

تاثیر افزایش pH سیکل بر کاهش نرخ خوردگی حاصل از پدیده FAC در اواپراتورهای دی اریاتور و کنترل این پدیده در بویلرهای HRSG: مطالعه موردی نیروگاه شوباد

محمد افشارمنش^{۱*}، حسن رئیسی^۲، محمد منظری نژاد^۳، ایوب برخوری^۴، مسلم اسفندیاری^۵

^{۱،۲} کارشناس شیمی، ^۳ کارشناس مکانیک، ^۴ کارشناس دفتر فنی، شرکت ماهتاب کهنوج مدیریت تولید برق آذربایجان غربی، نیروگاه شوباد کهنوج، کهنوج، ایران

* نویسنده مسئول: nmbm_m1245@yahoo.com

تاریخ ارسال : ۱۴۰۰/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۰

چکیده

یکی از مشکلات بسیار بزرگ و بسیار خطرناک در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی که باعث کاهش بهره‌وری و همچنین به وجود آمدن خطرات جانی و مالی بسیار زیادی شده است، مسئله خوردگی در بویلرها می‌باشد. در این مطالعه به بررسی پدیده خوردگی FAC در بویلرهای HRSG نیروگاه سیکل ترکیبی کهنوج پرداخته می‌شود. همچنین با بررسی تاثیر افزایش pH بر کاهش نرخ خوردگی FAC در اواپراتورهای دی اریاتور و شرایط به وجود آمدن این پدیده مورد بحث قرار می‌گیرد. به دنبال وقوع چندین مورد شکست (گسیختگی) در خم‌های هارپ‌های اواپراتور دی اریاتور بویلرهای بازیاب نیروگاه شوباد، نمونه‌ای از لوله‌های آسیب دیده جهت پیدا کردن علت خرابی بررسی گردید. طبق مشاهدات میدانی، این شکست‌ها در محل خم‌های انتهایی لوله‌ها مشاهده شده است. در شرایط عادی دمای سیال عبوری از این لوله‌ها در حدود ۲۰۰ °C می‌باشد. تغییرات pH نشان می‌دهد که با افزایش آن نرخ خوردگی FAC به شدت کاهش می‌یابد. که منجر به تغییر دستورالعمل کنترل شیمیایی و بهبود شرایط گردید.

واژه‌های کلیدی: افزایش pH، FAC، بویلر HRSG، اواپراتور دی اریاتور

Case Study

Effect of Increasing the pH of the Cycle on Reducing the Corrosion Rate of FAC Phenomenon in Deaerator Evaporators and Control of This Phenomenon in HRSG Boilers: A Case Study of Shobad Power Plant

M. Afsharmanesh^{*1}, H. Raissi², M. Manzerinejad³, A. Barkhori⁴, M. Esfandiari⁵

^{1,2} Chemical expert, ^{3,4} Expert of mechanics, ⁵ Technical office expert, Mahtab Kahnouj Electricity Production Management Company of West Azerbaijan, Shobad Kahnouj Power Plant, Kahnouj, Iran

* **Corresponding Author:** a.shanaghi@malayeru.ac.ir

Submission: 2022, 03, 11 **Acceptance:** 2022, 06, 10

Abstract

One of the biggest and most dangerous problems in combined cycle power plants, which has reduced efficiency, degraded reliability and also created a lot of human and financial risks, is the problem of boiler corrosion. Most events in boilers occur suddenly. In this study, the flow accelerated corrosion (FAC) phenomenon in HRSG boilers of Kahnouj combined cycle power plant is investigated. Also, by examining the effect of pH increasing on reducing the FAC corrosion rate in deaerator' evaporators and the conditions for this phenomenon, it can be said that changes in pH indicate that with increasing the FAC corrosion rate should be drastically reduced, which leads to a change in chemical control operation and condition improvement. Finally, the ideas are expressed to reduce these problems.

