

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۹

بررسی علل گسیختگی در محل اتصال سرلوله‌های فوق‌گرمکن دما بالا در دیگ بخار یک نیروگاه حرارتی با استفاده از روش تجربی و شبیه‌سازی عددی

محمد حسینی^۱، ابوالفضل فتاحی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

mpr.qom@gmail.com

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

afattahi@kashanu.ac.ir

چکیده: بعد از گذشت چند سال از بهره‌برداری سیکل ترکیبی در یکی از نیروگاه‌های حرارتی کشور مشاهده شد که لوله‌های فوق‌گرمکن بخش دما بالای دیگ بخار دچار آسیب و گسیختگی از محل اتصال به سرلوله‌های فوقانی شده است. بر اساس بررسی‌ها مشخص شد این پدیده برای چندین لوله در یک زمان و به صورت ناگهانی اتفاق افتاده که موجب خسارت سنگین به تجهیزات ابزار دقیق دیگ بخار و آسیب به سازه‌های داخلی در زمان حادثه شده است. بررسی آزمایشگاهی لوله‌های آسیب‌دیده با آزمون‌های مختلفی همچون آنالیز سوخت ورودی به محفظه احتراق، سختی‌سنجی لوله‌های سالم و گسیخته‌شده، ساختارشناسی از محل گسیختگی و آنالیز ترکیب رسوب داخل لوله فوق‌گرمکن صورت گرفت. نتایج نشان داد که افزایش دمای فلز در محل اتصال و تنش‌های ثابت اعمال‌شده به مدت طولانی عامل تخریب آن هستند. برخورد مستقیم گاز ورودی به دیگ بخار به لوله‌های فوق‌گرمکن دما بالا و همچنین تنش‌های ناشی از انبساط طولی لوله‌های مذکور باعث آسیب‌دیدگی و متعاقباً خروج اضطراری واحد از چرخه تولید توان شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، مواردی از قبیل استفاده از سیستم دوده‌روب، بهبود کیفیت سوخت مورد استفاده، اصلاح سیستم احتراقی برای استفاده از سوخت‌های خارج طراحی و تنظیم‌پذیر کردن مشعل‌ها برای جلوگیری از نقص‌های ایجادشده پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: دیگ بخار، فوق‌گرمکن دما بالا، انبساط طولی لوله، تنش حرارتی، گسیختگی مکانیکی.

۱. مقدمه

نیز وابسته‌اند. لیاو و همکاران [۳] طی تحقیقی نشان دادند که بررسی و پیش‌بینی در خصوص پدیده ترک‌های خزشی بدون توجه به عامل خزش اولیه منجر به خطا در تخمین عمر باقی‌مانده لوله‌های فوق‌گرمکن خواهد شد. چن و همکاران [۴] در خصوص تأثیر تنش‌های باقی‌مانده در محل اتصال در رشد ترک‌های خزشی در نمونه‌هایی از فولاد کرم-مولیبدن‌دار که تحت تنش‌های فشاری قبل و بعد از عملیات حرارتی بودند، بررسی مفصلی انجام دادند. آن‌ها دریافتند که عملیات حرارتی در ساخت لوله‌های فوق‌گرمکن و به تبع آن در فلز جوش محل اتصال آن به سرلوله، ایجاد حالت موج‌دار در مرز دانه‌های فولاد می‌کند. آن‌ها با استفاده از یک مدل سه‌بعدی المان محدود نحوه آسیب و رشد ترک‌های خزشی و تأثیر عامل تنش‌های باقی‌مانده در دوره زمانی خزش را مطالعه کردند. در انتها یک همبستگی بسیار مهم بین خواص مرزدانه‌های فولاد و رفتار خزشی در لوله ارائه شد.

چو و همکاران [۵] نشان دادند که انتقال حرارتی تشعشعی بر فوق‌گرمکن‌های موجود در نیروگاه‌ها باید به‌عنوان یک عامل خطر مدنظر قرار گیرد. پژوهش آن‌ها به بررسی رفتار چرخه‌ای خزشی پلاستیک در لوله‌های فوق‌گرمکن تحت بارگذاری پیچیده‌ای از نوع حرارتی-سازه‌ای پرداخته است و سپس با ارزیابی مقاومت لوله در برابر خستگی خزشی ادامه پیدا کرده است. در این مطالعه از وابستگی خواص مواد به دما در پیش‌بینی عمر لوله‌ها استفاده شده است. نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان‌دهنده تأثیر بحرانی توزیع حرارت نامتعادل بر روی ساختار سازنده مواد لوله‌های فوق‌گرمکن است. این مطالعه عوامل بحرانی را که باعث آسیب به لوله‌های فوق‌گرمکن در حالت‌های مختلف می‌شوند، بررسی و ارزیابی خسارت کرده است. نیز مقایسه‌ای بین نتایج برآورد شده از مدل‌های بررسی شده و نتایج اندازه‌گیری‌های تجربی انجام شده است.

