

مدل‌سازی حادثه‌ی وخیم از دست رفتن برق در نیروگاه بوشهر (SBO) و تولید مواد مذاب به کمک کد MELCOR

برزگری، محمد*^(۱) - ذوالفقاری، احمدرضا^(۲) - آقایی، مهدی^(۳)

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه راکتور

چکیده:

در این مقاله با استفاده از کد محاسباتی MELCOR که یک کد یکپارچه با قابلیت محاسبات سریع است، ابتدا حالت پایایی^۱ نیروگاه بوشهر طراحی شده و پس از صحت‌سنجی، حادثه‌ی قطع کامل برق نیروگاه^۲ به کمک آن مدل شده است و صحت نتایج آن با نتایج گزارش نهایی ایمنی نیروگاه بوشهر^۳ مقایسه شده است. لازم به ذکر است که نتایج موجود در FSAR تا قبل از زمان ذوب قلب می‌باشد که در این مقاله با توجه به مدل‌سازی انجام شده به نتایج ذوب قلب و حتی پس از آن نیز اشاره شده است. به این ترتیب از نتایج استخراج شده از این مقاله در باب مواد مذاب تولید شده می‌توان جهت انجام محاسبات آتی نیز استفاده نمود.

کلمات کلیدی: نیروگاه بوشهر، کد MELCOR، حوادث وخیم، حادثه SBO

مقدمه:

برای بررسی حادثه SBO سه نسخه وجود دارد ولی در این مقاله به نسخه اول که در آن، سناریو حادثه بدون دخالت اپراتور و در واقع بدون مدیریت آن بررسی می‌شود پرداخته شده است. حادثه‌ی قطع کامل برق نیروگاه به صورت از دست رفتن تمامی منابع تغذیه‌ی الکتریکی AC^۴، هم نرمال و هم اضطراری تعریف می‌شود که به دنبال قطع منبع توان، پمپ‌های گردش اصلی خنک‌کننده تریپ می‌کنند^۵، تغذیه‌ی اصلی و کمکی آب مدار دوم به مولد بخار قطع می‌شوند^۶، سیستم‌های کنترل فشار (گرم‌کن‌ها و افشانه‌ها) در فشارنده از کار می‌افتند^۷، شیرهای تخلیه‌ی بخار به توربین بسته می‌شوند^۸. لازم به ذکر است که اگر اقدامات لازم صورت نگیرد در نهایت به ذوب قلب^۹ ختم می‌شود و به همین دلیل جزو حوادث شدید^{۱۰} و حوادث ماورای مبنای طراحی^۱ دسته‌بندی می‌شود [۱].

¹ Steady-State

² Station-Blackout (SBO)

³ Final Report on Safety Analysis (FSAR)

⁴ Loss of all a.c. off-site and on-site power supply sources (power unit blackout)

⁵ Trip of all RCP sets

⁶ Trip of the main and auxiliary feedwater systems of the secondary side

⁷ Disconnection of PRZ system power supply

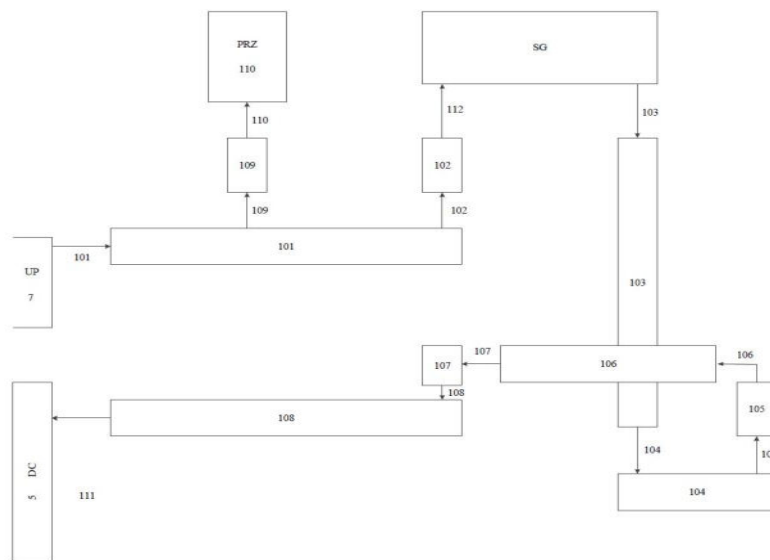
⁸ BRU-K disconnection

⁹ Core meltdown

¹⁰ Severe Accident

روش کار:

