



آنالیز اثرات انواع گردش طبیعی جریان بر میزان انتشار مواد رادیواکتیو در طی حادثه شدید نیروگاه PWR

عارف الدین زرنوشه فراهانی^۱، فرامرز یوسف‌پور^{۲*}، محمدرضا نعمت‌اللهی^۳، احمد پیروزمند^۱

۱. بخش مهندسی هسته‌ای، دانشکده مکانیک، دانشگاه شیراز، کدپستی: ۷۱۹۳۶۱۶۵۴۸، شیراز - ایران

۲. پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

۳. مرکز تحقیقات ایمنی دانشگاه شیراز، کدپستی: ۷۱۹۳۶۱۶۵۴۸، شیراز - ایران

*Email: fyousefpour@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۷/۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۸/۳۰

چکیده

مکانیزم شکست ناشی از خزش در طی حادثه شدید یک رآکتور آبی تحت فشار به جهت انتقال مواد رادیواکتیو به محیط زیست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به دنبال یک حادثه شدید، حرارت واپاشی منتقل شده به سایر قسمت‌های سیستم خنک‌کننده رآکتور می‌تواند منجر به گرم شدن سازه‌های سیستم خنک‌کننده رآکتور (RCS) و خرابی نواحی تحت فشار آسیب‌پذیر شود. حادثه قطع کامل برق (SBO) بدون اقدامات اپراتور (توالی TMLB) یکی از محتمل‌ترین سناریوهای است که ممکن است یکپارچگی RCS تحت فشار را تهدید کند. در این توالی، محل شکست RCS به نوع پدیده گردش طبیعی سیال مدار اولیه رآکتور بستگی دارد. در این تحقیق، علاوه بر مدل‌سازی کامل نیروگاه، تجزیه و تحلیل حساسیت شکست ناشی از خزش لوله‌های مولد بخار (SGTR) و خط لوله اصلی گرم خنک‌کننده رآکتور به نوع پدیده گردش طبیعی، یعنی جریان همسو و غیرهمسو، با استفاده از کد MELCOR بررسی شده است. نتایج حاصل از دو مدل جریان گردش طبیعی همسو و غیرهمسو نشان می‌دهد هنگامی که پدیده گردش طبیعی غیرهمسو غالب است، شکست ناشی از خزش خط لوله اصلی گرم خنک‌کننده رآکتور زودتر از دسته لوله‌های مولد بخار رخ می‌دهد. در صورتی که در اثر گردش طبیعی همسو لوله‌های مولد بخار زودتر از سایر بخش‌های خطوط اصلی سیستم خنک‌کننده رآکتور دچار شکست ناشی از خزش می‌شود. علاوه بر این، مقدار مواد رادیواکتیو منتشر شده به قسمت‌های مختلف نیروگاه و محیط زیست برای هر دو مدل برآورد شده است. نتایج نشان می‌دهد که براساس شکست، برای مدل‌های گردش طبیعی همسو و غیرهمسو به ترتیب ۱۸ کیلوگرم و ۱۴۵/۷۶ کیلوگرم مواد رادیواکتیو به صورت آئروسول و بخار محصولات شکافت به محفظه ایمنی رآکتور تخلیه می‌شود. از طرف دیگر، در گردش طبیعی همسو، حدود ۱۳۶/۳۳ کیلوگرم مواد رادیواکتیو به صورت بخار و آئروسول، از طریق شیرایمنی خط اصلی بخار به محیط زیست منتشر می‌شود.

کلیدواژه‌ها: ترم منبع رادیواکتیو، حادثه TMLB، گردش طبیعی، شکست ناشی از خزش، کد MELCOR

Analysis of natural circulation types' effect on source term during PWR severe accident

A. Zarnousheh Farahani¹, F. Yousefpour^{2*}, M.R. Nematollahi^{1,3}, A. Pirouzmand¹

1. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Shiraz University, Postalcode: 7193616548, Shiraz – Iran
2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran – Iran
3. Security Research Center, Shiraz University, Postalcode: 7193616548, Shiraz-Iran

Research Article

Received 26.9.2021, Accepted 21.11.2021

Abstract

Creep rupture as a failure mechanism during a severe accident in a PWR is of particular importance as it can lead to releasing radioactive materials into the environment. Following a severe accident, the decay heat transferred to other parts of the reactor cooling system can result in the heat-up of RCS structures and failure of vulnerable pressure boundaries. SBO without operator actions accident (TMLB sequence) is considered one of the most likely scenarios threatening the integrity of the RCS pressure boundary. In addition to PWR plant modeling, in this sequence, the location of rupture in the RCS depends on the type of natural circulation phenomenon of the reactor's primary side. This research investigates the sensitivity analysis of steam generator tube rupture (SGTR) and RCS hot-leg to the type of natural circulation, i.e. con-current and countercurrent, using the MELCOR code. The results of two models of con-current and countercurrent natural circulation show when the countercurrent natural circulation phenomenon is predominant, the RCS hot leg creep rupture occurs earlier than SGTR. However, the SGTR occurs earlier than any other part of RCS due to the concurrent natural circulation phenomenon. Moreover, the amount of materials released to different parts of the plant and the environment has been estimated for both models. The results show that about 18 kg and 145.76 kg of radioactive aerosol and fission product vapor materials are ejected to the containment following the rupture for con-current and countercurrent natural circulation models, respectively. On the other hand, in the con-current natural circulation, about 136.33 kg of radioactive aerosol and fission product vapor materials are released into the environment through the main steam line safety valve.

Keywords: Radioactive source term, TMLB accident, Natural circulation, Creep rupture, MELCOR code



۱. مقدمه

بررسی رفتار نیروگاه‌های هسته‌ای در زمان حوادث شدید از دیدگاه طراحی، بهینه‌سازی و ارزیابی ایمنی لازم و ضروری است. مطالعات انجام شده بر روی نیروگاه‌های هسته‌ای نشان داده است تا ۷۰ درصد (و بالاتر) فرکانس وقوع آسیب به قلب مربوط به حادثه قطع کامل برق است [۱]. حادثه SBO اگر با حوادثی مانند از دست دادن خنک‌کننده رآکتور، شکست لوله مولدبخار و یا ازدست‌دادن خنک‌کننده ثانویه همراه نشود، اثرات آنی شدیدی ندارد. ولی اگر حادثه برای مدت زمان طولانی ادامه پیدا کند، اثرات بالقوه آن بر نیروگاه و سلامت و ایمنی عمومی می‌تواند شدید باشد. همراه شدن آسیب قلب و افزایش فشار محفظه رآکتور می‌تواند منجر به حادثه مبنای طرح^۱ شکست لوله مولدبخار (SGTR) شود. حادثه SGTR در یک رآکتور آب تحت فشار^۲ به جهت پتانسیل آن برای دور زدن^۳ محفظه ایمنی رآکتور^۴ اهمیت ویژه‌ای دارد. در صورت آسیب قابل توجه به قلب، این حادثه ممکن است منجر به انتشار تصادفی مواد رادیواکتیویته به شکل گازهای نجیب، ذرات آئروسول و ید در فاز گاز شود [۲]. از این رو پیش‌بینی شکست لوله مولدبخار موضوعی است که مورد توجه بسیاری از جمله کار گروه حوادث شدید کمیسیون تنظیم مقررات هسته‌ای آمریکا، قرار گرفته است [۳]. هم‌چنین طی سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۰۲، در چارچوب پنجمین برنامه اتحادیه اروپا، پروژه شکست لوله مولدبخار در طی حادثه آسیب شدید به قلب رآکتور، انجام شد [۴]. برای درک بهتر از تأثیر حادثه قطع کامل برق در نیروگاه PWR بر شکست ناشی از خزش لوله‌های مولدبخار و سایر لوله‌های سیستم خنک‌کننده رآکتور می‌توان به تحقیقی که در سال‌های اخیر تحت عنوان «آنالیز MELCOR شکست ناشی از خزش لوله‌های مولدبخار در حادثه شدید SBO» اشاره نمود [۵].

