

تحلیل روی زدایی و خوردگی دو فلزی در مبدل‌های حرارتی واحد LPG پالایشگاه لاوان و راهکارهای کنترل

رحمان عرفانی، محمدرضا سرمستی امامی*

گروه مهندسی شیمی، دانشگاه علم و فناوری مازندران، مازندران، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده



واژه‌های کلیدی:

خوردگی مبدل حرارتی،
زدایش روی، آلیاژ برنج،
امپدانس الکتروشیمیایی،
پلاریزاسیون سیکلی

Keywords:

Heat exchanger corrosion,
Dezincification,
Brass alloy,
Electrochemical impedance
spectroscopy (EIS),
Cyclic polarization

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷

نوع مقاله: علمی - پژوهشی

در این پژوهش، از آزمایش‌های مختلف خوردگی برای بررسی عوامل خوردگی مبدل حرارتی پوسته و لوله در پالایشگاه لاوان استفاده شده است. در این مبدل، از جریان آب دریا به عنوان سیال سرد برای خنک کردن بوتان درون پوسته استفاده می‌شود. به همین منظور، دو مبدل حرارتی از واحد گاز مایع (LPG) برای بررسی انتخاب شدند. در این پژوهش، از تکنیک نوین الکتروشیمیایی برای بررسی محصولات خوردگی روی نمونه‌های خورده شده و از روش‌های الکتروشیمیایی امپدانس و پلاریزاسیون سیکلی، به همراه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، برای شناسایی عوامل خوردگی استفاده شده است. نتایج نشان داد که آلیاژ برنج استفاده شده در برابر خوردگی یکنواخت و خوردگی حفره‌ای مقاوم است. اما مهم‌ترین نوع خوردگی که مشاهده شد، خوردگی دو فلزی و انتخابی در محل اتصال لوله‌های برنجی به صفحات فولادی ضد زنگ بود. همچنین، خوردگی سایشی و خوردگی خستگی در این نواحی به وضوح شناسایی شد. راهکارهای کنترل خوردگی شامل استفاده از عایق‌های الکتریکی در محل‌های اتصال فلزات مختلف، انتخاب آلیاژهای مقاوم به خوردگی، کنترل شرایط عملیاتی، به کارگیری پوشش‌های محافظتی، استفاده از فیلترها و هوازادایی، و استفاده از آندهای فداشونده ضروری است. همچنین، برای جلوگیری از روی زدایی، پیشنهاد می‌شود از آلیاژهای آلومینیوم-برنج حاوی آرسنیک به جای برنج معمولی استفاده گردد.

مقدمه

یکپارچگی سازه‌های و در بسیاری موارد افت عملکرد تجهیزات می‌شود [۱]. خوردگی پدیده‌ای فراگیر در تمامی صنایع است که به دلیل ماهیت واکنش‌پذیر فلزات، منجر به تخریب تدریجی تجهیزات می‌شود؛

خوردگی فرآیند تخریبی ناخواسته یک فلز یا آلیاژ است که بر اثر واکنش‌های شیمیایی یا الکتروشیمیایی با محیط اطراف رخ می‌دهد و منجر به تغییر نامطلوب خواص سطحی یا حجمی آن، کاهش

* عهده‌دار مکاتبات

+E-mail: m_r_emami@mazust.ac.ir

رجاع: رحمان عرفانی، محمدرضا سرمستی امامی، تحلیل روی زدایی و خوردگی دو فلزی در مبدل‌های حرارتی واحد LPG پالایشگاه لاوان و راهکارهای کنترل، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳) ۴۴: ۶۳ تا ۷۷ (۱۴۰۴).

در مراحل اولیه و طراحی برنامه‌های پیشگیرانه به کار گرفته شده‌اند [۹]. با وجود مطالعات فراوان در زمینه خوردگی مبدل‌های حرارتی، داده‌های میدانی مرتبط با عملکرد آلیاژهای مسی در مبدل‌های پوسته و لوله واحدهای LPG واقع در منطقه خلیج فارس (جنوب ایران) بسیار محدود است. از این رو، هدف این پژوهش شناسایی و ارزیابی مکانیزم‌های خوردگی و ارائه راهکارهای کاهش آن در شرایط عملیاتی پالایشگاه لاوان با بهره‌گیری از آزمون‌های الکتروشیمیایی و تحلیل‌های سطحی است.

بررسی تحلیلی پژوهش‌های پیشین

مطالعات متعدد در صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و مبدل‌های حرارتی صنعتی نشان داده‌اند که بروز و شدت خوردگی لوله‌های مبدل‌های پوسته و لوله تحت تأثیر عواملی چون جنس آلیاژ، ترکیب شیمیایی سیال، کیفیت آب، شرایط هیدرودینامیکی، رسوبات، زوج‌های فلزی و عوامل میکروبی است. با این حال، نحوه اثرگذاری هر عامل و تعامل آن‌ها پیچیده بوده و در شرایط عملیاتی مختلف تفاوت‌های قابل توجهی دارد. در ادامه، پژوهش‌های پیشین بر اساس مکانیزم‌های خوردگی غالب دسته‌بندی و ارزیابی می‌شوند.

خوردگی حفره‌ای ناشی از یون کلرید

روچی و رحیمی‌زیناب [۱۰] با مطالعه لوله‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ حفرات متعدد ناشی از یون کلرید را مکانیزم غالب معرفی کردند و پایش میکروسکوپی را ضروری دانستند. *Batelić* و همکاران [۱۱] در چگالنده نیروگاه حرارتی نشان دادند که ترکیب آب دریا و سرعت بالای جریان هم‌افزایی خوردگی حفره‌ای و سایشی ایجاد می‌کند و انتخاب آلیاژ مقاوم و بهینه‌سازی جریان توصیه شد. *Wang* و همکاران [۱۲] اثر دما و pH بر نرخ خوردگی حفره‌ای را تحلیل کردند. *Chen* و همکاران [۱۳] نقش ناخالصی‌های یونی و رسوبات معدنی در شدت خوردگی حفره‌ای را نشان دادند. *Singh* و همکاران [۱۴] اثر سرعت جریان و تنش مکانیکی بر تشکیل حفرات را بررسی کردند و *Javed* و همکاران [۱۵] نقش همزمان کلرید و باکتری‌های SRB را در تسریع خوردگی حفره‌ای برجسته نمودند.

خوردگی سایشی و فرسایشی

حسینی و شایگانی [۱۶] ترکیب خوردگی شیمیایی، سایشی و رسوب‌گذاری را عامل اصلی خرابی لوله‌های چگالنده معرفی کردند. گودرزوی و نوبری [۱۷] اثر گل و لای، ذرات معلق، سلول‌های غلظتی اکسیژن، حضور SRB و تزریق نامنظم کلر را بر تشدید خوردگی نشان دادند و استفاده از آلیاژ مقاوم، تیمار شیمیایی مناسب و پایش پیوسته را توصیه کردند.

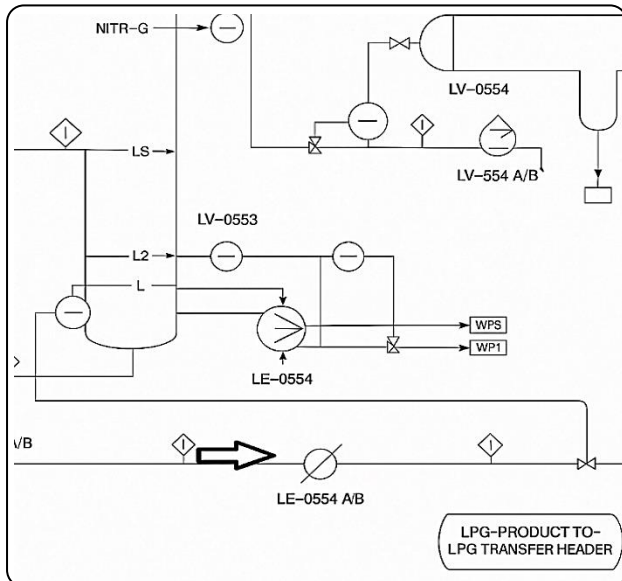
با این حال، در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی به دلیل شرایط عملیاتی خورنده، حضور آب، کلریدها و دماهای بالا، اهمیت و شدت آن دوچندان است [۳-۲]. بر اساس مطالعات انجام شده، هزینه سالانه خوردگی در جهان حدود ۲/۵ تریلیون دلار (معادل ۳,۴٪ GDP جهانی) برآورد شده است، در حالی که گزارش‌های ملی نشان می‌دهند که این هزینه در ایران نیز معادل چندین میلیارد دلار است و بخش عمده آن مربوط به تجهیزات خطوط لوله، مبدل‌های حرارتی و واحدهای فرآیندی می‌باشد [۵-۴].

خوردگی یکی از اساسی‌ترین چالش‌های مواد مهندسی به شمار می‌رود و در اشکال متعددی بروز می‌کند. از مهم‌ترین انواع آن می‌توان به خوردگی یکنواخت، خوردگی موضعی نظیر حفره‌ای، شیار و بین‌دانه‌ای، همچنین خوردگی تنشی اشاره کرد. در میان این موارد، خوردگی دو فلزی به دلیل تماس دو فلز با پتانسیل الکتروشیمیایی متفاوت در حضور محیط الکترولیت رخ داده و موجب تخریب ترجیحی فلز فعال‌تر می‌شود. علاوه بر این، جدایش انتخابی یا روی‌زدایی نیز نوعی خوردگی موضعی است که طی آن یک عنصر خاص - مانند روی در آلیاژهای برنج - ترجیحاً از ساختار خارج شده و منجر به افت شدید خواص مکانیکی آلیاژ می‌گردد.

پیامدهای خوردگی تنها به کاهش طول عمر تجهیزات محدود نمی‌شود؛ بلکه می‌تواند منجر به توقف تولید، نشت مواد خطرناک، آلودگی محیط‌زیست و بروز حوادث ایمنی جدی گردد که هزینه‌های غیرمستقیم آن چندین برابر هزینه‌های مستقیم تعمیر یا تعویض تجهیزات است [۶].

