

شبیه سازی حادثه شکست خط اصلی بخار نیروگاه بوشهر در سناریوهای مختلف با استفاده از کد RELAP5/MOD3.2

رامین بخشائی^{۱*}، حمید خادم‌لوا، بهمن شیخ کانلوی میلان^۲

۱- دانشگاه تحصیلات تکمیلی کرمان، دانشکده برق، گروه مهندسی هسته‌ای

۲- دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه راکتور

چکیده

در تحقیق حاضر پس از شناخت سیستم‌های اولیه و ثانویه نیروگاه بوشهر، بر اساس معیارهای کد RELAP5 که یک کد استاندارد جهت محاسبه پارامترهای ترموهیدرولیکی راکتورهای آب سبک در شرایط پایدار و گذرا است، گره بندی نیروگاه بوشهر و نتایج پایدار حاصل از این شبیه سازی با اطلاعات موجود در گزارش نهایی آنالیز ایمنی نیروگاه بوشهر بررسی شد. سپس حادثه شکست خط اصلی بخار در داخل محفظه ایمنی در نیروگاه بوشهر شبیه سازی شده و نتایج حاصل بر اساس معیارهای ارزیابی ایمنی و نمودارهای موجود در گزارش نهایی آنالیز ایمنی نیروگاه بوشهر مورد تحلیل قرار گرفته است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که در خلال حادثه (در همه سناریوها) پارامترهای ترموهیدرولیکی سیستم از مقادیر تعیین شده توسط معیارهای ارزیابی ایمنی تجاوز نمی‌کنند.

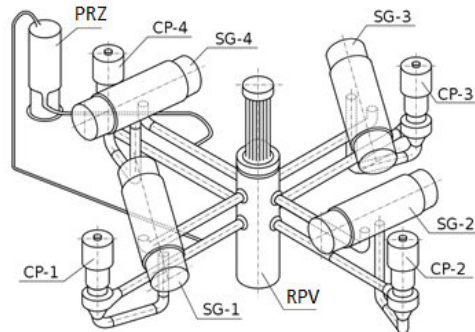
کلمات کلیدی: نیروگاه بوشهر، کد RELAP5، حادثه شکست خط اصلی بخار، گزارش نهایی آنالیز ایمنی نیروگاه بوشهر

۱. مقدمه

نیروگاه‌های هسته‌ای به علت دارا بودن خطرهای بالقوه‌ی زیست محیطی و انسانی، نیازمند سیستم‌های ایمنی کارا و قابل اطمینان برای عملکرد ایمن و مطمئن هستند. به همین دلیل ضوابط سخت گیرانه‌ای برای اخذ پروانه ساخت و بهره برداری این تأسیسات طرح ریزی شده اند و نظام ایمنی هسته‌ای بر آنها نظارت می‌کنند.

راکتور نیروگاه هسته‌ای بوشهر از نوع راکتورهای^۱ WWER است. WWER نوعی راکتور هسته‌ای با محفظه تحت فشار است که آب در آن به عنوان خنک کننده و کند کننده به کار می‌رود. عدد ۱۰۰۰ که در انتهای نوع راکتور می‌آید، نماینده توان الکتریکی

¹ Water-cooled Water-moderated Power Reactor



شکل ۱- مدار اولیه نیروگاه WWER 1000

واحد نیروگاهی بر حسب مگاوات است. تفاوت این نیروگاه‌ها با راکتورهای PWR غربی در نوع مولدهای افقی آن است. شکل ۱. شماتیکی از مدار اول این نیروگاه را نشان می‌دهد.

چهار حلقه در مدار اولیه نیروگاه با راکتور نوع WWER-1000 وجود دارد. سیال خنک‌کننده از طریق چهار پمپ که هر پمپ در یکی از حلقه‌ها نصب شده انتقال می‌یابد.

۱-۱ حادثه MSLB^۱

چنین حوادثی می‌توانند با شکست یا گسیختگی قسمت یا کل خط (لوله) بخار شروع شوند که ممکن است در داخل یا خارج محفظه ایمنی رخ دهند. این حادثه به طور همزمان منجر به کاهش فشار (سرد شدن) مدار ثانویه و از دست رفتن خنک‌کننده ثانویه می‌شود که خنک‌شدن RCS^۲ را به دنبال خواهد داشت. به طور معمول اثر سرد شدن منجر به خنک‌سازی نامتقارن دیواره محفظه فشار راکتور و ایجاد بهره راکتیویته مثبت می‌شود که در نتیجه آن قدرت راکتور با صرف نظر از SCRAM^۳ افزایش می‌یابد. [۲]

۲-۱ کد RELAP^۴

کد آنالیز حالت‌های گذرای راکتورهای آب سبک (RELAP5) در آزمایشگاه ملی آیداهو برای کمیته نظام هسته‌ای آمریکا توسعه داده شده است. کاربردهای ویژه کد شامل شبیه‌سازی حالت‌های گذرا در راکتورهای آب سبک مانند ائتلاف خنک‌کننده، حالت‌های گذرای پیش‌بینی شده بدون خاموشی راکتور، و حالت‌های گذرای عملکردی چون قطع آب تغذیه مدار ثانویه، قطع برق خارجی نیروگاه و قطع توربین می‌باشد. [۳]

