

بررسی رفتار خوردگی پوشش ها و آستری های مختلف مورد استفاده برای لوله های انتقال در صنعت آب کشور

امین اخباری زاده^{۱*}، علیرضا عراقی^۲، محمد حسین پایدار^۳

۱- استادیار، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی شیمی و مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۲- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی شیمی و مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

*Akhbarizadeh@shirazu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۱۳، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۲/۰۸)

چکیده

پوشش دهی از جمله مرسوم ترین روش های حفاظت از خطوط انتقال آب می باشد. پوشش دهی می تواند به منظور حفاظت از درون لوله به صورت آستری یا بیرون لوله به صورت پوشش انجام شود. در این تحقیق رفتار خوردگی و مقاومت به حفره دار شدن آستری های پلی یوریتان، اپوکسی مایع دو جزئی، سه لایه اپوکسی، دو لایه اپوکسی، پلی تترا فلورو اتیلن، سیمان و پوشش های پلی اتیلن و کولتار بوسیله آزمون پلاریزاسیون خطی و آزمون طیف نگاری الکتروشیمیایی امیدانس در محلول آبی نمک طعام ۳/۵٪ وزنی مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر آن سطح پوشش ها نیز با کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت تا نوع عملکرد خوردگی پوشش به دقت بررسی گردد. نتایج بررسی ها نشان داد که پوشش های پلی یوریتان و اپوکسی مایع دو جزئی از مقاومت بسیار خوبی در برابر خوردگی آب در سطح داخلی لوله برخوردار بوده و عمر مفید بالایی را از خود نشان می دهند. همچنین نشان داده شد که پوشش های پلی اتیلن و کولتار نیز به عنوان پوشش خارجی خط انتقال بسیار مفید بوده و باعث کاهش نرخ خوردگی به میزان ۲ الی ۴ برابر می گردند.

واژه های کلیدی:

پوشش، آستر، خوردگی، آب، پلی اتیلن، خوردگی حفره ای.

۱- مقدمه

باشد. پوشش در واقع یک سد فیزیکی بین محیط خورنده و سطح فلز ایجاد می کند و با این عمل مانع خوردگی می شود. مرسوم ترین پوشش های داخلی (آستری) مورد استفاده در صنعت آب قابل شرب در ایالات متحده آمریکا که دارای استاندارد ANSI/NSF61 می باشند عبارتند از اپوکسی پایه

هزینه های جایگزینی لوله های تخریب شده خطوط انتقال آب و هزینه های مربوط به راه اندازی و نصب مجدد این خطوط، از فاکتورهای مهم در انتخاب سیستم حفاظت در مقابل خوردگی می باشد. یکی از اقتصادی ترین و مرسوم ترین راه های حفاظت در مقابل خوردگی استفاده از پوشش های محافظ می

سطحی مورد نیاز، زمان پخت، شرایط اعمال پوشش و نحوه پخت آن را نشان می دهد. همانطور که از جدول مشخص است پوشش های پلی یورتان بسیار سریعتر از سایر پوشش ها پخت می شوند. پوشش های پایه اپوکسی زمان زیاد برای پخت و زمان زیاد بین پاس های پوشش دهی نیاز دارند، از طرف دیگر دمای پخت آنها محدود است و در شرایط سرد باید از گرم کننده های خاصی برای پوشش دهی استفاده کرد. در پوشش های سیمانی زمان پخت بالا بوده و به پخت در حضور رطوبت یا گرمای خارجی نیاز است. علاوه بر این مطالب باید دقت کرد که در اتصالات، مسئله خوردگی اهمیت بسیار بالایی دارد، از آنجایی که اعمال پوشش سیمانی در محل صورت می گیرد، اتصالات هم پوشش داده می شوند ولی در مورد سایر پوشش ها تفاوت بسیار زیادی بین پوشش کارخانه ای و پوشش در محل اتصالات وجود دارد [۹-۱۲]. یکی از مشکلات اصلی پوشش های سیمانی ترد بودن بسیار زیاد آنها می باشد. در واقع این پوشش ها به زمینه اتصال ندارند و تنها ذرات خود سیمان به هم متصل هستند. بهمین دلیل در حین جابجایی همیشه احتمال آسیب دیدن آنها وجود دارد و در نتیجه این پوشش ها باید در محل اعمال شوند تا میزان آسیب وارده به پوشش به حداقل برسد. اما در مقابل، اعمال آن بسیار ساده بوده و به اپراتور با مهارت بالا نیاز نمی باشد [۱۳-۱۴]. با وجود تحقیقات بسیار وسیع در زمینه رفتار خوردگی پوشش ها و آستری ها، مقایسه کلی مابین این پوشش ها از نظر مقاومت به حفره دار شدن و عمر خوردگی به شکل جامعی انجام نشده است. در این تحقیق مقاومت خوردگی و مقاومت به حفره دار شدن پوشش های پلی یورتان، اپوکسی مایع دو جزیی، سه لایه اپوکسی، دو لایه اپوکسی، پلی تترا فلورو اتیلن (PFEP)، پلی اتیلن، سیمان و کولتار

آمینی، اپوکسی ۱۰۰٪ جامد، پلی یورتان الاستومری جامد، پلی یورتان صلب ۱۰۰٪ جامد و آستری پایه سیمانی [۱-۳]. از بین این پوشش ها انتخاب پوشش مناسب تابع فاکتورهای متنوعی از قبیل خواص پوشش، آماده سازی سطح اولیه، پارامترهای اعمال پوشش، مقاومت به محیط خورنده و بحث هزینه و فایده (توجیه اقتصادی) می باشد. پوشش های جامد، فاقد هر نوع حلالی هستند که در مراحل پخت از درون اپوکسی خارج شود. پوشش های پلی یورتان صد درصد جامد بر اساس یک سری فرآیند های شیمیایی در پلاستیک های محکم شده با حرارت تولید می شوند. در نوع صلب پلی یورتان، اجزا به محکمی به هم متصل هستند و تولید یک جز سخت و چگال با مقاومت خوردگی بالا میکنند. در پلی یورتان الاستومری اتصالات ضعیف تر است و بهمین دلیل نرمی پوشش و مقاومت به ضربه در آنها بالاتر است. علاوه بر جنبه اقتصادی، قابلیت استفاده از یک پوشش در آب آشامیدنی نیز دارای اهمیت بسیار زیادی است. مشخص شده است که هیچ مشکلی در پوشش های پلی یورتان جدید که مونومر ایزوسیانات در آنها کم می باشد از نظر مسایل زیست محیطی و آلودگی وجود ندارد در حالی که در رزین های پایه آمینی مقادیری ترکیبات مضر برای انسان وجود دارد [۴-۶]. آستری پایه سیمانی ترکیبی از سیمان، ماسه و آب است که از سال های آغازین قرن ۱۹ میلادی در امریکا مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله مزیت های این آستر، نیاز بسیار کم به آماده سازی سطحی اولیه قبل از پوشش دهی است. در شرایطی که سایر پوشش ها و آسترها نیاز به صافی سطحی برابر SSPC/SP10 (NACE2) دارند، لاینینگ پایه سیمانی تنها نیاز به سطحی عاری از اکسید دارد که با یک سمباده زنی معمولی قابل انجام است [۷ و ۸]. جدول آماده سازی

بوسیله آزمون پلاریزاسیون و طیف نگاری الکتروشیمیایی امپدانس مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر آن سطح پوشش ها نیز با کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت تا نوع عملکرد خوردگی پوشش به دقت بررسی گردد.

