

## بررسی علل تخریب لوله‌های انتقال بخار در یک موتورخانه نیمه‌صنعتی

علی مصطفی‌پور<sup>۱</sup>، سید سعادت میریان مهریان<sup>۲</sup>، سید محمد جواد یوسفی شریک آباد<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد خوردگی و حفاظت مواد، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد خوردگی و حفاظت مواد، مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

smjyousefi@gmail.com

ارسال: شهریور ۹۷ پذیرش: مهر ۹۷

### چکیده

در این پژوهش به بررسی علل تخریب قطعه‌ی انتقال دهنده‌ی سیال در سیستم انتقال آب موتورخانه بخار خوابگاه دانشگاه شیراز پرداخته شد، بدین منظور لوله‌ی تخریب شده‌ی حامل آب داغ انتخاب شد. این قطعه پس از چهار سال کارکرد مداوم در این واحد، دچار خوردگی موضعی شدید و نشتی شده بود. جهت بررسی این موضوع، ابتدا بازرسی‌های چشمی، پس از اسیدشویی صورت گرفت. آنالیز رسوبات و ترکیب شیمیایی به ترتیب با آزمون‌های پراش پرتو ایکس و کوانتومتری تعیین گردید. همچنین مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری انجام گرفت برای تعیین نرخ خوردگی یکنواخت این قطعه، آزمون پلاریزاسیون نافل انجام شد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان داد که اگرچه خوردگی یکنواخت این قطعه فلزی در این محیط بسیار کم بوده است ولی وجود عوامل تشدیدکننده‌ی خوردگی موضعی مثل رسوبات هیدروکسیدی و اکسیدی عامل ایجادکننده‌ی حفره‌ها و تخریب شدید این قطعه شده بود.

کلمات کلیدی: علل تخریب، بویلر، موتورخانه‌ی بخار، پلاریزاسیون نافل، خوردگی، پراش پرتو ایکس.

### ۱- مقدمه

برای تولید بخار در مکان‌های مختلف از موتورخانه‌های بخار استفاده می‌شود [۱]. از آنجایی که دمای کارکرد این سیستم‌ها نسبتاً بالا می‌باشد در قسمت‌های مختلف انتقال بخار این سیستم‌ها مشکلات زیاد خوردگی مشاهده می‌گردد [۲]. قسمت‌های مختلف سیستم‌های بخار معمولاً با استفاده از فولادهای ساده‌ی کربنی ساخته می‌شود. ولی در قسمت‌های خاص سیستم می‌توان از فولادهای زنگ‌نزن و آلیاژهای مس نیز استفاده نمود [۳]. خوردگی معمولاً به دو صورت یکنواخت و موضعی اتفاق می‌افتد. خوردگی موضعی بسیار مخرب‌تر بوده، و به صورت‌های مختلفی اتفاق می‌افتد و در زمان اندک باعث تخریب قطعه می‌شود [۴]. خوردگی حفره‌ای نوعی از تخریب است که به سرعت اتفاق می‌افتد و باعث به وجود آمدن حفره‌هایی با دهانه‌ی کوچک و عمق زیاد در درون قطعه می‌گردد. این خوردگی نسبت به بقیه‌ی انواع خوردگی موضعی، بسیار مخرب‌تر بوده زیرا تشخیص ایجاد حفره‌ها در مراحل اولیه‌ی خوردگی بسیار سخت بوده و گاهی امکان‌پذیر نمی‌باشد. در این نوع تخریب هر عاملی از جمله ناهمگنی‌های سطحی که بتواند باعث جوانه‌زنی حفره‌ها شود می‌تواند شروع‌کننده‌ی این نوع از خوردگی باشد. پس از شروع جوانه‌زنی در مدت کوتاهی و به صورت خودپیشرونده<sup>۱</sup> تخریب صورت می‌گیرد [۳]. مشکلات خوردگی در موتورخانه‌های بخار