keyword: FAC, pH, HRSG, evaporators

۱- مقدمه

در طی سال‌ها، FAC باعث صدها آسیب به تجهیزات و لوله‌کشی‌های صنعتی و همچنین نیروگاه‌های هسته‌ای شده است [۱ و ۴]. بعد از فاجعه بزرگ نیروگاه هسته‌ای Surry تلاش‌های وسیعی برای از بین بردن معضلات خوردگی FAC توسط گروه‌های کارشناسی خبره انجام پذیرفت. استراتژی کار این بود که از طریق تشخیص و پیش‌بینی FAC، نیروگاه‌ها خسارت‌ها را قبل از بروز آن تشخیص دهند و برآوردهای لازم برای کنترل آن را به عمل آورند. یکی از بزرگترین این گروه‌ها گروه EPRI بود. اگر چه FAC در منطقه وسیعی در لوله‌ها رخ می‌دهد اما این مسئله چنان مطرح شده است که گویی اغلب در منطقه محدودی از لوله رخ می‌دهد، اما نقطه‌ای که در آن ناهمسانی جریان به وضوح دیده می‌شود موجب خوردگی بیشتر و کاهش ضخامت بیشتر می‌شود [۳]. دو نوع FAC در سال ۱۹۷۰ به عنوان مشکلات جهانی شناخته شده است. از اواسط ۱۹۸۰، FAC تک فازی به عنوان مشکل اساسی در تعادل تجهیزات شناخته شد. این وضعیت در سال ۱۹۸۶ تغییر یافت، در آن سال تجهیزات فلزی در سیستم مرکزی نیروگاه هسته‌ای Surry دچار پاره‌شدگی شدید گردید. این خسارت باعث از دست رفتن جان ۴ تن و میلیون‌ها دلار هزینه برای تعمیرات و ازدست رفتن بازده نیروگاه گردید طی کارشناسی‌های انجام گرفته دلیل اصلی این پارگی FAC گزارش گردید. در ۹ می سال ۲۰۰۷ خط آب تغذیه پر فشار ۳ اینچی در واحد بهره‌برداری نیروگاه کانزاس منفجر گردید و جان دو نفر از پرسنل بهره‌برداری را گرفت.

در این انفجار بر طبق شواهد بدست آمده مشخص گردید که دلیل این امر پدیده خوردگی از نوع FAC است. طبق آمار انجمن خوردگی ایالات متحده آمریکا، طراحی و شرایط متالورژیکی فلز بکار برده شده مهم‌ترین فاکتورهایی می‌باشند. که باعث رخ دادن پدیده FAC بوده است. پدیده FAC معمولاً در ناحیه جریان‌های آشفته در سیستم آب تغذیه رخ می‌دهد، به عنوان مثال لوله‌های پایین دست اریفیس‌ها (کاهنده‌ها)، زانویی‌ها و سهراهی‌ها مستعدترین نقاط ایجاد پدیده FAC می‌باشند. نرخ دبی بالا انحلال لایه اکسیدی محافظ را بر روی لوله‌های کربن

استیل افزایش می‌دهد و بنابراین، این فرایند سبب به وجود آمدن پدیده FAC می‌گردد. به خوبی آشکار می‌باشد که به وسیله پدیده FAC لایه اکسیدی به شدت نازک می‌شود. مهم‌ترین فاکتورهایی که باعث به وجود آمدن پدیده FAC می‌شوند عبارت انداز:

۱- شیمی آب (pH، غلظت اکسیژن محلول و دما) که پایداری مگنتیت (Fe_3O_4) را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

۲- ترکیبات شیمیایی کربن استیل

۳- دینامیک سیال که انتقال جرم آهن حل شده از سطح لایه اکسیدی را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۲ و ۳].

آمارهای منتشر شده توسط وزارت نیرو نشان می‌دهد که خروج‌های اضطراری ناشی از زوال‌های اجزاء بویلر بیشترین سهم را در انرژی هدر رفته ناشی از توقف واحدها را داشته‌اند. یکی از دلایل هزینه‌های بسیار سنگینی که زوال بویلرها ایجاد می‌کند، خروج اجباری بلند مدت واحد از مدار به منظور تعمیر یا جایگزینی قطعات است. خوردگی FAC تحت تاثیر فاکتورهای متعددی مانند نوع طراحی بویلر، دماها و فشارهای بویلر، جنس مواد، ترکیب سوخت، تاریخچه و عمر واحد و شرایط کاری می‌باشد. چون غالباً عمر بویلرهای نیروگاه‌ها بیشتر از ۲۰ سال است، سوپر‌هیترها یک بخش بحرانی در آنها محسوب می‌شوند [۲ و ۳]. عمر خزشی لوله‌های سوپر هیت با افزایش دما و مکانیزم‌های دیگری شبیه خوردگی و فرسایش که منجر به نازک شدن دیواره‌های لوله و افزایش تنش در آنها می‌شوند کاهش می‌یابد. همچنین تنش‌های اضافی بر اثر انبساط حرارتی نیز ممکن است ایجاد شود که باعث ایجاد ترک و سوراخ در لوله‌ها می‌شود که این مسئله در عمر پیش‌بینی شده خزشی منظور نمی‌شود. در طول یک برهه زمانی، بر اثر خوردگی یک لایه اکسیدی در سطح داخلی لوله‌ها ایجاد می‌شود که این لایه باعث افزایش دمای لوله می‌شود و عمر لوله به شدت کاهش می‌یابد و مسئله اساسی و مهم این می‌باشد که، این اکسید می‌تواند کنده شده و در داخل جریان حرکت کرده و بر اثر برخورد باعث فرسایش بیشتر گردد [۳].

