



ارزیابی حالت گذار حوادث منجر به ذوب محلی بدون رخداد خاموش‌سازی اضطراری با تلفیق کدهای محاسباتی MCNPx و COBRA/En

بهزاد سلماسیان، عطاءاله ربیعی*، محمدرضا نعمت‌اللهی، احمد پیروزمند
گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده مکانیک، دانشگاه شیراز، صندوق پستی: ۷۱۹۶۴-۸۴۳۳۴، شیراز - ایران

*Email: Rabiee@shirazu.ac.ir

مقاله‌ی فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۹

چکیده

مخاطرات ناشی از رخداد ذوب محلی، به دلیل دشواری پایش، از نظر ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشند. عدم برداشت حرارت، به‌صورت کلی و محلی می‌تواند ایمنی رآکتور را مختل نماید. حوادث محلی جریان که منجر به رخداد خاموشی اضطراری نشوند، می‌تواند باعث ایجاد بخار محلی بالای صفر درصد (حجمی) و ذوب محلی غلاف شود. در پژوهش اخیر، با هدف تحلیل حالت گذار و پایدار حوادث محتمل به رخداد ذوب محلی سوخت، حوادث اصلی منطبق بر رخدادهای ATWS شامل از دست رفتن پمپ، انسداد موضعی جریان و افزایش سطح توان و برخی ترکیبات بررسی شده‌اند. بعد از تلفیق کدهای محاسباتی MCNPx و COBRA/En، محاسبات با در نظر گرفتن تحلیل زیرکانال و شرایط مرزی انجام شده و توسط FSAR اعتبارسنجی شده است. نتایج بررسی سناریوهای محتمل و معیارهای خاموشی اضطراری رآکتور برای شرایط بدبینانه نشان داد، به‌میزان حداقل ۱۸٪، ۴۷۰ کیلو پاسکال و ۲۰۴ درجه کلوین از حدود لازم برای رخداد خاموشی اضطراری در نتیجه‌ی، کاهش نرخ جریان خنک‌کننده، حداکثر میزان افت فشار کانال، و سقف دمای غلاف سوخت، حاشیه وجود دارد. نتایج پژوهش اخیر نشان می‌دهد، درصد حجمی بخار بالای صفر تا حدود ۷۰٪ به‌مدت ۱۲ دقیقه در برخی از کانال‌ها رخ داده و در شرایط وخیم‌تر میزان نسبت بخار بالاتر می‌باشد. با توجه به فرکانس رخداد حوادث مورد بررسی، در شرایط عادی، نقاط خشک و تبعاً ذوب محلی سوخت وجود دارد. فاصله کمیت‌ها از حدود خاموشی اضطراری، مقادیر عدم قطعیت و اعتبارسنجی مدل توسط مدارک معتبر صحه بر صحت نتایج دارد.

کلیدواژه‌ها: حادثه ذوب محلی، رخداد ATWS، رآکتور VVER-1000، COBRA/En، MCNPx

Transient parameters analysis of non-scrammed local melting accident scenarios using MCNPx and COBRA/EN

B. Salmassian, A. Rabiee*, M.R. Nematollahi, A. Pirouzmand

Department of Nuclear Engineering, School of Mechanical Engineering, Shiraz University, P.O.BOX: 71964-84334, Shiraz - Iran

Technical Paper

Received 30.12.2020, Accepted 9.3.2021

Abstract

The risk assessment of local nuclear fuel melting in nuclear power plants (NPPs) due to its localized nature and the difficulty in accurate monitoring is of vital importance for safe operation of nuclear reactors. Experiences have shown that flow blockage accident without safety control rod axe man (SCRAM) can lead to local nuclear fuel melting which consequently affect the safety of NPPs. The purpose of this study is to analyze the transient states leading to local fuel melting based on ATWS-related events given in FSAR of the VVER-1000/V446 nuclear reactor including pump failure, local blockage, power level increasing and their combinations. In this work, a coupling framework is first developed based on the MCNPx and the COBRA/EN codes. After validation with available data, the results showed that despite 18% deviation from the mass flow rate reduction limitation, 470 kPa from the channel pressure drop limitation, and 204K from the clad temperature limitation in the most pessimistic situation, the reactor SCRAM does not occur. However, in these conditions (where SCRAM does not occur), 70% void fraction for 12 minutes is observed in some channels. Therefore, there may be dry spots and local melting of fuel in normal operational and ATWS conditions that need to be identified. According to the results, the occurrence of the void fraction above zero is locally expectant and an appropriate monitoring system should be used to identify weakness points of the system.

Keywords: Local melting accident, Un-scrammed ATWS, VVER1000, COBRA/En, MCNPx



۱. مقدمه

وجود نقص در برداشت حرارت تولیدشده جز مخاطرات ایمنی رآکتور می‌باشد. انسداد محلی در جریان در کنار افزایش توان و خرابی پمپ می‌تواند باعث کاهش برداشت حرارت از میله‌های سوختی شود. انسداد محلی جریانی با ماهیت محلی، میزان راکتیویته، جریان خنک‌کننده^۱ گذرا از قلب و توان برداشت حرارت کل قلب را تغییر نمی‌دهد ولی می‌تواند به صورت محلی برداشت حرارت را مختل نماید. انسداد محلی جریانی می‌تواند ناشی از گیر کردن قسمت‌های شکسته‌شده غلاف، بادکردگی المان‌های سوختی، خمیدگی یا جابه‌جایی المان‌های سوخت، بادکردگی غلاف در اثر فشار محصولات شکافت (در اثر تغییرات گذرای فشار قلب یا گرادیان دمایی) و یا قطعات خارجی جا مانده از زمان تعمیرات باشد. این انسداد، میزان جریان را به صورت محلی و در آن المان خاص کاهش داده و موجب کاهش میزان ضریب انتقال گرما از سوخت به خنک‌کننده می‌شود و نتیجتاً افزایش دمای سطح غلاف را به همراه خواهد داشت. در اثر افزایش دمای خنک‌کننده روی سطح به دمایی فراتر از اشباع،^۲ MDNBR به صورت محلی کاهش یافته و حباب ایجاد می‌شود. با افزایش حباب‌ها و درصد حجمی بخارهای بالای صفر، انتقال حرارت در قسمت خشک سطح کاهش می‌یابد. کاهش انتقال حرارت موجب افزایش دمای سطح غلاف و متعاقباً ذوب آن به صورت محلی می‌شود. ماده مذاب به شکل شمع جاری شده و در مسیر کانال خنک‌کننده جامد شده و مسیر کانال را تنگ‌تر می‌کند. افزایش انسداد مسیر خنک‌کننده به صورت فیدبک مثبت ادامه می‌یابد تا به تعادل برسد و یا بخش بزرگی ذوب شده و خاموش‌سازی اضطراری سیستم رخ دهد [۱]. هم چنین نوسانات گرمایی و ایجاد بخار و دوفازی شدن می‌تواند منجر به ایجاد شکستگی‌هایی بر روی غلاف سوخت تا محفظه رآکتور شود [۲].

لوییس و همکاران، صحنه بر دشواری شبیه‌سازی و شناسایی رخداد انسداد محلی، به دلیل ماهیت محلی آن گذاشته و فقط در شرایط تأثیر بر روی جریان خنک‌کننده یا راکتیویته قلب محتمل دانسته‌اند. در این پژوهش اشاره شده، سیستم‌های پایش وضعیت موجود قابلیت شناسایی انسداد موضعی جریان را ندارند [۳]. قراری و همکاران، انسداد محلی جریان در ورودی کانال خنک‌کننده رآکتور VVER-۱۰۰۰/۴۴۶ را با استفاده از کد محاسباتی COBRA/EN و RELAP۵ بررسی کرده‌اند.

