

بررسی آزمایشگاهی اثر جت‌های جریان سیال بر پدیده خوردگی شتاب یافته ناشی از

جریان (FAC) در یک اتصال سه راهی در یک نیروگاه اتمی

INC29-1041

علی عرفانی نیا*، محمدرضا نعمت‌اللهی

مرکز تحقیقات ایمنی هسته‌ای، بخش مهندسی هسته‌ای، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، صندوق پستی: ۸۴۳۳۴ - ۷۱۹۴۶، شیراز-ایران.

چکیده:

یکی از موضوعات بسیار مهم در حوزه ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای، پدیده خوردگی در قطعات، تجهیزات و سیستم‌های لوله‌کشی نیروگاه می‌باشد. شرایط هیدرودینامیکی و جریان سیال درون لوله‌ها نرخ خوردگی و زوال آن‌ها را بسیار متأثر می‌سازد. پدیده خوردگی شتاب یافته ناشی از جریان، باعث افزایش نرخ خوردگی و افزایش ضخامت لوله‌ها و محفظه‌ها از سمت داخل و محل عبور جریان، می‌شود. در این پژوهش، با استفاده از تکنیک سرعت سنجی بر مبنای تصویربرداری ذرات، برای اولین بار در ایران، اثر جت‌های جریان سیال بر پدیده خوردگی شتاب یافته ناشی از جریان در یک اتصال سه راهی در یک نیروگاه اتمی با ساخت تست لوپ آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است تا شرایط بهینه برای به حداقل رساندن رخداد پدیده مخرب FAC تعیین گردد.

کلیدواژه‌ها: خوردگی شتاب یافته ناشی از جریان، سه راهی، FAC، تکنیک PIV

Experimental Study of the Flow Jets' Effect on Flow Accelerated Corrosion Phenomenon in a T-joint in a Nuclear Power Plant

A. Erfania*, M. R. Nematollahi

Nuclear Safety Research Center, Department of Nuclear Engineering, School of Mechanical Engineering, Shiraz University, P.O.BOX: 71946-84334, Shiraz, Iran.

Abstract:

One of the very important issues in nuclear power plant's safety is the corrosion phenomenon in components, equipment and piping systems of the plant. Hydrodynamic conditions and fluid flow inside the pipes affect its corrosion and degradation rate dramatically. Flow Accelerated Corrosion (FAC) results in enhanced of the corrosion rate and increases the pipes and vessel's wall thinning from the inner side and where the fluid flows. In this study, by using Particle Image Velocimetry (PIV) and developing an experimental test loop for the first time in Iran, the effects of the flow jets on FAC in a T-joint in a nuclear power plant was investigated in order to determine the optimum flow field's condition to minimize the FAC occurrence.

Keywords: Flow Accelerated corrosion, T-joint, FAC, PIV

۱. مقدمه:

یکی از مقولات مهم در حوزه ایمنی نیروگاه‌ها و خصوصاً نیروگاه‌های هسته‌ای عملکرد ایمن قطعات، تجهیزات و سیستم‌های لوله‌کشی در تمامی قسمت‌های نیروگاه می‌باشد. ارزیابی ایمن قطعات، لوله‌کشی‌ها و سیستم پایداری در ارزیابی عمر قطعات و نیروگاه اثر مستقیم داشته و عملکرد ایمن نیروگاه و قطعات آن را تضمین می‌کند. خرابی قطعات و لوله‌ها و اتصالات در تمامی قسمت‌های یک نیروگاه هسته‌ای اعم از مدار اول و مدار دوم، سیستم انتقال بخار، سیستم کندانسور، تزریق آب تغذیه، پمپ‌ها، شیرها و... علاوه بر آسیب‌های محلی در ناحیه مربوطه، موجب اثرگذاری مستقیم و غیرمستقیم بر مدار اول نیروگاه شده و ممکن است که منجر به یک حادثه گردد.

