بررسی اثر تنش بر ترک‌خوردگی صفحات فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ مبدل آمین مورد استفاده در واحد شیرین‌سازی گاز طبیعی

حسن پناهی[۱]*، عبدالمجید اسلامی[۲]، محمدعلی گلعذار[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان
[۲] استادیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان
[۳] استاد دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

* نویسنده مسئول: hasan.p2009@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۰

چکیده

مبدل آمین یکی از تجهیزات مهم در صنایع پتروشیمی خصوصاً فرآیند شیرین‌سازی گاز طبیعی توسط محلول آمین می‌باشد. این تجهیز در بین برج‌های جذب و دفع قرار می‌گیرد و در بازیافت آمین و جداسازی گازهای اسیدی جذب‌شده نقش مؤثری دارد. در تحقیق پیش رو ترک‌خوردگی و نشتی یک مبدل آمین صفحه‌ای از جنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰۴ بررسی شد. در راستای تعیین علل تخریب، آزمون‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی بر روی نمونه‌ای از صفحه مبدل انجام شد. همچنین محلول آمین و گسکت های مورداستفاده جهت آب‌بندی صفحات نیز آنالیز شدند. پس از ارزیابی‌های اولیه میکرو ترک‌هایی در دو سمت صفحه مبدل مشاهده شد. محل قرارگیری میکرو ترک‌ها معمولاً در قوس‌ها با بیشترین انحنا بود. همچنین بررسی‌های میکروسکوپی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح ورق آثار خوردگی بین‌دانه‌ای را نشان داد که شدت آن در زیر محل قرارگیری گسکت ها بیشتر از سایر نقاط بود. طبق آنالیز شیمیایی انجام‌شده بر روی محلول آمین، این محلول حاوی فرمات تا ۳ برابر حد پذیرفته‌شده می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند عمده دلیل ترک‌خوردگی، خوردگی بین‌دانه‌ای توأم با تنش در اثر وجود مقدار بالای یون فرمات در محلول آمین و تمرکز تنش در محل گسکت ها می‌باشد که با انجام آزمون‌های تکمیلی نظیر خوردگی تنشی توسط U-bend تأیید شد.

کلمات کلیدی: ترک‌خوردگی، خوردگی بین‌دانه‌ای، گاز طبیعی، مبدل؛

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-10-06]

The Effect Stress on Cracking of Type 304 Stainless Steel Amine Exchanger Sheets in a Gas Sweetening Plant

H. Panahi[1]*, A. Eslami[2], M.A. Golozar[3]

[1, 2, 3] Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

*** Corresponding Author: hasan.p2009@yahoo.com**

Submission: 2017, 06, 25 Acceptance: 2018, 07, 11

Abstract

Amine exchanger is an important equipment which used petrochemical industries especially in gas sweetening plants. This equipment set between absorption and stripper towers and plays a vital role in amine solution regeneration process. This study investigates cracking and leakage of a UNS S30400 type stainless steel plate in an amine exchanger unit. In this regard, micro and macro examinations were performed on the plate. Also amine solution and gasket material were analyzed. After primary examinations micro cracks were observed on both sides of the plate, especially in the area with the most curvature. Also Scanning Electron Microscope examinations revealed signs of interganular corrosion which were more severe under the gasket region of the plate. Based on chemical analysis of amine solution the formate anions are three times more than accepted amounts. Results showed that the main reason of cracking was intergranular corrosion accompanied by stress. High concentration of formate in amine solution, and also high level of stress under gasket region, should have encouraged the corrosion and cracking which verifird by U-bend tests.

Keywords: Exchanger, Cracking, Gas plant, Intergranular Corrosion;

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-10-06]

۱ ـ مقدمه

شیرین‌سازی گاز طبیعی و جداسازی گازهای اسیدی توسط محلول‌های آمین به یکی از پرکاربردترین روش‌های حال حاضر تبدیل‌شده است. علت توسعه کاربرد محلول‌های آمین را می‌توان در راندمان مطلوب، نرخ جذب بالا و بازیافت پذیری محلول دانست [۱]. محبوبیت محلول‌های آمین در صنایع نفت و گاز عموماً ناشی از بازیافت پذیری آن‌ها می‌باشد لذا هرگونه تجهیز در رابطه با عملیات تصفیه و بازیافت محلول آمین ازنقطه‌نظر فرآیندی و اقتصادی اهمیت دارد [۲]. خوردگی یکی از مهم‌ترین مشکلات واحدهای شیرین‌سازی گاز طبیعی می‌باشد. حضور گازهای خورنده نظیر CO_2 و H_2S در جریان گاز طبیعی مهم‌ترین دلایل نرخ بالای خوردگی در صنایع فوق می‌باشد [۳ و ۴]. فولادهای ساده کربنی در مواجهه با خوردگی یکنواخت هستند درحالی‌که فولادهای زنگ‌نزن در معرض خوردگی موضعی می‌باشند. وجود خوردگی موضعی در سیستم‌های تحت تنش منجر به ایجاد نقاط تمرکز تنش می‌گردد و زمینه را برای ترک‌خوردگی فراهم می‌نماید. اهمیت این موضوع برای تجهیزاتی هم چون مبدل آمین که تحت‌فشار کار می‌کنند دو چندان می شود، زیرا منجر به نشتی خواهد شد.

نشتی محلول آمین از یک مبدل صفحه‌ای در یک واحد شیرین‌سازی گاز طبیعی رخ داد. نشت محلول آمین از مبدل به دلیل فشار داخلی سیستم ناشی از جریان محلول در طول زمان افزایش می‌یافت. مبدل آمین متشکل از ۵۰۴ صفحه بود که توسط پیچ‌های سرتاسری به یکدیگر محکم شده بودند. به‌منظور آب‌بندی بین صفحات از گسکت استفاده‌شده بود. صفحات مبدل از جنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی گرید UNS S30400 و سایر قسمت‌ها از فولاد ساده کربنی ASTM A516 Grade70 ساخته شده بودند. یک سمت از صفحات مبدل با آمین غنی از گازهای اسیدی و سمت دیگر با محلول رقیق از گازهای اسیدی در تماس بودند.