کیم و سایر همکاران [۶] طی پژوهشی، تأثیر قرارگیری طولانی مدت لوله‌های فولادی با ساختار فریت-پرلیت در معرض دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس را بر روی تغییرات سختی بررسی کردند. آن‌ها همچنین آزمایش گسیختگی فولاد مذکور را در این دما انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار سختی با افزایش زمان قرار گرفتن در دمای مذکور کاهش می‌یابد و دلیل آن تغییر ساختار از فاز سمیتیت به حالت کروی است. آن‌ها در نهایت به این نتیجه مهم دست یافتند که علت اصلی کاهش شدید مقاومت در برابر خزش، انحلال سریع فاز سمیتیت تحت تنش و کرنش‌های خزشی می‌باشد. کهرم و همکاران [۷] طی پژوهشی بر روی لوله‌های

تخریب لوله‌های فوق‌گرمکن‌ها از عوامل مهم توقف‌های اجباری نیروگاه‌های حرارتی است؛ از این رو بررسی دلایل تخریب لوله‌های مذکور و ارائه تصویری روشن از منشأ این موضوع برای جلوگیری از حوادث بعدی و ارائه روش‌های تعمیراتی مناسب، از اهمیت زیادی برخوردار است. لوله‌های فوق‌گرمکن به دلیل شرایط کارکردی، تحت مکانیزم‌های استهلاکی مختلفی نظیر خزش، گسیختگی تنش، خوردگی، سایش و خستگی قرار دارند. در این خصوص ساکسنا و همکاران [۱] بر روی رفتار رشد ترک‌های خزشی در قطعات داغ نیروگاه‌های بخار و لوله‌های فولادی حاوی بخار فوق‌گرم تحقیق کردند. آن‌ها تأثیر تخریب حاصل از سیال در حال جریان را که مخلوطی از بخار و سایر ناخالصی‌ها بود، بر داخل لوله‌های فولادی کروم-مولیبدن-وانادیوم بررسی کردند. همچنین آن‌ها عوامل مؤثر بر جوشکاری نظیر میزان ناخالصی‌ها و عملیات حرارتی بعد از آن را بر روی رفتار رشد ترک‌های خزشی در محل اتصال لوله‌ها آزمایش کردند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که ناخالصی‌های موجود در فولاد لوله‌های فوق‌گرمکن و نیز دمای بالای این لوله‌ها می‌تواند به‌عنوان عوامل مهم رشد ترک شناخته شود. در نهایت یک همبستگی بین نرخ رشد ترک و عوامل مؤثر ارائه شد.

فاتورینی و فرانزونی [۲] به‌طور خاص در مورد تأثیر ناخالصی‌ها بر روی رشد ترک‌های خزشی در فولادهای زنگ‌نزن آهن-کروم نظیر 1Cr1Mo0.25V که از جمله فولادهای پرکاربرد در ساخت لوله‌های فوق‌گرمکن‌ها هستند، تحقیق کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد عمده ترک‌های خزشی که در نهایت منجر به گسیختگی لوله‌ها از محل اتصال به سرلوله می‌شوند در فولادهایی رخ می‌دهند که مقادیر کمی از فسفر (در حدود ppm ۴۰) و نیز سرب و قلع (حدود ppm ۲۰۰-۱۰۰) در ساختار شیمیایی خود دارند. آن‌ها نشان دادند کاهش تدریجی در این فولادها که عمدتاً تحت تأثیر عواملی مثل حرارت بالا و تنش‌های اعمالی طولانی‌مدت هستند، تنها از راه کاهش قابل توجه مقادیر عناصر قلع و سرب حتی در حضور مقادیر متوسط تا بالای فسفر (۱۰۰ ppm) قابل حصول است. نتایج این کار نشان داد که گسیختگی و حداقل سرعت رشد ترک‌های خزشی تنها به عوامل ساختار شیمیایی بستگی ندارد، بلکه به طیف تنش‌های وارد به لوله‌های فوق‌گرمکن

1. Stainless Steel
2. Brittleness

فوق گرمکن نیروگاه توس و با استفاده از نرم افزارهای شبیه ساز، دامنه حرکتی ناشی از انبساط و انقباض سرلوله در جهات مختلف را بررسی کردند. نتیجه این شبیه سازی ها نشان داد که سرلوله در جهت انبساط لوله های متصل به آن نمی تواند به صورت مناسب منبسط شود و این عدم انبساط باعث تمرکز تنش بیش از حد به محل جوش لوله های متصل به سرلوله می شود. با اندازه گیری انبساط محلی سرلوله در جهات مختلف نتیجه فوق تأیید شد. بررسی های آنان نشان داد که پایین آمدن دو انتهای سرلوله به علت نقص طراحی باعث افزایش سطح تنش در محل جوش لوله های متصل به سرلوله می شود؛ از این رو تأثیر این دو عامل به صورت همزمان باعث افزایش تنش و شکست زود هنگام جوش لوله ها که با خم خاصی به دو سر سرلوله متصل شده اند می شود.

شیرینی و سلطانیلو [۸] پژوهشی بر روی لوله فوق گرمکن واحد آمونیاک نیروگاه بندرعباس انجام دادند. دیگ بخار واحد آمونیاک مورد نظر شامل فوق گرمکن های سرد و گرم بود. با توجه به تخریب ایجاد شده بر روی زانویی فوق گرمکن، بررسی های مختلف میکروسکوپی بر روی قسمت تخریب شده و آنالیز رسوبات ایجاد شده بر روی سطح داخلی لوله فوق گرمکن صورت پذیرفت. بر اساس نتایج، تغییر ساختار فولاد در این ناحیه بر اثر فعل و انفعالات شیمیایی با مواد حاصل از رسوب روی لوله های فوق گرمکن، مکانیزم و علت ریشه ای آسیب معرفی شد. ترشیزی و وزیرپناه [۹] طی پژوهشی که بر روی لوله های فوق گرمکن نیروگاه بیستون انجام دادند، با استفاده از آزمایش های سختی سنجی و ساختارشناسی نشان دادند که افزایش بیش از حد مجاز دمای بهره برداری حتی به مقدار بسیار کم تأثیر زیادی در کاهش عمر لوله ها دارد؛ به طوری که برخی از لوله های در نتیجه افزایش غیرمجاز دمای بهره برداری، پس از ۳ سال تخریب شده اند. عقبایی و احمدی [۱۰] لوله های فوق گرمکن یک نیروگاه ۳۲۰ مگاواتی را بررسی کردند و دریافتند عامل اصلی شکست و گسیختگی لوله های فوق گرمکن و از کارافتادگی آن ها پدیده های خزش، خستگی و خوردگی هستند. آگاهی از وقوع و گسترش عیوب ایجاد شده در آن ها و تعویض بموقع مناطق صدمه دیده می تواند در پیشگیری از توقف های ناگهانی و خسارات وارده جلوگیری نماید.