<sup>۱</sup> Autocatalytic

را می توان با طراحی و انتخاب مواد مناسب، حذف رسوبات با شستشوی شیمیایی سیستم در زمان مشخص، تنظیم pH، کنترل میزان اکسیژن، پایش منظم مکان های مستعد به خوردگی و استفاده از آب ورودی با کیفیت بالا به کمترین میزان ممکن رساند [۵]. در سال ۲۰۱۷ لیو<sup>۱</sup> و همکاران آنالیز تخریب برای لوله های یک بویلر آب را که دچار تخریب و پارگی شده بودند بررسی نمودند که بر اساس این مطالعه عامل اصلی این تخریب، کاهش ضخامت لوله ها به صورت موضعی و در اثر اکسیداسیون عنوان گردید [۶]. در سال ۲۰۱۸ شبانی و همکاران آنالیز تخریب برای لوله های انتقال گاز طبیعی که از محل جو شکاری شده دچار ترک های طولی شده بودند را بررسی نمودند و عوامل اصلی این تخریب را خوردگی متاثر از تنش<sup>۲</sup> و نقص های متالورژیکی متعدد در این ناحیه ذکر نمودند [۷]. در این تحقیق به بررسی علل تخریب قطعه انتقال دهنده بخار در موتورخانه بخار پرداخته شد و پس از مشخص شدن علت دقیق تخریب، روش هایی برای جلوگیری از آن پیشنهاد شد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- وضعیت خوردگی و بررسی چشمی قطعه مورد نظر

قطعه مورد نظر در این پژوهش، بخشی از سیستم انتقال آب موتورخانه بخار واقع در خوابگاه دانشگاه شیراز می باشد. تصویر این قطعه، در شکل ۱ نشان داده شده است. این قطعه پس از ۴ سال از محل مشخص شده در شکل دچار نشتی شده و سپس تعویض گردیده است.

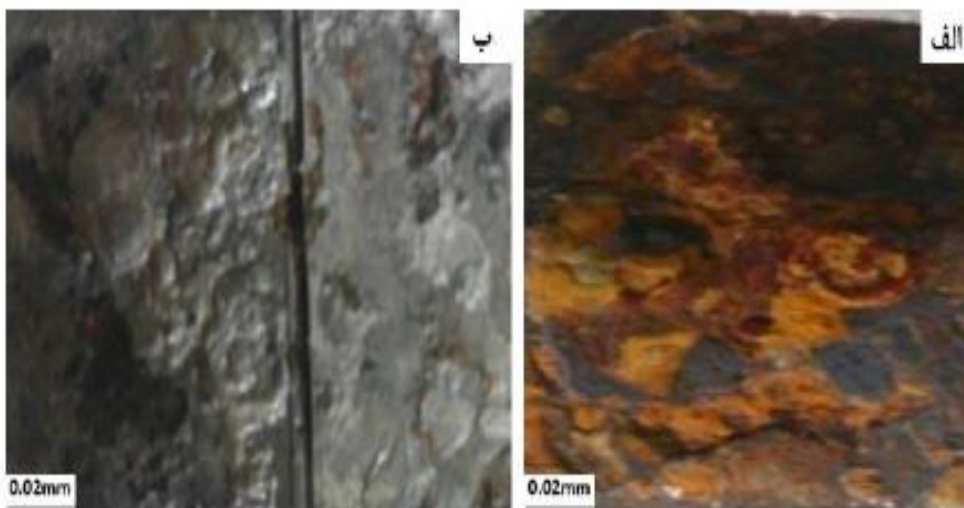


شکل ۱- قطعه تخریب شده و محل خوردگی

برای بررسی دقیق تر و وضع ظاهری خوردگی، نمونه ی کوچکی از این قطعه تهیه و طبق استاندارد ASTM G1 به مدت ده دقیقه در محلول ۵۰۰ میلی لیتر هیدرولیک اسید +۳/۵ گرم هگزا متیلن تترآمین +۵۰۰ میلی لیتر آب، اسید شویی شد. سطح نمونه قبل و بعد از اسید شویی و از بین بردن رسوبات در شکل ۲ نشان داده شده است. بعد از مرحله اسید شویی حفره های ایجاد شده ناشی از خوردگی، کاملاً مشهود بوده و برآمدگی های ناشی از رسوبات در محل خوردگی نیز قابل مشاهده است.

