



شرکت پژوهشی صنعتی آبریزان

گزارش شماره ۴

بررسی فیلم مقاوم به خوردگی ایجاد شده توسط محلول میتره صنعتی بر روی سطح فلزات

به کوشش

مهدی حیدری

(کارشناس ارشد خوردگی و حفاظت از مواد/دانشگاه شیراز)

سید حجت مساوات

(کارشناس ارشد خوردگی و حفاظت از مواد/دانشگاه شیراز)

اسفندماه ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

چکیده

بررسی فیلم مقاوم به خوردگی ایجاد شده توسط محلول میتره

صنعتی بر روی سطح فلزات

یکی از خوردگی‌های رایج در صنایع، خوردگی ایجاد شده توسط آب می باشد. فیلم تشکیل شده از محلول بازدارنده میتره بر روی سطح فولاد و مس در محیط آبی توسط تست الکتروشیمیایی امپدانس بررسی شد. نتایج بدست آمده نشان دهنده افزایش مقاومت پلاریزاسیون در نتیجه اضافه شدن محلول میتره به سیستم می باشد که این افزایش بیان کننده‌ی خاصیت بازدارندگی محلول میتره در محیط آب می باشد. نتایج بدست آمده از درصد بازدارندگی محلول میتره در توافق با نتایج بدست آمده از تست پلاریزاسیون تافل بوده و آن را تایید می کند. نتایج بدست آمده از مدل سازی فرآیند خوردگی فولاد و مس در آب آشامیدنی در حضور محلول میتره توسط مدار معادل الکتریکی، نشان دهنده تشکیل یک فیلم محافظ بر روی سطح می باشد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه.....	۵
فصل دوم: تئوری تحقیقات صورت گرفته	
۱-۲- اصول تست امپدانس الکتروشیمیایی	۷
۲-۲- رفتار لایه دوگانه در اثر اعمال ولتاژ متناوب	۹
۳-۲- کاربرد تست امپدانس الکتروشیمیایی و روش‌های موسوم گزارش نتایج EIS	۱۱
فصل سوم: روش تحقیق و کارهای آزمایشگاهی	
۱-۳- استراتژی تحقیق	۱۵
۲-۳- نحوه آماده سازی نمونه‌ها برای تست EIS	۱۵
۳-۳- آماده سازی محلول برای تست‌های امپدانس الکتروشیمیایی	۱۶
۴-۳- نحوه انجام آزمایش‌های امپدانس الکتروشیمیایی	۱۷
فصل چهارم: نتایج و بحث	
۱-۴- بررسی نتایج امپدانس الکتروشیمیایی بدست آمده برای فولاد ساده کربنی	۱۹
۲-۴- بررسی نتایج امپدانس الکتروشیمیایی بدست آمده برای مس تجاری.....	۲۶
فصل پنجم: نتیجه‌گیری.....	۳۱
فهرست منابع:	۳۲
ضمیمه: تصویر تاییده نتایج از دانشگاه شیراز.....	۳۳

۱- مقدمه

یکی از محیط‌هایی که سبب خوردگی می‌شود، محیط‌های آبی است و از آنجائی که غالباً مصرف آب در صنایع زیاد می باشد، باید به خوردگی‌هایی که توسط آب ایجاد می‌شود توجه خاصی کرد. خوردگی فلزات بستگی زیادی به کیفیت فیزیکی و شیمیایی آب دارد. از جمله پارامترهای مهم در این ارتباط، هدایت الکتریکی آب، pH، غلظت و نوع نمکها و گازهای موجود در آب و مسائل مربوط به رسوب‌گذاری می‌باشد. یک راه محافظت در برابر خوردگی استفاده از بازدارنده‌ها می‌باشد. بازدارنده‌ها موادی هستند که وقتی به مقادیر کم به یک محیط خورنده اضافه می شوند، سرعت خوردگی را کم می‌کنند. در واقع بازدارنده را می‌توان یک کاتالیزور بازدارنده فرض کرد. بازدارنده ها دارای انواع گوناگون و ترکیبات مختلف می‌باشند. اکثر این مواد با آزمایشات تجربی پیدا شده به همین دلیل فرآیند حفاظت برای آنها کاملاً مشخص و روشن نیست.

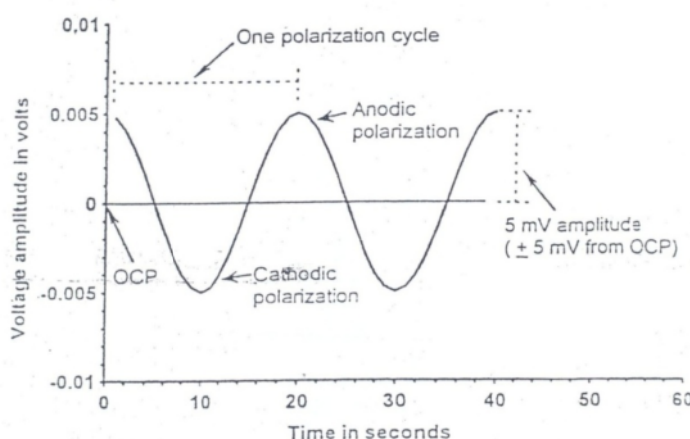
بازدارنده‌های خوردگی به محیط‌های مختلفی نظیر برج‌های خنک کننده، اسیدها، بویلرها و محیط های دیگر در مقادیر کم اضافه می گردند. این نکته قابل ذکر است که بیان کردن مکانیزم عملکرد بازدارنده در تعریف آن درست به نظر نمی رسد، زیرا بازدارنده ها ممکن است از یک یا چند طریق مختلف عمل بازدارندگی را انجام دهند. بعضی از بازدارنده ها با جذب شدن بر روی سطح فلز تولید لایه ای بسیار نازک و نامرئی می نمایند که این لایه ارتباط محیط خورنده با فلز را قطع می‌کند. برخی دیگر تولید یک رسوب حجیم بر سطح فلز می نمایند که این رسوب به عنوان یک مانع عمل می کند. مکانیزم عمل برخی دیگر از بازدارنده‌ها، ترغیب فلز به خورده شدن و تولید یک لایه از اکسید فلز در کنار بازدارنده جذب شده می باشد. این در حالی است که بازدارنده‌هایی یافت می شوند که با ترکیبی از مکانیزم های فوق و نه با یک مکانیزم خاص، ارتباط فلز را با محیط خورنده قطع می‌کنند. عوامل متعددی بر عملکرد ممانعت کننده‌ها در محیط های خورنده تأثیر می‌گذارند. طبیعت فلز حفاظت شونده به

لحاظ شرایط سطحی، پتانسیل فلز در محیط خورنده، وجود فلزات ناهمجنس در سیستم، نوع محیط خورنده و ترکیب دقیق اجزاء موجود در آن، pH، درجه حرارت سیستم، غلظت بازدارنده، تحرک یا سکون محیط خورنده، هوادار بودن یا نبودن محیط (در مورد سیستم های آبی)، وجود میکروارگانیزم ها در محیط، حضور محصولات خوردگی یا رسوب بر روی سطح، هدر رفتن بازدارنده و کاهش غلظت آن در محیط و عوامل زیست محیطی، همگی از عواملی هستند که بایستی قبل از استفاده از یک بازدارنده برای کاهش خوردگی در یک محیط، به دقت مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرند. اثر بازدارنده بستگی به محیط اطراف و نوع فلز دارد. ماده-ای که به عنوان بازدارنده برای یک فلز معین در یک محیط خاص می تواند موثر باشد، ممکن است با تغییر هر کدام از این پارامترها، اثر آن تقلیل و یا حتی باعث تشدید خوردگی شود. در این تحقیق به بررسی فیلم مقاوم به خوردگی ایجاد شده توسط محلول میتره صنعتی بر روی سطح فلزات می پردازیم.

۲- تئوری تحقیقات صورت گرفته

۲-۱- اصول تست امپدانس الکتروشیمیایی^۱

در تست EIS از میزان پلاریزاسیون در محدوده‌ای کوچک استفاده می‌شود، با این حال در این تست به جای اعمال پلاریزاسیون مستقیم از پلاریزاسیون متناوب استفاده می‌شود. یعنی میزان پلاریزاسیون از یک مقدار بیشینه آندی به یک مقدار بیشینه کاتدی رسیده و تناوب فوق با یک فرکانس خاص تکرار می‌شود و این طریق پلاریزه شدن متناوب در فرکانس‌های مختلف انجام می‌شود. مقاومت‌ها و ظرفیت خازن در مدار معادل خوردگی برای هر فرکانس خاص اندازه‌گیری شده و این مقدار اطلاعاتی درباره رفتار خوردگی، نفوذ و خواص پوشش را به ما خواهد داد. یک ولتاژ مستقیم که به نمونه وارد می‌شود، دارای یک مقدار ثابت است و جهت آن می‌تواند فقط کاتدی و یا آندی باشد. در حالی که یک ولتاژ متناوب اعمال شده به نمونه دارای بیشینه مقدار آندی و کاتدی است و می‌توان به طور متناوب دارای جهت آندی و کاتدی باشد (شکل ۲-۱).

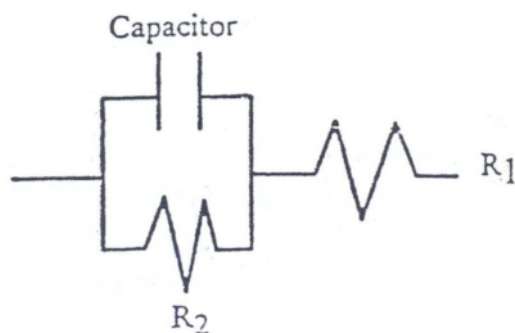


شکل ۲-۱- خاصیت سیکلی ولتاژ متناوب [۱].

