

تجزیه و تحلیل علل خوردگی تیوب در اکونومایزر سیستم تولید بخار

اکرم نوری دلاور^{۱*}، محسن صبوری^۱، امیر پاشا^۱، مهدی جوانمردی^۲

۱. کارشناسی ارشد مهندسی خوردگی و حفاظت فلزات، گروه پژوهش خوردگی فلزات، پژوهشکده حفاظت صنعتی، پژوهشگاه

صنعت نفت، تهران، ایران

۲. شرکت ملی نفت ایران، ایران

دریافت: ۹۳/۴/۱۸ پذیرش: ۹۳/۱۱/۱

چکیده

خوردگی در سیستم‌های تولید بخار باعث ایجاد مشکلات زیادی در واحدهای صنعتی می‌شود. اکونومایزر و گرم‌کننده آب تغذیه اولین مناطقی هستند که در یک سیستم تولید بخار در حال کار دچار خوردگی می‌شود. اکونومایزر به دلیل استفاده از انرژی گاز در حال خروج از سیستم بویلر، عاملی کلیدی در افزایش بهره‌وری حرارتی بویلر است. بروز خوردگی باعث کاهش بهره‌وری بویلر می‌شود. عموماً خوردگی در این تجهیزات در اثر ورود گاز اکسیژن، دی‌اکسیدکربن و آمونیاک رخ می‌دهد. در این تحقیق دلایل خوردگی یک نمونه تیوب فین‌دار اکونومایزر با استفاده از آنالیز شیمیایی تیوب و فین‌های آن، آنالیز شیمیایی محصولات خوردگی با روش‌های XRD و XRF، ارتباط بین مورفولوژی خوردگی و نتایج آنالیز رسوبات بررسی شد. همچنین، اثر کاهش ضخامت تیوب بر استحکام مکانیکی آن در شرایط عملیاتی مورد مطالعه قرار گرفت. طبق نتایج، اکسیژن عامل اصلی خوردگی بوده است. همچنین علیرغم کاهش ضخامت تیوب در اثر خوردگی، تیوب از استحکام مکانیکی کافی در برابر فشارهای داخلی برخوردار است.

واژگان کلیدی: سیستم‌های تولید بخار، اکونومایزر، خوردگی، استحکام مکانیکی

مقدمه

سیستم‌های تولید بخار معمولی شامل بخش پیش - بویلر^۱ (هیترهای هوازدا، لوله‌کشی، پمپ‌ها، هیترهای مرحله‌ای و اکونومایزر)، بخش تولیدکننده‌ی بخار (شامل بویلر، سوپرهیترها و ری‌هیترها)، بخش بعد از

*nouria@ripi.ir
¹pre-boiler
 FARAYANDNO

تولیدکننده‌ی بخار (شامل تجهیزات فرآیندی، لوله‌های بخار و تله‌های کندانس) و بخش کندانس (شامل لوله‌ها، فلاش تانک‌ها، پمپ‌ها و تانک‌های ذخیره‌ی کندانس) است [۱].

خوردگی در سیستم‌های تولید بخار باعث ایجاد مشکلات زیادی در پالایشگاه‌ها، واحدهای گاز و پتروشیمی می‌شود. خوردگی در بویلرها تابعی از غلظت اکسیژن، دی اکسید کربن و آمونیاک و نحوه کنترل این گونه‌ها و در برخی موارد ناشی از وجود آنیون‌های هیدروکسید و کلراید یا غلظت بالای مواد شیمیایی چلانت در آب بویلر است. به هر حال، در سیستم‌های پیشرفته‌تر تولید بخار، معمولاً کنترل گازهای محلول در آب مانند اکسیژن و دی‌اکسید کربن منجر به کاهش خوردگی دیواره‌ی داخلی تیوب‌های مورد استفاده در سیستم‌های تولید بخار می‌شود [۱]. خوردگی حفره‌ای، تردی قلیایی، گوجینگ بازی، حملات چلانتی و تردی هیدروژنی. متداول‌ترین مکانیزم‌های خوردگی در سیستم‌های تولید بخار محسوب می‌شود.

نتایج بسیاری از تحقیقات نشان می‌دهد کنترل خوردگی در بویلر به میزان زیاد تحت تأثیر کیفیت آب تغذیه بویلر قرار دارد [۲-۴]. اگر مقدار pH و شرایط رسوب‌گذاری به خوبی کنترل گردد، اکسیژن عامل اصلی خوردگی پیش از بویلر و داخل بویلر خواهد بود. خوردگی اکسیژنی و محصولات خوردگی در بویلر باعث تحمیل هزینه‌ی سنگین نگهداری بویلر می‌شود. خرابی تجهیزات گران قیمت و رسوب محصولات خوردگی منجر به کاهش بازدهی سیستم بویلر می‌شود. بنابراین پایش و کنترل غلظت اکسیژن در بویلر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در عمل به منظور جلوگیری از وقوع خوردگی اکسیژنی در بویلر، غلظت اکسیژن در آب بویلر باید به چند ppb تقلیل یابد و در این مقادیر کم کنترل شود.

