

بررسی تاثیر نوع آماده سازی سطح فولاد بر مقاومت به خوردگی و چسبندگی پوشش اپوکسی/پرک شیشه

سینا یزدانی^۱، مرتضی ابراهیمی^{۲*}، علی اصغر سرابی^۳، حسین عیوض محمدلو^۴، امین عیوض محمدلو^۵

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲ دانشیار، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۳ دانشیار، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۴ استادیار، گروه رنگ و روکش‌های سطح، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران

۵ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران

* نویسنده مسئول: ebrahimi@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۳

چکیده

معمولاً در همه کاربردهایی که پوشش آلی بر روی سطح فلز اعمال می‌شود، سطح نیازمند آماده‌سازی‌های فیزیکی و شیمیایی به منظور افزایش چسبندگی و مقاومت در برابر خوردگی سیستم است. کنترل زبری و شیمی سطح فلز اصلاح شده به وسیله پوشش تبدیلی از عوامل موثر در چسبندگی به پوشش‌های آلی می‌باشند. در این پروژه رفتار مقاومت به خوردگی و چسبندگی پوشش‌های اپوکسی در حضور و عدم حضور رنگدانه ضد خوردگی پرک شیشه بر روی سطح آماده سازی شده از طریق اعمال پوشش تبدیلی زیرکونیوم و سطح سندبلاست شده مورد بررسی قرار داده می‌شود. پوشش تبدیلی در شرایط بهینه ی پارامترهای فرآیندی بر روی سطح تشکیل شد. در گام بعد تاثیر نوع آماده سازی سطح شامل پوشش تبدیلی بر پایه زیرکونیوم بر رفتار مقاومت به خوردگی پوشش و ریخت شناسی سطح با استفاده از آزمون‌های الکتروشیمیایی و تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار گرفت که مشخص شد نمونه‌های آماده سازی شده با پوشش تبدیلی با تغییر در ناهمواری‌های سطح در مقیاس نانومتری و تغییر فیزیک سطح، میزان مقاومت به خوردگی و چسبندگی بالاتری را از خود نشان می‌دهد. در گام آخر پوشش اپوکسی/پرک شیشه با ۱۰ درصد از پرک شیشه بر روی سطح آماده سازی شده از طریق پوشش تبدیلی اعمال شد و مشخص گردید که اضافه کردن رنگدانه ضد خوردگی پرک شیشه باعث افزایش میزان مقاومت به خوردگی پوشش حاصل میگردد که نتایج آزمون مه نمکی تصدیق بر این امر می‌باشد.

کلیدواژه: خوردگی؛ پوشش تبدیلی بر پایه زیرکونیوم؛ اپوکسی؛ پرک شیشه؛ فولاد نرم

Investigation of The Effect of Steel Surface Treatments on Anti-Corrosion Performance and Adhesion of Epoxy/Glass Flake Coatings

S. Yazdani¹, M. Ebrahimi^{2,*}, A. A. Sarabi³, H. Eivaz Mohammadloo⁴, A. Eivaz Mohammadloo⁵

1. MSc Student, Polymer and Color Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2. Associate Professor, Polymer and Color Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

3. Associate Professor, Polymer and Color Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

4. Assistant Professor, Color, Resin & Surface Coatings Dept., Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

5. MSc Student, Polymer and Color Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* **Corresponding Author:** ebrahimi@aut.ac.ir

Submission: 2021, 02, 03 **Acceptance:** 2021, 05, 03

Abstract

Usually, in all applications where an organic coating is applied on the surface, physical and chemical surface preparations need to enhance adhesion and anti-corrosion resistance of the system. Control of surface roughness and chemistry of modified metal by conversion coatings are effective factors in the adhesion properties of organic coatings. In this project, the behavior of anti-corrosion resistance and adhesion of epoxy coatings in the presence and absence of anti-corrosion glass flakes pigments on the surface of steel prepared by applying the zirconium conversion coating and sandblast method were examined. Conversion coating was formed on the surface in the optimum condition of practical parameters. In the next step, the effect of the type of surface preparation on the anti-corrosion resistance and morphology behavior of the coating was investigated using electrochemical tests and atomic force microscope images. It was found that the samples prepared with conversion coating indicated the best anti-corrosion resistance and adhesion strength as a result of the change in the roughness and changing the surface chemistry. Finally, epoxy/glass flake coating with 10% of glass flake was applied on the prepared surface through conversion coating and it was found that adding glass flakes increase the anti-corrosion resistance of the coating and these results confirmed by the salt spray test.

Keywords: Corrosion, Zr-based conversion coating, epoxy, glass flakes, mild steel

۱- مقدمه

فلز آهن یکی از پرکاربردترین مواد در جهان است که به صورت خالص در صنعت کاربردی ندارد و به صورت آلیاژ استفاده می شود که یکی از آلیاژهای آن فولاد می باشد. تولید خام سالانه فولاد، ۱/۴ بیلیون تن در سال ۲۰۱۰ بود که در حدود ۷۲۱ میلیون تن از زغال کک^۱ استفاده شد [۱]. خوردگی فولاد یک واکنش شیمیایی و الکتروشیمیایی است که این واکنش ها در حضور آب، اکسیژن و یون های خورنده موجود در محیط اتمسفر رخ می دهد [۲]. محصول نهایی خوردگی آهن شامل ترکیبات متنوعی است که رایج ترین آن ها یک ترکیب قهوه ای مایل به قرمز است که زنگ نامیده می شود [۳]. برای محافظت از خوردگی فلزات روش های بسیاری وجود دارد [۴] از بین این روش ها می توان به مواردی چون بهبود ویژگی های فلز با استفاده از آلیاژ یا اصلاحات سطحی، اصلاح محیط توسط بازدارنده و تغییر پتانسیل فلز / محیط توسط حفاظت آندی یا کاتدی را نام برد که روش آماده سازی سطح شامل ایجاد یک مانع فیزیکی برای حفاظت از فلز در برابر محیط خورنده می باشد [۵] که ساده ترین روش برای ایجاد یک پوشش روی سطح، استفاده از پوشش های آلی، پوشش های تبدیلی و آندایزینگ می باشد که این روش ها در مقایسه با روش هایی مانند استفاده از رسوب شیمیایی بخار و رسوب فیزیکی بخار می باشند [۶].

اعمال پوشش های پلیمری همچون پوشش آلی بر روی سطح فلز می تواند باعث بهبود مقاومت در برابر خوردگی فلز شود [۷]، این پوشش ها قادرند تا نفوذ الکترولیت خورنده به سطح فلز را کاهش داده و طول عمر سازه فلزی را افزایش دهند که این خاصیت پوشش های آلی به نقش سدکنندگی آنها در برابر نفوذ الکترولیت خورنده برمی گردد [۸ و ۹]. از جمله این پوشش ها می توان اپوکسی را نام برد به علت مقاومت شیمیایی مناسب، چسبندگی قوی به زمینه، قابلیت ایجاد پوشش با دانسیته اتصالات عرضی بالا، قابلیت اعمال در ضخامت های بالا، قیمت مناسب و

توانایی فرآیند پذیری به عنوان پوشش آستری بسیار پر استفاده است [۱۰ و ۱۱].

