

# بررسی تحلیلی اثر رسوب‌ها و کیفیت آب ورودی بر خوردگی لوله‌های تبادله‌گر دیگی

محمد رضا سرمستی امامی\*، علی رضا غلامی

گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و صنایع، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

**چکیده:** در این پژوهش خوردگی لوله‌های یک تبادله‌گر گرمایی دیگی تولید بخار در یک واحد پتروشیمی در جنوب غربی کشور با آزمایش‌ها گوناگون مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به علت شدت خوردگی لوله‌های این تبادله‌گر پس از ۶ ماه ۳۲٪ از ضخامت اولیه خود را از دست دادند. نتیجه‌های به دست آمده از میکروسکوپ نوری و الکترونی و نیز آزمایش‌های متالوگرافی نشان داد که جنس لوله نمی‌تواند عامل خوردگی باشد. نتیجه‌های آزمون‌های XRD و XRF از رسوب‌های روی سطح بیرونی لوله، وجود ترکیب‌هایی از سیلیسیم، کلسیم و فسفر را نشان داد که بیانگر کیفیت پایین آب ورودی به تبادله‌گر بود. این ترکیب‌ها می‌توانند تشکیل پیل‌های غلظتی اکسیژن دهند و سرانجام موجب خوردگی زیررسوبی (زیر مجموعه‌ای از خوردگی تنشی) شوند. از سویی تجمع رسوب‌های به دست آمده از خوردگی و نیز ته‌نشینی ترکیب‌های موجود در آب مصرفی بر روی سطح بیرونی لوله به ویژه در بخش ورودی روغن داغ به درون لوله، باعث افزایش مقاومت گرمایی از روغن درون لوله به آب درون پوسته و کاهش نرخ انتقال گرما می‌شود. بنابراین به علت پدیده بیش گرمایش بلند مدت، نقطه‌های داغی روی سطح بیرونی لوله ایجاد شد که سرعت خوردگی آن را نسبت به حالت معمول بسیار افزایش داد. همچنین ارزیابی تغییرهای زمانی جرم رسوب‌های تشکیل شده و مقاومت گرمایی آن‌ها با استفاده از رابطه‌های موجود در منابع معتبر نیز نشان داد که با افزایش زمان جرم رسوب و مقدار مقاومت گرمایی آن به سرعت افزایش می‌یابد و پس از آن به تقریب ثابت می‌ماند.

**واژه‌های کلیدی:** خوردگی تنشی؛ تبادله‌گر گرمایی دیگی؛ رسوب‌گذاری؛ بیش گرمایش.

**KEYWORDS:** Tension corrosion; Kettle heat exchanger; Fouling; Long-term overheat.

## مقدمه

کاربردهای بسیاری در صنایع گوناگون به ویژه صنایع نفت، گاز و پتروشیمی دارند. تبادله‌گر دیگی بر پایه استاندارد TEMA در گروه‌بندی نوع K قرار می‌گیرد. این نوع تبادله‌گرها در صنعت بیش‌تر برای تولید بخار استفاده می‌شوند [۳].

در تبادله‌گر گرمایی دیگی مورد مطالعه، با انتقال گرما از روغن داغ درون لوله‌هایی با جنس فولاد کربنی متوسط به آب درون پوسته، بخار داغ تولید می‌شود. بخار داغ تولیدی برای کنترل دما

پدیده خوردگی به واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی بین یک ماده (به طور معمول یک فلز و محیط اطراف آن) گفته می‌شود که پیامد آن تغییر خواص ماده می‌باشد. نتیجه‌های به دست آمده در کشورهای پیشرفته صنعتی خسارت و هزینه‌های ناشی از خوردگی را تا ۴/۵٪ تولید ناخالص ملی برآورد می‌کنند [۱،۲]. تبادله‌گرهای گرمایی دستگاه‌هایی هستند که برای انتقال گرمای مؤثر بین دو سیال (گاز یا مایع) کاربرد دارند. تبادله‌گرهای گرمایی

\*عهده دار مکاتبات

+E-mail: m\_r\_emami@mazust.ac.ir

عامل اصلی خوردگی است. همچنین تشکیل رسوب بر روی سطح بیرونی لوله‌ها کاهش انتقال گرما و گرمایش بلند مدت و خرابی لوله را در پی داشته است. آن‌ها بهبود کیفیت آب تغذیه، اسیدشویی لوله‌ها برای حذف رسوب‌ها و کنترل میزان اکسیژن به عنوان راهکار کاهش خوردگی لوله‌ها پیشنهاد نمودند [۹].

**رضائیان و همکاران** علت تخریب لوله‌های مولد بخار نیروگاه سیکل ترکیبی فارس را با کمک داده‌های ضخامت سنجی و آمار تخریب لوله‌ها و شبیه سازی جریان درون لوله‌ها بررسی نمودند. نتیجه‌ها نشان داد که وجود قطره‌های آب در جریان دو فازی با الگوی حلقوی به ویژه در خم‌های لوله موجب کاهش ضخامت لوله در این ناحیه‌ها و سرانجام تخریب آن شده است. آن‌ها کنترل اسیدیته آب و تعویض جنس ناحیه‌های خم لوله‌های تولید بخار را برای کنترل خوردگی پیشنهاد دادند [۱۰]. **قربانی** دلیل‌های خوردگی خنک‌کننده‌های سکوی دریایی فاز یک مجتمع گاز پارس جنوبی را بررسی نمود. مشاهده‌ها نشان داد که افزودن بر وجود رسوب بر روی لوله‌ها، وجود اجسام خارجی در درون خنک‌کننده موجب سایش بخش‌های گوناگون شده است [۱۱].

**محققی و همکاران** اثر سرعت سیال بر دانسیته جریان خوردگی را برای فولاد کربنی ساده در محلول آب همراه با گاز چاه‌های بندرعباس را در دمای ۲۵ درجه سلسیوس بررسی نمودند. نتیجه‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش سرعت چرخشی تا ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به دلیل زیاد شدن میزان انتقال جرم، نرخ خوردگی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش سرعت الکتروود به مقدارهای بالاتر، موجب تغییر مکانیسم خوردگی می‌شود [۱۲].