اکونومایزر و گرم‌کننده آب تغذیه اولین مناطقی هستند که در یک سیستم در حال کار دچار خوردگی اکسیژنی می‌شود. در مواردی که مقدار اکسیژن محلول در آب زیاد باشد، خوردگی اکسیژنی ممکن است قسمت‌های دیگر سیستم بویلر را نیز تحت تأثیر قرار دهد. در اکثر موارد، خسارات ناشی از خوردگی اکسیژنی حتی اگر مقدار اکسیژن در یک محدوده زمانی کوتاه از حد مجاز فراتر رفته باشد بسیار زیاد است [۵].

اکونومایزر به دلیل استفاده از انرژی گاز در حال خروج از سیستم بویلر عاملی کلیدی در افزایش بهره‌وری حرارتی بویلر است. در اکونومایزر فرآیند پایش‌گرماپیش آب تغذیه بویلر انجام می‌شود. همچنین اکونومایزرها پتانسیل شوک حرارتی و نوسانات شدید دمای آب ورودی به درام یا واتروال‌ها را کاهش می‌دهد. در اکونومایزرها ضریب انتقال حرارت در سمت گاز بسیار کم‌تر از سمت آب است که برای جبران این مسأله، در تیوب‌های فین‌دار در اکونومایزرها استفاده می‌شود. هدف نهایی از طراحی یک اکونومایزر رسیدن به انتقال حرارت مورد نظر با حداقل هزینه است [۶].



خوردگی و شکست تیوب‌های اکونومایزر (مشابه سایر تجهیزات مورد استفاده در سیستم بویلر) به دو دسته سمت آب^۱ و سمت شعله^۲ تقسیم‌بندی می‌شود [۷]. البته عمده مشکلات خوردگی در سمت آب مشاهده می‌شود. به طور کلی سایش توسط جریان گاز، خوردگی در آب با دمای پایین، خوردگی خستگی و خوردگی حفره‌ای ناشی از وجود اکسیژن عمده‌ترین عوامل شکست تیوب‌های اکونومایزر است [۶]. زمانی که فولاد در معرض آب حاوی اکسیژن محلول قرار می‌گیرد واکنش (۱) انجام می‌شود [۵].



در یک سیستم بویلر در حال کار، به راحتی می‌توان این نوع خوردگی را با کاهش غلظت اکسیژن محلول در آب ورودی به سیستم، کنترل کرد. اما برخی اوقات وجود اکسیژن محلول در اثر عملکرد نادرست سیستم هوازدا، نامناسب بودن مواد شیمیایی به کار رفته جهت حذف اکسیژن یا نشت هوا به درون سیستم باعث بروز خوردگی اکسیژنی می‌شود [۵].

با توجه به فشار عملیاتی بالای بویلر، تنها راه ورود اکسیژن از طریق آب تغذیه خواهد بود. اکسیژن‌زدایی اولیه‌ی آب تغذیه توسط هوازداهای مکانیکی انجام می‌شود. در این مرحله، آب تغذیه در تماس با بخار قرار گرفته و گازهای محلول در آن جدا و همراه بخار خارج می‌شود. هوازداهای مدرن باید توانایی کاهش مقدار اکسیژن محلول در آب به مقادیر کم‌تر از ۱۰ ppb را داشته باشد. در ادامه مواد شیمیایی اکسیژن‌زدا برای کاهش بیش‌تر غلظت اکسیژن محلول به تزریق می‌شود. فرآیند حذف مکانیکی اکسیژن حتماً باید قبل از حذف آن توسط مواد شیمیایی انجام گیرد. در واقع بخش اعظم اکسیژن‌زدایی آب با روش‌های مکانیکی انجام می‌شود [۱].

با توجه به این‌که عملکرد اکسیژن‌زداها نیاز به گذشت زمان دارد، لازم است یک فاصله زمانی بین تزریق مواد اکسیژن‌زدا و مصرف آب در بویلر وجود داشته باشد. به همین دلیل برای آن‌که ماکزیمم مدت زمان برای عملکرد اکسیژن‌زدا فراهم شود، تزریق آن باید بلافاصله بعد از هوازدایی مکانیکی باشد. معمولاً تزریق در تانک ذخیره‌ی هوازدا انجام می‌گیرد. علاوه بر این، استفاده از مواد شیمیایی با قابلیت کاتالیزوری در حذف اکسیژن برای کاهش زمان عملکرد آن پیشنهاد می‌گردد. اکسیژن‌زداها در شکل کاتالیست‌شده (نمک‌های کبالت و منگنز به طور معمول برای سولفیت و کاتالیست‌های ارگانیک معمولاً برای اکسیژن‌زداهای فرار) استفاده می‌شود [۱].

