



دانشگاه صنعتی امیرکبیر



انجمن خوردگی ایران

# سومین کنفرانس ملی خوردگی

۲۰ و ۲۱ آبان ماه ۱۴۰۴

## تعیین تعداد سیکل تمیزکاری کوپن‌های خوردگی (PSL2) API 5L Gr. X52N مورد استفاده در صنعت نفت براساس غلظت بهینه بازدارنده ATMP در الکترولیت HCL 15%

علی امیرعبداللهیان\*، نسیم کجوری، محسن نصری

شرکت برنا الکترونیک، واحد پایش و کنترل خوردگی

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

### چکیده

هدف از پژوهش حاضر تعیین غلظت بهینه بازدارنده ATMP (Amino Trimethylene Phosphonic Acid) در الکترولیت HCL 15% جهت تمیزکاری کوپن‌های خوردگی (PSL2) API 5L Gr. X52N و متعاقباً دستیابی به تعداد سیکل تمیزکاری مؤثر در این محلول براساس استانداردهای ASTM G1 و NACE SP0775 است. به این منظور پنج نمونه کوپن خوردگی فولاد کربنی از جنس API 5L Gr. X52N (PSL2) انتخاب و آزمون‌های خوردگی غوطه‌وری (کاهش وزن) و پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در الکترولیت HCL 15% حاوی ۰، ۱۵۰، ۱۵۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ ppm بازدارنده ATMP انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش میزان بازدارنده از ۱۵۰ تا ۱۵۰۰۰ ppm در اسید، سرعت خوردگی کاهش و راندمان بازدارنده افزایش محسوسی داشته و پس از آن با افزایش غلظت تا ۳۰۰۰۰ ppm، در سرعت خوردگی و راندمان تغییر قابل توجهی مشاهده نشد. بنابراین محلول HCL 15% با میزان بازدارنده ۱۵۰۰۰ ppm به عنوان محلول تمیزکاری بهینه تعیین شد. در ادامه، فرآیند تمیزکاری نمونه‌های غوطه‌ور شده در نفت خام و 3.5% NaCl توسط محلول تمیزکاری با بهترین غلظت (HCL 15% حاوی ۱۵۰۰۰ ppm بازدارنده ATMP) انجام و تعداد ۲ سیکل تمیزکاری به عنوان سیکل بهینه مشخص شد.

### واژه‌های کلیدی:

صنعت نفت، کوپن‌های خوردگی، تمیزکاری، بازدارنده ATMP.

### ۱ - مقدمه

امروزه، نفت خام به‌طور گسترده در بخش‌های مختلف انرژی در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این منبع هیدروکربنی از چاه‌های زیرزمینی خشکی یا دریا استخراج شده و پس از انتقال از سر چاه به مخازن ذخیره، به پالایشگاه‌ها منتقل شده تا محصولات ارزشمندتر و مطلوب‌تری تولید گردد [۱]. در صنعت نفت، خوردگی از مسائل مهم و پرهزینه محسوب شده و پیامدهای ناگواری مشابه بلایای طبیعی دارد [۲]. خوردگی یک پدیده طبیعی است که منجر به تخریب تجهیزات صنعتی، آسیب به ساختار آن‌ها و در نهایت بی‌استفاده شدن تجهیزات می‌گردد [۳ و ۴].



دانشگاه صنعتی امیرکبیر



# سومین کنفرانس ملی خوردگی و پیت

۲۰ و ۲۱ آبان ماه ۱۴۰۴

عوامل متعددی مانند ترکیب شیمیایی سیال، دما، فشار، نوع جریان سیال (آرام، انتقالی یا آشفته)، جنس لوله، اثر میعان و حملات موضعی می‌توانند بر شدت و نوع خوردگی تأثیرگذار باشند [۵-۷]. وجود ترکیباتی نظیر  $O_2$ ،  $CO_2$ ،  $H_2S$ ، اسیدهای آلی، رسوبات و ... نیز از جمله عوامل شیمیایی مؤثر در فرایند خوردگی محسوب شده و فعالیت‌های میکروبی نیز می‌توانند آن را تشدید کنند [۵]. نحوه تأثیر این پارامترها بر خطوط لوله را می‌توان از طریق محاسبه نرخ خوردگی ارزیابی کرد. نرخ خوردگی را می‌توان با استفاده از روش‌هایی مانند کاهش وزن، آزمون‌های الکتروشیمیایی، برون‌یابی تافل و مقاومت پلاریزاسیون اندازه‌گیری نمود. علاوه بر این، در مواردی که داده‌های تجربی محدود هستند یا نیاز به ارزیابی سریع وجود دارد، استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی برای تعیین نرخ خوردگی اهمیت بالایی پیدا می‌کند [۳].

برای درک دقیق مشکلات خوردگی و یافتن راه‌حل‌های مؤثر در صنعت نفت، گاز و پالایش، بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نفت خام، گاز طبیعی، سوخت‌ها و میزان خوردگی آن‌ها ضروری است. در تجهیزات حاوی نفت خام، ترکیب شیمیایی نفت خام تأثیر قابل توجهی بر نرخ خوردگی دارد. نفت خام ترکیبی پیچیده از اجزای مختلفی نظیر گازهای محلول، ذرات جامد، نمک‌ها و آب است. به‌طور معمول، خوردگی نفت خام با استفاده از شاخص‌هایی مانند عدد اسیدی کل<sup>۱</sup> (TAN)، میزان گوگرد کل، مقدار آب و نمک و حضور میکروارگانیسم‌ها ارزیابی می‌شود [۵].

با توجه به این که خوردگی از نظر ترمودینامیکی فرآیندی طبیعی بوده و پیشگیری کامل از آن ممکن نیست، بنابراین به منظور کاهش مشکلات ناشی از خوردگی، استفاده از روش‌های مناسب جلوگیری امری ضروری است. در سال ۱۹۵۷، ورنون<sup>۲</sup> طبقه‌بندی جامعی از روش‌های پیشگیری از خوردگی ارائه داد که در چهار دسته اصلی قرار می‌گیرند: اصلاح فرآیند، اصلاح فلز، اصلاح محیط و استفاده از پوشش‌های محافظ [۵]. از آنجایی که مکانیسم خوردگی مبتنی بر واکنش فلز با محیط خورنده است، این پدیده را می‌توان از طریق انتخاب مواد مقاوم در برابر خوردگی و یا کاهش عوامل تهاجمی محیط کنترل نمود. روش‌های رایج پیشگیری از خوردگی شامل تثبیت pH، حفاظت کاتدی، استفاده از پوشش‌های محافظ، افزودن بازدارنده‌های خوردگی و سایر اقدامات مهندسی هستند [۳ و ۸].

در میان روش‌های مختلف مقابله با خوردگی در صنعت نفت و گاز، استفاده از بازدارنده‌های خوردگی یکی از مؤثرترین و مقرون به صرفه‌ترین روش‌ها به شمار می‌رود [۹]. اولین مرور علمی در زمینه بازدارنده‌های خوردگی توسط هاگرمن<sup>۳</sup> در سال ۱۹۴۸ ارائه شد. وی اظهار داشت که هر ماده‌ای که به سامانه تزریق شود و در فرآیند انحلال فلز اختلال ایجاد کند، فارغ از مکانیسم عملکرد آن، به عنوان بازدارنده شناخته می‌شود. بازدارنده‌های خوردگی شامل انواع مواد شیمیایی یا افزودنی‌هایی هستند که با افزودن مقدار اندکی از آن‌ها به محیط خورنده، می‌توان روند خوردگی بین سطح فلز و محیط را کاهش داده یا به طور کامل متوقف نمود [۳]. در جدول ۱ طبقه‌بندی انواع بازدارنده‌ها و پارامترهای مؤثر بر انتخاب آن‌ها آورده شده است.

