

علمی-تخصصی

ارائه راهکارهای کاهش توقفات ناشی از خوردگی و سایش در کارخانه فراوری فسفات اسفوردی

مرتضی فردوسی هرق^{۱*}، مسعود بقایی نیا^۱

^۱موسسه معدن

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰)

چکیده

در این پژوهش به منظور ممانعت از ایجاد صدمات ناشی از خوردگی و سایش در تجهیزات فلزی کارخانه فراوری فسفات اسفوردی به ارائه و ارزیابی راهکارهای مناسب کاهش نرخ خوردگی و سایش پرداخته شده است. به منظور ممانعت از خوردگی ایجاد شده در زیر کف مخازن ذخیره از بازدارنده‌های فاز بخار (VCI) و جهت جلوگیری از ایجاد خوردگی داخلی در خطوط لوله از بازدارنده‌های خوردگی فاز مایع استفاده شده است. جهت ارزیابی بازدارنده VCI از استاندارد NACE TM0208 و به منظور ارزیابی بازدارنده فاز مایع از آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک (PDP) و آزمون امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) استفاده شد. نتایج آزمون‌های PDP و EIS نشان‌دهنده کاهش نرخ خوردگی تا مقدار ۹۳٪ بود. این در حالی بود که نتایج ارزیابی بازدارنده VCI نشان داد که نرخ خوردگی در حضور بازدارنده VCI به صورت کامل متوقف شده است. جهت جلوگیری از سایش نمونه‌ها، پوشش سوپرآلیاژ IN625 بر روی زمینه فولاد ساده کربنی که در کارخانه اسفوردی استفاده شده است، اعمال شد. جهت بررسی رفتار سایشی پوشش اعمال شده از آزمون سایش پین روی دیسک استفاده شد. نتایج آزمون پین روی دیسک نشان داد که در صورت اعمال پوشش، ضریب اصطکاک نمونه‌ها از مقدار ۰/۷ به مقدار ۰/۱ کاهش پیدا می‌کند که منجر به بهبود خاص سایشی نمونه‌ها است. به منظور بررسی خواص مکانیکی پوشش اعمال شده از آزمون سختی سنجی استفاده شد. نتایج آزمون سختی نشان داد که سختی نمونه‌ها با اعمال پوشش از مقدار ۱۰۰ ویکرز به مقدار ۳۴۰ ویکرز افزایش پیدا کرده است.

کلید واژه‌ها: خوردگی، سایش، آلیاژ، پلاریزاسیون، امپدانس

۱. مقدمه

برای کارخانه‌هایی که مواد غالب استفاده شده فولادهای ساده کربنی است، جایگزین کردن مواد مهندسی جدید مقرون به صرفه نبوده و قابل اجرا نمی‌باشد. با این حال روش‌های فراوانی به منظور بهبود مقاومت به خوردگی و مقاومت به سایش فولادهای ساده کربنی مورد استفاده قرار می‌گیرد که از این میان می‌توان به استفاده از سیستم‌های حفاظت کاتدی [۲]، بازدارنده‌های خوردگی [۳]، اعمال پوشش‌های فلزی مانند کلدینگ سطح با مواد مهندسی مقاوم‌تر [۴] اشاره نمود.

در سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان به فلز مورد حفاظت که در معرض الکترولیت خورنده مانند آب یا خاک قرار گرفته است، ابری از الکترون‌های تزریق شده از سوی منبع تزریق جریان بر روی نمونه تشکیل می‌شوند که این الکترون‌ها از نقل و انتقال الکترون از روی نمونه و تشکیل کاتیون فلز (مثلاً

باتوجه به پیشرفت‌های روزافزون صنعت امروزی و نقش انکارنشده فلزات در صنایع، بحث حفاظت از فلزات در برابر تخریب‌های محتمل حائز اهمیت است. باتوجه به این موضوع که عموماً مواد مورد استفاده در صنعت استخراج و معادن از خانواده فولادهای ساده کربنی بوده و عموماً این دسته از مواد مهندسی دارای مقاومت به خوردگی مطلوبی در محیط‌های شامل آب یا رطوبت نیستند، لذا بحث ممانعت از خوردگی این مواد توسط هر فرایندی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اخیراً با افزودن برخی عناصر آلیاژی مانند کروم، نیکل و مس در ترکیب شیمیایی فولادهای ساده کربنی و تولید فولادهای کم آلیاژ (Low Alloy Steel) مقاومت به خوردگی این دسته از مواد مهندسی را بهبود داده‌اند [۱]. شایان ذکر است که استفاده از آلیاژهای LAS زمانی مقدور است که مجموعه مورد نظر در مرحله ساخت باشد. لذا

۲. روش تحقیق

این تحقیق در دو قسمت اصلی انجام شده است:

- ۱- معرفی و ارزیابی بازدارنده خوردگی فاز بخار و فاز مایع
- ۲- اعمال پوشش توسط فرایند کلدینگ بر روی آلیاژ مورد استفاده در پوسته آسیابها

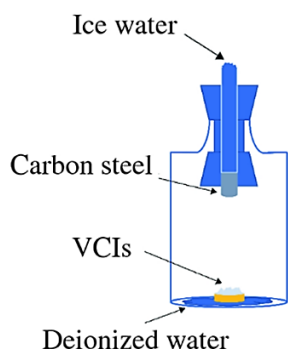
باتوجه به این موضوع که تمام مواد مورد استفاده در تجهیزات کارخانه از نوع کربن استیل بودند، لذا در این پژوهش نیز از فولاد ساده کربنی st37 با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ استفاده شد.

