

## مطالعه‌ی الکتروشیمیایی بازدارندگی یکی از مشتقات ایمیدازولین بر خوردگی CO<sub>2</sub> فولاد کربنی ساده و اثر یون‌های ید بر عملکرد آن

مهدی حیدری<sup>۱</sup> و مهدی جاویدی\*<sup>۲</sup>

### چکیده

در این پژوهش، بازدارندگی یکی از مشتقات ایمیدازولین بر خوردگی CO<sub>2</sub> فولاد کربنی ساده و اثر یون‌های ید بر عملکرد آن با استفاده از آزمون پتانسیودینامیک در محدوده‌ی تافل مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان دهنده‌ی بازدارندگی ایمیدازولین در محلول ۳ درصد کلرید سدیم اشباع شده با CO<sub>2</sub> در برابر خوردگی شیرین فولاد کربنی ساده بوده است. همچنین، مشاهده گردید که ایمیدازولین از جمله بازدارنده‌های آندی-کاتدی بوده و بازده‌ی بازدارندگی آن وابسته به غلظت است و با افزایش غلظت آن در محلول افزایش می‌یابد. افزودن KI ۰/۲٪ به سامانه باعث افزایش بازده‌ی ایمیدازولین شده و اثر هم‌افزایی بین KI و ایمیدازولین مشاهده گردید. همچنین، پارامتر هم‌افزایی محاسبه شده بزرگ‌تر از واحد بود که تایید کننده‌ی اثر هم‌افزایی در نتیجه‌ی ترکیب ایمیدازولین و یدید پتاسیم می‌باشد. جذب مولکول‌های بازدارنده‌ی ایمیدازولین روی سطح فولاد به تنهایی و در حضور KI ۰/۲٪ از ایزوترم جذب لانگمویر پیروی کرده و جذب آن روی سطح به صورت شیمیایی بوده است. بررسی سطح نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نشان دهنده‌ی تشکیل فیلم محافظ در حضور ایمیدازولین و یکنواخت تر شدن آن به دلیل افزودن یدید پتاسیم به سیستم بود.

**واژه‌های کلیدی:** خوردگی شیرین، فولاد کربنی ساده، ایمیدازولین، تافل، لانگمویر.

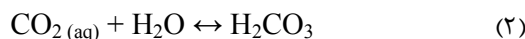
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، گرایش خوردگی و حفاظت از مواد، بخش مهندسی مواد، دانشگاه شیراز.

۲- استادیار، بخش مهندسی مواد، دانشگاه شیراز

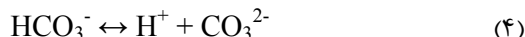
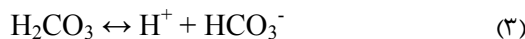
\*- نویسنده‌ی مسؤل مقاله: mjavidy@yahoo.com

## پیشگفتار

فولادهای کربنی به گونه‌ای گسترده در صنایع استخراج و انتقال نفت و گاز بکار می‌روند. هرچند مقاومت به خوردگی فولادها پایین است، اما به دلایل اقتصادی به دیگر فولادها ترجیح داده می‌شوند. یکی از معمول‌ترین و خورنده‌ترین محیط‌های موجود در صنایع نفت و گاز، محیط‌های حاوی سیالی است که دارای غلظت بالایی از یون‌های کلر و دی‌اکسید کربن است [۲۰]. این نوع الکترولیت موجب یکی از جدی‌ترین انواع خوردگی، خوردگی CO<sub>2</sub> (که معمولاً خوردگی شیرین نیز خوانده می‌شود)، می‌گردد [۳]. خوردگی CO<sub>2</sub> رایج‌ترین نوع خوردگی در صنایع نفت و گاز بشمار می‌رود. مکانیزم خوردگی فولاد در محیط‌های آبی حاوی دی‌اکسید کربن پیچیده بوده و نظریه‌های گوناگونی در مورد آن وجود دارد [۴]. روی هم رفته، ابتدا گاز CO<sub>2</sub> در آب حل شده و اسید کربنیک تولید می‌شود.



سپس اسید کربنیک بدست آمده به بی‌کربنات هیدرولیز شده که خود نیز می‌تواند دوباره تجزیه شود.



بنابراین، واکنش‌های کاتدی ممکن، شامل احیای اسید کربنیک تجزیه نشده و احیای هیدروژن به صورت زیر خواهد بود:



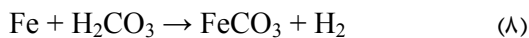
در حالی که واکنش آندی، اکسیداسیون آهن می‌باشد:



این‌که آیا اسید کربنیک به صورت مستقیم روی سطح فلز احیاء می‌شود یا نه، هنوز مورد بحث می‌باشد، زیرا تجزیه‌ی اسید کربنیک به هیدروژن سریع‌تر از نفوذ آن به سطح فلز می‌باشد. اگر اسید کربنیک بتواند روی سطح فلز تجزیه شود، می‌تواند به عنوان یک منبع اضافی برای یون‌های هیدروژن عمل کند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که انحلال‌پذیری کربنات آهن در آب حاوی نمک با افزایش دما کاهش می‌یابد [۵]. بسته به ترکیب محلول، فشار و

دمای سیستم، این کربنات آهن می‌تواند منجر به تشکیل یک لایه‌ی محافظ شود [۵].

واکنش کلی به صورت زیر خواهد بود:



البته در حضور یون‌های کلر، سولفید و اکسیژن، محصولات خوردگی دیگری به صورت مایع یا گاز می‌توانند تشکیل شود [۵ و ۴].

