



بررسی رفتار خوردگی فولاد میکروآلیاژی X70 محیط ترش در محلول یک مولار اسید سولفوریک در حضور بنزومیدازول و متیل بنزومیدازول

محمد یزدی‌زاده^۱، مهدی بروجردنیا^{۲*}

۱. گروه مهندسی مواد، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

۲.* گروه مهندسی مواد، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

* نویسنده مسئول: m.boroujerdia@gmail.com

چکیده

در تحقیق حاضر از دو بازدارنده بنزومیدازول و متیل بنزومیدازول در جهت جلوگیری از خوردگی فولاد میکروآلیاژی X70 محیط ترش در محیط یک مولار اسید سولفوریک استفاده شده است. به این منظور از هر دو بازدارنده در غلظت‌های متفاوت به منظور یافتن بهترین میزان غلظت، دما و راندمان آزمون‌های کاهش وزن، پلاریزاسیون و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده گردید. ترکیب شیمیایی نمونه توسط تست کوانتومتری به دست آمد و نمونه با ابعاد $10 \times 5 \times 10$ میلی‌متر به تعداد ۲۰ عدد آماده‌سازی گردید. عملکرد حفاظت در برابر خوردگی بازدارنده‌ها در محلول ۱ مولار اسید سولفوریک جهت آزمون کاهش وزن پس از ۱۰ روز غوطه‌وری و نیز در آزمون‌های پلاریزاسیون و امپدانس با استفاده از دستگاه Auto Lab و نرم‌افزار Nova1.11 مورد ارزیابی واقع گردیدند. نتایج نشان داد بهترین راندمان بازدارندگی بنزومیدازول در غلظت ۶۰۰ ppm برابر با ۳۷ درصد و متیل بنزومیدازول در غلظت ۴۰۰ ppm برابر با ۳۰ درصد می‌باشد و در حالت ترکیبی این دو محلول توانایی افزایش بهبود راندمان خوردگی تا ۷۳ درصد را دارند. در نتیجه هر دو این بازدارنده‌ها توانایی عملی به منظور استفاده در محیط صنعتی را از خود نشان دادند.

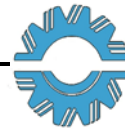
کلمات کلیدی: بنزومیدازول، متیل بنزومیدازول، فولاد میکروآلیاژی، رفتار خوردگی

مقدمه

فولادهای میکروآلیاژی یا به عبارت دیگر فولادهای استحکام بالای کم آلیاژی (HSLA)^۱ در طی نیم قرن گذشته گسترش یافته‌اند و به‌طور گسترده در کاربردهایی نظیر کشتی‌سازی و ساخت لوله‌های قطور خطوط انتقال نفت و گاز به کار می‌روند. این فولادها اصولاً همان فولادهای کربن - منگنزی هستند که با افزودن مقادیر کم عناصر میکروآلیاژی، استحکام آن‌ها افزوده شده است [۱،۲]. مشخصات آن دسته از این فولادها که در ساخت لوله‌های انتقال گاز و نفت مورد استفاده قرار می‌گیرند توسط مؤسسه نفت آمریکا^۲، استاندارد شده است [۳]. مقاومت تسلیم بالا، ازدیاد طول نسبی بالا، قابلیت جوش‌پذیری بالا و چقرمگی بالا و دمای انتقال شکست نرم به شکست ترد پایین از ویژگی‌های اصلی این فولادها است [۳،۴]. ریزساختار این فولادها ممکن است فریت - پرلیتی یا فریت سوزنی - بینیتی باشد که ساختار اخیر به دلیل ترکیب بهتر استحکام و چقرمگی ارجحیت دارد [۵-۷]. در این فولادها دستیابی به ریزساختار و خواص مکانیکی مطلوب با ترکیب مناسب عناصر میکروآلیاژی و عملیات ترمومکانیکی میسر است [۸-۱۰]. موفقیت فرآیند و ترکیب صحیح عناصر در نظر گرفته شده را می‌توان با آنالیز شیمیایی (قابلیت جوش‌پذیری)، انجام آزمون کشش (استحکام و ازدیاد طول نسبی) و انجام آزمون ضربه شاری و آزمون وزنه سقوطی مطابق استاندارد API 5L ارزیابی کرد [۳،۴]. در این فولادها به منظور بهبود قابلیت جوشکاری، درصد کربن، معمولاً پایین نگه داشته می‌شود (کمتر از ۰/۱ درصد وزنی) و اثر کاهش استحکام ناشی از کاهش کربن با افزودن منگنز (معمولاً بین ۱/۴ تا ۱/۹ درصد وزنی) و مقادیر جزئی عناصر میکروآلیاژی نظیر وانادیوم، تیتانیوم، آلومینیوم و نیوبیوم جبران می‌شود. عناصر میکروآلیاژی با ریز دانه کردن فولاد منجر به افزایش همزمان استحکام و چقرمگی می‌شوند [۱۱]. عملیات ترمومکانیکی، شامل نورد کنترل شده و سرد کردن سریع می‌باشد.

