

## بررسی خوردگی سایشی تسریع شده با جریان سیال در لوله های اکونومایزر فشار قوی بویلر واحد یک نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان

ابوالفضل احمدی<sup>۱</sup>، اسماعیل جعفری<sup>۲</sup> و مهدی قدرت<sup>۳\*</sup>

### چکیده

خوردگی سایشی تسریع شده با جریان سیال بیش از ۳۰ سال است که در جهان شناخته و وقوع آن در انواع نیروگاههای هسته‌ای، بخار و سیکل ترکیبی گزارش شده است که با توجه به این قدمت راهکارهای کنترل و یا رفع آن بسیار مهم است. در این پژوهش خوردگی سایشی تسریع شده با جریان سیال آب گرم (تک فازی) در لوله های اکونومایزر فشار قوی در ساختمان بویلر نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان با بررسی ظاهری، ابعادی و ریز ساختاری؛ در خم لوله های ساده کربنی آسیب دیده مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج بدست آمده نشانگر کم‌تر بودن ضخامت لوله ها از میزان استاندارد، عدم تغییر ریز ساختار لوله (فریتی-پرلیتی) و وقوع خوردگی سایشی است. رژیم شیمیایی آب، طراحی اولیه هارپ، خواص متالورژیکی و مکانیکی مواد مورد استفاده در هارپ و شرایط ترمودینامیکی و هیدرودینامیکی سیال مهم‌ترین عوامل در بروز این مکانیزم می‌باشد. در این پژوهش با کنترل شیمی آب (PH و اکسیژن) و استفاده از مواد جایگزین، از تخریب اتفاقی لوله ها جلوگیری می‌شود.

واژه های کلیدی: خوردگی، لوله ساده کربنی، لایه اکسیدی محافظ.

۱- استادیار، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک (دانشگاه صنعت آب و برق)

۲- استادیار، بخش مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی شیراز

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات مرکزی- اراک، ایران

\*- نویسنده مسئول: mehdighodrat@gmail.com

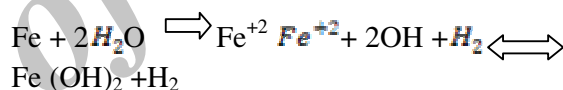
## پیشگفتار

خوردگی سایشی با جریان سیال در اصطلاح Flow Accelerated (assisted) Erosion-Corrosion یا FAC می‌باشد و همانگونه که از نام آن بر می آید نوعی خوردگی فیزیکی (Erosion) شیمیایی (Corrosion) است که در نتیجه شرایط جریان سیال تسریع می شود.

وقوع FAC در بیش از ۶۰ درصد نیروگاههای حرارتی جهان گزارش شده و آمار نشان می‌دهد که این پدیده پس از پدیده خستگی حرارتی، دومین عامل مهم خرابی در لوله‌های بویلرهای با زیافت می‌باشد.

## مکانیزم خوردگی FAC مطابق با روند زیر می‌باشد:

هنگامی که یک فلز پایه آهن در رویارویی با آب عاری از اکسیژن قرار می‌گیرد، به گونه طبیعی واکنش زیر برقرار می‌شود:



در گام بعد، هیدروکسید آهن تولیدی این واکنش بر اساس واکنش زیر به  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (مگنتیت) تبدیل می‌شود.



مگنتیت با تشکیل یک لایه محافظ سیاه رنگ بر روی سطح فلز، از اکسید شدن بیش‌تر ماده و استهلاک آن جلوگیری می‌کند. حال چنانچه به هر دلیل شیمیایی، ترمودینامیکی و یا سیالاتی شرایط آب مجاور فلز به گونه ای رقم بخورد که تشکیل لایه محافظ مگنتیت مختل شده یا میزان استهلاک این لایه در آب بیش از سرعت تولید آن شود، نتیجه مسلم امر آن خواهد شد که ساختار فلز دوباره در معرض خوردگی قرار گرفته و به تدریج از ضخامت آن برداشته می‌شود. [۱]

مطالب بالا در شکل های ۱ و ۲ به گونه گویایی نشان داده شده اند.

## موقعیت های تشدید FAC عبارتند از:

- محل خم لوله
- پشت مناطق جوشکاری شده
- FAC از نظر نوع سیال به دو بخش تقسیم می‌شود:
  - جریان سیال آب گرم (تک فازی)<sup>۱</sup>
  - جریان آب و بخار (دو فازی)<sup>۲</sup>
- تأثیر نوع جریان های یاد شده در شکل ۳ در خم لوله یا زانو مشخص شده است.
- پدیده های گوناگون که سبب تشدید FAC می‌شوند، عبارتند از:
  - خسارت حبابی یا کاویتاسیون<sup>۳</sup>
  - فلاشینگ<sup>۴</sup>
  - برخورد قطرات کوچک مایع<sup>۵</sup>
  - سایش ذرات جامد<sup>۶</sup>

شکل ۴ محدوده بروز این مکانیزمها را در لوله نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است سیال آب در اثر حرارت از فاز مایع در نقاط پایینی لوله به فاز بخار در نقاط فوقانی تبدیل شده است. ته نشینی مواد در نقاط پایین برخورد ذرات جامد با دیواره لوله را به دنبال خواهد داشت. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد نتیجه حرکت حباب‌های گاز از نقاط پر فشار (سطوح پایینی لوله ها) به نقاط کم فشار (سطوح بالایی لوله ها) پدیده کاویتاسیون می‌باشد. در محدوده‌های میانی و بالایی سیال دو فازی است و خوردگی سایشی در اثر برخورد قطرات مایع تشدید می‌شود. عملیات فلاشینگ یا گردش سیال نیز با وجود ذرات جامد و افزایش سرعت سیال افزایش FAC را سبب می‌شود. گفتنی است که FAC نه تنها در بویلر بلکه در سایر نقاط سیکل نیز می‌تواند رخ دهد [۸].

