

تحلیل ترموهیدرولیک و تخمین تولید هیدروژن در حوادث شدید WWER1000

رحمان قراری^۱، حسین کاظمی نژاد^{۲*}، نعیم‌الدین متاجی کجوری^۱، افشین هدایت^۱، محسن حسنونند^۳
۱. پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران-ایران
۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران-ایران
۳. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران-ایران

*Email: hkazeminejad@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۸/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۲/۶

چکیده

مدیریت حوادث شدید در نیروگاه‌های هسته‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای مدیریت حوادث شدید نیاز است تا شرایط ترموهیدرولیکی رآکتور هسته‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد. در این مقاله حوادث شدید قطع برق، قطع برق به همراه شکست بزرگ و قطع برق به همراه شکست کوچک در رآکتور WWER1000/V446 با کد MELCOR1.8.6 ارزیابی می‌شود. از کد RELAP3.2-SCDAP برای ارزیابی پارامترهای محفظه تحت فشار بهره گرفته شد. هدف از این مطالعه بررسی ترموهیدرولیکی رآکتور در حوادث مذکور به ویژه میزان تولید هیدروژن است. با ارزیابی نتایج مشاهده گردید، حادثه قطع برق بیش‌ترین مقدار تولید هیدروژن (۲۱۵۰ کیلوگرم) را طی فاز داخلی و خارجی حادثه شدید دارد و بیشینه دمای سوخت زودتر از بقیه حوادث (۱۱۸۰۰ ثانیه) رخ می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی با کدها و نتایج تحلیل گزارش نهایی ایمنی رآکتور WWER1000/V446 تطابق خوبی دارند. با استفاده از نتایج ارائه شده، تحلیل روند حادثه شدید امکان‌پذیر می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: حوادث شدید، WWER1000/V446، MELCOR، RELAP3.2-SCDAP

Thermal hydraulic analysis and estimation of hydrogen generation in severe accidents in WWER1000

R. Gharari¹, H. Kazeminejad^{*2}, N. Mataji Kojouri¹, A. Hedayat¹, M. Hassan vand³

1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 14155-1339, Tehran – Iran
2. Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 11365-3486, Tehran –Iran
3. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 11365-8486, Tehran-Iran

Research Article

Received 1.11.2020, Accepted 24.2.2021

Abstract

Severe Accidents Management (SAM) in nuclear power plants is an important safety issue. SAMs require assessing the thermal-hydraulic conditions of the nuclear reactor during the accident. This paper investigates three accident scenarios, Station Black-Out (SBO), SBO with Large Break Loss of Coolant Accident (LBLOCA), and SBO with Small Break Loss of Coolant Accident (SBLOCA) in the WWER1000/V446 reactor using the MELCOR1.8.6 code. The RELAP3.2-SCDAP code is also used to evaluate the accuracy of the reactor pressure vessel parameters. The purpose of this study was to determine the operating conditions of the reactor during the accident scenarios with emphasis on hydrogen production. The results showed that the SBO has the highest hydrogen production (2150 kg) compared to other accidents and the maximum fuel temperature occurred sooner than the other SAs (11800 seconds). The results obtained by the two codes and the Final Safety Analysis Report (FSAR) of the WWER1000/V446 reactor showed good agreement. The results of this analysis help make the appropriate decision in SAM.

Keywords: Severe accidents, WWER1000/V446, MELCOR, RELAP3.2-SCDAP



۱. مقدمه

حوادث شدید به حادثی اطلاق می‌شوند که با ذوب و ریزش قلب رآکتور همراه هستند. یکی از مهم‌ترین پدیده‌های مرتبط با حوادث شدید در رآکتورهای با خنک‌کننده آبی مقدار و نرخ تولید هیدروژن است. با نگاهی به تاریخ حوادث شدید در نیروگاه‌های هسته‌ای بخصوص تری مایل آیلند، چرنوبیل و فوکوشیما پی می‌بریم که این وقایع از جمله حادثی هستند که عدم مدیریت هیدروژن تولید شده و انفجار آن سبب از هم گسیختگی ساختمان رآکتور و یا محفظه ایمن و نشت مواد پرتوزا به محیط و خسارت‌های جانی و مالی شد. این حوادث اهمیت کنترل هیدروژن تولیدی را به خوبی نمایان می‌کنند. وقوع این حوادث و نشست‌های اخیر آرژانس بین‌المللی انرژی اتمی مؤید این هستند که راهبردهایی برای مواجهه با حوادث شدید و کاهش هیدروژن در طراحی نیروگاه در نظر گرفته شوند. شبیه‌سازی و مدل‌سازی با کدهای مختلف معمول‌ترین و کم‌هزینه‌ترین راهی است که برای ارزیابی عملکرد سیستم واقعی در مواجهه با حوادث به کار می‌آید [۱].

از جمله مهم‌ترین کدهای تحلیل حوادث می‌توان به MELCOR و RELAP-SCDAP اشاره کرد. کد MELCOR توسط آزمایشگاه ملی سندیا ارایه شده است که طیف وسیعی از پدیده‌های مرتبط با حوادث شدید را تحلیل می‌کند. از جمله این پدیده‌ها می‌توان به پاسخ ترموهیدرولیکی قلب رآکتور و محفظه ایمنی، ریزش قلب رآکتور و مواد پرتوزا به محفظه ایمنی، گرمایش مستقیم محفظه ایمنی، اکسیداسیون، انتقال و احتراق هیدروژن و واکنش مذاب با بتون چاهک اشاره کرد. کد MELCOR شش معادله بقا (جرم، انرژی و اندازه حرکت) را برای دو فاز شبه ضمنی در نظر گرفته و با روش تفاضل محدود حل می‌کند. کد RELAP-SCDAP یکی دیگر از مهم‌ترین کدهای تحلیل حوادث شدید است که توسط آزمایشگاه ملی آیداهو در سال ۲۰۰۱ منتشر شد [۲]. کد RELAP به تحلیل پاسخ ترموهیدرولیکی قلب طی حادثه می‌پردازد. زیر برنامه SCDAP برای تحلیل ذوب قلب به کار می‌رود. زیر برنامه دیگری در این کد با نام COUPLE به کار گرفته شده است که گسیختگی محفظه تحت فشار را با روش المان محدود دوبعدی بررسی می‌نماید. به صورت کلی این کد معادلات بقا را برای دو فاز به صورت جداگانه به صورت یک بعدی و شبه ضمنی حل می‌کند [۳].

محققان مختلفی بر روی تحلیل حوادث شدید کار کرده‌اند. در سال ۲۰۱۵، پولو لابیوس و همکارانش به مطالعه حادثه شدید قطع برق نیروگاه با استفاده از کدهای MELCOR و

RELAP-SCDAP پرداختند. در این کار به تفاوت‌ها و قابلیت‌های دو کد اشاره شده است. هر دو کد به خوبی توانستند حادثه را مدل نمایند [۴]. در سال ۲۰۱۶، لی و همکارانش حوادث قطع برق نیروگاه و کاهش جریان خنک‌کننده در رآکتور آب جوشان با کد MELCOR را تحلیل کردند. بر طبق نتایج به‌دست آمده، میزان تولید هیدروژن در حادثه قطع برق نیروگاه به سبب کاهش آرام جریان خنک‌کننده بیش‌تر از حادثه شکست بزرگ است [۵]. در سال ۲۰۱۵، یانیز و همکارانش به بررسی مقدار هیدروژن مؤثر در حادثه انفجار رآکتور فوکوشیما پرداختند. نتایج نشان داد که مقادیر کم هیدروژن نیز می‌تواند سبب انفجار شوند [۶]. لی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ برای رآکتور CPR1000 با استفاده از کد MELCOR حادثه قطع برق کل نیروگاه را مدل کردند تا با این بررسی راهنمایی برای مدیریت حوادث شدید برای متخصصان فراهم نمایند [۷]. در نهایت بررسی دیگری در ارتباط با رآکتور WWER1000 طی حادثه قطع برق نیروگاه طی خرابی شیر اطمینان فشارنده و عدم کارکرد صحیح شیر توسط گردو و همکارانش انجام گرفت. در این مطالعه اثرات شکل قسمت تحتانی مخزن تحت فشار رآکتور نیز بررسی شد. براساس نتیجه مطالعه مزبور در صورتی که شکل قسمت تحتانی مخزن بیضوی باشد، زمان گسیختگی مخزن طولانی‌تر از حالتی است که شکل آن کروی باشد [۸]. گانت و همکارانش تحلیل مقدار هیدروژن تولیدی را برای رآکتور سکویا طی حادثه قطع برق نیروگاه انجام دادند. نتایج نشان دادند که متوسط تولید هیدروژن بین ۱۴۵ و ۵۷۸ کیلوگرم است [۹].

