

# تأثیر سدیم دودسیل سولفات بر ریخت‌شناسی و مقاومت خوردگی پوشش تبدیلی نانوزیر کونیایی روی ورق فولاد گالوانیزه

علی پیامی گلپین<sup>۱</sup>، رضا اسلامی فارسانی<sup>۲\*</sup>، حمید خرسند<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲ و ۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

\*eslami@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۵/۲۶، تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۹/۱۱)

## چکیده

محلول‌های تبدیلی مبتنی بر هگزافلئوروزیر کونیک اسید ( $H_2ZrF_6$ ) به عنوان ترکیباتی نوین و دوست‌دار محیط زیست برای جایگزین کردن فرآیندهای زیانبار فسفات‌محیط شده‌اند. اصلاح ترکیب این مواد با نانوذرات، یون‌ها و ترکیبات شیمیایی گوناگون به تازگی در حال گسترش است. در این پژوهش، تأثیر مقادیر مختلف سدیم دودسیل سولفات (SDS) بر ریخت‌شناسی و مقاومت به خوردگی این پوشش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد که برخلاف تأثیر مثبت SDS بر کیفیت پوشش‌های فسفات‌محیط، این افزودنی دارای تأثیر منفی در تشکیل پوشش نانوزیر کونیایی بر سطوح گالوانیزه است. همچنین نتایج آزمون‌های مه‌نمکی و پلاریزاسیون نیز افت خواص ضد خوردگی پوشش در حضور SDS را تأیید کرد.

## واژه‌های کلیدی:

پوشش نانوزیر کونیا، فولاد گالوانیزه، سدیم دودسیل سولفات، مقاومت به خوردگی.

## ۱- مقدمه

زیادتی به پارامترهای شیمیایی و متالورژیکی دارد و در شرایط معمول روشی پرهزینه و زمان‌بر است [۳]. استفاده از افزودنی‌هایی همچون شتاب‌دهنده آنیونی سدیم دودسیل سولفات (SDS) در حمام فسفات‌محیط تا حدود زیادی باعث کاهش مصرف انرژی، افزایش کیفیت و سرعت پوشش‌دهی در حمام می‌شود. زیرا این ترکیب با کاهش انرژی سطحی باعث می‌شود که حباب‌های هیدروژن راحت‌تر از سطح کاتد جدا شوند و در نتیجه، احتمال ایجاد حفره روی سطح پوشش کاهش

روش‌های پیشگیری از خوردگی بسیار متنوع هستند، ولی اصلاح سطح فلز به وسیله تشکیل یک سد فیزیکی بر روی آن نسبت به سایر موارد رواج بیشتری دارد. از روش‌های مرسوم در این زمینه می‌توان به استفاده از پوشش‌های تبدیلی به همراه اعمال لایه رنگ بعدی اشاره کرد [۱].

پوشش‌های فسفات‌محیط به عنوان یک پوشش تبدیلی مهم، به صورت گسترده در صنایع خودروسازی، هوافضا و نظامی بکار می‌روند [۲]. با وجود کاربردهای گسترده، فرایند فسفات‌محیط کاری حساسیت

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

در این مطالعه، زیرلایه‌ای از جنس فولاد گالوانیزه (با کد تجاری dx54d)، مورد استفاده در بدنه خودرو، بکار گرفته شد. نمونه - های مورد نظر به ابعاد  $1 \times 30 \times 30$  میلیمتر مکعب و از میان ورق - های دریافتی در شرکت ایران خودرو برش داده شدند. ضخامت پوشش گالوانیزه در اندازه‌گیری‌های صورت گرفته توسط دستگاه ضخامت‌سنج الکو متر<sup>۱</sup>،  $13 \pm 1$  میکرومتر بدست آمد. ترکیب شیمیایی فولاد گالوانیزه شده در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد گالوانیزه.

عناصر	Ti	S	P	Mn	Si	C	Fe
درصد وزنی	۰/۳۰	۰/۰۴۵	۰/۱۰	۰/۶۰	۰/۵	۰/۱۲	باقیمانده

نمونه‌های برش داده شده پس از سمباده‌کاری لبه‌ها، درون محلول قلیایی شامل ترکیبی از ۱۰ درصد وزنی سود سوزآور و ۲۰ درصد وزنی سولفونیک اسید (شرکت کیمیا - ترکیه)، به مدت ۲ دقیقه در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد چربی زدایی شدند. سپس نمونه‌ها دو بار پی‌آپی در آب دیونیزه شستشو داده شده و توسط هوای گرم فشرده خشک شدند. چنانچه این سطوح برای مدت طولانی در معرض هوا و رطوبت قرار بگیرند، اثر مفید عملیات آماده‌سازی از بین رفته و سطح دوباره آلوده می‌شود. به همین سبب بلافاصله بعد از تمیزکاری، عملیات پوشش‌دهی بر روی نمونه‌ها انجام شد. شرایط پوشش‌دهی نمونه‌ها مطابق با جدول ۲ در نظر گرفته شد.