این بررسی برای شرایط وجود و عدم وجود جریان‌های عمودی در برابر جریان‌های محوری^۳ انجام شده است. طبق نتایج در ورودی کانال با انسداد محلی جریان و اختلال جریان‌های عمودی در برابر جریان‌های محوری مشکلات ایمنی جدی وجود داشته و شرایط گذر از معیارهای ایمنی رخ می‌دهد [۴].

دهجوریان و همکاران، اثر جابه‌جایی میله‌های سوختی و اثر تغییر شکل از نوع خمیدگی را برای رآکتور VVER-۱۰۰۰/۴۴۶ بررسی کرده‌اند. این بررسی بر روی مؤلفه‌های ضریب انتقال حرارت و دمای غلاف و سوخت با استفاده از کد ANSYS انجام شده که نشانگر افزایش دمای غلاف و سوخت بوده است. با افزایش میزان بادکردگی و جابه‌جایی، دمای غلاف و سوخت افزایش یافته و احتمال ذوب بیش‌تر وجود داشته است. هم‌چنین در نقاط نزدیک شبکه نگه‌دارنده^۴ میزان انسداد محلی و ذوب احتمالی بیش‌تر بوده است [۵].

یوچوان و همکاران، انسداد محلی جریان میان صفحات سوختی JPR-۳M را برای یک مجتمع سوختی بررسی کرده‌اند. میزان انسدادهای مورد مطالعه، از ۳۰٪ تا ۹۵٪ بوده است. این محاسبات با استفاده از کد محاسباتی RELAP۵/mod۳/۴ انجام شده است. نتایج نشانگر، عدم آسیب سوخت تارخداد ۷۰٪ انسداد سطح مقطع و آسیب جزئی تا ۹۵٪ انسداد بوده است. در انسدادهای بالاتر از ۹۵٪، آسیب کاملاً جدی بوده و موجب ذوب بخشی مجتمع سوخت شده است [۶].

سگال و همکاران محدوده دمایی رخداد تغییر شکل و ذوب غلاف را ۱۵۰۰ درجه کلوین پیش‌بینی کرده‌اند [۷]. مقاطع دارای سبکه ذوب محلی به دلیل عدم توازن تولید و برداشت حرارت جز نقاط مستعد رشد وخامت در خلال رخداد حوادث می‌باشند. به همین دلیل این نقاط، نقاط ضعف در شروع حوادث آغازین حادثه نوع شدید، محسوب می‌شود. IAEA در برنامه جامع خود در خصوص حوادث نوع شدید (SAMG-D) بر اهمیت پیش‌بینی، پیش‌گیری، تقلیل و کاهش تبعات هر گونه حادثه منتج به حوادث نوع شدید تأکید کرده‌است [۸].

تأکید می‌شود، حوادث محلی اغلب قبل از گسترش انسداد موضعی از حدود خاموشی اضطراری شناسایی نشده و اقدامات پیشگیرانه در جهت ایمنی رآکتور انجام نمی‌شود. این مسأله می‌تواند نقاط دارای آسیب محلی غلاف را به عنوان نقاط ضعفی برای شروع حوادث شدید در صورت رخداد حوادث دیگر مانند شکستگی بزرگ ورودی خنک‌کننده مطرح نماید.

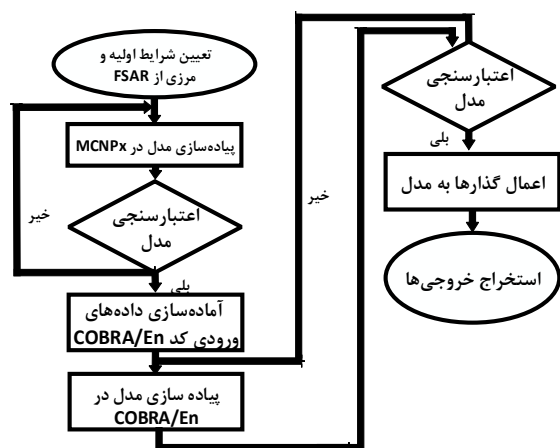
3. Cross Flow

4. Grid Spacer

1. Flow

2. Minimum Departure from Nucleate Boiling Ratio





شکل ۱. روند انجام پژوهش.

۲.۲ شبیه سازی ترموهیدرولیک

کد COBRA-EN به عنوان کد ترموهیدرولیکی برای محاسبات "تجزیه و تحلیل قلب" و "تجزیه و تحلیل زیر کانال" مورد استفاده قرار گرفته است. ورودی‌های سطوح توان محوری و شعاعی از خروجی تحلیل نوترونیک توسط کد MCNPx استخراج شده است. برای محاسبات ترموهیدرولیک قلب از معادلات جرم، انرژی و مومنتوم حالت دو فاز با اعمال تصحیحات برای استحصال نرخ جریان و افت فشار استفاده شده است. شرایط پایدار اولیه و مرزی به کد اعمال شده و همچنین از معادلات تحلیل شار گرمایی با الحاق ضرایب مدل EPRI^۱ برای به دست آوردن کمیت‌های دمایی استفاده شده است. به دلیل استفاده از درصد حجمی بخار در معادلات بقا و همچنین اهمیت درصد آن به عنوان یک کمیت مستقل، برای محاسبه در مدل جوشش سرد از ضرایب تصحیح Levy، برای جریان دوفازی از معادله نسبت لغزش و کیفیت بخار با اعمال ضریب تصحیح Zuber-Findlay استفاده شده است. همچنین برای شناسایی نقطه با شار گرمایی بحرانی از معادلات دیتوس-بولتر با ضرایب تصحیح مدل W-۳ استفاده شده است [۹، ۱۰].

برای به دست آوردن میزان شار بحرانی، کانال داغ و محاسبات دمایی، ضریب همبستگی شار بحرانی می‌تواند به عنوان بخشی از مدل انتقال حرارت از سطح مورد استفاده قرار گیرد [۱۱]. جهت شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی از معادلات پیوستگی مومنتم و انرژی به همراه معادلات کمکی در کنار معادله حاکم بر توزیع دمای میله سوخت استفاده شده است. معادلات بقا جرم در حالت دو فاز بفرم معادله (۱) می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_k \rho_k) + \text{div}(\phi_k \rho_k v_k) = -\rho_{ki}(v_{ki} - v_i) \cdot n_{ki} \alpha_i \quad (k = 1, 2) \quad (1)$$

فلذا تحلیل حوادث مرتبط با رخداد انسداد محلی جریان اهمیت از نقطه نظر ایمنی مهم است. در پژوهش اخیر، برای تحلیل حادثه از کد محاسباتی COBRA به دلیل قابلیت تحلیل حالت گذار برای زیرکانال‌ها و کل قلب استفاده شده است. همچنین، این کد قابلیت در نظر گرفتن ضرایب تصحیح ویژه ترموهیدرولیک برای دستیابی به پاسخ مناسب را دارا می‌باشد. برای انجام تحلیل حالت گذار حادثی که بدون رخداد خاموشی اضطراری منجر به گذار از معیارهای ایمنی به صورت محلی شده‌اند کوپلینگ این کد با کد مونت کارلو نوترونیک MCNPx انجام شده است.

