



بست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

مدل سازی ترموهیدرولیکی چند سلولی محفظه ایمنی نیروگاه اتمی بوشهر طی حادثه از دست رفتن خنک کننده

علیرضا فرخ سیر^۱، امید نوری کلخوران^۱، *امیرسعید شیرانی^۱

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

چکیده:

یکی از مهمترین و خطرناک‌ترین حوادث متحمل در راکتورهای هسته‌ای، حادثه از دست رفتن خنک‌کننده و از نوع DECL می‌باشد که به معنای شکستگی کامل پایه سرد است. در این مقاله پارامترهای ترموهیدرولیکی (دما و فشار) در محفظه ایمنی نیروگاه بوشهر در حادثه DECL به کمک مدل چند سلولی و توسط نرم افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی کل فضای محفظه ایمنی به چهار سلول تقسیم شده و محاسبات بر مبنای میزان انتقال جرم مابین این سلول‌ها و با در نظر گرفتن نحوه‌ی ارتباط با سلولی که در آن شکستگی لوله رخ داده، انجام گرفته است و نتایج حاصل از این شبیه‌سازی با نتایج موجود در گزارش نهایی تحلیل ایمنی نیروگاه بوشهر (FSAR) مقایسه می‌گردد.

کلید واژه: مدل‌سازی چند سلولی، حادثه از دست رفتن خنک‌کننده، DECL، محفظه ایمنی راکتور،

۱- مقدمه

عواقب حوادث شدید^۱ در راکتورها تا حد بسیار زیادی به ویژگی‌های ایمنی محفظه ایمنی و عملکرد محفظه ایمنی در حفظ مواد رادیواکتیو و جلوگیری از انتشار آن به محیط بیرون بستگی دارد. در طول یک حادثه شدید مقادیر زیادی از محصولات شکافت رادیواکتیو تولید می‌شود و هدف سیستم محفظه ایمنی جلوگیری یا محدود کردن انتشار محصولات شکافت رادیواکتیو به محیط بیرون می‌باشد [۱]. با توجه به اهمیت آنالیز پارامترهای محفظه ایمنی، مطالعات متعددی برای شبیه‌سازی حوادث مختلف و یافتن رفتار محفظه ایمنی در این حالات انجام شده است. در بیشتر این مطالعات از کد GOTHIC استفاده شده است [۲]. حادثه از دست رفتن خنک‌کننده (LOCA^۲) اغلب در راکتورهای آب سرد رخ می‌دهد جایکه انرژی ذخیره شده در خنک‌کننده با دما و فشار بالا ممکن است به دلیل ترک یا شکست لوله‌ای که حاوی آن می‌باشد در فضای درون محفظه ایمنی آزاد شود [۳]. مدل‌سازی چند سلولی

¹ Severe Accident

² Loss of Coolant Accident



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

اعمال شده بر مبنای میزان انتقال جرم ما بین سلول‌ها و با در نظر گرفتن نحوه‌ی ارتباط با سلولی که در آن شکستگی لوله رخ داده است انجام گرفته است. انجام محاسبات بر مبنای روابط تعادل ترمودینامیکی، جرمی، حجمی، انرژی و معادلات اوریفیس در هر یک از سلول‌ها و با در نظر گرفتن فازهای آب و بخار و هوا می‌باشد. مدل‌سازی در نظر گرفته شده توسط نرم افزار MATLAB برنامه نویسی شده و نتایج حاصل از این شبیه‌سازی با نتایج کد روسی [۴]ANGAR موجود در FSAR نیروگاه بوشهر مقایسه می‌گردد.

