

۱۶ و ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

طراحی و تحلیل عملکرد مکانیزم شکست اثر سیفونی جهت جلوگیری از وقوع LOCA در راکتورهای نوع استخری

ابراهیم عابدی*، امین داوری، سیدمحمد میروکیلی

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور

چکیده:

یکی از راه‌های جلوگیری از حادثه لخت شدن قلب (LOCA) در اثر شکستن لوله خروجی خنک‌کننده در راکتورهای نوع استخری، استفاده از یک شکننده اثرسیفونی (Siphon Breaker) است. این تمهید، با طراحی لوله خروجی به شکل سیفون به گونه‌ای که ارتفاع لوله در محل خروج از استخر بالاتر از ارتفاع سطح قلب قرار گیرد و تعبیه یک سیفون‌شکن بر روی این لوله، بکار می‌رود. به منظور تحلیل این پدیده و محاسبه ارتفاع بهینه لوله خروجی، قطر سیفون‌شکن و همچنین مقادیر افت ارتفاع آب پس از عملکرد سیفون‌شکن (undershooting height) سیفون‌شکن یک راکتور استخری ۱۰ مگاواتی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی مدل سازی و نتایج ارائه شده است.

کلیدواژه: اثر سیفونی، راکتورهای استخری، دینامیک سیالات محاسباتی، LOCA، Siphon Breaker

۱- مقدمه:

در طراحی راکتورهای تحقیقاتی استخری، طراحی استخر راکتور و اجزای آن یکی از مهم‌ترین بخش‌های طراحی از نقطه نظر ایمنی، می‌باشد. آب درون استخر به عنوان یک چاه گرمایی عمل کرده و با استفاده از پدیده جابجایی طبیعی گرمایی واپاشی پس از خاموشی راکتور را از داخل قلب برداشت می‌نماید. همچنین این آب به عنوان یک حفاظ مناسب برای جلوگیری از تابش‌های رادیو اکتیو قلب در هر شرایطی عمل می‌نماید. [۱] بنابراین، تضمین وجود مقدار حداقلی از آب در داخل استخر و اطراف قلب راکتور یکی از الزامات طراحی می‌باشند. یکی از وخیم‌ترین حوادث در این راکتورها که منجر از دست رفتن آب داخل استخر و لخت شدن قلب راکتور می‌گردد، حادثه شکسته شدن لوله خروجی آب خنک‌کننده در راکتورهای جریان رو به پایین (یا شکسته شدن لوله ورودی آب در راکتورها جریان رو به بالا) است. یکی از طرح‌های موجود برای جلوگیری یا کاهش صدمات این حادثه، قرار دادن سطح خروج لوله خنک‌کننده از استخر در

ارتفاعی بالاتر از سطح قلب است. در این طرح آب با رسیدن ارتفاع لوله خروجی با استفاده از اثر سیفونی از استخر خارج می‌گردد و در صورت وجود یک سیفون‌شکن بر روی لوله خنک‌کننده در محل خروج از استخر می‌توان باعث شکست پدیده سیفونی شد و در نتیجه از خروج بیشتر آب و کاهش ارتفاع آب استخر جلوگیری کرد. سیفون‌شکن‌ها انواع فعال و غیرفعال (Passive) داشته اما از آنجایی که عملکرد مطمئن و ایمن آنها مدنظر است، اغلب نوع غیر فعال آن به کار گرفته می‌شود. [۲]

ساده‌ترین و مطمئن‌ترین سیفون‌شکن‌های غیرفعال شامل ایجاد حفره یا خط لوله بدون شیر (بر روی لوله خنک‌کننده) می‌باشد. از بین این دو طرح، هر یک دارای مزایا و معایبی هستند و عملکردشان در تحقیقات مختلفی بررسی و آزمایش شده است. [۳] حفره طراحی ساده و کم هزینه‌ای دارد، اما دسترسی و تغییرات احتمالی در آن پس از بهره برداری دشوارتر می‌باشد.