۲ ـ تشریح فرآیند

محلول آمین رقیق با دمای پایین ابتدا وارد برج جذب می‌شود. دمای آمین حین حرکت از بالای برج به سمت پایین و با جذب گازهای اسیدی افزایش می‌یابد و در پایین برج به بیشترین مقدار خود می‌رسد. در همین محل مقدار گازهای اسیدی حل‌شده در محلول آمین به حداکثر خود می‌رسد و محلول آمین غنی می‌شود. محلول آمین غنی بایستی گرم‌تر شود و به برج دفع وارد شود تا گازهای اسیدی جذب‌شده را دفع نموده و به محلول رقیق آماده جذب مجدد تبدیل شود. محلول آمین غنی تبدیل‌شده به محلول رقیق در برج دفع، دمای بالایی دارد درحالی‌که محلول آمین موردنیاز جهت ارسال به برج جذب (آمین رقیق) باید دمای پایینی داشته باشد، لذا استفاده از یک مبدل حرارتی در بین برج جذب و دفع ضرورت می‌یابد. لذا وظیفه مبدل آمین تبادل دمای دو محلول و آماده‌سازی هریک برای فرآیند جذب و دفع CO_2 و H_2S می‌باشد. شرایط کاری مبدل آمین در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

۳ ـ روش تحقیق

شکل ۱ روند نمای تحقیق را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد. در این راستا تعدادی از صفحات مبدل آمین تهیه شد و نمونه‌های آزمایشگاهی تهیه گردید. سطح نمونه‌های آزمایشگاهی پس از شستشو، به‌صورت چشمی، غیر مخرب، استریوگرافی و میکروسکوپ الکترونی روبشی موردبررسی قرار گرفتند. نمونه‌های محلول آمین دریافت شده نیز توسط کروماتوگرافی گازی یونی (IGC) و طیف‌سنج تبدیل فوریه مادون‌قرمز(FTIR) به‌صورت کامل آنالیز شدند. اندازه‌گیری pH نمونه‌های محلول آمین رقیق و غنی نیز انجام شد. دانسیته و میزان جذب گسکت مورداستفاده در بین صفحات نیز توسط روش اعلام‌شده در استانداردهای ASTM D790 و ASTM D471 مورد بررسی قرار گرفت.

همچنین به‌منظور بررسی حساسیت به ترک‌خوردگی در محلول آمین رقیق، از نمونه‌های U-bend مطابق با استاندارد ASTM G30 استفاده شد [۵]. جهت جلوگیری از ورود اکسیژن به محلول و تجزیه اکسیدی آمین، گاز نیتروژن به داخل ظروف تزریق شد. نمونه‌های تسمه شکل بریده و سوراخ‌کاری شدند، سپس به دو صورت خم‌شده و خم‌شده همراه با پیچ آماده شدند. نمونه‌های پیچ‌دار جهت بررسی اثر تنش بر شروع ترک در دما و فشار محیط طی یک دوره زمانی ۶۰ روزه در محلول آمین رقیق غوطه‌ور شدند و سپس توسط میکروسکوپ نوری مورد ارزیابی قرار گرفتند. شکل ۲ شمای نمونه‌های مورداستفاده جهت ارزیابی حساسیت به ترک‌خوردگی را نشان می‌دهد.

٤ ـ آنالیز تخریب

٤ ـ ۱ ـ مشاهدات اولیه

شکل۳ تصویر دوربین دیجیتال از هردو سمت صفحات مبدل آمین را نشان می‌دهد. همان‌طور که از تصویر مشاهده می‌شود در یک سمت ورق رسوبات نازک و چسبنده مشکی‌رنگ وجود دارند (الف) درحالی‌که سمت دیگر (ب) با رسوب ضخیم و شکننده که به رنگ قهوه‌ای است پوشیده شده است.

به دلیل رسوبات موجود روی سطح صفحات مبدل امکان مشاهده ترک توسط مشاهده چشمی و آزمون غیر مخرب مایعات نافذ امکان‌پذیر نبود. بنابراین ابتدا رسوبات سطحی توسط محلول رسوب‌زدا و امواج آلتراسونیک تمیز شدند سپس بررسی چشمی و

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-10-06]

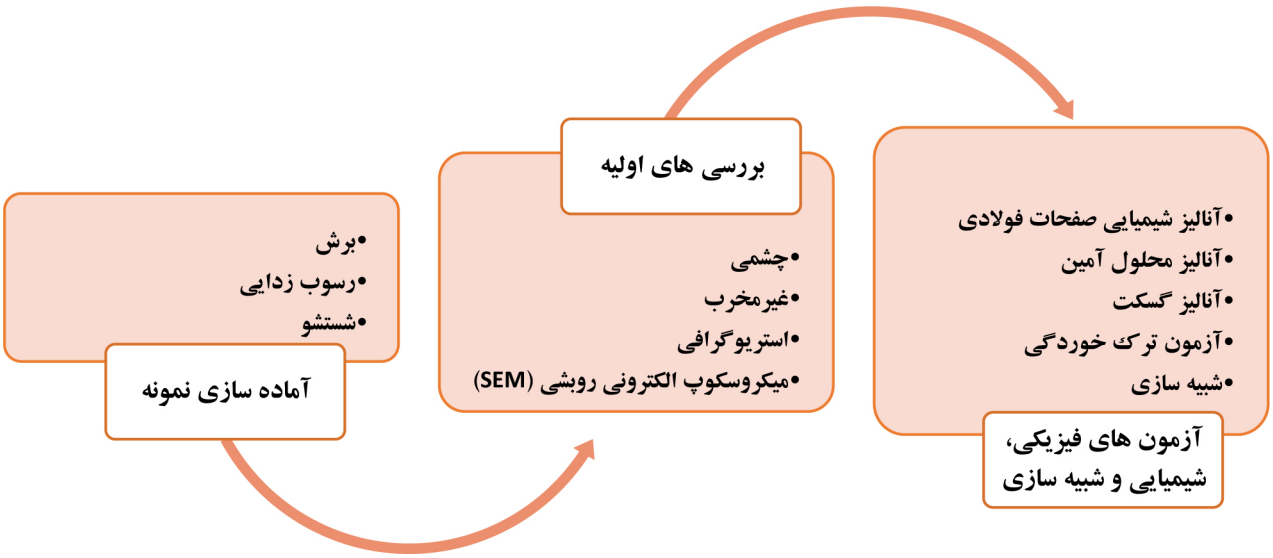
مایعات نافذ انجام شدند (شکل۴). توسط دو روش فوق ترک مشاهده نشد لیکن بررسی‌هـای بعـدی توسط میکروسکوپ استریوگرافی ترک مشاهده شد.

