

## مطالعه تاثیر فعال سازی مکانیکی سطح فولاد ساده کربنی بر خواص حفاظتی پوشش فسفات Zn

### اعمالی و بهبود چسبندگی رنگ

لیلا فتح یونس\*<sup>۱</sup> و مازیار آزادبه<sup>۲</sup>

#### چکیده

در این مقاله تاثیر روش های گوناگون آماده سازی سطح فولاد ساده کربنی، نظیر سنباده زنی با ورق سنباده شماره ۱۸۰، ماسه پاشی و ساچمه پاشی بر روی ساختار پوشش اعمالی مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، نشان دادند که عملیات ساچمه پاشی تاثیری منفی روی ساختار پوشش بدست آمده داشته، سبب درشت تر شدن و توزیع نایکنواخت بلورهای فسفات گردید. از سوی دیگر، مشاهده شد که عملیات ماسه پاشی با تشکیل نیم رخ زبری مناسب بر روی سطح، سبب افزایش مراکز جوانه زنی بلورهای فسفات در مقایسه با آماده سازی سطح به وسیله سنباده زنی شده و در نتیجه، پوششی ریزدانه و متراکم تر بدست آمد. نتایج آزمون های خوردگی نظیر پلاریزاسیون، طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) و آزمون پاشش نمک نیز نشان دادند که پوشش های متراکم و ریزدانه تر، سبب افزایش خواص حفاظتی شدند. همچنین، بررسی کیفیت چسبندگی رنگ در دو حالت تر و خشک برای دو نوع رنگ هوا خشک (سیستم اپوکسی- پلی یورتان) و هم چنین، رنگ کوره ای (آلکید- ملامین (سری YS))، نشان داد که تغییر بافت سطحی فلز پایه و ساختار پوشش فسفات، چسبندگی رنگ را به گونه ای چشمگیر تحت تاثیر قرار می دهند. بدین صورت که آماده سازی سطح به وسیله عملیات ساچمه پاشی به دلیل ایجاد زبری زیاد بر روی سطح، سبب آسیب رساندن به لایه رنگ اعمالی در مراحل بعدی پوشش دهی توسط رنگ شد، اما در مقابل، فعال سازی سطح توسط عملیات مکانیکی ماسه پاشی، سبب ایجاد اتصال قوی بین زیرلایه و رنگ گردید. پوشش فسفات نیز به ایجاد اتصال قوی بین لایه رنگ و زیرلایه کمک کرده و با کاهش اندازه بلورهای فسفات، کیفیت چسبندگی بهبودی بیش تر یافت.

**واژه های کلیدی:** فولاد کربنی، پوشش فسفات روی، فعال سازی مکانیکی سطح، پوشش ریزدانه، مقاومت به خوردگی، چسبندگی رنگ.

۱- کارشناس ارشد مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه صنعتی سهند.  
 ۲- دانشیار دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه صنعتی سهند.  
 \* - نویسنده مسئول مقاله: I\_fathyunes@yahoo.com

## پیشگفتار

روش‌های گوناگونی برای حفاظت از فلزات وجود دارد. عملیات پوشش‌دهی تبدیلی در مقایسه با تمام این روش‌ها ارزان‌تر، ساده‌تر و با سرعت اعمال بالاتر است. بنابراین، این عملیات به گونه گسترده‌ای در صنایع خودروسازی، رنگ، پتروشیمی، هوافضا، نظامی و غیره به عنوان یک مرحله آماده‌سازی بر روی سطوح فلزات آهنی و غیر آهنی اعمال می‌شود [۳-۱]. در این پوشش‌ها بخشی از فلز پایه به یکی از اجزای تشکیل‌دهنده فیلم حفاظتی با مقاومت به خوردگی بالاتر نسبت به فلز پایه تبدیل می‌شود [۴].

در اوایل، پوشش‌های تبدیلی بر پایه یون‌های کرومات بودند، ولی استفاده از محلول‌های شامل کرومات به دلیل سمیت بالا و سرطان‌زا بودن کروم شش ظرفیتی موجود در حمام محدود شد و از این رو، مطالعه‌ها برای حذف کرومات و جایگزینی پوشش‌های تبدیلی دیگر سازگارتر با محیط زیست توسعه یافت [۶ و ۵].

یک جایگزین مناسب، پوشش‌های فسفات‌دهنده بودند. نخستین ثبت اختراع در ارتباط با این پوشش‌ها، برای جلوگیری از زنگ زدن آهن و فولاد در سال ۱۸۶۹ به شخصی به نام راس<sup>۱</sup> از بریتانیا تعلق گرفت. در روش مورد استفاده به وسیله او، قطعات داغ آهنی برای جلوگیری از زنگ زدن در اسید فسفریک غوطه‌ور می‌شدند و پس از آن پیشرفت‌های زیادی در زمینه فسفات‌کاری رخ داد [۴].

پوشش‌های فسفات‌دهنده دارای ساختاری متخلخل و زیگزاگی هستند که در مقایسه با پوشش‌های کرومات با ساختار آمورف، چسبندگی رنگ بهتری ارائه می‌دهند [۵]. لایه غیر آلی تشکیل شده در طول عملیات فسفات‌کاری، دارای پیوند قوی به سطح فلز پایه بوده و قدرت جذب بالاتری نسبت به آن دارد. در نتیجه، به عنوان یک حامل روان‌ساز و یک پایه چسبنده مناسب برای فیلم‌های پلیمری عمل کرده و نیز به دلیل خواص عایق بودن مانع از تنزل پیوند به وسیله خوردگی زیر فیلم، ناشی از نفوذ اکسیژن سرتاسر پوشش رنگ می‌شود [۷].

از سوی دیگر، تبدیل شدن سطح فلز به پوشش فسفات‌دهنده حل ناشدنی، یک سد فیزیکی در مقابل نفوذ

محیط خورنده و رطوبت ایجاد می‌کند. درجه حفاظت از خوردگی که پوشش‌های فسفات‌دهنده تامین می‌کنند نیز به یک‌نواختی، ضخامت و چگالی پوشش، اندازه بلورها و نوع آب‌بندی نهایی بستگی دارد [۴].

مقاله‌های متعدد گزارش کرده‌اند که پوشش با ساختار ریزدانه و متراکم‌تر، دارای عیوب کم‌تری هست و با مسدود کردن مسیرهای مستقیم برقراری تماس بین زیرلایه و محیط، می‌تواند سبب کاهش خوردگی شود [۸ و ۹].

از سوی دیگر، برخی تغییرات در شرایط اعمال پوشش فسفات‌دهنده نظیر دما و زمان عملیات، غلظت اجزای موجود در حمام، ساختار و ترکیب شیمیایی فلز پایه، پیش‌عملیات محلول با میدان‌های مغناطیسی، پرتو افکنی آلتراسونیک و روش‌های آماده‌سازی سطح می‌توانند سبب ایجاد تغییراتی در ساختار، ضخامت، ترکیب شیمیایی، خواص حفاظتی پوشش و چسبندگی رنگ شوند [۱۰-۱۶].

در این مقاله به بررسی تاثیر روش‌های گوناگون فعال‌سازی مکانیکی سطح از قبیل سنباده‌زنی با ورق سنباده شماره ۱۸۰، ساچمه‌پاشی<sup>۲</sup> و ماسه‌پاشی<sup>۳</sup> بر روی ساختار پوشش حاصله پرداخته شد. هم‌چنین، در ادامه نیز، تاثیر روش‌های مکانیکی گوناگون آماده‌سازی سطح، روی خواص حفاظتی پوشش فسفات‌دهنده اعمالی و بهبود کیفیت چسبندگی رنگ، بررسی شد.

