^2 h_z \quad (2)$$

$$V_{l,j} = V_{t,i} - V_{s,i} \quad (3)$$

که

$$r_i: \text{ شعاع حلقه } i$$

$$h_z: \text{ ارتفاع بخش محوری}$$

$$S: \text{ تعداد مش سمتی}$$

$$B_i: \text{ تعداد مجتمع‌ها در حلقه } i \text{ ام}$$

$$N: \text{ تعداد میله‌ها در هر مجتمع}$$

$$r_p: \text{ شعاع میله}$$

$$V_{t,j}: \text{ حجم کل در ناحیه } j \text{ ام}$$

$$V_{l,j}: \text{ حجم سیال در ناحیه } j \text{ ام}$$

$$V_{s,j}: \text{ حجم جامد در ناحیه } j \text{ ام}$$

هم‌چنین لازم است سطح سیال و جامد در راستاهای

مختلف محاسبه شود. برای این منظور باید تعداد میله‌ها در مرزهای هر مش محاسبه شود. به عنوان مثال، تعداد میله‌هایی که بین دو مجتمع وجود دارد برابر با ۱۱ عدد است (شکل ۵) و تعداد میله‌هایی که در راستای هر ضلع بین قطاع ۱ و ۲ و درون یک مجتمع سوخت وجود دارد (شکل ۶) در حدود ۳۸/۵ است.

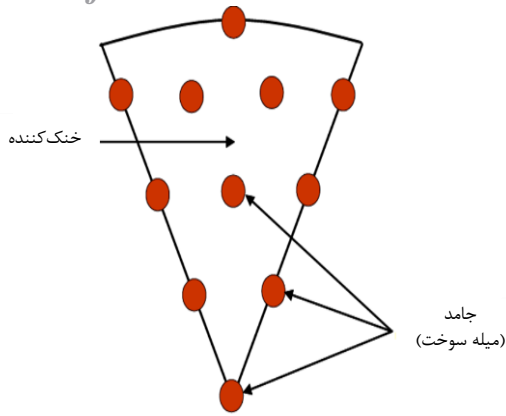
مقدار سطح برای مش سمتی، به صورت زیر قابل محاسبه

است:

$$A_{t,j}^{yt} = (r_i - r_{i-1}) h_z \quad (4)$$

$$A_{s,j}^{yt} = N_i^{yt} d_p h_z \quad (5)$$

$$A_{l,j}^{yt} = A_{t,i}^{yt} - A_{s,i}^{yt} \quad (6)$$



شکل ۷. نمای محوری از داخلی ترین بخش یک قسمت.

نمای محوری مجتمع سوخت در شکل ۷ نشان داده شده است. نقاط قرمز رنگ نشان دهنده المان سوخت است که توسط خنگ کننده احاطه شده است. در این صورت، مقدار سطح در راستای شعاعی و سمتی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$A_{t,j}^z = \frac{\sum (r_i^z - r_{i-1}^z)}{S} \quad (10)$$

$$A_{s,j}^z = \frac{B_i}{S} N \pi r_p^z \quad (11)$$

$$A_{i,j}^z = A_{t,i}^z - A_{s,i}^z \quad (12)$$

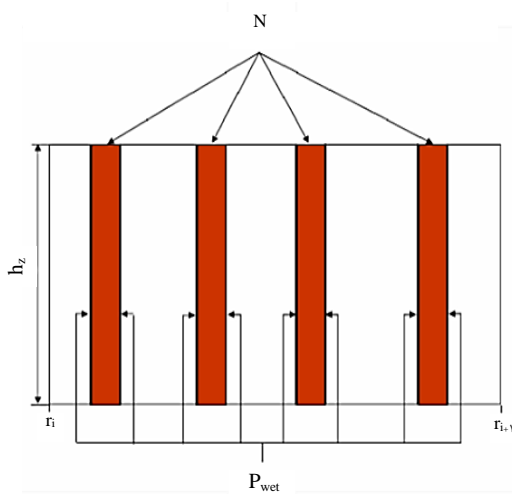
که

z : نمایه راستا و معرف راستای شعاعی و سمتی

$A_{t,j}^z$: سطح کل در ناحیه زام

$A_{i,j}^z$: سطح سیال در ناحیه زام

$A_{s,j}^z$: سطح جامد در ناحیه زام



شکل ۸. تعیین قطر هیدرولیک.