همان‌طور که از شکل ۵ (الف و ب) مشاهده می‌شود، ترک‌ها در محل‌های با بیشترین انحنا واقع شدند. تشکیل ترک‌های ماکروسکوپی نشانه‌ای از مقادیر بالای تنش در این نواحی می‌باشد.

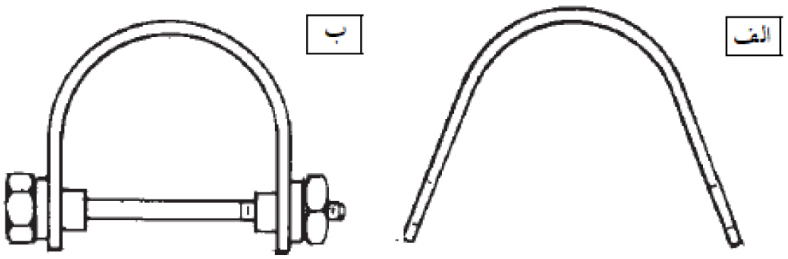
بررسی بیشتر توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی خوردگی بین‌دانه‌ای را نشان داد. خوردگی بین‌دانه‌ای در برخی نقاط باعث تشکیل ترک شده بود. آنالیزهای کیفی از سطوح خورده شده نشان می‌دهند، میزان و شدت خوردگی بین‌دانه‌ای در هر دو سمت صفحات یکسان است لیکن در محل گسکت ها شدت بیشتری مشاهده شد. خوردگی موضعی و ترک خورگی در محل گسکت ها در مطالعات قبلی نیز گزارش‌شده است [۵]. علت این پدیده را می‌توان در موضعی شدن محیط خورنده و بالاتر بودن میزان تنش دانست. در شکل۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی خوردگی بین‌دانه‌ای صفحات مبدل مشاهده می‌شود.

جدول ۱ ـ شرایط کاری مبدل آمین

Side	Lean		Rich	
Place	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
Tempereture (°C)	۱۲۳	۸۵	۷۷	۱۱۴
Pressure (Bar)	۲/۵۴		۷/۵۴	

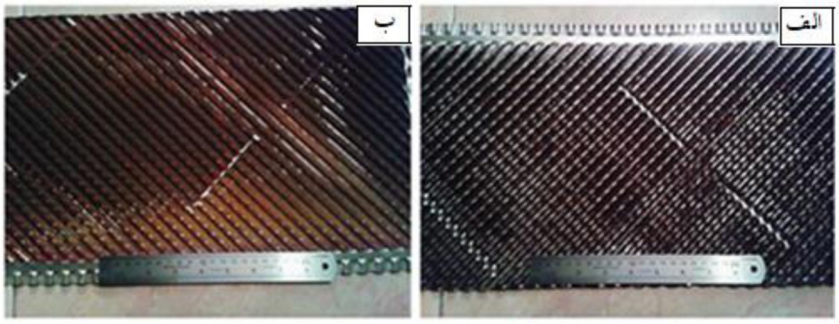


شکل ۱ ـ روند نمای تحقیق پیش رو

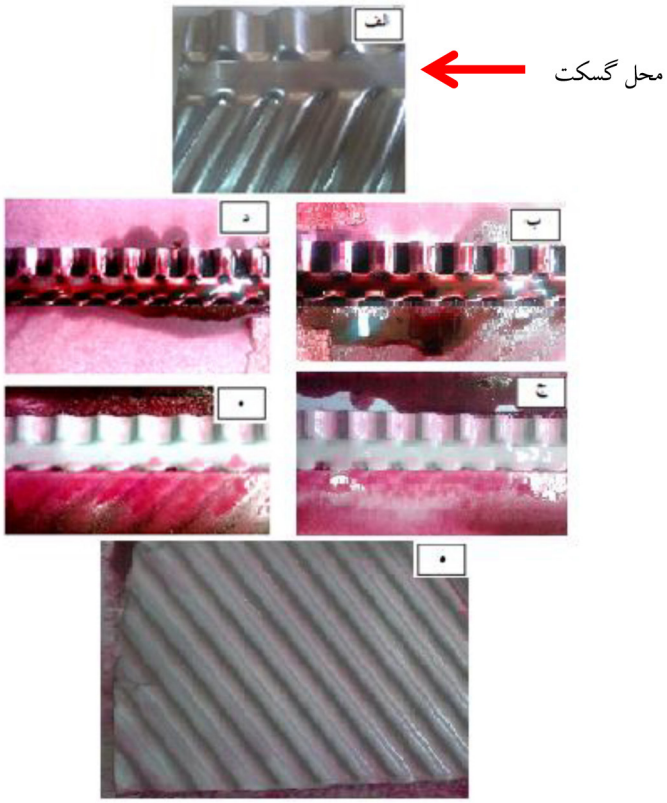


شکل ۲ ـ شمای نمونه‌های U-bend، الف) بدون پیچ و ب) پیچ‌دار [۵]

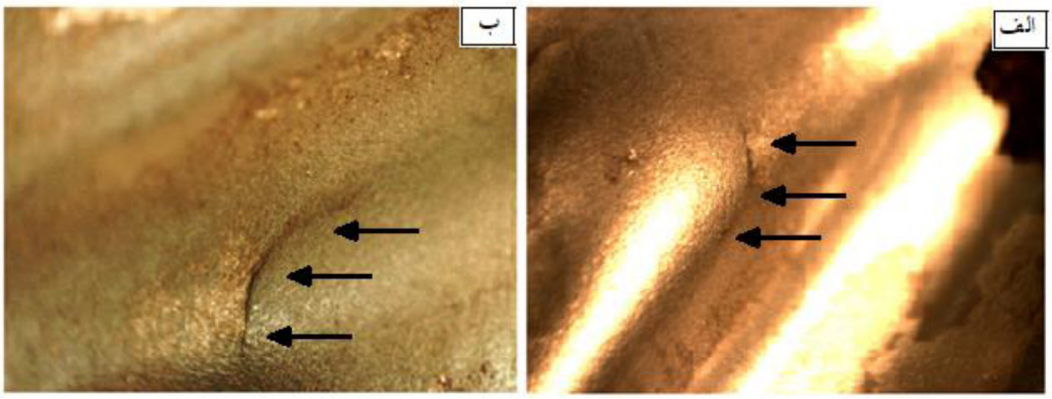
[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-10-06]