آهن (Fe_3O_4) می باشد. در واقع انحلال پذیری لایه محافظ بویلرها با تغییر پارامترهایی نظیر pH، دما، غلظت اکسیژن و غیره تغییر می کند به طور کلی عوامل موثر در فرایند انحلال عبارتند از:

۱ - انحلال پذیری لایه اکسیدی

۲ - حضور حفرات باز درون پوشش مگنتیت

۳ - سرعت انتقال یون فلزی به جریان سیال

۲-۳ - موقعیت های بروز پدیده FAC:

مناطق وقوع FAC در بویلرهای بازیاب، شامل مکان های است که در آن ها آب تک فاز و یا مخلوط آب و بخار دوفاز جریان دارد و این پدیده غالباً منجر به تخریب لوله های از جنس فولاد کربنی و اتصالات آن ها (هدرها، انشعابات، پایپ های اتصال) می گردد خرابی FAC به ندرت در لوله هایی مستقیم رخ می دهد و غالباً در خم ها یا سه راهی ها و به ویژه در خم های فوقانی با سرعت بالا رخ می دهد FAC می تواند در شرایط جریان تک فاز (آب) و یا دوفاز (آب / بخار) رخ دهد.

از آنجا که حضور آب به منظور جداسازی لایه اکسیدی الزامی می باشد این نوع در بخش هایی از بویلر نظیر سوپرهیترها که حاوی بخار خشک و داغ فوق اشباع می باشند رخ نمی دهد. FAC، تک فاز، زمانی رخ دهد که سیال آب باشد. در این حالت، تخریب به صورت برآمدگی "پوست پرتغال" دیده می شود FAC دو فازی زمانی رخ می دهد که سیال به صورت بخار اشباع تر باشد. در این حالت تخریب به صورت یک سطح سیاه و براق دیده می شود. FAC، دو فاز بسیار شدیدتر از، FAC تک فاز است که این امر ناشی از از ماهیت توربولانت بخارتر نسبت به آب است. به طور کلی دیده شده است که FAC بویلرهای بازیاب در اپراتورهای LP و اکونومایزرهای LP و گاهی در اکونومایزرهای HP رخ می دهد. از آنجایی که FAC در محدوده دمایی 70°C الی 300°C رخ می دهد.

کنترل دقیق شیمی آب برای کاهش خوردگی سطح داخلی لوله ها، جلوگیری از روشن و خاموش شدن های متوالی که منجر به تنش های انبساطی در لوله ها می شود، اسیدشویی لوله ها در زمان تعمیرات اساسی به منظور حذف لایه اکسیدی داخلی، آنالیز دقیق ماهیانه سوخت و گاز مصرفی برای انطباق با استاندارد، قلیا شویی لوله ها در تعمیرات، انجام دقیق آزمون های NDT در بازرسی ها برای افزایش عمر لوله ها بسیار مفید است

۲-۲ ارزیابی ها:

۲-۱ - پدیده FAC (flow-accelerated corrosion)

FAC در واقع خوردگی تسریع شده ناشی از جریان می باشد که در اثر جریان سیال و سایش این خوردگی اتفاق می افتد که در حالت های تک فازی و دوفازی رخ می دهد FAC یک فرایند سه مرحله ای است:

۱ - مجموعه ای از واکنش های الکتروشیمیایی در فصل مشترک فلز / اکسید: در این مرحله یون های آهن در فصل مشترک اکسید / آب تولید می شوند و اکسیداسیون فلز در فصل مشترک آهن / مگنتیت در آب با پتانسیل احیایی رخ می دهد.

۲ - سایش شیمیایی که منجر به انحلال لایه اکسیدی تشکیل شده بر روی فولاد کربنی می باشد

۳ - انتقال جرم که در اثر عوامل هیدرودینامیکی تسریع می شود.

۲-۲ پارامترهای موثر بر پدیده FAC

همان گونه که اشاره شد، FAC فرایندی است که در آن یک لایه اکسیدی محاذ درون سیال پرشتاب نظیر آب یا مخلوط آب و بخار حل می شود. لازم به ذکر می باشد که FAC شامل فرایند انحلال لایه محافظ است و در برگرنده جدایش مکانیکی لایه نمی باشد. عامل مهمی که در وقوع پدیده FAC در بویلرها موثر می باشد عدم انحلال پذیری لایه اکسید

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد

Element	Fe	C	Mn	P	S
Wt%	Bac	≤0.18	≤0.63	≤0.035	≤0.04

سیال مورد استفاده در بویلرها دارای pH محدوده ۹/۲ بود و همچنین میزان اکسیژن محلول در ساکشن پمپ‌های فید زیر 10 ppb می‌باشد و دمای آن در این ناحیه محدوده ۷۰ تا ۲۰۰ درجه می‌باشد. جهت بررسی ریزساختار لوله، نمونه‌های متالوگرافی از مقطع لوله به گونه‌ای تهیه گردیده است که امکان مشاهده ریزساختار نواحی مختلف شامل سطح خارجی، سطح داخلی و سطح میانی لوله میسر گردد. متالوگرافی از مقطع عرضی لوله و در بزرگنمایی‌های ۵۰ X تا ۱۰۰ X انجام شده است. شکل (۲) تصاویر ریزساختار لوله را از سطح خارجی در دو بزرگنمایی ۵۰ X و ۱۰۰ X نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصاویر مشخص است این ناحیه شامل ریزساختاری فریتی - پرلیتی به همراه لایه اکسیدی سطح خارجی می‌باشد که ریزساختار متداول و عادی فولاد به کار رفته در ساخت لوله‌های مذکور می‌باشد و نشان از بدون تغییر ماندن ریزساختار این منطقه حین کارکرد دارد. این موضوع با توجه به شرایط و دمای کاری لوله‌ها، مورد انتظار و قابل توجیه می‌باشد.

