بررسی تاثیر سیستم ایمنی Core catcher در واحد دوم نیروگاه اتمی بوشهر(BNPP2) با استفاده از نتایج مدلسازی ذوب قلب و داده‌های تجربی موجود

آقاجانپور، سپیده* - بنی فضل، امین

سازمان انرژی اتمی- شرکت مهندسین مشاور افق هسته ای (OCE)

چکیده:

در مقاله پیش رو با استفاده از مدارک تحلیل ایمنی نیروگاه مرجع بوشهر۲ به بررسی سیستم Core catcher و نحوه عملکرد آن بعنوان یکی از سیستم‌های ایمنی Containment جهت اعمال رویکردهای نوین در کنترل و مدیریت حوادث وخیم (SAM) پرداخته شده است. لذا با توجه به آنالیز حادثه ذوب قلب راکتور بوشهر۱ توسط کد MELCOR و تشابه ساختار آن با راکتور بوشهر۲ و نیز داده‌های تجربی موجود، نتایج حاصل مقایسه گشته و اثر وجود سیستم ایمنی Core catcher در نیروگاه BNPP2 مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در نهایت، تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهند که وجود سیستم ایمنی مذکور بر خنک‌کاری مواد مذاب در توالی حوادث وخیم و جلوگیری از نشت مواد رادیواکتیو به محیط نقش بسزایی خواهد داشت.

کلید واژه : *بوشهر۲- BNPP2- ذوب قلب- حوادث وخیم- Core catcher- SAM- MELCOR.*

۱- مقدمه

مادامی که انرژی هسته‌ای به‌عنوان یک منبع انرژی استفاده می‌گردد، ملاحظات ایمنی مهمی در نظر گرفته خواهند شد که یکی از این ملاحظات اساسی، بررسی پارامترهای ترموهیدرولیکی در پی رخداد حوادث وخیم می‌باشد. مقدار گرمای تولید شده در یک راکتور هسته‌ای توسط ملاحظات گرمایی محدود می‌شود. به‌نحوی که قلب راکتور در شرایطی کار کند که با بهره‌بری از سیستم خنک‌کننده مناسب دمای سوخت و غلاف سوخت از محدوده ایمن تجاوز نکند. چرا که در غیر این صورت و با از دست رفتن خنک‌کننده ممکن است حادثه ذوب قلب و در پی آن عواقب ناخوشایند زیست‌محیطی و انسانی را به دنبال داشته باشد. لذا وجود ابزارهای تحلیلی جهت تشریح حوادث وخیم هسته‌ای و پیش‌بینی شرایط فیزیکی، شیمیایی و رادیولوژیکی در داخل و خارج محفظه ایمنی نیروگاه و تجهیزات وابسته به یک راکتور هسته‌ای امری اجتناب‌ناپذیر است[1]. یکی از تکنیک‌های مدیریت

حوادث ماورای طراحی و بطور کلی حوادث وخیم در نیروگاه‌های هسته‌ای استفاده از سیستم ایمنی core catcher می‌باشد. مبنای طراحی این سیستم به گونه‌ای است که با قرارگیری در قسمت زیرین محفظه تحت فشار راکتور بستری را جهت گیراندازی و توقیف مواد مذاب حاصل از ذوب قلب و محفظه تحت فشار راکتور ایجاد می‌کند تا علاوه بر خنک‌کاری و تغییر بستر از فاز متالیک به اکسیدی، از نشت مواد رادیواکتیو مایع و جامد به درون containment و محیط جلوگیری به عمل آید. این سیستم اثرات پرتوی حوادث وخیم را به سطح ایمن کاهش می‌دهد. سیستم مذکور برخلاف واحد یکم نیروگاه اتمی بوشهر، در واحد دوم طراحی شده تا بعنوان یکی از سیستم‌های ایمنی containment در حوادث منجر به ذوب قلب عمل نماید. با توجه به اینکه اطلاعات ارائه شده توسط پیمانکار بمنظور شبیه‌سازی کامل واحد دوم نیروگاه کافی نیست، و از طرفی شباهت کلی واحد یک و دو نیروگاه اتمی بوشهر (باستثناء تعدادی سیستم‌ها و ساختارهای محدود)، در این کار از نتایج ذوب قلب واحد یکم جهت بررسی دمای مواد مذاب بدون حضور سیستم core catcher استفاده شده است.