1- High Strength Low Alloy

2- American Petroleum Institute



نورد کنترل شده در دو مرحله نورد خشن و نورد پرداخت انجام می‌شود. نورد خشن (اولیه)، در دمایی بالاتر از دمای عدم تبلور مجدد انجام می‌گیرد که هدف از این مرحله دستیابی به ریزساختار ریزدانه‌ای از آستنیت تبلور مجدد یافته است. نورد پرداخت (نورد نهایی) در دمایی زیر دمای عدم تبلور مجدد (TNR)^۱ و بالای Ar_3 (دمای شروع تبدیل فاز آستنیت به فریت) انجام می‌گیرد تا ریز ساختار آستنیت کشیده شده^۲ به دست آید. در این ریزساختار با افزایش نسبت مرز به حجم دانه و تشکیل باندهای تغییرشکل، مکان‌های جوانه‌زنی فریت افزایش یافته و امکان ریز دانه شدن فولاد فراهم می‌شود. با سرد کردن سریع از بالای خط Ar_3 تا دمای کلاف پیچی بر مقدار ریزدانه شدن افزوده می‌شود [۱۲].

خوردگی یکی از پرهزینه‌ترین مسائل و مشکلات برای صنعت می‌باشد که سبب اتلاف هزینه‌های بسیار زیاد و صرف وقت و کار نیروی انسانی در این زمینه می‌شود. این هزینه‌ها می‌تواند به‌طور مستقیم در استفاده از رنگ‌ها و مواد بازدارنده در فرآیند خوردگی، تعمیر قطعات فلزی و یا استفاده از فولاد صرف گردد و یا به‌طور غیرمستقیم در هزینه‌های ناشی از خرابی، خطرات زیست‌محیطی، تعطیلی و یا از کار افتادگی یک کارخانه تأثیرگذار باشد. خوردگی مربوط به پروسه‌های عملیاتی شامل انتقال اسیدهای آلی و ذرات سولفور به‌خصوص در دماهای بالاست و خوردگی مربوط به قسمت‌های انتقال آب مربوط به خوردگی در اثر واکنش رطوبت و اکسیژن با فلز است. سیستم تولیدی یک پالایشگاه، نیروی حیاتی آن است. آسیب‌دیدگی در هر مخزن تولیدی، به‌خصوص در خطوط مخازن اصلی هزینه گزافی را به پالایشگاه تحمیل می‌کند که این هزینه‌ها بسیار بالاتر از هزینه نگهداری و حفاظت آن‌ها است. از نظر اقتصادی پالایشگاه‌ها کاملاً وابسته به قیمت بازار جهانی هستند [۱۳].

روش‌های اساسی در زمینه محدود کردن خوردگی ایجاد شده، ایجاد پوشش و محافظت کاتدی است. پوشش‌ها به‌طور طبیعی تمایل دارند تا یک فیلم پیوسته بر روی سطح تشکیل دهند و بتوانند آن را از لحاظ الکتریکی عایق کاری کنند. عملکرد این پوشش‌ها، این است که فلز را از تماس مستقیم با الکترولیت محیطی، محدود می‌کنند و با ایجاد یک مقاومت بالا، از بروز واکنش‌های الکتروشیمیایی، جلوگیری می‌شود [۱۴]. بازدارنده‌ها افزودنی‌هایی هستند که با ایجاد تغییر و تحول بر روی سطح فلزات، محیط و یا هر دو، خوردگی را تحت کنترل درآورده و شیوه عمل آن‌ها ایجاد تغییرات در واکنش‌های آندی، کاتدی و یا هر دو آن‌ها می‌باشد. بازدارنده‌های بسیار زیادی با ترکیبات مختلف موجود می‌باشند، اکثر این مواد با آزمایشات تجربی پیدا شده و اصلاح یافته‌اند و بسیاری از آن‌ها با نام تجاری عرضه می‌گردند. لازم به ذکر است که بازدارنده‌ها از نظر فلز، محیط خورنده، درجه حرارت و غلظت معمولاً منحصر به فرد هستند. غلظت و نوع بازدارنده‌ای که در یک محیط خورنده بایستی استفاده شوند با آزمایش و تجربه تعیین می‌گردند و این گونه اطلاعات را معمولاً از تولید کنندگان آن مواد می‌توان دریافت نمود [۱۵].

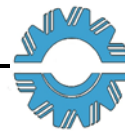
در یک مطالعه اثر بازدارندگی خوردگی بنزومیدازول بر روی فولاد میکروآلیاژی X70 و فولاد Q235 بررسی شده است. تست‌های پلاریزاسیون تافل و امپدانس شیمیایی در محلول خوردگی ۳/۵ درصد کلرید سدیم نشان دادند که راندمان بنزومیدازول برای فولاد میکروآلیاژی X70 برابر با ۹۷/۸ درصد و برای Q235 برابر با ۹۸/۶ درصد است [۱۶]. در تحقیق دیگری که بر روی خوردگی حفره‌ای فولاد میکروآلیاژی X70 انجام شده نتایج نشان داد که ترکیبات Thioureido Imidazoline و $NaNO_2$ در محلول کلرید سدیم بر روی X70 اثر بازدارندگی دارند [۱۷]. پژوهشی بر روی خوردگی الکتروشیمیایی، دینامیک مولکولی ترکیبی، مکانیک کوانتومی و تجزیه و تحلیل XPS از سطح فولاد محافظت شده توسط یک فیلم پیچیده مرکب از نئودیمیم (III) و بنزومیدازول نشان داده که بهترین عملکرد بازدارندگی در حدود ۹۸ درصد است [۱۸].