پارامتر اساسی جهت برآورد پیامدهای حادثه بر افراد و محیط زیست، مقدار محصولات شکافت آزاد شده است. اصطلاح منبع^۵، به عنوان زمان، کسر و گونه‌زایی محصولات شکافت انتشار یافته در طی حادثه شدید و رفتار آن‌ها هنگام معلق شدن در فضای محفظه ایمنی رآکتور تعریف می‌شود [۶]. به منظور تعیین نشد محصولات شکافت از حادثه SGTR در طی آسیب به قلب، می‌توان به پروژه بین‌المللی ARTIST^۶، بین سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۱ اشاره نمود [۷].

نیروگاه مورد بررسی در این پژوهش متشکل از یک رآکتور تحت فشار با خنک‌کننده آب سبک (PWR)^۷ است که ظرفیت تولید برق این نیروگاه (MW_{th}) ۱۱۳۰ مگاوات حرارتی یا به عبارتی (MW_e) ۳۶۰ مگاوات الکتریکی می‌باشد [۸]؛ که با استفاده از نسخه ۱،۸،۶ کد MELCOR [۹] مدل‌سازی شده است. در ادامه روش کار تشریح شده است که شامل پدیده شناسی و مدل‌سازی حادثه شدید است. هم‌چنین تجزیه و تحلیل حساسیت شکست ناشی از خزش لوله‌های مولدبخار (SGTR) و خط لوله اصلی گرم خنک‌کننده رآکتور به نوع پدیده گردش طبیعی، یعنی جریان همسو و غیرهمسو، و میزان و محل انتشار گروه‌هایی مختلف مواد رادیواکتیو بررسی شده است.

۲. روش کار

در این بخش پس از شناسایی و بررسی عواقب و اثرات سناریوهای مختلف حادثه شدید TMLB، مدل‌سازی اجزا یک نیروگاه متشکل از قلب رآکتور، مدار اولیه و ثانویه، محفظه ایمنی رآکتور و نحوه‌ی مدل‌کردن و آنالیز پدیده‌های مختلف با استفاده از مدل‌های متنوع موجود در کد MELCOR بیان شده است.

جهت شناخت پدیده‌های مختلف درون مولدبخار از جمله گردش طبیعی غیرهمسو سیال و تأثیر آن بر حادثه شکست ناشی از خزش لوله‌های مولدبخار و نحوه‌ی صحیح حجم‌بندی مولدبخار مجموعه‌ای از مقالات و گزارش‌ها ارایه شده است [۱۰-۱۲]. براین اساس در اثر حادثه TMLB، با از کارافتادن پمپ‌ها، هد لازم جهت گردش سیال درون مدار اول نیروگاه اعمال نمی‌شود و در هنگام خاموشی رآکتور سیستم آب تغذیه اصلی^۸ از کار می‌افتد و سیستم آب تغذیه اضطراری^۹ ایزوله می‌شود [۱۰]. بعد از وقوع حادثه و افزایش فشار خط لوله اصلی بخار، شیرایمنی خط لوله اصلی بخار MSSV^{۱۰} با عملکرد، در حالت باز قفل می‌شود و سیستم آب تغذیه اضطراری مولدبخار نمی‌تواند عمل تزریق را انجام دهد [۱۳]. در این حالت سیال باقی‌مانده در ناحیه ثانویه مولدبخار تنها منبع برداشت حرارت ناشی از واپاشی محصولات شکافت در قلب رآکتور است. با بالا رفتن درجه حرارت سیال و ایجاد اختلاف چگالی، گردش طبیعی سیال در مدار اول رخ می‌دهد و سیال گرم‌شده وارد خط لوله گرم سیستم خنک‌کننده رآکتور و پس از آن وارد دسته لوله‌های مولدبخار می‌شود [۱۱]. با تبخیر سیال آب و پایین رفتن سطح آب، در برخی مواقع ممکن است مقداری از آب درون ناحیه مابین مولدبخار و پمپ خنک‌کننده رآکتور^{۱۱}، به جهت پایین بودن ارتفاع، به درون

7. Pressurized Water Reactor

8. Main Feed Water

9. Emergency Feed Water

10. Main Steam Safety Valve

11. Cross Over

1. DBA

2. PWR

3. Bypass

4. Containment

5. Source Term

6. Aerosol Trapping In Steam Generator



است. این پارامتر براساس معادله ۲ به تنش ناشی از اختلاف فشار وابسته است. تنش ناشی از اختلاف فشار وارد بر لوله، تابعی از شعاع لوله (p)، ضخامت لوله (Z) و اختلاف فشار بین ناحیه بیرون و درون لوله (ΔP) می باشد که طبق معادله ۳ محاسبه می گردد [۱۵]. در کد MELCOR این تنش با استفاده از دستور تابع کنترل PIPE-STR محاسبه می شود. همچنین به منظور تعیین زمان شکست لوله های سیستم خنک کننده رآکتور از رابطه ۴ استفاده شده است. براساس این رابطه با استفاده از مجموع نسبت بازه زمانی (بازه زمانی که در آن درجه حرارت و تنش انتخاب گردیده) به زمان شکست محاسبه شده براساس درجه حرارت و تنش از رابطه ۳، مقدار تابع آسیب^۳ مدل لارسون میلر محاسبه می گردد. به عبارت دیگر هر زمانی که تابع آسیب مدل لارسون میلر برابر مقدار ۱ شود می توان گفت که شکست رخ داده است.

$$t_R = 1 \cdot \left[\frac{P}{T} + C_1 \right] \quad (1)$$

$$P = C_2 \log \sigma + C_3 \quad (2)$$

$$\sigma_e = \frac{\rho}{Z} \Delta P \quad (3)$$

$$LM - CREEP(t) = \int_0^{t_f} \frac{dt}{t_R(t)} = \sum \frac{\Delta t_i}{t_R(t_i)} = 1 \quad (4)$$

