

آنالیز تخریب تیوب‌های مبدل حرارتی از جنس فولاد کربنی مربوط به کمپرسور چهار مرحله‌ای افزایش دهنده فشار گاز

مرتضی افشاری^{۱*}، اکرم نوری دلاور^۲

۱ پژوهنده ارشد پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران.

۲ عضو هیات علمی پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: afsharim@ripi.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۰۸

چکیده

در این پژوهش آنالیز تخریب تیوب‌های یک مبدل حرارتی نوع پوسته - تیوب که جهت خنک کردن گاز فشرده شده توسط یک کمپرسور در یکی از مراحل فشرده‌سازی به کار برده شده ارایه شده است. مبدل حرارتی مورد بررسی یک مبدل یک بار گذرا با تیوب باندل حاوی تیوب‌های افقی بوده که جنس پوسته و تیوب‌های آن هر دو از فولاد کربنی بوده است. سیال درون پوسته آب حاوی ضد یخ به عنوان عامل خنک کننده و سیال درون تیوب‌ها گاز سوختنی است که در حین فشرده‌سازی، برای کاهش دما به درون مبدل انتقال می‌یابد. مطالعات مختلف توسط روش‌هایی مانند بررسی‌های ظاهری، آنالیز شیمیایی و بررسی‌های ریز ساختاری توسط میکروسکوپ نوری جهت تعیین علل تخریب انجام شد. علاوه بر این بررسی سطح تیوب‌های آسیب دیده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد و آزمون الکتروشیمیایی با استفاده از تکنیک مقاومت پلاریزاسیون خطی (LPR) انجام گردید. محصولات خوردگی باقیمانده روی سطح تیوب‌ها توسط روش‌های طیف سنجی تفکیک انرژی (EDS)، طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) و طیف سنجی تفرق اشعه ایکس (XRD) تحت بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که خوردگی روی سطح خارجی تیوب‌ها و در محل تماس آنها با سیال خنک کننده اتفاق افتاده است. نتایج بررسی‌ها نشان داد که نفوذ اکسیژن به درون سیال خنک کننده منجر به اکسید شدن ترکیب گلایکول موجود در سیال و تولید اسید شده است و این تغییر عامل اصلی ایجاد خوردگی و گسترش دامنه آن در درون مبدل بوده است. همچنین خوردگی گالوانیک ناشی از حضور عنصر مس روی سطح خارجی تیوب‌ها فرایند خوردگی اتفاق افتاده را تسریع نموده است.

کلمات کلیدی: مبدل حرارتی پوسته - تیوب، آنالیز تخریب، خوردگی موضعی، فولاد کربنی، مبدل خنک کننده گاز، تکنیک LPR؛

Failure analysis of carbon steel heat exchanger tubes of a four stage gas boosting compressor

M. Afshari ^{1*}, A. Nouri Delavar ²

¹ Senior Researcher, Corrosion Research Division, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran.

² Faculty Member, Corrosion Research Division, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran.

* Corresponding Author: afsharim@ripi.ir

Submission: 2016, 02, 08 Acceptance: 2016, 05, 28

Abstract

This paper reports on the failure analysis of tubes from a conventional shell tube type heat exchanger in one of the compression stages used to cool the compressed natural gas. The heat exchanger is a one pass type with a tube bundle with straight tubes. Both the tubes and shell being manufactured from carbon steel. The service fluid at the shell side is anti-freezing solution while it is compressed natural gas at the tube side. The cause of the failure was thoroughly investigated using visual examination, chemical analysis and metallographic studies using optical microscope while the surface of corroded material were studied using scanning electron microscope. Electrochemical studies were performed by linear polarization resistance technique, while X-ray diffraction, X-ray fluorescence and EDS analysis was conducted on residual corrosion products. The investigation revealed that corrosion had occurred on outer surface of the tubes in areas exposed to coolant fluid. The evidence indicated that, penetration of oxygen inside coolant fluid resulting in glycol oxidation and has led the production of acid which was the main cause of the corrosion. The presence of copper on the outer surface of tubes had accelerated the corrosion process by galvanic corrosion effect.

Keywords: Shell tube heat exchanger, Failure analysis, Localized corrosion, Carbon steel, Gas cooler, LPR Technique;

۱- مقدمه

مبدل‌های حرارتی از جمله تجهیزاتی هستند که به فراوانی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این تجهیزات بر حسب نوع کاربرد در معرض بسیاری از آسیب‌ها و انواع خوردگی قرار می‌گیرند. یکی از متداول‌ترین مبدل‌های حرارتی مدل پوسته - تیوب (Shell and tube) می‌باشد که در اثر انتقال حرارت از طریق دیواره نازک تیوب موجب کاهش یا افزایش دمای سیال داخل پوسته می‌گردد. در این مبدل‌ها، تیوب نقش اساسی برعهده دارد و بنابراین هر گونه ایجاد خسارت در تیوب‌ها در اثر خوردگی یا هر آسیب دیگر می‌تواند موجب توقف یا اختلال در عملکرد مبدل گردد. بنابراین طراحی این نوع مبدل‌ها از حیث آلیاژهای به کار رفته در آنها می‌تواند نقش اساسی در جلوگیری از بروز خسارت‌های ناشی از خوردگی را ایفا نماید. از دیگر عوامل اثرگذار در تخریب این مبدل‌ها می‌توان به نوع سیال و سرعت حرکت آن، دما و حضور باکتری‌های ایجاد کننده خوردگی میکروبی اشاره نمود [۱].