در این تحقیق با استفاده از آزمون‌های الکتروشیمیایی از قبیل پلاریزاسیون پتانسیو استات و طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) به ترتیب سرعت خوردگی و مکانیزم خوردگی فولادهای X70 محیط ترش با غلظت‌های مختلف بازدارنده‌های بنزومیدازول و متیل‌بنزومیدازول در محلول اسید سولفوریک بررسی می‌گردد.

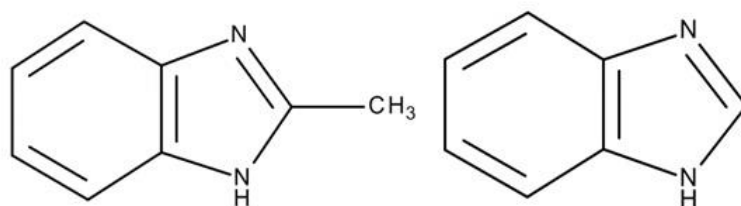
مبانی تجربی

1- No-recrystallization temperature

2- Pan caked



در این پژوهش بازدارنده بنزومیدازول و متیل‌بنزومیدازول از شرکت مرک آلمان تهیه شدند که دارای شماره کارت‌های ۸۲۱۹۵۶، ۸۲۱۹۵۶ و با فرمول شیمیایی $C_7H_6N_2$ ، $C_8H_8N_2$ و وزن مولکولی $118/13 \text{ g/mol}$ و $132/17 \text{ g/mol}$ می‌باشد، همچنین محلول خورنده از شرکت مرک در اندازه مورد نیاز به منظور تهیه یک محلول ۱ مولار اسید سولفوریک تهیه شد که کد محصول ۱۰۰۳۱۷ می‌باشد. ترکیب شیمیایی و ساختار بنزومیدازول و متیل‌بنزومیدازول در شکل (۱) ارائه شده است. در این پژوهش از فولاد میکروآلیاژی X70 محیط ترش به‌عنوان نمونه مورد مطالعه استفاده شد. نمونه‌ها با ابعاد $10 \times 50 \times 100$ میلیمتر تهیه گردید. ترکیب شیمیایی فولاد میکروآلیاژی X70 محیط ترش که توسط کوانتومتری به‌دست آمده در جدول (۱) نشان داده شده است.



(ب)

(الف)

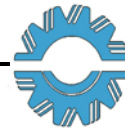
شکل (۱): تصاویر ساختار مولکولی (الف) بنزومیدازول و (ب) متیل‌بنزومیدازول

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد API X70 همراه با مقادیر بیشینه مورد نظر مطابق با استاندارد API 5L

عنصر آلیاژی	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	Mo	Ti	Ni	Cr	V	Cu
درصد وزنی	۰/۰۵	۱/۵	۰/۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱۵	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۲۴	۰/۰۱۸	۰/۱۸۷	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۱
مقدار بیشینه	۰/۲۴	۱/۴	-	۰/۰۲۵	۰/۰۱۵	-	-	-	۰/۰۶	-	-	-	-



شکل (۲): تصاویر نمونه‌های فولاد میکروآلیاژی X70



منحنی‌های پلاریزاسیون پوشش‌ها توسط دستگاه Auto Lab PG ST 302 N به دست آمد. نرخ رویش 1 mV.s^{-1} در محدوده $\pm 500 \text{ mV}$ بود. قبل از شروع اندازه‌گیری پارامتر خوردگی (E_{oc}^1)، هر یک از نمونه‌ها به مدت ۶۰ دقیقه مانیتور گردید تا واکنش سطح نمونه‌ها با محلول به حالت پایدار برسد. نتایج به دست آمده با نرم‌افزار Nova 1.11 مورد آنالیز قرار گرفت. برای محاسبه خوردگی به کمک تست‌های غوطه‌وری و اندازه‌گیری میزان کاهش وزن و محاسبه mpy ، از استاندارد MNL20 ویراست دوم رابرت بابویان استفاده شد. با گذشت ۱۰ روز از قرارگیری نمونه‌ها در محلول خورنده میزان کاهش وزن اندازه‌گیری شد. همچنین از روی مقدار کاهش وزن نمونه در محلول شاهد و محلول حاوی غلظت‌های مختلف بازدارنده و به کمک روابط (۱) و (۲)، راندمان بازدارندگی برای هر کدام از بازدارنده‌ها در غلظت‌های مختلف به دست آمده است [۱۹].

$$\text{mpy} = \frac{(534)(\Delta W)}{(D)(A)(t)} \quad (1)$$

$$IE(\%) = \frac{W_0 - W}{W_0} \quad (2)$$

در رابطه (۱) ΔW میزان وزن از دست رفته به میلی‌گرم، D دانسیته نمونه، A مساحت سطح نمونه به اینچ مربع و t زمان به ساعت است. همچنین در رابطه (۲) W_0 کاهش وزن نمونه غوطه‌ور در محلول شاهد و W کاهش وزن مربوط به نمونه غوطه‌ور در محلول حاوی غلظت‌های مختلف از بازدارنده‌ها است. پس از به دست آوردن غلظت‌های بهینه هر کدام از بازدارنده‌ها، تست غوطه‌وری برای محلولی که دارای مخلوطی از غلظت‌های بهینه برای هر کدام از بازدارنده‌ها است تکرار و مقدار تغییر وزن، مقدار خوردگی و راندمان بازدارندگی به دست آمده است. در نهایت نتایج این تست‌ها با نتایج حاصل از تست‌های الکتروشیمیایی مقایسه و بررسی شدند.