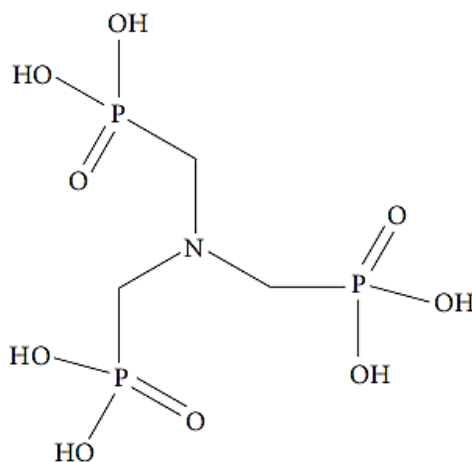
یکی از مکانیسم‌های بازدارندگی، مبتنی بر جذب شیمیایی بازدارنده بر سطح فلز است؛ به‌طوری‌که یک لایه نازک محافظ تشکیل می‌دهد و فلز زیرین را از تماس با عوامل خورنده محافظت می‌کند. به‌طور کلی، هرچه غلظت این نوع بازدارنده‌ها بیشتر باشد، سطح کمتری از فلز در معرض عوامل خورنده قرار گرفته و در نتیجه نرخ خوردگی کاهش می‌یابد [۳ و ۱۰]. بازدارنده همچنین ممکن است پتانسیل سطح فلز را افزایش داده تا فلز وارد ناحیه پسیو شود؛ ناحیه‌ای که در آن یک لایه اکسید طبیعی محافظ تشکیل می‌گردد، یا ممکن است با عوامل خورنده واکنش داده و آن‌ها را از محیط حذف کند [۱۰].

1. Total Acid Number  
2. W.H.J. Vernon  
3. Hackerman

## جدول ۱. طبقه‌بندی انواع بازدارنده‌ها براساس عملکرد و پارامترهای مؤثر بر انتخاب آن‌ها [۳]

پارامترهای مؤثر بر انتخاب	طبقه‌بندی براساس عملکرد
(۱) هزینه اقتصادی، میزان دسترسی و سهولت تأمین، راندمان و تأثیرات زیست محیطی بازدارنده (۲) حلالیت در محیط خوردنده (۳) سازگاری با سامانه و شرایط عملیاتی (۴) پایداری در برابر تغییرات دما و pH	(۱) تأثیر بر واکنش‌های خوردگی: بازدارنده‌های آندی، کاتدی و ترکیبی (۲) ماهیت شیمیایی: شامل بازدارنده‌های آلی و معدنی (۳) نوع فلز مورد حفاظت (۴) محیط کاربرد: مانند بازدارنده‌های فازهای آبی، گازی، قلیایی و اسیدی

اولین بازدارنده‌های مورد استفاده، آمین‌ها بودند که در دهه‌های ۱۹۴۰ تا ۱۹۸۰ برای کنترل خوردگی در خطوط لوله تولید گاز طبیعی استفاده شدند [۳]. دو دسته بازدارنده ضد رسوب<sup>۱</sup> وجود دارد که در ساختار خود حاوی فسفر هستند: فسفات‌های پلیمری و فسفات‌های غیرپلیمری. بازدارنده‌های ضد رسوب حاوی فسفات قادرند رشد کریستال‌های رسوب را کنترل کنند. این نوع بازدارنده‌ها را می‌توان در طیف وسیعی از مقادیر pH بکار برده و از پایداری شیمیایی مناسبی نیز برخوردارند. در زمینه کنترل رسوبات در چاه‌های نفت و گاز، بازدارنده‌های غیرپلیمری حاوی فسفات (دسته دوم) عملکرد بهتری نسبت به نوع پلیمری از خود نشان می‌دهند. برای بازدارنده‌های ضد رسوب فسفات غیرپلیمری، در مقابله با رسوبات کلسیم کربنات (CaCO<sub>3</sub>) و سولفات باریم (BaSO<sub>4</sub>) انواع رایجی وجود دارد که به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله این ترکیبات می‌توان به آمینو تری‌متیلن فسفونیک اسید<sup>۲</sup> (ATMP)، متیل‌آمینو دی‌متیلن فسفونیک اسید<sup>۳</sup> (MADMP)، اتیلن‌دی‌آمین تترامتیلن فسفونیک اسید<sup>۴</sup> (EDTMPA) و ... اشاره نمود [۱۱-۱۳]. ATMP یک ترکیب فسفونات آلی سازگار با محیط زیست است که در سامانه‌های خنک‌کننده آب در گردش، خطوط لوله نفت و دیگ‌های بخار به عنوان مهارکننده خوردگی ناشی از رسوب استفاده می‌شود [۱۴]. شکل ۱ ساختار مولکولی بازدارنده ATMP را نشان می‌دهد.



شکل ۱. ساختار مولکولی بازدارنده ATMP [۱۵، ۱۶-۱۹]

اسید آمینو تری‌متیلن فسفونیک (ATMP) با فرمول شیمیایی C<sub>3</sub>H<sub>12</sub>NO<sub>9</sub>P<sub>3</sub>، از طریق سنتز اسید فسفریک و آمونیاک تولید می‌شود. وجود اتم نیتروژن (N) به‌عنوان یک اتم ناهمجنس در ساختار مولکولی ATMP، نشان‌دهنده قابلیت بازدارندگی این ترکیب در برابر خوردگی فولاد در محیط‌های خوردنده و تهاجمی است [۲۰].

1. Scale Inhibitor
2. Amino Trimethylene Phosphonic Acid
3. Methyl Amino Dimethylene Phosphonic Acid
4. Ethylene Diamine Tetra Methylene Phosphonic Acid



دانشگاه صنعتی امیرکبیر



انجمن خوردگی ایران

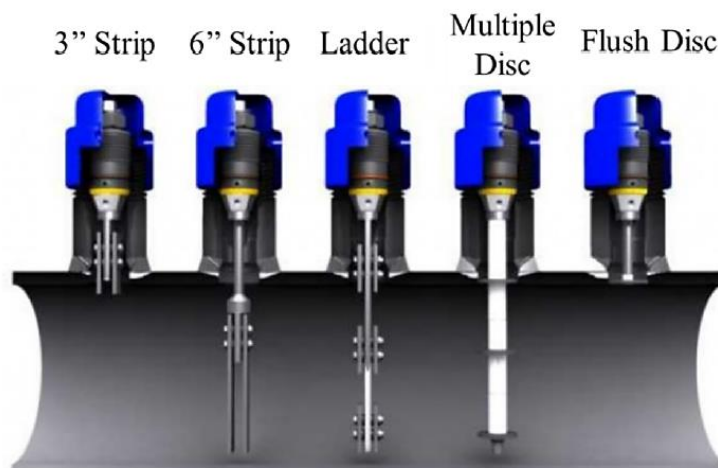
# بیت و سوین گنجره ملی خوردگی

۲۰ و ۲۱ آبان ماه ۱۴۰۴

مولکول‌های ATMP نیز قادرند از مسیره‌های مختلفی به شرح زیر بر سطح فولاد رسوب کرده و نقش مؤثری در افزایش بازدارندگی ایفا کنند:

۱. مولکول‌های ATMP می‌توانند با لایه اکسید هیدراته شده موجود بر سطح فولاد کمپلکس تشکیل دهند؛ این فرآیند از طریق ایجاد پیوندهای هیدروژنی میان گروه‌های هیدروکسیل در ساختار ATMP و لایه اکسید هیدراته صورت می‌گیرد.
۲. مولکول‌های ATMP قادرند از طریق نیروهای واندروالسی روی نواحی فعال آندی و کاتدی فولاد رسوب کنند.
۳. ساختار مولکولی ATMP شامل تعداد زیادی اتم‌های ناهمجنس است؛ از این‌رو، با اشتراک‌گذاری الکترون‌های آزاد با اوربیتال‌های خالی d در آهن، جذب مؤثر آن‌ها بر سطح فولاد امکان‌پذیر می‌شود.
۴. یک لایه بازدارنده مناسب می‌تواند از طریق تشکیل کمپلکس میان یون‌های Fe و مولکول‌های ATMP روی نواحی کاتدی فولاد شکل گیرد [۲۰].

