



مدل سازی رفتار دمایی المان‌های سوخت راکتورهای آبی تحت فشار طی فرایند از هم

گسیختگی قلب به کمک کد ۳، ۴، ۵/ MOD SCDAP-RELAP

تورج، نظری^۱؛ محمد رضا، نعمت الهی^{۱*}؛ امیر سعید، شیرانی^۲؛ محسن، صالحی^۲

۱ دانشگاه شیراز، دانشکده مکانیک، بخش مهندسی هسته‌ای، گروه راکتور

۲ دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه راکتور

چکیده:

با توجه به اینکه المان‌های سوخت اولین سد محافظ برای جلوگیری از انتشار مواد رادیواکتیو به محیط می‌باشند، لذا داشتن درک درستی از رفتار فیزیکی-شیمیایی المان‌های سوخت بهنگام بروز حوادث شدید منجر به ذوب قلب، برای طراحی ایمن نیروگاه، مدیریت حوادث شدید و کاستن از عواقب آن‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این مقاله تمرکز اصلی بر روی پاسخ دمایی غلاف زیرکونیوم المان‌های سوخت، مقدار و نرخ تولید هیدروژن بر اثر اکسیداسیون غلاف می‌باشد.

کلمات کلیدی: المان سوخت، زیرکونیوم، حوادث شدید، تولید هیدروژن، ۳، ۴، ۵/ MOD SCDAP-RELAP

مقدمه:

در حالت کلی تعداد منابع محتمل مفروض برای تولید هیدروژن بهنگام بروز یک حادثه شدید عبارتند از: واکنش زیرکونیوم-بخار آب (اکسیداسون زیرکالوی)، واکنش کاربرد بور-بخار آب، واکنش آهن-بخار آب، واکنش کوریم مذاب - بتن، رادیولیز آب، خوردگی ترکیبات فلزی مانند روی، آلومینیم و یا آهن و واکنش بین خورده ته نشین‌های کوریم و اتمسفر کانتینمنت. در حوادث شدید، تولید هیدروژن در اثر اکسیداسیون زیرکونیوم با بخار آب، یک فرایند سریع با نرخ تولید ۱/ تا ۵/ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار هیدروژن تولید شده در این واکنش حداقل ۱۰ برابر بیشتر از سایر واکنش‌ها می‌باشد، هیدروژن تولید شده بتوسط واکنش‌های دیگر در وهله اول قابل اغماض می‌باشند [۱].

زیرکونیوم (Zr) جزء اصلی سازنده غلاف سوخت است. چنانچه رفتار قلب راکتور در طول بروز یک حادثه شدید مهار نشود، زیرکالوی گرم با بخار آب واکنش می‌دهد:

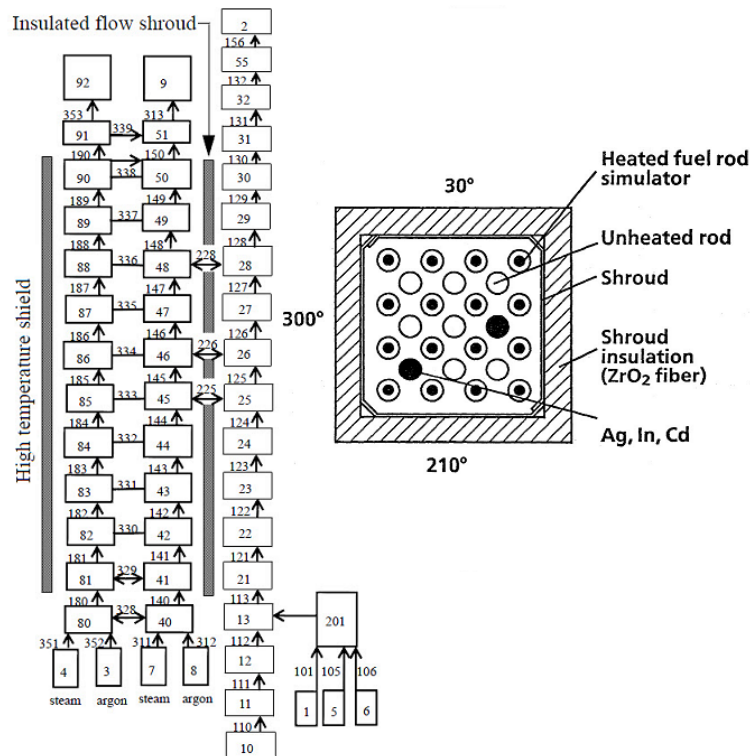


تولید هیدروژن از لحظه مهار نشدن رفتار قلب راکتور شروع می‌شود و چنانچه قلب بدلیل ذوب شدن از هم گسیخته شود، اکسیداسیون Zr ادامه می‌یابد. متعاقب خرابی غلاف و جابجایی مواد مذاب، سطوح جدیدی در معرض واکنش با بخار آب قرار خواهد گرفت. چنانچه قلب راکتور غرق آب گردد، نرخ اکسیداسیون زیرکالوی (و متعاقباً نرخ تولید هیدروژن) به دلیل حجم زیاد بخار آبی که تولید می‌شود افزایش خواهد یافت [۱].

روش کار:

در این مطالعه، آزمایش CORA-۱۳ به کمک کد ۳،۴ SCDAP-RELAP5/MOD3 شبیه‌سازی شده است. در این آزمایش از یک مجتمع سوخت مشابه مجتمع‌های سوخت راکتورهای آبی تحت فشار استفاده شده است. این مجتمع دارای آرایش ۷×۷ بوده و از ۱۶ میله شبیه‌ساز گرم شونده الکتریکی، ۷ میله سوخت عادی و ۲ میله جاذب متشکل است که با لفافه احاطه شده است. همچنین از ۳ عدد جداساز شبکه‌ای جهت ثابت نگهداشتن موقعیت میله‌ها در طول آزمایش استفاده شده است (شکل ۱) [۲].

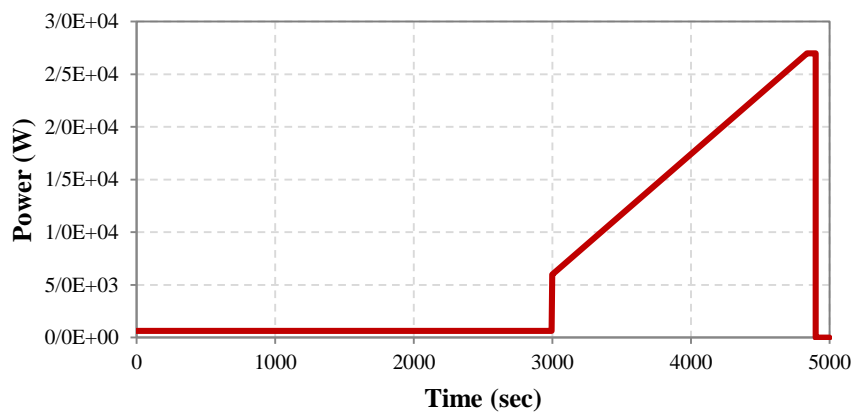
آزمایش به سه مرحله تقسیم می‌شود: مرحله اول از ثانیه صفر تا ۳۰۰۰ یا مرحله پیشگرمایش گاز، مرحله دوم از ثانیه ۳۰۰۰ تا ۴۹۰۰ یا مرحله گذار و مرحله سوم از ثانیه ۴۹۰۰ به بعد یا مرحله خنک‌کاری. در طی مرحله پیشگرمایش گاز، گاز آرگون با دبی ۸ گرم بر ثانیه به سیستم تزریق می‌شود و یک قدرت الکتریکی کم و ثابت حدود ۰/۶۵ کیلو وات به سیستم اعمال می‌گردد. در آغاز آزمایش دمای ابتدایی گاز ۵۲۵ درجه سانتیگراد است و مجتمع از پیش با عبور گاز گرم شده است. در مرحله دوم حالت گذار با افزایش قدرت الکتریکی اعمالی از ۶ تا ۲۷ کیلو وات آغاز می‌شود (شکل ۲). در ثانیه ۳۳۰۰ بخار آب با دبی ۶ گرم بر ثانیه به سیستم تزریق می‌شود. مرحله خنک‌کاری نیز با بالا رفتن سیلندر خاموش‌کننده با سرعت متوسط ۱ سانتی‌متر بر ثانیه در ثانیه ۴۸۷۰ و صفر شدن قدرت الکتریکی در ثانیه ۴۹۰۰ آغاز می‌شود [۲].