قطر هیدرولیکی دیگر پارامتری است که باید محاسبه گردد. برای به دست آوردن این پارامتر از رابطه زیر استفاده می شود:

$$D_h = \frac{4A_d}{P_{wet}} \quad (13)$$

که

A_d : سطح سیال روی میله در سلول مورد نظر

P_{wet} : محیط تر شده

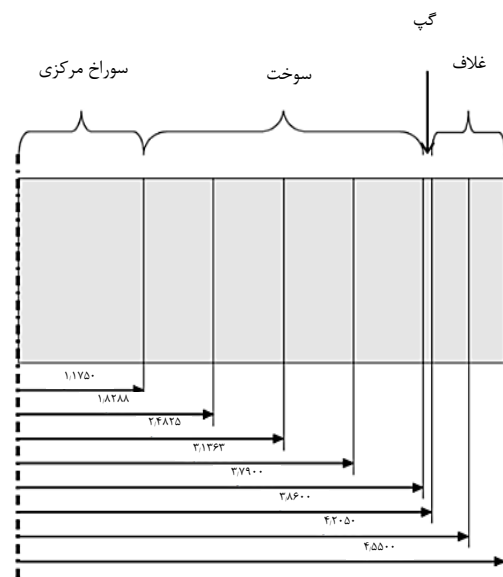
D_h : قطر هیدرولیکی

شکل ۸ تعاریف موجود در رابطه (۱۳) را نشان می دهد.

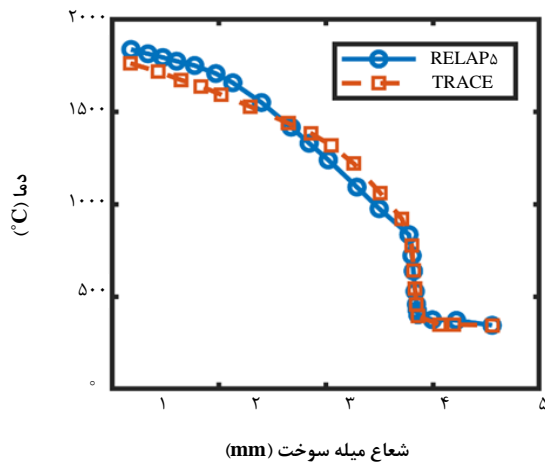
حرارت تولیدی توسط سوخت ایجاد می شود. برای شبیه سازی این منبع باید از ساختار حرارتی استفاده نمود. در تعریف ساختار حرارتی نیاز است که اجزای مختلف آن مش بندی شده و حجم آن محاسبه گردد. شکل ۹ نحوه تقسیم بندی میله سوخت را نشان می دهد.

شکل ۱۰ نحوه مدل سازی برخی از تجهیزات مدار اول را

نشان می دهد.



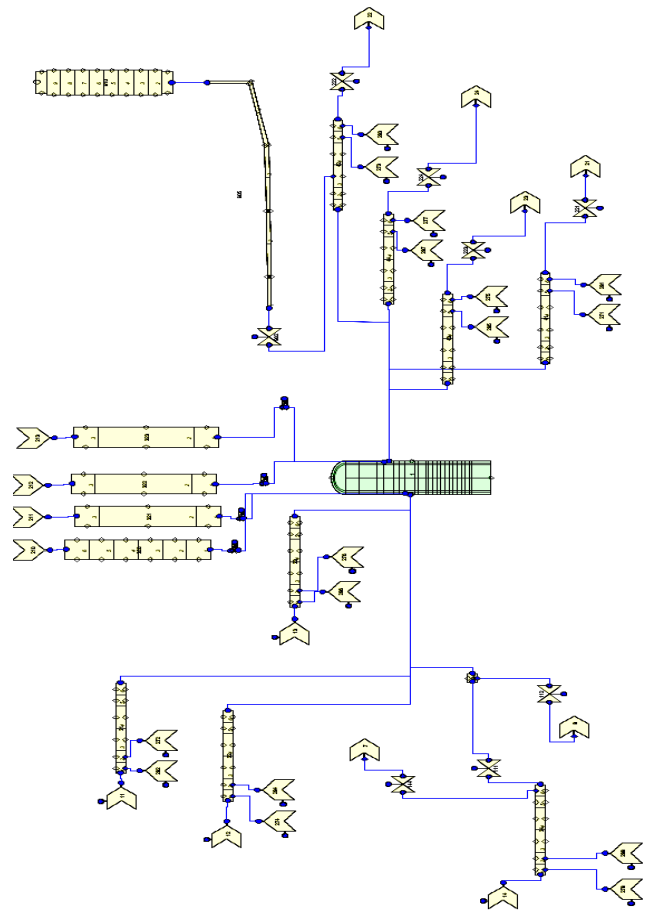
شکل ۹. مش بندی شعاعی میله سوخت.