مهدی زاده و میرابوالقاسمی [۱۱] طی پژوهشی دلایل تخریب لوله های فوق گرمکن یک دیگ بخار صنعتی را بررسی کردند. بدین منظور آزمایش های ساختارشناسی، سختی سنجی، بررسی های ابعادی و آنالیز رسوبات با روش XRF انجام شد. نتایج بررسی ها و

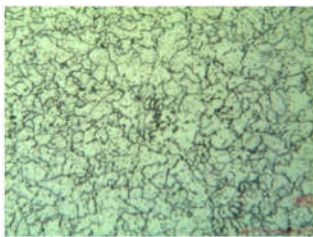
آزمایش ها نشان دادند که سختی فلز به شدت کاهش یافته است، ساختار فولاد کاملاً تغییر یافته و از حالت فریتی و پرلیتی اولیه به حالت فریتی-کاربیدی تبدیل شده است، در سطوح داخلی و خارجی لوله لایه اکسیدی ضخیمی تشکیل شده و در ناحیه خم لوله ها کاهش قابل توجهی در ضخامت رخ داده است. نتایج فوق نشان می دهند افزایش دمای فلز و خزش دلایل تخریب لوله ها بودند. فیروزه و همکاران [۱۲] طی پژوهشی نسبت به ارزیابی علل تخریب لوله های دیگ بخار از جنس فولاد کم آلیاژ کروم مولیبدن مطالعه ای را انجام دادند. لوله ها تحمل دمای حداکثر حدود ۵۰۰ درجه سلسیوس را داشتند. با این حال این دما تابع فشار بود. در داخل این لوله ها بخار فوق اشباع با دمای ۲۳۰ درجه سلسیوس و فشار ۶۱۰ پاسکال در جریان بوده و لوله ها از بیرون تحت تأثیر دمای گازهای سوخته قرار داشتند. بررسی های اولیه نشان داد یک لایه ضخیم رسوبات با ضخامت متغیر در داخل این لوله ها تشکیل شده و تخریب لوله به صورت کندگی و پاره شدن ظاهر گردیده است. بررسی های میکروسکوپی و ریزساختاری، آنالیز شیمیایی و فازشناسی از لوله و رسوبات داخل به عمل آمد. نتایج نشان داد که در اثر تشکیل رسوبات ناشی از واکنش بخار آب و آهن، توزیع دمای داخل لوله از حالت عادی خارج و به صورت موضعی افزایش یافته است. این امر موجب بروز پدیده های دیگری مثل کاهش سختی، نرم شدن فولاد و نفوذ هیدروژن به داخل مرز دانه ها شده است.

عطار روشن و ریخته گر [۱۳] پژوهشی بر روی لوله های فوق گرمکن ثانویه دیگ بخار شرکت کشت و صنعت حکیم در مورد یافتن علل خرابی لوله ها که از دلایل اصلی توقف دیگ بخار در طرح های توسعه نیشکر است، انجام دادند. اکثر این خرابی ها در محل خم لوله فوق گرمکن اتفاق می افتاد. آن ها طی این تحقیق به این نتیجه رسیدند که علاوه بر عوامل حرارتی، نقص در طراحی این قسمت بر سرعت و شدت گسیختگی می افزاید. باجقلی و خلیلی [۱۴] طی پژوهشی علل گسیختگی لوله های حامی دیگ بخار یک واحد نیروگاهی را بررسی کردند. بررسی ها نشان داد که تخریب با توجه به شکل ظاهری، افزایش مقدار دما، افزایش سختی در محل تخریب، تغییرات ریزساختاری و بیش دمای کوتاه مدت است. قطع یا کاهش جریان سیال، پایین بودن سطح آب درام و نیز تنظیم نبودن مشعل ها عوامل مؤثر بر ایجاد این نوع تخریب اند. یونگ و همکاران [۱۵] با هدف بررسی مکانیزم خوردگی و در نهایت گسیختگی در

