



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

بررسی اثر فرآیند Gap Cooling در زمان تخریب Lower Plenum راکتور هسته‌ای

- محسن صالحی^۱، ناصر شریفلو^۱، غلامرضا جهانفرنی^۱، تورج نظری^۱ مهدی حسینی^۱
 ۱. دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات تهران- دانشکده فنی و مهندسی- گروه مهندسی هسته‌ای- راکتور
 ۲. دانشگاه شیراز- دانشکده مهندسی مکانیک- گروه مهندسی هسته‌ای- راکتور

چکیده:

بررسی زمان تخریب قسمت تحتانی یک راکتور هسته‌ای (LP) توسط کدهای هسته‌ای نظیر MELCOR و RELAP5/SCDAP نیازمند شناخت هرچه بهتر فرآیند ذوب و عوامل تاثیر گذار در زمان تخریب نظیر فشار سیستم، میزان سیال درون LP و پدیده Gap Cooling (GC) باشد. این مقاله با مدل سازی پدیده GC در حالتی که قسمت LP مملو از خنک کننده است، نقش این پدیده را در تخمین زمان تخریب LP مورد ارزیابی قرار می دهد. در سه حالت بدون در نظر گرفتن GC و با در نظر گرفتن GC با دو مقدار $500 \text{ W/m}^2.k$ و $10000 \text{ W/m}^2.k$ برای ضریب انتقال حرارت گپ، زمان تخریب به ترتیب ۸۴۵/۰، ۹۱۵/۱ و ۹۴۰/۰ بدست خواهد آمد.

کلمات کلیدی: GC، LP، شکست خزشی، مواد مذاب

مقدمه:

در راکتور TMI-2 با جاری شدن مواد مذاب (Courium) در داخل قلب، در حدود ۲۰ تن از مواد مذاب قلب در داخل قسمت تحتانی راکتور (LP) که مملو از آب بود، ریزش کرد. در یک نمونه گیری که از RPV دمای سطح داخلی در حدود ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد برآورد شد، این در حالی بود که دمای سطح بیرونی این قسمت به ۸۰۰ درجه سانتی گراد می رسید. برای چنین شرایطی پیشنهاد شد که تشکیل گپ بین مواد مذاب و سطح داخلی LP لحاظ شود. تشکیل گپ می تواند ناشی از بخار شدن آب موجود بین منفذهای استیل و یا منقبض و منبسط شدن مواد مذاب ریزش کرده و دیواره RPV در اثر سرد و گرم شدن باشد [1]. نفوذ و چرخش آب در داخل این گپ ها از ذوب شدن LP راکتور TMI-2 حتی با وجود ۲۰ تن ماده مذاب در فشار تقریبی ۱۰ مگا پاسکال جلوگیری کرده است. تا کنون مطالعات تجربی زیادی پیرامون این پدیده صورت گرفته است که به برخی از آنها در ادامه اشاره خواهیم نمود.

انستیتو تحقیقات انرژی اتمی ژاپن (JAERI) و کره (KAERI) و شرکت FAUSKE در آمریکا در یک تست مقیاس- کوچک با استفاده از آلومینیوم مذاب به بررسی جریان مواد مذاب در داخل محفظه مملو از آب به منظور باز تولید مواد مذاب و آنالیز مکانیزمهای تجربی پرداخته شده است. در تست های دیگر که توسط موسسه ایمنی هسته-



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

ای آکادمی علوم روسیه (IBRAE)، شرکت زیمنس آلمان و انستیتو تحقیقات انرژی اتمی ژاپن (JAERI) صورت پذیرفته است بیشینه قدرتی که توسط آب در گپ ایجاد می شود، مورد بررسی قرار گرفته شده است. [1] در برخی از مطالعات توسط کدهای هسته‌ای حوزه حوادث شدید نظیر MELCOR و RELAP5/SCDAP mod3.3 به بررسی نحوه مدل سازی فرآیند GC پرداخته شده است. در این مقالات با استفاده از ایجاد یک مقاومت مصنوعی با مقادیر مختلف ضریب انتقال حرارت [5] در سطح دیواره درونی LP به دنبال ایجاد پدیده GC بوده و نقش این پدیده را در زمان تخریب LP بررسی می نمایند [2]. این مقاله نیز همانند مقالات یاد شده مدل سازی فرآیند GC توسط کد RELAP5/SCDAP mod3.4 را مورد بررسی و مطالعه قرار داده است. بررسی زمان تخریب LP در کد RELAP5/SCDAP با استفاده از محاسبات شکست خزشی^۱ Larson-Miller (در تنش‌ها در محدوده پایین) یا Manson-Hafner (در تنش‌های در محدوده بالا) بسته به نوع مواد و فشار سیستم صورت می پذیرد. در هر کدام از این موارد از روابط زیر شکست خزشی محاسبه خواهد می شوند.

