

## بررسی اثر جایگزینی اکسید آهن میکایی به جای گرد روی در خواص شیمیایی و مکانیکی پوشش‌های زینک ریچ اپوکسی

نازنین بخشی<sup>۱</sup>، داود زارعی<sup>۲\*</sup>

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه پلیمر، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی پلیمر، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.



تاریخ دریافت:

۹۴/۸/۳۰

تاریخ پذیرش:

۹۵/۱/۱۶

چکیده

آسترهای غنی از روی آلی، در طی سالیان طولانی در طیف وسیعی از صنایع به کار گرفته شده و عملکرد رضایت بخشی داشته اند. اکسید آهن میکایی نیز از پرکاربردترین رنگدانه های مورد استفاده در پوشش های ضد خوردگی با کارکرد سدکنندگی است. در این تحقیق، به فرمولاسیون پوششهای اپوکسی غنی از روی پایه حلالی و اعمال آنها بر روی پلیتهای فولاد کم کربن پرداخته شد و در مقایسه با پوشش استاندارد، ۵ تا ۴۰ درصد از فرمولاسیون حاوی گرد روی با اکسید آهن میکایی جایگزین شد. عملکرد پوششهای حاصله با به کارگیری آزمون های اندازه گیری چسبندگی، تست جامی شدن، تست ضربه، تست خمش مخروطی، تست سختی سنج مدادی، تست مالش متیل اتیل کتون، مشاهده توسط میکروسکوپ نوری، امپدانس الکتروشیمیایی، اندازه گیری های پتانسیل مدار باز و آزمون اسپری نمکی مورد ارزیابی قرار گرفتند. با استفاده از میکروسکوپ نوری ساختار پوشش های حاوی درصدهای مختلف از هر دو رنگدانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون های انجام شده موید آن بود که در میان پوششهای فرموله شده، پوشش حاوی ۴۰٪ وزنی پیگمنت اکسید آهن میکایی جایگزین شده با گرد روی در فرمولاسیون، مقاومت مکانیکی بیشتر و مقاومت به خوردگی بالاتری از خود نشان می دهد. به طور کلی، نتایج آزمون ها نشان داد که جایگزینی تا ۴۰٪ از مقادیر وزنی فرمولاسیون با رنگدانه اکسید آهن میکایی، موجب کاهش واکنش پذیری روکش حاصله گردید و زمان حفاظت کاتدی به میزان ۴۰٪ افزایش یافت.

اپوکسی غنی از روی، اکسید آهن میکایی، آزمون چسبندگی، مالش متیل اتیل کتون، اسپکتروسکوپی امپدانس الکتروشیمیایی، پتانسیل آزاد خوردگی، همفکری

واژگان کلیدی

## ۱) مقدمه

فولاد، مواد سازه ای مناسب برای طیف گسترده ای از مصنوعات بشری است و دلیل انتخاب آن خواص مکانیکی مطلوب و سرعت ساخت بالای آن است [۱]. با این حال سازه های فولادی، دیر یا زود دچار خوردگی می شوند و ضرر و زیان های غیر مستقیم و مستقیمی را ایجاد می کنند [۱]، [۲]. پوشش یکی از روش های مناسب برای حفاظت از خوردگی فلزات است که آنها را از تماس با محیط زیست جدا نگه می دارد [۱، ۳-۶]. پوشش های آستری غنی از روی به دلیل خواص منحصر بفردشان برای حفاظت از فولاد در محیط های خورنده ی گوناگون از قبیل محیط های ساحلی و صنعتی استفاده می شوند. این پوشش ها به دلیل ماهیت عملکردشان حتی در صورت ایجاد عارضه ی مکانیکی نیز قادر به حفاظت از سطح فولاد می باشند. آسترهای غنی از روی از دو سازکار<sup>۱</sup> حفاظت کاتدی و سد کنندگی جهت حفاظت از خوردگی فولاد استفاده می شوند. در ابتدا با نفوذ الکترولیت به داخل پوشش، ذرات روی فعال شده و باعث افت پتانسیل خوردگی زیرآیند تا محدوده ایمن می گردد که به این مکانیسم، حفاظت کاتدی گفته می شود. بعد از یک دوره اولیه فعالیت الکتروشیمیایی (حفاظت کاتدی) محصولات خوردگی روی ایجاد شده در داخل پوشش، باعث مسدود شدن خلل و فرج پوشش شده و خاصیت سد کنندگی آغاز می شود. پودر روی (کروی، ورقه ای و یا ترکیبی از هر دوی آنها) در ساختارهای با ماتریس آلی (نظیر رزینهای اپوکسی) و یا ماتریس معدنی (نظیر سیلیکاتهای قلیایی و ارتوسیلیکاتها) پخش می شوند [۷-۱۲]. عملکرد آستری غنی از روی بستگی به ریخت شناسی ذرات روی دارد، بطوری که ذرات کوچکتر و لایه ای نتایج بهتری نسبت به ذرات بزرگتر و کروی از خود نشان می دهند [۸]. در پوشش های غنی از روی، حجم رنگدانه بسیار مهم است. در این پوشش ها ارتباط مستمر بین ذرات فلز و گرد روی وجود دارد که این می تواند باعث حفاظت از طریق فدا شوندگی گردد و نهایتاً سرعت اکسیداسیون سریع تر شود که منجر به کاهش خواص پوشش و کاهش عمر پوشش می شود [۱۳، ۱۴]. طی سنوات اخیر مطالعه بر روی اثر جایگزین کردن بخشی از گرد روی با رنگدانه های کمکی [۱۵-۱۷] تقویت کننده ها و دیگر افزودنی ها برای بهبود خصوصیات پوشش و یا مقاصد اقتصادی صورت گرفته است [۱۸]. دلیل این توجه را این گونه می توان عنوان داشت که مقدار روی خورده شده در دوره ی حفاظت کاتدی در مقایسه با روی فلزی اولیه در پوشش درصد اندکی دارد و از سوی دیگر استفاده از رنگدانه های کمکی می تواند خطر ترک خوردگی، حباب زدن لایه رویین و آزاد شدن روی به محیط را کاهش دهد. همچنین این جایگزینی

می تواند جوش پذیری را بهبود بخشد و هزینه های نسبتاً بالای ناشی از گرد روی را کم کند [۱۷]. برای این منظور، با جایگزینی رنگدانه های ضد خوردگی دیگر نظیر ذرات آلومینیوم، اکسید روی، اکسید آهن میکایی، پرک شیشه و... استفاده شده است که این پیگمنت ها به پیگمنت های ورقه ای معروف می باشند و این پیگمنت ها در فیلم رنگ بعضاً با مکانیزم حفاظتی رویین سازی و عمدتاً به دلیل ساختار ورقه ای خود با مکانیزم ممانعتی از فلز پایه محافظت می نمایند که در این حالت موازی با سطح چیده می شوند و موجب بلوکه شدن حرکت آب و اکسیژن در برابر دیوار مسطح و نازک می گردد. بنابراین آب مسیری طولانی را جهت رسیدن به سطح فلز باید طی نماید [۱۹]. افزودنی های دیگری نیز با وظایف مختلف و در درصد کم به فرمولاسیون رنگ اضافه می شوند که بسیار فراوانند. از بین آنها تنها به ذکر چند نمونه بسنده می شود: استفاده از ترکیبات سرب و کرومات. در گذشته به منظور افزایش عمر نگهداری در ظرف، افزایش عمر پوشش و کاهش نرخ مصرف روی با سازو کار بازدارندگی بسیار معمول بود اما به دلیل سمی بودن و مسائل زیست محیطی کاربردشان تا حدی محدود گردیده است. برخی افزودنی ها مثل فسفات روی و کلسیم سیلیکات به منظور پایدار کردن محصولات خوردگی و تأثیر بر مرحله دوم حفاظت استفاده می شوند [۹، ۱۸، ۲۰-۲۲]. اکسید آهن میکایی یکی از پرکاربردترین رنگدانه لایه ای در پوششهای ضد خوردگی با مکانیزم سد کنندگی است که غیرسمی، غیر واکنش دهنده و با پایداری حرارتی بالاست. ذرات لایه ای این رنگدانه به وسیله جهت گیری موازی با زیرلایه، سدی در مقابل نفوذ الکترولیت به سمت زیرلایه ایجاد میکنند. جایگزین کردن رنگدانه های کروی روی با رنگدانه های لایه ای اکسید آهن میکایی باعث افزایش تخلخل پوشش می شود زیرا اکسید آهن میکایی نسبت سطح به وزن زیادی دارد و مقدار بیشتری رزین برای تر شدن احتیاج دارد. یک ساختار متخلخل تر مقدار بیشتری محصولات خوردگی را در خود جای می دهد و همچنین مهاجرت محصولات خوردگی و خروج هیدروژن به سمت خارج پوشش در آن راحتتر رخ می دهد [۱۷]. معروف ترین سازه ای که در آن اکسید آهن میکایی استفاده شده، برج ایفل در پاریس می باشد. از زمان بر پا شدن این برج در سال ۱۸۸۹ تا کنون برای نگهداری این برج، پوششی محتوی رنگدانه اکسید آهن میکایی به کار رفته است [۲۳]. در این تحقیق به ارزیابی جایگزینی هر چه بیشتر پودر روی در پوششهای آلی غنی از روی اپوکسی با پیگمنت اکسید آهن میکایی پرداخته شده است، که با نگاه اقتصادی صورت گرفته است و خواص پوششهای حاصله مورد بررسی قرار گرفته است. هم چنین در کارهای دیگران حداکثر ۲۰ درصد از این پودر جایگزین شده است، که در این کار میزان آن تا ۴۰ درصد کل فرمولاسیون بوده است و همزمان

سایر عناصر و جایگزینی گرد روی با پیگمنت اکسید آهن میکایی، ساخت پوششها صورت پذیرفته است. با توجه به درصد جامد ۵۰ برای سخت کننده و بنابر استوکیومتری مقادیر سخت کننده اعلام شده اند.