**سرمستی امامی و همکاران** پیش‌گرم‌کن هوا در نیروگاه شهید سلیمی نکا را در اثر مصرف مازوت در یک دوره سه ماهه بررسی نمودند. بررسی‌های نظری و تجربی نشان داد که عامل اصلی خوردگی رسیدن دمای گازهای احتراق به پایین‌تر از دمای نقطه شبنم بود. چگالش بخار آب موجود در گازهای احتراق و جذب اکسیدهای گوگرد در آن باعث تشکیل محیط اسیدی شده بود این نتیجه‌ها، با مشاهده‌های تجربی و محاسبه‌های نظری نیز همخوانی داشت [۱۳]. **حسینی و شایگانی** عامل‌های خوردگی لوله‌های از جنس آلیاژ مس - نیکل چگالنده، در یک مبدل گرمایی یک واحد پالایشگاهی را بررسی نمودند. آن‌ها ترک خوردگی لوله آلیاژی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۴۷ واحد آیزوماکس پالایشگاه را بررسی نمودند. نتیجه‌های بررسی‌ها نشان داد که ترک خوردگی لوله کوره به دلیل تشکیل

و پیشگیری از گرفتگی به راکتور هیدروژناسیون از نوع لوله‌ای با بستر کاتالیست تزریق می‌شود. تبادلگر مورد نظر شش ماه پس از نصب به علت خوردگی لوله‌ها از سرویس خارج شد. این سرعت خوردگی بیش‌تر از انتظار بوده و زیان‌های وارده برای سه روز توقف تولید به واحد ۲۵۴۴۰۰۰ دلار بود [۴]. بخش بیش‌تر خوردگی در بخش لوله‌های دارای روغن دیده شد. رسوب‌ها در بیش‌تر موردها گزارش شده عامل اصلی خرابی مبدل‌های و دیگ‌های جوش‌آور می‌باشند [۵]. در مناطق داغ احتمال تشکیل رسوب‌ها تا ۱۰۰ برابر حالت معمول می‌تواند افزایش یابد [۶]. بنابراین در این پژوهش عامل‌های خوردگی شدید موضعی لوله‌های تبادلگر گرمایی دیگری قرار گرفت. برای تعیین عامل‌های خوردگی از آزمون‌های گوناگون شیمیایی، الکتروشیمیایی، متالوگرافی و میکروسکوپی و بررسی‌های ظاهری استفاده شد. همچنین نقش رسوب‌ها شامل ناخالصی‌های موجود در آب ورودی و فراورده‌های خوردگی در درون و بیرون لوله توسط روش‌هایی مانند XRD و XRF مورد بررسی قرار گرفت تا علت خوردگی سریع لوله‌های تبادلگر گرمایی دیگری به طور دقیق مشخص شود.

### مروری بر برخی از پژوهش‌های انجام شده

**واسوسکاس<sup>(۱)</sup> و همکاران**، خرابی و رسوب‌گذاری لوله‌های تبادلگر گرمایی را با مشاهده فراورده‌های خوردگی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که بر روی دیواره درونی لوله‌ها خرابی از برخی روزنه‌ها شروع شده است. همچنین آن‌ها بیان کردند که خوردگی تبادلگر گرمایی را می‌توان به وسیله دمای مناسب، کمینه کردن ناخالصی‌ها و مواد شیمیایی زیان‌آور در محیط انتقال گرما و خارج کردن آلودگی‌های آب کاهش داد [۷].

**افشاری و نوری** خوردگی لوله‌های مبدل گرمایی از جنس فولاد کربنی در سامانه‌ی خنک‌کننده یک کمپرسور را بررسی نمودند. سیال درون پوسته آب و ضد یخ و سیال درون لوله‌گاز سوختنی بود. آنالیزها نشان دادند که نمونه با استاندارد مربوطه مطابقت داشت. آن‌ها عامل اصلی ایجاد خوردگی را اکسید شدن ترکیب گلیکول بیان کردند که خوردگی گالوانیک ناشی از حضور مس روی سطح بیرونی لوله‌ها موجب تسریع خوردگی در یک سال شدند [۸].

**جسمانی و همکاران** علت خرابی لوله‌های سوپر هیتز کارخانه کشت و صنعت اهواز را با متالوگرافی و میکروسکوپی نوری مورد بررسی قرار دادند. نتیجه‌ها نشان داد که رشد ترک‌ها به صورت بین‌دانه‌ای

(1) Vasauskas

همان‌گونه که دیده می‌شود بیش‌تر پژوهش‌های بررسی شده به صورت تجربی بوده و پژوهش‌های اندکی به نقش رسوب‌ها در خوردگی دستگاه‌های انتقال گرما پرداخته‌اند. همچنین در پژوهش‌های بررسی شده عامل‌های گوناگونی مانند رسوب روی سطح بیرونی لوله، وجود اجسام خارجی و خوردگی بین دانه‌ای برای خرابی لوله‌ها و دستگاه‌ها معرفی شده است که گاهی تفاوت اساسی با هم دارند. بنابراین طبیعی است که راهکارهای گوناگونی هم پیشنهاد شود. بنابراین با توجه به این که نقش رسوب‌ها (شامل ناخالصی‌ها و مواد معلق موجود در آب ورودی و فراورده‌های خوردگی تشکیل شده بر سطح داخلی و بیرونی لوله) بر روی نرخ انتقال گرما کم‌تر بررسی شده است، تمرکز اصلی این پژوهش بر روی نقش رسوب‌ها بر خوردگی لوله‌های تبادله‌گر گرمایی دیگری به کمک آزمایش‌ها و نیز رابطه‌های موجود در منابع معتبر می‌باشد.

### بخش تجربی

#### روش انجام پژوهش

پیرو گزارش واحد نگهداری و تعمیر مبنی بر افزایش مقدار مجاز آب در روغن و کاهش مقدار بخار تولید شده، تبادله‌گر گرمایی دیگری برای بررسی از خط تولید خارج شد. گزارش بررسی انجام شده نشان داد که بخش‌های اولیه لوله‌ها در مدت شش ماه دچار خوردگی شدید شده است. چون این تبادله‌گر وظیفه تولید بخار و تزریق آن به راکتور هیدروژناسیون را به عهده دارد، خارج شدن آن از خط تولید توقف تولید و زیان هنگفتی را به بار آورد. در نتیجه علت خوردگی لوله‌های این تبادله‌گر به عنوان هدف این پژوهش انتخاب شد.

#### شرایط عملیاتی تبادله‌گر گرمایی

تبادله‌گر گرمایی دیگری مورد بررسی از ۲۵۵ لوله یو شکل از جنس فولاد کربنی متوسط با قطر بیرونی ۱۹/۰۵ میلی‌متر، ضخامت ۲/۱۱ میلی‌متر و طول ۶۱۰۰ میلی‌متر تشکیل شده است. روغن با سرعت ۱/۳۷ متر بر ثانیه و دمای ۳۲۰ درجه سلسیوس وارد لوله می‌شود در حالی که آب با سرعت ۰/۳۹ متر بر ثانیه و دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس وارد پوسته می‌شوند. آب درون پوسته با جذب گرما از روغن تغییر فاز داده و به شکل بخار داغ با دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس و فشار ۷۶ بار از بخش بالایی پوسته تبادله‌گر دیگری خارج می‌شود.

