

ارزیابی پارامترهای پوشش تبدیلی سریومی بر خواص استحکام و چسبندگی چسب‌های اپوکسی بهینه شده با الاستومرهای بوتادین و ذرات گرافن اکساید

هادی اولیایی^۱، حامد فروتن^{۲*}، محمدرضا کلائی^۳

۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

۲ دانشجوی دکتری، پژوهشکده مواد رنگزا، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران

۳ دانشیار، گروه مهندسی پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

تاریخ دریافت:

۹۹/۰۱/۲۹

تاریخ پذیرش:

۹۹/۰۵/۲۰

استحکام پایین چسب‌های اپوکسی و همچنین عدم چسبندگی آن‌ها به سطوح آلومینیومی استفاده از این رزین را در برخی کاربردهای خاص از جمله صنایع هوایی با چالش جدی مواجه کرده است. به منظور بهبود استحکام کششی از دو نوع اصلاح‌کننده لاستیکی اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) و متاکریلات بوتادین استایرن (MBS) استفاده شد، به بهترین نمونه حاصل ذرات اکسید گرافن (GO) به میزان یک و دو درصد اضافه شده و در نهایت بهترین نمونه حاصل به لحاظ فیزیکی و مکانیکی انتخاب شد، در ادامه به منظور چسبندگی بهتر کامپوزیت اپوکسی به آلیاژ آلومینیم AA2024-T3، از پوشش تبدیلی سریومی در شرایط بهینه استفاده شد. نتایج حاصل از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و منحنی پلاریزاسیون نشان داد که پوشش تبدیلی سریوم در غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سریوم نیترات، pH برابر ۳/۵ و زمان غوطه‌وری ۱۵ دقیقه به دلیل تشکیل پوشش یکنواخت بر روی سطح بالاترین میزان مقاومت به خوردگی و چسبندگی را ایجاد کرده است، همچنین، تصاویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی تشکیل پوشش تبدیلی سریوم به صورت یکنواخت بر روی سطح نمونه را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از آزمون تنش-کرنش نیز نشان داد که استحکام کششی نمونه‌ی حاوی ۴ درصد ABS به میزان ۷۰ درصد افزایش داشته و با افزودن ۱ درصد GO به آلیاژ، استحکام آن ۴۷ درصد افزایش پیدا می‌کند. همچنین افزایش ۱۱۴ درصدی چسبندگی در حضور پوشش‌های تبدیلی نسبت به نمونه‌های بدون پوشش در آزمون استحکام برشی مشاهده شد. آزمون چسبندگی نیز افزایش قابل توجه استحکام چسبندگی را در حضور پوشش‌های تبدیلی سریومی نشان می‌دهد.

رزین اپوکسی، چقرمه کردن اپوکسی، گرافن اکساید، پوشش‌های تبدیلی سریومی

واژگان کلیدی

Evaluation of Cerium conversion Coating Parameters on Strength and Adhesion Properties of Optimized Epoxy Adhesives containing Butadiene Elastomers and Graphene Oxide Particles

H. Oliaie¹, H. Forootan^{2*}, M.R. Kalaei³

1. M.Sc, Department of Polymer Engineering and Color Technology, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2. Ph.D. Student, Department of Organic Colorants, Institute for Color Science and Technology, Tehran, Iran

3. Associate Professor, Department of Polymer Engineering, Islamic Azad University, Tehran South Branch, Tehran, Iran

Abstract

The low strength of epoxy adhesives as well as their non-adhesion to aluminum surfaces have posed a serious challenge to the use of this resin in some special applications, including the aerospace industry. In order to improve tensile strength, two types of rubber acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and methacrylate butadiene styrene (MBS) rubber modifiers were used. In order to better adherence of epoxy composites to the aluminum alloy AA2024-T3, the cerium conversion coating was used in optimal conditions. The results of electrochemical impedance spectroscopy and polarization curve showed that the obtained cerium conversion coating at 20 g / l cerium nitrate concentration, pH of 3.5, and 15 min of immersion time, has provided a uniform coating on the surface with the highest corrosion resistance and adhesion properties. Besides, the images of field emission scanning electron microscopy showed the formation of uniform cerium conversion coatings on the sample surface. The results of the stress-strain experiment showed that the addition of 4% of ABS and 1% of GO increased the tensile strength of up to 70% and 47%, respectively. Using conversion coatings resulted in a 60% increase of adhesion properties in the lap shear test. The pull-off test also proved a significant rise in adhesion strength due to the presence of conversion coatings.

Keywords

Epoxy Resin; Toughness; Graphene oxide; Cerium conversion coating

۱- مقدمه

مقاومت به خوردگی و شیمیایی بالا، خواص حرارتی خوب، چروک خوردگی و انقباض پایین هنگام تشکیل فیلم، خواص الکتریکی خوب و توانایی واکنش در شرایط مختلف از خصوصیات رزین اپوکسی است. با توجه به خواص مذکور این رزین ها کاربردهای فراوانی داشته و روزبه روز بر موارد مصرف و دامنه کاربرد آن ها افزوده می گردد [۱]. باوجود تمام این ویژگی ها در صورت وجود ترک در ساختار آنها، این رزین ها مقاومت کمی در برابر رشد ترک از خود نشان می دهند و در نتیجه استحکام کششی ضعیفی را از خود نشان می دهند [۲]. به طور کلی پلیمرهای ترموست و به طور خاص رزین اپوکسی به عنوان مواد پلیمری سخت و شکننده شناخته می شوند و در برخی کاربردهای خاص استحکام نسبتا کمی دارند. بنابراین چقرمه سازی و افزایش استحکام کششی به یک ضرورت برای امکان کاربردهای بیشتر از این رزین در کاربردهای خاص تبدیل شده است [۳].