جدول ۲) خصوصیات پیگمنت اکسید آهن میکایی

وزن مخصوص	۴.۹
رنگ	خاکستری تیره
جذب روغن	۱۱
بارگذاری معمولی	۳۰-۵۰٪
اندازه ذرات	۴۰-۶۰ میکرون

### ۲(۲) آماده سازی نمونه ها

پلیت هایی با ابعاد ۱۵\*۵ سانتی متر مربع که از ورق های فولاد کم کربن از جنس St37 به ضخامت 1mm بریده شد به عنوان زیرآیند فلزی بکار گرفته شدند. این پلیت های فولادی با سمباده سیلیسیوم کاربید شماره ۶۰ خشن کاری شدند و قبل از اعمال روکش، با استون چربی زدایی شده و خشک گردیدند. اجزای رنگ به طور کامل مخلوط شده و روکش ها با استفاده از پیستوله هوا با فشار ۱.۵ بار و از فاصله ۳۰ سانتی متر بر روی پلیت ها اعمال شدند. ۵ سری از پلیت های فولادی بر روی یک طرف با رنگ های فرموله شده روکش شدند. مشخصات مجموعه های مختلف در جدول ۳ ارائه گردیده است. اندازه گیری ضخامت پوشش های اعمالی با استفاده از ضخامت سنج با مارک الکومتر دیجیتال انجام شد. به منظور تضمین پخت فیلم، پلیت ها به مدت ۱۰ روز قبل از شروع آزمایش در محیط آزمایشگاهی نگهداری شدند.

جدول ۳) ویژگی های رنگ غنی از روی (با درصد وزن اجزای مختلف)

کد پوشش	گرد روی	اکسید آهن میکایی	رزین اپوکسی	سخت کننده
A	۸۵	-	۹	۷,۳۸
B	۸۰	۵	۹	۷,۳۸
C	۷۵	۱۰	۹	۷,۳۸
D	۶۵	۲۰	۹	۷,۳۸
E	۵۵	۳۰	۹	۷,۳۸
F	۴۵	۴۰	۹	۷,۳۸

### ۳(۲) آزمون های آزمایشگاهی

برای بررسی سطح ساختار دو پیگمنت گرد روی و اکسید آهن میکایی درون نمونه ها از میکروسکوپ نوری استفاده شد. آزمون چسبندگی با دستگاه کراس کات ساخت کمپانی

اکثر آزمونهای مرتبط با پوشش در حد آزمایشگاهی به صورت جامد انجام شده و نتایج مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته اند که در کارهای دیگران صرفاً آزمونهای شیمیایی یا مکانیکی یا فیزیکی مد نظر بوده اند

### ۲) مواد و روش تحقیق

#### ۱(۲) مواد اولیه

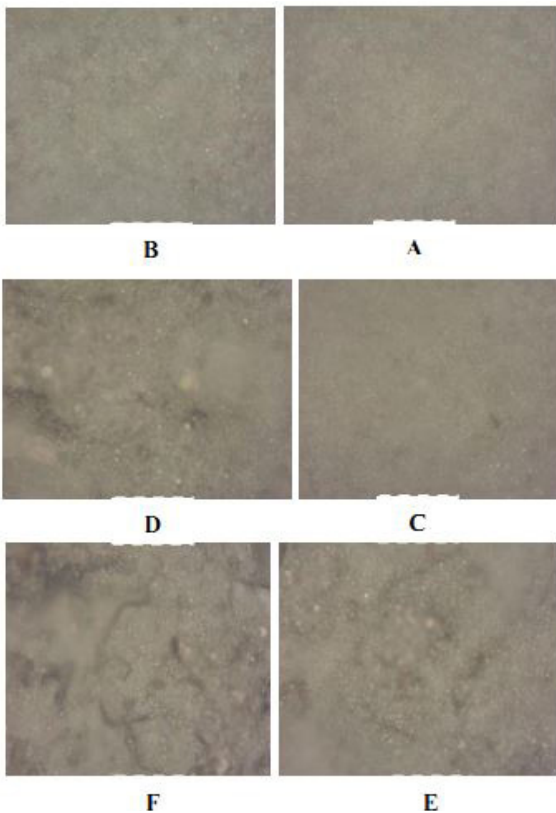
به دلیل کاربر نهایی صنعتی و لزوم کسب نتایج واقعی و عملی، مواد اولیه کاربردی در فرمولاسیون پوششها از نوع تجاری بوده و از بازار

جدول ۱) ویژگی های گرد روی به کار رفته در فرمولاسیون پوشش ها

خصوصیات	واحد	مقدار واقعی
میانگین اندازه ذرات	میکرون	۴-۶
باقی مانده	%	حداکثر ۰.۰۱
کل روی	%	حداقل ۹۹
روی فلزی	%	حداقل ۹۴
سرب	%	حداکثر ۰.۰۵
کادمیوم	%	حداکثر ۰.۰۵
آهن	%	حداکثر ۰.۰۰۱
آرسنیک	%	حداکثر ۰.۰۰۰۱
کلرید	%	حداکثر ۰.۰۰۱
اسید نامحلول	%	حداکثر ۰.۰۲
رنگ		خاکستری مایل به آبی
شکل ذره		کروی
چگالی ظاهری	Kg/m <sup>3</sup>	۳۰۰۰

داخلی تأمین شدند. رزین اپوکسی با درصد جامد ۶۵٪ با کد EPONE 1001 از شرکت باژاک تهیه شد و سخت کننده مربوطه با کد تجاری CRAY AMID 115 با استوکیومتری ۰,۴۱ رزین در فرمولاسیون ها مورد استفاده قرار گرفت هم چنین، گرد روی کروی با اندازه ذره برابر با ۴-۶ میکرومتر با مشخصات مندرج در جدول ۱ از طریق شرکت پارس زینک داست تأمین شد. اکسید آهن میکایی به کار رفته در این تحقیق با بیش از ۸۵٪ از ذرات با ابعاد کمتر از ۴۴ میکرومتر، محصول شرکت معادن سرمک ایران بود که مشخصات آن در جدول ۲ آورده شده است. شش فرمولاسیون با نسبت های مختلف از دو رنگدانه گرد روی و پیگمنت اکسید آهن میکایی ساخته شد که در جدول ۳ نشان داده شده اند. ستون سمت چپ نشان دهنده میزان درصد سخت کننده اپوکسی به کار رفته در فرمولاسیون ساخت هر پوشش می باشد که طبق این جدول از ۵ تا ۴۰٪ وزنی در فرمولاسیون با ثابت نگه داشتن

اندازه گیری براقیت پوشش از براقیت سنج استفاده می شود که این کار طبق استاندارد ASTM D523-14 انجام گرفت [۳۰]. این آزمون با دستگاه براقیت سنج ساخت کمپانی Sheen Instruments انگلستان انجام شد. برای لایه آستر آزمون براقیت ضرورت ندارد ولی هدف از انجام این آزمون در اینجا ارزیابی مقاومت حلالی با آزمون پخت کامل ماتریس اپوکسی بوده است. و در استاندارد مربوط به آزمون مالش متیل اتیل کتون بر روی پوشش های آلی، اشاره شده بود که اگر بعد از ۲۰۰ بار کشیدن دستمال، سطح فلز نمایان نشود، می بایست این آزمون انجام گیرد. به همین دلیل آزمون براقیت بر روی پوشش ها انجام شد. آزمون خوردگی شتاب یافته (مه نمکی)<sup>۱</sup> با دستگاه کابین مه نمکی ساخت کمپانی Sheen Instruments بر روی پوشش های سری ۳ به مدت ۵۰۰ ساعت و بر اساس استاندارد ASTM B 117-11 انجام گرفت [۳۰]. جهت بررسی توانایی حفاظتی پوشش ها، خراش های مقطعی<sup>۲</sup> بر روی آنها ایجاد گردید که به زیرلایه منتهی می شدند. در پایان، ارزیابی عملکرد بر اساس میزان تاول<sup>۳</sup> و زنگ زدگی و رشد (خزش) زنگ<sup>۴</sup> در خراش ها



شکل ۱) تصاویر سطح مقطع پوشش های نمونه ها با بزرگ نمایی ۴۰۰ برابر

- 1 Salt Spray
- 2 X-Cut scribes
- 3 Blistering
- 4 Rust creepage

Sheen Instruments انگلستان بر روی نمونه های سری ۱ طبق استاندارد ASTM D3359 [۲۴] انجام گرفت. این آزمون جهت اندازه گیری چسبندگی پوشش انجام شد.

جدول ۴) مشخصات سری های پلیت روکش شده.

