مکان‌یابی بازترکیب‌کن‌های کاتالیستی غیرفعال برای نیروگاه اتمی بوشهر با استفاده از کد MELCOR

پارسا،شیرین[۱]* - متاجی‌کجوری،نعیم‌الدین[۲] - مینوچهر، عبدالحمید[۳] – طالبی، مجید[٤]

۱-دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه راکتور

۲- سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

۳- دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه راکتور

٤- شرکت توسعه و ارتقای ایمنی نیروگاه‌های اتمی (توانا)

چکیده

تولید گاز هیدروژن و نشت آن به درون محفظه ایمنی در اثر وقوع حوادث مبنای طراحی در نیروگاه‌های هسته‌ای با خنک‌کننده آبی، به دلیل اشتعال‌پذیری بالای این گاز، محفظه را به خطر می‌اندازد. به همین دلیل باید از تجمع آن در این محفظه جلوگیری به عمل آید. یکی از سیستم‌های حذف هیدروژن، بازترکیب‌کن‌های کاتالیستی غیرفعال‌اند که توانایی حذف هیدروژن به صورت غیرفعال و بوسیله بازترکیب‌سازی آن با اکسیژن را دارا می‌باشند. در این پژوهش تولید هیدروژن ناشی از حادثه از دست رفتن خنک‌کننده برای راکتور ۱۰۰۰- VVER مدنظر قرار گرفته و پس از شبیه-سازی توسط کد MELCOR تعداد ۸۰ بازترکیب‌کن در مکان‌های مختلف محفظه مناسب تشخیص داده شده‌است.

کلمات کلیدی: حادثه پایه طراحی، هیدروژن، شبیه‌سازی، MELCOR ، بازترکیب‌کن‌های کاتالیستی غیرفعال

مقدمه

منبع اصلی تولید گاز هیدروژن در زمان وقوع حوادث نیروگاهی، اکسیداسیون زیرکونیوم غلاف میله‌های سوخت توسط بخار ناشی از تبخیر خنک‌کننده درون قلب راکتور می‌باشد. منابع دیگری از جمله برهمکنش کوریوم مذاب با بتن در زمان وقوع حوادث شدید، واکنش استیل-بخار، رادیولیز آب، خوردگی فلزات،

اکسیداسیون غلاف سوخت تابش دیده در استخر سوخت مصرفی نیز در تولید هیدروژن نقش بسزایی دارند.

نشت و احتراق هیدروژن درون محفظه ایمنی، فشار و دمای بالایی را ایجاد کرده که می‌تواند یکپارچگی محفظه را به مخاطره اندازد[۱]. فرآیندهای فیزیکی جابجایی اجباری، جابجایی طبیعی و نفوذ به خاطر آزادسازی ترکیب گاز و بخار داغ یا کندانس بخار روی دیوارهای سرد بر اختلاط گاز با اتمسفر درون محفظه اثر می‌گذارند. همچنین غلظت محلی هیدروژن می‌تواند توسط سیستم اسپری تحت تاثیر قرار گیرد[۲]. توزیع غلظت هیدروژن از پیکره‌بندی محفظه ایمنی، مکان رهاسازی هیدروژن و نرخ جرمی جریان و اختلاط آن با دیگر گازها تاثیر می‌پذیرد. در سال‌های اخیر استفاده از بازترکیب‌کن‌های کاتالیستی غیرفعال برای حذف هیدروژن موجود در فضای محفظه، بسیار مورد توجه بوده است. این سیستم‌ها از کانال‌هایی حاوی صفحات کاتالیستی از جنس پالادیوم یا پلاتینیوم تشکیل شده‌است. کاتالیست موجود در کانال بازترکیب‌کن در تماس با ترکیب گازی هیدروژن و اکسیژن یک واکنش کاتالیستی گرمازا را موجب می‌شود و بخار تولیدی در اثر واکنش، به علت نیروی شناوری از بازترکیب‌کن صعود کرده و از بالای آن خارج می‌شود[۳]. محاسبات انتقال و توزیع هیدروژن نیازمند مدل‌سازی انتقال حرارت و جابجایی طبیعی درون محفظه می‌باشد که توسط کدهای محاسباتی مختلف و ابزارهای CFD انجام می‌گیرد. در این پژوهش برای بدست آوردن توزیع غلظت و حذف هیدروژن در محفظه ایمنی VVER-۱۰۰۰ از کد محاسباتی MELCOR استفاده گردیده‌است.