پلی تیونیک اسید در سطح درونی لوله و در زمان تعمیر اساسی بود [۱۴].

روحی و همکاران عامل‌های خوردگی لوله‌های خنک‌کننده از جنس فولاد زنگ نزن را در پالایشگاه نفت بررسی کردند. پس از انجام بررسی‌های اولیه روی دو قطعه انتخابی مشخص شد که بر روی یکی از نمونه‌ها خوردگی‌های موضعی، به طوری‌عمده روزنه‌های بسیاری وجود داشته و نمونه دیگر از لحاظ ظاهری سالم بوده و به ظاهر خوردگی خاص یا آثار تخریب مکانیکی بر روی سطح آن دیده نشد. وجود یون کلر به عنوان یکی از مهم‌ترین عامل‌های شکست لایه غیر فعال و ایجاد حفره در این ناحیه از لوله بیان شد [۱۵].

زیوکینیک<sup>(۱)</sup> و همکاران اثر دما را بر روی مقاومت خوردگی لوله‌های فولاد کربنی را در لوله‌های تبادله‌گرهای پالایشگاه مورد بررسی قرار دادند. نتیجه‌های آزمایش‌ها مکانیسم تشکیل فراورده‌های خوردگی را بر روی لوله در محیط خورنده به دو بخش تقسیم می‌کند: یک بخش تشکیل فراورده‌های خوردگی در دمای پایین‌تر از ۵۰ درجه سلسیوس و دیگری تشکیل و تجزیه فراورده‌های خوردگی بود [۱۶]. عبدالوحد<sup>(۲)</sup> و همکاران مطالعه‌های نظری بر روی انتقال گرما در تبادله‌گر گرمایی در حضور رسوب انجام دادند. تبادله‌گر گرمایی مورد بررسی برای گرم کردن نفت خام با استفاده از بخار مورد استفاده قرار می‌گرفت. آنالیزها برای شرایط انتقال گرما جریان آشفته در گستره وسیعی از اعداد رینولدز، دمای متفاوت و زمان انجام شد. نتیجه‌های نشان داد که مقدار رسوب با افزایش عدد رینولدز، عدد پراتنل، دمای فیلم و زمان افزایش می‌یابد [۱۷].

ایمران<sup>(۳)</sup>، اثر خوردگی بر انتقال گرما در لوله‌های دیگ بخار را بررسی نمود. او دریافت که عامل خوردگی در دیگ بخار کیفیت آب ورودی می‌باشد که بر روی سطح درونی لوله‌ها ایجاد تنش می‌نماید. این عمل منجر به گرمایش بیش از حد و خوردگی و سرانجام شکست لوله شد [۱۸]. سرمستی/امامی و همکاران عامل‌های خوردگی تبادله‌گر گرمایی پوسته و لوله پالایشگاه لاوان را با استفاده از فناوری نوین الکتروشیمیایی برای فراورده‌های خوردگی و نیز روش‌های الکتروشیمیایی ایمپدانس و پلاریزاسیون سیکی مورد بررسی قرار دادند. نتیجه‌های آن‌ها نشان داد که وقوع خوردگی تنشی و خوردگی انتخابی در آلیاژ به کار رفته در ساخت لوله‌های تبادله‌گر گرمایی عامل اصلی خوردگی است [۱۹].

(۱) Xiu-qing

(۳) Imran

(۲) Abdulwahid

### آماده سازی نمونه‌ها برای انجام آنالیزها

آماده‌سازی درست و دقیق نمونه یکی از عامل‌های بسیار مهم در انجام آزمون می‌باشد. بدین منظور، نمونه‌ها در قسمت دارای رسوب‌های سطحی، با استفاده از میکروکاتر و مقطع عرضی بریده شدند و مقطع عرضی آنها تهیه شد. سپس برای پیشگیری از کنده شدن رسوب‌های سطحی در زمان سمپاده زنی، نمونه‌ها به روش سرد مانع شدند. سپس مقداری از اکسیدهای کنده شده، پودر شده و آزمون‌های XRF و XRD برای آنالیز ترکیب‌های موجود در سطح انجام شد.

### بخش نظری

#### بررسی تحلیلی نقش رسوب‌ها بر انتقال گرما در تبادلگر

رسوب در مبدل‌های گرمایی می‌تواند ناشی از نمک‌های معدنی حل شده در آب، یا وجود ذره‌های معلق و یا واکنش سطح انتقال گرما با محیط پیرامون و تشکیل فراورده‌های خوردگی باشد. روشن است نشست نمک‌های معدنی حل شده و یا ذره‌های معلق سریع‌تر از فراورده‌های خوردگی می‌باشد. بنابراین نخست یک لایه شکل می‌گیرد و این لایه با گذشت زمان و افزوده شدن فراورده‌های خوردگی روی سطح می‌تواند ضخیم‌تر و چسبنده‌تر شود. مدل‌های ریاضی محدودی برای شبیه سازی رسوب در یک لوله ساده وجود دارند که در این پژوهش از مدل توسعه یافته لاینر<sup>(۱)</sup> و همکاران [۲۰] و ترنر<sup>(۲)</sup> و همکاران [۲۱] استفاده شده است. همچنین این مدل توسط مرجع [۲۲] نیز مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل به صورت زیر بیان می‌شود: رسوب‌های بیان شده در طی چند مرحله به سطح می‌چسبند و تشکیل یک لایه می‌دهند. جرم رسوب در هر متر مربع (M) از سطح جانبی در تبادلگر دیگی تولید کننده بخار از معادله (۱) به دست می‌آید:

$$M = \left[ K C \rho v / (a(U^*)^2) \right] (1 - \exp(a(U^*)^2 t / v)) \quad (1)$$

که نرخ رسوب (K) با معادله (۲) تعیین می‌شود:

$$K = \left( \frac{1}{k_i} + \frac{1}{k_a} \right)^{-1} \quad (2)$$

معادله (۲) بیانگر رسوب ذره‌ها توسط دو مرحله انتقال به سطح و تجمع می‌باشد. برای سطوح عمودی ضریب انتقال (k<sub>i</sub>) شامل سهم انتشار گردابه‌ای مولکولی مضاعف (K<sub>d</sub>)، انتقال اینرسی (K<sub>i</sub>).

