



بیست و دومین کنفرانس ملی
و دومین کنفرانس بین‌المللی
خوردگی

گنجره ملی خوردگی
بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی
خوردگی
۲۰ و ۲۱ شهریور ۱۴۰۳

بررسی رفتار خوردگی کوپن‌های خوردگی متداول در صنایع نفت و گاز در محلول NaCl 3.5%

علی امیرعبداللهیان*، محسن نصری، نسیم کجوری، مهران جعفری

شرکت برنا الکترونیک

*E-mail: a.amirabdollahian@borna-co.com

چکیده

هدف از پژوهش حاضر بررسی و مقایسه رفتار خوردگی کوپن‌های خوردگی متداول در صنایع نفت و گاز به منظور پایش خوردگی است. به این منظور چهار کوپن خوردگی شامل فولاد کربنی AISI 1018، AISI 1010، API 5L Gr. X52 و ASTM A106 Gr. B انتخاب و آزمون‌های سختی‌سنجی مقطعی، خوردگی غوطه‌وری (کاهش وزن) و پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محلول NaCl 3.5% و همچنین بررسی میکروسکوپی مقطعی و سطحی روی آن‌ها انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که خوردگی کوپن‌ها از نوع یکنواخت همراه با حفراتی محدود بوده و بیشترین میزان نرخ خوردگی مربوط به کوپن AISI 1010 و کمترین مقدار نرخ خوردگی مرتبط با کوپن ASTM A106 Gr. B است که می‌تواند به دلیل تغییر میزان عناصر کربن و منگنز در آن‌ها و بالتبع تأثیر در رفتار خوردگی کوپن‌ها باشد.

واژه‌های کلیدی

صنایع نفت و گاز، خوردگی، پایش خوردگی، کوپن‌های خوردگی.

۱- مقدمه

تجهیزات و سازه‌های فلزی در واحدهای نفت، گاز و پالایشگاهی، با نفت خام، گاز طبیعی، فرآورده‌های نفتی و سوخت، حلال‌ها، آب، خاک و اتمسفر در تماس هستند. این واحدها با توجه به دارا بودن مواد قابل اشتعال، انفجاری و سمی، صنعت پرخطری برای سلامت انسان و محیط زیست به شمار می‌روند. مجموعه عوامل متعددی، تجهیزات نفت، گاز و پالایشگاهی را در برابر انواع پدیده‌های خوردگی که می‌تواند منجر به حوادث جدی شود، بسیار آسیب‌پذیر نموده است [۱]. خوردگی خطوط لوله نفت و گاز می‌تواند ایمنی و عمر مفید سیستم‌های خط لوله را تحت تأثیر قرار داده و هر ساله حوادث فاجعه باری را ایجاد نماید [۲]. خوردگی شدید سازه‌های موجود در میادین نفت و گاز در محل تولید و انتقال آن‌ها، اغلب غیرقابل پیش‌بینی بوده و جزو خسارات اصلی منجر به تخریب در صنایع نفت و گاز محسوب می‌شود [۳]. به طوری که حدود ۵۰ درصد از تخریب‌ها در صنایع نفت و گاز در نتیجه خوردگی است [۴]. اکثر چاه‌ها و خطوط لوله نفت و گاز، حاوی مواد بسیار خورنده مانند نمک‌ها و ترکیبات کلریدی و سولفیدی هستند. این نمک‌ها و ترکیبات حل شده در آن‌ها می‌توانند تشکیل یک الکترولیت آبی خورنده حاوی اسید هیدروکلریک (HCl) را تحریک نموده و خوردگی را تسریع نمایند [۵]. رایج‌ترین نوع خوردگی در صنایع نفت و گاز، خوردگی یکنواخت بوده که به طور یکنواخت در تمام سطح مقطع قطعه یا



سازه اتفاق می‌افتد [۶]. علاوه بر این نوع خوردگی، خوردگی‌های موضعی مانند خوردگی حفره‌ای^۱، شیاری^۲، گالوانیک^۳، تنش‌ی، فرسایشی و ... نیز جزو خوردگی‌هایی هستند که در این صنایع رخ می‌دهند [۷].

نظارت و پایش محیط خورنده اصطلاحاً پایش خوردگی^۴ نامیده شده و اولین گام به منظور کنترل خوردگی به حساب می‌آید [۸]. تجهیزات متداول مورد استفاده به منظور پایش خوردگی شامل کوپن‌های خوردگی^۵ (کوپن‌های کاهش وزن^۶)، پراب‌های مقاومتی^۷، پراب‌های مقاومتی پلاریزاسیون خطی^۸، پراب‌های هیدروژنی^۹ و ... است [۹].

کوپن‌های خوردگی ابزارهای ساده‌ای هستند که جهت تخمین کمی نرخ خوردگی و یا بررسی کیفی نوع خوردگی رخ داده در سیستم‌های تحت پایش به کار می‌روند. شواهد به دست آمده از کوپن خوردگی به عنوان شواهد تقریبی یا نشانه‌ای از مشکلاتی است که ممکن است در سیستم رخ داده باشد. استفاده از کوپن خوردگی، اگرچه یک روش ابتدایی و ساده است، اما هنوز یک روش دقیق برای پایش خوردگی محسوب می‌شود. در حالت ایده‌آل به منظور حصول نتایج دقیق‌تر، کوپن‌های خوردگی در کنار پراب‌های مقاومتی یا پراب‌های پلاریزاسیون خطی برای اندازه‌گیری نرخ‌های خوردگی به کار می‌روند [۱۰].

