

بررسی رفتار خوردگی فولاد کربنی و فولاد زنگ نزن ۳۱۶ در محلول amDEA مورد استفاده در فرایند جذب/دفع دی‌اکسید کربن

فرشته عادل مهربان^{۱*}، رویا سعیدی^۱، محسن مرادمندا^۲، محمد ژبانی^۳ و کیوان رئیسی^۱

۱- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- واحد تحقیق و توسعه، شرکت پالایش نفت اصفهان

۳- دانشکده علوم پایه بخش شیمی، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۵/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۲۹)

چکیده: یکی از چالش‌های مطرح در واحد شیرین‌سازی گاز در پالایشگاه‌ها، خوردگی اجزاء در محلول آمین در چرخش در طی فرایند حذف CO₂ است. از این‌رو در پژوهش حاضر، آزمون‌های الکتروشیمیایی (پلاریزاسیون تافل و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی) جهت بررسی رفتار خوردگی فولادهای کربنی و زنگ نزن ۳۱۶ در محلول متیل دی‌اتانول آمین فعال شده با پیرازین موجود در فرایند جذب/دفع CO₂ واحد تولید هیدروژن پالایشگاه اصفهان شامل جذب‌کننده (Rich)، ریژنراتور (Lean) و نیز محلول تازه ساخته شده، به‌کار گرفته شدند. آزمون‌ها در دمای ثابت ۶۵ درجه سانتی‌گراد انجام شدند. در غیاب CO₂، رفتار پاسیو برای هر دو فولاد کربنی و زنگ نزن ۳۱۶ مشاهده شد. کمترین مقاومت به خوردگی این فولادها در محلول Rich مشاهده شد که به دلیل کمترین مقدار pH و بیشترین مقدار هدایت ویژه این محلول در مقایسه با محلول‌های Lean و تازه ساخته شده بود. با دمش گاز CO₂ در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد، خوردگی فولاد کربنی به صورت اکتیو در آمد درحالی‌که رفتار پاسیو فولاد زنگ نزن ۳۱۶ حفظ شد. هر دو فولاد مقاومت به خوردگی کمتری را در محلول Rich ارائه دادند.

واژه‌های کلیدی: محلول amDEA، خوردگی، پاسیواسیون، فولاد کربنی، فولاد زنگ نزن ۳۱۶.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: fe.adelmehraban@gmail.com

Evaluation of the Corrosion Performance of Carbon Steel and 316 Stainless Steel in aMDEA Solution Used in the CO₂ Absorption/Desorption Process

F. Adel-Mehraban^{1*}, R. Saeidi¹, M. Moradmand², M. Zhiani³ and K. Raeissi¹

1- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran

2- R&D Center, Isfahan Oil Refinery Co., Isfahan, Iran

3- Department of Chemistry, Tarbiat Modares University, P.O. Box 14115-111, Tehran, Iran

ABSTRACT

One of the major challenges in natural gas sweetening plants is the corrosion of components in amine solution during the CO₂ removal process. In this study, electrochemical tests (Tafel polarization and electrochemical impedance spectroscopy) were employed to evaluate the corrosion performance of carbon steel and stainless steel 316 in the aMDEA solution present in the CO₂ absorption/desorption process of hydrogen generation unit in Isfahan refinery, including the absorber (rich) and regenerator (lean), as well as freshly made solution. The tests were performed at a constant temperature of 65 °C. Passive behavior was observed for both carbon and 316 stainless steels in the absence of CO₂. The lowest corrosion resistance of these steels was observed in the rich solution due to the lowest pH and the highest specific conductivity compared to the lean and freshly made solutions. The carbon steel corroded actively by the purging of CO₂ at a temperature of 65 °C while the passive behavior of 316 stainless steel was maintained. Both steels exhibited lower corrosion resistance in the rich solution.

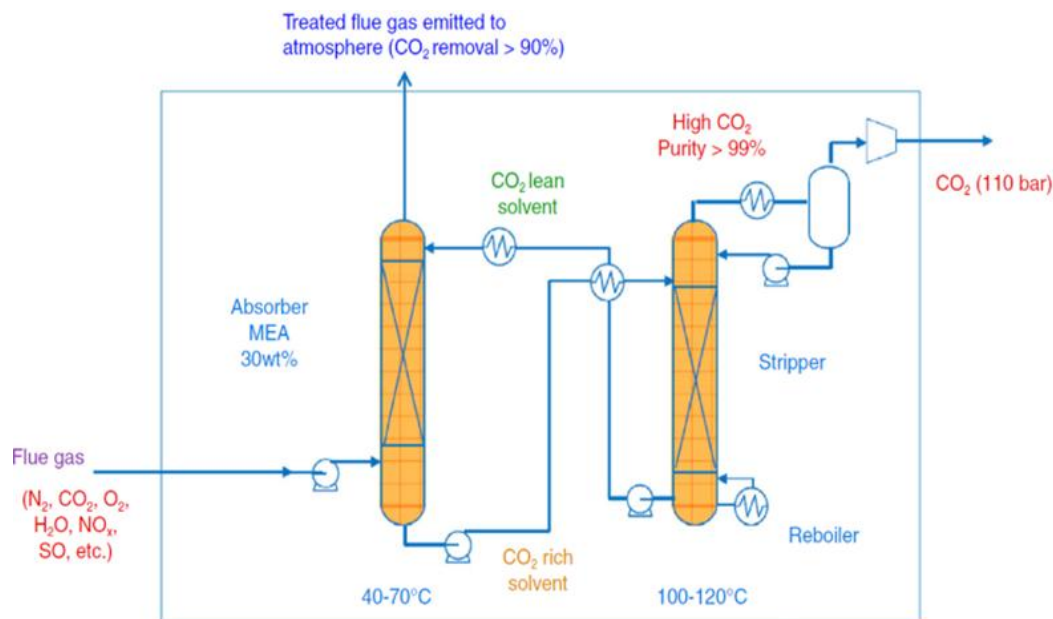
Keywords: aMDEA solution, Corrosion, Passivation, Carbon steel, 304 stainless steel.

۱- مقدمه

فقیر) است. سپس محلول توسط مبدل حرارتی سرد می‌شود و به بالای برج جذب کننده برگردانیده می‌شود تا سیکل جدید خود را آغاز کند. سپس گاز CO₂ خالص در بالای ریژنراتور جمع‌آوری می‌شود (۱).

MDEA، به‌عنوان یک آمین نوع سوم برای جذب و دفع CO₂، به علت هزینه پایین، توانایی جذب بالا، تمایل پایین به دی‌گریز شدن و مصرف انرژی پایین در فرایند باز تولید، در مقایسه با آمین‌های نوع اول و دوم، مورد توجه قرار گرفته است (۲ و ۳). با این حال، به علت پایین بودن سینتیک جذب CO₂ توسط این آمین (۴)، استفاده ترکیبی از آلکانوآمین‌ها و یا استفاده از فعال‌سازها به‌عنوان یک راهکار مؤثر می‌باشد (۵ و ۶). در این راستا، استفاده از متیل دی‌اتانول آمین فعال شده با پیرازین^۱ به علت راندمان و پایداری بالا مورد توجه محققین است (۷ و ۸). با این‌که آمین‌ها ذاتاً خورنده نیستند، یکی از چالش‌های مطرح در واحد آمین، خوردگی اجزاء در موقعیت‌های گوناگونی از واحد شیرین‌سازی گاز نظیر کف جذب کننده، مبدل فقیر/غنی^{۱۱}، ریژنراتور^{۱۲} و ریسیولر^{۱۳} است.

فرایند حذف دی‌اکسید کربن (CO₂) در تصفیه گاز یکی از فرایندهای رایج است که در آن از محلول‌هایی نظیر دی‌اتانول آمین^۱، مونواتانول آمین^۲، تری‌اتانول آمین^۳، متیل دی‌اتانول آمین^۴ و ۲-آمینو-۲-متیل-۱-پروپانول^۵ برای جذب CO₂ استفاده می‌شود. در این فرایند، همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، محلول آمین فقیر^۶ از بالای برج وارد می‌شود و واکنش‌های شیمیایی بین آمین و CO₂ انجام می‌شود. سپس، از خروجی مایع در کف جذب کننده، محلول غنی از گاز اسید (آمین غنی^۷) خارج می‌شود. در بالای جذب کننده، گاز خروجی عاری از CO₂ است (۱). سپس آمین غنی در دمای ۹۰-۱۱۰ درجه سانتی‌گراد توسط یک مبدل حرارتی^۸ پیش گرم می‌شود و به بالای برج ریژنراتور (عریان کننده^۹) انتقال می‌یابد. در این قسمت از واحد، دمای محلول توسط بخار بالاتر می‌رود و در محدوده ۱۲۰-۱۳۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد که در این شرایط CO₂ محلول رها می‌شود. در خروجی مایع ریژنراتور، محلول داغ است و حاوی کمترین مقدار گاز اسیدی (آمین



شکل ۱- طرحواره‌ای از فرایند جذب CO₂ در واحد آمین (۱).