شکل ۱۱. توزیع شعاعی دمای سوخت در میله داغ.

شکل ۱۲ توزیع دمای غلاف در راستای محوری برای میله داغ را نشان می‌دهد. از آنجا که تولید حرارت در طول قلب توزیعی کسینوسی دارد، توزیع محوری دمای سوخت نیز کسینوسی است. از طرف دیگر توزیع دمای سیال خنک‌کننده در طول قلب به صورت سینوسی است. بنابراین توزیع دمای غلاف سوخت در طول قلب توزیعی مابین سینوسی و کسینوسی است. این امر باعث می‌شود حداکثر دمای سطح غلاف سوخت در ۷۵ درصد ارتفاع قلب حاصل شود. اما در میله سوخت داغ، تولید حرارت بر برداشت حرارت غلبه کرده و نقطه حداکثر به ۶۵ درصد ارتفاع قلب تنزل یافته است.

دمای غلاف محاسبه شده توسط کد RELAP مقدار بیشتری از دمای محاسبه شده توسط کد TRACE است. علت این امر متفاوت بودن توزیع توان محوری در این دو کد است که منجر به تفاوت در توزیع شار حرارتی شده است. به عبارت دیگر، توان محوری میله داغ در کد RELAP بیشتر از کد TRACE است. نتیجه این امر در شکل ۱۱ نیز مشهود است و دمای مرکز سوخت کم‌تر از دمای محاسبه شده توسط REALP است.



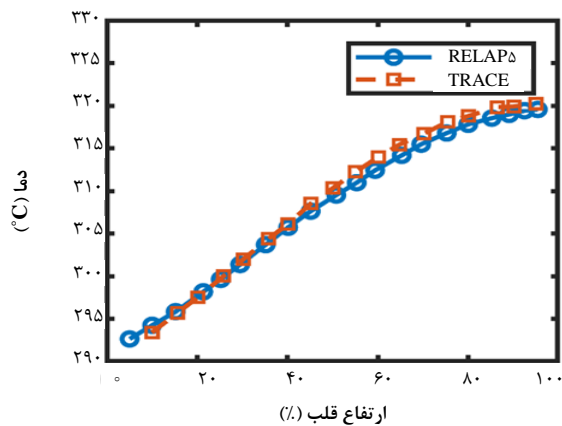
شکل ۱۰. نحوه گره‌بندی.

۳. نتایج حالت ماندگار

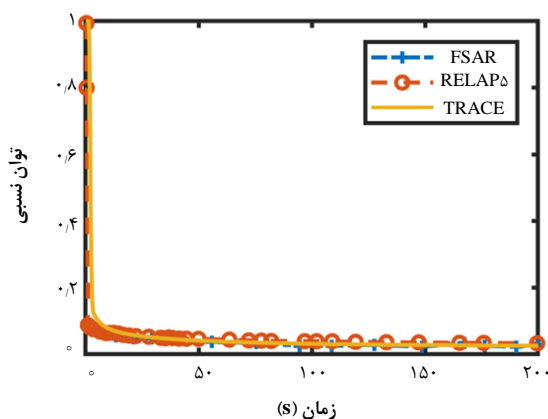
پس از اجرای کد و رفع خطاها، نتایج نهایی حالت پایا حاصل شد. تغییر زیاد دما در داخل سوخت و فضای بین سوخت و غلاف و تغییر کم دما در داخل غلاف سوخت، ناشی از رسانش حرارتی کم بین سوخت و فاصله‌ی گازی در مقابل رسانش حرارتی زیاد غلاف سوخت است.