متداول‌ترین و ارزان‌ترین سیال که جهت کاهش دما در مبدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد آب و ارزاترین آلیاژ مورد استفاده فولاد کربنی می‌باشد. بنابراین شیمی آب یا به عبارتی ترکیب شیمیایی آن از حیث مقدار pH، دما، میزان اکسیژن محلول، سختی، هدایت، قلیائیت و مقدار یون‌هایی مانند نیترات، سولفات و کلراید نقشی اساسی در ایجاد یا تسریع خوردگی داشته و می‌تواند در میزان عمر مفید تیوب‌ها در مبدل‌ها اثرگذار باشد [۲]. از دیگر پارامترهای اثرگذار بر میزان خوردگی می‌توان به مقدار pH سیال و غلظت مواد آلوده کننده مضر محلول در آن اشاره نمود زیرا pHهای زیر ۵ و بالای ۱۲ می‌تواند باعث ناپایدار شدن لایه محافظ مگنتیت در روی تیوب فولادی گردد بنابراین عدم کنترل صحیح pH آب خنک کننده احتمال ایجاد خوردگی‌های شدیدتر را تقویت می‌نماید [۳]. از مهم‌ترین انواع خوردگی در مبدل‌ها می‌توان به خوردگی حفره‌ای و شیاری اشاره نمود که خوردگی شیاری به طور معمول در انتهای تیوب‌ها و در محل اتصال تیوب به تیوب شیت اتفاق می‌افتد در حالی که در خوردگی حفره‌ای فرایند خوردگی به صورت موضعی و در مناطقی بر روی تیوب آغاز گردیده و به تدریج گسترش می‌یابد تا اینکه با کاهش ضخامت متریا به صورت موضعی در نهایت به سوراخ شدگی و نشی سیال از درون تیوب می‌انجامد [۴-۸]. در این دو نوع از خوردگی ترسیب محصولات خوردگی بر روی دیواره تیوب‌ها در شدت خوردگی به وقوع پیوسته اثرگذار می‌باشد [۳، ۹، ۱۰]. این

رسوبات باعث بیش گرم شدن نقطه‌ای، حبس سیال در زیر رسوبات یا محدودیت جریان سیال از بین تیوب‌ها در درون پوسته می‌شوند که در این شرایط آسیب و از کار افتادگی مبدل در اثر خوردگی محتمل خواهد بود. تجمع تدریجی رسوبات به احتمال زیاد در نقاط دارای خمیدگی مانند زانو‌ها، نقاط جوشکاری شده یا دارای برآمدگی، در مناطق با شار حرارتی بالا و بر روی تیوب‌های افقی و شیب‌داری که از سمت بالا یا پایین خود گرم می‌شوند اتفاق می‌افتد [۳]. در مناطق با انتقال حرارت بالا احتمال تشکیل رسوب ۵۰ تا ۱۰۰ برابر بیشتر از سایر نقاط می‌باشد [۹].

در این مطالعه علل خوردگی موضعی تیوب‌های مبدل حرارتی خنک کننده گاز فشرده شده توسط یک کمپرسور گاز چهار مرحله‌ای تحت بررسی قرار گرفت. جهت تعیین علل تخریب از آزمون‌های مختلف شیمیایی، الکتروشیمیایی، بررسی‌های ظاهری، متالوگرافی و میکروسکوپی استفاده شد و محصولات خوردگی راسب شده در درون پوسته و بر روی تیوب‌ها توسط روش‌هایی مانند EDS، XRF و XRD تحت مطالعه قرار گرفت.

۲- روش تحقیق

نمونه تخریب شده، تیوب یک مبدل حرارتی از نوع پوسته - تیوب بود که گاز فشرده شده و گرم شده توسط یک کمپرسور چهار مرحله‌ای به درون تیوب‌های آن وارد شده و سیال خنک کننده درون پوسته جریان می‌یافت. این مبدل که در حدود دو سال در سرویس بوده دارای تیوب‌ها و پوسته‌ای از جنس فولاد کربنی بود. مبدل دارای یک تیوب باندل با تعداد ۵۶ تیوب افقی با قطر ۰/۲۵ اینچ بود که توسط ۲۰ عدد بافل در کنار هم قرار گرفته بود. پوسته نیز دارای قطر ۳ اینچ و ضخامت ۰/۱۷ اینچ بود. سیال خنک کننده توسط یک پمپ به درون مبدل‌ها وارد و پس از تبادل حرارت، جهت خنک شدن مجدد به سمت یک کولر هوایی هدایت شده که جنس لوله‌های آن جهت انتقال حرارت بهتر از مس انتخاب شده است. برخی از شرایط عملیاتی این مبدل حرارتی در جدول ۱ ارایه شده است. طبق توصیه شرکت سازنده مبدل حرارتی، سیال خنک کننده مورد استفاده مخلوطی از اتیلن گلیکول و آب بدون یون همراه با بازدارنده خوردگی بوده که به صورت تجاری تحت عنوان ضد یخ در دسترس بوده و قابل خریداری می‌باشد. به منظور پی‌بردن به علل خوردگی و تخریب تیوب بررسی‌ها و آزمون‌های مختلفی انجام شد که شرح آن در ذیل ارایه می‌گردد.

