

## ارزیابی پدیده گردش طبیعی غیر همسو در طی حادثه قطع کامل برق (SBO) نیروگاه

### PWR بوسیله‌ی کد MELCOR

عارف الدین زرنوشه فراهانی<sup>۱\*</sup>، فرامرزیوسف پور<sup>۳</sup>، سید محسن حسینی<sup>۴</sup>

۱- باشگاه پژوهشگران جوان

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی هسته‌ای، تهران، ایران

۳- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

۴- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق، دانشکده علوم پایه، تهران، ایران

#### چکیده:

پس از حادثه قطع کامل برق نیروگاه فوکوشیما در سال ۲۰۱۱، تحلیل این حادثه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شد. براین اساس مدل‌سازی حادثه قطع کامل برق در نیروگاه هسته‌ای تحت فشار به منظور تحلیل پدیده گردش طبیعی غیر همسو سیال درون دسته لوله‌های مولد بخار پرداخته شده است. براساس آنالیزهای ایمنی قطعی انجام شده بر روی مدل MELCOR نیروگاه تحت فشار، پیشرفت حادثه قطع کامل برق در نیروگاه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است و نتایج آن بر بر روی پارامترهای ترموهیدرولیکی و ذوب قلب راکتور نمایش داده شده است. همچنین نحوه‌ی پدیده گردش طبیعی غیر همسو سیال درون مولد بخار مورد ارزیابی قرار گرفته است.

**کلید واژه‌ها:** پدیده گردش طبیعی سیال، حادثه قطع کامل برق، کد MELCOR، نیروگاه هسته‌ای، مدل‌سازی SBO

#### ۱. مقدمه:

حادثه فوکوشیما در سال ۲۰۱۱، اهمیت حادثه شدید هسته‌ای قطع کامل برق (SBO)<sup>۱</sup> را بار دیگر به جامعه جهانی گوشزد کرد. باتوجه به تولید برقی معادل ۲۰ هزار مگاوات در سند چشم‌انداز توسعه کشور و حساسیت جامعه جهانی بر پیشرفت‌های هسته‌ای کشور، اهمیت برنامه‌ریزی جامع برای مدیریت بحران حوادث از هم اکنون برای صنعت هسته‌ای کشور صد چندان است. از این رو نیروگاه در حال طراحی IR-360 که توسط متخصصان بومی کشور در حال طراحی است نیز نیازمند تحلیلهای ایمنی متعدد است. از جمله این تحلیلهای، مدل‌سازی و تحلیل حادثه وخیم قطع کامل برق و اثرات آن بر پدیده گردش طبیعی غیر همسو سیال<sup>۲</sup>، جهت محاسبه داده‌های لازم برای PSA Level 2 می‌باشد.

راکتور مورد نظر این پژوهش یک راکتور تحت فشار با خنک کننده آب سبک می‌باشد [۱]. شبیه‌سازی حادثه در مدل MELCOR با تعریف دقیق سناریوی TMLB حادثه SBO و پیاده‌سازی جزئیات آن در ساختار کد صورت گرفته است. براساس این سناریو، سیستم آب تغذیه اصلی از کار می‌افتد و سیستم آب تغذیه

<sup>1</sup> Station Black-Out

<sup>2</sup> Countercurrent Natural Circulation

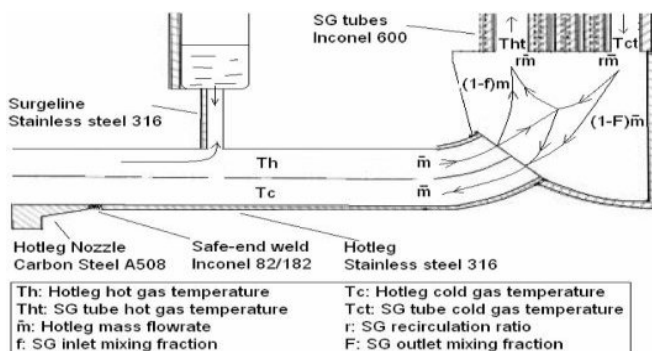
اضطراری ایزوله میشود [۴] و فرض میشود که با اولین عملکرد شیرایمنی خطلوله بخار MSSV<sup>۱</sup> در حالت باز قفل می‌شود [۵]. در این مقاله پس از معرفی ساختار کد MELCOR، نحوه‌ی مدلسازی حادثه قطع کامل برق در نیروگاه هسته‌ای به کمک کد MELCOR تشریح شده است. در نهایت پارامترهای مختلف از جمله فشار و دما در سیستم‌های مختلف نیروگاه و پدیده گردش طبیعی غیرهمسو سیال در دسته لوله‌های مولدبخار مورد ارزیابی تحلیل قرار گرفته شده است.