ترکیب شیمیایی حمام پوشش‌دهی شامل محلول ۴ درصد وزنی هگزافلئوروزیرکونیک اسید حاوی نانوذرات زیرکونیایی (شرکت هنکل - آلمان)، نمک سدیم دودسیل سولفات (شرکت مرک - آلمان)، آمونیوم کربنات (شرکت پانراک - اسپانیا) و استیک اسید (شرکت مرک - آلمان) به عنوان تنظیم‌کننده‌های pH بودند. ساختار نمک سدیم دودسیل سولفات در شکل ۱ نشان داده شده است. این مولکول‌ها دارای گروهی قطبی در

یابد [۴]. با این حال به دلیل مسایل زیست محیطی ناشی از تولید لجن، حضور یون‌های سمی و استفاده از سوخت‌های فسیلی به منظور تامین انرژی حرارتی، قوانین جدیدی در راستای حذف و جایگزینی پوشش‌های فسفات‌ها وضع شده‌اند [۵].

در یک دهه اخیر، کاربرد پوشش‌هایی مبتنی بر اکسید زیرکونیوم برای آماده‌سازی سطوح فلزی، به دلیل پوشش‌دهی آسان و عدم وجود مشکلات روش‌های موجود، مورد توجه مراکز تحقیقاتی در صنایع گوناگون قرار گرفته است. رسوب - دهی پوشش زیرکونیایی بیشتر به روش‌های سل ژل و غوطه‌وری انجام شده است [۶-۱۰].

در بسیاری از موارد، منبع زیرکونیوم در حمام پوشش‌دهی، زیرکونیک اسید تجاری بوده است.

امروزه با توسعه فناوری نانو، پژوهش‌های گسترده‌ای به منظور جایگزینی مواد و روش‌های متداول با انواع نانوفناورانه و دارای ویژگی‌های برتر، انجام شده است. در همین راستا، حفاظت از مواد نیز با استفاده از فناوری‌های مبتنی بر نانوساختارها به طرز چشمگیری در حال گسترش است. پژوهش‌های اندکی با استفاده از هگزافلئوروزیرکونیک اسید اصلاح شده (با ترکیب شیمیایی  $H_2ZrF_6$ ) به همراه نانوذرات سرامیکی صورت گرفته که از نظر شرایط عملیاتی و خواص پوشش تشکیل شده دارای مزایای عمده‌ای نسبت به نوع تجاری قبلی آن است. از جمله مزایای محلول‌های جدید مبتنی بر فناوری نانو می‌توان به pH کاری نزدیک به محیط خنثی، زمان پوشش‌دهی کوتاه‌تر و کنترل فرآیندی آسان اشاره کرد [۱۱-۱۲].

در این پژوهش برای اولین بار سعی شد تا با افزودن مقادیر مختلف SDS به حمام پوشش‌دهی هگزافلئوروزیرکونیک اسید دارای نانوذرات، اثر حضور این فعال‌ساز سطحی بر ریخت - شناسی و مقاومت به خوردگی پوشش بررسی شود. به منظور در نظر گرفتن جنبه‌های صنعتی پژوهش، از ورق گالوانیزه خودرویی به عنوان زیرآیند استفاده شد و نتایج با فرآیند فسفات‌ها مرسوم در خطوط رنگ صنایع خودروسازی مقایسه گردید.

منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک به کمک دستگاه گالوانواستات/پتانسیواستات (EG&G مدل 273A) با نرخ روبش ثابت  $5\text{mV/s}$  انجام شد. روش کار به صورت سه الکترودی مرسوم بود که در آن الکتروود شمارنده<sup>۵</sup>، گرافیتی، الکتروود مرجع<sup>۶</sup>،  $\text{Ag/AgCl}$  و الکتروود کاری<sup>۷</sup>، نمونه فولاد گالوانیزه آزمون است. مدت زمان غوطه‌وری الکتروود کاری قبل از شروع آزمایش، ۱۲۰ ثانیه تحت شرایط مدار باز (OCP)<sup>۸</sup> بود که به منظور رسیدن به حالت پایا در نظر گرفته شد. دامنه پتانسیل از  $-1700$  تا  $-700$  میلی‌ولت به نسبت OCP در نظر گرفته شد. جمع‌آوری اطلاعات به وسیله نرم‌افزارهای M270 و M398 صورت گرفت. چگالی جریان خوردگی نیز توسط روش برون-یابی تافل محاسبه شد. هر دو پوشش نانو سرامیکی و فسفات‌ها ایجاد شده، تا حدود زیادی عایق الکتریکی هستند و خوردگی نمونه‌ها از راه تبادل الکتریکی بین فلز پایه (فولاد) و محیط خورنده در طول تخلخل‌های پوشش انجام می‌شود. بنابراین، در این پژوهش با فرض خوردگی فولاد، نرخ خوردگی از رابطه ۱ محاسبه شد [۱۴].

$$\text{mpy} = 0.0457 i_{\text{corr}} \left( \frac{\text{mA}}{\text{m}^2} \right) \quad (1)$$

که در آن mpy نرخ خوردگی در یک سال و  $I_{\text{corr}}$  چگالی جریان خوردگی است. همچنین، برای اندازه‌گیری بازده حفاظت از خوردگی ( $\eta$ )، رابطه ۲ بکار گرفته شد.