¹water side

²fire side

در این تحقیق دلایل تخریب یک نمونه تیوب فین دار مورد استفاده در یک سیستم تولید بخار پالایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. شناسایی آلیاژ قطعه و ارزیابی متالورژیکی آن، بررسی وضعیت ظاهری تیوب، مشاهده مورفولوژی خوردگی و تحلیل آن، آنالیز شیمیایی محصولات خوردگی و بررسی ارتباط بین مشاهدات ظاهری و نتایج آنالیز رسوبات و در انتها بررسی استحکام تیوب در برابر فشار داخلی بویلر فعالیت‌های انجام شده در این راستا بوده است.

روش کار

شناسایی آلیاژ قطعه و ارزیابی‌های متالورژیکی

در اولین گام، یک قطعه از تیوب مورد نظر برش داده شد و پس از تمیزکاری و زدایش رسوب به منظور شناسایی ترکیب شیمیایی، با روش اسپکتروسکوپی نشر نوری (کوانتومتری) آنالیز شد. آنالیز کوانتومتری روی بدنه تیوب و روی پره متصل به آن توسط دستگاه PMI Master PLUS به صورت جداگانه انجام شد. همچنین برای بررسی متالورژیکی تیوب و پره متصل به آن، یک قطعه از هر یک برش داده شد و پس از مانت گرم و تهیه نمونه متالوگرافی، مورد صیقل کاری مکانیکی و پرداخت نهایی قرار گرفت. برای رؤیت ریزساختار، نمونه‌ها با محلول ۲٪ نایتال اچ شد و در ادامه با میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی ظاهری تیوب و آنالیز رسوبات

مورفولوژی خوردگی تیوب با مشاهده سطوح خورده شده مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این، برای شناسایی ترکیب شیمیایی رسوبات خوردگی در سطح داخلی تیوب از روش‌های XRD و XRF استفاده شد. برای انجام آنالیز XRD این منظور از دستگاه GNR-MPD3000 ساخت کشور ایتالیا با منبع تولید Cu تحت زاویه ۴-۷۰ درجه (2θ) و گام ۰/۰۵ درجه استفاده شد. جهت انجام آنالیز XRF نیز از دستگاه ARL8410 تولید کشور آمریکا به روش تهیه قرص استفاده گردید.

به منظور مشاهده وضعیت خوردگی سطح داخلی تیوب، عملیات اسیدشویی روی تیوب انجام شد. محلول اسیدشویی شامل ۵۰ درصد حجمی آب و ۵۰ درصد حجمی اسید کلریدریک بود. برای جلوگیری از خوردگی سطوح تیوب در حین فرآیند اسید شویی، ماده بازدارنده خوردگی هگزامتیل تترا آمین با غلظت ۶ گرم بر لیتر به محلول اسیدشویی افزوده شد. اسیدشویی در دمای محیط انجام شد.



بررسی‌های تنشی

با توجه به این‌که تیوب مورد نظر هنگام سرویس‌دهی تحت شرایط فشار بالا قرار دارد، تعیین تنش‌های اعمالی به تیوب و بررسی استحکام آن ضروری است. این موضوع از این جهت حائز اهمیت است که تیوب مورد نظر در اثر خوردگی دچار کاهش ضخامت شده که می‌تواند منجر به افت استحکام تیوب شده باشد. برای بررسی استحکام آلیاژ تیوب و تعیین ماکزیمم تنش اعمالی به آن رابطه (۱) مورد استفاده قرار گرفت: [۸].

$$\sigma = \frac{p}{2} \left(\frac{D_0}{\delta} - 1 \right) \quad (1)$$

پارامترها در رابطه (۱) به شرح ذیل است:

σ : تنش اعمالی بر دیواره تیوب بر حسب مگاپاسکال

D_0 : قطر خارجی تیوب بر حسب میلی‌متر

p : فشار بر حسب مگاپاسکال

δ : ضخامت تیوب بر حسب میلی‌متر

مطابق رابطه ۱ مقدار تنش به صورت زیر محاسبه گردید:

$$\sigma = \frac{4.14}{2} \left(\frac{50.8}{2.5} - 1 \right) = 40 \text{ MPa} = 5800 \text{ psi}$$

بحث و بررسی نتایج

در جدول ۱ نتایج آنالیز شیمیایی آلیاژ تیوب و پره آن که با روش اسپکترومتری نشری (کوانتومتری) انجام شده، ارائه شده است. نتایج آنالیز کوانتومتری نشان می‌دهد تیوب و پره متصل به آن از جنس فولاد کربنی ساده است. همچنین ترکیب شیمیایی آلیاژ تیوب و پره متصل به آن با ترکیب شیمیایی ذکر شده برای آلیاژ ASME SA192 انطباق دارد.