شکل ۳ ـ تصویر دوربین دیجیتال صفحات مبدل

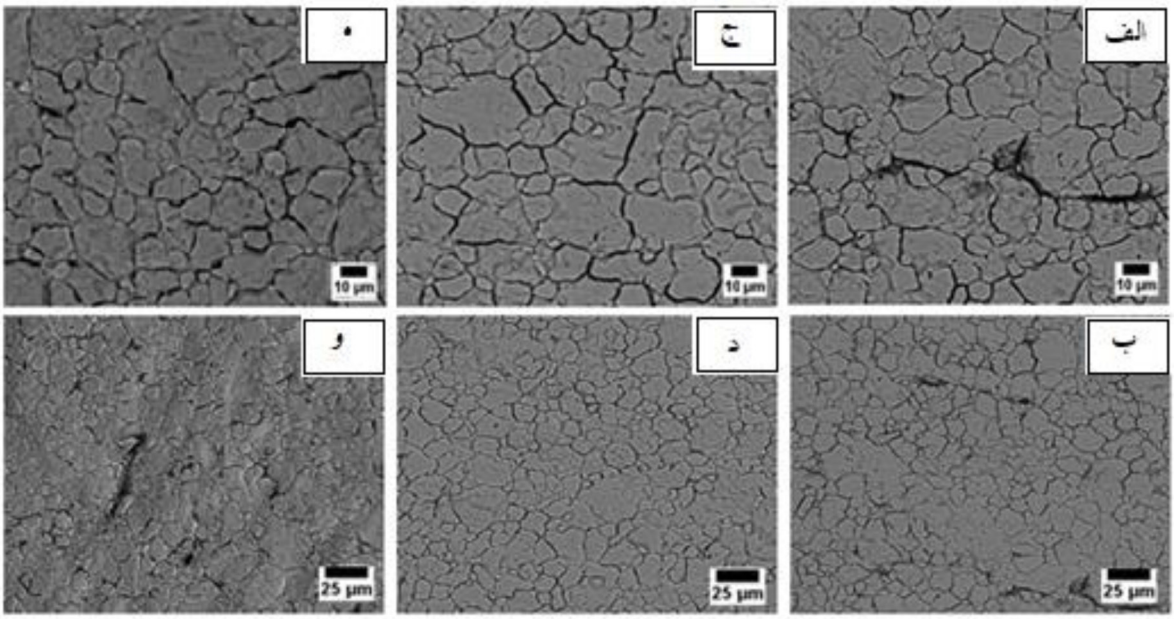


شکل ٤ ـ تصویر دوربین دیجیتال، الف) نمونه تمیز شده از صفحه مبدل، ب – ه) مایع نافذ و آشکارساز اسپری شده روی محل گسکت و) آشکارساز روی سطح ورق



شکل ۵ ـ تصویر میکروسکوپ استریوگرافی از نمونه صفحات مبدل، فلش‌ها محل ترک را نشان می‌دهند که در منطقه با بیشترین انحنا قرار دارد

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-10-06]



شکل۶ ـ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه صفحات مبدل، الف ب) سطح زیر گسکت سمت رسوب سیاه، ج د) سطح زیر گسکت سمت رسوب قهوه ای، ه و) سطوح دیگر

جدول ۲ ـ آنالیز عنصری صفحات مبدل آمین در مقایسه با استانداردASTM

Sample	Content							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	Fe
Exchanger's sheet	۰/۰۶	۱/۲۴	۰/۴	۱۸/۵	۸/۸	۰/۰۳	۰/۰۰۷	Bal.
ASTM 304	۰/۰۸	۲ <		۱۸<	۸<	۰/۰۲۵	۰/۰۴۵<	Bal.

٤ ـ ۲ ـ بررسی صفحات مبدل آمین

٤ ـ ۲ ـ ۱ ـ آنالیز شیمیایی عنصری

جدول۲ ترکیب شیمیایی فولاد مورداستفاده در تولید صفحات مبدل آمین، توسط طیف‌سنج نشر نوری را نشـان می‌دهـد. همان‌طور که از جدول مشاهده می‌شـود، کلیه عناصر در بازه مجاز می‌باشند.