جدول (۱). ترکیب شیمیایی فولاد st37

عنصر	FE	C	MN	SI	S
% WT.	Balance	0.18	0.32	0.33	0.05

جهت جلوگیری از خوردگی داخلی خطوط لوله از بازدارنده ساخت کشور ایران با نام تجاری SCI-600 استفاده شد. به منظور ارزیابی عملکرد این بازدارنده از آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک (PDP) و آزمون امیدانس الکتروشیمیایی (EIS) استفاده شد. دستگاه مورد استفاده جهت انجام این ارزیابی‌ها دستگاه پتانسیوستات Origa Flex مدل OGF 500 ساخت کشور فرانسه و الکترومد مرجع مورد استفاده SCE بود. پتانسیل آزمون با نرخ روبش ۰/۵ میلی‌ولت بر ثانیه به اندازه ± 300 میلی‌ولت نسبت به پتانسیل مدار باز نمونه‌ها اعمال شد. دامنه انجام آزمون EIS ۱۰ میلی‌ولت بود.

به منظور ممانعت از خوردگی کف مخازن ذخیره در کارخانه، از بازدارنده فاز بخار (VCI) ساخت کشور ایران با نام تجاری VCI-6000 استفاده شد. جهت ارزیابی عملکرد این بازدارنده از استاندارد NACE TM0208 استفاده شد. شماتیک تجهیز ساخته شده برای انجام ارزیابی بازدارنده فاز بخار در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل (۱). شماتیک تجهیز مورد استفاده جهت ارزیابی عملکرد بازدارنده فاز بخار

Fe^{2+} و انجام واکنش خوردگی جلوگیری می‌کنند [۵].

در بحث تزریق بازدارنده‌ها، با اعمال یک ترکیب شیمیایی به درون الکترولیت خورنده، ترکیب وارد شده با افزایش انرژی اکتیواسیون انجام خوردگی، تشکیل فیلم محافظ بر روی سطح فلز، ممانعت از تصعید هیدروژن و ... منجر به کاهش و یا توقف نرخ خوردگی در سیستم می‌گردد. بازدارنده‌های خوردگی منجر به تغییر ماهیت سیال نشده و فقط منجر به کاهش نرخ خوردگی سیستم می‌شوند [۶].

در سیستم‌های اعمال پوشش فلزی بر روی زمینه فلزی، با استفاده از فرایندهای جوشکاری مانند فرایند Tangestan Inert Gas (TIG) و یا سایر فرایندها مانند MIG، یک‌لایه از خانواده سوپرآلیاژهای پایه نیکل، پایه کبالت، فولادهای زنگ‌زن و ... بر روی بستر فولاد ساده کربنی اعمال می‌گردد. در این شرایط ماده درگیر با محیط خورنده و یا محیط ساینده، سوپرآلیاژ اعمال شده می‌باشد که دارای رفتار خوردگی نجیب‌تر و رفتار تریبولوژیکی مطلوب‌تری است. در نهایت با اعمال چنین پوشش‌هایی نرخ خوردگی و سایش قطعات به صورت چشمگیری کاهش پیدا می‌کند [۷].

در اغلب کاربردهای مهندسی، پوشش‌هایی نیاز است که قادر باشد ترکیبی از خواص الکتروشیمیایی (مقاومت به خوردگی) و تریبولوژیکی (مقاومت به سایش) را ارائه نماید. پوشش‌های پایه نیکل خالص و یا کامپوزیتی به علت دارا بودن ترکیبی از خواص مهندسی، مانند خواص مکانیکی (سختی بالا) خواص تریبولوژیکی (مقاوم به سایش) و خواص الکتروشیمیایی (مقاوم به خوردگی) انتخاب مناسبی جهت کاربرد در شرایط خطرناک مانند شرایط خورنده و سایشی می‌باشند [۸-۱۰]. ساختار کریستالی این مواد ساختار مکعبی مرکز دار می‌باشد [۱۰]. برخلاف دیگر پوشش‌ها، این آلیاژها به دلیل ترکیبی از خواص فوق، قابلیت استفاده در محدوده وسیعی از دماها و شرایط کاری از دید خوردگی و سایشی را دارند لذا این موضوع استفاده از این پوشش‌ها را در محیط‌های خطرناک را ترغیب می‌کند [۱۱]. مشخص شده است که امروزه به جهت بهبود خواص سایشی و خوردگی قطعات چدنی و فولادی به صورت گسترده‌ای از این دسته از پوشش‌ها استفاده می‌شود [۱۲].

در پژوهش حاضر هدف ارائه راهکارها و انجام ارزیابی‌هایی در خصوص بهبود رفتار الکتروشیمیایی و تریبولوژیکی تجهیزات و خطوط لوله کارخانه فراوری فسفات اسفوردی است. در این پژوهش به منظور ممانعت از سایش و خوردگی آسیاب‌های کارخانه، خطوط لوله، مخازن ذخیره و سایر تجهیزات راهکارهای قابل اجرا، ارائه و ارزیابی شدند.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. ارزیابی بازدارنده فاز بخار

به منظور جلوگیری از خوردگی خارجی این مخازن اعمال رنگ بهترین گزینه پیشگیری از پیشرفت خوردگی است. اما برای کف مخازن که در ارتباط با خاک و یا فونداسیون بتنی می باشد راهکار دیگری نیز وجود دارد.

مخازن ذخیره زمانی که پر و یا خالی می شوند کف آن ها دچار تغییر فرم می شود. شکل ۳ تغییر شکل کف مخزن را نشان می دهد. بالا آمدن کف مخزن خالی از دو جهت برای مخزن مضر می باشد: ۱- حضور بخارات و فازهای کندانس خورنده میان کف مخزن و خاک زیر آن

۲- هر فلزی که ارتباط آن با خاک قطع شود، اگر با سیستم حفاظت کاتدی حفاظت می شد دیگر حفاظت نخواهد شد. چون اساس عملکردی سیستم حفاظت کاتدی وجود الکترولیت میان فلز حفاظت شده (کاتد) و اند می باشد. الکترولیت سیستم حفاظت کاتدی، خاک می باشد. حال اگر کف مخزن از خاک جدا شود قسمت هایی که از خاک جدا شده اند قابل حفاظت با سیستم حفاظت کاتدی نخواهند بود.