نظارت و پایش محیط خوردنده اصطلاحاً پایش خوردگی نامیده شده و از اهمیت بالایی به منظور کنترل خوردگی برخوردار است. تجهیزات متداول مورد استفاده به منظور پایش خوردگی شامل کوپن‌های خوردگی (کوپن‌های کاهش وزن)، پراب‌های مقاومتی، پراب‌های مقاومتی پلاریزاسیون خطی، پراب‌های هیدروژنی و ... هستند. اندازه‌گیری کاهش وزن کوپن خوردگی، یکی از شناخته‌شده‌ترین و قدیمی‌ترین روش‌ها در صنعت برای سنجش نرخ خوردگی است. این روش هنوز به عنوان روشی مرجع برای ارزیابی نرخ خوردگی در حین استفاده از فناوری‌های مختلف پایش خوردگی شناخته می‌شود. اساس این روش به این صورت است که کوپن خوردگی ساخته‌شده از ماده مورد نظر با وزن و شکل طراحی شده، برای مدت معینی در معرض محیط خوردنده قرار گرفته و سپس به منظور اندازه‌گیری وزن پس از خوردگی و بررسی ظاهری بازیابی می‌گردد. به این معنی که تغییر وزن کوپن را پیش از قرار گرفتن در معرض محیط و پس از حذف محصولات خوردگی اندازه‌گیری نموده و اختلاف وزن آن ملاک عمل جهت محاسبه سرعت خوردگی خواهد بود. کوپن خوردگی به دلیل سادگی عملکرد، سهولت در اجرا و انعطاف‌پذیری در انتخاب ماده و شکل، به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، نصب، برداشت و تحلیل آزمایشگاهی پس از خوردگی کوپن‌ها نیازمند دقت بالایی بوده و باید براساس اصول استاندارد و تجربی صورت پذیرد [۲۱]. شکل ۲ نمونه‌ای از انواع کوپن‌های خوردگی و نحوه نصب آن‌ها در خطوط لوله نفت و گاز [۲۱].

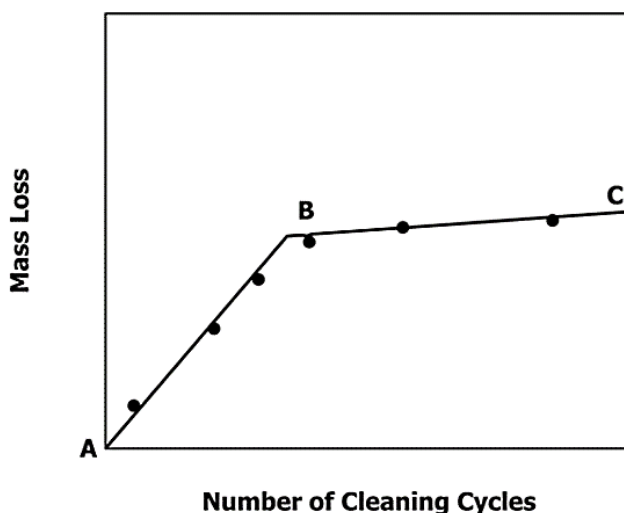


شکل ۲. نمونه‌ای از انواع کوپن‌های خوردگی و نحوه نصب آن‌ها در خطوط لوله نفت و گاز [۲۱].

استانداردهای ASTM G1 و NACE SP0775 روش‌های استاندارد را در خصوص تمیزکاری (سیکل تمیزکاری)، وزن کشی و محاسبه سرعت خوردگی کوپن‌های خوردگی ارائه می‌دهند. یک روش تمیزکاری ایده‌آل، روشی است که فقط محصولات خوردگی را حذف نموده و منجر به حذف فلز پایه نشود. روش‌های حذف محصولات خوردگی را می‌توان به سه دسته کلی مکانیکی، شیمیایی و الکترولیتی تقسیم‌بندی نمود [۲۲ و ۲۳].

براساس استاندارد NACE SP0775، به منظور حذف رسوبات معدنی و محصولات خوردگی، کوپن‌های فولادی بایستی در اسید کلریدریک ۱۵٪ حاوی بازدارنده مناسب غوطه‌ور شوند. تعداد زیادی بازدارنده تجاری برای محافظت از فولاد در حین تمیزکاری با اسید وجود داشته که استفاده از محلول ۱۵٪ ساخته شده از اسید کلریدریک ۳۷٫۵٪ حاوی ۱۰ g/L بازدارنده ۱،۳-دی-ان-بوتیل-۲-تیواوره<sup>۱</sup> (DBT) موفقیت آمیز معرفی شده است [۲۲].

برطبق استاندارد ASTM G1، برای تعیین وزن از دست رفته فلز پایه در هنگام حذف محصولات خوردگی، نمونه‌های شاهد<sup>۲</sup> بدون خوردگی (نمونه‌هایی که در معرض خوردگی قرار نگرفتند) بایستی با همان روش و شرایطی که نمونه‌های آزمون تمیزکاری می‌شوند، تمیز گردند. با توزین نمونه شاهد پیش و پس از تمیزکاری، می‌توان از میزان هدر رفت فلز پایه ناشی از تمیزکاری برای تصحیح اتلاف وزن استفاده نمود. روش تمیزکاری چندین بار روی نمونه‌ها تکرار شده و کاهش وزن باید پس از هر بار تمیزکاری با توزین نمونه تعیین شود. وزن از دست رفته بایستی به عنوان تابعی از تعداد سیکل‌های تمیزکاری که در شکل ۳ نشان داده شده است، ترسیم شود. در منحنی رسم شده دو خط AB و BC بدست می‌آید. دومی با خوردگی فلز پایه پس از حذف محصولات خوردگی مطابقت داشته و از دست دادن وزن فلز پایه ناشی از خوردگی تقریباً با نقطه B تطبیق دارد. برای به حداقل رساندن عدم قطعیت مربوط به خوردگی فلز پایه با روش تمیزکاری مورد نظر، باید روشی را انتخاب نمود که کمترین شیب (نزدیک به افق) خط BC را ارائه دهد [۲۳].



شکل ۳. منحنی کاهش وزن نمونه‌های خورده شده ناشی از سیکل‌های تمیزکاری مکرر براساس استاندارد ASTM G1 [۲۳]

در این پژوهش، در مرحله اول، ارزیابی عملکرد بازدارنده ATMP با غلظت‌های مختلف، به عنوان بازدارنده‌ای قابل دسترس و ارزاتر نسبت به بازدارنده DBT، در الکترولیت ۱۵٪ HCl به منظور حفاظت از خوردگی کوپن‌های (PSL2) API 5L Gr. X52N در فرایند تمیزکاری مورد ارزیابی قرار گرفته و غلظت بهینه آن تعیین شد. در مرحله دوم، دستیابی به تعداد سیکل بهینه تمیزکاری کوپن‌های غوطه‌ور شده در نفت خام<sup>۳</sup> و محلول ۳٫۵٪ NaCl با استفاده از محلول تمیزکاری با غلظت بهینه بازدارنده ATMP براساس استانداردهای ASTM G1 و NACE SP0775 در دستور کار قرار گرفت.

1. 1,3-di-n-butyl-2 thiourea  
2. Control Samples  
3. Crude Oil



دانشگاه صنعتی امیرکبیر



انجمن خوردگی ایران

# بیت و سوسین گنجره ملی

## خوردگی

۲۰ و ۲۱ آبان ماه ۱۴۰۴

### ۲- روش تحقیق

کوپن‌های نواری<sup>۱</sup> از جنس فولاد کربنی (API 5L Gr. X52N (PSL2) مطابق با استاندارد API 5L [۲۴] 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 اکسید شدن در نایلون حاوی بازدارنده فاز بخار<sup>۲</sup> (VCI) و پاکت کاغذی بسته‌بندی شده بودند. شکل ۱ تصویر کوپن‌های خوردگی مورد استفاده را نشان می‌دهد. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی کوپن‌های خوردگی مورد استفاده به ترتیب در جداول ۲ و ۳ آورده شده است.