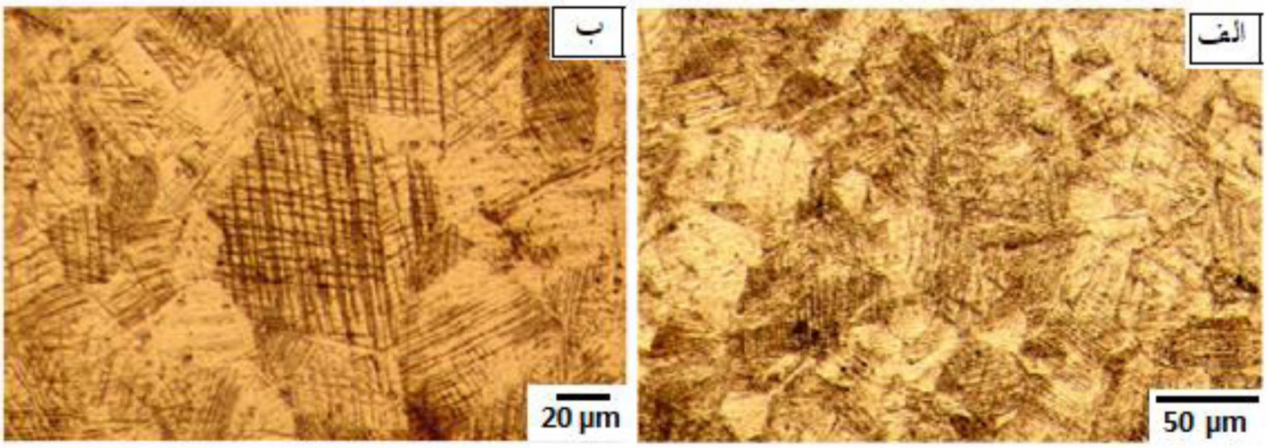
٤ ـ ۲ ـ ۲ ـ ریزساختار

شکل ۷ (الف و ب) تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فولاد زنگ‌نزن مورداستفاده در تولید صفحات مبدل را در دو بزرگنمایی نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل دیده می‌شود ریزساختار فولاد زنگ‌نزن شامل دانه‌های هم‌محور آستنیت همراه با دانسیته نسبتاً بالایی از دوقلویی می‌باشد. تشکیل دوقلویی‌ها در اثر فرآیند شکل‌دهی می‌باشد، زیرا در آلیاژهای با عرض منطقه نقص در چیده شدن زیاد تحرک نابجایی‌ها و تغییر شکل به‌واسطه آن با مشکل مواجـه می‌شـود [۶]. تشکیل دوقلویی‌ها می‌تواند به‌عنوان یک محل ترجیحی برای خوردگی موضعی و شروع ترک به‌واسطه آن باشد. آنچه طی تحقیقات مشخص شد نشان می‌دهد، حضور دوقلویی‌ها و مرزهای دوقلویی باعث انهدام صفحات مبدل آمین نبوده‌اند.

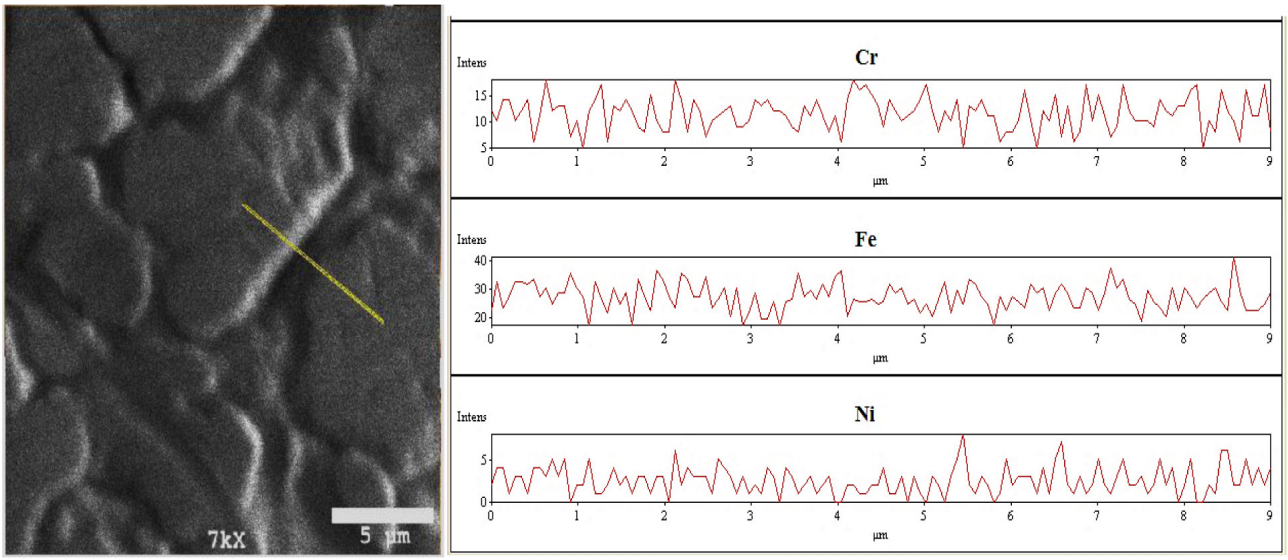
٤ ـ ۲ ـ ۳ ـ آنالیز طیف‌سنج پراش پرتوایکس (EDS)

اولین و مهم‌ترین علت خوردگی بین‌دانه‌ای در فولادهای زنگ‌نزن خروج کروم از حلالیت و تشکیل کاربید می‌باشد [۷ و ۸]. بنابراین آنالیز طیف‌سنج پراش پرتوایکس (EDS analysis) جهت بررسی غلظت کروم در نواحی مرزدانه‌ای استفاده شد. همان‌طور که از شکل ۸ مشخص است، شیب غلظتی قابل‌مشاهده‌ای توسط آنالیز نقطه‌ای و خطی در اطراف مرزدانه مشاهده نشد.

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-10-06]



شکل۷ ـ تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فولاد مورداستفاده در تولید صفحات مبدل آمین



شکل ۸ ـ آنالیز طیف‌سنج پراش پرتوایکس خطی ورق مبدل (توزیع عناصر آهن، کروم و نیکل)

٤ ـ ۳ ـ آنالیز محلول آمین

آنالیز کامل محلول آمین توسط روش کروماتوگرافی یونی گازی انجام شد که نتایج آن در جدول ۳ قابل‌مشاهده می‌باشد. تمام اجزاء محلول در بازه پذیرفته‌شده هستند به‌جز آنیون فرمات که حدود ۳ برابر مقدار مجاز می‌باشد [۴، ۹، ۱۰ و۱۱]. آنیون فرمات به‌عنوان یک یون مهاجم تلقی می‌شود و باعث خوردگی فولادهای زنگ‌نزن می‌شود [۱۲].

یون فرمات یکی از شناخته‌شده‌ترین محصولات تجزیه اکسیدی محلول آمین ناشی از نشت اکسیژن به داخل سیستم می‌باشد [۳، ۴، ۹ و۱۳]. راه‌های ورود اکسیژن به سیستم عبارت‌اند از: آب‌بندی ضعیف، آب جبرانی لازم برای سیستم شیرین‌سازی و درنهایت عدم کارایی تزریق نیتروژن به سیستم. طبق مطالعات پیشین، سود سوزآور یکی از دلایل تشدید سرعت واکنش تشکیل فرمات می‌باشد که کمتر به آن پرداخته‌شده است. این ماده جهت خنثی‌سازی نمک‌های مقاوم به حرارت و کنترل pH، به محلول آمین اضافه می‌شود [۱۴]. با توجه به اینکه از ترکیب نام‌برده جهت کنترل pH محلول آمین در واحد موردبررسی در این تحقیق استفاده می‌شود، لذا یکی از دلایل بالا بودن یون فرمات مشخص می‌گردد.

