مطالعه حادثه انسداد موضعی مسیر جریان در مجتمع سوخت گرم راکتور قدرت با استفاده از کد RELAP5

قراری،رحمان *[(۱)]- متاجی کجوری،نعیم‌الدین [(۲)] صفرزاده،امید[(۳)]

[۱] سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور

[۲] سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، گروه پژوهشی ایمنی و حفاظت پرتوی

[۳] دانشگاه شاهد تهران، دانشکده فنی و مهندسی

چکیده:

در عملکرد نیروگاه‌های هسته‌ای ارزیابی حوادث گوناگون در شرایط واقعی نیروگاه بسیار حائز اهمیت است. یکی از حوادث مهم، حادثه انسداد مسیر جریان خنک کننده است. برای اولین بار در این مقاله به تحلیل ترموهیدرولیکی حادثه انسداد موضعی مسیر جریان در راکتور VVER-1000 با استفاده از کد RELAP5-Mod3.2 بدون در نظر گرفتن ارتباط عرضی بین مجتمع‌های سوخت پرداخته شده است. نتایج شبیه سازی نشان داده است که حادثه انسداد در مجتمع سوخت گرم اثرات عمده‌ای بر روی پارامترهای ترموهیدرولیکی قلب راکتور دارد و باعث تغییر در مکان بیشینه دمای سوخت می‌گردد و اگر شدت انسداد از ۸۰ درصد بیشتر باشد غلاف ذوب خواهد شد.

کلمات کلیدی: *انسداد موضعی مسیر جریان، مجتمع سوخت گرم، کد RELAP5-Mod3.2*

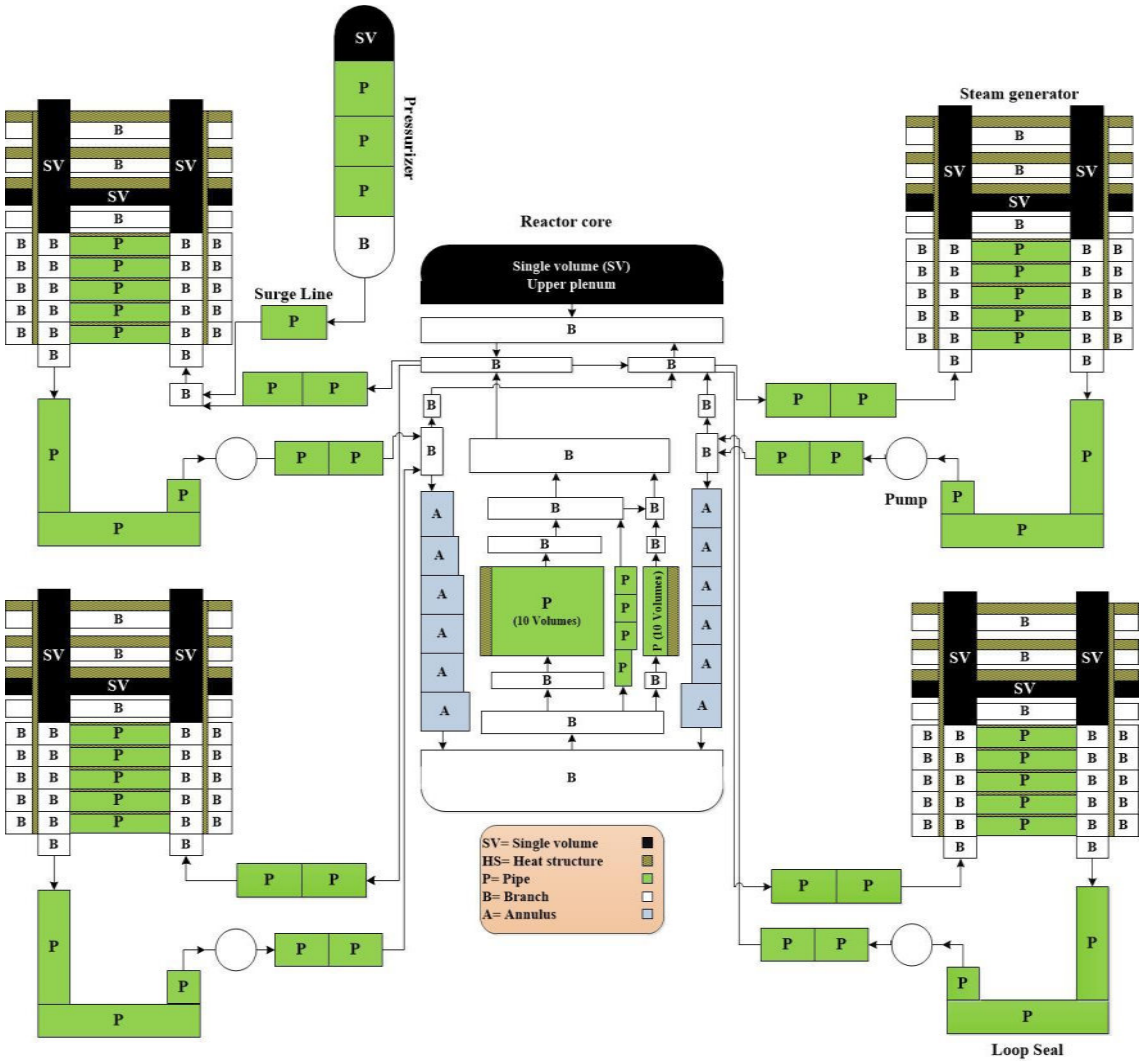
مقدمه :