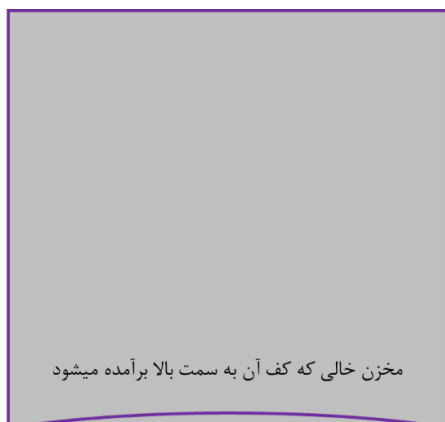
در این دو حالت بهترین روش ممانعت از خوردگی کف مخزن به این شکل، استفاده از پوشش مناسب رنگ و بازدارنده های فاز بخار می باشد. بازدارنده های فاز بخار آن دسته از موادی می باشند که فشار بخار بالایی دارند و مستقیماً از فاز جامد به فاز بخار تبدیل می شوند. این دسته از بازدارنده ها مستقیم تصعید می شوند. بخار این بازدارنده ها با تشکیل یک فیلم محافظ بر سطح فلز از هجوم یون های مهاجم ممانعت کرده و منجر به کاهش نرخ خوردگی نمونه می شوند [۱۴].

در این تست نمونه در یک محفظه قرار می گیرد که داخل این محفظه آب وجود دارد و بازدارنده فاز بخار نیز با استفاده از یک ظرف روی آب شناور است. ابتدا تجهیزات به شکل ۱ که نصب شدند به مدت یک ساعت رها می شوند. هدف از این یک ساعت بخار شدن بازدارنده فاز بخار و تشکیل فیلم محافظ بر روی نمونه است. سپس کل تجهیز انجام تست داخل یک ظرف با آب داغ قرار می گیرد تا آب موجود در داخل محفظه بخار شود. حال به منظور کندانس آب بخار شده بر روی نمونه و ایجاد یون های مهاجم بر روی نمونه از قسمت فوقانی نمونه به داخل لوله مخلوط آب و یخ ریخته می شود. در این حالت بخار موجود در داخل محفظه بر روی نمونه کندانس می گردد. حال اگر بازدارنده و فیلم تشکیل شده از آن مقاومت مناسبی در برابر خوردگی داشته باشند، فاز کندانس ایجاد شده بر روی نمونه قادر به ایجاد خوردگی نخواهد بود.

شکل ۲ تجهیزات آماده شده برای تست را نشان می دهد. لازم به ذکر است که نمونه کربن استیل مورد استفاده قبل از قرارگیری در شرایط آزمون باید با استفاده از فرایند سنباده زنی، تمام سطح آن صاف و خالی از هرگونه آلودگی باشد.

جهت اعمال پوشش فلزی بر روی فولاد ساده کربنی از فرایند کلدینگ TIG استفاده شد. گرید پوششش اعمالی سوپرالیاز IN625 بود. به منظور ارزیابی عملکرد این پوشش از آزمون سختی سنجی، سایش پین روی دیسک و آزمون خوردگی PDP استفاده شد. آزمون سختی سنجی با دستگاه سختی سنج ساخت شرکت BUHLER مدل MMT-7 صورت گرفت.

در نهایت به منظور بررسی تأثیر سیستم حفاظت کاتدی بر روی خوردگی فلز مورد استفاده، از الکترومد مرجع مس/سولفات مس و داده بردار ساخت شرکت MC Miller و جهت اعمال جریان از ترانس شرکت برنا الکتریک استفاده شد.



شکل (۳). تغییر شکل کف مخزن خالی

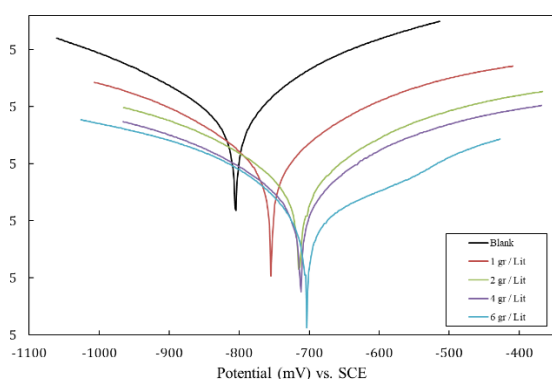


شکل (۲). تجهیزات آماده شده برای تست

در نهایت به منظور جلوگیری از خوردگی کف مخازن موجود در مجموعه اسفوردی می‌توان از این نوع بازدارنده استفاده نمود که در صورتی که کف مخزن از خاک بلند شده باشد به سهولت و با استفاده از این بازدارنده حفاظت شود. سیستم استفاده از این بازدارنده به این صورت خواهد بود که بازدارنده در وزن مشخصی در لایه میانی کف مخزن و خاک تزریق شده و از خوردگی آن ممانعت خواهد کرد.

۳-۲. ارزیابی بازدارنده فاز مایع

به منظور ممانعت از ایجاد خوردگی داخلی در خطوط لوله و تجهیزات درگیر با آب از اعمال بازدارنده فاز مایع استفاده شده است. در مرحله اول از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک (PDP) استفاده شد. شکل ۶ نتایج آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای غلظت‌های مختلف بازدارنده را نشان می‌دهد. جدول ۲ نیز نتایج کمی استخراج شده از این آزمون را نشان می‌دهد.