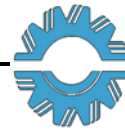
برای مطالعه اثر دمای محلول بر روی راندمان بازدارندگی ترکیبات، از هر دو بازدارنده در غلظت‌های متفاوت به منظور یافتن بهترین میزان غلظت، در دماهای ۲۵، ۴۵ و ۶۵ درجه سانتیگراد پس از یک ساعت غوطه‌وری راندمان آزمون‌های کاهش وزن، پلاریزاسیون و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی بررسی شدند. افزایش دما به کمک هیتر برقی انجام شد. با بررسی این طیف‌ها اثر دما روی راندمان بازدارندگی ترکیبات به دست آمده است.

نتایج و بحث

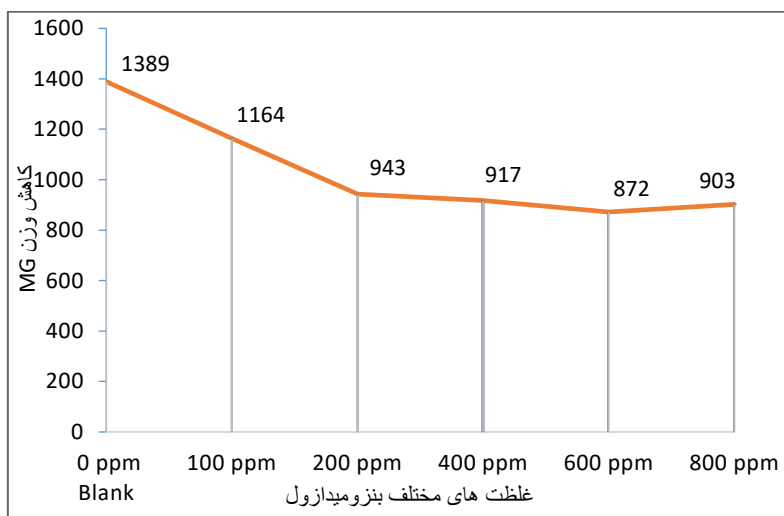
پس از غوطه‌وری نمونه‌ها به مدت ۱۰ روز در محلول‌های حاوی غلظت‌های مختلف بازدارنده‌ها، مقدار کاهش وزن آن‌ها اندازه‌گیری شده که به منظور ایجاد تلاطم از مگنت و استیر با سرعت ۱۵۰ RPM استفاده شده است. با کمک رابطه (۲)، راندمان بازدارندگی برای غلظت‌های مختلف به دست آمد. همچنین مقدار Mpy نیز برای این غلظت‌ها طبق رابطه (۱) محاسبه شده است. نتایج به دست آمده در شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) نشان داده شده‌اند. نتایج کاهش وزن برای نمونه فولاد میکروآلیاژی X70 را حضور محلول خورنده و در زمان حضور و عدم حضور بازدارنده متیل بنزومیدازول در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) ارائه شده است. نتایج نشان داد هر کدام از بازدارنده‌ها دارای یک غلظت بحرانی هستند که با افزایش غلظت به بالاتر از آن مقدار، راندمان بازدارندگی کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت بازدارنده بنزومیدازول تا 600 ppm راندمان بازدارندگی بالا می‌رود که می‌توان دلیل آن را به جذب بیشتر این ترکیب روی سطح فولاد نسبت داد. در واقع با افزایش غلظت، کسر بیشتری از سطح فولاد توسط مولکول‌های بازدارنده پوشیده می‌شود و یون‌های مهاجم به سختی می‌توانند خود را به سطح فلز برسانند و به این صورت مقدار خوردگی کاهش می‌یابد، اما با افزایش غلظت از 600 ppm راندمان بازدارندگی به دلیل واجد این ترکیبات، کاهش می‌یابد. دلیل واجد را می‌توان به این صورت بیان نمود که با افزایش غلظت بازدارنده از یک مقدار بحرانی، بین دمای مولکول‌های بازدارنده که روی سطح جذب شده‌اند، برهم‌کنش دافعه اتفاق می‌افتد. زنجیره‌های هیدروکربنی این یون‌ها (کاتیون‌ها) مستعد به