¹ Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

به طور کلی دامنه ولتاژ مورد استفاده برای تست EIS حدود $\pm 5 \text{ mV}$ تا $\pm 20 \text{ mV}$ از پتانسیل مدار باز نمونه می‌باشد. در این حالت نمونه به میزان 5 mV تا 20 mV از پتانسیل مدار باز به صورت آندی پلاریزه شده و سپس دپلاریزه می‌شود تا دوباره به پتانسیل مدار باز برسد. پس از آن نمونه در جهت کاتدی به میزان 5 mV تا 20 mV پلاریزه شده و سپس دپلاریزه می‌شود تا به پتانسیل مدار باز برسد و این تناوب دوباره تکرار می‌شود. این کار برای فرکانس‌های مختلف انجام شده و برای هر فرکانس مقادیر مقاومت، ظرفیت خازن و ثابت زمانی مدار معادل خوردگی اندازه‌گیری می‌شود. ثابت زمانی برحسب ثانیه از ضرب ظرفیت خازن برحسب فاراد در مقدار موازی با آن برحسب اهم در مدار معادل خوردگی بدست می‌آید.

وقتی که یک فلز درون محیط خورنده قرار می‌گیرد، می‌تواند خواص الکتریکی مانند مداری متشکل از خازن و مقاومت داشته باشد (شکل ۲-۲). در این حالت لایه دوگانه^۱ تشکیل شده در سطح فلز به صورت یک خازن عمل کرده و ظرفیت آن معادل ظرفیت خازن موجود در مدار نشان داده شده در شکل ۲-۱ می‌باشد. در این مدار R_2 معرف مقاومت خوردگی فلز و R_1 معرف مقاومت محیط خورنده‌ای که فلز درون آن قرار دارد خواهد بود.

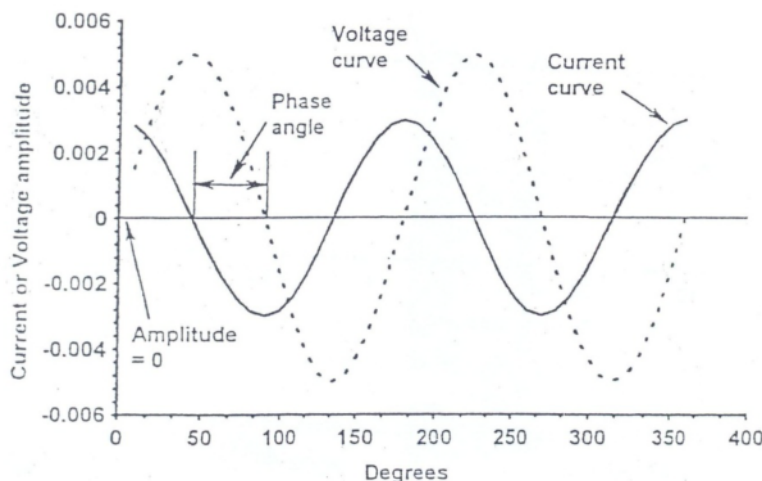


شکل ۲-۲- مدار الکتریکی معادل لایه دوگانه [۱].

همانطور که می‌دانیم یک مدت زمان خاصی طول می‌کشد تا خازن شارژ کامل شود، این تاخیر باعث می‌شود تا بین منحنی‌های ولتاژ و جریان مربوط به مدار یک اختلاف فاز وجود داشته باشد (شکل ۲-۳). این اختلاف فاز با نام زاویه فاز شناخته می‌شود و مقدار آن برای هر

¹ Double Layer

ولتاژ خاص اعمالی به نمونه متفاوت است. چون مقاومت الکتریکی توانایی ذخیره بار الکتریکی را ندارد پس در حین اعمال ولتاژ متناوب دارای زاویه فاز صفر خواهد بود. مقادیر زاویه فاز در اطلاعات مربوط به تست EIS به صورت کمیتی مثبت گزارش می‌شوند حتی اگر در اصل کمیت آنها منفی باشد.



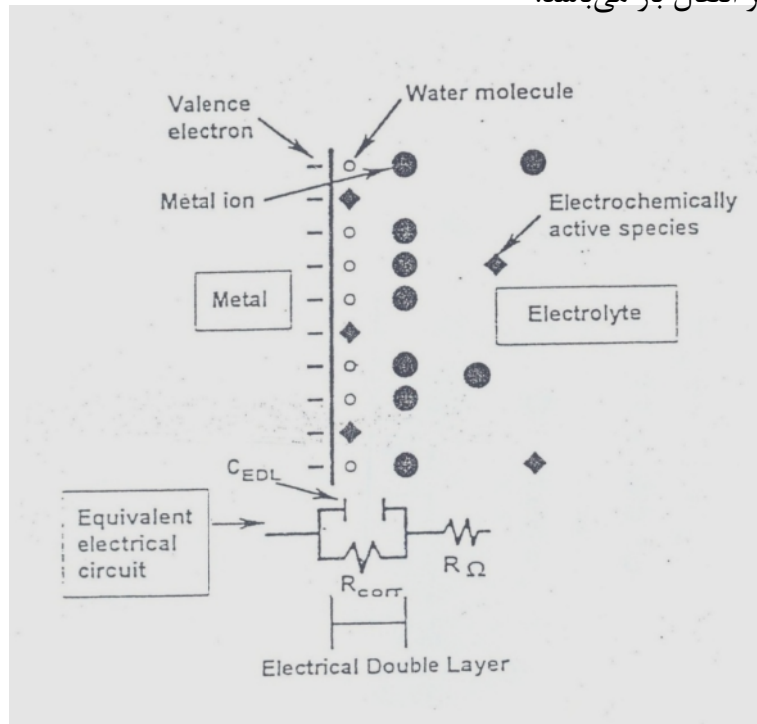
شکل ۲-۳- اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان متناوب [۱].

۲-۲- رفتار لایه دوگانه در اثر اعمال ولتاژ متناوب

اعمال ولتاژ متناوب مانند ولتاژ مستقیم باعث می‌شود که یون‌های موجود در محلول به طرف الکترودها حرکت کنند تا اصل خنثی بودن بارهای الکتریکی برقرار باشد. با این حال اعمال ولتاژ مستقیم باعث می‌شود تا یونها تنها در یک جهت خاص بسته به آندی یا کاتدی بودن ولتاژ مستقیم اعمالی حرکت کنند. در صورتی که اعمال ولتاژ به صورت متناوب باشد، در اثر تغییر پلاریته و مقدار ولتاژ اعمالی، جهت حرکت یونها بین الکترود شمارنده جریان^۱ و نمونه تغییر خواهد کرد. به همین طریق، انتقال الکترون بین سطح الکترود و یون‌های موجود در محلول نیز به صورت متناوب و سیکلی انجام خواهد شد. در شکل ۲-۴ لایه دوگانه تشکیل شده در سطح فلز در حال خورده شدن و مدار الکتریکی معادل با آن نمایش داده شده است. این مدار شامل مقاومت خوردگی، مقاومت محیط خورنده و خازن معادل با لایه دوگانه می‌باشد. این لایه دوگانه در حقیقت یک فصل مشترک الکتریکی است که در اثر اعمال ولتاژ دارای

¹ Counter Electrode

خاصیت خازنی با ظرفیت مشخص خواهد شد. لایه دوگانه دارای یک ثابت زمانی است که مقدار آن برابر با حاصل ضرب مقدار ظرفیت خازن معادل در مقدار مقاومت خوردگی یا همان مقاومت در برابر انتقال بار می‌باشد.



شکل ۲-۴- لایه دوگانه تشکیل شده در سطح یک فلز در حال خورده شدن [۱].

پلاریزاسیون متناوب، لایه دوگانه را مجبور می‌کند تا ترکیب شیمیایی خود را همگام با تغییرات مقدار و جهت ولتاژ اعمالی تغییر دهد. با این حال یک مدت زمان خاص طول می‌کشد تا لایه دوگانه بتواند ترکیب شیمیایی خود را با مقدار و جهت پلاریزاسیون لحظه‌ای تطبیق دهد. این پدیده مانند مدت زمانی است طول می‌کشد تا یک خازن پس از اعمال ولتاژ به طور کامل شارژ شود. در محدوده فرکانس ۵ mHz تا ۱۰۰ KHz که در تست‌های EIS کاربرد دارد، محدوده خاصی وجود دارد که در این محدوده فرکانس مدت زمان لازم برای رسیدن ترکیب شیمیایی لایه دوگانه به حالت پایدار برابر با مدت زمان لازم برای کامل شدن یک دوره تناوب ولتاژ اعمالی می‌باشد. در نتیجه در این حالت، مدت زمان لازم برای رسیدن لایه دوگانه به حالت پایدار شیمیایی متناسب با فرکانس ولتاژ اعمالی می‌باشد. به علاوه، در این محدوده، ثابت زمانی لایه دوگانه جزئی از محدوده فرکانس فوق می‌باشد و تغییرات لایه دوگانه با تغییرات پلاریزاسیون اعمالی متفاوت از تغییرات آن در فرکانس‌های خارج از این محدوده می‌باشد.

۳-۲- کاربرد تست امپدانس الکتروشیمیایی و روش‌های مرسوم گزارش

نتایج EIS

یکی از روش‌های نوین و متداول جهت مطالعه رفتار خوردگی فلزات در محیط‌هایی با هدایت الکتریکی پایین، بررسی میزان موفقیت در اعمال پوشش بر سطح فلزات، مطالعه میزان پوشش بازدارنده بر روی سطح و مکانیزم عملکرد بازدارنده، روش امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) می‌باشد.