پالایشگاه لاوان دارای شمار زیادی مبدل حرارتی پوسته و لوله بوده و از آب دریا به عنوان سیال خنک‌کننده در واحدهای مختلف پالایشگاه مانند چگالش نفت، گاز، تبدیل کاتالیستی، ایزومریزاسیون و واحد تولید سوخت جت پالایشگاه استفاده می‌نمایند. بدیهی است از کار افتادن این مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله به هر دلیلی ضربه مهلکی بر عملکرد برج‌های مختلف موجود در پالایشگاه وارد می‌نماید. در بسیاری از پالایشگاه‌های ساحلی، استفاده از آب دریا به عنوان سیال خنک‌کننده، هرچند مقرون‌به‌صرفه است، اما محیطی با غلظت بالای یون کلرید، اکسیژن محلول، رسوبات و میکروارگانیسم‌ها ایجاد می‌کند که منجر به فعال شدن انواع مکانیزم‌های خوردگی از جمله خوردگی حفره‌ای، دو فلزی، سایشی و انتخابی می‌شود [۷].

انتخاب مناسب جنس لوله‌ها و صفحات نگهدارنده، کنترل سرعت جریان و استفاده از پوشش‌های مقاوم یا حفاظت کاتدی، راهکارهای کلیدی برای افزایش طول عمر مبدل‌ها هستند؛ با این حال، در شرایط واقعی بهره‌برداری، اثربخشی این راهکارها نیاز به پایش و بهینه‌سازی مداوم دارد [۸]. در سال‌های اخیر، تکنیک‌های پیشرفته‌ای مانند طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)، نويز الکتروشیمیایی و تحلیل‌های ریزساختاری (SEM/EDS) برای شناسایی مکانیزم‌های خوردگی



شکل ۱ - نمودار فرآیند خنک‌سازی LPG خروجی دی‌پروپانایزر توسط دو مبدل حرارتی

روش انجام پژوهش

شرح فرآیند و مشاهدات

شمای کلی فرآیند خنک‌سازی جریان خروجی از برج دی‌پروپانایزر با استفاده از دو مبدل حرارتی پوسته و لوله (A/B) در شکل ۱ نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۱ مربوط به نمودار جریان فرآیندی برج دی‌پروپانایزر نشان داده شده است، جریان خروجی از بالای برج برای کاهش دما و آماده‌سازی برای انتقال به واحدهای پایین‌دستی، از دو مبدل حرارتی پوسته و لوله (A/B) عبور داده می‌شود. این دو مبدل در مسیر اصلی جریان LPG قرار دارند و نقش کلیدی در خنک‌سازی محصول برج ایفا می‌کنند. طراحی آن‌ها به صورت دوگانه (A/B) علاوه بر افزایش ظرفیت انتقال حرارت، امکان بهره‌برداری مداوم در شرایط سرویس یا تعمیرات را نیز فراهم می‌سازد. پیرو گزارش بهره‌برداری مبنی بر بروز خرابی در مبدل‌های حرارتی (LE-0554 A/B) واحد LPG، هر دو دستگاه از سرویس خارج شدند. در بازرسی انجام‌شده مشخص گردید که انتهای لوله‌ها به شدت دچار خوردگی شده‌اند و همچنین بخش داخلی شامل صفحه جداساز مسیر عبور و سطح نشیمن فلنج هد شناور تخریب شده است. از کار افتادن آن‌ها موجب توقف واحد شیرین‌سازی LPG شده است.

شرایط عملیاتی مبدل حرارتی

جدول ۱ شرایط عملیاتی مبدل حرارتی را نشان می‌دهد. در سمت لوله این مبدل از آب دریا به عنوان خنک‌کننده استفاده شده و سمت پوسته آن بوتان می‌باشد. لوله مبدل دارای قطر داخلی ۱۹/۰۵ میلی‌متر، ضخامت ۱/۶۵ میلی‌متر و طول ۳۰۰۰ میلی‌متر می‌باشد.

خوردگی دو فلزی و جدایش انتخابی

طاهرزاده و همکاران [۱۸] نشان دادند که فاز Al_2O_3 و ترک‌های اطراف آن نرخ خوردگی دو فلزی را تا ۲/۵ برابر افزایش می‌دهد و مکانیزم اصلی تخریب واشرها را تشکیل می‌دهد. قربانی [۱۹] اثر زوج‌های دوفلزی، رسوبات و شرایط محیطی بر خرابی لوله‌ها را بررسی کرد. ادریس و دانای‌مقدم [۲۰] خوردگی دوفلزی و جدایش انتخابی را به‌عنوان عوامل اصلی خرابی گزارش کردند و همکاران [۲۱] نشان دادند که کنترل کلر آزاد و آمونیاک باقیمانده می‌تواند این نوع خوردگی را کاهش دهد. همکاران [۲۲] جدایش روی و ترک‌خوردگی تنشی را عامل شکست لوله‌های برنجی شناسایی کردند و اهمیت تعامل خوردگی دو فلزی با تنش مکانیکی را نشان دادند.

اثر رسوبات و شرایط زیرسویی

Ranjbar [۲۳] نشان داد که سرعت جریان پایین موجب رسوب‌گذاری و افزایش خوردگی می‌شود و سرمستی /امامی و غلامی [۲۴] اثر رسوب‌گذاری کربناتی و سولفاتی را بر ایجاد نواحی کم‌اکسیژن و تشدید خوردگی حفره‌ای بررسی کردند.

خوردگی در محیط‌های ویژه و خوردنده شدید

روشنایی و روشنایی [۲۵] مقاومت مواد تانتالیم، زیرکونیم و آلیاژهای نیکل در برابر اسیدهای گرم را بررسی کردند و تانتالیم را مقاوم‌ترین گزینه معرفی نمودند. نورانی حسین‌آبادی و همکاران [۲۶] مقاومت فولادهای زنگ‌نزن سری ۳۰۰ و ۴۰۰ و فولاد کربنی در برابر آب ترش را بررسی کردند و گریدهای ۳۰۴ و ۳۴۷ بهترین مقاومت را نشان دادند. Liang و همکاران [۲۷] نقش محلول NH_4HS و ساختار فلنج در خوردگی شستشویی قلیایی-ترش را تحلیل کردند.

خوردگی شکافی و ترک خوردگی تحت تنش (SCC)

Panahi و همکاران [۲۸] و Yang و همکاران [۲۹] SCC ناشی از ترکیب تنش مکانیکی، کلرید، H_2S و CO_2 را گزارش کردند و Adnyana و همکاران [۳۰] SCC در فولاد ضدزنگ ۳۰۴ L را پس از یک سال سرویس شناسایی نمودند.

مرور پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که هر مکانیزم خوردگی تحت تأثیر ترکیب پیچیده‌ای از عوامل متالورژیکی، شیمیایی و هیدرودینامیکی قرار دارد. بیشتر پژوهش‌ها محدود به شرایط خاص صنعتی هستند یا اثر همزمان مکانیزم‌ها را بررسی نکرده‌اند. پژوهش حاضر با رویکرد میدانی و آزمایشگاهی، ضمن بهره‌گیری از داده‌های میدانی، مکانیزم‌های غالب را شناسایی و اثر همزمان شرایط عملیاتی و مواد را ارزیابی می‌کند.



الف - لوله برنجی خورده شده مدل LE554B ب - خوردگی صفحات فولاد کربنی مدل LE554A ج - تخریب انتهایی لوله و حفرات متعدد خوردگی موضعی
شکل ۲ - تصاویر واقعی از نواحی خوردگی در مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله واحد LPG

تصاویر بیانگر کاهش ضخامت یکنواخت (حدود ۱٫۲ میلی‌متر) در لوله‌های برنجی مبدل LE554B و وجود حفرات متعدد ناشی از انحلال ترجیحی روی در مجاورت یون کلرید و اکسیژن محلول هستند. در مبدل LE554A نیز دو صفحه نگهدارنده فولاد کربنی بدون پوشش حدود ۸ میلی‌متر از ضخامت خود را از دست داده‌اند، در حالی که سر شناور سالم باقی مانده است. این تفاوت رفتاری نشان‌دهنده تشکیل پیل گالوانیکی بین فولاد کربنی و آلیاژهای مسی/برنجی است که فولاد کربنی در نقش آند دچار خوردگی شدید موضعی شده است. نمونه‌های انتخابی از لوله‌های مبدل LE554B (خورده شده و سالم) برای آنالیزهای تکمیلی برداشت و بررسی شدند. نتایج نشان داد لبه‌ی انتهایی لوله خورده شده به‌طور کامل از بین رفته و خوردگی موضعی به صورت حفرات متعدد در آن وجود داشته است، در حالی که نمونه دیگر از نظر ظاهری سالم بوده و نشانه‌ای از خوردگی یا تخریب مکانیکی در سطح آن مشاهده نشد.

شرح آزمایشات انجام شده آماده سازی نمونه‌ها

ابتدا نمونه‌های انتخابی را به صورت طولی و به اندازه یک سانتی‌متر برش داده و جهت انجام آزمایشات الکتروشیمیایی کوانتومتری، نویز الکتروشیمیایی، پلاریزاسیون سیکیلی و متالوگرافی آماده شد. پیش از انجام آزمایش‌های الکتروشیمیایی جهت بررسی خوردگی، نمونه‌ها تحت عملیات صیقل زنی قرار گرفتند و با کاغذ سمباده‌های از ۶۰۰ تا ۲۵۰۰ صیقل گردیدند. سپس در محلول الکل و استون تمیز شدند. و پس از شستشو بوسیله آب مقطر در محلول ۳/۵٪ سدیم کلرید به مدت یک ساعت قرار گرفتند.

آزمایش کوانتومتری

کوانتومتر با تحلیل طیف نوری جرقه‌زنی نمونه و اندازه‌گیری شدت نور، ترکیب شیمیایی ماده را تعیین می‌کند. نمونه روی دستگاه قرار می‌گیرد و در حضور گاز آرگون جرقه زده می‌شود. برای هر نمونه حداقل ۲ تا ۳ جرقه لازم است تا داده‌ها اعتبارسنجی شوند.

جدول ۱ - شرایط عملیاتی مبدل‌های حرارتی این پژوهش

متغیر	لوله	پوسته
دمای ورودی (°C)	۳۳	۷۰/۱
دمای خروجی (°C)	۴۳	۴۰
فشار سیال (kg/cm ²)	۵/۵	۲۳/۴
سرعت سیال (m/s)	۰/۹۷	۰/۴

جدول ۲ - ترکیب آب ورودی به لوله مبدل حرارتی

مقدار	ترکیبات
کاتیون (ppm)	
۱۳۴۴۰	سدیم
۴۸۳	پتاسیم
۵۰۸	کلسیم
۱	منیزیم
آنیون (ppm)	
۲۴۰۹۰	کلرید
۳۳۸۴	سولفات
۱۳۰	بی کربنات
۸۳	برومید
۱	فلورید
متغیرهای دیگر	
۶۲۸۰۰	هدایت کنندگی (μS/cm)
۸/۱	pH
۷	اکسیژن حل شده (ppm)
۲/۱	کربن دی‌اکسید (ppm)
۲۰	کل جامدات معلق (ppm)
۴۳۸۰۰	کل جامدات حل شده (ppm)

ترکیب آب خلیج فارس به‌عنوان سیال سرد در مبدل‌های حرارتی در جدول ۲ و در دمای ۲۰ (°C) تا ۳۰ ارائه شده است.