روش کار

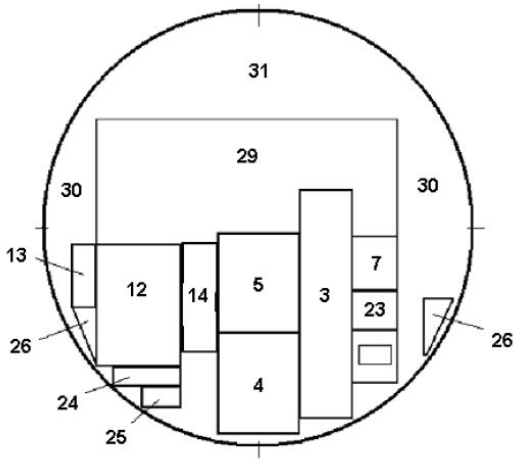
برای تعیین توزیع مکانی کسر حجمی هیدروژن برای راکتور VVER- ۱۰۰۰ با استفاده از کد MELCOR باید محفظه ایمنی شبیه‌سازی شده و شرایط اولیه‌ای برای آن در نظر گرفته شود. بدین منظور با استفاده از مشخصات هندسی محفظه ایمنی و استفاده از پکیج های حجم کنترل، مسیر جریان و ساختارهای حرارتی در کد MELCOR شبیه‌سازی انجام گرفته است[٤]. حجم داخلی محفظه ایمنی فولادی به ۳۰ سلول تقسیم شده‌است که این سلول‌ها توسط دریچه‌های مهندسی[۱] به یکدیگر متصل شده‌اند. شکل ۱ نمایی از نحوه قرار گرفتن سلول‌ها در کنار یکدیگر و جدول ۱ مشخصات استفاده شده برای محفظه ایمنی در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. محاسبات حجم مربوط به ۱٦۰ اتاق موجود در محفظه ایمنی بر اساس نقشه‌های مقاطع مختلف محفظه انجام گرفته و مشخصات هندسی همراه خصوصیات ترموهیدرولیکی به عنوان ورودی پکیج حجم کنترل به کد خورانده شده‌است. در شکل ۲ نمایی از ۳۰ سلول همراه با اتصال میان سلول‌ها نمایش داده شده‌است. این سلول‌ها توسط ۵۱ دریچه به یکدیگر متصل گردیده‌اند. در این مدل‌سازی دریچه‌های بین

[۱] Engineering vents

سلول‌های ۲و۸، ۲و۹، ۳و۱۰، ۳و۱۱، ۳و۲۹ به صورت شیر مدل شده‌اند که زمانی‌که اختلاف فشار بین دو اتاق مذکور به ۰/۰۱ MPa می‌رسد، جریان بین دو سلول برقرار می‌شود. این دریچه‌ها برای محافظت از ساختارهای بتنی محفظه ایمنی در برابر ایجاد اختلاف فشار فراتر از حد مجاز می‌باشند. از طرفی مدل‌سازی ساختارهای بتنی به دلیل تاثیری که بر غلظت بخار درون سلول‌ها و در نهایت بر غلظت هیدروژن می‌گذارد توسط پکیج ساختارهای حرارتی انجام گرفته‌است.