ایمنی راکتورهای هسته‌ای ایجاب می‌کند تا اثرات و پیامدهای تعداد زیادی از حوادث کوچک و بزرگ در راکتور در نظر گرفته شود. حوادث در نیروگاه‌های هسته‌ای معمولا به سه دسته طبقه بندی می‌شوند: الف) از دست رفتن خنک کننده، ب) تزریق راکتیویته و ج) ذوب شدن قلب. در حادثه از دست رفتن خنک کننده یا مدار اولیه دچار از هم گسیختگی مکانیکی شده و تمامی یا مقداری از خنک‌کننده به بیرون راه می‌یابد و یا موجودی خنک‌کننده در سیستم اولیه حفظ گردیده ولی انتقال حرارت مداوم از قلب و مدار اولیه به طور مناسب انجام نشود. یکی از دلایل کم شدن جریان خنک کننده انسداد موضعی مسیر جریان ورودی به یک یا چند مجتمع سوخت در اثر برخورد نخاله‌ها با سازه ورودی قلب و کاهش سطح عبوری جریان خنک کننده است[۱]. با نگاهی به تاریخ در سال ۱۹۷۵، حادثه کاهش موضعی جریان در مرکز تحقیقات هسته‌ای بلژیک در راکتور BR2 برای اولین بار اتفاق افتاده است. در این حادثه دو صفحه سوخت بر اثر انسداد در جریان خنک کننده ذوب شدند. این حادثه بر اثر قرار دادن یک شی خارجی در قلب راکتور موقع سوخت‌گذاری اتفاق

افتاد. تحقیقات زیادی در زمینه کاهش موضعی جریان در قلب صورت گرفته است. Qing و همکارانش به بررسی انسداد موضعی جریان در راکتور MTR پرداختند[۲]. Salah و همکارانش با جفت سازی دو کد نوترونیکی و کد ترموهیدرولیکی RELAP5 به تحلیل حادثه کاهش موضعی جریان پرداختند[۳]. Tian و همکارانش در سال ۲۰۰۶ به بررسی کاهش موضعی جریان در راکتور تحقیقاتی چین پرداختند[٤]. کد RELAP5 یکی از کدهای پرکاربرد در زمینه تحلیل ایمنی راکتورهای هسته‌ای است. این کد محاسباتی یک کد گسترش یافته تحلیل راکتور آب سبک بوده که در کتابخانه ملی ایالت آیداهو آمریکا ابداع شده و توانایی پیش بینی رفتار راکتور در شرایط عادی و حادثه را دارد[۵]. در این مطالعه برای اولین بار حادثه انسداد موضعی مسیر جریان بر اثر ورود اشیا فلزی در ورودی یک مجتمع سوخت گرم راکتور قدرت VVER-1000 با استفاده از کد RELAP5-Mod3.2 بررسی شده است.