مشاهدات ظاهری

تصاویر واقعی از نواحی خوردگی در مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله واحد LPG در شکل ۲ نشان داده شده است.

الکترولیت در سیستم را فراهم کند. تست پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در شرایط استاندارد و در محلول سدیم کلرید ۳/۵٪ و در دمای (C) ۲۵ انجام گرفت. این آزمایش در سل استاندارد (EG&G) انجام گرفت. برای انجام آزمایش پلاریزاسیون، ابتدا نمونه‌ها با کاغذ سنباده تا شماره ۱۲۰۰ سنباده زنی و سپس صیقلی و با استون چربی زدایی شدند. در ادامه با استفاده از لاک معمولی جهت ایجاد ناحیه مربعی به ابعاد 1cm × 1cm و خورده نشدن دیگر قسمت‌ها پوشش داده شدند. نمونه‌های آماده شده به عنوان الکتروود کاری و الکتروود مرجع نیز الکتروود کالومل انتخاب شد. پتانسیل توسط پتانسیو استات مدل (EG&G-273A) کنترل می‌شد. از ۱۰۰ میلی‌ولت پایین‌تر از پتانسیل مدار باز، ولتاژ به صورت پیوسته و با نرخ ۰/۵ میلی‌ولت در هر ثانیه تغییر داده شده تا نمودار پلاریزاسیون رسم شود.

آزمایش متالوگرافی

برای بررسی میکروسکوپی و مطالعه ریزساختار آلیاژ، ابتدا نمونه‌ها برش داده و در مواد مانع قرار گرفتند. سپس با سمباده‌هایی با زبری ۶۰، ۱۰۰، ۲۸۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ ساییده و با پودر آلومینا (۲۰۰-۳۰۰ مش) صیقلی شدند تا خراش‌ها کاملاً برطرف شود. پس از اچ کردن با محلول کلرید فریک، اتانول و اسید هیدروکلریک، نمونه‌ها در بزرگنمایی‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ برابر زیر میکروسکوپ بررسی و تصویربرداری شدند. خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها (سختی، چکش خواری و استحکام کششی) از ریزساختار صیقلی شده و اچ‌شده ارزیابی شد.

آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نوعی میکروسکوپ الکترونی است که امکان تصویربرداری از سطوح با بزرگنمایی ۱۰ تا ۵۰۰،۰۰۰ برابر و قدرت تفکیک ۱ تا ۲۰ نانومتر (بسته به نوع نمونه) را فراهم می‌کند. برای نمونه‌های رسانا، آماده‌سازی با پولیش و اچ متالوگرافی کافی است، اما نمونه‌های نارسانا معمولاً با لایه نازکی از طلا، کربن یا آلیاژهای طلا پوشش داده می‌شوند.

SEM عمدتاً برای مطالعه ساختار سطح یا نواحی نزدیک به سطح نمونه‌های حجیم به کار می‌رود. منبع الکترونی آن معمولاً تفنگ انتشار ترمیونیکی (فیلامان یا رشته تنگستنی) است، اما برای دستیابی به تفکیک بالاتر، از منابع انتشار میدانی (FEG) نیز استفاده می‌شود. الکترون‌ها با ولتاژ ۱ تا ۳۰ کیلوالکترون‌ولت شتاب می‌گیرند و پس از عبور از چند عدسی متمرکزکننده، پرتو برخوردی با قطر حدود ۲ تا ۱۰ نانومتر روی نمونه ایجاد می‌شود.

نتیجه‌ها و بحث

لوله‌های برنجی به دلیل مقاومت خوب در برابر خوردگی در آب خنک‌کننده تصفیه‌شده، مقاومت در برابر خوردگی میکروبی

جرقه مطلوب برای فولاد هاله‌ای سفید مرکزی همراه با هاله‌ای دودگونه پیرامون آن است؛ هاله کاملاً سفید نشان‌دهنده عدم دقت تحلیل است. اتصال صحیح نمونه و تمیزی محل آزمایش برای کاهش خطا ضروری است.

نمونه مورد بررسی با استفاده از دستگاه کوانتومتر (Spark OES) تحلیل شد. در این روش، جرقه الکترونیکی به سطح نمونه اعمال شده و طیف نوری تولیدشده توسط طیف‌سنج اپتیکی اندازه‌گیری شد. شدت خطوط طیفی هر عنصر نسبت به استاندارد کالیبره شده، به درصد وزنی تبدیل گردید و نتایج ترکیب شیمیایی نمونه در جدول ۳ ارائه شده است.

آزمایش نويز الکتروشیمیایی

روش نويز الکتروشیمیایی (EN) یکی از تکنیک‌های منحصربه‌فرد پایش خوردگی است که بدون اعمال سیگنال خارجی، نوسانات خودبخودی پتانسیل و جریان را در سامانه ثبت می‌کند و بنابراین در مقایسه با روش‌های دیگر ارزان‌تر و ساده‌تر است. در این مطالعه، آزمون EN با استفاده از دو الکتروود برنجی ۷۰-۳۰، الکتروود مرجع SCE، محلول کلرید سدیم ۳/۵٪ و ثبت همزمان پتانسیل و جریان به مدت ۳۰ دقیقه تحت شرایط مدار باز انجام شد [۳۱-۳۲].

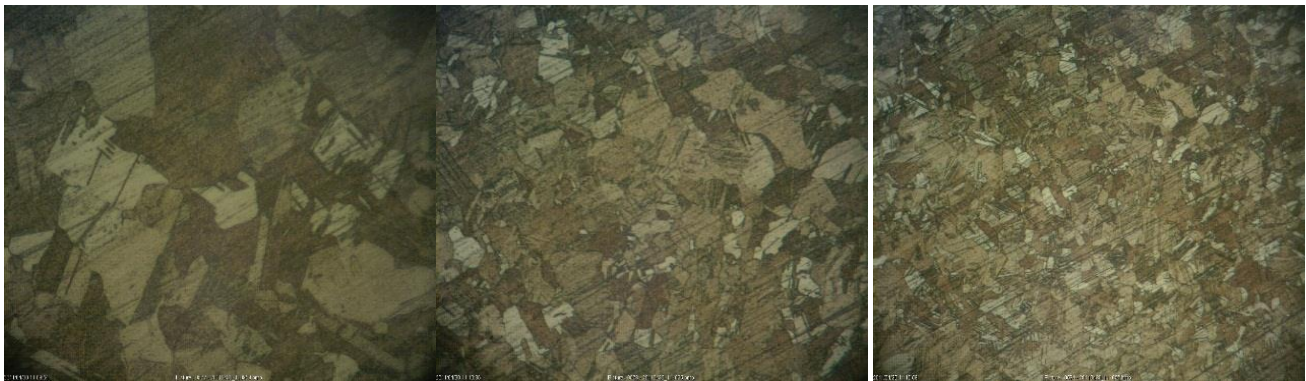
آزمون طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی

آزمون امپدانس یکی از روش‌های بررسی سرعت خوردگی است. اساس کار این روش اندازه‌گیری امپدانس جریان متناوب در دامنه‌ای از فرکانس است [۳۲]. در این پژوهش طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی اندازه‌گیری‌ها تحت پتانسیل مدار باز و از دستگاه پتانسیو استات و از نرم افزار M398V.1.30 برای ثبت داده‌های امپدانس، استفاده گردید. آزمون امپدانس مطابق استاندارد ASTM G 106-89 بر روی نمونه‌ها انجام شد.

نمونه‌ها مطابق آنچه که پیشتر گفته شد آماده و قبل از انجام هر آزمایش به مدت یک ساعت برای رسیدن به حالت پایدار (تغییرات کمتر از ۵ mV در ۵ دقیقه) در محلول آزمایش غوطه‌ور شدند. برای آزمایش از سه سل الکتروودی استفاده شد. در تمام آزمایشات از الکتروود اشباع کالومل SCE به عنوان الکتروود مرجع و از پلاتین هم به عنوان الکتروود کمکی استفاده شد. طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی در گستره فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱۰ مگاهرتز انجام شد. برای به دست آوردن مدار معادل و تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی طیف‌های امپدانس بدست آمده از نرم افزار شبیه‌سازی (Z-View) استفاده شد.

آزمایش پلاریزاسیون سیکنی

روش پلاریزاسیون سیکنی یک تکنیک غیر مخرب است که می‌تواند اطلاعات مربوط به نرخ خوردگی، پتانسیل خوردگی، حساسیت به ایجاد حفره برای خوردگی فلز و غلظت محدودیت



اندازه ۱۰۰۰ برابر

اندازه ۵۰۰ برابر

اندازه ۲۵۰ برابر

شکل ۳ - تصویر متالوگرافی نمونه مورد آزمایش

جدول ۳ - ترکیب شیمیایی نمونه‌های لوله مبدل مورد آزمایش

عنصر	درصد در نمونه ۱	درصد در نمونه ۲
مس	۷۲/۲۸۹	۷۱/۲۶۸
روی	۲۷/۳۸۰	۲۸/۳۷۵
آهن	۰/۰۴۲	۰/۰۳۶
آنتیموان	۰/۱۴۲	۰/۱۶۸
آرسنیک	۰/۰۸۰	۰/۰۸۱

تصاویر متالوگرافی نمونه‌ها

شکل ۳ تصاویر متالوگرافی نمونه را در بزرگنمایی‌های ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ برابر به ترتیب نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود مرز دانه‌ها به‌وضوح قابل تشخیص‌اند و در گستره دیده‌شده هیچ فاز ثانویه‌ای نظیر شبکه β یا رسوب متمایزی مشاهده نمی‌شود. ساختار نمونه مورد آزمایش برنج تک فاز است. این مشاهده با نتایج آنالیز شیمیایی جدول ۳ نیز سازگار است؛ ترکیب تقریبی $\text{Cu} \approx 72-73\%$ و $\text{Zn} \approx 27-28\%$ نمونه در ناحیه آلفای نمودار تعادلی برنج قرار می‌گیرد و انتظار ریزساختار تک‌فاز α را تقویت می‌کند. یکنواختی کنتراست درون دانه‌ای و نبود ناهمگنی‌های آشکار، نشان می‌دهد توزیع عناصر آلیاژی در مقیاس میکروسکوپی نسبتاً همگن است و اثری از دوفازی شدن یا جدایش موضعی قابل رؤیت در مقطع پولیش خورده دیده نمی‌شود. از منظر پیامدهای خوردگی، چنین ریزساختاری ذاتاً مستعد مکانیزم‌های ویژه برنج‌های آلفا مانند جدایش انتخابی روی در محیط‌های مناسب است، با این حال ارزیابی وقوع آن نیازمند بررسی نواحی خورده‌شده (مناطق متخلخل/لایه‌ای) در مقاطع پس از سرویس یا پس از آزمون خوردگی است.