## ۲. معرفی کد MELCOR

MELCOR یک کد هسته‌ای است که تمام پدیده‌های حوادث شدید راکتورهای آب سبک در فاز درون محفظه راکتور و در فاز خارج محفظه را تحت پوشش قرار می‌دهد. این کد در سال ۱۹۸۲، در آزمایشگاه ملی سندیا تحت حمایت کمیسیون تنظیم مقررات هسته‌ای ایالات متحده آمریکا، به منظور انجام تجزیه و تحلیل‌های یکپارچه از حوادث شدید در راکتورهای هسته‌ای، طراحی شده و توسعه یافته است [۳]. در این پژوهش از نسخه ۱.۸.۶ کد MELCOR که در سال ۲۰۰۵ میلادی انتشار یافته، استفاده شده است.

## ۳. شناخت پدیده گردش طبیعی غیرهمسو سیال در حادثه قطع کامل برق نیروگاه

مطابق شکل (۱) که پدیده گردش طبیعی غیرهمسو سیال در مولد بخار نمایش داده شده است، سیال عبوری از خطلوله گرم سیستم خنک‌کننده راکتور به دو بخش گرم و سرد تقسیم می‌گردد، بخشی از سیال گرم که در ناحیه فوقانی خطلوله گرم<sup>۲</sup> قرار دارد پس از وارد شدن به ناحیه ورودی هد پایین<sup>۳</sup> با سیال سرد برگشتی از لوله‌های مولدبخار، بر مبنای کسر اختلاط<sup>۴</sup> مخلوط می‌شود و بخشی دیگر مستقیماً وارد لوله‌های مولد بخار



می‌شود. این بخش سیال پس از طی نمودن دسته لوله‌ها و وارد شدن به ناحیه خروجی هد پایین مولد بخار، مجدداً وارد دسته لوله‌های سرد مولد بخار می‌گردد و پس از طی مسیر همانطور که ذکر شد با سیال گرم مخلوط می‌شود. [۲].

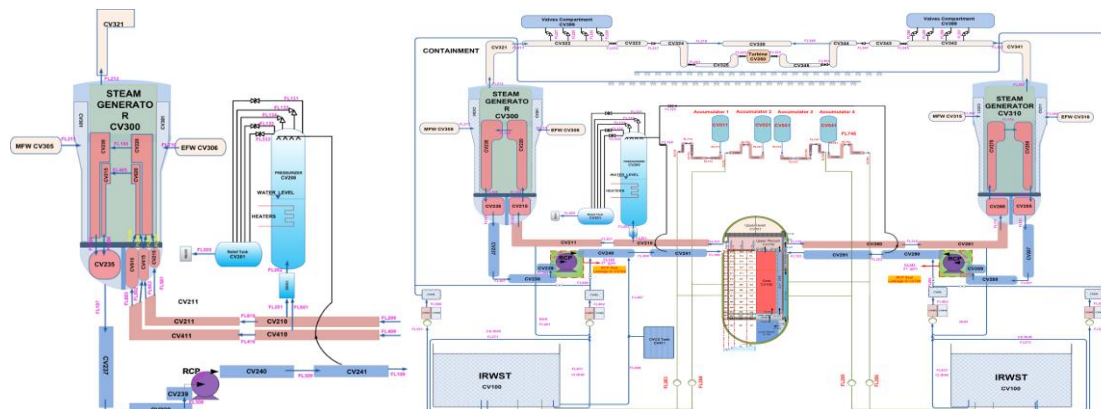
شکل (۱): نحوه‌ی گردش طبیعی غیرهمسو سیال درون مولد بخار در اثر حادثه SBO<sup>[۶]</sup>