¹- open circuit potential

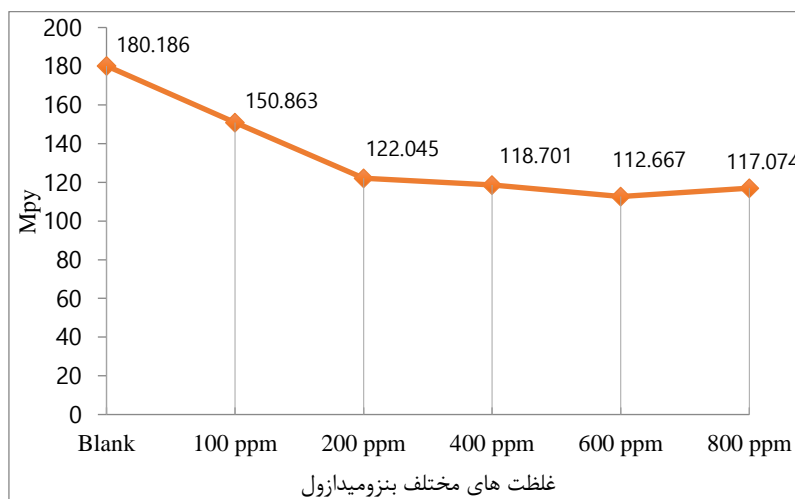
²- mills per year



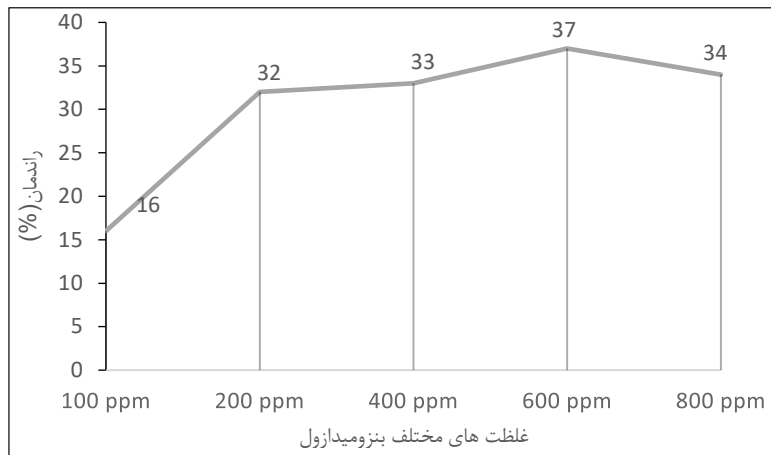
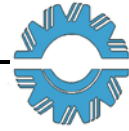
ترک سطح فلز دارند. این اتفاق می‌تواند باعث کاهش کسر پوشش سطح توسط مولکول‌های بازدارنده شود و به این ترتیب راندمان بازدارندگی کاهش می‌یابد [۲۰]. در مورد بازدارنده متیل بنزومیدازول نیز می‌توان همین استدلال را به کار برد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت بازدارنده متیل بنزومیدازول تا ۴۰۰ ppm راندمان بازدارندگی افزایش می‌یابد، اما با بالا رفتن غلظت از ۴۰۰ ppm راندمان کاهش می‌یابد. برای محلول حاوی ترکیبی از غلظت‌های بهینه از هر کدام از بازدارنده‌ها، یعنی ۶۰۰ ppm بنزومیدازول و ۴۰۰ ppm بازدارنده متیل بنزومیدازول، راندمان بازدارندگی بسیار بالا می‌رود که این را به اثر تقویتی این ترکیبات نسبت می‌دهند. یعنی این ترکیبات ضمن ترکیب شدن با هم، کمپلکسی با همدیگر تشکیل نمی‌دهند و هر کدام به صورت جداگانه روی سطح جذب می‌شوند و اثر خود را می‌گذارند.



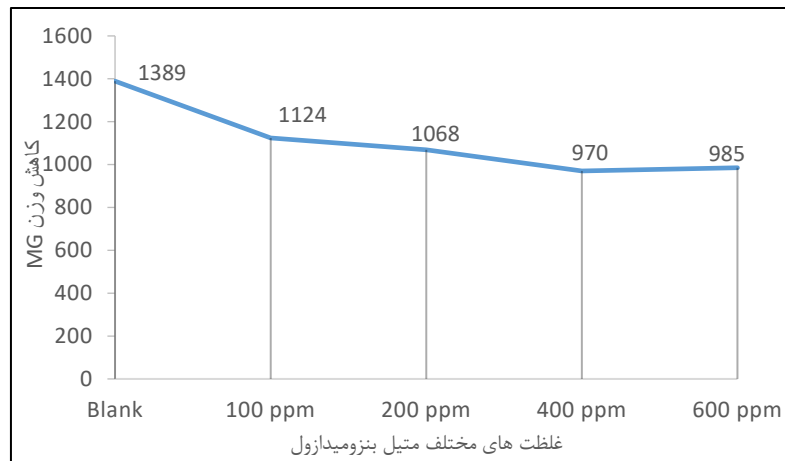
شکل (۳): نمودار کاهش وزن برای محلول حاوی غلظت‌های مختلف بنزومیدازول