امپدانس الکتروشیمیایی بوسیله اعمال ولتاژ متناوب به نمونه و خواندن مقادیر جریان عبوری محاسبه می‌شود که روابط آن به صورت زیر می‌باشد :

$$E(t) = E_0 \cos(\omega t) \quad (1-2)$$

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t - \phi) \quad (2-2)$$

در روابط فوق $\omega = 2\pi f$ و ϕ اختلاف فاز جریان نسبت به ولتاژ اعمالی می‌باشد ، در نتیجه امپدانس برابر است با:

$$Z = (E_0 \cos(\omega t)) / (I_0 \cos(\omega t - \phi)) = Z_0 (\cos(\omega t)) / (\cos(\omega t - \phi)) \quad (3-2)$$

امپدانس بر حسب مقدار مقاومت و تغییر فاز به صورت رابطه زیر می‌شود :

$$Z = Z_0 (\cos \phi + j \sin \phi) \quad (4-2)$$

حال این اطلاعات بدست آمده از تست EIS را می‌توان براساس مولفه‌های برداری امپدانس، امپدانس کل و یا زاویه فاز گزارش نمود. سه روش عمده در گزارش اطلاعات EIS عبارتند از:

۱. منحنی‌های کمپلکس

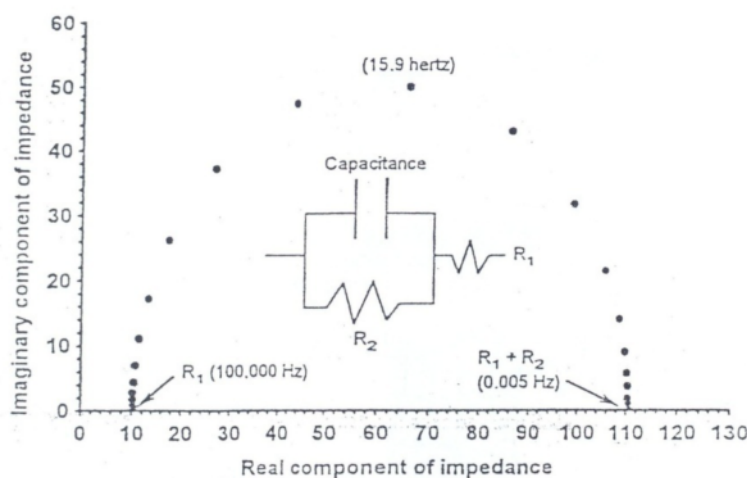
۲. منحنی‌های لگاریتمی اندازه امپدانس کل برحسب

۳. منحنی‌های لگاریتمی زاویه فاز برحسب فرکانس

نوع اول این نمودارها مولفه‌های حقیقی و موهمی امپدانس کل هستند و گاهی با نام نایکوئست (Nyquist) نیز شناخته می‌شوند. در شکل ۲-۵ یک نمونه از نمودار نایکوئست و مدار معادل آن که دارای ثابت زمانی است نشان داده شده است. باید توجه داشت که در

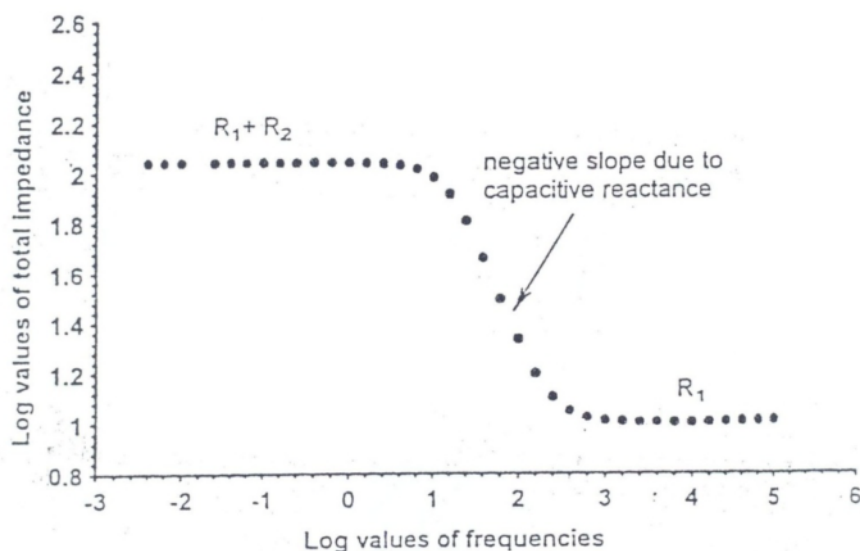
صورتی که مدار معادل دارای بیش از یک ثابت زمانی باشد، مانند وقتی که نمونه دارای پوشش آلی است و تبع آن یک ثابت زمانی مربوط به سطح فلز در حال خورده شدن و یک ثابت زمانی مربوط به پوشش آلی موجود در سطح فلز در مدار معادل ایجاد خواهد شد، باز هم نمودار نایکوئست حاصل به صورت دایره‌ای خواهد شد. به همین دلیل نمی‌توان تنها با اتکا به همین نمودار تفسیر درستی از ماهیت خوردگی بدست آورد، در نتیجه لازم است تا از روش‌های دیگر در گزارش اطلاعات تست EIS که نسبت به تعداد ثابت‌های زمانی حساس‌ترند، مانند منحنی‌های باد (Bode) استفاده شود. در شکل ۲-۵ مقادیر مختلف مولفه موهومی امپدانس برحسب مولفه حقیقی آن در فرکانس‌های مختلف رسم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود مقادیر مربوط به فرکانس‌های پایین در سمت راست نمودار و مقادیر مربوط به فرکانس‌های بالا در سمت چپ نمودار قرار دارند. خاصیت خازنی لایه دوگانه و به تبع آن وجود خازن در مدار معادل، باعث دایره‌ای شکل شدن این نمودار می‌شود. با این حال اگر مقاومت موازی با خازن در مدار معادل خیلی زیاد باشد، یعنی مقاومت به خوردگی فلز بسیار بالا باشد، نمودار فوق به جای نیم‌دایره به صورت خطی ظاهر خواهد شد. در مدار فوق R_2 بیانگر مقاومت به خوردگی فلز، R_1 بیانگر مقاومت الکتریکی محیط خورنده و C همان ظرفیت خازن لایه دوگانه می‌باشد. رابطه زیر بیانگر ارتباط بین ظرفیت خازن با مقاومت به خوردگی و فرکانس در نقطه راس نیم‌دایره فوق می‌باشد:

$$C = \frac{1}{2} \pi \cdot f \cdot R_2 \quad (5-2)$$



شکل ۲-۵- یک نمونه از منحنی‌های کمپلکس EIS دارای یک ثابت زمانی [۱].

در شکل ۶-۲ نمودار نوع دوم حاصل از نمودار نایکوئست نمایش داده شده است. در این نوع نمودارها محور X نشان دهنده مقادیر لگاریتم فرکانس‌های مختلف است و محور Y بیانگر مقادیر لگاریتم امپدانس کل در هر فرکانس خاص می‌باشد. همچنین موقعیت مقاومت‌های R_1 و R_2 و خازن موجود در مدار معادل نیز در این شکل نشان داده شده است. هنگامی که فرکانس پلاریزه شدن در محدوده‌ای باشد که فقط مقاومت‌های موجود در مدار معادل بتوانند به این تغییرات واکنش نشان داده و خود را با آن تطبیق دهند، شیب نمودار صفر خواهد شد. ولی وقتی که فرکانس پلاریزاسیون در محدوده‌ای باشد که خازن موجود در مدار نیز بتواند خود را با تغییرات پلاریزاسیون همگام کند، شیب نمودار منفی خواهد شد. شیب ناحیه فوق با رابطه R_2/R_1 متناسب خواهد بود و هرچه این نسبت بزرگتر باشد این شیب به عدد ۱- نزدیکتر خواهد شد.

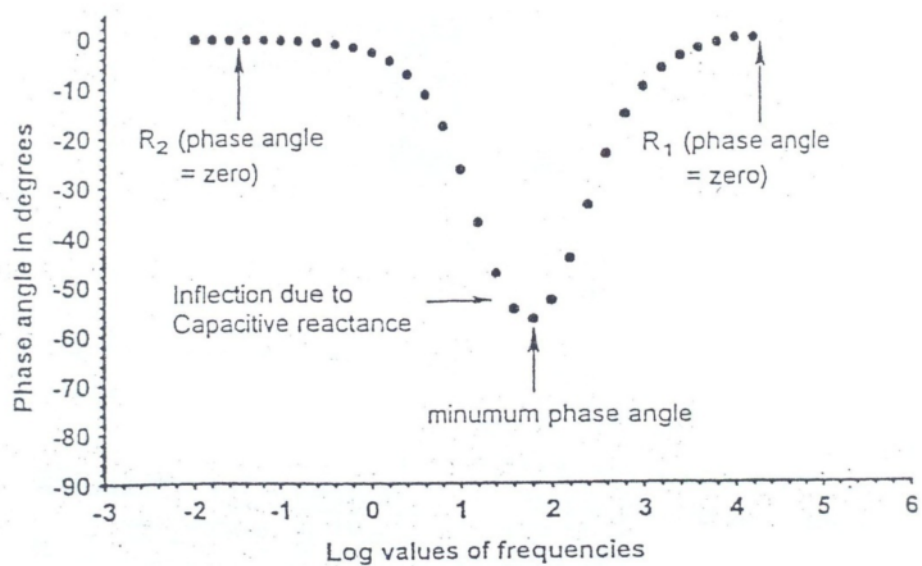


شکل ۶-۲- یک نمونه‌ای از منحنی‌های لگاریتمی اندازه امپدانس کل برحسب فرکانس [۱].

در شکل ۷-۲ نمودار نوع سوم حاصل از نمودارهای نشان داده شده در دو شکل قبل نمایش داده شده است. فرکانس در نقطه کمینه موجود در شکل فوق از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f = 1/1.77 R_2.C \quad (۶-۲)$$

در این رابطه f فرکانس، R_2 مقاومت به خوردگی و C برابر با ظرفیت خازن معادل لایه دو گانه در مدار الکتریکی می‌باشد.



شکل ۷-۲- یک نمونه از منحنی‌های لگاریتمی زاویه فاز برحسب فرکانس [۱].

مقایسه نمودارهای دوم و سوم (Bode Magnitude and Bode Phase) نشان می‌دهد که نقطه کمینه در نمودار سوم به محدوده فرکانسی تعلق دارد که شیب نمودار نوع دوم در آن منفی باشد. همچنین مقاومت‌های R_1 و R_2 در نمودار نوع دوم متعلق به فرکانس‌هایی است که در زاویه فاز برابر صفر باشد.

۳- روش تحقیق و کارهای آزمایشگاهی

۳-۱- استراتژی تحقیق

با توجه به اینکه هدف نهایی از انجام این تحقیق، بررسی لایه فیلم مقاوم به خوردگی تشکیل شده بروی سطح فلزات می‌باشد، از تست EIS استفاده گردید. به همین منظور، ابتدا نمونه‌هایی جهت آزمایشات EIS تهیه شد که جنس آنها مس تجاری و فولاد ساده کربنی به شماره API 5L X52 می‌باشد. در ادامه دو محلول تهیه شد که در یکی محلول میتره صنعتی حضور داشت و دیگری بدون محلول میتره صنعتی است. در انتها نیز با استفاده از روش امپدانس الکتروشیمیایی، لایه فیلم مقاوم به خوردگی ایجاد شده بر روی سطح فلزات بوسیله محلول میتره صنعتی مورد مطالعه قرار گرفت.