جدول (۱): مقایسه خصوصیات پوشش های مختلف [۱۳]

نوع محصول	سیمان	پلی یوریتان ۱۰۰٪ جامد صلب	پلی یوریتان ۱۰۰٪ جامد الاستومری	اپوکسی ۱۰۰٪ جامد	اپوکسی با حلال آمین
آماده سازی سطحی	تمیز کاری با دست	SSPC Sp10 (NACE 2)	SSPC Sp10 (NACE 1 & 2)	SSPC Sp10 (NACE 2)	SSPC Sp10 (NACE 2)
دمای اعمال (°F)	۴۰-۱۰۰	۱۰-۱۵۰	۰-۱۵۰	۴۰-۱۰۰	۴۰-۱۰۰
زمان پخت در ۷۰°F	۱ روز یا بیشتر	۲-۱ ساعت	۶-۴ ساعت	۱۰ ساعت	۱۴-۴ ساعت
زمان لازم قبل از قرارگیری در کار ۷۰°F (روز)	۱-۷	۲	۲-۳	۱-۴	۵-۷

۲- نحوه انجام آزمایش

۲-۱- تهیه پوشش های داخلی و خارجی

به منظور پوشش دهی لوله ها، با شرکت های اعمال کننده پوشش و آستری در داخل کشور تماس گرفته شد و پس از مذاکرات اولیه، مکاتباتی در زمینه دریافت پوشش با این شرکت ها به عمل آمد. لیست انواع آستری و پوشش های مورد بررسی در جدول ۲ آورده شده است. پوشش ها و آستری های دریافتی پس از نمونه سازی توسط آزمون پلاریزاسیون از نظر خوردگی مورد بررسی قرار گرفتند.

۲-۲- بررسی رفتار خوردگی پوشش ها

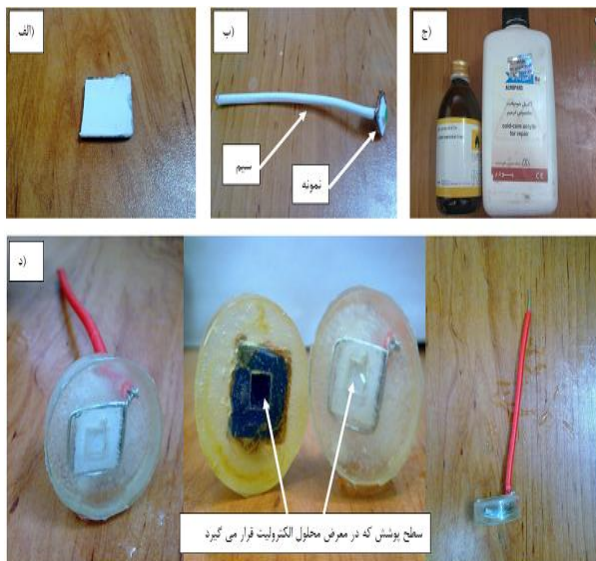
برای بررسی مقاومت به خوردگی پوشش های اعمال شده و همچنین مقاومت به خوردگی حفره دار شدن پوشش ها، از آزمون پلاریزاسیون سیکلی استفاده شده است. در این آزمون محدوده ولتاژ اعمالی ± 0.5 ولت نسبت به پتانسیل مدار باز اعمال

گردید. برای انجام آزمایش پلاریزاسیون سیکلی، از هر پوشش یک نمونه به ابعاد ۱ cm × ۱ cm از فولادهای پوشش داده شده، تهیه شد. به منظور نمونه سازی برای انجام آزمون، سطح نمونه ها، بوسیله مانت سرد پوشیده شد به طوریکه تنها ۱ cm² از سطح پوشش در معرض محلول الکترولیت، برای انجام آزمایش قرار گیرد. استفاده از مانت سرد بدین خاطر است که سایر نقاط قطعه در تماس با محلول الکترولیت نباشند و با مانت پوشیده شوند. شکل ۱ مراحل نمونه سازی برای انجام این آزمون را نشان می دهد. الکترولیت مورد استفاده در این آزمون، محلول ۳/۵ درصد وزنی نمک طعام در آب بود و آزمون در دمای محیط انجام شد. قبل از انجام آزمایش، الکتروده ها و نمونه ها با آب مقطر کاملاً شسته شده و همچنین نمونه ها به منظور به تعادل رسیدن، به مدت ۱ شبانه روز در محلول الکترولیت مورد نظر قرار داده شدند. علاوه بر سرعت خوردگی، نتیجه دیگری که از این آزمون بدست می آید، میزان مقاومت به خوردگی حفره ای نمونه است.

جدول (۲): پوشش های بررسی شده

نام پوشش های بررسی شده
اپوکسی مایع دو جزئی
پلی اتیلن
PFEF
پلی یورتان
سه لایه اپکسی
دو لایه اپکسی + پلی یورتان
آستری پایه سیمانی
کولتار

مدار الکتریکی معادل مورد استفاده برای نمودار نایکوئست شامل مقاومت محلول (R_{Ω}) می باشد که به صورت سری با یک مدار موازی شامل خازن (مربوط به لایه دو گانه، C_{dl}) و مقاومت پلاریزاسیون R_p قرار دارد. با توجه به این مدار معادل و به کمک نرم افزار دستگاه آزمون طیف نگاری الکتروشیمیایی امپدانس، نتایج بدست آمده تحلیل و مقدار R_p که نشان دهنده مقاومت به خوردگی پوشش است برای هر پوشش بدست آمد.

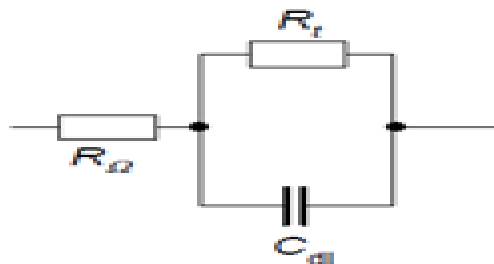


شکل (۱): مراحل نمونه سازی برای آزمون پلاریزاسیون سیکلی، (الف): نمونه بریده شده از پوشش، (ب): اتصال سیم، (ج): مانع سرد، (د): نمونه آماده شده برای انجام آزمون