RELAP5 یک کد جامع است که علاوه بر تخمین رفتار سیستم خنک‌کننده راکتور در خلال حالت‌های گذرا، می‌تواند برای شبیه‌سازی

^۱ Main Steam Line Break

^۲ Reactor Coolant System

^۴ Reactor Loss of Coolant Program

^۳ خاموشی اضطراری راکتور

رنج گسترده‌ای از حالت‌های گذرای گرمایی و هیدرولیکی در سیستم‌های هسته‌ای و هیدرولیکی به کار رود.

۳. روش کار

در قسمت‌های قبل به معرفی نیروگاه بوشهر پرداختیم. گره بندی استفاده شده برای شبیه سازی در کد RELAP5 در شکل ۲. آورده شده است. در این گره بندی جهت اختصار تنها حلقه‌ای که فشارنده روی آن قرار گرفته نشان داده شده است. همچنین در این شکل تنها دو انباشتگر نشان داده شده و برای جلوگیری از شلوغی بیش از حد انباشتگرهای KWU (انباشتگرهای طرح آلمانی استفاده شده در نیروگاه بوشهر) نشان داده نشده اند.

برای به دست آوردن نتایج ابتدا شرایط اولیه نیروگاه شامل دما، فشار، سرعت و دبی خنک کننده در مدارهای اولیه و ثانویه به صورت تقریبی و نزدیک به شرایط کار نیروگاه به فایل ورودی داده شده که برای مدت طولانی اجرا می‌شود. سپس از مقادیر خروجی به عنوان شرایط اولیه نیروگاه ورودی جدید استفاده شده است. فایل ورودی جدید پس از گذشت کمتر از ۱۰۰ ثانیه به شرایط پایدار می‌رسد. با توجه به مشاهده نمودارهای حاصل شده توسط کد، پارامترهای ترموهیدرولیکی مدارهای اولیه و ثانویه در شبیه سازی صورت گرفته در رنج مناسب و با درصد خطای قابل قبولی هستند. مقادیر مهمترین پارامترهای ترموهیدرولیکی پس از ۱۰۰ ثانیه از اجرای کد به عنوان مقادیر حالت پایدار در جدول ۱ آورده شده و با مقادیر موجود با FSAR^۱ مقایسه شده اند.

۳-۱ شبیه سازی حادثه MSLB

برای شبیه سازی حوادث معمولاً از شرایط اولیه محافظه کارانه در مدل شبیه سازی شده استفاده می‌شود. داده‌های اولیه استفاده شده در آنالیز در جدول ۲ آمده است. حادثه شکست را در دو ورژن مختلف انجام خواهیم داد:

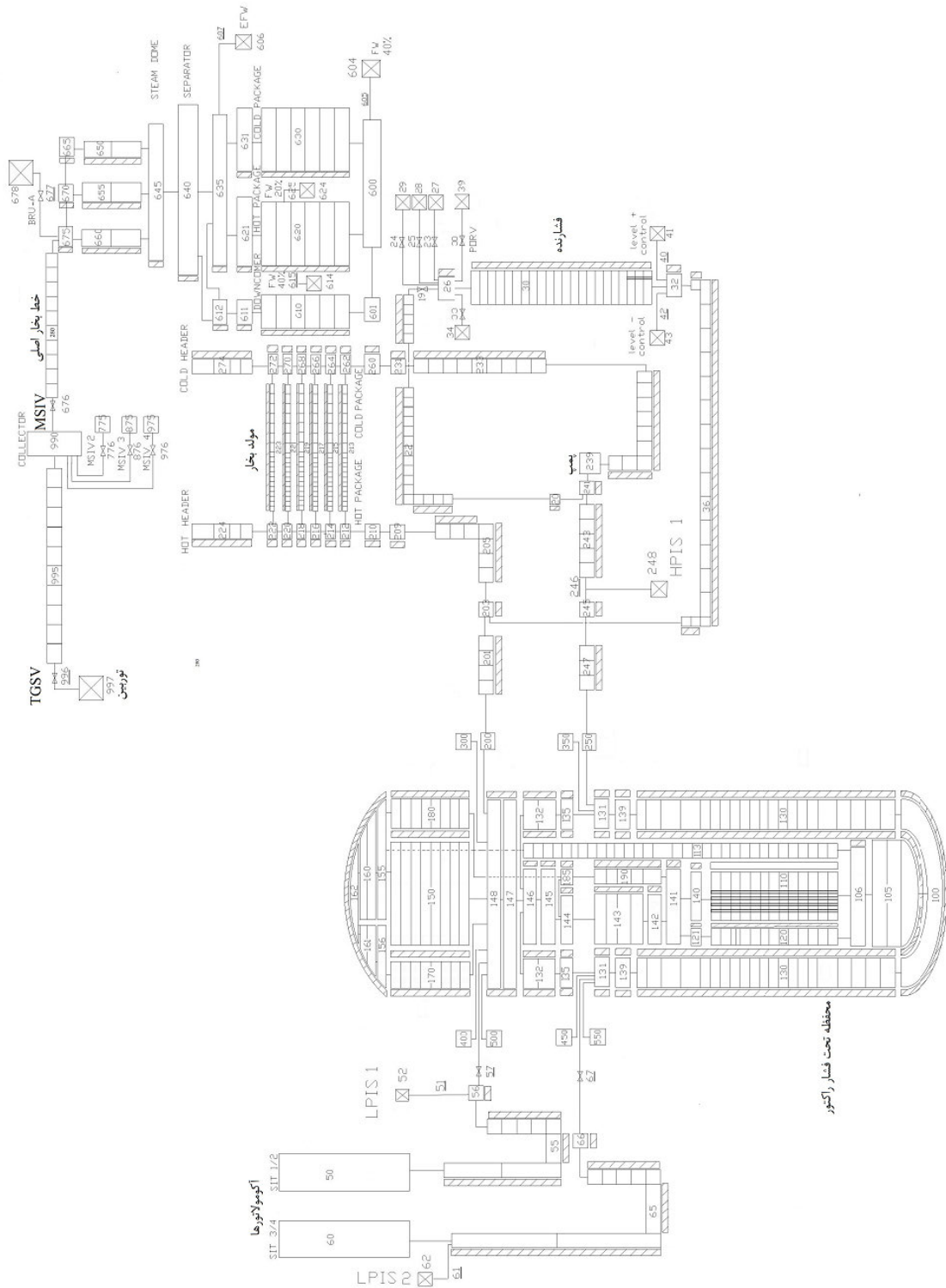
- در ورژن ۱ حادثه MSLB در قدرت نامه راکتور انجام شده است.

- در ورژن ۲ حادثه MSLB در قدرت نامه شبیه سازی شده و نیز فرض شده است که شیر BRU-A^۲ یکی از مولدهای بخار (SG^۳-3) در هنگام بسته شدن دچار خطا شده است؛ در نتیجه برداشت حرارت بیشتری از سمت مدار ثانویه رخ خواهد داد.

^۱ Final Safety Analysis Report

^۲ steam dump valve to the atmosphere

^۳ Steam Generator



شکل ۲- گره بندی نیروگاه بوشهر در کد RELAP5

جدول ۱- پارامترهای حالت پایدار

مقدار خطا (%)	FSAR	RELAP5	پارامتر
۰/۱۶	۳۰۰۰	۲۹۹۵	توان تولیدی هسته ای (MW)
.	۲۹۱ ^{+۲} -۵	۲۸۷/۹۱	دمای ورودی محفظه تحت فشار (°C)
.	۳۲۱ ^{+۵} -۵	۳۱۹/۸۵	دمای خروجی محفظه تحت فشار (°C)
.	-۰/۳ ۱۵/۷ ^{+۰} /۳	۱۵/۷۸	فشار در خروجی محفظه تحت فشار (MPa)
.	-۴۸۰۰ ^{+۴۰۰۰} ۸۴۸۰۰	۸۰۰۶۴	دبی حجم کل عبوری از راکتور (m ³ /h)
۰/۹۱	۳۵۲	۳۴۸/۷۷	حد اکثر دمای سطح بیرونی غلاف (°C)
۰/۴	۷۵۰	۷۴۷	توان حرارتی مولد بخار (MW)
۰/۱۸	۳۲۱	۳۲۰/۴	میانگین دمای سیال ورودی به مولدهای بخار (°C)
۱/۳	۲۹۱	۲۸۷/۴۲	میانگین دمای سیال خروجی از مولدهای بخار (°C)
۰/۱۷	۶/۲۷	۶/۲۸۱	میانگین فشار بخار خروجی از مولد بخار (MPa)
۲/۵	۴۰۸/۳۳	۴۱۹	میانگین دبی بخار خروجی از مواد های بخار (kg/s)

جدول ۲- داده های پارامترهای ترموهیدرولیکی استفاده شده در آنالیز حادثه [۴]

مقدار	پارامتر
۳۱۲۰	قدرت حرارتی راکتور، MW
۸۰۰۰۰	دبی خنک کننده عبوری از راکتور، m ³ /h
۱۵/۴	فشار خنک کننده در خروجی قلب، MPa
۲۹۳	دمای خنک کننده در ورودی قلب، °C
۶/۳۷	فشار بخار در کلکتور بخار SG، MPa
۲/۲۱	سطح آب دیگ بخار در SG، m