۲-۱- بررسی ظاهری

تصویر مبدل حرارتی و یک قطعه تیوب سوراخ شده این مبدل پس

توسط روش پراش اشعه ایکس (XRD) و با استفاده از دستگاه GNR XRD Analyzer مدل Explorer تعیین شد. همچنین برخی رسوبات موضعی روی سطح تیوب‌ها نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به اسپکترومتر تفکیک انرژی (EDS) نوع TESCAN مدل VEGA3 آنالیز گردید.

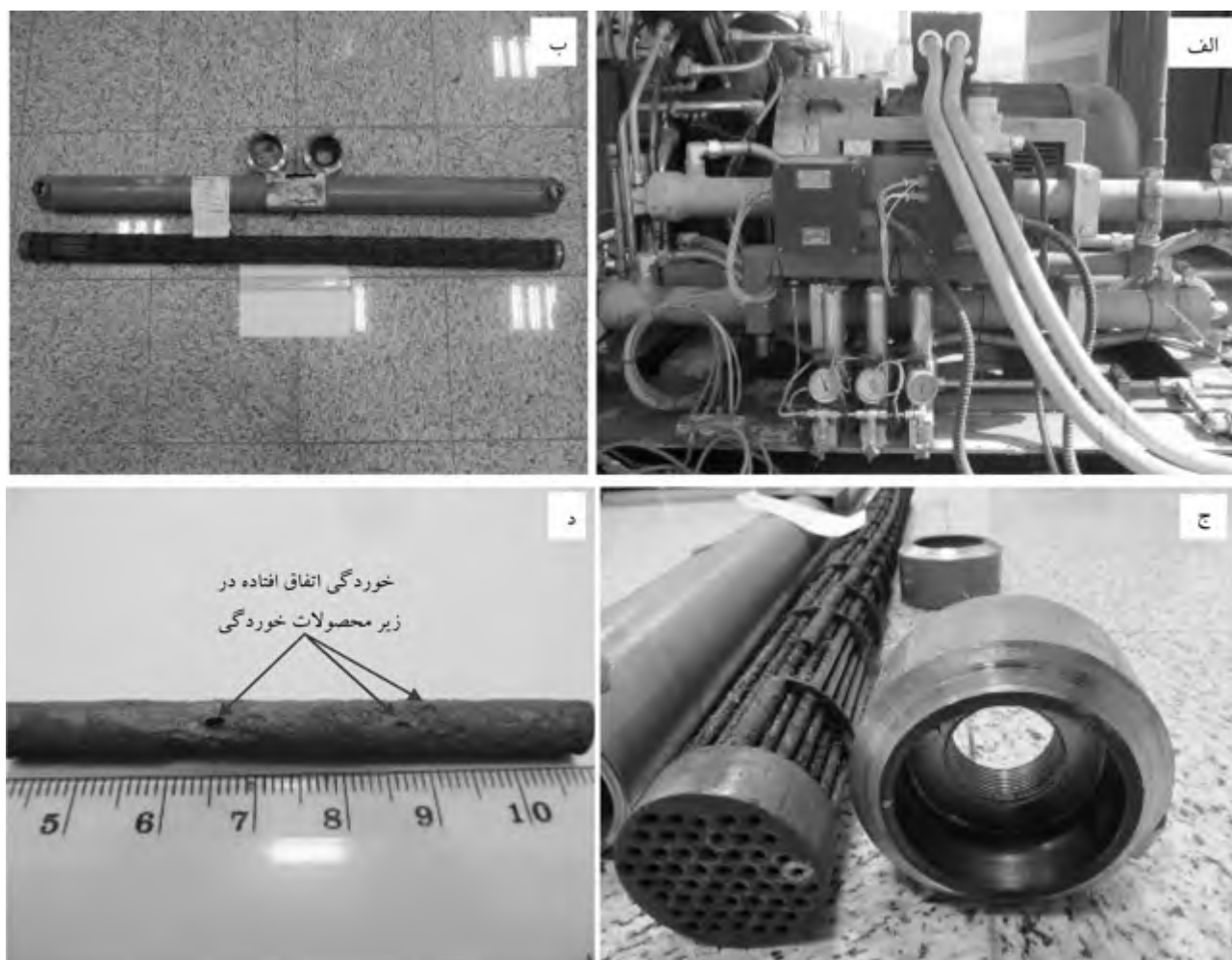
جدول ۱- شرایط عملیاتی مبدل حرارتی

پارامتر	سمت تیوب	سمت پوسته
نوع سیال	گاز سوختی	محلول خنک کننده
ظرفیت سیال (لیتر)	۱/۵	۴/۵
حداکثر فشار مجاز (bar)	۳۱۰	۱۰
حداکثر دمای مجاز (°C)	+۱۵۰	+۵۰
حداقل دمای مجاز (°C)	-۲۰	-۲۰

از فرایند اسید شویی در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود سطح خارجی تیوب‌ها توسط لایه نسبتاً ضخیمی از محصولات خوردگی پوشانده شده که پس از حذف این محصولات، خوردگی موضعی بر روی تیوب مشاهده شد.