شکل (۶). نتایج آزمون PDP برای ارزیابی عملکرد بازدارنده در غلظت‌های مختلف

جدول (۲). نتایج آزمون PDP

%Eff	β_c	β_a	E_{Corr} (mV)	I_{Corr} (mA.cm ⁻²)	میزان بازدارنده (گرم بر لیتر)
-	-۹۶	۷۵	-۸۰۵	۶/۸	۰
۵۴	-۹۰	۷۰	-۷۵۵	۳/۱	۱
۷۲	-۹۲	۶۷	-۷۱۱	۱/۹	۲
۷۶	-۹۶	۷۳	-۷۱۳	۱/۶	۴
۸۴	-۹۵	۷۲	-۷۰۳	۱/۴	۶

باتوجه به نتایج ارائه شده از آزمون PDP مشخص است که نرخ خوردگی نمونه‌های مورد استفاده در غلظت‌های مختلف بازدارنده، با افزایش غلظت بازدارنده کاهش پیدا کرده است. به عبارتی حضور بازدارنده منجر به بهبود رفتار الکتروشیمیایی

به منظور ارزیابی تأثیر بازدارنده مورد استفاده (VCI - 600) از یک نمونه فاقد بازدارنده و یک نمونه شامل بازدارنده استفاده شد. پس از اعمال آب یخ و ایجاد فاز کندانس بر روی نمونه‌ها، باید نمونه‌ها به مدت ۳ روز رها شوند تا تمام واکنش‌های خوردگی که می‌تواند از فاز کندانس بر روی نمونه صورت پذیرد، انجام بگیرند. در نهایت پس از سه روز نمونه‌ها باز شدند که نتایج آن در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است.



شکل (۴). زنگ زدگی و خوردگی نمونه فاقد بازدارنده

باتوجه به نتایج این آزمون مشخص است که حضور بازدارنده در محفظه منجر به توقف انجام واکنش‌های خوردگی حاصل از فاز کندانس شده است. به عبارتی این نوع از بازدارنده با فشار بخار بالایی که دارد به سرعت تصعید شده و بر روی نمونه می‌نشیند. در نهایت با تشکیل یک فیلم محافظ از هجوم یون‌های خطرناکی که می‌توانست از طریق فاز کندانس به نمونه صدمه بزنند جلوگیری کرده است.



شکل (۵). عدم خوردگی نمونه شامل بازدارنده.

نمونه‌ها شده و باعث کاهش نرخ خوردگی آن‌ها شده است. از نتایج ارائه شده در جدول ۲ می‌توان اطلاعاتی در ارتباط با سینتیک واکنش‌های خوردگی، ترمودینامیک و مکانیزم‌های خوردگی استخراج نمود. باتوجه به ستون i_{corr} مشخص است که با حضور بازدارنده‌ها این پارامتر کاهش پیدا کرده است. این موضوع نشان‌دهنده این امر مهم است که سینتیک نقل و انتقال الکترون و خوردگی با حضور بازدارنده کاهش پیدا کرده است [۱۵].

با مطالعه ستون E_{corr} مشخص است که با حضور بازدارنده این ستون از مقادیر منفی‌تر به سمت مقادیر مثبت‌تر شیفت پیدا کرده است. این موضوع نشان‌دهنده این مهم می‌باشد که با حضور بازدارنده رفتار ترمودینامیکی انجام واکنش‌های خوردگی تغییر کرده و میل به انجام واکنش کاهش پیدا کرده است [۱۵].

در نهایت با مطالعه شیب‌های آندی و کاتدی مشخص است که با حضور بازدارنده اعداد این پارامترها کمتر از ۸۵ میلی‌ولت تغییر کرده‌اند که این موضوع نشان‌دهنده عدم تغییر مکانیزم واکنش‌های خوردگی در اثر حضور بازدارنده بود [۱۵].

در نهایت می‌توان گفت که حضور بازدارنده در شرایط فوق منجر به کاهش نرخ خوردگی نمونه کربن استیل در محیط مورد تست شده است که این موضوع می‌تواند خوردگی‌های داخلی موجود در خطوط لوله مجموعه اسفوردی را متوقف کند.

در مرحله دوم به منظور اطمینان از عملکرد بازدارنده مورد استفاده در این پژوهش، از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) استفاده شد. شکل ۷ و ۸ نتایج حاصل از این آزمون که به ترتیب نشان‌دهنده نمودار نایکوئیست و بد می‌باشد را نشان می‌دهد.