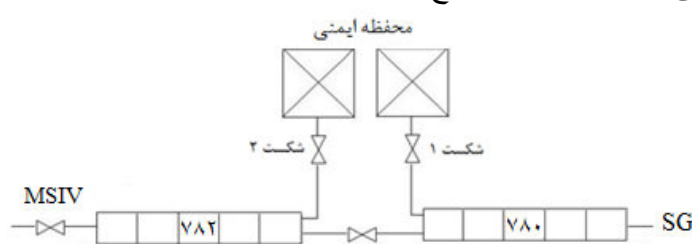
۴۴۸	حد اکثر نرخ حرارت خطی، W/cm
۴	زمان افتادن CPS CR بعد از SCRAM راکتور، s
۱۰	زمان بسته شدن MSIV، s
۲۲۰	دمای آب تغذیه پمپ‌های تغذیه تحت شرایط نامی، °C
۱۶۴	دمای آب تغذیه پمپ‌های تغذیه بعد از قطع شدن ^۱ HPH، °C
۴۰	دمای آب تغذیه پمپ‌های تغذیه اضطراری، °C
-۰/۰۰۰۰۱۸	ضریب راکتیویته دمای سوخت، 1/°C
از جدول ۳	ضریب راکتیویته چگالی خنک کننده، 1/°C

جدول ۳- ضریب راکتیویته چگالی خنک کننده

مقدار					پارامتر
۱۰۰۰	۹۴۳/۲	۷۹۶	۷۶۳/۴	۷۰۰	چگالی (kg/m ³)
۰/۰۶۹	۰/۰۵۶۶	۰/۰۳۸	۰/۰۲۲۶	۰	راکتیویته

۲-۳ شبیه سازی حادثه MSLB در کد RELAP5

شکست رخ داده در خط لوله به صورت گیوتینی است؛ به این معنی که وقتی شکست در قسمتی از لوله رخ داد دو قسمت لوله به



شکل ۳- گره بندی شکست در بخش انزله نشده خط بخار

طور کامل از هم جدا می‌شوند و هیچ گونه بخار یا آبی بین آنها عبور نمی‌کند. به این منظور برای شبیه سازی این حادثه - همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده - ابتدا در محل شبیه سازی شکست دو سر محل شکست را با یک شیر با سطح مقطع برابر لوله‌ها به هم وصل می‌کنیم. دو شیر هم به دو سر لوله‌ها برای شبیه سازی شکست با سطح مقطع ۰/۲۶۴m² برای شکست ۱ و ۰/۱۲۶m² برای شکست ۲ در وصل شده است. [۴] سر دیگر شیرها به محفظه

¹ High Pressure Heater

ایمنی با فشار ۱ اتمسفر و دمای ۵۰ درجه سانتی گراد وصل می‌شود.

۴. شرح وقوع حادثه

در نتیجه شکست خط بخار، فشار ثانویه کاهش می‌یابد. کاهش پارامترهای خنک‌کننده، افزایش انتقال حرارت از سمت اولیه را نتیجه می‌دهد. حداکثر جریان بخار از محل شکست در سمت SG آسیب دیده، 2500 kg/s است [۴]. در ۳ ثانیه اول بعد از شروع حادثه، سیگنال «شکست خط بخار» در خط بخار SG آسیب دیده فرستاده می‌شود (فشار خط بخار کمتر از $4/5 \text{ MPa}$ و افزایش اختلاف دمای اشباع بین اولیه و ثانویه بیش از 75°C). در پاسخ به این سیگنال، SCRAM راکتور اتفاق می‌افتد و شیرهای MSIV^۱ در خط بخار در SG مربوطه بسته می‌شوند.

بعد از SCRAM راکتور و قطع منبع آب تغذیه به SG آسیب دیده، سیستم خنک‌کننده اولیه تا زمانیکه SG خالی شده، خنک سازی مدار اولیه را ادامه می‌دهد. بعد از اینکه SG ایزوله نشده از شکستگی، خالی از آب شد گرم شدن خنک‌کننده اولیه آغاز می‌شود.

بعد از SCRAM و بسته شدن شیر TSV^۲ فشار سه مولد بخار دیگر افزایش یافته و موجب باز شدن شیرهای BRU-A مربوط به خود می‌شوند. با توجه به الگوریتم در نظر گرفته شده (ورژن ۲) برای این محاسبات، فرض می‌کنیم که در شیر BRU-A در SG3 خطایی صورت گیرد و منجر به بسته نشدن این شیر گردد. این خطا منجر به کاهش فشار در مولدهای بخار ۱، ۳ و ۴ می‌شود. در ادامه و در ثانیه ۶۵۰ کاهش فشار مولدهای بخار به مقدار $4/9 \text{ MPa}$ ، منجر به تولید سیگنال بسته شدن شیرهای MSIV^۱ مربوطه، می‌گردد. کاهش در سطح آب بویلر به مقدار 500 mm در مولدهای بخار ۱، ۳ و ۴ منجر به تولید سیگنال تریپ RCP^۳های مربوط به حلقه هایشان می‌شود. در صورت از دست دادن منبع آب تغذیه همه SGها، بعد از ۳۰ دقیقه از گذشت حادثه باید منبع آب تغذیه SGها را مجدداً فراهم نمود. حرارات پسماند در سمت اولیه قابل توجه است و می‌تواند سمت اولیه را گرم کرده و فشار را تا $17/73 \text{ MPa}$ افزایش دهد.