در این مقاله تغییرات پارامترهای ترموهیدرولیکی به ویژه میزان تولید هیدروژن طی سه حادثه قطع برق، قطع برق به همراه شکست بزرگ در خط لوله سرد و قطع برق به همراه شکست کوچک برای رآکتور WWER1000/V446 [۱۰] تحلیل و مقایسه می‌شود. در ادامه در بخش مواد و روش‌ها، پدیده‌های حادثه شدید و نحوه تولید هیدروژن به طور مختصر شرح داده می‌شود. در بخش تئوری و محاسبات، نحوه مدل‌سازی حوادث مختلف با کدهای MELCOR و RELAP-SCDAP توضیح داده می‌شود. در بخش نتایج و بحث به صورت مفصل خروجی‌های مدل‌سازی شرح داده می‌شوند و نهایتاً در بخش نتیجه‌گیری، نتایج کلی از مقاله به طور خلاصه ذکر می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

حوادث شدید مرتبط با نحوه خنک‌سازی رآکتور یکی از شرایط نیروگاهی است که به دنبال کاهش و یا قطع جریان خنک‌کننده اتفاق می‌افتد. حادثه شدید به دو فاز داخلی و خارجی تقسیم‌بندی می‌شود. فاز داخلی به قبل از گسیختگی محفظه تحت فشار رآکتور و فاز خارجی به بعد از گسیختگی محفظه تحت فشار رآکتور گفته می‌شود. در رآکتورهای آب سبک اگر به دلیل نقص در سیستم‌های ایمنی، خنک‌کننده کافی به قلب رآکتور نرسد، دمای سوخت بالاتر می‌رود و بخار آب تشکیل شود. در ادامه بر اثر واکنش بخار آب و اکسیژن با غلاف زیرکالیوم و اکسیداسیون سایر تجهیزات داخل قلب رآکتور، هیدروژن تولید می‌شود. با گسترش حادثه، مذاب به قسمت پایینی محفظه تحت فشار فرو می‌ریزد و بر اثر واکنش با خنک‌کننده مقادیر زیادی بخار تولید می‌گردد. بخار آب تولید شده می‌تواند زیرکالیوم اکسید نشده باقی‌مانده در مذاب را، اکسید کرده و هیدروژن تولید کند. محدوده دمایی در طی حادثه از دمای اشباع سیال (۶۰۰ کلوین) تا دماهای بالاتر از ۳۱۰۰ کلوین (نقطه ذوب اورانیم اکسید) است. به مرور زمان و با ادامه روند گرمایش جداره پایینی دیواره محفظه تحت فشار فرو می‌ریزد و مواد مذاب به داخل چاهک رآکتور (فاز خارجی حادثه شدید) نفوذ می‌کنند. طی فاز خارجی حادثه شدید نیز، بر اثر واکنش مذاب با بتون چاهک، هیدروژن تولید می‌گردد. در ادامه نحوه مدل‌سازی با کدهای MELCOR و RELAP-SCDAP شرح داده شده است.

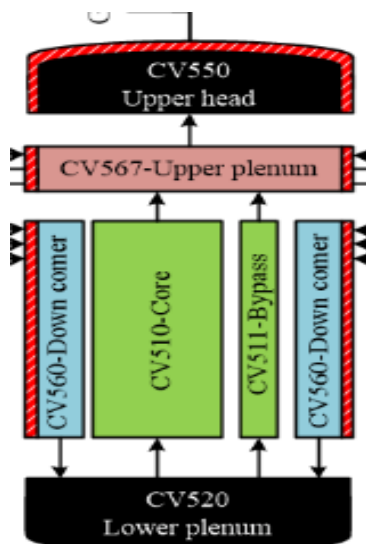
۳. تئوری و محاسبات

۱.۳ مدل‌سازی با استفاده از کد MELCOR

۱.۱.۳ قلب رآکتور و مدار اول

شکل ۱ مدل‌سازی قلب رآکتور را نشان می‌دهد. به منظور مدل‌سازی هیدروپدینامیکی، و همان‌طور که شکل نشان می‌دهد قلب رآکتور به شش حجم کنترل که با هفت مسیر جریان به هم متصل شده‌اند تقسیم شده است. سایر اجزاء مدار اول نیز به ترتیب مشابه و با استفاده از حجم‌های کنترلی تعیین و با استفاده از مسیرهای جریان به هم وصل شدند. در شکل ۲، مدل قلب رآکتور و پلنیوم پایین نشان داده شده است. قلب رآکتور به ۵ حلقه شعاعی هم‌مرکز و ۲۰ سطح محوری تقسیم‌بندی شده است. ۱۲ سطح در راستای محوری و سه حلقه محوری به قسمت فعال قلب رآکتور اختصاص داده شدند. مدل ساختار حمایتی قلب که مجتمع‌های سوخت بر روی آن می‌نشینند، در آخرین سطح محوری قبل از قسمت فعال قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین پارامترها در مدل‌سازی مشخص نمودن نوع ساختار حمایتی است. ساختارهای حمایتی^۱ نقش نگه‌دارندگی بقیه

تجهیزات را دارند. نوع ساختارهای حمایتی در پلنیوم پایین از نوع ستونی^۲ و صفحه‌ای هستند که در ورودی کد باید مشخص شوند. در قلب رآکتور نیز ساختارهای حمایتی از نوع صفحه‌ای^۳ هستند. شکل ۲ تقسیم‌بندی شعاعی، محوری قلب رآکتور و پلنیوم پایین را نیز نشان می‌دهد. جداره محفظه تحت فشار رآکتور در قسمت کله‌گی پایین نیز همان‌بندی شد. در این همان‌بندی دیواره کله‌گی پایین به پنج المان تقسیم‌بندی شده و برای هر المان نیز ضخامت جداره به صورت سه مش حجمی در نظر گرفته شده است. کلیه دیواره لوله‌ها، میله‌های سوخت، لوله‌های مولد بخار، دیواره محفظه تحت فشار و برل قلب^۴ به عنوان ساختارهای حرارتی در نظر گرفته شده‌اند. این ساختارها به عنوان چاه حرارتی نقش انتقال حرارت را دارند. مدار اول و دوم نیز با ۹۹ حجم کنترل و ۱۰۹ مسیر جریان مدل شده‌اند. پمپ‌های مدار اول به صورت FANA در نظر گرفته شده‌اند. لوله‌های مولد بخار در سه دسته طبقه‌بندی شده‌اند. هم‌چنین در مدل‌سازی شیرهای تخلیه فشارنده، سیستم اسپری فشارنده، شیرهای تخلیه بخار در سمت ثانویه مولدبخار و انباره‌های^۵ مرحله اول و دوم در نظر گرفته شده‌اند. آب تغذیه ورودی به قسمت پوسته مولد بخار و منبع بخار خروجی از پوسته مولد بخار به صورت حجم‌های کنترل تابع زمان در نظر گرفته شده است. در مسیر این آب ورودی و خروجی شیرهایی تعبیه شده‌اند که به محض وقوع حادثه بسته می‌شوند و سیستم ایزوله می‌گردد.