بیشتر نرخ خوردگی نمونه کمتر است. از طرفی مشاهده می‌شود که شکل کلی نیم حلقه‌های تشکیل شده در طی افزودن بازدارنده‌ها تغییری نداشته است. این موضوع نشان‌دهنده این مهم می‌باشد که در اثر حضور بازدارنده‌ها مکانیزم خوردگی تغییری نکرده است فقط سینتیک آن تغییر کرده است [۱۵]. این موضوع در نتایج آزمون PDP نیز تایید شد. در شکل ۷، علاوه بر از نمودار نایکوئیست مدار معادل موجود در این تست نیز قابل مشاهده است. این مدار به صورت فرقی در فصل مشترک میان نمونه و الکترولیت تشکیل می‌گردد. المان‌های موجود در این مدار تعیین کننده شکل نیم حلقه‌های نمودار نایکوئیست و به تبع آن نمودار بد هستند. باتوجه به کلیات خوردگی که نقل و انتقال الکترون می‌باشد، افزایش مقاومت‌های مسیر راه الکترون برای ممانعت از خوردگی بسیار مفید می‌باشد. به عبارتی در فرایند کاهش نرخ خوردگی هدف افزایش مقاومت‌های سر راه الکترون‌های انتقالی است که الکترون به سختی منتقل شده و در نهایت نرخ خوردگی کاهش پیدا کند. حال باتوجه به این مدار معادل مشخص است که دو عدد مقاومت R_s و R_{ct} در مدار معادل وجود دارند. مقاومت R_s مقاومت محلول بوده و غیر قابل تغییر می‌باشد. تنها مسیر تغییر این مقاومت تغییر سیال مورد آزمایش و یا سیالی است که در مجموعه در حال جریان است. این امر غیر ممکن بوده و سیال نمی‌تواند تغییر کند. مقاومت بعدی یا همان مقاومت R_{ct} مقاومتی است که در اثر حضور بازدارنده ایجاد شده است. حال با تغییر مقدار بازدارنده می‌توان مقدار این مقاومت را تغییر داد. باتوجه به جدول ۳ که از شبیه‌سازی مدار معادل آزمون در نرم افزار Z-View حاصل شده است، مشخص است که در اثر حضور بازدارنده مقاومت R_{ct} به صورت چشمگیری افزایش پیدا کرده است. لذا در اثر حضور این بازدارنده مقاومت مشخصی بر سر راه انتقال الکترون ایجاد شده و از نقل و انتقال آن جلوگیری می‌کند. از طرفی باتوجه به مدار و نتایج جدول ۳ مشخص است که یک المان خازنی نیز در مدار وجود دارد. باتوجه به خاصیت خازن که در صورت پر شدن جریان را قطع کرده و از انتقال الکترون جلوگیری می‌کند، حضور خازنی با ظرفیت کمتر در مدار معادل نشان‌دهنده کاهش نرخ خوردگی می‌باشد. چرا که خازنی با ظرفیت کمتری سریع‌تر پر شده و مدار را قطع می‌کند، پس یکی از مسیرهای انتقال الکترون بسته شده و نقل و انتقال آن کاهش پیدا می‌کند. در نهایت می‌توان گفت حضور خازنی با ظرفیت کمتر در مدار معادل نشان‌دهنده کاهش نرخ خوردگی است [۱۶]. باتوجه به نتایج جدول ۳ مشخص است که در اثر حضور بازدارنده در غلظت‌های بیشتر ظرفیت خازن کاهش پیدا کرده است. در نهایت در شکل ۸ نمودار بد نشان‌دهنده است که نشان‌دهنده افزایش مدول امپدانس در حضور بازدارنده می‌باشد که این موضوع خود نشان‌دهنده کاهش

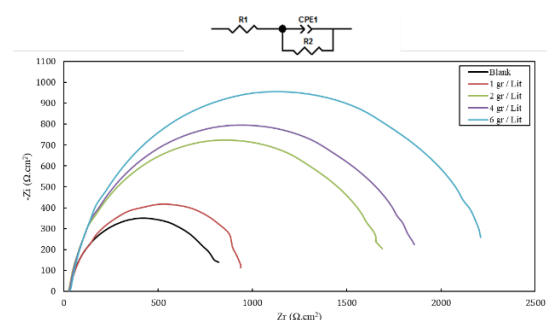
نمونه‌ها شده و باعث کاهش نرخ خوردگی آن‌ها شده است. از نتایج ارائه شده در جدول ۲ می‌توان اطلاعاتی در ارتباط با سینتیک واکنش‌های خوردگی، ترمودینامیک و مکانیزم‌های خوردگی استخراج نمود. باتوجه به ستون i_{corr} مشخص است که با حضور بازدارنده‌ها این پارامتر کاهش پیدا کرده است. این موضوع نشان‌دهنده این امر مهم است که سینتیک نقل و انتقال الکترون و خوردگی با حضور بازدارنده کاهش پیدا کرده است [۱۵].

با مطالعه ستون E_{corr} مشخص است که با حضور بازدارنده این ستون از مقادیر منفی‌تر به سمت مقادیر مثبت‌تر شیفت پیدا کرده است. این موضوع نشان‌دهنده این مهم می‌باشد که با حضور بازدارنده رفتار ترمودینامیکی انجام واکنش‌های خوردگی تغییر کرده و میل به انجام واکنش کاهش پیدا کرده است [۱۵].

در نهایت با مطالعه شیب‌های آندی و کاتدی مشخص است که با حضور بازدارنده اعداد این پارامترها کمتر از ۸۵ میلی‌ولت تغییر کرده‌اند که این موضوع نشان‌دهنده عدم تغییر مکانیزم واکنش‌های خوردگی در اثر حضور بازدارنده بود [۱۵].

در نهایت می‌توان گفت که حضور بازدارنده در شرایط فوق منجر به کاهش نرخ خوردگی نمونه کربن استیل در محیط مورد تست شده است که این موضوع می‌تواند خوردگی‌های داخلی موجود در خطوط لوله مجموعه اسفوردی را متوقف کند.

در مرحله دوم به منظور اطمینان از عملکرد بازدارنده مورد استفاده در این پژوهش، از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) استفاده شد. شکل ۷ و ۸ نتایج حاصل از این آزمون که به ترتیب نشان‌دهنده نمودار نایکوئیست و بد می‌باشد را نشان می‌دهد.



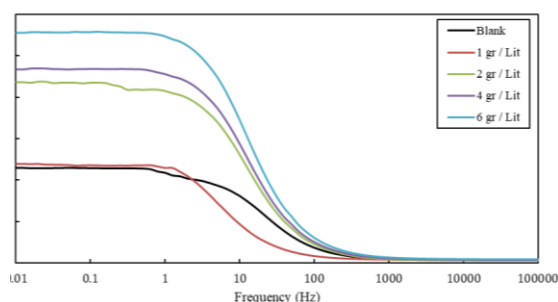
شکل (۷). نتایج آزمون EIS (نمودار نایکوئیست) و مدار معادل برای ارزیابی عملکرد بازدارنده در غلظت‌های مختلف.