نکته مهم دیگر، انتخاب بهینه و هوشمندانه قطر حفره یا لوله سیفون‌شکن است. با توجه به اندازه بزرگ لوله خنک‌کننده قلب و مقادیر بالای دبی گذرنده از آن، انتخاب قطر کوچک بیش از اندازه برای خط سیفون‌شکن باعث تأخیر در شکستن اثر سیفونی و یا حتی عدم شکست آن قبل از رسیدن آب استخر به سطح قلب می‌گردد. از طرف دیگر قطر بزرگ سیفون‌شکن باعث عبور مقادیر زیادی از آب استخر از مسیر سیفون‌شکن شده و بنابراین از مقدار خنک‌کننده عبوری از قلب می‌کاهد. در این مقاله، سیفون‌شکن نوع خط لوله مدل‌سازی و اثر تغییر قطر لوله بررسی شده است. قبل از شروع بحث لازم است تا برخی پارامترهای مهم در این مقاله تعرف شوند:

ارتفاع افت (Undershooting Height): ارتفاع افت به ارتفاعی که آب استخر از لحظه ورود هوا به سیفون‌شکن تا کامل شدن شکست اثر سیفونی و قطع کامل دبی خروجی کاهش می‌یابد، گفته می‌شود.

جریان کنارگذر (Bypass Flow): یک پارامتر مهم دیگر در مکانیزم شکست سیفون مقدار آب عبوری از خط سیفون‌شکن است. این پارامتر از آن جایی اهمیت پیدا می‌کند که بر روی دبی گذرنده از قلب اثر گذاشته و باعث تحت تأثیر قراردادن خنک‌شوندگی قلب می‌گردد و این جریان با قطر خط سیفون‌شکن بطور مستقیم ارتباط داشته و هرچه کمتر باشد مطلوب‌تر است.

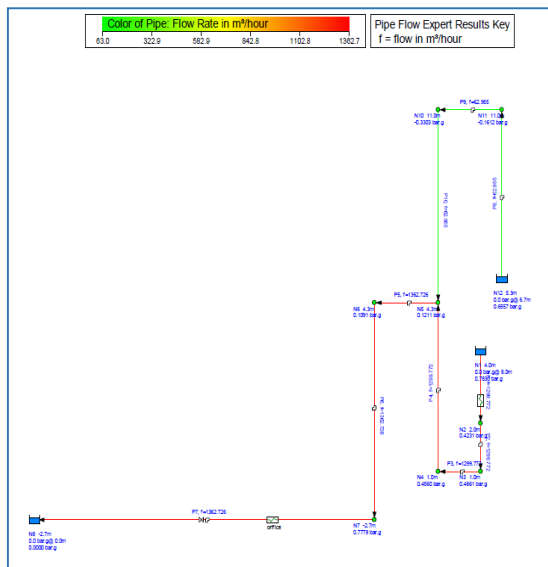
محل شکستگی لوله: شکستگی لوله در حادثه LOCA در موقعیت‌های مختلفی ممکن است رخ بدهد. موقعیت و مقدار شکستگی (نشستی) از پارامترهای تاثیرگذار بر روی ارتفاع افت سیفون‌شکن است. [۴]

۲- روش کار

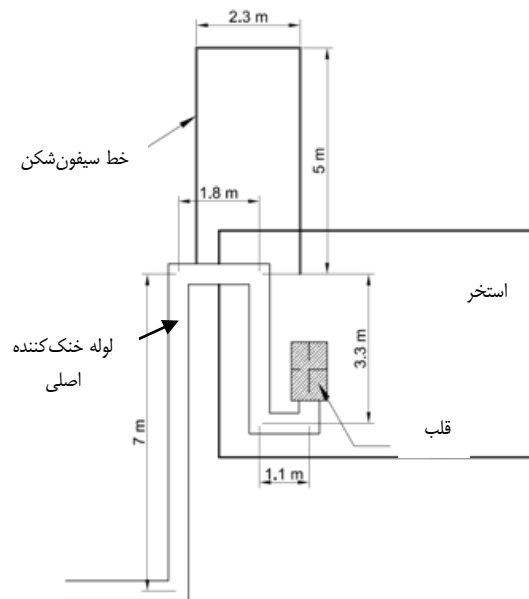
۱۶ و ۱۷ شهریور ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

۱-۲- توصیف شرایط شبیه سازی:

این شبیه سازی برای راکتور ۱۰ مگاواتی استخری با جریان اجباری گرانشی رو پایین به انجام شده است. جهت جریان خنک کننده در قلب رو به پایین و بنابراین سیفون شکن بر روی خط خروجی نصب گردیده است. دبی نامی خنک کننده برابر $1300 \frac{m^3}{h}$ است. قطر لوله خروجی ۱۸ اینچ و از جنس فولاد ضدزنگ می باشد. ابعاد و نحوه پیکربندی لوله خروجی، قلب و لوله سیفون شکن در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۲- خطوط معادل هیدرولیک در نرم افزار PipeFlowExpert