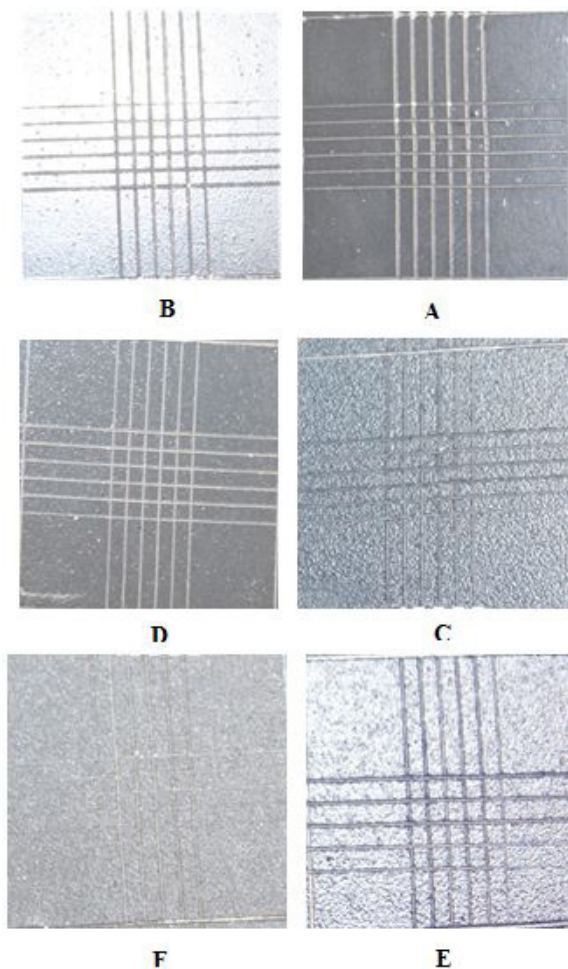
شماره سری پلیتهای روکش دار	ضخامت (μm)	تست های آزمایشگاهی
۱	۶۰±۱۰	تست خمش - تست چسبندگی
۲	۵۰±۱۰	تست ضربه - تست سختی سنج مدادی
۳	۷۰±۱۰	تست جامی شدن - تست مه نمکی
۴	۷۵±۱۰	تست مالش متیل اتیل کتون
۵	۵۵	آزمون امپدانس الکتروشیمیایی

آزمون جامی شدن بر روی نمونه های سری ۳ با دستگاه جامی شدن<sup>۱</sup> ساخت شرکت طراحی و تجهیز RNA رادیان نوآور، جهت تعیین میزان مقاومت و انعطاف پذیری و الاستیسیته روکشها در مقابل تغییر حجم و جامی شدن و خمیدگی، طبق استاندارد ISO-1520 [۲۵] انجام گرفت. آزمون ضربه<sup>۲</sup>، بر روی نمونه های سری ۲ با استفاده از استاندارد ISO-6272 [۲۶] انجام گرفت. آزمون با دستگاه تست ضربه ساخت کمپانی Testech کره انجام گرفت. آزمون خمش مخروطی مندرل<sup>۳</sup> به منظور سنجش میزان مقاومت، چسبندگی و کشش پوشش روی ورقه فلزی در برابر خمش، بر روی نمونه های سری ۱ با استفاده از استاندارد ISO 6860-84 [۲۷] انجام گرفت. این آزمون با دستگاه خمش مخروطی ساخت کمپانی Testech کره انجام گرفت. آزمون سختی سنج مدادی جهت اندازه گیری سختی رنگ و روکش بر روی نمونه های سری ۲ با استفاده از استاندارد ASTM D3363-05 [۲۸] انجام گرفت. این آزمون با دستگاه سختی سنج مدادی ساخت کمپانی Sheen Instruments انگلستان انجام شد.

آزمون مالش متیل اتیل کتون<sup>۴</sup> جهت بررسی مقاومت پوشش های آلی در برابر حلال متیل اتیل کتون، بر روی نمونه های سری ۴، طبق استاندارد ASTM D5402-06 [۲۹] انجام گرفت. بر اساس استاندارد مذکور، اگر بعد از ۲۰۰ بار کشیدن دستمال آغشته به متیل اتیل کتون بروی پوشش، سطح فلز نمایان نشود، بایستی مجدداً ضخامت فیلم خشک پلیت اندازه گیری شود و همچنین براقیت و همچنین سختی هر دو قسمت پلیت با هم مقایسه گردد. برای

- 1 Cupping test
- 2 Impact test
- 3 Conical Mandrel Bend test
- 4 MEK RUB

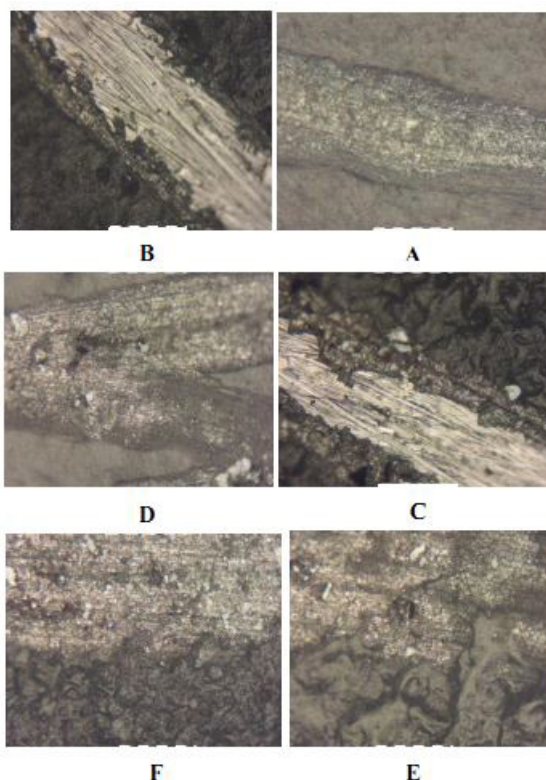
بزرگ نمایی ۴۰۰ برابر نشان می دهد. شکل ۲ تصاویر سطح مقطع پوشش ها که بر روی آنها خراش ایجاد شده است را با قدرت بزرگ نمایی ۱۰۰ برابر نشان می دهد تصاویر ۱ نشان دهنده نمونه های حاوی ۰-۴۰٪ وزنی پیگمنت اکسید آهن میکایی است، که با قدرت بزرگنمایی ۴۰۰ برابر نشان داده شده است. و تصویر ۲ از سطح مقطع ایجاد خراش بر روی نمونه با قدرت بزرگنمایی ۱۰۰



شکل ۳) تصویر نمونه هایی که تست چسبندگی بر روی آنها انجام شده

جدول ۵) نتایج آزمون چسبندگی بر روی نمونه های مختلف.

درجه بندی	%MIO	نمونه
5B	۰%	A
5B	۵%	B
5B	۱۰%	C
5B	۲۰%	D
5B	۳۰%	E
5B	۴۰%	F



شکل ۲) تصاویر سطح مقطع پوشش های ۶ نمونه که بر روی آنها خراش ایجاد شده با بزرگ نمایی ۱۰۰ برابر

و نواحی خارج آن مطابق با استانداردهای ASTM D714-02 و ASTM D1654-08، ASTM D610-08، [۳۲، ۳۳، ۳۴] انجام گرفت. پس از آن بر روی پوشش های سری ۵ آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در روز آغازین و پایانی یک دوره ۱۲۰۰ ساعته غوطه وری<sup>۱</sup> در محلول سدیم کلرید (ساخت مرک) ۳،۵٪ صورت پذیرفت. مساحت در معرض الکترولیت در این آزمون ۲ سانتی متر مربع بود. در یک سیستم پیل استاندارد سه الکترودی، نمونه های پوشش داده الکترود مرجع و میله ای از جنس پلاتین، نقش الکترود کمکی را ایفا می کردند. این آزمون با دستگاه Autolab PGSTAT 320N و تحلیل گر پاسخ فرکانس FRA 2 حول پتانسیل آزاد خوردگی با دامنه ۱۰ میلی ولت و در محدوده فرکانسی ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱۰ میلی هرتز انجام شد. پتانسیل آزاد خوردگی نیز با استفاده از همان پیل و تجهیزات در طول دوره آزمون های الکتروشیمیایی ثبت می شد.

### ۳) نتایج و بحث

#### ۱(۳) مطالعه سطح پوشش ها

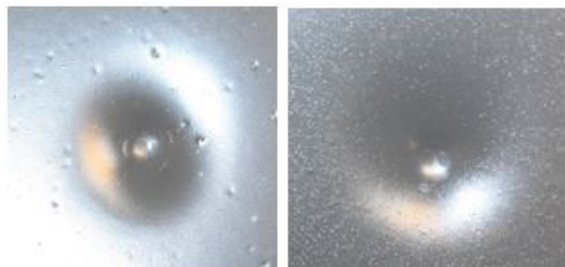
شکل ۱ تصویر میکروسکوپ نوری نمونه ها را از نمای بالا با قدرت

1 Immersion

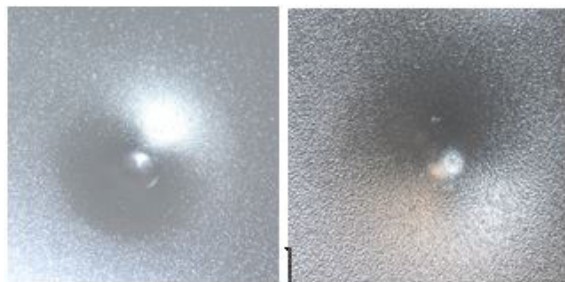
بر روی هر یک از نمونه ها طبق استاندارد مربوطه در این آزمون ۱ میلی متر می باشد و در جدول ۵ نتایج این ارزشیابی نشان داده شده است. Hochmonnova گزارش کرد که جایگزینی نسبی ذرات کروی گرد روی با اکسید آهن میکایی در فرمولاسیون روکش غنی از روی اپوکسی خواص روکش را بهبود می بخشد [۳۵]. نتایج آزمون چسبندگی کراس کات کمابیش با یافته های دیگران همخوانی دارند. بنابراین از انجام آزمون چسبندگی کراس کات می توان نتیجه گیری کرد که این میزان جایگزینی گرد روی با اکسید آهن میکایی اثر مخربی بر چسبندگی روکش غنی از روی نداشت و تغییری در چسبندگی پوشش ایجاد نمی کند و تفاوتی بین پوشش ها با درصد مختلف اکسید آهن میکایی از لحاظ چسبندگی در این آزمون مشاهده نمی شود

### (۳/۳) نتایج آزمون جامی شدن

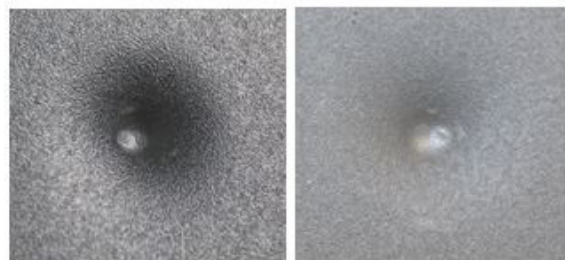
شکل ۴ نشان دهنده سطوحی است که تست جامی شدن بر روی آنها انجام شده است. میزان مقاومت روکش ها در مقابل تغییر حجم و ایجاد ترک و مشاهده آن از طریق



A B



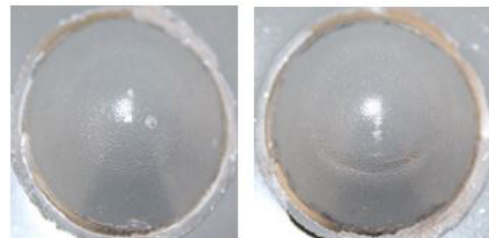
D C



E F

شکل ۵) تصویر نمونه هایی که تست ضربه بر روی آنها انجام شده.