پوشش های تبدیلی^۴ به وسیله اصلاحات شیمیایی یا الکتروشیمیایی بر روی سطح فلزات تولید می شوند. در نهایت یک لایه سطحی از اکسیدهای فلزی، کرومات ها، فسفات ها یا ترکیبات دیگر که با سطح پیوند شیمیایی برقرار کردند را ایجاد کنند [۱۲]. انواع مختلفی از پوشش های تبدیلی از جمله اصلاحات کرومات، فسفات / پرمنگنات و فلوئوروزیرکونات^۵ وجود دارد [۱۳]. از جمله پوشش های تبدیلی می توان به پایه زیرکونیوم اشاره کرد که اعمال زیرکونیوم اکساید/هیدروکساید بر سطح فلزات یکی از روش های موفقیت آمیز اصلاح سطح است که می تواند جایگزین روش های قدیمی شود [۱۴-۱۷]. آماده سازی بر پایه زیرکونیوم موجب بهبود مقاومت خوردگی و بهبود چسبندگی بسیاری از فلزات به پوشش آلی می شود [۱۸-۲۱]. از روش های دیگر برای آماده سازی سطح فلزات می توان به سند بلاست^۶ اشاره کرد که به معنی پاشش پرفشار شن روی سطح به منظور تمیز کردن آن است، در این فرآیند توجه به سرعت باد و فشار کمپرسور هوا و اندازه ذرات شن و ماسه ای امری مهم است، این روش یکی از روش های معمول و رایج در صنعت می باشد که جهت زنگ زدایی از سازه های فلزی که دچار زنگ زدگی شده اند و باید تمیز شوند و یا پوششی بر روی آنها اعمال شود مورد استفاده قرار می گیرد [۲۲].

رنگدانه ها با مکانیزم های مختلفی بهبود خواص ضد خوردگی پوشش های آلی را باعث می گردند [۲۳]، از این میان می توان به رنگدانه ضد خوردگی پرک شیشه اشاره کرد که باعث ایجاد خواصی چون بهبود خواص مکانیکی، پایداری در مقابل اشعه ی ماورای بنفش، عایق الکتریکی و گرمای طبیعی، مقاومت شیمیایی و خوردگی بسیار بالا^۷ و... در پوشش می شوند [۲۴ و ۲۵].

^۵Fluorozirconate^۶Sandblasting (SB)^۷Extra corrosion resistance^۱Coking coal^۲Chemical vapor deposition^۳Physical vapor deposition^۴Conversion coatings (CC)

گنزالز^۱ و همکاران [۲۶] در یک پژوهش به اثر زمینه فلزی پوشش داده شده توسط پوشش اپوکسی حاوی ذرات پرک شیشه پرداختند. نتایج آزمون امپدانس الکتروشیمیایی نشان داد استیل کربن دار مقاومت به خوردگی بهتری نسبت به استیل گالوانیزه دارد. نیروی چسبندگی برای هر دو زمینه پس از قرارگیری در برابر آب نمک کاهش می یابد. کاهش شدیدتر چسبندگی برای نمونه استیل کربن دار نسبت به نمونه استیل گالوانیزه نشان دهنده تشکیل محصولات خوردگی بر روی سطح فلز و پوشش است، همچنین بهتر بودن مقاومت به خوردگی استیل کربن دار، مربوط به محصولات خوردگی ایجاد شده بر روی سطح این نوع فولاد است که خود لایه محافظ بروی سطح فولاد تشکیل می دهد.

به منظور بررسی تاثیر آماده سازی مکانیکی سطح از روش سندبلاست بر روی میزان چسبندگی پوشش به سطح زمینه، رضایی تحقیقاتی را بر روی فولاد زنگ نزن LVM ۳۱۶ انجام داد. وی بیان کرد از آنجا که چسبندگی یک پدیده سطحی می باشد، نوع مورفولوژی و توپولوگرافی زیرلایه نقش مهمی در چسبندگی دارد، آماده سازی سطح تماس (پیش عملیات سطح) برای ایجاد پیوند مکانیکی قوی ضروری می باشد. نتایج نشان داد که نمونه سند بلاست شده توپوگرافی سطح نامنظم تری نسبت به نمونه شاهد دارد، با توجه به اینکه زبری سطح از عوامل موثر در چسبندگی است می توان نتیجه گرفت که عملیات سطحی بر روی فولاد باعث بهبود چسبندگی می شود [۲۷].

محمدلو^۲ و همکارانش در چند تحقیق به چاپ رسیده [۱۶ و ۱۷] از یک حمام فاقد فسفات و کروماته جهت بهبود خواص ضد خوردگی و چسبندگی زمینه فولاد نورد سرد^۳ استفاده کردند. بدین منظور از هگزافلوروزیرکونیک اسید (H_2ZrF_6) در محلول پوشش تبدیلی استفاده گردید و تاثیر پارامتر pH محلول بر تشکیل پوشش بر روی سطح فولاد و رفتار مقاومت به خوردگی این پوشش با آزمون های الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. مورفولوژی پوشش تبدیلی بدست آمده در $pH = 4/5$ بهترین پوشش دهی را بر روی سطح دارد به طوری

که در محیط های اسیدی تر پوششی بر روی سطح شکل نمی گیرد و در محیط های قلیایی تر پوشش با ناهمگونی زیاد بر روی زمینه شکل گرفته است. به منظور بررسی رفتار الکتروشیمیایی پوشش تبدیلی زیرکونیوم بر روی فولاد در pH های مختلف حمام پوشش تبدیلی از آزمون های پلاریزاسیون و طیف سنجی الکتروشیمیایی استفاده کردند. نتایج نشان داد که $pH = 4/5$ کمترین میزان چگالی جریان خوردگی و بیشترین میزان مقاومت خوردگی را دارا می باشد. در واقع می توان نتیجه گرفت در pH های پایین محلول پوشش تبدیلی، سرعت اکسایش بسیار بیشتر از تشکیل پوشش بوده و همچنین پوشش در شرایط بسیار اسیدی به لحاظ ترمودینامیکی نمی تواند تشکیل شود؛ علاوه بر این، حل شدن پوشش در pH های اسیدی نیز باعث کاهش ضخامت پوشش و نایکخواهی آن می شود. همچنین در pH های قلیایی شرایط تشکیل پوشش از نظر ترمودینامیکی فراهم بوده است اما به دلیل سرعت پایین، اکسایش فلز تشکیل پوشش پایین بوده است و این مسئله مجدداً باعث تشکیل پوشش با ضخامت نایکخواهی بر روی سطح فولاد می گردد.

در این پژوهش ابتدا بررسی رفتار مقاومت به خوردگی پوشش تبدیلی زیرکونیوم بر روی زمینه فولادی مورد بررسی قرار می گیرد. در گام بعدی لاک اپوکسی بر روی زمینه های آماده سازی شده از جمله پوشش تبدیلی زیرکونیوم و سندبلاست اعمال شد و تفاوت های این دو نوع آماده سازی با استفاده از آزمون های الکتروشیمیایی خوردگی و چسبندگی مورد بررسی قرار گرفت. در گام بعدی پرک شیشه به عنوان یکی از رنگدانه های ضد خوردگی در درصدهای مختلف در اپوکسی استفاده شد و تاثیر این پوشش بر رفتار مقاومت به خوردگی فولاد آماده سازی شده با استفاده از پوشش تبدیلی زیرکونیوم مورد بررسی قرار داده شد. در گام آخر برای مشاهده بیشتر تاثیر آماده سازی سطح از طریق دو نوع آماده سازی سندبلاست و پوشش تبدیلی زیرکونیوم، یک نمونه رنگ صنعتی بر روی فولاد آماده سازی شده با این دو روش اعمال شد و تاثیر آماده سازی سطح با

^۳CRS^۱Gonzlez^۲Mohammadloo

صورت سند بلاست، نمونه‌ها تحت نظر مهندسین پالایشگاه تهران به صورت صنعتی سندبلاست گردیدند.