۲-۲- آنالیز محصولات خوردگی رسوب کرده بر روی سطح خارجی تیوب‌ها

به منظور تعیین نوع رسوبات خوردگی، دو نمونه از این رسوبات از روی سطح خارجی تیوب‌ها جمع‌آوری گردید و عناصر شیمیایی تشکیل دهنده این رسوبات به روش طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) و با استفاده از دستگاه ARLPERFORM'X مدل ThermoScientific XRF Analyzer تعیین گردید. ترکیبات بلوری موجود در این رسوبات نیز



شکل ۱- تصویر (الف) کمپرسور فشرده ساز چند مرحله‌ای گاز به همراه چند مبدل حرارتی جهت خنک کردن گاز مراحل فشرده‌سازی و (ب و ج) مبدل حرارتی باز شده همراه با تیوب باندل مربوطه و محصولات خوردگی روی آن و (د) سطح یکی از تیوب‌های بریده شده پس از حذف محصولات خوردگی.

گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

همان‌گونه که در شکل ۲ الف دیده می‌شود محصولات حاصل از خوردگی بر روی سطح خارجی تیوب‌ها وجود دارد. شستشوی این رسوبات توسط محلول HCl به همراه هگزامیل تترا آمین به عنوان بازدارنده خوردگی، باعث حذف آنها از روی تیوب شده و موجب آشکار شدن سطح خارجی تیوب مطابق شکل ۲ ب می‌گردد.

نتایج به دست آمده از آزمون کوانتومتری نمونه تیوب که در جدول ۲ ارایه شده نشان می‌دهد که به غیر از عنصر منگنز، سایر عناصر موجود در آلیاژ تیوب با ترکیب فولاد کربنی در استاندارد ASTM A179 مطابقت دارند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود مقدار عنصر منگنز نیز تنها ۰/۰۳ درصد وزنی بیشتر از مقدار ذکر شده در استاندارد بوده و تقریباً در حداکثر مقدار مجاز خود قرار دارد. همچنین تصویر ریزساختار این آلیاژ که توسط میکروسکوپ نوری تهیه شده و در شکل ۳ الف نشان داده شده است نشان‌دهنده

آن است که این تیوب دارای ساختار نرمال با دانه‌های پرلیت در درون زمینه فریت می‌باشد و با توجه به مقدار کم کربن در آلیاژ (۰/۱ درصد)، فاز پرلیت در ریز ساختار به مقدار کم مشاهده می‌شود. همچنین هیچ نشانه‌ای از وجود رسوبات یا آخال‌ها در درون ساختار دیده نمی‌شود. از شکل ظاهری خوردگی در شکل ۳ ب مشخص است که خوردگی از سطح خارجی تیوب شروع شده و پس از گسترش و نفوذ به سمت سطح داخلی باعث ایجاد سوراخ در تیوب شده است. سطح مقطع تیوب در محل سوراخ شدگی نیز در شکل ۳ ج نشان داده شده است.

۳-۲- تعیین ترکیب شیمیایی آلیاژ تیوب‌ها

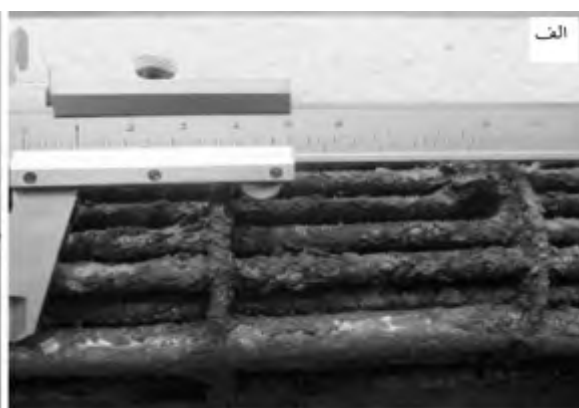
جهت حصول اطمینان از انطباق ترکیب شیمیایی تیوب‌ها با استاندارد مربوطه، ترکیب شیمیایی نمونه‌ای از تیوب‌ها از طریق روش اسپکترومتری نشری (کوانتومتری) و بر اساس استاندارد ASTM E415-08 تعیین گردید.

۴-۲- بررسی‌های میکروسکوپی

به منظور بررسی ریزساختار تیوب، حصول اطمینان از عدم وجود نقص‌های میکروساختاری و بررسی شرایط خوردگی در نقاط سوراخ شده، سطح مقطع و سطح خارجی تیوب تحت بررسی‌های متالوگرافی قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌های برش داده شده از تیوب بعد از پرداخت مکانیکی تحت حکاکی شیمیایی با محلول نایتال قرار گرفتند. این نمونه‌ها سپس توسط میکروسکوپ نوری Olympus مدل BH و میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN مدل VEGA3 مورد مطالعه قرار گرفت.