یکی از پدیده‌هایی که منجر به خرابی قطعات و سیستم‌های لوله‌کشی یک نیروگاه می‌گردد، پدیده خوردگی است. از آنجا که طراحان و مالکان نیروگاه و ناظرین بر نیروگاه‌های هسته‌ای در پی آن هستند که مدت زمان عملکرد ایمن و عمر مفید یک نیروگاه را افزایش دهند، لذا انتخاب مواد مقاوم به خوردگی و همچنین طراحی بهینه قطعات و بهره‌برداری از قطعات و اتصالات برای کارکرد ایمن در عمر ۵۰ الی ۶۰ ساله نیروگاه‌اتمی بسیار مطلوب بوده و تحقیقات زیادی در این زمینه شکل گرفته است [۱ و ۲].

در زوال مواد و سیستم‌های لوله‌کشی نیروگاهی در اثر خوردگی علاوه بر واکنش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی که بیان‌کننده خود پدیده خوردگی است، شرایط هیدرودینامیکی و حرکت سیال موجود در قطعات و لوله‌ها نرخ خوردگی و زوال مواد را بسیار تحت تأثیر قرار می‌دهد به گونه‌ای که ممکن است لوله و یا قطعه‌ای که با در نظر گرفتن شرایط خوردگی شیمیایی موجود برای مدت زمان معلومی طراحی و در سیستم نصب گردیده، در اثر شرایط بد هیدرودینامیکی، جریان سیال و اجرای نادرست سیستم پایداری در طی مدت بسیار کوتاهی دچار زوال شده و متعاقباً ممکن است خسارات جانی و مالی زیادی را به نیروگاه تحمیل نماید. با در نظر گرفتن شرایط هیدرودینامیکی بر خوردگی، پدیده خوردگی شتاب یافته ناشی از جریان (FAC¹) به عنوان پدیده‌ای نوظهور مطرح گردیده است که هم در رژیم تک فازی جریان و هم در رژیم دوفازی جریان رخ می‌دهد. پدیده خوردگی شتاب یافته ناشی از جریان، باعث افزایش نرخ خوردگی شیمیایی و افزایش نرخ کاهش ضخامت لوله‌ها، محفظه‌ها از سمت داخل لوله و محلی که سیال در جریان است، می‌شود و تا زمان پارگی کامل لوله و محفظه مربوطه قابل تشخیص نیست، لذا از روش‌ها و تکنیک‌های ویژه‌ای باید برای تشخیص آن استفاده نمود [۱]. پدیده FAC، در درون تمامی لوله‌ها و قطعاتی که سیال در آن‌ها در جریان است و یا روی سطوحی که جریان سیال بر روی آن‌ها عبور می‌کند ممکن است رخ دهد و منجر به نازک شدن لوله و قطعه از طرفی که سیال در جریان است شوند و نهایتاً باعث پارگی لوله و یا قطعه مزبور می‌گردد. بر اساس گزارش سازمان EDF فرانسه از بین انواع مکانیزم‌های خوردگی که منجر به زوال و خرابی قطعات و اتصالات نیروگاهی می‌گردد، پدیده FAC دارای سهمی حدود ۵۸ درصد است [۳]. از آنجا که نیروگاه‌های متعددی در سراسر کشور در حال کار هستند و هر ساله با موارد مختلف خرابی‌ها در اثر FAC روبه‌رو هستند، این تحقیق می‌تواند شروعی برای بیان پدیده FAC در نیروگاه‌های کشور و پیشبرد برنامه مدیریت FAC در نیروگاه‌ها در نظر گرفته شود.