جدول ۱: خصوصیات ساختاری محفظه ایمنی VVER-۱۰۰۰

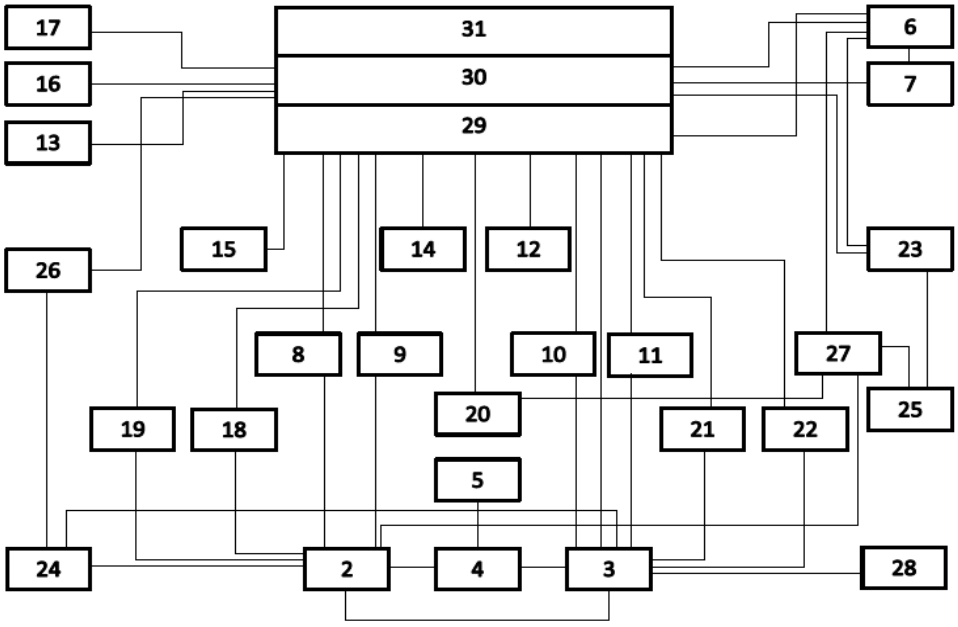
خصوصیات ساختاری:	مقدار
قطر داخلی محفظه ایمنی فولادی(m)	۲۸
ضخامت متوسط محفظه ایمنی فولادی(mm)	۳۰
حجم آزاد محفظه ایمنی (m^3)	٦٦٢٦٨/٩٤
سطح کلی محفظه ایمنی فولادی (m^2)	٧٢٨٨/٥
سطح کلی دیوارهای بتنی (m^2)	٢١١٥٢/٠
خصوصیات طراحی:	مقدار
بیشینه فشار درونی در دمای ۱۵۰ °C	٠/٤٦
متوسط حجمی بیشینه دما در تمام سلول‌ها(°C)	١٥٠



شکل ۱ : نمایی از سلول‌های مجاور در محفظه ایمنی[۵]

سیستم اسپری نیز برای حذف بخار و کاهش فشار ایجاد شده ناشی از وقوع حادثه با مقدار نرخ جرمی ۸۳/۳ kg/s و به مدت کارکرد ۱۸۰۰s و همچنین بازترکیب‌کن‌های کاتالیستی برای حذف هیدروژن مدل

گردیده‌است. جهت اعمال شرایط اولیه، منابع جرم و انرژی آب، بخار و هیدروژن ناشی از حادثه از دست رفتن خنک‌کننده به عنوان یک حادثه پایه طراحی مدنظر قرار گرفته‌است[۵]. در شکل ۳ مقدار جرم هیدروژن تزریق شده به درون محفظه ایمنی نشان داده شده‌است که ناشی از منابعی چون هیدروژن حل شده در خنک-کننده، هیدروژن ناشی از واکنش بخار–زیرکونیوم، رادیولیز خنک‌کننده در قلب، رادیولیز خنک‌کننده در استخر سوخت، رادیولیز آب در sump، رادیولیز بخار، تغییر ترکیب هیدرازین هیدرات می‌باشد[۵].