فرض می‌کنیم که شکست در خط بخار مولد بخار حلقه ۲ رخ داده و فشارنده در حلقه ۱ قرار گرفته است. همچنین فرض شده است که شکست در ناحیه ایزوله نشده (بین SG و MSIV) روی داده،

¹ Main Steam Isolation Valve

² Turbine Stop Valve

³ Reactor Coolant Pump

چرا که این مورد موجب بیشترین انتقال حرارت در سمت ثانویه می‌شود. سطح مقطع شکاف ایجاد شده در سمت SG آسیب دیده برابر با $0/264m^2$ در نظر گرفته شده است. سطح مقطع شکاف در سمت کلکتور اصلی بخار توسط MSIV به مقدار $0/126m^2$ محدود می‌شود. [۵]

وقوع SCRAM با یک تاخیر $1/3$ ثانیه‌ای بعد از حادثه خواهد بود (۱ ثانیه برای درست کردن سیگنال و $0/3$ ثانیه برای عبور سیگنال از مدارهای الکتریکی). همانطور که گفته شد قبل از شبیه سازی شکست در کد REAP5، مدت ۱۰۰ ثانیه شبیه سازی را در حالت پایدار اجرا می‌کنیم تا پارامترهای ترموهیدرولیکی به مقدار نامی خود برسند.

جدول ۴- سیر زمانی عملکرد سیستم‌ها و دستگاه‌های مختلف در هنگام وقوع حادثه MSLB (ورژن ۲)

نقاط تنظیم یا تحریک	سیر وقایع پیشامده	زمان (s)
آغار حادثه	شکست خط بخار در SG2	۱۰۰
رسیدن به نقطه تنظیم، فشار خط اصلی بخار کمتر از $4/9MPa$ و اختلاف دمای اشباع در مدار اولیه و ثانویه بیشتر از $75^{\circ}C$	شروع تولید سیگنال برای SCRAM راکتور و بستن MSIV	۱۰۲
عمل حفاظت اضطراری	شروع حرکت $CPS CR^1$	۱۰۳/۳
رسیدن به نقطه تنظیم بسته شدن MSIV، فشار خط بخار کمتر از $4/4MPa$ و اختلاف دمای اشباع در مدار اولیه و ثانویه بیشتر از $75^{\circ}C$	بسته شدن شیرهای گیت در خطوط تغذیه اصلی و بای پس، بسته شدن شیرهای ایزوله در سمت EFWP ² مولد بخار ۲	۱۰۴/۱
رسیدن به نقطه تنظیم باز شدن BRU-A، $7/154MPa$	باز شدن BRU-A در SG1,3,4	۱۱۹
رسیدن به نقطه تنظیم بسته شدن BRU-A، $6/27MPa$	بسته شدن BRU-A در SG1,4	۱۵۱
کاهش سطح SG1 به اندازه $500mm$	تریپ RCP در حلقه ۱	۲۹۳
کاهش سطح SG3 به اندازه $500mm$	تریپ RCP در حلقه ۳	۳۸۳
کاهش سطح SG4 به اندازه $500mm$	تریپ RCP در حلقه ۴	۴۳۸

¹ Control Rod of Control and Protection System

² Emergency Feed Water Pump

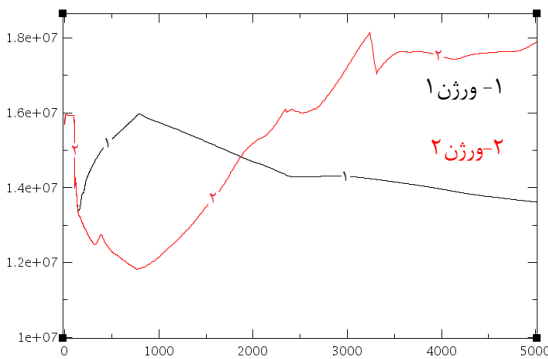
رسیدن به نقطه تنظیم بسته شدن MSIV، فشار خط اصلی بخار کمتر از ۴/۹ MPa و اختلاف دمای اشباع در مدار اولیه و ثانویه بیشتر از ۷۵ °C	شروع بسته شدن MSIV خطوط بخار SG1,3,4	۷۵۰
توسط پرسنل	شروع تامین آب تغذیه اضطراری به SG4	۱۹۰۰
-	انتهای محاسبات	۵۰۰۰

۵- نتایج

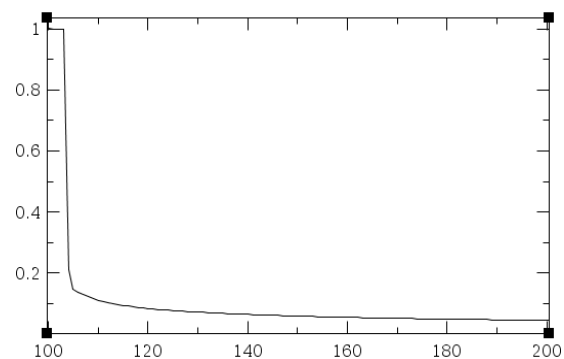
نتایج حاصل از شبیه سازی در شکل های زیر آمده است. شکل ها در دو ورژن مختلف از شبیه سازی نشان داده شده اند.