(شکل ۵)

تعمیرات موقعیت‌های بروز FAC در لوله‌های اکونومایزر همان‌گونه که در شکل ۶ نشان داده شده بسیار زمان بر و دشوار است.

<sup>1</sup> -Single Phase Flow

<sup>2</sup> - Two Phase Flow

<sup>3</sup> -Cavitation

<sup>4</sup> - Flushing

<sup>5</sup> -Liquid Droplet Impingement

<sup>6</sup> - Solid Particle Erosion

که رقم بسیار بالایی است. مقادیر نوعی در جدول ۳ و نمودار ۱ آورده شده است.

شرایط کاری لوله های بویلر به شرح زیر می باشد.

محل قرار گیری: اکونومایزر فشار قوی

ساعت کارکرد: ۲۶۰۰۰ ساعت

دما و فشار طراحی: فشار ۱۵۲ بار و دمای  $344^{\circ}\text{C}$

درجه حرارت گازهای داغ در اکونومایزر  $198^{\circ}\text{C}$

نوع سوخت: گاز و گازوئیل

کنترل شیمیایی: هیدرازین و فسفات

### مواد لوله و ابعاد آن‌ها

پس از مطالعه مدارک نیروگاه مشخص شد که مواد لوله‌ها فولاد CSA178-grade بر اساس استاندارد ASME می باشد. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی این فولاد بر اساس استاندارد کلید فولاد در جداول ۴ و ۵ ارایه شده است. ابعاد اسمی لوله عبارتند از:

- قطر خارجی ۳۸/۱ میلیمتر

- ضخامت ۳/۷ میلیمتر

### آزمایش‌های انجام شده

بمنظور تعیین علت تخریب آزمایش‌های زیر روی لوله انجام گرفته است.

- بررسی‌های ظاهری و بررسی با میکروسکوپ استریو

- اندازه گیری ابعاد

- بررسی‌های ری‌ساختاری با میکروسکوپ نوری

### بررسی‌های ظاهری

شکل (۱۳-الف) نمای ظاهری لوله تخریب شده را نشان می دهد. ظاهر شکسته گسیختگی شدید لوله با لبه‌های نزدیک می باشد. در سطح خارجی و سطح داخلی لوله ها رسوب و آثار خوردگی و اکسیداسیون شدید مشاهده نگردید. در سطح داخلی لوله آثار خوردگی سایشی به صورت حفره های ریزی مشاهده می شود(شکل ۱۳-ب و ج). بمنظور بررسی دقیق تر سطح داخلی ، لوله به صورت طولی برش داده شده و به دو نیم تقسیم گردید که تصاویر مربوط در شکل ۱۴ آمده است. ملاحظه می‌شود که حفره ها در تمام سطح داخلی لوله پراکنده

در جدول ۱ درصد خرابی های ناشی از پدیده FAC در نیروگاههای گوناگون جهان ملاحظه می شود.

خاطر نشان می سازد که وقوع این پدیده در نقاط گوناگون سیکل بعضاً می تواند افزون بر خسارات مالی با خسارات جانی نیز توأم باشد. (شکل ۷ و ۸)

### دلایل ایجاد FAC

- بر اساس مطالعات صورت گرفته، عمده‌ترین پارامترهای تأثیر گذار بر این پدیده عبارتند از:

- شیمی آب (pH ، غلظت اکسیژن و ...)

- طراحی اولیه هارپ

- خواص متالورژیکی و مکانیکی مواد مورد استفاده در هارپ

- شرایط فیزیکی آب (دما، فشار و ...)

- ویژگی‌های هیدرودینامیکی سیال ( سرعت، توربولانسی و ...)

بدیهی است که در شرایط بهره برداری از یک بویلر، تمامی این عوامل می توانند از یکدیگر متأثر شوند.

### شکل ظاهری عیب

همانند شکل ۹ به صورت حفره های تجمعی می‌باشد که به شکل هلال بوجود آمده و با ادامه مکانیزم به نیم کره تبدیل می‌شوند. [۱]

### مواد و روش پژوهش

این پژوهش شامل بررسی آزمایش‌های ظاهری، ابعادی و ری‌ساختاری انجام شده بر روی یک عدد لوله اکونومایزر فشار قوی بویلر واحد یک نیروگاه کرمان می باشد (شکل ۱۰).

در لوله های هارپ (اشکال ۱۱ و ۱۲) اکونومایزر فشار قوی، ۵ لوله تعویض شده است که ۱ لوله به دلیل گسیختگی یا سوراخ شدگی و ۴ لوله به دلیل کاهش ضخامت جداره تعویض شده اند.(جدول ۲)

مقایسه ضخامت اندازه گیری شده لوله های این هارپ که طی یک بازه زمانی ۴ ماهه انجام گرفت گویای آن است که طی این مدت به طور میانگین شاهد کاهش ۱۷ درصدی ضخامت در نقاط گوناگون جداره لوله ها بوده ایم

می باشد. لایه اکسیدی نازکی نیز در سطح خارجی وجود دارد که به ضخامت حدود ۲۰ میکرون اندازه گیری شد. در سطح داخلی نیز لایه اکسیدی با ضخامت ۵۰ میکرون اندازه گیری شد و بیشترین عمق حفره اندازه گیری شده در نمونه متالوگرافی مورد بررسی ۳۰۰ میکرون می باشد. لایه محافظ تشکیل شده در سطح داخلی لوله ها در تمامی سطح قابل مشاهده می باشد.