جدول ۱. نتایج آنالیز کوانتومتری تیوب و پره متصل به آن بر حسب درصد وزنی

عنصر نمونه	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S	Fe
تیوب	0.11	0.11	0.55	0.12	0.03	0.08	0.015	0.012	باقیمانده
پره	0.06	0.01	0.26	0.02	0.02	0.01	0.02	0.018	باقیمانده
فولاد کربنی ASME SA192	0.06-0.18	0.25 Max	0.27-0.63	-	-	-	0.035 Max	0.035 Max	باقیمانده

در شکل ۱ تصویر تیوب مورد نظر ارائه شده است. آثار خوردگی شدید روی سطح خارجی تیوب به وضوح قابل مشاهده است.



شکل ۱. تصویر تیوب اکونومایز که دچار خوردگی شده است

در شکل ۲ تصویر سطح داخلی تیوب پس از برش طولی تیوب ارائه شده است. محصولات ناپیوسته خوردگی به رنگ قرمز مایل به قهوه‌ای روی سطوح داخلی تیوب مشاهده می‌شود.



شکل ۲. تصویر سطح داخلی تیوب اکونومایز و رسوبات خوردگی تشکیل شده روی آن

با توجه به این که خوردگی از سطح داخلی تیوب شروع شده و به سطح خارجی آن راه یافته، آنالیز شیمیایی رسوب سطح داخلی تیوب به منظور درک بهتر پدیده خوردگی آن ضروری است. بر این اساس آنالیزهای XRD و XRF روی نمونه رسوبات سطح داخلی تیوب صورت گرفت. در جدول ۲ نتایج آنالیز XRF نمونه رسوب مذکور ارائه شده است.

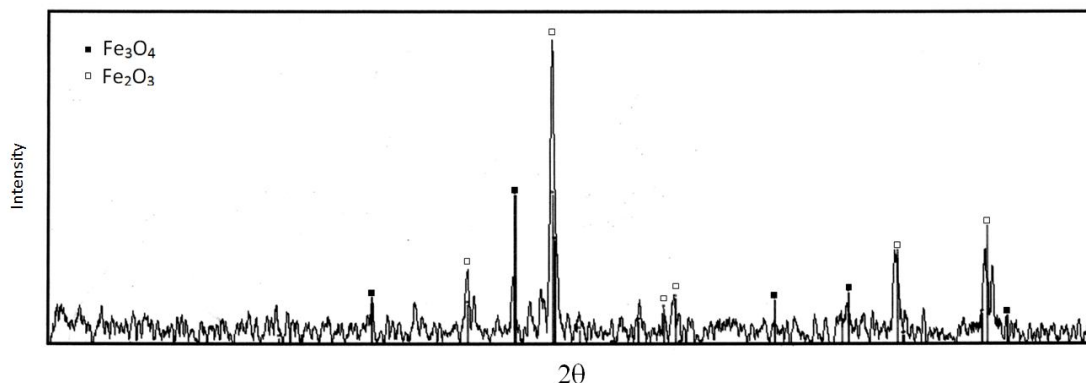
آنالیز XRF حضور عناصر Fe, P, Si, Mg, Al, Ca, S و Cu را در رسوب نشان می‌دهد. آهن عمده‌ترین عنصر شناسایی شده در ترکیب رسوب است. سایر عناصر به مقدار بسیار جزئی در ترکیب آن وجود دارد که منشا آنها می‌تواند آب ورودی به سیستم تولید بخار باشد.

جدول ۲. نتایج آنالیز XRF رسوب تشکیل شده بر روی سطح داخلی تیوب اکونومایزر

CuO	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	ترکیب
۰/۱۴	۰/۲۴	۰/۴۵	۰/۷۵	۰/۲۱	۱/۱	۰/۸۳	۹۶/۳	درصد وزنی*

* آنالیز به صورت نیمه کمی انجام شده است.

طیف XRD محصولات خوردگی سطح داخلی تیوب، تشکیل دو گونه اکسید آهن هماتیت و مگنتیت بر سطح داخلی تیوب را نشان می‌دهد (شکل ۳).