۳-۲- نحوه آماده سازی نمونه‌ها برای تست‌های EIS

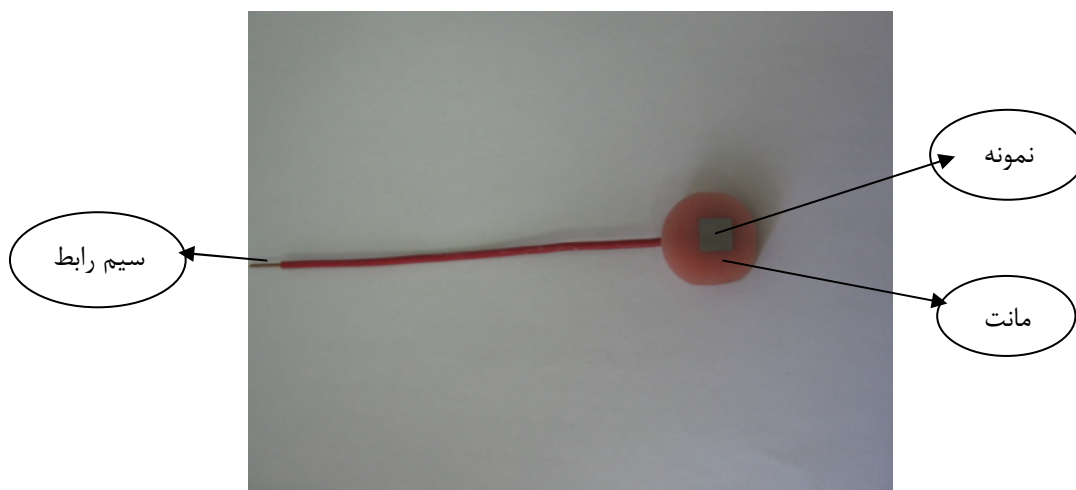
برای انجام تست‌های EIS از لوله‌های مسی و فولادی استفاده کردیم، چراکه این دو فلز بیشتر در تاسیسات مورد استفاده قرار می‌گیرند. ترکیب شیمیایی لوله‌های مسی و فولادی در جدول ۳-۱ آورده شده است.

جهت آماده سازی نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های EIS از استاندارد ASTM G61 استفاده شده است. برای این منظور از لوله‌های فولادی و مسی دو نمونه به مساحت ۱ سانتی‌متر مربع در آورده شد. سپس سیم رابط مسی به پشت نمونه‌ها لحیم گردید و در ادامه از مانت سرد جهت عایق بندی سطوح اضافی استفاده شد. تصویر نمونه‌های مورد استفاده جهت تست‌های خوردگی پلاریزاسیون در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. پس از انجام این مرحله نمونه‌های تولید شده وارد مرحله آماده سازی سطح می‌گردند.

جدول ۳-۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده

Element	Fe	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb	Ni
Composition (wt %)	Balance	0.09	0.186	0.867	0.006	0.003	0.016	0.01	0.023	0.016

قبل از انجام آزمایش‌های خوردگی برای اطمینان از حذف تمامی آلاینده‌ها و محصولات خوردگی بر روی سطح نمونه‌ها و همچنین برای ایجاد یک سطح صاف، براق و بدون زبری، سطح نمونه‌ها با استفاده از کاغذهای سنباده به شماره ۲۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ سنباده زده شد. در ادامه نمونه‌ها با استون و آب مقطر شستشو داده شد تا سطح نمونه‌ها کاملاً تمیز شوند.



شکل ۳-۱- تصویر نوعی از نمونه‌های تست تافل

۳-۳- آماده سازی محلول برای تست‌های امپدانس الکتروشیمیایی

برای اینکه بتوان لایه تشکیل شده توسط محلول میتره صنعتی را برای هر فلز مورد بررسی قرار داد، باید از نمونه‌های شاهد استفاده کرد. به این صورت که برای یک نمونه، محلول میتره صنعتی نباید حضور داشته باشد. تست‌های خوردگی در آب شهر انجام گرفت چراکه معمولاً از آب شهر برای تاسیسات استفاده می‌کنند. بنابراین ۴ محلول تهیه شد که دو محلول آن فقط آب شهر و دوتای دیگر آب شهر به همراه محلول میتره صنعتی بود. مقدار محلول میتره صنعتی که باید به آب شهر اضافه گردد بستگی به سختی آب دارد. برای همین منظور ابتدا سختی آب

شهر را سه بار و با استفاده از یک سختی سنج دیجیتالی اندازه گیری گردید و سپس بر اساس جدول ۲-۳ که در کاتالوگ محلول میتره صنعتی نیز آمده است، مقدار محلول میتره صنعتی تعیین شد. از آنجایی که میانگین سختی آب شهر در حدوده ۷۰۰ ppm بود، لذا براساس جدول ۲-۳، ۰/۴ درصد محلول میتره صنعتی اضافه گردید.

جدول ۲-۳- کالیبره استفاده از محلول میتره جهت پیشگیری از خوردگی و رسوب گذاری

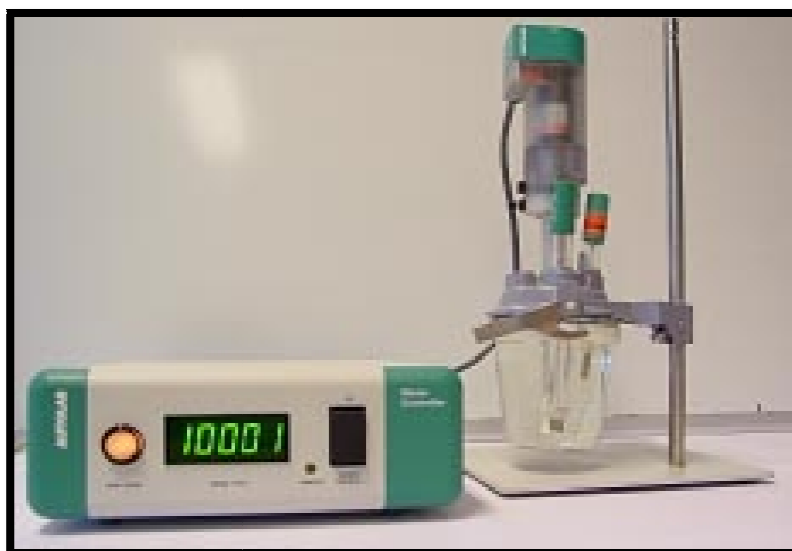
میزان سختی آب (ppm)	میزان مصرف محلول میتره در هر ۱۰۰ لیتر آب در گردش
۰-۱۰۰	۱ لیتر
۱۰۰-۳۰۰	۲ لیتر
۳۰۰-۶۰۰	۳ لیتر
۶۰۰-۹۰۰	۴ لیتر
۹۰۰-۱۲۰۰	۵ لیتر

۳-۴- نحوه انجام آزمایش های امپدانس الکتروشیمیایی

برای بررسی فیلم تشکیل شده توسط محلول میتره صنعتی و تعیین این مسئله که با حضور محلول میتره صنعتی در آب، نرخ خوردگی فلزات مس و فولاد ساده کربنی چه تغییری می کند از روش امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد. لازم به ذکر است که آزمایشات بر اساس استانداردهای ASTM G3 & G106 انجام شده است.

تست های EIS با استفاده از دستگاه پتانسیواستات مدل μ Autolab type III و آنالیز نتایج تست های تافل توسط نرم افزار FRA 4.9 (Frequency Response Analysis) انجام گرفت (شکل ۲-۳). تمام تست های خوردگی در یک سل پیرکس سه الکترودی و در دمای محیط انجام شد و از الکترود Ag/AgCl به عنوان الکترود مرجع و از الکترود پلاتین به عنوان الکترود کمکی استفاده گردید. با توجه به اینکه انتظار می رود محلول میتره صنعتی یک نقش بازدارندگی داشته باشد و معمولاً بازدارنده ها نیاز به زمان دارند تا بتوانند نقش بازدارندگی خود

را ایفاء کنند، به همین خاطر پس از آماده سازی نمونه‌های تست خوردگی و محلول‌ها، نمونه‌ها را قبل از انجام تست‌ها به مدت ۱۶۸ ساعت (یک هفته) در محلول‌ها غوطه‌ور کردیم.



شکل ۳-۲- دستگاه پتانسیواستات مدل μ Autolab type III

۴- نتایج و بحث

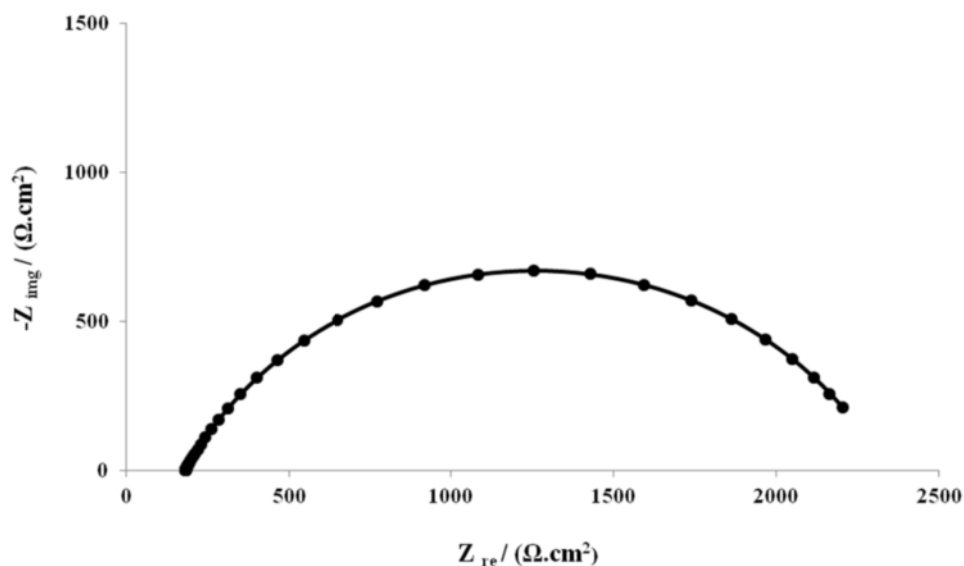
۴-۱- بررسی نتایج امپدانس الکتروشیمیایی برای فولاد ساده کربنی