### نتایج و بحث

آزمایش ها و بررسی ها نشان می دهند که :

- ضخامت لوله کم تر از حد طراحی است .
- وجود فلوی حرارتی بیش تر در قسمت های بالایی ساختمان بویلر سبب فلوی بیش تر سیال در این نواحی شده و این امر سبب افزایش تخریب لوله ها در نواحی فوقانی شده است.
- ریزساختار لوله تغییری چندانی نکرده است و مشابه ساختار لوله نو فریتی - پرلیتی است.
- لایه محافظ داخلی لوله ها تقریباً به صورت یکنواخت در تمام نواحی وجود دارد. وضعیت سطح داخلی لوله ها نشان می دهد که تشکیل لایه و تخریب آن به وسیله خوردگی سایشی و ایجاد حفره ها به گونه ای که عمق آن ها بیش تر از ضخامت لایه محافظ باشد و تکرار این مکانیزم و تعمیق حفره ها موجب گسیختگی لوله در خم گردیده است که این مکانیزم همان خوردگی سایشی تسریع شده با جریان سیال یا FAC می باشد. [۱ و ۲]
- در این جا عوامل چهارگانه اصلی که سبب بروز پدیده FAC در لوله ها شده اند به شرح زیر است:

### رژیم شیمیایی آب

از آن جا که لایه محافظ مگنتیت در آب دمین و یا آب با pH بین ۷ تا ۹/۲ و هم چنین در آب با غلظت اکسیژن کم تر از 20ppb توانایی حل شدن دارد، وجود هر یک از این شرایط می تواند بروز خوردگی FAC در لوله های بویلر را بیش تر کند.

در مواقعی که بویلر از مدار خارج باشد، می توان با انجام آزمایش های ضخامتسنجی در نقاط مستعد و

می باشند، ولی در ناحیه تخریب شده شدت و مقدار حفره ها بسیار بیش تر می باشد. در نواحی که فرسایش شدید رخ داده است ظاهر یکنواخت و موج مانند می باشد. در قسمت هایی که فرسایش متوسط رخ داده است، حفره های مجزا مشاهده می شود. جهت بررسی آثار خوردگی سایشی در سطح داخلی لوله، این سطح با میکروسکوپ استریو نیز مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ۱۵ تصاویر سطح داخلی لوله در مقاطع گوناگون نشان داده شده است. ظاهر تخریب، فرسایش به وسیله سیال را نشان می دهد.

### بررسی ابعاد

در شکل های ۱۶ و ۱۷ و جدول های ۶ و ۷ نتایج اندازه گیری ابعادی لوله ارایه شده است. براساس بررسی های انجام گرفته ضخامت در تمامی نواحی نسبت به ضخامت اسمی لوله کاهش یافته است و در لبه های تخریب لوله بسیار نازک شده است. کم ترین ضخامت در لبه تخریب (۰/۷ میلی متر) است. اندازه گیری ها نشان می دهند که در ناحیه خم لوله ها به دلیل فرآیند خم کاری ضخامت در قوس خارجی خم ها کاهش یافته است. در بخش های صاف لوله ها نیز ضخامت ها کم تر از حد طراحی (۳/۷ mm) می باشند. هم چنین، با توجه به شکل ۱۷ و جدول ۷ ملاحظه می شود که قطر خارجی تغییر چندانی را نشان نمی دهد و بنظر می رسد تغییر ضخامت لوله از سمت داخل باشد. گفتنی است با توجه به این که لوله ارسالی از ناحیه خم بوده فقط امکان اندازه گیری قطر داخلی در ناحیه ۳ وجود دارد.

### بررسی های ریز ساختاری

جهت بررسی تغییرات ریزساختاری از انتهای لوله نمونه متالوگرافی تهیه شد و مورد بررسی قرار گرفت. شکل های ۱۸ و ۱۹ تصاویر ریزساختاری از نمونه متالوگرافی در ناحیه انتهایی لوله را نشان می دهد. ملاحظه می شود که ساختار نمونه فریتی - پرلیتی و مشابه ساختار اولیه این فولاد می باشد. هم چنین، به دلیل فرآیند ساخت جهت گیری فاز پرلیت و فریت و دوقلو های مکانیکی در تصاویر ریزساختاری مشخص می باشند. در سطح خارجی لایه دکربوره تشکیل شده که عمق آن ۱۲۰ میکرون

رفتن سرعت و اغتشاش در نقاط حساس، نوسان‌های دمایی و بویژه نوسان‌های فشار آب درون لوله‌ها بر میزان سایش و انتقال جرم مگنتیت از آن ناحیه به بیرون تاثیر گذاشته و روند خوردگی را تسریع می‌کند.

اصولا در شرایط سرعت و اغتشاش بالای آب، بسیاری از یون‌های آزاد آهن پیش از آن‌که بتوانند وارد واکنش شیمیایی دوم شده و لایه مگنتیتی محافظ را تشکیل دهند، توسط جریان آب از محل دور شده‌اند.

هم‌چنین واکنش تشکیل لایه محافظ در شرایط دمایی اکونومایزر (۳۴۴ درجه سانتی‌گراد) به دلیل کاهش حلالیت فسفات کند می‌شود [۳].