گرماگرایی (K<sub>th</sub>) و جوشش (K<sub>b</sub>) می‌باشد. این فرایندهای انتقال به صورت سری انجام می‌شوند؛ بنابراین خواهیم داشت:

$$k_t = k_d + k_i + k_{th} + k_b \quad (3)$$

سهم انتقال ذره‌ها توسط انتشار مولکولی گردابه‌ای را می‌توان با معادله (۴) محاسبه نمود:

$$k_d = (Sc)^{-\frac{1}{3}} U^* / 1.9 \quad (4)$$

سهم اینرسی برای نرخ انتقال ذره‌ها از معادله (۵) تعیین می‌شود:

$$k_i = \frac{U^* t_p^* \rho}{2615 \rho_p} \exp(0.48 t_p^*) \quad (5)$$

سهم زمان ماند بدون بُعد t<sub>p</sub>\* با معادله (۶) بیان می‌شود:

$$t_p^* = \frac{1}{18} \frac{\rho_p}{\rho} \left( \frac{U^* d_p}{v} \right)^2 \quad (6)$$

سهم جوشش در نرخ انتقال ذره‌ها را می‌توان از معادله (۷) برآورد نمود:

$$k_b = \frac{bq}{\rho h_f} \quad (7)$$

سهم ضریب گرماگرایی در نرخ انتقال ذره‌ها با استفاده از معادله (۸) برآورد می‌شود:

$$k_{th} = \frac{0.13 h_c v (T_s - T_b)}{3 (2k_f + k_p) T_b} \quad (8)$$

نرخ ضریب تجمع ذره‌ها با معادله (۹) بیان می‌شود:

$$k_a = k_o \exp \left( \frac{E_a}{R \cdot T_s} \right) \quad (9)$$

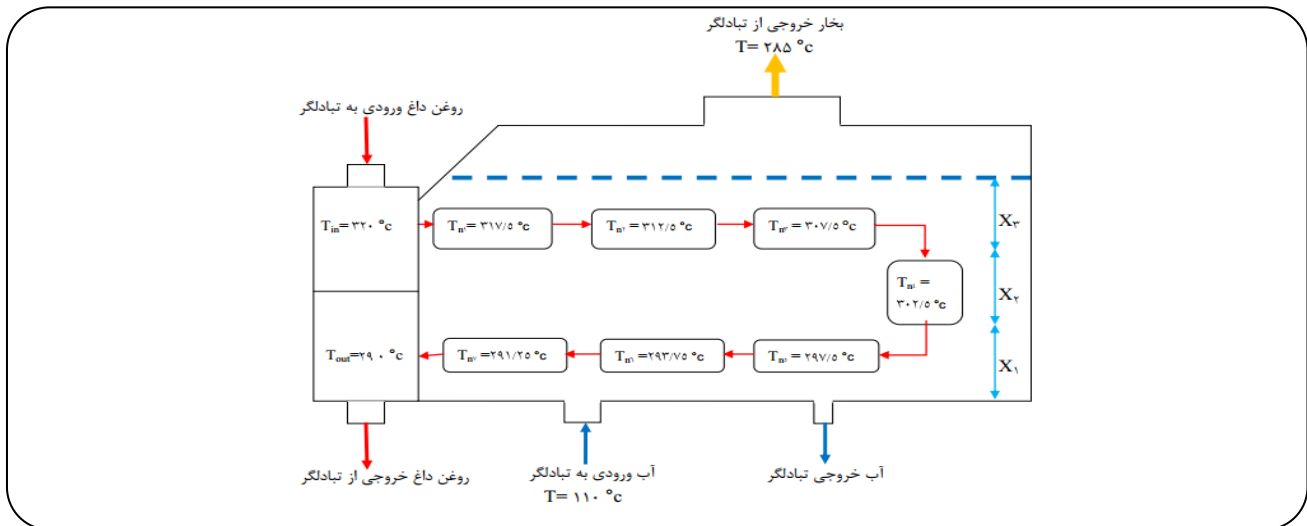
مقاومت گرمایی رسوب طبق معادله (۱۰) بیان نمود:

$$R_f = \frac{M}{(\rho_f k_f)} \quad (10)$$

توزیع تقریبی دمای روغن در تبادلگر گرمایی دیگی مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شد.

(۱) Liner

(۲) Turner



شکل ۱- توزیع دمای روغن درون تبادله گر گرمایی دیگری.



شکل ۲- تصویر نمونه‌های انتخاب شده.

بنابراین نقش رسوب بیرون لوله‌های تبادله گر گرمایی دیگری مورد بررسی با استفاده از معادله‌های (۱) تا (۱۰) و فرض‌های زیر بر اساس غلظت‌های گوناگون ناخالصی‌های موجود در آب ورودی به پوسته، توسط نرم‌افزار متلب برای این پژوهش شبیه‌سازی شد:

- افزایش افت فشار در سطح مقطع عرضی لوله می‌باشد.
- رسوب تنها در سطح بیرونی لوله‌ها تشکیل می‌شود.
- رسوب به صورت یکنواخت بر روی لوله ته‌نشین می‌شود.
- دمای روغن در هر متر لوله ۲/۵ درجه سلسیوس کاهش می‌یابد.

### نتیجه‌ها و بحث

چون میزان خوردگی در سرتاسر طول لوله‌های تبادله گر گرمایی دیگری انتخاب شده یکسان نبود، در نتیجه برای انجام آزمایش‌های خوردگی دو نمونه انتخاب شد. تصویر نمونه‌های انتخاب شده در شکل ۲ آورده شده است.

شکل ۲ نشان می‌دهد که نمونه اول دارای رسوب‌های اکسیدی یکنواخت می‌باشد در حالی که نمونه دوم دارای رسوب‌های سطحی متورم است. بنابراین از مشاهده‌های ظاهری به نظر می‌رسد نمونه دوم بیش‌تر در معرض خوردگی و تنش گرمایی قرار داشته است.

### تجزیه و تحلیل آنالیز شیمیایی نمونه‌های مورد آزمایش

نتیجه‌های آنالیز شیمیایی نمونه‌ها و نمونه استاندارد ASTM A210 برای فولاد کربنی متوسط با استفاده از کوانتومتر در جدول ۱ نشان داده شده است.