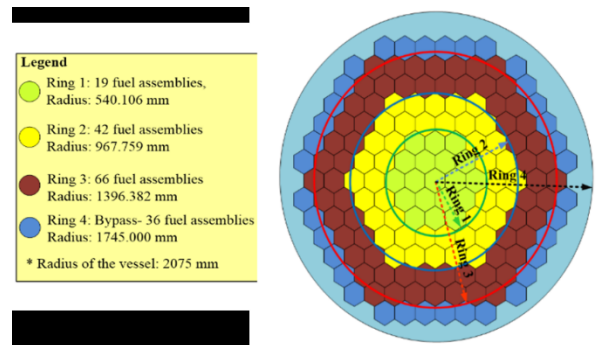
شکل ۱. مدل قلب رآکتور با کد MELCOR (حجم کنترل به همراه شماره آن CV - ساختار حرارتی: HS) مسیر جریان: (→)

2. Column Type
3. Plate Type
4. Core Barrel
5. Accumulators

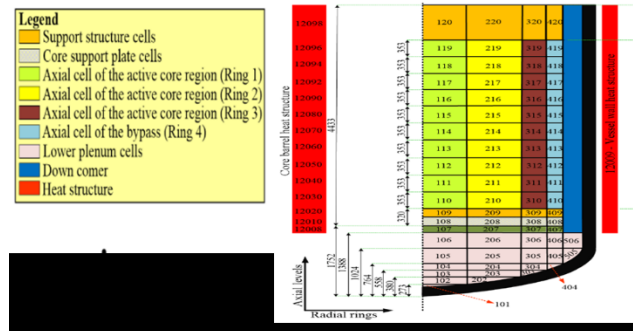


حلقوی^۱ استفاده شده است که به هفت بخش تقسیم‌بندی شده است. در انتخاب طول حجم نسبت طول حجم به قطر آن بزرگ‌تر مساوی یک در نظر گرفته شد. کلیه حجم‌های هیدروپنماتیکی توسط اتصالاتی^۲ به هم متصل و پلنیوم بالایی و پایینی چون دارای چندین اتصال هستند به صورت شاخه^۳ تعریف شده‌اند. قلب رآکتور به چهار دسته تقسیم‌بندی شده و با حجم کنترل لوله^۴ مدل‌سازی شدند. یک دسته هم برای مدل‌سازی کانال کنار گذر^۵ در نظر گرفته شد. سیال عبوری از این کانال نقشی در برداشت حرارت از قلب رآکتور ندارد. ۱۹ مجتمع سوخت در دسته اول، ۷۲ مجتمع در دسته دوم و ۷۲ مجتمع سوخت در دسته سوم در نظر گرفته شده است. تعداد ۱۰ گره در راستای محوری برای هر دسته در نظر گرفته می‌شود، زیرا انتخاب این تعداد مجتمع‌ها در هر دسته اختیاری است و بر اساس انتظار کاربر از مسئله انتخاب می‌شوند. سایر بخش‌ها و لوله‌های خنک‌کننده مدار اول به صورت حجم‌های هیدروپنماتیکی از نوع لوله در نظر گرفته شده‌اند. برای مدل‌سازی پمپ‌های مدار اول از مسیجریان پمپ استفاده می‌شود. باید گشتاور پمپ و فاکتورهای دوفازی و غیره را به صورت توابع جدولی در کد وارد کرد. هد پمپ، سرعت چرخش، فشار اولیه و دیگر پارامترهای مهم پمپ باید در ورودی وارد شوند. برای مدل‌سازی شیرهای اطمینان فشارنده، از شیر Relief استفاده شد. لوله‌های مولد بخار در پنج بخش تقسیم‌بندی و به عنوان ساختاری حرارتی در نظر گرفته شدند که تبادل حرارت با خنک‌کننده مدار دوم را انجام می‌دهند. برای هر ساختار حرارتی ۱۰ گره در نظر گرفته شد. میله‌های سوخت، گرم‌کن‌های فشارنده، جداره محافظه تحت فشار و لوله‌ها نیز به عنوان ساختار حرارتی لحاظ شدند. پارامترهای مهم دیگر در ورودی، توزیع توان محوری و شعاعی است که باید وارد شوند. باز و بسته شدن کلیه شیرها با کارت‌های کنترلی و تریپ‌ها به کد وارد می‌شوند.

قسمت‌های دیگر مدار دوم به صورت حجم کنترلی وابسته به زمان مدل‌سازی می‌شوند. این کد قابلیت حل معادله سینتیک نقطه‌ای^۶ را دارد. در صورتی که بخواهیم حادثه‌ای از قبیل تزریق راکتیویته را مدل نماییم این کارت باید مورد استفاده قرار خواهد گرفت.



(الف)



(ب)

شکل ۲. تقسیم‌بندی، (الف) شعاعی، (ب) محوری و پلنیوم پایین در کد MELCOR.

۲.۱.۳ چاهک رآکتور

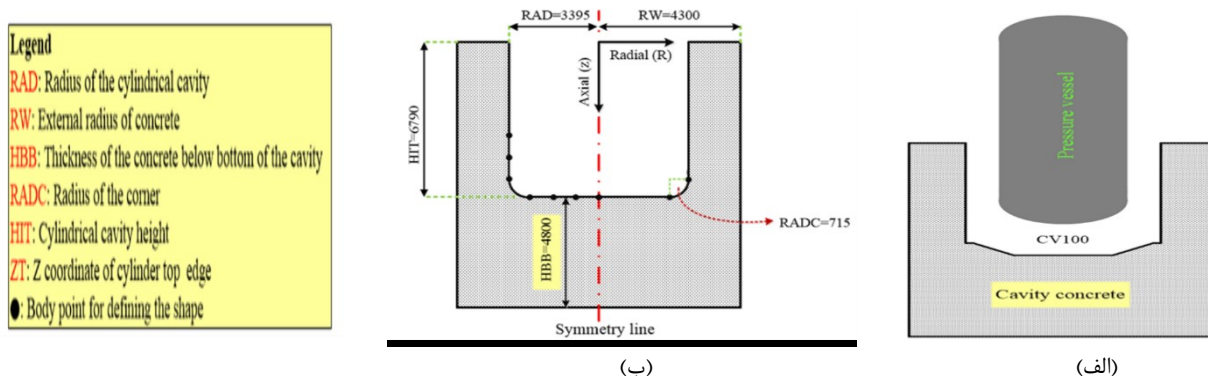
مرحله مهم دیگر مدل‌سازی چاهک رآکتور است. با توجه به محدودیت‌های ذاتی کد MELCOR برای مدل‌سازی چاهک رآکتور، مدل چاهک با شکل واقعی چاهک رآکتور تفاوت‌هایی دارد. به همین خاطر فرض شده است که نوع چاهک رآکتور به صورت استوانه ته صاف است. برای مشخص نمودن شکل چاهک ۹۵ نقطه بر روی دیواره چاهک فرض شده است. این نقاط برای مشخص نمودن شکل چاهک بعد از خوردگی بتون بر اثر مذاب استفاده می‌شود. با خورده شدن بتون مختصات نقاط در راستای افقی و عمودی تغییر می‌کند. شکل ۳ نمایی از چاهک اصلی رآکتور و مدل‌سازی آن را نشان می‌دهد. ضخامت دیواره جانبی بتون چاهک در حدود ۹۰ سانتی‌متر بوده و ضخامت جداره پایینی بتون تا کره فلزی در حدود ۴/۸ متر است. انحنای گوشه چاهک نیز با توجه به محاسبات ۷۱۵ میلی‌متر به دست آمده است. چاهک با حجم کنترل شماره ۱۰۰ در شکل مشخص شده است.