۲- روش کار (مدل‌سازی)

در مدل چهار سلولی حجم داخل محفظه ایمنی به چهار سلول تقسیم می‌شود. سلول یک، قسمتی از مدل در نظر گرفته می‌شود که در آن حادثه شکست پایه سرد^۳ مدار اولیه رخ می‌دهد و بر اساس آن مقداری از سیال پراورژی خنک‌کننده مدار اولیه وارد فضای محفظه ایمنی در این سلول می‌شود و بنابراین سلول شماره یک به صورت اشباع در نظر گرفته می‌شود. همچنین در حین انتقال جریان به دلیل اختلاف فشار بین سلول یک و سایر سلول‌ها این جریان دو فاز به صورت جریان فوق اشباع در می‌آید. از آنجا که جرم و انرژی خروجی از محل شکست به طور مستقیم وارد سلول یک می‌شوند معادلات مربوط به این سلول مجزا از سایر معادلات است. بنابراین معادلات برای دو دسته از سلول‌ها نوشته خواهد شد. دسته اول معادلات مربوط به سلول یک و دسته دوم معادلات مربوط به سایر سلول‌هاست. معادلات پیوستگی جرم و انرژی برای هر سه جزء مورد نظر، معادلات انتقال جرم و انرژی برای هر سه جزء، معادلات تبدیل آب به بخار آب و سایر معادلات کمکی ملزومه فرمولاسیون مدل چند سلولی را تشکیل خواهند داد. با در نظر گرفتن شرایط فوق، به معادلاتی که در این محیط حاکم می‌باشند پرداخته می‌شود. در معادلات پیش رو نماد (•) و (°) که بر روی پارامترها به کار رفته‌اند به ترتیب نمایشگر مشتق زمانی (نرخ پارامتر مربوطه) و مشتق دمایی (مشتق گیری نسبت به دما) برای پارامتر مربوطه می‌باشند. همچنین هر یک از سه عنصر به کار رفته در این سیستم یعنی بخار آب، آب و هوا به ترتیب با اندیس L, W, D مشخص شده‌اند. همچنین در جدول (۱) فهرست پارامترهای لازمه برای فرمولاسیون آورده شده است.

جدول ۱- فهرست پارامترهای لازمه برای فرمولاسیون به کار رفته در مدل سازی

اندیس ها	توضیح	اندیس ها	توضیح
B	ترک یا شکستگی	\dot{M}	نرخ جرمی (Kg/s)
e	ورودی به سلول	C_p	ظرفیت گرمایی ویژه (J/Kg °K)

³ Cold Leg



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

a	خروجی از سلول	V	حجم (m ³)
k	شماره سلول مورد بررسی	v	حجم ویژه (m ³ /Kg)
P	فشار (Bar)	R	ثابت جهانی گازها (J/Kg °K)
T	دما (°K)	H	آنتالپی (J/Kg)
M	جرم (Kg)		

۳-۱- معادلات سلول یک :

$$\dot{M}_{D1} = G_{DB} - \sum_{j=1}^n G_{D1j} + G_{V1} \quad (1)$$

$$\dot{M}_{W1} = G_{WB} - \sum_{j=1}^n G_{W1j} - G_{V1} \quad (2)$$

$$\dot{M}_{L1} = - \sum_{j=1}^n G_{L1j} \quad (3)$$

معادلات ۱ تا ۳ به ترتیب بیانگر موازنه جرم برای بخار آب، آب و هوا (سه جزء شرکت کننده در سیستم) می باشد. فشار موجود در سلول، مجموعه ای از فشار عناصر گازی شکل شامل هوا و بخار آب موجود در سلول می باشد و بنابراین نرخ تغییرات فشار توسعه یافته با در نظر گرفتن هوا و بخار آب به عنوان عوامل تامین فشار بدست می آید.

$$P_1 = P_{L1} + P_{D1} \quad (4)$$

$$P_{L1} = \frac{R_L T_1}{v_{L1}} = \frac{M_{L1} R_L T_1}{V_1} \quad (5)$$

$$P_{D1} = f(T_1) \quad (6)$$

$$\dot{P}_1 = \frac{R_L}{V_1} (T_1 \dot{M}_{L1} + M_{L1} \dot{T}_1) + \frac{dP_{D1}}{dT_1} \dot{T}_1 \quad (7)$$