$$D_c(t + \Delta t) = D_c(t) + \frac{\Delta t}{t_r} \quad (1)$$

$$t_r = 10^{f(\sigma, T)} \quad (2)$$

$D_c(t)$	=	creep damage at time t
Δt	=	time step at current problem time (s)
$t_r(t)$	=	time required for the structure to fail by creep rupture at the current state of temperature and stress (s)
t	=	problem time (s).
σ	=	stress in creep rupture equations (converted from Pa to ksi)
P_i	=	internal pressure on structure (Pa)
P_o	=	external pressure on structure (Pa)
r_i	=	inner radius of structure (m)
r_o	=	outer radius of structure (m).

$$\sigma = (P_i r_i^2 - P_o r_o^2)$$

تخریبی صورت پذیرفته است و زمانی که این رابطه مقداری

[3]

روش کار

با استفاده از این نکته که راکتور TMI-2 به عنوان یک نمونه عالی برای ریزش مواد مذاب به داخل قلب است، قسمت LP این راکتور برای مدل سازی مورد استفاده قرار گرفته شده است. از آنجایی که نحوه ریزش مواد مذاب نسبت به زمان و انرژی آنها در این راکتور اطلاعاتی در دسترس نمی باشد لذا با استفاده از جدول [4]، الگوریتم ریزش مواد مذاب را مطابق با گام‌های زمانی و انرژی درونی مطرح شده در این جدول در نظر گرفته شده است. نمای کلی مدل سازی انجام شده و شماره نودهای مورد بررسی در قسمت LP در شکل ۱ نشان داده شده است. در این مدل سازی سه حالت متفاوت برای بررسی تاثیر پدیده GC در نظر گرفته شده است. سه حالت یاد شده برای انجام مدل سازی عبارتند از:

A بدون در نظر گرفتن پدیده GC

^۱ Creep Rupture

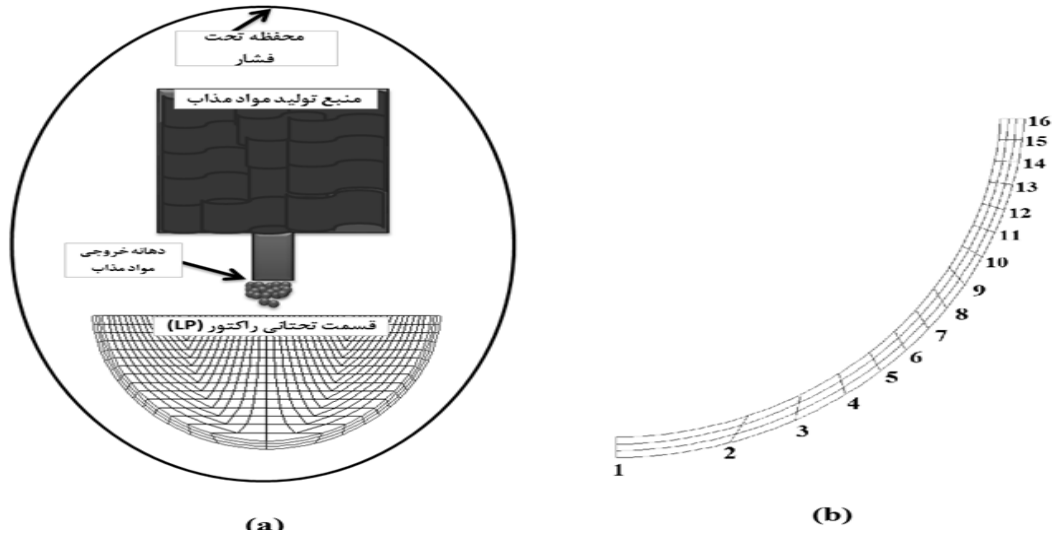


بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

B. با در نظر گرفتن پدیده $GC(h = 500 \text{ W/m}^2.k)$

C. با در نظر گرفتن پدیده $GC(h = 10000 \text{ W/m}^2.k)$



شکل ۱: (a) نمای کلی مدل سازی صورت پذیرفته شده (b) شماره المان دیواره بیرونی LP

جدول ۱: تاریخچه و سهم هریک از مواد ریزش کرده در داخل [4] Lower Plenum

No.	Period of time (s)		Mass of various materials (kg)					Temperature (K)	Power (MW)
	T1	T2	UO2	Zr	ZrO2	SS	Ag		
1	10.0	70.0	7145	822	807	1,435.00	0	3076.0	1.71
2	71.0	81.0	0	0	0	453	0	393.0	0
3	166.0	226.0	8,428	863	964	1,453	0	3095.0	2.09
4	227.0	237.0	0	0	0	1,220	0	416.0	0
5	272.0	332.0	4,559	464	525	66	0	3115.0	0.96
6	333.0	343.0	0	0	0	91	0	438.0	0
7	553.0	613.0	10,478	1,046	1,226	1,483	0	3145.0	2.27
8	614.0	624.0	0	0	0	191	0	427.0	0
9	931.0	991.0	0	0	0	0	956	1073.0	0
10	1027.0	1087.0	0	0	0	0	628	1073.0	0
11	1087.0	1147.0	6,596	638	792	1,427	0	3182.0	1.42
12	1148.0	1158.0	0	0	0	110	0	417.0	0
13	1229.0	1289.0	0	0	0	0	954	1073.0	0
14	1303.0	1363.0	0	0	0	0	174	1073.0	0
15	1471.0	1531.0	0	0	0	0	59	1073.0	0
16	1884.0	1944.0	26,783	1,733	3,278	387	0	3199.0	5.79
17	1945.0	1955.0	0	0	0	20,804	0	416.0	0
Total mass			63,989.0	5,566.0	7,592.0	29,120.0	2,771.0		
			109,038.0						

از آنجایی

مقاومت

مشترک

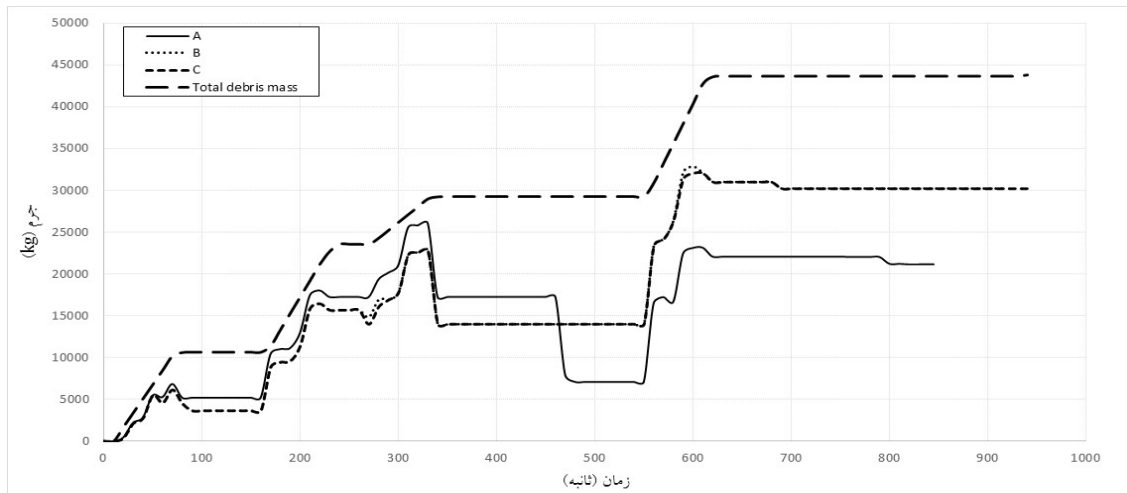
نتایج

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است مقدار کلی مواد ریزش کرده در هر سه حالت تقریباً برابر با ۴۳ تن است که مقدار و رفتار مواد مذاب ریزش کرده در حالتی که پدیده GC در نظر گرفته نشده (حالت A) با دو حالت B و C متفاوت است.



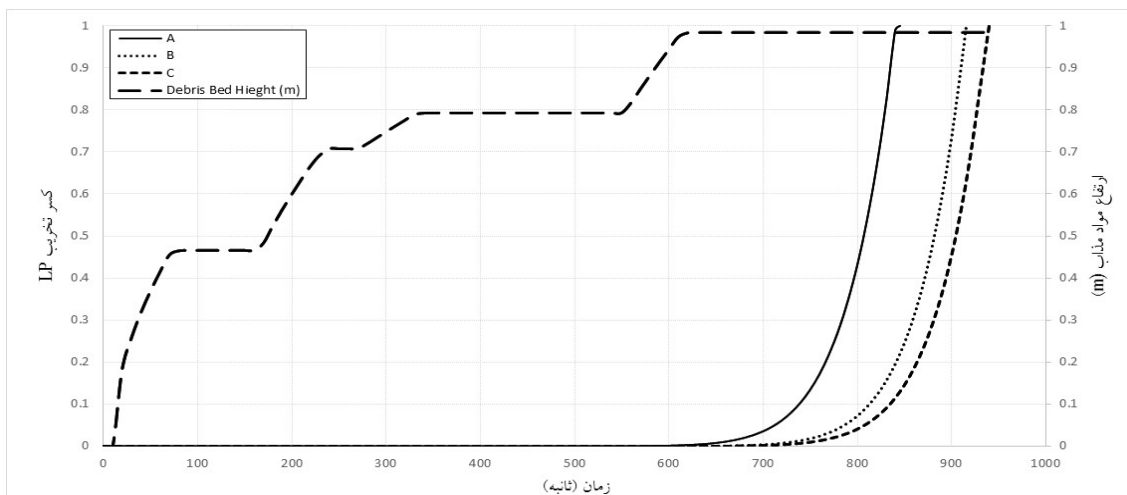
بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل ۳: جرم کل مواد ریزش کرده و مواد مذاب در قسمت تحتانی راکتور TMI-2