همانگونه که در شکل مشاهده می شود در شاخه آندی یک مسیر برگشت دیده می شود، اگر مسیر برگشت به صورت ساعت گرد باشد و شاخه آندی را قطع کند، نشاندهنده ایجاد حفره در نمونه است و بیان می کند که نمونه مستعد به خوردگی حفره ای است و اگر مسیر برگشت به صورت پاد ساعت گرد باشد، بیانگر عدم ایجاد حفره در نمونه است و نشان می دهد که نمونه مقاومت بالایی به خوردگی حفره ای دارد. به منظور بررسی تاثیر نفوذ آب در داخل پوشش بر مقاومت به خوردگی پوشش ها، پارامتر مدت زمان قرار گیری نمونه ها در محلول خورنده قبل از انجام آزمون پلاریزاسیون خطی، تغییر داده شد. برای این منظور یک نمونه دیگر از پوشش های اشاره شده آماده گردید و بعد از آماده سازی مطابق شکل ۱، به مدت ۲ ماه در محلول ۳/۵ درصد وزنی نمک طعام در آب قرار داده شدند و بعد از سپری شدن ۲ ماه، آزمون پلاریزاسیون خطی بر روی نمونه ها در همین محلول انجام شد و نتایج بدست آمده از این بررسی با نتایج حاصله از آزمون پلاریزاسیون سیکلی بر روی پوشش ها مقایسه شد. آزمون پلاریزاسیون خطی با دامنه ولتاژ ± 0.2 ولت نسبت به پتانسیل مدار باز انجام گردید. مقایسه نتایج بدست آمده در این مرحله اطلاعات مفیدی در خصوص مقاومت پوشش در برابر نفوذ پذیری آب و تاثیر آن بر نرخ خوردگی به همراه داشت که در ادامه ارائه گردیده است.

علاوه بر آزمون پلاریزاسیون، آزمون طیف نگاری الکتروشیمیایی امپدانس نیز به منظور تعیین R_p و بررسی مقاومت به خوردگی پوشش ها، بر روی نمونه های فولادی پوشش داده شده انجام شد. در این آزمون دامنه ولتاژ اعمالی ± 5 میلی ولت نسبت به پتانسیل مدار باز اعمال گردید. برای این منظور یک نمونه دیگر از پوشش های اشاره شده آماده گردید و بعد از آماده سازی مطابق شکل ۱، به مدت ۳۰ دقیقه در محلول ۳/۵ درصد وزنی نمک طعام در آب قرار داده شدند و سپس آزمون طیف نگاری الکتروشیمیایی امپدانس بر روی پوشش ها انجام گردید. نتایج بدست آمده از این بررسی با استفاده از مدار معادل شکل ۲ تحلیل شد.

شکل ۴ نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون خطی بر روی پوشش های مختلف بررسی شده بعد از دو ماه قرار گیری نمونه های فولادی پوشش داده شده در محلول ۳/۵ درصد وزنی نمک طعام را نشان می دهند. پتانسیل، دانسیته جریان و سرعت خوردگی پوشش های بررسی شده بعد از دو ماه قرار گیری در محلول مورد نظر از نمودار های بدست آمده استخراج شده و در جدول ۴ ارائه گردیده است.



شکل (۲): مدار الکتریکی معادل استفاده شده برای نمودار نایکوئست

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمون پلاریزاسیون

شکل ۳ نمودار پلاریزاسیون سیکلی و جدول ۳ پتانسیل و سرعت خوردگی پوشش های مورد بررسی را نشان می دهد. برای تبدیل دانسیته جریان به نرخ خوردگی بر حسب میلی متر در سال از رابطه ۱ استفاده شده است:

$$\text{mm/year} = (3280.M.i)/(n.D) \quad (1)$$

دانسیته جریان که در آن: (A/cm^2) : M : جرم اتمی (gr) D : دانسیته (gr/cm^3) ظرفیت یون: n

طبق این رابطه و با توجه به اینکه جرم اتمی آهن ۵۶ گرم، دانسیته آن $7/4 - 7/8$ گرم بر سانتی متر مکعب و ظرفیت یونی آن ۲ است، نرخ خوردگی برای این پوشش ها بر حسب میلی متر در سال بدست آمده می آید. علت اختلاف در نرخ خوردگی پوشش ها، تفاوت در نوع پوشش و کیفیت آن ها می باشد. شکل ۳ همچنین نشان می دهد که در پوشش های پلی یوریتان، اپوکسی مایع دو جزئی، اپوکسی سه لایه، اپوکسی دو لایه، پلی اتیلن، کولتار و سیمان، شاخه آندی نمودار پلاریزاسیون به صورت پاد ساعت گرد است که بیانگر مقاومت بالای این پوشش ها در برابر خوردگی حفره ای است. بر خلاف این پوشش ها، نمودار پلاریزاسیون خطی در پوشش پلی تترا فلورو اتیلن در مسیر برگشت به صورت ساعت گرد، شاخه آندی را قطع می کند و این مطلب نشان دهنده مستعد بودن این پوشش به خوردگی حفره ای می باشد.