## روش آزمایش

### مراحل اعمال پوشش

در این مطالعه زیرلایه‌هایی از جنس فولاد ساده کربنی St ۳۷ با ابعاد ۵۰×۴۰×۲ میلی‌متر استفاده شدند. ابتدا آماده‌سازی مکانیکی سطح بمنظور حذف مواد خارجی و لایه‌های زنگ از سطح به سه روش مکانیکی گوناگون سنباده‌زنی با ورق سنباده شماره ۱۸۰، ماسه‌پاشی نمونه‌ها به وسیله ماسه‌های سیلیس با محدوده اندازه ذرات ۱۰ تا ۱۸۰ میکرومتر و ساچمه‌پاشی به وسیله ساچمه‌های فولادی با سختی ۴۰ تا ۴۵ راکول C و دانه‌بندی گزارش شده در جدول ۱، به مدت ۱۰ دقیقه انجام گرفت به

2 - Shot blast

3 - Sand blast

1 - Ross

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به EDX مدل Cam Scan MV2300 انجام شد.

اندازه‌گیری ضخامت پوشش نهایی فسفات و رنگ نیز به وسیله ضخامت‌سنج رنگ و پوشش مدل surfix® ساخت کمپانی Phynix آلمان انجام گرفت. محدوده اندازه‌گیری ضخامت به وسیله این دستگاه، ۰-۱۰۰ میلی‌متر و دقت آن  $\pm 0.1$  میکرومتر است. در این مطالعه، ضخامت در دوازده نقطه متفاوت سطح نمونه اندازه‌گیری شده و میانگین آن‌ها به عنوان ضخامت نهایی گزارش شد.

### مطالعه خواص حفاظتی پوشش

#### آزمون پاشش نمک

این آزمون بر اساس استاندارد ASTM B117، انجام شد. پیش از انجام آزمون، نمونه‌ها بمنظور افزایش مقاومت به خوردگی و قدرت جذب پوشش، در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۴۵ دقیقه مورد عملیات حرارتی قرار گرفتند و سپس در پی آن، عملیات تکمیلی با غوطه‌وری نمونه‌ها به مدت یک دقیقه درون روغن با چگالی  $885 \text{ kg/m}^3$  (در دمای محیط) انجام گرفت تا خواص عایق بودن پوشش افزایش یابد. دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد نیز با توجه به عملیات حرارتی نمونه‌های پوشش‌دهی شده در دماهای گوناگون و انجام آزمون پلاریزاسیون، بمنظور انتخاب دمای مناسب عملیات حرارتی جهت دستیابی به بالاترین خواص حفاظتی برای پوشش، تعیین شد.

#### آزمون پلاریزاسیون

آزمون پلاریزاسیون برای نمونه‌هایی با سطح مقطع ۱۰۰ میلی‌متر مربع در تماس با محلول  $\text{NaCl}$  ۳/۵٪، در شرایط گالوانواستات با استفاده از دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات BEHPAJOOH انجام گرفت. بمنظور انجام این آزمون، نمونه‌ها پس از پایدار سازی پتانسیل به مدت زمان ۲۰ دقیقه در محلول ذکر شده با دمای محیط، از پتانسیل مدار باز (OCP)<sup>۱</sup> در

گونه‌ای که بر اساس استاندارد ISO S501-1، درجه تمیزی سطح 2 A Sa 1/2 تعیین شد [۱۷].

گفتنی است که سطح نمونه‌ها پس از ماسه‌پاشی، به کمک هوای فشرده و برس سیمی از گرد و غبار و ذرات سیلیس باقی مانده تمیز شدند زیرا بقایای سیلیس و گرد و غبار روی سطح، چسبندگی پوشش و رنگ اعمالی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. از سوی دیگر، سطوح ماسه‌پاشی شده، فعال و مستعد خوردگی هستند. بنابراین، چنانچه این سطوح برای دراز مدت در معرض هوا و رطوبت قرار بگیرند، اثر مفید آن عملیات از بین رفته و سطح دوباره آلوده می‌شود [۴]. پس باید بلافاصله عملیات پوشش‌دهی یا اعمال رنگ بر روی آن‌ها انجام شود.

در مرحله بعدی عملیات آماده‌سازی سطح، چربی‌زدایی نمونه‌ها در محلول  $\text{NaOH}$  ۱۰٪ با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت زمان ۱۰ دقیقه انجام گرفت. در نهایت، نمونه‌ها توسط آب مقطر شستشو داده شده و به مدت زمان ۳ دقیقه به وسیله محلول استون با دمای محیط در داخل دستگاه آلتراسونیک تمیز شدند. برای اسیدشویی نمونه‌ها نیز از محلول حاوی اسید سولفوریک و اسید هیدروفلوریک با نسبت حجمی ذکر شده در جدول ۲، طی دو مرحله جداگانه برای پوسته‌زدایی و ماسه‌زدایی (در مورد سطوح ماسه‌پاشی شده) استفاده شد. پس از هر مرحله نیز نمونه‌ها دو مرتبه آب‌کشی شده و در انتها در هوای گرم خشک شدند تا سطحی تمیز و عاری از هر گونه آلودگی و ذرات اکسیدی بدست آید. سپس نمونه‌ها در یک محلول فسفات با ترکیب ۱۰ گرم بر لیتر  $\text{ZnO}$ ؛ ۲ گرم بر لیتر  $\text{NaNO}_3$  ۶۵٪؛ ۱۵ میلی‌لیتر  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ۸۵٪ و ۴/۲ میلی‌لیتر  $\text{HNO}_3$ ، با اسیدیته کل و آزاد به ترتیب ۲۱ و ۸/۴، به مدت زمان ۱۵ دقیقه غوطه‌ور شدند. اندازه‌گیری عدد اسیدیته کل و آزاد به روش تیتراسیون که در مراجع [۲۱-۱۸] به آن اشاره شده، انجام گرفت. دمای حمام فسفات‌کاری نیز حدود ۶۰ الی ۶۵ درجه سانتی‌گراد بود.

### مطالعه ساختار پوشش و ضخامت رنگ و پوشش

مقایسه بین ساختار پوشش‌های اعمالی روی سطوح آماده‌سازی شده به روش‌های گوناگون مکانیکی، به وسیله

<sup>۱</sup> -Open circuit potential

آزمون طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی در این تحقیق برای انجام آزمون طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی<sup>۱</sup> (EIS)، از دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات مدل EG & model parstate 2263 استفاده شد. این آزمون با دامنه پتانسیل اعمالی ۱۰ mV نسبت به پتانسیل مدار باز، در محدوده‌ی فرکانس ۰/۰۱ هرتز الی ۱۰ کیلوهرتز توسط نرم افزار power souit در محلول NaCl ۳/۵٪ انجام شد. سپس از نرم افزار Zview برای تحلیل داده‌های امپدانس و ارائه‌ی مدار معادل مناسب استفاده شد.

### مطالعه چسبندگی رنگ مشخصات رنگ هوا خشک

این رنگ که از نوع ترموست است، در دو مرحله آستری و رنگ رویه بر روی نمونه‌ها اعمال شد. لازم به ذکر است که قبل از اعمال رنگ، نمونه‌ها به مدت زمان ۴۵ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد برای آبزدایی و افزایش قدرت جذب پوشش، حرارت داده شدند. سپس آستر اپوکسی پلی آمید که از نوع پایه حلال و بر پایه رزین‌های اپوکسی شامل بیسفنل A و سخت‌کننده پلی‌امینو آمید است، با ضخامت خشک (DFT) ۲ μm ± ۰.۴۵، بر روی سطح اعمال شد. با افزایش بیشتر ضخامت، به علت ایجاد مشکل در خروج حلال از سطح رنگ در طول خشک کردن، ممکن است محبوس شدن حلال رخ دهد. رنگ رویه انتخاب شده نیز بر پایه سیستم پلی‌یورتان بود که از آن جهت تعمیر رنگ بدنه خودرو استفاده می‌شود. این رنگ دو جزئی، بر پایه پلی اول‌های اکریلیک- هیدروکسی اکریلیک و پلی ایزوسیانات‌های آلیفاتیک است که با ضخامت خشک ۳.۵ ± ۰.۳۵ μm بر روی نمونه‌ها اعمال شد.