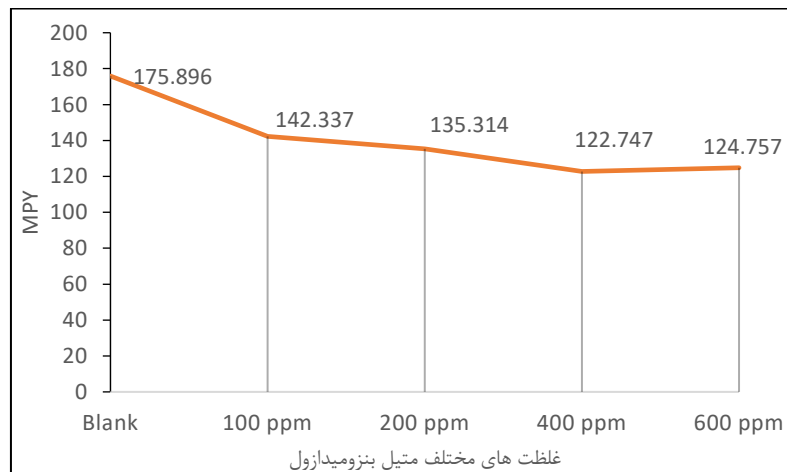
شکل (۴): نمودار سرعت خوردگی برای محلول حاوی غلظت‌های مختلف بنزومیدازول



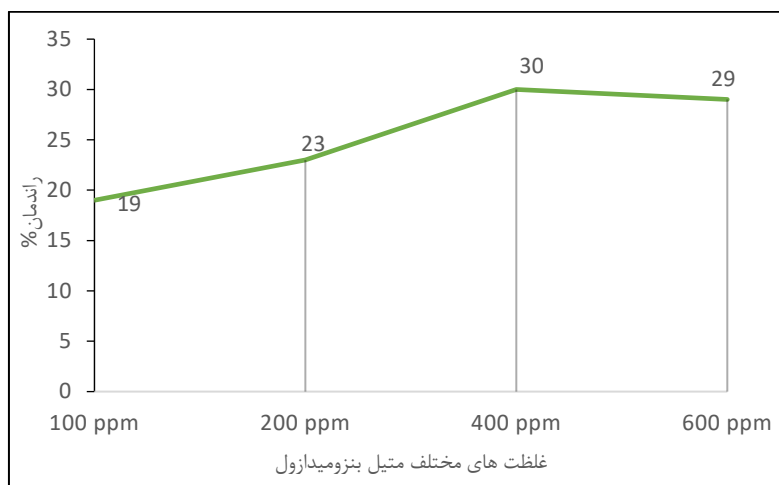
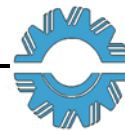
شکل (۵): نمودار راندمان برای محلول حاوی غلظت‌های مختلف بنزومیدازول



شکل (۶): نمودار کاهش وزن برای محلول حاوی غلظت‌های مختلف متیل بنزومیدازول

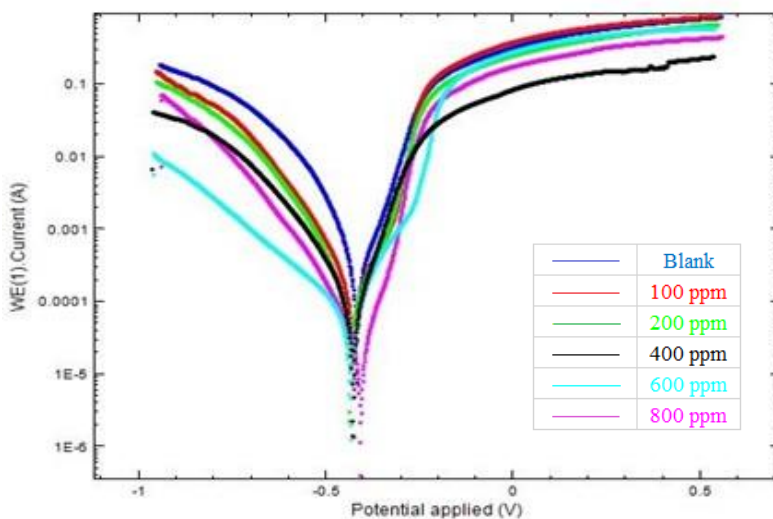
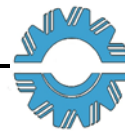