استفاده از فولادهای کربنی به همراه بازدارنده‌های خوردگی در صنعت نفت و گاز در مقایسه با استفاده از فولاد با مقاومت به خوردگی بالاتر و یا افزایش ضخامت، اقتصادی‌تر است [۶]. عموماً در صنایع نفت و گاز، استفاده از بازدارنده‌های آلی که در ترکیب آن‌ها عناصر گروه ۵ و ۶ جدول تناوبی شرکت دارند، بویژه ترکیبات آلی نیتروژن دار با رشته‌های طویل هیدروکربنی مثل آمین‌ها<sup>۱</sup>، پلی‌آمین‌ها<sup>۲</sup>، دی‌آمین‌ها<sup>۳</sup>، آمیدها<sup>۴</sup>، ایمیدازولین<sup>۵</sup>، بنزیمیدازول<sup>۶</sup> و هم‌چنین، اسید چرب آلیفاتیک<sup>۷</sup> و رزین<sup>۸</sup> متداول است [۷]. از انواع گوناگونی از مشتقات ایمیدازولین به گونه‌ای گسترده برای کنترل خوردگی CO<sub>2</sub> استفاده می‌شود. پارامترهای گوناگونی از جمله سرعت سیال، دما و فشار سیستم، غلظت بازکننده، زمان غوطه‌وری، نوع و ترکیب فولاد، حضور اسید استیک و دیگر یون‌ها از جمله کلر و کلسیم بر بازدارندگی خوردگی CO<sub>2</sub> در صنعت نفت گاز موثرند [۸-۱۵]. نقش بازدارندگی ترکیبات ایمیدازولین به جذب سطحی آن‌ها در سطح مشترک فلز-محلول نسبت داده می‌شود. هم‌چنین، این گونه گزارش شده که مقدار جذب سطحی این بازدارنده‌های آلی به شدت تحت تاثیر طبیعت و بار سطحی فلز، نوع جذب، ساختار شیمیایی بازدارنده، دما و فشار واکنش، سرعت سیال و ترکیب محیط خورنده می‌باشد. دو نوع مکانیزم جذب سطحی شامل جذب فیزیکی (جذب الکترواستاتیکی بین فلز باردار و

1 -Amines

2 -Polyamines

3 -Diamines

4 -Amides

5 -Imidazoline

6 -Benzimidazole

7 -Aliphatic Fatty Acid

8 -Rezin

### آماده سازی محلول

محلول آزمایش شامل ۳۵۰ میلی لیتر از محلول ۳ درصد کلرید سدیم بود که به وسیله‌ی دمش گاز نیتروژن به مدت ۲ ساعت اکسیژن زدایی شده و سپس به وسیله‌ی دمش گاز CO<sub>2</sub> به مدت ۲ ساعت از دی اکسید کربن اشباع شده بود. محلول آزمایش در حین انجام آزمایش‌ها به وسیله‌ی دمش پیوسته گاز CO<sub>2</sub> در فشار اتمسفر به صورت اشباع شده از CO<sub>2</sub> نگاه داشته شد. آب مقطر بکار رفته در کلیه آزمایش‌ها، آب مقطر دوبار تقطیر شده بود. با توجه به آب مقطر بکار رفته که pH آن در حدود ۶/۵ تا ۷ بود، pH محلول پس از دمش گاز دی اکسید کربن بین ۳/۹ تا ۴/۵ بود که به وسیله‌ی اسید هیدروکلریدریک و هیدروکسید سدیم pH محلول به ۴ رسید. pH به وسیله‌ی دستگاه اندازه گیری pH با دقت  $\pm 0.1$  که به وسیله‌ی دو محلول بافر ۴ و ۷ کالیبره شده بود، اندازه‌گیری شد. همه‌ی آزمایش‌ها در pH=۴ انجام گرفت. بازدارنده بکار رفته در این پژوهش یکی از مشتقات ایمیدازولین (IH) بود که در ابتدا با غلظت ۱۰۰۰ ppm در حلال گازوئیل آماده گردید. بمنظور مطالعه‌ی اثر یون هالید بر رفتار و عملکرد ایمیدازولین بر خوردگی CO<sub>2</sub> از نمک KI استفاده شد.

### روند عملی پژوهش

آزمایش‌ها در یک سل شیشه‌ای سه الکترودی با اکترودم کمکی از جنس پلاتین و الکترودم مرجع Ag/AgCl انجام گرفت. سل شیشه‌ای با محلول آزمایش پر شده و به وسیله‌ی گاز نیتروژن اکسیژن زدایی و توسط گاز CO<sub>2</sub> اشباع گردید. در مرحله بعد، پتانسیل مدار باز اندازه‌گیری شد و این اندازه‌گیری تا ثابت شدن پتانسیل ادامه یافت. پس از ۹۰ دقیقه غوطه‌وری، آزمون پتانسیودینامیک در محدوده‌ی تافل با دامنه‌ی  $\pm 300$  mv نسبت به پتانسیل مدار باز و نرخ اسکن ۱ mV/s انجام گردید. همه‌ی آزمایش‌ها در دمای اتاق انجام گرفت.

مولکول‌های باردار بازدارنده) و جذب شیمیایی (اشتراک یا انتقال بار از مولکول‌های بازدارنده به سطح) می‌باشد [۱۷ و ۱۶].

هم افزایی<sup>۱</sup> یکی از مهم‌ترین پدیده‌های بازدارندگی خوردگی مدرن است که هدف از آن کاهش مقدار مصرف بازدارنده مورد استفاده با افزودن ترکیبات و مواد سازگار با محیط زیست می‌باشد. از جمله‌ی این ترکیبات می‌توان به نمک‌های هالید اشاره کرد. توافق عمومی بر تاثیر مثبت هالیدها بر بازدارندگی بازدارنده‌های آلی در محیط‌های اسیدی می‌باشد. پژوهشگران متعددی اثر مثبت یون‌های ید (I) را بر عملکرد بازدارنده‌های آلی گوناگون در محیط اسیدی برای فولاد نشان داده اند [۱۸-۲۴].

در این پژوهش بازدارندگی یکی از ترکیبات ایمیدازولین (IM) بر خوردگی CO<sub>2</sub> فولاد کربنی API 5L X52 که یکی از فولادهای پرکاربرد در ساخت خطوط لوله نفت و گاز می‌باشد، به وسیله‌ی تست‌های الکتروشیمیایی بررسی گردید. هم‌چنین، اثر اضافه شدن یون ید به سیستم و تاثیر آن بر عملکرد این بازدارنده در غلظت‌های گوناگون مورد مطالعه قرار گرفت. در آخر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ریخت شناسی سطح قطعه بررسی گردید.