به افزایش یون‌های CO_3^{2-} و HCO_3^- در محلول با تشدید واکنش CO_2 با آب نسبت دادند. کمبل و همکارانش (۱۲) تشکیل لایه‌های سدرایت^{۱۴} (FeCO_3) بر روی فولاد کم کربن را عامل حفاظت آن در برابر خوردگی در محلول MDEA عنوان کردند. نتایج مشابهی توسط یو و همکارانش (۱۰) برای فولاد کربنی در محلول amDEA گزارش شد.

چوی و همکارانش (۱۳) تأثیر اکسیژن و نمک‌های پایدار حرارتی^{۱۵} را بر خوردگی فولاد کربنی در محلول MDEA بررسی کردند. نتایج آزمون‌های الکتروشیمیایی در تحقیق آن‌ها نشان داد که علی‌رغم آن‌که حضور CO_2 تأثیر قابل توجهی در افزایش نرخ خوردگی فولاد کربنی دارد، حضور O_2 و HSS تأثیر چندانی بر آن ندارد. این در حالی است که پناهی و همکارانش (۲) گزارش کردند که حضور HSS در محلول amDEA خوردگی موضعی و تشکیل ترک را در فولادهای زنگ نزن ۳۰۴ و ۳۱۶ به همراه دارد. ژیانگ و همکارانش (۱۴) رفتار خوردگی فولاد کربنی را در شرایط ریژنراتور (فشار و دمای کاری بالا) بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که در حضور O_2 و HSS نرخ خوردگی فولاد کربنی در شرایط غلظت

بررسی‌ها نشان می‌دهد که ۲۵٪ از هزینه تعمیرات و نگهداری کارخانه‌ها صرف کنترل خوردگی در واحد آمین می‌شود (۹). همچنین خوردگی، بیش از نیمی از فعالیت‌های تعمیراتی را به خود اختصاص می‌دهد. بنابراین، منطقی است که توجه زیادی به خوردگی در تحقیق و توسعه واحد آمین گردد. خوردگی آمین‌ها به علت اندرکنش آن‌ها با گازهای اسیدی نظیر CO_2 اتفاق می‌افتد (۱۰). در این راستا، انحلال گاز اسیدی و دما از مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر خوردگی می‌باشند.

در سال‌های اخیر، تحقیقات محدودی در زمینه خوردگی فولادهای کربنی و زنگ نزن در محلول MDEA و amDEA انجام شده است. ژائو و همکارانش (۱۱) تأثیر میزان CO_2 ، حضور اکسیژن (O_2) و دما را بر خوردگی فولاد کربنی و زنگ نزن در محلول بررسی کردند. نتایج پژوهش این محققان نشان داد که حضور O_2 و CO_2 هر دو منجر به افزایش نرخ خوردگی در فولاد کربنی و افزایش چگالی جریان پاسیو در فولاد زنگ نزن می‌شود، با این حال، حضور O_2 تنها زمانی بر خوردگی تأثیر داشت که CO_2 در محلول وجود داشت. این محققان علت افزایش چگالی جریان خوردگی فولاد را با افزایش میزان CO_2

۰/۰۲% و باقیمانده Fe) در محلول ۳۵ درصد وزنی aMDEA حاوی ۶ درصد وزنی پیرازین در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها قبل از انجام آزمون بدین صورت بود که ابتدا ورق‌هایی از جنس فولادهای مذکور به مساحت ۲ سانتی‌متر مربع بریده شدند و پس از سوراخ‌زنی در مقطع و برقراری اتصال با سیم مسی روکش‌دار، محل اتصال توسط نوار تفلون عایق شد. سپس سطح نمونه‌ها تا سنباده ۱۲۰۰ آماده‌سازی و با الکل شسته و خشک شد. محلول‌های در چرخش از برج‌های جذب‌کننده و ریژنراتور و نیز محلول تازه ساخته شده مورد استفاده قرار گرفتند.

آزمون‌های پلاریزاسیون تافل^{۱۶} و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی^{۱۷} با استفاده از پتانسیواستات/گالوانواستات EG&G مدل A263 (ساخت آمریکا) انجام گرفت. آزمون‌ها در یک سل سه الکترودی استاندارد خوردگی با الکتروود مرجع^{۱۸} نقره/کلرید نقره الکتروود و پلاتین به‌عنوان الکتروود مقابل^{۱۹} در دو شرایط غیاب و تحت دمش گاز CO₂ انجام شدند. کنترل دمای محلول با قرار دادن سل در حمام آب و توسط یک هیتر صورت گرفت. دمش گاز CO₂ به مدت ۲۰ دقیقه جهت حصول شرایط اشباع محلول صورت گرفت. جهت رسیدن به شرایط پایا، نمونه به مدت ۳۰ دقیقه در محلول اشباع از CO₂ غوطه‌ور شد. تغییرات پتانسیل مدار باز^{۲۰} نمونه جهت اطمینان از رسیدن آن به شرایط پایا نسبت به زمان خوانده شد. سپس آزمون EIS و بلافاصله بعد از آن پلاریزاسیون تافل روی نمونه انجام شد.

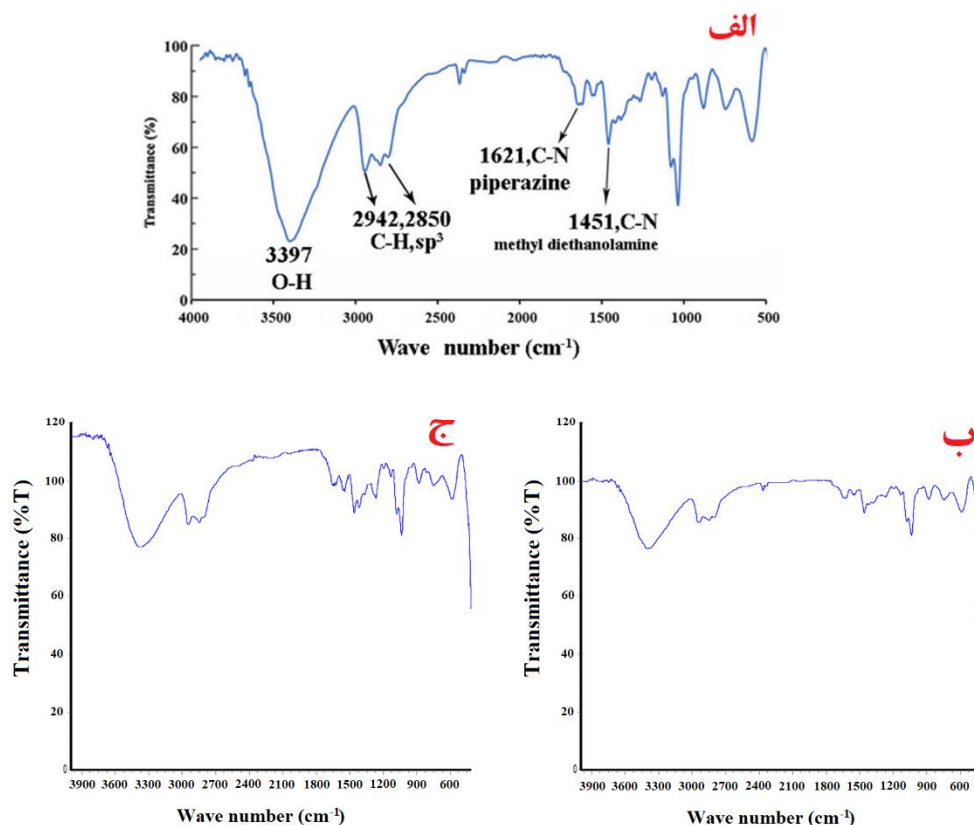
آزمون‌های پلاریزاسیون تافل با نرخ روبش پتانسیل یک میلی‌ولت بر ثانیه از محدوده ۲۵۰- تا ۱۵۰۰+ میلی‌ولت نسبت به پتانسیل مدار باز انجام گرفت. آزمون‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی با دامنه پتانسیل ۱۰ میلی‌ولت در فرکانس‌های ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱۰ میلی‌هرتز در شرایط مشابه با آزمون پلاریزاسیون انجام شد. داده‌های آزمون امپدانس توسط نرم‌افزار Zview پردازش شده و مدل مدار معادل الکتریکی مناسب ارائه شد. جهت اطمینان از صحت و دقت داده‌های الکتروشیمیایی، این آزمون‌ها حداقل دو بار تکرار شدند.