و نرخ آن در ۱۵۰°C حداکثر است، مجموعاً می‌توان اصلی‌ترین نواحی وقوع آن را عبارت از نقاط زیر دانست، شکل (۱).

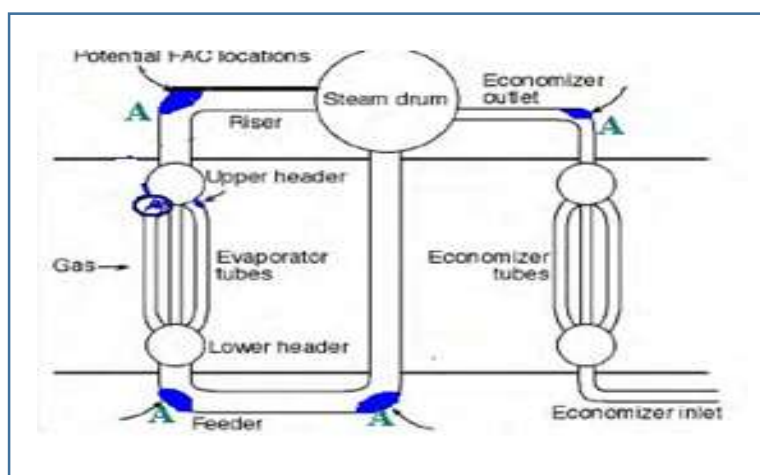
۱- لوله‌های خنک‌شونده با آب (اکونومایزر، اوپراتور، هیت‌آب ورودی)

۲- لوله‌های خنک‌شونده با آب و بخار (اوپراتور LP و HP) - ۳- درام‌ها

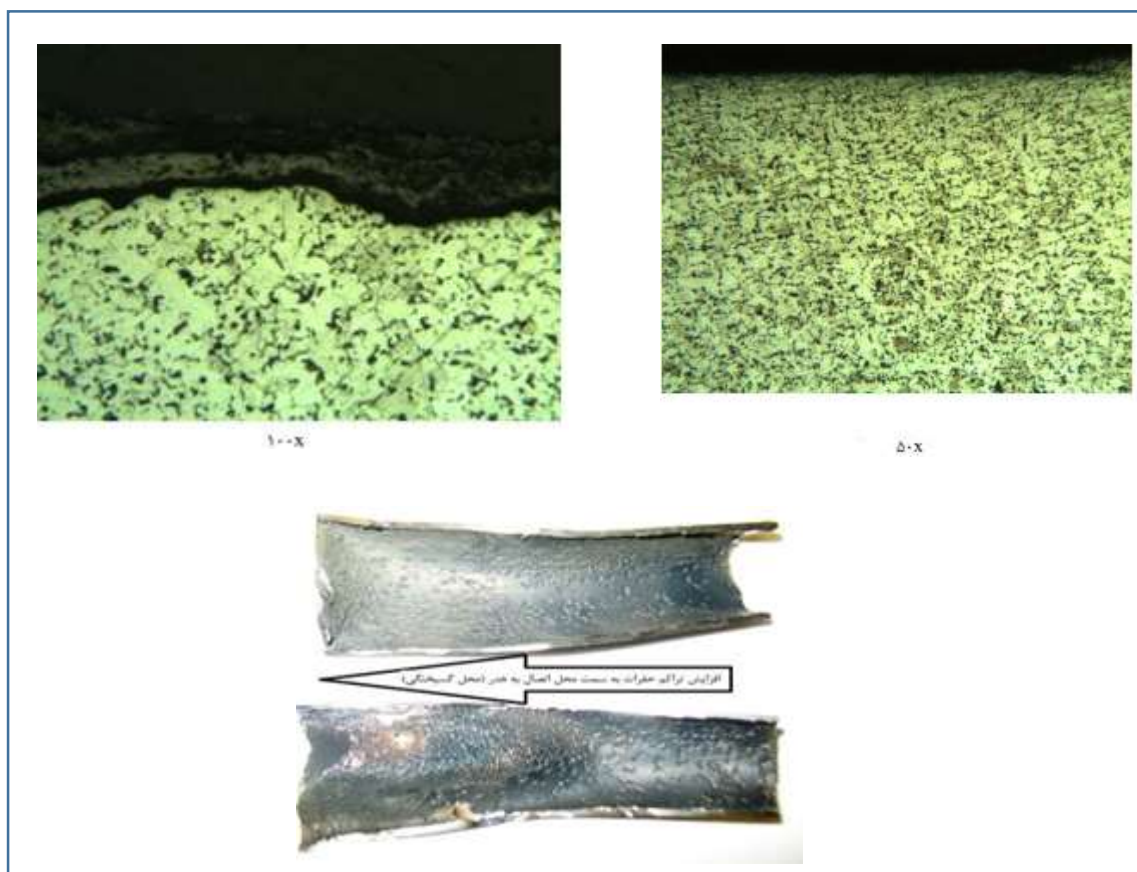
۲-۴- بررسی پدیده FAC در اوپراتور دی اریاتور نیروگاه کهنوج وریشه‌یابی علل ایجاد