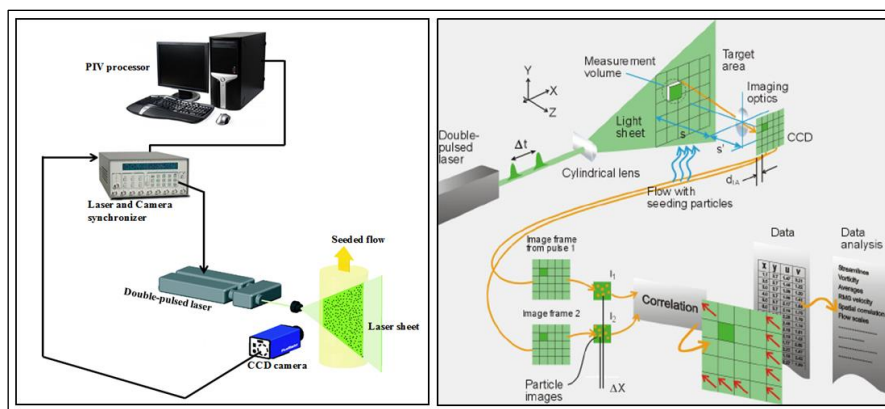
پدیده FAC از سه دسته پارامتر تأثیرمی‌پذیرد که عبارتند از پارامترهای محیطی، پارامترهای موادی و پارامترهای هیدرودینامیکی [۳-۹]. پارامترهای محیطی عبارتند از دما، PH سیال و مقدار اکسیژن موجود در سیال. پارامترهای موادی عبارتند از مقدار عناصری همچون مولیبدن، کروم، مس و... در ساختار و جنس قطعه مورد نظر پارامترهای هیدرودینامیکی عبارتند از سرعت جریان، عدد رینولدز جریان، پیکربندی هندسی قطعه و اتصال مورد نظر، قطرهای لوله‌ها، زبری سطح و در حالت جریان دوفازی، کیفیت بخار و کسر حجمی بخار را نیز شامل می‌شود [۳-۱۰]. با پی بردن به ساختار میدان جریان در اتصالات یک نیروگاه اتمی می‌توان در جهت بهبود طراحی و بهره‌برداری از شرایط جریان و پیکربندی هندسی اتصال مد نظر برای نیل به شرایط مطلوب میدانی به منظور کاهش نرخ رخداد پدیده FAC اقدام نمود.

1 FAC: Flow_ Accelerated Corrosion

۲. روش کار:

در این پروژه با ساخت یک تست لوپ آزمایشگاهی و استفاده از تکنیک سرعت سنجی بر مبنای تصویربرداری ذرات (PIV^1)، به بررسی جت‌های جریان در یک اتصال سه راهی مستقیم (عمود بر هم) (اتصال تی شکل) پرداخته می‌شود. اتصال سه راهی یکی از مکان‌های مستعد رخ دادن پدیده FAC است، و نمونه خرابی آن در سیستم آب کندانس نیروگاه اتمی مشاهده شده‌است. با بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی از قبیل سرعت و تکانه جریان سیال در انشعابات اتصال سه راهی مذکور، در نهایت شرایط بهینه کاری برای جلوگیری از رخداد پدیده FAC و یا کاهش پتانسیل رخداد پدیده FAC تعیین گردیده و پیشنهاد می‌شود.

تکنیک PIV روشی است برای به تصویر کشیدن میدان جریان سیال به صورتی که می‌توان به صورت زمانمند میدان جریان را با تمام جزئیاتش مشاهده نمود. این تکنیک بر اساس عکس‌برداری سریع از جریان سیال بنیان شده‌است. در این تکنیک بعد از ساخت قطعه مورد نظر با مواد شفاف و شیشه‌ای، با افزودن ذراتی در ابعاد میکرومتر و هم چگالی با سیال آب به جریان، در محیطی تاریک و در بستر صفحات لیزری که به صورت جفت پالس در مقطع جریان ایجاد نموده ایم، عکس برداری بسیار سریع توسط دوربین دیجیتال پیشرفته در راستای عمود بر صفحات لیزر انجام می‌گیرد. وجود ذرات با خواص مخصوص باعث می‌گردد در صفحه لیزر این ذرات روشن به نظر برسند و عکس برداری را در محیطی تاریک میسر گرداند. لیزر در یک مدت زمان کوچک (کسری از ثانیه)، دو پالس با فاصله زمان قابل تنظیم dt ثانیه ایجاد می‌نماید. در زمان هر یک از پالس‌ها دوربین یک فریم عکس‌برداری می‌نماید. در فریم‌های عکس‌برداری شده در مدت زمان dt تغییر مکان ذرات نورانی در تصویر به وسیله پردازنده مرکزی سیستم PIV محاسبه می‌گردد و بعد از انجام محاسبات آماری و با توجه به جابه‌جایی‌های ذرات، بردار سرعت ذرات که در سرتاسر میدان جریان سیال پراکنده شده‌اند در زمان محاسبه می‌گردند و بدین ترتیب می‌توان میدان سرعت و جریان سیال را تصویربرداری نمود [۱۱-۱۳]. شکل یک مکانیزم عملکرد سیستم PIV به صورت شماتیک در ذیل ارائه شده‌است.