<sup>1</sup> Main Steam Safety Valve  
<sup>2</sup> Hot Leg  
<sup>3</sup> Bottom Head  
<sup>4</sup> Mixing Fraction

## ۴. مدل‌سازی حادثه قطع کامل برق (SBO) در کد MELCOR

مدلسازی تمامی سیستم‌های نیروگاه با استفاده از پکیج‌های مختلف کد صورت گرفته است. اولین مرحله در مدل‌سازی ایجاد یک حجم‌بندی مناسب است. مطابق شکل (۲) که نمایش‌دهنده نحوه‌ی حجم‌بندی نهایی است، حجم‌های کنترل از طریق مسیرهای جریان (FL)<sup>۱</sup> با یکدیگر در ارتباط می‌باشند، همچنین ارتباط حرارتی مابین سیال سیستم‌های مختلف توسط ساختارهای گرمایی<sup>۲</sup> تعریف شده است.

بر اساس نحوه‌ی جریان سیال درون مولدبخار و مشابه تصویر سمت راست شکل (۲) ناحیه ورودی هد پایین<sup>۳</sup> به سه حجم کنترل داغ، مخلوط و سرد تقسیم شده است، همچنین خط لوله گرم و دسته‌لوله‌های مولدبخار به دو حجم کنترل داغ (فوقانی) و سرد (تحتانی) تقسیم شده است. بخش از مسیر جریان داغ از خط لوله گرم وارد ناحیه داغ ورودی هد پایین شده و بخشی دیگر وارد ناحیه مخلوط که با بخشی از سیال برگشتی پس از ورود به دسته لوله‌های مولد بخار مخلوط می‌شود.



شکل (۲): نحوه‌ی نودبندی مدل MELCOR نیروگاه IR360

## ۵. نتایج و بحث

گراف مربوط به میزان تغییرات دبی جرمی بخار خروجی از مولدبخار در طول حادثه SBO در شکل (۳) رسم شده است. مقدار دبی جرمی بخار خروجی در طی زمان (-۲۰۰) تا صفر ثانیه مقداری ثابت است که بیانگر حالت پایدار سیستم می‌باشد. در زمان صفر ثانیه با قطع کامل برق نیروگاه منبع آب تغذیه اصلی مولدبخار از کار افتاده و با توجه به ایزوله شدن سیستم آب تغذیه اضطراری مولدبخار هیچ سیالی به دانکامر مولدبخار تزریق نشده است و در نتیجه بخار تولیدی کاهش می‌یابد. در اثر انتقال حرارت بین دو سمت مولدبخار، تنها موجودی درون بویلر تبدیل به بخار شده و تجمع می‌یابد که بعد از هر بار، باز و بسته شدن MSSV و

<sup>1</sup> Flow Path  
<sup>2</sup> Heat Structures  
<sup>3</sup> Bottom Head

کاهش فشار می‌تواند از مولدبخار تخلیه شود. در مرتبه پنجم عمل باز و بسته شدن شیر ایمنی خطلوله اصلی بخار در حالت باز قفل می‌شود، این امر سبب کاهش مستمر بخار خروجی از مولدبخار می‌شود تا جایی که موجودی آب درون بویلر تماماً تبخیر شده و خارج شود. در این زمان است که مقدار دبی جرمی بخار خروجی از مولدبخار صفر می‌شود. از زمان صفر به بعد که حادثه بر روی نیروگاه اعمال شده است. ملاحظه می‌شود که با تریپ راکتور و از کارافتادن پمپ در اثر قطع کامل برق فشار سیال مدار اول و قلب راکتور به یکباره کاهش شدیدی می‌یابد. همانگونه که توضیح داده شد با گذشت زمان، در اثر افزایش گرمای قلب و تبخیر سیال، فشار بالا می‌رود. این افزایش تا جایی ادامه می‌یابد که فشار به نقطه تنظیم شده شیرهای ایمنی فشارنده (PSV)<sup>۱</sup> می‌رسد. این شیرها که از نوع فنری<sup>۲</sup> است در اثر نیروی ناشی از فشار سیال خنک‌کننده مدار اول باز می‌شود و به محض اینکه مقداری از فشار سیستم تخلیه می‌شود و فشار افت پیدا می‌کند، شیرها بسته می‌شود. عمل باز و بسته شدن شیرهای ایمنی فشارنده به طور مداوم ادامه پیدا می‌کند. مطابق شکل (۴) با هر بار عمل باز شدن این شیرها مقداری از موجودی سیال مدار اولیه از دست می‌رود و وارد حجم کنترل تانک تخلیه می‌شود.