۲. مواد و روش‌ها

با توجه به تحلیل حالت گذار حوادث مبتنی بر رخداد انسداد محلی جریان، در این بخش به روش، مراحل و موارد مورد بررسی پرداخته شده است. این بخش شامل پنج زیربخش می‌باشد. در بخش اول روند انجام پژوهش تبیین گشته‌است. در بخش دوم توضیحات کلی در خصوص نحوه شبیه‌سازی به کمک کد COBRA/En مطرح شده است. برای دستیابی به ورودی‌های کد از قبیل پروفیل دمایی و تولید انرژی محاسبات کدهای نوترونیک نیاز می‌باشد که در بخش بعدی نحوه انجام این محاسبات با کد محاسباتی MCNPx تشریح شده است. در بخش چهارم خصوصیات از رآکتور VEER-۱۰۰۰/۴۴۶ به عنوان سیستم مورد، شرایط خاموشی اضطراری در رآکتورهای نوعی VEER-۱۰۰۰/۴۴۶ و سناریوهای گذرایی مورد بررسی مطرح شده‌اند. در آخرین بخش اعتبارسنجی مدل انجام شده است.

۱.۲ روش پیاده‌سازی پژوهش

روند انجام پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. در این پژوهش شرایط مرزی و اولیه مستخرج از FSAR با تمام جزئیات زیرکانال‌های قلب در کد MCNPx پیاده‌سازی شده است. سپس بعد از اعتبارسنجی مدل، شرایط نوترونیک در حالت پایدار محاسبه شده است. نتایج حالت پایدار به عنوان شرایط اولیه و مرزی شروع محاسبات در نظر گرفته شده و در خلال شرایط گذار، این شرایط توسط COBRA/En بروز رسانی می‌شوند. بعد از پیاده‌سازی و اعتبارسنجی مدل در COBRA/En اعمال حوادث و استخراج خروجی‌ها انجام شده است.



۱.۴.۲ چینش غناهای سوختی

در شکل ۳ نحوه چینش قلب اعمالی به رآکتور منطبق بر FSAR رسم شده است. چینش مذکور با رعایت غناها در آلوم نوترونیک قلب در کد MCNPx مورد استفاده قرار گرفته است.

۲.۴.۲ شرایط رخدادهای اسکرم

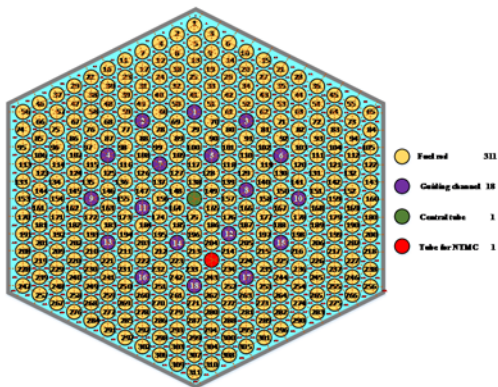
نظر به این‌که در پژوهش اخیر تلاش برای تحلیل رخدادهایی است که به خاموشی اضطراری منتهی نشوند لذا داشتن آگاهی از شرایط مرتبط منتج به خاموشی اضطراری ضروری بوده که در جدول ۳ آورده شده است. این حدود خاموشی اضطراری مرتبط با کاهش نرخ جریان گرمی، که مبنای اصلی پژوهش اخیر است، می‌باشد [۱۴].

جدول ۱. مشخصات ورودی به کد cobra/en

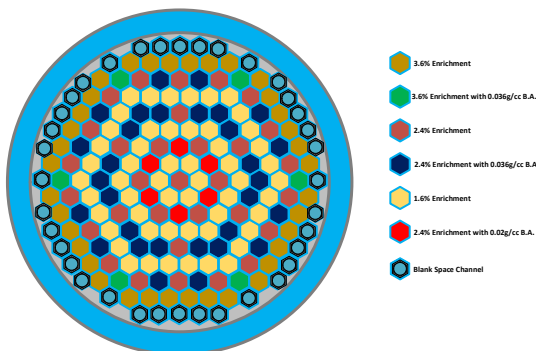
مقدار	کمیت	مقدار	کمیت
۱۰	تعداد محوری شبکه نگه‌دارنده	۱۶۳	تعداد مجتمع سوخت
۴۱۵۸.۴	متوسط جریان گرمی ورودی (kg/s/m ²)	۵۴۶.۱۶	دمای ورودی خنک‌کننده (K)
۱۱۶۲	متوسط غلظت برن (ppm)	۱۵.۷	فشار قلب (MPa)
۳۱۱	تعداد سوخت هر مجتمع	۶۶۸	تعداد کانال هر مجتمع

جدول ۲. مشخصات ورودی به کد MCNPx

مقدار	کمیت	مقدار	کمیت
۳۱۳	تعداد سوخت هر مجتمع	۱۶۳	تعداد مجتمع سوخت
Zr + Nb	ماده غلاف	۳۵۵	ارتفاع قلب (cm)
B ₂ C + Dy ₂ O ₃ + TiO ₂	ماده میله کنترل	UO ₂	ماده سوخت
		۳۰۰۰	توان حرارتی قلب (MW)



شکل ۲. طرح چیدمان کانال‌های قلب رآکتور در کد Cobra.



شکل ۳. طرح چیدمان قلب رآکتور در MCNPx۲/۷.

معادلات بقا مومنتوم برای هر دو فاز بفرم معادله (۲) می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_k \rho_k v_k) + di v(\phi_k \rho_k v_k v_k) = -grad(\phi_k P_k) + di v(\phi_k \tau_k) + \phi_k \rho_k F_k + [-\{\rho_{ki} v_{ki} \cdot (v_{ki} - v_i) n_{ki}\} - P_{ki} n_{ki} + n_{ki} \tau_{ki}] \alpha_i \quad (k=1,2) \quad (2)$$

معادلات بقا انرژی برای هر دو فاز و ضریب بخار بفرم معادله‌های (۳) و (۴) می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ (\phi_k \rho_k) \cdot (U_k + \frac{1}{\gamma} v_k^2) \right\} + di v \left\{ \phi_k \rho_k \cdot (U_k + \frac{1}{\gamma} v_k^2) v_k^2 \right\} = -di v(\phi_k q_k) - di v(\phi_k P_k v_k) + di v(\phi_k \tau_k v_k) + \phi_k \rho_k F_k \cdot v_k + \phi_k Q_k + \left\{ -\rho_{ki} (U_{ki} + \frac{1}{\gamma} v_{ki}^2) (v_{ki} - v_i) n_{ki} - n_{ki} q_{ki} - P_{ki} v_{ki} \cdot n_{ki} + n_{ki} \cdot (\tau_{ki} \cdot v_{ki}) \right\} \alpha_i \quad (k=1,2) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + di v(\alpha \times V_{el}) = source \quad (4)$$

تصحیحات مذکور به این معادلات اعمال می‌گردد [۱۲].

۳.۲ شبیه‌سازی نوترونیک

به‌منظور به‌دست آوردن پیک‌های توان تولیدی محوری و شعاعی ورودی به کد Cobra/En از کد MCNPx استفاده شده است. در کد مونت‌کارلو MCNPx مقدار فلاکس محوری و شعاعی محاسبه شده و با ضرب در میزان انرژی تولیدی در هر واکنش، میزان توان‌های تولیدی محوری و شعاعی محاسبه شده و در کد Cobra/En استفاده شده است.

کد MCNPx یکی از کدهای محاسباتی پرتوی منطبق‌بر محاسبات مونت‌کارلو کار بوده که رفتار جمعیت نوترونی را با حل معادله انتقال بولتزمن مبتنی بر شار نوترونی، سطوح مقاطع و نرخ واکنش پیش‌بینی می‌کند [۱۳].