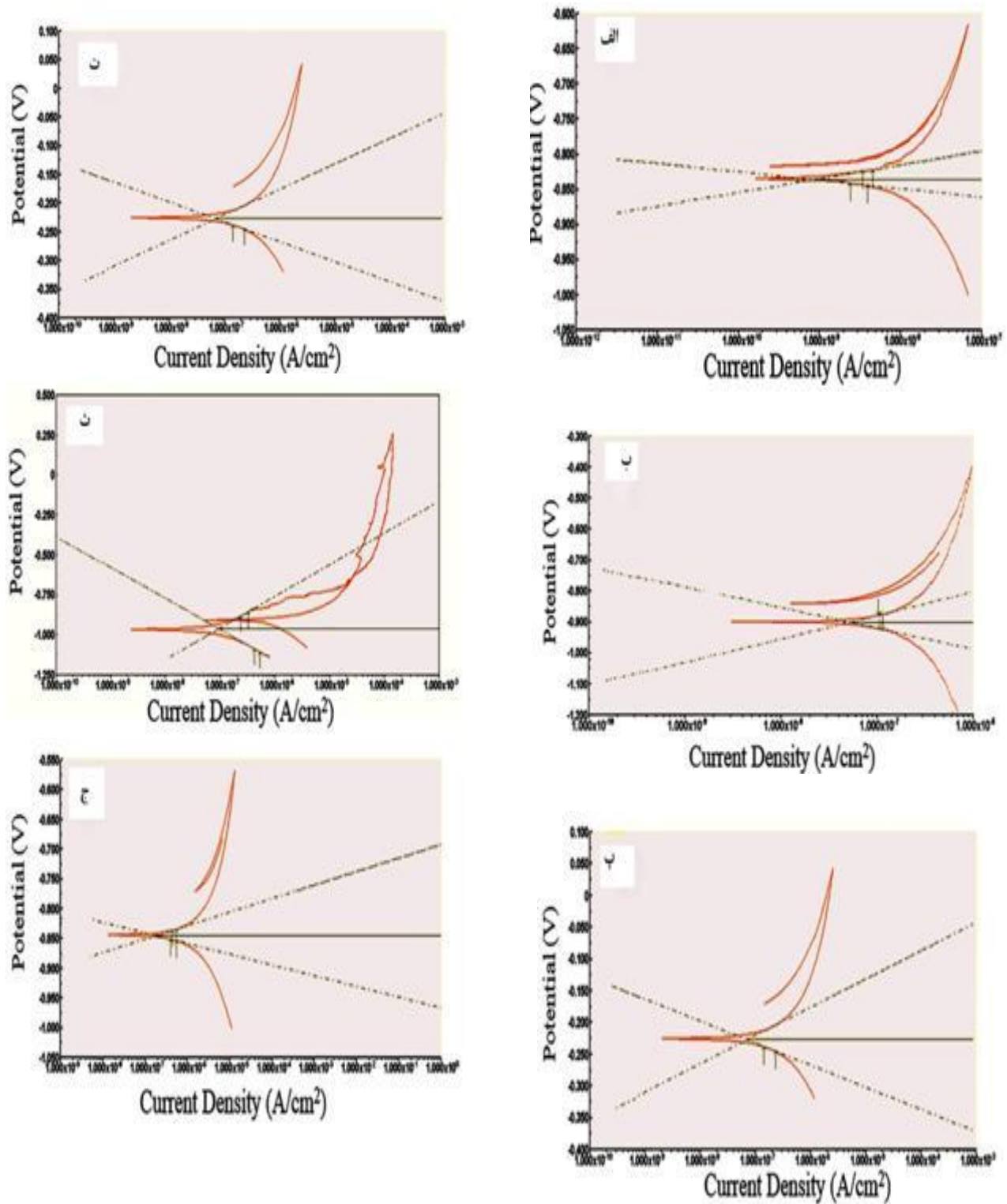
شکل ۵ تغییرات نرخ خوردگی پوشش های مختلف بر اثر افزایش زمان قرار گیری نمونه ها در محلول ۳/۵ درصد وزنی نمک طعام را نشان می دهد. در این شکل، نمودار کم رنگ تر معرف نرخ خوردگی بدست آمده از آزمون پلاریزاسیون برای پوشش های مختلف پس از دو ماه و نمودار پر رنگ تر معرف نرخ خوردگی پوشش های مختلف پس از ۳۰ دقیقه قرار گیری در محلول مورد نظر است. همانگونه که مشاهده می گردد با افزایش زمان قرار گیری نمونه ها در محلول خورنده، نرخ خوردگی تمامی پوشش ها افزایش یافته است. میزان این افزایش برای پوشش های پلی یوریتان و اپوکسی مایع دو جزئی در مقایسه با پوشش های سه لایه اپوکسی، دو لایه اپوکسی + پلی یوریتان، پلی تترا فلورو اتیلن، پلی اتیلن و کولتار بسیار ناچیز است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که پوشش های پلی یوریتان و اپوکسی مایع دو جزئی از مقاومت بسیار خوبی در برابر نفوذ محلول خورنده بر خوردار بوده و مقاومت به خوردگی و عمر مفید بالایی را از خود نشان می دهند. مقاومت نسبتا پایین سایر پوشش های بررسی شده در برابر نفوذ محلول خورنده به خاطر حضور عیوب در این پوشش ها می باشد که باعث می شود محلول خورنده از این عیوب به داخل پوشش نفوذ کرده و خود را به سطح فولاد در زیر پوشش رسانده و باعث ایجاد خوردگی گردد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) برای پوشش های مختلف که در شکل ۶ ارائه شده است نیز تایید کننده این مطلب است. همانگونه که مشاهده می شود در پوشش های سه لایه اپوکسی و دو لایه اپوکسی + پلی یوریتان، عیوب بسیاری قابل تشخیص است که در شکل ۶ الف و ب مشخص است. این در

که این دو پوشش از نرخ خوردگی نسبتاً بالایی در محیط خورنده ۳/۵ درصد نمک طعام بر خوردارند. اما این دو پوشش به عنوان پوشش خارجی بر روی دیواره خارجی لوله اعمال می شوند (نه به عنوان پوشش داخلی که در تماس با آب است) و در تماس با محیط خاک که نسبت به آب از خوردگی بسیار کمتری بر خوردار است، قرار دارند. عوامل مختلفی در ایجاد عیوب در پوشش ها موثرند. برخی از این عیوب در اثر حمل نقل لوله پوشش داده شده ایجاد می شوند. که ناشی از خراش های ایجاد شده در پوشش و یا ضربات وارده به لوله در حین جابجایی است. این نوع از عیوب در شکل های ۶ الف، ب و پ مشخص است. برخی دیگر از عیوب ایجاد شده در پوشش ناشی از کیفیت نامطلوب خود پوشش حین اعمال آن می باشد. عیوب مشاهده شده در شکل های ۶ ج، چ و ح جزء این دسته می باشد.

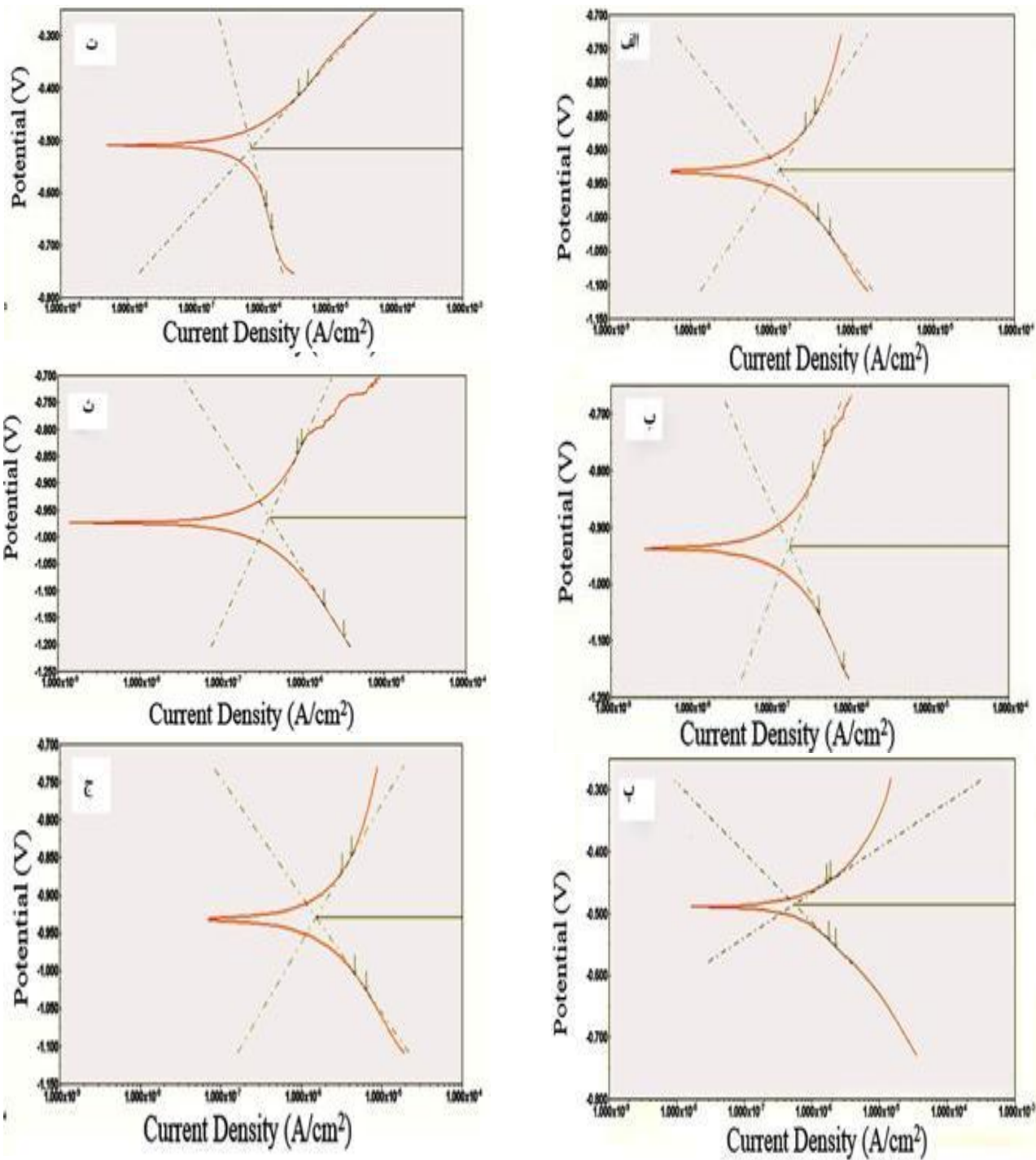
حالیست که در مورد پوشش های پلی یوریتان و اپوکسی مایع دو جزئی عیوب خاصی به چشم نمی خورد (شکل ۶ ت و ث). پوشش پلی تترا فلورو اتیلن نیز دارای عیوب نسبتاً زیادی است و این پوشش در بررسی های انجام شده به عنوان یک پوشش محافظ و مانع در برابر خوردگی، عملکرد متوسط رو به پایینی را از خود نشان می دهد (شکل ۶ پ). تصاویر پوشش کولتار در شکل ۶ چ و ح، نشان می دهد که فضا های خالی برای نفوذ محلول خورنده در این پوشش بسیار زیاد است. به همین خاطر نرخ خوردگی بدست آمده برای این پوشش از سایر پوشش های بررسی شده فاصله گرفته و مقدار بالایی را به خود اختصاص داده است. اما نکته جالبی در خصوص این پوشش و پوشش پلی اتیلن با توجه به نتایج حاصله قابل ذکر است که باید به آن پرداخته شود. همانگونه که مشاهده می شود بررسی ها نشان داد