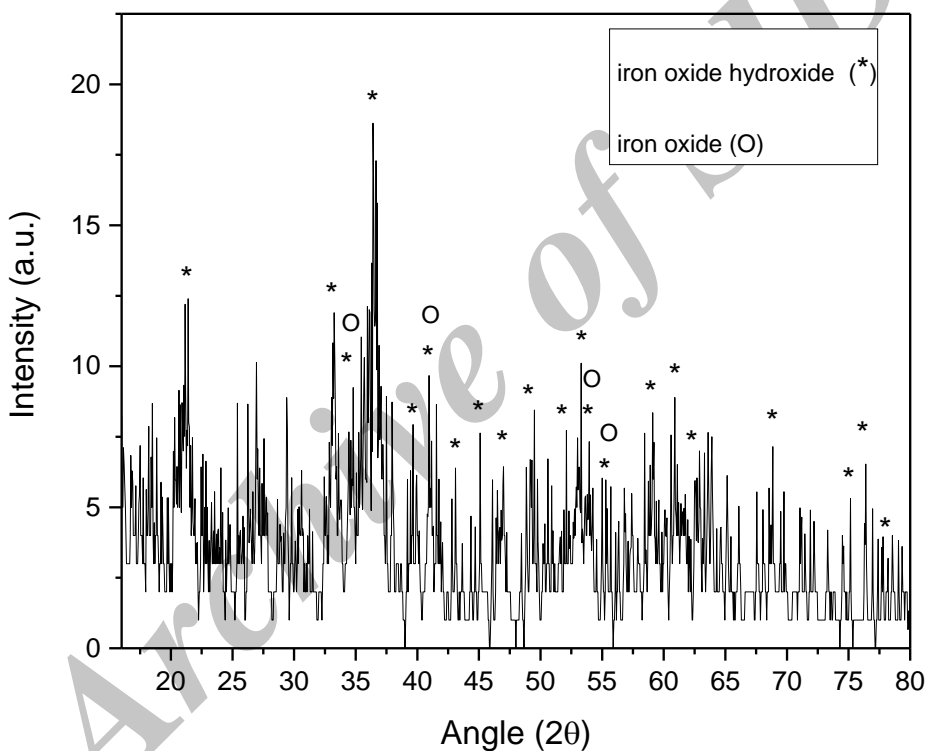
<sup>1</sup> Liu

<sup>2</sup> Stress Corrosion Cracking (SCC)



شکل ۲- سطح نمونه‌ها: الف) قبل از اسیدشویی ب) بعد از اسیدشویی

۲-۲- آنالیز پراش پرتو ایکس



شکل ۳- آنالیز پراش پرتو ایکس مربوط به رسوبات خوردگی

به منظور اطمینان از تشکیل فازهای دخیل در ایجاد خوردگی حفره‌ای، آنالیز پراش پرتو ایکس روی این رسوبات صورت گرفت. شکل ۳ طیف پراش پرتو ایکس مربوط به محصولات خوردگی روی نمونه در محل تخریب را نشان می‌دهد همانطور که پیک‌ها نشان می‌دهند این رسوبات عمدتاً اکسید و هیدروکسیدهای آهنی هستند.

۲-۳- شرایط کارکرد سیستم

این قطعه از قسمت دیگ موتورخانه بخار نیمه‌صنعتی خوابگاه دانشگاه شیراز که در شکل ۴ نشان داده شده است، انتخاب شد.



شکل ۴- دیگ موتورخانه بخار خوابگاه دانشگاه شیراز

دمای سیال آب داغ درون این قطعات حدوداً ۸۰ درجه سانتی گراد و pH آن تقریباً ۷ بوده است. محل قرارگیری این قطعات به صورت رابط بین اتصالات سیال بوده است. برای جلوگیری از رسوب گذاری، سولفیت سدیم به آب ورودی تزریق می شده است. عمر متوسط این قطعات در سیستم چهار سال ذکر شده است.