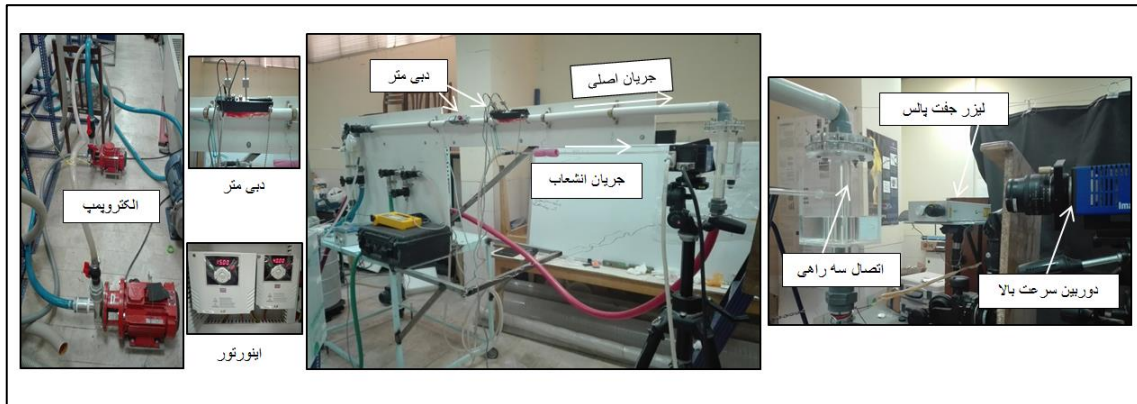


شکل ۱. شماتیک مکانیزم و تجهیزات تکنیک و سیستم PIV

به منظور ساخت تست لوپ آزمایشگاهی، طراحی‌ها و آنالیزهای لازم انجام گرفت. اتصال سه راهی مورد نظر با استفاده از لوله‌های شیشه‌ای در مکعبی از جنس پلکسی گلاس طراحی و ساخته شد تا امکان عکس‌برداری مهیا گردد. اتصال سه راهی از یک لوله با قطر داخلی ۳۰ میلی‌متر که حاوی جریان اصلی در راستای عمودی رو به پایین بوده و یک لوله به قطر داخلی ۸ میلی‌متر که حاوی جریان انشعاب و به صورت عمود بر لوله جریان اصلی متصل شده، ساخته شده‌است. جریان لوله اصلی و لوله انشعاب بوسیله دو عدد الکتروپمپ مجزا تأمین می‌گردد. دور هر یک از پمپ‌ها توسط اینورترهای مجزایی قابل تنظیم بوده و بدین ترتیب دبی‌های مختلفی از جریان اصلی و جریان انشعاب تأمین می‌گردد. سرعت و دبی جریان‌های اصلی و انشعاب نیز بوسیله دبی‌متر الکترومغناطیسی و همچنین دبی سنجی وزنی

¹ PIV: Particle Image Velocimetry

اندازه‌گیری می‌شود. تصاویر تست لوپ آزمایشگاهی همراه با دوربین و لیزر جفت پالس سیستم PIV در شکل ۲ نشان داده شده‌است.