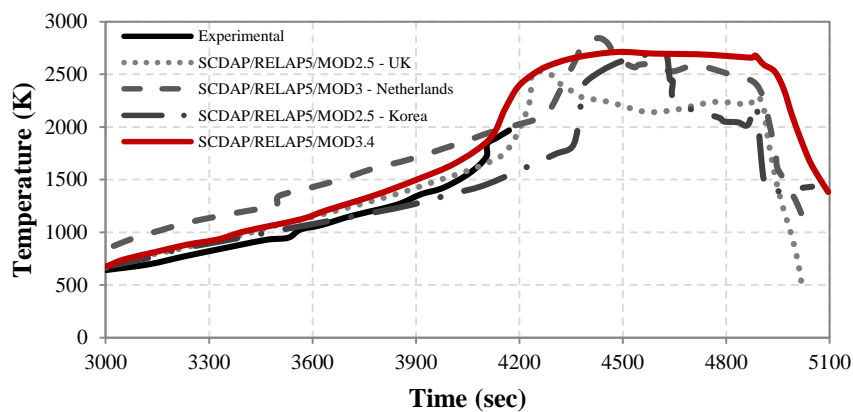
شکل ۱: گره‌بندی و نحوه چیدمان میله‌ها در مجتمع

مدلسازی و نتایج:

گره‌بندی مدلسازی انجام شده بتوسط کد SCDAP-RELAP5/MOD3,4 در شکل ۱ نشان داده شده است. برای مدلسازی اجزاء ترموهیدرولیکی از کانال‌های موازی همراه با جریان‌های عرضی و برای مدلسازی مجتمع سوخت از شش مولفه SCDAP برای دو گروه میله سوخت عادی، دو گروه میله شبیه‌ساز، یک گروه میله جاذب و لفافه استفاده شده است. در این مدلسازی میله‌های اطراف میله وسط بعنوان حلقه اول، میله‌های بیرونی دور حلقه اول بعنوان حلقه دوم و بیرونی‌ترین میله‌ها بعنوان حلقه سوم مدل شده است.