### ویژگی‌های رنگ کوره‌ای (ترموست)

در این مطالعه، رنگ کوره‌ای از نوع آلکید- ملامین (سری YS) استفاده شد. این رنگ گرما سخت بوده و بر پایه رزین‌های آلکیدی مخصوص و رزین‌های ملامین

جهت کاندی- آندی با سرعت روبش ۰/۵ میلی‌ولت بر ثانیه در محدوده ولتاژ ±۲۵۰ میلی‌ولت پلاریزه شدند. برای تمامی آزمون‌های خوردگی از یک سل سه الکترودی شامل ورق پلاتین به عنوان الکتروود کمکی با مساحت یک سانتی‌متر مربع، الکتروود KCl اشباع (۴/۷ نرمال) به عنوان الکتروود مرجع و نمونه با مساحت سطحی یک سانتی‌متر مربع به عنوان الکتروود کاری استفاده شد. در این مقاله، برای محاسبه چگالی جریان خوردگی از رابطه اشترن- گری (Stern Geary) (رابطه ۱) استفاده شد [۲۲].

(۱)

$$i_{corr} = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2.3 (\beta_a + \beta_c)}$$

میزان تخلخل پوشش نیز از رابطه ۲ محاسبه شد [۷].

(۲)

$$\phi(\%) = \left( \frac{R_{p,m}}{R_p} \right) \times 10^{-|\Delta E_{corr}| / \beta_a} \times 100$$

در معادله مزبور  $\phi$  میزان تخلخل برحسب درصد،  $R_{p,m}$  مقاومت پلاریزاسیون زیرلایه فولادکربنی برحسب اهم،  $R_p$  مقاومت پلاریزاسیون نمونه بعد از فسفات‌کاری برحسب اهم،  $\Delta E_{corr}$  اختلاف بین پتانسیل خوردگی فلز- پایه پیش و پس از اعمال پوشش، بر حسب ولت و  $\beta_a$  شیب خط تافل آندی نمودار پلاریزاسیون مربوط به فولاد کربنی بر حسب V/decade است.

به کمک قانون فارادی نیز، سرعت خوردگی توسط رابطه ۳ محاسبه شد [۲۲].

(۳)

$$mpy = 0.0457 i_{corr} (mA/m^2)$$

هم‌چنین، برای اندازه‌گیری بازده حفاظت ایجاد شده با اعمال پوشش، از رابطه ۴ استفاده شد [۲۳].

$$(\eta \%) = 1 - \left( \frac{i_{corr}}{i_{corr}^0} \right) \times 100 \quad (۴)$$

1- Electrochemical Impedance Spectroscopy

2- Dry Film Thickness

فرمالدئید، به عنوان رنگ‌های اتومبیلی فرموله شده است که در شرایط موجود در جدول ۱، بر روی نمونه‌ها اعمال شد.

حد سطح، هنگام بکار گیری عملیات، سبب افت کیفیت پوشش بدست آمده، پوششی درشت‌دانه و نایکنواخت و فاقد قدرت پوشش‌دهی مناسب بر روی سطح تشکیل شد.

### آزمون چسبندگی رنگ

در این مطالعه، از آزمون چسبندگی رنگ کراس‌کات<sup>۱</sup> استفاده شد که عموماً برای رنگ‌هایی با ضخامت خشک ۱۲۵ میکرومتر یا کم‌تر کاربرد دارد. این آزمون، چسبندگی رنگ را به صورت کیفی براساس استاندارد ASTM D 3359 از مقیاس ۰ تا ۵ مورد ارزیابی قرار می‌دهد. برای انجام این آزمون از چسب نواری مخصوص حساس به فشار که در بازار با نام پرماسل ۲۹۹<sup>۲</sup> متداول است، استفاده شد [۴].

پیش از انجام آزمون چسبندگی تر نیز، نمونه‌ها پس از گذشت ۷ روز از اعمال رنگ نهایی، به مدت زمان ۲۴۰ ساعت در داخل آب مقطر با دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور شده و سپس میزان چسبندگی رنگ، بر اساس روش ذکر شده برای بررسی کیفیت چسبندگی خشک، تعیین شد [۴].

گفتنی است که آزمون چسبندگی رنگ در هر گروه از نمونه‌ها، دست‌کم روی سه عدد نمونه انجام گرفت و نتایج به صورت میانگین طبقه‌بندی چسبندگی گزارش شد.

### بحث و نتایج

#### مطالعه ساختار پوشش فسفات‌ها

شکل ۱ تغییرات در ساختار لایه فسفات‌ها اعمالی روی سطوح فولاد کربنی آماده‌سازی شده به وسیله روش‌های مکانیکی گوناگون سنباده‌زنی، ساچمه‌پاشی و ماسه‌پاشی را نشان می‌دهد.

با توجه به تصاویر، می‌توان گفت که فعال‌سازی سطح با عملیات ماسه‌پاشی، به دلیل افزایش مراکز فعال جوانه‌زنی بر روی آن، سبب تشکیل پوشش ریزدانه و متراکم‌تری با قدرت پوشش‌دهی بالا در مقایسه با حالتی شد که پرداخت سطح توسط عملیات سنباده‌زنی با سنباده شماره ۱۸۰ انجام گرفته بود، اما در مقابل، زبری بیش از

### مطالعه خواص حفاظتی پوشش فسفات‌ها

#### آزمون پاشش نمک

شکل ۲، وضعیت ظاهری نمونه‌های فسفات‌کاری شده را به همراه فلزپایه بدون پوشش جهت مقایسه، پس از قرارگیری به مدت زمان ۵ روز در محفظه پاشش نمک، نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان دادند، نمونه‌هایی که دارای پوششی با ساختار بلوری ریز و متراکم‌تری بودند، مدت زمان بیش‌تری را در داخل محفظه بدون وجود آثاری از زنگ و محصولات قرمز رنگ خوردگی باقی ماندند زیرا گزارش شده که ابعاد درشت بلورهای فسفات‌ها، سطحی بهینه را برای نگهداری روغن مهیا نمی‌کنند [۲۴]. بنابراین، با کاهش اندازه بلورهای پوشش فسفات‌ها و در نتیجه، افزایش یکنواختی آن، قدرت جذب روغن به وسیله پوشش افزایش پیدا می‌کند و جذب یکنواخت‌تر روغن در تمامی سطح پوشش، خاصیت عایق بودن را ترفیع می‌دهد. در مورد نمونه‌های ساچمه‌پاشی شده نیز به دلیل زبری بیش از حد سطح پس از اعمال پوشش فسفات‌ها، سطح نمونه ناصاف بود. ناصافی سطح به دلیل حضور بلورهای درشت فسفات‌ها و ناصافی ناشی از عملیات ساچمه‌پاشی است که مانع از جذب یکنواخت روغن بر روی سطح می‌شود و در نتیجه، منجر به کاهش مقاومت به خوردگی و افزایش مکان‌های مستعد جهت خوردگی بر روی نمونه می‌شود.

#### آزمون پلاریزاسیون

نتایج آزمون‌های پلاریزاسیون انجام گرفته روی نمونه در محلول NaCl ۳/۵٪، جهت تعیین خواص حفاظتی آن‌ها، در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. همچنین، نتایج محاسبات مربوط به این آزمون در جدول ۴ آورده شده است.

با توجه به نتایج، می‌توان گفت که کاهش اندازه بلورهای فسفات‌ها Zn، در نتیجه پیش آماده‌سازی سطح به وسیله عملیات ماسه‌پاشی، سبب کاهش تخلخل پوشش

<sup>۱</sup> - cross-cut

<sup>۲</sup> - permacel 99

تخلخل و ضخامت، کمترین بازده حفاظتی را حاصل کرده است، این مطلب را تایید می کند.