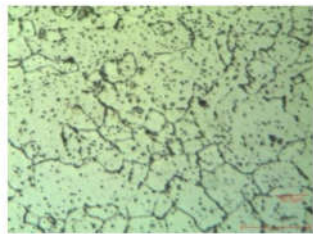
۲. بررسی‌های آزمایشگاهی

۱.۲. ساختارشناسی قطعه گسیخته شده

جنس لوله‌های فوق‌گرمکن دما بالای دیگ بخار مورد مطالعه ASME SA-213-T22 و جنس سرلوله، سایر لوله‌ها و نیز اتصالات ASME SA-210 Grade A-1 است که از فولادهای متداول در ساخت فوق‌گرمکن‌ها هستند. دما و فشار بخار خروجی از دیگ بخار در سرلوله بالایی به ترتیب ۴۸۰ درجه سلسیوس و ۸۳ بار و دما و فشار بخار موجود در لوله‌های عمودی فوق‌گرمکن به علت تماس مستقیم با جریان گاز داغ ورودی به دیگ بخار برابر ۴۹۰ درجه سلسیوس و ۸۵ بار است. برای تعیین علت گسیختگی، سختی یک برش از لوله فوق‌گرمکن جداشده از سرلوله مستعمل با سختی لوله سالم مقایسه و مشخص شد سختی لوله در محل گسیختگی (۷۶ برینل) کمتر از سختی لوله سالم (۸۴ برینل) است. شایان ذکر است اندازه‌گیری‌ها با دستگاه سختی‌سنج پرتابل KOOPA D06 انجام شده است. رابطه تجربی بین استحکام نهایی (TS) و سختی لوله (HB) به صورت $TS(Mpa) = 3.45 \times HB$ American (مطابق استاندارد API 5L, Petroleum institute) و بر این اساس مشخص است استحکام نهایی لوله فوق‌گرمکن در محل گسیختگی کمتر شده و سختی لوله در این محل از حداقل لازم برخوردار نیست. نتایج آزمایش ساختارشناسی^۱ فلز لوله گسیخته شده در شکل (۲) به صورت تصاویر ریزساختار نشان داده شده است.



(الف)

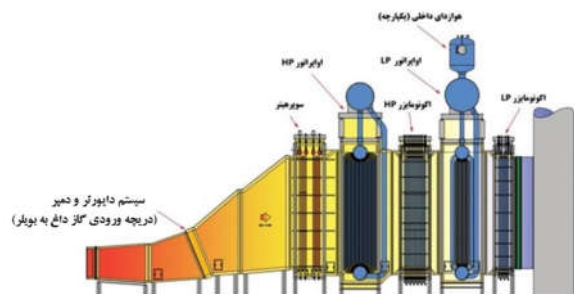


(ب)

شکل (۲): تصاویر ریزساختار از لوله فوق‌گرمکن (الف) قبل و (ب) بعد از گسیختگی

لوله‌های فوق‌گرمکن نسبت به بررسی لوله در محل گسیختگی به کمک میکروسکوپ اقدام نمودند. طی این بررسی مشخص شد سولفات سدیم عامل اصلی خوردگی است و همچنین با بررسی لایه‌های مختلف رسوبات تشکیل شده در داخل لوله‌های فوق‌گرمکن مشخص شد که لایه اکسید آهن نسبت به بقیه رسوبات سست‌تر و متخلخل‌تر بوده و باعث نفوذ و انتقال بهتر اکسیژن جهت خوردگی خواهد شد. آن‌ها برای کاهش خوردگی و به تبع آن جلوگیری از گسیختگی حاصل از آن، استفاده از پوشش‌های آلومینیومی و پوشش‌های پایه زغال‌سنگ برای بخش خارجی لوله‌های فولادی فوق‌گرمکن را پیشنهاد داده‌اند.

با توجه به مرور بالا هریک از مکانیزم‌های آسیب‌زای بیان شده به تدریج باعث زوال و در نهایت گسیختگی لوله‌ها و اتصالات می‌شوند. با بررسی متغیرهای طراحی، سوابق بهره‌برداری، انجام آزمایش‌هایی نظیر آنالیز جریان گاز ورودی به دیگ بخار، سختی‌سنجی و نیز شبیه‌سازی عددی می‌توان به دلایل تخریب لوله‌ها پی برد. با مشخص شدن دلایل تخریب می‌توان علاوه بر جلوگیری از آسیب‌های بعدی، روش‌های تعمیراتی و علاج‌بخشی مناسب‌تری را به کار گرفت. در تحقیق حاضر یک مورد واقعی از گسیختگی ناگهانی دیگ بخار ناشی از پیشرفت ترک در یکی از نیروگاه‌های کشور مورد تحلیل قرار گرفته است. طرح‌واره بخش حرارتی بخار نیروگاه مورد بررسی در شکل (۱) نشان داده شده است. دیگ بخار مورد بررسی بر اساس مدارک شرکت سازنده برای حالت سوخت گاز طبیعی طراحی شده است؛ اما به دلیل ملاحظات تأمین گاز بخش شهری در نیمه دوم سال از سوخت گازوئیل تغذیه می‌کند. این پژوهش قصد دارد به بررسی عوامل و ارائه راهکارها در جلوگیری از این نقص بپردازد. نتایج حاصل می‌تواند راهنمای سایر پژوهشگران بخش نیروگاهی کشور در اجرای اقدامات پیشگیرانه باشد.