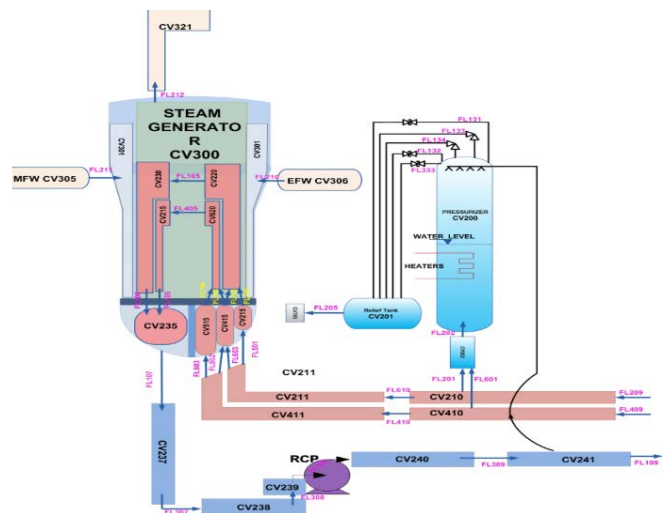
در ادامه با استفاده از پکیج های رادیونوکلید (RN)، سازه های حرارتی (HS) و مسیر جریان (FL) کد MELCOR، میزان تولید رادیونوکلیدها، انتقال، رسوب شدن و نشست آنها بر روی سطوح مختلف مدل سازی شده است. شانزده کلاس رادیونوکلید در کد MELCOR برای چهار گروه حجم های کنترل، شامل مدار اولیه رآکتور، مدار ثانویه، فضای محفظه ایمنی رآکتور (کانتینمنت) و محیط (زیست) بیرون محفظه ایمنی رآکتور مدل شده است.

۳. صحت سنجی و اعتبارسنجی

صحت سنجی و اعتبارسنجی شامل دو بخش کد و مدل ترموهیدرولیکی MELCOR می شود که براساس آنها تحلیل های ایمنی صورت گرفته، واجد صحت و صلاحیت لازم می شوند. صحت سنجی و اعتبارسنجی نسخه کد در دسترس، قبلاً انجام و گزارش شده است [۱۶]. به منظور دستیابی به مدل قابل اطمینان و با پیروی از فرایندهای تضمین کیفیت در مرجع

قلب تخلیه نشود و سبب تجمع شود. در این حالت بخار آب داغ تر خروجی از قلب رآکتور پس از ورود به درون خط لوله گرم و دسته لوله های مولد بخار به جهت وجود سد آب درون ناحیه مابین مولد بخار و پمپ خنک کننده رآکتور، مجدداً از طریق دسته لوله های مولد بخار وارد خط لوله گرم می شود و به قلب برمی گردد. به این حالت پدیده گردش طبیعی غیرهمسو^۱ می گویند.

حجم بندی هیدرولیک و مدل سازی سیستم های مدار اول و مدار ثانویه نیروگاه با استفاده از کد MELCOR انجام شده است [۱۴]. به منظور بررسی پدیده های مختلف درون مولد بخار از جمله گردش طبیعی همسو و غیرهمسو سیال و تأثیر آن بر حادثه شکست ناشی از خزش لوله های RCS، حجم بندی مدل MELCOR نیروگاه در خط لوله گرم و دسته لوله های مولد بخار مطابق شکل ۱ توسعه یافته است. بر این اساس سیال عبوری از خط لوله گرم سیستم خنک کننده رآکتور به دو بخش گرم و سرد تقسیم می گردد. در این پژوهش دو حالت پدیده گردش طبیعی سیال مدل شده است. علاوه بر این حجم بندی محفظه ایمنی ساختمان نیروگاه^۲ با هشت بخش شامل ناحیه فوقانی کانتینمنت، مرکز کانتینمنت، فضای آنالوس، چاهک رآکتور، فضای مولد بخار و دیگر بخش های سیستم خنک کننده رآکتور، فضای بالای محفظه تحت فشار رآکتور و فضای مربوط به تانک ذخیره آب درون محفظه ایمنی رآکتور انجام گرفته است. همچنین برای ناحیه بیرون محفظه ایمنی رآکتور یک فضا به عنوان اتمسفر محیط زیست در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. نحوه حجم بندی مدل گردش طبیعی غیرهمسو سیال.
زمان رخداد شکست ناشی از خزش، مطابق معادله ۱ وابسته به درجه حرارت لوله ها و مؤلفه ای به نام «پارامتر لارسون میلر»

1. Countercurrent Natural Circulation
2. Containment



(۲۰۰-) ثانیه تا صفر حالت کاری نیروگاه پایدار است و فشار بدون تغییر و ثابت است. با رخداد حادثه قطع کامل برق (در زمان صفر ثانیه) و انجام عمل خاموشی رآکتور و از کار افتادن پمپ‌های اصلی مدار اول، فشار سیال مدار اول و قلب رآکتور به یکباره کاهش شدیدی می‌یابد. با گذشت زمان، در اثر انبساط حرارت قلب و تبخیر سیال مایع، فشار افزایش می‌یابد. افزایش فشار تا نقطه تنظیم شده شیرهای ایمنی فشارنده (PSV) سبب عملکرد آن‌ها می‌شود و با هر بار عمل باز شدن، ضمن تخلیه مقداری از فشار سیستم، مقداری از موجودی سیال مدار اولیه از دست می‌رود و وارد حجم کنترل تانک تخلیه می‌شود. در توالی TMLB، به جهت عدم عملکرد سیستم تزریق اضطراری مدار ثانویه مولد بخار^۲، افزایش بیش‌تر درجه حرارت و فشار سیال رخ می‌دهد که سبب شکست ناشی از خزش می‌شود. در پدیده گردش طبیعی غیرهمسو و همسو، به ترتیب خط لوله گرم مدار اول خنک‌کننده و دسته لوله مولد بخار دچار شکست ناشی از خزش شده است. فشار مدار اول نیروگاه و قلب رآکتور به علت تخلیه بخار آب از محل شکست، کاهش می‌یابد. کوچک بودن سطح مقطع ناحیه شکست دسته لوله‌های مولد بخار باعث افت فشار کم‌تر در مقایسه با افت فشار ناشی از شکست در خط لوله گرم مدار اول شده است.