در مرحله بعدی پوشش اپوکسی در حضور و عدم حضور رنگدانه پرک شیشه با درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ بر روی سطوح آماده سازی شده به روش پوشش تبدیلی و سندبلاست اعمال گردید. ضخامت فیلم تر اعمالی بر روی سطح فولاد ۲۰۰ میکرون می‌باشد. پس از اضافه شدن هاردنر و افزودنی‌ها به رزین، اختلاط مواد به مدت ۴۵ دقیقه زیر همزن قرار گرفت و جهت جلوگیری از تبخیر حلال، روی آن با فویل بسته شد. پس از آن نمونه‌ها در ضخامت‌های تر ۲۰۰ میکرون اعمال شدند و به مدت یک ساعت در دمای ۸۵ درجه سانتیگراد درون آون پخت شدند و سپس به مدت یک هفته در دمای محیط قرار گرفتند. ضخامت فیلم نهایی بعد از پخت برابر با 10 ± 10 میکرون می‌باشد.

۲-۳-۲- ارزیابی خواص پوشش

۲-۳-۲-۱- آزمون‌های الکتروشیمیایی

مقاومت در برابر خوردگی پوشش اپوکسی اعمالی بر روی نمونه‌های آماده سازی شده توسط پوشش تبدیلی و سندبلاست توسط طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) ارزیابی شد. یک سامانه‌ی سه الکترودی برای کلیه آزمون‌های الکتروشیمیایی به کار برده شد که در آن پلاتین به عنوان الکتروکد، نمونه پوشش داده شده به عنوان الکتروکد کار و نقره/نقره کلراید (۳ مولار) نیز به عنوان الکتروکد مرجع بودند. آزمون‌های الکتروشیمیایی بر مساحت یک سانتی متر مربع از هر نمونه انجام شد. آزمون‌های امپدانس الکتروشیمیایی در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید صورت گرفت. اندازه گیری‌های امپدانس الکتروشیمیایی در محدوده‌ی فرکانس ۱۰ کیلوهرتز تا ۰/۱ هرتز انجام شد. دامنه پتانسیل متناوب اعمالی ۱۰ میلی ولت بالاتر و پایین‌تر از پتانسیل مدار باز بود. آزمون امپدانس الکتروشیمیایی توسط دستگاه Autolab PGSTAT 302 N انجام شد و نتایج توسط نرم افزار نووا^۲ تحلیل شد. برای هر نمونه، سه تکرار انجام شد.

استفاده از آزمون چسبندگی و مه نمکی مورد بررسی قرار گرفت.

۲- کارهای تجربی

۲-۱- مواد استفاده شده در پژوهش

برای اعمال پوشش بر روی ورقه‌های فولادی از ورقه‌های فولاد در ابعاد ۱۰×۵ سانتی متر مربع متعلق به کارخانه فولاد مبارکه استفاده شد و سپس از سنگ مغناطیسی به منظور برداشتن لایه حفاظتی روی آن استفاده گردید. ساختار عنصری این صفحات فولادی توسط آزمون آنالیز عنصری مطابق جدول ۱ می‌باشد. رزین بکار رفته در این پژوهش، اپوکسی ایران ۰۱ از پتروشیمی خوزستان می‌باشد که تعداد گروه‌های اپوکسی در هر گرم ۴۵۰-۵۵۰ می‌باشد. نسبت اختلاط رزین به هاردنر ۱ به ۲/۵ می‌باشد. از رنگدانه پرک شیشه به عنوان رنگدانه ضد خوردگی در درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ در فرمولاسیون رنگ استفاده شد. حلال مورد استفاده در پوشش اپوکسی شامل مخلوطی از بوتیل استات و زایلن به نسبت ۶۰ به ۴۰ می‌باشد (افزودنی‌های اعمالی در فرمولاسیون رنگ از جمله ضد کف، از شرکت بازاک تهیه شده است).

۲-۲- آماده سازی و اعمال پوشش

از روش‌های آماده سازی سطوح که در این پروژه بررسی می‌گردد پوشش تبدیلی و سندبلاست می‌باشد. برای اعمال پوشش تبدیلی برپایه زیرکونیوم [۲۸] ابتدا سطح نمونه‌ها با سمباده‌های ۴۰۰ و ۸۰۰ و ۱۲۰۰ سنباده زده شد، سپس با استفاده از محلول ۱۰ درصد وزنی پتاسیم هیدروکساید به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه ی سانتی‌گراد چربی زدایی صورت گرفت و در گام آخر نمونه در محلول پوشش تبدیلی بر پایه هگزافلوروزیرکونیک اسید با غلظت ۰/۰۱ مولار از به مدت ۹۰ ثانیه غوطه‌ور شد. در تمام مراحل از آب دی یونیزه برای شستشو استفاده گردید. همچنین از هیدروکلرید اسید برای تنظیم pH استفاده شد. با طی این مراحل پوشش تبدیلی برپایه زیرکونیوم بر روی سطح فولاد اعمال گشت و آماده برای اعمال اپوکسی بر روی سطح فلز گردید. همچنین در روش آماده سازی به

^۲Nova

^۲Electrochemical Impedance Spectroscopy

۲-۳-۲- اندازه گیری چسبندگی

آزمون Pull-Off به منظور بررسی چسبندگی پوشش های آلی بر روی سطوح ورقه های فولادی همراه با پوشش تبدیلی یا بدون حضور پوشش تبدیلی استفاده شده است که طبق استاندارد ASTM D4541 و از سیستم آزمون چسبندگی DEFELSKO استفاده گردید.

۲-۳-۳- آزمون مه نمکی

با استفاده از آزمون مه نمکی خواص کیفی مقاومت به خوردگی پوشش اپوکسی مورد ارزیابی قرار گرفت. طبق استاندارد ASTM B117 برای تشدید بیشتر شرایط خوردگی در این آزمون، بر روی نمونه ها خراشی به صورت ضربدری ایجاد شد. همچنین نمونه ها با زاویه ی ۴۵ درجه درون کابین دستگاه قرار گرفتند و بخار سدیم کلراید ۵ درصد وزنی به نمونه ها توسط دستگاه اسپری شد. دمای آزمون در محدوده ی ۳۵ درجه سانتی گراد قرار داده شد. بعد از قرارگیری نمونه ها در معرض آزمون به مدت ۵۰۴ ساعت، از سطح نمونه ها توسط دوربین دیجیتال عکس برداری شده است.

۲-۳-۴- آزمون میکروسکوپ نیروی اتمی^۱

به منظور بررسی زبری و توپوگرافی سطح اصلاح شده با پوشش تبدیلی و سندبلاست از آزمون میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM, Ambios Tech, USA)

استفاده گردید. - نتایج و بحث

آماده سازی سطح بر روی رفتار مقاومت به خوردگی پوشش و خواص چسبندگی تاثیر بسزایی دارد. بر این امر ابتدا تاثیر نوع آماده سازی فلز فولاد بر مقاومت به خوردگی پوشش اپوکسی

مورد بررسی قرار گرفته می شود. در اولین گام پوشش تبدیلی بر پایه زیرکونیوم به عنوان یکی از انواع آماده سازی سطح با تغییر پارامتر pH بهینه گردید که مقدار بهینه برای اعمال پوشش تبدیلی pH=4، غلظت محلول ۰/۰۱ مولار و زمان غوطه وری ۹۰ ثانیه شد [۲۸]. سپس تاثیر آماده سازی های صورت گرفته بر روی فلز با توجه به مقاومت در برابر خوردگی، چسبندگی مورد بررسی قرار می گیرد که در انتها مقاومت در برابر خوردگی پوشش اپوکسی به همراه رنگدانه ضد خوردگی (پرک شیشه) مورد بررسی قرار می گیرد.