شکل های ۱-۴، ۲-۴ و ۳-۴ به ترتیب نشان دهنده نمودار نایکوئیست، بد- فاز و بد بدست آمده از تست های امپدانس الکتروشیمیایی خوردگی فولاد کربنی X52 در محلول آب آشامیدنی می باشد. شکل ۱-۴ نشان می دهد که در غیاب ممانعت کننده، از فرکانس های بالا تا فرکانس های پایین، نمودار نایکوئیست بصورت یک نیم دایره خازنی له شده^۱ یا پایین افتاده و با مرکزی زیر محور افقی بوده که این از مشخصات الکترودهای جامد می باشد که به زبری و ناهمگنی سطح الکتروود مربوط می شود [۲، ۳]. ظهور نیم دایره های خازنی در نمودارهای نایکوئیست به خازن لایه دوگانه و مقاومت انتقال بار در فرآیند خوردگی در سطح فلز نسبت داده می شود [۴]. بنابراین فرآیند خوردگی فولاد کربنی در غیاب ممانعت کننده تحت کنترل مقاومت انتقال بار می باشد. نمودار بد- فاز بدست آمده (شکل ۲-۴) نشان دهنده وجود یک ثابت زمانی در غیاب ممانعت کننده می باشد که به رفتار خازنی لایه دوگانه مربوط می باشد. همچنین وجود تنها یک شیب ۱- در نمودار بد (شکل ۳-۴) نیز تایید کننده وجود تنها یک ثابت زمانی در خوردگی فولاد در محلول آب آشامیدنی در غیاب ممانعت کننده است. شکل ۴-۴ نمودارهای نایکوئیست بدست آمده از خوردگی فولاد در محلول آب آشامیدنی در غیاب و در حضور ممانعت کننده میتره می باشد. همان طور که مشاهده می شود با افزوده شدن محلول میتره به سیستم، قطر نیم دایره خازنی بزرگتر می شود که نشان دهنده بازدارندگی این ترکیب می باشد.

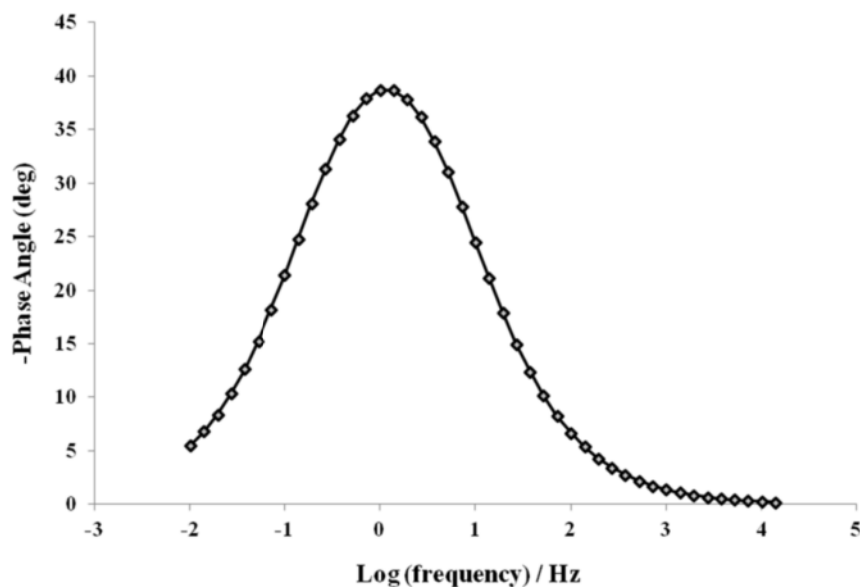
با توجه به نمودارهای بد- فاز (شکل ۴-۵)، مشاهده می شود که در حضور محلول میتره، دو ثابت زمانی وجود دارد، که ثابت زمانی در فرکانس های بالا را به تشکیل یک فیلم محافظ در

¹ Depressed

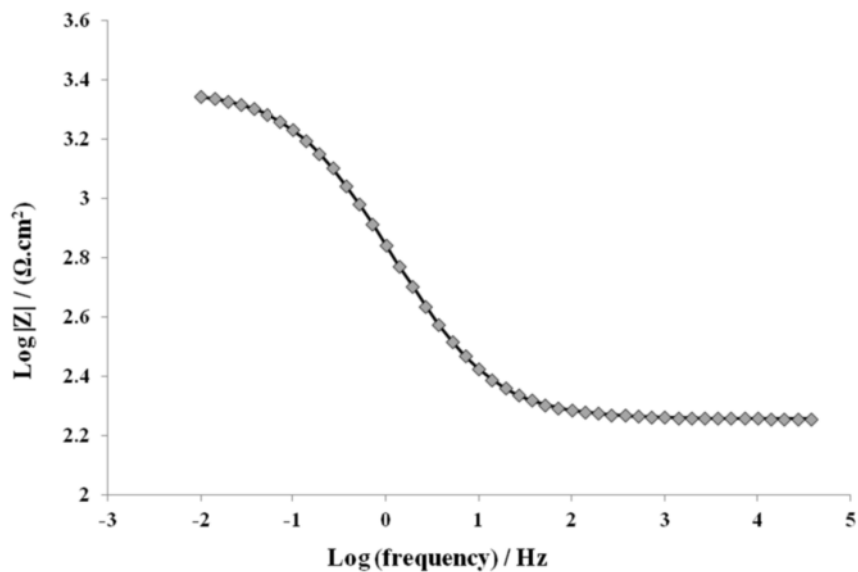
برابر خوردگی مربوط می دانند و ثابت زمانی در فرکانس های پایین تر را مربوط به رفتار خازنی لایه دوگانه در نظر می گیرند. همان طور که در نمودارهای بد (شکل ۴-۶) ملاحظه می شود با افزوده شدن محلول میتره به سیستم مقدار امپدانس افزایش می یابد که نشان دهنده افزایش مقاومت پلاریزاسیون می باشد.



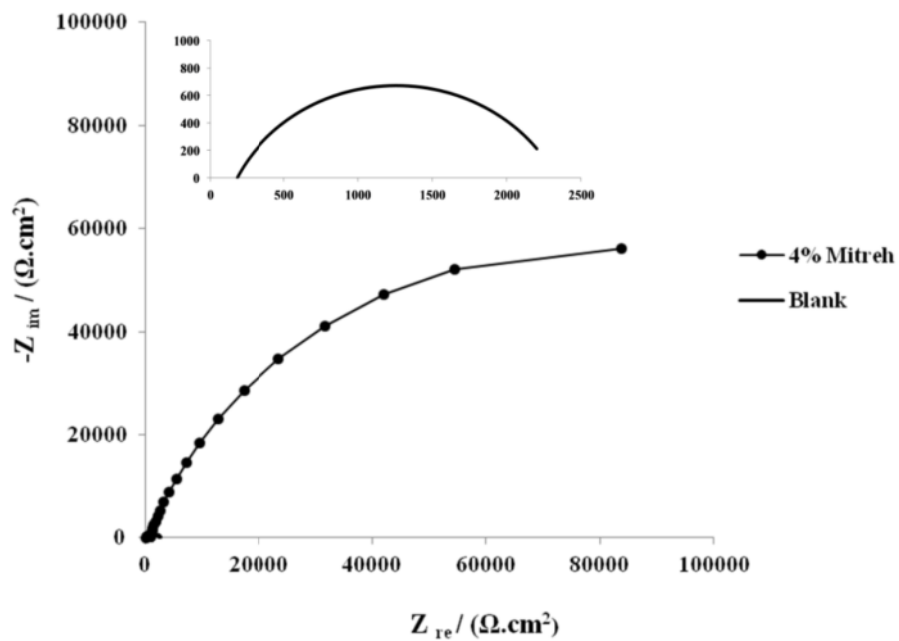
شکل ۴-۱- نمودار نایکوئیست بدست آمده از خوردگی فولاد کربنی در محلول آب آشامیدنی.



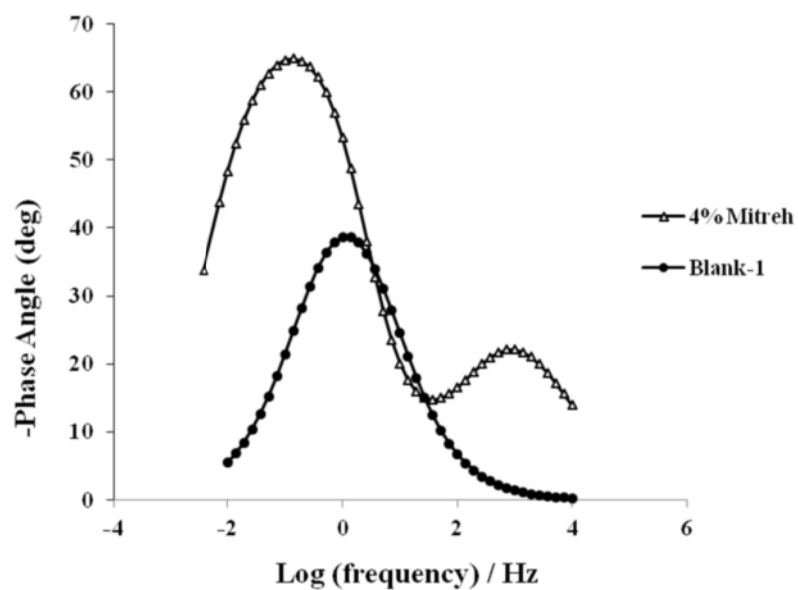
شکل ۴-۲- نمودار بد- فاز بدست آمده از خوردگی فولاد کربنی در محلول آب آشامیدنی.