باتوجه به شکل ۷ مشخص است که در حضور بازدارنده در غلظت‌های مختلف، نیم حلقه‌های تشکیل شده در قطرهای بیشتر ظاهر شده‌اند. این موضوع نشان‌دهنده بهبود عملکرد الکتروشیمیایی نمونه نسبت به حالتی می‌باشد که دارای نیم حلقه‌ای قطر کمتر است. به عبارتی در نیم حلقه‌هایی با قطر

نرخ خوردگی نمونه‌ها می‌باشد [۱۶].

جدول (۳). نتایج آزمون EIS.

%Eff	R _{ct} (ohm.cm ²)	CPE (μF.cm ⁻²)	n _{dl}	میزان بازدارنده (گرم بر لیتر)
	۴۴	۲۱۷/۶۵	۰/۷۸	۰
۷۰	۱۵۰	۱۱۹/۸۹	۰/۸۴	۱
۸۲	۲۴۵	۱۱۲/۸۷	۰/۸۳	۲
۸۷	۳۶۰	۱۱۱/۰۱	۰/۸۶	۴
۹۳	۷۲۰	۱۰۲/۰۹	۰/۸۷	۶



شکل (۸). نتایج آزمون EIS (نمودار بد) برای ارزیابی عملکرد بازدارنده در غلظت‌های مختلف.

۲-۳. ارزیابی رفتار سایشی و خوردگی کلد اعمال شده

به منظور مشخصه‌یابی کلد اعمال شده از آزمون‌هایی به شرح زیر استفاده شده است:

- ۱- آزمون خوردگی (PDP)
- ۲- آزمون سایش (تغییر وزن در اثر سایش، ضریب اصطکاک)
- ۳- سختی‌سنجی

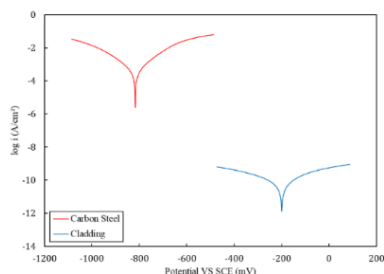
مقایسه نمونه‌ها به این صورت می‌باشد که یک نمونه شامل کلد و نمونه دیگری فاقد کلد می‌باشد که هر تست برای هر دو نمونه صورت گرفته و در نهایت مقایسه شده است.

۱-۲-۳. آزمون خوردگی (PDP)

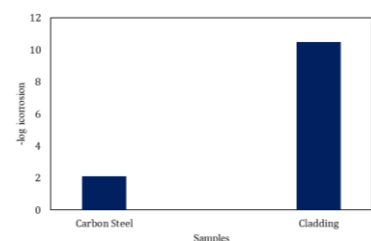
به منظور بررسی تأثیر حضور کلد در رفتار الکترو شیمیایی و خوردگی نمونه‌ها از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک (PDP) در محیط 3.5% wt. NaCl استفاده شده است. مشخص است که این نوع از سیال به نسبت سیال موجود در مجموعه اسفوردی به شدت خورنده‌تر می‌باشد. دلیل این موضوع حضور یون‌های Cl⁻ در این سیال می‌باشد. نتایج این بررسی در شکل ۹ نشان داده شده است. باتوجه به نتایج شکل ۹ مشخص است که در حضور لایه کلد، باتوجه به اینکه آلیاژ در تماس با محلول خورنده از خانواده آلیاژهای Ni می‌باشد، این آلیاژ در مقادیر پتانسیل‌های نجیب‌تری نسبت به نمونه کربن استیل قرار دارد. این موضوع نشان‌دهنده

این مهم می‌باشد که کلد اعمال شده به صورت چشمگیری رفتار ترمودینامیکی واکنش‌های خوردگی را تحت تأثیر قرار داده است. در ادامه مشخص است که شاخه‌های تافلی برای نمونه کلد شده در شدت جریان‌های بسیار کمتری از نمونه ساده کربنی قرار دارند. این موضوع نشان‌دهنده این مهم می‌باشد که نرخ خوردگی و سینتیک خوردگی با اعمال کلد تغییرات بسیاری داشته و به صورت چشمگیری کاهش پیدا کرده است.

تغییرات نرخ خوردگی با انتقال چشمگیر نمودار PDP به سمت مقادیر کمتر چگالی جریان کاملاً مشهود می‌باشد [۱۷]. مشخص است که میل ترمودینامیکی خوردگی (E_{corr}) به سمت مثبت‌تر شیف‌ت پیدا کرده است این موضوع نشان‌دهنده این مهم می‌باشد که رغبت نمونه برای انجام واکنش‌های خوردگی به صورت چشمگیری کاهش پیدا کرده است و ترمودینامیک واکنش‌های خوردگی به سمت حالت نجیب و بی اثر شیف‌ت پیدا کرده است [۱۵]. جدول ۴ نتایج استخراج شده از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک را نشان می‌دهد بر اساس این نتایج نیز مشخص است که چگالی جریان خوردگی (I_{corr}) در حضور کلد کاهش چشمگیری از خود داشته است (در شکل ۱۰ نشان داده شده است). از طرفی E_{corr} گزارش شده در جدول نیز نشان‌دهنده انتقال پتانسیل خوردگی به سمت مقادیر مثبت‌تر و نجیب‌تر می‌باشد.



شکل (۹). نمودار PDP برای نمونه کلد شده و فاقد کلد.