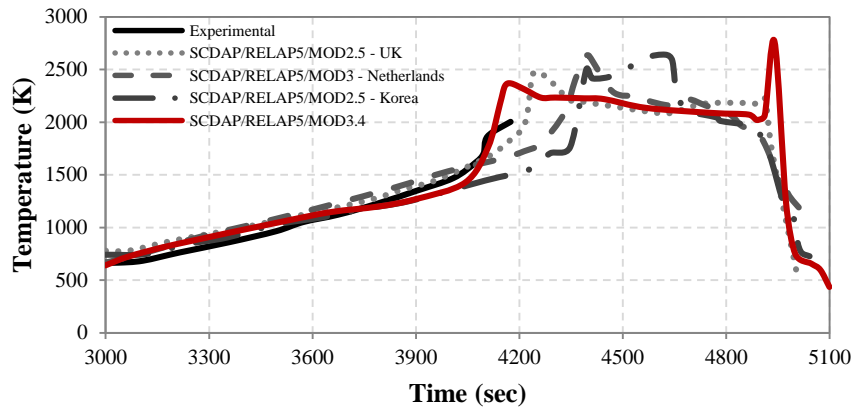


شکل ۲: تغییرات قدرت الکتریکی در طول آزمایش

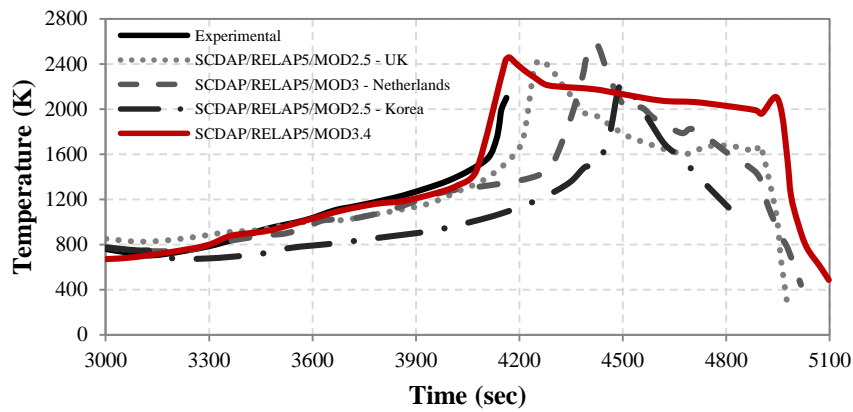


شکل ۳: تغییرات دمای سوخت در حلقه اول (ارتفاع ۷۵۰ میلی‌متر)^۱

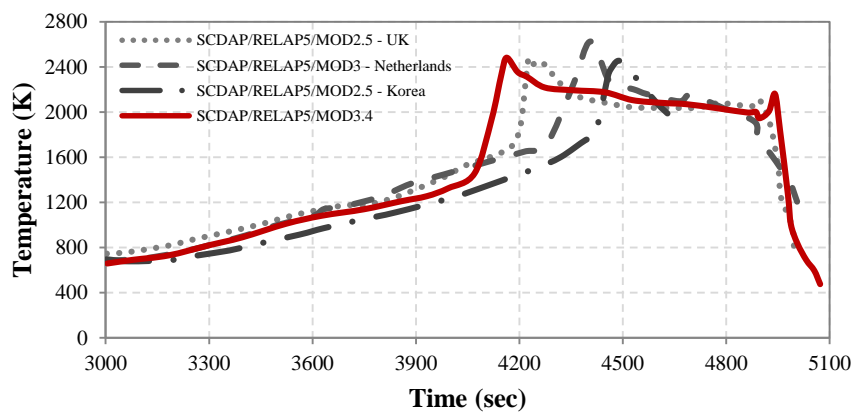
^۱ نتایج تجربی و سایر آنالیزهای ارائه شده در شکل‌ها با توجه به مرجع ۳ ارائه شده‌اند.



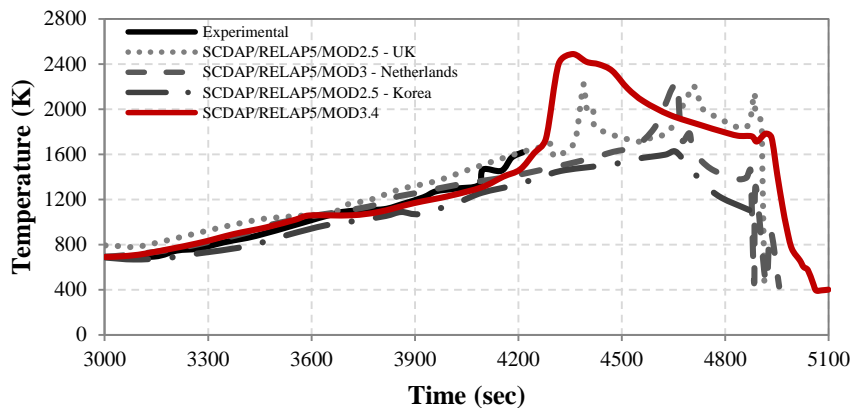
شکل ۴: تغییرات دمای غلاف در حلقه اول (ارتفاع ۷۵۰ میلی متر)



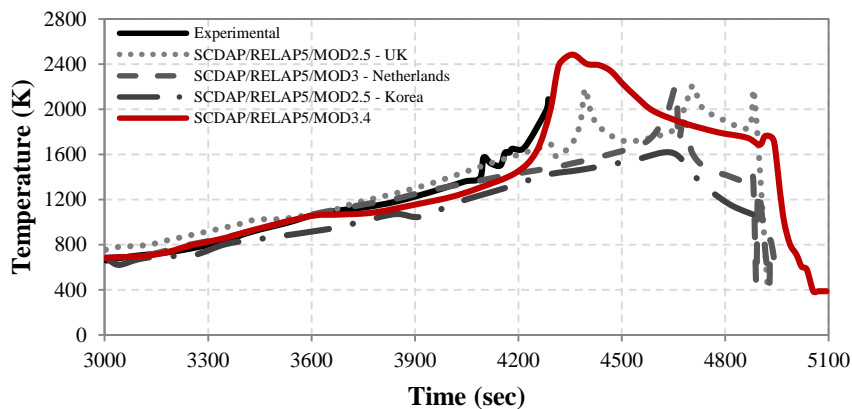
شکل ۵: تغییرات دمای سوخت در حلقه دوم (ارتفاع ۷۵۰ میلی متر)