گفتنی است که هر چند عوامل چهار گانه بالا، کاندیداهای اصلی و ایجاد کننده FAC می‌باشند، ولی با شروع شدن این پدیده در هارپ‌ها و کاهش ضخامت لوله‌ها، عوامل ثانویه نیز وارد عمل شده و بروز حوادث را تسریع می‌کنند. عوامل ثانویه عبارتند از:

- نبود و یا عملکرد نادرست و نامطمئن شیر اطمینان مسیر HP اکونومایزر که پدیده خسارت حیاتی را به دنبال خواهد داشت [۷].

- نوسان در دما، فشار، دبی و . . . لوله‌ها به علت تغییر پارامترهای بهره برداری.

- روشن و خاموش شدن‌های خواسته و ناخواسته بویلر و تجهیزات جانبی آن و شوک‌های ناشی از این امر.

### نتیجه گیری

پس از کنترل شیمی آب بویلر شماره یک نیروگاه کرمان و تهیه نمونه متالوگرافی از لوله گسیخته شده اکونومایزر فشار قوی بویلر مشخص شد که عمق حفره‌ها ۳۰۰ میکرون و عمق لایه اکسیدی محافظ در جدار داخلی لوله ۵۰ میکرون است و این امر نشان‌دهنده سوراخ شدگی و سایش لایه محافظ مگنتیت در اثر عبور سیال آب گرم می‌باشد و تشکیل دوباره این لایه و سایش دوباره آن در اثر شرایط سیال و تکرار این روند سبب بروز FAC در لوله‌های اکونومایزر شده است.

عامل‌های اصلی که سبب بروز FAC در لوله‌های اکونومایزر فشار قوی بویلر و در نهایت، سبب گسیختگی لوله‌ها در ناحیه خم شده عبارتند از:

مشکوک، از نازک شدن احتمالی جداره لوله‌ها داده‌هایی را بدست آورد، اما در شرایط کارکرد بویلر، بهترین روش آگاهی از وقوع و کنترل FAC پایش مداوم غلظت آهن در آب آن ناحیه از سیکل می‌باشد. لذا، انجام آزمایش‌های دقیق شیمیایی در این رابطه ضروریست.

### طراحی اولیه هارپ

ایجاد نقاط مستعد و حادثه خیز در طراحی اولیه هارپ (همانند ورق‌های جدا کننده که در تعدادی از مقسم‌های بالایی هارپ طراحی شده و مقسم را به سه قسمت تقسیم کرده) هم‌چنین، پروفیل ورود و خروج آب از مقسم‌ها به سمت لوله‌ها و بر عکس نیز جزء موارد طراحی موثر بر بروز این پدیده بشمار می‌آید.

### ویژگی‌های متالورژیکی و مکانیکی مواد بکار رفته

#### در هارپ

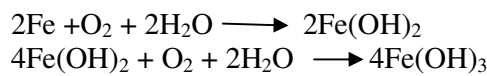
با توجه به ترکیب SA178C (جدول ۳) که در ساخت لوله‌های اکونومایزر بویلرهای نیروگاه بکار رفته، می‌توان گفت که این ماده نوعی فولاد کربنی (فولاد کربنی) غیر آلیاژی است. در شرایط عادی چنانچه پدیده FAC در هارپ‌ها رخ ندهد (فرض اولیه تیم طراح و سازنده بویلر)، استفاده از این مواد برای شرایط کاری ناحیه اکونومایزر بویلرهای بلامانع بوده و در استانداردها نیز به عنوان یک ماده مناسب معرفی شده است، اما در شرایط بروز FAC، فولاد‌های غیر آلیاژی بسیار مستعد خوردگی بوده و با شروع این پدیده، نرخ استهلاک و نازک شدن جداره لوله شدید است. براساس مطالعات جهانی صورت گرفته، آهنگ فرسایش این‌گونه مواد در شرایط شدید FAC می‌تواند به ۳mm/yr نیز برسد. [۱] همان‌گونه که اشاره شد، در HP اکونومایزر بویلر شماره یک نیروگاه کرمان، طی یک دوره ۴ ماهه کاهش ۱۷ درصدی ضخامت جداره تعدادی از لوله‌ها گزارش شده است (معادل ۸mm/yr) [۶].

### شرایط فیزیکی و هیدرودینامیکی سیال

این دو عامل در تعامل مستقیم با یکدیگر بوده و تغییر هر یک می‌تواند دیگری را نیز متاثر سازد. بدیهی است بالا

وجود می آید. در زمان خاموشی یا توقف واحد، اکسیژن هوا از راه توربین، کندانسور، پمپ های کندانست و هیترهای آب تغذیه وارد لوله های بخار، بویژه لوله های سوپرهیت و ری هیت و اکونومایزر می شود.

نفوذ اکسیژن به همراه آب و یا رطوبت باعث واکنش های زیر بر روی سطح فولاد می شود:



قابلیت انحلال محصول واکنش  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  خیلی کم بوده و به صورت کلئیدی روی سطح پراکنده می شود و این امر سبب بروز خوردگی سایشی با ذرات جامد در نقاط گوناگون سیکل خواهد شد. [۹ و ۱۱]

۳- تغییر مواد نقاط در معرض خطر FAC به آلیاژهای دارای کروم، مولیبدن، یا مس نقش بسزایی در مقاوم سازی این نقاط ایفا می کند. در این میان استفاده از لوله های کروم دار (بیش از ۱ درصد کروم) در بسیاری از مراجع توصیه می شود [۱۰ و ۱۱].