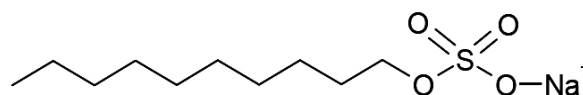
$$\eta\% = \left( \frac{I_0 - I_{\text{corr}}}{I_0} \right) \times 100 \quad (2)$$

در رابطه فوق،  $I_0$  و  $I_{\text{corr}}$  به ترتیب چگالی جریان خوردگی در غیاب و در حضور پوشش‌های مختلف است [۱۵]. هر آزمون به منظور کاهش خطا سه بار تکرار شد. همچنین برای تأیید نتایج ارزیابی‌های الکتروشیمیایی، آزمون مه نمکی مطابق استاندارد ISO 12944-6 در دستگاه مه نمکی (مدل S75-V201 شرکت پارس هرم ایران) و به مدت ۵۰۴ ساعت بر روی نمونه‌های بدون خراش انجام شد [۱۶].

انتهای یک زنجیره کربنی طویل و آب‌گریز هستند. در شرایط مورد بررسی (دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و آب دیونیزه)، غلظت بحرانی مایسل برای این ماده برابر با  $2/36$  گرم بر لیتر است [۱۳].

جدول (۲): شرایط عمومی پوشش‌دهی در نمونه‌های مورد آزمایش

نمونه	دمای محلول (درجه سانتیگراد)	زمان غوطه‌وری (ثانیه)	pH	SDS (گرم بر لیتر)
فسفات	۶۰	۳۰۰	۳	۰
۱	۲۵	۹۰	۵	۰
۲	۲۵	۹۰	۵	۰/۱
۳	۲۵	۹۰	۵	۰/۶
۴	۲۵	۹۰	۵	۱/۱



شکل (۱): ساختار شیمیایی سدیم دودسیل سولفات

نمونه‌های فسفات نیز بعد از شستشوی اولیه، در خط پیش‌رنج شرکت ایران‌خودرو تهیه شدند. در نهایت سطوح پوشش داده شده به جز فسفات، داخل آون قرار گرفته و به مدت ۱۰ دقیقه تحت حرارت ۱۳۵ درجه سانتیگراد گرم‌دیده شدند. نمونه‌های فسفات نیز توسط هوای گرم فشرده خشک شدند.

## ۲-۲- آزمون‌های خوردگی

خواص خوردگی پوشش نانو سرامیکی ایجاد شده، توسط آزمون‌های مه نمکی<sup>۳</sup> و پلاریزاسیون<sup>۴</sup> مورد بررسی قرار گرفت. آزمون پلاریزاسیون برای نمونه‌هایی با سطح مقطع ۱ سانتیمتر مربع در داخل محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم و به حجم ۲۵۰ میلی‌لیتر انتخاب شد. به منظور جلوگیری از تماس محلول الکترولیت با سطوح دیگر، سایر قسمت‌های هر نمونه توسط یک چسب قوی پوشانده شد. در حین آزمون‌ها، الکترولیت در معرض اکسیژن محیط و اتمسفر طبیعی بود.

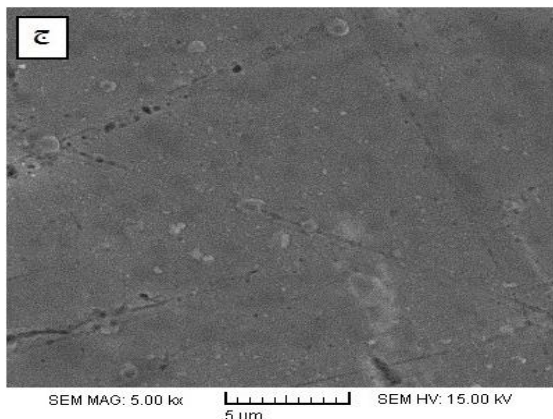
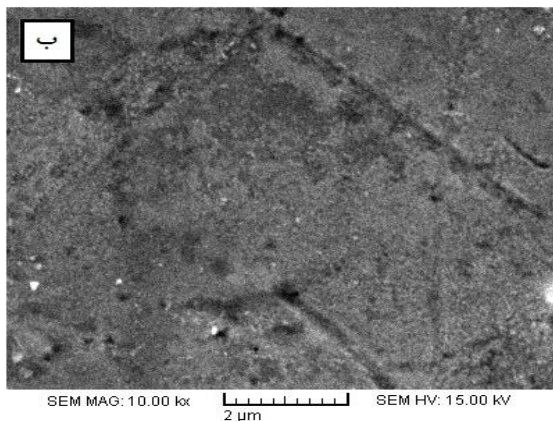
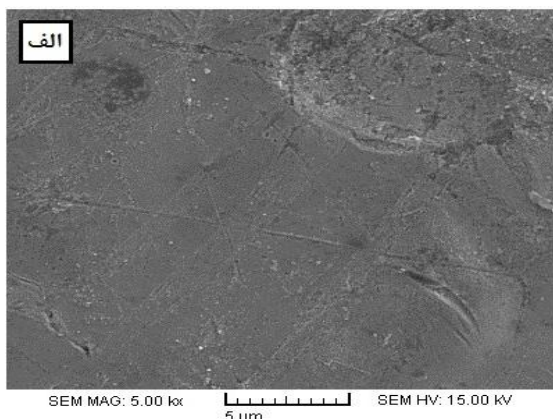
### ۲-۳- ریخت‌شناسی پوشش