۳-۱- تاثیر آماده سازی سطح بر رفتار لاک اپوکسی

۳-۱-۱- آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

نمونه های آماده سازی شده از طریق پوشش تبدیلی و سندبلاست تهیه و بر روی این نمونه ها، لاک اپوکسی به ضخامت خشک ۵۰ میکرون اعمال شد. شکل های ۱، ۲ و ۳ منحنی های باد (الف) و نایکویست (ب) نمونه های پوشش داده شده با لاک اپوکسی بر روی سطوح فولادی آماده سازی شده بعد از یک روز، دو هفته و چهار هفته غوطه وری در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید را نشان می دهد. برای هر سه نمونه پس از اینکه نمونه ها در داخل الکترولیت (محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید) در زمان کوتاه قرار گرفتند با توجه به اینکه هنوز الکترولیت به زمینه نفوذ نکرده است، نفوذ پذیری این پوشش در برابر آب و اکسیژن و عوامل خورنده نیز بسیار پایین است. در نتیجه نمونه ها مقاومت های بالایی را از خود نشان دادند.

جدول ۱- درصد عناصر موجود در فولاد نرم.

عنصر	Fe	C	Si	Mn	P	S	Al
درصد وزنی	۹۹/۰۱	۰/۱۹	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴

^۱Atomic force microscope

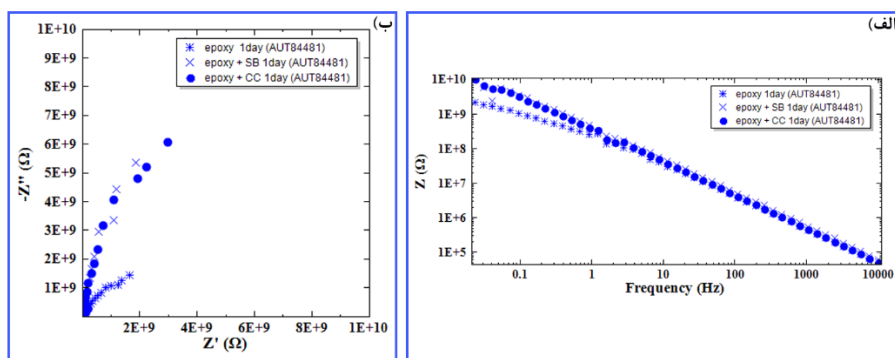
کرده است. افزایش نهایی مقاومت نمونه‌ها را می‌توان به اثر بازدارندگی گروه‌های آمینی حاضر در هاردنر اپوکسی نسبت داد.

۳-۱-۲- آزمون چسبندگی

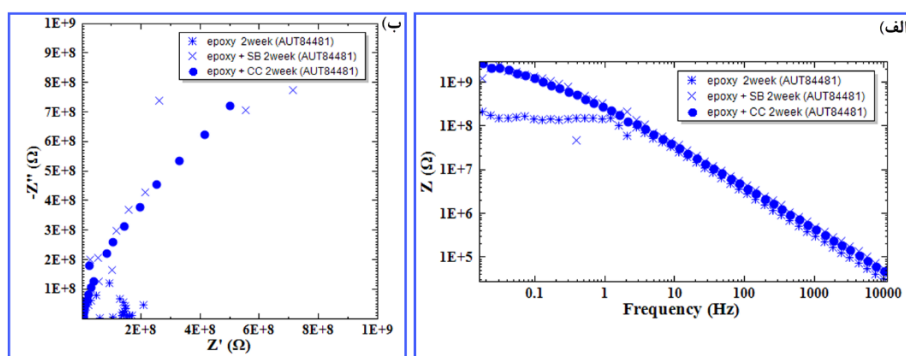
با توجه به جدول ۳ می‌توان دریافت که در حالت حضور پوشش تبدیلی روی سطح، چسبندگی بالاتری نسبت به دو نمونه دیگر مشاهده می‌گردد. یکی از دلایل این افزایش چسبندگی پوشش به زیرآیند را می‌توان به تغییر مورفولوژی و شیمی سطح زیرآیند با استفاده از پوشش تبدیلی بر پایه H_2ZrF_6 نسبت داد. حضور عنصر زیرکونیوم با ظرفیت‌های متنوع یک، دو، سه و چهار احتمالاً سبب ایجاد باندهای شیمیایی بیشتر و در نهایت چسبندگی بالاتر می‌شود [۳۰]. وجود پیوندهای شیمیایی و فیزیکی تأثیر بسزایی در چسبندگی پوشش اپوکسی بر سطح زیرآیند دارد. در صورت وجود اکسید آهن بر سطح فلز از ایجاد پیوندهای هیدروژنی و واندروالس جلوگیری خواهد شد. با ایجاد سطحی تمیز و بدون اکسید بر روی فلز چسبندگی بالاتری را می‌توان شاهد بود و از سوی دیگر در سطح پرخلل و فرج امکان نفوذ پوشش به داخل این نواحی بیشتر خواهد بود و در نهایت با ایجاد پیوند و قفل شدن پوشش در حفره‌ها شاهد بهبود چسبندگی خواهیم بود. به نظر می‌رسد با توجه به خلل و فرج شکل گرفته بر روی سطح بعد از اصلاح سطحی توسط پوشش تبدیلی مکانیزم قفل شدن مکانیکی^۱ غالب بر دیگر مکانیزم‌ها باشد. البته از دلایل دیگر برای بالاتر بودن میزان چسبندگی نمونه‌ی آماده‌سازی شده توسط پوشش تبدیلی نسبت به نمونه‌ی آماده‌سازی شده توسط سندبلاست را می‌توان به این مورد ارتباط داد که اندازه خلل و فرج موجود در آماده‌سازی سندبلاست بیش از حد می‌باشد به طوری که قفل شدن مکانیکی به طور کامل صورت نمی‌پذیرد و میزان چسبندگی بصورت جزئی کاهش پیدا می‌کند.

با گذر زمان در نمونه سنباده زده شده، نفوذ الکترولیت به داخل پوشش صورت گرفته و از مقدار مقاومت آن کاسته شده است. بعد از زمان دو هفته الکترولیت به داخل پوشش نفوذ کرده است و رفتار نمودارهای امپدانس نشان دهنده ظهور ثابت زمانی دوم به عنوان شبیه ساز رفتار فصل مشترک فلز/ پوشش آلی و یا پوشش تبدیلی/ پوشش آلی می‌باشد. بعد از گذشت چهار هفته از غوطه‌وری نمونه‌ها مقاومت گزارش شده برای نمونه‌ای که تنها سنباده زده شده است به ۱۰۶ اهم رسیده است. با توجه به اعمال پوشش تبدیلی بر پایه زیرکونیوم، انتظار می‌رود مقاومت‌های گزارش شده برای لایه دوگانه سطوحی که دارای پوشش تبدیلی می‌باشند، بالاتر از مقادیر گزارش شده برای سطوح با آماده سازی مکانیکی باشد. در مدت‌های کوتاه‌تر، دو نیم دایره (دو ثابت زمانی) در هم ادغام شده و بیشتر به صورت یک نیم دایره به نظر می‌رسند اما با گذر زمان تفکیک این دو نیم دایره از یکدیگر راحت‌تر است. این امر به وضوح در نمونه‌ها پس از چهار هفته غوطه‌وری دیده می‌شود. قطر کلی نمودار نایکوئیست که در مدارهای تک ثابتی معادل با قطر نیم دایره و در مدارهای دو ثابتی حاصل جمع قطر دو نیم دایره است بیانگر مقاومت پلاریزاسیون سیستم است و معیاری از مقاومت به خوردگی کلی سیستم را ارائه می‌دهد. جدول ۲ نتایج آزمون امپدانس الکتروشیمیایی نمونه‌ها پس از میانگین گرفتن برای تکرارهای مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲ نمونه‌ی دارای پوشش تبدیلی بالاترین مقاومت به خوردگی را در زمان‌های مختلف غوطه‌وری نسبت به دو نمونه دیگر از خود نشان داده است که این امر را می‌توان به این علت دانست که با نفوذ الکترولیت و دستیابی آن به سطح، با توجه به اینکه شیمی و فیزیک سطح در اثر اعمال پوشش تبدیلی تغییر پیدا کرده است [۲۹]، واکنش‌های آندی و یا کاتدی به سختی انجام می‌شود و مقاومت آنها افزایش پیدا