با توجه به این بند نسبت به تعویض لوله های ساده کربنی اکونومایزر در محل خم ها با استفاده از مواد جایگزین بر اساس جدول ۸ اقدام شد و تا کنون در این نقاط مشکلات گذشته از قبیل سوراخ شدگی، پارگی و گسیختگی لوله ها بوجود نیامده است. گفتنی است که چون بیشترین میزان فلوی حرارتی در نواحی بالای ساختمان بویلر می باشد و لوله های ورودی در معرض حرارت بیشتری می باشند در این نقاط از آلیاژ A213(T22) (که دارای کروم و مولیبدن بیش تر و در نتیجه دارای مقاومت به سایش بیش تری می باشد) استفاده شد.

در پایان ذکر این نکته ضروریست که پدیده FAC در نیروگاه کرمان نه تنها در بویلر ها بلکه در چندین مورد در خطوط ۲/۵ اینچ خروجی پمپ های تغذیه نیز رخ داده و باعث پارگی این خطوط شده است.

بدین ترتیب به منظور پیشگیری از وقایع شدید احتمالی داشتن یک برنامه منسجم جهت مونیتورینگ نقاط حساس در سیکل ضروریست.

از سوی دیگر، اعمال هر یک از راهکارهای بالا نیازمند مطالعات دقیق تر و بررسی تاثیرات متقابل آنهاست.

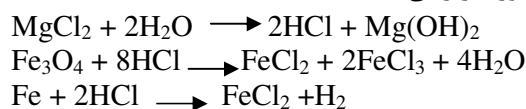
- رژیم شیمیایی آب  
- طراحی اولیه هارپ  
- خواص متالورژیکی و مکانیکی مواد مورد استفاده در هارپ

- شرایط ترمودینامیکی و هیدرودینامیکی سیال  
با توجه به مطالب گفته شده در بخش های گذشته روش های زیر جهت کنترل FAC در لوله های ساده کربنی اکونومایزر پیشنهاد گردید:

۱- افزایش pH آب در ناحیه اکونومایزر به مقادیر بالاتر می تواند نرخ FAC را تا حد شایان توجهی کاهش دهد. در شکل ۲۰ یک مثال از تاثیر این راهکار نمایش داده شده است.

مطالعات نشان داده است که در محدوده pH بین ۹ تا ۱۰، افزایش ۰.۵ واحدی pH باعث کاهش ده برابری نرخ FAC می شود [۱۰ و ۱۱ و ۱۲].

با وجود تنظیم pH آب تغذیه، ممکن است کاهش pH در آب بویلر در زمان های خاص بهره برداری، در اثر پدیده تغلیظ صورت گیرد. اصولاً تمام نمک های کلریدی در آب بویلر می توانند با مکانیزم هیدرولیز شدن به وسیله یک عامل اکسید کننده مثل اکسیژن به HCl تبدیل شوند [۸]. نمک های یاد شده می توانند از راه آب تغذیه و یا نشستی کندانسور و یا از قسمت های گوناگون سیکل، وارد آب بویلر شوند. واکنش های هیدرولیز شدن نمک های کلریدی و هم چنین، تخریب لایه محافظ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  به صورت زیر می باشد.



در شرایط بهره برداری، کلرید های بالا پایدار نیستند و به محض خارج شدن از محل خود باعث رسوب دوباره  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  و تولید HCl شده و بار دیگر به اکسیدهای آهن حمله کرده و باعث خوردگی لوله ها می شوند [۸ و ۱۱]

۲- افزایش غلظت اکسیژن محلول در آب  
میزان اکسیژن از ۲۰ ppb نباید کم تر باشد چون سبب کاهش سرعت تولید لایه اکسیدی محافظ می گردد و از ۵۰ ppb نبایستی بیش تر شود چون خوردگی حفره ای ناشی از اکسیژن را بوجود می آید. خوردگی حفره ای عمدتاً در زمان خاموشی و بعضاً در طی راه اندازی بویلر به

پیل‌های گالوانیکی در آن ناحیه و بروز خوردگی گالوانیک را باعث خواهد شد یا نه و همچنین، بررسی روش‌های جلوگیری از تشکیل حفره‌های ناشی از FAC با توجه به شبکه بلوری فلز و پوشش مناسب بر روی فلز می‌تواند نتایج مفیدی را به دنبال داشته باشد [۸ و ۴].

### References

- 1- K. Fujiwara, M. Domae, K. Yoneda, F. Inada, T. Ohira, and K. Hisamune, "Correlation of flow Accelerated Corrosion Rate with Iron Solubility", Nuclear Engineering and Design, Vol.241, P 4482–4486, 2011.
- 2- Wael H. Ahmed, "Evaluation of the proximity Effect on Flow-Accelerated Corrosion", Annals of Nuclear Energy, vol.37, P.598–605, 2010.
- 3- Vivekanand Kain, S. Roychowdhury, Thomas Mathew, Atul Bhandakkar, "Flow Accelerated Corrosion and its Control Measures for the Secondary Circuit Pipelines in Indian Nuclear Power Plants", Journal of Nuclear Materials, vol.383, P.86–91, 2008.
- 4- S. Nasrazadani, R.K. Nakka, D. Hopkins, and J. Stevens, "Characterization of oxides on FAC Susceptible Small-Bore Carbon Steel Piping of a Power Plant", Journal of Pressure Vessels and Piping, vol 86, P. 845–852, 2009.
- 5- V. Kain, S. Roychowdhury, P. Ahmedabadi, and D.K. Barua, "Flow accelerated Corrosion: Experience from Examination of Components from Nuclear power plants", Engineering Failure Analysis, vol 18, P. 2028–2041, 2011.