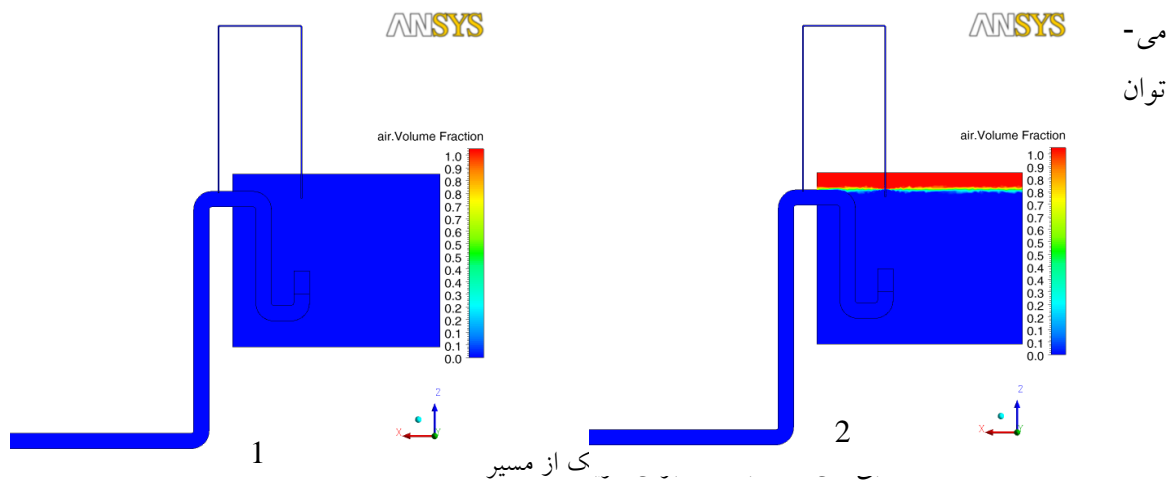
شکل ۱- پیکربندی و ابعاد لوله ها در مدل شبیه سازی شده

جهت به دست آوردن دبی گذرنده از هریک از مسیرها از نرم افزار Pipe Flow Expert 5.0 استفاده شده است. [۵] در شکل ۲ خطوط هیدرولیکی معادل خط لوله خروجی اصلی و خط سیفون شکن را به همراه کلیه المان های افت فشار مسیر را نشان داده شده است. مقادیر افت فشار قلب بصورت یک جدول برحسب دبی های مختلف محاسبه شده است. نتایج بدست آمده از نرم افزار Pipe Flow در جدول ۱ قابل مشاهده هستند.

۲-۲- مدل سازی عددی:

۱۶ و ۱۷ شهریور ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

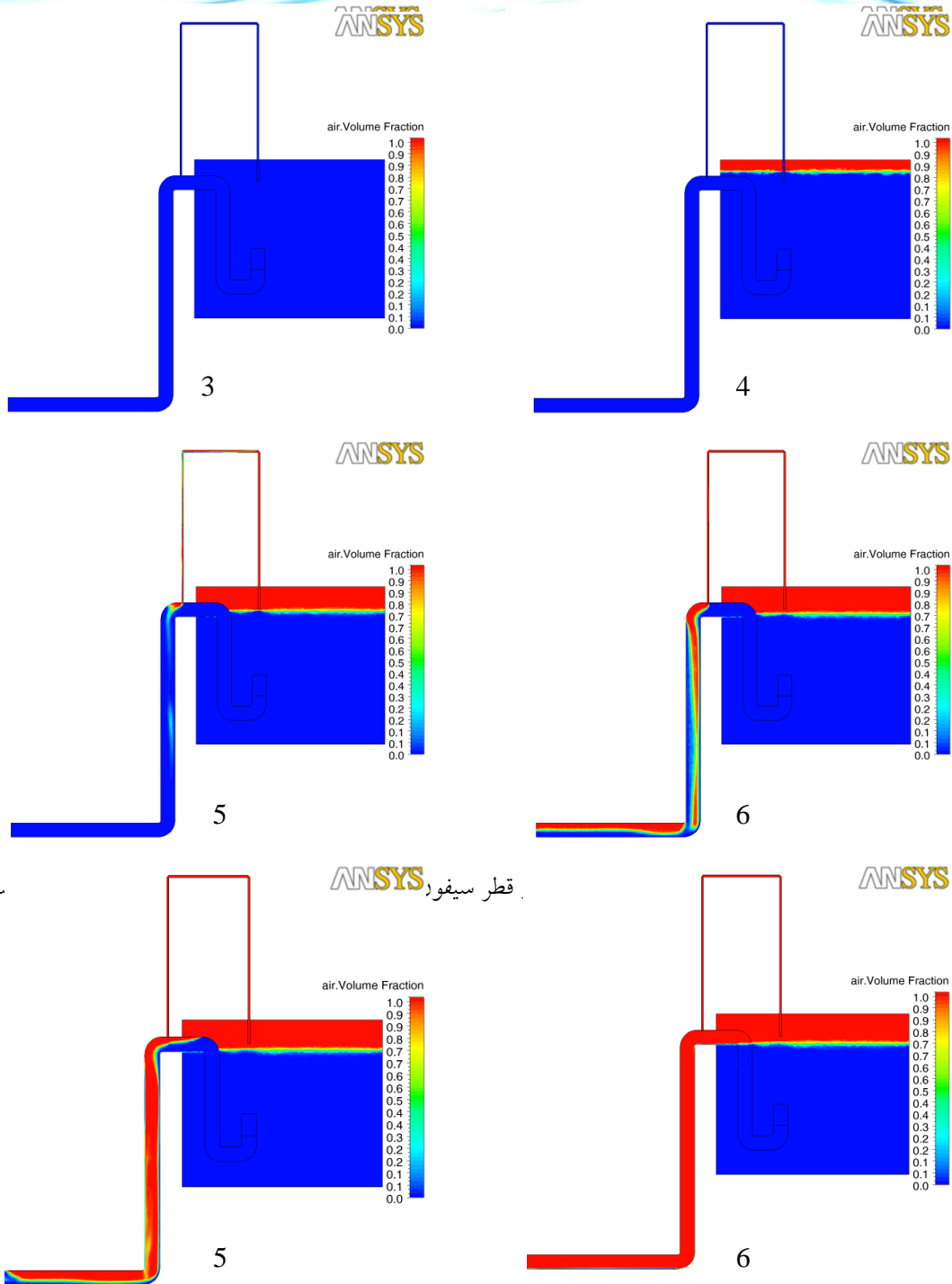
برای انجام شبیه سازی عددی مدل از نرم افزار ANSYS CFD 14.0 [۶] استفاده گردیده است. معادلات ناویر-استوکس برای مدل توربولانس دوفازی مکانیزم سیفون شکن حل گردیده است. نرم افزار ANSYS دارای چند مدل توربولانسی می باشد که در این مدل با توجه به توانایی تشخیص و محاسبه جدایش فازها در مدل Shear Stress Transport (SST)، از این مدل استفاده شده است. در واقع با توجه به تشکیل یک جریان دوفازی از هوا و آب در زمان به وقوع پیوستن پدیده شکست سیفون مدل های رایج مانند K- ϵ برای این محاسبات مناسب نمی باشد. با توجه به وجود دو فاز هوا و آب در دامنه حل از حل دوفازی نرم افزار استفاده شده است. نرم افزار ANSYS CFD برای مدل دوفازی اولیرین-اولیرین خود دارای دو نوع حلگر همگن و ناهمگن است. در حلگر همگن فرض می شود که هر دو فاز در حال حرکت با یک سرعت برابر بوده و تمام متغیرهای میدان حل را به جز کسر حجمی بین دو فاز تقسیم می نماید، بنابراین معادلات انتقال توده را به جای معادلات انتقال هریک از فازها حل می نماید. برای مدل شکست سیفون



کد لوله	نام مسیر	سایز (اینچ)	دبی (m ³ /hr)	سرعت (m/sec)	فرض کرد
P1	لوله خروجی قلب	۱۸	۱۳۰۰	۲/۲۸	هر یک از دو
P5	لوله خروجی استخر	۱۸	۱۳۶۳-۱۳۲۰	۲/۳۹	سیال میدان
P10	خط سیفون شکن	۲/۵-۱/۵	۶۳-۲۰	۴/۷	جریان خود