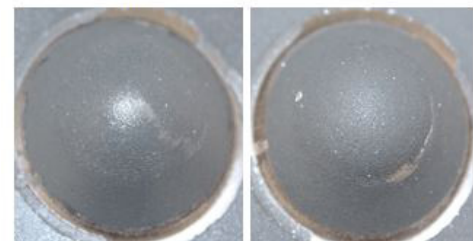
برابر نشان داده شده است که هرچه درصد اکسید آهن میکایی در نمونه ها افزایش پیدا می کند، مقاومت پوشش در مقابل ایجاد خراش بیشتر می شود و رنگ و پیگمنت کمتری از سطح جدا می گردد.



B A



D C



F E

شکل ۴) تصاویر نمونه هایی که تست جامی شدن بر روی آنها انجام شده

### (۳/۲) نتایج آزمون چسبندگی و تحلیل

شکل ۳ نشان دهنده سطوحی است که تست چسبندگی بر روی آنها انجام شد. میزان چسبندگی روکش ها از طریق مقایسه با استاندارد ASTM D3359-02 [۲۴] ارزشیابی شد و فاصله خطوط

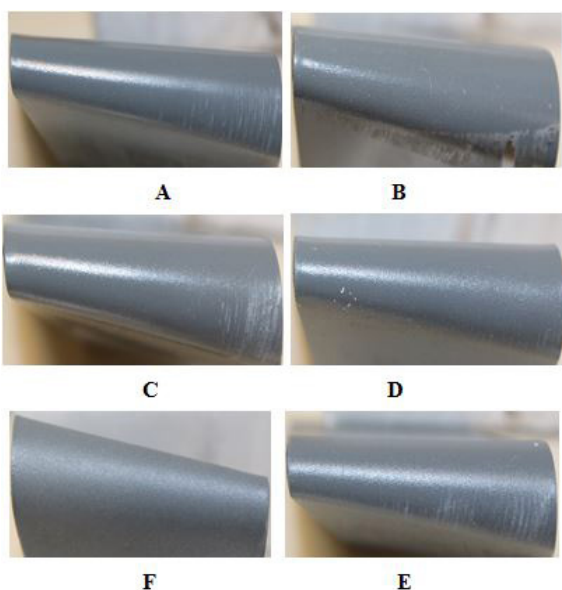
### جدول ۶) اندازه گیری مقاومت در مقابل تغییر حجم

و ایجاد ترک توسط تست جامی شدن.

نمونه	%MIO	اندازه گیری عمق دندان
A	۰%	۹۰ میلی متر
B	۵%	۹۷ میلی متر
C	۱۰%	۱۰۴ میلی متر
D	۲۰%	۱۱۰ میلی متر
E	۳۰%	۱۱۱ میلی متر
F	۴۰%	۱۱۲ میلی متر

جدول ۷) اندازه گیری مقاومت پوشش در برابر ضربه.

نمونه	%MIO	۳۵۰ mm	۳۷۰ mm	۳۹۰ mm	۴۱۰ mm	۴۳۰ mm	۴۵۰ mm
A	%۰	+					
B	%۵	-	+				
C	%۱۰	-	-	+			
D	%۲۰	-	-	-	+		
E	%۳۰	-	-	-	-	+	
F	%۴۰	-	-	-	-	-	+



شکل ۶) تصویر نمونه‌هایی که تست خمش مخروطی بر روی آنها انجام شده

جدول ۸) اندازه گیری میزان مقاومت پوشش در برابر خمش

نمونه	%MIO	۶-۸ میلی متر
A	%۰	+
B	%۵	+
C	%۱۰	-
D	%۲۰	-
E	%۳۰	-
F	%۴۰	-

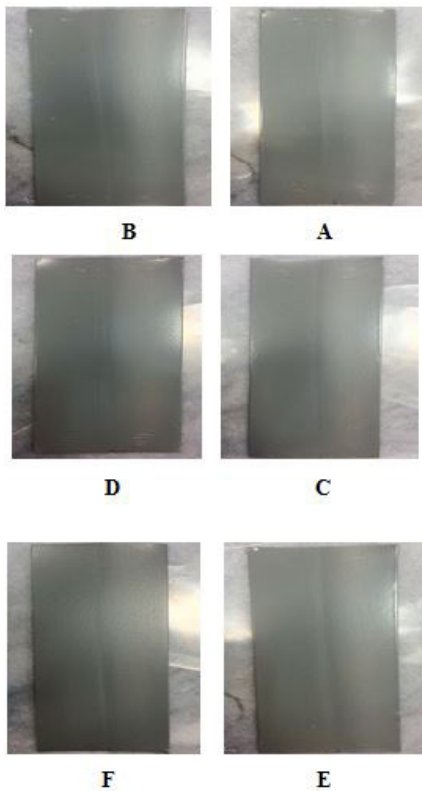
جدول ۵) نتایج آزمون خمش مخروطی مندرل

شکل ۶ نشان دهنده سطوحی است که تست خمش بر روی آنها انجام شده است. میزان مقاومت پوشش‌ها در برابر خمش و ایجاد ترک در آنها در مقایسه با استاندارد ISO 6860 مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت [۲۷] و نتایج این آزمون در جدول ۸ آورده شده است.

مقایسه با استاندارد ISO 1520 [۲۵] ارزشیابی شد و نتایج در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج جدول ۶ و شکل ۴ کمابیش با گفته‌های Hochmonnova همخوانی دارد [۳۵]. بنابراین نتیجه گیری می‌شود که هرچه میزان ذرات اکسید آهن میکایی بیشتر باشد، مقاومت مکانیکی پوشش حاصله بیشتر می‌شود و اثر کمتری در مقابل ترک خوردگی نشان می‌دهد و ترک در عمق بالاتری ایجاد و مشاهده می‌شود. و دلیل آن را اینگونه می‌توان عنوان داشت که ذرات اکسید آهن میکایی به دلیل ساختار ورقه‌ای که دارند، ساختار پوشش غنی از روی اپوکسی را دست‌خوش تغییر قرار می‌دهند و مانند یک کامپوزیت در بعد ۱۰۰ عمل می‌کند به همین دلیل گفته می‌شود که مقاومت مکانیکی پوشش را افزایش می‌دهد به عبارت دیگر این میزان جایگزینی گرد روی با اکسید آهن میکایی حداقل اثر مخربی بر مقاومت و انعطاف پذیری روکش غنی از روی در مقابل تغییر حجم نداشت.

### ۴) نتایج آزمون ضربه

شکل ۵ نشان دهنده سطوحی است که تست ضربه بر روی آنها انجام شد. میزان مقاومت روکش‌ها در برابر ضربه و ایجاد ترک در آنها و مقایسه با استاندارد ISO 6272 7 [۲۶] ارزشیابی شد و نتایج حاصل از این آزمون در جدول نشان داده شده است. بر اساس جدول ۷ اولین ترک‌ها در ارتفاعات ۳۵۰-۴۵۰ میلی متری مشاهده شد و منظور از ترک، خط‌های خیلی خیلی ریز در اطراف محل اعمال ضربه است. به دلیل پیوندهای شیمیایی روکش غنی از روی اپوکسی با پیگمنت اکسید آهن میکایی، انسجام زیاد روکش قابل پیش‌بینی می‌باشد. به همین دلیل نمونه‌های E و F مقاومت بیشتری در مقابل ضربه در مقایسه با نمونه A از خود نشان می‌دهد. با انجام این آزمون می‌توان نتیجه‌گیری کرد که هرچه میزان اکسید آهن میکایی بیشتر باشد، مقاومت مکانیکی بیشتر می‌شود و اثر کمتری در مقابل ترک خوردگی نشان می‌دهد و در ارتفاع بالاتری ترک ایجاد و مشاهده می‌شود

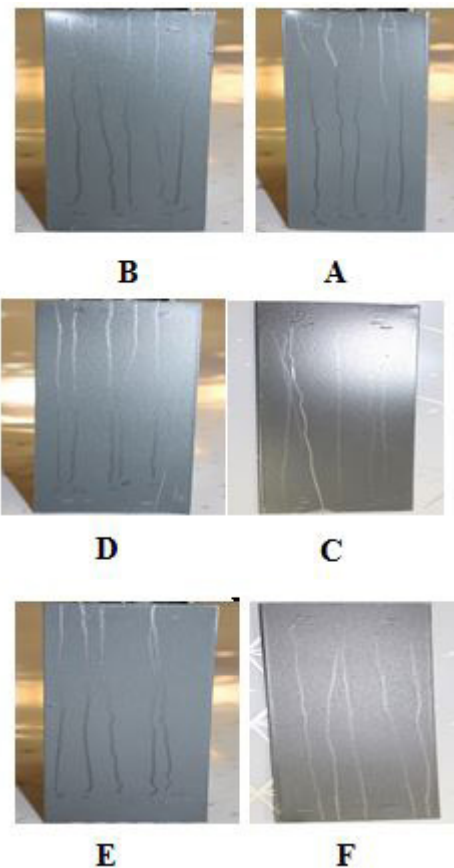


شکل ۸) تصویر نمونه هایی که تست مالش متیل اتیل کتون بر روی آنها انجام شده

وزنی، مقاومت مکانیکی بیشتر شده است که دلیل آن هرچه میزان اکسید آهن میکایی بیشتر باشد، مقاومت مکانیکی بیشتر می شود و اثر کمتری در مقابل ترک خوردگی نشان می دهد.