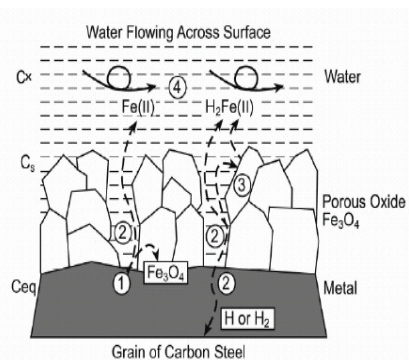
۶- مدارک فنی نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان، ۱۳۹۰

۷- مدارک فنی نیروگاه سیکل ترکیبی کازرون، ۱۳۹۰

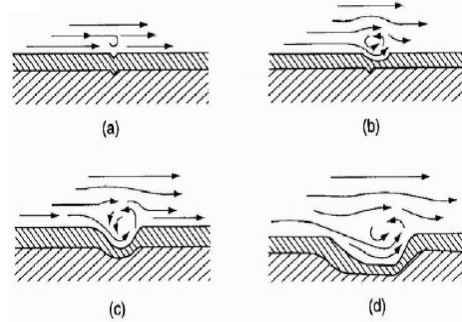
برای مثال، در یک مطالعه جامع می‌بایست بررسی شود که افزایش میزان pH آب در ناحیه اکونومایزر چه تاثیرات مثبت و منفی بر سایر نقاط سیکل می‌گذارد و یا تعویض نقاط حساس به FAC با آلیاژهای مقاوم‌تر تشکیل

- 8- R.B. Dooley, "Flow-accelerated Corrosion of Pressure Vessels in Fossil Plants", International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol.77, P.85-90, 2000.
- 9- Kazutoshi Fujiwara, Masafumi Domae, Kimitoshi Yoneda, and Fumio Inada, "Model of Physico-Chemical Effect on Flow Accelerated Corrosion in Power Plant", Corrosion Science, vol.53, P.3526–3533, 2011.
- 10- Shunsuke Uchida, Masanori Naitoh, Hidetoshi Okada, Yasushi Uehara, and Seiichi Koshizuka, "Evaluation of Flow Accelerated Corrosion by Coupled Analysis of Corrosion and Flow Dynamics. Relationship of Oxide Film Thickness, Hematite/Magnetite Ratio, ECP and Wall Thinning Rate", Nuclear Engineering and Design, vol. 241, P. 4585–4593, 2011.
- 11- N. Y. Lee, S. G. Lee, K. H. Ryu, and Il Soon Hwang, "On-Line Monitoring System Development For Single-Phase Flow Accelerated Corrosion", Nuclear Engineering and Design, vol. 237, P.761–767, 2007.
- 12- B. Chexal, J. Horowitz, R. Jones, "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants", EPRI TR-106611, Electric Power Research Institute, 1996.

پیوست ها



شکل ۱- چگونگی مستهلک شدن لایه مگنتیت محافظ سطح فلز [۱]



شکل ۲- تأثیر جریان سیال بر کاهش ضخامت دیواره [۱]

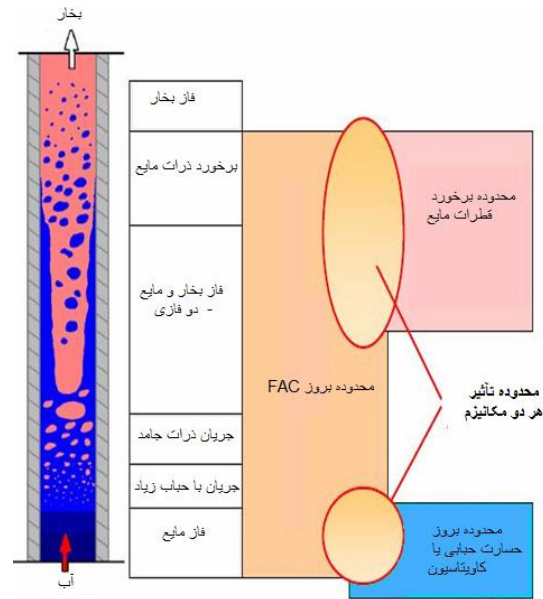
موقعیت خوردگی سایشی  
باسیال دو فازی در زانو



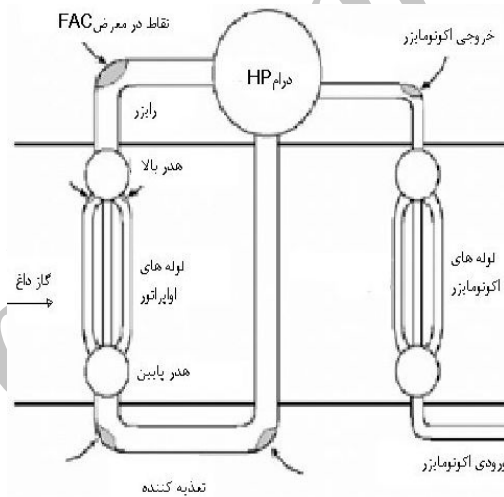
موقعیت خوردگی سایشی  
باسیال تک فازی در زانو

شکل ۳- تأثیر جریان سیال در خم لوله [۵]





شکل ۴- پدیده هایی که سبب تشدید FAC می شوند. [۵]



شکل ۵- نقاط بحرانی بویلر بازیافت جهت بروز پدیده FAC [۸]

شکل ۶- موقعیت بروز FAC در ورودی هدر هارپ [۷]



جدول ۱- پراکندگی آماری خرابی‌های ناشی از FAC [۲]