۴.۲ رآکتور آب تحت فشار

رآکتور مورد مطالعه، رآکتور VVER-۱۰۰۰ و مدل ۴۴۶ بوده است. جزئیات ورودی از رآکتور به کد COBRA-en در جدول ۱ و ورودی‌ها به کد MCNPx در جدول ۲ آمده است. شکل ۲ شماره‌گذاری کانال‌ها و میله‌های سوختی برای ورودی کد COBRA/En را نمایش می‌دهد. شماره کانال‌های خنک‌کننده در روی وسط شش ضلعی‌ها و شماره کانال‌های خنک‌کننده در روی ضلع‌ها با رنگ سرخ نوشته شده است. در شکل ۳ نقشه کلی قلب نشان داده شده و محاسبات مذکور به صورت تحلیل زیرکانال با جزئیات تک‌تک میله‌ها و کانال‌ها انجام شده است.



جدول ۳. اسکریم‌های محتمل در خصوص حوادث انسداد محلی جریان

نوع حادثه	از دست رفتن یکی از پمپ‌ها	از دست رفتن تمام پمپ‌ها RCP	از دست رفتن دو پمپ از چهار پمپ
تغییر افت فشار RCP			
از ۰٫۳۹۲ به ۰٫۲۴۵ MPA طی زمان کم‌تر از ۵ ثانیه	+		
DNBR زیر ۱٫۲	+	+	
فشار قلب بالای ۱۷٫۵ MPA	+	+	
افزایش دمای خط گرم ^۱ بیش از ۸ °C	+	+	
خاموش شدن دو پمپ از چهار پمپ در توان نامی بیش از ۷۵٪			+

جدول ۴. سناریوهای انسداد محلی جریان مورد بررسی

عنوان رخداد	خلاصه رخداد	فرکانس رخداد رخداد در هر دوره (#/T)
ATWS _۱	از دست رفتن یک پمپ RCP	۳
ATWS _۲	افزایش توان به ۱۱۷٪ نامی	۱۰ ^{-۱}
ATWS _۳	وجود ۹۰٪ انسداد در ورودی تک کانال	>۱۰
ATWS _۴	رخداد توأم ATWS _۲ و ATWS _۳	۸×۱۰ ^{-۲}
ATWS _۵	رخداد توأم ATWS _۱ و ATWS _۳	۶×۱۰ ^{-۲}
ATWS _۶	رخداد توأم ATWS _۱ و ATWS _۳ و عدم سقوط میله کنترل	۱۰ ^{-۲}
ATWS _۷	رخداد توأم از دست رفتن دو پمپ RCP و ATWS _۳	۱۰ ^{-۱}

۳.۴.۲.۱ رخداد ATWS_۱

با توجه به جدول ۴ در سناریو ATWS_۱ در خصوص جریان گذرا از قلب، از ثانیه ۵۰ تا ۸۰ نرخ جریان گرمی در اثر خرابی یک پمپ (منطبق بر اسناد ATWS) تا ۱۷٪ و سپس تا ثانیه ۱۰۰ تا ۲۲٪ کاهش می‌یابد. سطح توان نسبی از ثانیه ۵۵ ام به دلیل فرمان کاهش ناشی از خرابی یک پمپ RCP منطبق با اسناد ATWS تا ثانیه ۶۰ ام به سطح توان ۶۶٪ می‌رسد و ثابت می‌ماند. در این سناریو فشار کلی قلب از ثانیه ۵۰ تا ۸۰ ام با کاهش میزان جریان خنک‌کننده ورودی به قلب به میزان ۸۴٪ نامی و در ثانیه ۱۰۰ ام به ۸۰٪ نامی کاهش می‌یابد. اما به دلیل اثر فشارنده مجدداً شروع به افزایش می‌کند و تا ثانیه ۱۴۰ ام خود را به ۹۶٪ نامی رسانده و ثابت می‌ماند.

۳.۴.۲.۲ رخداد ATWS_۲

در سناریو ATWS_۲، جریان گذرا از قلب و میزان جریان سیال ثابت می‌باشد. سطح توان نسبی از ثانیه ۵۵ ام به دلیل فرمان افزایش سطح توان نسبی تا ثانیه ۱۰۰ ام به سطح توان ۱۱۷٪ می‌رسد و ثابت می‌ماند. لازم به ذکر است فشار کلی تحت کنترل ثابت می‌ماند.

۳.۴.۲.۳ رخداد ATWS_۳

با توجه به جدول ۴ در خصوص حادثه انسداد محلی جریان، حادثه ATWS_۳ یک رخداد محلی بوده و کمیت‌های کلی قلب از جمله جریان گذرا، توان و فشار رآکتور را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. فلذا این کمیت‌ها در طول حادثه مذکور تغییری نمی‌کنند.

۴.۳.۴.۲ رخداد ATWS_۴

در سناریو ATWS_۴ حادثه‌ی وجود انسداد محلی جریان در شرایط ثبات و افزایش جریان گذرا و توان نسبی قلب مورد

جدول ۳ متشکل از یک ردیف افقی و یک ستون عمودی بوده که تلفیق این وقایع، شروط رخداد خاموشی اضطراری‌اند. شرط خاموشی اضطراری رخداد توأم ستون عمودی و افقی نقطه نشان‌دار می‌باشد. همچنین، معیار شرایط خاموشی اضطراری نتایج سنسورهای داخل قلب بوده، نتیجتاً حوادث نزدیک یا گسترده شناسایی می‌شوند. برای نمونه، تخمین MDNBR تنها در نقاط بسیار محدود وجود ترمومتر امکان‌پذیر بوده و در مورد حوادث محلی محتمل نیست. فلذا با وجود رخداد ذوب محلی و MDNBR زیر ۱، امکان عدم خاموشی اضطراری ناشی از MDNBR محلی بالا است.

۳.۴.۲.۴ رخداد انسداد موضعی جریان

رخدادهای منجر به این حوادث ترکیبی از حوادث نوع گذار پیش‌بینی شده بدون رخداد خاموشی اضطراری^۲ (ATWS) می‌باشند که با توجه به حدود ایمنی مندرج در جدول ۳ شرایط هیچ کدام از رخدادها منجر به گذر از حدود ایمنی و فرمان خاموشی اضطراری نمی‌شوند. اما در حوادث مذکور درصدهای حجمی بخار بالای صفر، خشکی سطح و ذوب محلی رخ می‌دهد. سه مورد حوادث اصلی و چهار مورد ترکیب این حوادث مورد بررسی قرار گرفته که ترکیبی از حوادث مبنا مانند خرابی تک پمپ و انسداد ناشی از گیر کردن قطعات مانده یا بادکردگی^۳ ناشی از سوختن سوخت و حوادث تغییر وضعیت گذرای رآکتور مانند افزایش مقدار توان می‌باشند. حوادث وخیم‌تر می‌توانند منجر به درصد حجمی بخار و میزان ذوب محلی بالاتر شوند. با توجه به شروع حادثه از شرایط پایدار، شرایط مرزی در خلال حادثه توسط کد محاسبه می‌شود. از ثانیه صفر ام تا ۵۰ ام شرایط کاری پایا تعریف شده است. در جدول ۴ سناریوهای مورد بررسی نوع انسداد محلی جریان در پژوهش اخیر لیست شده‌اند.

1. Hot Leg
2. Anticipated Transient Without Scram
3. Ballooning



۴۸٪ تقلیل می‌یابد. فشار کلی قلب از ثانیه ۵۰ تا ۸۰ ام با کاهش میزان جریان خنک‌کننده ورودی به قلب به میزان ۶۰٪ نامی و سپس در ثانیه ۱۰۰ ام به ۵۵٪ نامی می‌رسد. اما به دلیل اثر فشارنده مجدداً شروع به افزایش کرده و تا ثانیه ۱۴۰ ام به ۹۶٪ نامی افزایش یافته و ثابت می‌ماند.