۵-۲- ارزیابی الکتروشیمیایی

به منظور بررسی شرایط خوردندگی محلول خنک کننده پیشنهادی توسط سازنده مبدل، نمونه‌ای از این محلول گرفته شده و خوردگی فولاد کربنی و مس در آن توسط روش پلاریزاسیون خطی مطابق استاندارد ASTM G3 توسط یک دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات ACM Instruments مدل Field Machine مورد بررسی قرار گرفت. همچنین خوردگی این دو آلیاژ در آب مقطر فاقد ضد یخ نیز تحت آزمون قرار گرفت. با توجه به دمای گاز موجود در درون تیوب‌ها و دمای سیال خنک کننده ورودی، دمای محلول جهت اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در نظر



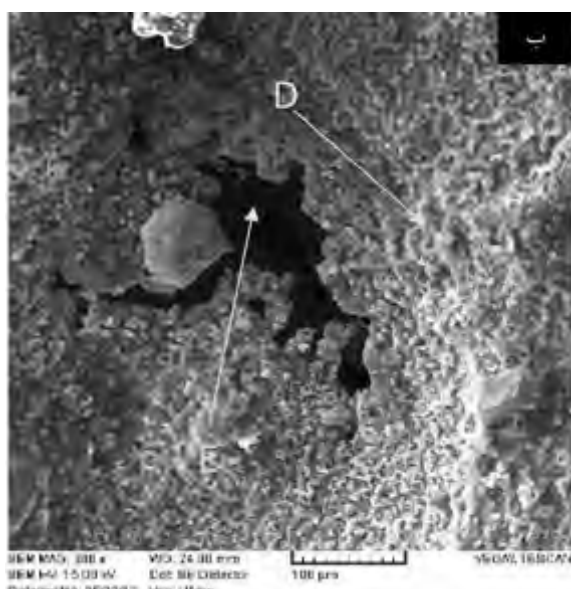
شکل ۲- تصویر (الف) سطح خارجی تیوب با محصولات خوردگی و (ب) پس از حذف محصولات خوردگی.

جدول ۲- نتایج آزمون کوانتومتری تیوب بریده شده همراه با مقادیر نرمال عناصر آلیاژی

Fe	S(max.)	P(max.)	Mn	C	
باقیمانده	۰/۰۱۳	۰/۰۳۰	۰/۶۶	۰/۱۰	تیوب بریده شده
باقیمانده	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۲۷-۰/۶۳	۰/۰۶-۰/۱۸	فولاد کربنی مطابق با استاندارد ASTM A179



شکل ۳- تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری که نشان دهنده (الف) ریز ساختار تیوب، (ب) خوردگی موضعی اتفاق افتاده در سطح خارجی تیوب و (ج) مورفولوژی خوردگی در یکی از محل‌های سوراخ شده می‌باشد.



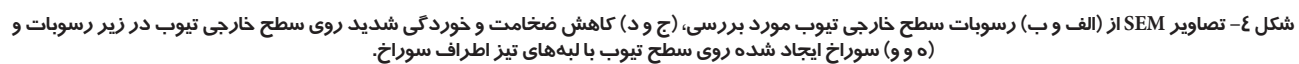
تصویر تهیه شده از سطح مقطع نمونه توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی که در شکل ۴ الف و ب نشان داده شده وجود لایه نسبتاً ضخیمی از محصولات خوردگی با ضخامت تقریبی حدود ۳۵۰ میکرومتر را نشان می‌دهد و نشان‌دهنده آن است که محلول خنک‌کننده‌ی مورد استفاده دارای خواص خوردندگی قابل توجهی بر روی تیوب‌های مبدل بوده است. سطح خارجی تیوب‌ها در زیر این رسوبات همان‌طور که در شکل‌های ۴ ج و د دیده می‌شود به شدت دچار خوردگی شده است که منجر به کاهش ضخامت تیوب‌ها شده و تا مرز سوراخ شدن پیش رفته است. شکل ۴ ه و و تصاویری از یکی از سوراخ‌های ایجاد شده بر روی سطح تیوب و لبه‌های این سوراخ را نشان می‌دهد.

جهت بررسی ترکیب شیمیایی رسوب در نقاط مختلف روی تیوب از آنالیز توسط EDS استفاده گردید. شکل ۵ الف و ب تصویر SEM مربوط به رسوبات روی سطح تیوب در نقاط مختلف و محل‌های انجام آنالیز EDS را نشان می‌دهد. نتایج آنالیز نقاط مختلف که در جدول ۳ ارائه شده نشان می‌دهد که عناصر اصلی تشکیل دهنده رسوب در نقاط مختلف آهن، اکسیژن و مس می‌باشد.

جدول ۳- آنالیز شیمیایی به دست آمده توسط SEM-EDS در نقاط مختلف نشان داده شده در شکل ۵ بر حسب درصد وزنی

عنصر	نقطه A	نقطه B	نقطه C	نقطه D	نقطه E
اکسیژن	۱۹/۹	۱۲/۳	۳/۳	۲۹/۹	۳۴/۲
سیلیسیم	۰/۷۶	-	-	-	۰/۰۵
منگنز	۰/۸۰	-	۰/۳۷	۰/۳۸	۰/۵۳
آهن	۷۷/۵	۸۳/۱	۹۵/۷	۶۶/۳	۶۴/۴
مس	۱/۰۳	۴/۵	۰/۶۲	۳/۴	۰/۸۱

شکل ۵- تصاویر SEM از رسوبات روی سطح تیوب مورد بررسی و محل‌های انجام آنالیز EDS، (الف) سطح خارجی رسوب و (ب) لایه‌های داخلی رسوب.