نیروگاه کهنوج یک بلوک سیکل ترکیبی با کندانسور هوا خنک (ACC) می‌باشد که در ۲ فاز مگاوات اسمی آن ۱۰۰۰ می‌باشد. بنابراین از لحاظ محدودیت تغییرات pH در رنج بالا هیچ اشکال عمده‌ای وجود ندارد. بر اساس اطلاعات بدست آمده از مدارک و اطلاعات نیروگاه، جنس لوله‌های مورد نظر از فولاد ASTM A192 بوده است. این فولاد که ترکیب شیمیایی آن در جدول (۱) نشان داده شده، از دسته فولادهای ساده کربنی می‌باشد که به عنوان تیوب‌های بویلر معمولی کاربرد دارد.

در جدول ۱ ترکیب شیمیایی ASTM A192 Grad C [۱]
فولاد درج شده است.



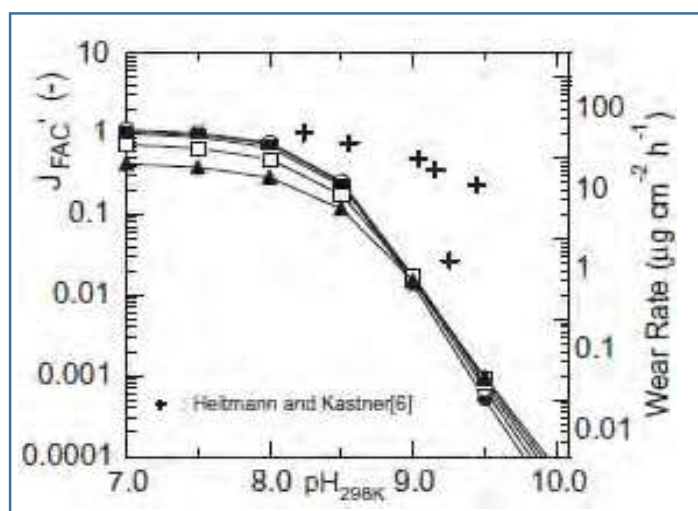
شکل ۱- شماتیک محل‌های وقوع FAC در HRSRG [نویسنده]



شکل ۲ - عکس بزرگ‌نمایی

همان گونه که از شکل مشخص می‌باشد، با افزایش میزان pH نرخ FAC بسیار کاهش می‌یابد. Bigloand و Heitman [۶] در تحقیقات خود نشان دادند که نرخ واقعی FAC در pH های بالاتر از ۹/۲ بیشتر کاهش پیدا می‌کند.

در این مطالعه ابتدا روش موثر در پیشگیری از رخ دادن پدیده FAC گزارش می‌شود و سپس به تشریح ضخامت‌سنجی هارپ‌های بویلر در نیروگاه ترکیبی کهنوج پرداخته می‌شود. شکل شماره (۳) نشان‌دهنده رابطه بین نرخ FAC و pH تنظیم شده بوسیله NH_3 می‌باشد.



شکل ۳ - رابطه بین نرخ FAC و pH [نویسنده]

جدول ۲. نتایج ضخامت سنجی

THICKNESS TEST RESULTS			
MEASUREMENT POINTS: DEAERATOR EVAPORATOR TUBES OF HRSG2 - TOP OF THE HRSG			
TESTED BY: MECHANICS SECTION OF TECHNICAL AND ENGINEERING OFFICE - ESFANDIARI			
ROW	FIREST	98/01/27	99/08/16
F1	2.7	2.48	2.2
F2	2.7	2.49	2.25
F3	2.7	2.56	2.35
F4	2.7	2.57	2.28
F5	2.7	2.5	2.43
F6	2.7	2.45	2.4
F7	2.7	2.59	2.37
F8	2.7	2.45	2.53
F9	2.7	2.45	2.44
F10	2.7	2.69	2.5
F11	2.7	2.5	2.44
F12	2.7	2.7	2.6
F13	2.7	2.55	2.45
F14	2.7	2.54	2.31
F15	2.7	2.55	2.43
F16	2.7	2.55	2.42
F17	2.7	2.61	2.47
F18	2.7	2.55	2.44
F19	2.7	2.55	2.4
F20	2.7	2.55	2.4
F21	2.7	2.55	2.43
F22	2.7	2.5	2.38
F23	2.7	2.4	2.33
F24	2.7	2.53	2.41
F25	2.7	2.43	2.39
F26	2.7	2.4	2.34
F27	2.7	2.4	2.33
F28	2.7	2.4	2.3
F29	2.7	2.45	2.33
F30	2.7	2.55	2.44
F31	2.7	2.5	2.39
F32	2.7	2.55	2.44
F33	2.7	2.5	2.39
F34	2.7	2.49	2.42
F35	2.7	2.4	2.32
F36	2.7	2.43	2.32
F37	2.7	2.49	2.34
F38	2.7	2.05	1.52
F39	2.7	2.4	2.27