- در همه شکل های زیر، محور افقی زمان بر حسب ثانیه (s) می باشد.

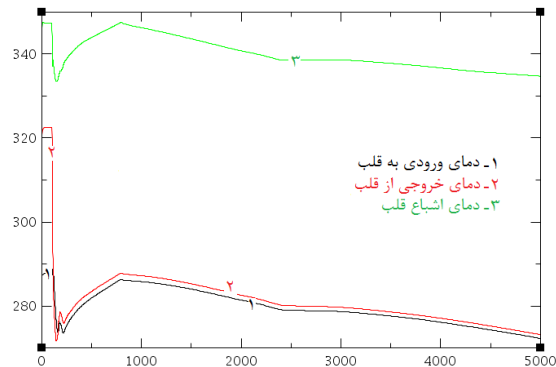
با توجه به شکل ۴ مشاهده می شود که بعد از وقوع SCRAM و تزریق راکتیویته منفی توسط میله های کنترل، قدرت راکتور بلافاصله بعد از حادثه کاهش می یابد. (در هر دو ورژن SCRAM در یک زمان اتفاق افتاده است) در نتیجه وقوع SCRAM، فشار مدار اولیه کاهش می یابد (شکل ۵). بعد از آن و به علت وجود حرارت پسماند در قلب و نیز انتقال حرارت کمتر در سمت ثانویه، فشار افزایش می یابد.



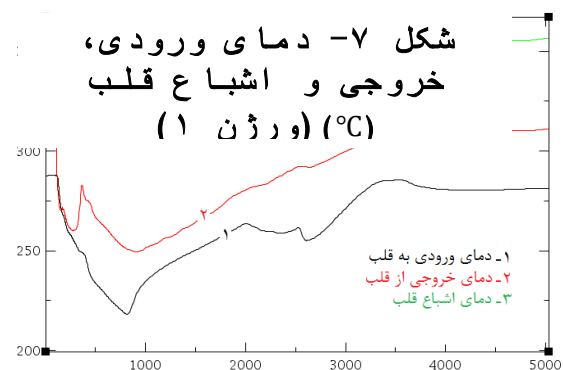
شکل ۵- فشار مدار
اولیه (Pa)



شکل ۴- قدرت نسبی قلب

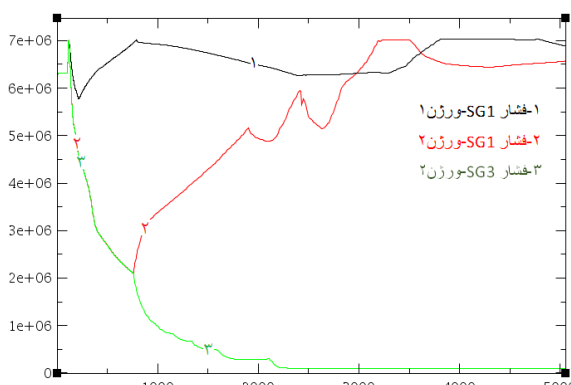


شکل ۷- دمای ورودی، خروجی و اشباع قلب (۱ ورژن) (°C)



شکل ۸- دمای ورودی، خروجی و اشباع قلب (۲ ورژن) (°C)

با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، در هر دو ورژن دمای سیال خنک کننده پایین‌تر از دمای اشباع می‌باشد و در نتیجه هیچ گونه بخاری در مدار اولیه نخواهیم داشت. در هر دو ورژن در ابتدای حادثه، در نتیجه خاموشی راکتور دما کاهش می‌یابد. در ادامه و به علت وجود حرارت پسماند در قلب، دما افزایش یافته است.