شکل ۱۱ توزیع شعاعی دمای سوخت را نمایش می‌دهد. حداکثر دمای محاسبه شده در مرکز سوخت میله‌ی داغ برابر ۱۷۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است که با توجه به حداکثر مقدار ذکر شده در گزارش نهایی تحلیل ایمنی (۱۸۸۳ درجه‌ی سانتی‌گراد) مقداری قابل قبول است. رفتار دمای سوخت کد TRACE مشابه رفتار کد RELAP5 [۸] است.

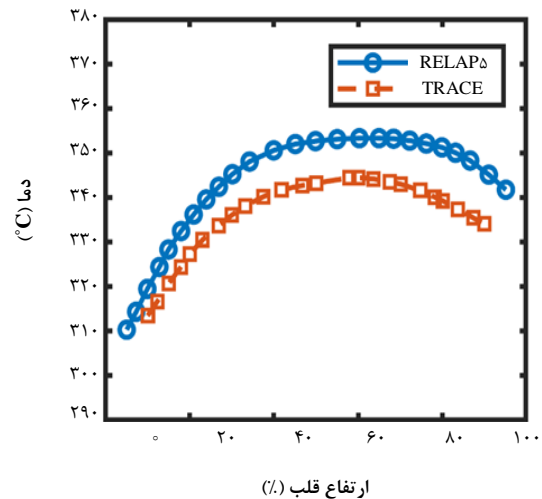
کنترلی به کار رفته جهت باز شدن انباره‌ها به صورت یک عملگر کنترلی مقایسه فشار رآکتور با مقدار ۵/۸۸ مگاپاسکال است. در صورتی که فشار رآکتور بیش تر از این مقدار باشد، عملگر کنترلی صحیح و در غیر این صورت ناصحیح است. جدول ۲ توالی حادثه شکست بزرگ را نشان می‌دهد. شکل ۱۴ افت کل توان نسبی تولیدی قلب پس از شروع حادثه را نشان می‌دهد. یکی از سیگنال‌های توقف رآکتور، ناشی از رسیدن فشار بالای قلب به ۱۴/۷ مگا پاسکال است. از آنجا که با ایجاد شکست، افت فشار به سرعت حاصل می‌شود، فشار بالای قلب پس از گذشتن کم‌تر از یک ثانیه به کم‌تر از ۱۴/۷ مگا پاسکال می‌رسد. بنابراین در لحظات اول حادثه، سیگنال توقف رآکتور تولید می‌شود و پس از گذشت زمان تأخیر حدود ۱/۳ ثانیه توقف آنی رآکتور با سقوط میله‌های کنترل حاصل می‌شود. ضمن این‌که توان ورودی در این حالت براساس محاسبات سینتیک نقطه‌ای قلب رآکتور به دست آمده است.



شکل ۱۳. توزیع محوری دمای خنک‌کننده.



شکل ۱۴. تغییرات توان نسبی رآکتور.



شکل ۱۲. توزیع محوری دمای غلاف در میله داغ.

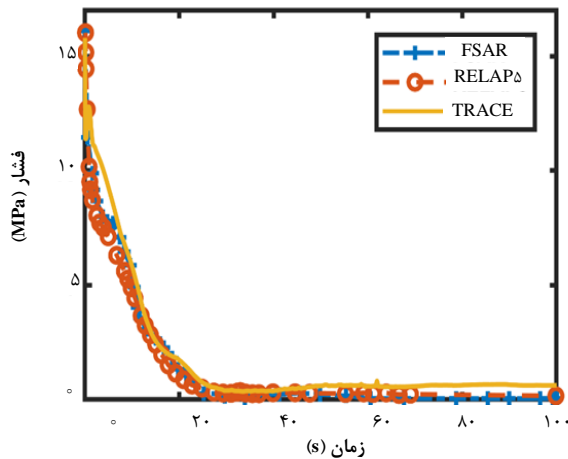
شکل ۱۳ توزیع دمای میانگین سیال خنک‌کننده در طول ارتفاع قلب را نشان می‌دهد. دمای خنک‌کننده خروجی قلب در حدود ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد و دمای ورودی آن حدود ۲۹۰ درجه سانتی‌گراد است.