۲.۳ مدل‌سازی با استفاده از کد RELAP3.2-SCDAP

به منظور ارزیابی نتایج کد MELCOR، از کد RELAP-SCDAP استفاده شده است. مدل‌سازی صورت گرفته برای قلب با این کد در شکل ۴ نشان داده شده است. به منظور مدل‌سازی Down comer از حجم هیدروپنماتیکی

1. Annulus
2. Junctions
3. Branch
4. Pipe
5. Bypass Channel
6. Point Kinetic

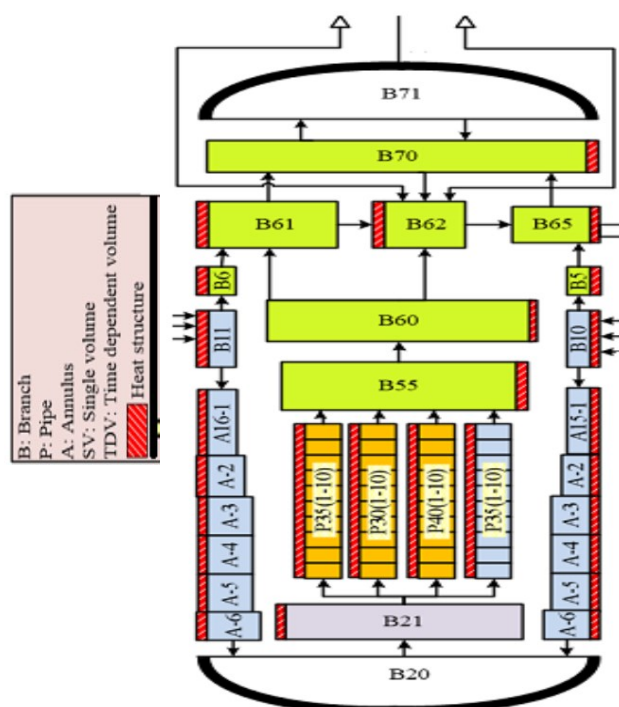




شکل ۳. مدل سازی چاهک رآکتور با کد MELCOR، (الف) حالت واقعی، (ب) مدل.

سوخت، زمان خاموشی رآکتور، مشخصات گپ، مشخصات میله کنترل، فاکتورهای تشعشعی و ضریب دید در این کارت وارد می شوند.

زیربرنامه دیگری با عنوان Couple برای مدل سازی رفتار پلنیوم پایینی محفظه تحت فشار رآکتور استفاده می شود. این زیربرنامه برای محاسبات زمان گسیختگی کله گی پایینی رآکتور و رفتار پلنیوم پایینی طی ریزش مواد مذاب استفاده می شود. با تقسیم پلنیوم پایینی به المان های چهار گوش محاسبات برای هر المان انجام می گیرد. روش حل به صورت المان محدود است. برای بررسی رفتار گرمایش دیواره محفظه رآکتور از معادله رسانش دو بعدی بهره می گیرد. در محاسبات دما و با توجه به مطالعات صورت گرفته پلنیوم پایینی به ۱۴۰ گره و ۱۱۷ المان تقسیم بندی شده است. از دیگر پارامترهای مهم ورودی این زیربرنامه، مشخص کردن راستای گره های ورودی، جنس مواد در المان های مختلف و مشخصات کله گی پایین است.



شکل ۴. مدل قلب کد RELAP-SCDAP.

۴. نتایج

ابتدا ضروری است تا صحت و دقت مدل سازی با کدهای مختلف ارزیابی شود. جدول ۱ نتایج حالت پایای مدل سازی با کدهای مختلف و مقایسه نتایج را با FSAR [۱۰] نشان می دهد. دو کد MELCOR و RELAP-SCDAP تطابق خوبی با هم دیگر و با FSAR نشان داده اند.

در ادامه نتایج تحلیل حوادث قطع برق، قطع برق به همراه شکست بزرگ و قطع برق به همراه شکست کوچک ارائه می شوند. لازم به ذکر است فرض شده که تا ۲۰۰ ثانیه رآکتور در شرایط پایا کار می کند سپس، سناریوی حادثه آغاز می شود.

کد RELAP توانایی تحلیل ذوب قلب رآکتور و مدل سازی فاز خارجی حادثه شدید (واکنش بتون با مذاب) را ندارد. از این رو زیربرنامه دیگری با عنوان SCDAP برای تحلیل ذوب قلب به این کد اضافه شده است. در ورودی SCDAP برای هر دسته از قسمت فعال قلب رآکتور، دو جزء (میله سوخت و میله کنترل) تعریف می شود. علاوه بر این اجزا، بفل قلب رآکتور نیز در این برنامه تعریف می شود. نوع رآکتور، منبع توان، جنس صفحات نگه دارنده، تعداد میله های سوخت، گام میله ها و میزان مصرف سوخت^۲، مشخصات خود میله سوخت، حجم کنترل بالای میله های سوخت، دمای اولیه، مواد تشکیل دهنده میله

1. Core Baffle
2. Burn Up



جدول ۱. نتایج حالت پایا

خطای نسبی MELCOR (%)	خطای نسبی RELAP (%)	خطای نسبی قابل قبول [۱۱] (%)	MELCOR	RELAP	FSAR	پارامتر
۰.۲	۰.۲	۲.۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	توان حرارتی رآکتور (MWth)
۰.۳	۰.۳	۰.۱	۱۵۷۵	۱۵۶۵	۱۵۷	فشار خروجی خنک‌کننده (MPa)
۰.۳	۰.۳	۲.۰	۳۲۰.۱	۳۲۲.۰	۳۲۱	دمای خروجی خنک‌کننده (°C)
۰.۸	۱.۰	۲.۰	۸.۸۵۷	۸.۷۰	۸.۷۷	سطح آب فشارنده (m)
۰.۲	۲.۴	۲.۰	۲.۴۶	۲.۴۰	۲.۴۰	سطح آب مولد بخار (m)
۰.۳	۰.۱	۰.۵	۸۵.۲۹۰	۲۹۲.۰	۲۹۱	دمای ورودی به قلب رآکتور (°C)
۰.۲	۰.۶	۰.۱	۱۵.۴	۱۵.۳	۱۵.۳	فشار ورودی پمپ (MPa)
۱.۵	۰.۳	۱۰.۰	۰.۱۳۵۴	۰.۱۳۳	۰.۱۳۵	افت فشار در مولد بخار (MPa)
۲.۹	۰.۸	۱۰.۰	۰.۳۷۸۱	۰.۳۷۰	۰.۳۸۱	افت فشار در قلب رآکتور (MPa)
۰.۱	۰.۳	۰.۱	۶.۲۷۸	۶.۲۹۱	۶.۲۸۰	فشار سمت ثانویه مولد بخار (MPa)
۰.۶	۰.۳	۰.۵	۰.۶۲۲	۰.۶۲۰	۰.۶۲۴	هد پمپ (MPa)
۰.۱	۰.۳	۲.۰	۳۱۹.۹۴	۳۲۱.۴	۳۲۱±۵	دمای ورودی مولد بخار (°C)
۰.۶	۰.۱	۲.۰	۲۹۰.۷۶	۲۹۲.۰	۲۹۱±۵	دمای خروجی مولد بخار (°C)
۰.۵	۰.۱	۰.۵	۲۷۸.۶۵	۲۷۷.۰	۲۷۸.۵	دمای بخار تولیدی (°C)
۰.۱	۰.۲	۲.۰	۴۵۴.۱	۴۵۴.۰	۴۵۴.۷	دبی جریان خنک‌کننده در قلب (kg/s)
۰.۳	۰.۱	۰.۵	۴۰.۸۷	۴۰.۶۹	۴۰.۸۳	دبی بخار تولیدی (kg/s)
-	-	-	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰	≥۹۹.۸	کیفیت بخار تولیدی (%)
-	-	-	۱۴۷۶.۰۷	۱۴۷۷.۰	≤۱۸۸۳	بیشینه دمای سوخت (°C)