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-10-06]

جدول ۳ ـ نتایج آنالیز کامل نمونه‌های محلول غنی و رقیق

Basic degradation compounds	Semi-Lean side	Lean side	Unit
	Value		
MEG	<۰/۱	<۰/۱	wt%
THEED	۰/۱	۰/۱	wt%
HEOD	<۰/۱	<۰/۱	wt%
Propanediol	۰/۱	۰/۱	wt%
DEA	۰/۱	۰/۱	wt%
HMPO	۰/۱	۰/۱	wt%
TEA	<۰/۱	<۰/۱	wt%
Bicine	<۰/۱	<۰/۱	wt%
MMEA	<۰/۱	<۰/۱	wt%
DEA-F	<۰/۱	<۰/۱	wt%
HEI	<۰/۱	<۰/۱	wt%
BHEP	۰/۱	۰/۱	wt%
HMP	<۰/۱	<۰/۱	wt%
HSS Anions			
Acetate	۲۱۲	۲۱۷	Ppm
Formate	۱٤٦۸	۱۵۸۷	Ppm
Succinate	۲۳۸	۲۴۷	Ppm
Glycolate	<۱	<۱	Ppm
Propianate	۱۰٦	۱۲۱	Ppm
Butyrate	<۱	<۱	Ppm
Chloride	۳	۳	Ppm
Nitrate	۲	۲	Ppm
Nitrite	<۱	<۱	Ppm
Oxalate	<۱	۲	Ppm
Sulfite	٤	۴	Ppm
Sulfate	۱۰	۹	Ppm
Phosphate	٦	۵	Ppm
Thiocyanate	۲	۲	Ppm
Thiosulfate	۹	۹	Ppm
Cation content			
Cr	<۱	<۱	mg/Kg
K	٤	۳	mg/Kg
Na	۷۹	۹۴	mg/Kg
Ni	۱۳	۴4	mg/Kg
Fe	٦	۳	mg/Kg
Mg	<۱	<۱	mg/Kg
Ca	<۱	<۱	mg/Kg

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-10-06]

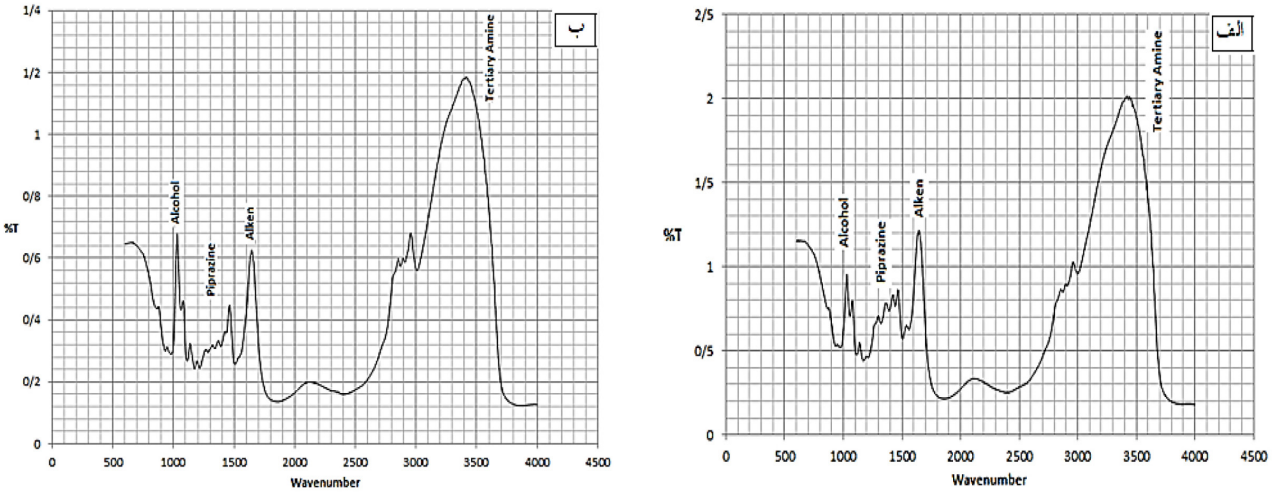
شکل ۹ نتایج آزمون طیف‌سنج تبدیل فوریه مادون‌قرمز برای محلول‌های آمین رقیق و غنی نشان می‌دهد. پیک‌های اصلی مربوط به آمین نوع سوم، آلکن، الکل و پیپرازین (Piperazine) می‌باشند. آمین مورداستفاده در واحد مورد تحقیق، متیل دی اتانول آمین فعال‌شده (aMDEA) می‌باشد. آلکن‌ها و الکل نیز از اجزائی هستند که معمولاً در این محلول‌ها یافت می‌شوند. پیپرازین جهت بهبود فرآیند جذب گازهای اسیدی به محلول آمین افزوده می‌شود. وجود تمامی اجزاء فوق توسط متخصصین فرآیند واحد مربوطه تأیید شد. پیک‌های بلند سمت راست هردو تصویر تایید کننده آمین نوع سوم هستند.

٤ ـ ٤ ـ آنالیز گسکت

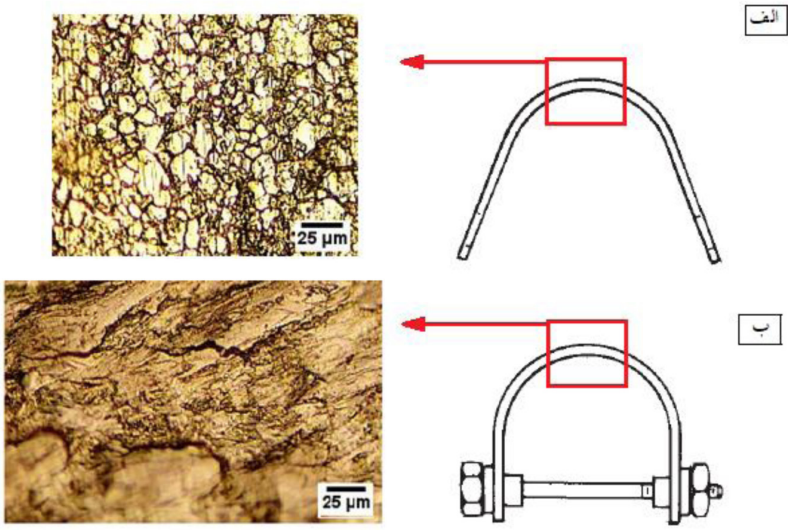
به‌منظور اطمینان از خواص فیزیکی گسکت مورداستفاده در بین صفحات، ابتدا دانسیته آن بررسی شد که مقدار آن برابر با ۱/۲۷ گرم بر سانتیمتر مربع تعیین شد. مقدار جذب رطوبت نمونه گسکت مورداستفاده در صنعت برابر با ۲/۳ درصد می‌باشد. تمامی مقادیر مطابق با مشخصات اعلام‌شده از طرف سازنده بود.