برای بررسی هر عملیاتی از جمله یک حادثه بر روی نیروگاه، ابتدا باید حالت پایای نیروگاه را شبیه‌سازی کرد که برای این کار در این مقاله با استفاده از کد MELCOR که یک کد یکپارچه با قابلیت محاسبات سریع بوده و دارای بسته‌های نرم‌افزاری متفاوتی از جمله بسته‌های قلب^۱، حجم کنترل ترموهیدرولیکی^۳، مسیر جریان، ساختارهای حرارتی و چندین پکیج دیگر می‌باشد، استفاده شده است [۲]. لذا در این مقاله نیز پس از نودبندی نیروگاه (که در اشکال (۱) تا (۳) نمونه‌ای از آن‌ها را ملاحظه می‌کنید) و مدل‌سازی حالت پایای نیروگاه بوشهر و رسیدن به نتایج حالت پایا که مقادیر آن در جدول (۱) موجود می‌باشد، حادثه SBO بر روی آن اعمال شد. لازم به ذکر است که مدار اول نیروگاه به صورت کامل و مدار دوم نیز به صورت چشمه^۴ (آب برگشتی^۵ به مبدل حرارتی) و چاهک^۶ (بخار خروجی از مبدل حرارتی) مدل‌سازی شده‌اند [۳]. همچنین قبل از شرح وقوع حادثه، این نکته قابل تأمل می‌باشد که منابع اطلاعاتی نیروگاه بوشهر که توسط روس‌ها در اختیار ایران قرار می‌گیرد هر سال به روزتر و کامل‌تر می‌شود و نواقص و کمبودهای نسخه‌های قبلی در آن‌ها جبران می‌شود ولی مدارک و نسخه‌ی کامل نیروگاه جزء اسناد محرمانه بوده، لذا در این مقاله نیز از FSAR سال ۲۰۰۵ میلادی برای شبیه‌سازی و اعتبارسنجی استفاده شده است [۱]. در جدول (۲) نیز توالی رخدادهای این حادثه و رویدادهای به وجود آمده را ملاحظه می‌کنید که در قسمت نتایج به بررسی آن‌ها پرداخته خواهد شد.



¹ Beyond Design Basis Accident (BDBA)

² Core Package (COR)

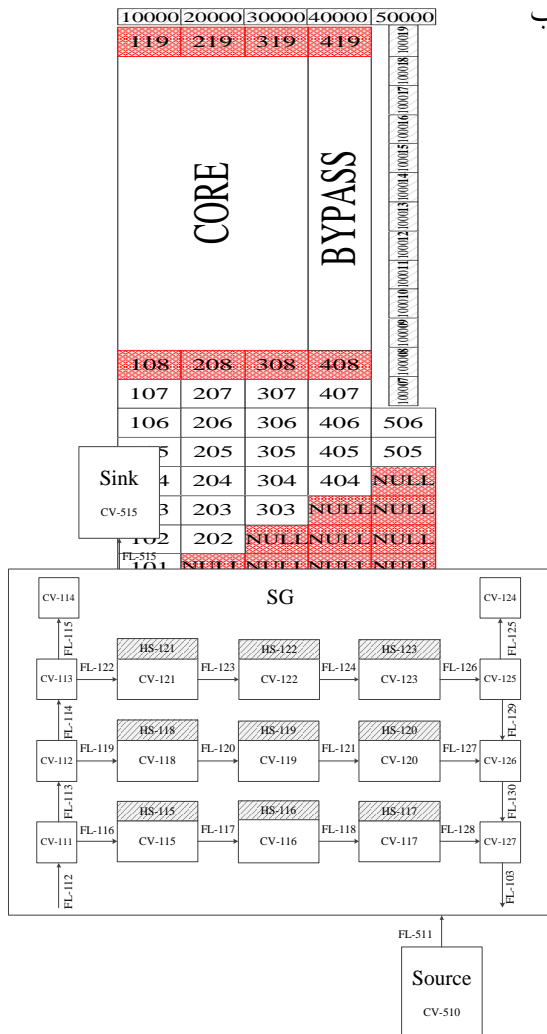
³ Control Volume Hydrodynamics Package (CVH)