شکل ۴. تصویر کوپن‌های خوردگی (API 5L. X52N (PSL2)

جدول ۲. ترکیب شیمیایی کوپن‌های خوردگی (API 5L. X52N (PSL2)

CE <sub>EW</sub>	Cu (wt%)	Ti (wt%)	Nb (wt%)	V (wt%)	Mo (wt%)	Ni (wt%)	Cr (wt%)	S (wt%)	P (wt%)	Mn (wt%)	Si (wt%)	C (wt%)
۰٫۴۲	۰٫۰۱۹	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۴	۰٫۰۴۱	۰٫۰۳۰	۰٫۰۰۵	۰٫۰۱۱	۱٫۳۵	۰٫۲۶	۰٫۱۹

جدول ۳. خواص مکانیکی کوپن‌های خوردگی (API 5L. X52N (PSL2)

Hardness (HBW)	Elongation (%)	Yield strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
۱۵۵	۲۸٪	۳۸۸	۵۵۵

جدول ۴. مشخصات بازدارنده ATMP

ظاهر	مایعی شفاف و بی‌رنگ
pH (محللول ۱٪) در دمای ۲۵ °C	حداکثر ۲
کلراید (PPM)	حداکثر ۱
آهن (PPM)	حداکثر ۲۰

1. Strip Coupons  
2. Vapor Corrosion Inhibitor



جدول ۵: مشخصات نفت خام

۰,۹۵۶۹	دانسیته در دمای ۱۵ °C (g/mL)
۱۴۶,۷	ویسکوزیته سینتیک در دمای ۵۰ °C (cSt)
۴۸	نمک (PTB)
۲,۴	گوگرد (mass%)

### ۳- آزمون‌ها

نمونه‌ها جهت انجام آزمون‌ها با ابعاد ۲۲ × ۱۰ × ۳,۲ میلی‌متر از کوپن‌ها برش داده شدند و مرحله به مرحله از سنباده ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ سنباده زده شده، با آب مقطر و اتانول شسته و در جریان هوای گرم خشک شدند. سپس با ترازوی AND مدل HR200 با دقت چهار رقم اعشار توزین شدند.

به منظور دستیابی به غلظت بهینه بازدارنده ATMP، نمونه‌های آماده‌سازی شده در محلول اسید کلریدریک ۱۵٪ حاوی غلظت‌های مختلف ۰، ۱۵۰، ۱۵۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ ppm بازدارنده ATMP به مدت ۱۱ روز غوطه‌ور شدند. پس از گذشت این مدت زمان، نمونه‌ها از محلول خارج شده، با آب مقطر و اتانول شسته و در جریان هوای گرم خشک شدند و سپس با ترازو وزن شدند. پس از محاسبه مساحت سطح اولیه نمونه‌ها و جرم از دست رفته در طول آزمون، سرعت خوردگی متوسط براساس استاندارد NACE SP0775 و از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$CR = (W \times 365 \times 1000) / (ATD) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن CR سرعت متوسط خوردگی (mm/y)، W وزن از دست رفته (g)، A مساحت سطح (mm<sup>2</sup>)، T مدت زمان در معرض قرارگیری (day) و D دانسیته فلز (g/cm<sup>3</sup>) می‌باشد.

جهت انجام آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، نمونه‌های آماده‌سازی شده با استفاده از دستگاه پتانسیواستات AUTOLAB مدل AUT84367 در محلول اسید کلریدریک ۱۵٪ حاوی غلظت‌های مختلف ۰، ۱۵۰، ۱۵۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ ppm بازدارنده ATMP و با سرعت روبش ۰,۵ mV/s تحت آزمون قرار گرفتند. در این آزمون ۱ سانتی‌متر مربع از سطح نمونه‌ها در معرض محلول قرار گرفته و از الکتروود کالومل اشباع<sup>۱</sup> (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 ۶۰ دقیقه در معرض محلول قرار گرفته و سپس آزمون پلاریزاسیون انجام شد. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزار Corrview انجام شد. پس از تعیین غلظت بهینه بازدارنده ATMP و به منظور پیدا کردن سیکل بهینه فرآیند تمیزکاری در این محلول، نمونه‌های آماده‌سازی شده در محلول‌های نفت خام و ۳.۵% NaCl به صورت مدت زمان طولانی<sup>۲</sup> مطابق با استاندارد NACE SP0775 به مدت ۷۵ روز غوطه‌ور شدند. پس از گذشت ۷۵ روز، نمونه‌های غوطه‌ور شده در نفت خام پس از شستشو، در محلول سیکلوهاگزان به مدت ۳۰ دقیقه غوطه‌ور شده تا اثرات هیدروکربن از روی آن‌ها زدوده شود. سپس نمونه‌ها (نمونه‌های شاهد، غوطه‌ور شده در نفت خام و غوطه‌ور شده در ۳.۵% NaCl) جهت تمیزکاری شیمیایی در محلول بهینه در دستگاه التراسونیک به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شدند. بعد از فرآیند تمیزکاری، نمونه‌ها با آب مقطر و اتانول شسته و در جریان هوای گرم خشک شدند و با ترازو وزن شدند. این فرآیند روی نمونه‌ها تا ۵ سیکل تکرار و منحنی مرتبط با آن‌ها رسم گردید (تمیزکاری نمونه‌های شاهد در هر مرحله به منظور تعیین اتلاف فلز پایه و اعمال آن به عنوان ضریب تصحیح در نمونه‌های دیگر بود).

1. Saturated Calomel Electrode  
2. Long-term Periods



دانشگاه صنعتی امیرکبیر



انجمن خوردگی ایران

# بیت و سون گنگره ملی خوردگی

۲۰ و ۲۱ آبان ماه ۱۴۰۴

## ۴ - نتایج و بحث

راندمان بازدارنده<sup>۱</sup> (IE) به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی اثربخشی مواد بازدارنده خوردگی شناخته می‌شود. این شاخص به طور مستقیم با ساختار مولکولی و غلظت بازدارنده‌ها مرتبط بوده و همچنین تحت تأثیر نوع فلز پایه و شرایط محیط خوردگی قرار دارد. برای تعیین راندمان بازدارنده، ابتدا نرخ خوردگی در دو حالت حضور و عدم حضور بازدارنده اندازه‌گیری شده و سپس مقدار IE با استفاده از رابطه ۲ محاسبه گردید:

$$IE = (1 - (CR_{inhibited} / CR_{uninhibited})) \times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن IE راندمان بازدارنده (%)،  $CR_{inhibited}$  سرعت متوسط خوردگی (mm/y) در حضور بازدارنده و  $CR_{uninhibited}$  سرعت متوسط خوردگی (mm/y) در غیاب بازدارنده می‌باشد [۲۵].

نتایج حاصل از آزمون خوردگی غوطه‌وری کوپن‌ها در محلول اسید کلریدریک ۱۵٪ حاوی غلظت‌های مختلف بازدارنده ۰، ۱۵۰، ۱۵۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ ppm در جدول ۶ ارائه شده است. شکل ۵ منحنی سرعت خوردگی برحسب غلظت بازدارنده را نشان می‌دهد.