### آزمایش‌ها

#### آماده سازی نمونه

در این پژوهش فولاد API 5L X52 از خط لوله انتقال گاز نمونه‌برداری شد. ترکیب این فولاد در جدول ۱ آورده شده است. نمونه‌های تهیه شده به سیم مسی لحیم و مانع شدند، به گونه‌ای که مساحت در معرض محلول ۱ cm<sup>2</sup> باشد. سپس به خوبی به وسیله‌ی سنباده‌های کاربرد سیلیسیم تا شماره‌ی ۸۰۰ به صورت تر پولیش شدند و سپس به وسیله‌ی آب مقطر شستشو و به وسیله‌ی استون چربی زدایی گردیدند و در هوای اتاق خشک شدند.

<sup>1</sup>- Synergism

## نتایج و بحث

## بازدارندگی با ایمیدازولین

در شکل ۱ نمودارهای پلاریزاسون برای فولاد API 5L X52 در محلول ۳ درصد کلرید سدیم اشباع شده با CO<sub>2</sub> در غیاب (Blank) و در حضور غلظت‌های گوناگون بازدارنده ایمیدازولین نشان داده شده است. پارامترهای الکتروشیمیایی بدست آمده از این نمودارها در جدول ۲ آورده شده است. بازدهی بازدارندگی با رابطه‌ی زیر محاسبه شد:

$$\eta\% = [(i_{\text{corr}}^0 - i_{\text{corr}}) / i_{\text{corr}}^0] \times 100 \quad (9)$$

که در آن  $i_{\text{corr}}$  و  $i_{\text{corr}}^0$  به ترتیب چگالی جریان خوردگی در حضور و در غیاب بازدارنده است. با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که در حضور بازدارنده ایمیدازولین به طور کلی شیب شاخه‌ی آندی و کاتدی و پتانسیل خوردگی نسبت به حالت بدون بازدارنده تغییر زیادی نداشته و چگالی جریان خوردگی کاهش یافته که این نشان دهنده‌ی اثر مختلط کاتدی و آندی این بازدارنده است، هرچند در غلظت‌های بالاتر بازدارنده شیب شاخه آندی کمی افزایش یافته و شیب شاخه‌ی کاتدی اندکی کاهش را نشان می‌دهد، پس می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر مهم این بازدارنده بر کاهش چگالی جریان‌های تبدالی هر دو نوع واکنش آندی و کاتدی می‌باشد که تاثیر بیش‌تر آن بر واکنش کاتدی موجب اندکی منفی‌تر شدن پتانسیل خوردگی شده است. مکانیزم این اثر را می‌توان جذب بازدارنده در فصل مشترک فلز/ محلول و بنابراین، کاهش سرعت انتقال یون فلزی بین فلز و محلول دانست. اگرچه تغییر شیب شاخه‌ی آندی و کاتدی در غلظت‌های بالاتر ایمیدازولین، نشان می‌دهد که بازدارنده در غلظت‌های بالا افزون بر تاثیر بر مکان‌های فعال روی سطح، بر سینتیک واکنش نیز تاثیر گذاشته است. هم‌چنین، بازدهی بازدارندگی با افزایش غلظت ایمیدازولین روندی افزایشی داشته که این نشان دهنده‌ی وابسته بودن بازدهی آن به غلظت می‌باشد. نتایج مشابهی به وسیله‌ی سایر پژوهشگران در کنترل خوردگی با استفاده از مشتقات ایمیدازولین در محیط‌های اسیدی گزارش شده است [۲۸، ۱۶ و ۸۰۳].

## تاثیر یون‌های ید

در شکل ۲ نمودارهای پلاریزاسون برای فولاد API 5L X52 در محلول ۳ درصد کلرید سدیم اشباع شده با CO<sub>2</sub> در غیاب و در حضور غلظت‌های گوناگون بازدارنده‌ی ایمیدازولین و KI ۰/۲٪ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ و پارامترهای پلاریزاسون نشان داده شده در جدول ۲ مشاهده می‌شود که بازدارنده‌ی ایمیدازولین در حضور KI ۰/۲٪ تاثیر اندکی بر شیب‌های تافل داشته و افزایش غلظت این بازدارنده موجب منفی‌تر شدن پتانسیل خوردگی و کاهش چگالی جریان خوردگی می‌شود. منفی‌تر شدن پتانسیل خوردگی به علت جذب سطحی یون‌های I<sup>-</sup> بر روی سطح فولاد می‌باشد [۱۶].

با توجه به نتایج جدول ۲ مشاهده می‌شود که بازده IM در حضور یون‌های ید نسبت به حالتی که از IM به تنهایی استفاده شده، افزایش یافته که این نشان دهنده‌ی اثر هم‌افزایی<sup>۱</sup> بین ایمیدازولین و یدید پتاسیم می‌باشد. یون‌های ید موجب افزایش جذب مولکول‌های ایمیدازولین شده اند (جذب باهم)<sup>۲</sup> [۱۶ و ۱۹].

## اثر هم‌افزایی بین IM و KI

برای بررسی بیش‌تر اثر دو بازدارنده بر عملکرد یکدیگر در یک محیط خورنده از پارامتر هم‌افزایی<sup>۳</sup> (S) استفاده می‌شود که به صورت زیر بیان می‌شود [۲۵]:

$$S = (1 - \theta_{1,2}^{\text{calc}}) / (1 - \theta_{1,2}^{\text{meas}}) \quad (10)$$

که در آن  $\theta_{1,2}^{\text{calc}}$  اثر بازدارندگی محاسبه شده در حضور دو بازدارنده است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\theta_{1,2}^{\text{calc}} = \theta_1 + \theta_2 - (\theta_1 \theta_2) \quad (11)$$

که در آن  $\theta_1 = 1 - i_1/i_0$ ،  $\theta_2 = 1 - i_2/i_0$  و  $\theta_{1,2}^{\text{meas}} = 1 - i_{1,2}/i_0$  می‌باشد و  $i_1$  و  $i_2$  به ترتیب چگالی جریان خوردگی در حضور ترکیب بازدارنده‌ی ۱ و ۲ به تنهایی و  $i_{1,2}$  چگالی جریان خوردگی در حضور دو بازدارنده باهم می‌باشد.  $i_0$  نیز چگالی جریان خوردگی در غیاب بازدارنده و در محلول Blank است. در واقع، فرمول ۱۰ نرخ