کوپن‌های کاهش وزن، نمونه‌های بدون پوششی از مواد فلزی هستند که با قرار گرفتن در معرض محیط خورنده، میزان خوردگی را اندازه‌گیری می‌کنند. این کوپن‌ها در محیط تحت پایش قرار گرفته و پس از گذشت بازه زمانی مشخصی از محیط خارج شده و نرخ خوردگی با استفاده از روش وزن‌سنجی محاسبه می‌شود، به این معنی که تغییر جرم کوپن را پیش و پس از قرار گرفتن در معرض محیط و حذف محصولات خوردگی اندازه‌گیری نموده و اختلاف وزن آن ملاک عمل جهت محاسبه سرعت خوردگی خواهد بود [۱۱] و [۱۲]. به عبارت دیگر کوپن خوردگی یک قطعه فلزی با خواص شیمیایی و مکانیکی مشابه با تجهیزات فرآیند، شکل، اندازه و سطح معین، شماره سریال متمایز کننده و وزن از پیش تعیین شده با دقت ۰,۰۰۰۱ گرم بوده که در مدت زمان مشخصی در معرض محیط خورنده قرار گرفته و از طریق آن نوع خوردگی و نرخ متوسط خوردگی تعیین می‌شود [۱۰]. استانداردهای ASTM G1 و NACE SP0775 روش‌های استاندارد را در خصوص تمیزکاری، وزن‌کشی و محاسبات سرعت خوردگی ارائه می‌دهند [۱۳ و ۱۴]. کوپن‌های خوردگی اغلب از جنس فولاد، مس، آلومینیوم، تیتانیوم و ... است. فولاد مورد استفاده در ساخت کوپن از نوع کم کربن، کربن متوسط و آلیاژی و فولاد زنگ‌نزن می‌باشد [۱۴].

برخی کوپن‌ها با تغییر شکل فیزیکی و موقعیت قرارگیری خود در سرویس می‌توانند معضلات دیگری مانند فرسایش و رسوب را تشخیص دهند. در صورت شناسایی چنین مشکلاتی، می‌توان با استفاده از سایر روش‌های پایش، آن‌ها را با دقت بیشتری اندازه‌گیری کرد و اقدامات اصلاحی مورد نیاز را برای بهبود شرایط انجام داد [۱۰]. مزایا و معایب استفاده از کوپن‌های خوردگی در جدول ۱ آورده شده است.

هنگام تفسیر داده‌های کوپن خوردگی، زمان قرارگیری در معرض باید در نظر گرفته شود. قرارگیری در معرض کوتاه مدت (۱۵ تا ۴۵ روز) پاسخ‌های سریعی را ارائه می‌دهد اما ممکن است نرخ خوردگی بالاتری نسبت به قرار گرفتن در معرض طولانی مدت داشته باشند. قرارگیری در معرض طولانی‌تر (۶۰ تا ۹۰ روز) اغلب برای شناسایی و تحلیل حمله حفره‌ای مورد نیاز است [۱۴].

کوپن‌ها در اشکال و اندازه‌های مختلف موجود بوده که به نوع سیال، موقعیت پایش، نوع نگهدارنده مورد استفاده، اندازه خط و ... بستگی دارد. از انواع کوپن‌های خوردگی می‌توان به کوپن‌های کاهش وزن نواری، دیسکی و دیسکی همتراز^{۱۰}، کوپن‌های رسوب‌گذاری^{۱۱}، و انواع دیگر کوپن‌های خاص شامل: کوپن اتمسفری، تنش‌ی، ویل تست، میله‌ای، بایوفیلیم و ... اشاره کرد. بسته به

1. Pitting Corrosion
2. Crevice Corrosion
3. Galvanic Corrosion
4. Corrosion Monitoring
5. Corrosion Coupons
6. Weight Loss Coupons
7. Electrical Resistance Probes
8. Linear Polarization Probes
9. Hydrogen Probes
10. Flush Disc
11. Scale Coupons

شرایط سیستم، کوپن‌ها به روش‌های مختلفی نصب شده و امکان نصب باید با در نظر گرفتن پشتیبانی کافی از کوپن‌ها در سیستم، جداسازی الکتریکی کوپن‌ها (از سایر کوپن‌ها، نگهدارنده کوپن و دیواره لوله یا مخزن به منظور جلوگیری از خوردگی گالوانیک)، حفظ موقعیت کوپن در محل مورد نظر و قرار گرفتن آن در سیستم، تعویض سریع و آسان کوپن‌ها فراهم باشد [۱۴].

جدول ۱. مزایا و معایب کوپن‌های خوردگی [۱۵ و ۱۶]

مزایا	معایب
(۱) یک تکنیک ساده و مستقیم بوده و در انواع محیط‌ها قابل استفاده است. (۲) تعیین نرخ خوردگی با این روش دقیق، با قابلیت اطمینان بالا و تکرارپذیری ۵٪-۳ است. (۳) ابزار موثری برای نظارت بر عملکرد بازدارنده‌ها با گذشت زمان است. (۴) این روش می‌تواند میزان خوردگی حفره‌ای را نشان داده و مطالعه عمق حفره‌ها توسط میکروسکوپ نوری امکان پذیر است. (۵) این تکنیک به تلفات واقعی مواد بستگی داشته، از این رو، می‌تواند برای اندازه‌گیری خوردگی و فرسایش استفاده شود.	(۱) کوپن‌ها صرفاً می‌توانند میانگین نرخ خوردگی را در زمان قرارگیری در معرض اندازه‌گیری نمایند. همچنین تجزیه و تحلیل کوپن‌ها تنها پس از خارج نمودن آن‌ها از سیستم انجام می‌شود. (۲) به منظور اندازه‌گیری تغییرات خوردگی ناشی از تغییرات گذرا در شرایط عملیاتی، نامناسب است. (۳) آلاینده‌ها می‌توانند آماده‌سازی سطح و در نتیجه دقت نتایج را تحت تاثیر قرار دهند. (۴) کوپن‌ها تنها می‌توانند تغییرات آهسته در نرخ خوردگی را به دلیل پاسخ آهسته آن‌ها به تغییرات ثبت کنند.

از نقطه نظر عملی دو روش برای انجام آزمون‌های خوردگی وجود دارد: انجام آزمون‌ها در شرایط آزمایشگاهی و انجام آزمون‌ها در شرایط طبیعی. آزمون‌های آزمایشگاهی، آزمون‌های خوردگی هستند که در شرایط شبیه‌سازی شده با شرایط طبیعی و با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی، انجام می‌شوند. آزمون‌های خوردگی در شرایط طبیعی در اتمسفر، خاک یا آب دریا و با استفاده از نمونه‌هایی که با روش‌های خاصی تهیه و آماده‌سازی می‌شوند، انجام می‌گردند [۱۷].