۵ ـ آزمون ترک‌خوردگی

تصویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه‌های U-bend خم‌شده و پیچ‌دار در شکل ۱۰ مشاهده می‌شوند. نمونه‌ها به مدت یک ماه در محلول آمین رقیق تحت محافظت گاز نیتروژن قرار داشتند. همان‌طور که از تصویر مشاهده می‌شود، در نمونه‌های خم‌شده بدون پیچ تنها خوردگی بین‌دانه‌ای مشاهده می‌شود درحالی‌که در نمونه‌های پیچ‌دار ترک‌هایی تشکیل‌شده‌اند. بالاتر بودن میزان تنش در نمونه‌های پیچ‌دار به تشکیل ترک از محل مرزدانه های خورده شده می‌انجامد.



شکل ۹ ـ آنالیز طیف‌سنج تبدیل فوریه محلول آمین، الف (آمین رقیق ب) آمین غنی



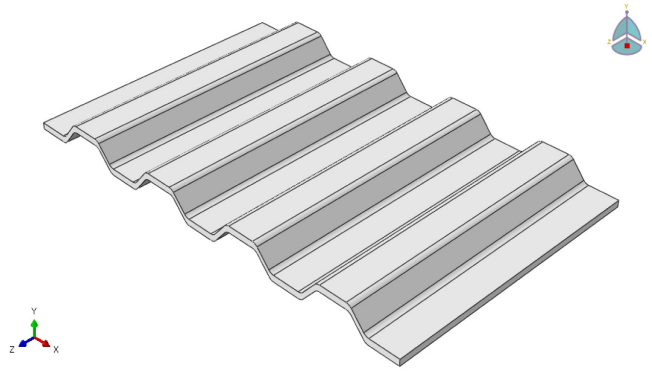
شکل ۱۰ ـ تصویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه‌های آزمون ترک‌خوردگی پس از یک ماه غوطه‌وری در محلول آمین رقیق، الف) نمونه‌های بدون پیچ، ب) نمونه‌های پیچ‌دار

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-10-06]

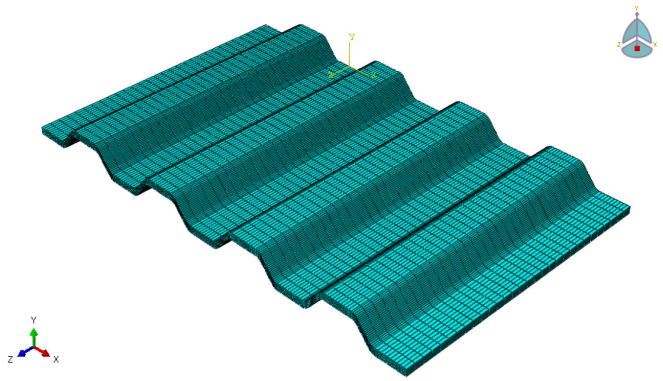
٦ ـ شبیه‌سازی توزیع تنش

به‌منظور بررسی‌های تکمیلی در مورد نقش تنش در محل ترک‌های شکل‌گرفته بر ورق مبدل آمین، شبیه‌سازی مقدماتی توزیع تنش با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS صورت گرفت. بر این اساس نمونه‌ای مشابه شکل ۱۱ طراحی شد. شرایط مرزی به صورتی انتخاب شد که گوشه‌های ورق ثابت باشند. در ضمن با توجه به داده‌هایی که از دمای کاری ورق‌ها وجود داشت (جدول۴-۶)، خواص الاستیک ماده انتخاب شدند. با در نظر گرفتن شرایط کاری، در این بررسی فقط تغییر فرم الاستیک ماده در نظر گرفته شد. همچنین فشار موجود در دو طرف ورق که توسط کارفرما ارائه‌شده بود، در دو طرف ورق به‌صورت یکنواخت اعمال گردید. مدل با استفاده از المان‌های مکعبی شبکه‌بندی شد (حاوی بیش از ۲۰۰۰۰ المان). نمونه المان بندی شده ورق مبدل آمین در شکل۱۲ نشان داده‌شده است.

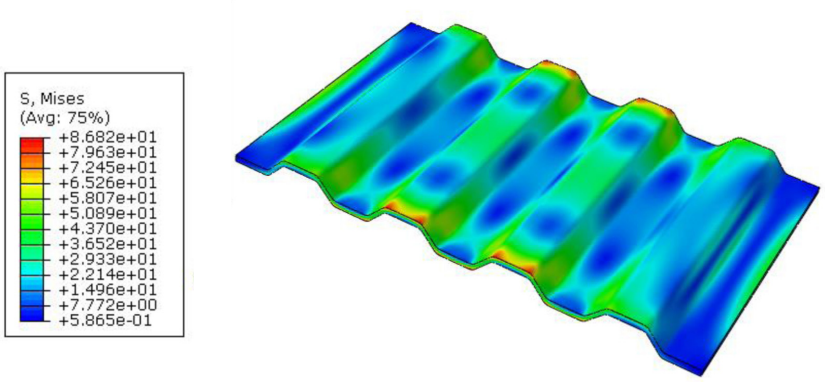
نتایج این شبیه‌سازی در شکل ۱۳ نشان داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مناطق مرزی و قله‌ها دارای تمرکز تنش بیشتری نسبت به سایر مناطق می‌باشند. این نتایج در تطابق با محل‌های بیشتر تشکیل ترک در سطح ورق مبدل آمین می‌باشند (شکل ۵).