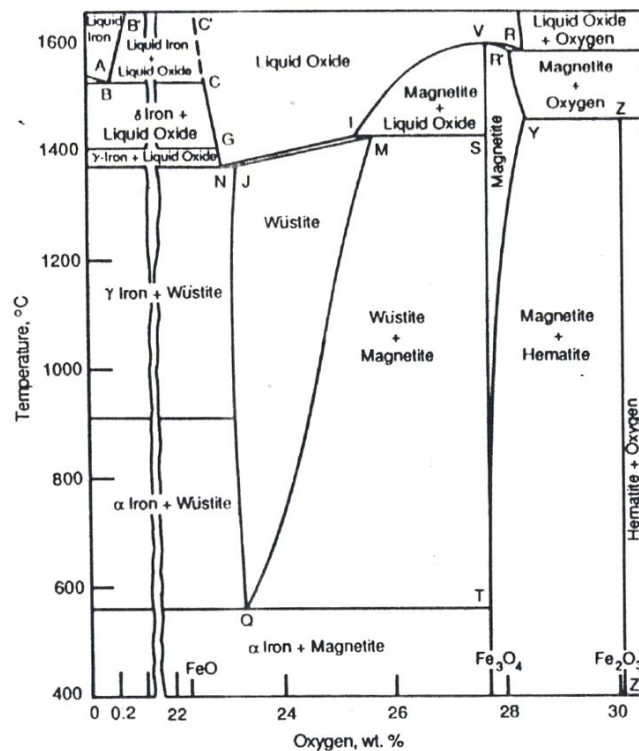


شکل ۳. طیف XRD نمونه رسوب سطح داخلی تیوب اکونومایزر

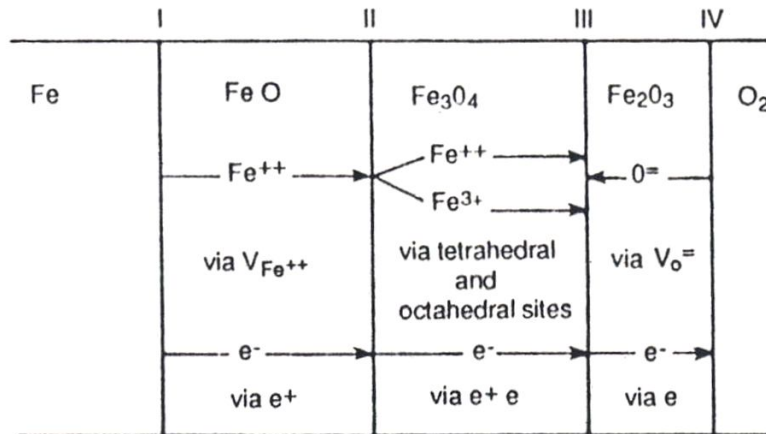
به منظور تشریح تشکیل لایه‌های اکسیدی بر سطح فولاد کربنی باید نمودارهای فازی آهن - اکسیژن را مورد توجه قرار داد (شکل ۴). پوسته‌ی تشکیل شده از اکسیداسیون آهن ترکیبی از سه اکسید مختلف به نام‌های FeO، Fe₃O₄ و Fe₂O₃ است. ترکیب شیمیایی پوسته اکسیدی با تغییر دما و فشار جزئی اکسیژن تغییر می‌کند. با توجه به شکل ۴، اکسید نوع FeO در دماهای کم‌تر از ۵۷۰ °C یا ۸۴۳ K تشکیل نمی‌شود.

لذا اکسید آهن در دماهای کم‌تر از 570°C ترکیبی از اکسیدهای نوع Fe_2O_3 و Fe_3O_4 است. در شکل ۴ همچنین مشاهده می‌شود که Fe_2O_3 در مقایسه با Fe_3O_4 در کسر مولی بیش‌تر اکسیژن تشکیل می‌شود. در شکل ۵ تصویر شماتیکی از توالی تشکیل لایه‌های اکسید آهن بر سطح آهن نیز ارائه شده است. همان‌طور که در تصویر شکل ۵ مشاهده می‌شود، رشد لایه‌های FeO و Fe_3O_4 با حرکت کاتیون‌های آهن و الکترون به سمت بیرون پوسته انجام می‌شود ولی در فرآیند رشد Fe_2O_3 علاوه بر انتقال کاتیون آهن و الکترون به سمت بیرون لایه، انتقال اکسیژن به درون لایه اکسیدی نیز در فرآیند رشد مؤثر است. به‌طور کلی تشکیل Fe_2O_3 نسبت به Fe_3O_4 نیاز به میزان اکسیژن بیش‌تری دارد. لذا وجود این اکسید در ترکیب شیمیایی محصولات خوردگی نقش مهم اکسیژن در بروز خوردگی را برجسته‌تر می‌کند [۹].

حضور لایه‌ی نازکی از Fe_3O_4 باعث محافظت سطح فولادهای کم‌آلیاژ در برابر خوردگی می‌شود. افزایش بیش از حد ضخامت این لایه باعث اختلال در کار سیستم بویلر می‌شود.