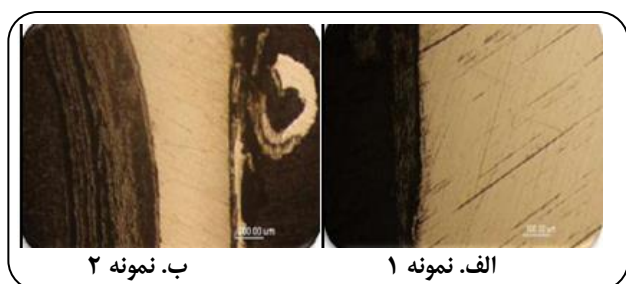
مقدارهای گزارش شده در جدول ۱ نشان دهنده این است که هر دو نمونه در گستره استاندارد ASTM A210 قرار دارند.

### نتیجه‌های بررسی میکروسکوپی نوری نمونه‌ها

مطابق شکل ۳ نمونه‌های ۱ و ۲ بریده شده و سپس به روش سرد مانت شدند.

جدول ۱: آنالیز شیمیایی دو نمونه لوله و آنالیز استاندارد ASTM A210

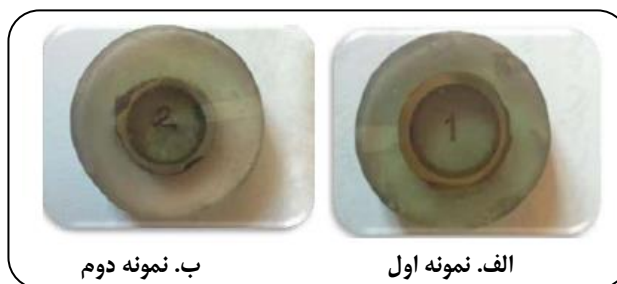
عنصر	نمونه اول	نمونه دوم	استاندارد
کربن	۰/۲۱	۰/۲	۰/۲۷
منگنز	۰/۶۵	۰/۷۳	۰/۹۳
گوگرد	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳۵
فسفر	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳۵
سلیسیم	۰/۲۶	۰/۲۸	۰/۱



ب. نمونه ۲

الف. نمونه ۱

شکل ۴- تصویرهای متالوگرافی نمونه‌ها.



ب. نمونه دوم

الف. نمونه اول

شکل ۳- تصویر نمونه های مانیت شده.

### نتیجه‌های بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌ها

تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز نتیجه‌های به دست آمده از میکروسکوپ نوری را تأیید می‌کنند. در شکل ۵ رسوب‌های درون لوله نمونه ۱ نشان داده شده است. در این شکل موقعیت دقیق پوسته داخلی در ناحیه‌ای که بیشترین ضخامت را دارد، نشان داده شده است. بررسی آنالیز EDS از پوسته داخلی، میزان بالای کربن (۲/۱۳٪)، گوگرد (۲/۶٪)، وانادیم (۱/۲٪) و اکسیژن (۰/۲٪) به همراه عنصرهای آلیاژ پایه نظیر آهن (۱/۰۸٪)، سلیسیم (۰/۶٪) و منگنز (۰/۳٪) را نشان می‌دهد. میزان بالای کربن در این قسمت به مفهوم تجزیه کم روغن در این منطقه‌ها می‌باشد.

تغییر ضخامت لایه تشکیل شده در نمونه ۲ در شکل ۶ آورده شده است. نتیجه نمونه ۱ برای نمونه ۲ نیز قابل بیان است.

### نتیجه‌های آنالیز XRF و XRD از رسوب‌های روی سطح بیرونی نمونه‌ها

نتیجه‌های آزمایش XRF نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است. نکته قابل تأمل در این آنالیز، حضور عنصر روی (Zn) می‌باشد که لازم است در مراحل اولیه تولید بخار و در سامانه‌های مربوطه مورد بازبینی قرار داده شود. همانند نمونه شماره ۱ وجود ترکیب‌ها شامل کلسیم، سدیم و فسفر در این نمونه ۲ نیز تأیید می‌شود.

شکل ۳ الف نشان می‌دهد که بیش‌تر لایه‌ها در سطح بیرونی لوله می‌باشد. همچنین در بخشی که پوسته شدن رخ داده، نازک شدن ضخامت دیواره لوله نیز دیده می‌شود. همین نتیجه در مورد نمونه ۲ نیز وجود دارد. به بیان دیگر سهم لایه‌های درونی در از بین رفتن ضخامت لوله بسیار کم می‌باشد. افزون بر کاهش ضخامت به میزان بیش‌تر نسبت به نمونه شماره ۱، حجم اکسیدهای تشکیل شده نیز به مراتب بیش‌تر بوده و آماس در حد آشکار در سطح نمونه دوم قابل دیدن است.

متالوگرافی نمونه‌ها در شکل ۴ آورده شده است. برای متالوگرافی، پس از مانیت کردن نمونه‌ها سطح مقطع آن‌ها سمباده و براق شدند. برای بررسی فلز اولیه و اطمینان از یکسان بودن ساختار و نبود آخال و مک‌ها ساختاری، نخست از سطح نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری تصویرهایی گرفته شد. سپس نمونه‌ها اچ شدند و بررسی ساختاری و نیز بررسی لایه‌های سطحی توسط میکروسکوپ نوری انجام شد.

همان‌گونه که در شکل‌های ۴ الف و ۴ ب نشان داده شده است، سطح نمونه‌ها تقریباً یکنواخت و بدون هرگونه زنگ و خراش است. این امر با آنالیز شیمیایی نمونه همخوانی دارد. همچنین این نتیجه در نمونه اچ شده نیز قابل تشخیص بود.

جدول ۲- نتیجه‌های آنالیز XRF رسوب‌های سطح بیرونی نمونه‌ها.

اجزاء	نمونه اول (%)	نمونه دوم (%)
آهن	۹۸/۳۳	۸۸/۶۵
سلیسیم	۰/۴۰۱	۰/۸۶۲
منگنز	۰/۳۰۷	۱/۲۹
روی	۰/۱۹۹	۳/۵۲
کلسیم	۰/۱۴۸	۱/۳
فسفر	۰/۱۰۰	۰/۶۳۳
گوگرد	۰/۰۹۹	۰/۱۱
آلومینیم	۰/۰۹	۰/۲
سدیم	۰/۰۷۳	۲/۷۵
مس	۰/۰۷۱	۰/۰۸۴
کروم	۰/۰۵۱	۰/۰۳۵
منیزیم	۰/۰۵	۰/۲۴۹
پتاسیم	-	۰/۰۳۱
کلر	-	۰/۰۸۱
جمع	۹۹/۹۲	۹۹/۹۲

الگوی پراش پرتو ایکس از نمونه ۱ مطابق شکل ۷ است. در این الگو فازهای اکسید آهن، بیش‌تر به صورت  $Fe_2O_3$ ،  $Fe_{21.34}O_{32}$ ، مشخصه یابی شدند. به دلیل مقدار بسیار کم فازهای دیگر امکان تشخیص این فازها میسر نشد. این امر با توجه به درصد پایین دیگر عناصر در نتیجه‌های آنالیز XRF طبیعی است.