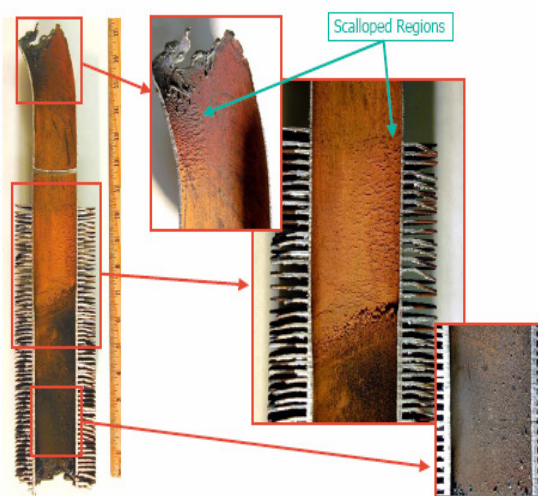
موقعیتهای بروز FAC	
25%	لوله های ورودی اکونومایزر
52%	خطوط درین
25%	لوله های کنار Boiler Feed Pump
11%	لوله های هدر HP
35%	لوله های ورودی به هدر اکونومایزر
14%	شلپهای دی اریتور
7%	شلپهای اطراف هدر LP



شکل ۷- پاره شدن زانوی ۱۸ اینچ خط کندانس به دلیل FAC [۲]



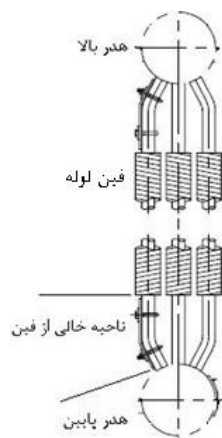
شکل ۸- ترکیدن خط کندانس ۱۲۲ اینچ ناشی از FAC [۲]



شکل ۹- شکل خوردگی FAC [۱]



شکل ۱۰- تصویر لوله هارپ گسیخته شده در بویلریک [۶]



شکل ۱۱- نمای جانبی لوله های هارپ (مرتبط با جدول ۲) [۶]



شکل ۱۲- هارپ بالا کشیده شده-نواحی آزمون ضخامت و لوله های معیوب بریده شده (مرتبط با جدول ۲) [۶]

جدول ۲- مقادیر اندازه گیری شده ضخامت (mm) [۶]

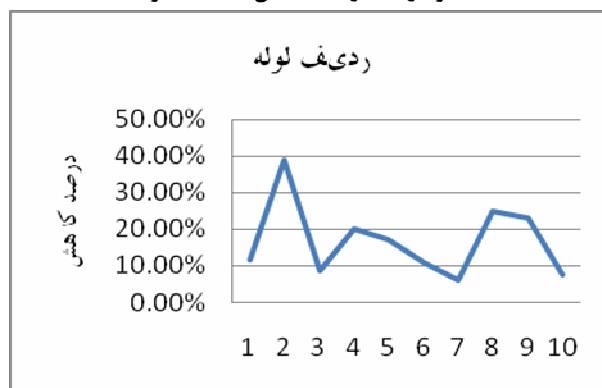
6	5	4	3	2	1	
	2.2		3	2	2.6	بالا (زیر جوش)
						ردیف جلو
						وسط (محل خم)
						پایین (بالای فینها)
3.8	3.5	3.5	3.5	3.3	3.5	ردیف وسط
						وسط
3.7	2.6	2.4	3.2	2.7	2.9	بالا (زیر جوش)
						ردیف آخر
						وسط (محل خم)
3.6	2.7	2.7	3.2	2.7	2.9	پایین (بالای فینها)
						پایین (بالای فینها)
3.8	3.3	3.6	3.2	3.5	3.7	

رنگ خاکستری: تعویض لوله به دلیل تست ضخامت رنگ مشکلی: تعویض لوله به دلیل سوراخ ترک یا پارگی

جدول ۳- مقادیر کاهش ضخامت لوله هارپ های HP اکونومایزر بویلر واحد یک (mm) [۶]

	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
ضخامت جداره در دیمه 1389	2.7	2.6	2.4	3.2	2.7	2.3	3.5	3.5	3.3	2.6	
ضخامت جداره در آردیپشت 1390	2.5	2	1.8	3	2.4	2.4	2.8	3.2	2	2.3	
میانگین کاهش ضخامت	%7.5	%23	%25	%6	%11	%17	%20	%8.5	%39	%11.5	
میانگین کل						%17					

نمودار ۱- درصد کاهش ضخامت لوله ها [۶]



جدول ۴- ترکیب شیمیایی اسمی فولاد CSA178

کربن	منگنز	گوگرد	فسفر
%0.35	%0.8	%0.06	%0.05

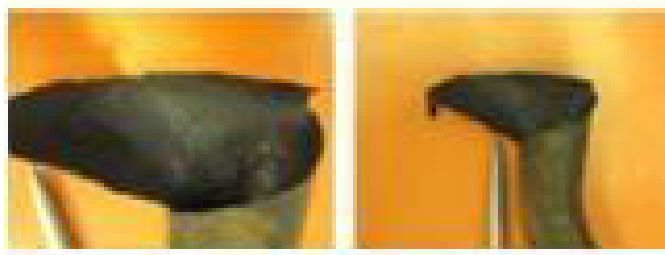
جدول ۵- خواص مکانیکی فولاد CSA178

درصد ازدیاد طول	استحکام نهایی (M pa)	استحکام تسلیم (M pa)
30	415	256

Archive



الف



ب

ج

شکل ۱۳- الف- نمای ظاهری لوله مورد بررسی ب و ج-نمای داخل لوله و حفره های ناشی از سایش [۶]