ترکیب شیمیایی اصلی آب دریا در سراسر جهان ثابت است ولی با این حال، آب دریا هنوز یک سیستم شیمیایی پیچیده بوده که تحت تاثیر عوامل مختلف دیگر مانند: شوری، غلظت اکسیژن محلول، غلظت یون‌های جزئی، فعالیت بیولوژیکی و آلاینده‌ها قرار دارد. میزان خوردگی نمونه‌های آب دریا، زمانی که ذخیره می‌شوند، نسبت به آب دریای عمده که از آن گرفته شده‌اند، دچار تغییر می‌شود. این تا حدی به دلیل این واقعیت است که اجزای جزئی، از جمله موجودات زنده و مواد مغذی آلی محلول در آن، در تعادل خاصی در محیط طبیعی هستند. این تعادل به محض جداسازی نمونه طبیعی آب دریا از توده آب اصلی شروع به تغییر می‌کند. بنابراین آب دریا به راحتی در آزمایشگاه برای آزمون‌های خوردگی قابلیت شبیه‌سازی نداشته و محلول 3.5% NaCl اغلب برای این منظور استفاده می‌شود که در مقایسه با آب دریای طبیعی نسبت به فولاد کربنی ته‌اجمی تر است. این امر به عدم حضور سایر یون‌های موجود در آب دریای طبیعی، به ویژه کلسیم و منیزیم در محلول 3.5% NaCl نسبت داده شده است [۱۸].

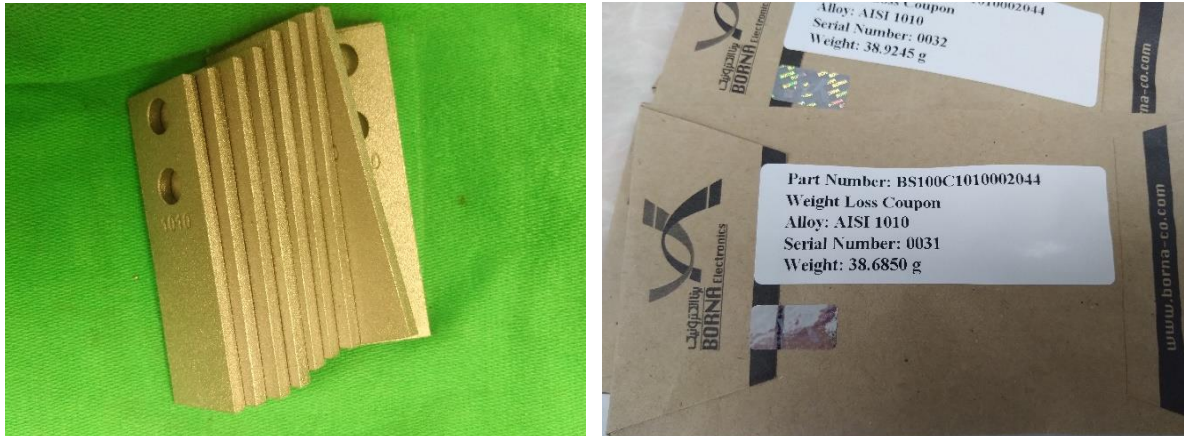
چون یکی از ناخالصی‌های مرسوم و عامل خورنده اصلی در اکثر محیط‌های نفت و گاز، ترکیبات کلریدی ناشی از آب دریا است بنابراین در این پژوهش رفتار خوردگی کوپن‌های خوردگی فولاد کربنی متداول شامل ASTM A106 Gr. B، API 5L Gr. X52، AISI 1018، AISI 1010 در محلول 3.5% NaCl مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

کوپن‌های نواری^۱ از جنس فولاد ASTM A106 Gr. B، API 5L Gr. X52، AISI 1018، AISI 1010 از شرکت برنا الکترونیک تهیه شدند. کوپن‌ها با ابعاد ۷۳ × ۲۲ × ۳٫۲ میلی‌متر، آنیل شده و با سطح سندبلاست شده بودند. این کوپن‌ها به منظور جلوگیری از

1. Strip Coupons

اکسید شدن در نایلون حاوی بازدارنده فاز بخار^۱ (VCI) و پاکت بسته‌بندی شده بودند. شکل ۱ تصویر نمونه کوپن‌های خوردگی را نشان می‌دهد. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی کوپن‌های خوردگی مورد استفاده به ترتیب در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.



شکل ۱. تصویر نمونه کوپن‌های خوردگی مورد استفاده در پژوهش حاضر

جدول ۱. ترکیب شیمیایی کوپن‌های خوردگی

Cu (wt%)	Ti (wt%)	Nb (wt%)	V (wt%)	Mo (wt%)	Ni (wt%)	Cr (wt%)	S (wt%)	P (wt%)	Mn (wt%)	Si (wt%)	C (wt%)	نوع کوپن
۰,۰۱۰	۰,۰۰۲	۰,۰۰۷	۰,۰۰۲	۰,۰۰۲	۰,۰۰۲	۰,۰۰۱	۰,۰۰۷	۰,۰۰۳	۰,۶۰	۰,۰۴	۰,۱۳	AISI 1010
۰,۰۰۳	-	۰,۰۰۲	۰,۰۰۳	۰,۰۰۸	۰,۰۰۲	۰,۰۰۵	۰,۰۰۴	۰,۰۱۵	۰,۷۸	۰,۰۲	۰,۱۹	AISI 1018
۰,۰۰۲	۰,۰۰۶	۰,۰۰۲	۰,۰۰۴	۰,۰۰۱	۰,۰۰۳	۰,۰۰۴	۰,۰۰۷	۰,۰۱۳	۱,۳۵	۰,۲۴	۰,۱۷	API 5L Gr. X52
۰,۰۰۴	-	۰,۰۰۵	۰,۰۰۲	۰,۰۰۵	۰,۰۰۳۸	۰,۰۰۴	۰,۰۰۳	۰,۰۰۹	۰,۹۴	۰,۱۰	۰,۲۹	ASTM A106 Gr. B

جدول ۲. خواص مکانیکی کوپن‌های خوردگی

Hardness (HRC)	Elongation (%)	Yield strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	نوع کوپن
۱۱	۲۴٪	۳۱۰	۳۷۰	AISI 1010
۱۲	۱۸٪	۳۸۰	۴۴۸	AISI 1018
۱۵	۲۸٪	۳۷۳	۵۳۵	API 5L Gr. X52
۱۴	۳۰٪	۳۲۱	۵۱۹	ASTM A106 Gr. B