⁴ Source

⁵ Feed Water

⁶ Sink

شکل (۲) نودبندی کلی مدار اول نیروگاه به جز قلب



شکل (۳) نودبندی مبدل حرارتی و مدار دوم نیروگاه

جدول (۱) مشخصات حالت پایای مدل‌سازی شده

FSAR[4]	مدل‌سازی	پارامترها
۵۹۳/۱۵°k	۵۹۳/۱۵°k	دمای خروجی از قلب
۵۶۳/۱۵°k	۵۶۲/۹۵°k	دمای ورودی به قلب
۱۵/۴MPa	۱۵/۴MPa	فشار خروجی از قلب
۱۵/۷MPa	۱۵/۷MPa	فشار ورودی به قلب
۵۵۱/۶۵°k	۵۵۱/۸۵°k	دمای مبدل حرارتی
۶/۲۷MPa	۶/۲۸۶MPa	فشار مبدل حرارتی
۶۱۹/۱۵°k	۶۱۷/۳۷°k	دمای فشارنده
۱۵/۴MPa	۱۵/۳۷MPa	فشار فشارنده

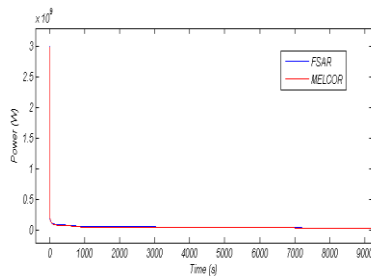
جدول (۲) توالی زمانی و رخداد‌های به وجود آمده [۱]

توضیحات	رخدادها	زمان (S)
از دست رفتن تمامی منابع تغذیه‌ی الکتریکی AC	از کار افتادن پمپ‌های گردش اصلی خنک‌کننده قطع شدن تغذیه‌ی اصلی و کمکی آب مدار دوم به مولد بخار از دست دادن سیستم مکش آب از زیر مدار اولیه ^۱	۰/۰

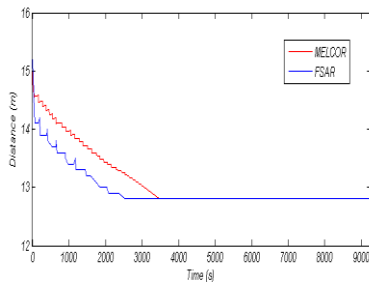
¹ Trip of makeup-blowdown system of the primary system

	قطع شدن شیرهای BRU-K	
	قطع شدن منبع برق سیستم فشارنده	
فعال شدن عملیات پشتیبانی توربین	بسته شدن شیرهای توقف توربین ^۱	۰/۶
قطع کلی برق نیروگاه	تولید سیگنال خاموشی ناگهانی ^۲	۱/۴
فعال شدن عملیات پشتیبانی	حرکت میله‌های کنترل به داخل ^۳	۱/۷
رسیدن فشار SG به ۷/۱۵ MPa	باز شدن شیرهای BRU-A	۵/۰
	تخلیه‌ی مولد بخار ^۴	۲۸۰۰/۰
	شروع ذوب شدن قلب	۷۰۰۰/۰

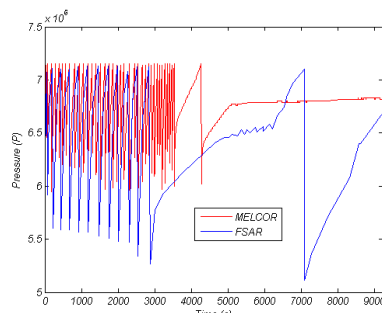
نتایج:



نمودار (۱) توان نسبی راکتور



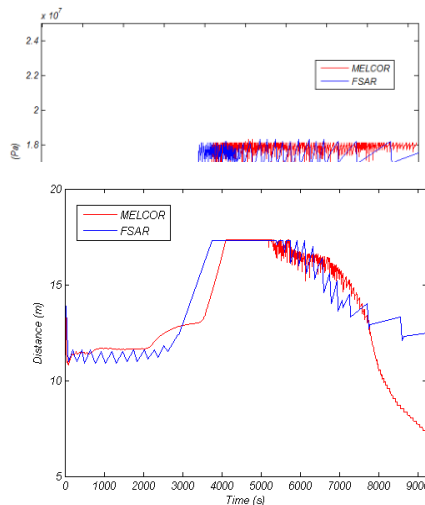
نمودار (۲) سطح آب در مولد بخار



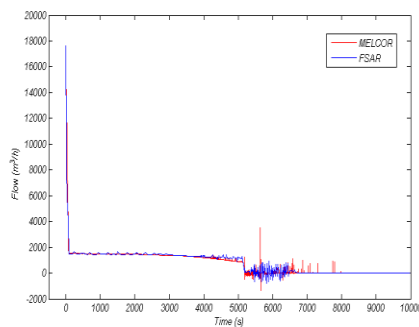
- 1
- 2 Scram signal generation
- 3 The onset of control rod motion
- 4 SG drainage