نتایج نويز الكتروشیمیایی

شکل ۴ حاصل آزمون نويز الكتروشیمیایی بر روی دو نمونه همسان از برنج در محلول $3/5\% \text{NaCl}$ است؛ در این آزمون پتانسیل نمونه‌ها نسبت به الكترود مرجع کالومل اشباع و جریان عبوری بین دو الكترود بر حسب زمان ثبت شده است.

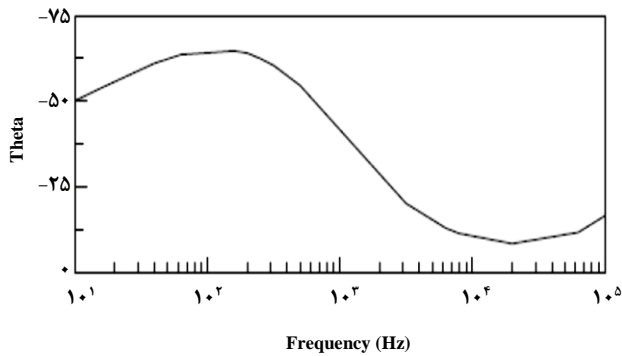
و رسانایی حرارتی مناسب، به‌طور گسترده در مبدل‌های حرارتی و خنک‌کننده‌ها به‌کار می‌روند. با این حال، برنج می‌تواند دچار خوردگی‌های مختلفی مانند خوردگی سایشی، ترک‌خوردگی و زدایش روی شود.

زدایش روی به‌ویژه در آلیاژهای حاوی بیش از 15% روی رخ می‌دهد که منجر به تشکیل لایه‌ای متخلخل و ضعیف از مس شده و در نهایت باعث شکست می‌گردد. این پدیده یکی از عوامل مؤثر در ترک‌خوردگی تنشی (SCC) برنج است. هنگامی که زدایش روی رخ می‌دهد، سطح برنج توسط توده مس متخلخل جایگزین شده که فاقد استحکام است. به‌طور کلی، انحلال ترجیحی روی از آلیاژهای Cu-Zn در آلیاژهای غنی از روی بیشتر از آلیاژهای غنی از مس رخ می‌دهد.

بررسی‌های میدانی بر روی مبدل حرارتی آسیب‌دیده نشان داد که شدت خوردگی سایشی در بخش ابتدایی لوله‌ها، به‌ویژه در 10 سانتی‌متر نخست مجاور صفحه لوله (Tube Sheet)، قابل توجه است. همچنین خوردگی دو فلزی نیز در محل اتصال لوله به صفحات نگهدارنده لوله‌ها مشهود بود. همچنین اثراتی از زدایش روی نیز مشاهده گردید. در ادامه در این بخش به بررسی نتایج آزمایشات و تجزیه و تحلیل آنها می‌پردازیم.

تجزیه و تحلیل ترکیب شیمیایی

ترکیب شیمیایی دو نمونه لوله برنجی توسط تجزیه و تحلیل شیمیایی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد نمونه مورد بررسی برنج تجاری با محتوای اصلی مس و روی است و مقادیر کم سرب، آنتیموان و آرسنیک ناشی از افزودنی‌ها یا ناخالصی‌ها می‌باشد. این نوع آلیاژ برنج که ساختارش نزدیک به برنج ۴۴۳ است برای ساخت لوله‌های مبدل‌های حرارتی مناسب می‌باشد [۳۳]. دقت دستگاه در اندازه‌گیری حدود $\pm 0.1\%$ وزنی است و داده‌های ارائه شده بازتاب‌دهنده ترکیب شیمیایی واقعی نمونه هستند.



شکل ۵ - تغییرات زاویه فاز برای نمونه در آب نمک ۳/۵٪

نتایج آزمایش امپدانس الکتروشیمیایی

آلیاژ برنج در محلول ۳/۵٪ سدیم کلرید مورد بررسی قرار گرفت. وقتی سطح نمونه در این محیط غوطه‌ور می‌شود، به‌طور طبیعی لایه‌ای غیرفعال روی سطح تشکیل می‌شود. این لایه محافظ در معرض فرآیندهای الکتروشیمیایی سه مرحله‌ای قرار دارد [۳۴-۳۵]:

۱. نفوذ اتم‌های فلز از شبکه به مرز فلز/فیلم (مرحله انتقال اتمی)
۲. انتقال جرم یون‌ها در درون فیلم غیرفعال (مرحله نفوذ یونی)
۳. انتقال بار در فصل مشترک فیلم/محلول (مرحله تبادل بار)

امپدانس کل سیستم را می‌توان به‌صورت رابطه ۱ بیان کرد: [۳۶].

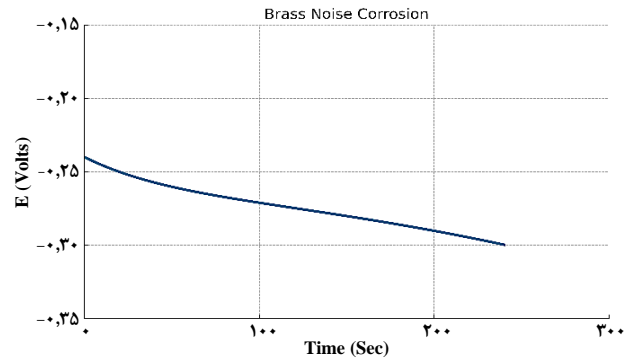
$$Z_T = Z_{m/f} + Z_f + Z_{f/s} \quad (1)$$

که در آن $Z_{m/f}$ امپدانس فصل مشترک فلز/فیلم، Z_f امپدانس خود فیلم غیرفعال و $Z_{f/s}$ امپدانس فصل مشترک فیلم/محلول است. برای تحلیل داده‌ها، طیف‌های امپدانس به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار Z-view و مدل مدار معادل شبیه‌سازی شدند. منحنی‌های نایکوئیست و تغییرات زاویه فاز (Bode plots) در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند.

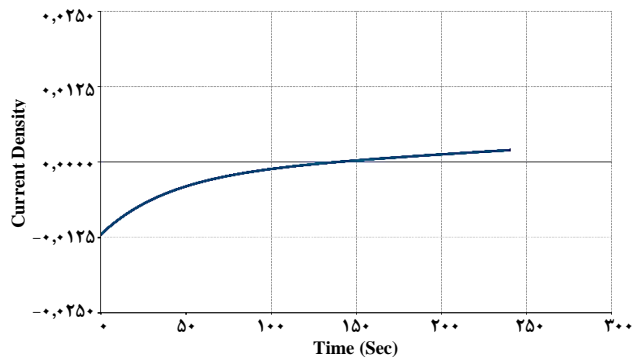
شکل ۵ نشان می‌دهد که زاویه فاز در دو ناحیه فرکانسی پایین و میانی بیشینه دارد. این رفتار بیانگر وجود فرآیند انتشار (جرم‌انتقالی) در کنار مقاومت پلاریزاسیون است. افزایش زاویه فاز در این نواحی تأیید می‌کند که مکانیزم غالب شامل نفوذ یون‌ها در لایه غیرفعال و سپس تبادل بار در فصل مشترک است.

در شکل ۶ محور عمودی دامنه لگاریتمی امپدانس و محور افقی لگاریتم فرکانس است. مشاهده می‌شود که مقدار امپدانس با کاهش فرکانس افزایش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده افزایش مقاومت به خوردگی در اثر تشکیل لایه غیرفعال روی برنج است. مقایسه این نتایج با آزمایش‌های پلاریزاسیون (مطالعه مرجع [۳۷]) نشان می‌دهد که افزایش امپدانس با کاهش سرعت انحلال ترجیحی فازهای آلیاژی هم‌خوانی دارد.

در بررسی داده‌های امپدانس با استفاده از نرم افزار و مدار معادل متشکل از ترکیب موازی یک خازن (C_{dl})، و یک مقاومت (R_{ct})



الف. تغییر ولتاژ بر حسب زمان

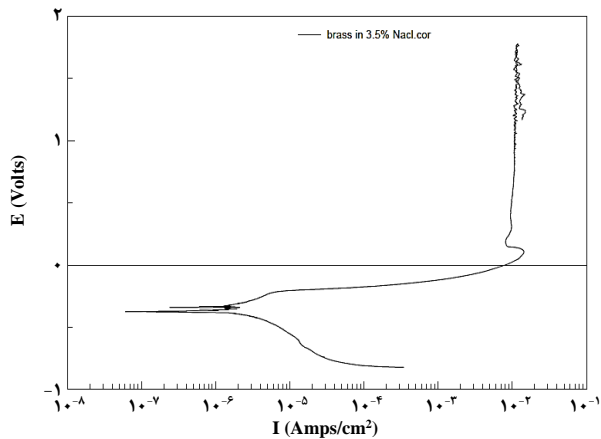


ب. تغییر دانسیته جریان بر حسب زمان

شکل ۴ - نویز الکتروشیمیایی برای نمونه در محلول سدیم کلرید ۳/۵٪

شکل ۴- الف نشان می‌دهد پتانسیل با گذر زمان به‌صورت یکنواخت به سمت مقادیر فعال‌تر جابه‌جا می‌شود؛ شیب اولیه بزرگ‌تر است و سپس به یک روند کند و پایدار می‌رسد. این رفتار مشخصه‌ی فعال شدن سطح پس از غوطه‌وری و زدوده شدن لایه‌های ضعیف هوا ساخته/جذب است تا جایی که پتانسیل به یک حالت شبه پایدار کنترل شده توسط واکنش‌های آندی/کاتدی می‌رسد. نبود افت‌های تند و نوسان‌های ضربانی در ردگیری پتانسیل نشان می‌دهد شکست ناگهانی لایه‌ی سطحی و آغاز خوردگی موضعی (حفره‌ای) رخ نداده است. شکل ۴- ب روند افزایشی ملایم چگالی جریان را از مقادیر اندکی کاتدی به نزدیک صفر و اندکی مثبت نشان می‌دهد. نبود قله‌های لحظه‌ای و دامنه‌های بزرگ نویز دلالت دارد که جریان غالب، هموار و کم‌نویز بوده و جفت الکترودها به تعادل گالوانی نزدیک شده‌اند؛ بنابراین، مکانیسم غالب در بازه‌ی آزمون، انحلال یکنواخت/پایدار است نه رویدادهای موضعی ناپایدار. اگر حفره‌زایی گذرا رخ می‌داد، انتظار می‌رفت پالس‌های جریان با دامنه‌ی زیاد و تکرارپذیری کم مشاهده شود که در این نمودارها دیده نمی‌شود.