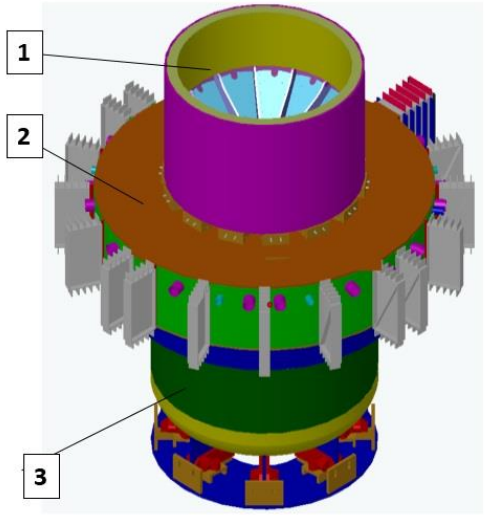
از آنجاییکه سیستم ایمنی core catcher در تعداد معدودی نیروگاه اتمی لحاظ گردیده است و این نیروگاه‌ها یا بسیار جدید بوده و یا هنوز آغاز بکار ننموده‌اند، داده‌های تجربی و شبیه‌سازی محدودی در این زمینه موجود است. از طرف دیگر بسیاری از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در این زمینه مربوط به سیستم core catcher در نیروگاه‌های EPR می‌باشد. کیم و همکاران در سال ۲۰۱۱ با انجام آزمایش در انستیتو انرژی اتمی کره جنوبی، رفتار دمایی مواد مذاب موجود در core catcher را مورد مطالعه قرار دادند[2]. در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی مواد مذاب حاصل از ذوب قلب از ترکیبات آلومینیوم استفاده گردید. در مقاله پیش رو بمنظور بررسی اثر سیستم core catcher از نتایج حاصل از تست مذکور استفاده شده است.

۲- سیستم ایمنی core catcher واحد دوم نیروگاه اتمی بوشهر

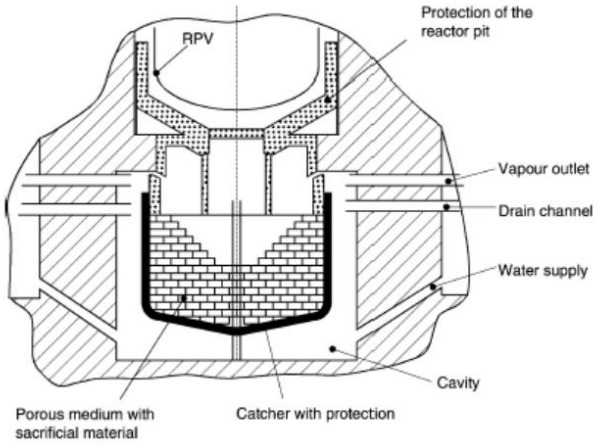
سیستم مذکور اولین بار در جهان در راکتور تیان‌وان چین مورد استفاده قرار گرفته است. عوامل مهمی که در طراحی ساختار core catcher باید مد نظر قرار گیرد عبارتند از:

- حفظ چاهک راکتور در برابر بارهای مکانیکی و حرارتی حاصل از مواد مذاب
- نگهداری مناسب مواد مذاب و جامدات حاصله
- حفظ ساختار و مشخصات حوضچه مذاب در بهینه‌ترین حالت و متعاقبا شمعی و جامد شدن این مواد