جدول ۳. پتانسیل، دانسیته جریان و سرعت خوردگی، برای پوشش های مختلف در محلول ۳/۵ درصد وزنی نمک طعام در آب.

نام پوشش بررسی شده	پتانسیل خوردگی (V)	دانسیته جریان خوردگی (A/cm^2)	سرعت خوردگی ($mm/year$)
پلی یوریتان	-۰/۸۳	$1/29 \times 10^{-9}$	$1/60 \times 10^{-5}$
اپوکسی مایع دو جزئی	-۰/۹۰	$6/42 \times 10^{-8}$	$7/97 \times 10^{-4}$
سه لایه اپکسی	-۰/۲۳	$7/32 \times 10^{-8}$	$9/08 \times 10^{-4}$
دو لایه اپکسی + پلی یورتان	-۰/۴۳	$8/1 \times 10^{-8}$	$1/01 \times 10^{-3}$
پلی تترا فلورو اتیلن	-۰/۹۶	$8/60 \times 10^{-8}$	$1/07 \times 10^{-3}$
پلی اتیلن	-۰/۸۵	$1/86 \times 10^{-7}$	$2/31 \times 10^{-3}$
کولتار	-۰/۵۵	$6/34 \times 10^{-6}$	$7/87 \times 10^{-2}$
سیمان	-۰/۷۵	$2/81 \times 10^{-8}$	$3/94 \times 10^{-4}$



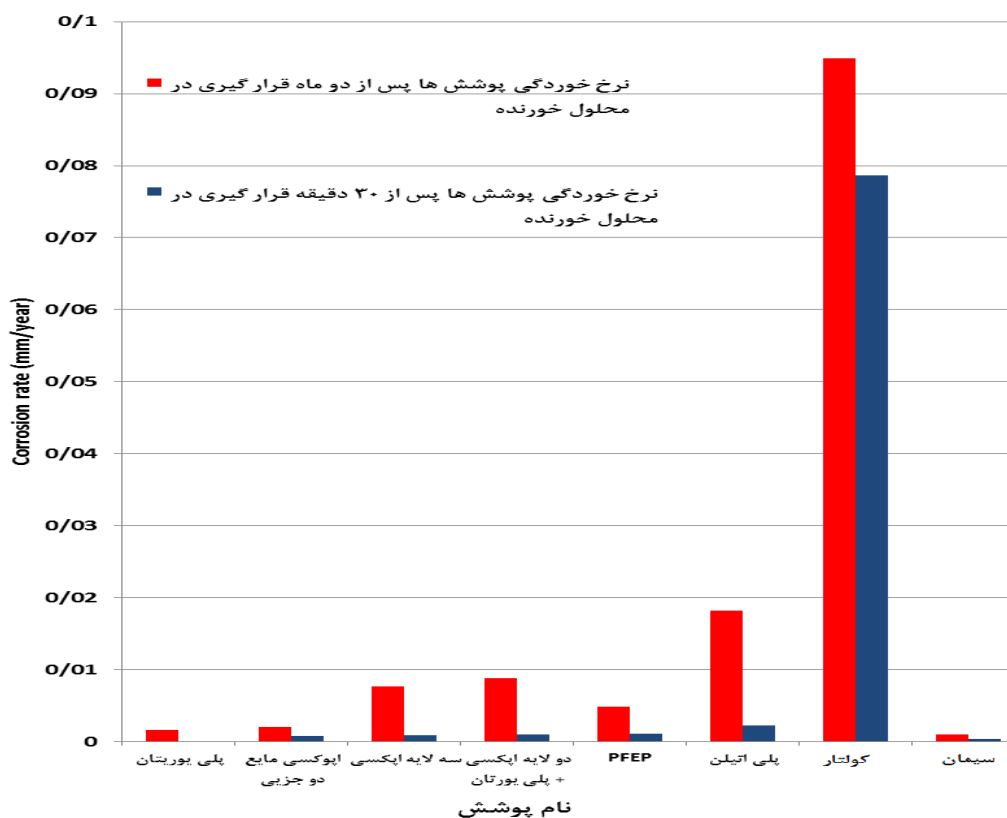
شکل (۳): نمودار پلاریزاسیون سیکنلی برای فولاد با پوشش های (الف): پلی یوریتان، (ب): اپوکسی مایع دوجزیبی، (پ): سه لایه اپوکسی، (ت): دو لایه اپوکسی، (ث): PFEP، (ج): پلی اتیلن، (چ): کولتار و (ح): سیمان در محلول الکترولیت ۳/۵ درصد وزنی نمک طعام در آب