سناریو مورد مطالعه در این پژوهش منجر به جریان غیرهمسو همرفتی طبیعی در خطلوله گرم سیستم خنک‌کننده راکتور می‌شود. نمودار شکل (۵) دبی جرمی سیال بخار آب عبوری از قسمت فوقانی محفظه تحت فشار به درون شاخه گرم را در دو مسیر رفت و برگشت نمایش می‌دهد. در شکل (۵) ملاحظه می‌شود که در زمان‌های ابتدایی (تا حدود ۳۴۰۰ ثانیه) هیچ بخار آبی از خطلوله گرم عبور نمی‌کند که نشان دهنده این موضوع است که تا این زمان، هنوز بخار آب تولیدی توسط حرارت واپاشی مقدار زیادی نیست و سطح آب بالاتر از خطلوله گرم می‌باشد. از این زمان به بعد بخار تولیدی افزایش یافته و با کاهش سطح آب درون قلب راکتور و خطلوله گرم، بخار آب فضای لازم جهت حرکت به سمت لوله‌های مولدبخار را پیدا می‌نماید. اما در مسیر برگشت بخار آب با سد آب درون ناحیه خروجی<sup>۳</sup> Lower Plenum مولدبخار برخورد کرده و در همانجا متوقف می‌شود. با گذشت زمان بیشتر و کاهش بیشتر سطح آب درون خطلوله گرم و ناحیه خروجی Lower Plenum مولدبخار، فضای لازم در مسیر برگشت فراهم شده و بخار تجمع شده به یکباره از قسمت تحتانی خطلوله گرم به درون قلب برمی‌گردد. این فرآیند تا زمان شکست خطلوله گرم ادامه می‌یابد در زمان شکست تمامی سیال بخار آب تولیدی قلب، از طریق مسیر جریان رفت (مسیر جریان فوقانی - FL209) به درون فضای محفظه ایمنی ساختمان راکتور<sup>۴</sup> می‌ریزد. به جهت اینکه مسیر جریان ناحیه تحتانی شاخه گرم سیستم خنک‌کننده راکتور در جهت خلاف مسیر جریان قسمت فوقانی شاخه گرم می‌باشد، مقدار دبی جرمی