### آزمون طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی

نمودارهای نایکوئیست ناشی از آزمون امپدانس برای نمونه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، دیاگرام پیش و پس از اعمال پوشش، از یک حلقه ساده خازنی تشکیل شده است. بنابراین، مکانیزم خوردگی فولاد با اعمال پوشش تغییر نکرده و تنها مقادیر پارامترهای الکتروشیمیایی افزایش یافته است که به علت ماهیت غیر فلزی نمونه پوشش دهی شده است.

در این مطالعه، با توجه به شکل دیاگرام نایکوئیست و منابع گوناگون [۳۱ و ۳۰، ۲۸، ۸]، مدار معادل ساده  $R_s(CPE[R_p])$  (شکل ۵)، توسط نرم افزار Zview جهت انطباق با داده‌های تجربی آزمون امپدانس برای فلز پایه و پوشش فسفات پش بینی شد. در مدار پیشنهادی، با در نظر گرفتن این مورد که یکی از مهم ترین مشخصه های فصل مشترک سیستم های الکتروشیمیایی، لایه دوگانه الکتریکی است و از آن جا که در فرایندهای خوردگی، عمده تحلیل روی فصل مشترک الکتروود و محیط اطرافش انجام می شود، بنابراین، رفتار این لایه به وسیله یک خازن شبیه سازی شده است و ظرفیت آن به ظرفیت لایه دوگانه ای که در واقع دارای دو صفحه با آرایشی از بارهای مخالف است، ارتباط داده می شود. دی الکتریک این خازن، متأثر از محیط اطراف خود است. بدین معنی که تغییر محیط، موجب تغییر ثابت دی الکتریک لایه دوگانه و تغییر ظرفیت آن می شود. از سوی دیگر، برای این سیستم یک مقاومت به خوردگی (مقاومت به انتقال بار) نیز در نظر گرفته شده است که در مدار معادل با عنوان  $R_p$  از آن یاد شده است. همچنین،  $R_s$  نیز مقاومت جبران نشده الکتروولیت است که به محل قرار گرفتن الکتروود مرجع و کاری وابسته است.

با توجه به مدار معادل پیشنهادی و قوانین کریشهف، می توان مقادیر پارامترهای الکتروشیمیایی را بدست آورد. از سوی دیگر، گزارش شده است که به دلیل زبری های میکروسکوپی و ناهمگنی های سطحی، توزیع نایکنواختی از جریان وجود دارد. بنابراین، به دلیل این که میزان زبری

می شود. در مقاله های [۲۷-۲۵] نیز به این مطلب اشاره شده که کاهش اندازه بلورها، سبب کاهش تخلخل می شود و نتایج حاصله این مطلب را تایید می کند.

همچنین، مشاهده می شود که با کاهش تخلخل پوشش، مقاومت به خوردگی بهبود می یابد زیرا مقاومت به خوردگی نسبت مستقیم با مقاومت پلاریزاسیون و نسبت عکس با چگالی جریان خوردگی دارد [۲۸]. بنابراین، چنانچه نتایج نشان می دهد و در منابع نیز به آن اشاره شده، رابطه ای بین مقدار پوشش فسفات تشکیل شده و مقاومت به خوردگی آن وجود ندارد و افزایش وزن پوشش معیاری برای ازدیاد مقاومت به خوردگی آن نیست [۲۱]. بنابراین، صرفاً به دلیل این که وزن پوشش های تشکیل شده بر روی نمونه های ساچمه پاشی شده (در حدود ۴۴ گرم بر مترمربع)، نسبت به وزن پوشش اعمالی بر روی نمونه های ماسه پاشی شده (در حدود ۲۳/۲۵ گرم بر مترمربع) و یا سنباده زنی شده (در حدود ۳۸ گرم بر مترمربع)، بالا است، نمی توان نتیجه گرفت که خواص حفاظتی بهتری دارد زیرا، درجه حفاظت از خوردگی که پوشش های فسفات تامین می کنند به یکنواختی پوشش، ضخامت و چگالی پوشش بستگی دارد [۲۴ و ۴]. بنابراین، پوشش حاصله روی نمونه ماسه پاشی شده که دارای بالاترین چگالی فازی است، (۲/۰۹۴ گرم بر سانتی متر مربع) در مقایسه با پوشش اعمالی بر روی سطوح سنباده زنی شده (با چگالی فازی ۱/۸۷۴ گرم بر سانتی مترمربع) و پوشش اعمالی بر روی سطوح ساچمه پاشی شده با (دانسیته فازی ۱/۷۱۸ گرم بر سانتی متر مربع)، دارای بالاترین خواص حفاظتی است [۱۷].

از سوی دیگر، پوشش های فسفات با مقادیر وزن پوشش و ضخامت بالا، دارای میکروترک های زیادی با طول بزرگ تر در سرتاسر پوشش هستند [۲۹]. این میکروترک ها که در نتیجه، حضور تنش های کششی ناشی از ضخامت بالای پوشش ظاهر می شوند [۳۰]، منجر به کاهش رفتار حفاظتی می شوند زیرا این ترک ها و تخلخل های موجود در پوشش، سبب تشکیل مسیرهای برقراری ارتباط بین فلز پایه و محیط خورنده می شوند [۳۱] و ۸. نتایج حاصله نیز در ارتباط با این که پوشش اعمالی بر روی سطح ساچمه پاشی شده، با بیشترین درصد

کاهش تخلخل پوشش، مقاومت لایه ایجاد شده بر روی سطح،  $R_i$  همزمان با کاهش  $C_i$  افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، کاهش انتقال بار در سطح فولاد به همراه کاهش مناطق فعال مستعد برای خوردگی، در نتیجه تشکیل لایه فسفات متراکم‌تر و با تخلخل پایین‌تر، رخ می‌دهد. بنابراین، لایه فسفات متراکم تشکیل شده بر روی سطح فعال‌سازی شده به وسیله عملیات ماسه‌پاشی، بالاترین خواص حفاظتی را نشان داد که این نتایج در تایید نتایج حاصل از آزمون پاشش نمک و پلاریزاسیون است. از سوی دیگر، گزارش شده، یکی از عامل‌های مهمی که در زبری و ضخامت پوشش‌های فسفات تاثیر می‌گذارند، تعداد بلورهای فسفات است [۳۵]. نتایج ارایه شده در جدول ۵ نیز، افزایش در مقادیر  $n$  را در نتیجه کاهش زبری سطح، به دلیل کاهش اندازه بلورهای فسفات و افزایش تعداد آن‌ها، نشان می‌دهد که مطلب بالا را تایید می‌کند.

#### مطالعه مربوط به چسبندگی رنگ

مقادیر ضخامت پوشش و رنگ هوا خشک اعمالی (آستر + رنگ روبه)، در جدول ۶ آورده شده است. همچنین، تصویر مقطع عرضی یک نمونه پس از اعمال پوشش، لایه آستر اپوکسی و لایه رنگ نهایی پلی‌یورتان، در شکل ۶ نشان داده شده است. در این تصویر، لایه‌های پوشش و رنگ اعمالی به روشنی قابل مشاهده است.