الف



ب

ج

شکل ۱۴- الف- تصویر ظاهری از سطح داخلی لوله (نمای کلی) ب و ج- تصویر حفره های ناشی از سایش سیال [۶]



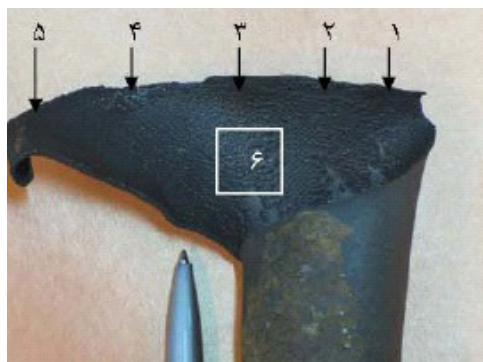
شکل ۱۵- تصویر استریو از سطح داخلی لوله [۶]



شکل ۱۶- مرتبط با جدول [۶]

جدول ۶- نتایج اندازه گیری ابعادی لوله (mm)

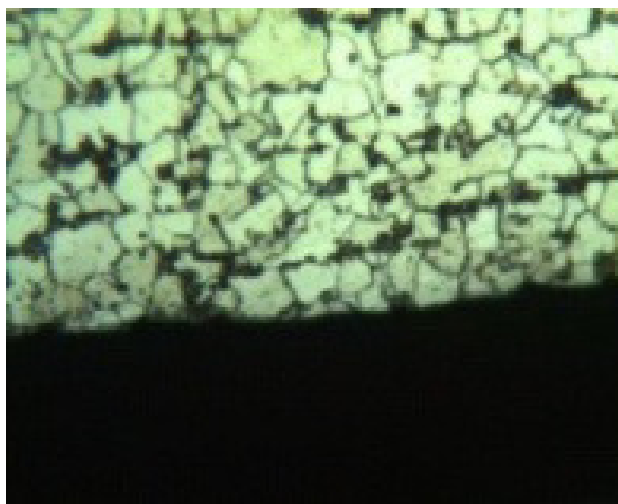
ناحیه	1	2	3
قطر داخلی	-	-	31.21
قطر خارجی	-	38.15	38.06
ضخامت لوله در سمت تصویر	2.65	3	3.30
ضخامت جداره لوله در پشت تصویر	1.99	2.52	3.32



شکل ۱۷- مرتبط با جدول [۶]

جدول ۷- ضخامت جداره لوله در لبه گسیختگی (mm)

ناحیه	1	2	3	4	5	6
ضخامت جداره	2	1.2	0.81	0.79	0.7	1.13



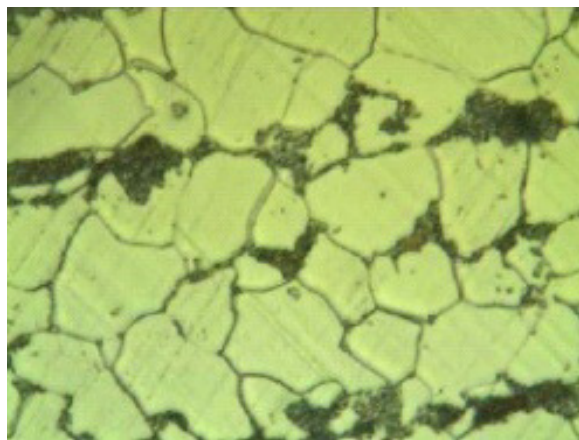
الف



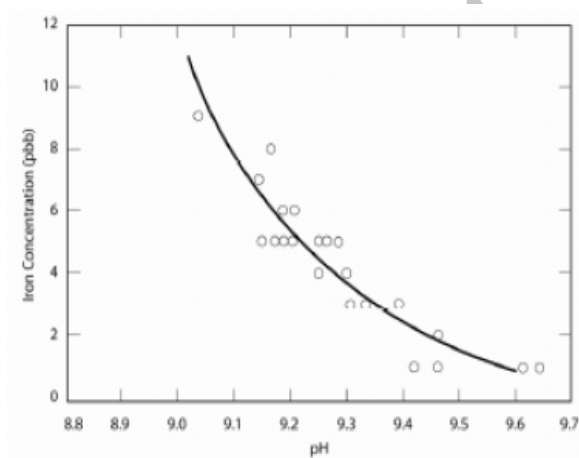
ب

شکل ۱۸- ریز ساختار نمونه در نزدیکی سطوح داخلی و خارجی لوله الف : سطح داخلی لوله، ب : سطح خارجی لوله (۲۰۰×) [۶]





شکل ۱۹- ریز ساختار نمونه متالوگرافی در زمینه لوله (۲۰۰×) [۶]



شکل ۲۰- تأثیر افزایش PH بر کاهش خوردگی FAC

جدول ۸- مواد جایگزین شده با فولاد ساده کربنی لوله های اکونومایزر فشار قوی بویلر [۶]

نام ماده و محل استفاده	ترکیب شیمیایی %						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
A213(T11) - در خروج سیال از هدر (سرعت کمتر)	≤0.15	0.5	0.3	0.03	0.03	1	0.44
		تا	تا			تا	تا
A213(T22) - در ورود سیال به هدر (سرعت بیشتر)	≤0.15	1	0.6	0.03	0.03	1.5	0.65
		≤0.5	0.3			2	0.9
		تا	تا			تا	تا
			0.6			2.5	1.1