۵.۲ اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی محاسبات حوادثی که قبلاً مورد تحلیل قرار نگرفته‌اند با توجه به نبود نتایج برای حالت گذار، می‌بایست مقایسه نتایج برای حالت پایدار صورت‌گرفته و سپس بعد از اعتبارسنجی در شرایط پایدار، تحلیل حالت گذار انجام شود. جدول ۵ مقایسه نتایج پژوهش اخیر با تحقیق‌های صورت‌گرفته و FSAR را نشان می‌دهد.

مقایسه نتایج پژوهش اخیر با نتایج فعالیت‌های صورت گرفته و FSAR نشان‌گر انطباق و دقت بالای مدل می‌باشد.

۶.۲ عدم قطعیت مدل

با توجه به این‌که نتایج خروجی کد محاسباتی COBRA می‌تواند با مقادیر واقعی و در عمل اختلاف داشته باشد، میزان عدم قطعیت در محاسبه کمیت‌های دارای اهمیت در جدول ۶ بیان شده است [۱۶].

۳. نتایج

در این بخش تلاش می‌شود، با هدف بررسی هفت حادثه از نوع انسداد محلی جریان، نتایج بررسی کمیت‌های اساسی گزارش شود.

جدول ۵. اعتبارسنجی مقادیر کمیت‌ها

کمیت	پژوهش آخر	میکروکلی [۱۵]	FSAR	درصد خطا نسبت به FSAR
متوسط دمای خنک‌کننده در طول قلب (K)	۵۸۱٫۷	۵۸۳٫۰۵	۵۷۹	٪۰٫۴
متوسط دمای خنک‌کننده در خروجی قلب (K)	۵۹۴٫۴	۵۹۵٫۲۴	۵۹۴	٪۰٫۰۷
بیشینه آنتالپی سوخت (KJ/Kg)	۲۵۶	۲۷۵	۹۶۳<	-
متوسط افت فشار در طول قلب (KPa)	۱۲۲٫۰۵	۱۱۴٫۵	N/A	-

جدول ۶. مقادیر میزان عدم قطعیت نتایج محاسبات کد Cobra/En

کمیت	عدم قطعیت	کمیت	عدم قطعیت
فشار	±/۱	نرخ جریان جرمی	±/۱
سطح زیرکانال	±/۰٫۵	ضریب اختلاط تک فاز	±/۴۲
توان	±/۱٫۵	دمای ورودی	±۱٫۵ °k

بررسی قرار گرفته است. سطح توان نسبی از ثانیه ۵۵ ام تا ۱۰۵ ام افزایش یافته و به سطح توان ۱۱۷٪ می‌رسد و ثابت می‌ماند. درخصوص فشار کلی قلب این کمیت نیز ثابت می‌ماند.

۵.۲.۴.۲ رخداد ATWS۵

سناریو ATWS۵ ترکیبی از رخداد انسداد محلی در ورودی کانال و خرابی یک پمپ می‌باشد. درخصوص جریان گذرا از قلب، از ثانیه ۵۰ تا ۸۰ نرخ جریان جرمی در اثر خرابی یک پمپ تا ۱۸٪ و سپس تا ثانیه ۱۰۰ ام تا ۲۲٪ کاهش می‌یابد. سطح توان نسبی از ثانیه ۵۵ تا ۶۰ ام به دلیل فرمان کاهش سطح توان نسبی ناشی از خرابی یک پمپ منطبق با اسناد ATWS به سطح توان ۶۶٪ می‌رسد و ثابت می‌ماند. فشار کلی قلب از ثانیه ۵۰ تا ۸۰ ام با کاهش میزان جریان خنک‌کننده ورودی به قلب به میزان ۸۴٪ نامی و در ثانیه ۱۰۰ ام به ۸۰٪ نامی می‌رسد. اما به دلیل اثر فشارنده مجدداً شروع به افزایش می‌کند و تا ثانیه ۱۴۰ ام به ۹۶٪ نامی رسیده و ثابت می‌ماند.

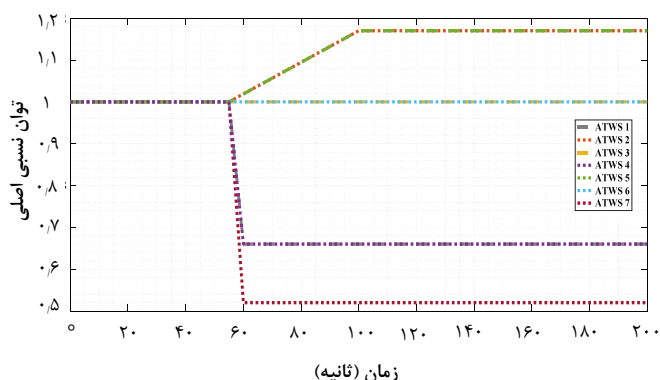
۶.۲.۴.۲ رخداد ATWS۶

در سناریو ATWS۶ ترکیبی از رخداد انسداد محلی در ورودی کانال و خرابی یک پمپ مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه فرض شده، کاهش سطح توان پیش‌بینی شده ناشی از رخداد خرابی پمپ، به دلیل گیر افتاد میله کنترل در زمان سقوط ناشی از وجود انسداد در کانال مربوطه صورت نگرفته است. جریان گذرا از قلب، از ثانیه ۵۰ تا ۸۰ در اثر خرابی یک پمپ تا ۱۸٪ و سپس تا ثانیه ۱۰۰ تا ۲۲٪ کاهش دارد. سطح توان نسبی به دلیل عدم سقوط میله کنترلی در کانال مربوطه به دلیل انسداد به صورت محلی ثابت می‌ماند. فشار کلی قلب از ثانیه ۵۰ تا ۸۰ ام با کاهش میزان جریان خنک‌کننده ورودی به قلب به میزان ۸۴٪ نامی و در ثانیه ۱۰۰ ام به ۸۰٪ نامی کاهش می‌یابد. اما به دلیل اثر فشارنده مجدداً شروع به افزایش می‌کند و تا ثانیه ۱۴۰ ام به ۹۶٪ نامی رسیده و ثابت می‌ماند.

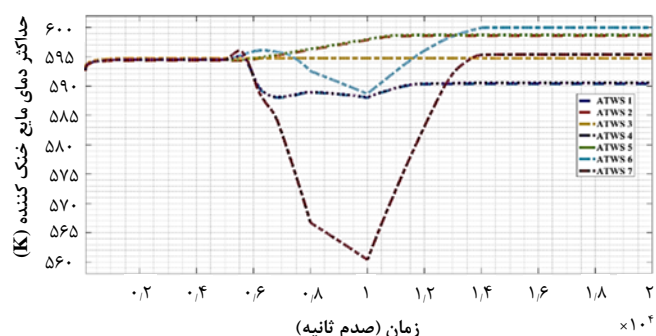
۷.۲.۴.۲ رخداد ATWS۷

سناریو ATWS۷ ترکیبی از رخداد انسداد محلی در ورودی کانال و خرابی دو پمپ می‌باشد. در خصوص جریان گذرا از قلب، از ثانیه ۵۰ تا ۸۰ نرخ جریان جرمی در اثر خرابی دو پمپ تا ۴۶٪ و سپس تا ثانیه ۱۰۰ تا ۵۰٪ کاهش دارد. سطح توان نسبی از ثانیه ۵۵ تا ۶۰ ام به دلیل فرمان کاهش سطح توان نسبی ناشی از خرابی پمپ منطبق با اسناد ATWS تا به سطح توان ۵۲٪ می‌رسد و ثابت می‌ماند. در ATWS۷ حالت مدنظر خرابی پمپ‌های ضرب‌دوری بوده و در حالت سری سطح توان به





شکل ۴. خروجی توان نسبی در رخداد‌های مختلف انسداد محلی جریان.