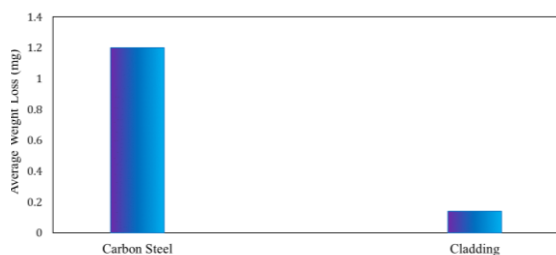


شکل (۱۰). تغییرات چگالی جریان خوردگی برای نمونه کلد شده و فاقد کلد.

جدول (۴). نتایج آزمون PDP.

E _{Corr} (mV)	I _{corr} (mA.cm ⁻²)	نمونه
-۸۱۶	۷/۹۵ × ۱۰ ^{-۲}	CARBON STEEL
-۲۰۰	۳/۱۶ × ۱۰ ^{-۸}	CLADDING

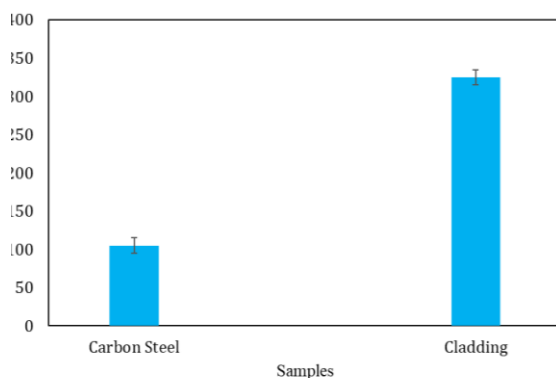
بسیار کمتر می‌باشد پس نرخ سایش نمونه کلد شده بسیار کمتر از نمونه کربن استیل می‌باشد.



شکل (۱۳). وزن ازدست‌رفته نمونه‌های کلد شده و فاقد کلد در آزمون سایش.

۳-۲-۳. آزمون سختی سنجی

باتوجه به مشاهدات صورت گرفته در Shell مربوط به آسیاب‌ها مشخص است که این تجهیزات علاوه بر مکانیزم‌های تخریب مربوط به خوردگی و سایش، در معرض لهیدگی و اعوجاج نیز هستند. این لهیدگی‌ها در اثر برخورد Rod, Mill ها می‌باشد. اگر سختی Shell به اندازه کافی بالا باشد این اعوجاج‌ها و لهیدگی‌ها در اثر برخوردهای صورت گرفته ایجاد نمی‌گردد. باتوجه به پیشنهاد اعمال کلد بر روی این Shell لازم است تا تأثیر حضور این لایه بر رفتار سختی نمونه‌ها بررسی شود. بدین منظور از دو نمونه که یکی شامل کلد و دیگری فاقد کلد بود آزمون سختی سنجی به عمل آمد. نتایج آزمون سختی سنجی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. باتوجه به نتایج آزمون سختی سنجی مشخص است که در صورت حضور کلد سختی نمونه به صورت چشمگیری افزایش پیدا می‌کند.



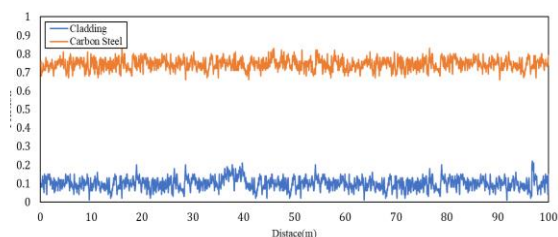
شکل (۱۴). نتایج سختی نمونه‌های کلد شده و فاقد کلد.

۴. نتیجه‌گیری

بازدارنده فاز بخار VCI-6000 در شرایط آزمون عملکرد

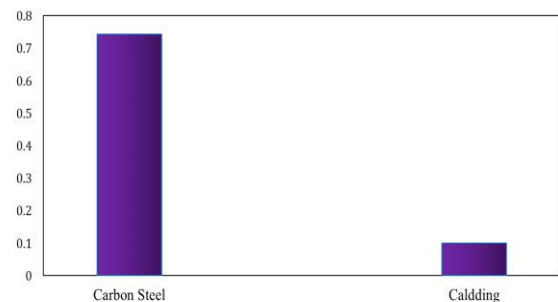
۳-۲-۳. آزمون سایش

جهت انجام آزمون سایش و بررسی رفتار تریبولوژیکی نمونه‌های مورد ارزیابی از آزمون سایش پین روی دیسک استفاده شد. شکل ۱۱ نتایج آزمون سایش را نشان می‌دهد. در این شکل تغییرات ضریب اصطکاک نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. باتوجه به نتایج مشخص است که با اعمال لایه کلد، ضریب اصطکاک نمونه‌ها به صورت چشمگیری کاهش پیدا کرده است. این موضوع نشان‌دهنده بهبود رفتار سایشی نمونه‌ها می‌باشد [۱۸].



شکل (۱۱). تأثیر اعمال کلدینگ بر ضریب اصطکاک نمونه‌ها.

شکل ۱۲ میانگین ضریب اصطکاک برای هر دو نمونه مورد بررسی را نشان می‌دهد. باتوجه به این شکل مشخص است که در صورت کلدینگ، ضریب اصطکاک نمونه به اندازه ۸۶٪ کاهش پیدا می‌کند. کاهش ضریب اصطکاک منجر به بهبود رفتار تریبولوژیکی و کاهش نرخ سایش نمونه‌ها می‌گردد.



شکل (۱۲). میانگین ضریب اصطکاک نمونه‌های کلد شده و فاقد کلد.