یکی از شناخته شده ترین روشها در اصلاح اپوکسی برای افزایش انعطاف پذیری، استحکام و انرژی شکست آنها، ترکیب با الاستومر های بوتادینی است [۴]. در این راستا ژان و همکاران [۵]، از نانوذرات لاستیکی carboxylic nitrile-butadiene برای بررسی بهبود خواص مکانیکی در سیستم اپوکسی در دو دمای ۷۷ درجه سانتیگراد و دمای محیط استفاده کردند. برای پخش مناسب این ذرات نانو از آسیاب سه غلتکی استفاده شده و نتایج نشان از افزایش ۴۰٪ میزان مقاومت کششی و همچنین افزایش ۴۷٪ کرنش بحرانی شکست در میزان ۱۵ phr از این ذرات می دهد. در پژوهشی که آبادیان و همکاران [۶] انجام داده اند، تاثیر الاستومر ATBN و ذرات بازیافته تایر بر چقرمگی ماتریس اپوکسی بررسی شده است. نتایج حاصله از آزمون SEN-3PB نشان داده که در نمونه حاوی ATBN عملا تغییری در چقرمگی رخ نداده، با این حال بیشترین میزان کرنش بحرانی شکست در نمونه ها مربوط به نمونه ی شامل ۷/۵٪ از الاستومر و ۲/۵٪ تایر بوده است. یحیایی و همکاران [۷] اثر ETPB را بر روی چقرمگی سیستم اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد که مکانیزم اصلی در بهبود خواص مکانیکی، تسلیم برشی و حفره زایی است. سرعت تغییر فرم ایجاد شده بر روی سیستم بر روی میزان حفره زایی موثر است و همچنین سرعت بیشتر تغییر فرم، حفره زایی را کاهش می دهد. شاو و همکاران [۸] جذب انرژی را در آزمون های کششی مورد بررسی قرار دادند، و نتیجه گرفتند که در درصد های مختلف الیاف پنبه جذب انرژی در اثر کشش از ۶۸٪ تا ۲۷۰٪ افزایش پیدا می کند.

وانگ و همکاران نشان دادند که اکسید گرافن (GO) بدلیل آنکه حاوی طیف وسیعی از گروه های عاملی فعال می باشد می تواند با ماتریس پلیمری برهم کنش قوی ایجاد کرده و خواص مکانیکی را بهبود بخشد [۸]، بعنوان مثال هو و همکاران در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که افزودن GO به اپوکسی افزایش سختی و مقاومت در برابر خستگی قابل توجهی را نشان داده ست [۹]، همچنین لیو و

همکاران نشان دادند که افزودن ۱ وزنی. GO به اپوکسی منجر به پیشرفتهای چشمگیر در مقاومت خمشی، مدول خمشی و مقاومت در برابر ضربه می شود [۱۰]، گالپایا و همکاران [۱۱] نیز دریافتند که در حضور ۵/۰٪ گرافن اکساید مدول کششی اپوکسی تقریبا ۳۵٪ افزایش پیدا کرده است.

به دلیل تحمل شوک های حرارتی، داشتن استحکام مناسب به خصوص در دماهای بالا، مقاومت به خستگی، چقرمگی و نسبت استحکام به وزن بالا آلیاژ آلومینیم AA2024-T3، کاربردهای گسترده ای در صنعت هوافضا و هواپیماسازی دارند [۱۲]. همچنین این سری از آلیاژهای آلومینیم از نظر مقاومت در برابر خوردگی و چسبندگی، جزو آلیاژهای ضعیف آلومینیم محسوب می شوند. یکی از راه های بهبود چسبندگی رزین به سطوح صاف و صیقلی فلزی استفاده از پوشش های تبدیلی است. با توجه به آنکه اکثر فلزات یک لایه ی نازک اکسیدی بر روی سطح خود دارند، باور براین است که پوشش های آلی از طریق پیوندهای هیدروژنی و پیوندهای ثانویه به سطوح فلزی می چسبند [۱۳]. علت وابستگی قدرت چسبندگی اپوکسی به تعداد گروه هیدروکسیل، به علت آن است که در حضور آب، اپوکسی ناچار به نحوی آرایش پیدا می کند که گروه های آب دوست مولکول به سمت پایین و گروه های غیر آب دوست به سمت بالا (دور از سطح) قرار گیرند [۱۴]. به منظور آماده سازی سطح فلزات قبل از اعمال پوشش آلی از پوشش تبدیلی استفاده می شود. از آنجایی که پوشش های تبدیلی به تنهایی کاربردی ندارند عموماً به منظور بهبود مقاومت به خوردگی و چسبندگی پوشش آلی به زمینه استفاده می شود. به منظور چسبندگی بیشتر پوشش آلی، پوشش تبدیلی باید خاصیت ترشوندگی را بالا برد [۱۵].

در سه دهه ی گذشته از ترکیبات لاتناید ها از جمله سریم برای جایگزین کردن کروم شش ظرفیتی به منظور افزایش مقاومت به خوردگی و افزایش چسبندگی استفاده شده است. به دلیل فراوانی این ترکیبات در طبیعت و همچنین درجه سمیت کمتر نسبت به کروم شش ظرفیتی تحقیقات بر روی این ترکیبات روزه روز افزایش یافته است [۱۶]. اولین بار هینتون و همکارانش [۱۷] از آب اکسیژنه برای کاهش زمان اعمال پوشش استفاده کرده اند. اثر شتاب دهنده ی آب اکسیژنه بر تشکیل رسوب اکسید و هیدروکسید سریم مربوط به افزایش سریع pH در اثر واکنش های احیا است و همچنین اکسیداسیون سریع سریم سه ظرفیتی به چهار ظرفیتی در محلول است که باعث تشکیل فیلم هیدروکسید سریم چهار ظرفیتی می شود. از معایب پوشش تبدیلی سریم می توان به وجود ترک های زیاد در سطح پوشش اشاره کرد. جهت رفع مشکلات ناشی از پوشش تبدیلی سریم مطالعات بسیاری انجام شده است. هوگس و همکارانش [۱۲] به بررسی نحوه ی تشکیل پوشش تبدیلی سریم و دلایل ایجاد ترک در این پوشش ها بر روی آلیاژ آلومینیم AA2020-T3 پرداختند. آن ها دریافتند که برای کاهش ترک های حاصل از این پوشش از سریم نترات به جای سریم