### ۶(۳) نتایج آزمون سختی سنج مدادی

شکل ۷ نشان دهنده سطوحی است که آزمون سختی سنج مدادی بر روی آنها انجام شده است. میزان سختی پوشش ها برابر خراش در مقایسه با استاندارد ASTM D 3363-05 [۲۸] مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این در جدول ۹ آورده شده است. با توجه به شکل ۷ هرچه میزان ذرات اکسید آهن میکایی بیشتر



شکل ۷) تصویر نمونه هایی که تست سختی سنج مدادی بر روی آنها انجام شد

به دلیل گفته شده در قسمت نتایج آزمون جامی شدن و تقویت ساختار ماتریس رزین اپوکسی با ورقه های اکسید آهن میکایی نوعی کامپوزیت تشکیل شده و خواص مکانیکی اعم از مقاومت ضربه و نتایج آزمون جامی شدن و آزمون خمش را ارتقا داده است. با توجه به نتایج بدست آمده از انجام این تست ها نیز می توان صحت این استدلال را ثابت کرد [۳۵]. و با توجه به نتایج شکل ۶ و جدول ۸ و نتایج آزمون های ضربه و جامی شدن نیز می توان به این نتیجه دست یافت که با افزایش درصد جایگزینی گرد روی با اکسید آهن میکایی از ۰ به ۴۰ درصد

جدول ۹) درجه بندی با سنجش چسبندگی به وسیله تست سختی سنج مدادی

نمونه	%MIO	H 6	H 4	H 3	H	F
A	۰%	+	+	-	-	-
B	۵%	+	+	-	-	-
C	۱۰%	+	-	-	-	-
D	۲۰%	-	-	-	-	-
E	۳۰%	-	-	-	-	-
F	۴۰%	-	-	-	-	-



انجام شده است. میزان مقاومت پوشش های آلی در برابر حلال متیل اتیل کتون در مقایسه با ASTM D5402-06 [۲۹] مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته، استاندارد است. در جدول ۱۰ ضخامت پلیت ها قبل و بعد از انجام این تست نشان داده شده است. بدلیل اینکه هیچ کدام از سطوح پوشش ها در اثر مالش حلال به سطح فلز نرسیدند، تست سختی سنج مدادی و تست براقیت سنج بر روی پلیت ها انجام شد و هر کدام طبق استاندارد مربوطه که به ترتیب ASTM D3363-05، ASTM D523-14 [۲۸، ۳۰] می باشد انجام شد و نتایج حاصل از آنها در جداول ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. نتایج جداول ۱۱ و ۱۲ نشان می دهد که بدلیل ساختار ورقه ای پیگمنت اکسید آهن میکایی، تقویت مکانیکی ساختار ماتریس کاملاً تثبیت شده است و در هنگام انجام تست مالش متیل اتیل کتون، پیگمنت کمتری از سطح پوشش جدا می شود و به همین ترتیب تفاوت ضخامت پوشش هایی که اکسید آهن میکایی بیشتری دارند، قبل و بعد از انجام تست کم است و مقاومت پوشش های با درصد بیشتر پیگمنت اکسید آهن میکایی در برابر حلال متیل اتیل کتون

جدول ۱۳) درجه بندی نمونه ها از لحاظ زنگ زدگی و تاول

نمونه	%MIO	درجه تاول زدگی	درجه زنگ زدگی
A <sub>1</sub>	۰٪	4M	10
A <sub>2</sub>	۰٪	4MD	8-S
B <sub>1</sub>	۵٪	2F	8-S
B <sub>2</sub>	۵٪	2F	7-G
C <sub>1</sub>	۱۰٪	2F	7-G
C <sub>2</sub>	۱۰٪	2F	7-G
D <sub>1</sub>	۲۰٪	4M	7-G
D <sub>2</sub>	۲۰٪	4F	8-G
E <sub>1</sub>	۳۰٪	4F	7-G
E <sub>2</sub>	۳۰٪	4F	10
F <sub>1</sub>	۴۰٪	10	10
F <sub>2</sub>	۴۰٪	10	10

بیشتر است. و به همین دلیل براقیت پوشش هایی با درصد بیشتر اکسید آهن میکایی، کمتر تغییر می کند و تفاوت براقیت کمتری قبل و بعد از انجام تست در این پوشش ها مشاهده می شود.

### ۸(۳) نتایج آزمون پاشش نمک

تصاویر مجموعه پلتهای روکش شده سری ۵ بعد از ۵۰۰ ساعت آزمایش اسپری نمک در شکل ۹ نشان داده می شود. در برخی

جدول ۱۰) ضخامت پلیت ها قبل و بعد از تست مالش متیل اتیل کتون

نمونه	%MIO	ضخامت قبل از تست	ضخامت بعد از تست
A	۰٪	۷۵ میکرون	۷۱ میکرون
B	۵٪	۷۵ میکرون	۷۲ میکرون
C	۱۰٪	۸۵ میکرون	۸۳ میکرون
D	۲۰٪	۷۵ میکرون	۷۴ میکرون
E	۳۰٪	۸۵ میکرون	۸۴ میکرون
F	۴۰٪	۸۵ میکرون	۸۵ میکرون

جدول ۱۱) درجه بندی سنجش چسبندگی به وسیله تست سختی سنج مدادی

نمونه	%MIO	H 6	H 4	H 3	H
A	۰٪	+	+	+	-
B	۵٪	+	+	-	-
C	۱۰٪	+	-	-	-
D	۲۰٪	-	-	-	-
E	۳۰٪	-	-	-	-
F	۴۰٪	-	-	-	-

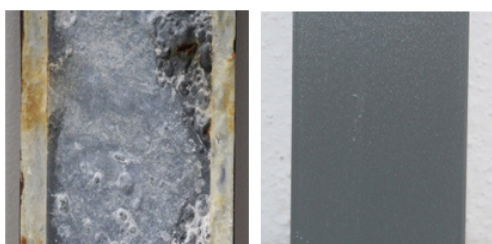
جدول ۱۲) اندازه گیری براقیت پوشش ها قبل و بعد از انجام تست

نمونه	%MIO	قبل از مالش متیل اتیل کتون	بعد از مالش متیل اتیل کتون
A	۰٪	۷۹,۴	۷۵,۴
B	۵٪	۶۸,۲	۶۴,۷
C	۱۰٪	۵۹,۵	۵۶,۵
D	۲۰٪	۵۰,۶	۴۸,۱
E	۳۰٪	۳۷,۵	۳۵,۵
F	۴۰٪	۲۱,۱	۱۹,۶

باشد، مقاومت پوشش در برابر ایجاد خراش بیشتر می شود و سختی سطح بیشتر می شود و هم چنین سبب می شود که در این آزمون خراشی بر روی سطح نمونه هایی که دارای درصد بیشتری اکسید آهن میکایی هستند ایجاد نشود حتی با سخت ترین مداد هم بر روی این سطوح خراش ایجاد نمی شود زیرا براساس اسناد مرتبط میزان سختی پیگمنت اکسید آهن میکایی حدود ۶ تا ۶,۵ موس<sup>۱</sup> می باشد

### ۷(۳) نتایج آزمون سختی سنج مدادی

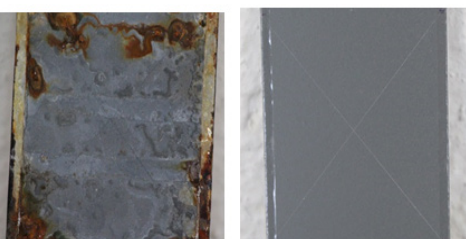
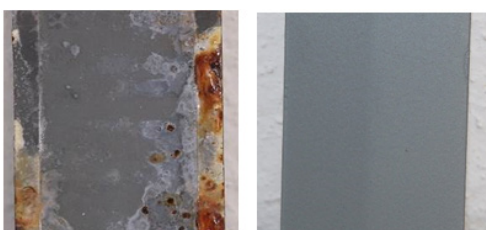
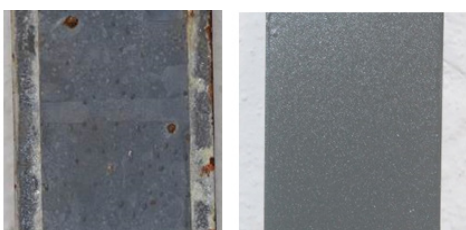
شکل ۸ نشان دهنده سطوحی است که این آزمون بر روی آنها