شکل ۸، الگوی پراش پرتو ایکس نمونه ۲ را نشان می‌دهد. در این الگو، فازهای آهن اکسید، بیش‌تر به صورت مگنتیت ( $Fe_3O_4$ )،  $Fe_{2.886}O_4$ ،  $Fe_{2.936}O_4$ ، هماتیت ( $Fe_2O_3$ ) و کرومیت ( $Fe^{+2}Cr_2O_4$ ) مشخصه یابی شدند.

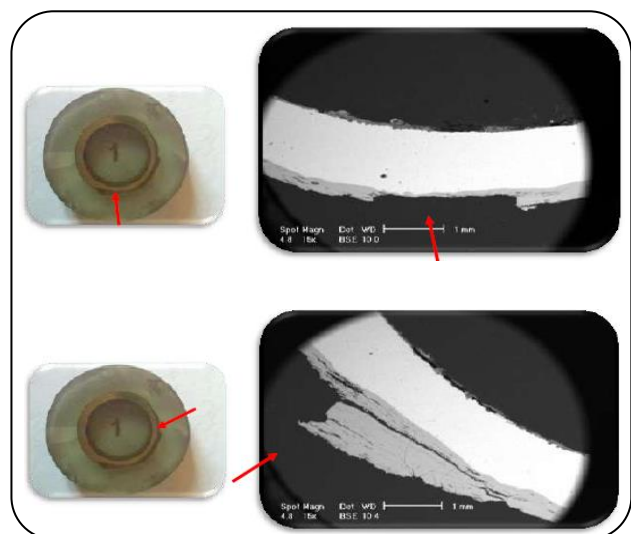
نتیجه‌های آزمون‌های XRD و XRF از رسوب‌ها روی سطح درونی و بیرونی لوله، وجود ترکیب‌هایی از سیلیسیم، کلسیم و فسفر را در تنها در سطح بیرونی نشان می‌دهد که بیانگر کیفیت پایین آب ورودی به پوسته تبادلگر دیگی است. این ترکیب‌ها تشکیل پیل‌های غلظتی اکسیژن می‌دهند که می‌توانند موجب خوردگی زیررسوبی از زیر مجموعه‌های خوردگی تنشی شوند. این نوع از خوردگی همچنین در نتیجه‌های مراجع [۱۹-۱۸] برای خوردگی لوله‌های تبادلگر گرمایی گزارش شده است.

#### بررسی خوردگی بر انتقال گرما از نتیجه‌های آزمایش‌های خوردگی

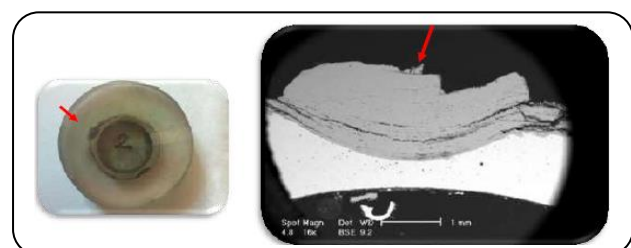
چون آنالیز شیمیایی نمونه مطابق با استاندارد بوده است؛ بنابراین مشکل به وجود آمده ناشی از ترکیب شیمیایی جنس لوله نمی‌باشد. با توجه به بررسی صورت گرفته با میکروسکوپ و مشخص شدن دو لایه متراکم و متخلخل در سطح بیرونی لوله‌ها و نتیجه‌های به دست آمده از آزمون XRF وجود ترکیب‌های منیزیم، سدیم، فسفر و کلسیم در آنالیزهای فوق، حضور این عنصرهای در بخار آب را نشان می‌دهد. این عنصرهای به صورت رسوب‌هایی به شکل کلسیم کربنات و یا ترکیب‌های شامل فسفات بر سطح لوله تشکیل می‌شوند. این رسوب‌ها به صورت موضعی انتقال گرما را کاهش داده و با ایجاد بیش گرمایش در این قسمت‌ها به مرور زمان موجب تشکیل لایه‌های اکسیدی می‌شوند [۱۸]. چون استحکام فولاد با افزایش دما به سرعت کاهش می‌یابد، پس از مدت زمان دچار گسیختگی می‌شود.

#### بررسی تحلیلی نقش رسوب‌ها بر روی انتقال گرما در مبدل

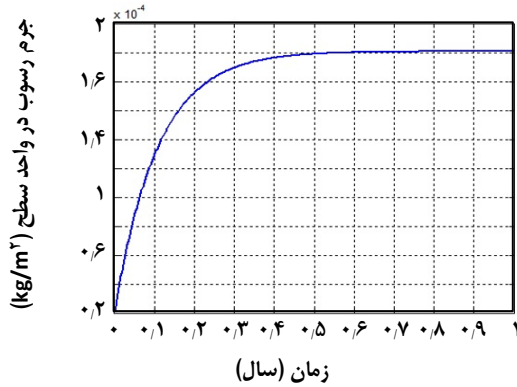
بر اساس معادله‌های (۱) تا (۱۰) و فرضیه‌های انجام شده تغییرهای جرم رسوب و مقاومت رسوب در غلظت میانگین ناخالصی‌های موجود در آب مورد استفاده در پوسته تبادلگر مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۹ تغییر جرم رسوب با گذشت زمان را برای غلظت میانگین ناخالصی آب ورودی ( $10^{-1} \times 2/1$ ) نشان می‌دهد.



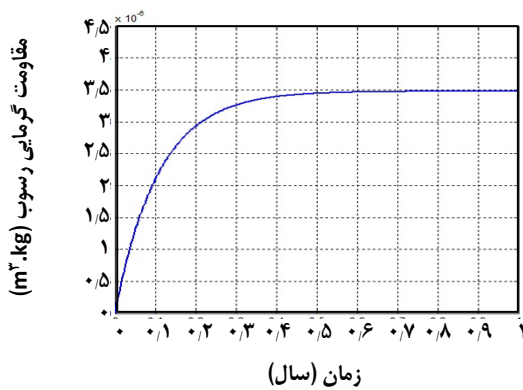
شکل ۵- تصویر غیریکنواختی در تشکیل لایه خارجی نمونه ۱



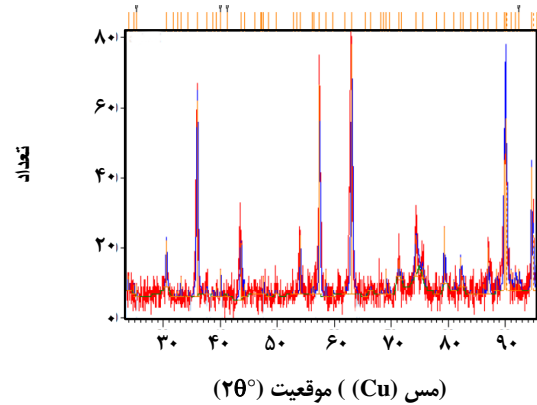
شکل ۶- نازک شدن فلز بر اثر ایجاد لایه اکسیدی نمونه ۲.