۲- بخش تجربی

۲-۱ مواد

در این پروژه از رزین اپوکسی اپیران تولیدی در پتروشیمی خوزستان استفاده شد، هم‌چنین نسبت ۱/۷۲ اپوکسی به ۱ از هاردنر اف-۲۰۵ شرکت شل برای ساخت چسب استفاده شد که مشخصات فنی آن در جدول ۱ نشان داده شده است. MBS با گرید (IM812)، که هسته‌ی آن متشکل از الاستومر بوتادین-استایرن بوده و پوسته‌ی متاکریلاتی در اطراف آن به‌منظور ایجاد سازگاری مناسب برای پخش بهتر در اپوکسی از شرکت LG Chem کره‌ی جنوبی تهیه شده‌اند. برای این پروژه از ABS (گرید SD0150) از پتروشیمی تبریز استفاده شده است. ذرات گرافن اکساید نیز (GO) از شرکت سیگما تهیه شده است که مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است. هم‌چنین برای پوشش تبدیلی آلیاژهای آلومینیومی از نمک سریم نیترات شرکت مرک استفاده شده است.

۲-۲ روش کار

۲-۲-۱ آماده‌سازی کامپوزیت‌ها

مراحل تهیه‌ی نمونه‌ها شامل گرم کردن رزین اپوکسی تا دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد اختلاط فیزیکی GO در درصدهای مختلف با رزین اپوکسی تحت همزن مکانیکی با دور ۶۰۰ به مدت ۲ ساعت، استفاده از همزن التراسونیک (با توان ۴۰۰ وات به مدت ۳۰ دقیقه) برای اختلاط بهتر نمونه‌ها، قرار دادن نمونه‌ها در آون خلأ به مدت

کلراید نیز می‌توان استفاده کرد تا باعث کاهش ایجاد ترک شود. در تحقیقی دیگر اثر آماده‌سازی سطح آلیاژ آلومینیم AA2020-T3 از طریق قلیاشویی و اسیدشویی توسط پینک و همکاران [۱۸] بررسی شده است. آنها در ابتدا از محلول قلیاشویی هیدروکسید سدیم برای آماده‌سازی سطح نمونه‌ها استفاده کرده‌اند، سپس پوشش تبدیلی سریم را اعمال کرده‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد اعمال پوشش بعد از قلیاشویی دارای ترک‌های زیادی است.

در تحقیق حاضر از دو نوع ذرات لاستیکی بوتادینی شامل (MBS) و اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) و اکسید گرافن به ترتیب برای بهبود استحکام کششی و مدول رزین اپوکسی استفاده شده است. هم‌چنین برای بهبود خاصیت چسبندگی اپوکسی و مقاومت خوردگی آلیاژ آلومینیم AA2020-T3 از پوشش‌های تبدیلی سریمی استفاده شده است. هدف از انجام این پروژه بهینه‌سازی ترکیب درصد‌های مواد مورد استفاده برای حصول بیشترین استحکام و مدول کششی در ترکیب نانو کامپوزیت اپوکسی بوده است. هم‌چنین برای بهینه‌سازی پوشش تبدیلی سریمی مورد استفاده پارامترهای مختلفی از قبیل غلظت سریم نیترات (۱۰ الی ۴۰ گرم بر لیتر)، pH (۳ الی ۴/۵)، زمان (۱۰ الی ۲۵ دقیقه) و غلظت آب اکسیژنه (۰/۵ الی ۲ میلی‌لیتر بر لیتر) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. فرض بر این است که استفاده از این مقادیر و شرایط بهینه در کنار یکدیگر میزان چسبندگی رزین اپوکسی به سطح آلومینیومی را به میزان قابل توجهی افزایش دهد.

جدول ۱: مشخصات فنی هاردنر F-205

ویسکوزیته در ۲۵°C	وزن معادل هیدروژن	دانسیته در ۲۵°C	میزان توصیه شده برای
۰.۷-۰.۵ Pa.s	۱۰۶-۱۰۲ gr	۱.۰۴ kg/L	Epiran 06
			۵۸ Phr

جدول ۲: مشخصات GO

حالت فیزیکی	PH	اندازه ذره	دانسیته
پودر مشکی	۳	۱۰۰-۵ میکرون	۱.۲ g/ml

جدول ۳: ترکیب درصد مواد استفاده شده در نمونه‌ها

نام نمونه	پوشش تبدیلی	درصد GO	درصد MBS	درصد ABS
E	۰	۰	۰	۰
EA2	ندارد	۰	۰	۲
EA4	ندارد	۰	۰	۴
EA6	ندارد	۰	۰	۶
EM2	ندارد	۰	۲	۰
EM4	ندارد	۰	۴	۰
EM6	ندارد	۰	۶	۰
EA4G1	ندارد	۱	۰	۴
EA4G2	ندارد	۲	۰	۴
CEA4G1	دارد	۱	۰	۴

جدول ۴: ترکیب شیمیایی آلیاژ AA2020-T3

مس	منیزیم	منگنز	آهن	آلومینیم
۴/۴۶	۱/۳۵	۰/۶۴	۰/۲۸	۹۳/۲۷

۲۴ ساعت به منظور از بین رفتن حباب های ناشی از اختلاط فیزیکی می باشد. سپس ABS یا MBS در درصد های مختلف در دمای ۱۹۰ درجه به مدت ۵ ساعت به منظور اختلاط کامل به کامپوزیت اپوکسی گرافن اکساید افزوده شد و در نهایت اضافه کردن هاردنر به نمونه ها تحت پمپ خلأ به مدت ۳ دقیقه به عنوان مرحله ی آخر در نظر گرفته شده است. سپس نمونه ها بر روی ورق آلومینیوم برش داده شده به ابعاد استاندارد، دارای پوشش تبدیلی (یا بدون تبدیل پوششی) به کمک فیلم کش اعمال شد و در ادامه جهت پخت، نمونه ها به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد در آون خلا قرار گرفته و سپس به منظور تکمیل فرایند پخت و post curing در دمای اتاق به مدت ۱۲ ساعت این فرایند تکمیل می گردد. جدول ۳ ترکیب درصد مواد استفاده شده در نمونه ها را نشان می دهد.