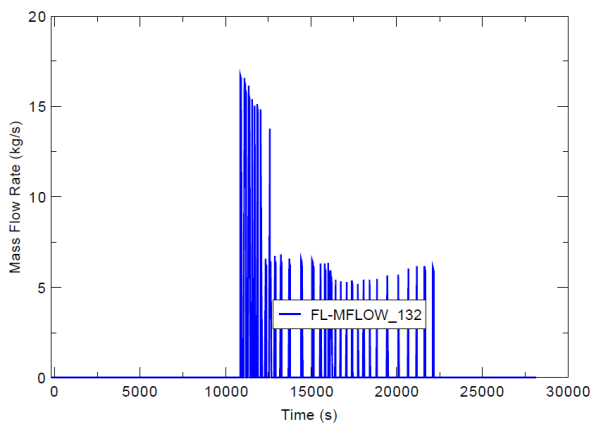
<sup>1</sup> Pressurizer Safety Valve

<sup>2</sup> Spring Loaded

<sup>3</sup> Outlet Nozzle

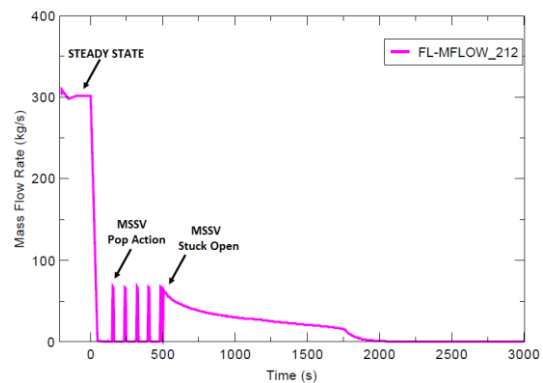
<sup>4</sup> Containment

بخار آب عبوری نشان داده شده در شکل (۵) مقداری منفی می‌باشد. دبی جرمی بخار آب عبوری در دو مسیر جریان رفت و برگشت (به ترتیب گرم و سرد) در ناحیه انحنای فوقانی دسته لوله‌های مولدبخار در شکل (۶) نمایش داده شده است. مقدار دبی جرمی بخار آب عبوری تا زمانی در حدود ۳۴۰۰ ثانیه صفر می‌باشد، از این زمان به بعد به جهت تبخیر آب درون شاخه گرم گردش سیال بخار آب درون دسته لوله‌های مولدبخار شروع می‌شود. با توجه به فشار کم ناحیه درون ساختمان راکتور (کانتینمنت) و فشار بالای مدار اول راکتور، اختلاف فشاری در حدود ۱۷ مگاپاسکال بین ناحیه این دو ناحیه در زمان شکست تمامی بخار آب درون مولدبخار به منظور تخلیه به سمت محل شکست درون شاخه گرم برمی‌گردد، به همین جهت عدد دبی جریان عبوری به یکباره مقدار بزرگ و منفی می‌شود. در شکل (۷) مقدار دبی جرمی سیال عبوری در مولد بخار در دو مدل حجم‌بندی با در نظر گرفتن گردش طبیعی، و بدون در نظر گرفتن گردش طبیعی سیال در حین حادثه قطع کامل برق نمایش داده شده است. در این شکل ملاحظه می‌گردد که در مدلی که گردش طبیعی لحاظ نشده است (نمودار قرمز رنگ)، دبی جرمی سیال بخار آب بین مقادیر مثبت و منفی دائماً تغییر می‌کند که نشان‌دهنده رفت و برگشت سیال می‌باشد. اما در مدل حجم‌بندی که گردش طبیعی با در نظر گرفتن دو مسیر جریان لحاظ شده است، سیال می‌تواند از مسیر رفت (نمودار آبی رنگ) وارد دسته لوله‌های مولدبخار گردد و همان مقدار سیال از مسیر برگشت به داخل خط لوله گرم برگردد (نمودار سبز رنگ). در واقع با اصلاح مدل گردش طبیعی سیال مقدار دبی جرمی بیشتری در دسته لوله‌های مولدبخار گردش می‌نماید.



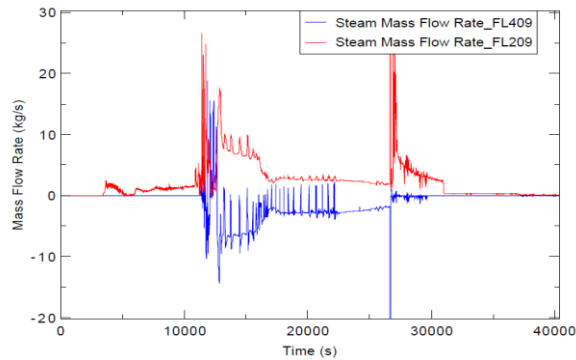
شکل (۴): تغییرات میزان دبی جرمی عبوری از شیر ایمنی