CO₂ پایین، به علت عدم حضور سدرایت، بیشتر از غلظت CO₂ بالاست. ژانگ و همکارانش (۱۵) به بررسی تأثیر یون کلرید بر رفتار خوردگی فولادهای کربنی و زنگ نزن در محلول MDEA پرداختند. این محققان گزارش کردند که یون Cl⁻ نرخ حلالیت آندی را بالا می‌برد و لذا نرخ خوردگی یکنواخت را افزایش می‌دهد.

همان‌طور که بیان شد پژوهش‌ها در رابطه با بررسی خوردگی فولادهای کربنی و زنگ نزن در محلول aMDEA بسیار محدود و پراکنده است. به علاوه در این تحقیقات از محلول‌های در چرخش در فرایند جذب/دفع CO₂ استفاده نشده است. از آنجا که کیفیت محلول‌های در چرخش با گذشت زمان دچار تغییر می‌شود (ورود آنیون‌های مختلف نظیر یون کلرید، تشکیل HSS و غیره) (۱۳ و ۱۵)، خوردگی محلول‌های در چرخش می‌تواند نسبت به محلول آمین اولیه متفاوت باشد و لذا بررسی رفتار خوردگی اجزای فولاد در محلول‌های در چرخش از اهمیت بالایی برخوردار است. به علاوه از آنجا که در هنگام تعمیرات، ممکن است اجزایی از جنس فولاد زنگ نزن جایگزین بخش‌هایی از جنس فولاد کربنی شود، بررسی مقاومت به خوردگی هر دو فولاد در محلول‌های در چرخش اهمیت می‌یابد. از این‌رو، در پژوهش حاضر به بررسی رفتار خوردگی الکتروشیمیایی فولادهای کربنی و زنگ نزن ۳۱۶ در محلول‌های در چرخش (Lean و Rich) و تازه ساخته شده (Fresh)، در حضور و غیاب دمش گاز CO₂ پرداخته شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

آزمون FTIR بر روی محلول‌های در چرخش و محلول تازه ساخته شده با استفاده از دستگاه WQF-520 صورت گرفت. آزمون‌های خوردگی بر روی فولادهای کربنی (C/۲% <، Mn ۰/۹% <، Si ۰/۰۳% - ۱۵/۳%، P ۰/۰۴% < و S ۰/۰۴% < و باقیمانده Fe) و زنگ نزن ۳۱۶ (C/۰/۰۸% <، Mn ۱/۷%، Si ۰/۵%، Mo ۲/۲%، Ni ۱۰/۳%، Cr ۱۷/۸%، P ۰/۰۳% < و S %



شکل ۲- طیف FT-IR از: الف) محلول آمین تازه ساخته شده (fresh)، ب) محلول‌های در چرخش Lean و ج) محلول در چرخش Rich.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز محلول‌ها

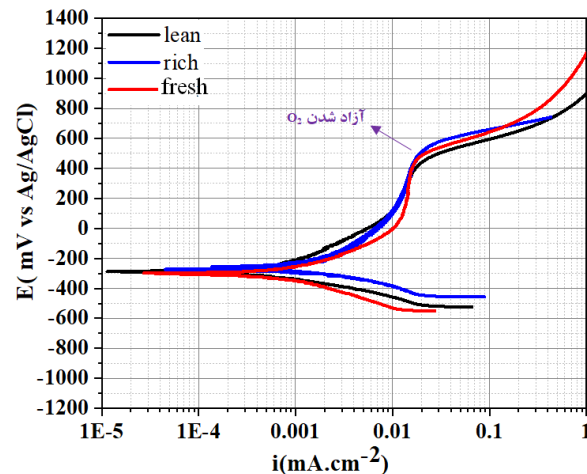
شکل (۲) طیف‌های FT-IR محلول‌های در چرخش از برج جذب‌کننده (Rich) و ریژنراتور (Lean) را در مقایسه با محلول تازه ساخته شده (Fresh) نشان می‌دهد. طیف FT-IR محلول تازه ساخته شده مشابه با طیف FT-IR ترکیب متیل دی‌اتانولامین گزارش شده در مقالات مشابه (۱۶) است، اما از آنجا که در محلول مورد نظر، پپیرازین نیز وجود دارد باندهای جذبی این ترکیب نیز دیده می‌شود. باند جذبی ناحیه cm^{-1} ۳۳۹۷ مربوط به ارتعاشات کششی پیوند O-H الکلی ساختار متیل دی‌اتانولامین می‌باشد. ارتعاشات کششی پیوند C-H گروه-های متیل و متیلن در ناحیه cm^{-1} ۲۸۵۰ تا cm^{-1} ۲۹۴۲ آشکار شده است. باندهای جذبی ۱۴۵۱ و cm^{-1} ۱۶۲۱ به ترتیب مربوط به ارتعاشات پیوند C-N در ساختار دی‌اتانولامین و پپیرازین می‌باشند. با مقایسه طیف‌های مربوط به محلول‌های در چرخش

با طیف محلول تازه ساخته شده در محدوده عدد موج cm^{-1} ۲۹۰۰-۱۳۰۰ و حضور یک پیک پهن در این محدوده، ملاحظه می‌شود که شرایط محلول‌های در چرخش (شکل ۲- ب و ج) با شرایط محلول تازه ساخته شده (شکل ۲- الف) برابر است. در اینجا نیز علاوه بر باندهای جذبی مربوط به ترکیب MDEA، باندهای جذبی پپیرازین در cm^{-1} ۱۶۲۱ دیده می‌شود (۱۶).

۳-۲- خوردگی در غیاب دمش گاز CO_2

۳-۲-۱- خوردگی فولاد کربنی

شکل (۳) منحنی‌های پلاریزاسیون فولاد کربنی در محلول‌های در چرخش Rich و Lean و نیز محلول Fresh را در دمای $^{\circ}\text{C}$ ۶۵ نشان می‌دهد. شاخه آندی منحنی‌ها، نشان‌دهنده رفتار پاسیو-ترانس پاسیو یکسانی برای فولاد کربنی در محلول‌های ذکر شده است. در غیاب CO_2 ، واکنش کاتدی احیای اجزای اکسیدی موجود در آمین انجام می‌شود، لذا واکنش انحلال آهن



شکل ۳- منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به فولاد کربنی در غیاب دمش CO₂ در دمای ۶۵ °C.

ثابت^{۲۵} مربوط به لایه پاسیو و Rox مقاومت لایه پاسیواند. جدول (۱) مقادیر المان‌های الکتریکی استخراج شده از نمودارهای امپدانس را به همراه مقادیر پتانسیل خوردگی (E_{corr}) و دانسیته جریان پاسیو (i_p) نشان می‌دهد. دانسیته جریان پاسیو توسط روش برون‌یابی از نمودارهای پلاریزاسیون تخمین زده شده است.

همان‌طوری که از جدول (۱) مشاهده می‌شود، کمترین مقاومت خوردگی فولاد کربنی (بیشترین مقدار i_p) در محلول Rich حاصل شده است. از طرفی مقاومت به خوردگی فولاد کربنی در محلول Lean بیشترین و حتی بیشتر از محلول Fresh است. علت این امر را می‌توان در رابطه با مقادیر pH و هدایت محلول آمین مطابق با جداول (۲) و (۳) در نظر گرفت. چنانچه مشاهده می‌شود، دمش گاز CO₂ منجر به کاهش pH و افزایش هدایت ویژه محلول‌های آمین شده است. دلیل این امر ترویج اجزای H₃O⁺ و MDEAH⁺ است (۱۸). با دمش گاز خنثی (آرگون) تغییری در pH محلول ایجاد نمی‌شود، که این امر به دلیل عدم تغییر در غلظت عوامل مذکور است. لیکن با دمش گاز خنثی، هدایت محلول تا حدی کاهش یافته است که این احتمالاً به دلیل حذف CO₂ محلول و لذا برگشت آنیون‌های CO₃²⁻ و HCO₃⁻ به فرم غیر یونی در محلول می‌باشد.