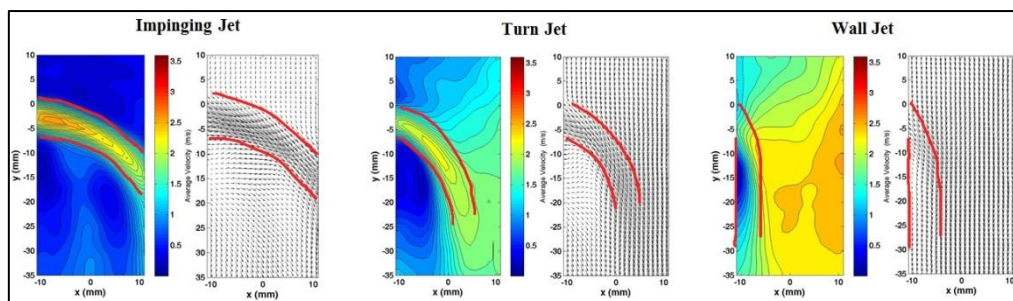


شکل ۲. تصاویر تست لوپ آزمایشگاهی همراه با دوربین و لیزر جفت پالس سیستم PIV

وجود جریان انشعاب در محل اتصال سه راهی باعث ایجاد جت‌های جریانی در آنجا می‌گردد که رفتار این جت‌های جریان می‌تواند تعیین‌کننده خرابی هریک از دیواره‌های لوله جریان اصلی باشد. اعمال تکانه از طرف جت‌های جریان تشکیل شده بر دیواره‌های داخلی لوله جریان اصلی، باعث افزایش ضریب انتقال جرم بر روی دیواره شده و به تبع آن باعث افزایش نرخ پدیده FAC می‌گردد. در این پژوهش، جت‌های جریان تصویربرداری شده و دسته بندی می‌گردند. بر اساس نسبت تکانه و یا نسبت سرعت جریان‌های برخوردی در ناحیه اتصال سه راهی، جت‌های توربولانسی تشکیل شده را می‌توان به سه نوع جت دسته‌بندی نمود: جت دیواره، جت گردشی و جت تماسی [۱۳].

جت دیواره در حالی به وجود می‌آید که سرعت جریان اصلی نسبت به جریان انشعاب بیشتر باشد. در این حالت جت از دیواره لوله اصلی جدا نمی‌شود. نوسانات سرعت تنها نزدیک به دیواره اصلی اتفاق می‌افتد.

جت گردشی زمانی به وجود می‌آید که دو جریان ورودی از تکانه‌های قابل مقایسه‌ای نسبت به یکدیگر برخوردار باشند. در این جت، جریان انشعاب به سمت محور مرکزی لوله اصلی حرکت کرده و هم‌جهت با جریان اصلی می‌گردد. جت تماسی مربوط به شرایطی است که در آن سرعت جریان انشعاب بیشتر از سرعت جریان اصلی باشد و در نتیجه جریان انشعاب می‌تواند با دیواره مقابل لوله اصلی تماس پیدا کند که عملاً می‌تواند مخرب‌ترین نوع جت باشد که سبب می‌گردد نرخ اضمحلال لایه اکسید بر روی دیواره لوله افزایش یافته و ضریب انتقال جرم بیشتر گردد و به تبع آن نرخ FAC افزایش خواهد یافت. در شکل ۳ نمای برداری و کانتور سرعت جریان سه نوع جت تشکیل شده در اتصال سه راهی منتهی از تکنیک PIV نشان داده شده است.



شکل ۳. نمای برداری و کانتور سرعت جریان از سه نوع جت دیواره، گردشی و تماسی در اتصال سه راهی