درون مبدل انتقال یافته باشد و سپس با گرفتن الکترون از تیوب‌های با جنس فولاد کربنی، به صورت فلز مس در روی سطح لوله‌های مبدل رسوب نموده و منجر به تشدید خوردگی تیوب‌های مبدل از طریق ایجاد پیل‌های گالوانیکی موضعی شده باشد.

در شکل ۶ مخزن مورد استفاده جهت ذخیره سیال خنک کننده جبرانی در کولر هوایی نیز نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود این مخزن به صورت باز و در تماس با هوا می‌باشد که در طراحی آن هیچ گونه شیری جهت قطع ارتباط آن با سیال خنک کننده چرخشی پیش‌بینی نشده است بنابراین اکسیژن به طور پیوسته وارد سیال چرخشی می‌شود. دمای این سیال در اثر تبادل با گاز داغ درون تیوب‌ها به بیش از ۷۰ درجه سانتیگراد می‌رسد که در این دما و با حضور اکسیژن باعث خوردگی تیوب‌ها و تشکیل اکسیدهای آهن می‌شود. همچنین در این شرایط احتمال تخریب ضد یخ (حاوی گلیکول به همراه بازدارنده خوردگی) موجود در سیال خنک کننده در حضور اکسیژن وجود دارد که تخریب اتیلن گلیکول و تشکیل احتمالی ترکیبات اسیدی حاصل از اکسیداسیون آن می‌تواند باعث تشدید خوردگی گردد [۱۱، ۱۲]. با توجه به اظهارات کارفرما مبنی بر تخلیه تمام سیال چرخشی سیستم، امکان نمونه‌گیری و آنالیز این سیال که می‌توانست در نتیجه‌گیری‌های نهایی موثر باشد میسر نگردید.

برای بررسی دقیق‌تر این رسوبات، نمونه‌ای از آنها جهت انجام آنالیزهای XRF و XRD از سطح خارجی تیوب جمع‌آوری شد. نتایج آنالیز XRF این رسوبات که در جدول ۴ آورده شده است نشان داد که نمونه رسوب دارای ۵۶ درصد آهن و حدود ۵ درصد مس می‌باشد. نتایج آنالیز XRD نیز نشان داد که نمونه رسوب دارای ترکیبات مس، مگنتیت (Fe_3O_4) و هماتیت (Fe_2O_3) می‌باشد. با توجه به شناسایی اکسیدهای آهن در محصولات خوردگی، می‌توان نتیجه گرفت که اکسیژن به داخل سیستم نفوذ داشته است. از طرف دیگر از آنجایی که در ترکیب شیمیایی آلیاژ تیوب اثری از عنصر مس مشاهده نمی‌شود، اما بر روی سطح برخی از تیوب‌ها و همچنین محصولات خوردگی عنصر مس به مقدار قابل توجهی وجود دارد، مشخص می‌شود در برخی از بخش‌های سیستم بسته در حال کار از آلیاژ مس استفاده شده که دچار خوردگی شده است. شکل ۶ تصویر کولر هوایی مورد استفاده برای خنک سازی سیال خنک کننده گرم شده برگشتی را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود لوله‌های خنک کننده این کولر هوایی همگی از جنس مس می‌باشند. با توجه به مشاهده مس در رسوبات روی سطح تیوب‌ها احتمال می‌رود که بخشی از مس خورده شده در این لوله‌ها به صورت یون‌های مس توسط سیال خنک کننده چرخشی به

جدول ۴- نتایج آنالیز رسوب روی سطح خارجی تیوب توسط روش XRF بر حسب درصد وزنی

L.O.I.*	K	Zn	Cu	Fe	Mn	Ca	Cl	S	P	Si	Al	Mg	عنصر نمونه
۱۱/۹	۰/۰۳۹	۱/۶	۵/۴	۵۶/۴	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۶۲	-	۰/۰۲۵	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۳۹	رسوب روی سطح تیوب