نتایج به دست آمده در حالت ماندگار با نتایج حاصله از گزارش ایمنی نیروگاه بوشهر [۸] و کد RELAP5 [۹]، مقایسه و در جدول ۱ به نمایش در آمده است. نتایج به دست آمده صحت و دقت قابل قبول مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

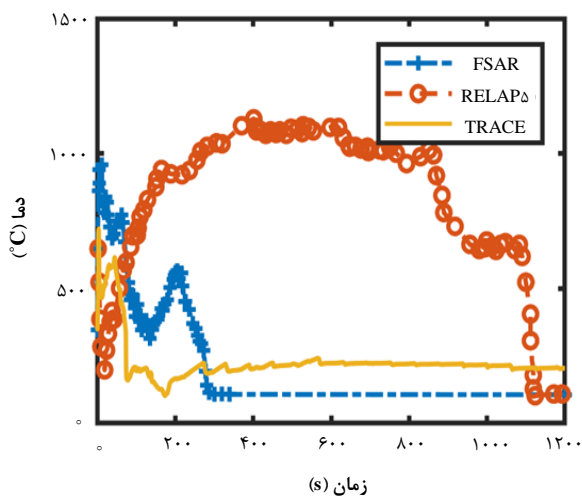
۴. نتایج حالت گذرا

شرایط ذکر شده برای این حادثه مطابق فصل پانزدهم FSAR به شرح زیر است: ۳ انباره‌ی طرح VVER، ۲ پمپ تزریق فشار بالا یکی به یک مدار سالم (مدار ۱) و دیگری به مدار حاوی شکست (مدار ۴) و ۲ پمپ تزریق فشار پایین یکی به یک مدار سالم (مدار ۱) و دیگری به مدار حاوی شکست (مدار ۴). حالت‌های مختلفی برای شرایط حادثه با توجه به اجزای سیستم خنک‌کننده‌ی اضطراری قلب در نظر گرفته شده است. در مدل‌سازی برای عمل کردن اجزای مختلف درگیر در حادثه، عمل‌گرهای کنترلی مختلفی به کار رفته است. برخی از عمل‌گرهای کنترلی به صورت واقعی در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال، رسیدن فشار رآکتور به مقداری کم‌تر از ۵/۸۸ مگا پاسکال منجر به باز شدن انباره‌های طرح VVER می‌شود. این پارامتر توسط کد محاسبه می‌شود. در نتیجه عمل‌گر

کاهش دما با باز شدن انباره‌ها تشدید می‌شود. پس از بسته شدن انباره‌ها و غلبه تولید حرارت ناشی از واپاشی محصولات شکافت بر برداشت حرارت توسط سیستم تزریق فشار بالا و فشار پایین، دمای غلاف سوخت افزایش می‌یابد و در نهایت، برداشت حرارت بر تولید آن غلبه می‌کند و دمای سطح غلاف در میله‌ی سوخت داغ به حدود ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌رسد. نتیجه‌ی مهم حاصل این است که بیشینه دمای غلاف سوخت از ۱۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد کم‌تر است. بنابراین از معیار دمایی غلاف سوخت در طول حادثه عدول نمی‌شود. علت تفاوت در رفتار دمایی غلاف سوخت می‌تواند ناشی از عملکرد انباره‌ها، تزریق آب موجود در مولدهای بخار، مدل شار حرارتی بحرانی، گام زمانی محاسبات و دیگر موارد است.



شکل ۱۵. تغییرات فشار بالای قلب رآکتور.



شکل ۱۶. تغییرات دمای غلاف سوخت.