همان‌طور که در جدول (۲) مشهود است، زمانی که حادثه SBO اتفاق می‌افتد، در ۱/۴ ثانیه بعد از وقوع حادثه دستور خاموشی صادر شده و توان در همان لحظه ابتدایی با افت شدیدی مواجه می‌شود اما به دلیل وجود پاره‌های شکافت و انرژی آن‌ها، توان تولیدی راکتور به صفر مطلق نمی‌رسد که در این شبیه‌سازی نیز توزیع توان پس از وقوع حادثه به همین صورت بوده و نمودار (۱) بیانگر این موضوع می‌باشد. همچنین در زمان وقوع حادثه شیرهای ورودی آب تغذیه به مولد بخار و بخار خروجی از آن به توربین بسته می‌شوند اما فشار مولد بخار به دلیل انتقال حرارتی که مدار اول با آب موجود در سمت ثانویه مولد بخار دارد، افزایش می‌یابد اما شیرهای ایمنی نمی‌گذارند تا فشار آن از ۷/۱۵ MPa بالاتر و یا از ۶/۲۷ MPa پایین‌تر برود که این شیرها همان شیرهای BRU-A می‌باشند.

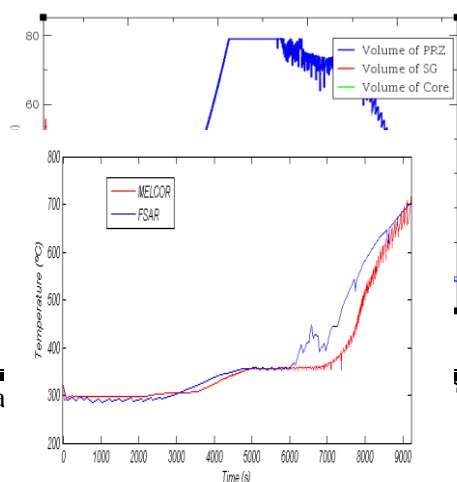
سطح مولد بخار نیز از آنجایی که نه تنها دیگر آبی وارد آن نمی شود بلکه، آبی که در سیستم خود داشته است نیز، با آب مدار اول تبادل حرارتی برقرار کرده و بخار می شود؛ که این بخار نیز پس از آن که فشار مولد بخار به $7/15 \text{ Mpa}$ رسید به اتمسفر تزریق می شود و این روند تا زمانی که آب مولد بخار تماماً تخلیه شده و دیگر آبی درون مدار ثانویه ی مولد بخار باقی نماند ادامه دارد که این روند را در نمودار (۲) ملاحظه می کنید. لازم به ذکر است که تفاوت زمان تخلیه ی مولد بخار در نمودار (۲) هم به دلیل نوع طراحی و نودبندی می باشد و



نمودار (۵) سطح آب در فشارنده



نمودار (۶) دبی خنک کننده ورودی به قلب



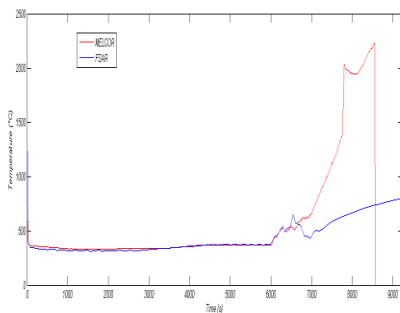
نمودار (۹) دمای خروجی از راکتور

هم اینکه روس ها شرایط حادثه را شدیدترین نوع حالت و کاملاً محافظه کارانه^۱ در نظر می گیرند و همچنین تفاوت در فشار مولد بخار در نمودار (۳) نیز، هم به دلیل نوع طراحی و

نودبندی می باشد و هم به دلیل اینکه در حالت MELCOR زمانی که شیرها باز و بسته می شوند ماده ی زیادی از مولد بخار خارج می شود و بخار چندانی پس از تخلیه ی کامل مولد بخار در آن باقی نمی ماند که در ادامه بخواهد باعث افزایش فشار در مولد بخار شود. با کاهش سطح مولد بخار فشار و دما در مدار اول به دلیل برداشت حرارت کمتر، افزایش یافته که با تخلیه ی کامل مولد بخار، به شدت افزایش می یابد که این افزایش فشار، بالا آمدن سطح آب در فشارنده را به همراه دارد تا جایی که سیستم ایمنی فشار در فشارنده فعال شده (شیرهای ایمنی) و فشار فشارنده و به دنبال آن فشار مدار اول را بین $17/2 \text{ Mpa}$ تا حدود $18/1 \text{ Mpa}$ نگه می دارد که باعث می شود سطح آب در فشارنده ثابت بماند که تغییرات فشار و سطح آب در فشارنده در نمودارهای (۴) و (۵) مشهود می باشند.