<sup>1</sup> -Synergistic effect

<sup>2</sup> -Co-adsorption

<sup>3</sup> -Synergistic Parameter

که در آن  $C$  غلظت بازدارنده در سیستم،  $\theta$  فاکتور پوشش دهی سطح و  $K_{ads}$  ثابت تعادلی واکنش جذب سطحی بازدارنده می باشد. پیروی از مکانیزم جذب ایزوترم لانگمویر بیانگر آن است که هیچ فعل و انفعالی بین مولکول های جذب شده ایمیدازولین بر روی سطح فولاد وجود ندارد، [۳۲]. در نتیجه می توان رابطه بین  $C/\theta$  و  $C$  را می توان به صورت زیر نشان داد:

$$C/\theta = 0.9587 C + 8.5936 \quad (14)$$

با مقایسه بین رابطه ۱۳ و ۱۴ می توان  $K_{ads} = 0.116$  بدست آورد. رابطه بین  $K_{ads}$  و  $\Delta G^0_{ads}$  با رابطه زیر نشان داده می شود:

$$K_{ads} = (1/55.5) \exp(-\Delta G^0_{ads} / RT) \quad (15)$$

که در آن  $R$  ثابت جهانی گازها و برابر با  $8.31447 \text{ J/K.mol}$  بوده و هم چنین،  $T$  دما بر حسب کلونین می باشد. مقدار  $55/5$  غلظت آب در محلول بر حسب مول بر لیتر می باشد [۱۶ و ۱۹ و ۲۷ و ۳۳]. با قرار دادن  $K_{ads}$  در فرمول بالا  $\Delta G^0_{ads} = -37/86 \text{ kJ/mol}$  بدست آمد. منفی بودن و مقدار زیاد  $\Delta G^0_{ads}$  بدست آمده نشان دهنده‌ی آن است که از نظر ترمودینامیکی جذب سطحی ایمیدازولین امکان پذیر است و جذب آن به خوبی انجام می شود. به طور کلی  $\Delta G^0_{ads} = -20 \text{ kJ/mol}$  را مرز بین جذب سطحی فیزیکی و شیمیایی می دانند [۳]. بنابراین، جذب ایمیدازولین روی سطح فولاد عمدتاً به صورت شیمیایی می باشد.

شکل ۵ نسبت  $C/\theta$  را بر حسب  $C$  برای غلظت های گوناگون ایمیدازولین در حضور  $0.2\% \text{ KI}$  نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، جذب ایمیدازولین در حضور  $0.2\% \text{ KI}$  نیز از ایزوترم لانگمویر تبعیت می کند. ثابت تعادلی جذب سطحی  $K_{ads} = 0.225$  و  $\Delta G^0_{ads} = -39/81 \text{ kJ/mol}$  بدست آمد که نشان می دهد افزودن یدید پتاسیم به سیستم باعث افزایش ثابت تعادلی جذب سطحی و هم چنین، افزایش مقدار  $\Delta G^0_{ads}$  می شود. مقدار کم افزایش در  $\Delta G^0_{ads}$  نشان دهنده‌ی این است که بازدارندگی در حالت  $\text{IM} + \text{KI}$  بیش تر مربوط به جذب ایمیدازولین می باشد، اگرچه افزایش  $\Delta G^0_{ads}$  بیانگر این مطلب است که یون های ید باعث پایدارتر شدن جذب مولکول های ایمیدازولین شده است.

خوردگی مورد انتظار تئوری (صورت کسر) که بر اساس نرخ خوردگی در حضور هریک از بازدارنده ها به تنهایی محاسبه می شود را با نرخ خوردگی اندازه گیری شده در حضور همزمان دو بازدارنده (مخرج کسر) مقایسه می کند [۲۵ و ۲۶ و ۲۷]. پارامتر هم افزایی را می توان به صورت زیر ساده سازی کرد:

$$S = (i_1 i_2) / (i_{1,2} i_0) \quad (12)$$

هرگاه  $S > 1$  شود، نشان دهنده اثر هم افزایی دو ممانعت کننده بوده و هنگامی که  $S < 1$  می شود، بدین معنی است که حضور دو ممانعت کننده با هم باعث غالب شدن اثر ضد هم بودن می شود که این ممکن است به دلیل جذب سطحی بصورت رقابتی باشد [۱۸ و ۲۰ و ۲۳ و ۲۹ و ۳۱].

در جدول ۳ فاکتور  $S$  برای سه غلظت متفاوت از بازدارنده ایمیدازولین و  $0.2\% \text{ KI}$  با توجه به چگالی جریان خوردگی بدست آمده از منحنی های پلاریزاسیون تافل آورده شده که نشان می دهد پارامتر  $S$  در شرایط اضافه کردن  $0.2\% \text{ KI}$  به غلظتهای  $50, 75, 100 \text{ ppm}$  بزرگ تر از یک می باشد. این نتایج نشان دهنده اثر هم افزایی این دو ممانعت کننده است. اثر هم افزایی بین ایمیدازولین و یدید پتاسیم را می توان با توجه به این نکته توضیح داد که یون های ید موجب تثبیت جذب سطحی ایمیدازولین می شود و همین امر موجب افزایش بازدهی  $\text{IM}$  در حضور  $\text{KI}$  شده است [۱۸ و ۲۰ و ۳۰].