جدول ۱. مقایسه پارامترهای اساسی در حالت ماندگار

پارامتر	FSAR ^۱	RELAP ^۵	TRACE
دمای ورودی خنک‌کننده (°C)	۲۹۱	۲۹۱٫۱	۲۹۱٫۰۵
دمای خروجی خنک‌کننده (°C)	۳۲۱	۳۲۲٫۵۷	۳۲۱٫۲۵
حداکثر دمای مرکز سوخت (°C)	۱۸۸۳	۱۸۳۸	۱۷۶۰
فشار خروجی (MPa)	۱۵٫۷	۱۵٫۷۲	۱۵٫۷۰
دبی حجمی (m ^۳ /h)	۸۴۸۰۰	۸۴۱۲۶٫۰۴	۸۴۷۸۷٫۹۷
افت فشار قلب (MPa)	۰٫۱۴۴	۰٫۱۴۳۹۴	۰٫۱۴۴۳
حداکثر دمای سطح بیرونی غلاف (°C)	۳۵۲	۳۵۳٫۴۴	۳۴۹٫۳۵۴
حداکثر توان خطی (W/cm)	۴۴۸	۴۱۷٫۴۸	۳۶۲٫۳۲
شار حرارتی بحرانی (MW/m ^۲)	۲٫۳۱-۱٫۶۵	۳٫۴۶-۱٫۸	۲٫۲۲۱۶
حداقل مقدار DNBR	۱٫۸-۱٫۷۵	۱٫۹۵	۱٫۸۶

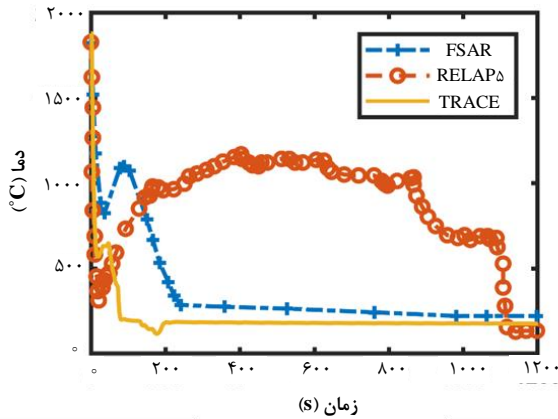
جدول ۲. توالی حادثه شکست بزرگ

رویداد	متغیر کنترلی	زمان (ثانیه)
باز شدن شیرهای	زمان	۰٫۰
توقف پمپ‌های اصلی	زمان	۰٫۰
بسته‌شدن شیر آب تغذیه	زمان	۰٫۰
بسته‌شدن شیر توربین	زمان	۰٫۶
توقف رآکتور	زمان	۱٫۳۲۷
باز شدن انباره‌ها	فشار قلب	۸
خالی شدن فشارنده	-	۱۳
توقف انباره‌های	سطح آب انباره	۳۴
شروع پمپ‌های فشار بالا و پایین	زمان	۴۰
توقف پمپ‌های فشار بالا و اتصال پمپ‌های فشار پایین به چاهک	زمان	۱۵۷۰

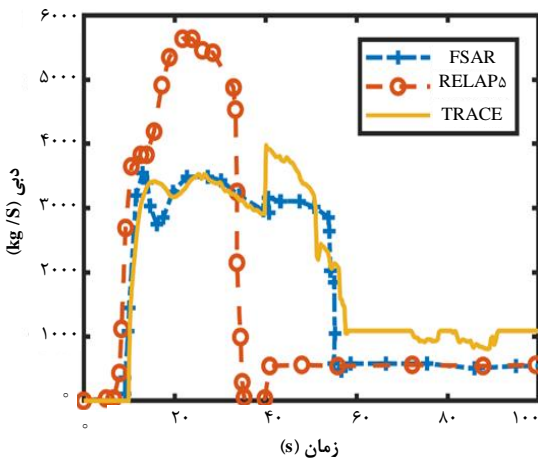
شکل ۱۵ تغییر فشار در بالای قلب رآکتور پس از شروع حادثه را نشان می‌دهد. با ایجاد شکست، فشار به شدت افت می‌کند و پس از گذشت ۳۰ ثانیه از حادثه، فشار رآکتور برابر فشار محیط می‌شود.