شکل (۱): طرح‌واره دیگ بخار و فوق‌گرمکن مورد مطالعه نیروگاه

۳.۲. آنالیز رسوب داخل لوله فوق‌گرمکن دما بالا

رسوبات جمع‌آوری شده از داخل لوله فوق‌گرمکن بریده‌شده مورد آنالیز XRD قرار گرفت. این دستگاه قابلیت بالایی در آنالیز ترکیبی نمونه‌های سفال، ملات، محصولات خوردگی، رنگدانه‌ها، آجر، گچ، سرباره و... دارد. برای آنالیز، هر نمونه ابتدا به صورت پودر درآمده و در معرض بمباران پرتوهای اشعه ایکس با طول موج ۱-۰/۱ آنگستروم قرار می‌گیرد تا یک الگوی پراش منحصربه‌فرد برای هر نمونه در دستگاه به دست آید. در بررسی حاضر از این آنالیز برای تعیین کامل ترکیب شیمیایی رسوبات موجود استفاده شده است. خروجی این آنالیز نشان می‌دهد به ترتیب اتم‌های سدیم، کربن، آهن، کلسیم، گوگرد، منیزیم و سیلیسیم بیشترین درصد ترکیب را نشان می‌دهند (جدول ۱ را ببینید). این در حالی است که این نیروگاه به واحد فرایندی اصلاح شیمیایی ترکیب آب سیکل کاری مجهز می‌باشد و با تزریق مواد افزودنی غلظت کلر و سایر یون‌های خورنده موجود در آب را می‌تواند کاهش دهد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت مقدار نسبتاً بالای این ترکیبات در آنالیز ناشی از تجمع رسوب در گذر سال‌های بهره‌برداری از دیگ بخار یا خروج تجهیزات نمونه‌گیری واحد کنترل شیمیایی آب سیکل بخار نیروگاه از حالت کالیبره است. وجود عناصر مذکور و درصد‌های آن نشان می‌دهد که کیفیت آب اسپری مورد استفاده جهت کاهش دمای بخار فوق‌گرم‌شده در مواقع لازم نیز در محدوده مجاز قرار ندارد. نتایج آنالیز نشان می‌دهد که ترکیب کلرید سدیم در رسوب بیش از ۳۷٪ است؛ این در حالی است که محدوده مجاز این ماده در رسوبات نیروگاه حرارتی (یا محلول آبی کاری سیکل) باید کمتر از ۱۸٪ باشد [۱۶]. وجود رسوبات در لوله‌های فوق‌گرمکن منجر به تشکیل لایه‌های اکسیدی و یا رسوب در سطوح داخلی شده که این عامل به دلیل ایجاد مانع جهت انتقال حرارت به بخار می‌تواند باعث افزایش دمای فلز لوله و در نهایت تخریب آن گردد.

جدول (۱): درصد جرمی مواد آنالیزشده از رسوب		
درصد جرمی	ماده موجود در رسوب	اتم یافت‌شده طی آنالیز
۳۷/۳۴	NaCl	Na
۵/۳۰۲	MgO	Mg
۱/۰۳۳	Al ₂ O ₃	Al
۱۵/۷۰۶	SiO ₂	Si
۷/۱۳۳	SO ₃	S
۲۰/۹۱۶	CaO	Ca
۱۲/۵۷	Fe ₂ O ₃	Fe

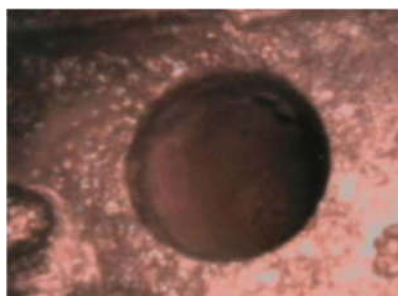
مطابق شکل (۲ الف) مشاهده می‌شود که ساختار فریتی-پرلیتی اولیه لوله به صورت کامل تغییر کرده و چنان‌که در شکل (۲ ب) نشان داده شده، به ساختار فریتی-کارییدی تبدیل شده و در مرز دانه‌ها کاربیدهای درشت و ناپیوسته تشکیل شده است. این تغییر ساختار نشان می‌دهد که دمای فلز لوله در حین کار بیش از دمای کاری بخار خروجی فوق‌گرمکن است. مقدار این دما با اندازه‌گیری تجربی در لحظه قطع جریان گاز ورودی به دیگ بخار به دست آمده است. مقادیر دمای ۵۰۰ تا ۵۰۸ درجه سلسیوس در مناطقی از لوله‌های فوق‌گرمکن گزارش شد. این اتفاق به دلیل استفاده از سوخت گازوئیل و دوده حاصل در اتاق احتراق توربین گاز رخ داده است. لایه دوده ناشی از احتراق گازوئیل در سطح خارجی لوله‌های فوق‌گرمکن مؤید این مطلب است. این رخداد می‌تواند منجر به توزیع ناهمگون حرارت بر لوله‌های فوق‌گرمکن و افزایش تمرکز تنش شود.

۲.۲. بررسی چشمی^۱ داخل لوله گسیخته‌شده فوق‌گرمکن

برای بررسی وجود رسوب یا گرفتگی لوله‌های فوق‌گرمکن که می‌تواند از عوامل ایجاد ترک باشد، بازرسی چشمی از نمونه موجود به عمل آمد. در شکل (۳) تصاویر داخل لوله فوق‌گرمکن نشان داده شده است. در داخل لوله رسوباتی به صورت توده وجود دارد. البته توده‌ها در حدی نیست که مانع حرکت بخار شود. همچنین، حفره‌های خوردگی موضعی نیز قابل مشاهده است که بزرگ‌ترین بعد حفره ایجادشده ۵۹ میلی‌متر مشخص شد.



(الف)



(ب)

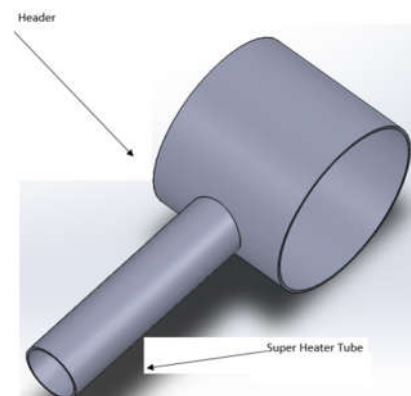
شکل (۳): تصویر (الف) توده‌ها و حفره ایجادشده با خوردگی موضعی درون لوله فوق‌گرمکن، (ب) تصویر حفره با بزرگ‌نمایی