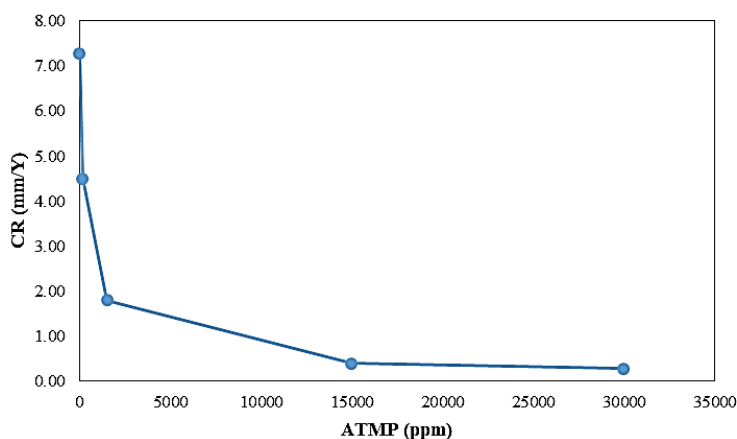
جدول ۶: نتایج حاصل از آزمون خوردگی غوطه‌وری کوپن‌ها

راندمان بازدارنده IE (%)	سرعت خوردگی CR (mm/y) (mpy)	دانسیته D (g/cm <sup>3</sup> )	زمان غوطه‌وری T (Day)	مساحت سطح اولیه A (mm <sup>2</sup> )	اختلاف وزن W <sub>1</sub> -W <sub>2</sub> (gr)	وزن ثانویه W <sub>2</sub> (gr)	وزن اولیه W <sub>1</sub> (gr)	عدد ثابت	نوع الکترولیت
-	۷,۲۷ (۲۸۶,۳۱)	۷,۸۶	۱۱	۶۴۵	۱,۱۱۱۱	۴,۲۳۷۶	۵,۳۴۸۷	۳۶۵۰۰۰	HCl 15% + 0 ppm ATMP
٪۳۸	۴,۴۹ (۱۷۷,۱۳)	۷,۸۶	۱۱	۶۴۵	۰,۶۸۷۴	۴,۷۲۸۶	۵,۴۱۶۰	۳۶۵۰۰۰	HCl 15% + 150 ppm ATMP
٪۷۵	۱,۸۰ (۷۰,۹۱)	۷,۸۶	۱۱	۶۴۵	۰,۲۷۵۲	۵,۰۹۱۵	۵,۳۶۶۷	۳۶۵۰۰۰	HCl 15% + 1500 ppm ATMP
٪۹۴	۰,۳۹ (۱۵,۶۶)	۷,۸۶	۱۱	۶۴۵	۰,۰۶۰۸	۵,۲۸۷۷	۵,۳۴۸۵	۳۶۵۰۰۰	HCl 15% + 15000 ppm ATMP
٪۹۶	۰,۲۷ (۱۰,۸۷)	۷,۸۶	۱۱	۶۴۵	۰,۰۴۲۲	۵,۳۲۶۱	۵,۳۶۸۳	۳۶۵۰۰۰	HCl 15% + 30000 ppm ATMP

نتایج جدول ۶ و شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت بازدارنده ATMP از ۱۵۰ تا ۱۵۰۰۰ ppm سرعت خوردگی به طور قابل توجهی کاهش و راندمان بازدارنده به طور محسوسی افزایش می‌یابد. پس از آن با افزایش غلظت تا ۳۰۰۰۰ ppm، در سرعت خوردگی و راندمان تغییر قابل توجهی مشاهده نمی‌شود.

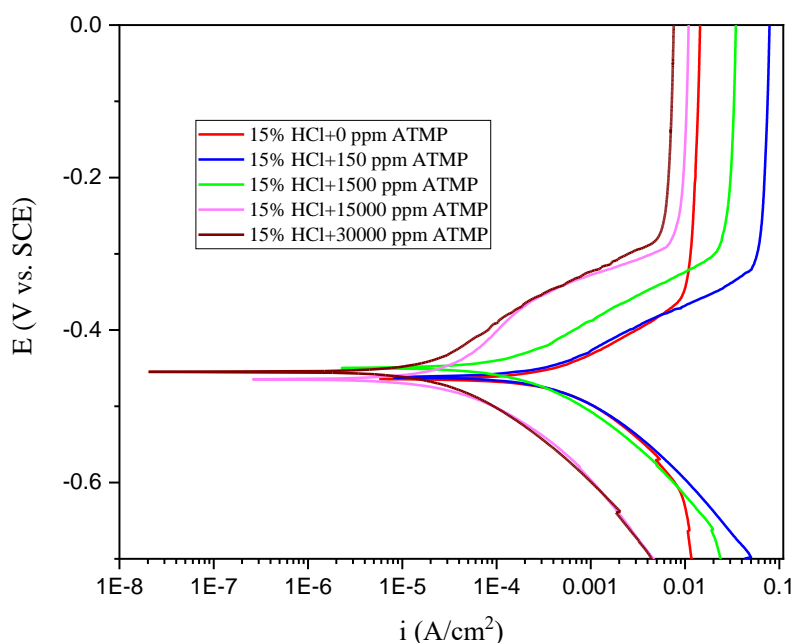
کاهش خوردگی با افزایش میزان بازدارنده ATMP را می‌توان به این صورت توجیه نمود که مولکول‌های ATMP قادرند از مسیرهای مختلفی بر سطح فولاد رسوب کرده و با ایجاد یک لایه نازک محافظ، از تماس فلز زیرین با عوامل خوردنده جلوگیری

کنند. به بیان دیگر، نتایج حاصل از مطالعات سطحی تأیید می‌کنند که گروه‌های فعال موجود در ساختار ATMP در اثر واکنش با کاتیون‌های فلزی دارای اوربیتال‌های خالی مانند  $Fe^{2+}$  و  $Fe^{3+}$  موجب تشکیل کمپلکس‌هایی در سطح فعال فولاد شده و حملات عوامل خوردنده را محدود می‌سازند [۲۰].



شکل ۵. منحنی سرعت خوردگی بر حسب غلظت بازدارنده

منحنی‌های پلاریزاسیون حاصل از آزمون پلاریزاسیون کوپن‌ها در محلول حاوی غلظت‌های مختلف بازدارنده در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود منحنی‌های پلاریزاسیون کوپن‌های API 5L Gr. X52N (PSL2) در محلول‌ها به ترتیب از ۱۵۰، ۱۵۰۰، ۱۵۰۰۰، ۱۵۰۰۰ ppm و ۳۰۰۰۰ ppm به سمت چپ (دانسیته جریان خوردگی کوچک‌تر) حرکت می‌کنند. پارامترهای خوردگی شامل شیب‌های تافل آندی و کاتدی ( $\beta_c$  و  $\beta_a$ )، پتانسیل خوردگی و دانسیته جریان خوردگی نمونه‌ها، با استفاده روش برون‌یابی تافل و توسط نرم افزار Corrvue محاسبه شده و نتایج در جدول ۷ ارائه شده است.



شکل ۶. منحنی‌های پلاریزاسیون کوپن‌ها



دانشگاه صنعتی امیرکبیر



انجمن خوردگی ایران

# بیت و سون گنجره ملی خوردگی

۲۰ و ۲۱ آبان ماه ۱۴۰۴

جدول ۷. شیب‌های تافل آندی و کاتدی ( $\beta_c$  و  $\beta_a$ )، پتانسیل خوردگی و دانسیته جریان خوردگی حاصل از برون‌یابی تافل منحنی‌های

پلاریزاسیون کوپن‌ها

نوع الکترولیت	شیب تافل آندی $\beta_a$ (mV/dec)	شیب تافل کاتدی $-\beta_c$ (mV/dec)	پتانسیل خوردگی $E_{Corr.}$ (V)	دانسیته جریان خوردگی $i_{Corr.}$ (A/cm <sup>2</sup> )
HCl 15% + 0 ppm ATMP	۶۲،۷۹	۹۰،۳۳	-۰،۴۶۵	$۶،۴۴ \times ۱۰^{-۴}$
HCl 15% + 150 ppm ATMP	۶۸،۴۸	۹۳،۱۱	-۰،۴۶۱	$۴،۰۱ \times ۱۰^{-۴}$
HCl 15% + 1500 ppm ATMP	۷۵،۳۴	۸۸،۹۱	-۰،۴۴۹	$۱،۸۲ \times ۱۰^{-۴}$
HCl 15% + 15000 ppm ATMP	۱۲۳،۷۹	۷۰،۰۱	-۰،۴۶۹	$۴،۳۵ \times ۱۰^{-۵}$
HCl 15% + 30000 ppm ATMP	۱۱۱،۹۶	۷۶،۴۶	-۰،۴۵۳	$۲،۷۱ \times ۱۰^{-۵}$