شکل ۵. خروجی بیشینه دمای خنک‌کننده در رخداد‌های مختلف.

۳.۲ روند تغییرات میزان فشار قلب

سناریوهای تغییرات میزان فشار قلب جز شرایط مرزی بوده و مستقیماً به مدل اعمال می‌گردند. در شرایط مرزی اعمالی هر چند نوسان‌ها به دلیل تفاوت‌های آبی اعمال نشده اما با توجه به هدف پژوهش که یافتن شرایط خشکی سطح سوخت و رخداد متعاقب ذوب سوخت بدون ورود خاموشی اضطراری بوده است، تأثیری در نتایج ندارد. همان‌طور که در شکل ۶ مشهود است؛ در ATWS₂ به دلیل تحت کنترل بودن حین گذار و در ATWS₃ به دلیل ماهیت محلی، میزان فشار کل قلب تغییری نکرده و ثابت می‌ماند. اما در سناریوهای ATWS₁، ATWS₅، ATWS₆، ATWS₇ مرتبط با افت جریان ناشی از خاموشی یک یا دو پمپ ابتدا میزان فشار قلب منطبق بر روند گفته شده در اسناد ATWS و FSAR کاهش پیدا کرده و به ترتیب تا ۸۰٪ و ۵۵٪ مقدار اصلی می‌رسد اما در اثر تأثیر فشارنده بسته به نظر اسناد مختلف به میزان ۹۶٪ و ۹۴٪ نامی افزایش می‌یابند. فلذا حوادث مذکور از بابت میزان افت فشار قلب، دچار گذار از حدود ایمنی و رخداد خاموشی اضطراری نمی‌باشند.

۴.۲ روند تغییرات جریان خنک‌کننده ورودی در حوادث

همان‌طور که در شکل ۷ مشهود است؛ بیشینه میزان تغییرات جریان خنک‌کننده ورودی در شرایط گذار در حادثه ATWS₇ بوده که این میزان کاهش در صورتی که بدون رعایت روند FSAR می‌تواند موجب ذوب کلی قلب شود.

۱.۳ روند تغییرات نسبی توان تولیدی در حوادث

نقاط شروع رخداد‌های مورد بررسی شرایط پایدار کاری رآکتور بوده و روند تغییرات نسبی توان در زمره شرایط اولیه و مرزی ورودی در نظر گرفته شده است. این روند دقیقاً منطبق بر اسناد ATWS و FSAR و باتوجه به اعمال شرایط نوترونیک و ترموهیدرولیک مربوطه از جمله افتادن میله کنترلی و یا خروج آن از قلب، اثر فشارنده و تأثیر توربین پیاده‌سازی شده است. در شرایط مرزی اعمالی هر چند نوسانات جزئی به دلیل تفاوت‌های آبی اعمال نشده‌اند اما با توجه به هدف پژوهش که یافتن شرایط خشکی سطح غلاف و رخداد ذوب سوخت، در شرایط عدم خاموشی اضطراری بوده است، تأثیری در نتایج ندارد. همچنین اثر سموم نوترونی به دلیل زمان‌بر بودن در نظر گرفته نشده است. منطبق بر شکل ۴ میزان توان نسبی در ATWS₃ که مربوط به رخداد گرفتگی در کانال گرم می‌باشد، تغییری نمی‌کند. در سناریو ATWS₆ نیز به دلیل این‌که انسداد مانع ورود میله کنترلی می‌شود به صورت محلی، میزان توان ثابت در نظر گرفته شده است. در ATWS₁ و ATWS₅ سناریوهای از دست رفتن یک پمپ می‌باشند، به دلیل روش کار ذکر شده در مستندات FSAR برای حوادث ATWS که بر روی سیستم اتوماتیک پیاده‌سازی شده است، میزان توان ظرف مدت ۵ ثانیه به میزان ۶۶٪ تقلیل یافته و ثابت می‌ماند. در سناریوهای افزایش توان ATWS₂ و ATWS₄ افزایش ۱۷٪ به صورت شیب در بازه زمانی ۵۵ ثانیه تا ۱۰۰ ثانیه بوده که از حدود خاموشی اضطراری کمتر است. نهایتاً در خصوص سناریو ATWS₇ منطبق بر اسناد FSAR به دلیل خاموشی دو پمپ (ضرب‌دوری) سطح توان به میزان ۵۲٪ توان اولیه تقلیل می‌یابد. نظر به شرایط خاموشی اضطراری ارایه شده در جدول ۴ حوادث مذکور از بابت تغییرات نسبی توان، دچار گذار از حدود ایمنی و رخداد خاموشی اضطراری نمی‌باشند.

۲.۳ روند تغییرات بیشینه دمای خنک‌کننده

منطبق بر شکل ۵، میزان تغییرات دمایی در خلال حوادث کم‌تر از ۱٪ بوده و بیشینه مقدار آن در ATWS₆، ۵۹۸ کلوین بوده که کم‌تر از حدود ایمنی و مقدار لازم برای خاموشی اضطراری می‌باشد. همچنین، تغییرات دمای خنک‌کننده زمان‌بر بوده و در دماهای بالا انجام تزریق آب با سیستم‌های ECCS، افزایش توان توربین و کاهش توان تولیدی ناشی از کاهش چگالی کندکننده مقدم بر خاموشی اضطراری می‌باشد. فلذا حوادث مذکور از بابت تغییرات دمای متوسط خنک‌کننده، دچار گذار از حدود ایمنی و رخداد خاموشی اضطراری نمی‌باشند.



۵.۳ بیشینه درصد حجمی بخار در حوادث

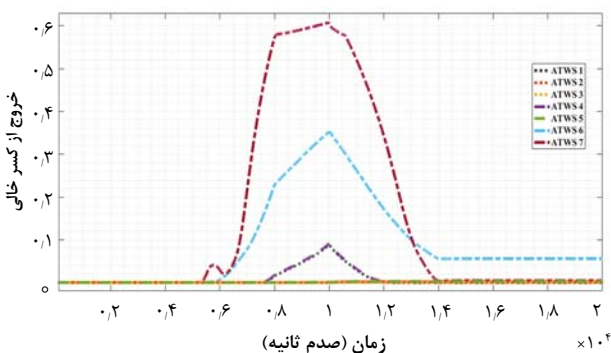
منطبق بر شکل‌های ۸ و ۹ تمامی این حوادث دارای درصد حجمی بخار بالای صفر می‌باشند و طبیعاً در هر حادثه‌ای که میزان افت فشار قلب بیش‌تر، دمای ورودی بالاتر، نرخ جریان کم‌تر و یا مؤلفه‌های طراحی برخلاف مؤلفه‌های ترموهیدرولیکی باشد، درصد حجمی بخار بالاتری ایجاد می‌شود. حوادثی که شرایط خاموشی اضطراری را ایجاد نمی‌کنند ولی به صورت محلی درصد حجمی بخارهای بالاتر از صفر و ذوب محلی سوخت را در پی دارند. با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ بیش‌از ۱۲ دقیقه درصد حجمی بالای ۷۰٪ در ATWS۷ و باقی با نسبت کم‌تر تجربه می‌شود که به راحتی برای ذوب غلاف کافی است.