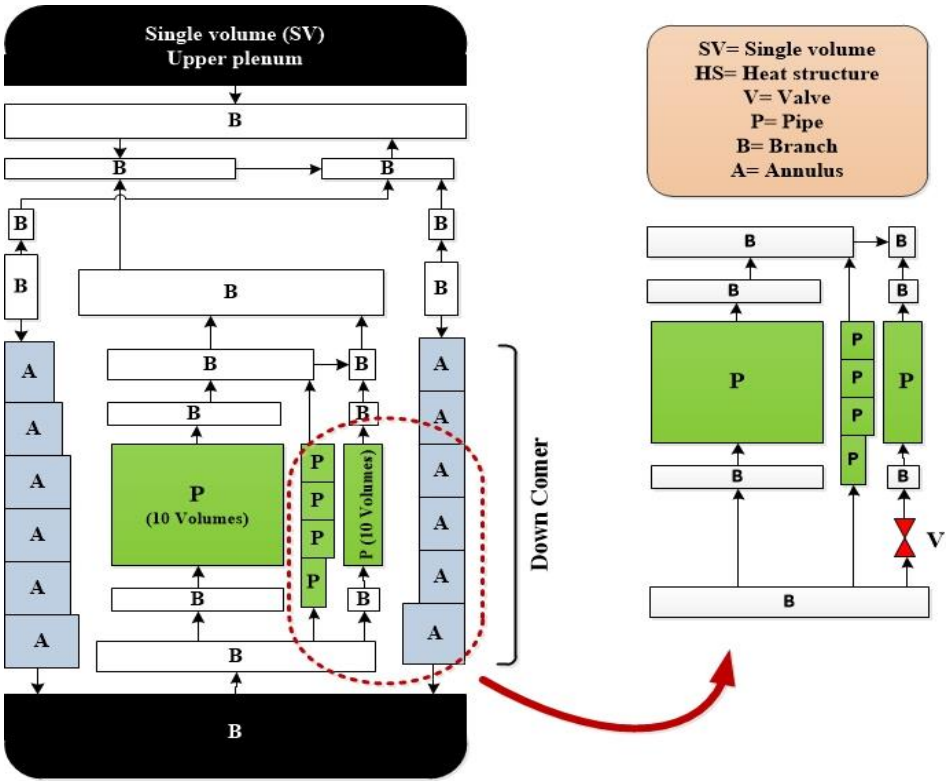
روش کار :

ابتدا حالت پایای راکتور VVER-1000 با ا ستفاده از کد RELAP5-Mod3.2 مدل شده و با نتایج حالت پایای راکتور در FSAR نیروگاه اتمی بوشهر مقایسه شده است تا صحت و دقت مدل‌سازی تایید شود. گره بندی قلب و مدار اول در شکل(۱) نشان داده شده است.



شکل شماره (۱). گره بندی قلب و مدار اول

برای انجام مدل سازی حالت پایا، ابتدا شرایط اولیه نیروگاه شامل دما، فشار و دبی خنک کننده به عنوان شرایط مرزی به فایل ورودی کد داده می شود و برنامه برای مدت ۵۰۰ ثانیه اجرا می شود. مدل سازی قلب از سه مسیر hot channel، Average channel و Bypass channel تشکیل یافته است که تعداد مجتمع‌های سوخت در بخش گرم یک عدد و در بخش Average channel، ۱۶۲ عدد در نظر گرفته شده است. برای مدلسازی حادثه انسداد از Servo valve استفاده شده است که در شکل (۲) نشان داده شده است [۵،۲]. با تغییر وضعیت Valve stem (میله شیر) مدل سازی شدت انسدادهای مختلف انجام می‌پذیرد. تغییر وضعیت شیر با تغییر سطح مقطع عبوری جریان از شیر و با دستور تریپ تعیین می‌شود[۵].