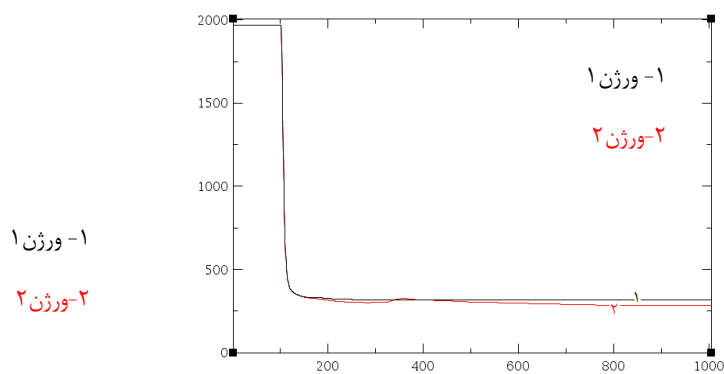


شکل ۹- فشار مولدهای

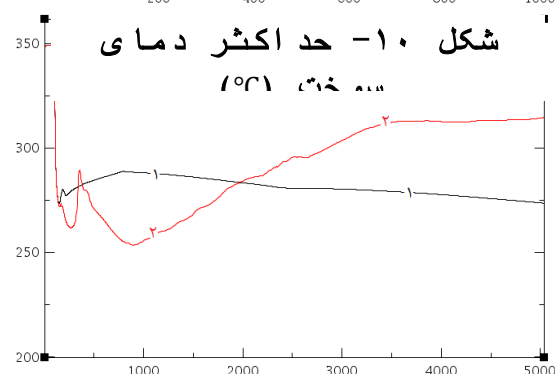
همانطور که قبلاً گفته شد، در ورژن ۲ فرض شده است که شیر BRU-A در SG-3 دچار خطا شده و بسته نخواهد شد. همین امر موجب کاهش بیشتر فشار در مدار ثانویه همه مولدهای بخار می‌شود تا وقتی که شیرهای MSIV شروع به بسته شدن کنند. بعد از بسته شدن این شیرها فشار SG-3 همچنان کاهش می‌یابد تا به فشار

فشار مولدهای بخار او ۴ هم مجدداً به علت برداشت حرارت افزایش خواهد یافت تا مجدداً BRU-A های آنها عمل کنند. اما در ورژن ۱، فشار هر ۴ مولد بخار به شکل تغییر خواهند کرد و چون عمل برداشت حرارت همیشه ادامه خواهد داشت و با توجه به بسته بودن شیر TSV، فشار مولدهای بخار افزایش یافته و بیوسته شیرهای BRU-A برای کنترل فشار باز و بسته

در نتیجه SCRAM و سقوط میله‌های کنترل، عمل شکافت در میله‌های سوخت متوقف شده و هیچ حرارتی در آن تولید نخواهد شد و به همین ترتیب دمای غلاف سوخت هم کاهش خواهد یافت. در ادامه تنها حرارت پسماند (به علت واپاشی محصولات شکافت) در قلب خواهیم داشت که منجر به افزایش دمای غلاف سوخت نیز می‌گردد (شکل ۱۰ و ۱۱).



شکل ۱۱- حد اکثر دمای غلاف
در حالت ۱ و ۲

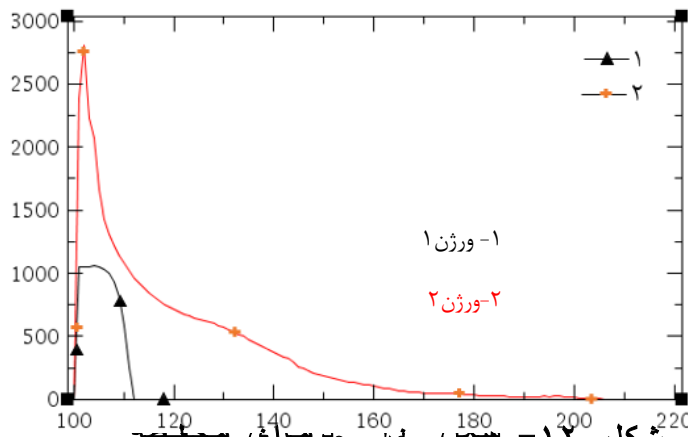


در ابتدای حادثه کاهش دمای غلاف سوخت در ورژن ۲ بیشتر از ورژن ۱ است؛ این به دلیل برداشت بیشتر حرارت در ورژن ۲ به علت خطا در بسته شدن شیر BRU-A در SG-3 است. اما در ادامه مشاهده می‌کنیم که در ورژن ۲ افزایش دمای غلاف سوخت بیشتر است و این به دلیل آن است که در ابتدا به علت زیاد بودن برداشت حرارت، مولدهای بخار از آب خالی شده و در ادامه تنها SG-4 برداشت حرارت را انجام می‌دهد.