مقایسه بین تغییرات ایجاد شده در ویژگی‌های سطحی نمونه‌ها پس از اعمال پوشش‌های مختلف روی آنها، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل VEGA//TESCAN) دارای آنالیزگر اشعه ایکس<sup>۹</sup> (EDS) انجام گرفت. همچنین تصاویر دیجیتالی ماکروسکوپی به منظور بازرسی چشمی قطعات پس از انجام آزمون‌های خوردگی تهیه شد.

### ۳- نتایج و بحث

بر طبق نتایج حاصل از تحقیقات نیوهارد<sup>۱۰</sup> و همکاران، ضخامت پوشش تشکیل شده در موارد مشابه، تنها در حدود ۲۰ تا ۲۵ نانومتر است [۱۷]. همچنین شران<sup>۱۱</sup> و همکاران نیز با استفاده از روش‌های بیضی‌سنجی (SE)<sup>۱۲</sup>، این ضخامت را کمتر از ۱۰ نانومتر گزارش کرده‌اند [۱۸]. تصاویر SEM مرتبط با نمونه‌های تهیه شده در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲-الف دیده می‌شود، سطح نمونه گالوانیزه فاقد هر نوع تجمع مشخصی از پوشش تبدیلی است ولی با اعمال پوشش تبدیلی (شکل ۲-ج)، تعدادی تجمعات ریز از اکسید زیرکونیا، شامل خوشه‌ها و ذرات نانومتری در سطح نمونه فاقد افزودنی SDS قابل مشاهده است. محمدلو و همکاران اندازه ذرات تشکیل شده را ۴۰ تا ۶۰ نانومتر عنوان کرده‌اند. همچنین ایشان تجمعاتی از اکسید زیرکونیوم به ابعاد ۲۰۰ تا ۳۰۰ نانومتر را گزارش نموده‌اند [۱۱]. البته باید در نظر داشت که تشخیص پوشش ایجاد شده به علت ضخامت اندک آن و نرمی زیاد سطح روین گالوانیزه، به سادگی امکان‌پذیر نیست. شکل ۲-ب نشان‌دهنده این موضوع است که با افزودن SDS به حمام چنین تجمعاتی از پوشش نانوسرامیکی کاهش یافته و دیگر به صورت واضح قابل تشخیص نیستند. نتایج حاصل از آنالیز عنصری با اشعه ایکس نیز این مطلب را تأیید می‌کند، چرا که درصد وزنی زیرکونیای موجود در سطح نمونه‌های گالوانیزه پوشش داده شده در حمام فاقد SDS در حدود ۲/۱۴ درصد است. در حالی که با افزودن SDS به حمام پوشش‌دهی، این مقدار به ۱/۵۵ درصد کاهش