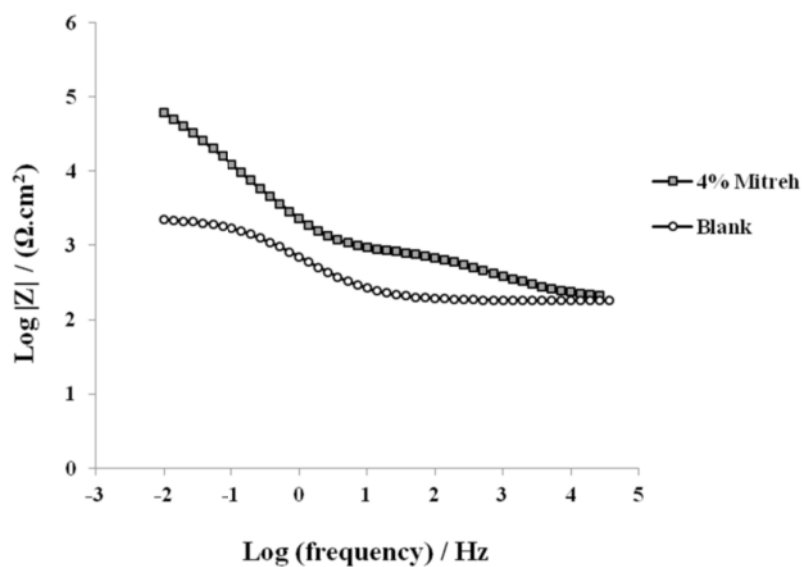
شکل ۳-۴- نمودار بد بدست آمده از خوردگی فولاد کربنی در آب آشامیدنی.



شکل ۴-۴- نمودارهای نایکوئیست بدست آمده از خوردگی فولاد کربنی در محلول آب آشامیدنی در غیاب و در حضور محلول میتره.



شکل ۴-۵- نمودارهای بد- فاز بدست آمده از خوردگی فولاد کربنی در محلول آب آشامیدنی در غیاب و در حضور محلول میتره.



شکل ۴-۶- نمودارهای بد بدست آمده از خوردگی فولاد کربنی در محلول آب آشامیدنی در غیاب و در حضور محلول میتره.

معمولاً از مدارهای معادل الکتریکی برای مدل سازی رفتار الکتروشیمیایی و محاسبه پارامترهایی همچون مقاومت محلول، مقاومت انتقال بار و ظرفیت خازنی لایه دوگانه استفاده

می شود. در حالت پاسخ فرکانس غیر ایده آل، استفاده از عناصر مداری توزیع شده^۱ در یک مدار معادل مورد قبول می باشد. عنصر با فاز ثابت (CPE^۲) معمول ترین آنها می باشد که با توان غیر صحیح به فرکانس وابسته است. امپدانس (مقاومت) یک CPE بصورت زیر مشخص می شود:

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Y(i\omega)^n} \quad (1-4)$$

که در آن Y ثابتی است که متناسب با ظرفیت خازنی می باشد و $i = \sqrt{-1}$ و $\omega = 2\pi f$ و n مقدار تغییر فاز یا ضریب غیر یکنواختی سطح بوده و $-1 \leq n \leq 1$ می باشد. یک CPE بسته به مقدار n می تواند نشان دهنده عناصر مختلفی در مدار باشد و به ازای مقادیر $n = 0$ و 1 به ترتیب، نشان دهنده رفتار مقاومتی خالص، ظرفیتی خالص و القایی خالص بوده و اگر $n = 0.5$ باشد، CPE دارای رفتار امپدانس واربرگ^۳ می باشد. [۵، ۶].

با توجه به نتایج بدست آمده از طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، مدار معادل الکتریکی خوردگی فولاد کربنی در محلول آب آشامیدنی در غیاب ممانعت کننده در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. این مدار که تایید کننده مکانیزم انتقال بار خوردگی فولاد در محلول حاوی نمک می باشد شامل R_s مقاومت محلول (مقاومت جبران نشده)^۴، R_{ct} مقاومت انتقال بار و CPE عنصر با فاز ثابت با خصوصیات خازنی می باشد.

اگرچه در منحنی های نایکوئیست نشان داده شده در شکل ۴-۴، در حضور میتره، پیدا کردن دو نیم دایره برای خوردگی فولاد API 5L X52 در محلول آب آشامیدنی مشکل می باشد، اما با توجه به وجود دو ثابت زمانی در نمودارهای بد-فاز و بد (شکل ۴-۵ و ۴-۶) بدست آمده مدار معادل مناسب خوردگی فولاد در حضور میتره به صورت شکل ۴-۸ می باشد که در آن CPE_f و CPE_{dl} به ترتیب عنصر با فاز ثابت مربوط به فیلم تشکیل شده از میتره و لایه دوگانه با خصوصیات خازنی می باشد. R_f و R_{ct} نیز به ترتیب مقاومت فیلم محافظ و مقاومت انتقال بار می باشد. نیم دایره خازنی در فرکانس های بالا به فیلم محافظ بازدارنده به دلیل ثابت زمانی پایین آن مربوط می باشد. دلیل واضح نبودن دو ثابت زمانی (نیم دایره خازنی) در نمودار

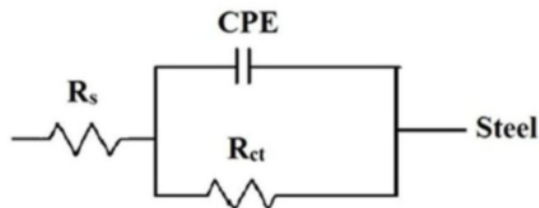
¹ Distributed circuit elements

² Constant Phase Element

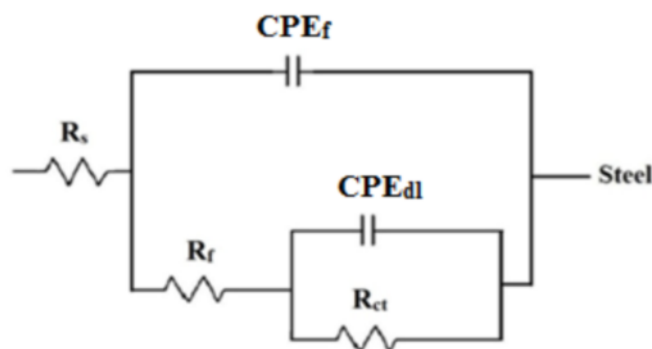
³ Warburge impedance

⁴ Uncompensated resistance

نایکوئیست بدست آمده را می توان به جذب میتره به صورت تک لایه روی سطح فولاد مربوط دانست [۷]. می توان در نظر گرفت که مقاومت فیلم ممانعت کننده (R_f) بسیار کوچکتر از مقاومت انتقال بار می باشد و نیم دایره مربوط به فیلم ممانعت کننده با نیم دایره انتقال بار، در نمودار نایکوئیست ادغام می شود. بنابراین در نمودار نایکوئیست در حضور میتره، نمی توان دو نیم دایره را از هم تشخیص داد.



شکل ۴-۷- مدار الکتریکی معادل برای خوردگی فولاد کربنی در محلول آب آشامیدنی در غیاب ممانعت کننده.



شکل ۴-۸- مدار الکتریکی معادل برای خوردگی فولاد کربنی در محلول آب آشامیدنی در حضور محلول میتره.

نتایج الکتروشیمیایی این نمودارها که از مدل سازی توسط مدار معادل الکتریکی بوسیله نرم افزار FRA و Zview بدست آمده اند، در جدول ۴-۴ آورده شده است. بازده بازدارندگی ($\eta\%$) از فرمول زیر محاسبه گردید:

$$\eta\% = \left(\frac{R_{ct(inh)} - R_{ct}}{R_{ct(inh)}} \right) \times 100 \quad (۲-۴)$$

که در آن R_{ct} و $R_{ct(inh)}$ به ترتیب مقاومت انتقال بار در غیاب و در حضور ممانعت کننده است. همان گونه که در جدول ۴-۱ مشاهده می شود، بازده بازدارندگی بدست آمده توسط

4% میتره 98.7% بوده که این مقدار در حد قابل قبولی بوده و در توافق با نتایج بدست آمده از آزمون پلاریزاسیون تافل می باشد.

همچنین ظرفیت خازنی لایه دوگانه و فیلم با فرمول زیر محاسبه شد [۸]:

$$C_i = (Y_i R_i^{1-n_i})^{\frac{1}{n}} \quad (3-4)$$

که در آن C ظرفیت خازنی CPE، Y ثابت CPE، R مقاومت عنصر با فاز ثابت می باشد. با توجه به نتایج بدست آمده و همان طور که در جدول ۴-۴ نشان داده شده است، می توان دریافت که ظرفیت خازنی لایه دوگانه با افزوده شدن میتره به سیستم کاهش یافته که این می تواند بدلیل جذب سطحی یک فیلم فشرده محافظ بر روی سطح باشد.

جدول ۴-۴- نتایج الکتروشیمیایی بدست آمده از EIS برای خوردگی فولاد کربنی در غیاب و در حضور محلول بازدارنده میتره.

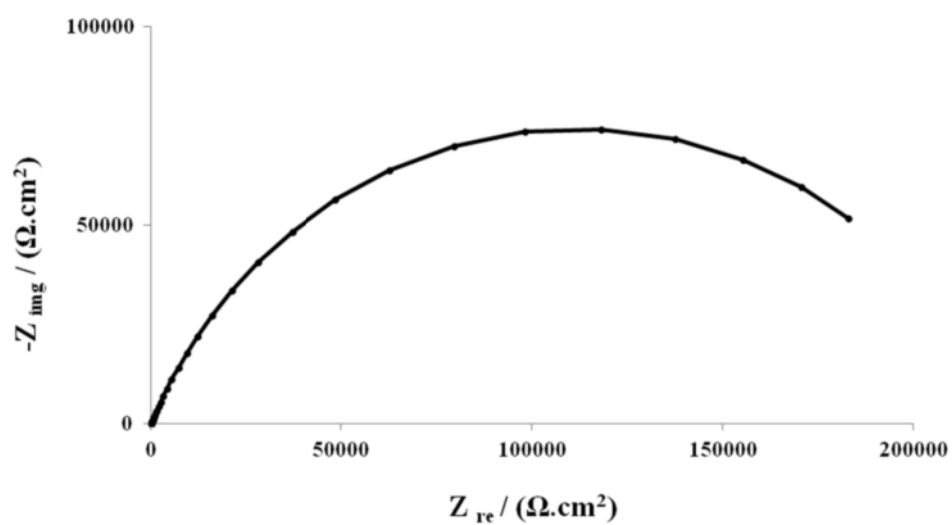
System (mg/L)	Blank	4% Mitreh
$R_s (\Omega \text{ cm}^2)$	181	182.9
$R_{ct} (\Omega \text{ cm}^2)$	2153	166000
n_{dl}	0.71	0.846
$Y_{dl} (s^n / \text{cm}^2 \Omega) 10^{-6}$	399.4	95.92
$C_{dl} (\mu\text{F}/\text{cm}^2)$	23.66	158.47
$R_f (\Omega \text{ cm}^2)$	-	787.3
n_f	-	0.59
$Y_f (s^n / \text{cm}^2 \Omega) 10^{-6}$	-	18.06
$C_f (\mu\text{F}/\text{cm}^2)$	-	45
$\eta (\%)$	-	98.70
Surface Coverage, θ	-	0.987