۲-۲-۲ آماده سازی پوشش تبدیلی سربومی

در این پژوهش از آلیاژ آلومینیم AA2020-T3 استفاده شده است. نتایج آنالیز کوانتومتری این آلیاژ در جدول ۴ آورده شده است. نمونه ها برای انجام آزمون های الکتروشیمیایی به ابعاد $0.5 \times 20 \times 40$ میلی متر و برای آزمون میکروسکوپ روبش الکترونی به ابعاد $0.5 \times 10 \times 10$ میلی متر برش داده شد. به منظور آماده سازی نمونه ها قبل از اعمال پوشش تبدیلی، ابتدا با استون چربی زایی گردید پس از آن با آب دیونیزه شسته شدند و سپس در محلول ۲ مولار سدیم هیدروکسید به مدت ۶ دقیقه به منظور از بین بردن چربی ها و آلودگی های آلی قلیا شویی شد و بعد از آن در محلول ۵۰ درصد حجمی اسید نیتریک به مدت ۵ دقیقه به منظور از بین بردن لایه های اکسیدی و فعال کردن سطح، اسیدشویی شدند و در مرحله آخر با آب دیونیزه مجدد شسته شدند. پس از آماده سازی، بلافاصله نمونه ها در محلول پوشش تبدیلی سربیم نیترات غوطه ور گردید. محلول پوشش تبدیلی شامل آب مقطر، نمک سربیم نیترات (شرکت مرک) در غلظت های (۱۰، ۲۰، ۴۰ گرم بر لیتر) با pH های مختلف (۳، ۴، ۵/۴) غلظت های مختلف آب اکسیژنه (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ دقیقه) و در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد غوطه ور شد. در ابتدای ساخت محلول، pH حدود ۵ می باشد، جهت تنظیم pH از

اسید نیتریک و هیدروکسید سدیم استفاده شد. تمامی نمونه ها بعد از اعمال پوشش با آب مقطر شستشو شد سپس به منظور خشک شدن به مدت ۲۴ ساعت در هوا نگه داشته شد تا کاملاً خشک شود. در تحقیق انجام شده پارامتر دما با در نظر گرفتن تحقیقات گذشته و همچنین صرفه جویی در مصرف انرژی در دمای محیط در نظر گرفته شد.

۲-۳ آزمون ها

به منظور بررسی چگالی جریان خوردگی (i_{cor}) نمونه های پوشش داده شده و مقایسه با نمونه بدون پوشش از آزمون پلاریزاسیون استفاده شد. آزمون ها توسط دستگاه Autolab PGSTAT 302N انجام شد و توسط نرم افزار Nova 2.11 تحلیل شد. این آزمون در یک سیستم سه الکترودی انجام شد. اجزای سیستم سه الکترودی، شامل الکترود مرجع Ag/AgCl، الکترود کمکی پلاتین و نمونه مورد آزمون نیز به عنوان الکترود کار بود. نمونه ها جهت انجام آزمون پلاریزاسیون در الکترولیتی شامل محلول ۳/۵٪ وزنی نمک سدیم کلراید غوطه ور شد و پس از ۲۰ دقیقه جهت پایداری در محیط الکترولیت آزمون انجام گردید. به منظور اطمینان از قابلیت تکرارپذیری، هر آزمون سه بار تکرار شد. ولتاژ در محدوده ۲۵۰ میلی ولت بالاتر و پایین تر نسبت به پتانسیل مدار باز با سرعت ۱/۵ میلی ولت بر ثانیه روبش شد. چگالی جریان خوردگی با استفاده از روش برون یابی تافل در محدوده پتانسیل ۵۰ میلی ولت بالاتر و پایین تر پتانسیل مدار باز به دست آمد. به منظور بررسی مقاومت به خوردگی نمونه های پوشش داده شده و مقایسه با نمونه بدون پوشش از آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد. آزمون ها توسط دستگاه Autolab PG-STAT 302N انجام شد و توسط نرم افزار Nova 2.11 تحلیل شد. این آزمون در یک سیستم سه الکترودی انجام شد. اجزای سیستم سه الکترودی، شامل الکترود مرجع Ag/AgCl، الکترود کمکی پلاتین و نمونه مورد آزمون به عنوان الکترود کار بود. آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی بر مساحت یک سانتی متر مربع از سطح نمونه ها انجام شد و مابقی نمونه توسط مخلوط مذاب بیروکس و رزین کلو فونی عایق گردید. نمونه ها جهت انجام آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در الکترولیتی شامل محلول ۳/۵٪ وزنی

جدول ۵: مقادیر حاصل از آزمون کشش

نام نمونه	Modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation @break (%)
E	1.77 ± 0.18	35 ± 3	2.5 ± 0.2
EA2	1.69 ± 0.22	42 ± 3	3.2 ± 0.1
EA4	1.65 ± 0.09	51 ± 1	4.5 ± 0.2
EA6	1.61 ± 0.13	46 ± 2	4.1 ± 0.3
EM2	1.75 ± 0.18	32 ± 2	3.6 ± 0.3
EM4	1.73 ± 0.12	30 ± 1	4.3 ± 0.1
EM6	1.66 ± 0.10	29 ± 1	5.1 ± 0.5