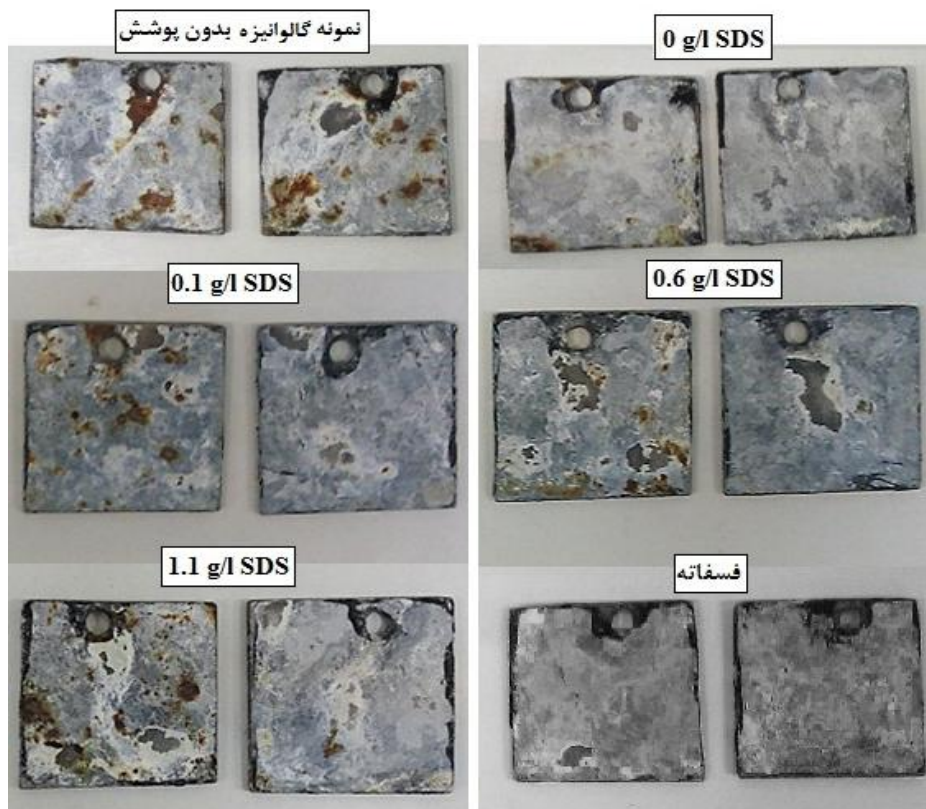
می‌یابد. این طور به نظر می‌رسد که بر خلاف تأثیر مثبت SDS در سرعت بخشیدن به تشکیل لایه فسفات و ایجاد پوششی با کیفیت بهتر در فرآیند فسفات کردن [۱۹]، افزودن SDS به حمام حاوی هگزا فلئوروزیرکونیک اسید، در روند تشکیل پوشش نانوسرامیکی ممانعت به عمل می‌آورد.



شکل (۲): تصاویر SEM از سطح نمونه‌های گالوانیزه: (الف): پوشش داده نشده، (ب): پوشش داده شده در حمام تبدیلی  $H_2ZrF_6$  دارای SDS و (ج): فاقد SDS

فاقد SDS دارای مقاومت به خوردگی بهتری نسبت به سطوح گالوانیزه فاقد پوشش هستند. همانطور که در مورد نمونه‌های حاوی SDS دیده می‌شود، افزودن SDS تأثیر منفی بر خواص خوردگی پوشش تبدیلی نانوزیرکونیایی گذاشته است.

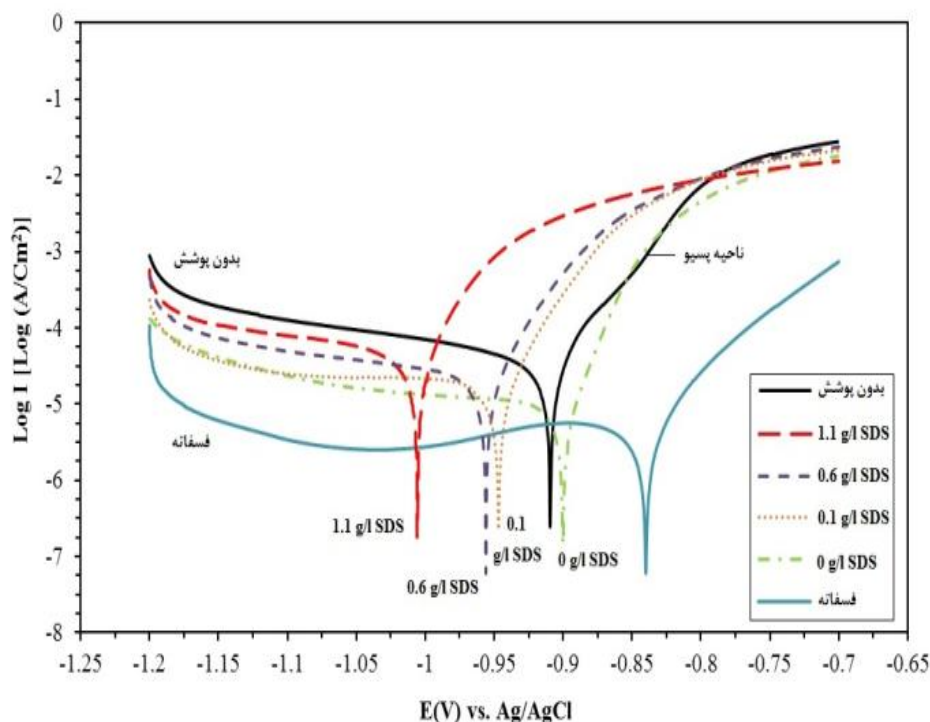
شکل ۳ نشان‌دهنده تصاویر دیجیتالی از سطوح نمونه‌ها پس از ۵۰۴ ساعت قرارگیری در شرایط آزمون مه نمکی است. برای جلوگیری از زنگ‌زدگی ناخواسته، لبه‌های هر زیرآیند با لاک از جنس آلکید رزین پوشانده شد. از نتایج آزمون مه نمکی مشخص است که پوشش‌های تبدیلی فسفات و نانوزیرکونیایی