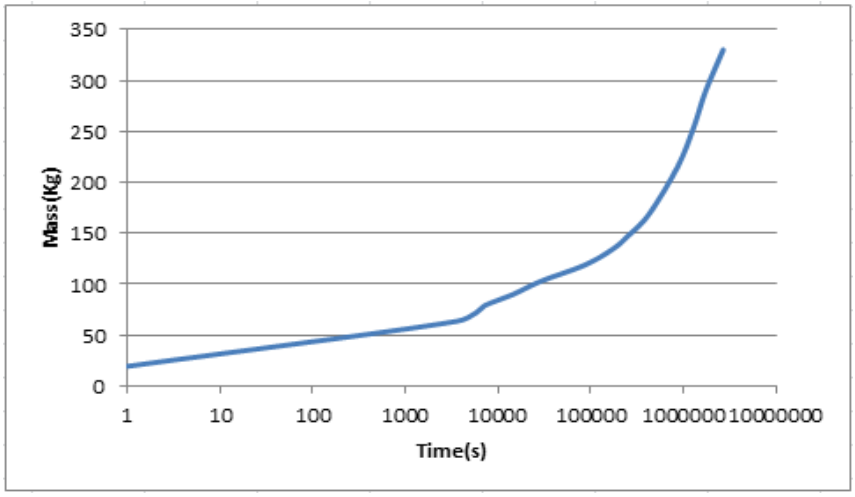


شکل ۲ : سلول‌بندی انجام گرفته برای مدل‌سازی توسط MELCOR

نتایج

در این بخش نتایج حاصل از مدل‌سازی توسط کد MELCOR و همچنین مقایسه نتایج با محاسبات انجام گرفته با کد ANGAR توسط پیمانکار روس مورد بررسی قرار گرفته است[۵]. با توجه به شکل‌های ۳و ٤ نرخ تولید هیدروژن در ساعات اولیه بالاتر از زمان‌های پایانی می‌باشد؛ اما به دلیل تاثیر حضور بخار تزریق شده به محفظه، گراف غلظت هیدروژن ابتدا کاهش را نشان می‌دهد و پس از مدتی با کاهش غلظت بخار، مقدار هیدروژن رو به افزایش می‌گذارد و تا زمانیکه هیدروژن به درون محفظه تزریق می‌شود، مقدار کسر حجمی هیدروژن به ٦٪ می‌رسد. در شکل ۵ مقدار هیدروژن در صورت کارکرد بازترکیب‌کننده، به ماکزیمم کسر حجمی ۱/۲٪ می‌رسد و سپس به دلیل حذف آن شروع به کاهش می‌کند. رفتار گراف با نتایج حاصل از ANGAR تطابق دارد. با توجه به هدف یافتن نتایج ارائه شده توسط پیمانکار روس تعداد ۸۰ بازترکیب‌کننده

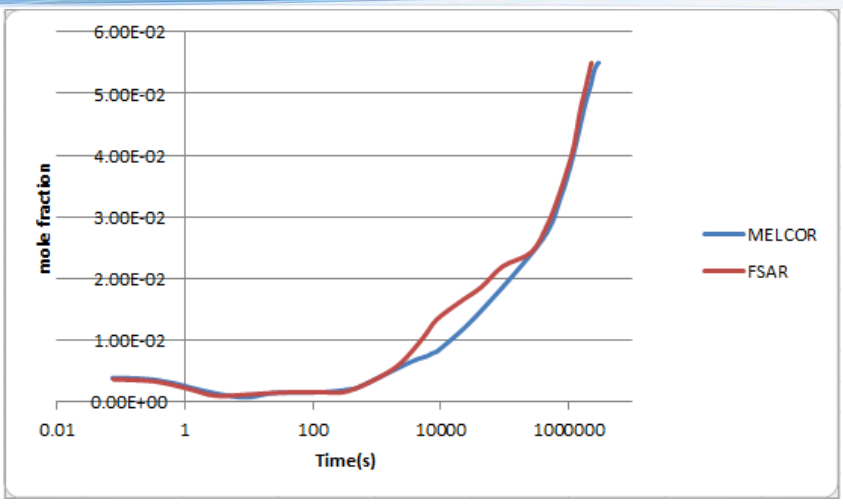
برای حذف این میزان هیدروژن مناسب تشخیص داده شده‌است و کسر حجمی هیدروژن را تا ۲٤ ساعت پس از اعمال شرایط به کمتر از ۲٪ و پس از آن به کمتر از ۰/۵٪ (محدوده مجاز ایمنی)کاهش داده‌است[۵]. (جدول۲)