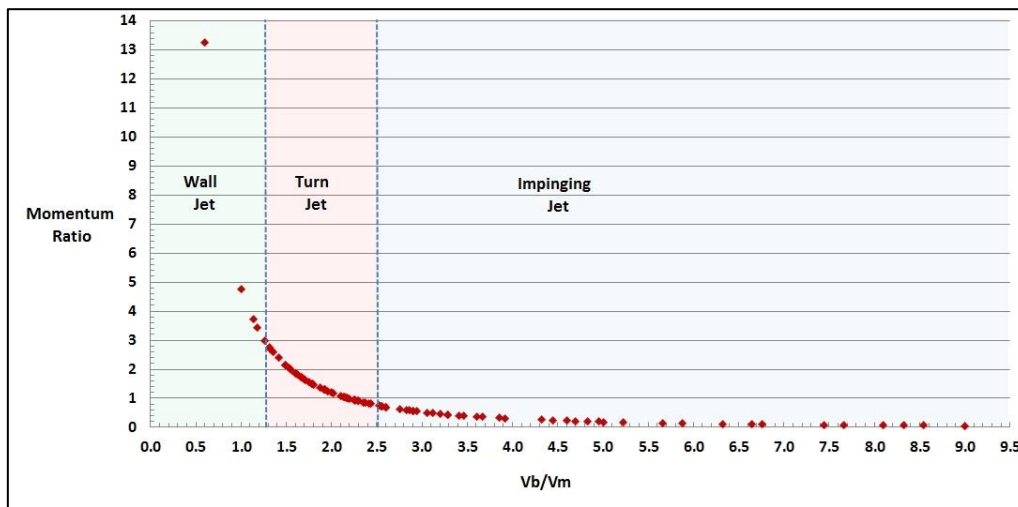
۳. نتایج:

با توجه به نسبت سرعت‌های متوسط و تکانه جریان‌های اصلی و انشعاب می‌توان دسته‌بندی جت‌های جریان را انجام داد. برای این منظور با محاسبه نسبت سرعت متوسط جریان انشعاب به جریان اصلی و همچنین نسبت تکانه^۱ جریان اصلی به جریان انشعاب با استفاده از رابطه (۱) دسته‌بندی جت‌های جریان صورت پذیرفته است.

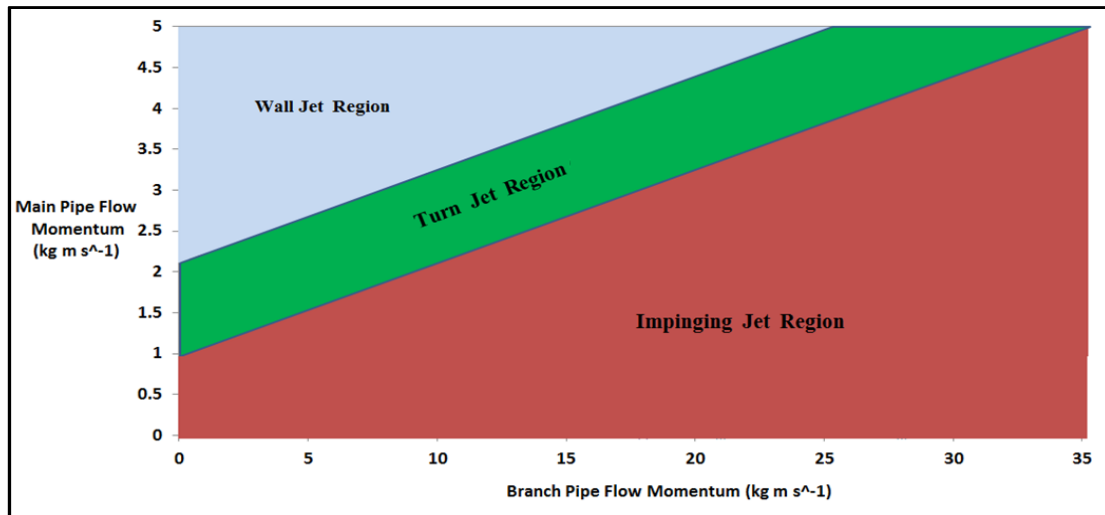
$$MR = \frac{\rho_m V_m^2 \cdot (D_m \times D_b)}{\rho_b V_b^2 \cdot (D_b \div 2)^2} \quad (1)$$

در این رابطه، ρ بیانگر چگالی سیال و V معرف سرعت جریان و D بیانگر قطر لوله می‌باشد و زیرنویس m و b به ترتیب معرف جریان اصلی و جریان انشعاب می‌باشند.