در شکل ۱۶ حداکثر دمای غلاف میله‌ی^۲ سوخت داغ نشان داده شده است. با وقوع شکست در خط لوله به دلیل افت فشار و عدم صدور فرمان خاموشی رآکتور، دمای سطح غلاف در میله‌ی داغ به شدت افزایش می‌یابد و سپس به دلیل توقف رآکتور و عدم ایجاد شکافت جدید این دما کاهش می‌یابد. این

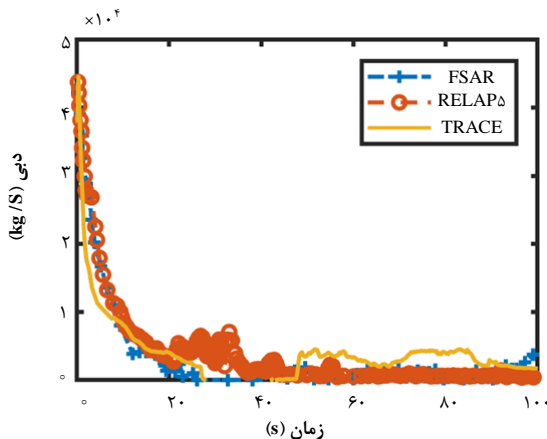
1. Final Safety Analysis Report (FSAR)
2. Peak Cladding Temperature (PCT)



شکل ۱۷. تغییرات دمای مرکز سوخت.



شکل ۱۸. تغییرات دبی تزریقی سیستم خنک‌کننده اضطراری.



شکل ۱۹. تغییرات دبی سیال خروجی از محل شکست.

در شکل ۱۷ دمای مرکز سوخت در میله‌ی داغ در بحرانی‌ترین مقطع نشان داده شده است. دمای مرکز سوخت پس از خاموشی رآکتور به دلیل توقف آنی رآکتور به شدت افت می‌کند. اما به دلیل افت فشار، خروج سیال از محل شکست و تولید حرارت توسط محصولات شکافت، شروع به افزایش می‌کند و پس از گذشت حدود ۱۰۰ ثانیه از شروع حادثه این افزایش دما توسط سیستم تزریق فشار بالا و فشار پایین مهار می‌شود و سرانجام دمای مرکز سوخت به حدود ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌رسد. در شکل ۱۷ دو نکته وجود دارد:

۱. حداکثر دمای مرکز سوخت در میله‌ی داغ در طول محاسبات همان دمای اولیه‌ی مرکز سوخت است. بنابراین سوخت ذوب نخواهد شد و معیار عدم ذوب سوخت در حادثه برقرار است.

۲. حداکثر دمای مرکز سوخت محاسبه‌شده نشان می‌دهد که دمای مرکز سوخت در بازه‌ی زمانی نزدیک به نتیجه‌ی گزارش نهایی تحلیل ایمنی نیروگاه، مهار می‌شود که این در مقایسه با نتیجه‌ی حاصل از RELAP5 بسیار بهتر است. دمای سوخت وابسته به دمای سطح غلاف است. از این‌رو، رفتار گذاری دمای سوخت ناشی از رفتار گذاری دمای غلاف است.

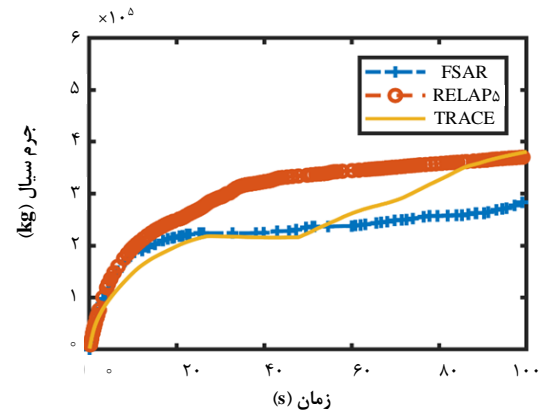
شکل ۱۸ جریان ورودی به رآکتور جهت برداشت حرارت توسط سیستم خنک‌کننده‌ی اضطراری قلب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، نتایج در مقایسه با کد RELAP5 به FSAR نزدیک‌تر است. کد RELAP5 حجم آب تزریقی توسط انبارها را بیشتر و در مدت زمان کم‌تری محاسبه کرده است. این عملکرد بر دمای سطح غلاف و میله سوخت می‌تواند تاثیرگذار باشد.

دبی خروجی از محل شکست در شکل ۱۹ آورده شده است و انتگرال سیال خروجی در شکل ۲۰ رسم شده است. سیال در لحظات ابتدای شکست به شدت از مدار اول خارج می‌شود. علت این امر اختلاف فشار حدود ۱۵۰ برابری است. با گذشت زمان این اختلاف فشار کم‌تر شده و سیال کم‌تری از محل شکست بیرون هدایت می‌رود.