همان گونه که از نمودار مشخص می‌باشد با افزایش pH، کاهش بسیار ناچیزی از روند FAC وجود دارد ولی با افزایش بیشتر pH نرخ FAC به شدت کاهش پیدا می‌کند و در pH بالاتر از ۹ نرخ pH با شدت بیشتری کاهش پیدا می‌کند و در pH برابر ۹/۸ خوردگی به کمترین میزان خود می‌رسد با بررسی‌های اولیه مشاهده شد، خوردگی در لوله‌های اوپراتور دی اریاتور بویلر دو، از نوع FAC می‌باشد. این خوردگی در نواحی رخ می‌دهد که جهت جریان عادی به طور ناگهانی تغییر کند و سبب آشفته‌گی جریان در داخل لوله‌ها می‌شود. بیشتر این زوال‌ها ناشی از برخورد گلوله‌وار مایع در محل زانویی‌ها می‌باشد. با توجه به طراحی اولیه سیکل و افت فشار دی اریاتور در سوخت گازوییل که ناشی از بسته شدن CPH و کاهش دمای آب ورودی به دی اریاتور می‌باشد، و همچنین کاهش فشار بخار بالای محلول که در درام دی اریاتور اتفاق می‌افتد و چیدمان بویلر، دمای آب دی اریاتور در شرایط مختلف بهره‌برداری به ناچار در محدوده خاص خود قرار گرفته و قابلیت مانور خاصی در این زمینه در اختیار بهره‌بردار برای گریز از این مشکل قرار نمی‌دهد. میزان pH آب در این سیکل در محدوده مناسبی قرار دارد و از مقدار ۹/۲ بالاتر می‌باشد. البته تزیقات شیمیایی برای کنترل pH در مقدار بالاتر می‌تواند سبب کاهش نرخ خوردگی FAC شود. همان‌طور که گفته شد، اجزا فولاد کربنی نسبت به FAC بسیار آسیب‌پذیرند و در حالی که تجهیزات با آلیاژ کروم از خود مقاومت بیشتری نشان می‌دهند. براین اساس با توجه به اینکه متریال لوله اوپراتور دی اریاتور از جنس فولاد کربنی A192 می‌باشد مقاومت الزام را در مقابل این پدیده ندارد. متأسفانه در طراحی اولیه این مسئله رعایت نشده است. به علت وجود انحنای لوله‌ها در ناحیه متصل به هدر، دینامیک سیال به گونه‌ای تغییر می‌کند که باعث افزایش مومنت و نزدیک شدن به شرایط جریان آشفته می‌شود. با توجه به اینکه شرایط شیمیایی در حد مطلوب می‌باشد و دما و فشار سیال در شرایط نرمال توصیه شده برای بهره‌برداری نمی‌باشد؛ راهکار برون رفت از این مشکل استفاده از متریال مناسب‌تر با درصد کروم بیشتر ضخامت بیشتر همچنین تغییر هندسه لوله در جهت دستیابی به دینامیک بهینه سیال می‌باشد.

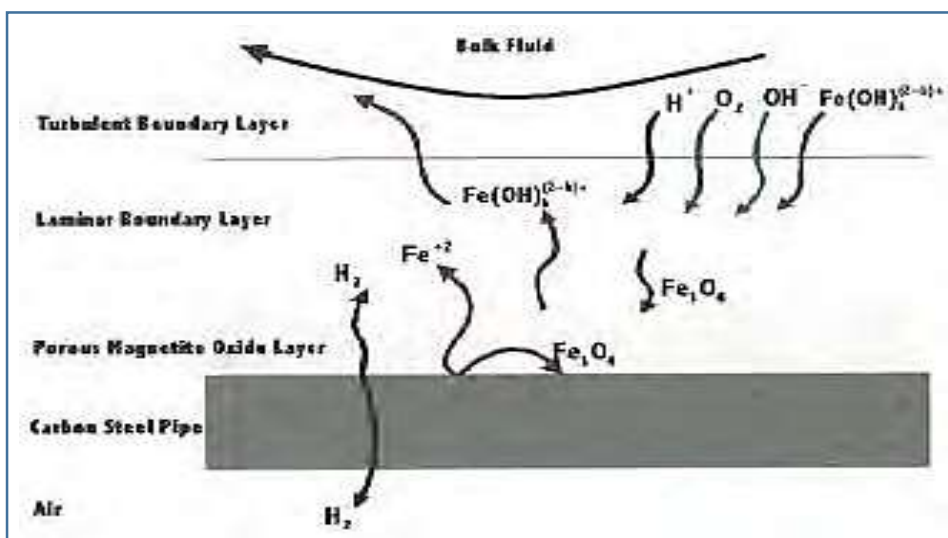
ضخامت‌سنجی مورخ ۹۹/۰۸/۱۵ در جدول شماره (۲) از هارپ‌های اوپراتور دی اریاتور بویار دو و مقایسه با نتایج ضخامت‌سنجی اولیه و ثانویه قبل تغییر دستورالعمل کنترل شیمیایی گویای کاهش ۳۸ درصدی نرخ خوردگی دارد.