فوقانی فشارنده شده که باعث بازوبسته شدن شیرهای PSD می‌شود و موجودی سیال مدار اول کاهش می‌یابد. در ادامه با پیشرفت حادثه سطح خنک‌کننده در قلب رآکتور کم‌تر شده و سطح خنک‌کننده نیز در فشارنده کم‌تر می‌شود. در هنگام کاهش سطح خنک‌کننده به دلیل تولید بخار، در زمان‌های مختلف به طور موقت سطح خنک‌کننده در فشارنده بالاتر می‌رود و دوباره کم می‌شود. به همین دلیل نوساناتی در کاهش سطح خنک‌کننده مشاهده می‌گردد. افزایش سطح خنک‌کننده ناشی از حمل خنک‌کننده توسط بخار آب است. شکل ۶ (الف) و (ب) میزان تولید هیدروژن (۴۵۰ کیلوگرم) و کربن مونو اکسید (۰.۹۳ کیلوگرم) طی فاز داخلی حادثه را نشان می‌دهند. با توجه به این‌که محفظه تحت فشار رآکتور فرو می‌ریزد، هیدروژن طی فاز داخلی حادثه شدید بر اثر اکسیداسیون تولید نمی‌شود و لذا یک مقدار ثابت به خود می‌گیرد و به صورت مستقیم تا انتهای حادثه پیش می‌رود. این ادعا در شکل‌های ۶ (الف و ب) آشکار است. علاوه بر این شکل ۶ (پ و ت) نیز میزان تولید هیدروژن (۱۷۰۰ کیلوگرم) و مونو اکسید کربن (۱۱۶۰۰ کیلوگرم) را طی فاز خارجی حادثه شدید نمایش می‌دهند. تولید هیدروژن در فاز داخلی حادثه شدید است. نرخ تولید هیدروژن طی فاز داخلی زیادتر از نرخ تولید هیدروژن طی فاز خارجی حادثه شدید است. هم‌چنین میزان تولید هیدروژن در حادثه قطع برق نسبت به حادثه قطع برق همراه با شکست بزرگ زیاد است. دلیل این امر میزان اکسیداسیون بالا (به علت میزان بالای بخار در حادثه قطع برق نسبت به حادثه قطع برق همراه با شکست بزرگ) است. محاسبات تا ۶۵۰۰۰ ثانیه نشان داده شده است. طی حادثه قطع برق تقریباً ۶۵۰۰۰ ثانیه طول می‌کشد تا جداره

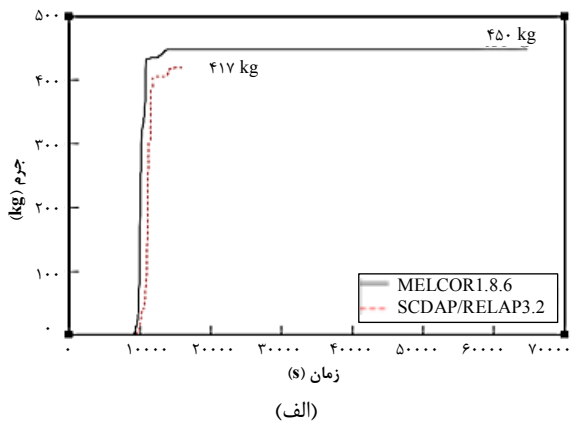
۱۰.۴ حادثه قطع برق

نتایج حادثه قطع برق در شکل ۵ مشهود است. شکل ۵ (الف) تغییرات بیشینه دمای سوخت را نشان می‌دهد. تقریباً در ۱۱۸۰۰ ثانیه سوخت به بیشینه دمای ۲۷۰۰ کلوین رسیده و فرو می‌ریزد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدا دمای سوخت ثابت است و با صدور سیگنال خاموشی^۱ رآکتور، دما کم می‌شود. در ادامه با جابه‌جایی طبیعی برداشت حرارت و آپاشی از قلب رآکتور انجام می‌گیرد. با گذشت زمان و خشک شدن مولد بخار، دمای سوخت بالاتر می‌رود تا به نقطه ریزش می‌رسد. شکل ۵ (ب) تغییرات فشار قلب رآکتور را نشان می‌دهد. فشار قلب رآکتور تا ۳۰۰۰ ثانیه به دلیل برداشت حرارت از مولد بخار کاهش می‌یابد. در ادامه با خشک شدن مولد بخار، فشار در قلب رآکتور زیادتر شده و به ۱۶ مگاپاسکال می‌رسد. شیرهای فشارنده به‌طور متوالی بازوبسته شده تا از این راه فشار در قلب رآکتور تنظیم شود. به همین دلیل نوساناتی در فشار قلب رآکتور بین ۵۰۰۰ تا ۱۳۰۰۰ ثانیه در شکل ۵ (ب) مشاهده می‌شود. در نهایت با گذشت زمان محفظه تحت فشار رآکتور فرو می‌ریزد و فشار سریعاً افت می‌کند. شکل ۵ (پ) تغییرات سطح خنک‌کننده در رآکتور را نشان می‌دهد. سطح آب در قلب رآکتور بعد از ۱۳۰۰ ثانیه به صفر می‌رسد. کاهش سطح خنک‌کننده به دلیل بخار شدن خنک‌کننده اتفاق می‌افتد. نهایتاً شکل ۵ (ت) تغییرات سطح خنک‌کننده در فشارنده را نشان می‌دهد. کاهش فشار به دلیل برداشت حرارت از مولد بخار رخ می‌دهد. در ادامه با خشک شدن مولد بخار و هم‌چنین در دسترس نبودن اسپری آب در فشارنده به دلیل قطعی برق، سطح آب فشارنده افزایش یافته و سبب افزایش فشار در قسمت

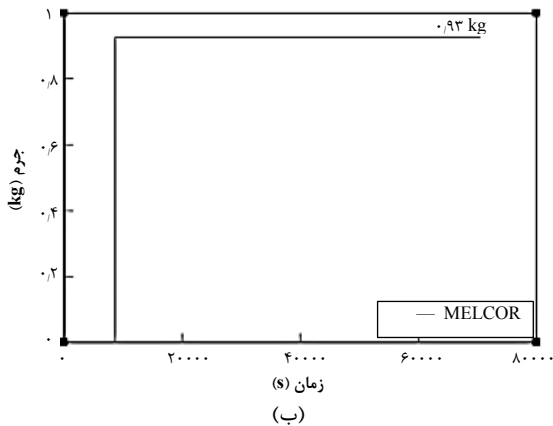
1. Scram



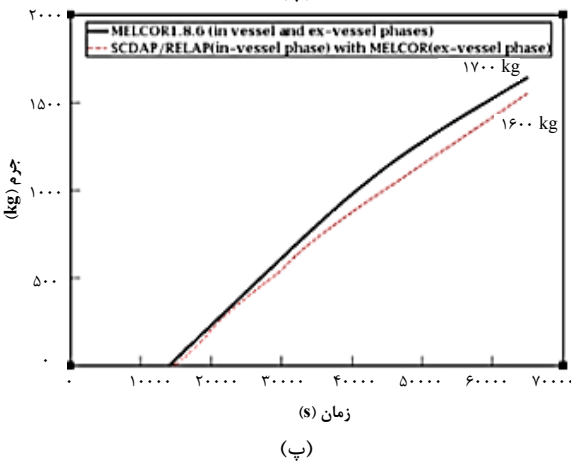
بتونی چاهک خورده شود. با خورده شدن بتون مذاب به سمت کره فلزی محفظه ایمنی حرکت می‌کند. با گسیخته شدن کره فلزی محفظه ایمنی، مواد پرتوزا به آب‌های زیرزمینی نفوذ می‌کنند و آلودگی زیستی ایجاد می‌کنند.