شکل ۱۱ ـ نمونه طراحی‌شده برای آنالیز المان محدود ورق مبدل آمین



شکل ۱۲ ـ نمونه المان بندی شده از سطح ورق مبدل آمین



شکل ۱۳ ـ نتایج آنالیز تنش انجام‌شده (کانتورهای تنش واردشده به ورق)

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-10-06]

۷ ـ بحث و بررسی نتایج

ترکیب شیمیایی فولاد مورداستفاده در ساخت صفحات مبدل در بازه استاندارد قرار داشت. آمین‌های خالص نیز خورنده نیستند و به‌واسطه تجزیه محلول و تشکیل یون‌های مهاجم موسوم به نمک‌های مقاوم در برابر حرارت خورنده می‌شوند. وجود فرمات بالا در نمونه‌های محلول غنی و رقیق بر وجود تجزیه محلول و واکنش‌های ناخواسته صحه می‌گذارد. یکی از رایج‌ترین راه‌های تجزیه اکسیدی محلول و تشکیل فرمات، ورود اکسیژن و تشکیل گاز CO می‌باشد که در تماس با محلول آمین به واکنش ۱ می‌انجامد. حاصل این واکنش یون فرمات و یون آمین می‌باشند که هردو باعث خورنده شدن محلول آمین می‌شوند، (واکنش ۱).

هرچند هیچ‌گونه غیریکنواختی و شیب غلظتی در توزیع عنصر کروم در اطراف مرزدانه ها مشاهده نشد، لیکن انرژی بالای مرزدانه ها باعث افزایش تمایل به واکنش‌های آندی در این نواحی می‌شود. بروز واکنش‌های آندی نیاز به محیط خورنده جهت انجام واکنش‌های کاتدی دارد که در محلول آمین تجزیه‌شده یون‌های لازم برای انجام این واکنش حضور دارند.

$$CH_3N[CH_2CH_2OH]_2 \xrightarrow{CO} MDEAH^+ HCOO^- \quad (1)$$

(MDEA) (Formate salt)

خوردگی در مرزدانه‌ها باعث ایجاد مناطق تمرکز تنش می‌شود. تنش لازم برای تشکیل ترک‌ها از چند منبع می‌تواند فراهم شود، ازجمله می‌توان به تنش‌های پس‌ماند از فرآیند تولید و شکل‌دهی صفحات مبدل، تنش‌های ناشی از فشار محلول در سیستم و درنهایت تنش حاصل از محکم کردن پیچ‌های سراسری جهت فشرده کردن گسکت ها و آب‌بند شدن صفحات مبدل اشاره کرد. هرچند در سایر نقاط صفحات مبدل نیز آثار خوردگی بین‌دانه‌ای و ترک مشاهده شد، لیکن مقدار بالای تنش و ایجاد یک محل موضعی جهت نفوذ و تجمع یون‌های خورنده در زیر گسکت ها باعث افزایش خوردگی بین‌دانه‌ای و ترک‌خوردگی در این مناطق می‌شود.

درنهایت جهت حداقل نمودن مشکل ترک‌خوردگی در مبدل موردبررسی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

ـ حداقل نمودن مجاری ورود اکسیژن و تجزیه اکسیدی و به‌تبع آن‌ها یون‌های مهاجم نظیر فرمات

ـ حداقل نمودن تنش‌های داخلی خارجی بر روی صفحات مبدل آمین

ـ استفاده از گریدهای فولاد زنگ‌نزن با مقاومت بیشتر

نتیجه‌گیری

نتایج اصلی از این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

- فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ دارای مقاومت کافی در برابر خوردگی بین‌دانه‌ای و ترک‌خوردگی در محلول آمین واحد مربوطه نمی‌باشد.
- نوع و شدت خوردگی و ترک‌خوردگی در طرفین صفحات (در تماس با محلول رقیق و غنی) یکسان بود.
- یون فرمات حاصل از تجزیه اکسیدی محلول عامل اصلی خوردگی بین‌دانه‌ای فولاد ۳۰۴ می‌باشد.
- خوردگی و ترک‌خوردگی در زیر گسکت‌ها شدیدتر از نواحی دیگر است که علت آن در خوردگی موضعی و سطح تنش بالاتر در این ناحیه است.

مراجع

[1] J.H. Gary, G.E. Handwerk, Petroleum Refining Technology and Economics, Marcel Dekker, 4th Ed., ,2001.

[2] M. Nouri, J. Mesbah, S. Shaiban, A verified computer modell for corrosion rate prediction in a Di-Ethanol amine plant using field data, Corrosion 2008, NACE International Conference and Expo, p. 8417.

[3] R.B. Nielsen, K.R. Lewis, J.G. McCullough, D.A. Hansen, Controlling corrosion in amine treating plants, Corrosion 1995, NACE International Conference and Expo, p. 571.

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-10-06]

[4] P.C. Rooney, M.S. Dupart, Corrosion in alkanolamine plants: Causes and Minimaization. Corrosion 2000, NACE International Conference and Expo, p. 494.

[5] ASTM G30. Standard Practice for Making and Using U-Bend Stress-Corrosion Test Specimens. West Conshohocken: ASTM;1997.

[6] W.F. Hosford, Mechanical behavior of materials, Cambridge university press, 2010.

[7] M.G. Fontana, Corrosion Engineeing, McGraw-Hill, 1987.

[8] M. McGuire, Stainless Steels For Design Engineers, ASM International, 2008.

[11] A. Erfani, S. Boroojerdi, A. Dehghani, M. Yarandi, Investigation of carbon steel and stainless steel corrosion in a MEA based CO2 removal plant, Petroleum & Vol. 57, 2015, Pp. 48-55.

[9] F. Namazi, A. Almasi, Amine corrosion in gas sweetening plant: causes and minimization on real case study, Corrosion 2016, NACE International Conference and Expo, p.7178.

[10] J. Xie, V. Simanzhenkov, B. Santos, K, Ikeda, L. Davies, Corrosion of UNS S30403 stainless steel trays in an amine unit, Corrosion 2010, NACE InternationalConference and Expo. p. 10187.

[11] R. Mesgarian, Corrosion management in gas treating plants (GTP's): comparison between corrosion rate of DEA and MDEA a case study in sour gas refinery. Bali: IEOM 2014.

[12] G.E. Badea, D. Ionita, P. Cret, Corrosion and passivation of the 304 stainless steel in formic acid solutions, Mater Corros, Vol. 65, 2014, Pp.1103-1110.

[13] C. Gouedard, D. Picq, F. Launay, P. Carrette, Amine degradation in CO2 capture.I. A review. International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 10, 2012, Pp.144-270.

[14] M.j.Litschewski, More experiences with corrosion and fouling in a refinery amine system, Corrosion 1996, NACE International Conference and Expo, p.391.

[Downloaded from journal.ica.ir on 2026-10-06]