برآیند دو نمودار بیانگر این است که در محیط ۳/۵٪ NaCl و در بازه‌ی زمانی ثبت‌شده، سامانه رفتاری آرام و بدون رویدادهای موضعی جهشی داشته و شواهد معناداری از خوردگی حفره‌ای دیده نشده است؛ نتیجه‌ای که با گزارش نویز «صاف» و نبود نشانه‌های حفره‌زایی در متن مقاله نیز سازگار است.

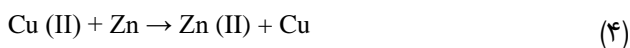


شکل ۸ - نمودار پلاریزاسیون شکلی نمونه در محلول ۳,۵٪ آب نمک

آزمایش پلاریزاسیون سیکی

شکل ۸ پلاریزاسیون نشان می‌دهد که در ناحیه پلاریزاسیون آندی جریان در 10^{-2} آمپر به سانتی‌متر مربع تقریباً ثابت شده است که نشان دهنده پایداری فیلم تشکیل شده در سطح نمونه است و پس از برگشت پتانسیل، پتانسیل بر روی منحنی رفت قرار گرفته است که نشان دهنده آن است که خوردگی حفره‌ای در محلول ۳/۵٪ سدیم کلرید برای نمونه اتفاق نمی‌افتد و فیلم تشکیل شده پایدار است. جریان خوردگی هم از روی شکل نشان می‌دهد که در محدوده 10^{-6} آمپر به سانتی‌متر مربع است که خوردگی بسیار کمی است یعنی نمونه در محلول دارای مقاومت به خوردگی یکنواخت و حفره‌ای خوبی است. اما، در مورد آلیاژهای برنج ارزش چگالی جریان آندی و کاتدی در نتیجه جریان چگال با افزایش محتوای روی افزایش می‌یابد. رفتار خوردگی آلیاژها توسط خواص هر دو اجزای آلیاژ مشخص می‌گردد [۳۹].

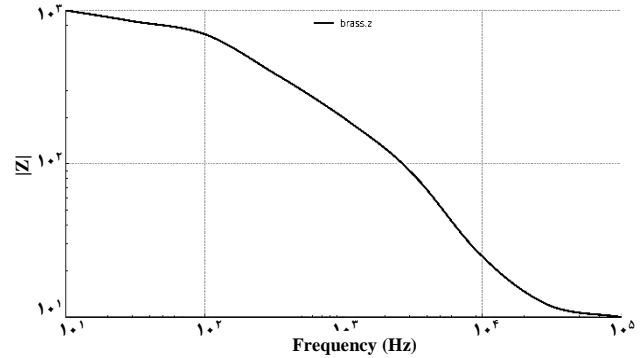
افزایش آندی و کاتدی چگالی جریان با روی می‌تواند با رابطه‌های ۳ و ۴ توجیه گردد:



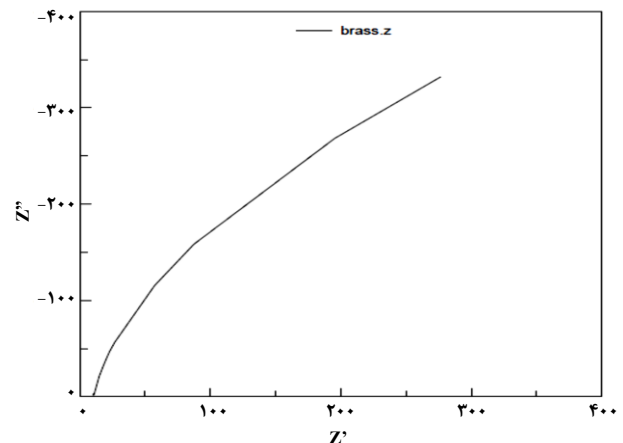
بنابراین انحلال ترجیحی از جزء فعال افزایش و واکنش نامتناسب (۴) صورت می‌گیرد. روی جایگزین مس (II) شده و رسوب مس را افزایش می‌دهد و باعث توزیع منطقه کاتدیک که منجر به تشکیل زوج فلزی فعال و باعث افزایش نرخ خوردگی آلیاژ می‌گردد [۴۰].

مشاهدات SEM از سطح شکستگی و دیواره داخلی

با توجه به تمام آزمایش‌های قبلی دریافتیم که نمونه مورد نظر در برابر خوردگی حفره‌ای مقاوم است بنابراین به بررسی SEM نمونه مورد نظر پرداختیم. میکروگراف SEM از سطح مقطع نمونه



شکل ۶ - نمودار بوده (Bode) برای نمونه در آب نمک ۳/۵٪



شکل ۷ - نمودار نایکوئیست برای نمونه در محلول ۳,۵٪ آب نمک

که به طور سری با یک مقاومت (R_s)، به نمایندگی از مقاومت محلول است، امپدانس الکتروود (Z) با رابطه ۲ بیان می‌شود:

$$Z = R_s + \frac{R_{ct}}{(2\pi f R_{ct} C_{dl})^\alpha} \quad (2)$$

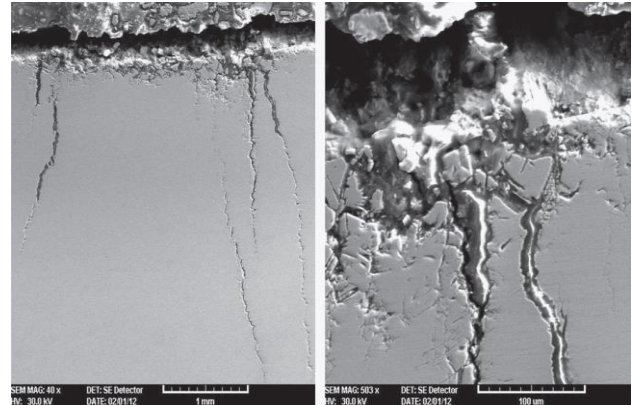
که در آن α نشان دهنده یک پارامتر تجربی ($0 \leq \alpha \leq 1$) و f ، فرکانس بر حسب هرتز است. رابطه ۲ به عنوان فرمول پراکندگی شناخته می‌شود و انحراف از رفتار ایده آل (R_c) را از توزیع ثابت زمانی نشان می‌دهد. این انحراف به دلیل اثرات زبری سطح و تغییرات در خواص یا ترکیب لایه‌های سطحی در طول زمان تغییر می‌کند [۳۸]. شکل ۷ پاسخ نمونه برنج را در قالب نمودار نایکوئیست نشان می‌دهد. وجود یک قوس واحد بیانگر رفتار شبه‌خازنی لایه غیرفعال است. هرچه قطر قوس بزرگ‌تر باشد، مقاومت پلاریزاسیون بالاتر و در نتیجه مقاومت به خوردگی بیشتر خواهد بود. این نتایج نشان می‌دهد که خوردگی نمونه عمدتاً به صورت یکنواخت بوده و گرایش کمتری به خوردگی موضعی دارد.

جمع بندی نتایج شکل‌های ۵ تا ۷ نشان می‌دهد که نمونه مورد بررسی در برابر خوردگی یکنواخت مقاوم می‌باشد، اما آلیاژ نسبت به زدایش روی و خوردگی انتخابی در معرض خطر می‌باشد.

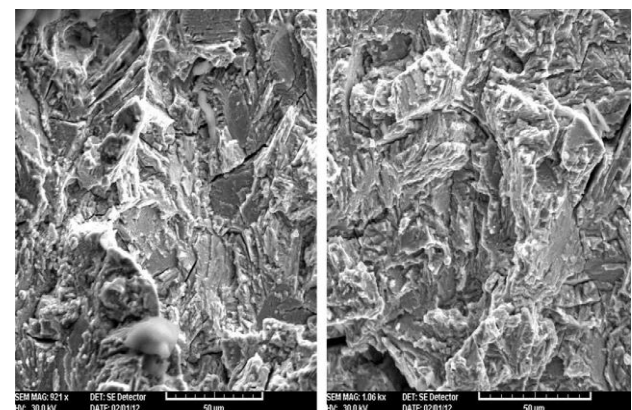
که از زدایش روی رنج می‌برند یافت شد. تغییر رنگ در محل ترک قابل مشاهده است که با توجه به غنی سازی مس، به عنوان یک نتیجه از حذف روی ترجیحی می‌باشد. مشخص شده است که حذف انتخابی روی در طول فرآیند زدایش روی یک لایه متخلخل و ضعیف مس و مس اکسید به وجود آورده است. حضور ترک‌های متعدد موازی، عدم ترک منشعب و طبیعت درون دانه از ترک خوردگی مشاهده شده در مورد حاضر نوعی از ترک و خوردگی خستگی را نشان می‌دهد. خوردگی مشاهده شده در سطح شکستگی و زدایش روی از سطح شکستگی به شدت دخیل در سهم حمله زیست محیطی در فرآیند ترک خوردگی هستند.