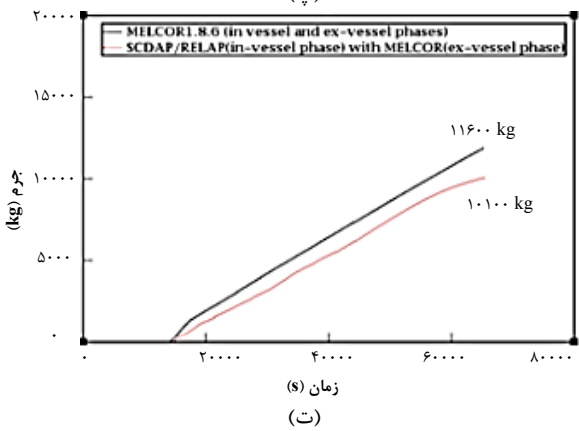
(الف)



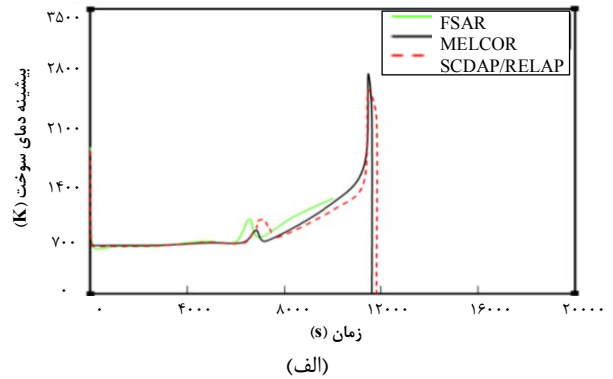
(ب)



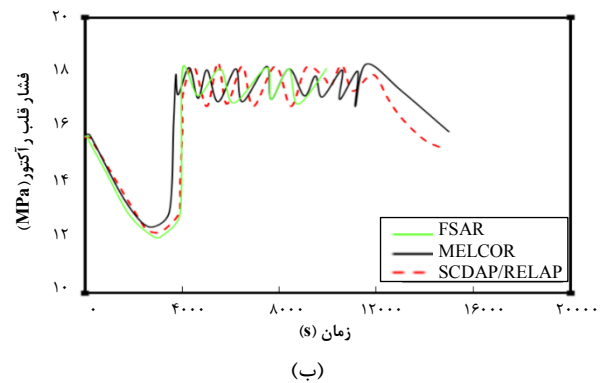
(پ)



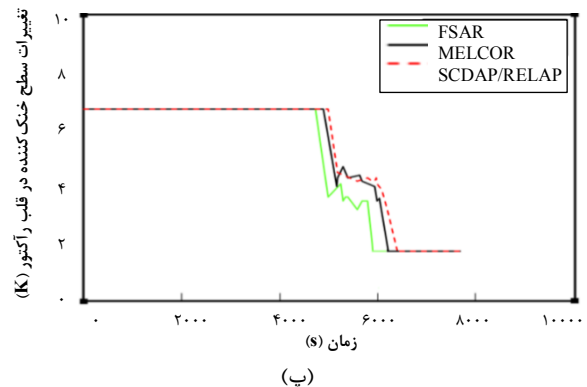
(ت)



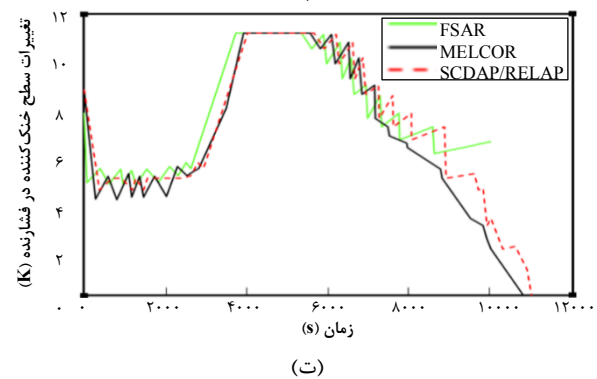
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۵. الف) تغییرات بیشینه دمای سوخت، ب) تغییرات فشار قلب رآکتور، پ) تغییرات سطح خنک‌کننده در قلب رآکتور و ت) تغییرات سطح خنک‌کننده در فشارنده.

شکل ۶. الف) مقدار هیدروژن طی فاز داخلی حادثه، ب) مقدار مونو اکسید کربن طی فاز داخلی حادثه، پ) مقدار تولید هیدروژن طی فاز خارجی حادثه و ت) مقدار تولید کربن مونو اکسید طی فاز خارجی حادثه.



۸ (الف) نشان می‌دهد که در ابتدا با صدور سیگنال خاموشی، فشار قلب رآکتور تا زمانی که خنک‌کننده در مولد بخار وجود دارد و برداشت حرارت انجام می‌گیرد، کاهش می‌یابد. با خشک شدن مولد بخار، فشار در قلب رآکتور بالا می‌رود و با توجه به خرابی شیرهای ایمنی فشارنده، شیرها باز شده و در حالت باز باقی می‌ماند. با باز ماندن شیر فشارنده فشار قلب رآکتور شروع به کم شدن می‌کند. دمای متناظر با فشار قلب رآکتور برای خنک‌کننده نیز در شکل ۸ (ب) نشان داده شده است. دلیل نوسانات دمایی می‌تواند به بالا و پایین شدن دمای مذاب قلب در رینگ‌های مختلف برگردد که با ریزش قلب رآکتور دما یک لحظه کم شده و دوباره با افزایش دمای قلب رآکتور دمای خنک‌کننده زیاد می‌شود. بیشینه دمای سوخت نیز در طی حادثه در شکل ۸ (پ) نمایش داده شده است. در شکل ۸ (ت) نیز تغییرات سطح سیال در قلب رآکتور نشان داده شده است. به دلیل فعال شدن انباره‌ها، سطح خنک‌کننده در قلب رآکتور تا ۱۸۰۰۰ ثانیه حفظ شده است. شکل‌های ۸ (ث و ج) میزان تولید هیدروژن و کربن مونواکسید را به ترتیب نشان می‌دهند. طی فاز داخلی حادثه شدید ۴۱۲ کیلوگرم و طی فاز خارجی حادثه شدید ۱۵۵۰ کیلوگرم هیدروژن تولید می‌گردد. مطابق شکل ۸ (ج) ۱۳۶۵۰ کیلوگرم مونواکسید کربن طی فاز خارجی حادثه شدید تولید می‌گردد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله به تحلیل تفصیلی حوادث قطع برق، قطع برق به همراه شکست بزرگ و قطع برق به همراه شکست کوچک برای رآکتور WWER1000/V446 با کد MELCOR پرداخته شد و نتایج با کد RELAP-SCDAP و گزارش تحلیل ایمنی صحت‌سنجی شد و نتایج زیر استخراج شد:

- بیش‌ترین میزان تولید هیدروژن طی فاز داخلی و خارجی حادثه شدید مربوط به حادثه قطع برق بوده و به ترتیب تقریباً ۴۵۰ و ۱۷۰۰ کیلوگرم تخمین زده شد. دلیل این امر زمان و مقدار بالای بخار آب در سیستم طی حادثه قطع برق است که باعث اکسیداسیون بیش‌تر و تولید هیدروژن بیش‌تر می‌شود.
- زمان شروع اکسیداسیون برای حادثه قطع برق، قطع برق به همراه شکست بزرگ و قطع برق به همراه شکست کوچک به ترتیب ۹۵۰۰، ۱۲۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ است.
- بیشینه دمای سوخت طی حادثه قطع برق تقریباً در ۱۱۸۰۰، حادثه قطع برق به همراه شکست بزرگ در ۱۵۰۰۰

۲.۴ حادثه قطع برق به همراه شکست بزرگ

در حادثه قطع برق به همراه شکست بزرگ فرض شده است که شکست ۸۵۰ میلی‌متری در خط لوله سرد مدار چهارم رخ دهد و کل برق نیروگاه قطع شود. نمودار تغییرات پارامترهای ترموهیدرولیکی قلب رآکتور در شکل ۷ آورده شده است. در حادثه قطع برق به دلیل این‌که فشار قلب رآکتور به شرایط عملیاتی انباره‌ها نمی‌رسد، این سیستم‌ها وارد مدار نمی‌شوند. در حادثه قطع برق به همراه شکست بزرگ انباره‌ها وارد سیستم می‌شوند. به دلیل شکست در خط لوله فشار قلب رآکتور به سرعت کم می‌شود که در شکل ۷ (الف) مشهود است.