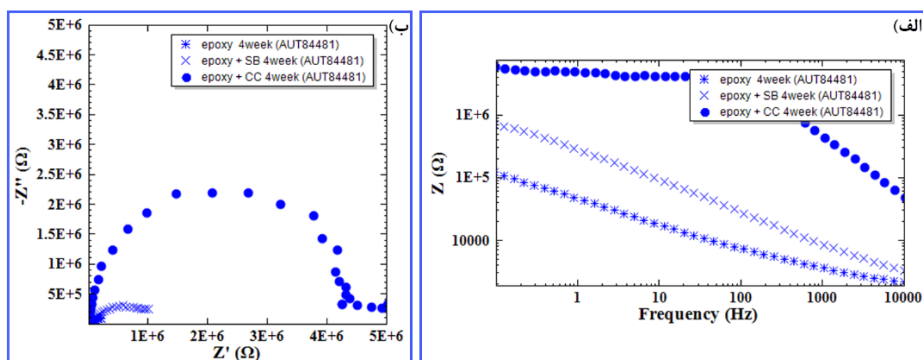
^۱Mechanical interlocking



شکل ۱- منحنی‌های باد (الف) و نایکوئیست (ب) نمونه‌های پوشش داده شده با لاک اپوکسی بر روی سطوح فولادی آماده سازی شده بعد از یک روز غوطه‌وری (CC=پوشش تبدیلی و SB=سندبلاست).



شکل ۲- منحنی‌های باد (الف) و نایکوئیست (ب) نمونه‌های پوشش داده شده با لاک اپوکسی بر روی سطوح فولادی آماده سازی شده بعد از دو هفته غوطه‌وری (CC=پوشش تبدیلی و SB=سندبلاست).



شکل ۳- منحنی‌های باد (الف) و نایکوئیست (ب) نمونه‌های پوشش داده شده با لاک اپوکسی بر روی سطوح فولادی آماده سازی شده بعد از چهار هفته غوطه‌وری (CC=پوشش تبدیلی و SB=سندبلاست).

جدول ۲- مقدار امپدانس کل در فرکانس پایین بدست آمده از برازش آزمون طیف سنجی الکتروشیمیایی نمونه‌های پوشش داده شده به وسیله لاک اپوکسی با شرایط مختلف آماده‌سازی شده (اعداد با واحد اهم می باشند)

نمونه	بعد یک روز غوطه وری	بعد از دو هفته غوطه وری	بعد از چهار هفته غوطه وری
نمونه سمباده زده شده	$2/4 \times 10^{-9}$	$2/2 \times 10^{-8}$	7×10^{-5}
نمونه حاوی پوشش تبدیلی	2×10^{-10}	$2/7 \times 10^{-9}$	6×10^{-6}
نمونه حاوی سند بلاست	$6/2 \times 10^{-9}$	$1/7 \times 10^{-9}$	4×10^{-6}

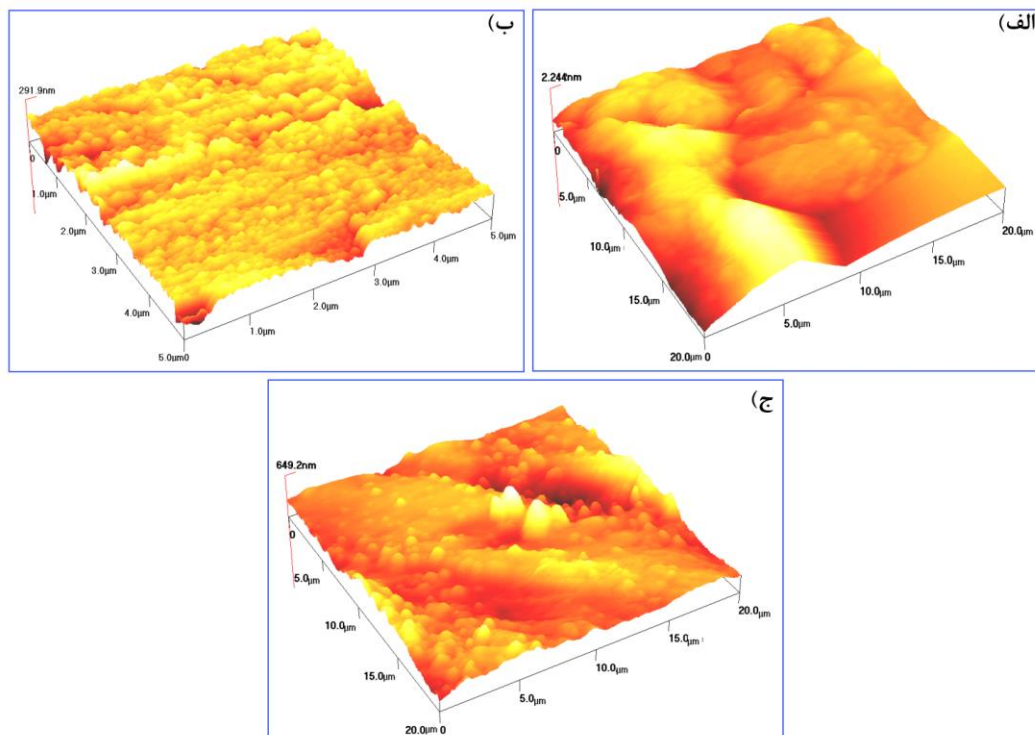
۳-۱-۳- آزمون میکروسکوپ نیروی اتمی

میکروسکوپ نیروی اتمی ابزار مناسبی برای بررسی زبری سطح در مقیاس میکرو/نانو است. به منظور بررسی زبری سطح و هم چنین اندازه‌ی ذرات بر روی سطوح آماده‌سازی شده از آزمون میکروسکوپ نیروی اتمی استفاده شد. شکل ۴ تصویر سه بعدی نمونه شاهد فولاد سنباده زده شده، نمونه‌ی آماده‌سازی شده با پوشش تبدیلی و نمونه‌ی آماده‌سازی شده از طریق سندبلاست را نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر AFM مشاهده می‌شود که سطح فولاد قبل از اعمال پوشش تبدیلی زبری متوسطی برابر با ۳۰۲ نانومتر دارد، بعد از اعمال پوشش تبدیلی زیرکونیوم به وضوح ذرات بسیار ریز و کروی شکل بر روی سطح مشاهده می‌شوند. اندازه‌ی زبری متوسط برای

پوشش تبدیلی زیرکونیوم برابر با ۱۵۰ نانومتر می‌باشد. ایجاد یک سطح با زبری نانومتری می‌تواند سطح تماس با پوشش آلی را افزایش دهد و در نتیجه شانس چسبندگی مناسب پوشش آلی بعدی را نیز افزایش دهد. شکل ۴-ج وضعیت سطح آماده‌سازی شده از طریق سندبلاست را نشان می‌دهد که زبری آن در حدود ۱۰۰۰ نانومتر رسیده است. همان طور که قبلاً گفته شد، زبری در اندازه‌های نانومتری می‌تواند مقیاسی از چسبندگی بالاتر سطح باشد، پس انتظار می‌رود میزان چسبندگی نمونه‌ی آماده‌سازی شده با پوشش تبدیلی از نمونه‌ی آماده‌سازی شده از طریق سندبلاست بالاتر باشد که نتایج حاصل از آزمون Pull-off نیز این ادعا را ثابت کرد

جدول ۳- نتایج بدست آمده از آزمون Pull-Off بر روی نمونه های آماده سازی شده.