شکل ۲(۹) تصویر نمونه B قبل و بعد از گذشت ۵۰۰ ساعت



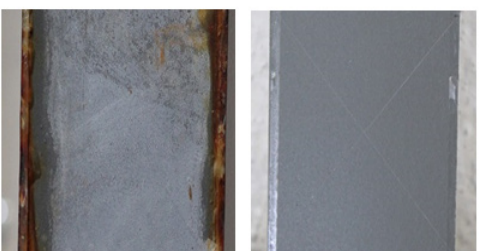
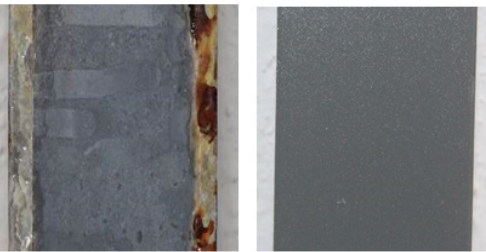
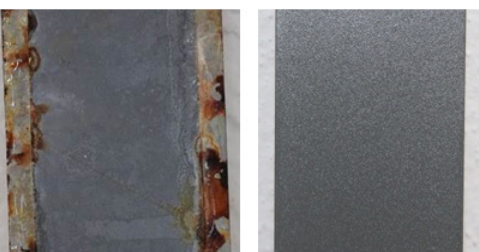
شکل ۱(۹) تصویر نمونه A قبل و بعد از گذشت ۵۰۰ ساعت



شکل ۴(۹) تصویر نمونه D قبل و بعد از گذشت ۵۰۰ ساعت



شکل ۳(۹) تصویر نمونه C قبل و بعد از گذشت ۵۰۰ ساعت



شکل ۶(۹) تصویر نمونه F قبل و بعد از گذشت ۵۰۰ ساعت



شکل ۵(۹) تصویر نمونه E قبل و بعد از گذشت ۵۰۰ ساعت

### ۹(۳) پتانسیل آزاد خوردگی

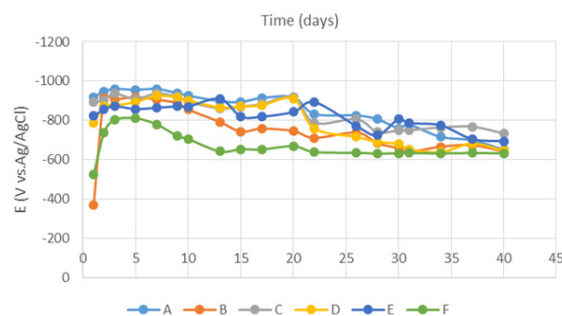
تغییرات پتانسیل پوشش های سری ۵ با زمان در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این پلیت های روکش شده در طی دوره زمانی ۴۰ روزه غوطه وری مستمر در معرض محلول نمکی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفتند. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود میزان حفاظت با افزایش درصد پیگمنت اکسید آهن میکایی تحت تاثیر قرار می گیرد و با گذشت زمان پتانسیل پوشش ها تا روزه ۳۵ نوسان داشته، رفته رفته به سمت مقادیر کمتر منفی و ثابت شدن مقادیر تغییر کرده است. این رفتار معمولاً بر اثر هم افزای پر شدن حفرات با محصولات نارسای خوردگی (که نقش سد کننده دارند و اتصال الکتریکی را در شبکه رسانای پوشش قطع می کنند) از یکسو و کوچک شدن روی (و در نتیجه کم شدن نسبت مساحت فعال روی به فولاد و کاهش سهم روی در پتانسیل مختلط) از سوی دیگر نسبت داده می شود. همچنین روند دیگری که غالباً صادق است این است که با افزایش درصد اکسید آهن میکایی در فرمولاسیون، پتانسیل به سمت مقادیر مثبت تغییر کرده است. این رفتار را می توان به قرار گیری ذرات اکسید آهن میکایی بین ذرات روی که به قطع اتصال الکتریکی برخی از آنها منجر می شود نسبت داد. یکی از معیار های پر کاربرد حفاظت کاتدی، داشتن پتانسیل منفی تر از  $-780$  mV - نسبت به الکتروود کالومل ( $-735$  mV - نسبت به نقره/کلرید نقره) است. با توجه به این معیار تمامی پوشش ها توانایی حفاظت کاتدی فولاد را حفظ کردند. در هر حال به طور کلی می توان گفت که با افزایش مقدار اکسید آهن میکایی، طول دوره حفاظت کاتدی زیاد شده است.

### ۱۰(۳) طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

نمودار نایکویست پوشش های سری ۵ بعد از گذشت ۱ ساعت و در روز دوم، پنجم، هشتم، سیزدهم، بیستم، بیست و ششم، سی و پنجم و پنجاهم به ترتیب در شکل های ۱۱-۱۹ نشان داده شده اند و برای تحلیل طیف شکل ها از مدار معادل شکل ۲۰ استفاده شد. در مدار معادل  $Q_{dl}$ ،  $R_{ct}$ ،  $Q_c$ ،  $R_c$ ،  $R_s$  به ترتیب مقاومت الکترولیت، مقاومت و ظرفیت خازنی پوشش، مقاومت انتقال بار و ظرفیت خازنی دو لایه الکتریکی هستند. Q عنصر فاز ثابت<sup>۱</sup> است که برای تفسیر بهتر ثابت زمانی پراکنده<sup>۲</sup> جایگزین خازن ایده آل (C) شده است. شکل (۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴) نشان می دهد که پوشش ها در اوایل غوطه وری تنها یک ثابت زمانی داشته اند. با توجه به این که عناصر الکتروشیمیایی مختلفی در غوطه وری یک پوشش غنی از روی مورد انتظار هستند اینطور برداشت می شود که پاسخ عناصر مختلف همپوشانی داشته است. در هر حال در این تحقیق این حلقه خازنی به انحلال روی نسبت داده شده است که با نتایج مطالعات نووا و همکارانش [۲۵] و نیز آبرئو و همکارانش [۲۶، ۲۷] تطابق دارد. با گذشت زمان رفته رفته یک

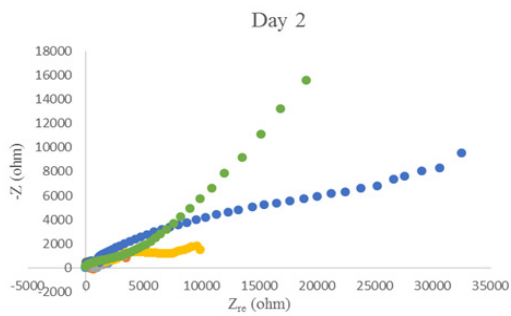
از پوشش ها علامتی از زنگ نقطه ای یا عمومی آهن یا حتی رشد (خزش) زنگ آهن دیده شد. از اینرو به پوشش ها براساس استانداردهای ASTM D 1654-08 و ASTM D 610-08 [۳۳، ۳۲] از ۱۰ نمره طبق جدول ۱۱ نسبت داده شد. در تمامی پوشش ها به جز نمونه F1 و F2 ( که عاری از زنگ نقطه ای، عمومی و خزش زنگ و پف کردگی و تاول است) بقیه در برخی نواحی دچار پف کردگی و تاول زدگی شده بودند. برای جدا کردن این بخش ها، سطح پوشش ها با سمباده سیلیسیمو کاربید p-60 اندکی ساییده شد و سپس ارزیابی براساس استاندارد ASTM D 714-02 [۳۴] انجام گرفت. نتایج این ارزیابی در جدول ۱۳ آورده شده است. نتایج درجه بندی بر اساس استاندارد های ASTM D 610-08 و ASTM D 714-02 در جدول [۳۴، ۳۳] نشان داده شده است. در این ارزیابی F و M و MD به ترتیب نماد فراوانی کم، متوسط، متوسط متراکم تاول ها هستند و اعداد نیز اندازه تاول ها را نشان می دهند. مقادیر جذب روغن پیگمنت ها حکم معیار مقدار رزین مورد نیاز برای مرطوب شدن را دارد. ذرات اکسید آهن میکایی، پیگمنت های لایه ای بوده که از نسبت مساحت به وزن بیشتر برخوردار بوده، و نیاز به رزین بیشتری برای مرطوب شدن دارد. بنابراین در صورت ثابت بودن درصد وزن کل پیگمنت، جایجایی گرد روی با جذب روغن ۷٫۸ توسط اکسید آهن میکایی با جذب روغن ۱۸٫۵ به افزایش تخلخل روکش انجامید. ساختار متخلخل تر محصولات خوردگی بیشتری را در خود جای داده و مهاجرت نمک و فرار هیدروژن به سمت بیرون روکش را تسهیل می کند. بر اساس این توضیحات و آگاهی از این که محصولات خوردگی حجم بیشتری در قیاس با روی ناب اشغال می کنند، بدیهی است که چرا A به عنوان کم تخلخل ترین و واکنش پذیرترین، بیشترین افت کیفی را نشان داد، در حالی که E و F با وجود کمترین واکنش پذیری و بیشترین تخلخل عملکرد خوبی داشتند. شایان ذکر است که F بر اساس مشخصات رنگ SSPC شماره ۲۰ حتی به عنوان غنی از روی نیز درجه بندی نشد. با این وجود، جایگزینی روی با اکسید آهن میکایی در تشکیل رنگ های غنی از روی در ۵۰۰ ساعت آزمایش اسپری نمک نتایج رضایت بخشی را به همراه داشت.