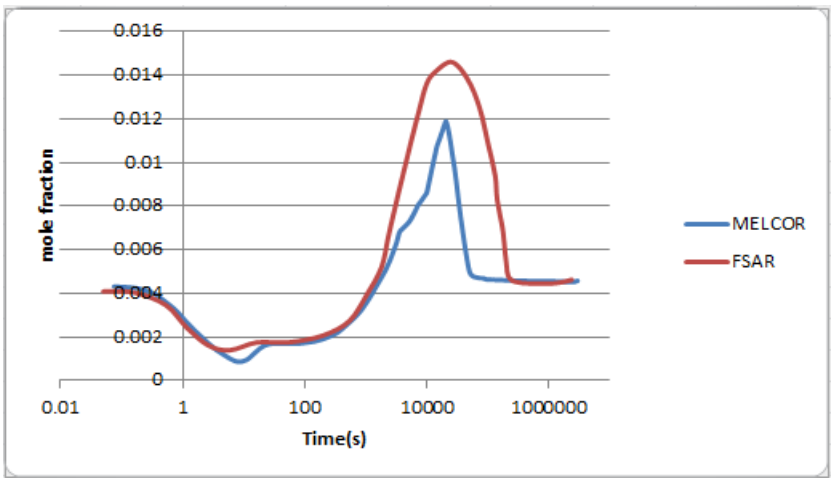
شکل ۳ : جرم هیدروژن تزریق شده به درون محفظه ایمنی بر حسب زمان[۵]

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل شده تعداد ۸۰ بازترکیب‌کننده برای حذف هیدروژن ناشی از یک حادثه پایه طراحی در سلول‌های مختلف محفظه ایمنی مورد استفاده قرار گرفته‌است که از این میان سهم سلول‌های ۲،۳،۲۹،۳۰و ۳۱ از بقیه بیشتر می‌باشد که به خاطر تجمع بیشتر هیدروژن در این نواحی می‌باشد، همچنین موقعیت مکانی مورد نظر برای بازترکیب‌کن‌ها از موقعیت هندسی سلول‌ها مشخص شده‌است. باید بیان گردد که ارزیابی انجام گرفته برای راکتور مذکور با استفاده از کد MELCOR برای اولین بار و از جهت راستی آزمایی کد مذکور می‌باشد که پیش از این توسط پیمانکار روس بوسیله کد ANGAR انجام گرفته‌است که با توجه به نتایج بدست آمده برای توزیع هیدروژن، کد MELCOR ابزاری مناسب تشخیص داده شده‌است.



شکل ٤ : کسر حجمی هیدروژن در سلول شماره ۲۹ بدون حضور بازترکیب‌کن‌های کاتالیستی



شکل ٥ : کسر حجمی هیدروژن در سلول شماره ۲۹ همراه با بازترکیب‌کن‌های کاتالیستی

جدول ۲ : تعداد و نحوه چینش بازترکیب‌کن‌ها در سلول‌های مختلف برای حادثه پایه طراحی[٥]

سلول	تعداد بازترکیب‌کن	سلول	تعداد بازترکیب‌کن	سلول	تعداد بازترکیب‌کن	سلول	تعداد بازترکیب‌کن
۲	٦	۱۰	۱	۱۸	۱	۲۶	۲
۳	٦	۱۱	۱	۱۹	۱	۲۷	۱
٤	۱	۱۲	۰	۲۰	۱	۲۸	۱
٥	۱	۱۳	۱	۲۱	۱	۲۹	۳
٦	۱	۱٤	۰	۲۲	۱	۳۰	۱۰

۷	۱	۱۵	۱	۲۳	۱	۳۱	۲۸
۸	۱	۱۶	۱	۲٤	۳		
۹	۱	۱۷	۱	۲۵	۲		

مراجع

[1] B. De Boeck, "Prevention and mitigation measures to ensure containment integrity," Nuclear engineering and design, vol. 209, pp. 147-154, 2001.

[2] I. TECDOC, "Mitigation of hydrogen hazards in severe accidents in nuclear power plants," Tech. Rep., IAEA-TECDOC-1661, IAEA2011.

[3] Shah, D. Use of passive autocatalytic recombiners at Indian Point 2 nuclear power plant. No. IAEA-TECDOC--1054. 1998.

[4] Gauntt, R.O.,et al."MELCOR Computer Code Manuals–Vol.1: Reference Manuals, Version 1.8.6 September 2005." (2005).

[5] Bushehr NPP, Unit 1 Final Report on safety analysis(FSAR), chapter 6.