با توجه به نتایج آزمون چسبندگی رنگ (جدول ۷)، می‌توان گفت که در مورد فلز پایه سنباده‌زنی شده، به دلیل حضور یک سطح صاف و دارای پستی و بلندی کم، کیفیت چسبندگی رنگ بر روی آن مناسب نیست. البته، باید به این نکته نیز توجه کرد که نوع رنگ اعمالی، ضخامت رنگ و تمیزی سطح اولیه بر روی چسبندگی رنگ تاثیر می‌گذارند. از سوی دیگر، بررسی‌ها نشان داد که عملیاتی مانند ساچمه‌پاشی به دلیل افزایش زیاد زبری سطح، سبب آسیب رساندن به لایه‌های رنگ شده و در نتیجه، کیفیت چسبندگی رنگ تنزل یافت. در این حالت، به دلیل زبری زیاد سطح، عیب پوست پرتغالی شدن<sup>۱</sup> روی رنگ ظاهر شد، اما انجام عملیات پرداخت سطحی به وسیله

سطح در این مطالعه قابل ملاحظه است، جهت انطباق بهتر قسمت ظرفیتی مدار با داده‌های تجربی، از یک عنصر فاز ثابت در مدار معادل به جای خازن استفاده می‌شود که ترکیبی از یک خازن خالص و یک مقاومت است. در این شرایط، اگر عامل انحراف خازن از رفتار ایده‌آل ظرفیتی را  $n$  فرض کنیم، آن‌گاه در حالت عادی مقدار  $n$  بین ۰/۹ تا ۱ است و اگر سطح به شدت نایکنواخت باشد، مسلماً مقدار  $n$  کوچک‌تر خواهد بود [۳۴ و ۷].

$$\text{سطح واقعی / سطح ظاهری} = n \quad (۵)$$

در چنین شرایطی، امپدانس عنصر فاز ثابت با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود [۲۲، ۲۵ و ۳۵]:

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Y_0 (j\omega)^n} \quad (۶)$$

در رابطه بالا، مقادیر  $Y_0$  (ادمیتانس) و  $n$ ، مستقل از فرکانس هستند. ادمیتانس نیز همان عکس امپدانس است که مقدار آن از راه رابطه ۷ محاسبه می‌شود [۳۴]:

$$Y_0 = \tau_i^n / R_i \quad (۷)$$

در این رابطه،  $\tau$ ، ثابت زمانی است که به صورت معادله ۸ تعریف می‌شود.

$$\tau_i = C_i R_i$$

ظرفیت خازنی نیز با استفاده از رابطه ۹ قابل محاسبه است [۲۲ و ۳۴]:

$$C_i = [Y_0 R_i^{1-n}]^{\frac{1}{n}} \quad (۹)$$

تمامی محاسبات ذکر شده در این مطالعه، با برازش داده‌های تجربی امپدانس با مدار معادل پیشنهادی، به وسیله نرم افزار Zview انجام شد و نتایج حاصله با خطای کم‌تر از ۵ درصد در جدول ۵ گزارش شدند. با توجه به یافته‌های قبلی در مورد ویژگی‌های پوشش اعمالی بر روی سطوح آماده‌سازی شده به روش‌های مکانیکی گوناگون و نیز نتایج آزمون امپدانس، می‌توان گفت که با کاهش اندازه بلورهای فسفات، افزایش یک‌نواختی و چگالی ظاهری پوشش فسفات و در نتیجه

۱- حالتی مشابه بافت پوست پرتغال است که به شکل ناهموار و غیر یکنواخت بر روی سطح رنگ تشکیل می‌شود.

زیرفیلم، چسبندگی رنگ کاهش یافت به گونه‌ای که در مورد تمام نمونه‌های بدون پوشش، کندگی بدتر از درجه رنگ از زیرپایه مشاهده شد.

یک راه کار عملی جهت کاهش فعالیت سطح در فصل مشترک فلزپایه-رنگ، اعمال پوشش فسفات‌ه روی آن است که به صورت مانع فیزیکی در مقابل رطوبت عمل کرده، مانع از خرابی و کاهش پیوند به وسیله خوردگی زیر فیلم می‌شود [۷]. بنابراین، بررسی‌ها نشان داد که در مورد نمونه‌های فسفات‌ه کاری شده، خوردگی زیر فیلم رنگ و در نتیجه تاول زدگی رنگ کاهش پیدا کرد. همچنین، با کاهش اندازه بلورهای پوشش فسفات‌ه و افزایش یک‌نواختی پوشش، خوردگی زیر فیلم، کاهش بیش‌تری پیدا کرد و در نتیجه چسبندگی رنگ بهبود یافت.

هم‌چنین، مشاهده می‌شود که نتایج بدست آمده از بررسی کیفیت چسبندگی رنگ کوره‌ای نیز در تایید نتایج مطالعات انجام گرفته روی رنگ هوا خشک است. به گونه‌ای که با اعمال پوشش ریزدانه و متراکم‌تر، کیفیت چسبندگی بهبود یافت. افزون بر این، بررسی‌ها نشان داد که رنگ کوره‌ای نسبت به رنگ هوا خشک از کیفیت چسبندگی بالاتری برخوردار است.

### نتیجه‌گیری

مطالعات نشان داد که روش‌های گوناگون آماده سازی مکانیکی سطح روی بافت سطحی فلزپایه و ویژگی‌های پوشش فسفات‌ه اعمالی تاثیر می‌گذارند. به گونه‌ای که پرداخت سطح با عملیات ساچمه‌پاشی به دلیل ایجاد زبری نامناسب و بیش از حد روی سطح، سبب تشکیل پوشش فسفات‌ه Zn درشت‌دانه و با کیفیت پایین شد، اما در مقابل، عملیات ماسه‌پاشی در مقایسه با عملیات سنباده‌زنی و ساچمه‌پاشی، به دلیل ایجاد زبری مناسب و افزایش مکان‌های فعال برای جوانه‌زنی بلورهای فسفات‌ه بر روی سطح، سبب کاهش چشمگیر ابعاد بلورهای فسفات‌ه و تراکم بالای پوشش حاصله شد.

نتایج آزمون‌های خوردگی نظیر پاشش نمک، پلاریزاسیون و طیف‌نگار امیدانسی الکتروشیمیایی نیز نشان دادند که پوشش‌های متراکم و دارای تخلخل پایین تشکیل شده بر روی سطوح ماسه‌پاشی شده به دلیل

ماسه‌پاشی، به دلیل افزایش پستی، بلندی و تحمیل زبری مناسب بر روی سطح، سبب اتصال مکانیکی بیش‌تری بین سطح فلزپایه و رنگ شده و در نتیجه، کیفیت چسبندگی بهبود یافت.

هم‌چنین، با توجه به نتایج آزمون و مراجع گوناگون، می‌توان گفت که در مورد نمونه‌های فسفات‌ه کاری شده، به دلیل نفوذ فیلم رنگ در ساختار زیگزاگی شکل پوشش، کیفیت چسبندگی بهبود یافته [۳۶] و با کاهش اندازه بلورهای فسفات‌ه به همراه کاهش در ضخامت پوشش و نیز افزایش یک‌نواختی آن، قدرت چسبندگی افزایش قابل‌توجه‌تری را نشان می‌دهد [۲۷ و ۲۶]. به گونه‌ای که در مورد سطوح ساچمه‌پاشی شده، به علت زبری بالای سطح، حتی پس از اعمال پوشش فسفات‌ه با ضخامت تقریباً زیاد نیز یک سطح صاف و یک‌دست برای اعمال رنگ ایجاد نشد. هم‌چنین، در این مورد، بلورهای خیلی بزرگ و لبه تیز پوشش فسفات‌ه سبب آسیب رساندن به لایه رنگ شدند. بنابراین، پس از اعمال پوشش فسفات‌ه بر روی سطوح ساچمه‌پاشی شده نیز عیب پوست پرتغالی روی رنگ مشاهده شد و بنابراین، به ضخامت بیش‌تری از رنگ نیاز است تا یک سطح صاف و یک دست بدست آید، اما با افزایش ضخامت رنگ، دوباره چسبندگی رنگ کاهش خواهد یافت، ولی در مقابل، نتایج نشان دادند که بمنظور دست‌یابی به یک پوشش یک‌نواخت با بلورهای فسفات‌ه ریز و شمار زیاد بلور در واحد سطح و به تبع آن دست‌یابی به پوشش فسفات‌ه‌ای با قابلیت چسبندگی بالا به رنگ نهایی، پیش آماده‌سازی سطح به وسیله عملیات مکانیکی ماسه‌پاشی مفید است.