۴-۲- بررسی نتایج امپدانس الکتروشیمیایی بدست آمده برای مس تجاری

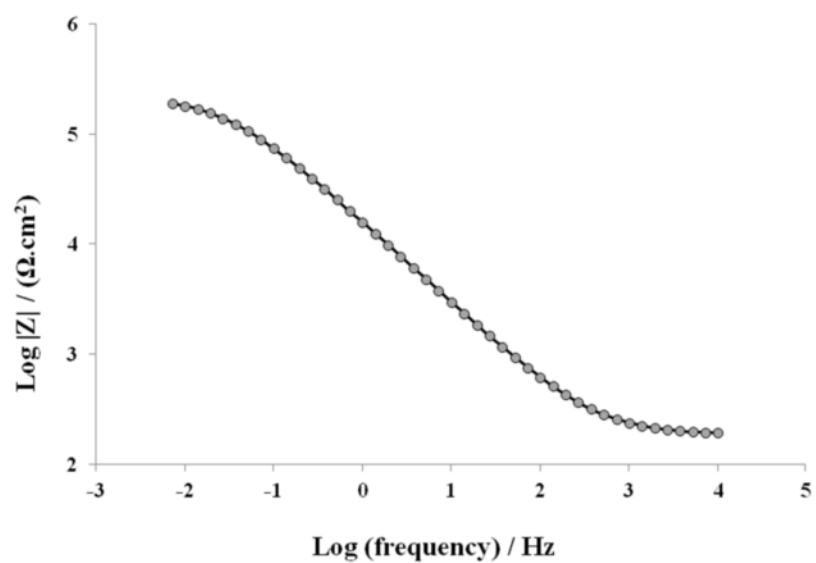
شکل های ۹-۴، ۱۰-۴ و ۱۱-۴ به ترتیب نشان دهنده نمودار نایکوئیست، بد- فاز و بد بدست آمده از تست های امپدانس الکتروشیمیایی خوردگی مس تجاری در محلول آب آشامیدنی می باشد. با توجه به نمودار نایکوئیست بدست آمده می توان دریافت که در غیاب ممانعت کننده، از فرکانس های بالا تا فرکانس های پایین، نمودار نایکوئیست بصورت یک نیم دایره خازنی له شده یا پایین افتاده و با مرکزی زیر محور افقی بوده که این از مشخصات الکترودهای جامد می باشد که به زبری و ناهمگنی سطح الکتروده مربوط می شود. بنابراین فرآیند خوردگی مس تجاری در غیاب ممانعت کننده تحت کنترل مقاومت انتقال بار می باشد. نمودار بد- فاز بدست آمده (شکل ۱۰-۴) نشان دهنده وجود یک ثابت زمانی در غیاب ممانعت کننده می باشد که به رفتار خازنی لایه دوگانه مربوط می باشد. همچنین وجود تنها یک شیب 1- در نمودار بد (شکل ۱۱-۴) نیز تایید کننده وجود تنها یک ثابت زمانی در خوردگی مس تجاری در محلول نمک کلرید سدیم در غیاب ممانعت کننده است.

شکل ۱۲-۴ نمودارهای نایکوئیست بدست آمده از خوردگی مس در محلول آب آشامیدنی در غیاب و در حضور ممانعت کننده میتره می باشد. همان طور که مشاهده می شود با افزوده شدن محلول میتره به سیستم، قطر نیم دایره خازنی بزرگتر می شود که نشان دهنده بازدارندگی این ترکیب می باشد.

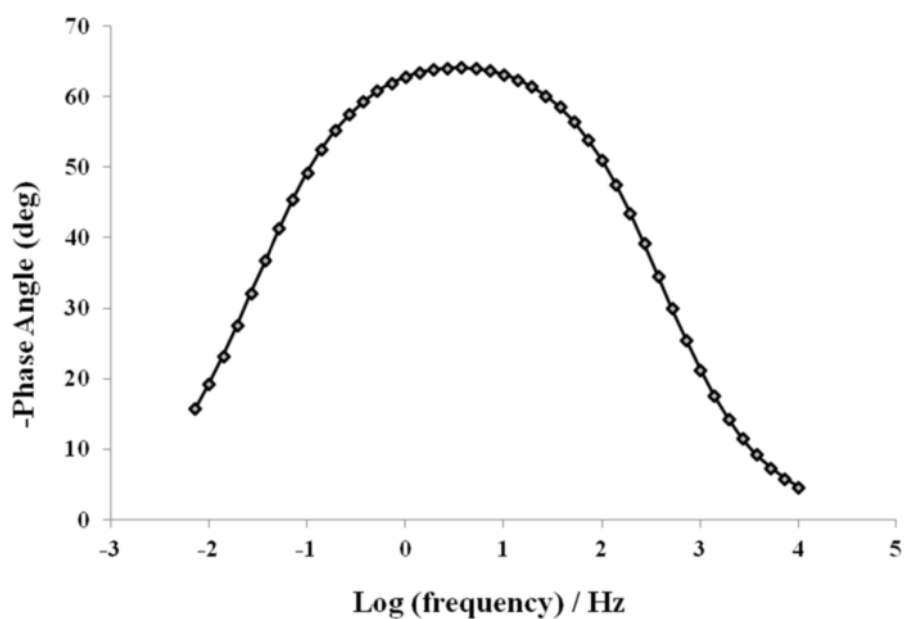
با توجه به نمودارهای نایکوئیست (شکل ۱۲-۴) و نمودارهای بد- فاز (شکل ۱۳-۴) مشاهده می شود که در حضور محلول میتره، یک ثابت زمانی وجود دارد، هر چند که با توجه به نتایج بدست آمده از تست امپدانس الکتروشیمیایی مربوط به حضور میتره برای خوردگی فولاد، در مورد مس هم انتظار دو ثابت زمانی می رود. واضح نبودن دو ثابت زمانی را می توان به کوچک بودن ظرفیت خازنی فیلم تشکیل شده از میتره بر روی مس در مقایسه با ظرفیت لایه دوگانه مربوط دانست که موجب شده نیم دایره خازنی فیلم در نیم دایره خازنی لایه دوگانه ادغام شود. همان طور که در نمودارهای بد (شکل ۱۴-۴) ملاحظه می شود با افزوده شدن محلول میتره به سیستم مقدار امپدانس افزایش می یابد که نشان دهنده افزایش مقاومت پلاریزاسیون در حضور میتره می باشد.



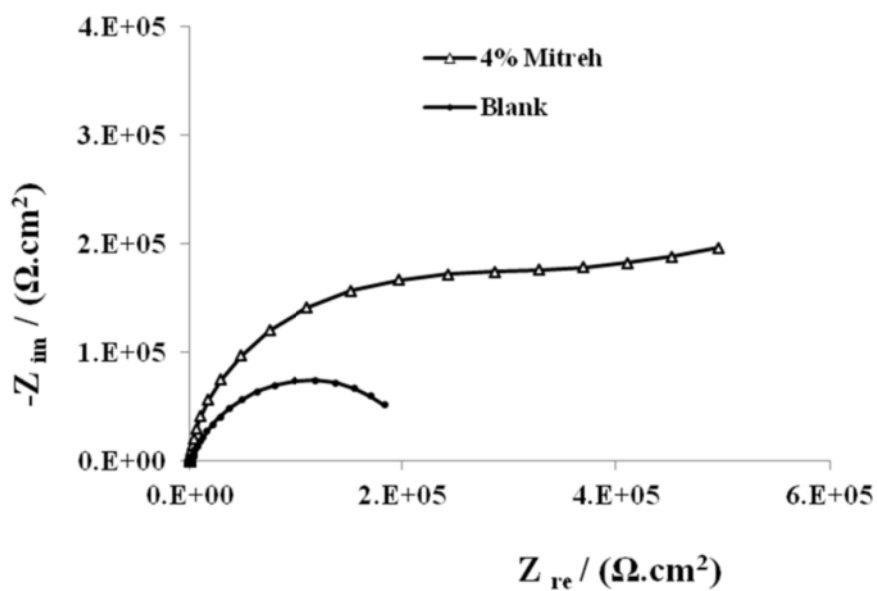
شکل ۹-۴- نمودار نایکوئیست بدست آمده از خوردگی مس تجاری در محلول آب آشامیدنی.



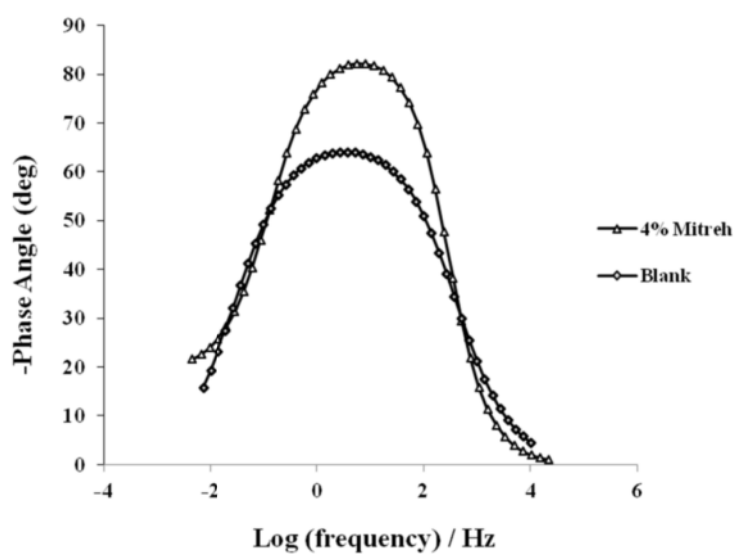
شکل ۱-۴- نمودار بد- فاز بدست آمده از خوردگی مس تجاری در محلول آب آشامیدنی.