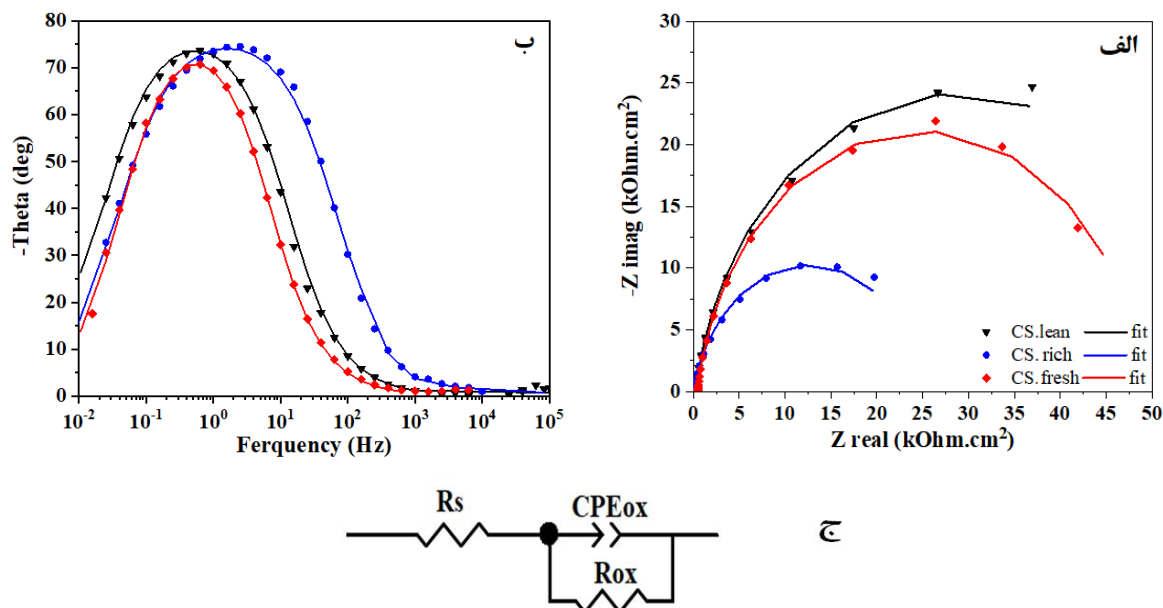
کمترین مقدار pH و بیشترین مقدار هدایت ویژه محلول

در شاخه آندی (رابطه ۱) منجر به ایجاد یک فیلم اکسیدی پاسیو بر سطح فولاد کربنی می‌گردد.

مطابق با دیاگرام پوربه آهن در دمای ۸۰ °C (۱۷)، می‌توان دریافت که فیلم پاسیو در پتانسیل حدود ۰/۱ V_{SHE} (معادل با ۰/۳ V_{Ag/AgCl}) با در نظر گرفتن pH محلول‌ها در حدود ۹-۱۱/۵، Fe₂O₃ است. افزایش پتانسیل آندی به بالای ۰/۴ تا ۰/۵ V_{Ag/AgCl}، منجر به آزاد شدن اکسیژن در اثر تجزیه آب و لذا ایجاد شرایط ترانس پاسیواسیون می‌شود که در تطابق با دیاگرام پوربه است.

شکل (۴- الف و ب)، نمودارهای نایکویست^{۲۱} و باد-زاویه^{۲۲} مربوط به فولاد کربنی در محلول‌های مذکور در دمای ۶۵°C را نشان می‌دهد. حضور یک حلقه خازنی در نمودارهای نایکویست و یک قله در نمودارهای باد-زاویه نشان‌دهنده حضور یک ثابت زمانی مربوط به فیلم اکسیدی تشکیل شده بر سطح فولاد کربنی در شرایط مدار باز است. ناتمام بودن حلقه‌های خازنی در دیاگرام نایکویست تداعی‌کننده شرایط شبه پاسیو فولاد کربنی در محیط‌های مذکور است.

شکل (۴- ج) مدار معادل الکتریکی (مدار رندلز^{۲۳}) مورد استفاده برای برازش داده‌های امپدانس را نشان می‌دهد. در این مدار، Rs مقاومت جبران نشده محلول^{۲۴}، CPEox المان فاز



شکل ۴- نمودارهای نایکوئیست (الف) و باد-زاویه (ب) مربوط به فولاد کربنی در غیاب دمش CO₂ در دمای ۶۵ °C (ج) مدار معادل الکتریکی مورد استفاده برای برازش داده‌های امپدانس.

جدول ۱- مقادیر المان‌های الکتریکی استخراج شده از نمودارهای امپدانس به همراه مقادیر پتانسیل خوردگی و دانسیته جریان پاسیو حاصل

از نمودارهای پلاریزاسیون فولاد کربنی در دمای ۶۵ °C

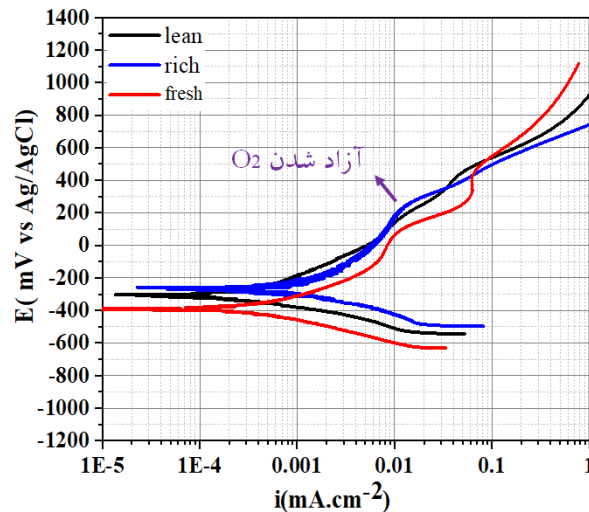
ip ($\mu\text{A cm}^{-2}$)	E _{corr} (mV _{Ag/AgCl})	χ^2	R _{ox} (k Ω cm ²)	n	CPE _{ox} ($\mu\text{F cm}^{-2} \text{S}^{-n-1}$)	نمونه
۰/۵	-۲۸۵	۰/۰۰۲	۵۷/۳	۰/۸۹	۹۸/۹	Lean
۱/۲	-۲۷۸	۰/۰۰۲	۲۵/۱	۰/۸۷	۱۳۸/۴	Rich
۰/۸	-۳۰۵	۰/۰۰۱	۴۸/۷	۰/۹۰	۶۷/۳	Fresh

جدول ۲- مقادیر pH محلول‌های Rich، Lean و Fresh در دمای ۶۵ °C

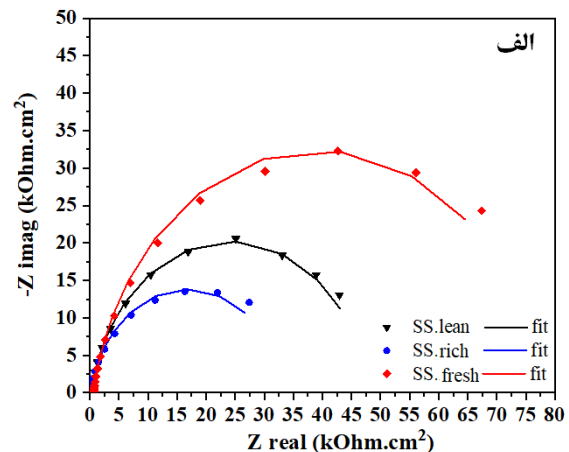
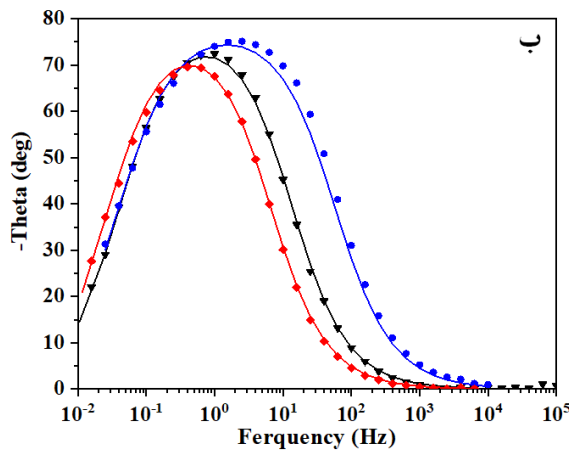
Fresh	Rich	Lean	
۱۱/۰۶±۰/۰۵	۹/۳۱±۰/۰۳	۱۰/۰۸±۰/۰۳	پیش از دمش CO ₂
۸/۹۱±۰/۰۱	۸/۵۲±۰/۰۲	۸/۷۳±۰/۰۳	در طی دمش CO ₂
۸/۷۵±۰/۰۶	۸/۶۷±۰/۰۳	۸/۷۴±۰/۰۳	پس از دمش Ar

جدول ۳- مقادیر هدایت ویژه (mS/cm) محلول‌های Rich، Lean و Fresh در دمای ۶۵ °C

Fresh	Rich	Lean	
۰/۹۳±۰/۰۱	۱۰/۳۳±۰/۰۴	۲/۹۳±۰/۰۱	پیش از دمش CO ₂
۱۹/۳۳±۰/۳۲	۱۷/۷۴±۰/۰۱	۱۷/۴۵±۰/۰۵	در طی دمش CO ₂
۱۹/۷۳±۰/۰۸	۹/۶۲±۰/۰۲	۹/۳۳±۰/۰۳	پس از دمش Ar



شکل ۵- منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به فولاد زنگ نزن در غیاب دمش CO_2 در دمای 65°C .