به نظر می‌رسد که لایه غنی مس از نظر مکانیکی ضعیف است، ترک می‌تواند به راحتی از این منطقه که در آن زدایش روی رخ داده است و انتشار توسط مکانیسم خستگی، خوردگی را شروع کند. آلیاژ مس و روی کاهش چشمگیری از مقاومت خستگی، به خصوص در محلول‌های آبی حاوی یون‌های کلرید از خود نشان دادند. ترک‌های خستگی مشاهده شده احتمالاً در اثر تنش‌های چرخه‌ای ناشی از شرایط سرویس، از جمله ارتعاشات جریان، ایجاد شده‌اند. شروع ترک خوردگی تنشی از چاله تشکیل شده توسط زدایش روی و شکست لوله گزارش شده است. مشاهده ترک‌های موازی چند شعبه و ترک درون دانه نشان می‌دهد خوردگی خستگی بیشتر از خوردگی تنشی در مورد حاضر نقش دارد. به طور معمول، مقداری کلر برای کنترل رشد زیستی در آب ورودی به کار می‌رود. کلر بیش از حد در آب ورودی می‌تواند زدایش روی از برنج را سرعت ببخشد. کلر یکی از تهاجمی‌ترین گونه‌های موجود در آب خنک کننده به آلیاژهای مس است که می‌تواند لایه اکسید حفاظتی را کاهش و حمله خوردگی را افزایش دهد. کیفیت اولیه آب ورودی به لوله تعیین کننده دوام رضایت‌بخش سیستم است. خورنده‌ترین آب‌ها آن‌هایی هستند که شامل هیدروژن سولفید آزاد تولید شده توسط عمل باکتری‌های احیا کننده سولفات و یا آن‌هایی که با مقدار بالاتر از کلر می‌باشند [۴۱].

از این رو، نظارت دقیق بر آب خنک کننده برای کنترل خوردگی ضروری است، به ویژه، هنگامی که تجهیزات جدید به سیستم آب خنک کننده اضافه می‌شوند. آب راکد یا آب با حرکت آهسته و آب دارای اکسیژن و دی‌اکسیدکربن بالا نیز زدایش روی را ترویج می‌دهند [۴۲]. در زمان‌های قدیم وقتی ۳۰/۷۰ لوله‌های برنجی توسط زدایش روی شکست می‌خوردند استفاده از برنج دریایی ($\text{Sn}\backslash\text{Zn}-2\% \text{Cu}-70$) به عنوان یک راهکار، جایگزین خوبی به ارمان می‌آورد. این ترکیب کمی بهتر است، اما در برابر زدایش روی ایمنی نیست و بعد از آن از آرسنیک برای مهار جدایش روی پیدا شد و به این ترکیب اضافه گردید. هنگامی که شرایط به دلیل جدایش روی نمی‌تواند توسط آلیاژی مانند برنج دریایی حاوی آرسنیک کنترل شود، آلیاژهایی نظیر برنج آلومینیوم یا مس-نیکل می‌توان با موفقیت مورد استفاده قرار گیرد [۴۱].



شکل ۹ - میکروگراف‌های SEM از مقطع نمونه پس از سیقل زنی



شکل ۱۰ - تصویر SEM فراکتو گراف از سطح شکستگی

مؤید شروع ترک از سطح لوله داخلی در محل حمله خوردگی (شکل ۹) می‌باشد. مکان شروع شکست، به نظر متخلخل و تکه تکه می‌رسد. SEM از سطح شکستگی نشان از یک حالت عمدتاً درون دانه از شکست با ویژگی‌های برش صاف (شکل ۱۰) داد. سطح شکستگی ویژگی‌های انحلال کریستالوگرافی انتخابی و مدرکی از حمله خوردگی را نشان داد. ترک ثانویه نیز در حال حاضر در سطح شکستگی وجود داشت. شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند که قطر شکاف‌ها در محدوده زیرمیکرونی تا چندین میکرون متغیر هستند؛ شکاف‌های ریزتر ناشی از خوردگی انتخابی و رشد تدریجی ترک بوده و شکاف‌های درشت‌تر مربوط به گسیختگی مکانیکی و رشد سریع ترک می‌باشند. این نتایج بیانگر آن است که شکست در نمونه حاضر ترکیبی بوده و تحت تأثیر هر دو مکانیزم مذکور رخ داده است.

بحث و گفتگو

با توجه به مشاهدات چشمی، آزمایش‌هایی انجام شد تا نوع خوردگی به طور دقیق مشخص شود. همان‌طور که گفته شد لوله در برابر خوردگی حفره‌ای مقاوم است اما نتایج حاصل از بررسی میکروسکوپی و تجزیه و تحلیل آن نشان می‌دهد که لوله مبدل حرارتی از زدایش روی رنج می‌برد. شروع ترک از مناطقی

مکانیزم جدایش انتخابی در لوله مبدل حرارتی

برای توجیه زدایش روی، دو تئوری پیشنهاد شده است. در یکی گفته می‌شود که در اثر حل شدن روی محل‌های خالی در ساختمان شبکه برنج به وجود می‌آید. این تئوری اثبات نشده است. یک دلیل محکم بر علیه آن وجود دارد و آن این است که زدایش روی تا عمق‌های زیاد ناممکن یا بسیار آهسته خواهد بود. زیرا نفوذ محلول و یون‌ها از طریق شبکه‌ای مشتمل بر جاهای خالی مشکل بوده و نیاز به زمان زیادی دارد [۴۲].

مکانیزمی که بیشتر از مکانیزم قبلی مورد قبل قرار گرفته مشتمل بر سه مرحله است. (۱) انحلال برنج (۲) باقی ماندن روی در محلول، (۳) رسوب کردن مس روی سطح برنج.

روی فلز کاملاً فعالی است، در حالیکه مس نجیب‌تر است. روی می‌تواند در آب خالص به آهستگی خورده شود و واکنش کاتدی آن، احیا آب به گاز هیدروژن و یون‌های هیدروکسیل می‌باشد. به همین دلیل زدایش روی در غیاب اکسیژن نیز می‌تواند انجام شود. در صورتی که اکسیژن نیز حضور داشته باشد، در واکنش کاتدی وارد شده و خوردگی افزایش می‌یابد [۴۲].

آنالیز نواحی که روی را از دست داده‌اند نشان می‌دهد که ۹۰ تا ۹۵ درصد مس وجود دارد که مقداری از آن نیز به صورت مس اکسید می‌باشد، که مقدار آن بستگی به مقدار اکسیژن محیط دارد و طبیعت متخلخل رسوبات باعث تسهیل تماس محلول و برنج می‌گردد.

دلایل خوردگی سایشی

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، آثار خوردگی سایشی بر سطح لوله به‌صورت چشمی قابل مشاهده بود. خوردگی سایشی به معنای تشدید یا تسریع نرخ خوردگی فلز در اثر حرکت نسبی سریع یک سیال خورنده بر سطح فلز است و معمولاً با اثرات سایش مکانیکی و ساییده شدن همراه است. یون‌های فلزی حل شده یا محصولات جامد حاصل از خوردگی در اثر این حرکت به‌طور مکانیکی از سطح فلز جدا می‌شوند و همین امر منجر به افزایش نرخ خوردگی می‌گردد. کلیه تجهیزاتی که در تماس با مایعات متحرک هستند، در معرض این نوع خوردگی قرار دارند [۴۳-۴۴]. افزایش سرعت حرکت سیال معمولاً موجب افزایش نرخ خوردگی سایشی می‌شود و این تأثیر ممکن است تا رسیدن به یک سرعت بحرانی چندان محسوس نباشد، اما با رسیدن به سرعت بحرانی، نرخ خوردگی به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد. برای هر سیستم (فلز و محیط خاص) یک محدوده سرعت امن وجود دارد که در آن خوردگی کاهش می‌یابد [۴۵].

وجود گاز سولفید هیدروژن (H_2S) نیز سرعت جذب هیدروژن و در نتیجه نرخ خوردگی را افزایش می‌دهد. این گاز با سطح لوله واکنش داده و سولفید آهن تشکیل می‌دهد که به‌تدریج به‌دنه لوله چسبیده و سطح را به‌صورت پودری سیاه‌رنگ می‌پوشاند. این لایه سبب می‌شود تا واکنش‌های کاتدی تشدید شده و سطح‌های خورده‌شده توسط

جریان سیال کنده شوند که این فرآیند کاهش ضخامت لوله را به‌دنبال دارد [۴۶]. نرخ سایش-خوردگی همچنین با دما تغییر می‌کند؛ به‌طوری‌که با افزایش دما تا یک حد بحرانی، نرخ سایش-خوردگی افزایش یافته و با افزایش بیشتر دما، این نرخ کاهش می‌یابد [۴۷]. اکسیژن حل‌شده در سیال درون لوله‌ها نیز باعث اکسیداسیون آهن سطح داخلی لوله شده و منجر به تشکیل هیدروکسیدهای آهن و برجستگی‌هایی روی سطح می‌شود. در زیر این برجستگی‌ها خوردگی ادامه پیدا کرده و جداره لوله به تدریج متخلخل می‌شود. هرچه غلظت اکسیژن بیشتر باشد، شدت خوردگی ناشی از زنگ‌زدگی نیز افزایش می‌یابد. حذف اکسیژن از سیال به روش‌های فیزیکی یا شیمیایی بهترین راه جلوگیری از این اثر است [۴۸]. علاوه بر این، گاز دی‌اکسیدکربن به دلیل خاصیت اسیدی، محیط را اسیدی‌تر کرده و باعث تشدید خوردگی می‌شود.

کربن دی‌اکسید در حضور رطوبت، اسیدکربنیک تولید می‌کند که اگرچه اسیدی ضعیف است، اما می‌تواند فولاد را تخریب کند. اثر همزمان کربن دی‌اکسید و اکسیژن می‌تواند بسیار شدیدتر از اثر هر یک به‌تنهایی باشد [۴۸].

خوردگی در محل اتصال لوله به صفحات نگهدارنده

در این بخش، بررسی خوردگی در محل اتصال لوله‌های برنج و صفحات نگهدارنده آن‌ها که از جنس فولاد ضد زنگ سری L۳۱۶ است، انجام شده است. برای جلوگیری از این پدیده رایج و شناخته شده، لازم است از عایق‌های الکتریکی استفاده شود، که در طراحی اولیه به آن توجه نشده است. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، عوامل مؤثر در خوردگی دو فلزی به شرح زیر هستند:

الف- دما: تحقیقات نشان می‌دهد که نرخ خوردگی دو فلزی به دما وابسته است و در دمای حدود $(45^{\circ}C)$ ، میزان خوردگی دو فلزی افزایش می‌یابد. در دماهای ۵۵ تا ۶۵ درجه سلسیوس، سرعت خوردگی دو فلزی از دمای $(45^{\circ}C)$ بیشتر است.