به منظور انجام آزمون خوردگی غوطه‌وری^۲ نمونه‌ها با ابعاد $۲۲ \times ۱۰ \times ۳,۲$ میلی‌متر از کوپن‌ها برش داده شدند. نمونه‌های تهیه شده، مرحله به مرحله از سنباده ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ سنباده زده شده، با آب مقطر و اتانول شسته و در جریان هوای گرم خشک شدند. نمونه‌ها با ترازو AND مدل HR200 با دقت چهار رقم اعشار توزین و در شرایط محیطی ۲۲°C و رطوبت ۱۹٪ در محلول ۳.۵٪ NaCl به مدت ۲۸ روز غوطه‌ور شدند. پس از گذشت ۲۸ روز نمونه‌ها از محلول خارج شده و تمیزکاری سطحی مکانیکی و سپس شیمیایی براساس استاندارد ASTM G1 در محلول تمیزکاری حاوی ۲۰ گرم هیدروکسید سدیم و ۲۰ گرم گرانول روی در ۱۰۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر در دمای ۸۰°C به مدت ۳۵ دقیقه به صورت التراسونیک روی آن‌ها انجام شد. بعد از فرایند تمیزکاری سطحی، نمونه‌ها با آب مقطر و اتانول شسته و در جریان هوای گرم خشک شدند و با ترازو با دقت چهاررقم اعشار وزن شدند.

1. Vapor Corrosion Inhibitor
2. Immersion Corrosion Test

پس از محاسبه مساحت سطح اولیه نمونه‌ها و جرم از دست رفته در طول آزمون، سرعت خوردگی متوسط براساس استاندارد ASTM G1 و از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$CR = (K \times W)/(A \times T \times D) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن CR سرعت متوسط خوردگی، K ثابت، W جرم از دست رفته (g)، A مساحت سطح (cm²)، T مدت زمان در معرض قرارگیری (h) و D دانسیته فلز (g/cm³) می‌باشد [۱۳].

جهت انجام آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه‌های تهیه شده مرحله به مرحله از سنباده ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ سنباده زده شده، با آب مقطر و اتانول شسته و در جریان هوای گرم خشک شدند. آزمون پلاریزاسیون با استفاده از دستگاه پتانسیواستات Solartron مدل SI 1287 و یک دستگاه آنالیزکننده فرکانس Solartron مدل SI 1260 در محلول 3.5% NaCl و با سرعت روبش ۰.۵ mV/s انجام شد. در این آزمون ۲.۱ سانی متر مربع از سطح نمونه‌ها در معرض محلول قرار گرفته و از الکتروود کالومل اشباع^۱ (SCE) به عنوان الکتروود مرجع، الکتروود پلاتین به عنوان الکتروود کمکی و از کوپن‌ها به عنوان الکتروود کاری استفاده شد. پیش از انجام آزمون، به منظور پایدارشدن پتانسیل مدار باز، نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در معرض محلول قرار گرفتند و سپس آزمون پلاریزاسیون روی آن‌ها انجام شد. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزار Corrview انجام شد.

سختی سنجی مقطعی کوپن‌ها با استفاده از میکرو سختی سنج صورت پذیرفت. همچنین سطح مقطع کوپن‌ها پیش از انجام آزمون‌های خوردگی پس از اچ شدن با محلول نیتال ۲٪ با استفاده از میکروسکوپ نوری به منظور بررسی دکرپورگی^۲ و سطح کوپن‌ها پس از انجام آزمون خوردگی غوطه‌وری به صورت چشمی و توسط میکروسکوپ استریو مورد ارزیابی قرار گرفتند.

۳- نتایج و بحث

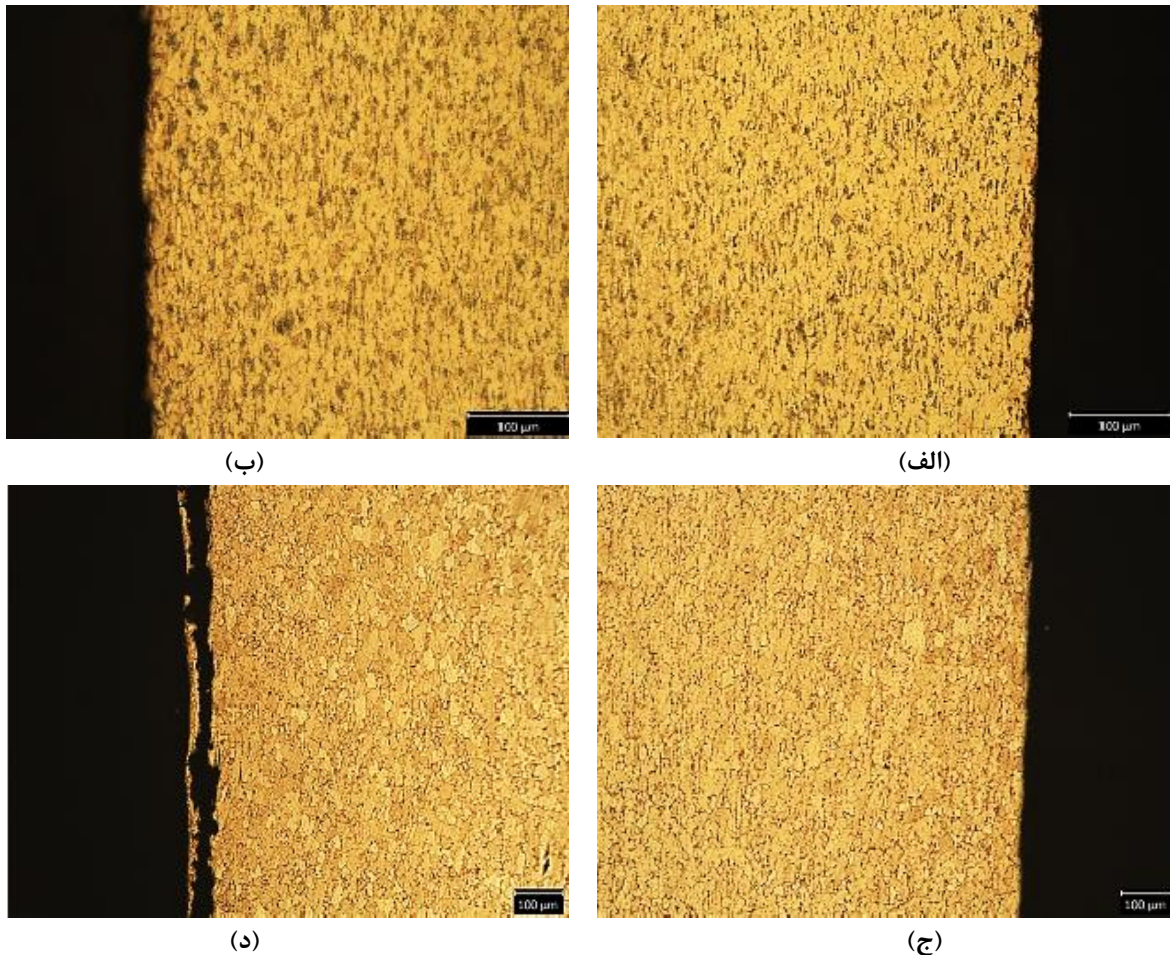
دکرپورگی به از دست رفتن اتم‌های کربن از سطح قطعه اطلاق می‌شود که در نتیجه آن سطح قطعه، میزان کربن کمتری نسبت به لایه زیرین آن خواهد داشت. این پدیده در کوپن‌های خوردگی به عنوان یک نقطه ضعف تلقی شده و یکی از عواملی است که منجر به خوردگی غیر یکنواخت آن‌ها و در نتیجه دریافت اطلاعات نادرست خواهد شد. بنابراین کوپن‌های خوردگی باید عاری از دکرپورگی بوده و سطح مقطع کوپن‌ها پیش از انجام آزمون‌های خوردگی از این منظر مورد بررسی قرار گیرد. نتایج سختی سنجی کوپن‌های خوردگی از نزدیکترین نقطه به سطح تا عمق ۱۵۰۰ میکرون در جدول ۳ ارائه شده است. بررسی اعداد حاصل نشان می‌دهد که سختی کوپن‌ها از سطح تا عمق یکسان بوده و تغییری چندانی نداشته است.