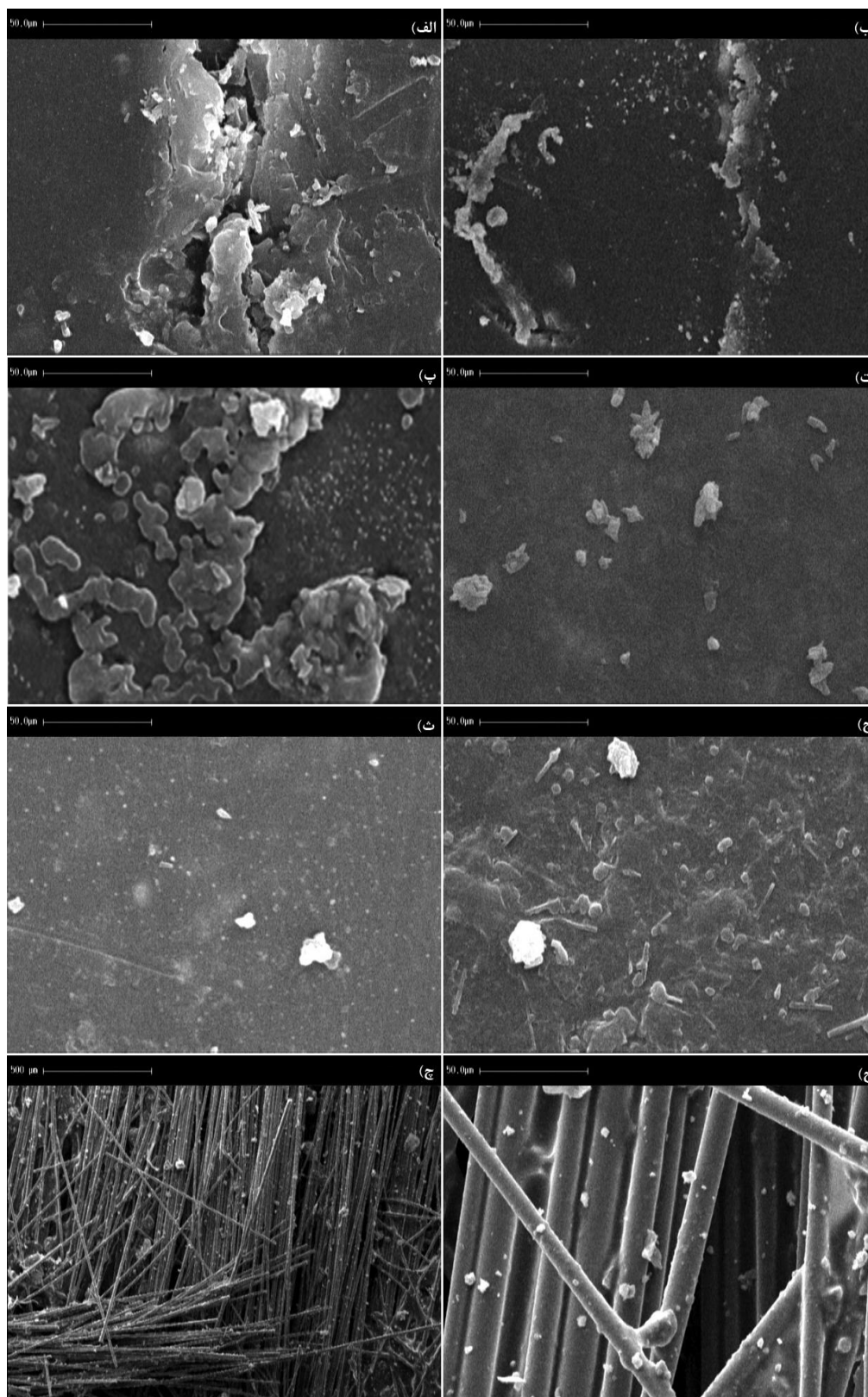
شکل (۴): نمودار پلاریزاسیون خطی برای فولاد با پوشش های (الف): پلی یوریتان، (ب): اپوکسی مایع دو جزئی، (پ): سه لایه اپوکسی، (ت): دو لایه اپوکسی، (ث): PFEP، (ج): پلی اتیلن، (چ): کولتار و (ح): سیمان بعد از دو ماه قرار گیری در محلول الکترولیت ۳/۵ درصد وزنی نمک طعام در آب

جدول (۴): پتانسیل، دانسیته جریان و سرعت خوردگی پوشش های بررسی شده بعد از دو ماه قرار گیری در محلول ۳/۵ درصد نمک طعام در آب

سرعت خوردگی (mm/year)	دانسیته جریان خوردگی (A/cm ²)	پتانسیل خوردگی (V)	نام پوشش بررسی شده
$1/59 \times 10^{-3}$	$1/28 \times 10^{-7}$	-۰/۹۳۲	پلی یوریتان
$2/03 \times 10^{-3}$	$1/64 \times 10^{-7}$	-۰/۸۸۲	اپوکسی مایع دو جزئی
$7/7 \times 10^{-3}$	$6/21 \times 10^{-7}$	-۰/۴۸۳	سه لایه اپوکسی
$8/80 \times 10^{-3}$	$7/09 \times 10^{-7}$	-۰/۵۰۹	دو لایه اپوکسی + پلی یورتان
$4/86 \times 10^{-3}$	$3/92 \times 10^{-7}$	-۰/۹۷۴	پلی تترافلورو اتیلن
$18/24 \times 10^{-3}$	$1/47 \times 10^{-6}$	-۰/۹۱۳	پلی اتیلن
$94/94 \times 10^{-3}$	$7/64 \times 10^{-6}$	-۰/۵۴۷	کولتار
$1/01 \times 10^{-3}$	$8/12 \times 10^{-6}$	-۰/۷۳۳	سیمان



شکل (۵): مقایسه نرخ خوردگی پوشش های بررسی شده پس از ۳۰ دقیقه قرار گیری در محلول ۳/۵ درصد نمک طعام و بعد از دو ماه قرار گیری در این محلول



شکل (۶): تصاویر میکروسکوپ الکترونی از پوشش های: (الف): دو لایه اپوکسی + پلی یورتان، (ب): سه لایه اپوکسی، (پ): PFEP،