شکل شماره (۲). گره بندی و مدل‌سازی نحوه انسداد در ورودی مجتمع سوخت گرم

نتایج :

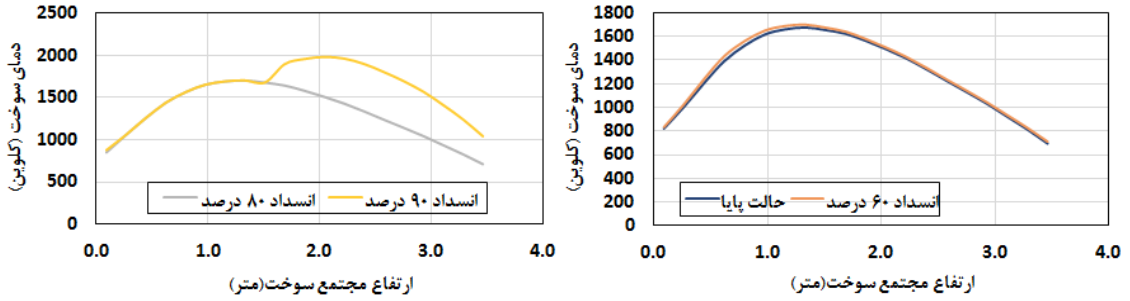
در این بخش نتایج حاصـــل از مطالعه تغییرات پارامترهای ترموهیدرولیکی در اثر حادثه انســـداد پس از رسیدن به حالت پایا آورده شده است. پس از بررسی نتایج شرایط عادی قلب و اطمینان از دقت و صحت مدل‌ســازی با کد، نتایج مربوط به حادثه انســداد در ورودی مجتمع ســوخت گرم بدون در نظر گرفتن ارتباط عرضی بین مجتمع‌های سوخت (دیدگاه محافظه کارانه) آورده شده است. مطابق جدول (۲) نتایج حالت پایای قلب راکتور مدل شده توسط کد با داده‌های FSAR نیروگاه اتمی بوشهر مقایسه شده و نتایج نشان داده است که مدلسازی با کد رفتار سیستم را به خوبی پیش بینی نموده است.

جدول شماره (۲). نتایج حالت پایای قلب و مدار اول راکتور

پارامتر	FSAR	Relap5
فشار ورودی مولد بخار(Mpa)	۱۵/۷۰	۱۵/۶۲
فشار خروجی مولد بخار(Mpa)	۱۵/۵۷	۱۵/۴۱
دمای ورودی مولد بخار(K)	۵۹۳/۱۵	۵۹۷/۵۰
دمای خروجی مولد بخار(K)	۵۵۹/۱۵	۵۶۰/۵۰

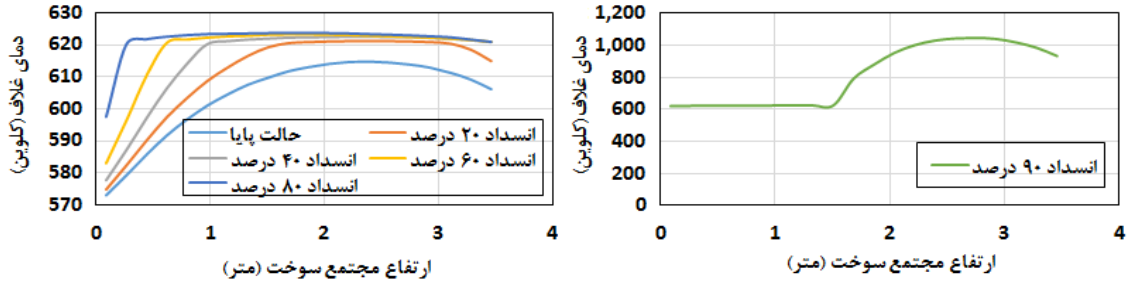
فشار ورودی پمپ(Mpa)	۱۵/۱۰	۱۵/٤۰
بیشینه دمای غلاف در بخش Hot channel (K)	≤٦۲۵ /۱۵	٦۱٤/۷۰
بیشینه دمای سوخت در بخش Hot channel (K)	≤۲۱۵٦ /۱۵	۱٦۷۵/۹۰
کمینه انحراف از نقطه جوشش هسته‌ای	≥۱/۳۰	۲/۲۹