### ۳-۴- ایزوترم جذب

شکل ۳ فاکتور پوشش دهی سطح ( $\theta$ ) برای غلظت های گوناگون بازدارنده ایمیدازولین بر حسب غلظت مورد استفاده با توجه به بازده بازدارندگی بدست آمده از آزمون تافل را نشان می دهد که در آن  $\theta = \eta / 100$  می باشد. با بررسی و تطبیق نتایج بدست آمده با ایزوترم های گوناگون جذب مشاهده شد که جذب این بازدارنده از ایزوترم لانگمویر پیروی می کند که بصورت زیر نشان داده می شود، شکل ۴:

$$C/\theta = 1/K_{ads} + C \quad (13)$$

### بررسی ریخت شناسی سطح

ریخت شناسی سطح نمونه‌های فولاد API 5L X52 در محلول ۳ درصد کلرید سدیم اشباع شده از دی اکسید کربن در غیاب و در حضور ۵۰ ppm IM و ۰/۲% KI + ۵۰ ppm IM در pH=۴ و در دمای ۲۵°C و پس از ۲ ساعت غوطه وری به وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی (SEM) بررسی شد. نتایج بدست آمده در شکل ۶ نشان داده شده است. در نبود بازدارنده‌ی ایمیدازولین به دلیل خوردگی سریع به وسیله‌ی محلول اشباع شده از دی اکسید کربن سطحی خشن مشاهده می‌شود. خوردگی در این حالت نسبتاً یکنواخت بوده و نشانه‌ی آن از خوردگی موضعی مشاهده نمی‌شود. در حضور بازدارنده ایمیدازولین (۵۰ ppm) و همچنین، در حالتی که یدید پتاسیم به سیستم اضافه شده است (KI ۰/۲% + ۵۰ ppm IM)، زبری سطح فولاد کاهش یافته که این نشان دهنده‌ی تشکیل فیلم روی سطح فلز و اثر بازدارندگی آن است. با بررسی دقیق تر شکل ۶ بنظر می‌رسد که فیلم تشکیل شده در حضور KI ۰/۲% + ۵۰ ppm IM بسیار فشرده تر از فیلم تشکیل شده به وسیله‌ی ایمیدازولین به تنهایی است. این اثر می‌تواند مربوط به اثر همزمان<sup>۱</sup> بین مولکول‌های ایمیدازولین و یون‌های ید باشد [۳۳ و ۳۴].

### نتیجه گیری

بررسی‌های الکتروشیمیایی به روش پتانسیودینامیک و محاسبه‌ی بازده بازدارندگی، فاکتور پوشش نشان دهنده‌ی بازدارندگی ترکیب ایمیدازولین در محلول ۳ درصد کلرید سدیم اشباع شده با CO<sub>2</sub> در برابر خوردگی شیرین فولاد API 5L X52 است. بازده‌ی بازدارندگی ایمیدازولین وابسته به غلظت آن در سیستم بوده و با افزایش غلظت آن در محلول افزایش می‌یابد. افزودن KI ۰/۲% به سیستم باعث افزایش بازده‌ی ایمیدازولین شده و اثر هم افزایی بین یدید پتاسیم و ایمیدازولین مشاهده گردید. همچنین، پارامتر هم افزایی محاسبه شده بزرگ‌تر از واحد بود که تایید کننده‌ی اثر هم افزایی در نتیجه‌ی ترکیب ایمیدازولین و یدید پتاسیم می‌باشد. جذب مولکول‌های

بازدارنده‌ی ایمیدازولین روی سطح فولاد به تنهایی و در حضور KI ۰/۲% از ایزوترم جذب لانگمویر پیروی می‌کند.

### قدردانی

در پایان، نویسندگان این مقاله از مسئولان آزمایشگاه بخش مهندسی مواد قدردانی می‌کنند. همچنین، از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شیراز و دانشکده‌ی مهندسی که هزینه‌های این پروژه را از راه گرانت 90-GR-ENG-104 به دکتر جاویدی پرداخت نمودند، قدردانی می‌شود.

<sup>1</sup>-Co-operative

## منابع

- 1- D.A. Lopez, S.N. Simison, S.R. de Sanchez, "Inhibitors performance in CO<sub>2</sub> corrosion EIS studies on the interaction between their molecular structure and steel microstructure", *Corrosion Science*, Vol. 47, pp. 735-755, 2004.
- 2- D.A. Lopez, W.H. Schreiner, S.R. de Sanchez, S.N. Simison, "The influence of inhibitors molecular structure and steel microstructure on corrosion layers in CO<sub>2</sub> corrosion An XPS and SEM characterization", *Applied Surface Science*, Vol. 236, pp. 77-97, 2004.
- 3- X. Zhang, F. Wang, Y. He, Y. Du, "Study of the inhibition mechanism of imidazoline amide on CO<sub>2</sub> corrosion of armco iron", *Corrosion Science*, Vol. 43, pp. 1417-1431, 2001.
- 4- M. B. Kermani, L. A. Smith, CO<sub>2</sub> corrosion in oil and gas production, The Institute of Materials, p. 4, London, 1997.
- 5- K. S. George, "Electrochemical investigation of carbon dioxide corrosion of mild steel in the presence of acetic acid", M.S. thesis presented to the faculty of the Fritz. J. and Dolores H. Russ College of Engineering and Technology of Ohio University, 2003.
- 6- J. W. Palmer, The Use of Corrosion Inhibitors in Oil and Gas Production, Maney , London, 2004.
- 7- H. Chaghervand, , "Investigation of effective parameters on service operation of injected corrosion inhibitors in gas wells and pipelines" MS. Thesis in Materials Science and Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran, 2010.
- 8- G. Zhang, C. Chena, M. Lub, C. Chai, Y. Wu, "Evaluation of inhibition efficiency of an imidazoline derivative in CO<sub>2</sub>-containing aqueous solution", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 105, pp. 331-340, 2007.
- 9- T. Hong, Y. H. Sun, W. P. Jepson, "Study on corrosion inhibitor in large pipelines under multiphase flow using EIS", *Corrosion Science*, Vol. 44, pp. 101-112, 2002.
- 10- Y. Chen, W. P. Jepson, "EIS measurement for corrosion monitoring under multiphase flow conditions", *Electrochimica Acta*, Vol. 44, pp. 4453-4464, 1999.
- 11- T. Hong, W. P. Jepson, "Corrosion inhibitor studies in large flow loop at high temperature and high pressure", *Corrosion Science*, Vol. 47, pp. 1839-1849, 2001.
- 12- Y. Chen, T. Hong, M. Gopal, W. P. Jepson, "EIS studies of a corrosion inhibitor behavior under multiphase flow conditions", *Corrosion Science*, Vol. 42, pp. 979-990, 2000.
- 13- Seala, S., Sapre, K., Kale, A., Desai, V., Gopal, M., Jepson, W.P., "Effect of multiphase flow on corrosion of C-steel in presence of inhibitor: a surface morphological and chemical study", *Corrosion Science*, Vol. 42, pp. 1623-1634, 2000.
- 14- P. C. Okafor, C. B. Liu, Y. G. Zheng, "Corrosion inhibition and adsorption behavior of imidazoline salt on N80 carbon steel in CO<sub>2</sub>-saturated solutions and its synergism with thiourea", *Journal of Solid State Chemistry*, Vol. 14, pp. 1367-1376, 2010.
- 15- W. H. Durnie, B. J. Kinsela, R. De Marco, A. Jefferson, "A study of adsorption properties of commercial carbon dioxide corrosion inhibitor" *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 31, pp. 1221-1226, 2001.
- 16- P. C. Okafor, Y. Zheng, "Synergistic inhibition behaviour of methylbenzyl quaternary imidazoline derivative and iodide ions on mild steel in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions", *Corrosion Science*, Vol. 51, pp. 850-859, 2009.
- 17- X. Jiang, Y. G. Zheng, W. Ke, "Effect of flow velocity and entrained sand on inhibition performances of two inhibitors for CO<sub>2</sub> corrosion of N80 steel in 3% NaCl solution", *Corrosion science*, Vol. 47, pp. 2636-2658, 2005.
- 18- M. Bouklah, B. Hammouti, A. Aouniti, M. Benkaddour, A. Bouyanzer, "Synergistic effect of iodide ions on the corrosion inhibition of steel in 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> by new chalcone derivatives", *Applied Surface Science*, Vol. 252, pp. 6236-6242, 2006.
- 19- E. E. Oguzie, Y. Li, F. H. Wang, "Corrosion inhibition and adsorption behavior of methionine on mild steel in sulfuric acid and synergistic effect of iodide ion", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 310, pp. 90-98, 2007.
- 20- E. E. Ebenso, H. Alemu, S. A. Umoren, I. B. Obot, "Inhibition of Mild Steel Corrosion in Sulphuric Acid Using Alizarin Yellow GG Dye and Synergistic Iodide Additive", *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 3, pp. 1325-1339, 2008.