به محض این‌که فشار قلب رآکتور به ۵/۸۸ مگاپاسکال می‌رسد انباره‌های مرحله اول وارد مدار می‌شوند. با کاهش بیش‌تر فشار قلب رآکتور (۲/۵ مگاپاسکال) انباره‌های مرحله دوم نیز وارد مدار می‌شوند. مشاهده می‌شود با تزریق آب توسط انباره‌ها تغییراتی در در دما و سطح خنک‌کننده در داخل قلب رآکتور مشاهده می‌شود و تا اتمام خنک‌کننده داخل انباره‌ها (۱۱۹۰۰ ثانیه) دما و سطح آب قلب رآکتور و بیشینه دمای سوخت کنترل می‌شوند. در شکل‌های ۷ (الف و ب) به دلیل احتراق هیدروژن در محفظه ایمنی نوساناتی در فشار محفظه تحت فشار و دمای بخار مشاهده می‌شود. در شکل ۷ (ب) پیش‌بینی احتراق هیدروژن با توجه به نمودار شاپیرو^[۱] انجام می‌شود. شکل‌های ۷ (پ و ت) تغییرات بیشینه دمای سیال سوخت و سطح خنک‌کننده در قلب رآکتور را برحسب زمان نشان می‌دهند. شکل ۷ (ث) میزان تولید هیدروژن را طی فاز داخلی و خارجی حادثه نشان می‌دهد. طی حادثه ۳۹۹ و ۱۴۳۴ کیلوگرم هیدروژن طی فاز داخلی و فاز خارجی حادثه شدید تولید می‌شوند. از آن‌جا که هر کد در بازه دمایی مختلف روابط مختلفی برای اکسیداسیون زیرکالی با بخار آب دارند، لذا میزان تولید هیدروژن نیز متفاوت خواهد بود اما، تطابق خوبی بین نتایج کدهای MELCOR و RELAP-SCDAP مشاهده شده است. نهایتاً در شکل ۷ (ج) مقدار مونواکسید کربن تولید شده نیز گزارش شده است. همان‌طور که شکل ۷ (ج) نشان می‌دهد تقریباً ۱۱۷۲۷ کیلوگرم طی فاز خارجی حادثه تولید می‌شود.

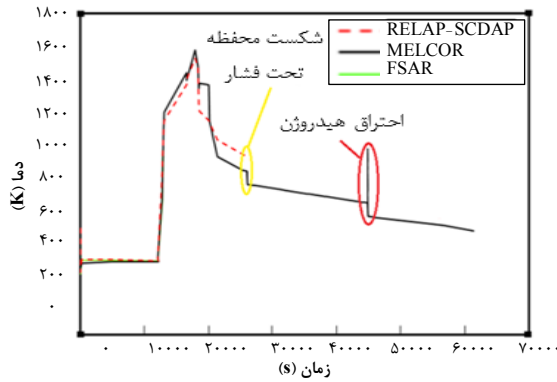
۲.۴ حادثه قطع برق به همراه شکست کوچک

شکل ۸ نتایج حاصل از تحلیل حادثه قطع برق به همراه شکست کوچک (خرابی شیرهای ایمنی فشارنده) را نشان می‌دهد. شکل

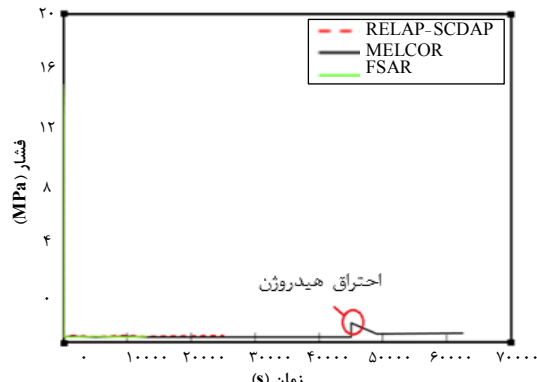


- نتایج حاصل از کدهای مختلف در تطابق خوبی با هم بوده و دقت مدل سازی را تأیید می نمایند.
- با آگاهی از شرایط ترموهیدرولیکی و نتایج حاصل از کار می توان تصمیمات کاربردی (از جمله عملکرد مناسب کاربر) در هنگام بروز حادثه در کنترل و پیشرفت حادثه اتخاذ نمود.

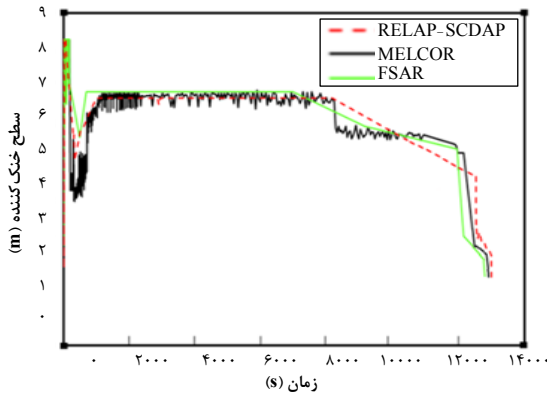
- طی حادثه قطع برق به همراه شکست کوچک در ۲۱۰۰۰ ثانیه رخ می دهند.
- بیشینه دمای بخار طی حوادث مختلف به ۱۶۰۰ کلوین می رسد.



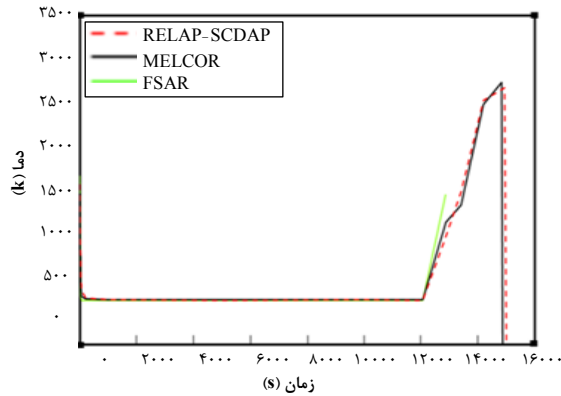
(ب)



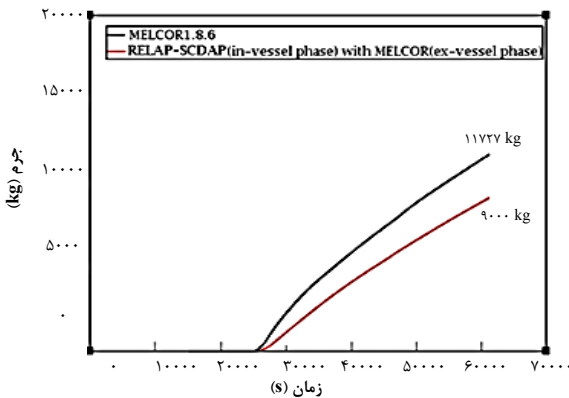
(الف)