#### ۲-۴- آنالیز کوانتومتری

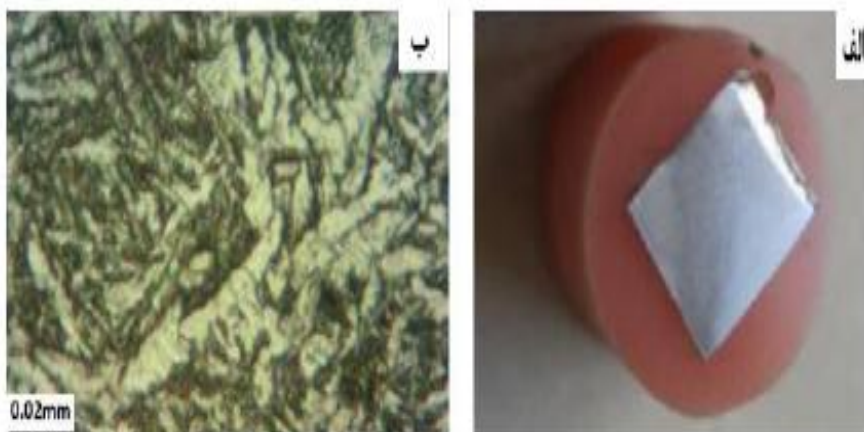
برای تعیین ترکیب شیمیایی قطعه‌ی موردنظر، نمونه‌ای با ابعاد مشخص از فلز با آنالیز کوانتومتری مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به ترکیب شیمیایی که در جدول ۱ مشخص شده است، جنس این نوع قطعه از نوع فولاد ساده کربنی می باشد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی نمونه

عنصر	کربن	منگنز	سیلیسیم	فسفر	گوگرد	نیکل	کروم	آهن
درصد وزنی	۰/۰۵۹۲	۰/۲۵۸	۰/۳۹۴	۰/۰۴۴۶	۰/۰۴۶۱	۰/۰۰۵۰	۰/۰۲۵۵	مابقی

#### ۲-۵- بررسی ریزساختاری

به منظور بررسی ریزساختار، نمونه‌ای از این قطعه تهیه و مانت شد که در شکل ۵ الف مشخص شده است و با سنباده‌های ۸۰ تا ۲۰۰۰ از جنس کاربید سیلیسیم سنباده‌زنی شده و در محلول نایتال دو درصد اچ شد. تصویر میکروساختاری حاصل از این بررسی در شکل ۵ ب نشان داده شده است.



شکل ۵- تصاویر نمونه الف) مانت شده ب) ریز ساختار

با توجه به شکل ۵ ب ساختار فریتی پرلیتی نمونه که مربوط به فولاد ساده کربنی است کاملاً قابل مشاهده است.