شکل ۶- نمودارهای نایکوئیست (الف) و باد-زاویه (ب) مربوط به فولاد زنگ نزن ۳۱۶ در غیاب دمش CO_2 در دمای 65°C .

مذکور حاکی از احراز شرایط پاسیواسیون فولاد زنگ نزن ۳۱۶ با تشکیل یک فیلم اکسید اسپینلی Fe-Cr آهن و کروم (FeCr_2O_4) مطابق با دیاگرام پوربه آلیاژ Fe-Cr (۱۹) می‌باشد. تغییرات ملاحظه شده در شاخه آندی با افزایش پتانسیل تا قبل از پتانسیل ترانس پاسیواسیون، ناشی از تغییر ظرفیت و انحلال یون کروم به صورت آنیون CrO_4^{2-} ، مطابق با دیاگرام پوربه آلیاژ Fe-Cr است.

شکل (۶) نمودارهای نایکوئیست و باد-زاویه مربوط به فولاد زنگ نزن ۳۱۶ در محلول‌های مذکور در دمای 65°C را نشان می‌دهد. در اینجا نیز نمودارها، به‌طور مشابه، رفتار

Rich (در غیاب دمش گاز CO_2)، نشانگر خورنده تر بودن این محلول و لذا ایجاد شرایط پاسیواسیون ضعیفتر برای فولاد کربنی است. همان‌طوری که قبلاً ذکر شد، محلول‌های آمین ذاتاً خورنده نیستند و pH بالا و هدایت یونی اندک آن‌ها منجر به مصونیت فولادها در برابر خوردگی می‌شود (۱).

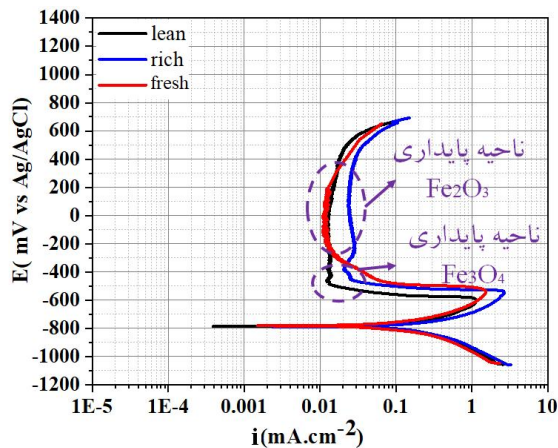
۳-۲-۲- خوردگی فولاد زنگ نزن ۳۱۶

شکل (۵) منحنی‌های پلاریزاسیون فولاد زنگ نزن ۳۱۶ در محلول‌های مذکور را نشان می‌دهد. پتانسیل خوردگی تقریباً برابر با فولاد کربنی (-0.3 تا -0.4 V_{Ag/AgCl}) در محیط‌های

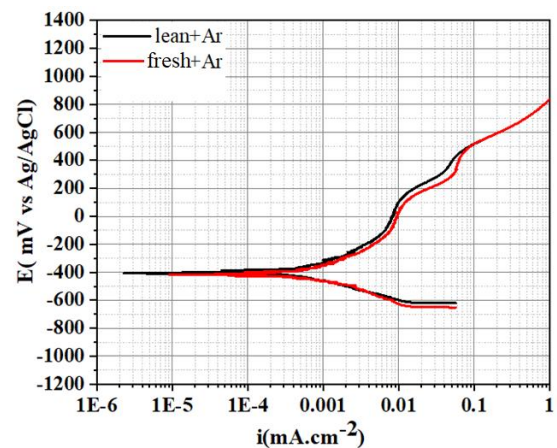
جدول ۴- مقادیر المان‌های الکتریکی استخراج شده از نمودارهای امیدانس به همراه مقادیر پتانسیل خوردگی

و دانسیته جریان پاسیو حاصل از نمودارهای پلاریزاسیون فولاد زنگ نزن ۳۱۶ در دمای ۶۵ °C

نمونه	CPEox ($\mu\text{F cm}^{-2} \text{S}^{n-1}$)	n	Rox ($\text{k}\Omega \text{cm}^2$)	χ^2	E_{corr} ($\text{mV}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$)	i_p ($\mu\text{A cm}^{-2}$)
Lean	۶۸/۸	۰/۸۹	۴۷/۹	۰/۰۰۱	-۳۱۲	۰/۵
Rich	۱۰۰/۴	۰/۸۷	۳۳/۵	۰/۰۰۱	-۲۶۵	۰/۸
Fresh	۵۹/۴	۰/۸۹	۷۷/۳	۰/۰۰۰۹	-۳۴۰	۰/۴



شکل ۸- منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به فولاد کربنی در حضور دم‌ش CO₂ در دمای ۶۵ °C.



شکل ۷- منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به فولاد زنگ نزن در محلول‌های Lean و Fresh با دم‌ش گاز آرگون در دمای ۶۵ °C.

آرگون (شرایط هوازداپی) نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، پتانسیل خوردگی فولاد زنگ نزن تغییر قابل ملاحظه‌ای نسبت به شرایط دسترسی به هوا نداشته است (اندکی منفی‌تر شده است). این امر نشان می‌دهد که احیای اکسیژن حل شده در محلول احتمالاً تحت کنترل فرآیند نفوذ است و لذا چندان تحت تأثیر غلظت آن در محلول (هوازداپی) نمی‌باشد.

۳-۳- خوردگی در حضور دم‌ش گاز CO₂

۳-۳-۱- خوردگی فولاد کربنی

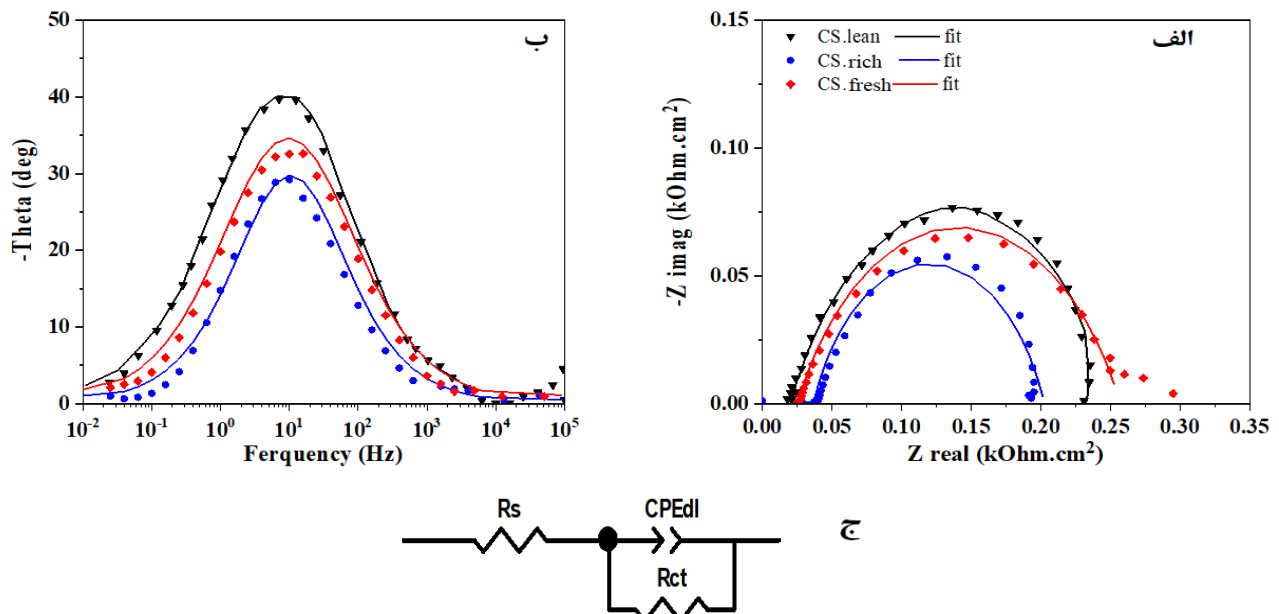
شکل (۸) منحنی‌های پلاریزاسیون فولاد کربنی در محلول‌های مذکور را نشان می‌دهد. در محلول‌های Lean، Rich و نیز Fresh، رفتار خوردگی اکتیو در پتانسیل خوردگی (پتانسیل مدار باز) مشاهده می‌شود.