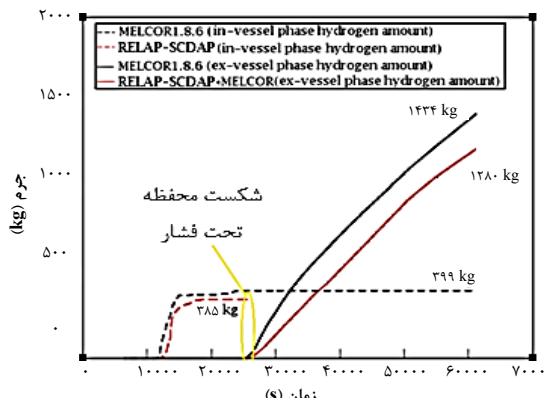
(ت)



(پ)



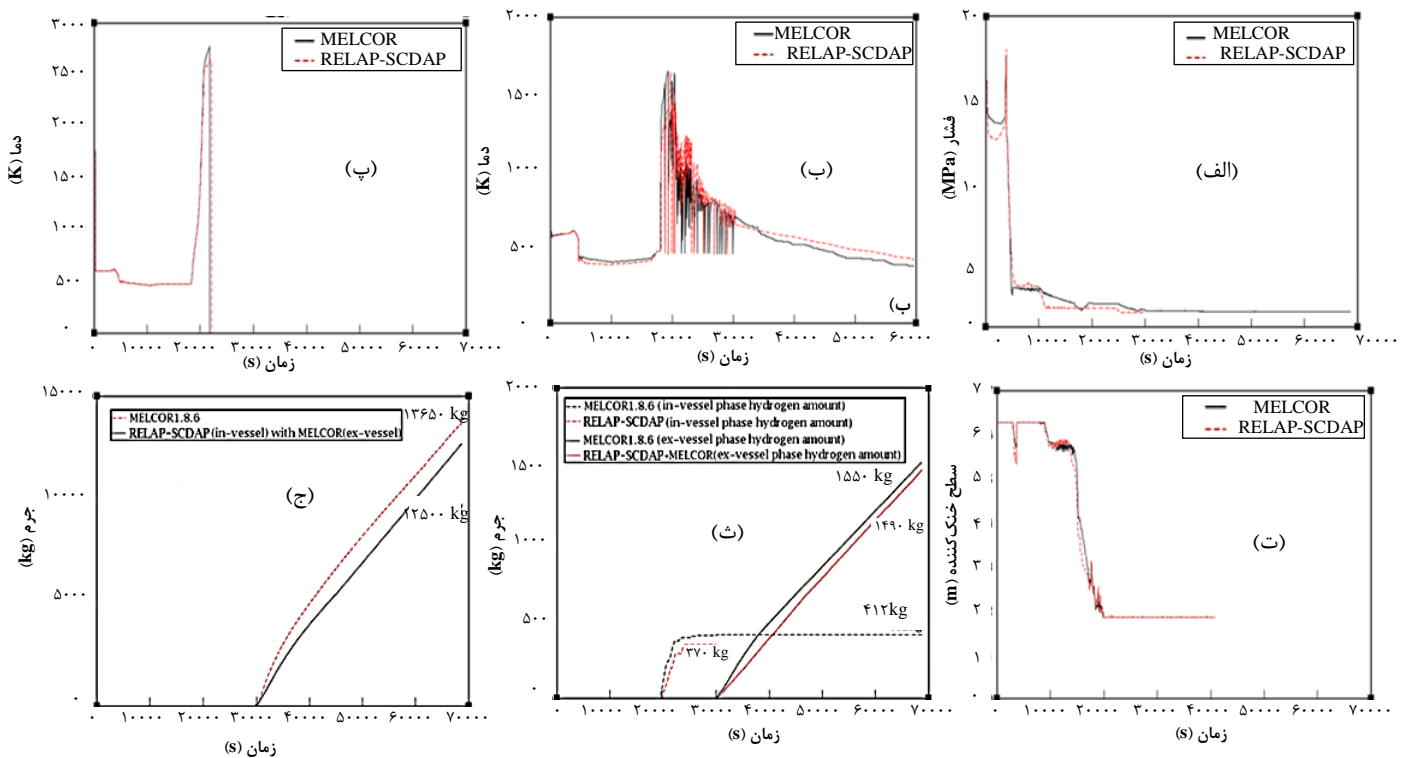
(چ)



(ث)

شکل ۷. الف) تغییرات فشار در قلب رآکتور، ب) تغییرات دمای بخار در قلب رآکتور، پ) تغییرات بیشینه دمای سوخت، ت) تغییرات سطح خنک کننده در قلب رآکتور، ث) میزان هیدروژن تولید شده و ج) میزان کربن مونو اکسید تولید شده.





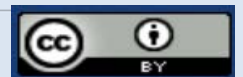
شکل ۸. الف) تغییرات فشار در قلب رآکتور، ب) تغییرات دمای سیال خنک‌کننده در قلب رآکتور، پ) تغییرات بیشینه دمای سوخت، ت) تغییرات سطح خنک‌کننده در قلب رآکتور، ث) میزان هیدروژن تولید شده و ج) میزان کربن مونو اکسید تولید شده.

مراجع

- R. Gharari, et al, *A review on hydrogen generation, explosion, and mitigation during severe accidents in light water nuclear reactors*, *International Journal of Hydrogen Energy*, **43** (4), 1939-1965 (2018).
- R.M. Summers, et al., *MELCOR computer code manuals*, Sandia National Labs (1995).
- D.T. Hagrman, C.M. Allison, G.A. Berna, *SCDAP/RELAP5/MOD 3.1 code manual: MATPRO, A library of materials properties for Light-Water-Reactor accident analysis*, Volume 4 (No. NUREG/CR-6150-Vol. 4; EGG-2720-Vol. 4). Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div. of Systems Technology; Lockheed Idaho Technologies Co., Idaho Falls, United States (1995).
- M.A. Polo-Labarríos, G. Espinosa-Paredes, *Comparative study of the hydrogen generation during short term station blackout (STSBO) in a BWR*, *Annals of Nuclear Energy*, **83**, 274-282 (2015).
- G. Li, et al. *MELCOR 2.1 analysis of melt behavior in a BWR lower head during LOCA and SBO accident*, *Annals of Nuclear Energy*, **90**, 195-204 (2016).
- J. Yanez, M. Kuznetsov, A. Souto-Iglesias, *An analysis of the hydrogen explosion in the Fukushima-Daiichi accident*, *International Journal of Hydrogen Energy*, **40**(25), 8261-8280 (2015).
- L. Li, et al., *Severe accident analysis for a typical PWR using the MELCOR code*, *Progress in Nuclear Energy*, **71**, 30-38 (2014).
- P. Groudev, A. Stefanova, R. Gencheva, *Investigation of VVER 1000 Core Degradation During SBO Accident Scenario in Case of Pressurizer SV Stuck in Open Position, Fuel Behavior and Modelling under Severe Transient and Loss of Coolant Accident (LOCA) conditions*, **367**, (2013).
- R.O. Gauntt, N.E. Bixler, K.C. Wagner, *An uncertainty analysis of the hydrogen source term for a station blackout accident in Sequoyah using MELCOR1.8.5*, Sandia National Laboratories Letter Report to US NRC (2002).
- AEOI, *Final Safety Analysis Report (FSAR) for BNPP Accident Analysis*, (2007).
- M. Salehi, G. Jahanfarnia, *Investigation of LBLOCA in VVER-1000 NPP using RELAP5/SCDAP and CONTAIN codes*, *Annals of Nuclear Energy*, **139**, 107229 (2020).

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

رحمان قراری، حسین کاظمی نژاد، نعیم‌الدین متاجی کجوری، افشین هدایت، محسن حسونند (۱۴۰۱)، تحلیل ترموهیدرولیک و تخمین تولید هیدروژن در حوادث شدید WWER1000، ۹۹، ۱۱۶-۱۲۵

DOR: 20.1001.1.17351871.1401.43.1.13.6

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1356.html