شکل (۳): تصاویر دیجیتالی نمونه‌های گالوانیزه پوشش داده نشده و پوشش داده شده توسط محلول‌های نانوسرامیکی و فسفات پس از ۵۰۴ ساعت قرارگیری در معرض پاشش مه نمکی

جدول ۳ شامل اطلاعات مربوط به متغیرهای الکتروشیمیایی خوردگی به دست آمده از برون‌یابی خطوط آندی و کاتدی تا فل در پتانسیل خوردگی است. در این جدول، CR نرخ خوردگی برحسب  $E_{corr}$  و  $i_{corr}$  پتانسیل خوردگی در واحد ولت (V) و  $R_p$  مقاومت خوردگی بر اساس  $\text{ohm/cm}^2$  است.

نمودارهای پلاریزاسیون نمونه‌های مورد آزمایش در شکل ۴ قابل مشاهده هستند. همانطور که در منحنی‌ها دیده می‌شود، طبیعت خوردگی تمامی نمونه‌ها در مورد شاخه‌های کاتدی یکسان است در حالی که شاخه آندی نمونه گالوانیزه بدون پوشش، به علت وجود یک ناحیه پسیو<sup>۱۳</sup> در محدوده پتانسیل خوردگی برابر با ۸۵۰ میلی‌ولت نسبت به الکتروکد Ag/AgCl، دارای رفتار متفاوتی از سایر نمونه‌ها است.



شکل (۴): نمودارهای پلاریزاسیون برای نمونه‌های پوشش داده شده نسبت به گالوانیزه پوشش داده نشده (در محلول ۳/۵ درصد سدیم کلرید)

کمترین چگالی جریان خوردگی، بیشترین مقاومت خوردگی و در نتیجه کمترین نرخ خوردگی (CR) هستند. این در حالی است که افزودن SDS به حمام پوشش‌دهی باعث افزایش نرخ خوردگی در نمونه‌ها تا حدود نزدیک به نمونه گالوانیزه مرجع (فاقد پوشش تبدیلی) می‌شود.

همچنین نتایج جدول ۳ نشان می‌دهند که بازده حفاظت از خوردگی در حضور افزودنی SDS از مقدار ۷۵/۹۹ درصد برای نمونه فاقد SDS (نمونه ۱) به حدود ۷/۹۰ برای نمونه غوطه‌ور شده در حمام حاوی ۱/۱ گرم بر لیتر SDS (نمونه ۴) رسیده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، شیب تغییرات راندمان در غلظت‌های بالای SDS به تدریج کمتر شده است. این مورد بیانگر این واقعیت است که با افزایش بیشتر غلظت SDS، دیگر راندمان بازدارندگی به طور محسوس کاهش نخواهد یافت و حضور اندکی فعال‌کننده سطحی SDS باعث کاهش چشمگیر در مقاومت به خوردگی پوشش می‌شود.

جدول (۳): نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون.

نمونه	$I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$E_{corr}$ vs- Ag/AgCl (V)	$R_p$ ( $\Omega/cm^2$ )	CR (mpy)	$\eta$ (%)
فسفاتنه	۱۳/۲۸	-۰/۸۴۱	۲۱۹۴	۶/۰۶۹	۷۶
گالوانیزه مرجع	۵۹/۷۳	-۰/۹۱۰	۳۳۵/۱	۲۷/۲۹۷	۰
۱	۱۴/۳۴	-۰/۹۰۰	۹۴۳/۶	۶/۵۵۳	۹۹/۷۵
۲	۳۴/۱۷	-۰/۹۴۶	۶۸۳/۸	۱۵/۶۱۶	۹۹/۴۲
۳	۵۱/۱۰	-۰/۹۵۶	۵۵۳/۵	۲۳/۳۵۲	۴۵/۱۴
۴	۵۵/۰۱	-۱/۰۰۵	۲۷۲/۸	۲۵/۱۳۹	۹۰/۷

طبق نتایج حاصله در جدول ۳، نمونه‌های فسفاتنه و نانوزیرکونیایی فاقد SDS (نمونه شماره ۱) به ترتیب دارای

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر یک پوشش تبدیلی نانوسرامیکی مبتنی بر هگزا فلئوروزیرکونیک اسید (پوشش نانوزیرکونیا) و دارای افزودنی سدیم دودسیل سولفات (SDS) بر روی ورق فولاد گالوانیزه مورد استفاده در صنایع خودرویی بررسی شد. نتایج نهایی تحقیق به شرح زیر است:

۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که افزودنی SDS دارای تأثیر منفی در کیفیت پوشش نانوزیرکونیایی گالوانیزه است و از تشکیل تجمعات سرامیکی بر سطح جلوگیری می‌کند.