(ت): اپوکسی مایع دو جزئی، (ث): پلی یورتان، (ج): پلی اتیلن، (چ و ح): کولتار ۳

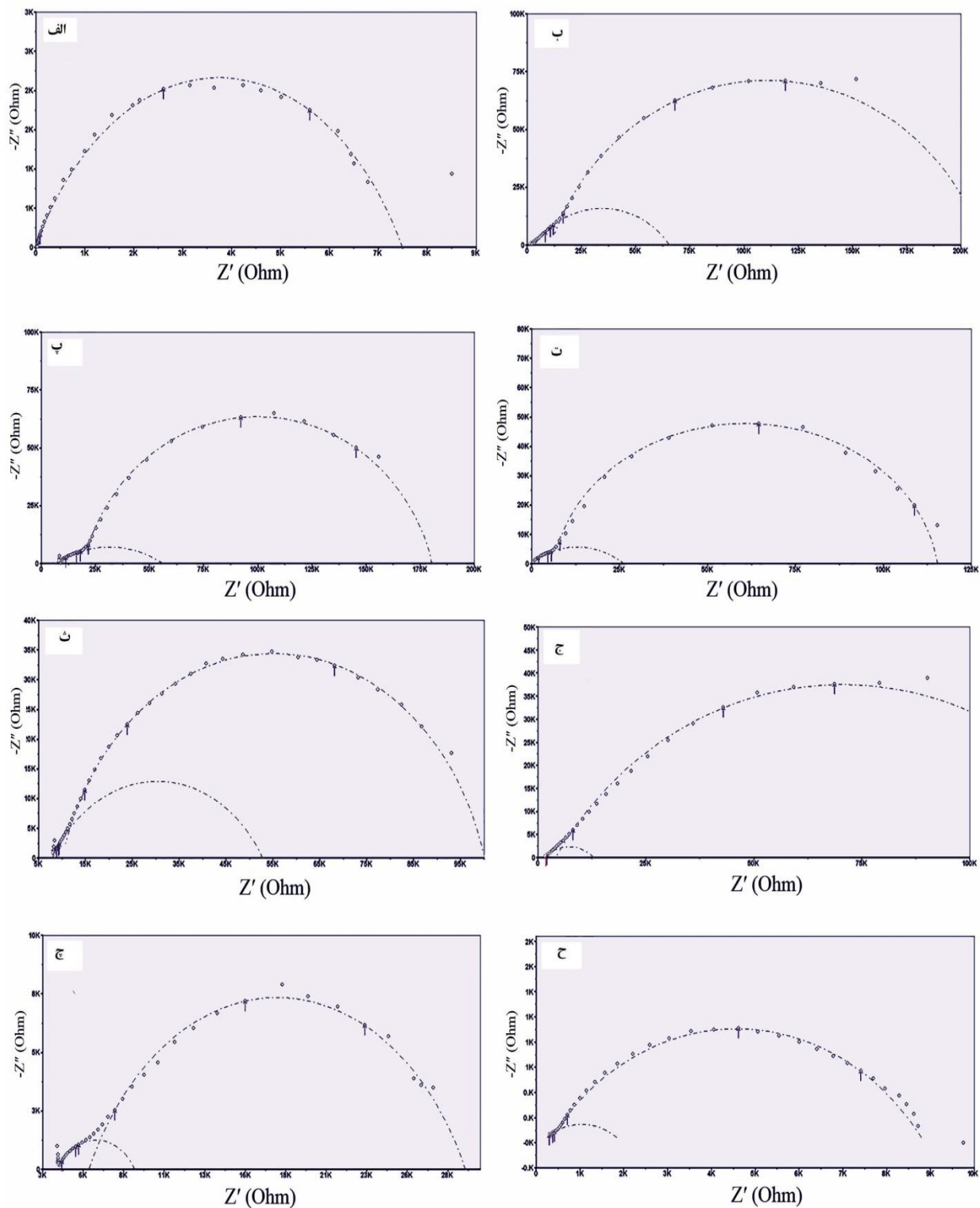
لایه اپکسی، دو لایه اپکسی + پلی یورتان و پلی تترافلورو اتیلن از مقدار R_p نسبتاً کمی بر خوردارند و مقاومت به خوردگی خوبی از خود نشان نمی دهند. در بین این سه پوشش، پوشش پلی تترافلورو اتیلن شرایط مساعدتری نسبت به دو پوشش دیگر دارد. بنابراین استفاده از پوشش های سه لایه اپکسی و دو لایه اپکسی + پلی یورتان تولیدی کارخانه مربوطه به هیچ عنوان توصیه نمی گردد. پوشش های پلی اتیلن و کولتار همانطور که پیش بینی می شد کمترین مقادیر R_p را داشته و از کمترین مقاومت به خوردگی بر خوردارند. بطور کلی می توان نتیجه گرفت که پوشش های پلی یورتان و اپوکسی مایع دو جزئی از مقاومت بسیار خوبی در برابر خوردگی آب در سطح داخلی لوله بر خوردار بوده و عمر مفید بالایی را از خود نشان می دهند.

جدول (۵): R_p بدست آمده از آزمون طیف نگاری الکتروشیمیایی امیدانس برای پوشش های بررسی شده

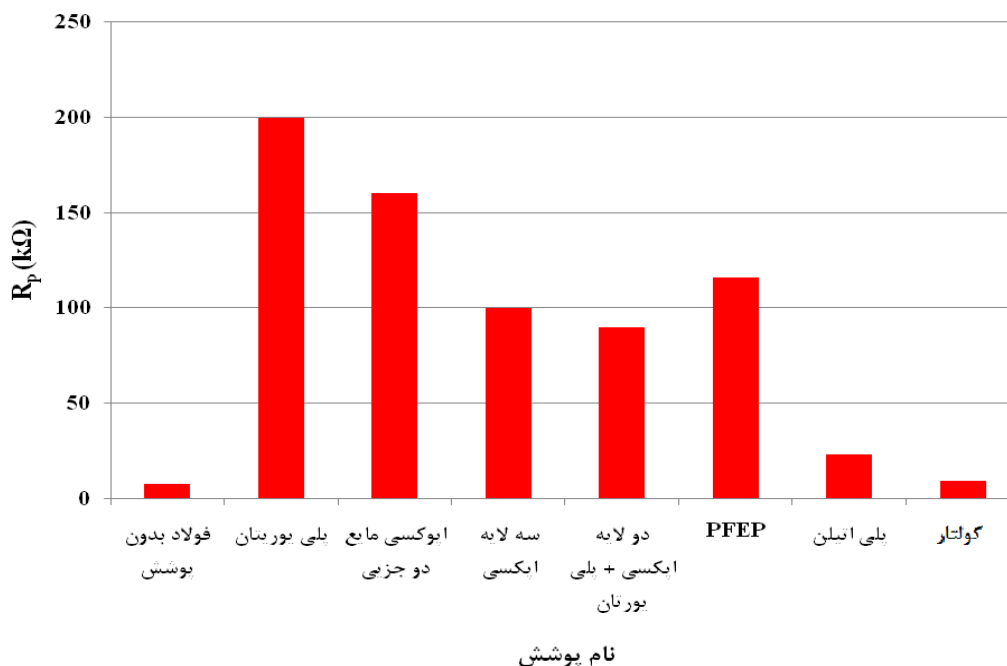
$R_p(k\Omega)$	نام پوشش بررسی شده
۷/۵	فولاد بدون پوشش
۲۰۰	پلی یورتان
۱۶۰	اپوکسی مایع دو جزئی
۱۰۰	سه لایه اپکسی
۹۰	دو لایه اپکسی + پلی یورتان
۱۱۶	پلی تترافلورو اتیلن
۲۳	پلی اتیلن
۹/۲	کولتار

۲-۳- بررسی مقاومت به خوردگی پوشش ها با استفاده از آزمون طیف نگاری الکتروشیمیایی امیدانس