شکل ۴. نمودار محدوده دمایی تشکیل اکسیدهای آهن بر حسب مقدار اکسیژن [۹]



شکل ۵. تصویر شماتیکی از توالی تشکیل لایه‌های اکسید آهن [۹]

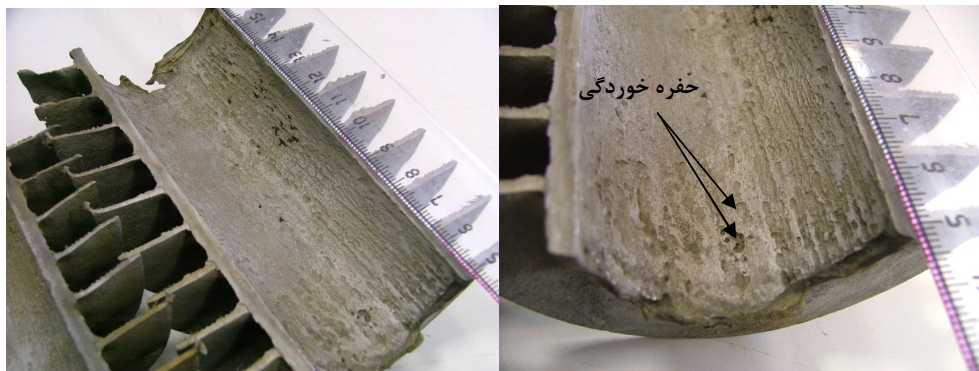
در شکل ۶ وضعیت ظاهری سطح داخلی تیوب پس از انجام عملیات اسیدشویی و زدایش رسوب ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، آلیاژ تیوب در زیر رسوبات به شدت دچار خوردگی حفره‌ای شده است. شدت خوردگی حفره‌ای در سایر قسمت‌های سطح که فاقد رسوب بوده کم‌تر بوده است. تصاویر میکروسکوپی لبه‌های تیزی برای حفره‌ها را نشان می‌دهد (شکل ۷). لبه‌های تیز این نوع حفره‌ها، مشخصه‌ی خوردگی حفره‌ای ناشی از وجود اکسیژن است [۵]. در واقع نتایج آنالیز XRD و مشاهدات ظاهری به وضوح نشان می‌دهد اکسیژن عامل مهم خوردگی حفره‌ای بوده است.

نقش اکسیژن در تشدید خوردگی و در نتیجه بروز خوردگی حفره‌ای زیر رسوبات به این شکل تشریح می‌شود که در زیر رسوبات به دلیل عدم دسترسی به فضای بیرون به مرور زمان غلظت اکسیژن در مقایسه با مناطقی که رسوب تشکیل نشده به شدت کاهش می‌یابد. در نتیجه فضای زیر رسوب در نقش آند و فضاهای اطراف به عنوان کاتد در پیل الکتروشیمیایی حاصل ایفای نقش می‌کند. در واقع سیستم با تشکیل پیل‌های غلظتی اکسیژن مواجه می‌شود که به دلیل اختلاف زیاد سطوح آندی و کاتدی (نسبت سطح کاتد به آند بزرگ)، خوردگی به صورت خوردگی حفره‌ای زیر رسوبات ظاهر می‌شود [۵].

با توجه به این‌که وجود رسوب روی دیواره‌ی تیوب‌ها به همراه تشکیل پیل غلظتی اکسیژن می‌تواند باعث تشدید خوردگی اکسیژنی در سیستم شود، به نظر می‌رسد اولین قدم در جهت کنترل خوردگی در سیستم مورد مطالعه، حذف رسوبات با انجام فرآیند اسیدشویی است [۵].

علاوه بر این، جهت ممانعت از خوردگی سطوح فولاد کربنی در حضور اکسیژن در مواقعی که سیستم در حال کار نیست، باید سطوح فولادی خشک نگه داشته شود. این کار را می‌توان با دمش هوای گرم یا تزریق

گاز نیتروژن انجام داد. روش دیگر محافظت از خوردگی تجهیزات بویلر این است که تجهیزات مزبور به صورت مرطوب در حضور مواد شیمیایی رویین‌کننده مانند هیدرازین یا سولفیت سدیم نگهداری شود. در صورت انتخاب روش سوم، باید دقت شود مواد شیمیایی مذکور با آلیاژهای مس در تماس نباشد و مواد شیمیایی غیرفرار در تجهیزاتی با عدم قابلیت تخلیه مانند سوپرهیترها وارد نشود [۵].