پتانسیل آزاد خوردگی

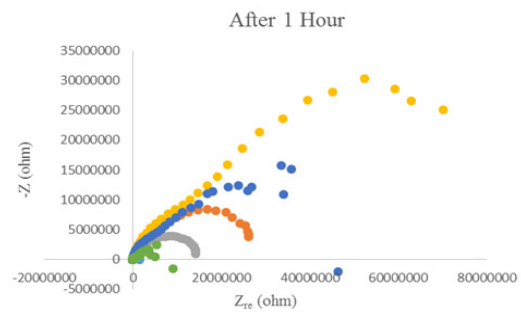


شکل ۱۰ تغییرات پتانسیل پوشش ها با زمان

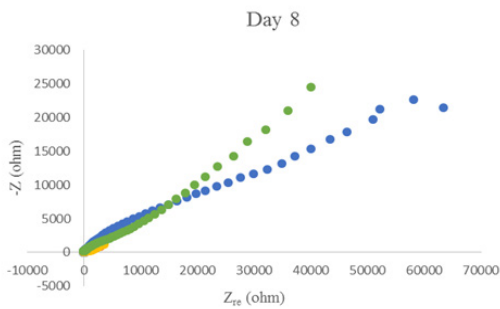
- 1 Constant phase element
- 2 Distributed time constant



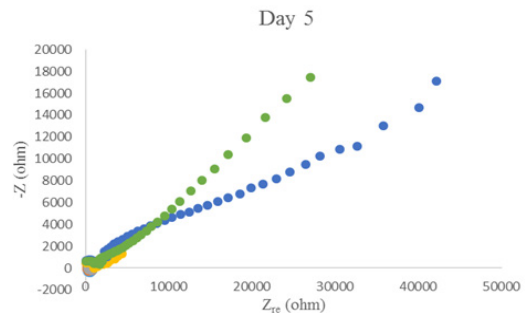
شکل ۱۲) نمودار نایکوویست پوشش ها در روز دوم غوطه وری



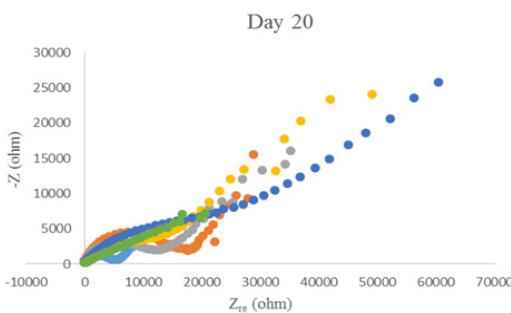
شکل ۱۱) نمودار نایکوویست پوشش ها پس از ۱ ساعت غوطه وری



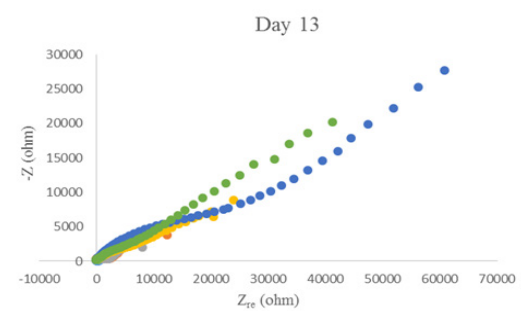
شکل ۱۴) نمودار نایکوویست پوشش ها در روز هشتم غوطه وری



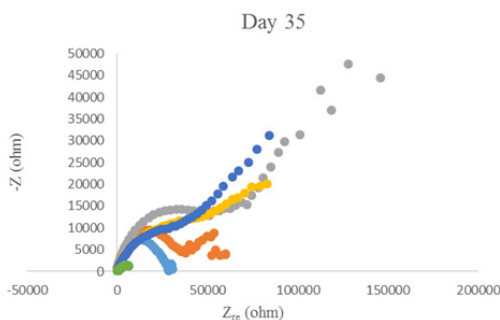
شکل ۱۳) نمودار نایکوویست پوشش ها در روز پنجم غوطه وری



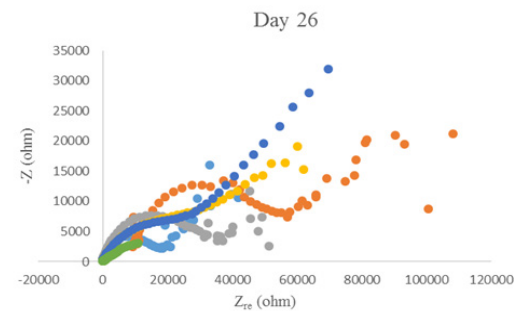
شکل ۱۶) نمودار نایکوویست پوشش ها در روز بیستم غوطه وری



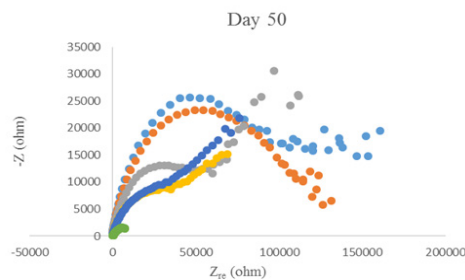
شکل ۱۵) نمودار نایکوویست پوشش ها در روز سیزدهم غوطه وری



شکل ۱۸) نمودار نایکوویست پوشش ها در روز سی و پنجم غوطه وری



شکل ۱۷) نمودار نایکوویست پوشش ها در روز بیست و ششم غوطه وری



شکل ۱۹) نمودار نایکوویست پوشش ها در روز پنجاهم غوطه وری

را کنترل کرد و هزینه های ناشی از گرد روی را تا حدی کم کرد. در مجموع می توان عنوان داشت که جایگزین کردن روی با اکسید آهن میکایی نرخ فعالیت را کمتر می کند و طول دوره حفاظت کاتدی را در پوشش های اپوکسی غنی از روی افزایش می دهد.

### ۵) تشکر و قدردانی

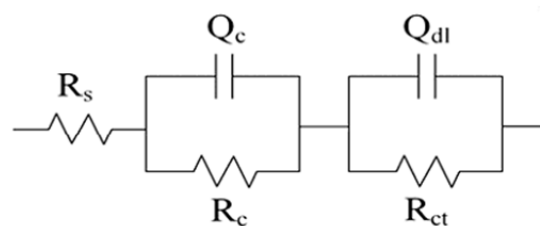
از همکاری شرکت رنگسازی توپ و جناب آقای مهندس فرهاد توحیدی و سرکارخانم مهندس الهام رضایی تشکر و قدردانی می شود.

### ۶) مراجع

- [1] R.N. Jagtap, P.P. Patil, S.Z. Hassan, Effect of zinc oxide in combating corrosion in zinc-rich primer, *Progress in Organic Coatings*, 63, 2008, 389–394.
- [2] S. Ananda Kumar, T. Balakrishnan, M. Alaga, Z. Denchevr, Development and characterization of silicone/phosphorus modified epoxy Materials and their application as anticorrosion and antifouling coatings, *Progress in Organic Coatings*, 55, 2006, 207–217.
- [3] Ole Øystein Knudsen, Unni Steinsmo, Marit Bjordal, Zinc-rich primers—Test performance and electrochemical properties, *Progress in Organic Coatings*, 54, 2005, 224–229.
- [4] Ramezanzadeh B, Attar M, An evaluation of the corrosion resistance and adhesion properties of an epoxy-nanocomposite on a hot-dip galvanized steel (HDG) treated by different kinds of conversion coatings, *Surface & Coating Technology*, 205, 2011, 4649-4657.

[۵] امیر سلماسی فر، علی اصغر سرابی داریانی، رضا فضایی، حسین عیوض محمدلو، مطالعه رفتار مقاومت به خوردگی پوشش نانو کامپوزیت اپوکسی بر روی فولاد اصلاح شده با پوشش تبدیلی بر پایه هگزافلورورو زیرکونیک اسید، نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته و پوشش های نوین،

۷، ۱۳۹۲، ۴۸۹–۴۸۰



شکل ۲۰) مدار معادل برای تحلیل نمودارهای امپدانس

حلقه خازنی دیگر در ناحیه فرکانسی بالا برای پوشش ها ظاهر شد که در این تحقیق این حلقه به طور کلی به خصوصیات پوشش نسبت داده شده است. تحقیقات متعددی مؤید این هستند که تجمع محصولات خوردگی—حداقل تا حدودی—مسئول افزایش مقاومت پوشش یا در واقع قطر حلقه خازنی ناحیه فرکانس بالا با گذشت زمان مشهود است [۲۶–۳۴]. این روند در رفتار پوشش ها دیده شد. اما در بقیه عکس ها آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی دو حلقه خازنی کاملاً تفکیک شده را نشان می دهد و جالب تر اینکه مقاومت حلقه فرکانس بالا با گذشت زمان برای همه پوشش ها کم شده است. اگر نسبت مقاومت انتهایی به اولیه محاسبه گردد، A کم ترین مقدار را دارد یعنی محصولات خوردگی و لایه سدی در این پوشش بیش از بقیه پوشش ها دستخوش تغییر شده اند. A نمونه ایست که با گذشت زمان روند کاهش پتانسیل نشان داده بود که این رفتار با توضیحات بخش پتانسیل و نتایج این بخش قابل توجیح است.