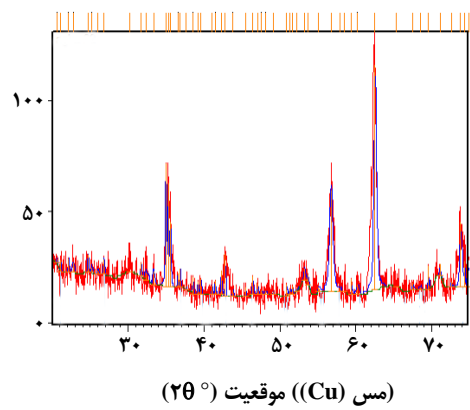
شکل ۹- تغییر جرم رسوب بر حسب زمان در غلظت میانگین ناخالصی آب ورودی



شکل ۱۰- تغییر مقاومت گرمایی رسوب بر حسب زمان در غلظت میانگین ناخالصی آب ورودی.



شکل ۷- تصویر الگوی پراش پرتو ایکس نمونه ۱.



شکل ۸- الگوی پراش پرتو ایکس نمونه ۲.

### نتیجه گیری

در این پژوهش عامل‌های خوردگی تبادلگر گرمایی دیگی تولید بخار در یک واحد پتروشیمی بررسی شد. برای این کار از دو نمونه با شکل ظاهری متفاوت برای انجام آنالیزها و آزمایش‌های گوناگون استفاده شد. مهم‌ترین نتیجه‌های پژوهش عبارتند از:

۱- ترکیب شیمیایی لوله‌های تبادلگر مطابق با استاندارد بود و هیچ‌گونه ناخالصی در ترکیب دیده نشد. بنابراین جنس لوله عامل آغاز فرایند خوردگی نمی‌باشد.

۲- در سطح بیرونی لوله‌ها رسوب‌های ضخیم غیریکنواخت ناشی از مشارکت آلیاژ در تشکیل آن‌ها دیده شد که موجب کاهش ۳۰٪ ضخامت اولیه لوله شد. در نتیجه تجزیه روغن درون لوله‌ها نمی‌تواند عامل خوردگی باشد.

۳- آنالیز رسوب‌های روی سطح بیرونی لوله‌های تبادلگر گرمایی وجود ترکیب‌های اکسید شامل کلسیم، سدیم، سیلیکات و فسفر را

شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش زمان تا نصف سال، جرم رسوب تشکیل شده بر روی سطح بیرونی لوله به بالاترین مقدار خود می‌رسد و پس از آن ثابت می‌ماند. شکل ۱۰ تغییر مقاومت گرمایی رسوب با گذشت زمان را برای غلظت بالا نشان می‌دهد.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش زمان چون جرم رسوب افزایش می‌یابد مقاومت گرمایی لوله و در نتیجه فشار بخار و شار گرمایی تبادلگر مورد بررسی پس از شش ماه به یک حالت پایدار خود می‌رسد. چنین روندی برای غلظت‌های بالاتر دیده شد تنها با این تفاوت که با افزایش ناخالصی آب در زمان کم‌تری موجب خرابی لوله می‌شود. بنابراین پیامد افزایش جرم رسوب بر روی سطح بیرونی لوله، کاهش نرخ انتقال گرما و وقوع پیش گرمایش بلند مدت خواهد شد. این پدیده به ویژه در نقاط ورودی که میزان انتقال گرما بالاتر موجب تخریب بیش‌تر لوله می‌شود که با مشاهده‌های میدانی و نیز نتیجه‌های گزارش شده توسط مرجع [۱۸] هم‌خوانی داشت.



U*	سرعت اصطکاکی، m/s	نشان داد که بیانگر نبود کیفیت دلخواه آب تغذیه ورودی مورد استفاده است.
q	شار گرمایی، W/m <sup>2</sup>	
g	شتاب گرانش، m/s <sup>2</sup>	۴- تشکیل رسوب بر روی سطح بیرونی لوله‌ها منجر به خوردگی زیر رسوبی شده است. وجود همزمان فراورده‌های خوردگی و رسوب‌ها، نرخ انتقال گرما را کاهش داده و نقطه‌های داغ را ایجاد می‌نمایند. این پدیده افزایش سرعت خوردگی لوله را در این نقطه‌ها در پی داشت.
D	ضریب نفوذ، m <sup>2</sup> /s	
k <sub>th</sub>	ضریب ترموفورز، m/s	
h <sub>C</sub>	ضریب انتقال گرما جابه‌جایی، W/m <sup>2</sup> .°C	بر این اساس، بهبود کیفیت آب ورودی، شستشوی دوره‌ای، افزایش میزان آب تخلیه (برای پیشگیری از انباشت رسوب در کف پوسته) و سنجش پیوسته مقدار بخار تولید شده توسط تبادلگر گرمایی دیگری به عنوان راهکارهای کنترل خوردگی پیشنهاد می‌شوند.
K <sub>l</sub>	ضریب رسانایی گرمایی مایع، W/m.°C	
K <sub>p</sub>	ضریب رسانایی گرمایی ذره‌های مغناطیسی، W/m.°C	
K <sub>f</sub>	ضریب رسانایی گرمایی رسوب، W/m.°C	
K	ضریب رسوب ذره‌ها، m/s	
K <sub>a</sub>	ضریب پیوستگی، m/s	
K <sub>b</sub>	ضریب جوش رسوب، m/s	
K <sub>d</sub>	ضریب انتشار گردابه‌ای، m/s	
K <sub>i</sub>	ضریب اینرسی در انتقال ذره‌ها، m/s	<b>فهرست نمادها</b>
K <sub>t</sub>	ضریب انتقال، m/s	تنش برشی، N/m <sup>2</sup>
Sc	عدد اشمیت، -	ثابت جهانی گاز، N.m/K.mol
C	غلظت وزنی ذره‌ها، -	جرم ویژه سیال، kg/m <sup>3</sup>
d <sub>p</sub>	قطر ذره‌ها، m	جرم ویژه ذره‌ها، kg/m <sup>3</sup>
v	گرانروی سینماتیک، m <sup>2</sup> /s	جرم ویژه رسوب، kg/m <sup>3</sup>
h <sub>fg</sub>	گرمان نهان تبخیر، J/kg	جرم رسوب بر مترمربع، kg/m <sup>2</sup>
R <sub>f</sub>	مقاومت رسوب، °C/W	دمای سیال، °C
		دمای سطح، °C
		زمان، s
		زمان استراحت بدون بعد، -
		T
		R
		ρ
		ρ <sub>p</sub>
		ρ <sub>f</sub>
		M
		T <sub>b</sub>
		T <sub>s</sub>
		t
		t <sub>p</sub> *