شکل ۱۳ تغییرات میزان وزن ازدست‌رفته برای نمونه کلد شده و نمونه کربن استیل را نشان می‌دهد. باتوجه به نتایج مشخص است که در حضور کلد میزان وزن ازدست‌رفته نمونه نسبت به نمونه کربن استیل بسیار کاهش پیدا کرده است. این موضوع نشان‌دهنده افزایش مقاومت به سایش نمونه‌ها در اثر اعمال کلدینگ می‌باشد. به عبارتی شکل ۱۳ نشان‌دهنده نرخ سایش نمونه‌ها می‌باشد. مشخص است که میزان جرم ازدست‌رفته مواد در اثر سایش در نمونه کلد شده نسبت به نمونه فاقد کلد

Acetylene Flame," *Surface Review and Letters*, vol. 16, no. 03, pp. 475-485, 2009.

[9]R. González et al., "Microstructural study of NiCrBSi coatings obtained by different processes," *Wear*, vol. 263, no. 1-6, pp. 619-624, 2007.

[10]H. Skulev, S. Malinov, W. Sha, and P. Basheer, "Microstructural and mechanical properties of nickel-base plasma sprayed coatings on steel and cast iron substrates," *Surface and Coatings Technology*, vol. 197, no. 2-3, pp. 177-184, 2005.

[11]C. Navas, R. Colaço, J. De Damborenea, and R. Vilar, "Abrasive wear behaviour of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 200, no. ۲۴, pp. 6854-6862, 2006.

[12]M. Okazaki, "High-temperature strength of Ni-base superalloy coatings," *Science and Technology of advanced Materials*, vol. 2, no. 2, pp. 357-366, 2001.

[13]S. Sharma, D. Dwivedi, and P. Jain, "Effect of CeO₂ addition on the microstructure, hardness, and abrasive wear behaviour of flame-sprayed Ni-based coatings," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 222, no. 7, pp. 925-933, 2008.

[14]F. Ansari, C. Verma, Y. Siddiqui, E. Ebenso, and M. Quraishi, "Volatile corrosion inhibitors for ferrous and non-ferrous metals and alloys: A review," *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, vol. 7, no. 2, pp. 126-150, 2018.

[15]M. Ferdosi Heragh and H. Tavakoli, "Electrochemical properties of a new green corrosion inhibitor derived from *Prosopis farcta* for St37 steel in 1 M hydrochloric acid," *Metals and Materials International*, vol. 26, no. 11, pp. 1654-1663, 2020.

[16]M. F. Heragh and H. Tavakoli, "Synergetic effect of the combination of *Prosopis Farcta* extract with sodium dodecyl sulfate on corrosion inhibition of St37 steel in 1M HCl medium," *Journal of Molecular Structure*, vol. 1245, p. 131086, 2021.

[17]M. J. Fontana, "Corrosion engineering," 2nd ed, Mac-Hill, New York, 1987.

[18]F. B. Jam, H. B. Hour, and M. Ferdosi, "Characterization of TiB₂ reinforced aluminum matrix composite synthesized by in situ stir casting method," *Journal of Composites and Compounds*, vol. 2, no. 5, pp. 163-170, 2020.

مطلوبی داشت و منجر به توقف خوردگی نمونه مورد آزمایش شد. استفاده از این بازدارنده در کف مخان ذخیره و واحد انبارداری بازدارنده فاز مایع SCI-600 مورد استفاده در این پژوهش از عملکرد مطلوبی برخوردار بوده و منجر به کاهش نرخ خوردگی تا مقدار ۹۳٪ می‌گردد. نتایج آزمون سختی سنجی کلد اعمال شده نشان داد که با اعمال کلد سختی نمونه‌ها از مقدار ۱۰۰ ویکرز به مقدار ۳۴۰ ویکرز افزایش پیدا می‌کند. نتایج آزمون سایش نشان داد با اعمال کلد میانگین ضریب اصطکاک نمونه‌ها از مقدار ۰/۷ به مقدار ۰/۱ کاهش پیدا کرده است که منجر به بهبود رفتار تریبولوژیکی نمونه‌ها شده است. میزان وزن ازدست‌رفته نمونه‌ها در آزمون سایش با اعمال کلد از مقدار ۱/۲ میلی‌گرم به مقدار ۰/۲ میلی‌گرم کاهش پیدا کرده است.

۵. مراجع

[1]Y. Zhi, D. Fu, D. Zhang, T. Yang, and X. Li, "Prediction and knowledge mining of outdoor atmospheric corrosion rates of low alloy steels based on the random forests approach," *Metals*, vol. 9, no. 3, p. 383, 2019.

[2]U. M. Angst, "A critical review of the science and engineering of cathodic protection of steel in soil and concrete," *Corrosion*, vol. 75, no. 12, pp. 1420-1433, 2019.

[3]A. Kadhim, A. Al-Amiery, R. Alazawi, M. Al-Ghezi, and R. Abass, "Corrosion inhibitors. A review," *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, vol. 10, no. 1, pp. 54-67, 2021.

[4]M. K. Saha and S. Das, "A review on different cladding techniques employed to resist corrosion," *Journal of the Association of Engineers*, vol. 86, no. 1-2, pp. 51-63, 2016.

[5]J. P. Broomfield, "An overview of cathodic protection criteria for steel in atmospherically exposed concrete," *Corrosion Engineering, Science and Technology*, vol. 55, no. 4, pp. 303-310, 2020.

[6]P. B. Raja et al., "Reviews on corrosion inhibitors: a short view," *Chemical Engineering Communications*, vol. 203, no. 9, pp. 1145-1156, 2016.

[7]L. Zhu et al., "Recent research and development status of laser cladding: A review," *Optics & Laser Technology*, vol. 138, p. 106915, 2021.

[8]Q. Wang, Z. Chen, Z. X. Ding, and D. Chen, "Abrasive Wear Behavior of WC Reinforced Ni-Based Composite Coating Sprayed and Fused by Oxy-