را تصرف کرده و فازها در ترم های انتقال مرزی بر همکنش دارند. هر یک دو فاز از سرعت های منحصر بفرد خود برخوردارند و این سرعت ها در یک ترم درگ مرزی با هم به تعادل می رسند. برای ترم مرزی از مدل اختلاط که به طور معمول برای مدل کردن

۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد



۱۶ و ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

شکل ۴- مراحل مختلف شکستن اثر سیفون در قطر سیفون شکن ۲/۵ اینچ و افت ارتفاع نهایی برابر با ۲۲ سانتیمتر مسایل چند فازی پیچیده به کار می رود، استفاده شده است. همچنین در این حل برای مدل کردن سطح آزاد استخر از مدل استاندارد سطح آزاد و شرط مرزی نوع باز (Opening Type B.C.) استفاده گردیده است. برای در نظر گرفتن افت فشار قلب از یک مدل متخلخل معادل (Porous Media) آن در مدل استفاده شده است. حل به صورت سه بعدی و گذرا، بوده است. [۶] شکستگی لوله به صورت یک شکستگی کامل و در ارتفاع ورود لوله به مخزن تأخیری یعنی پایین ترین ارتفاع ممکن در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج مدل سازی

شکل ۳ مراحل مختلف و نحوه شکل گیری پدیده شکست سیفون را در چند لحظه به تصویر کشیده است. همانگونه که در شکل مشاهده می شود با ورود هوا به بخش بالایی سیفون فشار منفی ایجاد شده بخاطر اثر سیفونی شکسته شده و دبی آب خروجی کاهش یافته تا سرانجام بطور کامل جریان قطع می گردد. شکل ۴ ارتفاع آب پس از عمل کردن سیفون شکن و قطع شدن کامل جریان خروجی را برای دو سایز لوله خط سیفون شکن با اندازه های ۱/۵ و ۲/۵ اینچ نمایش داده است. افت ارتفاع آب استخر از لحظه ورود هوا به سیفون شکن برای لوله ۱/۵ برابر با ۶۵ سانتیمتر و برای لوله ۲/۵ اینچ ۲۲ سانتیمتر است.

۴- بحث و نتیجه گیری:

نتایج حاصل از مدل سازی پدیده شکست سیفون برای جلوگیری از وقوع حادثه LOCA در یک راکتور استخری نشان می دهد که برای یک لوله ۱۸ اینچی که در ارتفاع ۱۲۰ سانتیمتری بالای سطح قلب از دیواره استخر خارج می شود، افت فشار برای خط سیفون شکن ۲/۵ اینچی ۲۲ سانتیمتر شده است و این لوله میزان دبی کنارگذری برابر با ۶۳ متر مکعب بر ساعت ایجاد می کند. در مقایسه ملاحظه می شود که لوله ۱/۵ اینچی دارای یک افت ارتفاع برابر با ۶۵ سانتیمتری است که هر چند میزان جریان کنارگذر کمتری ایجاد می کند اما با توجه به ارتفاع آب باقی مانده روی سطح قلب که برابر ۵۵ سانتیمتر است. این سایز دارای ریسک ایمنی بالایی بوده و بنابراین می توان سایز ۲/۵ اینچ را سایز مناسب معرفی نمود.

۵- مراجع:

- [1] Kyoungwoo Seo, et al., "Experimental And Numerical Study For A Siphon Breaker Design Of A Research Reactor", Annals Of Nuclear Energy, Vol. 50 PP 94-102, 2012.
- [2] Seo K.W., et al., "Estimation on A Siphon Breaker Type Of A Research Reactor", KNS Sprong Meeting, Taebaek, Korea, 2011.



بیست و دومین کنفرانس هسته‌ای ایران



۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

- [3] Neil D.T., Stephens A.G., “siphon breaker requirements-Final Report”, DOE/ER/12820-T1, 1993.
- [4] Soon Ho Kang, et al., “experimental Study Of Siphon Breaker Phenomenon In The Real-Scaled Research Reactor Pool”, Nuclear Engineering And Design, Vol. 255, PP 28-37, 2013.
- [5] Daxesoft and Oakleigh Software, “pipe flow software”, PipeFlow.co.uk.
- [6] ANSYS, “ANSYS CFD-Solver Manager User’s Guide” Release 14.0, 2012.