برای بررسی کیفیت چسبندگی تر نیز نمونه‌ها پس از ده شبانه روز قرارگیری در آب ۴۵ درجه سانتی‌گراد، مورد مطالعه قرار گرفتند و تاول‌زدگی شدید رنگ روی نمونه‌های فاقد پوشش فسفات‌ه، مشاهده شد که نشان دهنده خوردگی زیر فیلم رنگ به دلیل نفوذ پذیری نسبتاً بالای رنگ انتخابی بود. میزان تاول‌زدگی سطح رنگ اعمالی روی نمونه‌های ماسه‌پاشی شده نیز بیش‌ترین بود زیرا این عملیات، فعالیت شیمیایی سطح فلز را افزایش داده و سبب تسریع واکنش‌های خوردگی در فصل مشترک رنگ-فلز می‌شوند. بنابراین، با افزایش خوردگی



ساجمه‌پاشی و سنباده‌زنی تشکیل شده بود، سبب آسیب رساندن به لایه رنگ اعمالی و در نتیجه تنزل کیفیت چسبندگی شدند.

از سوی دیگر، بررسی‌ها نشان داد که با اعمال پوشش فسفات‌ها بر روی سطح، به دلیل افزایش خاصیت عایق بودن نمونه، خوردگی زیر فیلم رنگ، پس از قرارگیری نمونه‌ها به مدت زمان ده شبانه روز در آب ۴۵ درجه سانتی‌گراد، کاهش یافت و در نتیجه کیفیت تر بهبود یافت. افزایش تراکم و یک‌نواختی پوشش نیز به دلیل ترفیع خواص حفاظتی، سبب کاهش بیشتری در خوردگی زیر فیلم رنگ و در نتیجه بهبودی قابل توجه‌تر در کیفیت چسبندگی رنگ شد.

مسدود کردن مسیرهای مستقیم برقراری تماس بین فلز پایه و محیط خورنده، نسبت به لایه‌های اعمالی بر روی سطوح آماده‌سازی شده به روش سنباده‌زنی و یا ساجمه‌پاشی شده، سبب افزایش قابل توجهی در رفتار مقاومت به خوردگی شد.

هم‌چنین، نتایج آزمون چسبندگی نشان داد که با اعمال پوشش فسفات‌ها بر روی سطح، کیفیت چسبندگی رنگ افزایش می‌یابد. یکنواختی، تراکم و اندازه بلورهای لایه فسفات‌ها اعمالی نیز بر روی چسبندگی تاثیر می‌گذارند. بدین ترتیب که با تشکیل پوشش ریزدانه و متراکم روی سطح ماسه‌پاشی شده، کیفیت چسبندگی بهبود یافت، اما بلورهای فسفات‌ها با ابعاد درشت نظیر آنچه در پوشش اعمالی بر روی سطوح آماده‌سازی شده به روش

### References

- 1- S. Jegannathana, T.K. Arumugama, T. S. N.Sankara, and K. Ravichandran, "Formation and Characteristics of Zinc Phosphate Coatings Obtained by Electrochemical Treatment: Cathodic Vs. Anodic", *Progress in Organic Coatings*, Vol.65, pp. 229–236, 2009.
- 2- E. P. Banczek, P. R. P.Rodrigues, and I. Costa, "Investigation on the Effect of Benzotriazole on the Phosphating of Carbon Steel", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201 pp.3701–3708, 2006.
- 3- N. L. Yuan, L. Guang-Yu, J. Zhong-Hao, S. Li-Ping, and H. Dong, "Influence of Sodium Metanitrobenzene Sulphonate on Structures and Surface Morphologies of Phosphate Coating on AZ91D", *Trans. Nonferrous Met. SOC. China*, Vol. 16, pp. 567-571, 2006.
- 4- T. S. N.Sankara Narayanan, "Surface pretreatment by Phosphate Conversion Coating- a Review", *National Metallurgy Laboratory, India*, Vol.9, pp. 130-177, 2005.
- 5- L. Y. Niu, Z. H. Jiang, G. Y. Li, C. D. Gu, and J. S. Lian, "A Study and

Application of Zinc Phosphate Coating on AZ91D Magnesium Alloy", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 200, pp. 3021–3026, 2006.

6- A. S. Akhtar, K. C. Wong, P. C. Wong, and K.A.R. Mitchell, "Effect of  $Mn^{2+}$  Additive on the Zinc Phosphating of 2024-Al alloy", *Thin Solid Films*, Vol. 515, pp. 7899–7905, 2007.

7- V. d. Freitas. C. Lins, and G. Francisco, "Electrochemical impedance Spectroscopy and Linear Polarization Applied to Evaluation of Porosity of Phosphate Conversion Coatings on Electrogalvanized Steels", *Applied Surface Science*, Vol. 253, pp. 2875–2884, 2006.

8- M. Manna, "Characterisation of Phosphate Coatings Obtained Using Nitric Acid free Phosphate Solution on Three Steel Substrates: An Option to Simulate TMT Rebars Surfaces", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 203, pp. 1913-1918, 2009.

9- Q. Li, Sh. Xua and J. Hua, "The Effects to the Structure and Electrochemical Behavior of Zinc Phosphate Conversion Coatings with Ethanolamine on

- Magnesium alloy AZ91D”, *Electrochimica Acta*, Vol. 55, pp. 887-894, 2010.
- 10- G.Y. Li, J.S. Lian and L.Y. Niu, “Growth of Zinc Phosphate Coatings on AZ91D Magnesium Alloy”, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 1814-1820, 2006.
- 11- H. Zhang, G. Yao and Sh. Wang, “A Chrome-Free Conversion Coating for Magnesium-Lithium Alloy by a Phosphate-Permanganate Solution”, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 202, 1825-1830, 2008.
- 12- G. Bikulcius, V. Burokas and A. Martusiene, “Effects of Magnetic Fields on the Phosphating Process”, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 172, 139-143, 2003.
- 13- D. Susac, X. Sun and R.Y. Li, “Microstructural Effects on the Initiation of Zinc Phosphate Coatings on 2024-T3 Aluminum Alloy”, *Applied Surface Science*, Vol. 239, pp. 45-59, 2004.
- 14- Z. Shenglin, “Study on Phosphating Treatment of Aluminum, Alloy Role of Yttrium Oxide”, *Journal of Rare Earths*, Vol. 71, 469-480, 2009.
- 15- L. Kouisnia, M. Azzia and F. Dalardb, “Phosphate Coatings on Magnesium Alloy AM60 Part 2: Electrochemical Behaviour in Borate Buffer Solution”, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 192, 239-246, 2005.
- 16- M. Sheng, Ch. Wanga and Q. Zhong, “Ultrasonic Irradiation and Its Application for Improving the Corrosion Resistance of Phosphate Coatings on Aluminum Alloys”, *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 17, 21-25, 2010.
- ۱۷- فتح یونس، ل. آزادبه، م. و حیدری، ف. تاثیر پیش فعال سازی مکانیکی سطح فولاد ساده کربنی بر ساختار پوشش فسفات Zn اعمالی، مجله مواد نوین، جلد ۲، شماره ۴، ص ۱-۱۴، تابستان ۱۳۹۱
- 18- *Metals Handbook*, 9th Ed, vol. 5, pp: 379-404, 1982.
- 19- W. J. Wittke, “Phosphate Coating”, *Metal Finishing*, pp. 576-620, 1980.
- 20- S. Scislowski, “Phosphating, Part II- Total Acid, Free Acid and pH”, *Metal Finishing*, Vol. 84, 35-40, 1991.
- 21- Din-50942, “Phosphating of Metals”, 1987.
- 22- E. E. Stansbury, and R.A. Buchanan, “Fundamentals of Electrochemical Corrosion”, ASM International, pp. 178-180, 2000
- 23- E. P. Banczek, and P. R. P. Rodrigues, “The Effects of Niobium and Nickel on the Corrosion Resistance of the Zinc Phosphate Layers”, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 202, pp. 2008-2014, 2008.
- 24- S. Thomas, “Zinc Phosphate Conversion Coating Composition”, United State Patent, 1985, No. 4498935.
- 25- S. M. Tamborim, D. S. Azambuja, and L. Costa, “Cerium Conversion Layer for Improving the Corrosion Resistance of Phosphated NdFeB Magnets”, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 3670-3675, 2006.
- 26- L. Helmut, “Trivalent Phosphorus Compounds Stabilized with Amines”, United State Patent, 1996, No. 5534645.
- 27- J. William, “Low temperature Microcrystalline Zinc Phosphate Coatings, Compositions, and Processes for Using and Preparing the Same”, United State Patent, 1977, No. 4140551.
- 28- CH. Ying-liang, W. Hai-lan, CH. Zhen-hua, and W. Hui-min, “Phosphating Process of AZ31 Magnesium Alloy and Corrosion Resistance of Coatings”, *Trans. Nonferrous Met. SOCC. Hina*, Vol. 16, 1086-1091, 2006.
- 29- T. Biestek, and j. Weber, “Electrolytic and Chemical Conversion Coatings, A Concise Surrey of Their Production, Properties and Testing” portcullis press ltd., survey, U.K, pp.128-224, 1976.
- 30- G. Bikulcius, A. Rucinskiene, E. Matulionis, and A. Sudavicius, “Influence