اطلاعات جدول ۷ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت ATMP در محلول، مقدار دانسیته جریان خوردگی ( $i_{corr}$ ) به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. همان طور که مشاهده می‌شود، شیب تافل کاتدی ( $\beta_c$ ) با افزایش غلظت بازدارنده ATMP تغییرات اندکی دارد. منحنی‌های آندی کوپن‌ها در محلول‌های اسیدی حاوی بازدارنده، در مقایسه با نمونه در محلول فاقد بازدارنده، به سمت کاهش جریان جابجا می‌شوند، که بیانگر سرکوب واکنش آندی (انحلال فولاد) توسط ترکیبات آلی است. تغییرات در شیب تافل آندی ( $\beta_a$ ) ممکن است ناشی از جذب یون‌های کلراید یا مولکول‌های بازدارنده بر سطح فولاد کربنی باشد. کاهش قابل توجه جریان‌های کاتدی و آندی پس از افزودن بازدارنده به محلول خورنده نشان می‌دهد که این بازدارنده هم انحلال آندی و هم واکنش آزاد شدن هیدروژن کاتدی را کند می‌کند [۲۶].

به بیان دیگر، برای تعیین نوع بازدارندگی (کاتدی یا آندی)، لازم است میزان جابه‌جایی پتانسیل خوردگی محاسبه شود. به طور کلی، اگر اختلاف  $E_{corr}$  میان نمونه‌های دارای بازدارنده و نمونه فاقد بازدارنده بیش از ۸۵ میلی‌ولت باشد، عملکرد بازدارنده به صورت کاتدی یا آندی تلقی شده و در مقابل، اگر این جابه‌جایی کمتر از ۸۵ میلی‌ولت باشد، بازدارنده از نوع ترکیبی<sup>۱</sup> در نظر گرفته می‌شود. در مطالعه حاضر، اختلاف  $E_{corr}$  میان نمونه با غلظت بهینه (۱۵۰۰۰ ppm) و نمونه شاهد کمتر از ۸۵ میلی‌ولت گزارش شده است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تعاملات کاتدی و آندی هر دو نقش اصلی را در کاهش خوردگی فولاد ایفا کرده‌اند [۲۰].

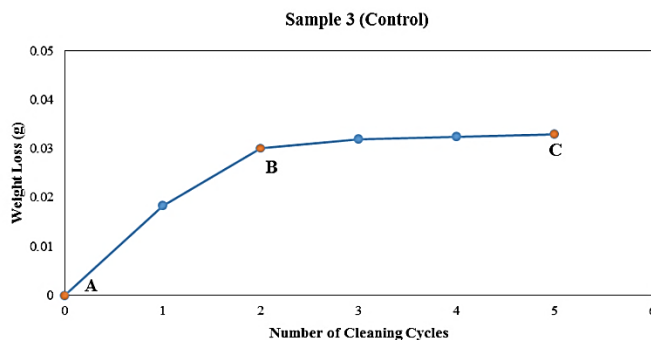
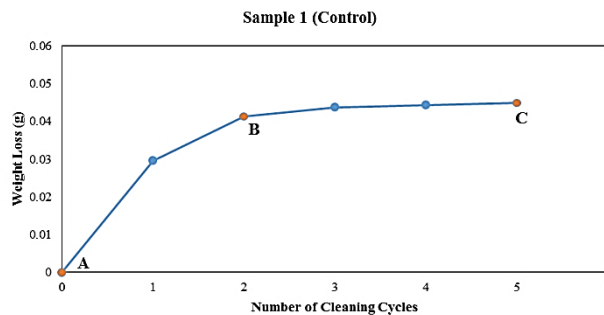
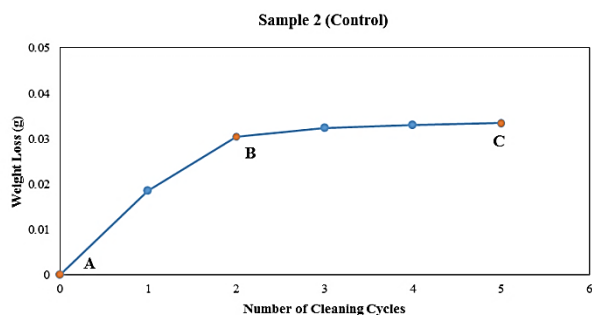
از مجموع نتایج آزمون‌های خوردگی غوطه‌وری و پلاریزاسیون می‌توان دریافت که با لحاظ نمودن مباحث اقتصادی، الکترولیت HCl 15% حاوی ۱۵۰۰۰ ppm بازدارنده ATMP به عنوان محلول بهینه تمیزکاری کوپن‌های خوردگی API 5L Gr. X52N (PSL2) محسوب می‌شود.

نتایج فرایند تمیزکاری نمونه‌های غوطه‌ور شده در نفت خام و 3.5% NaCl با استفاده از محلول بهینه تمیزکاری مطابق با استانداردهای NACE SP0775 و ASTM G1 در جدول ۸ آورده شده است. همچنین منحنی‌های وزن از دست رفته بر حسب تعداد سیکل تمیزکاری برای نمونه‌های شاهد (نمونه‌های بدون خوردگی)، غوطه‌ور شده در نفت خام و غوطه‌ور شده در 3.5% NaCl به ترتیب در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ ارائه شده است.



جدول ۸. نتایج فرایند تمیزکاری نمونه‌های غوطه‌ور شده در نفت خام و ۳.۵٪ NaCl با استفاده از محلول بهینه تمیزکاری (۱۵٪ HCl حاوی ۱۵۰۰۰ ppm بازدارنده ATMP)

NaCl 3.5%			نفت خام			شاهد			نمونه
۳	۲	۱	۳	۲	۱	۳	۲	۱	
۵,۴۱۳۹	۵,۲۳۶۵	۵,۴۶۴۲	۵,۶۵۴۶	۵,۵۳۰۳	۵,۵۶۵۲	۵,۵۸۷۸	۵,۵۷۲۵	۵,۶۳۹۸	وزن اولیه
۵,۴۰۳۶	۵,۲۳۲۱	۵,۴۵۶۶	۵,۶۴۸۸	۵,۵۲۷۸	۵,۵۵۹۷	۵,۵۶۹۵	۵,۵۵۴۱	۵,۶۱۰۲	وزن ثانویه پس از سیکل اول تمیزکاری
۵,۳۹۲۶	۵,۲۲۴۳	۵,۴۵۱۴	۵,۶۳۳۲	۵,۵۲۴۳	۵,۵۵۸۱	۵,۵۵۷۷	۵,۵۴۲۱	۵,۵۹۸۵	وزن ثانویه پس از سیکل دوم تمیزکاری
۵,۳۹۲۱	۵,۲۲۳۹	۵,۴۵۱۱	۵,۶۳۲۱	۵,۵۲۳۸	۵,۵۵۷۷	۵,۵۵۵۹	۵,۵۴۰۲	۵,۵۹۶۱	وزن ثانویه پس از سیکل سوم تمیزکاری
۵,۳۹۱۶	۵,۲۲۳۷	۵,۴۵۰۸	۵,۶۳۰۹	۵,۵۲۳۱	۵,۵۵۷۲	۵,۵۵۵۳	۵,۵۳۹۶	۵,۵۹۵۴	وزن ثانویه پس از سیکل چهارم تمیزکاری
۵,۳۹۱۱	۵,۲۲۳۱	۵,۴۵۰۲	۵,۶۳۰۱	۵,۵۲۲۷	۵,۵۵۶۶	۵,۵۵۴۸	۵,۵۳۹۱	۵,۵۹۴۹	وزن ثانویه پس از سیکل پنجم تمیزکاری