عدم برداشت حرارت تولیدی در قلب منجر به افزایش درجه حرارت سطح غلاف سوخت و سوخت می‌گردد. در شکل ۴ تغییرات درجه حرارت غلاف سوخت در طی حادثه و عدم برداشت حرارت واپاشی قلب برای دو حالت گردش طبیعی سیال نشان داده شده است. درجه حرارت غلاف سوخت در حلقه اول برای سه سطح پایین، میانه و بالای قلب (به ترتیب برای سلول‌های ۱۰۹، ۱۰۵ و ۱۱۴) نمایش داده شده است. در حالت گردش طبیعی غیرهمسو، بیش‌ترین درجه حرارت مربوط به سلول واقع در ارتفاع میانه قلب در حلقه مرکزی اول است. در حالت گردش طبیعی همسو، به جهت خنک شدن سیال بخار آب در اثر عبور از داخل حلقه مدار و به جهت افزایش درجه حرارت سیال بخار در طی حرکت از پایین به بالا قلب، غلاف سوخت موجود در سلول بالاتر دارای درجه حرارت بیش‌تر نسبت به سایر سلول‌های سطوح پایین‌تر است. براساس افزایش میزان درجه حرارت، واکنش فلز-آب در غلاف، منجر به تولید اکسید زیرکالوی (ZrO₂) و در نتیجه، تولید بیش‌تر گرما می‌شود [۱۸]. مکانیزم از دست رفتن غلاف سوخت و سوخت در کد MELCOR براساس ذوب در درجه حرارت‌های ۲۵۰۰ کلوین و ۳۱۰۰ کلوین یا سقوط آن‌ها به سلول‌های سطوح پایین‌تر در اثر کاهش

[۱۷]، فرایند صحت‌سنجی و اعتبارسنجی تحت عنوان «V&V» اعمال شده است. این فرایند براساس بازبینی مجدد داده‌های ورودی کد جهت اطمینان از صحت داده‌های ورودی و نیز بررسی و تصدیق رفتار مدل انجام شده است. پس از اطمینان از صلاحیت و صحت کد مدنظر، از طریق کاربری واجد صلاحیت، فرایند حجم‌بندی مدل مدنظر انجام شد. لازم به ذکر است که این فرایند با استفاده از داده‌های طراحی نیروگاه در حالت پایدار، شکل گرفته و نتایج حاصل از اجرای مدل مدنظر در کد MELCOR مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در واقع با مقایسه نتایج پارامترهای ترموهیدرولیکی حاصل از مدل با مقادیر طراحی، میزان خطای ناشی از مدل‌سازی به دست آمده است که در مقایسه با میزان خطای قابل قبول، صلاحیت مدل مدنظر مورد ارزیابی و تأیید قرار گرفت. به منظور تأیید صحت جزئیات حجم‌بندی مدل، آنالیز حساسیت بر روی نواحی مختلف مدار اول نیروگاه انجام گرفت و اطمینان لازم به منظور ارایه استقلال نتایج از حجم‌بندی حاصل شده است [۸].

۴. تحلیل و بررسی نتایج

در این بخش پس از بررسی و مقایسه نتایج حادثه شدید بر پارامترهای اساسی برای دو مدل مختلف، مقدار و نحوه انتشار مواد رادیواکتیو در بخش‌های مختلف نیروگاه ارایه شده است. جدول ۱ زمان رخداد پدیده‌های مؤثر بر رفتار قلب رآکتور و نیروگاه، برای دو مدل مختلف گردش طبیعی در حادثه قطع کامل برق را نشان می‌دهد.

جدول ۱. زمان رخداد پدیده‌های مختلف

پدیده	زمان (برحسب ثانیه)	
	گردش طبیعی همسو	گردش طبیعی غیرهمسو
شروع حالت پایا	-۲۰۰	-۲۰۰
رخداد حادثه SBO با خاموش شدن پمپ	۰/۰	۰/۰
قفل شدن شیر ایمنی MSSV در حالت باز	۵۰۰	۵۰۰
خشک شدن بویلر مولد بخار	۲۱۲۵/۶	۲۲۰۸/۵
فعال شدن عملکرد شیرهای PSV فشارنده	۱۰۷۴۱/۰	۱۰۸۶۵/۰
شکست ناشی از خزش در نواحی مختلف RCS	۲۵۳۴۰/۰	خط لوله گرم ۲۹۶۶۰/۰
شروع تزریق تانک آکومولاتور	۲۸۵۰۰/۰	۲۹۶۷۰/۹
از دست دادن تمام غلاف‌های سوخت (حلقه اول، حلقه دوم)	۳۳۹۱۹/۰	۲۴۶۰۰/۰
شکست محفظه تحت فشار رآکتور RPV	۳۳۲۱۳/۰	۲۳۵۸۰/۰
	۳۷۵۲۱/۹	۲۸۴۹۱/۹

در شکل‌های ۲ و ۳ تغییرات فشار و درجه حرارت سیال درون قلب رآکتور با گذشت زمان رسم شده است. در زمان

1. Pressurizer Safety Valve

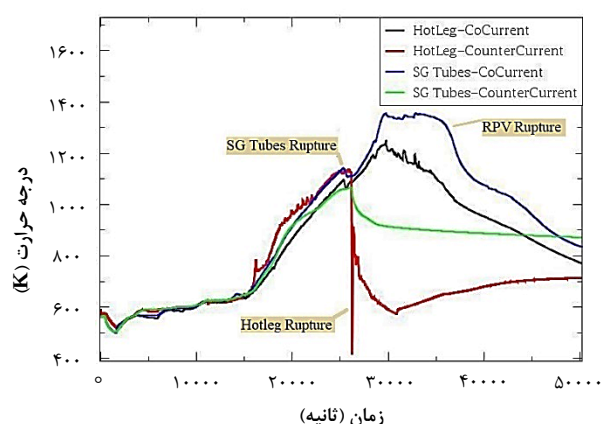
2. Emergency Feedwater

Journal of Nuclear Science and Technology

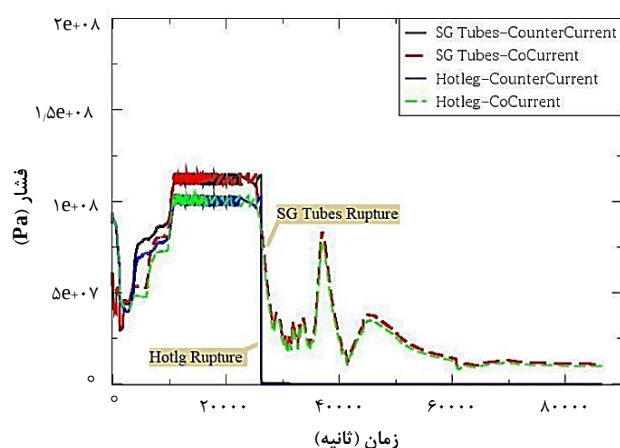
Vol. 44 (2), Serial Number 103, 2023, P 78-86



گرم و لوله‌های مولد بخار اثر می‌گذارد (شکل ۵). علاوه بر درجه حرارت، تنش در اثر اختلاف فشار داخل و بیرون لوله‌ها ایجاد شده برای هر دو حالت پدیده گردش طبیعی سیال در شکل ۶ نشان داده شده است.



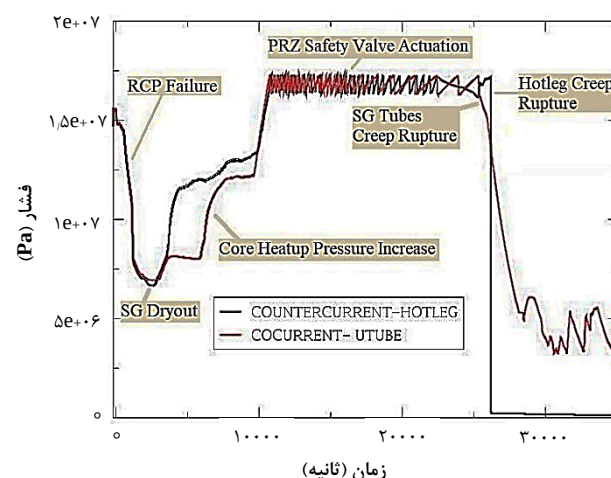
شکل ۵. درجه حرارت سازه‌های حرارتی دو ناحیه خط لوله گرم و لوله‌های مولد بخار.