of a Static Magnetic Field on the Protective Ability of Chromatic Conversion Coatings on Zinc”, Surface & Coatings Technology, Vol, 187, pp. 388–392, 2004.

31- Q. Li, Sh. Xua, and J. Hua, “The Effects of Structure and Electrochemical Behavior of Zinc Phosphate Conversion Coatings with Ethanolamine on Magnesium alloy AZ91D”, Electrochimica Acta, Vol. 55, pp. 887-894, 2010.

32- G. Song, “Electroless Deposition of a Pre-Film of Electrophoresis Coating and Its Corrosion Resistance on an Mg Alloy”, Electrochimica Acta, Vol. 55, pp. 2258–2268, 2010.

33- L. Feng, SH. Da-Yong, H. En-Hou, and L. Chang-Sheng, “Barium Phosphate Conversion Coating on Die-Cast AZ91D Magnesium Alloy”, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, Vol. 18, 344-348, 2008.

۳۴- احتشام‌زاده، م. "مقدمه‌ای بر کاربرد طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی در مطالعه خوردگی، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۵.

35- M. D. Carattino, “Effects of Long-Term Exposure to  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Cd}^{2+}$  on the Pentose Phosphate”, Ecotoxicology and Environmental Safety, Vol. 57, 311-318, 2004.

36- N. L. Yuan, “Cathodic Phosphate Coating Containing Nano Zinc Particles on Magnesium Alloy”, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, Vol. 18, 365-368, 2008.

## پیوست‌ها

جدول ۱- دانه‌بندی ساچمه‌های فولادی برای انجام عملیات ساچمه‌پاشی

S 780	S 550	S 460	S 390	S 330	S 280	S 230	S 170	S 110	کد ساچمه فولادی
-۲/۸	-۲/۰	۱/۲-۱/۷	۱/۰-۱/۴	-۱/۲	-۱/۰	۰/۶-۰/۸۵	-۰/۷۱	۰/۳-۰/۵	اندازه (mm)
۲/۰	۱/۴			۰/۸۵	۰/۷۱		۰/۴۲		

جدول ۲- ترکیبات حمام اسیدشویی

شرایط کاری	پوسته‌زدایی	ماسه‌زدایی
درصد حجمی اسید سولفوریک ۹۸٪	۷٪	۵٪
درصد حجمی اسید هیدروفلوریک ۴۸٪	۳٪	۵٪
درصد حجمی آب	۹۰٪	۹۰٪
دما (°C)	۲۵٪	۲۵٪
زمان غوطه‌وری (دقیقه)	۳٪	۳٪

جدول ۳- شرایط اعمال رنگ کوره‌ای

دمای کوره گذاری (°C)	زمان توقف در کوره (min)	زمان انتظار قبل از کوره (min)	رنگ ضخامت خشک (μ m)
۱۲۰-۱۳۰	۳۰-۴۰	۱۰-۱۵	۵۰

جدول ۴- پارامترهای الکتروشیمیایی محاسبه شده با توجه به نتایج آزمون پلاریزاسیون

نمونه	$i_{corr} \mu A/cm^2$	نرخ خوردگی mpy	درصد تخلخل	بازده حفاظت
فلز پایه	۶/۰۹۶	۲/۷۸۶	-	-
ساجمه پاشی+فسفات کالی	۲/۹۹۵	۱/۳۶۸	۶/۷۲	۵۰/۸۷٪
سنباده زنی+فسفات کالی	۲/۳۴۶	۱/۰۷۲	۶/۴۴	۶۱/۵۲٪
ماسه پاشی+فسفات کالی	۱/۳۴۷	۰/۶۱۵	۴/۵۱	۷۷/۹۱٪

جدول ۵- مقادیر پارامترهای الکتروشیمیایی محاسبه شده برای مدار معادل پیشنهادی، با توجه به نتایج آزمون امپدانس

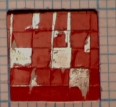
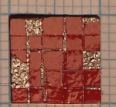
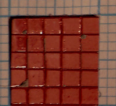
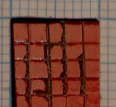
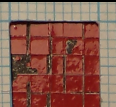
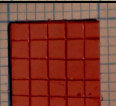
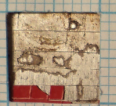
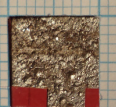
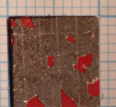
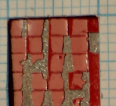
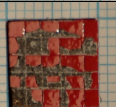
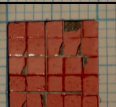
نمونه	$R_s (\Omega \cdot cm^2)$	$R_p (\Omega \cdot Cm^2)$	$Y_0 (\Omega^{-1} s^{-n} cm^{-2})$	$CPE - n$	$C_{dl} (F \cdot cm^{-2})$
فلز پایه	۱۱/۴۸	۶۲۶/۲	۳E-۱/۵۲۶۹	۰/۷۱	۳E-۱/۴۹
ساجمه پاشی + فسفات کالی	۱۸/۴۴	۸۹۸/۷	۴E-۸/۴۰۷	۰/۵۲	۴E-۶/۵۲
سنباده زنی + فسفات کالی	۱۹/۹۸	۱۲۴۹	۴E-۶/۵۸۷	۰/۵۷	۴E-۵/۶۹
ماسه پاشی + فسفات کالی	۱۲/۱۲	۲۸۳۳	۴E-۲/۳۰۲	۰/۶۲	۴E-۱/۷۸

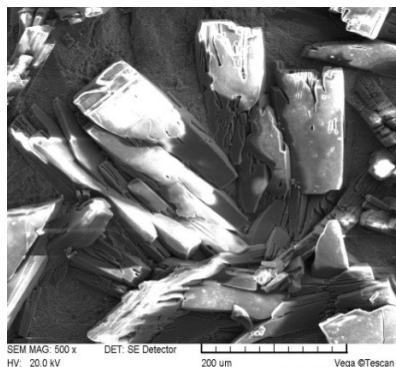
جدول ۶- مقادیر ضخامت پوشش فسفات و لایه رنگ اعمالی بر روی نمونه های آماده سازی شده به روش های مکانیکی