شکل ۷. منحنی وزن از دست رفته بر حسب تعداد سیکل تمیزکاری برای نمونه‌های شاهد



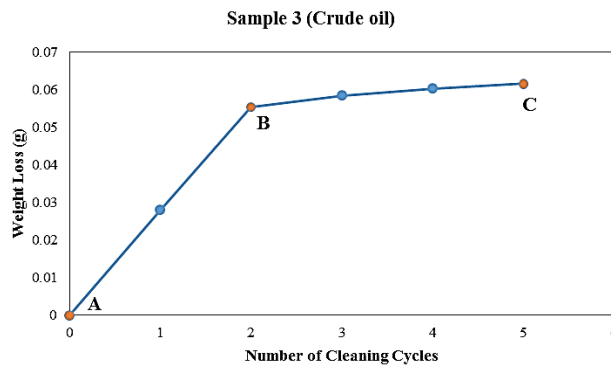
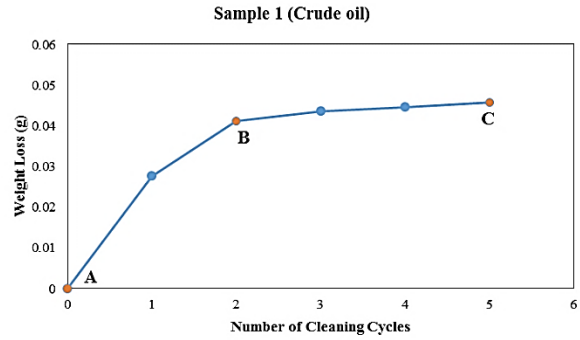
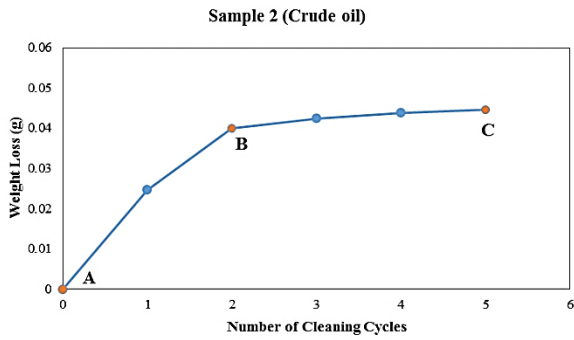
دانشگاه صنعتی امیرکبیر



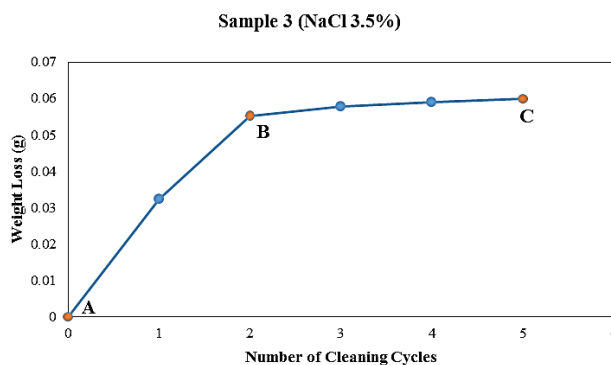
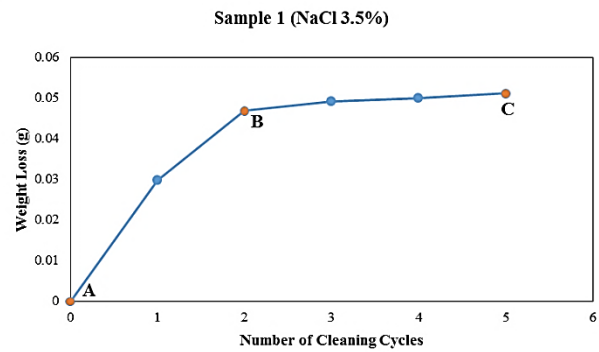
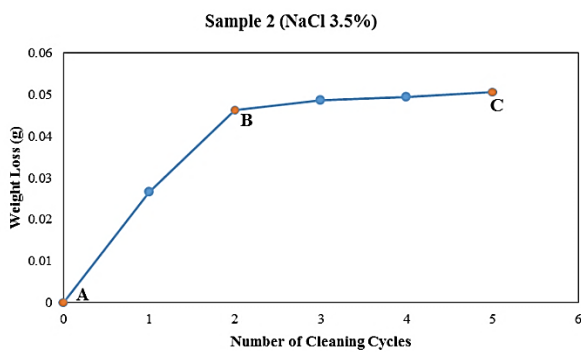
انجمن خوردگی ایران

# بیت و سوسین گنجره ملی خوردگی

۲۰ و ۲۱ آبان ماه ۱۴۰۴



شکل ۸. منحنی وزن از دست رفته (پس از تصحیح وزن) بر حسب تعداد سیکل تمیزکاری برای نمونه‌های غوطه‌ور شده در نفت خام



شکل ۹. منحنی وزن از دست رفته (پس از تصحیح وزن) بر حسب تعداد سیکل تمیزکاری برای نمونه‌های غوطه‌ور شده در NaCl 3.5%



از اطلاعات جدول ۸ و منحنی‌های ۷، ۸ و ۹ مشخص است که در همه نمونه‌ها از سیکل دوم به بعد مقدار وزن از دست رفته تقریباً ثابت شده و مطابق با استاندارد ASTM G1 نقطه B در محل تقاطع سیکل دوم قرار گرفته و پس از آن منحنی تقریباً افقی (خط BC) می‌شود. بنابراین می‌توان تعداد ۲ سیکل تمیزکاری را به عنوان سیکل بهینه تمیزکاری کوپن‌های API 5L Gr. X52N (PSL2) در محلول 15% HCl حاوی 15000 ppm بازدارنده ATMP تعیین نمود.

## ۵ - نتیجه‌گیری

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

(۱) رفتار خوردگی کوپن‌های فولاد کربنی (PSL2) API 5L Gr. X52N در محلول 15% HCl حاوی غلظت‌های مختلف ۰، ۱۵۰، ۱۵۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ ppm بازدارنده ATMP، نشان داد که با افزایش میزان غلظت بازدارنده تا ۱۵۰۰۰ ppm، سرعت خوردگی به طور قابل توجهی کاهش و راندمان بازدارنده افزایش محسوسی داشت. پس از آن با افزایش غلظت تا ۳۰۰۰۰ ppm، در سرعت خوردگی و راندمان تغییر قابل توجهی مشاهده نشد. بنابراین با لحاظ نمودن مباحث اقتصادی، محلول 15% HCL با میزان بازدارنده ۱۵۰۰۰ ppm به عنوان محلول تمیزکاری بهینه تعیین شد.

(۲) با ترسیم منحنی‌های "جرم از دست رفته بر حسب تعداد سیکل تمیزکاری" در فرآیند تمیزکاری نمونه‌های غوطه‌ور شده در نفت خام و 3.5% NaCl توسط محلول تمیزکاری بهینه (15% HCL حاوی ۱۵۰۰۰ ppm بازدارنده ATMP)، تعداد ۲ سیکل تمیزکاری به عنوان سیکل بهینه تعیین شد.