۳- نتایج و بحث

۳-۱ خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها

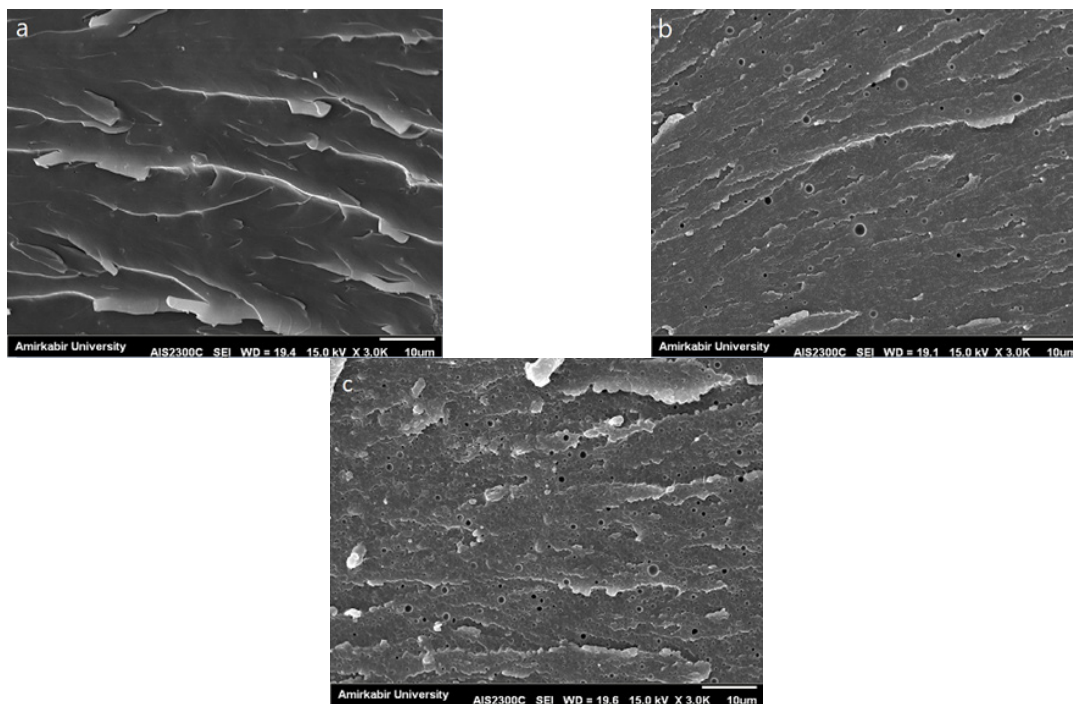
نتایج حاصل از آزمون مکانیکی در جدول ۵ ارائه شده است، همان‌طور که در جدول ۳ مشخص شده با افزایش میزان ABS در تمامی درصد‌ها مدول کششی کاهش یافته است. علت این پدیده ماهیت ترموپلاستیک الاستومری ABS بوده که نسبت به اپوکسی پخت شده مدول کمتری دارد و با افزایش آن در رزین اپوکسی مدول دچار افت بیشتری می‌شود. اما با توجه به ماهیت لاستیکی ABS نیز می‌توان دریافت که تنش وارد شده به نمونه‌ها در حضور ABS نسبت به اپوکسی خالص توسط لاستیک‌های ABS به راحتی دفع می‌شود و همین امر سبب شده تا نمونه‌ها در درصد‌های بالاتر از دایاد طول دچار شکست شوند.

به دلیل حضور زنجیرهای لاستیکی ABS و قابلیت کشسانی بیشتر انتظار می‌رود که با افزایش مقدار جزء الاستیک میزان استحکام کششی در نمونه‌ها بیشتر شود. در درصد‌های ۲ و ۴ ABS استحکام کششی به مقدار ۲۰ و ۴۵ در صد افزایش یافته است. اما با افزایش ABS به مقادیر ۶ درصد استحکام کششی کاهش یافته است هرچند که نسبت به اپوکسی خالص مقدار بالاتری را نشان می‌دهد. علت این افزایش را می‌توان به تغییر در مورفولوژی آلیاژ اپوکسی / ABS نسبت داد. همان‌طور که در مراجع نیز ذکر شده است [۱۹-۲۰] مورفولوژی آلیاژ در درصد‌های کم به صورت قطره ماتریس بوده و لاستیک‌های بوتادینی به صورت قطره‌های نانومتری در ماتریس اپوکسی پخش شده‌اند اما در درصد‌های بالاتر فاصله‌ی بین این قطره‌ها کاهش یافته و به علت ناسازگاری با ماتریس اپوکسی به یکدیگر می‌چسبند و ساختاری

نمک سدیم کلراید غوطه‌ور شد و پس از ۲۰ دقیقه جهت پایداری در محیط الکترولیت آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی انجام گردید. به منظور اطمینان از قابلیت تکرارپذیری، هر آزمون سه بار تکرار شد. این آزمون در محدوده فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۰/۰۱ هرتز با دامنه ۱۰ میلی ولت بالاتر و پایین‌تر از پتانسیل مدارباز صورت پذیرفت. جهت تجزیه و تحلیل نمودارهای حاصل از آزمون طیف‌سنجی امپدانس و برازش این نمودارها با مدار معادل از برنامه Zview 3.1 استفاده شد. آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل Carl zeiss supra 40vp با آشکارساز پراش اشعه ایکس برای بررسی مورفولوژی سطح آلیاژ AA2020-T3 اصلاح شده به وسیله پوشش تبدیلی سریم قبل و بعد از اعمال پوشش تبدیلی سریم استفاده شد همچنین از این آزمون برای بررسی سطح شکست کامپوزیت‌های اپوکسی نیز استفاده شد.

آزمون pull-off جهت بررسی چسبندگی پوشش‌های آلی بر روی سطوح ورق‌های فلزی همراه با پوشش تبدیلی یا بدون آن استفاده شده که با استاندارد ASTM D454 از تست کننده چسبندگی DEFEL-SKO استفاده گردید.