شکل ۴ تقسیم‌بندی جت‌های جریان را با توجه به نسبت سرعت جریان انشعاب به سرعت جریان اصلی و همچنین نسبت تکانه جریان اصلی به جریان انشعاب را نشان می‌دهد. سه ناحیه که معرف سه نوع جت دیواره، گردشی و تماسی هستند بر روی شکل نشان داده شده‌است.



شکل ۴. تقسیم‌بندی جت‌های جریان بر حسب نسبت سرعت جریان انشعاب و جریان اصلی و نسبت تکانه‌های دو جریان

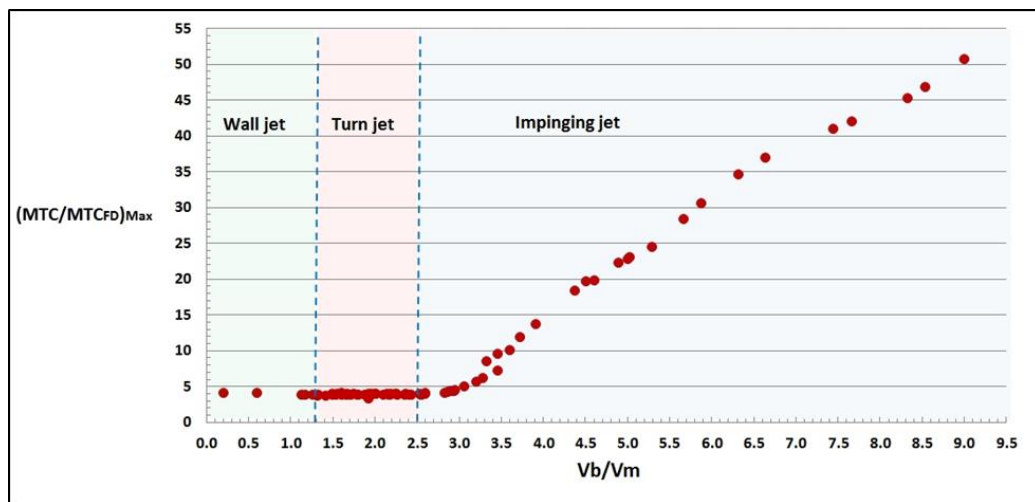


شکل ۵. تقسیم‌بندی جت‌های جریان بر اساس تکانه جریان اصلی و جریان انشعاب در اتصال تی‌شکل

¹ Momentum Ratio (MR)

شکل ۵ نیز تقسیم بندی جت‌های جریان را بر اساس تکانه جریان اصلی و تکانه جریان انشعاب نشان می‌دهد. ناحیه وسط که معرف ناحیه جت گردشی است عملاً ناحیه‌ای است که جت جریان به هیچ یک از دیواره‌های لوله اصلی برخورد نکرده و جت جریان انشعاب در امتداد محور لوله اصلی به پایین دست به پیش می‌رود. با افزایش تکانه جریان انشعاب نسبت به تکانه جریان اصلی، جت تماسی تشکیل شده که عملاً با دیواره لوله اصلی در روبه‌روی لوله انشعاب برخورد می‌نماید و عملاً مخرب‌ترین نوع جت محسوب می‌گردد.

برای اینکه نشان داده شود که جت تماسی مخرب‌ترین نوع جت بوده و اثر بسیار قابل توجهی بر روی نرخ FAC دارد، در شکل ۶، که نتیجه محاسبات عددی و مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد، که تغییرات ضریب انتقال جرم^۱ بی بعد^۲ ماکزیمم، $(MTC/MTC_{FD})_{Max}$ ، را بر حسب نسبت سرعت متوسط جریان انشعاب به جریان اصلی و محدوده شکل‌گیری جت‌های جریان نشان داده‌است. در این شکل نشان داده شده‌است که به محض شکل‌گیری جت تماسی، ضریب انتقال جرم که مستقیماً معرف نرخ FAC بوده بر روی دیواره داخلی لوله جریان اصلی افزایش یافته است.