- 21- I. B. Obot, "Synergistic Effect of Nizoral and Iodide Ions on the Corrosion Inhibition of Mild Steel in Sulphuric Acid Solution", *Portugaliae Electrochimica Acta*, Vol. 27, pp. 539-553, 2009.
- 22- S. Khan, "Synergistic Effect of Potassium Iodide on Inhibitive Performance of Thiadiazoles During Corrosion of Mild Steel in 20% Sulfuric Acid", *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 35, pp. 71-82, 2010.
- 23- N. caliskan, S. Bilgic, "Effect of iodide ions on the synergistic inhibition of the corrosion of manganese-14 steel in acidic media", *Applied Surface Science*, Vol. 153, pp. 128-133, 2000.
- 24- S. A. Umoren, Y. Li, F. H. Wang, "Electrochemical study of corrosion inhibition and adsorption behaviour for pure iron by polyacrylamide in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: Synergistic effect of iodide ions", *Corrosion Science*, Vol. 52, pp. 1777-1786, 2010.
- 25- E. Kalman, I. Felhosi, F. H. Karman, I. Lukovits, J. Telegdi, G. Palinkas, "Environmentally Friendly Corrosion Inhibitors, in Corrosion and Environmental Degradation", *Materials Science and Technology*, Vol. 1, pp. 471-537, 2000.
- 26- U. M. Eduok, S. A. Umoren, A. P. Udoh, "Synergistic inhibition effects between leaves and stem extracts of *Sida acuta* and iodide ion for mild steel corrosion in 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions", *Arabian Journal of Chemistry*, In Press, 2010.
- 27- S. A. Umoren, I. B. Obot, I. O. Igwe, "Synergistic Inhibition Between Polyvinylpyrrolidone and Iodide Ions on Corrosion of Aluminium in HCl, *The Open Corrosion Journal*, Vol. 2, pp. 1-7, 2009.
- 28- A. Khavasfar, M. H. Moayed, A. H. Jafari, "an investigation on the performance of an imidazoline based commercial corrosion inhibitor on CO<sub>2</sub> corrosion of mild steel", *IJE Transactions A: Basics*, Vol. 20, pp. 35-44, 2007.
- 29- S. A. Umoren, M. M. Solomon, "Effect of HALIDE IONS ADDITIVES ON THE CORROSION INHIBITION OF ALUMINUM IN HCl BY POLYACRYLAMIDE", *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 35, pp. 115-129, 2010.
- 30- A. R. Yazdzad, T. Shahrabi, M. G. Hosseini, "Inhibition of 3003 aluminum alloy corrosion by propargyl alcohol and tartrate ion and their synergistic effects in 0.5% NaCl solution, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 109, pp. 199-205, 2008.
- 31- L. Larabi, Y. Harek, M. Traisnel, A. Mansri, "Synergistic influence of poly(4-vinylpyridine) and potassium iodide on inhibition of corrosion of mild steel in 1M HCl", *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 34, pp. 833-839, 2004.
- 32- I. Zaafarany, M. Abdallah, "Ethoxylated Fatty Amide as Corrosion Inhibitors for Carbon Steel in Hydrochloric Acid Solution", *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 5, pp. 18-28, 2010.
- 33- P. C. Okafor, X. Liu, Y. G. Zheng, "Corrosion inhibition of mild steel by ethylamino imidazoline derivative in CO<sub>2</sub>-saturated solution", *Corrosion Science*, Vol. 51, pp. 761-768, 2009.
- 34- F. Farel, A. Ramirez, "Carbon Dioxide Corrosion Inhibition of Carbon Steels Through Bis-imidazoline and Imidazoline compounds by EIS", *Journal of Electrochemical Science*, Vol. 5, pp. 797-814, 2010.