در آزمون کشش خواص مکانیکی (lap shear and tensile) نمونه‌های مختلف با استفاده از یک دستگاه کششی الکترومکانیکی (دستگاه Instron 5566، Elancourt، ساخت فرانسه) مطابق استاندارد ASTM D 632 و ASTM D3163 انجام شد. منحنی تنش کرنش این نمونه‌ها با سرعت کشش ۲ میلی متر بر دقیقه دستگاه به دست آمد. این آزمون حداقل برای سه نمونه انجام گرفت و معنی دار بودن نمونه‌ها بررسی شد و میانگین آن‌ها گزارش شده است.



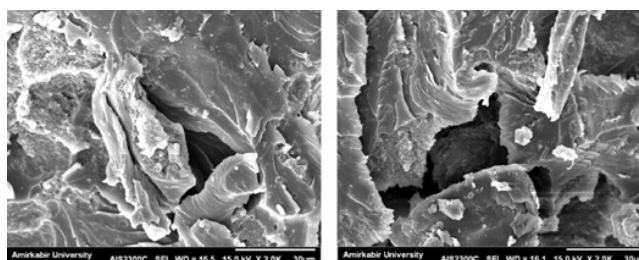
شکل ۱: تصاویر SEM مربوط به آلیاژ اپوکسی در به ترتیب (a) و (b) ۲ و (c) ۴ درصد وزنی از MBS

بیشتر شده و ازدیاد طول تا نقطه‌ی شکست در این کامپوزیت‌ها با افزایش میکرو ذرات MBS افزایش یافته و در کل با توجه به کاهش ناچیز استحکام کششی میزان چقرمگی در تمامی کامپوزیت‌ها افزایش داشته است [۲۰]. علت کاهش ناچیز مدول در آلیاژها نسبت به اپوکسی خالص کمتر بودن مدول ذرات لاستیکی نسبت به اپوکسی پخت شده است. بدین صورت که هرچه درصد ذرات بوتادینی بیشتر شده مدول آلیاژ نیز کمتر می شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت نمونه‌هایی که در درصد های پایین ABS ساخته شده اند هم چقرمگی بیشتری داشته اند و استحکام آن‌ها افزایش یافته است.

۲-۳ بررسی مورفولوژی

تصاویر تهیه شده از نمونه های آلیاژ اپوکسی که در مقادیر مختلف MBS تهیه شده، در شکل ۱ مشاهده می شود. همچنین تصاویر تهیه شده از نمونه های آلیاژ اپوکسی و ABS که در آزمون تنش-کرنش دچار شکست شده اند در شکل ۲ مشاهده می شوند. با مقایسه ی شکل ۱ و ۲ می توان نتیجه گرفت که با توجه به آزمون تنش -کرنش نمونه های حاوی MBS چون دارای

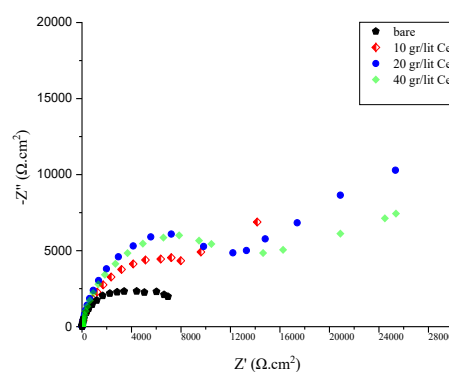
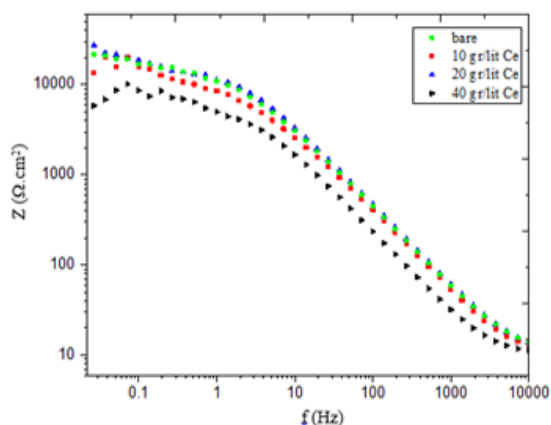
به هم پیوسته تشکیل می دهند. این تغییر مورفولوژی در آلیاژ سبب ایجاد نقاط نقص در ساختار پلیمری شده و رشد ترک در آلیاژ به راحتی صورت می گیرد سطح تماس کمتر لاستیک بوتادین و ماتریس اپوکسی از میزان چقرمگی این رزین در درصد های بالاتر کاسته است. بنابراین نمونه ی حاوی ۴ درصد ABS بیشترین میزان چقرمگی را بین آلیاژ های ساخته شده دارد. اما با افزودن میکرو ذرات MBS و افزایش ترکیب درصد آن ها مدول کامپوزیت های ساخته شده کمتر از اپوکسی خالص شده است، که مورد انتظار نیز می باشد. به علت برهم کنش ضعیفی که بین میکرو ذرات هسته پوسته MBS و ماتریس اپوکسی وجود دارد این برهم کنش های ضعیف به عنوان نقاط نقص عمل کرده و میزان مقاومت و استحکام کششی میکرو کامپوزیت در مقایسه با اپوکسی کاهش یافته است. دلیل دیگر کاهش استحکام کششی این کامپوزیت ها را می توان به تشکیل کلوخه های هسته پوسته در کامپوزیت پلیمری نسبت داد و همان طور که از جدول ۳ مشخص است با افزایش میکرو ذرات و احتمال تشکیل کلوخه های بیشتر میزان استحکام کششی کاهش بیشتری داشته است. اما به دلیل وجود ذرات لاستیکی بوتادینی در سیستم مسیر رشد ترک ها در میکرو کامپوزیت



شکل ۲: تصاویر SEM مربوط به سطح مقطع شکست در تست کشش مربوط به بالک مخلوط اپوکسی در ۲٪ و ۴٪ وزنی ABS (سمت راست) و ۴٪ وزنی ABS (سمت چپ)