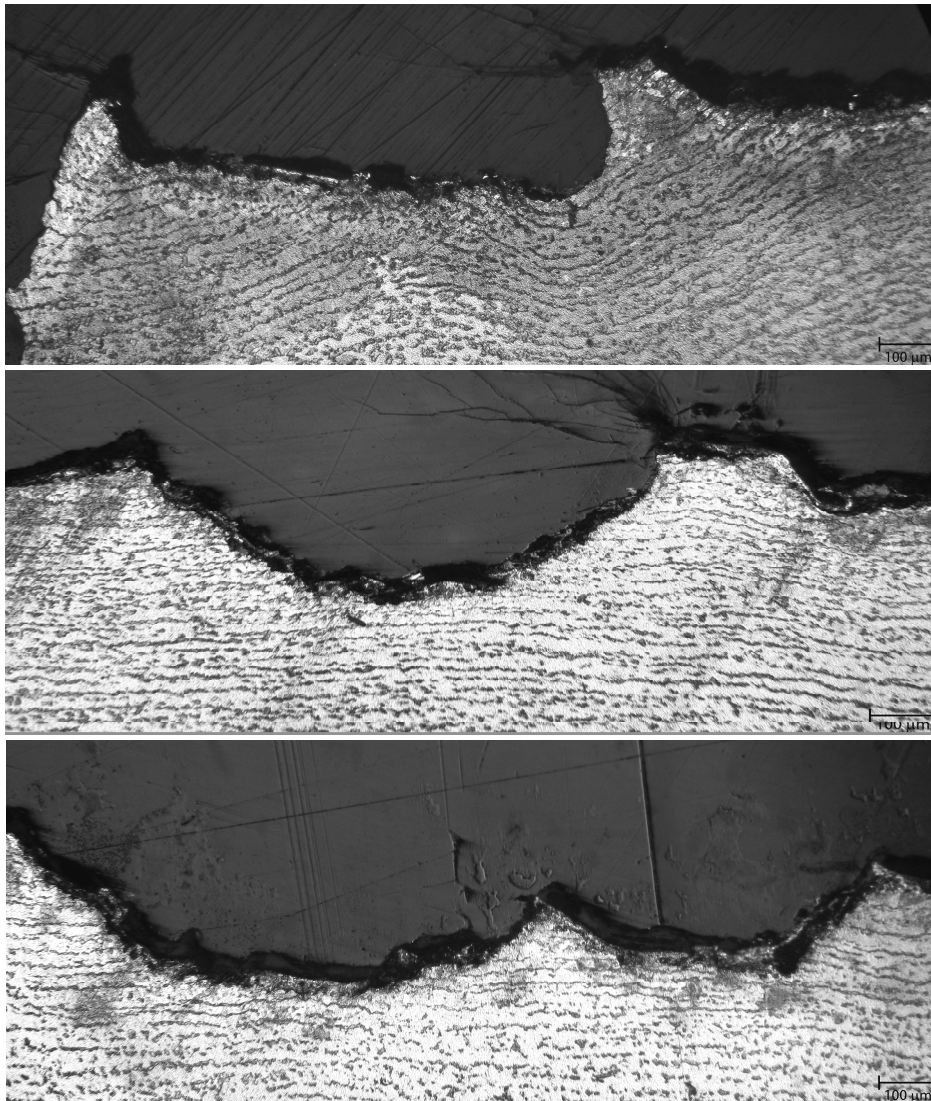
شکل ۶. تصویر سطح داخلی تیوب اکونومایزر پس از فرآیند اسیدشویی حاوی ۵۰ درصد حجمی آب، ۵۰ درصد حجمی اسید کلریدریک و هگزامتیل تترا آمین با غلظت ۶ گرم بر لیتر

زمانی که از روش مرطوب جهت نگهداری استفاده می‌شود، غلظت هیدرازین و یا هر ماده‌ی دیگری که استفاده می‌شود باید حداقل هفته‌ای یک بار پایش شود. همچنین محلول موجود در بویلر باید حداقل هفته‌ای یک بار به مدت ۲ تا ۴ ساعت چرخش داشته باشد. معمولاً غلظت باقیمانده‌ی هیدرازین باید بین ۲۰۰-۴۰۰ ppm در pH بین ۹/۵-۱۰/۵ نگهداری شود. همچنین باید متذکر شد که بویلر برای کار باید همیشه به خوبی با آب شرایطسازی شده پر شود و به هنگام خالی کردن، تحت فشار کمی مثبت، توسط گاز نیتروژن تخلیه شود تا از ورود هوا به درون آن جلوگیری شود [۱۱، ۱۰ و ۵].

در عمل، معمولاً خارج کردن سیستم بویلر از مدار کاری و یا ورود آن به مدار به سرعت انجام می‌شود که منجر به عدم حفاظت صحیح از آلیاژهای به کار رفته در سیستم در برابر خوردگی ناشی از نفوذ اکسیژن می‌گردد. در واقع نتیجه‌ی این کار افزایش خسارات شدید به بویلر و در نهایت طولانی شدن زمان خاموشی سیستم (Overhaul) و تعویض تیوب‌های بویلر خواهد بود.

با توجه به اینکه بخشی از ضخامت تیوب به دلیل بروز خوردگی حفره‌ای زیر رسوبی کاهش یافته، محاسبات مربوط به میزان تنش اعمالی به دیواره‌ی تیوب باید با توجه به ضخامت جدید انجام شود. برای محاسبه تنش اعمالی رابطه (۱) مورد توجه قرار گرفت. در رابطه (۱) با احتساب ضخامت دیواره تیوب در بدترین حالت به

میزان $2/5$ میلی‌متر، فشار کاری 600 psi و قطر خارجی $50/8$ میلی‌متر برای تیوب، تنش اعمالی به دیواره‌ی تیوب مقدار 5800 psi محاسبه می‌شود. بر اساس ASME SECII Part D ماکزیمم تنشی که آلیاژ SA 192 در دمای 153°C قادر به تحمل است حدود 11800 psi است. لذا تیوب در فشار کاری اکونومایزر به لحاظ مکانیکی مقاوم است. البته با توجه به اینکه میزان تنش اعمالی به تیوب به شدت تحت تأثیر ضخامت تیوب قرار دارد، کنترل خوردگی تیوب در ادامه کار بسیار ضروری است.