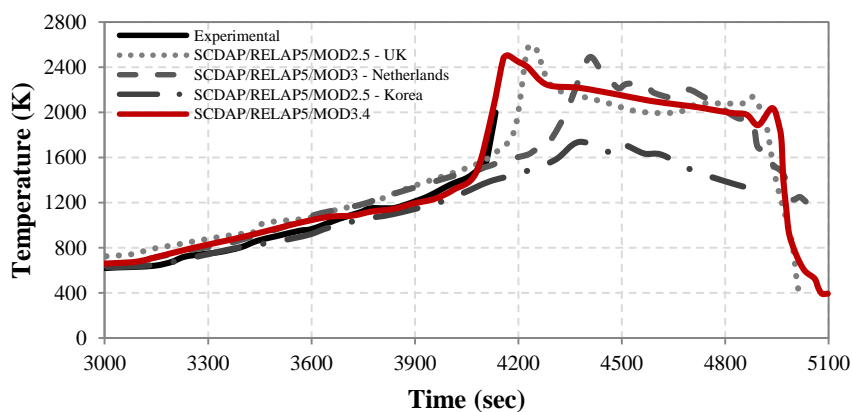
شکل ۶: تغییرات دمای غلاف در حلقه دوم (ارتفاع ۷۵۰ میلی متر)



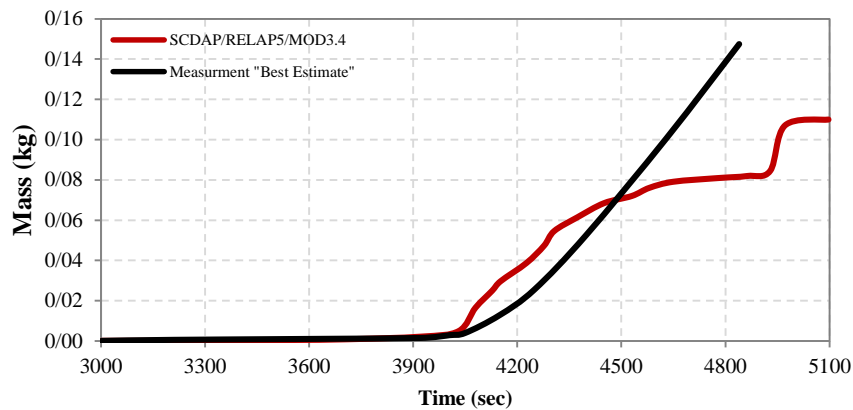
شکل ۷: تغییرات دمای میله جاذب (ارتفاع ۵۵۰ میلی متر)



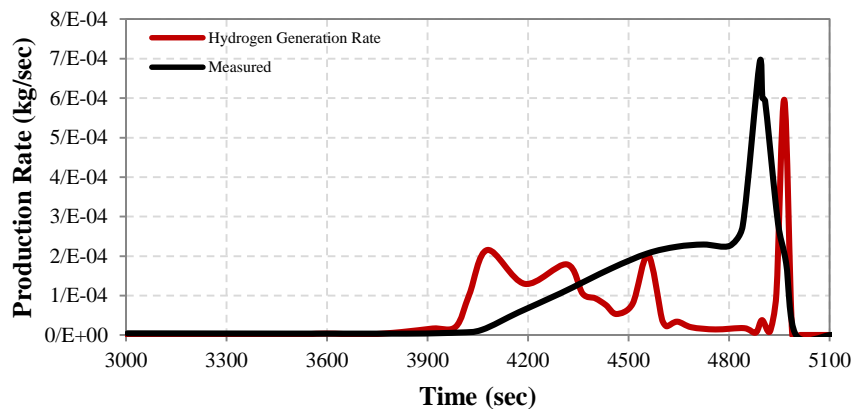
شکل ۸: تغییرات دمای تیوب هدایت (ارتفاع ۵۵۰ میلی متر)