۴.۲. آنالیز سوخت ورودی به محفظه احتراق

از آنجا که گازهای حاصل از احتراق به‌طور مستقیم با لوله‌های فوق‌گرمکن تماس دارند، در این قسمت کیفیت سوخت گازوئیل مصرفی به‌عنوان سوخت خارج از طراحی نیروگاه بررسی می‌شود. با توجه به آنالیز گازوئیل مصرفی مقدار گوگرد موجود در این سوخت ۷۵۰۰ ppm گزارش شد که ۱۵۲ برابر بیشتر از حد مجاز استاندارد یورو ۴ در خصوص این سوخت (۵۰ ppm) می‌باشد. همچنین استاندارد ASTM D482 نشان می‌دهد که با افزایش مقدار گوگرد، میزان خاکستر تولیدی نیز بالاتر می‌رود. مشاهده می‌شود که مقدار گوگرد غیرمجاز به‌همراه سایر ناخالصی‌های موجود در گازوئیل و ارزش حرارتی پایین گازوئیل - که می‌تواند عامل احتراق کم کیفیت باشد - موجب ایجاد لایه‌ای از دوده بر روی لوله‌های فوق‌گرمکن شده‌اند. وجود لایه رسوبات بر سطح لوله‌ها مانند یک عایق حرارتی عمل می‌کند و علاوه بر کاهش انتقال حرارت موجب افزایش دمای سطح لوله‌ها نیز می‌شود. کیفیت گاز طبیعی ورودی به دیگ بخار از جهت ترکیبات شیمیایی در واحد توربین گاز نیز بررسی شد و نتایج تقریباً مشابه حالت طراحی به دست آمد.

شبیه‌سازی عددی

به‌منظور بررسی تنش‌های حرارتی در لوله‌های فوق‌گرمکن از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار Ansys APDL نسخه ۱۳ استفاده شده است. در بخش جامد معادله انرژی حل شده است. همچنین به‌دلیل دماهای بالا انتقال حرارت تشعشعی نیز فعال شده است. هندسه مورد مطالعه در شکل (۴) مشاهده می‌شود. جریان پس از ورود به سرلوله وارد لوله فوق‌گرمکن می‌شود.



شکل (۴): هندسه مورد مطالعه در بررسی عددی

۱.۳. شرایط مرزی، خواص مواد و شبکه‌بندی

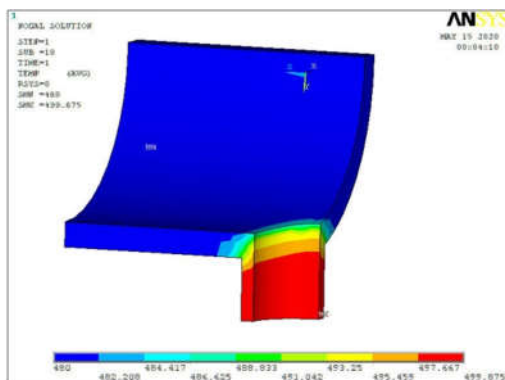
بخار در دمای ۴۸۰ درجه سلسیوس به سرلوله وارد می‌شود. دمای سطح خارجی لوله‌ها با توجه به تماس گازهای داغ خروجی از

توربین گاز برابر ۵۱۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. ضریب هدایت حرارتی، چگالی و حرارت ویژه در سرلوله و لوله‌های فوق‌گرمکن متغیر با دما در نظر گرفته شده است (نک: جدول ۲). ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین بخار و سطح داخلی سرلوله برابر $5.2 \text{ w/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ در نظر گرفته شده است [۱۷]. در مورد فوق‌گرمکن مقدار این ضریب وابسته به دما در نظر گرفته شده که در جدول (۲) نمایش داده شده است.

جدول (۲): تغییرات مشخصه‌های حرارتی نسبت به دما

دما ($^\circ\text{C}$)	۲۷	۱۲۷	۳۲۷	۵۲۷
چگالی (Kg/m^3)	۷۸۲۲	۷۸۲۲	۷۸۲۲	۷۸۲۲
ضریب هدایت ($\text{w/m}^\circ\text{C}$)	۰/۱۳۸۵	۰/۱۴۰۴	۰/۱۴۸	۰/۱۲۲۳
حرارت ویژه ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$)	۱/۷۴	۱/۸۲	۱/۹۴	۲/۱۴
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($\text{w/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)	۴۱/۷۷	۳۶/۷۷۹	۸/۵۵۷	۱/۱۲۵

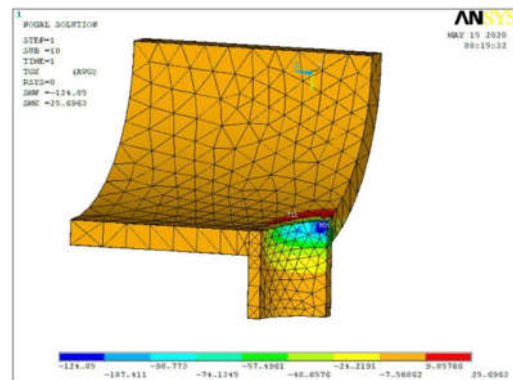
استحکام کششی جنس سرلوله و فوق‌گرمکن یکسان است که این موضوع از تست کشش نیز ثابت شد. از این رو در نرم‌افزار به هر دو جنس یک شماره ماده اختصاص داده شد و جنس دوم برای لایه نازکی از بخار در تماس با سطح لوله در نظر گرفته شد. شایان ذکر است مدل به‌کاررفته برای مواد در این آنالیز مدل آیزوتروپیک است. به‌دلیل وجود گرادیان‌های دمایی شدیدتر در محل اتصال سرلوله به فوق‌گرمکن و در نتیجه نیاز به دقت بالاتر در حل، از المان‌های ریزتری در این ناحیه استفاده شده است. با وجود تقارن هندسی و مرزی، ایجاد شبکه و حل عددی تنها برای یک‌چهارم میدان انجام شده است. در این هندسه پس از مقایسه دما در شبکه‌ها با ابعاد مختلف از ۲۷۸۴ گره محاسباتی با روش ایجاد شبکه آزاد به‌منظور استقلال حل از شبکه استفاده شده است. در حل عددی حاضر از روش المان محدود استفاده شده است. همچنین، اختلاف دماهای به‌دست‌آمده از روش عددی و تجربی کمتر از ۱۰٪ می‌باشد که گویای اعتبار روش عددی در این بررسی است.