شکل ۷. تصویر سطح مقطع خوردگی حفره‌ای اتفاق افتاده در سطح داخلی تیوب اکونومایزر، محلول اچ ۲٪

نایتال، لبه‌های تیز حفره‌ها به وضوح قابل مشاهده هستند

نتیجه گیری

نتایج حاصل از بررسی تخریب تیوب نشان می‌دهد:

- محصولات خوردگی در سطح داخلی تیوب از نوع اکسید آهن می‌باشد که نشان‌دهنده نفوذ اکسیژن به درون سیستم است.
- روی سطح داخلی تیوب، خوردگی حفره‌ای ناشی از حضور اکسیژن حادث شده است.
- با وجود خوردگی و کاهش ضخامت ایجاد شده در تیوب مورد تحقیق، با فرض اینکه نمونه‌ی موردنظر از حادثترین قسمت سیستم انتخاب شده باشد، سیستم همچنان در برابر دما و فشار عملیاتی از استحکام کافی برخوردار است. البته با توجه به اینکه پارامتر ضخامت تأثیر مستقیم و زیادی در استحکام تیوب در برابر فشار و دمای عملیاتی دارد، کنترل خوردگی برای جلوگیری از کاهش ضخامت بسیار حائز اهمیت است.

پیشنهادات

با توجه به نتایج حاصل از آنالیز تخریب تیوب مورد نظر، به منظور جلوگیری از بروز تخریب مشابه و رفع مشکل مذکور، پیشنهاداتی به شرح ذیل ارائه می‌شود:

- جهت حذف رسوب سطح داخلی تیوب‌ها، سیستم تحت عملیات اسیدشویی قرار گیرد.
- مواد شیمیایی اکسیژن زدا همواره به مقدار کافی و در مکان مناسب به سیستم تزریق گردد.
- همچنین میزان قابلیت اکسیژن‌زدایی مواد شیمیایی مورد استفاده که در انبار نگهداری می‌شود، همواره باید مورد آزمایش کنترل کیفیت قرار گیرد؛ زیرا معمولاً این ترکیبات با طولانی شدن دوره نگهداری در انبار خاصیت اکسیژن‌زدایی خود را از دست می‌دهند.
- از ورود هوا به داخل بویلر به هنگام راه‌اندازی یا هنگام از مدار خارج کردن ممانعت شود.
- هنگامی که بویلر حتی در شرایط خاموشی قرار دارد، حتماً در برابر خوردگی محافظت شود.

منابع

1. Jaffer A., Fulmer D., and Ensslen J., Recent Developments in Organic Oxygen Scavenger Technology, Corrosion, Paper No. 06687, 2006.
2. Heyes A.M., Oxygen Pitting Failure of a Bagasse Boiler Tubes, Engineering Failure Analysis, Vol. 8, 2001, pp 123-31.
3. Chattoraj I., Das S.K., Ravi Kumar B. and Bhattacharya D.K., Corrosive Degradation and Failure of Vertical Furnace Wall Tubes of a Boiler, Engineering Failure Analysis, Vol. 4, 1997, pp 274-86.



4. British Electricity International, Modern Power Station and Practice, Vol. E, In: Chemistry and Metallurgy, Pergamon Press, 1992.
5. Deport R. and Hero H.M., The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis, Hill Inc., 1944.
6. Patil A.D., Baviskar P.R., Sable M.J. and Barve S.B., To Optimise Economiser Design for Better Performance, New Aspects of Fluid Mechanics, Heat Transfer and Environment, ISBN: 978-960-474-215-8.
7. Moakhar R.S., Mehdipour M., Ghorbani M., Mohebalı M. and Koohbor B., Investigations of the Failure in Boilers Economizer Tubes Used in Power Plants, Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, DOI: 10.1007/s11665-013-0567-2.
8. API Standard 530, Calculation of Heater Tube Thickness in Petroleum Refineries, Fifth Edition, 2003.
9. Bruce D. Craig, Fundamental Aspects of Corrosion Films in Corrosion Science, Plenum Press, New York, 1991.
10. P. Chattopadhyay, Boiler Operation Engineering: Questions and Answers, Second edition, Tata McGraw-Hill, 2000.
11. A. Lindberg, Method of gas blanketing a boiler, US 5050540 A, 1991.