نمونه	Pull-off (MPa)
نمونه دارای سندبلاست	۳/۷
نمونه دارای پوشش تبدیلی	۴/۱
نمونه سنباده زده شده	۱/۹



شکل ۱- تصاویر سه بعدی نمونه فولادهای آماده سازی شده (الف) سندبلاست، (ب) پوشش تبدیلی زیرکونیوم و (ج) سنباده.

۳-۲- تاثیر رنگدانه پرک شیشه بر رفتار مقاومت به

خوردگی پوشش اپوکسی

در ادامه برای بررسی تاثیر رنگدانه پرک شیشه بر روی رفتار مقاومت به خوردگی پوشش اپوکسی بر روی زمینه‌های آماده‌سازی شده از طریق پوشش تبدیلی از درصد‌های مختلف پرک شیشه در رنگ استفاده می‌شود (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد). رنگدانه‌های پرک شیشه با قرار گرفتن در منافذ و خلل و فرج پوشش از یک سو و از طرفی به دلیل واکنش ناپذیری شیمیایی که دارند به عنوان مانعی در برابر یون‌های خورنده عمل می‌کنند و از سوی دیگر به دلیل نارسا بودن، با کاهش تمایل به خوردگی، موجب افزایش مقاومت به خوردگی می‌شوند.

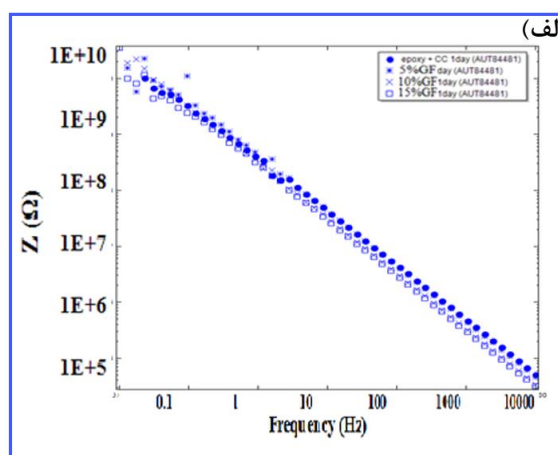
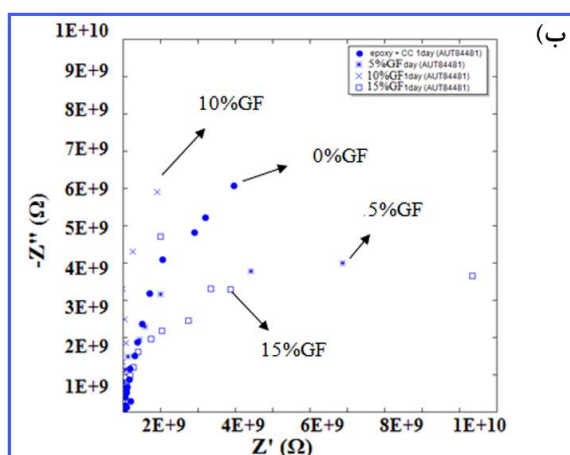
۳-۲-۱- آزمون طیف سنجی امپدانس

الکتروشیمیایی

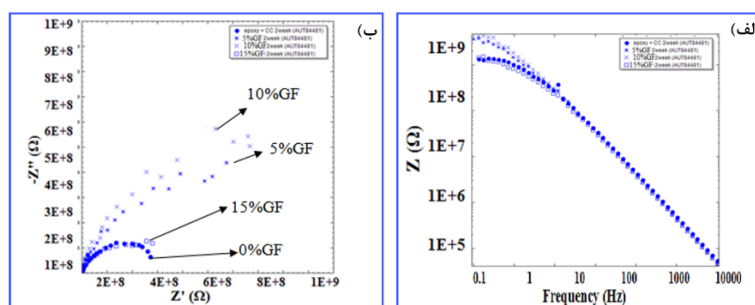
با توجه به نتایج به دست آمده از آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی مشاهده می‌گردد که اضافه کردن رنگدانه پرک شیشه در هردردصدی به پوشش باعث افزایش میزان مقاومت به خوردگی پوشش می‌گردد. با توجه به شکل‌های ۵ در زمان‌های اولیه مقدار مقاومت‌ها نزدیک به هم بوده است. همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است با گذشت زمان تا دو هفته میزان مقاومت به خوردگی پوشش حاوی ۱۰ درصد پرک شیشه با دارا بودن مقدار امپدانس در فرکانس

پایین برابر با 8×10^9 اهم. سانتی متر مربع بیشترین میزان مقاومت به خوردگی را نسبت به ۵ و ۱۵ درصد دارا می‌باشد. این روند با گذشت ۴ هفته از غوطه‌وری نیز به همین ترتیب است (شکل ۵)، در واقع کاهش میزان مقاومت در پوشش حاوی ۱۵ درصد از پرک شیشه نشان دهنده‌ی آن است که در درصد‌های بالا، میل به تجمع در ذرات پرک شیشه مشاهده می‌شود و به دلیل کاهش مشارکت آنها در پوشش، منافذ و خلل و فرج‌های پوشش، مسیری برای نفوذ یون‌های خورنده می‌باشد. مشارکت کمتر ذرات پرک شیشه باعث افزایش اندازه ذرات می‌شود، در نتیجه عدم نفوذ کامل زنجیرهای رزین بین ذرات باعث تجمعات ذرات می‌شود، در مقابل انسجام ذرات کاهش پیدا می‌یابد و عوامل خورنده در کمترین زمان ممکن می‌تواند از کوتاه‌ترین مسیر به درون پوشش نفوذ کنند.

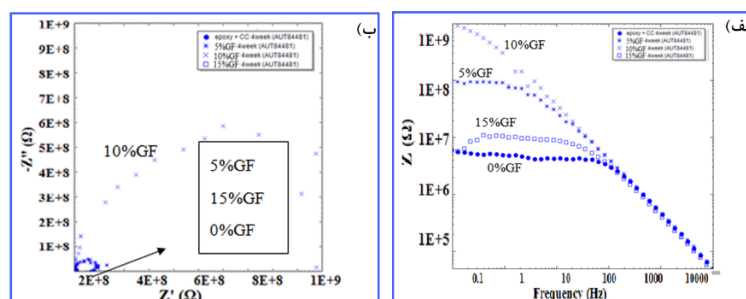
ساختار شماتیکی از نوع قرار گیری رنگدانه‌های پرک شیشه در شکل ۸ آورده شده است [۳۱]. در واقع می‌توان گفت زمانی که مقدار ذرات پرک شیشه زیاد باشد این ذرات امکان جهت‌گیری مناسب برای رفتار مقاوم در برابر یون‌های خورنده را نخواهند داشت و هم‌چنین پخش مناسب می‌تواند سبب افزایش مسیر دسترسی الکترولیت به سطح فلز شود که در قسمت ب شکل ۸ قابل مشاهده است.



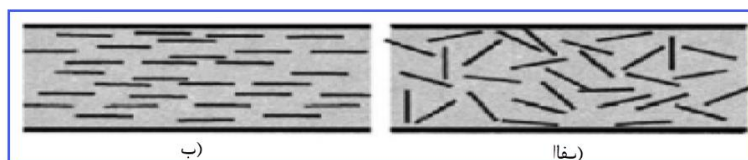
شکل ۲- منحنی‌های باد (الف) و نایکوئیست (ب) نمونه‌های پوشش داده شده اپوکسی/پرک شیشه بر روی سطوح فولادی آماده سازی شده بعد از یک روز غوطه‌وری.



شکل ۳- منحنی های باد (الف) و نایکوئیست (ب) نمونه های پوشش داده شده اپوکسی/پرک شیشه بر روی سطوح فولادی آماده سازی شده توسط پوشش تبدیلی بعد از دو هفته غوطه وری.