شکل (۶) تغییرات ضریب انتقال جرم ماکزیمم بی بعد بر حسب نسبت سرعت جریان انشعاب به اصلی

۴. بحث و نتیجه گیری:

در زوال مواد و اتصالات لوله‌کشی سیستم‌های نیروگاه‌های اتمی در اثر خوردگی علاوه بر واکنش‌های شیمیایی و الکتروشیمیایی که بیان‌کننده خود پدیده خوردگی است، شرایط هیدرودینامیکی و حرکت سیال موجود در قطعات و لوله‌ها، نرخ خوردگی و زوال مواد را بسیار تحت تأثیر قرار می‌دهد. با در نظر گرفتن شرایط هیدرودینامیکی بر جریان خوردگی مواد قطعات و پایپینگ، پدیده خوردگی شتاب‌یافته ناشی از جریان مطرح گردیده است. یکی از رویکردهای شناخت و بررسی پدیده خوردگی شتاب‌یافته ناشی از جریان و بررسی اثر پارامترهای هیدرودینامیکی بر آن به تصویر کشیدن و بررسی میدان جریان سیال در قطعه مورد نظری است که مستعد خرابی در اثر پدیده است. در این تحقیق اثر جت‌های جریان بر روی خوردگی شتاب‌یافته ناشی از جریان در یک اتصال سه راهی (تی‌شکل) در یک نیروگاه اتمی با استفاده از تکنیک PIV و به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در اتصال تی‌شکل جت‌های جریان تصویربرداری و دسته‌بندی شد و محدوده جریانی مناسب برای داشتن بهترین نوع جت جریان که منجر به کمترین تماس به دیواره و به تبع آن کمترین نرخ FAC می‌شود ارائه گردید.

۵. مراجع:

1. Feron, D. Nuclear corrosion science and engineering. UK: Wood head publishin, 2012.
2. Flow Accelerated Corrosion in Power Plants – EPRI TR-106611-R1.

¹ MTC: Mass Transfer Coefficient

² FD: Fully Developed

3. Nuclear Energy Agency.(2012). OECD/NEA Piping Failure Data Exchange Project (OECD/NEA OPDE), Final Report, NEA/CSNI/R(2012)16, Issy-les-Moulineaux, France.
4. Uchida, S “Evaluation method for FAC of components by corrosion analysis coupled with flow dynamics analysis,” in Proceedings of the Annual Meeting of the Executive Committee and Working Groups of the International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS '06), Witney,UK,2006.
5. Nuclear Energy Agency. (2009). OECD/NEA Piping Failure Data Exchange Project, 2002-2008 Status Report, NEA/CSNI/R 19, Issy-les-Moulineaux, France.
6. Sladeand, J.P, Gendron,S.T.“FAC and cracking of carbon steel piping in primary water-operating experience at the Point Lepreau Generating station,” in Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-water Reactors,T.R.King,P.J.King,and L.Nelson,Eds.,pp.773–784,2005.
7. Lister, D, H., Uchicia, S. (2010). Reflections on FAC mechanisms. Power Plant Chemistry, 12(10), 590–597.
8. Dooley, R.B. “Flow-accelerated corrosion in fossil and combined-cycle/HRSG plants”, PPChem, 10(2), pp. 68–89,2008.
9. Pavageau,E.M, de Bouvier,O, Trévin,S, Bretelle,J.L, Dejoux,L .“Update of the water chemistry effect on the flow-accelerated corrosion rate of carbon steel: influence of hydrazine, boric acid, ammonia, morpholine and ethanolamine”, 13th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, August 19–23, Westin Whistler, Whistler, British Columbia,Canada,2007.
10. Poulson, Bryan.(2012). Predicting and Preventing Flow Accelerated Corrosion in Nuclear Power Plant. International Journal of Nuclear Energy . 423295, 1-23.
11. Raffel Markus. Particle Image Velocimetry. Berlin: springer,2007.
12. Jahanmiri, M. Particle Image Velocimetry: Fundamental and Its Applications. Sweden :Chalmers university press, 2011.
13. Ali Erfaninia., Mohammadreza Nematollahi. Numerical study of mass transfer coefficient in a T-junction. International Journal of Hydrogen Energy. 2016. 41:7027-7035.