## گوناگون

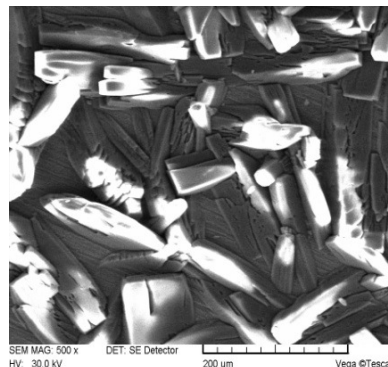
نمونه	ضخامت لایه فسفات ( $\mu m$ )	ضخامت لایه رنگ ( $\mu m$ )
فلز پایه	-	۹۱/۷±۸/۱
ساجمه پاشی شده	-	۱۰۵/۲±۹/۶
ماسه پاشی شده	-	۹۲/۴±۷/۴
سنباده زنی+فسفات کالی	۲۱/۳±۲/۴	۸۹/۶±۶/۷
ساجمه پاشی+فسفات کالی	۲۵/۶±۴/۷	۸۸/۴±۷/۱
ماسه پاشی+فسفات کالی	۱۱/۱±۱/۷	۸۵/۳±۲/۶

جدول ۷- نتایج بدست آمده از آزمون چسبندگی رنگ

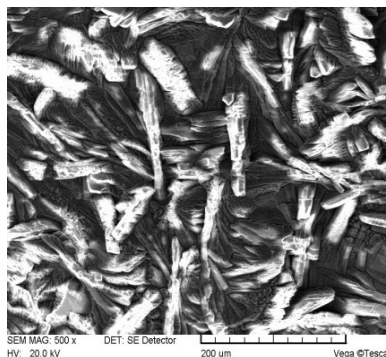
نمونه	عکس قطعه	طبقه بندی سه نمونه	میانگین طبقه بندی	رنگ	رنگ هموار خشک (چسبندگی خشک)
فلز پایه، سنباده زنی شده		۱ و ۲ و ۱	۱B	رنگ گروه این (چسبندگی خشک)	رنگ هموار خشک (چسبندگی خشک)
فلز پایه، ساجمه پاشی شده		۱ و ۱ و ۰	۱B		
فلز پایه، ماسه پاشی شده		۴ و ۳ و ۴	۴B		
سنباده زنی + فسفاتنه کاری		۲ و ۲ و ۲	۲B		
ساجمه پاشی + فسفاتنه کاری		۲ و ۲ و ۲	۲B		
ماسه پاشی + فسفاتنه کاری		۵ و ۵ و ۴	۵B		
فلز پایه، سنباده زنی شده		۰ و ۰ و ۰	۰B	رنگ هموار خشک (چسبندگی تر)	
فلز پایه، ساجمه پاشی شده		۰ و ۰ و ۰	۰B		
فلز پایه، ماسه پاشی شده		۰ و ۰ و ۰	۰B		
سنباده زنی + فسفاتنه کاری		۱ و ۱ و ۱	۱B		
ساجمه پاشی + فسفاتنه کاری		۱ و ۱ و ۱	۱B		
ماسه پاشی + فسفاتنه کاری		۳ و ۲ و ۳	۳B		



(ب) ساچمه پاشی + فسفات کاری



(الف) سنباده زنی + فسفات کاری



(ج) ماسه پاشی + فسفات کاری

شکل ۱- تصاویر SEM از سطح پوشش اعمالی بر روی نمونه های پرداخت سطحی شده به روش های گوناگون مکانیکی



(ب) سنباده زنی + فسفات کاری



(الف) فلز پایه، بدون فسفات کاری



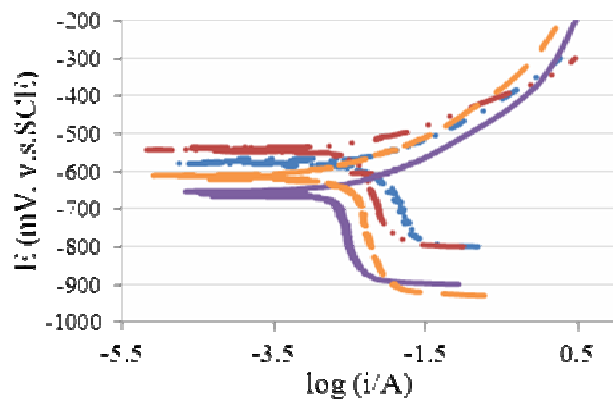
(د) ماسه پاشی + فسفات کاری



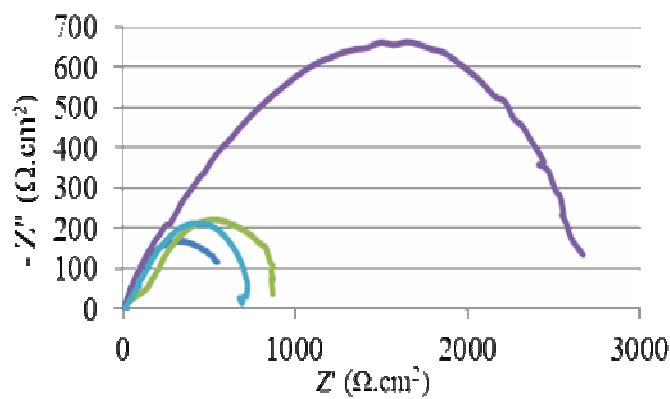
(ج) ساچمه پاشی + فسفات کاری

شکل ۲- وضعیت ظاهری نمونه ها پس از ۵ روز قرارگیری در محفظه

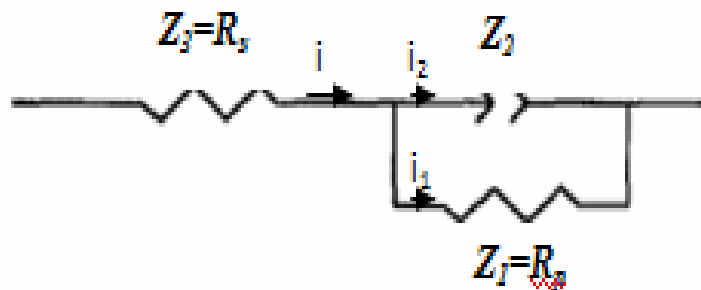
پاشش نمک



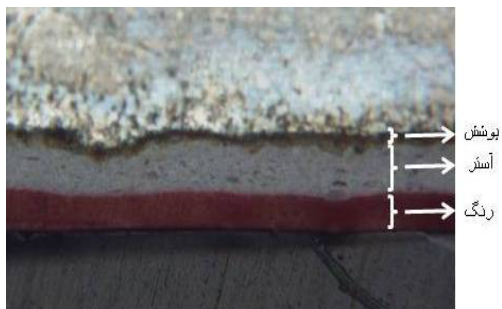
شکل ۳- نمودار پلاریزاسیون نمونه‌ها در محلول NaCl ۰.۲/۰.۵٪  
 - ساجمه پانسی = فرغانه کاری (red dots)  
 - سنباده زمی فرغانه کاری (orange)  
 - فز پایه، بدون فرغانه کاری (blue dots)  
 - ماسه پایی فرغانه کاری (purple)



شکل ۴- نمودارهای نایکوئیست نمونه‌ها در محلول NaCl ۰.۲/۰.۵٪  
 - ساجمه پانسی فرغانه کاری (cyan)  
 - سنباده زمی فرغانه کاری (green)  
 - فز پایه، بدون فرغانه کاری (blue)  
 - ماسه پایی فرغانه کاری (purple)



شکل ۵- مدار معادل رندلز جهت انطباق با نمودارهای نایکوئیست



شکل ۶- تصویر لایه‌های پوشش فسفات، آستر و رنگ روی عملی بر روی زیرلایه فولادی