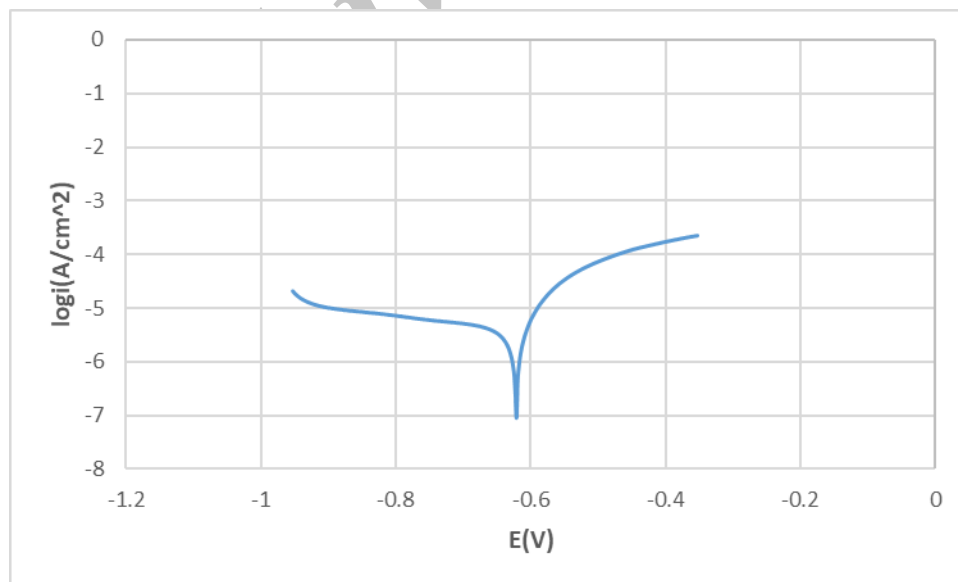
## ۲-۶- آزمون پلاریزاسیون تافل

برای بررسی بیشتر تخریب ایجاد شده و تعیین نرخ خوردگی یکنواخت فلز، نمونه‌ای با ابعاد مشخص از این قطعه تهیه و سپس آزمون پلاریزاسیون تافل انجام گرفت. جهت بررسی رفتار خوردگی، نمونه‌ای با ابعاد مشخص به یک سیم لحیم و سپس مانت شد که در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- نمونه مانت شده برای انجام آزمون تافل

در ادامه نمونه مورد نظر به کمک سنباده‌هایی از ۸۰ تا ۱۰۰۰ از جنس کاربید سلیسیم سنباده‌زنی شد. سپس نمونه با آب مقطر شستشو و خشک شد. به منظور شبیه سازی شرایط آزمایش با شرایط کاری قطعه در موتورخانه بخار، از آب مورد استفاده در موتورخانه با دمای حدود ۷۰ درجه سانتی گراد استفاده شد. آزمون‌های خوردگی بوسیله دستگاه پتانسیواستات مدل  $\mu$ autolabIII با استفاده از یک سل الکترودی شامل الکتروود مرجع کالومل،  $Ag/AgCl(3M,KCl)$  الکتروود کمکی از جنس پلاتین و الکتروود کاری صورت پذیرفت. پس از اندازه گیری‌های پتانسیل مدار باز (OCP)، آزمون پلاریزاسیون تافل انجام گرفت. منحنی‌های پلاریزاسیون در محدوده ۳۰۰ میلی ولت نسبت به پتانسیل مدار باز و با سرعت روبش  $1\text{ mV/S}$  رسم شدند. از نرم افزار NOVA جهت مدل سازی داده‌ها استفاده شد. نتایج حاصل از آزمون تافل در شکل ۵ و داده‌های حاصل که با نرم افزار NOVA به دست آمدند در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۷- آزمون پلاریزاسیون تافل برای نمونه مورد نظر

جدول ۲- مقادیر پتانسیل، چگالی جریان و نرخ خوردگی برای نمونه مورد نظر

پتانسیل خوردگی (mV)	چگالی جریان خوردگی ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	نرخ خوردگی (mm/year)
-۶۳۴/۶۳	۴/۰۶۰۸۰	۰/۱۲۴۱۷

همان طور که از داده‌های حاصل از آزمون تافل مشخص است نرخ خوردگی یکنواخت این نمونه بسیار پایین می‌باشد پس مدت زمان طولانی برای خوردگی به صورت یکنواخت لازم است.

### ۳- نتایج و بحث

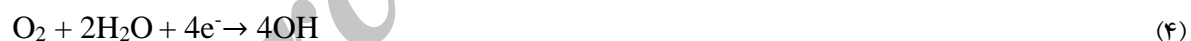
طبق شکل ۲ حفره‌های نسبتاً عمیق زیادی روی فلز قابل مشاهده است. با توجه به نتایج آزمون پلاریزا سیون تافل که در شکل ۷ و جدول ۲ مشخص شده است نرخ خوردگی این نمونه به صورت یکنواخت بسیار پایین می‌باشد و وجود این حفره‌ها قطعاً ناشی از خوردگی موضعی است. اولین و مهم‌ترین عامل جوانه‌زنی حفره می‌تواند به دلیل رسوبات بر روی جداره داخلی لوله و ناشی از خوردگی شیاری باشد [۵]. طبق بازرسی چشمی که در شکل‌های ۱ و ۲ مشخص شده است قطعه‌ی مورد نظر دچار خوردگی حفره‌ای شدید شده است و دارای انواع عیوب سطحی و ناهمگنی می‌باشد. از عوامل دیگر جوانه‌زنی حفره‌ها در این قطعه می‌توان به تجمع رسوبات اشاره نمود که بر اساس آزمون پراش پرتو ایکس مشخص شد که این رسوبات عمدتاً اکسید و هیدروکسیدهای آهنی هستند. رسوبات هیدروکسیدی روی سطح فلز می‌توانند بر اساس واکنش (۱) ایجاد شوند.