کوریوم مذاب پس از ذوب محفظه تحت فشار راکتور، به صفحه پایینی واقع در زیر راکتور که بعنوان تجهیزی جهت انتقال مواد به درون core catcher عمل می‌کند، رها می‌گردد. جهت خنک‌کاری سطح خارجی محفظه تحت فشار core catcher، آب موجود در تانک چاهک راکتور که حاصل از نشتی مدار اول می‌باشد مورد استفاده قرار خواهد گرفت. پس از انتقال کوریوم به core catcher، دمای دیواره‌های محفظه آن که از بیرون با آب خنک‌کاری می‌گردند به تدریج افزایش خواهد یافت تا جایی که آب گرم شده و شروع به جوشش نماید. مخلوط بخار-آب توسط کانال‌های تخلیه بخار رها می‌گردد. حالت خنک‌کاری مواد مذاب آغاز می‌شود. بخار تولید شده به محفظه ایمنی منتقل می‌شود. بخار به تدریج روی سطوح سرد ساختار containment کندانس شده و در چاهک جمع می‌شود و سپس توسط کانال‌هایی به کوریوم مذاب در محفظه core catcher منتقل می‌شود[3]. شکل ۱ و ۲ نشان‌دهنده موقعیت و اجزاء این سیستم می‌باشند.



شکل (۱): سیستم core catcher- ناحیه ۱ نشان‌دهنده lower plate، ناحیه۲ console truss و ناحیه ۳ نشان‌دهنده vessel می‌باشد.



شکل(۲): نمای کلی سیستم core catcher و محفظه تحت فشار راکتور

نقش اجزاء مختلف سیستم core catcher:

۱- صفحه زیرین(lower plate)

اطمینان از عایق کردن دمایی قسمت پایین راکتور(reactor bottom) در شرایط کاری نرمال(NO). انتقال کوریوم بعد از تخریب یا ذوب محفظه ایمنی به قسمت استوانه‌ای، اطمینان از حفاظت بخش console truss در برابر تخریب و نیز حفاظت محفظه core catcher در برابر آسیب.

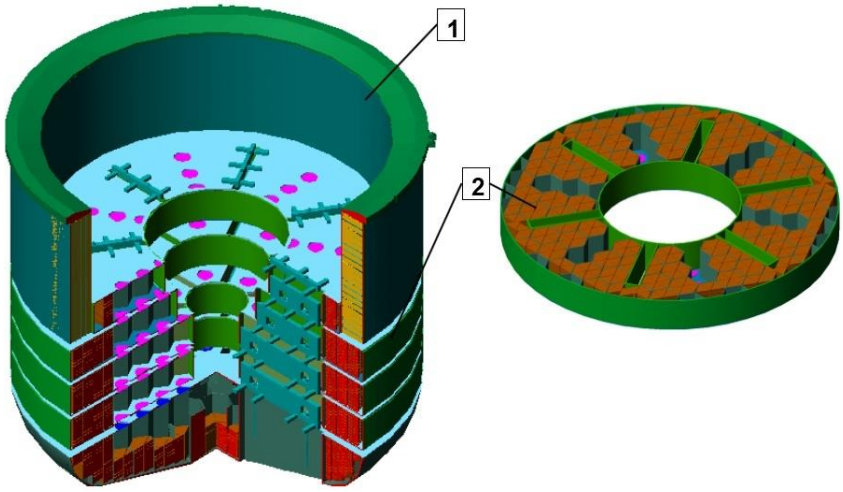
۲- Console truss

اطمینان از حفاظت محفظه ایمنی core catcher و اتصالات در برابر تخریب در اثر کوریوم، بکارگیری بعنوان ساپورت lower plate شامل:

- لوله‌کشی‌های اسپری کوریوم، جهت اتصال سیستم تغذیه آب خنک‌کاری توسط این لوله‌کشی‌ها، آب خنک‌کاری توسط console truss از بالا منتقل می‌شود.
- لوله‌کشی‌های تخلیه بخار، جهت گردش طبیعی فاز بخار بین قسمت زیرین راکتور و containment در مرحله خنک‌کاری کوریوم در core catcher فراهم شده‌اند.
- لوله‌کشی‌های انتقال، جهت تغذیه هوا برای خنک‌کاری حفاظت خشک(dry protection) و صفحه زیرین در شرایط NO فراهم شده‌اند.