جدول ۳. نتایج سختی سنجی کوپن‌ها

سختی (HRC)				موقعیت سختی سنجی
ASTM A106 Gr. B	API 5L Gr. X52	AISI 1010	AISI 1010	
۱۴	۱۵	۱۳	۱۱	نزدیکترین نقطه به سطح
۱۴	۱۴	۱۲	۱۱	عمق ۳۰۰ میکرون
۱۳	۱۵	۱۲	۱۱	عمق ۶۰۰ میکرون
۱۵	۱۵	۱۳	۱۱	عمق ۹۰۰ میکرون
۱۴	۱۵	۱۲	۱۱	عمق ۱۲۰۰ میکرون
۱۵	۱۴	۱۲	۱۲	عمق ۱۵۰۰ میکرون

1. Saturated Calomel Electrode
2. Decarbonization

تصاویر میکروسکوپی سطح مقطع کوپن‌های خوردگی در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود هیچ گونه آثاری از دکرבורگی در سطح مقطع نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود. تطابق این تصاویر و اعداد حاصل از سختی‌سنجی، عدم وجود دکربورگی در مقطع کوپن‌های خوردگی را تأیید می‌نماید.



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپی سطح مقطع کوپن‌ها؛ کوپن AISI 1010 (بزرگنمایی 200X)، کوپن AISI 1018 (بزرگنمایی 200X)، کوپن API 5L Gr. X52 (بزرگنمایی 100X) و کوپن ASTM A106 Gr. B (بزرگنمایی 100X)

نتایج حاصل از آزمون خوردگی غوطه‌وری و نرخ متوسط خوردگی کوپن‌ها که با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده است، در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. نتایج آزمون خوردگی غوطه‌وری کوپن‌ها

نرخ خوردگی (mpy)	دانسیتته D (g/cm ³)	زمان غوطه‌وری T (h)	مساحت سطح اولیه A (cm ²)	جرم از دست رفته W ₁ -W ₂ (gr)	جرم ثانویه W ₂ (gr)	جرم اولیه W ₁ (gr)	ثابت K	نوع کوپن
۲,۸۵	۷,۸۶	۶۷۲	۶,۴۵	۰,۰۲۸۱	۴,۵۳۹۴	۴,۵۶۷۵	۳۴۵۰۰۰۰	AISI 1010
۲,۱۵	۷,۸۶	۶۷۲	۶,۴۵	۰,۰۲۱۲	۴,۶۶۲۹	۴,۶۸۴۱	۳۴۵۰۰۰۰	AISI 1018
۲,۰۸	۷,۸۶	۶۷۲	۶,۴۵	۰,۰۲۰۵	۴,۷۶۷۷	۴,۷۸۸۲	۳۴۵۰۰۰۰	API 5L Gr. X52
۱,۹۱	۷,۸۶	۶۷۲	۶,۴۵	۰,۰۱۸۹	۴,۶۳۸۸	۴,۶۵۷۷	۳۴۵۰۰۰۰	ASTM A106 Gr. B

بررسی اعداد حاصل نشان می‌دهد که بیشترین خوردگی مربوط به فولاد AISI 1010 به میزان ۲,۸۵ mpy و کمترین مقدار خوردگی مرتبط با فولاد ASTM A106 Gr. B به مقدار ۱,۹۱ mpy است که این اختلاف می‌تواند به دلیل ترکیب شیمیایی و تغییر عناصر کربن و منگنز در ترکیب شیمیایی این کوپن‌ها باشد.

افزایش مقاومت به خوردگی در کوپن‌های API 5L Gr. X52 و ASTM A106 Gr. B نسبت به کوپن‌های AISI 1010 و AISI 1018 می‌تواند به میزان بالای منگنز آن‌ها (به ترتیب ۱,۳۵ و ۰,۹۴) نسبت به کوپن‌های AISI 1010 و AISI 1018 (به ترتیب ۰,۶۰ و ۰,۹۴) نسبت داده شود. با افزایش منگنز مقاومت به خوردگی افزایش یافته و این موضوع می‌تواند به این علت باشد که فولادهای با منگنز بالاتر دارای خواص مکانیکی مفید هستند و همچنین منگنز با گوگرد واکنش داده و سولفید منگنز را تشکیل می‌دهد. مورفولوژی و ترکیب این سولفیدها می‌تواند اثرات قابل توجهی بر مقاومت در برابر خوردگی، به ویژه مقاومت در برابر خوردگی حفره‌ای داشته باشد [۱۹].