در معادلات (۱ تا ۳) پارامتر G_{V1} نرخ تبدیل آب به بخار آب در سلول یک می باشد و از ترکیب روابط بالانس جرمی و معادله فشار و جایگذاری آن در معادله انرژی رابطه ای برای محاسبه ترم G_{V1} حاصل می شود.

$$G_{V1} = \frac{G_{DB} (h_{DB} - h_{D1}) + G_{WB} (h_{WB} - h_{W1}) - F_1 + Q_1 + R_L T_1 \dot{M}_{L1}}{r_1} \quad (8)$$



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

$$- \left(\frac{M_{D1} h'_{D1} + M_{W1} h'_{W1} + M_{L1} (Cp_{L1} - R_L) - V_1 \frac{dP_{D1}}{dT_1}}{r_1} \right) \dot{T}_1$$

در معادله (۸) پارامتر F_1 نمایانگر میزان انرژی انتقالی از سلول شماره یک به سایر سلول‌ها در اثر انتقال سه جزء مورد نظر می‌باشد. همچنین ترم‌های r_1 و Q_1 به ترتیب بیانگر گرمای نهان تبخیر آب و میزان انرژی چشمه‌های حرارتی در سلول یک می‌باشند.

در نهایت ترم دما در سلول یک از رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

$$\dot{T}_1 = \frac{G_{DB}(h_{DB} - h_{D1}) + G_{WB}(h_{WB} - h_{W1}) + Q_1 + R_L T_1 \dot{M}_{L1} + B_1 - F_1}{C_1} \quad (9)$$

در رابطه بالا پارامترهای (B_1) و (C_1) به صورت مجموعه‌ای از پارامترها تعریف خواهند شد.

همان‌گونه که در پاره‌ای از روابط بالا مشاهده می‌شود پارامترهای انتقال جرم مابین سلول یک و سایر سلول‌های مجاور آن که با هم ارتباط دارند مانند G_{12} ، G_{13} ، ... و G_{1n} ظاهر شده است. این انتقال جرم ناشی از اختلاف فشار موجود بین سلول‌های مجاور می‌باشد و تا مرز هم فشار شدن کل سیستم ادامه خواهد داشت. دو روش عمده برای محاسبه نرخ انتقال جرم مابین سلول‌ها وجود دارد که یکی بر مبنای معادلات پایستگی جرم و ممنتوم در حجم کنترل شامل سلول مورد بررسی و دیگری بر مبنای مدل‌سازی با معادلات اوریفیس با استفاده از روابط ترمودینامیکی می‌باشد. همچنین در مجموعه روابط بالا داده‌های دمش مربوط به ناحیه شکست اعم از جرم و آنتالپی آب و بخار آب به ترتیب با ترم‌های G_{WB} ، h_{WB} ، G_{DB} و h_{DB} مشخص شده‌اند که این داده‌ها از FSAR^۴ نیروگاه بوشهر استخراج شده و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۲- معادلات سایر سلول‌ها :

همانطور که پیشتر اشاره شد سلول شماره یک در حالت اشباع و سایر سلول‌ها در حالت فوق اشباع قرار دارند بنابراین معادلات سایر سلول‌ها نیز مشابه سلول یک بوده با این تفاوت که معادلات برای حالت غیر اشباع بازنویسی می‌شود. در نهایت با اعمال این تغییرات معادلات دما و فشار سایر سلول‌ها به صورت زیر نشان داده می‌شود.