ب- اکسیژن: بر اساس پیشنهاد سازنده، میزان اکسیژن آب باید در محدوده ۶ تا ۸ ppm کنترل شود [۴۹]. شایان ذکر است که تاکنون اندازه‌گیری اکسیژن در این سیستم صورت نگرفته است. مطالعات متعدد نشان می‌دهند که آلیاژهای مس در وضعیت نیمه غوطه‌ور، شدیدتر از زمانی که کاملاً زیر آب غوطه‌ور هستند، مستعد خوردگی دو فلزی می‌باشند. این پدیده ناشی از تشکیل سلول دیفرانسیل هوادهی در مرز دو محیط است که به دلیل حلالیت کم اکسیژن در آب، غلظت اکسیژن در بالای سطح آب بیشتر از زیر آب خواهد بود.

مقایسه نتایج با تحقیقات پیشین در نواحی ساحلی

برای ارزیابی عملکرد مواد پیشنهادی در محیط‌های دریایی مشابه با شرایط مورد مطالعه در تحقیق حاضر، نتایج یک برنامه میدانی یک‌ساله

اکسیژن محلول یا قلیائیت آب ثبت نشد. به نظر می‌رسد که شرایط محیطی در مراحل ابتدایی قراردگی تأثیر بیشتری بر سینتیک تشکیل لایه محافظ داشته باشد. تحلیل شیمیایی آب (یون‌های Ca , Cu , Mg , Na ، pH، هدایت، قلیائیت و آنیون‌ها) تغییرات فصلی محدودی را نشان داد؛ با این حال، غلظت بالای کلرید می‌تواند احتمال خوردگی حفره‌ای در آلیاژهای غنی از مس و روی زدایی در برنج‌ها را افزایش دهد، در حالی که سولفات بالا و سختی کربناته پایین نیز رفتار خوردگی را تشدید می‌کنند [۵۷].

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، علل خوردگی لوله‌های مبدل حرارتی واحد LPG پالایشگاه لاوان با استفاده از روش‌های الکتروشیمیایی، متالوگرافی و میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. نتایج نشان داد نمونه مورد مطالعه مقاومت مناسبی در برابر خوردگی حفره‌ای دارد، اما افزایش روی در آلیاژ موجب تشکیل زوج‌های دو فلزی و افزایش نرخ خوردگی می‌شود. همچنین، کاهش مقاومت الکتروشیمیایی به دلیل انحلال ترجیحی روی تأیید شد. تصاویر SEM شکست لوله‌ها را ناشی از نواحی روی زدایی شده و خوردگی خستگی نشان داد. علاوه بر خوردگی سایشی و دو فلزی، جنس نامناسب لوله‌ها و کیفیت پایین آب ورودی به عنوان عوامل اصلی خوردگی شناسایی شدند. برای جلوگیری از خوردگی در مبدل‌های گرمایی در نواحی ساحلی، انتخاب آلیاژهای مقاوم، طراحی بهینه، کنترل سرعت و شرایط عملیاتی، استفاده از فیلتر و هوازدايي، به کارگیری پوشش‌های محافظتی و آند فدا شونده اهمیت دارد. همچنین پیشنهاد می‌شود برای جلوگیری از روی زدایی، به جای برنج معمولی از آلیاژهای آلومینوم برنج حاوی آرسنیک استفاده شود. در کنار این نتایج، بخشی نیز به پیشنهاد تحقیقات آتی اختصاص یافت. بر لزوم انجام مطالعات میدانی بلندمدت در شرایط واقعی پالایشگاه‌های ساحلی تأکید می‌شود تا پایداری راهکارهای ضد خوردگی در بازه‌های زمانی طولانی‌تر مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین، مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی مکانیزم‌های خوردگی می‌تواند به عنوان رویکردی مکمل برای درک عمیق‌تر فرآیندها و پیش‌بینی رفتار مواد در شرایط متغیر معرفی شود. این مسیر، جهت‌گیری‌های روشن‌تری برای پژوهش‌های آینده فراهم خواهد ساخت.

خوردگی و خزه‌زدگی که بر روی چندین خانواده آلیاژ پایه‌مس (برنج، برنز، مس-نیکل) به همراه مس خالص و فولاد کربنی انجام شده است، مرور شد. ترکیب شیمیایی مواد آزمایش شده در منابع معتبر گزارش شده است [۵۱-۵۰]. خواص مکانیکی نمونه‌های ورق ریخته‌گری و نوردشده با استفاده از آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM E8 تعیین گردید. اندازه‌گیری کرنش با استفاده از کرنش‌سنج مقاومتی و تصویربرداری دیجیتال انجام شد. تنوع خواص مکانیکی نشان‌دهنده گستره کاربردهای صنعتی این آلیاژها می‌باشد [۵۳-۵۲]. همچنین زبری سطح و اندازه دانه نیز اندازه‌گیری شد تا نقش ریزساختار در رفتار خوردگی بررسی شود [۵۴].

آزمون‌های استاندارد خوردگی، شامل ارزیابی حساسیت به خوردگی موضعی، شکاف ناشی از تنش (SCC)، خوردگی یکنواخت (ISO6957) و روی زدایی در محلول CuCl_2 بر اساس ISO6509 اجرا شد. نتایج نشان داد که هیچ‌یک از ورق‌های آزمایش شده نسبت به SCC آسیب‌پذیر نبودند و عمق روی زدایی، به جز در برنج Br-4 و آلیاژ نقره‌دار CuNi-2 که معمولاً برای استفاده در سرویس دریایی توصیه نمی‌شوند، کم گزارش شد.

برای بررسی اثر تنش‌های مکانیکی بر رفتار خوردگی، بخشی از نمونه‌ها پیش از قراردگی در آب شور خلیج فارس تحت بارگذاری مکانیکی قرار گرفتند. این نمونه‌ها با استفاده از روش خمش کنترل شده تا رسیدن به مقدار مشخصی از کرنش، در شرایط تحت تنش قرار داده شدند. در مقابل، گروه دیگری از نمونه‌ها بدون اعمال هیچ‌گونه بار مکانیکی و در حالت آزاد در محیط آزمون مستقر شدند که به عنوان نمونه‌های بدون تنش شناخته می‌شوند. بدین ترتیب امکان مقایسه رفتار خوردگی آلیاژهای پایه‌مس در دو وضعیت «تنش‌دار» و «بدون تنش» فراهم شد. تنها برنج Br-4 نرخ خوردگی پایین‌تری نشان داد، در حالی که آلیاژ مس-نیکل (Cu-Ni) نرخ خوردگی بالاتری ثبت کرد. این نتایج عملکرد مس و فولاد را با داده‌های منتشرشده پیشین همخوان نشان داد [۵۵]. اعمال تنش کششی حدود ۶۰۰ نیوتن باعث افزایش معنی‌دار خوردگی یکنواخت (حدود چند ده درصد) شد که به ترک خوردن لایه محافظ در اثر نوسانات مکانیکی ناشی از حرکت شناور (امواج/مد) نسبت داده شد [۵۶]. در آزمون‌های متناوب ۳ ماهه، پراکندگی قابل توجهی در نرخ خوردگی مشاهده شد و هیچ همبستگی مستقیمی با میانگین دما، شوری،

مراجع

- [1] Revie R.W., Uhlig H.H., "Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering". Wiley ISBN: 978-1-119-32475-1 (2025).
- [2]. Sarmasti Emami M.R., "An Experimental and Theoretical Investigation of Corrosion Mechanism in a Metallic Stack, Iran. J. of Mater. Sci & Eng.(IJMSE), 9(3): 200-208 (2012).

- [3] Ghoshal J., Lavanya M., [Inhibition of Microbial Corrosion by Green Inhibitors: An Overview](#), *Iran. J. Chem. Eng. (IJCCE)*, **42(2)**: 684-703 (2023).
- [4] Thompson N.G., Yunovich M., Dunmire D., [Cost of Corrosion and Corrosion Maintenance Strategies](#), *Corros. Rev.*, **25(3-4)**: 247-262 (2007).
- [5] Solovyeva V.A., Almuhammadi K.H., Badeghaish W.O., [Current Downhole Corrosion Control Solutions and Trends in the Oil and Gas Industry: A Review](#), *Mater.*, **16(5)**: 1795 (2023).
- [6] Upadhyaya N., Shankara A.R., Singh S.S., Anandkumar B., [Electrochemical Noise Studies on the Effect of Nitrogen on the Pitting Corrosion of Stainless-Steel Using Wavelet Analysis](#), *Corros. Eng. Sci. Technol.*, **57(6)**: 531-541 (2022).
- [7] Benzarti Z., Arrousse N., Serra R., Cruz S., Bastos A., Tedim J., [Copper Corrosion Mechanisms, Influencing Factors, and Mitigation Strategies for Water Circuits of Heat Exchangers: Critical Review and Current Advances](#), *Corro. Rev.* (2024).
- [8] Van Ede M.C., Fichtner A., Angst U., [Nondestructive Detection and Quantification of Localized Corrosion Rates by Electrochemical Tomography](#), *NDT & E International* **142**: 103005 (2023).
- [9] Zhang Y., Lu S., Li D., Duan H., Duan C., Zhang J., Liu S., [Inhibition Mechanism of Air Nanobubbles on Brass Corrosion in Circulating Cooling Water Systems](#), *Chin. J. Chem. Eng.*, **62**: 168-181 (2023).
- [۱۰] روحی م.، رحیمی زیناب ع.، بررسی علت و عوامل خوردگی تیوب‌های مبدل مورد استفاده در پالایشگاه نفت، پنجمین همایش مبدل‌های گرمایی، تهران، ایران، ۳۰ آبان، ۱۳۹۲.
- [11] Batelić J., Špada V., Kršulja M., Martinez S., [Thermal-Power-Plant Condenser-Tube Corrosion Analysis](#), *Mater. Technol.*, **57(4)**: 317-323 (2023).
- [12] Wang Y., Cheng G., Wu W., Qiao Q., Li Y., Li X., [Effect of pH and Chloride on the Micro-Mechanism of Pitting Corrosion for High Strength Pipeline Steel in Aerated NaCl Solutions](#), *Appl. Surf. Sci.*, **349**: 746-756 (2015).
- [13] Liu H., Zhou G., Han Z., Ji Y., Zhang Y., Zhang C., Chen C., [Research on the Influence of Major Ions in Weakly Alkaline Mine Water on Anchor Cable Corrosion and Protection Technique](#), *Case Stud. Constr. Mater.*, **21**: e03584 (2024).
- [14] Singh J., Shahi A.S., [Weld Joint Design and Thermal Aging Influence on the Metallurgical, Sensitization and Pitting Corrosion Behavior of AISI 304L Stainless Steel Welds](#), *J. of Manuf. Process*, **33**: 126-135 (2018).
- [15] Javed M.A., Neil W.C., Wade S.A., [Effect of Test Media on the Crevice Corrosion of Stainless Steel by Sulfate Reducing Bacteria](#), *Mater Degrad* **6**: 40 (2022).
- [۱۶] حسینی س.م.ح.، شایگانی اکمل م.، بررسی علل تخریب تیوب کندانسور مبدل حرارتی در یک واحد پالایشگاهی، دو ماهنامه علمی-پژوهشی پژوهش نفت، (۲-۹۶): ۲۷ تا ۱۰۶: ۹۶ (۱۳۹۶).
- [۱۷] گودرزی م.، نوبری ع.، کنترل عوامل موثر بر خوردگی و رسوب دهی در آب‌های خنک کن و روش‌های جلوگیری از آن، مجله چیلر و برج خنک کن، ۵۵، (۱۳۹۷).
- [۱۸] طاهرزاده ر.، حجت زاده م.ح.، حجازی ا.، شرفی ش.، بررسی نقش اتصال گالوانیکی در خوردگی مبدل‌های حرارتی نیروگاه برق آبی سد کرخه، یازدهمین کنگره ملی خوردگی ایران، کرمان، ایران، (۱۳۸۸).