۶.۳ بیشینه دمای سوخت در حوادث

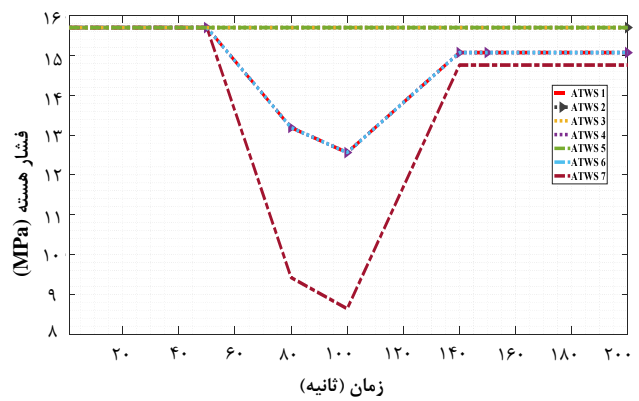
همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود؛ بیشینه دمای سوخت در سناریوی مرتبط با خاموشی یک پمپ، وجود انسداد محلی و عدم کاهش توان به دلیل گیر کردن میله کنترلی توسط انسداد مربوطه، به میزان ۱۲۹۷ K می‌باشد. در حوادث گذرای مذکور شرایط لازم برای خاموشی اضطراری ایجاد نمی‌شود. شایان ذکر است، با وخیم‌تر شدن این حوادث حداقلی برای رخداد درصد حجمی بخار بالای صفر، میزان دمای بیشینه سوخت نیز افزایش می‌یابد. البته همان‌طور که بیان شد قطعاً دما بالاتر از دمای ذوب می‌رود اما احتمال عدم تشخیص حادثه خصوصاً در نقاط با فاصله از ترمومترها بالاست.

۷.۳ مقایسه حدود خاموشی اضطراری و نتایج فعلی

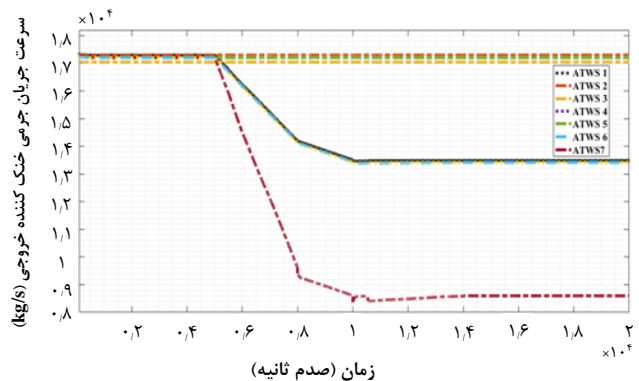
در جدول ۷ حدود خاموشی اضطراری با وخیم‌ترین مقادیر کمیت‌های حوادث موجود مقایسه شده که مبین عدم گذار از حدود لازم برای خاموشی اضطراری بوده است.



شکل ۸. متوسط درصد حجب بخار خروجی در رخداد‌های مختلف.



شکل ۶. تغییرات فشار قلب در رخداد‌های مختلف انسداد محلی جریان.



شکل ۷. میزان جریان جرمی خروجی در رخداد‌های مختلف انسداد محلی.

اما با افزایش میزان فشار با استفاده از فشارنده و ایجاد توازن بین توان تولیدی و برداشتی از طریق کاهش توان به‌وسیله وارد کردن میله‌های کنترلی شماره ۱۳ مدیریت می‌شود. در سناریوهای ATWS۱، ATWS۵ و ATWS۶ مندرج در FSAR میزان جریان خنک‌کننده گذرا از قلب به میزان ۲۲٪ کاهش یافته و به سطح ۷۸٪ نامی می‌رسد. در حادثه ATWS۳ میزان جریان خنک‌کننده گذرا از قلب به دلیل افزایش میزان مقاومت کانال مربوطه به میزان کم‌تر از ۱٪، که عددی ملموس نمی‌باشد، تغییر پیدا می‌کند که می‌توان جریان خنک‌کننده گذرا را تقریباً ثابت در نظر گرفت. هم‌چنین سناریوهای ATWS۲ و ATWS۴ مرتبط با تغییرات نوترونیک بوده فلذا به تغییرات ترموهیدرولیک ارتباطی ندارد و میزان جریان خنک‌کننده گذرا از قلب ثابت باقی می‌ماند. در ATWS۷ نیز به دلیل خاموشی دو پمپ میزان جریان خنک‌کننده گذرا از قلب به میزان ۵۰٪ کاهش می‌یابد. فلذا حوادث مذکور از بابت تغییرات جریان خنک‌کننده ورودی به قلب، دچار گذار از حدود ایمنی و رخداد خاموشی اضطراری نمی‌باشند.

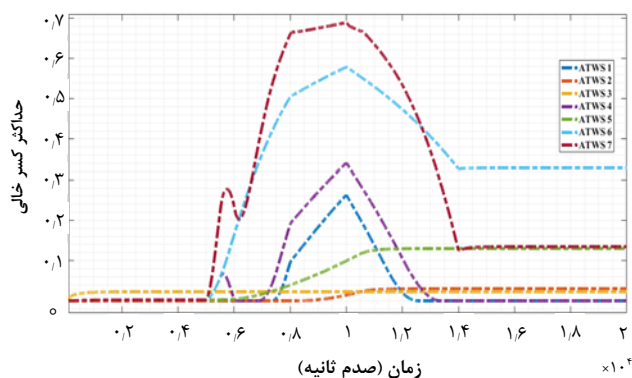


توربین کنترل گردد. فلذا درخصوص خاموشی اضطراری نباید مطمئن بود و تحلیل حالت گذار به صورت محتاطانه در نظر گرفته شده است. میزان افزایش افت فشار پایدار کانال در سناریوهای حداقلی لازم برای درصد حجمی بخار بالای صفر در بیشترین حالت افت ۴٪ می باشد که با مقدار لازم برای خاموشی اضطراری رآکتور که مقدار ۷٪ می باشد بیش از ۳٪ فاصله دارد.

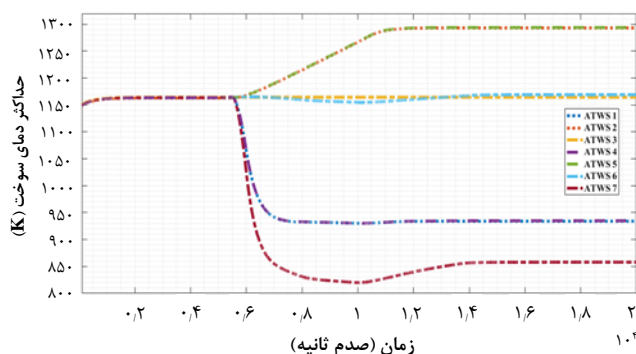
با وجود این که میزان MDNBR در این حوادث به صورت محلی به زیر عدد ۱ می رسد لیکن در آن بازه زمانی هم برای کل قلب زیر ۱٫۵ نمی باشد. میزان افزایش توان نسبی در بیشترین حالت ۱۷٪ می باشد که با میزان حدود خاموشی اضطراری که ۱۸٪ می باشد، بیش از ۱٪ فاصله دارد.