ارتفاع مواد ریزش کرده در هر سه حالت مورد آزمایش برابر به ۰.۹۹ متر در داخل LP می‌رسد که در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین در این شکل پارامتر Creep Rupture به تفکیک برای هر سه حالت A، B و C گزارش شده است. این شکل بیانگر میزان تاثیر در نظر گرفتن پدیده GC را در زمان تخریب قسمت LP راکتور نشان می‌دهد.



شکل ۴: ارتفاع مواد ریزش کرده و کسر تخریب قسمت تحتانی راکتور TMI-2

بحث و نتیجه گیری

در این مدل سازی به دنبال روشی جهت مدل کردن و بررسی تاثیر پدیده GC بر روی نتایج آنالیزهای حوادث شدید بوده ایم. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است زمانی که GC مدل می‌شود انباشت گرما در راکتور بیشتر



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

بوده و لذا جرم مواد مذاب به دلیل ایزوله شدن گرمای حاصل از مواد مذاب اکتیو بیشتر از حالتی است که GC مدل نشده (A) است. شکل ۴ نشان دهنده زمان تخریب راکتور می باشد. با مدل سازی پدیده GC (حالات B و C) زمان تخریب LP دیرتر از زمانی رخ می دهد که این پدیده را در نظر گرفته نشده است. حادثه TMI-2 بخوبی اهمیت و نقش این پدیده را بعنوان حفاظی در برابر ذوب شدن قسمت تحتانی راکتور بیان می دارد. خلاصه ای از نتایج حاصله در جدول ۲ آورده شده است. همانطور که در این جدول آمده است در سه حالت A، B و C، زمان تخریب به ترتیب ۸۴۵/۰، ۹۱۵/۱ و ۹۴۰/۰ بدست خواهد آمد.

از دیگر نتایج می توان به این نکته اشاره کرد که با وجود دمای ذوب استیلن استیل در حدود ۱۴۲۶/۸۵ درجه سانتی گراد (۱۷۰۰ درجه کلوین) [6]، قبل از رسیدن به این دما قسمت LP دچار شکست خزشی می شود.

جدول ۲: خلاصه نتایج حاصله از آنالیز

پارامتر	A	B	C
ارتفاع مواد مذاب (m)	0.99	0.99	0.99
مقدار مواد مذاب در داخل LP(ton)	21.16	30.23	30.23
زمان تخریب (sec)	845.1	915.1	940.0
شماره‌المان تخریب شده	2	3	3
دمای المان تخریب شده (°C)	1049.53	1045.30	1047.19

سپاسگزاری:

تقدیم به پدر و مادر عزیزم که هر چه دارم از سایه وجودی این دو فرشته آسمانی‌ام است.

منابع:

[1] B.R. Sehgal, Nuclear Safety in Light Water Reactors, Severe Accident Phenomenology, Academic Press is an imprint of Elsevier, USA, page 155, First edition 2012

[2] S.CHAN, Assessment of S/R5/MOD3.3 Models of Stratified Molten Pool and Debris-TO-Vessel Contact Resistance by TMI-2 Lower Head Creep Rupture Analyses, Swiss Federal Institute of Technology Department of Mechanical and Process Engineering ETH Zurich, CH-8092 Zurich, Switzerland, February 2006

[3] SCDAP/RELAP5Code Development Team, SCDAP/RELAP5Code Manual, Vol. 2: Modeling of Reactor Core and Vessel Behavior during Severe Accidents, INEEL0EXT-02-00589, Vol. 2, Rev. 2.2, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Oct. 2003



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

[4] The SCDAP/RELAP5 Development Team, October 1997, Appendix a SCDAP/RELAP5 MOD3.2 Assessment, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, page 127/202

[5] J. L. Rempe et al., Light Water Reactor Lower Head Failure Analysis, NUREG/CR-5642, EGG-2618, October 1993.

[6] R. C. Nause and M. T. Leonard, Thermophysical Property Assessment Report for Savannah River Site Production Reactor Materials, Science Applications International Corporation, SAIC Report No. 89/6507, Rev. 1 (May 1990).