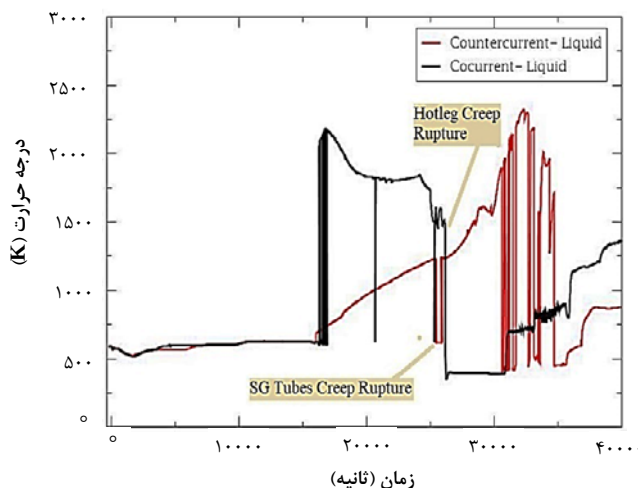
شکل ۶. تنش ناشی از اختلاف فشار در خط لوله گرم و لوله‌های مولد بخار.

مقادیر تابع آسیب مدل لارسون میلر برای لوله‌های مولد بخار، خط لوله گرم سیستم خنک‌کننده رآکتور در شکل ۷ نمایش داده شده است. در حالتی که پدیده گردش طبیعی غیرهمسو رخ می‌دهد این تابع برای خط لوله گرم، زودتر از دیگر بخش‌ها به مقدار ۱ رسیده است. این بدین معنی است که علی‌رغم تنش بیش‌تر در دسته لوله‌های مولد بخار (شکل ۶)، خط لوله گرم زودتر از لوله‌های مولد بخار دچار شکست ناشی از خزش شده است. با توجه به تخلیه فشار از ناحیه شکافت خط لوله گرم و تثبیت فشار و درجه حرارت لوله‌ها، پارامتر تابع آسیب در مقداری ثابت باقی می‌ماند. در صورتی‌که برای حالت گردش طبیعی همسو، لوله‌های مولد بخار سریع‌تر از خط لوله گرم سیستم خنک‌کننده، مقدار عدد ۱ را رد می‌کند. در این حالت،

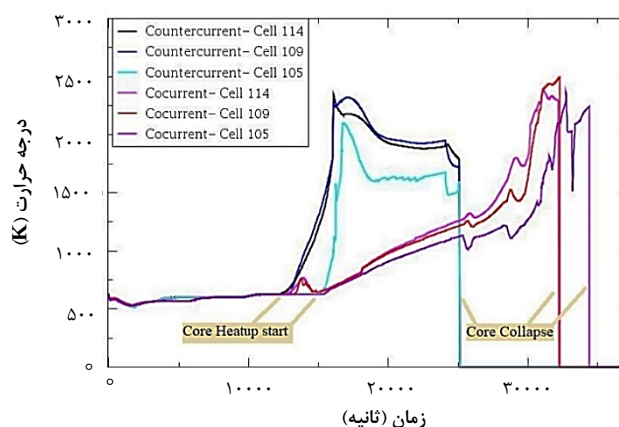
ضخامت غلاف زیرکالوی (رسیدن به ضخامت بحرانی ۰/۰۰۰۱ متر) در طی واکنش فلز-آب است. افت شدید درجه حرارت غلاف سوخت در شکل ۴ به جهت سقوط آن‌ها در اثر کاهش ضخامت غلاف به ضخامت بحرانی کد می‌باشد.



شکل ۲. فشار سیال درون قلب رآکتور در طی حادثه.



شکل ۳. درجه حرارت بخار آب و آب درون حجم کنترل قلب رآکتور.



شکل ۴. درجه حرارت غلاف سوخت در سه سلول در ارتفاع‌های مختلف قلب. تغییرات درجه حرارت بخار آب در سناریوهای مختلف، به‌طور مستقیم بر روی درجه حرارت سازه‌های حرارتی خط لوله

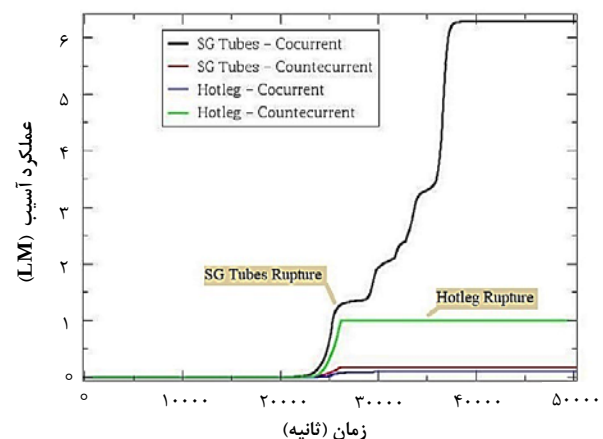


خروجی فایل melgen در جدول ۲ آورده شده که بیان‌کننده مقادیر تولیدی رادیونوکلییدها در حالت پایا^۳ رآکتور می‌باشد. علاوه بر این، جرم ۱۶ کلاس مختلف مواد رادیواکتیو منتشر شده در ناحیه ساختمان محافظه ایمنی (کانتینمنت) و محیط زیست آورده شده است. این مقادیر، مجموع مواد رادیواکتیو هوابرد^۴ از جمله ذرات معلق در هوا (آئروسول)، بخار و مواد رادیواکتیو رسوب کرده و ته‌نشین شده^۵ بر روی سازه‌های حرارتی می‌باشد. جرم گازهای نجیب رادیواکتیو منتشر شده در پدیده گردش طبیعی همسو در محیط‌زیست و محافظه ایمنی رآکتور به ترتیب برابر با ۱۰۱/۸۱ کیلوگرم و ۱۱/۷۲ کیلوگرم می‌باشد، که مطابق شکل ۹ مقدار ۱۰/۸۳ کیلوگرم از جرم مواد رادیواکتیو منتشر شده در محافظه ایمنی رآکتور و تمام جرم منتشر شده در محیط‌زیست، به صورت ذرات آئروسول و بخار می‌باشد. در حادثه با پدیده گردش طبیعی غیرهمسو، هیچ مقداری از مواد رادیواکتیو به خارج از ساختمان محافظه ایمنی راه پیدا نمی‌کند و جرمی در محیط‌زیست منتشر نمی‌شود و تنها مقدار ۱۱۳/۱۳ کیلوگرم (۱۱۱/۷۵ کیلوگرم به صورت ذرات آئروسول و بخار و ۱/۳۸ کیلوگرم به صورت مواد رادیواکتیو ته‌نشین شده و رسوب کرده در داخل محافظه ایمنی رآکتور منتشر شده است. مطابق جدول ۲، جرم فلزات قلیایی و قلیایی خاکی رادیواکتیو منتشر شده در پدیده گردش طبیعی همسو در محیط‌زیست به ترتیب برابر با ۲۲/۷۰۸۱ و ۰/۲۰۷۸ کیلوگرم است. به همین ترتیب میزان جرم رادیواکتیو مواد هالوژن‌ها، کالکوزن‌ها، پلانوییدها، مولیبدن‌ها، سرب‌ها و لاتان‌ها، انتشار یافته به محیط‌زیست در حادثه فوق به ترتیب برابر با ۴/۳۳۰۷، ۶/۵۱۰۶، ۲/۶۳۳۲، ۳/۵۶۹۶، ۵/۷۸۰۵ و ۰/۰۰۳۵ کیلوگرم است. مقدار نشت مواد رادیواکتیو مربوط به کلاس ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به محیط‌زیست که به ترتیب به نام‌های اورانیوم‌ها، کادمیم‌ها و قلع‌ها شناخته شده‌اند برابر با ۰/۸۶۶۸ و ۰/۰۱۲۴ و ۰/۰۶۹۳ کیلوگرم است. نتایج مربوط به نشت مواد رادیواکتیو به صورت ذرات آئروسول و بخار برای کلاس‌های ۲، ۳ و ۴ به ترتیب در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نمایش داده شده است.