۳- پرکننده(filler)

- جهت جلوگیری از جمع‌شدگی کوریوم مذاب درون محفظه core catcher فراهم گشته است. برای اکسیداسیون کامل کوریوم و رقیق‌سازی جهت کاهش حرارت حجمی و افزایش سطح آزادسازی انرژی کوریوم و انتقال حرارت به core catcher در نظر گرفته شده است. بهبود وضعیت برای بیرون آمدن سوخت مذاب به درون core catcher نیز از جمله وظایف آن است.



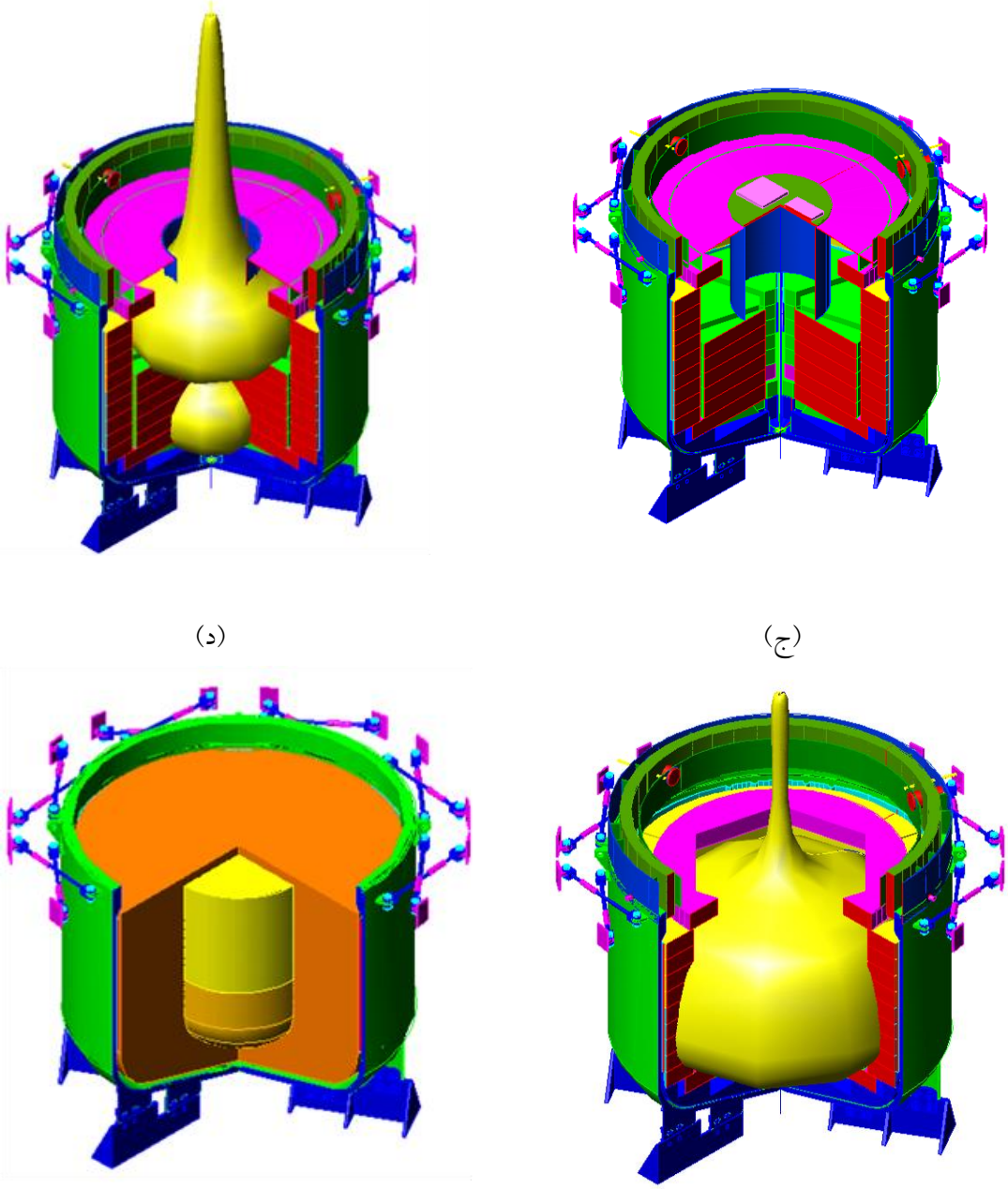
شکل(۳): اکسیدکننده داخل سیستم core catcher- ناحیه ۱ نشان دهنده محافظ دمایی بدنه محفظه و ناحیه ۲ نشان‌دهنده مجتمع‌های مواد اکسیدکننده می‌باشد.