فشارنده PSV در حادثه SBO

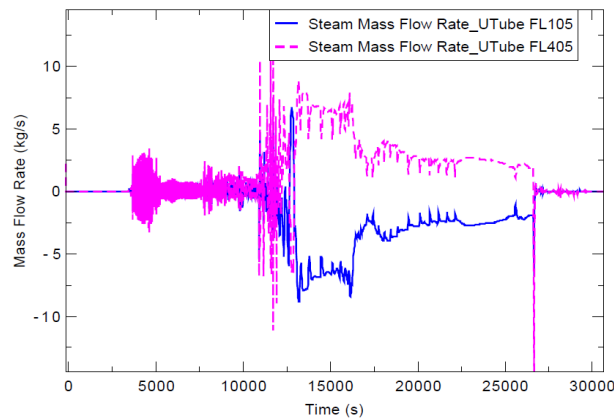


شکل (۳): دبی جرمی بخار خروجی از مولد بخار در

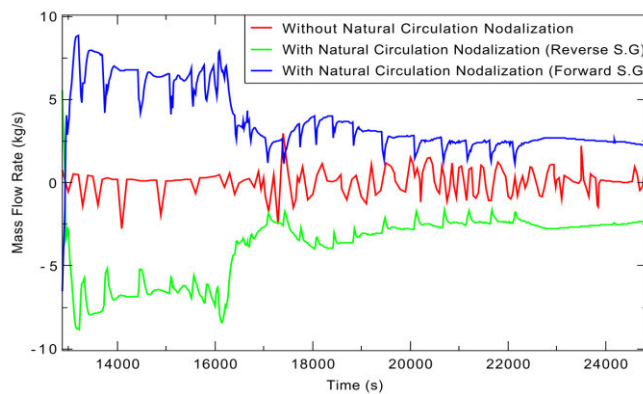
حادثه SBO



شکل (۵): دبی جرمی سیال بخار آب عبوری در مسیر رفت و برگشت درون خطلوله گرم در طی حادثه شدید قطع کامل برق نیروگاه



شکل (۶): دبی جرمی سیال بخار آب عبوری در مسیر رفت و برگشت درون دسته لوله‌های مولد بخار در طی حادثه شدید



شکل (۷): دبی جرمی سیال درون مولد بخار در دو مدل حجم‌بندی گردش طبیعی و غیر گردش طبیعی

۶. نتیجه‌گیری

از آنجایی که در برخی حوادث شدید مانند حادثه قطع کامل برق، فشار و دمای مدار اول نیروگاه افزایش می‌یابد، احتمال وقوع پدیده گردش طبیعی در لوله‌های سیستم خنک‌کننده راکتور در اثر این افزایش فشار و دمای سیستم وجود دارد و این پدیده سبب کاهش نسبی دمای سیال راکتور می‌شود.



همچنین میزان دبی سیال در گردش در این حادثه برای نیروگاه IR360 بررسی شده است اما با این وجود به مرور زمان با شکست ناشی از خزش دسته لوله‌های مولدبخار مواد رادیواکتیو موجود در سیال مدار اول به ناحیه ثانویه مولدبخار حمل می‌شود و در ادامه از طریق شیرهای ایمنی خط لوله بخار اصلی به محیط زیست منتقل می‌شوند، رخداد این حادثه می‌تواند منجر به عواقب زیست محیطی و بحرانی برای کل منطقه گردد.

## مراجع:

- [۱]. زرنوشه فراهانی و دیگران، آنالیز ترموهیدرولیک حالت پایدارمدل MELCOR مدار اول نیروگاه IR360، بیست و دومین کنفرانس هسته‌ای ایران، انجمن هسته‌ای ایران، ۱۳۹۴.
- [2]. ASAMPSA2, Volume2 best practices for the Gen II PWR, Gen II BWR L2 PSAs. Refrence IRSN-Raport PSN-RES/SAG/2013-0177.
- [3]. R. O. Gauntt, J.E. Cash, R. K. Cole, C. M. Erickson, L.L. Humphries, S. B. Rodriguez, and M. F. Young, "MELCOR Computer Code Manuals, Vol.1: Primer and Users' Guide, Version 1.8.6 September 2005," Sandia National Laboratories Albuquerque, NM 87185-0739, NUREG/CR-6119, Rev. 3, SAND 2005-5713.
- [4]. SGTR SEVERE ACCIDENT WORKING GROUP, "Risk Assessment of Severe Accident-Induced Steam Generator Tube Rupture", NUREG-1570, U.S. Nuclear Regulatory Commission (1998).
- [5]. Y. Liao and K. Vierow, "MELCOR analysis of steam generator tube creep rupture in station blackout severe accident", Journal of Nuclear Technology (152), 2005, Pages 302-313.
- [6]. C. H. Peng, Y. H. Yang, "The Analysis of Severe Accident Induced Steam Generator Tube Rupture and LERF Risk", Advanced Materials Research, Vols. 614-615, pp. 626-631, 2013