## 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] S. Santhana Prabha, R. Joseph Rathish, R. Dorothy, G. Brindha, M. Pandiarajan, A. Al-Hashem and S. Rajendran, Corrosion problems in petroleum industry and their solutions, European Chemical Bulletin Journal, No. 3, 2014, Pp. 300-307.
- [2] K. Tamalmani, H. Huzin, Review on corrosion inhibitors for oil and gas corrosion issues, Applied Sciences Journal, Vol. 10, No. 3389, 2020.
- [3] U. Bharatiya, P. Gal, A. Agrawal, M. Shah, A. Sircar, Effect of corrosion on crude oil and natural gas pipeline with emphasis on prevention by ecofriendly corrosion inhibitors: A comprehensive review, Bio- and Tribo-Corrosion, Vol. 5, No. 35, 2019.
- [4] B. El Ibrahimy, A. Jmiai, L. Bazzi, S. El Issami, Amino acids and their derivatives as corrosion Inhibitors for metals and alloys, Arabian Journal of Chemistry, 2017.
- [5] A. S. Groysman, Corrosion problems and solutions in oil, gas, refining and petrochemical industry, Corrosion and Material Protection Journal, Vol. 61, No. 3, 2017, Pp. 100-117.
- [6] S. Nestic, Key issues related to modelling of internal corrosion of oil and gas pipelines – A review, Corrosion Science Journal, Vol. 49, 2007, Pp. 4308-4338.
- [7] P. C. Okonkwo, M. A. Mohamed, Erosion-Corrosion in oil and gas industry: A Review, International Journal of Metallurgical and Materials Engineering, Vol. 4, No. 3, 2014, Pp. 7-28.
- [8] B. Jegdic, S. P. Radovanovic, S. Ristic, A. Alil, Corrosion processes, nature and composition of corrosion products on iron artefacts of weaponry, Scientific Technical Review Journal, Vol. 61, No. 2, 2011, Pp. 50-56.
- [9] M. N. Rahuma, B. M. Kennan, corrosion in oil and gas industry: A perspective on corrosion inhibitors, Material Science & Engineering Journal, Vol. 3, No. 3, 2014.
- [10] L. T. Popoola, A. S. Grema, G. K. Latinwo, B. Gutti and A. S. Balogun, Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation, International Journal of Industry Chemistry, Vol. 4, 2013.



دانشگاه صنعتی امیرکبیر



انجمن خوردگی ایران

# سومین کنفرانس ملی خوردگی و سیت

۲۰ و ۲۱ آبان ماه ۱۴۰۴

- [11] K. Sawada, The mechanisms of crystallization and transformation of calcium carbonates, *Pure and Applied Chemistry Journal*, Vol. 69, No. 5, 1997, Pp. 921-928.
- [12] J. Li, M. Tang, Z. Ye, L. Chen and Y. Zhou, Scale formation and control in oil and gas fields: A review, *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 38, No. 5, 2016, Pp. 661-670.
- [13] J. Mohammad, A. Al Hamad, Inhibition of inorganic oilfield scales: Theoretical investigation, A Thesis submitted to the College of Engineering of Qatar University, 2020.
- [14] D. R. Zuchrillah, L. Pudjiastuti, F. Az Zahra, H. D. Edo Pratama, I. A. Chusna and A. Zalsabila, Effect of additional concentration of ATMP inhibitor on the formation of 40% phosphoric acid scale, *Engineering Chemistry Journal*, Vol. 10, 2025, Pp. 43-56.
- [15] N. Labjar, F. Bentiss, M. Lebrini, C. Jama, S. El Hajjaji, Study of temperature effect on the corrosion inhibition of C38 carbon steel using amino-tris(Methylenephosphonic) acid in hydrochloric acid solution, *International Journal of Corrosion*, Vol. 2011, No. 12, 2011.
- [16] C. J. Zou, L. Zhang, Y. J. Cui, Y. Xing and J. Ge, The solubility of the oil scale inhibitor amino trimethylene phosphonic acid in different binary solvents, *Petroleum Science and Technology Journal*, Vol. 31, No. 19, 2013, Pp. 1967-1973.
- [17] A. Zeino, M. Albakria, M. Khaleda, M. Zarzourb, Comparative study of the synergistic effect of ATMP and DTPMPA on CaSO<sub>4</sub> scale inhibition and evaluation of induction time effect, *Journal of Water Process Engineering*, Vol. 21, 2018, Pp. 1-8.
- [18] Y. Xu, Y. Huang, L. He, F. Yang, X. Wang, Experimental study on under-deposit corrosion and its inhibition using electrochemical methods and electronic coupon technique, *Anti Corrosion Methods and Materials Journal*, Vol. 64, No. 2, 2017, Pp. 148-161.
- [19] C. Mahmou, E. M. Bouissoui, F. Bouhlal, N. Labjar, I. Merimi, S. Kaya, B. El Ibrahim, M. Chellouli, A. Dahrouch and S. El Hajjaji, Synergistic effects of aminotris (methylene phosphonic acid) and Zn<sup>2+</sup> on the carbon steel corrosion in acid media: An experimental and theoretical approach, *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, Vol. 10, No. 3, 2021, Pp. 1245-1281.
- [20] F. Poshtiban, Gh. Bahlakeh, B. Ramezanzadeh, A detailed computational exploration and experimental surface electrochemical analyses of mild steel functionalized by zinc-aminotris methylene phosphonic acid complex film, *Applied Surface Science Journal*, Vol. 495, 2019.
- [21] R. F. Wright, P. Lu, J. Devkota, F. Lu, M. Ziomek-Moroz and P. R. Ohodnicki Jr, Corrosion sensors for structural health monitoring of oil and natural gas infrastructure: A review, *Sensors Journal*, Vol. 19, 2019.
- [22] NACE SP0775 Standard, Preparation, installation, analysis, and interpretation of corrosion coupons in hydrocarbon operations, 2023.
- [23] ASTM G1 Standard, Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens, 2017.
- [24] API 5L Standard, Line Pipe, 2018.
- [25] N. Muthumani, S. Rajendran, M. Pandiarajan, J. Lydia Christy and R. Nagalakshmi, Corrosion Inhibition by Amino Trimethylene Phosphonic Acid (ATMP) - Zn<sup>2+</sup> System for Carbon Steel in Ground Water, *Portugaliae Electrochimica Acta*, Vol. 30, No. 5, 2012, Pp. 307-315.
- [26] N. Labjara, M. Lebrinib, F. Bentissc, N. Chihibd, S. Hajjaji, Ch. Jamab, Corrosion inhibition of carbon steel and antibacterial properties of aminotris-(methylenephosphonic) acid, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 119, 2010, Pp. 330-336.



## Determination of Cleaning Cycle Number of API 5L Gr. X52N (PSL2) Corrosion Coupons Used in Oil Industry Based on Optimal Concentration of ATMP Inhibitor in 15% HCL Electrolyte

Ali Amirabdollahian, Nasim Kojouri, Mohsen Nasri  
Borna Electronics Co., Corrosion Monitoring and Control Department

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

### Abstract:

The aim of the present study is to determine the optimal concentration of ATMP (Amino Trimethylene Phosphonic Acid) inhibitor in 15% HCL electrolyte for cleaning API 5L Gr. X52N (PSL2) corrosion coupons and subsequently to achieve the number of effective cleaning cycles in this solution based on ASTM G1 and NACE SP0775 standards. For this purpose, five samples of carbon steel corrosion coupons made of API 5L Gr. X52N (PSL2) were selected and immersion corrosion (weight loss) and potentiodynamic polarization tests were performed in 15% HCL electrolyte containing 0, 150, 1500, 15000 and 30000 PPM of ATMP inhibitor. The results showed that by increasing the inhibitor content from 150 to 15000 PPM in acid, the corrosion rate decreased and the inhibitor efficiency increased significantly, and then by increasing the concentration to 30000 PPM, no significant change was observed in the corrosion rate and efficiency. Therefore, 15% HCL solution with 15000 PPM inhibitor content was determined as the optimal cleaning solution. Subsequently, the cleaning process of the samples immersed in crude oil and 3.5% NaCl was carried out by the cleaning solution with the best concentration (15% HCL containing 15000 ppm ATMP inhibitor) and 2 cleaning cycles were determined as the optimal cycle.

### Keywords:

Oil Industry, Corrosion Coupons, Cleaning, ATMP Inhibitor.