٤- محفظه(vessel)

فراهم آوردن نگهداری و خنک‌کاری طولانی مدت کوریوم

روند ریزش مواد مذاب به درون core catcher در شکل (٤) نشان داده می‌شود

(الف) (ب)

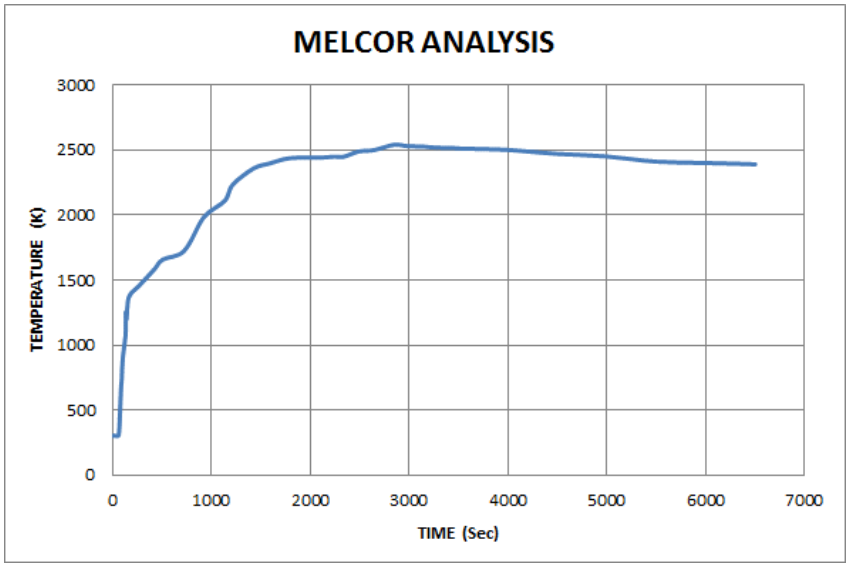


(ج) (د)

شکل٤- در شکل‌های الف تا د بترتیب مراحل ریزش مواد مذاب از قلب به داخل core catcher نشان داده شده است. در شکل د، بخش اعظم مواد مذاب اکسید و خنک شده است.