۴ نتیجه گیری

هدف از پژوهش اخیر، تحلیل حالت گذار حوادث منجر به ذوب محلی یا بخشی غلاف در شرایط کار عادی رآکتور و عدم رخداد خاموشی اضطراری بوده است. سه حادثه اصلی از نوع حوادث ATWS و چهار حادثه ترکیبی از این نوع با محاسبات ترموهیدرولیک توسط کد COBRA/en و محاسبات پروفایل توزیع توان توسط کد MCNPx، مورد تحلیل قرار گرفتند. در موارد مورد مطالعه ترکیب هایی از رخدادهای خاموشی یک پمپ ورودی به قلب و انسداد در ورودی کانال، افزایش توان نسبی بررسی شدند. بیشترین میزان کاهش نرخ جریان جرمی در تمامی سناریوها از حدود اسکرم، ۱۸٪ کم تر بوده است. بیشترین میزان افت فشار کانال در تمامی سناریوها از حدود اسکرم، ۴۷۰ کیلو پاسکال کم تر بوده و بیشترین میزان دمای غلاف سوخت در تمامی سناریوها از حدود اسکرم، ۲۰۴ درجه کلون کم تر بوده است. کمترین میزان MDNBR ۱٫۵ بوده که حدود خاموشی اضطراری را رد نکرده است. فلذا در هیچ کدام از این حوادث خاموشی اضطراری رخ نمی دهد. حداکثر میزان درصد حجمی بخار ۷۰٪ کانال بوده و در شرایط وخیم تر، میزان درصد حجمی بخار افزایش پیدا می کند. نتیجتاً، در شرایط عادی کار نقاط دارای خشکی غلاف و ذوب محلی محدود سوخت وجود داشته و باید مورد شناسایی قرار گیرد. زمان رخداد این درصد حجمی خشکی بیش از ۱۲ دقیقه بوده که با توجه به این که در بدبینانه ترین شرایط عدم قطعیت در نتایج به دست آمده ۱٪ می باشد، نتایج به دست آمده قطعی می باشند. در شرایط گذار مورد بررسی اثر فشارنده نیز دیده شده است. با توجه به اهمیت شناسایی نقاط خشک، ضرورت یک سیستم مانیتورینگ افزونه قلب به منظور تشخیص حوادث مطروحه مشاهده می شود.



شکل ۹. بیشینه درصد حجمی بخار در رخدادهای مختلف انسداد محلی.



شکل ۱۰. خروجی بیشینه مقدار دمای سطح سوخت در رخدادهای مختلف.

جدول ۷. مقایسه مقادیر کمیتها و حدود خاموشی اضطراری

کمیت	مقدار لازم برای خاموشی اضطراری	حداکثر میزان در رخدادهای
میزان جریان خنک کننده	کاهش ۵۰٪	کاهش ۳۲٪
افزایش میزان دمای ورودی	حداکثر ۸ درجه کلون از مقدار اصلی	به صورت محلی بیش تا ۱۴ درجه
خط داغ	بیش از ۷٪	تا ۴٪
افزایش افت فشار	زیر ۱٫۲	تا ۱٫۵
MDNBR	۱٫۸	۱٫۷
افزایش توان نسبی		

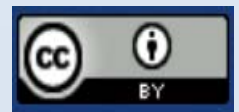
مقدار جریان خنک کننده در سناریوهای حداقلی لازم برای درصد حجمی بخار بالای صفر در بیشترین حالت افت ۳۲٪ را داشته که ۶۸٪ جریان خنک کننده موجودی بوده است که با مقدار لازم برای خاموشی اضطراری رآکتور که مقدار ۵۰٪ در توان بالای ۷۵٪ می باشد بیش از ۱۸٪ فاصله دارد. میزان افزایش دمای ورودی تنها در یک سناریو بیش تر از ۸+ درجه می باشد که سناریو شماره ۶ از موارد مذکور در جدول ۴ می باشد. با توجه به محدودیت وجود سنسورها و محلی بودن حادثه، تضمینی بر شناسایی این نقطه وجود ندارد ولی در محاسبات گام به گام انجام شده شناسایی به وقوع پیوسته است. ضمن این که این افزایش دما به مدت محدود تا ۱۵ دقیقه بوده و خاموشی اضطراری در مورد این کمیت در لحظه رخ نمی دهد و در مرحله نخست تلاش می گردد تا با تزریق آب سرد و فشار



1. H. Nakamura, *Particle Modeling of Fuel Plate Melting during Coolant Flow Blockage in HFIR*, PhD Diss., University of Tennessee, https://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/2719, Chapter 4, Model Test Cases, 67-74 (2014).
2. J. Zhang, S. Yu, Y. Yan, *Fixed-time output feedback trajectory tracking control of marine surface vessels subject to unknown external disturbances and uncertainties*, *ISA Transactions*, **93**, 145-155 (2019).
3. E.E. Lewis, *Nuclear power reactor safety*, John Wiley, Chapter 7, *Coolant Transients*, 312-365 (1977).
4. R. Gharari, et al., *Study of flow path blockage accident around a hot fuel rod*, in: *1st Power Engineering and Nuclear Power Plant Conference*, Bushehr, Iran, November 21-22 (2016).
5. H.N. Dehjurian, *Analysis Of Conjugate Conduction-Convection Heat Transfer In Nuclear Reactor Fuel Assembly*, In *Mechanical*. Shiraz University (2015).
6. Y. Guo, et al., *Analysis of Flow Blockage of a Single Fuel Assembly in the JRR-3 20MW Research Reactor*, In *2018 26th International Conference on Nuclear Engineering*, ASMEDC (2018).
7. B.R. Sehgal, *Nuclear safety in light water reactors: severe accident phenomenology*, Academic Press (2011).
8. I. Khamis, *SAMG-D: The IAEA Training Toolkit on The Development of Severe Accident Management Guidelines*, (2017).
9. P. Constantin, *Note on loss of regularity for solutions of the 3D incompressible and related equations*, *Commun. Math. Phys.* **106**, 311-325 (1986).
10. I. Kataoka, A. Serizawa, *Basic equations of turbulence in gas-liquid two-phase flow*, *International Journal of Multiphase Flow*, **15(5)**, 843-855 (1989).
11. L. Ammirabile, *Studies on supercritical water reactor fuel assemblies using the subchannel code COBRA-EN*, *Nuclear Engineering and Design*, **240(10)**, 3087-4903 (2010).
12. D. Reddy, S. Sreepada, A. Nahavandi, *Two-Phase Friction Multiplier Correlation for High-Pressure Steam-Water Flow*, EPRI NP-2522, Research Project, 813 (1982).
13. L.S. Waters, *MCNPX user's manual*, Los Alamos National Laboratory, (2002).
14. (AEOI), A.e.o.o.I., *Inspection and Control Systems (I&A): Chapter 7, in Final Safety Assurance Report 2007*, Federal State Unitary Enterprise "Research, Design, and Engineering Survey Institute "Atomenergoproekt": Moscow (2007).
15. S.S. Arshi, S. Mirvakili, F. Faghihi, *Modified COBRA-EN code to investigate thermalhydraulic analysis of the Iranian VVER-1000 core*, *Progress in Nuclear Energy*, **52(6)**, 589-595 (2010).
16. M. Avramova, et al., *Uncertainty analysis of COBRA-TF void distribution predictions for the OECD/NRC BFBT Benchmark*, in *Proceedings of the International Conference on Advances in Mathematics, Computational Methods, and Reactor Physics (M&C'09)*, (La Grange Park, IL: American Nuclear Society) (2009).

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

بهزاد سلماسیان، عطاءاله ربیعی، محمدرضا نعمت‌اللهی، احمد پیروزمند (۱۴۰۱)، ارزیابی حالت گذار حوادث منجر به ذوب محلی بدون رخداد خاموش‌سازی اضطراری با تلفیق کدهای محاسباتی MCNPx و COBRA/En، ۱۰۰، ۱۴۸-۱۵۷

DOR: 20.1001.1.17351871.1401.43.2.17.2

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1394.html