از طرفی دیگر کلیری و گرین^۱ گزارش نموده است که کاهش عناصر کربن و منگنز در فولادهای لوله کم آلیاژ می‌تواند مقاومت در برابر ترک خوردگی ناشی از هیدروژن^۲ (HIC) را افزایش داده و افزایش منگنز بالاتر از ۱,۲ درصد وزنی منجر به افزایش سرعت خوردگی می‌شود [۲۰]. این موضوع با افزایش میزان خوردگی فولاد API 5L Gr. X52 نسبت به فولاد ASTM A106 Gr. B که میزان کربن کمتر (۰,۱۷ در مقایسه با ۰,۲۹) و مقدار منگنز بیشتر (۱,۳۵ در مقایسه با ۰,۹۴) دارد تطابق دارد. کربن معادل نمونه‌ها براساس استاندارد API 5L و از رابطه (۲) محاسبه شده و نتایج در جدول ۵ ارائه شده است.

$$CE_{IIW} = C + [Mn/6] + [(Cr + Mo + V)/5] + [(Ni + Cu)/15] \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن CE_{IIW} کربن معادل، Mn عنصر منگنز (wt%)، Cr عنصر کروم (wt%)، Mo عنصر مولیبدن (wt%)، V عنصر وانادیم (wt%)، Ni عنصر نیکل (wt%) و Cu عنصر مس (wt%) می‌باشد [۲۱].

جدول ۵. کربن معادل کوپن‌ها

نوع کوپن	کربن معادل
AISI 1010	۰,۲۳۸
AISI 1018	۰,۳۳۵
API 5L Gr. X52	۰,۴۰۹
ASTM A106 Gr. B	۰,۴۵۹

همانطور که از نتایج جدول ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش میزان کربن معادل در کوپن‌ها، مقاومت به خوردگی افزایش می‌یابد یعنی با افزایش مقدار کربن معادل از ۰,۲۳۸ در فولاد AISI 1010 تا ۰,۴۵۹ در فولاد ASTM A106 Gr. B سرعت خوردگی از ۲,۸۵ به ۱,۹۱ کاهش می‌یابد.

از طرفی دیگر نتایج حاصل از پژوهش پلشیوتسه^۳ و همکارانش نشان داد که افزایش مقدار عنصر کربن در فولاد با فرض ثابت بودن سایر عناصر، باعث کاهش مقاومت در برابر خوردگی می‌شود [۲۲]. نتایج حاصل از این تحقیق در ظاهر با نتایج پژوهش حاضر متفاوت بوده ولی با بررسی دقیق‌تر می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر کربن و منگنز بایستی همزمان بررسی شده و همان طور که مشاهده شده است با افزایش میزان کربن معادل مقاومت به خوردگی افزایش می‌یابد.

1. H. J. Cleary and N. D. Greene
2. Hydrogen Induced Cracking
3. V. G. Pleshivtsev

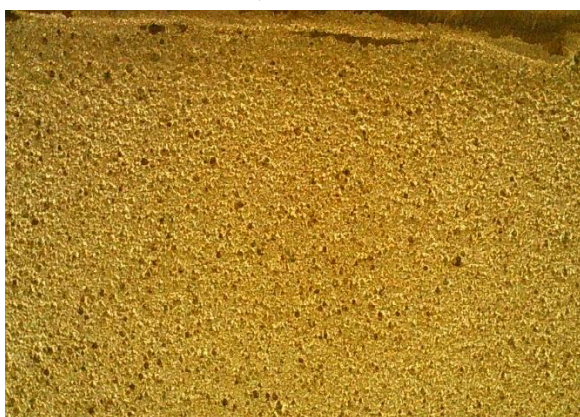
تصاویر میکروسکوپ استریو سطح کوپن‌های خوردگی پس از آزمون خوردگی غوطه‌وری در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که به نظر می‌رسد خوردگی در سطح کلیه کوپن‌ها به صورت یکنواخت همراه با حفراتی محدود رخ داده است. بررسی بیشتر کوپن‌ها مؤید کاهش میزان خوردگی کوپن‌ها به ترتیب از AISI 1010، AISI 1018، API 5L Gr. X52 تا ASTM A106 Gr. B است.



(ب)



(الف)



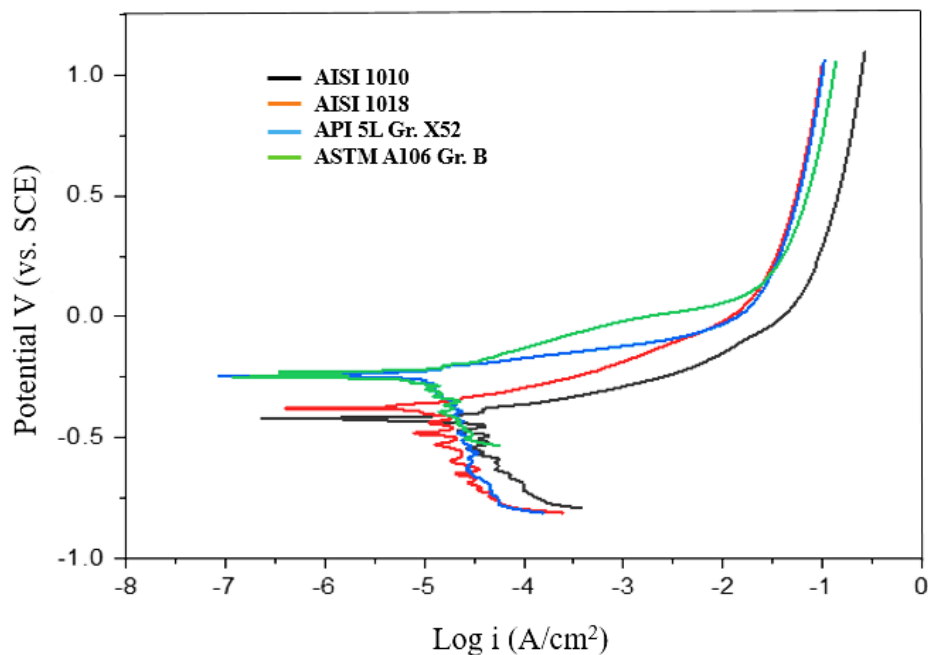
(د)



(ج)

شکل ۳. تصاویر استریو سطح کوپن‌ها پس از آزمون خوردگی غوطه‌وری؛ کوپن AISI 1010 (بزرگنمایی 10X)، کوپن AISI 1018 (بزرگنمایی 10X)، کوپن API 5L Gr. X52 (بزرگنمایی 10X) و کوپن ASTM A106 Gr. B (بزرگنمایی 10X)