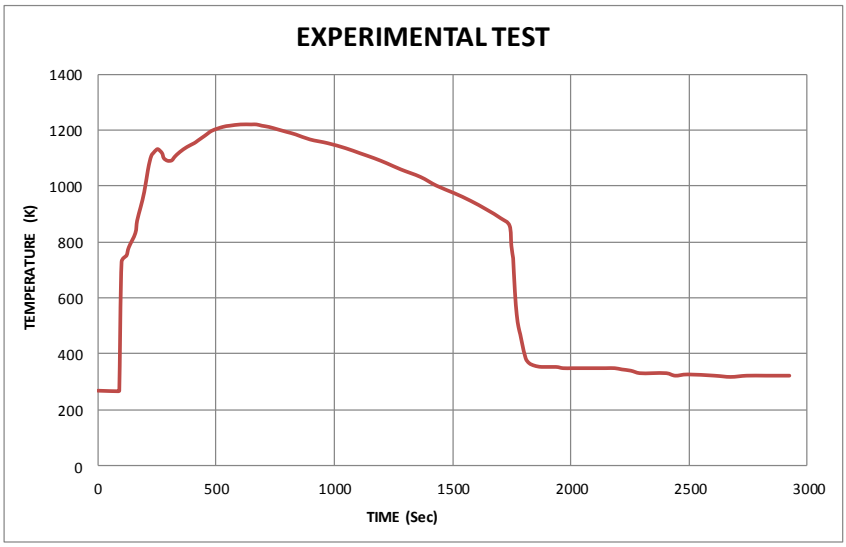
۳- بحث و نتیجه گیری

همانگونه که ذکر شد، با از دست رفتن جریان خنک‌کننده و همچنین با گذشت زمان دمای میله‌های سوخت افزایش می‌یابد و این امر تا جایی ادامه پیدا می‌کند که تمامی میله‌ها و قسمت‌های گوناگون داخل محفظه تحت فشار ذوب می‌شوند. پس از اینکه قلب ذوب شد مواد مذاب به قسمت پایینی قلب راکتور وارد می‌گردند و دمای کلگی پایینی محفظه افزایش می‌یابد. این روند در ادامه منجر به سوراخ شدن محفظه تحت فشار می‌شود و بر اثر آن مواد مذاب به داخل چاهک راکتور راه پیدا می‌کنند و واکنش‌های شیمیایی گوناگونی را رقم می‌زنند. مدار اول و containment واحد یکم نیروگاه بوشهر با توجه به شباهت با واحد دوم توسط کد MELCOR شبیه‌سازی شده و نمودار تغییرات دمای مواد مذاب از لحظه ریزش به داخل چاله راکتور تا ۷۰۰۰ ثانیه مطابق شکل ۵ رسم شده است[1].



شکل ۵- تغییرات دمای کوریوم مذاب پس از ذوب قلب در کد MELCOR

همچنین امکانات مورد نیاز جهت تست و مطالعه core catcher در انیستیتو تحقیقات انرژی اتمی کره فراهم شده است. اولین سری تست‌ها با استفاده از مخلوط AL2، Fe2O3 و CaO بعنوان شبیه‌ساز مواد مذاب صورت گرفته است. آب از زیر مواد مذاب توسط نازل‌های تزریق آب به درون آن وارد می‌شود[2]. شکل ٦ نحوه تغییرات دمایی مواد مذاب را در این تست نشان می‌دهد.



شکل ٦- تغییرات دمای مواد مذاب در آزمایش تجربی

با توجه به نتایج بدست آمده، حداکثر دمای بدست آمده در مدلسازی نیروگاه بوشهر به حدود ۲۵۰۰ درجه کلوین رسیده و سپس با توجه به عدم خنک‌کاری، تا حدود ۷۰۰۰ ثانیه بعد نیز دما افت چندانی پیدا نخواهد کرد. در حالی که با توجه به نتایج تست، از لحظه شروع خنک‌کاری و تزریق آب در ثانیه ۱۷۵۰، دمای مواد مذاب با شیب قابل توجهی رو به کاهش نهاده و به محدوده ۳۰۰ درجه کلوین رسیده است. با توجه به تفاوت ساختار این دو راکتور و نیز محدودیت‌های اشاره شده در تست، حداکثر دمای تست از ۱۲۰۰درجه کلوین تجاوز نمی‌نماید، با این حال می‌توان از مقایسه روند شیب نمودار نتیجه گرفت که خنک‌کاری مواد مذاب می‌تواند زمان کاهش دما را کمتر نموده و اثرات دمایی و فشاری و رادیولوژیکی ناشی از ان را بهبود بخشد. در نتیجه می‌توان اطمینان داشت که وجود سیستم ایمنی Core catcher در واحد دوم نیروگاه اتمی بوشهر به افزایش ایمنی در حوادث وخیم و حفاظت از اشخاص و محیط زیست کمک خواهد کرد.

٤- مراجع:

[1] بنی فضل، امین، مدلسازی حادثه ذوب قلب راکتور نیروگاه اتمی بوشهر با استفاده از کد MELCOR، اصفهان، اسفند ۱۳۹۳.

[2] H.Y. Kim, J.H. Kim, K.S. Ha, J.H. Song and J.H. Park, A Proposed Core Catcher System and Thermite Experimental Results, Korea, November 30, 2011.

[3] Bal Raj Sehgal , Hyun Sun Park, Pre-Project on Development and Validation of Melt Behavior in Severe Accidents, Sweden, june, 2004.