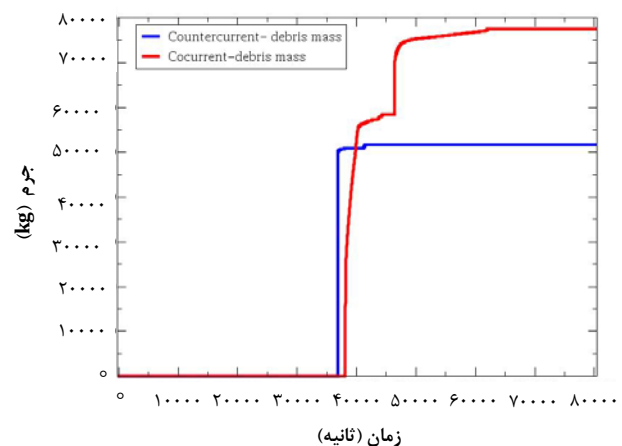
مجموع جرم مواد رادیواکتیو منتشر شده موجود در آب و اتمسفر محیط‌زیست و کانتینمنت نیروگاه (به غیر از مواد ته‌نشین شده بر روی سازه‌ها) در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در طی حادثه قطع کامل برق و رخداد پدیده گردش طبیعی همسو، ۱۳۶/۳۳ کیلوگرم مواد به صورت ذرات معلق (آئروسول) و بخار رادیواکتیو، در محیط‌زیست منتشر شده است. همچنین مقدار ۱۸ کیلوگرم و ۱۴۵/۷۶ کیلوگرم از مواد

عدم افت تنش (ناشی از عدم کاهش فشار) علت اصلی افزایش تابع آسیب به مقدار بیش‌تر از ۱ است.

همان‌طور که ذکر شد، پدیده گردش طبیعی همسو در طی حادثه TMLB، منجر به شکست ناشی از خزش دسته لوله‌های مولد بخار می‌شود. به جهت کوچک بودن سطح مقطع دسته لوله‌های مولد بخار، کاهش فشار قلب رآکتور به کندی رخ می‌دهد و با گذشت زمان و افزایش ذوب و تخریب قلب، پدیده دفع مواد مذاب با فشار بالا (HPMI) رخ می‌دهد. این پدیده منجر به افزایش ناگهانی فشار داخل محافظه ایمنی رآکتور می‌شود. درحالی که در پدیده گردش طبیعی غیرهمسو، به جهت کاهش شدید فشار قلب در اثر شکست خط لوله مولد بخار، دفع مواد مذاب با فشار پایین با گذشت زمان رخ می‌دهد. این پدیده سبب می‌شود بسیاری از مواد مذاب قلب داخل محافظه تحت فشار رآکتور (RPV) حفظ و تجمع پیدا کند. کل جرم آوار^۲ دفع شده در اثر شکست RPV در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۷. پارامتر تابع آسیب لارسون میلر لوله‌های نواحی مختلف RCS.



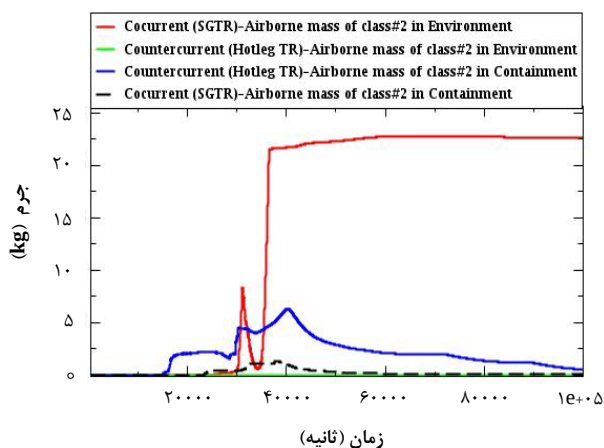
شکل ۸. جرم کل بقایای خارج شده از طریق شکست RPV برای دو پدیده. نتایج حاصل از نشت مواد رادیواکتیو بر این اساس جرم موجودی کلاس‌های مختلف رادیونوکلییدها برای رآکتور از

3. Steady State

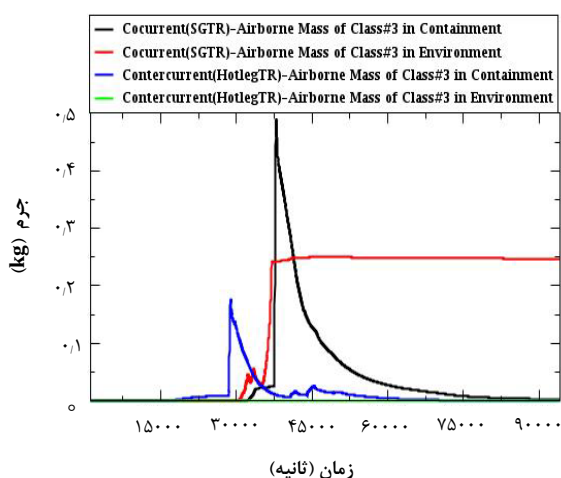
4. Airborne

5. Deposited

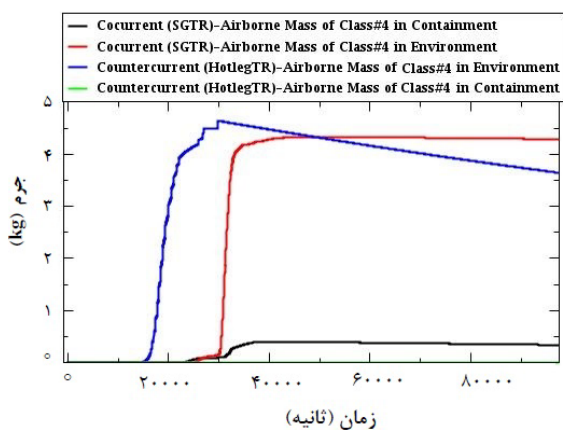




شکل ۱۰. انتشار رادیونوکلیدهای آئروسول و بخار کلاس ۲ (فلزات قلیایی).