در شرایط دم‌ش گاز CO₂، واکنش‌های کاتدی مطابق با

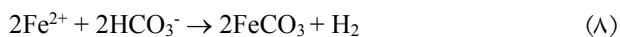
پاسیواسیون فولاد زنگ نزن ۳۱۶ را در شرایط مدار باز نشان می‌دهند.

جدول (۴) مقادیر المان‌های الکتریکی استخراج شده از نمودارهای امیدانس (با استفاده از مدار معادل الکتریکی شکل ۴-ج) را به همراه مقادیر پتانسیل خوردگی (E_{corr}) و دانسیته جریان پاسیو (i_p) نشان می‌دهد.

چنانچه ملاحظه می‌شود، کمترین مقاومت خوردگی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ در محلول Rich حاصل شده است. همان‌طوری که قبلاً نیز دیده شد، مطابق با جدول (۴)، مقادیر pH کمتر و هدایت بالای محلول Rich خوردگی بیشتر آن را سبب می‌شود. از طرفی مقاومت به خوردگی فولاد زنگ نزن در محلول Lean تا حدودی کمتر از محلول Fresh است. شکل (۷) منحنی‌های پلاریزاسیون فولاد زنگ نزن ۳۱۶ در محلول‌های Lean و Fresh را در دمای ۶۵ °C تحت دم‌ش گاز



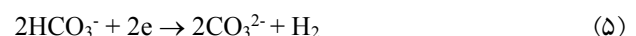
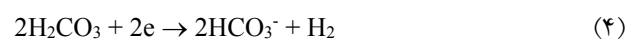
شکل ۹- نمودارهای نایکوئیست (الف) و باد-زاویه (ب) مربوط به فولاد کربنی در حضور دمش CO_2 در دمای 65°C .
 (ج) مدار معادل الکتریکی مورد استفاده برای برازش داده‌های امپدانس.



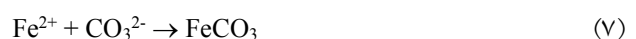
با افزایش پتانسیل آندی به بالاتر از حدود $0.5 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ ، امکان تشکیل اکسیدهای آهن به ترتیب Fe_3O_4 و Fe_2O_3 به وجود می‌آید که انتقال شرایط خوردگی اکتیو به پاسیو برای فولاد کربنی را سبب می‌گردد. تغییرات دیده شده در منحنی پلاریزاسیون آندی فولاد در ابتدای ناحیه پاسیواسیون (در شکل ۸ مشخص شده است)، تغییر ماهیت فیلم اکسیدی از Fe_3O_4 به Fe_2O_3 را نشان می‌دهد. مجدداً افزایش پتانسیل آندی به بالای 0.4 تا $0.5 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ ، منجر به حالیت فیلم اکسیدی در همه محلول‌ها و لذا ایجاد شرایط ترانس پاسیواسیون می‌شود که در آن خوردگی فعال فولاد کربنی (FeO_4^{2-}) رخ خواهد داد.

شکل (۹) نمودارهای نایکوئیست و باد-زاویه فولاد کربنی در محلول‌های مذکور را نشان می‌دهد. در تطابق با رفتار پلاریزاسیونی فولاد کربنی در محلول‌ها، حلقه‌های خازنی فولاد کربنی در سه محلول Rich، Lean و Fresh، کامل ولی با قطر بسیار کوچک‌اند که بر رفتار خوردگی اکتیو فولاد کربنی در این سه محلول دلالت دارند. جدول (۵) مقادیر المان‌های الکتریکی استخراج شده از نمودارهای امپدانس (با استفاده از مدار معادل

روابط (۲-۶) صورت می‌گیرد. لیکن به واسطه pH بالای محلول‌های آمین، فقط اجزای بی‌کربنات (HCO_3^-) و آمین پروتونه شده (MDEAH^+) دارای غلظت مناسب جهت انجام واکنش‌های کاتدی هستند و لذا واکنش‌های کاتدی غالب، مطابق با روابط (۵ و ۶) قابل انجام‌اند (۱۸).



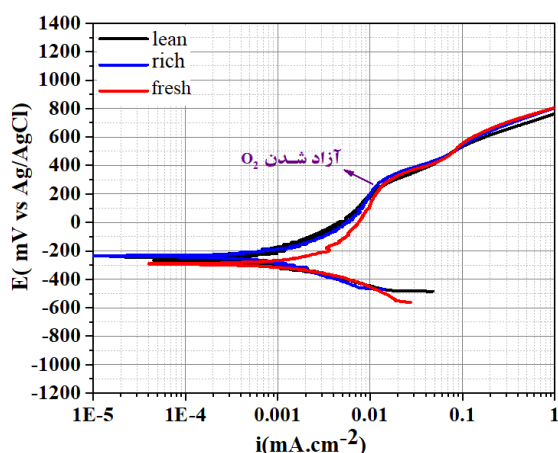
در شرایط آندی، مطابق با دیاگرام پوربه آهن در محیط $\text{MDEA}/\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ (۱۷)، با کاهش pH محلول به واسطه حالیت CO_2 ، امکان انحلال آهن به صورت کربنات آهن محلول در ناحیه پتانسیل 0.8 تا $0.5 \text{ V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$ (0.6 تا $0.3 \text{ V}_{\text{SHE}}$) به وجود می‌آید. واکنش یون‌های آهن آزاد شده با یون‌های کربنات و بی‌کربنات منجر به ایجاد کربنات آهن محلول مطابق با روابط (۷ و ۸) می‌شوند.



جدول ۵- مقادیر المان‌های الکتریکی استخراج شده از نمودارهای امپدانس به همراه مقادیر پتانسیل خوردگی و

دانشیه جریان پاسیو حاصل از نمودارهای پلاریزاسیون فولاد کربنی در دمای ۶۵ °C

نمونه	CPEdl ($\mu\text{F cm}^{-2} \text{S}^{n-1}$)	n	Rct ($\text{k}\Omega \text{cm}^2$)	χ^2	E_{corr} ($\text{mV}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$)	i_{corr} ($\mu\text{A cm}^{-2}$)
Lean	۹۴۶/۳	۰/۷۴	۰/۲۳	۰/۰۰۵	-۷۸۴	۱۷۰
Rich	۶۳۱/۳	۰/۷۴	۰/۱۶	۰/۰۰۴	-۸۱۰	۲۰۰
Fresh	۸۸۸/۳	۰/۶۷	۰/۲۴	۰/۰۰۴	-۷۸۸	۱۶۴



شکل ۱۰- منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به فولاد زنگ نزن در حضور دمش CO_2 در دمای ۶۵ °C.

جدول (۶) مقادیر المان‌های الکتریکی استخراج شده از نمودارهای امپدانس (با استفاده از مدار معادل الکتریکی شکل ۴-ج) را به همراه مقادیر پتانسیل خوردگی (E_{corr}) و دانشیه جریان خوردگی (i_{corr}) / پاسیو (i_p) نشان می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود، کمترین مقاومت خوردگی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ در محلول Fresh حاصل شده است.

۳-۴- تحلیل رفتار خوردگی فولاد کربنی و زنگ نزن ۳۱۶

در محلول‌های آمین تازه و در چرخش

شکل (۱۲) نمودارهای پلاریزاسیون مربوط به فولاد کربنی و زنگ نزن در محلول Fresh در دو شرایط دمش و عدم دمش گاز CO_2 را نشان می‌دهد.