شکل (۵): توزیع درجه حرارت در محل اتصال سرلوله و فوق‌گرمکن

۲.۳. نتایج عددی

شکل (۵) توزیع دما در ناحیه اتصال را نشان می‌دهد. مقدار دما در ناحیه اتصال سرلوله و گرمکن در بازه ۴۵۹ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس تغییر می‌کند. به‌علت بهره‌برداری مداوم از دیگ بخار، این دما به‌مدت طولانی به محل اتصال یادشده اعمال می‌شود و این فرایند دلیل کاهش ایجادشده در سختی اندازه‌گیری‌شده از فولاد در محل گسیختگی است که پیش‌تر ذکر شد. در واقع دمای زیاد همیشگی در این ناحیه موجب تغییر ساختار فریتی-پرلیتی به فریتی-کاربیدی شده است. شایان ذکر است علت دمای کمتر در سرلوله وجود سیستم پاشش آب برای بخار این قسمت است که منجر به کاهش دمای بخار انتقالی از سرلوله به ۴۸۰ درجه سلسیوس می‌شود. همچنین، عدم ایجاد اختلاف دما در نسج سرلوله، وجود انتقال حرارت شدید به‌علت تشکیل دوده بر سطح خارجی آن است که موجب برابری دمای بخار و دمای نسج لوله شده است.



شکل (۶): توزیع شار حرارتی در محل اتصال سرلوله و فوق‌گرمکن

شکل (۶) توزیع شار حرارتی در محل اتصال سرلوله به فوق‌گرمکن را نشان می‌دهد. در محل اتصال، بیشینه شار حرارتی مشاهده می‌شود که عامل پیدایش عیوب ساختاری در ماده سازنده یا جوش اتصالی است.

دمای بخار ورودی به فوق‌گرمکن دما بالا در حدود ۴۸۰ و دمای گازهای داغ بر روی لوله‌ها ۵۰۰ درجه سلسیوس است. این اختلاف دما می‌تواند عامل ایجاد تنش بر لوله‌های فوق‌گرمکن باشد که مقدار آن توسط نرم‌افزار حدود ۱۰۰ مگاپاسکال تخمین زده شده است. این تنش از تنش تسلیم فولاد لوله فوق‌گرمکن کمتر است ولی به‌طور دائم سطح مقطع لوله در حال اعمال است. این تنش به‌همراه تنش حرارتی حاصل از گرمایش بیش از حد و طولانی، لوله‌ها و به‌خصوص محل اتصال آن‌ها به سرلوله را دچار پدیده خزش نموده است. بنا بر تعریف، خزش عبارت است از تغییر فرم پلاستیک اجسام در دمای بالا تحت تنش ثابت نسبت به

زمان. با توجه به محدوده دمایی لوله‌های فوق‌گرمکن که در بازه $T_m/3$ تا $0.7 T_m$ قرار دارند (T_m دمای ذوب فولاد است) پدیده‌ای به نام نوع دوم خزش در این لوله‌ها رخ می‌دهد [۶ و ۱۸].

همچنین با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته لوله فولادی برابر ۲۰۰ گیگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۳ و ضریب انبساط حرارتی در مقدار $11 \times 10^{-6} /k$ تحلیل انبساط طولی برای لوله فولادی انجام شد. فرض می‌شود لوله بدون هیچ‌گونه تنش اولیه است و به‌صورت تیر دو سر درگیر ثابت شده است. به تکیه‌گاه پایین حرارت ورودی به دیگ بخار اعمال می‌شود تا به دمای گازهای داغ برسد و دما در این مقدار ثابت بماند. با توجه به وجود انتقال حرارت میان سرلوله و لوله، به تدریج با داغ شدن کل لوله و محکم بودن لوله بین تکیه‌گاه بالایی و پایینی و عدم امکان انبساط طولی آزاد، تنش در لوله به وجود می‌آید. ایجاد تنش‌های ثابت حاصل از انبساط طولی همراه با کاهش سختی لوله و فلز جوش و به تبع آن کاهش استحکام کششی نهایی منجر به ایجاد اعوجاج در لوله‌های فوق‌گرمکن بین سرلوله‌های بالایی و پایینی خواهد شد که می‌تواند عامل ایجاد ترک، نشستی بخار و به‌دنبال آن خروج اضطراری واحد از چرخه تولید باشد.

۳. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی علل گسیختگی لوله‌های فوق‌گرمکن در یک دیگ بخار نیروگاهی پرداخته شد. آزمایش‌های مختلفی به همراه شبیه‌سازی عددی با روش المان محدود توسط نرم‌افزار ANSYS APDL صورت گرفت. مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیرند.