۲- براساس نتایج آزمون پلاریزاسیون، طبیعت خوردگی شاخه-های کاتدی نمونه‌ها مشابه یکدیگر است در حالی که شاخه آندی در نمونه گالوانیزه بدون پوشش به علت دارا بودن یک ناحیه پسیو شکلی متفاوت دارد. همچنین حضور SDS تأثیر خاصی بر طبیعت کاتدی و آندی منحنی‌ها ندارد.

۳- نتایج عددی متغیرهای خوردگی بر اساس روش برون‌یابی تافل نشانگر این مطلب بود که نمونه‌های پوشش‌داده شده با محلول‌های فسفات و نانوزیرکونیایی دارای بهترین عملکرد خوردگی هستند و حضور اندکی SDS نیز موجب کاهش شدید خواص ضد خوردگی پوشش می‌شود. تصاویر حاصل از آزمون مه نمکی نیز موید این مطلب بود.

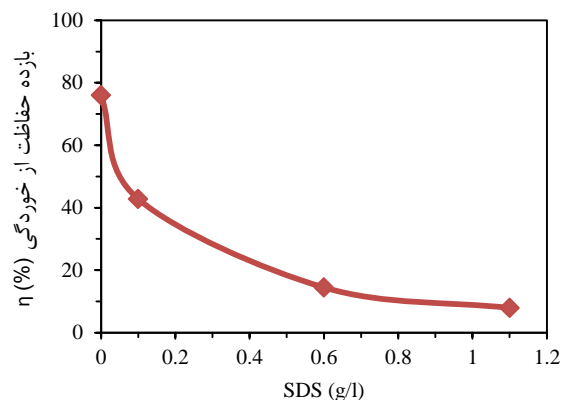
۴- با توجه به نتایج SEM و آزمون‌های پلاریزاسیون، مکانیزم خوردگی پیشنهادی در نمونه‌های با پوشش نانوزیرکونیایی، حفره‌دار شدن است.

#### ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله لازم می‌دانند از همکاری شایسته شرکت ساپکو، دکتر مرتضی امرونی حسینی و پروفیسور مجید جعفریان در انجام این پژوهش صمیمانه تشکر و قدردانی نمایند.

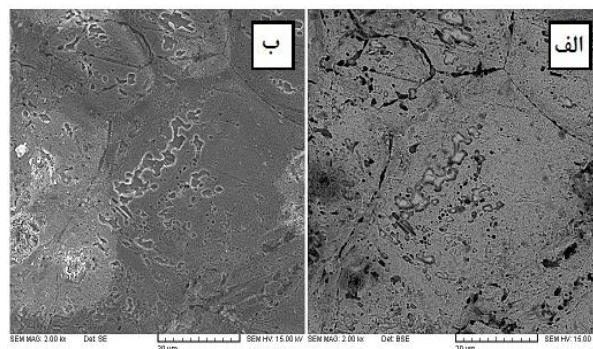
#### ۶- مراجع

- [1] T. S. N. Sankara Narayanan, "Surface Pretreatment by Phosphate Conversion



شکل (۵): تغییرات بازده حفاظت از خوردگی در حضور افزودنی SDS

آزمون پلاریزاسیون، صرفاً جهت اطمینان از نتایج بدست آمده مبنی بر کاهش قدرت حفاظت پوشش تبدیلی نانوزیرکونیایی به هنگام افزودن SDS انجام گرفت. داده‌های فوق انطباق خوبی با نتایج آزمون مه نمکی و تفسیرهای مربوط به نتایج SEM/EDS از خود نشان می‌دهند. همچنین با توجه به تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های پوشش داده شده توسط محلول تبدیلی نانوزیرکونیایی پس از ایجاد محصولات خوردگی شکل ۶، به نظر می‌رسد مکانیزم خوردگی قالب در این نوع پوشش‌ها، خوردگی حفره‌ای است. این مورد از چگالی جریان خوردگی بیشتر در نمونه‌های حاوی SDS نیز قابل استنباط است، زیرا به دلیل حفره‌دار شدن، سطح موثر قطعه در تماس با محیط خورنده بزرگ‌تر می‌شود و در نتیجه جریان بیشتری توسط قطعه مصرف می‌شود [۲۰].