## پیوست‌ها

جدول ۱- ترکیب شیمیایی نمونه‌های فولادی API 5L X52

عنصر	کربن	سیلیسیم	مولیبدن	فسفر	گوگرد	آلومینیوم	مس	نیوبیوم	نیکل
درصد وزنی	۰/۰۹	۰/۱۸۶	۰/۸۶۷	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۰۱۶	۰/۰۱	۰/۰۲۳	۰/۰۱۶

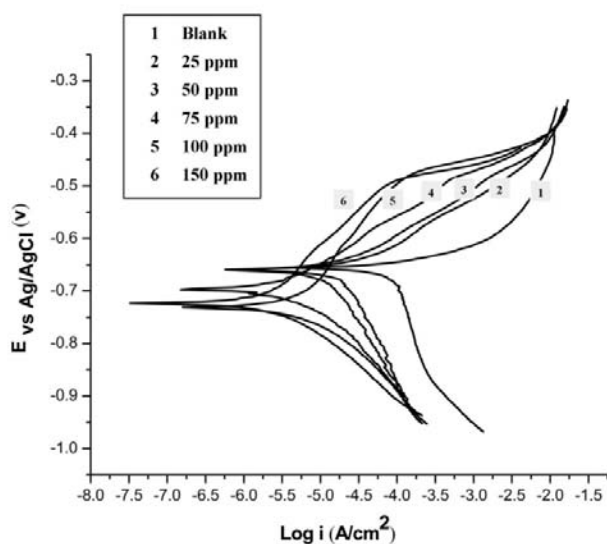


جدول ۲- پارامترهای مربوط به پلاریزاسیون برای خوردگی فولاد API 5L X52 در محلول ۳ درصد کلرید سدیم اشباع شده از CO<sub>2</sub> در غیاب و در حضور بازدارنده ایمیدازولین و در حضور KI ۰/۲% بعد از ۹۰ دقیقه غوطه وری و در pH= ۴ و در دمای ۲۵ °C.

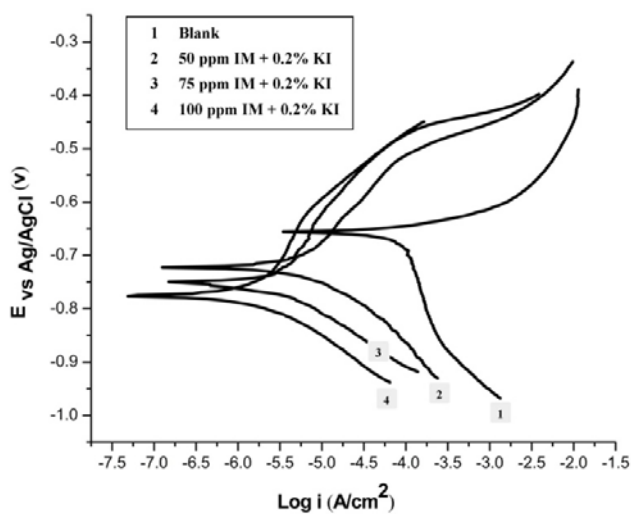
سیستم	پتانسیل خوردگی (V Ag/AgCl)	چگالی جریان خوردگی (A/cm <sup>2</sup> )	بازده بازدارندگی (%)
بدون بازدارنده	-۰/۶۵۶	۹/۱۱*۱۰ <sup>-۵</sup>	-
۲۵ ppm IM	-۰/۶۶۱	۲/۰۶*۱۰ <sup>-۵</sup>	۷۷/۴۱
۵۰ ppm IM	-۰/۶۶۴	۱/۳۶*۱۰ <sup>-۵</sup>	۸۵/۰۷
۷۵ ppm IM	-۰/۶۹۵	۳/۸۵*۱۰ <sup>-۶</sup>	۹۵/۷۷
۱۰۰ ppm IM	-۰/۶۶۰	۳/۴۲*۱۰ <sup>-۶</sup>	۹۶/۲۴
۱۵۰ ppm IM	-۰/۷۲۲	۱/۸۷۵*۱۰ <sup>-۶</sup>	۹۷/۹۴
۵۰ ppm IM + ۰/۲ % KI	-۰/۷۲۳	۵/۲۵*۱۰ <sup>-۶</sup>	۹۴/۲۳
۷۵ ppm IM + ۰/۲ % KI	-۰/۷۵۱	۲/۷۳*۱۰ <sup>-۶</sup>	۹۷
۱۰۰ ppm IM + ۰/۲ % KI	-۰/۷۷۵	۱/۸۸*۱۰ <sup>-۶</sup>	۹۷/۹۴
۰/۲ % KI	-۰/۶۶۳	۷/۰۱۵*۱۰ <sup>-۵</sup>	۲۳

جدول ۳- پارامتر هم افزایی برای غلظت های گوناگون ایمیدازولین و KI ۰/۲%، در محلول ۳ درصد کلرید سدیم اشباع شده با CO<sub>2</sub>، برای فولاد کربنی ساده.

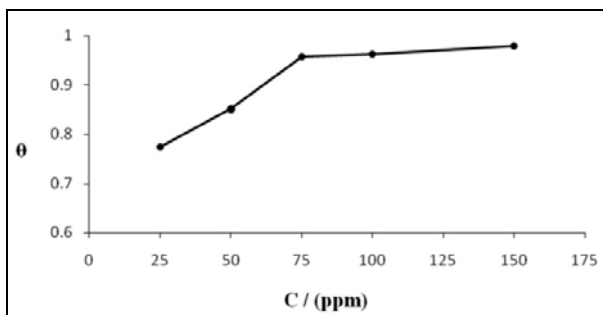
سیستم	S
۵۰ ppm IM + ۰/۲ % KI	۱/۹۹
۷۵ ppm IM + ۰/۲ % KI	۱/۰۹
۱۰۰ ppm IM + ۰/۲ % KI	۱/۴