شکل (۷): نمودار سرعت خوردگی برای محلول حاوی غلظت‌های مختلف متیل بنزومیدازول

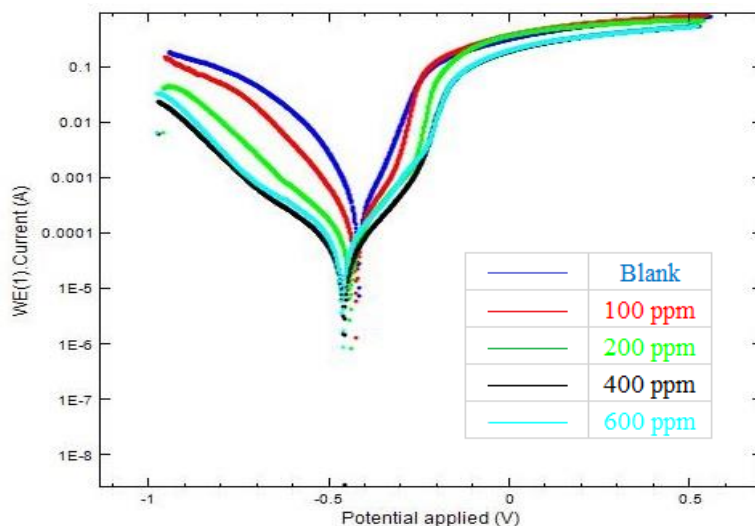


شکل (۸): نمودار راندمان برای محلول حاوی غلظت های مختلف متیل بنزومیدازول

در شکل‌های (۹) و (۱۰) منحنی‌های پلاریزاسیون خوردگی فولادهای میکروآلیاژی X70 در حضور دو بازدارنده بنزومیدازول و متیل بنزومیدازول در محلول اسید سولفوریک ۱ مولار ارائه شده‌اند. همچنین پارامترهای الکتروشیمیایی استخراج شده از این منحنی‌ها از قبیل پتانسیل خوردگی (E_{corr})، دانسیته جریان خوردگی (i_{corr})، شیب‌های تافل آندی و کاتدی، راندمان بازدارندگی که با استفاده از روش اکستراپولاسیون تافل حاصل شدند. در شکل (۹) مشاهده می‌شود که بازدارنده بنزومیدازول با غلظت ۶۰۰ ppm باعث ایجاد پهنای محافظ سطحی شده است. در مورد متیل بنزومیدازول مشاهده می‌شود که بازدارنده سبب ایجاد پهنای محافظ بر روی سطح قطعه می‌گردد همچنین از آنجا که با افزایش بازدارنده یک سیر یکنواخت را طی می‌کند دارای پایداری مناسبی است. می‌توان نتیجه‌گیری نمود که از آنجا که قسمت کاتدی نمودارها پلاریزاسیون دارای امتداد در راستای یکدیگر هستند و در شکل‌های (۹) و (۱۰) اینگونه نشان داده می‌شود که افزایش یون هیدروژن مثبت تحت پلاریزاسیون اکتیواسیون است و مکانیزم احیای یون‌های هیدروژن مثبت روی سطح فولاد میکروآلیاژی X70 به همراه بازدارنده بنزومیدازول چندان تحت تأثیر حضور بازدارنده‌ها قرار نمی‌گیرد در صورتی که با اضافه شدن بازدارنده متیل بنزومیدازول شاخه کاتدی دچار تغییر شده و یک پهنای محافظ ایجاد می‌کند که می‌توان در مقیاس خیلی کم در بازدارنده بنزومیدازول و غلظت ۶۰۰ ppm آن را مشاهده نمود. تغییرات ایجاد شده در مقادیر β_c در اثر افزایش بازدارنده‌ها نشان دهنده تأثیر مولکول‌های بازدارنده بر سینتیک تصاعد هیدروژن می‌باشد. مقاومت به خوردگی یا به‌طور دقیق‌تر کاهش میزان انتقال الکترون در فولاد میکروآلیاژی X70 با افزایش هر دو بازدارنده در میزان غلظت آن‌ها بهبود می‌یابد. شاخه‌های تافل آندی الکتروود کاری در محلول‌های اسید سولفوریک حاوی بازدارنده در جهت کاهش جریان جابجا شده که ثابت می‌کند این ترکیبات می‌توانند واکنش انحلال آندی فولاد میکروآلیاژی X70 را نیز مختل سازند. با بالا رفتن غلظت بازدارنده به دلیل ایجاد مقادیر بالاتر پوشش سطحی، بازدارندگی در هر دو واکنش آندی و کاتدی به مقدار بیشتری افزایش می‌یابد. این نتایج دلالت بر جذب مولکول‌های بازدارنده بر روی سطوح فعال فلز دارد. به وضوح مشخص است که در دمای اتاق هر دو بازدارنده با افزایش میزان آن‌ها در محلول خوردگی باعث بهبود مقاومت به خوردگی می‌شوند این مساله در شکل‌های (۹) و (۱۰) مشخص است و بازدارنده‌ها دارای یک کارایی مناسب در دمای محیط هستند.



شکل (۹): منحنی پلاریزاسیون فولاد میکروآلیاژی X70 در محلول اسید سولفوریک ۱ مولار در زمان حضور و عدم حضور بازدارنده بنزومیدازول در دمای 25°C



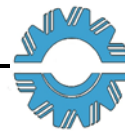
شکل (۱۰): منحنی پلاریزاسیون فولاد میکروآلیاژی X70 در محلول اسید سولفوریک ۱ مولار در زمان حضور و عدم حضور بازدارنده متیل بنزومیدازول در دمای 25°C

نتیجه گیری

بهترین راندمان بازدارندگی بنزومیدازول برابر با ۶۰۰ ppm و متیل بنزومیدازول ۴۰۰ ppm می باشد. در حالت ترکیبی و کمپلس این دو محلول توانایی افزایش بهبود راندمان خوردگی تا ۷۳ درصد را دارند. افزایش یون هیدروژن مثبت تحت پلاریزاسیون اکتیواسیون است و مکانیزم احیای یون های هیدروژن مثبت روی سطح فولاد میکروآلیاژی X70 به همراه بازدارنده بنزومیدازول چندان تحت تأثیر حضور بازدارنده‌ها قرار نمی گیرد. در صورتی که با اضافه شدن بازدارنده متیل بنزومیدازول شاخه کاتدی دچار تغییر شده و یک لایه محافظ ایجاد می کند. تأثیر مولکول های بازدارنده بر سینتیک تصاعد هیدروژن می باشد. هر دو بازدارنده بنزومیدازول و متیل بنزومیدازول می توانند واکنش انحلال فولاد میکروآلیاژی X70 را نیز مختل سازند.