نتایج به دست آمده از آزمون طیف نگاری الکتروشیمیایی امیدانس بر روی انواع پوشش های بررسی شده و فولاد بدون پوشش در شکل ۷ ارائه شده است. نمودار های بدست آمده برای هر پوشش و به کمک نرم افزار دستگاه آزمون طیف نگاری الکتروشیمیایی امیدانس، R_p برای تمامی پوشش ها بدست آمد. تحلیل و نتایج حاصل از بررسی نمودار طیف نگاری الکتروشیمیایی امیدانس پوشش های مختلف و فولاد بدون پوشش در جدول ۵ و شکل ۸ به منظور مقایسه آورده شده است. بررسی ها نشان داد که نتایج حاصله از آزمون طیف نگاری الکتروشیمیایی امیدانس بر روی پوشش های بررسی شده از تطابق بسیار خوبی با نتایج بدست آمده از آزمون پلاریزاسیون بر خوردار است. R_p نمایانگر مقاومت الکتریکی لایه دوگانه می باشد و هرچه مقدار آن بیشتر باشد، نرخ خوردگی کمتر خواهد بود. مقدار R_p برای فولاد بدون پوشش حدود ۷/۵ کیلو اهم می باشد. این در حالیست که این مقدار با اعمال پوشش مناسب می تواند تا حدود ۲۷ برابر (۲۰۰ کیلو اهم) افزایش یابد. بنابراین مشاهده می گردد که با اعمال پوشش مناسب می توان مقاومت به خوردگی فولاد را تا حد بسیار زیادی افزایش داد. مقایسه نمودار طیف نگاری الکتروشیمیایی امیدانس برای پوشش های مختلف نشان داد که پوشش های پلی یورتان و اپوکسی مایع دو جزئی در مقایسه با پوشش های سه لایه اپکسی، دو لایه اپکسی + پلی یورتان، پلی تترافلورو اتیلن، پلی اتیلن و کولتار، R_p بالاتری داشته و به همین خاطر کمترین نرخ خوردگی متعلق به این دو پوشش می باشد. این در حالیست که پوشش های سه



شکل (۷): نمودار نیکوتست برای فولاد (الف): بدون پوشش و با پوشش های، (ب): پلی یوریتان، (پ): اپوکسی مایع دو جزئی، (ت): سه لایه اپوکسی، (ث): دو لایه اپوکسی، (ج): PFEP، (چ): پلی اتیلن، (ح): کولتارد در محلول الکترولیت ۳/۵ درصد وزنی نمک طعام در آب



شکل (۸): R_p بدست آمده از آزمون طیف نگاری الکتروشیمیایی امیدانس برای پوشش های بررسی شده و فولاد بدون پوشش

۴- نتیجه گیری

قابل تشخیص است در حالی که در مورد پوشش های پلی یوریتان و اپوکسی مایع دو جزئی عیوب خاصی به نظر نمی رسد. پوشش پلی تترا فلورو اتیلن نیز دارای عیوب نسبتاً زیادی است و دارای نرخ خوردگی متوسط در مقایسه با سایر پوشش های بررسی شده می باشد. پوشش کولتار دارای فضا های خالی برای نفوذ محلول خورنده می باشد و مقاومت به خوردگی بالایی از خود نشان نمی دهد.

در این تحقیق رفتار خوردگی پوشش ها و آستری های مرسوم در خطوط فلزی انتقال آب مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور پوشش های پلی یوریتان، اپوکسی مایع دو جزئی، سه لایه اپوکسی، دو لایه اپوکسی، پلی تترا فلورو اتیلن، پلی اتیلن، سیمان و کولتار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی ها نشان می دهد که:

۵- تشکر و قدردانی

بدینوسیله نویسندگان این مقاله از شرکت آب و فاضلاب استان فارس بابت تامین مالی و همکاری در انجام این پژوهش کمال تشکر و قدر دانی را می نمایند.

۱- پوشش های پلی یوریتان و اپوکسی مایع دو جزئی از مقاومت بسیار خوبی در برابر خوردگی آب در سطح داخلی لوله برخوردار بوده و عمر مفید بالایی را از خود نشان می دهند. بنابراین استفاده از این دو پوشش به عنوان لایه محافظ در دیواره داخلی خطوط انتقال بسیار سودمند بوده و توصیه می گردد. همچنین پوشش های پایه سیمانی نیز باعث افزایش عمر مفید خطوط انتقال در محیط های آب شرب با خوردگی متوسط می باشند. بنابراین استفاده از این نوع پوشش نیز به عنوان لایه محافظ در دیواره داخلی خطوط انتقال توصیه می گردد.

۶- مراجع

- [1] I. S. Cole & D. Marney, "The science of pipe corrosion: A review of the literature on the corrosion of ferrous metals in soils", Corrosion Science, pp. 5-16, 2012.

۲- با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی، در پوشش های سه لایه اپوکسی و دو لایه اپوکسی + پلی یوریتان، عیوب بسیاری

- [11] B. K. Mahato, C. Y. Cha & L. W. Shemilt, "Unsteady state mass transfer coefficients controlling steel pipe corrosion under isothermal flow conditions", *Corrosion Science*, pp. 421-441, 1980.
- [12] D. L. Rice, D. E. Jenkins, J. M. Gray & S. D. Greenberg, "Chemical Pneumonitis Secondary to Inhalation of Epoxy Pipe Coating", *Archives of Environmental Health*, pp. 173-178, 1977.
- [13] V. Chawla, P. G. Gurbuxani & G. R. Bhagure, "Corrosion of Water Pipes: a Comprehensive Study of Deposits", *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, pp. 479-492, 2012.
- [14] H. Wang, C. Hu, X. Hu, M. Yang & J. Qu, "Effects of disinfectant and biofilm on the corrosion of cast iron pipes in a reclaimed water distribution system", *Water Research*, pp. 1070-1078, 2012.
- [2] G. P. Guidetti, G. L. Rigosi & R. Marzola, "The use of polypropylene in pipeline coatings", *Progress in Organic Coatings*", pp. 79-85, 1996.
- [3] A. Sander, B. Berghult, A. E. Broo, E. L. Johansson & T. Hedberg, "Iron corrosion in drinking water distribution systems—The effect of pH, calcium and hydrogen carbonate", *Corrosion Science*, pp. 443-455, 1996.
- [4] F. Brichau & J. Deconinck, "A Numerical Model for Cathodic Protection of Buried Pipes", *Corrosion*, pp. 39-49, 1994.
- [5] W. von Baeckmann, H. Bohnes, G. Franke & D. Funk, "Handbook of Cathodic Corrosion Protection", Gulf Publishing company, Houston, USA, 1997.
- [6] B. A. Chouchaoui & R. J. Pick, "Behaviour of circumferentially aligned corrosion pits", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, pp. 187-200, 1994.
- [7] L. McNeill & M. Edwards, "The Importance of Temperature in Assessing Iron Pipe Corrosion in Water Distribution Systems", *Environmental Monitoring and Assessment*, pp. 229-242, 2002.
- [8] F. M. Song, D. W. Kirk, J. W. Graydon & D. E. Cormack, "Steel Corrosion under a Disbonded Coating with a Holiday—Part 2: Corrosion Behavior", *Corrosion*, pp. 42-49, 2003.
- [9] H. P. Godard, "The corrosion behavior of aluminum in natural waters", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, pp. 167-173, 1960.
- [10] E. Heitz, "Corrosion of Metals in Organic Solvents", *Advances in Corrosion Science and Technology*, pp. 149-243, 1974.