### ۴) نتیجه گیری

مقایسه نتایج آزمون های شیمیایی و اسپکتروسکوپی امپدانس الکتروشیمیایی نشان داد که نمونه های حاوی مخلوط دو رنگدانه گرد روی و اکسید آهن میکایی عملکرد بهتری نسبت به نمونه فاقد اکسید آهن میکایی داشتند. نمونه F، که حاوی ۴۰٪ وزنی رنگدانه اکسید آهن میکایی است در بین نمونه های مورد ارزیابی بیشترین مقاومت پوشش در برابر خوردگی و تست های دیگر را دارا می باشد. پوشش F که دارای درصد وزنی بیشتری از رنگدانه اکسید آهن میکایی می باشد توانایی حفاظت کاتدی خود را در طی دوره قرارگیری از دست نداد. اما روکش های حاوی روی بیشتر و اکسید آهن میکایی کمتر، توانایی حفاظت کاتدی خود را در بعضی از مراحل دوره زمانی قرارگیری در معرض محلول نمک از دست دادند. با انجام آزمون های صورت گرفته بر روی پلیت های پوشش شده، این نتیجه حاصل شد که حضور اکسید آهن میکایی در پوشش اپوکسی غنی از روی اثر مخربی ایجاد نمی کند، بلکه مقاومت پوشش ها در مقابل عوامل مختلف بیشتر می کند و با به کارگیری اکسید آهن میکایی در پوشش های غنی از روی، می توان فعالیت پوشش

- [15] Geeta Parashar, Deepak Srivastava, Pramod Kumar, Ethyl silicate binders for high performance coatings, *Progress in Organic Coatings*, 42, 2001, 1–14.
- [16] E. Akbarinezhad, M. Ebrahimi, F. Sharif, M.M. Attar, H.R. Faridi, Synthesis and evaluating corrosion protection effects of emeraldine base PAni/clay nanocomposite as a barrier pigment in zinc-rich ethyl silicate primer, *Progress in Organic Coatings*, 70, 2011, 39-44.
- [17] محمدناصر کاکایی، ایمان دانایی، داود زارعی، مطالعه اثر اکسید آهن میکایی بر رفتار حفاظت از خوردگی پوشش پایه آبی سیلیکاتی غنی از روی، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال هفتم، شماره سوم پائیز، ۱۳۹۲
- [18] محمد ناصر کاکایی، داود زارعی، ایمان دانایی، مروری بر پوشش های سیلیکات معدنی غنی از روی: بخش دوم، نشریه علمی-ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، جلد اول، شماره سوم، زمستان ۹۰.
- [19] رضا امینی، علی اصغر سرابی، سید محمود کثیریه، بررسی تأثیر حضور همزمان دو پیگمنت اکسید آهن میکایی و پرک شیشه در پوشش اپوکسی بر روی خواص ضدخوردگی پوشش با استفاده از ایمپدانس الکتروشیمیایی، یازدهمین کنگره ملی مهندسين شیمی ایران، تهران- دانشگاه تربیت مدرس- ۷ الی ۹ آذر ماه ۱۳۸۵
- [20] Doren K, Freitag W, Stoye D, Water-Borne Coatings the environmentally-friendly alternative, Hanser/Gardner Publications, Cincinnati (USA), 1994, 204.
- [21] Laverde D, Zubillaga J, Gil-Sevillano J, Villanueva E, The influence of the primer layer on mechanical damage and loss of corrosion protection of deformed painted Zn-0.16% Al and Zn-5% Al galvanized sheet steel, *Corrosion Science*, 37, 1995, 79-95.
- [22] Barraclough J, Harrison J, New Leadless Anti-corrosion Primers, *Journal of Oil Colour Chemistry, Assoc*, 48, 1965, 341-355.
- [6] Nikraves B, Ramezanzadeh B, Sarabi A.A, Kasiriha S.M, Evaluation of the corrosion resistance of an epoxy-polyamide coating containing different rations of micaceous iron oxide/ Al pigments, *Corrosion Science*, 53, 2011, 1592-1603.
- [7] A. Meroufel, S. Touzain, EIS characterisation of new zinc-rich powder coatings, *Progress in Organic Coatings*, 59, 2007, 197–205.
- [۸] علی صالح، منوچهر خراسانی، علی جان نثاری، فرشته صادقلو، فاطمه خیری، تأثیر محتوای روی بر مقاومت خوردگی سیستم های پوشش های پودری هیبرید اپوکسی پلی استر، نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته و پوششهای نوین، ۲، ۱۳۹۱، ۶۱-۷۰
- [۹] ایمان علی بخشی، ابراهیم قاسمی، محمد مهدویان احدی، رنگدانه های ضدخوردگی بر پایه فسفات روی، نشریه علمی پژوهشی مواد پیشرفته و پوششهای نوین، ۳، ۱۳۹۱، ۱۷۶-۱۵۹
- [10] Funke W, ACS Symposium Series, polymeric Materials for Corrosion Control, American Chemical Society, Washington, DC, 1986, 211-222.
- [11] Kalendova A, Sunparek J, Kalenda P, Non-toxic Anticorrosion Pigments of the Spinel Type Compared with Condensed Phosphates, *Dyes and Pigments*, 30, 1996, 129-140.
- [12] Zaarei D, Sarabi A, Sharif F, Moazzami Gudarzi M, Kassiriha S, A New approach to using submicron emeraldine-based polyaniline in corrosion-resistant epoxy coatings, *Coatings Technology and Research*, 9, 2012, 47-57.
- [13] H. Marchebois, C. Savall, J. Bernard, S. Touzain, Electrochemical behavior of zinc-rich powder coatings In artificial sea water, *Electrochimica Acta*, 49, 2004, 2945–2954.
- [14] V. Barranco, S. Feliu Jr, S. Feliu, EIS study of the corrosion behaviour of Zinc-based coatings on steel in quiescent 3% NaCl Solution. Part 1: directly exposed coatings, *Corrosion Science*, 46, 2004, 2203–2220.

- [35] L. Hochmonnova, Zinc-rich primers with micaceous iron oxide, paintandpowder.com, April, 2004, 27-30.
- [36] X. R. Novoa, M. Izquierdo, P. Merino and L. Espada, Electrochemical Impedance Spectroscopy and Zero Resistance Ammeters (ZRA) as Tools for Studying the Behaviour of Zinc-Rich Inorganic Coatings, Materials Science Forum, Vol. 44-45, 1989, pp. 223-234.
- [37] C. M. Abreu, M. Izquierdo, P. Merino, X. R. Novoa, C. Perez, A New Approach to the Determination of the Cathodic Protection Period in Zinc-Rich Paints, Corrosion, 55(12), 1999, 1173-1181.
- [38] C. M. Abreu, M. Izquierdo, M. Keddad, X. R. Novoa and H. Takenouti, Electrochemical Behavior of Zinc-Rich Epoxy in 3% NaCl Solution, Electrochimica Acta, Vol. 41, No. 15, 1996, pp. 2405-2415.
- [39] M. Morcillo, M. Svoboda, S. Feliu Jr, B. Kanápek, J. Simancas, H. Kubátova, A New Pigment to Be Used in Combination with Zinc Dust in Zinc-Rich Anti-Corrosive Paints, Pig. Resin Technol, 27(3), 1998, 161-167.
- [40] R. A. Armas, C. A. Gervasi, A. D. Sarli, S. G. Real and J. R. Vilche, Zinc-Rich Paints on Steels in Artificial Seawater by Electrochemical Impedance Spectroscopy, Corrosion, Vol. 48, 1992, pp. 379-383.
- [41] N. Hammouda, H. Chadli, G. Guillemot and K. Belmokre, The Corrosion Protection Behaviour of Zinc Rich Epoxy Paint in 3% NaCl Solution, Advances in Chemical Engineering and Science, Vol. 1, No. 2, 2011, pp. 51-60.
- [42] M. Selvaraj and S. Guruviah, The Electrochemical Aspects of the Influence of Different Binders on the Corrosion Protection Afforded by Zinc-Rich Paints, Surface Coatings International, Vol. 80, No. 1, 1997, pp. 12-17.
- [۲۳] بابک نیک روش، علی اصغر سرابی، سید محمود کثیریه، بررسی اثر پیگمنت های اکسید آهن میکایی و آلومنیوم ورقه ای بر افزایش مقاومت پوشش با روش امیدانس الکتروشیمیایی و آزمون مه نمکی، نشریه علمی - پژوهشی علوم و فناوری رنگ، ۲، ۱۳۸۷، ۲۳۶-۲۲۷
- [24] Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test, Annual Book of ASTM Standard, ASTM Standard, D3359-02, 2002.
- [26] Paints and varnishes — Falling-weight test, First edition 04.01, ISO 6272, 1993.
- [27] Paints and varnishes — Bend test (conical mandrel), Second edition 03.15, ISO 6860, 2006.
- [28] Standard Test Method for Film Hardness by Pencil Test, Annual Book of ASTM Standard, ASTM Standard, D3363-05(Reapproved 2011), 2011.
- [29] Standard Practice for Assessing the Solvent Resistance of Organic Coatings Using Solvent Rubs, Annual Book of ASTM Standard, ASTM Standard, D5402-06(Reapproved 2011), 2011.
- [30] Standard Test Method for Specular Gloss, Annual Book of ASTM Standard, ASTM Standard, D523-14, 2014.
- [31] Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus, Annual Book of ASTM Standard, ASTM Standard, B117-11, 2011.
- [32] Standard Test Method for Evaluation of Painted or Coated Specimens Subjected to Corrosive Environments, Annual Book of ASTM Standard, ASTM Standard, D1654-08, 2008.
- [33] Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces, Annual Book of ASTM Standard, ASTM Standard, D610-08 (Reapproved 2012), 2012.
- [34] Standard Test Method for Evaluating Degree of Blistering of Paints, Annual Book of ASTM Standard, ASTM Standard, D714-02(Reapproved 2009), 2009.

- [43] H. Shi, F. Liu and E.-H. Han, The Corrosion Behavior of Zinc-Rich Paints on Steel: Influence of Simulated Salts Deposition in an Offshore Atmosphere at the Steel/Paint Interface, Surface and Coatings Technology, Vol. 205, No. 19, 2011, pp. 4532-4539.
- [44] J. R. Vilche, E. C. Bucharsky and C. A. Giudice, Application of EIS and SEM to Evaluate the Influence of Pigment Shape and Content in ZRP Formulations on the Corrosion Prevention of Naval Steel, Corrosion Science, Vol. 44, 2002, pp. 1287-1309.
- [45] D. Xie, J. Wang, J. Hu and J. Zhang, Electrochemical Behavior of Organic and Inorganic Zinc-Rich Coatings in 3.5% NaCl Solution, The Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 13, 2003, pp. 421-425.