جدول ۶: مقادیر محاسبه شده از آزمون تنش-کرنش برای کامپوزیت ها

نام نمونه	Modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation @break (%)
EA4	1.65 ± 0.05	51 ± 0.3	4.5 ± 0.1
EA4G1	2.7 ± 0.08	78 ± 0.2	2 ± 0.1
EA4G2	3.2 ± 0.12	65 ± 0.4	1.5 ± 0.1



شکل ۳: منحنی نایکوئیست و بد نمونه های بدون پوشش و پوشش دهی شده در محلول سربیم نیترات در غلظت های مختلف با pH برابر ۳/۵، زمان ۲۰ دقیقه و ۰/۵ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه در دمای محیط

و کاهش ازدیاد طول در نقطه‌ی شکست کامپوزیت‌ها می‌شود. علت کاهش استحکام کششی در ۲ درصد گرافن را می‌توان به تشکیل کلوخه‌های نانوذرات در این ترکیب درصد نسبت داد و این بدان معنی است که پخش نانوذرات در ماتریس به‌خوبی صورت نگرفته است [۲۱]. اما در نمونه‌ی EA4G1 افزایش ۵۲ درصدی استحکام نشان از پخش مناسب نانوذرات در ماتریس پلیمری دارد. بنابراین نمونه‌ی EA4G1 به علت داشتن بیشترین استحکام برای ادامه‌ی مسیر این پژوهش انتخاب شده است.

۳-۴ تأثیر پوشش تبدیلی بهینه

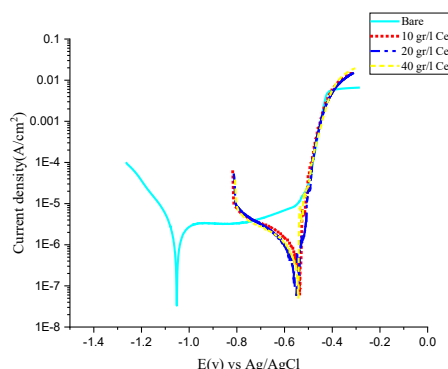
در این بخش نتایج حاصل از آزمون‌های انجام‌شده بر روی پوشش تبدیلی سریم بر روی آلیاژ آلومینیم AA2020-T3 آورده شده است و نتایج مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۳-۵ بررسی اثر غلظت نمک سریم

در ابتدا اثر غلظت نمک سریم نیترات بر رفتار مقاومت به خوردگی

جدول ۷: نتایج حاصل از برآش آزمون طیف‌سنجی امپدانس نمونه‌های بدون پوشش و پوشش دهی شده در محلول سریم نیترات در غلظت‌های مختلف با pH برابر ۳/۵، زمان ۲۰ دقیقه و ۰/۵ میلی‌لیتر بر لیتر آب‌اکسیژنه در دمای محیط

شرایط نمونه	$R_s (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_c (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_{ct} (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_p = R_c + R_{ct} (\Omega \cdot \text{cm}^2)$
نمونه بدون پوشش	۹/۳	۴۵۰۸	۲۷۹۲	۷۳۰۰
غلظت ۱۰ گرم بر لیتر	۸/۹۵	۹۲۱۳	۱۳۹۰۸	۲۳۱۲۱
غلظت ۲۰ گرم بر لیتر	۱۰	۱۲۴۵۰	۲۵۶۶۱	۳۸۱۱۱
غلظت ۴۰ گرم بر لیتر	۹	۱۲۵۸۱	۱۹۲۳۶	۳۱۸۱۷



شکل ۵: منحنی پلاریزاسیون نمونه‌های بدون پوشش و پوشش دهی شده در محلول سریم نیترات در غلظت‌های مختلف با pH برابر ۳/۵، زمان ۲۰ دقیقه و ۰/۵ میلی‌لیتر بر لیتر آب‌اکسیژنه در دمای محیط

جدول ۸: نتایج حاصل از منحنی پلاریزاسیون نمونه‌های بدون پوشش و پوشش دهی شده در محلول سریم نیترات در غلظت‌های مختلف با pH برابر ۳/۵، زمان ۲۰ دقیقه و ۰/۵ میلی‌لیتر بر لیتر آب‌اکسیژنه در دمای محیط

شرایط نمونه	$i_{corr} (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	$E_{corr} (\text{V})$	Corrosion rate (mm/year)
نمونه بدون پوشش	۹/۲	-۱/۰۵	۰/۰۱
غلظت ۱۰ گرم بر لیتر	۰/۴	-۰/۵۴	۰/۰۰۴
غلظت ۲۰ گرم بر لیتر	۰/۲	-۰/۵۵	۰/۰۰۳
غلظت ۴۰ گرم بر لیتر	۰/۴	-۰/۵۴	۰/۰۰۴

سطوح صافی هستند چقرمگی کمتری نسبت به نمونه‌های ABS دارند. همان‌طور که از در شکل ۲ مشاهده می‌شود نواحی سفید که نشان‌دهنده‌ی تغییر شکل پلاستیک است در نمونه‌ی EA4 از EA2 بیشتر است. همچنین در مقایسه‌ای که بین EA ها صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به سطوح چین‌خورده‌ای که دارند هرچه نواحی سفید بیشتری در تصاویر وجود داشته باشد تغییر شکل پلاستیک آن‌ها بیشتر بوده و نمونه‌ها چقرمه‌تر هستند.