معادله فشار بازنویسی شده برای سلول‌های غیر اشباع:

⁴ Final Safety Analysis Report



بیست و یکمین کنفرانس هفتای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

$$\dot{P}_K = \frac{1}{V_K} \left[\dot{T}_K (M_{DK} R_D + M_{LK} R_L) + T_K (\dot{M}_{DK} R_D + \dot{M}_{LK} R_L) \right] \quad (10)$$

معادله دما بازنویسی شده برای سلول‌های غیر اشباع:

$$\dot{T}_K = \frac{F_{ek} - F_{ak} + Q_K + T_K (\dot{M}_{DK} R_D + \dot{M}_{LK} R_L)}{M_{DK} (Cp_{DK} - R_D) + M_{LK} (Cp_{LK} - R_L)} \quad (11)$$

در معادله (۱۱) پارامتر F_{ek} نمایانگر میزان انرژی ورودی به سلول k و F_{ak} نمایانگر میزان انرژی خروجی از سلول k در اثر انتقال سه جزء مورد نظر می‌باشند.

۴- نتایج

حادثه DECL از جمله شدیدترین حوادث LOCA می‌باشد که در نیروگاه اتمی به وقوع می‌پیوندد. در این بخش نتایج آنالیز چهار سلولی (مدل چند سلولی) پارامترهای ترموهیدرولیکی محفظه ایمنی نیروگاه بوشهر برای حادثه DECL (شکست با قطر ۸۵۰ میلی متر) آورده شده است. همچنین در جدول (۲) برخی از مشخصات هندسی ۴ سلول در نظر گرفته شده در مدل آورده شده است.

جدول ۲ - مشخصات هندسی ۴ سلول در نظر گرفته شده در محفظه ایمنی

شماره سلول	حجم سلول (m^3)	سطح تماس موثر با سلول‌های هم جوار (m^2)			
		۴	۳	۲	۱
۱	۱۰۸۰۹	---	---	۵۳۶/۲۴	---
۲	۵۱۵۸۰	۲۴۷/۴	۳۸۹/۴۹	---	۵۳۶/۲۴
۳	۱۷۴۰	---	---	۳۸۹/۴۹	---
۴	۳۵۷۰	---	---	۲۴۷/۴	---



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

۵- بحث و نتیجه گیری

بررسی نتایج بدست آمده از مجموعه شکل‌های (۱ تا ۵) نشان می‌دهد که شکل توزیع فشار متوسط و دمای سلول‌ها در داخل محفظه ایمنی در تمامی حالات مدل‌سازی انجام شده در این مقاله تطابق مناسبی با نتایج FSAR دارد. همان‌طور که از توزیع دما و فشار مدل چهار سلولی بر می‌آید، پس از بروز حادثه و در همان لحظات اولیه همزمان با دمش جریان دو فازی خنک‌کننده به درون محفظه، دما و فشار به سرعت شروع به افزایش می‌کنند و با شروع به کار سیستم‌های ایمنی این روند افزایش دما متوقف و حتی کاهش خواهد یافت. مدل‌سازی سیستم اسپری توسط کد ANGAR سبب شده است تا نمودار فشار و دمای خروجی این کد پس از عبور از نقطه بیشینه خود به دلیل فعال شدن این سیستم سیر نزولی داشته باشد در حالی که در مدل چند سلولی سیستم اسپری مدل‌سازی نشده است فلذا نمودارها پس از عبور از نقاط بیشینه خود فاقد سیر نزولی می‌باشند.

مراجع

- 1- Oriolo, F., Paci, S., Heat and mass transfer model in LWR containment systems. Nucl. Eng. Des. 204, 233–250., 2001.
- 2- Noori Kalkhoran, O., Rahgoshay, M., Minuchehr, A.H., Shirani, A.S., Analysis of thermal-hydraulic parameters of WWER-1000 containment in a large break LOCA. Nucl. Eng. Des 68, 101–111., 2014.
- 3- Noori Kalkhoran, O., Minuchehr, A.H. , Rahgoshay, M., Shirani, A.S., Short-term and long-term analysis of WWER-1000 containment parameters in a large break LOCA. Nucl. Eng. Des 74, 201–212., 2014.
- 4- Atomic Energy Organization of Iran (AEOI), Final Safety Analysis Report (FSAR) for Bushehr VVER-1000 reactor. Tehran, Iran (Chapter 6, 2003). 2003.