شکل ۱۱. انتشار رادیونوکلیدهای آئروسول و بخار کلاس ۳ (فلزات قلیایی خاکی).

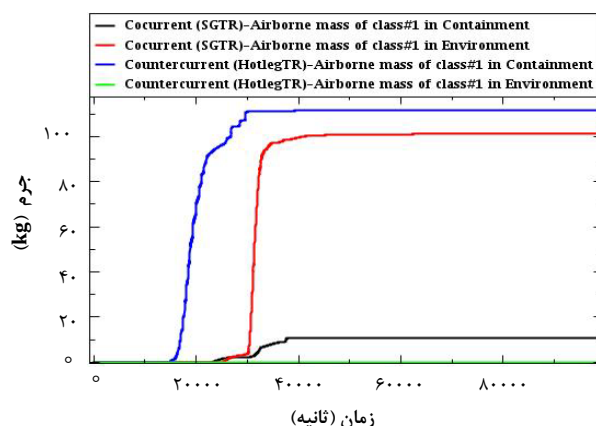


شکل ۱۲. انتشار رادیونوکلیدهای آئروسول و بخار کلاس ۴ (هالوژن‌ها).

رادیواکتیو در کانتینمنت به صورت (آئروسول) و بخار رادیواکتیو، به ترتیب برای پدیده گردش طبیعی همسو و غیرهمسو، منتشر شده است.

جدول ۲. موجودی رادیونوکلیدهای درون قلب در حالت پایا و نشت کرده در محفظه ایمنی رآکتور و محیط زیست در طی حادثه پس از یک روز برحسب کیلوگرم (kg)

کلاس	نام (رادیونوکلید معرف)	کل موجودی رادیونوکلیدهای درون قلب در حالت پایا	نشت مواد رادیواکتیو (kg) در طی حادثه در اثر گردش طبیعی همسو	
			محیط زیست	محفظة ایمنی
۱	گازهای نجیب	۱۱۳,۳۹۹	۱۱,۷۲۴۰	۱۰۱,۸۱
۲	فلزات قلیایی	۶۳,۱۶۷	۲,۷۷۱۱	۲۲,۷۰۸۱
۳	فلزات قلیایی خاکی	۴۹,۷۲۰	۱۷,۸۸۳۶	۰,۲۴۷۳
۴	هالوژن‌ها	۴,۸۸۱	۰,۴۳۵۲	۴,۳۳۰۷
۵	کالکوزن‌ها	۹,۹۴۴	۰,۷۸۵۵	۶,۵۱۰۶
۶	پلانیویدها	۶۹,۹۴۷	۲۴,۲۹۱۲	۰,۰۰۰۰۳
۷	مولیبدن‌ها	۸۲,۴۹۰	۶۶,۴۲۶۴	۳,۵۶۹۶
۸	سریم‌ها	۱۴۵,۵۴۴	۵۰,۸۸۸۴	۰,۰۰۰۰۰۶
۹	لانتان‌ها	۱۳۵,۰۳۵	۴۶,۹۰۳۶	۰,۰۰۰۰۳۵
۱۰	اورانیوم‌ها	۲۸۲,۵۰۰	۱۳۶,۹۹۹۶	۰,۸۶۶۸
۱۱	کادمیم‌ها	۰,۳۳۰۳	۰,۲۳۰۳	۰,۰۱۴۷
۱۲	قلع‌ها	۱,۸۷۵۸	۱,۵۲۶۰	۰,۰۸۰۸
۱۳	بورها	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۴	آب	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۵	بتن	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۱۶	سزیم یدید	۱,۰۰۰E-۶	۰,۰۳۰۱	۰,۰

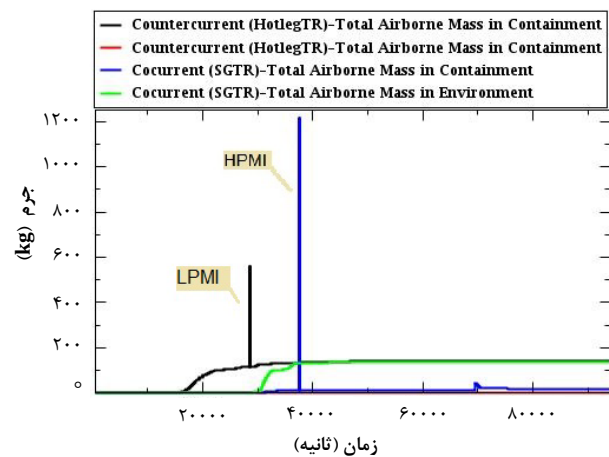


شکل ۹. انتشار رادیونوکلیدهای آئروسول و بخار کلاس ۱ (گازهای نجیب).



کیلوگرم و ۱۵۵ کیلوگرم مواد رادیواکتیو به درون محفظه ایمنی رآکتور تخلیه می‌شود، که مقدار ۱۸ کیلوگرم و ۱۴۵/۷۶ کیلوگرم (مطابق شکل ۱۳) از مواد به صورت آئروسول و بخار رادیواکتیو به ترتیب در طی دو پدیده مذکور، در اتمسفر کانتینمنت منتشر شده است. این مقادیر به عنوان Source Term کانتینمنت شناخته می‌شود.

- بر اساس نتایج سناریوی مربوط به پدیده گردش طبیعی همسو و ایجاد شکست در دسته لوله‌های مولد بخار و همچنین باز بودن شیرهای ایمنی خط لوله اصلی بخار (MSSV)، مقدار ۱۴۰ کیلوگرم از مواد رادیواکتیو به محیط زیست انتشار یافته است که حدود ۱۳۶/۳۳ کیلوگرم به صورت آئروسول و بخار رادیواکتیو است و مابقی به صورت مواد رسوب کرده و ته‌نشین شده بر روی سطوح می‌باشد. لذا با توجه به مقدار مواد آئروسول رادیواکتیو منتشر شده در محیط‌زیست و ایجاد بحران زیست‌محیطی حادثه شکست دسته لوله‌های مولد بخار نیروگاه مذکور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.
- براساس ارزیابی نتایج، حدود ۹۰ درصد از گازهای نجیب موجود در رآکتور به محیط‌زیست منتشر شده است و مقدار مواد گروه مولیبدن آزاد شده در محیط‌زیست ۳/۵۷ کیلوگرم می‌باشد.
- علاوه بر این، مقدار مواد منتشر شده مربوط به رادیونوکلیدهای گروه ید که به جهت جذب در غده تیروئید و ایجاد سرطان اهمیت بالایی دارند برابر با ۴/۳۳ کیلوگرم است (حدود ۸۸ درصد موجودی رآکتور). همچنین مقدار ۳۶ درصد از موجودی مواد رآکتور مربوط به رادیونوکلیدهای گروه سزیم به محیط‌زیست منتشر شده است. این ۲۲/۷ کیلوگرم به جهت نیمه‌عمر بسیار بالا اهمیت زیست‌محیطی ویژه‌ای دارد.
- انتشار مواد رادیواکتیو در محیط‌زیست تهدیدی جدی برای منطقه به حساب می‌آید، لذا می‌بایست علاوه بر طراحی سیستم ایمنی Passive جهت حداقل رساندن اثرات، می‌توان اقداماتی صورت گیرد که از رخداد پدیده گردش طبیعی همسو جلوگیری شود به‌طور مثال جلوگیری از نشت پمپ به جهت حفظ سیال‌مابیع ناحیه Crossover به‌منظور سدی در برابر گردش طبیعی سیال بخار و ایجاد گردش غیرهمسو.