- [۱۹] قربانی ر.، رستمی ف.، بررسی دلایل خوردگی مبدل‌های خنک‌کننده سکوی دریایی فاز یک و راهکارهای جلوگیری از آن‌ها، ماهنامه مبدل حرارتی، ۱۳۱، (۱۴۰۰).
- [۲۰] ادريس ن.، دانای مقدم ر.، جدایش آلیاژ روی از تیوب‌های آلومینیوم برنج در آب شیرین کن‌های مجتمع گاز پارس جنوبی، چهارمین همایش علمی تخصصی مبدل‌های گرمایی، تهران، ایران، ۱۸ آبان، (۱۳۹۱).
- [21] Al-Hashem A., Carew J., *The Use of Electrochemical Impedance Spectroscopy to Study the Effect of Chlorine and Ammonia Residuals on the Corrosion of Copper-Based and Nickel-Based Alloys in Seawater*, *Desalination*, **151(3)**: 255-262 (2002).
- [22] Qu S., Yao G., Tian J.F., Zhang Z.F., *Failure Analysis of the Brass Tubes in a Lubricating Oil Cooler*, *Eng. Fail. Anal.*, **18(8)**: 2232-2239 (2011).
- [23] Ranjbar K., *Effect of Flow Induced Corrosion and Erosion on Failure of a Tubular Heat Exchanger*, *Materials and Design*, **31(6)**: 613-619 (2010).
- [۲۴] سرمستی امامی م.، غلامی ع.، بررسی تحلیلی اثر رسوبات و کیفیت آب ورودی بر خوردگی لوله‌های تبادلگر دیگی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴) ۳۹: ۲۲۵ تا ۲۳۵ (۱۳۹۹).
- [۲۵] روشنایی ا.، روشنایی ه.، انتخاب بهترین نوع فلز در تولید مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله با توجه به نرخ خوردگی در دو اسید داغ HCl و H₂SO₄، سومین همایش ملی تحقیقات نوین در شیمی و مهندسی شیمی، ماهشهر، ایران، ۲۴ آذر (۱۳۹۰).
- [۲۶] نورانی د.، احتشام زاده م.، طاهریان م.، بررسی مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ نزن مختلف جهت انتخاب جنس مناسب برای تیوب‌های مبدل‌های حرارتی واحد تصفیه آب ترش پالایشگاه اصفهان، یازدهمین کنگره ملی خوردگی ایران، کرمان، ایران، (۱۳۸۸).
- [27] Liang H., Duan Z., Li W., *Analysis of Causes and Protective Measures against Corrosion Perforation in the Shell-Side Outlet Flange of a Sour Water Steam Heater*, *Coatings*, **14(3)**: 306 (2024).
- [28] Panahi H., Eslami A., Golozar M.A., Laleh A.A., *An Investigation on Corrosion Failure of a Shell-and-Tube Heat Exchanger in a Natural Gas Treating Plant*, *Eng. Fail. Anal.*, **118**: 104918 (2020).
- [29] Yang J., Li C., Pan Y., Huang H., *The Failure Mechanism of the 316 SS Heat Exchanger Tube in the Geothermal Water Environment*, *Materials*, **15(22)**: 8103 (2022).
- [30] Adnyana D.N., *Failure Analysis of Stainless Steel Heat Exchanger Tubes in a Petrochemical Plant*, *J. Fail. Anal. Prev.*, **18(2)**: 413-422 (2018).
- [31] Stanbury E.E., Buchanan R.A., *Fundamentals of electrochemical corrosion*, ASM International. ISBN: 0-87170-676-8 (2000).
- [32] Frankel G.S., "Introduction to Metallurgically Influenced Corrosion", *ASM handbook*, (2003).
- [۳۳]. خضرای م؛ کریم‌زاده ع.، ساختار، خواص و کاربرد آلیاژهای مهندسی، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، (۱۴۰۳).
- [۳۴]. احتشام زاده، م.، اصول خوردگی الکتروشیمیایی، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان، چاپ سوم، (۱۳۹۷).
- [۳۵]. احتشام زاده، م.، مقدمه‌ای بر طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی در مطالعه خوردگی، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان، (۱۴۰۰).
- [36] Krakowiak S., Darowiki K., Slepiski P., *Impedance Investigation of Passive 304 Stainless Steel in the Pit Pre-Initiation State*, *Electrochem. Acta*, **50(13)**: 2699 (2005).

- [37] Ismail K.M., Badawy W.A., [Electrochemical Behavior of Alloys in Different Environments](#), *J. Appl. Electrochem.*, **30(12)**: 1303-1311 (2000).
- [38] Han D., Jung W. C., Kong M.S., [Study on the Corrosion Behavior of Various Alloys in High-Concentration Chlorine Gas Environments](#), *Corros. Sci. Technol.*, **24(1)**: 28-33 (2025).
- [39] Adams F.V., Akinwamide S.O., Obadele B., Olubambi P.A., [Comparison Study on the Corrosion Behavior of Aluminum Alloys in Different Acidic Media](#), *Mater. Today*, **38**: 1040-1043 (2021).
- [40] Badawy W.A., Al-Kharafi F.M., El-Azab A.S., [Electrochemical Behaviour and Corrosion Inhibition of Al, Al-6061 and Al-Cu in Neutral Aqueous Solutions](#), *Corros. Sci.*, **41(4)**: 709-727 (1999).
- [41] Franco R.J., [Failures of Heat Exchangers](#), In *ASM handbook. Failure analysis and prevention*, 11:628–642. ASM International (1986).
- [42] Fontana M.G., ["Corrosion Engineering"](#), McGraw-Hill Education. (1986).
- [43] Atkins P.W., ["Physical Chemistry"](#), Oxford University Press (1994).
- [44] Borgioli F., [The Corrosion Behavior in Different Environments of Austenitic Stainless Steels Subjected to Thermochemical Surface Treatments at Low Temperatures: An Overview](#), *Metals*, **13(4)**: 776 (2023).
- [45] Stack M.M., Chacon-Nava J., Stott F.H., [Relationship Between the Effects of Velocity and Alloy Corrosion Resistance in Erosion-Corrosion Environment at Elevated Temperatures](#), *Wear*, **180(1-2)**: 91–99 (1995).
- [46] Lins V.F.C., Guimarães E.M., [Failure of a Heat Exchanger Generated by an Excess of SO₂ and H₂S in the Sulfur Recovery Unit of a Petroleum Refinery](#), *J. Loss Prev. Process Ind.*, **20(2)**: 91-97 (2007).
- [47] Stack M.M., Abdulrahman G.H., [Mapping Erosion–Corrosion of Carbon Steel in Oil–Water Solutions: Effects of Velocity and Applied Potential](#), *Wear*, **274-275**: 401-413 (2011).
- [48] Huijbregts W.M.M., Uilhoorn F., Wels H.C., [Corrosion in Heat Exchangers, the Value of Material Specification](#), *Materials functionality & design: Conference Maastricht*. (Book Chapter) (1997).
- [49] French S.M., Johnson G., May H., [Examination of Dealloying in a Domestic Water Fitting Using Light Optical/Scanning Electron Microscopy and Raman Spectroscopy](#), *Microsc. Microanal.*, **29(1)**: 152 (2023).
- [50] ASTM International. [ASTM E8/E8M-08, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials](#), ASTM International (Last update 2024).
- [51] International Organization for Standardization. [ISO 6509-2:2017, Corrosion of Metals and Alloys – Determination of Dezincification Resistance of Copper Alloys with Zinc – Part 2: Acceptance Criteria](#). International Organization for Standardization, (2017).
- [52] Drach A., Tsukrov I., Gross T., Hofmann U., Aufrecht J., Grohbauer A., [Corrosion Rates and Changes in Mechanical Properties of Copper Alloys Due to Seawater Exposure](#), Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 3: Design, Materials and Manufacturing, Parts A, B, and C. Houston, Texas, USA. **15**: 1245-1250 (2012)
- [52] Wang L., Li Z., Cai J., Fan Y., Wu W., Cheng X., Li X., [Study the Corrosion Resistance of Copper Alloys Exposed to Severe Marine Conditions](#), *Anti-Corrosion Methods and Materials*, **72(4)**: 506–522 (2025).

- [53] American Society of Mechanical Engineers. *ASME B46.1-2019, Surface Texture Surface Roughness, Waviness, and Lay*, American Society of Mechanical Engineers (2020).
- [54] American Society for Testing and Materials. *ASTM E112-13R21, Standard test methods for determining average grain size*. ASTM International (2024).
- [55] Francis R., *The Corrosion of Copper and its Alloys: A Practical Guide for Engineers*. NACE International (2018).
- [56] Zhang S., Pang X., Wang Y., Gao K., *Corrosion Behavior of Steel with Different Microstructures Under Various Elastic Loading Conditions*, *Corro.Sci.*, **75**: 293-299 (2013).
- [57] Drach A., Tsukrov I., *Field Studies of Corrosion Behaviour of Copper Alloys in Natural Seawater*, *Corro. Sci.*, **76**: 453-464 (2013).