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۲۰

## مراجع

- [1] Fontana M.G., "Corrosion Engineering", Tata McGraw-Hill Education (2005).
- [2] Elayaperumal K., Raja V.S., Corrosion Failures, John Wiley & Sons Inc. (2015).
- [3] Thulukkanam K., "Heat Exchanger Design Handbook", 2nd ed., CRC Press (2013).
- [4] <http://www.stpc.ir>
- [5] Ming-Jia L., Song-Zhen T., Fei-long W., Qin-Xin Z., Wen-Quan T., Gas-Side Fouling, Erosion and Corrosion of Heat Exchangers for Middle/Low-Temperature Waste Heat Utilization: A Review on Simulation and Experiment, *Applied Thermal Eng.*, **126(5)**: 737-761 (2017).
- [6] Sarmasti Emami M.R., An Experimental and Theoretical Investigation of Corrosion Mechanism in a Metallic Stack, *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, **9(3)**: 58-66 (2012).
- [7] Vasauskas V., Baskutis S., Failures and Fouling Analysis in Heat Exchangers, *Mechanika*, **61(5)**: 24-31 (2006).

- [۸] افشاری مرتضی؛ نوری دلاور اکرم؛ آنالیز تخریب تیوبهای مبدل حرارتی از جنس فولاد کربنی مربوط به کمپرسور چهار مرحله‌ای افزایش دهنده فشار گاز، فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، (۸) ۱۸: ۵۹ تا ۶۸ (۱۳۹۴).
- [۹] جسمانی، سید محمد؛ شریعت، محمد حسین؛ اشرف ریاحی، علی؛ "بررسی علت تخریب لوله‌های سوپر هیتز کارخانه نیشکر اهواز"، یازدهمین اجلاس/انجمن خوردگی، کرمان، ایران (۱۳۸۸).
- [۱۰] رضائیان، مهدی؛ نعمت اللهی، محمد رضا؛ سیروی نژاد، آرش؛ "بررسی علت تخریب لوله‌های بویلر نیروگاه سیکل ترکیبی فارس"، سومین اجلاس نیروگاه‌های برق، مازندران، ایران (۱۳۸۹).
- [۱۱] قربانی، رضا؛ "بررسی دلایل خوردگی مبدل‌های خنک‌کننده سکوی دریایی فاز یک و راهکارهای جلوگیری از آن‌ها"، سومین همایش بین‌المللی مبدل‌های گرمایی در صنایع نفت و انرژی، تهران، ایران، آبان (۱۳۹۰).
- [۱۲] محقق، امیر؛ سرگلزایی، جواد؛ باستانی، داریوش؛ بررسی تأثیر جریان سیال بر نرخ خوردگی فولاد ساده کربنی در محلول آبی به کمک الکتروود صفحه چرخان، تشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳) ۳۳: ۴۱ تا ۵۱ (۱۳۹۳).
- [۱۳] سرمستی امامی، محمد رضا؛ نعمتی امیری مجید؛ "بررسی خوردگی پیشگرمکن هوا در نیروگاه شهید سلیمی نکا"، پانزدهمین کنگره ملی خوردگی ایران، تهران، ۲۹ مهر (۱۳۹۳).
- [۱۴] شایگانی اکمل، محمد؛ ذاکر صفایی، چورا؛ علل ترک خوردگی لوله آلیاژی از جنس SS. ۳۴۷ واحد آیزوماکس پالایشگاه، فصلنامه زنگ، ۵۱: ۱۲ تا ۱۸ (۱۳۹۱).
- [۱۵] روحی، محسن؛ رحیمی زیناب، علیرضا؛ "بررسی علت و عوامل خوردگی لوله‌های مبدل مورد استفاده در پالایشگاه نفت"، پنجمین همایش مبدل‌های گرمایی، تهران، ایران، ۳۰ آبان (۱۳۹۲).
- [16] Xiu-qing X., Zhen-Quan B., Yao-Rong F., Qiu-Rong M., Zhao Wen-Zhen, *The Influence of Temperature on the Corrosion Resistance of 10 Carbon Steel for Refinery Heat Exchanger Tubes*, *Applied Surface Science*, **280**: 641-645 (2013).
- [17] Abdulwahid W., Al-Hallaf A., *Theoretical Study on Heat Transfer in the Presence of Fouling*, *Iraqi J. of Chemical and Petroleum Engineering (IJCPE)*, **14(1)**: 47- 53 (2013).
- [18] Imran M., *Effect of Corrosion on Heat Transfer through Boiler Tube and Estimating Overheating*, *Int. J. of Advanced Mechanical Eng. (IJAME)*, **4(6)**: 629-638 (2014).
- [۱۹] سرمستی امامی، محمد رضا؛ عرفانی راد، رحمان؛ "ارزیابی عوامل خوردگی مبدل حرارتی پوسته و لوله پالایشگاه لاوان"، پانزدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، ۲۸ بهمن، دانشگاه تهران ۱۳۹۳.
- [20] Liner Y., Carver M.B., Turner C.W., Campagna A.O., "Simulation of Magnetite Particulate Fouling in Nuclear Steam Generators", Chalk River Laboratories, AECL Research, Ontario, Canada (1992).

- [21] Turner C.W., Liner Y., Carver M.B., "Modeling Magnetite Particle Deposition in Nuclear Steam Generators and Comparisons with Plant Data", *Presented at the Second International Steam Generator and Heat Exchanger Conference*, Toronto, Canada (1994).
- [22]. Huang X., "Theoretical and Experimental Study of Degradation Monitoring of Steam Generators and Heat Exchangers", Master's Thesis, University of Tennessee (2003).  
[https://trace.tennessee.edu/utk\\_gradthes/1978](https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/1978).