پس از بررسی نتایج حالت پایا و اطمینان از دقت مدلسازی نتایج مربوط به بررسی حادثه انسداد آورده شده است. در شکل (۳) تغییرات دمای سوخت بر حسب شدت انسداد نشان داده است. با افزایش شدت انسداد به دلیل تولید بخار در قلب راکتور و کاهش میزان انتقال حرارت از میله سوخت به خنک کننده، دمای سوخت زیادتر شده است. تا انسداد ۸۰ درصد بیشینه دمای سوخت افزایش دمای کمتری دارد اما در شدت انسداد ۹۰ درصد، بیشینه دمای سوخت شدیدا بالارفته و مکان بیشینه دمای سوخت نیز در طول مجتمع سوخت بالاتر رفته است. دلیل این امر آن است، در انسداد ۹۰ درصد، چون خنک کننده در ارتفاع‌های پایین مجتمع سوخت که در شکل (٤) نیز نشان داده شده است، به دمای اشباع رسیده و خنک کننده دچار تغییر فاز می‌شود. سپس در طول مجتمع سوخت، لایه بخار تشکیل شده اطراف میله سوخت را احاطه کرده و مانع انتقال حرارت از میله سوخت و غلاف به خنک کننده شده و افزایش شدیدی در دمای سوخت مشاهده شده است.



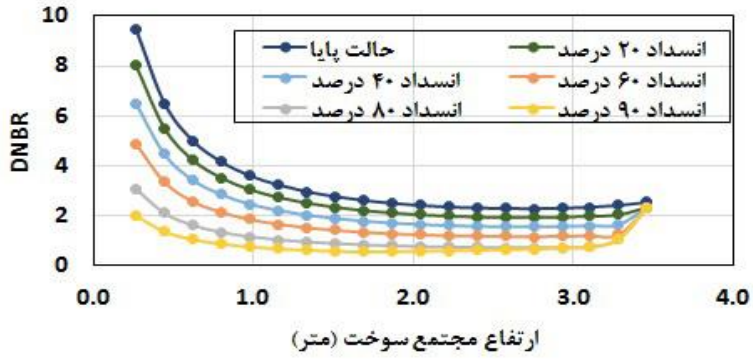
شکل شماره (۳). تغییرات دمای سوخت بر حسب شدت انسداد

شکل (٤) تغییرات دمای غلاف را بر حسب شدت انسداد نشان می‌دهد. با افزایش شدت انسداد دمای غلاف بالاتر رفته و در شدت انسداد ٦۰ درصد، دمای غلاف به دمای اشباع سیال (٦۲۰ کلوین) و به حد ثابتی رسیده است. در انسداد ۹۰ درصد نیز تغییرات شدیدی در دمای غلاف مشاهده شده است که این رفتار ناشی از تغییرات دمای سوخت است که در شکل (۳) توضیح داده شد.