نیز وارد محلول شده و سطح پوسته پوسته می‌شود. FAC دوفاز در محدوده دمایی $300^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}$ رخ می‌دهد. در FAC دوفاز، نمی‌توان پتانسیل ORP را افزایش داد زیرا اگر غلظت اکسیژن در بخار بالا باشد، غلظت اکسیژن در آب مجاور سطح فلزی کاهش می‌یابد لذا تنها راه کاهش انحلال‌پذیری مگنتیت در FAC دوفاز افزایش pH می‌باشد. همان‌گونه که از شکل فوق و جدول تعیین ضخامت مشخص می‌باشد اساس ارزیابی‌های به عمل آمده ضخامت در کلیه نواحی نسبت به ضخامت اسمی لوله کاهش یافته است و در لبه‌های تخریب، لوله بسیار نازک شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نواحی که بیشترین تخریب روی داده است، در نواحی می‌باشد که اتصال و خمیدگی وجود دارد و باعث تغییر مسیر و همچنین تغییر نرخ جریان گردیده است.

همچنین ضخامت‌سنجی‌ها نشان می‌دهد که بیشترین کاهش ضخامت مربوط به ابتدا و انتهای ماژول‌ها می‌باشد که اکثر سوراخ شدگی‌ها در این ناحیه‌ها اتفاق می‌افتد شکل (۴) نمونه‌ای از پدیده FAC که سبب نازک شدن محل خمیدگی لوله گردیده است نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل مشخص می‌باشد شدت خوردگی آنقدر زیاد بوده است که منجر به پاره‌شدگی لوله گردیده است. شکل شماره (۵) شماتیک پدیده FAC را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص می‌باشد، لایه اکسیدی تشکیل شده یک لایه ثابت یا دائمی نمی‌باشد. جریان آب تلاش می‌کند تا این لایه را حل کند و سبب سایش آن شود. هرچه سرعت جریان آب بالاتر باشد، این عمل تشدید می‌گردد. در FAC دوفاز علاوه بر انحلال فلز، ذرات Fe_3O_4



شکل ۴ - نمونه‌ای از پدیده FAC



شکل ۵ - شماتیک پدیده FAC [نویسنده]

نتیجه گیری:

با توجه به کلیه نکات مذکور، کاهش یا حذف پدیده FAC به روش های زیر امکان پذیر می باشد:

۱ - تغییر محیط خورنده ۲ - تغییر آلیاژ ۳ - جداسازی فیزیکی محیط و ماده

در حال حاضر، راه حل سوم با توجه به تکنولوژی های موجود امکان پذیر نمی باشد. لذا به طور کلی از روش های زیر می توان استفاده نمود:

۱- کنترل pH در مقدار بالای ۹/۸ می تواند سبب کاهش نرخ خوردگی FAC شود. که نتایج مورد بحث گویای کاهش ۳۸ درصدی مقدار خوردگی بعد از تغییر pH می باشد. که بعد از تغییر دستورالعمل و افزایش میزان pH بالای ۹/۸ شرایط خوردگی FAC کاهش یافت که حتی نیروگاه های مشابه بعد از نیروگاه شوباد دستورالعمل افزایش pH را داشتند. که می توان این رژیم کنترل شیمیایی را بسیار شبیه HIGH AVT دانست.

۲- همان طور که گفته شد، اجزا فولاد کربنی نسبت به FAC بسیار آسیب پذیرند و در حالی که تجهیزات با آلیاژ کروم از خود مقاومت بیشتری نشان می دهند. بر این اساس با توجه به اینکه متریال لوله اواپراتور دی اری تور از جنس فولاد کربنی A192 می باشد مقاومت الزم را در مقابل این پدیده ندارد. متأسفانه در طراحی اولیه این مسئله رعایت نشده است. با توجه به حساسیت شدید فولادهای کربنی ساده به FAC، لازم است در نقاط بحرانی (محل خم لوله تا اتصال به هدر) با لوله های آلیاژی کروم دار، ترجیحاً فولاد ASTM A-335 Gr. P22 که دارای درصد کروم برابر ۲۵/۲ و Mo برابر یک می باشد تعویض شوند.