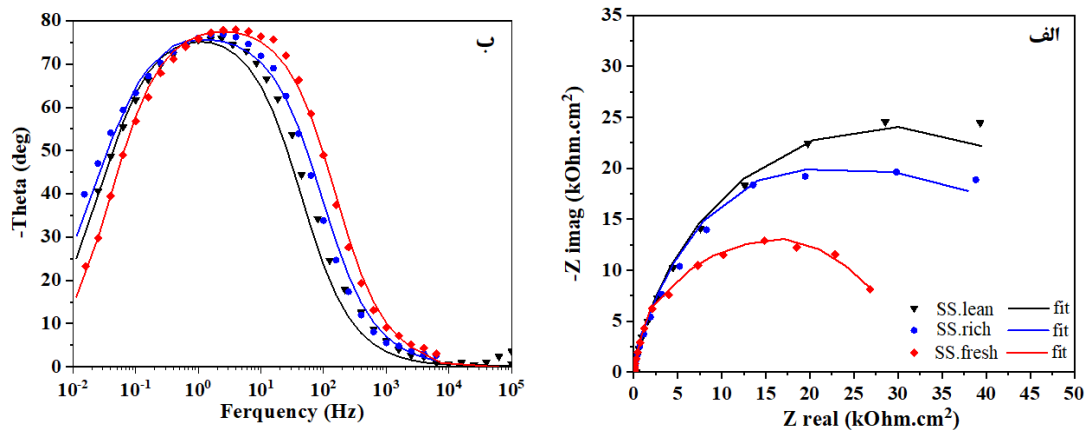
نمودار پلاریزاسیون مربوط به فولاد کربنی در محلول آمین

الکتریکی (شکل ۹-ج) را به همراه مقادیر پتانسیل خوردگی (E_{corr}) و چگالی جریان خوردگی (i_{corr}) نشان می‌دهد. از جدول (۵) مشاهده می‌شود که کمترین مقاومت خوردگی فولاد کربنی در محلول Rich حاصل شده است. از طرفی مقاومت به خوردگی فولاد کربنی در محلول Lean در حد محلول Fresh است.

۳-۳- خوردگی فولاد زنگ نزن

شکل (۱۰) منحنی‌های پلاریزاسیون فولاد زنگ نزن ۳۱۶ در محلول‌های مذکور را نشان می‌دهد. پتانسیل خوردگی نزدیک به فولادهای زنگ نزن ۳۱۶ و کربنی (۰/۳- تا -۰/۴ $\text{V}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$) در محیط‌های مذکور حاکی از انجام واکنش کاتدی احیای اکسیژن موجود در محلول و لذا احراز شرایط پاسیواسیون فولاد زنگ نزن ۳۱۶ با تشکیل یک فیلم اکسید اسپینلی آهن و کروم مطابق با دیاگرام پوربه آلیاژ Fe-Cr (۱۹) می‌باشد. تغییرات ملاحظه شده در شاخه آندی با افزایش پتانسیل تا قبل از پتانسیل آزاد شدن اکسیژن (ترانس پاسیواسیون)، ناشی از تغییر ظرفیت و انحلال یون کروم مطابق با آنچه که در شرایط عدم دمش گاز CO_2 ملاحظه شد، است.

شکل (۱۱) نمودارهای نایکویست و باد-زاویه مربوط به فولاد زنگ نزن ۳۱۶ در محلول‌های مذکور در دمای ۶۵ °C را نشان می‌دهد. در اینجا نیز نمودارها، به‌طور مشابه، رفتار پاسیواسیون فولاد زنگ نزن ۳۱۶ را در شرایط مدار باز نشان می‌دهند. مورد متفاوتی که در اینجا مشاهده می‌شود، قطر کمتر حلقه خازنی فولاد زنگ نزن در محلول Fresh است که مقاومت به خوردگی کمتر فولاد زنگ نزن در این محیط را نشان می‌دهد.



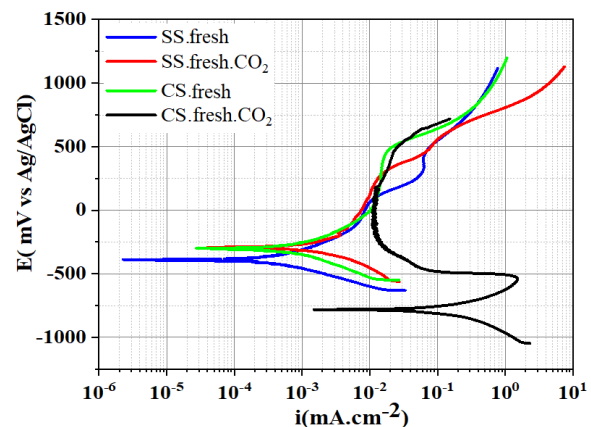
شکل ۱۱- نمودارهای نایکوئیست الف) و باد-زاویه ب) مربوط به فولاد زنگ نزن در حضور دمش CO_2 در دمای 65°C .

جدول ۶- مقادیر المان‌های الکتریکی استخراج شده از نمودارهای امپدانس به همراه مقادیر پتانسیل خوردگی و

دانشسته جریان پاسیو حاصل از نمودارهای پلاریزاسیون فولاد زنگ نزن در دمای 65°C

نمونه	CPEox ($\mu\text{F cm}^{-2} \text{S}^{-1}$)	n	Rox ($\text{k}\Omega \text{cm}^2$)	χ^2	E_{corr} ($\text{mV}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$)	i_p ($\mu\text{A cm}^{-2}$)
Lean	۸۴/۵	۰/۸۸	۵۸/۰	۰/۰۰۱	-۲۷۲	۰/۷
Rich	۱۰۲/۹	۰/۸۸	۴۴/۱	۰/۰۰۱	-۲۴۷	۰/۸
Fresh	۹۵/۷	۰/۸۹	۲۷/۲	۰/۰۰۰۷	-۳۰۲	۱/۲

گاز CO_2 و فولاد زنگ نزن ۳۱۶ در هر دو شرایط دمش و عدم دمش گاز CO_2 دارای رفتار پاسیو-ترانس پاسیو و دارای پتانسیل خوردگی نجیتری می‌باشند. رفتار پاسیو ایجاد شده مطابق با مطالب گذشته مرتبط با تشکیل اکسیدهای آهن برای فولاد کربنی و اکسید اسپینلی حاوی آهن و کروم برای فولاد زنگ نزن است. بیشترین نرخ خوردگی مربوط به فولاد کربنی در شرایط دمش گاز CO_2 است. همچنین، مطابق با اختلاف مقادیر پتانسیل خوردگی، چنانچه ارتباط گالوانیکی بین فولاد کربنی و زنگ نزن در شرایط دمش گاز CO_2 ایجاد شود به ضرر فولاد کربنی تمام می‌شود ($\Delta E_{\text{corr}} = 486 \text{ mV}$). شکل (۱۳) نمودارهای پلاریزاسیون مربوط به فولاد کربنی و زنگ نزن در محلول Lean در دو شرایط دمش و عدم دمش گاز CO_2 را نشان می‌دهد. رفتار پلاریزاسیونی تقریباً یکسانی از فولاد کربنی و زنگ نزن ۳۱۶ در محلول آمین در چرخش Lean دیده



شکل ۱۲- نمودارهای پلاریزاسیون مربوط به فولاد کربنی و زنگ نزن در محلول آمین Fresh، در دمای 65°C درجه سانتی‌گراد در دو شرایط دمش و عدم دمش گاز CO_2 .

تازه تحت دمش گاز CO_2 ، رفتار اکتیو-پاسیو-ترانس پاسیو را نشان می‌دهد. این درحالی است که فولاد کربنی در غیاب دمش

زنگ نزن ۳۱۶ در محلول تازه ساخته شده (Fresh) با محلول‌های در چرخش (Lean و Rich) مشابه و به صورت پاسیو می‌باشد.

۲- در شرایط دمش گاز CO₂ رفتار خوردگی فولاد کربنی در محلول‌های استفاده شده به طور یکسان اکتیو است ولی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ رفتار خوردگی پاسیو با پتانسیل خوردگی نجیب‌تری را ارائه می‌دهد. چنین اختلاف پتانسیلی می‌تواند منجر به خوردگی گالوانیکی فولاد کربنی گردد. این امر بدین معنی است که در تعویض اجزای فولاد کربنی با فولاد زنگ نزن در برج جذب‌کننده دقت لازم باید صورت گیرد.

۳- نتایج آزمون پلاریزاسیون نشان داد که بیشترین نرخ خوردگی در هر دو محلول تازه ساخته شده (Fresh) و در چرخش (Lean)، مربوط به فولاد کربنی و در شرایط دمش گاز CO₂ است.

۴- کمترین مقاومت به خوردگی این فولادها در هر دو شرایط حضور و غیاب CO₂ در محلول Rich مشاهده شد که به دلیل کمترین مقدار pH و بیشترین مقدار هدایت ویژه این محلول در مقایسه با محلول‌های Lean و fresh بود.