همچنین دلیل اینکه شیرهای ایمنی در بعضی زمانها در بازه ی خاصی از فشار که برایشان تعریف شده است کارنکرده و بعضاً دیرتر یا زودتر باز و بسته می شوند، مکانیکی بودن آنها و حجم فشاری که در آن زمان در

پشت شیرهای ایمنی قرار دارد، می‌باشد. همچنین برای پیکی که در نمودار (۵) برای مدل MELCOR قبل از افزایش شدید در سطح آب به وجود آمده است، باید گفت که قبل از تخلیه‌ی کامل مولد بخار، در زمان حدود ۲۲۰۰ ثانیه سطح آب موجود در مولد بخار به قدری کاهش می‌یابد که فقط با اولین سری از لوله‌های U شکل که در پایین‌ترین ارتفاع مولد بخار قرار دارند تبادل حرارتی انجام می‌دهد و از آنجائیکه بیش از ۹۰٪ آب موجود در لوله‌های U شکل در دو سری بالایی قرار دارد (به شکل (۳) رجوع شود)، برداشت حرارت کمتری از آب مدار اول صورت گرفته و فشار در فشارنده زودتر افزایش می‌یابد. سطح آب در



نمودار (۱۰) ماکزیم دمای سوخت

پایین تر بیاید. با بخار شدن آب مدار اول، عملاً دیگر هیچ برداشت حرارتی از میله‌های سوخت صورت نمی‌گیرد و دمای مجتمع‌های سوخت به شدت افزایش یافته و در نهایت از بالاترین قسمت خود، به صورت شمعی شروع به ذوب شدن می‌کنند. لازم به ذکر است همان‌طور که گفته شد نتایج موجود در FSAR تا قبل از زمان ذوب قلب می‌باشد ولی این پروژه به نتایج ذوب قلب و حتی پس‌از آن نیز رسیده است که به‌طور مثال در نمودار (۱۰) افزایش دما در سوخت و به ذوب رسیدن آن را ملاحظه می‌کنید.

بحث و نتیجه‌گیری:

در این پروژه ابتدا با استفاده از کد محاسباتی MELCOR، حالت پایای نیروگاه بوشهر مدل‌سازی شد و اعتبارسنجی نتایج حالت پایای آن نیز با نتایج گزارش نهایی ایمنی نیروگاه بوشهر انجام گردید و سپس حادثه‌ی قطع کامل برق نیروگاه بوشهر (SBO) بر روی حالت پایا پیاده‌سازی شد که پس اعتبارسنجی آن با نتایج موجود، مشاهده شد که نتایج بسیار مطلوبی حاصل گردیده است. همچنین در این پروژه علاوه بر به دست آمدن نتایج موجود در FSAR که تا قبل از زمان ذوب شدن قلب و Heat-up می‌باشد، نتایج بعداز آن نیز به دست آمد و ثابت شد که کد MELCOR یک کد یکپارچه بوده و در رابطه با حوادث وخیم و عواقب بعداز آن، بسیار کارآمد و دقیق می‌باشد.

مراجع:

- [۱] A. E. O. O. IRAN, *FINAL SAFETY ANALYSIS REPORT_CHAPTER-15*. "Bushehr" NPP
Unit 1, January, 2007.
- [۲] R. Gauntt, "MELCOR Computer Code Manuals, Vol. 1: Primer and Users' Guide, Version 1.8. 6 September 2005, Sandia National Laboratories Albuquerque, NM ,pp. 87185-0739, 2005.
- [۳] M. Pavlova, "Development and validation of VVER-1000 input deck for severe accident calculations with MELCOR Computer Code, *International School on Nuclear Physics, Neutron Physics and Nuclear Energy, Varna, Bulgaria*, September. ۲۰۰۳ ,
- [۴] F. S. A. REPORT, *ATOMIC ENERGY ORGANIZATION OF IRAN_CHAPTER-4*. "Bushehr" NPP
Unit 1, January, 2007.