جدول ۳ - آنالیز فولاد کروم دار

Grade	UNS Designation	carbon	Man-ganese	Phos-phorus.max	Sulfur.max	silicon	Chromium	Molybde-num	other
P1	K11522	0.10-0.20	0.30-0.80	0.025	0.025	0.10-0.50	.....	0.44-0.65	.....
P2	K11547	0.10-0.20	0.30-0.61	0.025	0.025	0.10-0.30	0.50-0.81	0.44-0.65	.....
P5	K41545	0.15max	0.30-0.60	0.025	0.025	0.50max	4.00-6.00	0.45-0.65	.....
P5b	K51545	0.15max	0.30-0.60	0.025	0.025	1.00-2.00	4.00-6.00	0.45-0.65	.....
P5c	K41245	0.12max	0.30-0.60	0.025	0.025	0.50max	4.00-6.00	0.45-0.65	.....
P9	S50400	0.15max	0.30-0.60	0.025	0.025	0.25-1.00	8.00-10.00	0.90-1.10	.....
P11	K11597	0.05-0.15	0.30-0.60	0.025	0.025	0.50-1.00	1.00-1.50	0.44-0.65	.....
P12	K11562	0.05-0.15	0.30-0.61	0.025	0.025	0.50max	0.80-1.25	0.44-0.65	.....
P15	K11578	0.05-0.15	0.30-0.60	0.025	0.025	1.15-1.65	.....	0.44-0.65	.....
P21	K31545	0.05-0.15	0.30-0.60	0.025	0.025	0.50max	2.65-3.25	0.80-1.06	.....
P22	K21590	0.05-0.15	0.30-0.60	0.025	0.025	0.50max	1.90-2.60	0.87-1.13	.....
P23	K41650	0.04-0.10	0.10-0.60	0.030max	0.010max	0.50max	1.90-2.60	0.50-0.30	v080-1.06

۳- با توجه به نتایج بیشترین خوردگی‌ها در ابتدا و انتهای ماژول‌ها اتفاق افتاده است. که در این ناحیه‌ها بیشترین فلوی گاز بر روی بدنه هارپ برخورد می‌کند که سبب تبدیل به حالت تک فازی که بیشترین FAC در آن‌ها مشاهده شده است بنابراین پیشنهاد شد که از سپرهای حرارتی و عایق‌های نسوز به منظور کنترل دما در این ناحیه استفاده شود.

مراجع:

- [1] K.Fujiwara, M. Domea, Corrosion Science 53(2020)3526-3533
- [2] The Japan Society of Mechanical Engineers, JSME S CA1-2005, Maruzen Co., Ltd., Tokyo, Japan, 2021. (in Japanese).
- [3] H.G. Heitmann, P. Schub, Proc Water Chemistry of Nuclear Reactor System 3, vol. 1, BNES, London, UK, 1994, Pp. 243-252.
- [4] G.J. Bignold, K. Garbett, R. Garnsey, I.S Woolsey, Proc. Water Chemistry of Nuclear Reactor System 2, BNES, London, UK, 2018, Pp. 5-18.
- [5] V.H. Keller, VGB-Kraftwerkstechnik 54 (1974) 292-295
Y.Ozawa, S. Uchida, M. Kitamura, J. Nucl. Sci. Technol. 20 (1983) 1039-1045.
- [6] V.H.G. Heitman, W. Kastner, VGB-Kraftwerkstechnik 62 (1974) 211-219.
- [7] Atomic Energy Society of Japan, Handbook of Water Chemistry of Nuclear Reactor System, Corona Publishing Co., Ltd., Tokyo, Japan, 2000 (in Japanese).
- [8] M. Izumiya, F. Mizuniwa, K. Osumi, T. Kanbayashi, Y. Matsushima, K. Tanno, Karyoku genshiryoku hatsuden 27 (2020) 419-426. K. Fujiwara, M. Domae, T. Ohira, K. Hisamune, H. Takiguchi, S. Uchida, D. Lister, proc. 16th Pacific Basin Nuclear Conference, AESJ, Tokyo, Japan (2008) Paper No. P16P1048.
- [9] O. D. Bouvier, M. Bouchacourt, K. Fruzzetti, Proc. Cimie 2002 Water Chemistry in Nuclear Reactor System, SFEN, Paris, France (2002) Paper No. 117.
- [10] I.S Woolsey, G.J. Bignold, C.H.D. Whalley, K. Garbett, Proc. Water Chemistry of Nuclear Reactor System 4, BNES, London, UK, 2008, Pp. 337-346.
- [11] T. Tsuruta, K. Muruta, Y. Shoda, K. Yamamoto, Proc. Fontevraud 6, Contribution of Materials Investigations to Improve the safety and Performance of LWRs, vol. 1, SFEN, Paris, France, 2019, Pp. 181-190.
- [12] D.H. Lister, L. Liu, A.D. Feicht, M. Khatibi, W.G. Cook, K. Fujiwara, E. Kadoi, T. Ohira, H. Takiguchi, S. Uchida, PowerPlant Chem. 10 (2008) 659-667