منحنی‌های پلاریزاسیون حاصل از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک کوپن‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود هر چهار فولاد AISI 1010، AISI 1018، API 5L Gr. X52 و ASTM A106 Gr. B رفتار خوردگی فعال را از خود نشان داده و منحنی‌های پلاریزاسیون نمونه‌ها به ترتیب از AISI 1010، AISI 1018، API 5L Gr. X52 تا ASTM A106 Gr. B به سمت بالا (پتانسیل خوردگی نجیب‌تر) و چپ (دانسیته جریان خوردگی کوچک‌تر) حرکت می‌کنند. پارامترهای خوردگی شامل شیب‌های تافل آندی و کاتدی (β_c و β_a)، پتانسیل خوردگی و دانسیته جریان خوردگی نمونه‌ها، با استفاده روش برون‌یابی تافل و توسط نرم افزار Corrvue محاسبه شده و نتایج در جدول ۶ آورده شده است.



شکل ۴. منحنی‌های پلاریزاسیون کوپن‌ها

جدول ۶. شیب‌های تافل آنودی و کاتدی (β_c و β_a)، پتانسیل خوردگی و دانسیته جریان خوردگی حاصل از برون‌یابی تافل منحنی‌های پلاریزاسیون کوپن‌ها

سرعت خوردگی CR (mpy)	دانسیته جریان خوردگی $i_{Corr.}$ (A/cm^2)	پتانسیل خوردگی $E_{Corr.}$ (V)	شیب تافل آنودی $-\beta_c$ (mV/dec)	شیب تافل آنودی β_a (mV/dec)	نوع کوپن
۷,۰۵	$۱,۵۴ \times ۱۰^{-۵}$	-۰,۴۲	۳۴۱,۱۵	۶۳,۳۳	AISI 1010
۶,۲۶	$۱,۳۷ \times ۱۰^{-۵}$	-۰,۳۸	۱۰۷۶,۶۰	۹۵,۱۲	AISI 1018
۴,۹۹	$۱,۰۹ \times ۱۰^{-۵}$	-۰,۲۵	۶۰۳,۰۷	۷۷,۰۴	API 5L Gr. X52
۳,۳۸	$۷,۳۹ \times ۱۰^{-۶}$	-۰,۲۶	۳۰۵,۳۴	۱۱۹,۶۴	ASTM A106 Gr. B

تغییر شیب ناحیه فعال در منحنی‌های پلاریزاسیون به این دلیل است که در مراحل اولیه خوردگی، وجود یون کلر در سطح فولاد کربنی می‌تواند به راحتی فیلم محصول خوردگی در حال تشکیل را از بین برده و تولید یون Fe^{2+} را تسریع و در نتیجه خوردگی را افزایش دهد. با این حال، در مراحل بعدی خوردگی، بایوفیلیم‌ها می‌توانند تأثیر فزاینده‌ای بر خوردگی دارند به گونه‌ای که غلظت بالای یون کلر رشد بایوفیلیم را تسریع و لایه محصول خوردگی را متراکم می‌کند که متعاقباً واکنش‌های آنودی را کند و در نتیجه سرعت خوردگی را کاهش می‌دهد [۲۳].

به طور کلی علت کاهش سرعت خوردگی با افزایش دوره در معرض قرارگیری می‌تواند ناشی از سرعت آهسته واکنش الکتروشیمیایی ناشی از تشکیل غشا یا لایه‌هایی از بقایای خوردگی روی سطح فولاد کربنی باشد که تداوم خوردگی الکتروشیمیایی و در نتیجه نرخ خوردگی را کاهش می‌دهد. همچنین این موضوع می‌تواند به دلیل کاهش اکسیژن محلول در محیط خورنده باشد که در ابتدای آزمون خوردگی، واکنش الکتروشیمیایی به سرعت رخ داده و در نتیجه نرخ خوردگی بالا اتفاق می‌افتد. اما با گذشت زمان اکسیژن محلول کاهش یافته و غلظت یون‌های هیدروژن تجمع یافته در آند افزایش می‌یابد، در نتیجه واکنش‌های خوردگی کاهش می‌یابد [۲۴]. بررسی منحنی‌های پلاریزاسیون در شکل ۴ و نتایج حاصل از آن در جدول ۶ نشان می‌دهد که فولاد ASTM A106 Gr. B با جریان خوردگی $۷,۳۹ \times ۱۰^{-۶}$ کمترین میزان خوردگی و فولاد AISI 1010 با جریان خوردگی $۱,۵۴ \times ۱۰^{-۵}$ بیشترین مقدار خوردگی را دارد.

نرخ خوردگی کمتر فولاد ASTM A106 Gr. B را می‌توان به میزان کربن معادل بالاتر و مقدار منگنز بهینه نسبت به سایر کوپن‌های دیگر نسبت داد [۱۸ و ۱۹]. نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون با نتایج حاصل از آزمون خوردگی غوطه‌وری در تطابق کامل بوده به گونه‌ای که بیشترین میزان خوردگی مربوط به کوپن AISI 1010 و کمترین مقدار خوردگی مرتبط با کوپن ASTM A106 Gr. B است.

نتیجه‌گیری

از مجموع مطالعات و آزمون‌های انجام شده، می‌توان نتایج زیر را به صورت خلاصه استنتاج نمود:

(۱) رفتار خوردگی چهار کوپن AISI 1018، AISI 1010، API 5L Gr. X52 و ASTM A106 Gr. B در محلول 3.5% NACl نشان داد که مقاومت در برابر خوردگی کوپن‌ها به ترتیب از AISI 1018، AISI 1010، API 5L Gr. X52 تا ASTM A106 Gr. B افزایش یافته که این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش میزان کربن معادل و مقدار بهینه منگنز باشد.

(۲) خوردگی چهار کوپن از نوع یکنواخت همراه با حفراتی محدود بود.