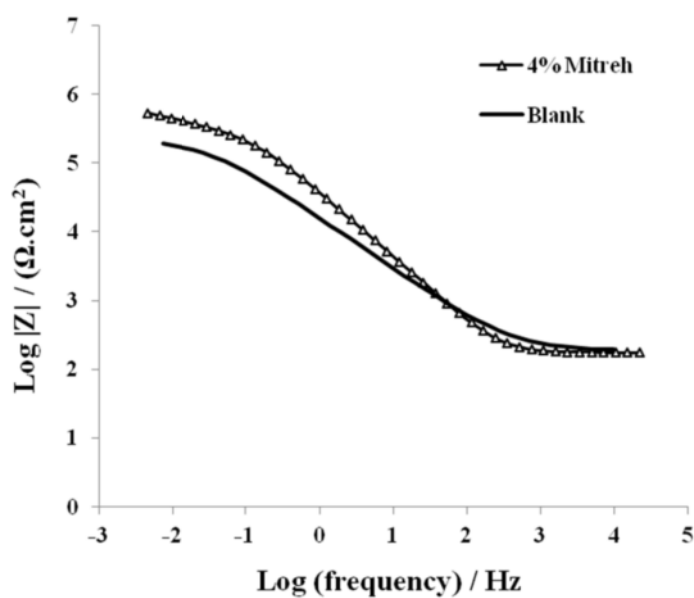
شکل ۴-۱۱- نمودار بد بدست آمده از خوردگی مس تجاری در محلول آب آشامیدنی.



شکل ۴-۱۲- نایکوئیست بدست آمده از خوردگی مس تجاری در محلول آب آشامیدنی در غیاب و در حضور محلول میتره.



شکل ۴-۱۳- نمودارهای بد- فاز بدست آمده از خوردگی مس تجاری در محلول آب آشامیدنی در غیاب و در حضور محلول میتره.



شکل ۴-۱۴- نمودارهای بد بدست آمده از خوردگی مس تجاری در محلول آب آشامیدنی در غیاب و در حضور محلول میتره.

با توجه به نتایج بدست آمده از طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، مدار معادل الکتریکی خوردگی مس تجاری در محلول آب آشامیدنی در غیاب ممانعت کننده مشابه با

خوردگی فولاد کربنی می باشد (شکل ۴-۷). مدار معادل مورد استفاده برای استخراج پارامترهای الکتروشیمیایی برای خوردگی مس تجاری در حضور میتره نیز مشابه فولاد بود (شکل ۴-۸). نتایج بدست بدست آمده در جدول ۴-۲ آورده شده است. ملاحظه می شود که با افزوده شدن میتره به سیستم، مقاومت انتقال بار افزایش یافته و ظرفیت خازنی لایه دوگانه کاهش یافته است که نشان دهنده جذب سطحی یک لایه فیلم محافظ از میتره بر روی سطح مس می باشد. همچنین مقدار بازده بازدارندگی بدست آمده از میتره برای خوردگی مس 87.02% بدست آمد که در حد قابل قبولی بوده و در توافق با نتایج بدست آمده از تست پلاریزاسیون تافل می باشد.

جدول ۴-۲- نتایج الکتروشیمیایی بدست آمده از EIS برای خوردگی مس تجاری در غیاب و در حضور محلول بازدارنده میتره.

System (mg/L)	Blank	4% Mitreh
$R_s (\Omega \text{ cm}^2)$	182.7	174.8
$R_p (\Omega \text{ cm}^2)$	228030	1.758E6
n_{dl}	0.745	0.946
$Y_{dl} (s^n / \text{cm}^2 \Omega) 10^{-6}$	15.41	4.64
$C_{dl} (\mu\text{F}/\text{cm}^2)$	375.52	5.305
$\eta (\%)$	-	87.02
Surface Coverage, θ	-	0.8702

۵- نتیجه گیری

به طور کلی می توان از نتایج بدست آمده، اینچنین نتیجه گیری کرد:

- ۱- نتایج بدست آمده از تست الکتروشیمیایی امیدانس برای خوردگی فولاد کربنی و مس تجاری در آب آشامیدنی نشان دهنده افزایش مقاومت پلاریزاسیون در نتیجه اضافه شدن محلول میتره به سیستم می باشد که این نشان دهنده خاصیت بازدارندگی خوردگی محلول میتره در محیط آب آشامیدنی می باشد.
- ۲- نتایج بدست آمده از درصد بازدارندگی محلول میتره در توافق با نتایج بدست آمده از تست پلاریزاسیون تافل بوده و آن را تایید می کند.
- ۳- نتایج بدست آمده از مدل سازی فرآیند خوردگی فولاد و مس در آب آشامیدنی در حضور محلول میتره توسط مدار معادل الکتریکی، نشان دهنده تشکیل یک فیلم محافظ بر روی سطح می باشد.

فهرست منابع

- [1] Tait, W.S, (1994). *An Introduction to Electrochemical Corrosion Testing for Practicing Engineers and Scientists*. New York: Pris Publications.
- [2] Okafor, P.C., Zheng, Y.G., (2009). "Synergistic inhibition behaviour of methylbenzyl quaternary imidazoline derivative and iodide ions on mild steel in H_2SO_4 solutions." *Corros. Sci.*, Vol. 51: 850-859.
- [3] Choi, Y.S., Nesic, S., Ling, S., (2011). "Effect of H_2S on the CO_2 corrosion of carbon steel in acidic solutions." *Electrochim. Acta*, Vol. 56: 1752–1760.
- [4] Okafor, P.C., Liu, C.B., Liu, X., Zheng, Y.G., (2009). "Inhibition of CO_2 corrosion of N80 carbon steel by carboxylic quaternary imidazoline and halide ions additives." *J. Appl. Electrochem.*, Vol. 39: 2535-2543.
- [5] Diaz, E.F., Gonzalez-Rodriguez, J.G., Martinez-Villafane, A., Gaona-Tiburcio, C., (2010). " H_2S corrosion inhibition of an ultra high strength pipeline by carboxyethyl-imidazoline." *J. Appl. Electrochem.*, Vol. 40: 1633-1640.
- [6] Heydari, M., BaghaeiRavari, F., Dadgarineghad, A., (2011). "Corrosion inhibition propargyl alcohol on low alloy Cr steel in 0.5 M H_2SO_4 in the absence and presence of potassium iodide." *GU. J. Sci.*, Vol. 24: 507-515.
- [7] Hong, T., Sun, Y.H., Jepson, W.P., (2002). "Study on corrosion inhibitor in large pipelines under multiphase flow using EIS." *Corros. Sci.*, Vol. 44: 101-112.
- [8] Ehteshamzadeh, M., (2006). *An Introduction to EIS*. Kerman: Shahid Bahonar University of Kerman Publication.

فهرست منابع

 دانشگاه شهروود دانشکده مهندسی بخش متریال		آزمایشگاه خوردگی											
آزمایش امیدانسی الکتروشیمیایی (EIS)		شماره گزارش											
تاریخ گزارش ۹۰/۱۰/۶													
مشخصات نمونه		آزمون امیدانسی الکتروشیمیایی											
هدف آزمایش		دستگاه مورد استفاده											
نام		دستگاه پتانسیو استات / گالوانو استات											
تعداد ۴		مدل دستگاه مورد استفاده											
جنس فولاد ساده کربنی و مس تجاری		Autolab Type III											
شکل مربع		استاندارد انجام آزمایش											
ابعاد ۱ cm ²		ASTM G3 & G106											
شرکت صنعتی پژوهشی آبریزان		تاریخ انجام آزمایش											
۹۰/۹/۳۰		مقایسه آزمایش											
عملکرد خوردگی محلول میره با استفاده از تست امیدانسی الکتروشیمیایی مورد مطالعه قرار گرفت. برای همین منظور ابتدا نمونه‌ها عانت شده و سپس با کاشنهای سمباده به شماره ۲۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ سمباده زده شدند. تمام تستهای خوردگی در یک سل پیرکس سه الکترودی حاوی محلول آب شهر در دو حالت با محلول میره و بدون محلول میره و در دمای محیط انجام گرفت و از الکترود Ag/AgCl به عنوان الکترود مرجع و از الکترود پلاتین به عنوان الکترود شمارنده جریان استفاده شد. قبل از انجام هر تست نمونه‌ها به مدت ۱۶۸ ساعت (۷ روز) در محلول غوطه‌ور شدند و تستهای خوردگی توسط دستگاه پتانسیو استات مدل Autolab و آنالیز نتایج تستهای امیدانسی نرم افزار FRA 4.9 (Frequency Response Analysis) انجام شد.		شرایط انجام آزمایش											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">جنس نمونه</td> <td style="text-align: center;">مقاومت پلاریزاسیون (Rp/ohm)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">فولاد ساده کربنی</td> <td style="text-align: center;">۲۰۱۶/۵۵</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">فولاد ساده کربنی + ۰/۴ درصد حجمی محلول میره</td> <td style="text-align: center;">۱۰۲۷۰۱</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">مس تجاری</td> <td style="text-align: center;">۲۱۲۷۳۷</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">مس تجاری + ۰/۴ درصد حجمی محلول میره</td> <td style="text-align: center;">۵۹۳۳۲۸</td> </tr> </table>		جنس نمونه	مقاومت پلاریزاسیون (Rp/ohm)	فولاد ساده کربنی	۲۰۱۶/۵۵	فولاد ساده کربنی + ۰/۴ درصد حجمی محلول میره	۱۰۲۷۰۱	مس تجاری	۲۱۲۷۳۷	مس تجاری + ۰/۴ درصد حجمی محلول میره	۵۹۳۳۲۸	نتایج آزمایش	
جنس نمونه	مقاومت پلاریزاسیون (Rp/ohm)												
فولاد ساده کربنی	۲۰۱۶/۵۵												
فولاد ساده کربنی + ۰/۴ درصد حجمی محلول میره	۱۰۲۷۰۱												
مس تجاری	۲۱۲۷۳۷												
مس تجاری + ۰/۴ درصد حجمی محلول میره	۵۹۳۳۲۸												
نام و نام خانوادگی		تاریخ و امضاء											
مهندس مهدی حیدری		متصدی انجام آزمایش											
مهندس سید حجت مساوات		تهیه کننده گزارش											
آقای دکتر جاویدی		سرپرست آزمایشگاه											