شکل (۶): تصاویر SEM، (الف): الکترون برگشتی، (ب): الکترون ثانویه از سطح نمونه گالوانیزه پوشش داده شده در محلول تبدیلی نانوزیرکونیایی حاوی ۰/۶ گرم بر لیتر سدیم دودسیل سولفات

- 1999.
- [11] H. Eivaz Mohammadloo, A. A. Sarabi, A. A. Sabbagh Alvani, H. Sameie & R. Salimi, "Nano-ceramic Hexafluorozirconic acid based Conversion Thin Film: Surface Characterization and Electrochemical Study", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 206, pp. 4132-4139, 2012.
- [12] S. Adhikari, K. A. Unocic, Y. Zhai, G. S. Frankel, J. Zimmerman & W. Frisad, "Hexafluorozirconic acid based Surface Pretreatments: Characterization and Performance Assessment", *Electrochimica Acta*, Vol. 56, pp. 1912-1924, 2011.
- [13] [http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium\\_dodecyl\\_sulfate](http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_dodecyl_sulfate), accessed online 12 Aug. 2013.
- [14] E. E. Stansbury & R. A. Buchanan, "Fundamentals of Electrochemical Corrosion", ASM International, Vol. 86, p. 178, 2000.
- [15] S. K. Shukla, A. K. Singh, I. Ahamad & M. A. Quraishi, "Streptomycin: A Commercially Available Drug as Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Hydrochloric Acid Solution", *Materials Letters*, Vol. 63, pp. 819-822, 2009.
- [16] ISO International Standard, *Paints and varnishes, Corrosion Protection of Steel Structures by Protective Paint Systems, Part 6: Laboratory performance test methods*, p. 12944, 1998.
- [17] N. J. Newhard Jr, "Conversion coatings – chromate and non-chromate types, in: H. Leidheiser (Ed.)", *Proceedings of Corrosion Control Coatings*, Science Press, Princeton, p. 225, 1979.
- [18] T. Schram, G. Goeminne, H. Terryn & W. Vanhoolst, "Study of the Composition of Zirconium based Chromium free Conversion Layers on Aluminium", *Transactions of The Institute of Metal Finishing*, Vol. 73, pp. 91-95, 1995.
- [19] ر. امینی، ع. ا. سرابی و م. کثیریه، "تأثیر سدیم دودسیل سولفات بر ساختار و خواص ضد خوردگی پوشش فسفات بر روی آلایز Coating - A Review", *National Metallurgy Laboratory, India*, Vol. 9, pp. 130-17, 2005.
- [2] L. Y. Niu, Z. H. Jiang & G. Y. Li, "A Study and Application of Zinc Phosphate Coating on AZ91D Magnesium Alloy", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 200, pp. 3021-3026, 2006.
- [3] G. Song, "Electroless Deposition of a Prefilm of Electrophoresis Coating and its Corrosion Resistance on an Mg Alloy", *Electrochimica Acta*, Vol. 55, pp. 2258-2268, 2010.
- [4] T. Biestek & j. Weber, "Electrolytic and Chemical Conversion Coatings, A Concise Survey of their Production", *Properties and Testing*, *Wgdawnictwa Naukowe Technican*, p. 128, 1976.
- [5] Restriction of Hazardous substance Directive, 2002/95/EC.
- [6] G. Gusmano, G. Montesperelli, M. Rapone, G. Padeletti, A. Cusma, S. Kaciulis, A. Mezzi & R. Maggio, "Zirconia Primers for Corrosion Resistant Coatings", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 5822-5828, 2007.
- [7] L. Fedrizzi, F. J. Rodriguez, S. Rossi, F. Deflorian & R. DiMaggio, "The use of Electrochemical Techniques to Study the Corrosion Behavior of Organic Coatings on Steel Pretreated with sol-gel Zirconia Films", *Electrochimica Acta*, Vol. 46, pp. 3715-3724, 2001.
- [8] C. Stromberg, P. Thissen, I. Klueppel, N. Fink & G. Grundmeier, "Synthesis and Characterization of Surface Gradient Thin Conversion Films on Zinc Coated Steel", *Electrochimica Acta*, Vol. 52, pp. 804-815, 2006.
- [9] S. Verdier, S. Delalande, N. Van der Laak, J. Metson & F. Dalard, "Monochromatized X-ray Photoelectron Spectroscopy of the AM60 Magnesium Alloy Surface after Treatments in Fluoride-based Ti and Zr Solutions", *Surface Interface Analysis*, Vol. 37, pp. 509-516, 2005.
- [10] P. Puomi, H. M. Fagerholm, J. B. Rosenholm & R. Sipila, "Optimization of Commercial Zirconic acid based Pretreatment on Hot-dip Galvanized and Galfan coated Steel", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 115, pp. 79-86,



منیزیم AZ31"، نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری رنگ،  
شماره ۴، ص. ۱۸۳-۱۸۹، اسفند ۱۳۸۹.

[20] M. G. Fontana & N. D. Greene, Corrosion Engineering, 1st ed., McGraw-Hill, New York, 1967.

## ۷- پی نوشت

- [1] Sodium Dodecyle Sulfate
- [2] Elcometer
- [3] Salt Spray
- [4] Polarization
- [5] Counter Electrode
- [6] Reference Electrode
- [7] Working Electrode
- [8] Open Circuit Potential
- [9] Energy Dispersive Spectroscopy
- [10] Newhard
- [11] Schram
- [12] Spectroscopic Ellipsometry
- [13] Passivation Area