مراجع

- [1] Verlinden, B., Driver, J., Samajdar, I. and Doherty, R.D., (2007). Thermo-mechanical processing of metallic materials. Elsevier. 11, pp 423-431.



- [2] Davis, J., (2001). Alloying. Understanding the Basics, ASM International, Materials Park, OH, pp44073-0002.
- [3] Faizabadi, M.J., Khalaj, G., Pouraliakbar, H. and Jandaghi, M.R., (2014). Predictions of toughness and hardness by using chemical composition and tensile properties in microalloyed line pipe steels. *Neural Computing and Applications*, 25(7), pp1993-1999.
- [4] Reip, C.P., Shanmugam, S. and Misra, R.D.K., (2006). High strength microalloyed CMn (V-Nb-Ti) and CMn (V-Nb) pipeline steels processed through CSP thin-slab technology: Microstructure, Precipitation and Mechanical Properties. *Materials Science and Engineering: A*, 424(1-2), pp 307-317.
- [5] Smith, Y., Coldren, A. and Cryderman, R., (1972). Toward improved ductility and toughness. Climax Molybdenum Company (Japan) Ltd., Tokyo, 119.
- [6] Xiao, F., Liao, B., Ren, D., Shan, Y. and Yang, K., (2005). Acicular ferritic microstructure of a low-carbon Mn-Mo-Nb microalloyed pipeline steel. *Materials Characterization*, 54(4-5), pp 305-314.
- [7] Bakkaloglu, A., (2002). Effect of processing parameters on the microstructure and properties of an Nb microalloyed steel. *Materials Letters*, 56(3), pp 200-209.
- [8] Jiao, D.T., Cai, Q.W., Wu, H.B. and Ren, Y., (2010). Effect of Nb on austenite recrystallization in high temperature deformation process. *Journal of Iron and Steel Research International*, 17(8), pp 39-44.
- [9] Hashemi, S.H. and Mohammadyani, D., (2012). Characterisation of weldment hardness, impact energy and microstructure in API X65 steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 98, pp 8-15.
- [10] Calvo, J., Jung, I.H., Elwazri, A.M., Bai, D. and Yue, S., (2009). Influence of the chemical composition on transformation behaviour of low carbon microalloyed steels. *Materials Science and Engineering: A*, 520(1-2), pp 90-96.
- [11] Korczak, P., (2004). Modeling of steel microstructure evolution during thermo-mechanical rolling of plate for conveying pipes. *Journal of Materials Processing Technology*, 153, pp 432-435.
- [12] Anijdan, S.M. and Yue, S. (2011). The necessity of dynamic precipitation for the occurrence of non-recrystallization temperature in Nb-microalloyed steel. *Materials Science and Engineering: A*, 528(3), pp 803-807.
- [13] Touir, R., Cenoui, M., El Bakri, M. and Touhami, M.E., 2008. Sodium gluconate as corrosion and scale inhibitor of ordinary steel in simulated cooling water. *Corrosion Science*, 50(6), pp 1530-1537.
- [14] Heitz, E ., (1974). Corrosion of metals in organic solvents, in *Advances in Corrosion Science and Technology*, pp 149-243.
- [15] Aljourani, J., M. Golozar, and K. Raeissi, (2010). The inhibition of carbon steel corrosion in hydrochloric and sulfuric acid media using some benzimidazole derivatives. *Materials chemistry and physics*, 121(1-2), pp 320-325.
- [16] Zhang, H.H., Gao, K., Yan, L. and Pang, X., (2017). Inhibition of the corrosion of X70 and Q235 steel in CO₂-saturated brine by imidazoline-based inhibitor. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 791, pp 83-94.
- [17] Zuo, Y., Yang, L., Tan, Y., Wang, Y. and Zhao, J., (2017). The effects of thioureido imidazoline and NaNO₂ on passivation and pitting corrosion of X70 steel in acidic NaCl solution. *Corrosion Science*, 120, pp 99-106.
- [18] Ralkhal, S., Shahrabi, T., Ramezanzadeh, B. and Bahlakeh, G., (2019). A combined electrochemical, molecular dynamics, quantum mechanics and XPS analysis of the mild steel surface protected by a complex film composed of neodymium (III) and benzimidazole. *Applied Surface Science*, 464, pp 178-194.
- [19] Amin, M.A. and Khaled, K.F., (2010). Monitoring corrosion and corrosion control of iron in HCl by non-ionic surfactants of the TRITON-X series-Part I. Tafel polarisation, ICP-AES and EFM studies. *Corrosion science*, 52(5), pp 1762-1770.
- [20] Dutta, A., Saha, S.K., Adhikari, U., Banerjee, P. and Sukul, D., (2017). Effect of substitution on corrosion inhibition properties of 2-(substituted phenyl) benzimidazole derivatives on mild steel in 1 M HCl solution: a combined experimental and theoretical approach. *Corrosion Science*, 123, pp 256-266.