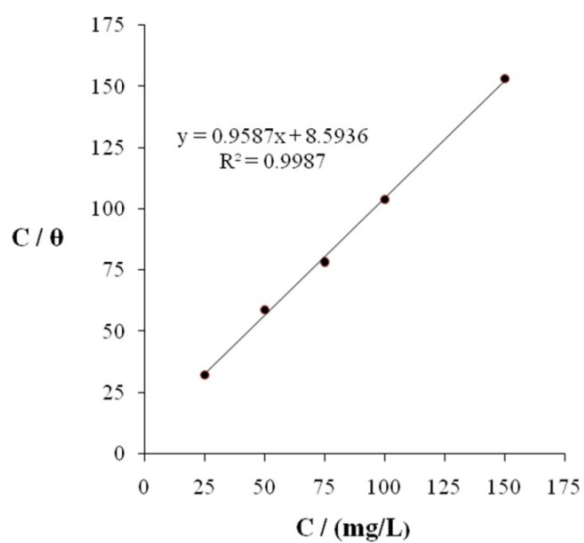
شکل ۱- نمودرهای پلاریزاسیون برای فولاد API 5L X52 در محلول ۳ درصد کلرید سدیم اشباع شده از  $\text{CO}_2$  در غیاب و در حضور بازدارنده ایمیدازولین و در حضور  $\text{KI}$  ۰/۲٪ بعد از ۹۰ دقیقه غوطه وری و در  $\text{pH}=4$  و در دمای  $25^\circ\text{C}$ .



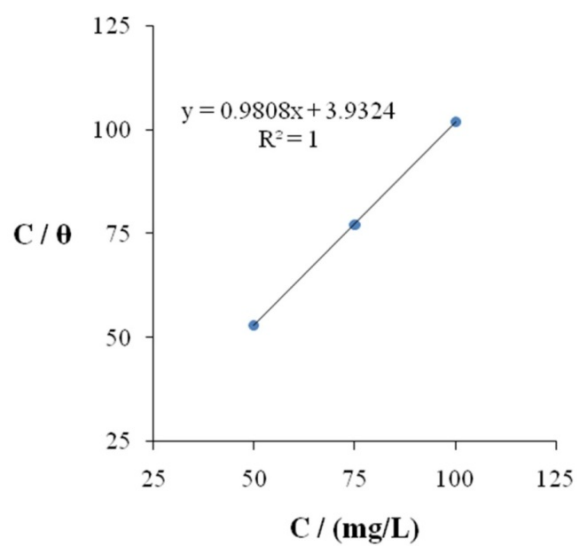
شکل ۲- نمودرهای پلاریزاسیون برای فولاد API 5L X52 در محلول ۳ درصد کلرید سدیم اشباع شده از  $\text{CO}_2$  در غیاب و در حضور بازدارنده ایمیدازولین و در حضور  $\text{KI}$  ۰/۲٪ بعد از ۹۰ دقیقه غوطه وری و در  $\text{pH}=4$  و در دمای  $25^\circ\text{C}$ .



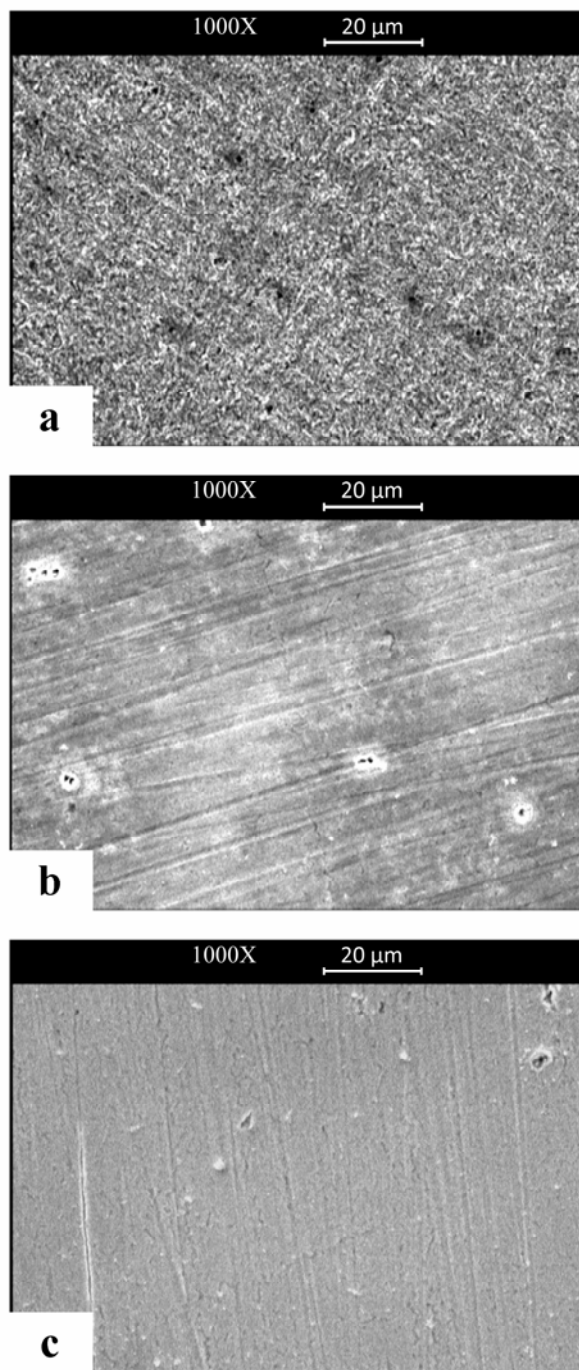
شکل ۳- نمودار درصد بازدارندگی ایمیدازولین بر حسب غلظت برای فولاد API 5L X52 در محلول ۳ درصد کلرید سدیم اشباع شده از دی اکسید کربن.



شکل ۴- ایزوترم لانگمویر برای فولاد API 5L X52 در محلول ۳ درصد کلرید سدیم اشباع شده از CO<sub>2</sub> حاوی ایمیدازولین.



شکل ۵- ایزوترم لانگمویر برای فولاد API 5L X52 در محلول ۳ درصد کلرید سدیم اشباع شده از CO<sub>2</sub> حاوی ایمیدازولین و ۰/۲% KI



شکل ۶- تصویر SEM سطح فولاد API 5L X52 در محلول ۳ درصد کلرید سدیم اشباع شده از دی اکسید کربن (a) در غیاب بازدارنده (b) در حضور ۵۰ ppm IM (c) ۵۰ ppm IM + ۰/۲% KI بعد از ۲ ساعت غوطه وری.