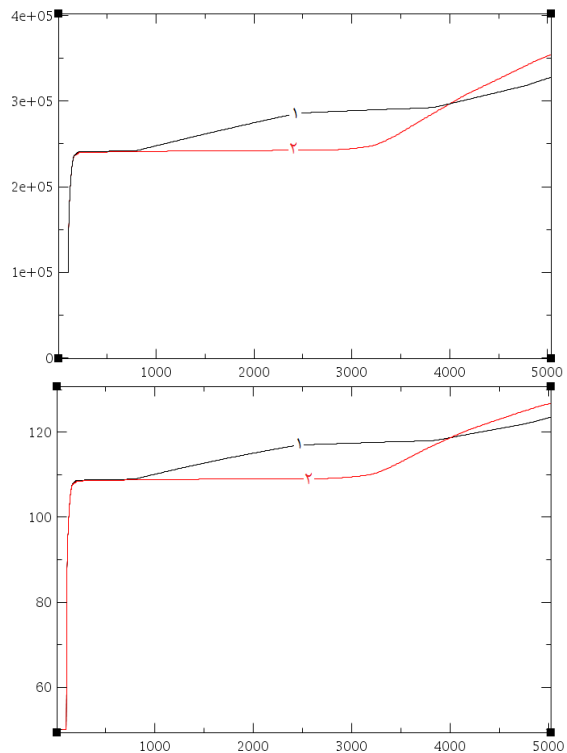
بعد از ایجاد شکست، به علت اختلاف فشار زیاد بین محیط محفظه ایمنی (۰/۱MPa) و خط بخار (۶/۳MPa)، بخار از نقطه شکست به محفظه ایمنی وارد می‌شود.

۱- دبی خروجی از محل شکست سمت کلکتور بخار

۲- دبی خروجی از محل شکست سمت مولد بخار



شکل ۱۲- دبی خروجی از محل شکست (kg/s) از زمان (s) شکل ۱۳- فشار محفظه ایمنی (Pa)



مقدار اولیه دما و فشار محفظه ایمنی را قبل از حادثه، به ترتیب برابر با 45°C و 10^5Pa در نظر می‌گیریم [۶]. مقدار مجاز دما و فشار محفظه ایمنی به ترتیب برابر با 150°C و 0.46MPa است. با توجه به شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود که مقدار فشار از مقدار مجاز خود بیشتر شده است. البته سیستم پاشش آب محفظه ایمنی و نیز سیستم‌های ایمنی مربوطه در این شبیه سازی مدل نشده‌اند و به درستی نمی‌توان در این مورد اظهار نظر کرد.

نتیجه گیری

در این پروژه شبیه سازی حادثه شکست خط اصلی بخار در داخل محفظه ایمنی (بخش ایزوله نشده خط بخار) با استفاده از کد RELAP5/MOD3.2 در دو ورژن انجام گرفت و با بررسی معیارهای ارزیابی ایمنی نشان داده شد که این نیروگاه با سیستم‌های ایمنی در نظر گرفته شده در مقابل حوادث مورد نظر ایمن خواهد بود.

با توجه به نتایج موجود:

مقدار فشار در مدار اولیه و ثانویه نیروگاه نباید به ترتیب از $20/24\text{MPa}$ و $9/02\text{MPa}$ تجاوز کنند [۲]. در طول این حادثه فشار اولیه در ورژن ۱ و ۲ به ترتیب از مقادیر $16/00\text{MPa}$ و $18/15\text{MPa}$ و فشار مدار ثانویه در هر دو ورژن از مقدار $7/15\text{MPa}$ تجاوز نمی‌کنند. بنابراین فشارها از مقدار مجاز خود تجاوز نمی‌کنند.

دمای سوخت در حالت شکست در قسمت ایزوله نشده در هر دو ورژن، از مقدار اولیه اش بیشتر نمی‌شود. حداکثر دمای قرص‌های سوخت باید زیر مقدار ذوب دی‌اکسید اورانیوم باشد (کمتر از 2400°C برای سوخت کارکرده و 2550°C برای سوخت تازه). این مقدار در طول حادثه همیشه زیر مقدار 1910°C است.

در ادامه با بررسی تاثیر حادثه شکست خط لوله و به دنبال آن باز شدن شیرهای BRU-A در مولدهای بخار، در پارامترهای ترموهیدرولیکی محفظه ایمنی، نشان دادیم که در این حادثه هم بررسی این پارامترها و عملکرد سیستم‌های ایمنی محفظه ایمنی برای کنترل دما و فشار آن مهم است.

مرجع

1. Atomic Energy Organization of IRAN (AEOI), Final Safety Analysis Report (FSAR) for Bushehr WWER-1000 Reactor, Tehran, Iran (chapter5), 2002

2. IAEA, Safety Report Series No.30 Accident Analysis for Nuclear Power Plant with Pressurized Water Reactor, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA, 2003
3. Division of Systems Technology Office of nuclear Regulatory Research, RELAP5/MOD3 Code Manual, Nuclear Safety Analysis Division, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, 2002
4. Atomic Energy Organization of IRAN (AEOI), Final Safety Analysis Report (FSAR) for Bushehr WWR-1000 Reactor, Tehran, Iran (chapter15), 2002
5. M. Pavlova, M. Andreeva, P. Groudev, Steam Line Break investigation at full power reactor for VVER-1000/V320, Nuclear Engineering and Design (2015) 65-68.
6. Noori-Kalkhoran O, Minuchehr A, Rahgoshay M, Shirani A, Short-term and long-term analysis of WWR-1000 containment parameters in a large break LOCA, Progress in Nuclear Energy, Volume 74, 2 February 2014, 201-212