- بررسی ساختارشناسی محل گسیختگی در لوله فوق‌گرمکن و سختی‌سنجی انجام‌شده در این ناحیه به‌همراه نتایج حاصل از تحلیل المان محدود نشان داد که مکانیزم خزش عامل بالقوه تخریب لوله‌هاست.
- بررسی چشمی از محل آسیب‌دیدگی و داخل لوله فوق‌گرمکن نشان داد که در داخل لوله‌ها رسوب تشکیل شده است.
- آنالیز رسوب داخل لوله فوق‌گرمکن بیانگر وجود عناصر خورنده است.
- کیفیت گاز طبیعی ورودی به دیگ بخار از جهت ترکیبات شیمیایی در واحد توربین گاز تقریباً مشابه طراحی بود، ولی

- وجود آمدن تنش‌های نسبتاً دائمی حاصل از انبساط طولی در آن‌ها شده بود.
- با توجه به این موارد می‌توان راه‌حل‌هایی را برای رفع این مشکلات پیشنهاد داد.
- استفاده از سیستم‌های دوده‌روب برای کاهش انتقال حرارت کنترل نشده بر لوله‌ها؛
 - استفاده از سوخت‌های باکیفیت‌تر مطابق با استانداردهای یورو و ASTM D482؛
 - اصلاح سیستم احتراق برای استفاده از سوخت‌های خارج از طراحی؛
 - تغییر مشعل‌ها به انواع قابل کنترل برای سوخت‌های خارج از طراحی.
- سوخت گازوئیل مصرفی به علت مقادیر بالای گوگرد و سایر ناخالصی‌ها به شدت متفاوت از شرایط طراحی بود.
- وجود قشری از دوده بر روی لوله‌های فوق گرمکن که حاصل استفاده از سوخت گازوئیل است، باعث اختلال در انتقال حرارت و ایجاد نقاط و سطوح فوق داغ بر روی لوله‌ها شده که خود باعث آسیب‌های ساختاری شدید می‌باشد.
 - بررسی‌ها نشان داد نبود سیستم دوده‌روب در داخل دیگ بخار می‌تواند بر شدت و تکرار آسیب‌دیدگی‌ها تأثیر بگذارد.
 - استفاده نکردن از نگهدارنده‌های قابل انعطاف^۱ در لوله‌های عمودی فوق گرمکن مورد بررسی موجب به

مراجع

- [1] Saxena, A., J. Han, and K. Banerji. "Creep crack growth in boiler and steam pipe steels: Topical report" No. EPRI-CS-5585. General Atomics Co., San Diego, CA (USA); Georgia Inst. of Tech., Atlanta (USA). Fracture and Fatigue Research Lab., 1988.
- [2] Fattorini, F., U. Franzoni, and S. Sturlese. "Effect of impurity content on creep crack growth resistance in 1Cr1Mo0. 25V ferritic steels." Metallurgical Transactions A, Vol. 21, No. 7, pp. 1941-1949, 1990.
- [3] Liaw, P. K., A. Saxena, and J. Schaefer. "Creep crack growth behavior of steam pipe steels: Effects of inclusion content and primary creep." Engineering fracture mechanics, Vol. 57, no. 1, pp. 105-130, 1997.
- [4] Xu, Mengjia, Junmei Chen, Hao Lu, Jijin Xu, Chun Yu, and Xiao Wei. "Effects of residual stress and grain boundary character on creep cracking in 2.25 Cr-1.6 W steel." Materials Science and Engineering: A, Vol. 659, pp. 188-197, 2016.
- [5] Cho, Nak-Kyun, Run-Zi Wang, Zhiyuan Ma, Haofeng Chen, and Fu-Zhen Xuan. "Creep-fatigue endurance of a superheater tube plate under non-isothermal loading and multi-dwell condition." International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 161, pp. 105048, 2019.
- [6] Kim, Myung-Yeon, Dong-Ju Chu, Young-Su Lee, Woo-Sang Jung, Joonho Lee, Young-Kook Lee, and Jae-Hyeok Shim. "Mechanical property change and precipitate evolution during long-term aging of 1.25 Cr-0.5 Mo steel." Materials Science and Engineering: A, pp: 139663, 2020.
- [7] Kahrum, M., Sajjadi, S.A., Bahadori, G., Investigating the causes of failure of Superheater 2 header pipes of Toos power plant, 21st International Electricity Conference, 2006.
- [8] Shiri, M., Soltanlo, M., "Investigating the causes of destruction of the superheater pipe of the ammonia unit of the power plant", Oil, Gas & Energy Monthly Magazine, Vol. 22, pp. 40, 2014.
- [9] Mosavi Torshizi, S.E., Vazirpanah, M., Biston Power Superheater Pipe Fault Analysis, 18st International Electricity Conference, 2004.
- [10] Eghabi, F., Ahmadi, A., Check the condition of the boiler superheater pipes of a 320 MW power plant, 21st International Electricity Conference, 2009.
- [11] Mehdizadeh, M., Mirabolghasemi, S.H., Estimation of the remaining life of boiler super heater pipes, 10th Annual Congress of Iranian Association of Metallurgical Engineers, 2006.
- [12] Firoozeh, A., Ranjbar, Kh., Mohemmi, E., Evaluation of the causes of destruction of ASTM A213 Gr.T12 steel boiler pipes, Second National and International Conference on Oil, Gas, Refining and Petrochemicals, 2015.
- [13] Causes of failure of secondary boiler superheater pipes of Hakim Farabi Agro-industry Company, 21st Annual Conference on Mechanical Engineering, 2014.
- [14] Bajgholi, A., Khalili, S., Investigating the causes of rupture of boiler support pipes of a power plant unit, Second National and International Conference on Oil, Gas, Refining and Petrochemicals, 2014.
- [15] Xiong, X., Lv, Z., Tan, H. and Wei, B., 2020. A typical super-heater tube leakage and high temperature corrosion mechanism investigation in a 260 t/h circulated fluidized boiler. Engineering Failure Analysis, 109, p.104255.
- [16] Power Plant Documents by ABB, Vol. 3, pp. 108-160, 2006.
- [17] Technical Report of Power Research Center, 1390- Technical documents of the power plant.
- [18] Viswanathan, R., *Damage mechanisms and life assessment of high temperature components*. ASM international, 1989.