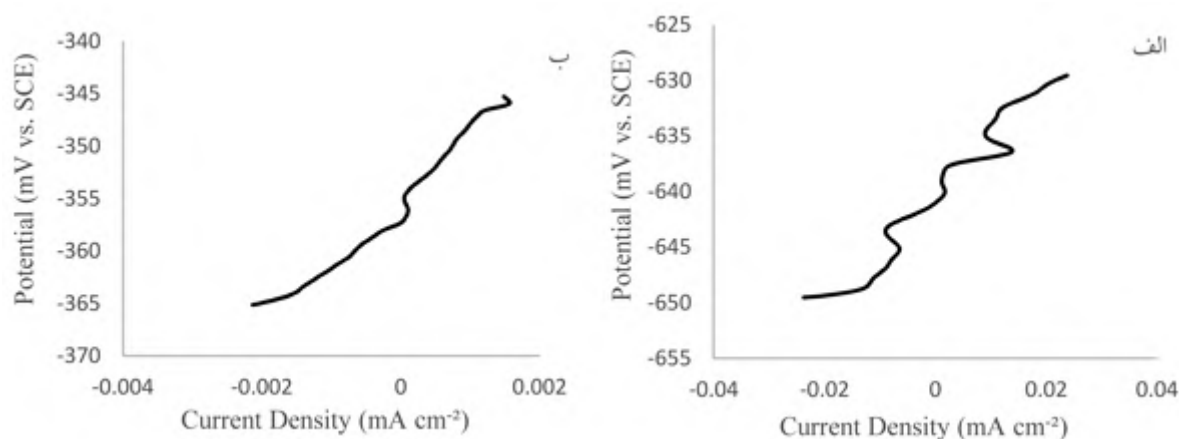
*: Loss on Ignition



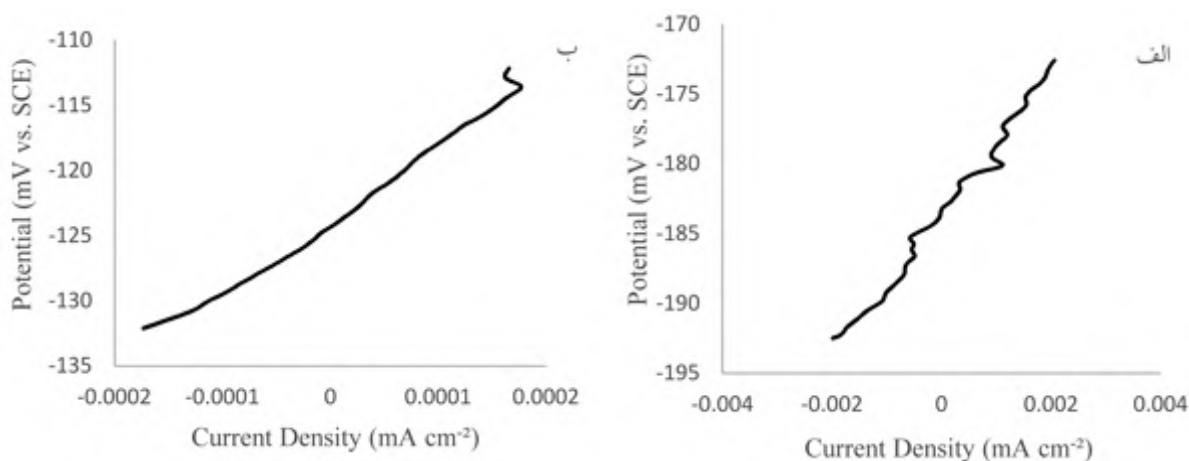
شکل ۶- تصویر کولر هوایی مورد استفاده با لوله‌های مسی جهت خنک کردن سیال گرم شده برگشتی و مخزن جبرانی سیال خنک کننده.

پتانسیل مدار باز نمونه‌های فولاد کربنی و مس در محلول ضد یخ تجاری به سمت مقادیر مثبت جابجا شده و مقادیر دانسیته جریان هر دوی آنها نسبت به آب مقطر فاقد ضد یخ کاهش می‌یابد که نشان دهنده کاهش نرخ خوردگی می‌باشد. از طرف دیگر مقادیر نرخ خوردگی محاسبه شده از این نمودارها برای فولاد کربنی (حدود ۲۰ mpy یا ۰/۵ میلی متر بر سال) و مس (۱/vmpy) در محلول آب مقطر فاقد ضد یخ، نشان می‌دهد که اگرچه نرخ خوردگی فولاد کربنی در این سیال مقدار بالایی می‌باشد ولی در مورد مس این مقدار کم بوده و با توجه به مشاهده مقادیر قابل توجهی از مس در رسوبات روی سطح خارجی تیوب‌های مبدل احتمال ایجاد تخریب

به منظور بررسی شرایط خوردگی سیال خنک کننده پیشنهاد شده توسط سازنده مبدل، نمونه‌ای از آن که حاوی محلول ضد یخ تجاری بود، گرفته شد و خوردگی فولاد کربنی و مس در آن توسط روش پلاریزاسیون خطی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با در نظر گرفتن احتمال استفاده از آب مقطر بدون ضد یخ به جای سیال پیشنهاد شده توسط سازنده مبدل، خوردگی این دو آلیاژ در آب مقطر فاقد ضد یخ نیز بررسی گردید. نمودارهای پلاریزاسیون خطی به دست آمده در شکل‌های ۷ و ۸ و نتایج حاصل در جدول ۵ نشان داده شده است. همان گونه که در نمودار شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود مقادیر



شکل ۷- نمودارهای پلاریزاسیون خطی فولاد کربنی در (الف) آب مقطر فاقد ضد یخ و (ب) محلول ضد یخ تجاری.



شکل ۸- نمودارهای پلاریزاسیون خطی مس در (الف) آب مقطر فاقد ضد یخ و (ب) محلول ضد یخ تجاری.

جدول ۵- نرخ خوردگی محاسبه شده توسط روش LPR برای خوردگی فولاد کربنی و مس در دو محلول مختلف

محلول		نرخ خوردگی محاسبه شده بر حسب mpy
محلول ضد یخ تجاری	فولاد کربنی	مس
	۱/۴	۰/۱۴
	۲۰/۵	۱/۷
آب مقطر فاقد ضد یخ		

در اثر استفاده از آب مقطر به جای سیال پیشنهادی کم می‌باشد. اما با توجه به اینکه پایه‌ی اولیه‌ی ترکیبات ضدیخ، گلیکول بوده که یک الکل دو عاملی می‌باشد و در دماهای بالا و در مجاورت اکسیژن اکسید شده و تشکیل اسید می‌دهد، لذا بسته بودن کامل سیستم باید توسط طراح در نظر گرفته شود. اما بررسی‌ها نشان داد اکسیژن از طریق مخزن آب جبرانی درون سیال نفوذ کرده و باعث اکسیداسیون گلیکول به اسیدهای کربوکسیلیک شده و با کاهش pH سیال، در حضور اکسیژن باعث افزایش نرخ خوردگی فولاد کربنی و مس شده است [۱۱، ۱۲].