(۳) رفتار خوردگی چهار کوپن مذکور مشابه و سرعت خوردگی آن‌ها نزدیک به هم بوده بنابراین در صنایع نفت و گاز و در شرایط سازه‌ای و محیطی یکسان می‌توانند با تقریب قابل قبولی بجای یکدیگر مورد استفاده قرار گیرند. بدیهی است که به کارگیری کوپن AISI 1010 می‌تواند ریسک خوردگی را در صنعت به دلیل فراتر نشان دادن میزان خوردگی نسبت به واقعیت و بالتبع آن افزایش اعمال تمهیدات حفاظت از خوردگی توسط واحد بهره‌بردار، کاهش دهد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از کلیه همکاران واحد پایش و کنترل خوردگی و آزمایشگاه خوردگی شرکت برنا الکترونیک که ما را در تهیه کوپن‌ها، انجام آزمون‌ها و تدوین این مقاله یاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

- [1] A. Groysman, Corrosion problems and solutions in oil, gas, refining and petrochemical industry, Korozje a ochrana materiálu. VoL 61(3) 100-117, 2017.
- [2] Z. Wang, Z. Zhou, W. Xu, et al, Study on inner corrosion behavior of high strength product oil pipelines, Engineering Failure Analysis, 2020.
- [3] S. Paul, A. Pattanayak, S. K. Guchhait, Corrosion Behavior of Carbon Steel in Synthetically Produced Oil Field Seawater, International Journal of Metals, Volume 2014, Article ID 628505, 11 pages.
- [4] S. H. Ali Pirzada, Corrosion in Oil and Gas Industries: A Review, National University of Sciences and Technology. 22 November 2022.
- [5] L. T. Popoola, A. S. Grema, G. K. Latinvo, et al, Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation, International Journal of Industrial Chemistry, 2013
- [6] S. M. Goh, L. T. Tan, H. Y. Gan, et al, Monitoring of Atmospheric Corrosion in a Mass Rapid Transit (MRT) Tunnel, Urban Rail Transit (2022) 8(3-4):184-197.
- [7] Mars G. Fontana, Corrosion Engineering, 3th Ed., Mac Graw-Hill Companies Pub., 1987.
- [8] Z. Lu, Discussions of General Methods for Measurement and Monitoring of Corrosion in the Oil & Gas Industry, Advances in Petroleum Exploration and Development, Vol. 10, No. 2, 2015, pp. 111-116.
- [9] Y. T. Al-Janabi, An Over view of Corrosion in Oil and Gas Industry: Upstream, Midstream, and Downstream Sectors, Research and Development Center, Saudi Aramco, Dhahran, 31311, Saudi Arabia. Published 2020 by Wiley.
- [10] RCSL TN 010296, Technical Note and General Guide for Corrosion Coupons, Rose Corrosion Services Limited 1 the Galloway Center Hambridge Lane Newbury RG14 5TL Berkshire United Kingdom.
- [11] M. H. Sliem, E. M. Fayyad, A. M. Abdullah, et al, Monitoring of under deposit corrosion for the oil and gas industry: A review, Journal of Petroleum Science and Engineering 204 (2021) 108752.



انجمن خوردگی ایران
و دین کنکره بین المللی
خوردگی

خوردگی
دین کنکره
بین المللی
دین کنکره
۲۰ و ۲۱ شهریور ۱۴۰۳

- [12] M. Raunio, Properties and Monitoring of Precipitates and Related Corrosion, Research Report VTT-R-02118-15.
- [13] ASTM G1, Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens, 2017.
- [14] NACE SP0775, Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Hydrocarbon Operations, Association for Materials Protection and Performance (AMPP), 2023.
- [15] M. S. Bhargava Reddy, D. Ponnamma, K. K. Sadasivuni, S. Aich, et al, Sensors in advancing the capabilities of corrosion detection: A review, Sensors and Actuators: A. Physical 332 (2021) 113086.
- [16] F. García-Ávila, G. B. Barba, S. D. Moscoso, et al, Dataset of copper pipes corrosion after exposure to chlorine, Data in Brief 19 (2018) 170–178.
- [17] D. Musik, K. Wojcik, M. Sekuła-Wybanska, et al, Analysis of the Corrosion Process with the Application of the Novel Type of Coupon Installation, Processes, 2022, 10, 2468.
- [18] H. Moller, The corrosion behaviour of a low carbon steel in natural and synthetic seawaters, The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, Volume 106 August 2006.
- [19] ASM Hand Book, 2005 ASM International, Volume 13B, Corrosion: Materials.
- [20] H. J. Cleary, N. D. Greene, Corrosion Properties of Iron and Steel, Corrosion Science. 1967. Vol. 7, pp. 821 to 831. Pergamnn Press Ltd. Printed in Great Britain.
- [21] API Specification 5L, Line Pipe, Forty-Sixth Edition, April 2018.
- [22] V. G. Pleshivtsev, G. A. Filippov, Effect of Carbon Content and Stressed State on the Corrosion Rate of Pipe Steel in Heating Systems, Metallurgist, Vol. 53, Nos. 7–8, 2009.
- [23] P. Xu, M. Zhao, et al, Effect of chloride ions on the corrosion behavior of carbon steel in an iron bacteria system, RSC advances, Issue 24, 2022, 15158–15166.
- [24] A. A. Muhammad, A. D. Thamir, et al, Corrosion of Carbon Steel and alloy Steel: effect of humidity and hydrochloric acid, Materials Science and Engineering 1173 (2021) 012061.



Investigation of the Corrosion Behavior of Common Corrosion Coupons in the Oil and Gas Industries in 3.5% NaCl Solution

Ali Amirabdollahian*, Mohsen Nasri, Nasim Kojouri, Mehran Jafari
Borna Electronics Co.

*Email: a.amirabdollahian@borna-co.com

Abstract

The aim of the present study is to investigate and compare the corrosion behavior between common corrosion coupons in the oil and gas industries in order to corrosion monitoring. For this purpose, four carbon steel corrosion coupons include AISI 1010, AISI 1018, API 5L GR X52 and ASTM A106 GR. B were selected and Cross sectional hardness test, immersion corrosion (weight loss) and Potentiodynamic polarization in 3.5% NaCl solution were performed as well as cross-section and surface microscopic examination. The results showed that the corrosion type of the coupons was uniform with limited cavities and the highest corrosion rate is for the AISI 1010 coupon and the lowest corrosion rate associated with the ASTM A106 GR.B coupon that these figures can be due to the change in the amount of carbon and manganese elements and consequently the effect of coupons corrosion behavior.

Keywords

Oil and Gas Industries, Corrosion, Corrosion Monitoring, Corrosion Coupons.