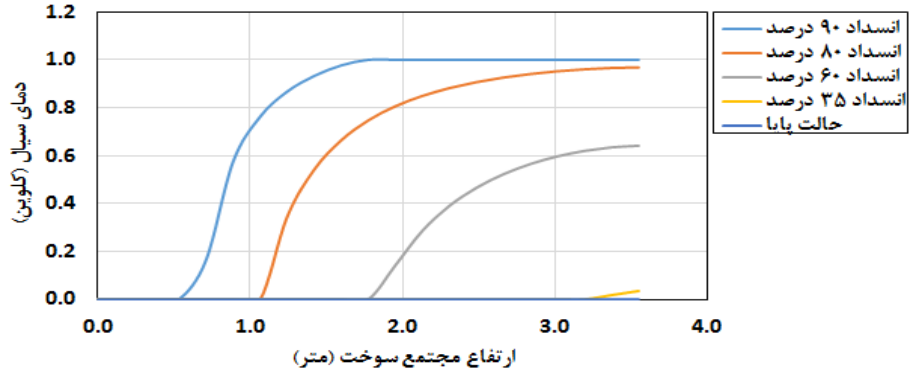


شکل شماره (٤). تغییرات دمای غلاف بر حسب شدت انسداد

یکی از پارامترهای مهم دیگر در تحلیل ترموهیدرولیکی قلب راکتور، انحراف از نقطه جوشش هسته‌ای (DNBR) است. تغییرات این پارامتر نیز بر حسب شدت انسداد در شکل (٥) نشان داده شده است. با افزایش شدت انسداد ، میزان DNBR، به دلیل تولید بخار در سیستم که در شکل (٦) نشان داده شده است، در طول مجتمع سوخت کمتر شده است.



شکل شماره (٥). تغییرات DNBR بر حسب شدت انسداد



شکل شماره (٦). کسر بخار بر حسب ارتفاع مجتمع سوخت در شدت انسدادهای مختلف

برای بررسی بیشتر موضوع میزان تولید بخار بر حسب ارتفاع از پایین مجتمع سوخت در شکل (٦) نشان داده شده است. با افزایش ارتفاع و شدت انسداد، میزان تولید بخار در قلب راکتور زیادتر شده است و از شدت

انسداد تقریبا ۳۵ درصد، تولید بخار شروع شده و در شدت انسدادهای بالاتر از ۸۰ درصد کسر بخار تولیدی به ۱۰۰ درصد رسیده است و در انسداد ۹۰ درصد نیز از میانه مجتمع سوخت به بالا، کاملا بخار تولید شده است.

بحث ونتیجه گیری :

با استفاده از کد RELAP5 به تحلیل ترموهیدرولیکی حادثه انسداد موضعی مسیر جریان خنک کننده در ورودی یک مجتمع سوخت گرم بدون وجود ارتباط عرضی بین مجتمع‌های سوخت پرداخته شد. نتایج نشان داد که، از شدت انسداد ۳۵ درصد به بالا در سیستم بخار تشکیل می‌گردد و از شدت انسداد ۸۰ درصد به بالا سیستم محدودیت‌های طراحی ترموهیدرولیکی را رد می‌کند و ممکن است غلاف ذوب شود لذا راکتور باید خاموش گردد. علاوه بر این با افزایش شدت انسداد، مکان بیشینه دمای سوخت در طول مجتمع سوخت جابه‌جا شده و بالاتر می‌رود.

مراجع :

1. Lewis, E.E., Nuclear power reactor safety, A Wiley-Interscience publication, 1977.
2. Qing, L., Suizheng, S., G.H., Flow blockage analysis of a channel in a typical material test reactor core, Annals of Nuclear Energy 239(45–50), 2009.
3. Salah Ud Din Khan, Shahab Ud Din Khan, Minjun Peng, Flow blockage accident or loss of flow accident by using comparative approach of NK/TH coupling codes and RELAP5 code, Annals of nuclear Energy64(311-319), 2014.
4. Tian, C.L., Hua, J., YUAN, L., Flow blockage accident analysis for china advanced research reactor, Nuclear Power Engineering, 2006.
5. RELAP5/MOD3.2 CODE MANUAL, INEEL, 1995 .
6. Atomic Energy Organization of Iran NPP Bushehr Unit 1 (BNPP), Final Safety Analysis Report (FSAR), chapters 4, 15, 2003.