نتیجه‌گیری

علل خوردگی و تخریب تیوب‌های یک مبدل حرارتی از جنس فولاد کربنی مربوط به سیستم خنک کننده یک کمپرسور افزایش دهنده فشار گاز با روش‌های مختلف بررسی و نتایج ذیل حاصل گردید:

- ۱- دلیل تخریب تیوب‌های این مبدل وقوع خوردگی از سطح خارجی تیوب‌ها که در تماس با سیال خنک کننده بوده می‌باشد. این خوردگی با گسترش به سمت سطح داخلی، موجب ایجاد سوراخ در تیوب‌ها شده است.
- ۲- آنالیزهای کوانتومتری و متالوگرافی به منظور بررسی ریز ساختار تیوب توسط میکروسکوپ نوری نشان داد که تیوب‌های خورده شده با استاندارد مربوطه مطابقت داشته و هیچ نشانه‌ای از وجود رسوبات، آخال‌ها یا هرگونه نقص در ریزساختار مشاهده نگردید.
- ۳- با توجه به نتایج به دست آمده از آزمون LPR، در صورت استفاده از محلول ضدیخ تجاری پیشنهاد شده توسط شرکت سازنده مبدل، و به شرط بسته بودن سیستم و عدم نفوذ اکسیژن به درون آن، خوردگی خاصی روی تیوب‌ها مشاهده نگردید.
- ۴- نتایج بررسی‌ها نشان داد، به دلیل ضعف در طراحی و آب بندی نبودن مخزن حاوی سیال خنک کننده جبرانی، اکسیژن به طور پیوسته در آن حل شده است. حضور این اکسیژن باعث اکسید شدن گلیکول موجود در ترکیب سیال خنک کننده در دمای درون مبدل شده و با ایجاد محصولات اسیدی حاصل از اکسیداسیون باعث بروز خوردگی شده است.
- ۵- علاوه بر خوردگی تیوب‌های فولاد کربنی، به دلیل خوردگی لوله‌های مسی به کار رفته در کولر هوایی در این شرایط، مقدار قابل ملاحظه‌ای از مس همراه با سایر محصولات خوردگی روی سطح تیوب‌ها رسوب نموده و باعث تشدید خوردگی تیوب‌های مبدل از طریق ایجاد پیل‌های گالوانیکی موضعی شده است.

مراجع

- [1] H. M. Herro, R. D. Port, The Nalco guide to cooling water system failure analysis, McGraw-Hill Inc., New York, 1993.
- [2] K.M. Deen, M.A. Virk, C.I. Haque, R. Ahmad, I.H. Khan, Failure investigation of heat exchanger plates due to pitting corrosion, Engineering Failure Analysis, Vol. 17, 2010, Pp. 886-893.
- [3] M.R. Khajavi, A.R. Abdolmaleki, N. Adibi, S. Mirfendereski, Failure analysis of bank front boiler tubes, Engineering Failure Analysis, Vol. 14, 2007, Pp. 731-738.
- [4] M. P. Jurinski, J. R. Scully, R. S. Lillard, Crevice corrosion of alloy 625 in chlorinated ASTM artificial ocean water, Corrosion, Vol. 50, 1994, Pp. 251-65.
- [5] S.R. Allahkaram, P. Zakersafae, S.A.M. Haghgoo, Failure analysis of heat exchanger tubes of four gas coolers, Engineering Failure Analysis, Vol. 18, 2011, Pp. 1108-1114.
- [6] F. Nasirpouri, A. Mostafaei, L. Fathyunes, R. Jafari, Assessment of localized corrosion in carbon steel tube-grade AISI 1045 used in output oil-gas separator vessel of desalination unit in oil refinery industry, Engineering Failure Analysis, Vol. 40, 2014, Pp. 75-88.
- [7] S. M. Hu, S. H. Wang, Z. G. Yang, Failure analysis on unexpected wall thinning of heat-exchange tubes in ammonia evaporators, Case Studies in Engineering Failure Analysis, Vol. 3, 2015, Pp. 52-61.
- [8] M.A. Virk, M.A. Butt, A. Chughtai, M. Ahmad, I.H. Khan, K.M. Deen, Failure analysis of heat exchanger fluid vapor phase vent lines in a Polyester plant, Engineering Failure Analysis, Vol. 17, 2010, Pp. 447-454.
- [9] I. J. Cotton, Refinery Boiler Feed Water Systems: Corrosion and Control, Material Performance, Vol. June, 2000, Pp. 46-57.
- [10] ASM Handbook, Corrosion, Vol. 13, 1990.
- [11] I. Manabe, A. Inubushi, Metal corrosion inhibitor, 1982, US Patent No. 4338209 A.
- [12] H. Yue, Y. Zhao, X. Ma, J. Gong, Ethylene glycol: properties, synthesis, and applications, Chemical Society Reviews, Vol. 41, 2012, Pp. 4218-4244.