شکل ۱۳. مجموع جرم رادیونوکلیدهای آئروسول و بخار.

۵. نتیجه‌گیری

- در این پژوهش موارد اثرگذار بر محل و میزان انتشار مواد رادیواکتیو در توالی خاصی از حادثه قطع کامل برق موسوم به TMLB بررسی شده است. در واقع در این مقاله، اثرگذاری نوع گردش طبیعی سیال درون RCS منتج از پیشرفت حادثه شدید، بر رفتار و شکست ناشی از خزش دسته لوله‌های مولد بخار رآکتور تحت فشار و خط لوله گرم خنک‌کننده رآکتور و در نتیجه محل و میزان مواد رادیواکتیو بررسی شده است مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:
- ملاحظه گردید که در طی حادثه شدید TMLB، مواد رادیواکتیو از گپ سوخت- غلاف در اثر افزایش دمای شکست غلاف و یا از دست رفتن یکپارچگی غلاف به RCS و همچنین در طی واکنش‌های بتن و مواد مذاب در داخل کوییتی محفظه ایمنی رآکتور منتشر می‌شود.
 - بر اساس توسعه مدل‌سازی با استفاده از مدل لارسون میلر حساسیت محل شکست ناشی از خزش لوله‌های RCS و مولد بخار (SGTR) نشان داد که در نیروگاه مورد پژوهش، در صورت وقوع پدیده گردش طبیعی همسو سیال دسته لوله‌های مولد بخار و وقوع گردش طبیعی غیرهمسو سیال، خط لوله گرم دچار شکست ناشی از خزش می‌شود.
 - حساسیت نحوه‌ی پیشرفت حادثه به نوع پدیده گردش طبیعی نشان داد که در صورت وقوع گردش طبیعی همسو، پدیده HPMT روی می‌دهد و به یک‌باره مواد رادیواکتیو و کوریوم قلب با فشار بالا به داخل محفظه ایمنی رآکتور تخلیه و منتشر می‌شود.
 - نتایج نشان می‌دهد که براساس شکست RPV، برای پدیده گردش طبیعی همسو و غیرهمسو به ترتیب حدود ۱۳۵/۴۷

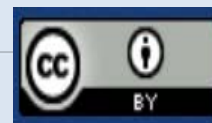


مراجع

1. S.A. Eide, et al., *Reevaluation of Station Blackout Risk at Nuclear Power Plants*, Analysis of Loss of Offsite Power Events:1986-2004, NUREG/CR-6890, (U.S.Nuclear Regulatory Commission, Idaho National Laborator, December 2005), Vol. 1.
2. T. Lind, et al., *A summary of fission-product-transport phenomena during SGTR severe accidents*, *J. Nucl. Eng. Des.*, **363**, 110635 (2020).
3. U.S. NRC, *Risk assessment of severe accident-induced steam generator tube rupture*, NUREG-1570 (U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, 1998).
4. A. Auvinen, et al., *Steam generator tube rupture (SGTR) scenarios*, *J. Nucl. Eng. Des.*, **235**, 457 (2005).
5. Y. Liao, K. Vierow, *MELCOR analysis of steam generator tube creep rupture in station blackout severe accident*, *J. Nucl. Technol.*, **152**(3), 302 (2005).
6. IAEA-TECDOC-1127, *A Simplified Approach to Estimating Reference Source Terms for LWR Designs*, (International Atomic Energy Agency, Vienna, 1999).
7. S. Güntay, et al., *ARTIST: introduction and first results*, *J. Nucl. Eng. Des.*, **231**(1), 109 (2004).
8. A.Z. Farahani, et al., *Sensitivity analysis for thermo-hydraulics model of a Westinghouse type PWR: verification of the simulation results*, *J. Kerntechnik*, **82**(3), 1 (2017).
9. R.O. Gauntt, et al., *State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project, MELCOR Best Modeling Practices*, NUREG-1935, (U.S. Nuclear Regulatory Commission, Sandia National Laboratories, 2005).
10. K. Vierow, et al., *Severe accident analysis of a PWR station blackout with the MELCOR, MAAP4, and SCDAP/RELAP5 codes*, *J. Nucl. Eng. Des.*, **234**, (1-3), 129 (2004).
11. D. Jian, C. Xuewu, *Analysis of hot leg natural circulation under station blackout severe accident*, *J. Nuc. Sci. and Tech.*, **18** (2), 123 (2007).
12. C. Peng, Y. Yang, *The analysis of severe accident induced steam generator tube rupture and LERF risk*, *J. Adv. Mat. Res.*, **614-615**, 626 (2013).
13. U.S. NRC Regulatory Guide, RG1.155: *Station Blackout*, (1988).
14. F. Yousefpour, et al., *Development of a Qualified MELCOR Model for IR-360 NPP Using SNAP Software*, *J. of Nucl Sci. and Tech.*, **37**(4), 42 (2017).
15. F.R. Larson, J. Miller, *Transactions ASME*, **74**, 765 (1952).
16. MASNA Co., SA0042, *Verification and Validation (V&V) of Success Criteria Analysis Codes*, (2010).
17. IAEA-Safety Reports Series, *Approaches and Tools for Severe Accident Analysis for Nuclear Power Plants*, Safety reports series, ISSN 1020-6450; no. 56; International Atomic Energy Agency, Vienna: (2008).
18. M. Lee, J.S. Wu, *Ex-Vessel Releases of Radionuclides During Molten Core/Concrete Interactions in Severe Light Water Reactor Accidents*, *J. Nuc. Sci. and Eng.*, **111**, 82 (1992).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

عارف الدین زرنوشه فراهانی، فرامرز یوسفپور، محمدرضا نعمت‌اللهی، احمد پیروزمند (۱۴۰۲)، آنالیز اثرات انواع گردش طبیعی جریان بر میزان انتشار مواد رادیواکتیو در طی حادثه شدید نیروگاه PWR، ۱۰۳، ۷۸-۸۶

DOI: 10.24200/NST.2021.968.1655

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1512.html