شکل ۴- منحنی های باد (الف) و نایکوئیست (ب) نمونه های پوشش داده شده اپوکسی/پرک شیشه بر روی سطوح فولادی آماده سازی شده توسط پوشش تبدیلی بعد از چهار هفته غوطه وری.



شکل ۵- شماتیک نوع قرار گیری رنگدانه های پرک شیشه (الف) جهت گیری و پخش نامناسب (ب) جهت گیری و پخش مناسب.

جدول ۴. مقادیر امپدانس کل در فرکانس پایین $|Z|_{lf}$ بدست آمده از آزمون طیف سنجی الکتروشیمیایی نمونه های پوشش داده شده به وسیله اپوکسی/پرک شیشه با درصد های مختلف پرک شیشه (اعداد با واحد اهم می باشند)

نمونه	یک روز غوطه وری	دوهفته غوطه وری	چهار هفته غوطه وری
عدم حضور پرک شیشه	2×10^{10}	$4/7 \times 10^9$	6×10^6
۵ درصد پرک شیشه	$4/7 \times 10^{10}$	$6/9 \times 10^9$	$9/7 \times 10^7$
۱۰ درصد پرک شیشه	5×10^{10}	$8/8 \times 10^9$	4×10^9
۱۵ درصد پرک شیشه	$2/9 \times 10^{10}$	$4/9 \times 10^9$	$7/6 \times 10^6$

مقادیر امیدانس کل در فرکانس پایین $|Z|_{lf}$ بدست آمده از آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در جدول ۴ آورده شده است. همان طور که مشخص است نمونه‌ی پوشش داده شده در عدم حضور پرک شیشه بعد از چهار هفته غوطه‌وری با کاهش بسیار زیاد میزان مقاومت به خوردگی همراه است که می‌توان به نفوذ الکترولیت در پوشش در همان زمان‌های ابتدایی نسبت داد. همان طور که مشخص است، نمودارهای باد شکل (۵-الف) مربوط به نمونه‌ی پوشش داده شده در عدم حضور پرک شیشه بعد از دو هفته غوطه‌وری نفوذ الکترولیت به داخل پوشش را اثبات می‌کند. نتایج جدول نشان می‌دهد نمونه‌ی حاوی ۵ درصد پرک شیشه میزان مقاومت پایین‌تری را نسبت به نمونه‌ی حاوی ۱۰ درصد در زمان‌های مختلف غوطه‌وری را دارا می‌باشد که این مورد را می‌توان به پایین بودن مقدار پرک شیشه در پوشش نسبت داد که سبب به وجود آمدن منافذی برای عبور یون‌های خورنده در پوشش می‌گردد.

۳-۲-۲- آزمون مه نمکی

آزمون مه نمکی یکی از آزمون‌های تشدید یافته خوردگی است که برای شبیه‌سازی محیط خورنده جهت بررسی عملکرد ضد خوردگی پوشش‌ها به طور کیفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مرحله برای سنجش عملکرد نمونه‌ها در محیط خورنده، تمام نمونه‌ها با ۲ بار تکرار به مدت ۲۰۰ ساعت درون دستگاه مه نمکی قرار گرفتند و در زمان‌های ۲۴، ۴۸، ۱۱۰ و ۲۰۰ ساعت عکس برداری از نمونه‌ها صورت گرفته است. تصاویر درج شده در جدول ۵ مربوط به آزمون مه نمکی انجام شده بر روی نمونه‌های مختلف است. کدهای نوشته شده در جدول ۵ به صورت زیر معرف هر یک از نمونه‌ها و ویژگی‌های آن‌ها است.

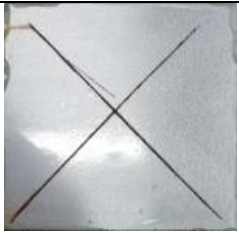
E/SB: نمونه اپوکسی اعمال شده بر سطح سندبلاست شده.
E/CC: نمونه اپوکسی اعمال شده بر سطح دارای پوشش تبدیلی زیر کونیوم.
E5GF: نمونه اپوکسی حاوی ۵٪ وزنی پرک شیشه اعمالی بر سطح دارای پوشش تبدیلی.

E10GF: نمونه اپوکسی حاوی ۱۰٪ وزنی پرک شیشه اعمالی بر سطح دارای پوشش تبدیلی.
E15GF: نمونه اپوکسی حاوی ۱۵٪ وزنی پرک شیشه اعمالی بر سطح دارای پوشش تبدیلی.
با توجه به جدول ۵، دو ردیف اول که لاک اپوکسی بر سطح سندبلاست شده و سطح دارای پوشش تبدیلی اعمال شده است، به وضوح دیده می‌شود که خوردگی در اطراف کراس کات ایجاد شده به شدت در نمونه بدون پوشش تبدیلی در کلیه زمان‌های بررسی شده گسترده‌تر از نمونه دارای پوشش تبدیلی است. میزان محصولات خوردگی ایجاد شده در شیار اعمال شده در نمونه‌ی بدون پوشش تبدیلی بیشتر بوده و همچنین گسترش خوردگی در قسمت‌های زیر پوشش اطراف شیار به وضوح در نمونه‌ی بدون پوشش تبدیلی بیشتر است. این امر نشان دهنده‌ی این است که اعمال پوشش تبدیلی در مقایسه با نمونه‌ای که سندبلاست شده است، با تغییر مورفولوژی سطح چسبندگی رنگ به زیر آیند را افزایش داده و از گسترش خوردگی زیر پوشش جلوگیری کرده است. همچنین با تغییر شیمی سطح در اثر ایجاد پوشش تبدیلی، واکنش‌های خوردگی بر روی سطح به سختی انجام می‌گیرد. با انتخاب سطح دارای پوشش تبدیلی به عنوان سطح مقاوم در برابر خوردگی، حال رنگ‌های حاوی درصد‌های مختلف وزنی (۵، ۱۰ و ۱۵) بر روی سطح دارای پوشش تبدیلی اعمال شده است. همانطور که از تصاویر مندرج در جدول ۵ مشخص است، نمونه‌ی دارای ۱۰ درصد وزنی پرک شیشه مقاوم‌ترین نمونه در برابر خوردگی است. چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش زمان غوطه‌وری همچنان نمونه‌ی دارای ۱۰ درصد وزنی پرک شیشه مقاومت بالایی نسبت به سایر نمونه‌ها از خود نشان داده است. این نمونه هم محصولات خوردگی کمتری در شیارهای اعمال شده دارد و هم گسترش خوردگی به زیر پوشش در اطراف شیار در آن در حداقل خود نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد. با مقایسه‌ی نمونه‌ی دارای پرک شیشه با نمونه‌های لاک اپوکسی مشاهده می‌شود که گسترش خوردگی زیر پوشش به شدت کاهش پیدا کرده است و همچنین سرعت خوردگی نیز به شدت

کمتر شده است، چرا که در زمان‌های مشابه میزان محصولات خوردگی در مقایسه با نمونه‌های دارای لاک اپوکسی کمتر است. این امر نشان دهنده‌ی اثر بازدارندگی خوردگی پرک

شیشه است که می‌توان آن را به افزایش طول مسیر دستیابی عوامل خوردنده به سطح نسبت داد.

جدول ۵- تصاویر نمونه‌های پوشش داده شده با اپوکسی در حضور و عدم حضور پرک شیشه در آزمون مه نمکی در زمان‌های مختلف.