علاوه بر این در ادامه این هیدروکسیدها می‌توانند بر اساس واکنش (۲) به زنگ آهن تبدیل شوند.



وجود این رسوبات بر سطح زیرلایه‌ی فولادی باعث می‌شود تا جوانه‌زنی برای خوردگی حفره‌ای از زیر این رسوبات آغاز گردد و با ایجاد یک پیل اختلاف دمش ایجاد گردد [۴]. پس از ایجاد حفره‌ها در فلز به دلیل انجام واکنش‌های آندی انحلال فلز بر اساس واکنش شماره (۳) و کاتدی احیای اکسیژن به یون‌های هیدروکسید بر اساس واکنش شماره (۴)، تجمع یون‌های فلزی داخل حفره‌ها زیاد شده و به دلیل وجود نمک‌های فلزی و هیدرولیز آن‌ها، بعضی از یون‌ها مثل کلر وارد حفره می‌شوند و واکنش ۳ اتفاق می‌افتد.



در نتیجه این واکنش محیط اسیدی شده و واکنش‌ها به صورت خودپیشرونده صورت می‌گیرد و در زمان کوتاهی قطعه مورد نظر تخریب می‌شود.

### ۴- نتیجه گیری

با بررسی علل تخریب قطعه‌ی مورد نظر در این واحد مشخص شد که خوردگی‌های موضعی خصوصاً حفره‌ای و شیاری ایجاد شده بر روی جداره‌ی داخلی این قطعه می‌تواند ناشی از شرایط ایجاد کننده‌ی حفره‌های خودپیشرونده از قبیل تجمع رسوبات، ناهمگنی‌های سطحی و هم‌چنین حفره‌های ناشی از خوردگی شیاری باشد که هم‌چنین تمامی این عوامل با تشکیل پیل‌های اختلاف دمشی تشدید خواهد شد و قطعه را در مدت زمانی کوتاه تخریب کرده و از سرویس خارج خواهند کرد. برای جلوگیری از این تخریب باید در مرحله‌ی اول به رسوب زدایی سیستم توجه نمود که می‌تواند باعث ایجاد خوردگی‌های شیاری شود توجه بیشتری داشت. هم‌چنین با خالص سازی آب ورودی، و حذف اکسیژن می‌توان باعث افزایش عمر سرویس دهی قطعات در این سیستم‌ها شد.

## ۵- مراجع

1. Merritt, Carey. Process Steam Systems: A Practical Guide for Operators, Maintainers, and Designers John Wiley & Sons, 2015
2. Fontana, Mars Guy. Corrosion engineering. Tata McGraw-Hill Education, 2005.
3. Port R.D. and Herro H.M., The NALCO Guide to Boiler Failure Analysis, McGraw-Hill Publication, 1991.
4. McCafferty, Edward. Introduction to corrosion science. Springer Science & Business Media, 2010.
5. Betz Laboratories Inc, "Betz Handbook of Industrial Water Conditioning", 9th Edition, Trevese, PA, 1991
6. Liu SW, Wang WZ, Liu CJ. Failure analysis of the boiler water-wall tube. Case studies in engineering failure analysis. 2017 Oct 1;9:35-9.
7. habani H, Goudarzi N, Shabani M. Failure analysis of a natural gas pipeline. Engineering Failure Analysis. 2018 Feb 1;84:167-84.

Archive of SID