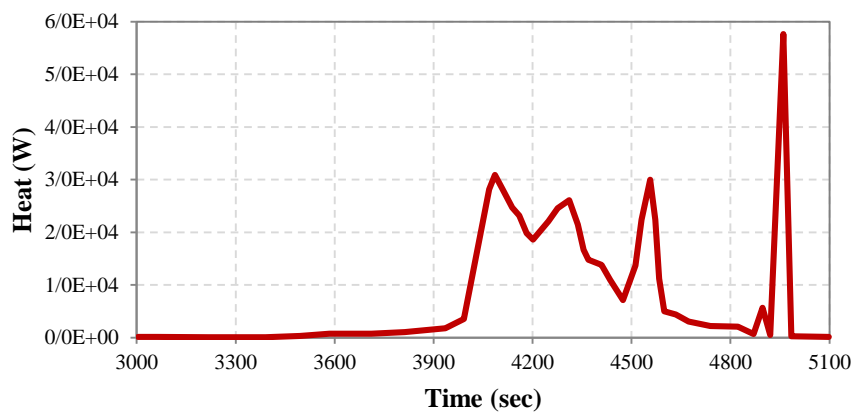
شکل ۹: تغییرات دمای سطح داخلی لفافه (ارتفاع ۷۵۰ میلی متر)



شکل ۱۰: هیدروژن انباشته



شکل ۱۱: نرخ تولید هیدروژن



شکل ۱۲: گرمای تولید شده در اثر اکسیداسون



بحث و نتیجه گیری:

رفتار دمایی برخی از اجزاء همانند میله‌های شبیه‌ساز، میله‌های سوخت عادی و غیره در یک ارتفاع معین جهت ارائه ارزیابی مقایسه‌ای از شکل ۳ تا شکل ۹ نمایش داده شده است. با افزایش قدرت الکتریکی اعمالی، در ابتدا دما متناسب با قدرت افزایش می‌یابد. پس از رسیدن دما به ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد، واکنش گرمای زیرکونیوم - بخار آب باعث افزایش گرمای سیستم می‌گردد که منجر به نوسانات دمایی می‌شود (شکل ۱۲). مقدار هیدروژن انباشته شده در سیسیم و نرخ تولید هیدروژن در طول آنالیز به ترتیب در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نمایش داده شده است. واکنش زیرکونیوم - بخار آب از ثانیه ۴۰۰۰ به بعد و با افزایش دما به مقادیر بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد منجر به تولید هیدروژن شده و بخاطر ماهیت گرمازا بودن واکنش به افزایش دما سرعت می‌بخشد. نکته اوج پس از ثانیه ۴۹۰۰ مربوط به مرحله خنک‌کاری می‌باشد. لایه‌های اکسیدی محافظ که در طول گرمایش ابتدایی شکل گرفته است، به دلیل تنش گرمایی ترک خورده و بدین ترتیب امکان تماس مستقیم بخار آب با زیرکونیوم فلزی در دماهای بالا فراهم می‌شود که منجر به واکنش قوی زیرکونیوم - بخار آب و در نتیجه تولید مقدار زیادی هیدروژن و یک اوج دمایی می‌شود. پس از غرق آب شدن مجتمع دیگر امکان تولید هیدروژن فراهم نمی‌باشد.

مراجع:

- [۱] Sehgal, B. R., Nuclear Safety in Light Water Reactors Severe Accident Phenomenology, Elsevier, ۱۹۵-۱۹۷, ۲۰۱۲.
- [۲] Hagen, S., Hofmann, P., Noack, V., Schanz, G., Schumacher, G., and Sepold, L., Results of SFD Experiment CORA-۱۳ (OECD International Standard Problem ۳۱), KfK ۵۰۵۴, February ۱۹۹۳.
- [۳] Fimhaber, M., Trambauer, K., Hagen, S., and Hofmann, P., CORA-۱۳ Experiment on Severe Fuel Damage (Comparison Report), KfK ۵۲۸۷, July ۱۹۹۳.