نمونه/مدت زمان غوطه‌وری	بعد از ۲۴ ساعت غوطه‌وری	بعد از ۴۸ ساعت غوطه‌وری	بعد از ۱۱۰ ساعت غوطه‌وری	بعد از ۲۰۰ ساعت غوطه‌وری
E/SB				
E/CC				
E5GF				
E10GF				
E15GF				

نتیجه گیری

در این تحقیق اثر دو آماده سازی سطح (پوشش تبدیلی و سندبلاست) بر رفتار مقاومت در برابر خوردگی پوشش لاک اپوکسی اعمالی بر روی استیل ۳۷ نشان داد که میزان مقاومت به خوردگی و چسبندگی لاک اپوکسی برای نمونه‌های آماده‌سازی با پوشش تبدیلی از نمونه‌ی آماده سازی شده از طریق سندبلاست در زمان‌های مختلف غوطه‌وری بیشتر می‌باشد. این بالاتر بودن میزان مقاومت به خوردگی و چسبندگی را می‌توان به این مورد نسبت داد که در آماده‌سازی از طریق پوشش تبدیلی علاوه بر تغییر در ناهموری‌های سطح، شیمی سطح را نیز تغییر می‌دهد که باعث سخت‌تر شدن انجام واکنش‌های کاتدی و آندی گشته و میزان خوردگی را کاهش می‌دهد. همچنین با ایجاد ناهموری‌های نانومتری تر نسبت به آماده‌سازی از طریق سندبلاست، میزان چسبندگی پوشش اپوکسی را بیشتر افزایش می‌دهد. اضافه کردن رنگدانه‌ی ضدخوردگی پرک شیشه باعث افزایش میزان مقاومت به خوردگی پوشش حاصل می‌گردد. بهترین میزان درصد پرک شیشه ۱۰ درصد وزنی می‌باشد. افزایش میزان پرک شیشه از ۱۰ به ۱۵ درصد به دلیل ایجاد تجمعات و جهت‌گیری نامناسب رنگدانه‌های پرک شیشه در پوشش باعث کاهش مقاومت به خوردگی پوشش می‌گردد.

مراجع

- [1] Š. Kavecký, P. Štefánik, K. Iždinský, Š. Nagy, P. Šebo, N. Beronská, A. Opálek, Erosion resistance of copper / alumina composite, Kovove Ma[^۱] H. D. Young, Sears and Zemanskys College Physics, 9th ed. Boston: [Addison-Wesley](#), 1999.
- [2] TSN. Sankara Narayanan, Surface pretreatment by phosphate conversion coatings-A review, Reviews in Advanced Materials Science, 9, 2005, pp.130-177.
- [3] A. Kausar, Corrosion prevention prospects of polymeric nanocomposites: A review, Journal of Plastic Film & Sheeting, 35(2), 2019, pp.181-202.
- [4] U.S. Department of Commerce, Bureau of Census, Current Industrial Reports-Paint and Coating Manufacturing; <http://www.census.gov>
- [5] R. A. Cottis, S. Turgoose, R. Neuman, Corrosion testing made easy: impedance and noise analysis, 1999.
- [6] H. Leidheiser, Metals Handbook, 9th ed, Ohio, American Society of Metals, 1987.
- [7] P. G. Dhirde, V. G. R. Chada, B. P. Mallik, N. Moitra, Alkyd-Clay Nanocomposites for Improved Anticorrosion & Mechanical Performance of Coating, Polymer Composites, 39(8), 2018, p. p. 2922-2931.
- [8] CMH. Hagen, A. Hognestad, O. Knudsen, K. Sørby, The effect of surface roughness on corrosion resistance of machined and epoxy coated steel, Progress in Organic Coatings, 130, 2019, pp.17-23.
- [9] K. Dusek, M. Duskova, Network structure formation during crosslinking of organic coating systems, Progress in Polymer Science., 25(9), 2000, p. p. 1215-1260.
- [10] H. Eivaz Mohammadloo, A. A. Sarabi, H. R. Asemani, P. Ahmadi, A comparative study of eco-friendly hybrid thin films: With and without organic coating application. Progress in Organic Coatings, 125, 2018, pp.432-442.
- [11] M. Tomić, B. Dunjić, V. Likić, The use of nanoclay in preparation of epoxy anticorrosive coatings, [Prog. in Organic Coating](#), 77(2), 2014, p. p. 518-527.
- [12] K. H. Yang, Study of vanadium-based chemical conversion coating on the corrosion resistance of magnesium alloy, Materials Chemistry and Physics 101.2-3, 2007, 480-485.
- [13] J. Gray, B. Luan, Protective coatings on magnesium and its alloys—a critical review, Journal of alloys and compounds, 336(1-2), 2002, pp.88-113.
- [14] S. Adhikari, K. A. Unocic, Y. Zhai, G. S. Frankel, J. Zimmerman, W. Fristad, Electrochim. Acta., 56, 2011, 1912-1924.
- [15] T. Schram, G. Goeminne, H. Terryn, W. Vanhoolst, P. Van Espen, I.M.F, 73, 1995, 91-95.
- [16] H. Eivaz Mohammadloo, A. A. Sarabi, A. A. Sabbagh Alvani, H. Sameie, R. Salimi, Surface and Coating Technology, 206, 2012, 4132-4139.
- [17] H. Eivaz Mohammadloo, A. A. Sarabi, R. Mohammad Hosseini, M. Sarayloo, H. Sameie, R. Salimi, Progress. Organic Coating, 77, 2014, 322-330.
- [18] H. Li, K. Liang, L. Mei, S. Gu, S. Wang, Mater. Sci. Lett., 20, 2001, 1081-1083.
- [19] L. Fedrizzi, F. J. Rodriguez, S. Rossi, F. Deflorian, R. Di Maggio, Electrochim. Acta., 46, 2001, 3715-3724.
- [20] G. Gusmano, G. Montesperelli, M. Rapone, G. Padeletti, A. Cusma, S. Kaciulis, A. Mezzi, R. Di Maggio, Surface Coating Technology, 201, 2007, 5822-5828.

- [21] R. Di Maggio, L. Fedrizzi, S. Rossi, *Adhes. Sci. Technol*, 15, 2001, 793-808.
- [22] Introduction to surface coating and modification for metallic biomaterials. *Surface Coating and Modification of Metallic Biomaterials*, 2015, p1.
- [23] P. A. Sørensen, S. Kiil, K. Dam-Johansen, C. E. Weinell, Anticorrosive coatings: a review, *Journal of Coatings Technology and Research*, 6(2), 2009, pp.135-176.
- [24] Z. Wang, W. Ke, *Polymer Degradation and stability*, 91, 2006, 1937-1947.
- [25] M. F. Uddin, *Composite science and Technology* 68, 2008, 1937-1943.
- [26] J. Gonzalez-Guzmn, J.J. Santana, S. Gonzalez, R.M. Souto, *Progress in Organic Coatings*, 68, 2010, 240-243.
- [27] رضایی، تاثیر عملیات حرارتی و سندبلاست بر روی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ و میزان زبری سختی، ۱۳ امین همایش علمی و دانشجویی مهندسی مواد و متالورژی ایران.
- [28] R. Mohammad Hosseini, A.A. Sarabi, H. Eivaz Mohammadloo, M. Sarayloo, The performance improvement of Zr conversion coating through Mn incorporation: With and without organic coating, *Surface and Coatings Technology*, 258, 2014, 437-446.
- [29] پرویز احمدی، علی اصغر سرابی، بررسی مقاومت به خوردگی پوشش تبدیلی بر پایه هگزا فلئوئورزیر کونیک اسید بر روی زمینه فولاد نورد سرد و فولاد نرم، پایان نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده ی پلیمر و رنگ، ۱۳۹۲.
- [30] A. A. Hermas, M. S. Morad, *Corrosion Science*, 50, 2008, 2710-2717.
- [31] G. G. Oliveira, A. D. Gotsis, *European Polymer Journal*, 45, 2009, 967-984.
- terial, Vol. 53, 2015, Pp. 463-470.