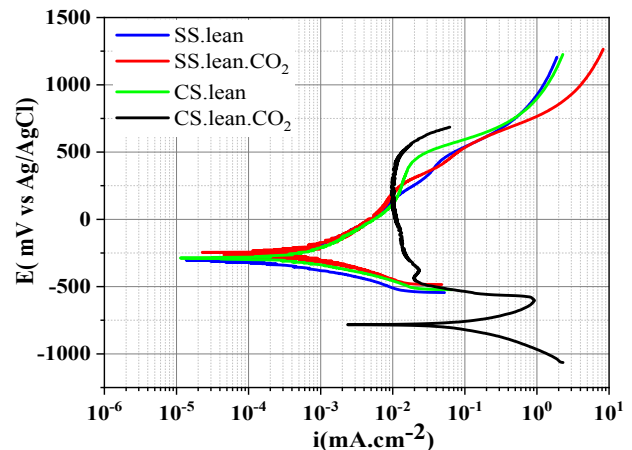
۵- رفتار خوردگی فولاد کربنی و زنگ نزن ۳۱۶ در هر دو محلول آمین در چرخش و تازه تقریباً یکسان بود که دلالت بر عدم اختلاف میزان خوردگی آمین در چرخش نسبت به تازه دارد.

تشکر و سپاسگزاری

از شرکت پالایش نفت اصفهان به‌خاطر تعریف پروژه و حمایت مالی تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.



شکل ۱۳- نمودارهای پلاریزاسیون مربوط به فولاد کربنی و زنگ نزن در محلول آمین در چرخش Lean، در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد در دو شرایط دمش و عدم دمش گاز CO₂.

می‌شود. اختلاف پتانسیل خوردگی زیادی ($\Delta E_{corr} = 512 \text{ mV}$) بین فولاد کربنی و زنگ نزن در شرایط دمش وجود دارد که حساسیت به خوردگی گالوانیکی زیادی را ایجاد خواهد کرد. با مقایسه نتایج حاصل از دو محلول آمین تازه و در حال چرخش، مشخص است که رفتار خوردگی فولاد کربنی و زنگ نزن ۳۱۶ در هر دو محلول آمین در چرخش و تازه تقریباً یکسان است که می‌توان بر عدم اختلاف میزان خوردگی آمین در چرخش نسبت به تازه در واحد هیدروژن‌سازی پالایشگاه اصفهان پی برد. همچنین از مقایسه داده‌های به‌دست آمده از فولاد کربنی در محلول آمین در چرخش Lean در حضور دمش گاز CO₂ (دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد) با داده‌های رساله گوناسکاران (۱۷)، مشخص می‌شود که مقدار pH محلول آمین در چرخش Lean (۸/۷۳)، پتانسیل خوردگی (-۷۸۴ mV)، دانسیته جریان خوردگی ($170 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) و مقاومت انتقال بار ($0/23 \text{ k}\Omega \text{ cm}^2$) قابل مقایسه با نتایج این پژوهش هستند.

۴- نتیجه‌گیری

۱- در غیاب دمش گاز CO₂ رفتار خوردگی فولادهای کربنی و

واژه‌نامه

1. diethanolamine (DEA)
2. monoethanolamine (MEA)
3. triethanolamine (TEA),
4. methyldiethanolamine (MDEA)
5. 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP)
6. lean amine
7. rich amine
8. heat exchanger
9. stripper
10. piperazine (PZ)-activated MDEA (aMDEA)
11. rich/lean exchanger
12. regenerator
13. reboiler
14. siderite
15. heat-stable salts (HSS)
16. Tafel polarization
17. electrochemical impedance spectroscopy (EIS)
18. reference electrode
19. counter electrode
20. open circuit potential (OCP)
21. Nyquist
22. Bode-phase
23. Randles circuit
24. uncompensated solution resistance
25. constant phase element (CPE)
26. spinel oxide

مراجع

1. Kittel J, Gonzalez S. Corrosion in CO₂ post-combustion capture with alkanolamines—a review. *Oil & Gas Science and Technology—Revue d'IFP Energies nouvelles*. 2014;69(5):915-29. <https://doi.org/10.2516/ogst/2013161>
2. Panahi H, Eslami A, Golozar M. Effect of heat stable acids on corrosion and stress corrosion cracking initiation of 304 and 316 stainless steels in activated methyl diethanol amine (aMDEA) solution. *Corrosion Engineering, Science and Technology*. 2020;55(1):57-65. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2019.1669762>
3. Park J, Seok Young L, Kim J, Yoon Y-S. Efficiency, Economic, Energy, and Safety (3ES) Analyses on Different Configurations of MDEA Absorption Process for Coke Oven Gas Desulfurization. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2022;10:100281. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.100281>
4. Abkhiz V, Heydari I. Comparison of amine solutions performance for gas sweetening. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. 2014;9(5):656-62. <https://doi.org/10.1002/apj.1795>
5. Chen G, Chen G, Peruzzini M, Zhang R, Barzagli F. Understanding the potential benefits of blended ternary amine systems for CO₂ capture processes through 13C NMR speciation study and energy cost analysis. *Separation and Purification Technology*. 2022;291:120939. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120939>
6. Zhang R, Liu R, Barzagli F, Sanku MG, Li Ce, Xiao M. CO₂ absorption in blended amine solvent: Speciation, equilibrium solubility and excessive property. *Chemical Engineering Journal*. 2023;466:143279. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143279>
7. Choubtashani S, Rashidi H. CO₂ capture process intensification of water-lean methyl diethanolamine-piperazine solvent: Experiments and response surface modeling. *Energy*. 2023;267:126447. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126447>
8. Hosseini-Ardali SM, Hazrati-Kalibbaki M, Fattahi M, Lezsovits F. Multi-objective optimization of post combustion CO₂ capture using methyldiethanolamine (MDEA) and piperazine (PZ) bi-solvent. *Energy*. 2020;211:119035. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119035>
9. Tems R, Al-Zahrani A. Cost of corrosion in oil production and refining. *Saudi Aramco Journal of Technology*. 2006;2:14.
10. Yu LCY, Sadeek S, Williams DR, Campbell KLS. Investigating the Corrosion Due to High Capacity and Uptake Promoter Amine Blends on Carbon Steel. *Energy Procedia*. 2017;114:1998-2008. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1334>
11. Zhao B, Sun Y, Yuan Y, Gao J, Wang S, Zhuo Y, et al. Study on corrosion in CO₂ chemical absorption process using amine solution. *Energy Procedia*. 2011;4:93-100. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.01.028>
12. Campbell KLS, Zhao Y, Hall JJ, Williams DR. The effect of CO₂-loaded amine solvents on the corrosion of a carbon steel stripper. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2016;47:376-85. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.02.011>
13. Choi Y-S, Duan D, Nestic S, Vitse F, Bedell SA, Worley C. Effect of oxygen and heat stable salts on the corrosion of carbon steel in MDEA-based CO₂ capture process. *Corrosion*. 2010;66(12):125004-10. <https://doi.org/10.5006/1.3524834>
14. Xiang Y, Choi Y-S, Yang Y, Nešić S. Corrosion of carbon steel in MDEA-based CO₂ capture plants under regenerator conditions: effects of O₂ and heat-stable salts. *Corrosion*. 2015;71(1):30-7. <https://doi.org/10.5006/1354>
15. Zhang N, Zeng D, Xiao G, Shang J, Liu Y, Long D, et al. Effect of Cl⁻ accumulation on corrosion behavior of steels in H₂S/CO₂ methyldiethanolamine

- (MDEA) gas sweetening aqueous solution. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016;30:444-54. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.02.055>
16. de Avila S.G, Logli M.A, Silva L.C., Fantini M.C.A. Incorporation of monoethanolamine (MEA) diethanolamine (DEA) and methyldiethanolamine (MDEA) in mesoporous silica: An alternative to CO₂ capture”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2016;4:4514. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.10.015>
17. Gunasekaran P. Corrosion Evaluation for Absorption-Based CO₂ Capture Process Using Single and Blended Amines: Faculty of Graduate Studies and Research, University of Regina; 2012.
18. Choi Y-S, Duan D, Jiang S, Nešić S. Mechanistic modeling of carbon steel corrosion in a methyldiethanolamine (MDEA)-based carbon dioxide capture process. *Corrosion*. 2013;69(6):551-9. <https://doi.org/10.5006/0695>
19. Zhao Y, Xie J, Zeng G, Zhang T, Xu D, Wang F. Pourbaix diagram for HP-13Cr stainless steel in the aggressive oilfield environment characterized by high temperature, high CO₂ partial pressure and high salinity. *Electrochimica Acta*. 2019;293:116-27. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.08.156>