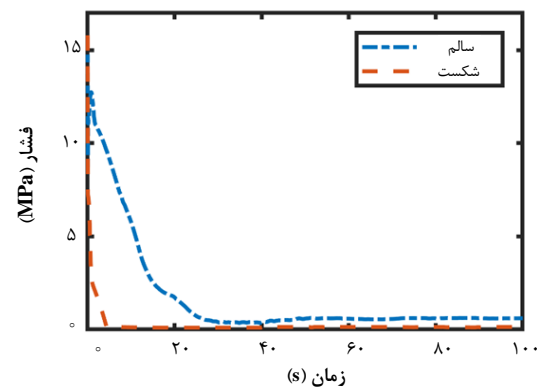
شکل ۲۱ فشار سیال را در مداری که دارای شکست است و مداری که سالم نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل می‌توان ملاحظه نمود، فشار سیال در مدار شکست، سریع‌تر افت می‌کند.

مراجع

1. S. Bajorek, *TRACE V5. 0 Theory Manual, Field Equations, Solution Methods and Physical Models*, (U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, USA, 2008).
2. M.I. Radaideh, T. Kozlowski, Y.M. Farawila, *Loss of coolant accident analysis under restriction of reverse flow*, *Nucl. Eng. Technology* **51**, 1532-1539 (2019).
3. C. Queral, et al. *AP1000[®] Large-Break LOCA BEPU analysis with TRACE code*, *Ann. Nucl. Energy* **85**, 576-589 (2015).
4. J. Montero-Mayorga, C. Queral, J. Gonzalez-Cadelo, *AP1000[®] SBLOCA simulations with TRACE code*, *Ann. Nucl. Energy* **75**, 87-100 (2015).
5. C.-Y. Chen, C. Shih, J.-R. Wang, *The alternate mitigation strategies on the extreme event of the LOCA and the SBO with the TRACE Chinshan BWR4 model*, *Nucl. Eng. Des.* **256**, 332-340 (2013).
6. B. Miglierini, T. Kozlowski, V. Kopecek, *Uncertainty analysis of rod ejection accident in VVER-1000 reactor*, *Ann Nucl Energy* **132**, 628-635 (2019).
7. Y. Alzaben, V.H. Sanchez-Espinoza, R. Stieglitz, *Analysis of a steam line break accident of a generic SMART-plant with a boron-free core using the coupled code TRACE/PARCS*, *Nucl. Eng. Des.* **350**, 33-42 (2019).
8. AEOI, *Final Safety Analysis Report (FSAR)*, (Chapter 15, *Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran*, 2008).
9. M.M. Khalife-Shoushtari, *M.S. thesis*, Sharif University of Technology, (2010).



شکل ۲۰. انتگرال دبی سیال خروجی از محل شکست.



شکل ۲۱. مقایسه فشار در مدار اصلی دارای شکست و سالم.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق حادثه‌ی شکست بزرگ دوطرفه^۱ در پایه‌ی سرد بر طبق گزارش نهایی ایمنی نیروگاه بوشهر- واحد اول تحلیل شد. نوآوری انجام‌شده در این تحقیق، مدل‌سازی و بررسی LBLOCA نیروگاه هسته‌ای VVER-۱۰۰۰ با کد TRACE است. این مدل‌سازی امکان بررسی رفتار ترموهیدرولیکی نیروگاه در گذارها و حوادث مختلف از جمله حوادث شکست مربوط به مدارهای اولیه و ثانویه به همراه بررسی عملکرد اجزای مختلف سیستم ایمنی نیروگاه در این حوادث را فراهم آورده است. نتایج نشانگر سازگاری مناسب برای فشار و دمای قلب در کدهای RELAP5 و TRACE و گزارش FSAR است. عملکرد انباره‌ها در RELAP5 متفاوت از عملکرد انبارها در TRACE است. این عملکرد در TRACE نزدیک‌تر به FSAR است. علت تفاوت در دمای غلاف می‌تواند ناشی از مدل شار حرارتی بحرانی، گام زمانی محاسبات و مدل‌سازی انجام شده در RELAP و TRACE باشد.

1. Double-Ended Guillotine Break