۳-۳ مقایسه‌ی استحکام کششی کامپوزیت‌ها

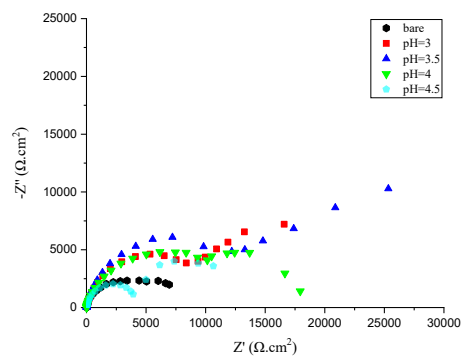
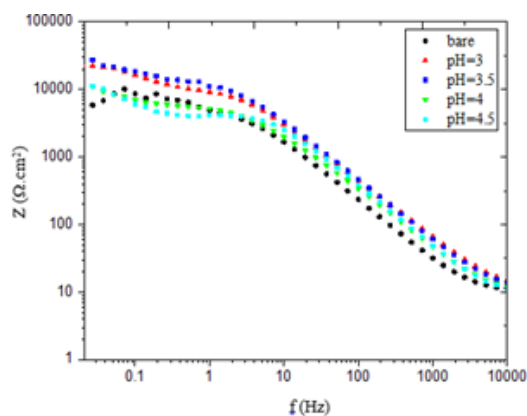
همان‌طور که از جدول ۶ مشخص است با افزایش میزان نانوذرات مدول کامپوزیت‌ها در ترکیب درصدهای ۱ و ۲ درصد به ترتیب به میزان ۴۵ و ۶۳ درصد افزایش پیدا کرده است. همچنین استحکام کششی کامپوزیت‌ها نیز نسبت به آلیاژ اپوکسی حدود ۵۲ و ۲۷ درصد افزایش داشته است. حضور نانوذرات معدنی در کل باعث افزایش مدول و استحکام کششی کامپوزیت‌ها می‌شود. محدود شدن حرکت زنجیرها در حضور نانوذرات به علت وجود برهم‌کنش قوی بین نانوذرات گرافن و زنجیرهای اپوکسی سبب افزایش مدول

جدول ۷: نتایج حاصل از برآش آزمون طیف‌سنجی امپدانس نمونه‌های بدون پوشش و پوشش دهی شده در محلول سریم نیترات در غلظت‌های مختلف با pH برابر ۳/۵، زمان ۲۰ دقیقه و ۰/۵ میلی‌لیتر بر لیتر آب‌اکسیژنه در دمای محیط

بررسی شد. نمودارهای نایکوئیست و بد نمونه های بدون پوشش و پوشش داده شده، در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که از شکل ۳ مشخص است، پوشش تبدیلی سربم در غلظت ۲۰ گرم بر لیتر بیشترین مقاومت به خوردگی را دارا است. اضافه کردن نمک سربم نیترات تا غلظت ۲۰ گرم بر لیتر باعث بهبود پوشش دهی سطح و مسدود کردن نواحی کاتدی بیشتری خواهد شد. افزایش میزان نمک سربم نیترات باعث غیریکنواخت شدن پوشش بر روی مناطق کاتدی می شود و میزان مقاومت به خوردگی پوشش کاهش پیدا می کند. غیریکنواختی پوشش بر روی مناطق کاتدی باعث ایجاد تنش پسماند گردیده که ترک هایی را بر روی سطح پوشش تبدیلی ایجاد می کند. این امر باعث رسیدن محلول خورنده به نمونه و ایجاد پیل گالوانیک بین پوشش تبدیلی و زیرلایه می شود و مقاومت به خوردگی کاهش پیدا می کند. به منظور تحلیل دقیق تر نتایج به دست آمده از آزمون طیف سنجی امپدانس از نمودار بد نیز استفاده گردید. نمودارهای بد نمونه بدون پوشش و پوشش داده شده در غلظت های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. مقدار امپدانس در فرکانس پایین می تواند به عنوان معیاری از مقاومت کلی پوشش در برابر خوردگی مورد استفاده قرار بگیرد. نمودار بد حاصل از برازش آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نشان می دهد پوشش تبدیلی سربم در

محلول با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر در pH برابر ۳/۵، زمان ۲۰ دقیقه، غلظت ۰/۵ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه در دمای محیط بیشترین امپدانس کل (IZI) در فرکانس پایین را دارا می باشد. برای بررسی بهتر، نتایج حاصل از این آزمون با استفاده از مدار الکتریکی مناسب برازش گردید و مقادیر مقاومت پوشش و مقاومت انتقال بار نمونه ها محاسبه گردید. داده های حاصل از آزمون طیف سنجی امپدانس برای نمونه های بدون پوشش و نمونه های پوشش داده شده در محلول سربم نیترات (با غلظت های مختلف در pH برابر ۳/۵، غلظت ۰/۵ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه، زمان ۲۰ دقیقه و دمای محیط) در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید در جدول ۷ آورده شده است.

شکل ۵ منحنی های پلاریزاسیون نمونه های بدون پوشش و پوشش داده شده در محلول با غلظت های ۱۰، ۲۰، ۴۰ گرم بر لیتر سربم نیترات در pH برابر ۳/۵، زمان ۲۰ دقیقه، غلظت ۰/۵ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه در دمای محیط را نشان می دهد. روش برون یابی تافل در اینجا برای تعیین پتانسیل و چگالی جریان خوردگی به کار برده شد که در جدول ۸ نتایج حاصل از آن آورده شده است. همان طور که از نتایج مشخص است کمترین میزان چگالی جریان خوردگی مربوط به پوشش تبدیلی حاوی ۲۰ گرم بر لیتر سربم نیترات می باشد.



شکل ۶: منحنی نایکوئیست و بد نمونه های بدون پوشش و پوشش دهی شده در محلول سربم نیترات با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سربم، ۰/۵ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه، زمان ۲۰ دقیقه، دمای محیط در pH های مختلف ۳ الی ۴/۵

جدول ۹: نتایج حاصل از برازش آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نمونه های بدون پوشش و پوشش دهی شده در محلول سربم نیترات با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سربم، ۰/۵ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه، زمان ۲۰ دقیقه، دمای محیط در pH های مختلف ۳ الی ۴/۵

شرایط نمونه	$R_s (\Omega.cm^2)$	$R_e (\Omega.cm^2)$	$R_{ct} (\Omega.cm^2)$	$R_p = R_s + R_{ct} (\Omega.cm^2)$
نمونه بدون پوشش	۹/۳	۴۵۰۸	۲۷۹۲	۷۳۰۰
pH=3	۱۴	۹۰۸۳	۱۸۲۳۲	۲۷۲۱۵
pH=3.5	۱۰	۱۲۴۵۰	۲۵۶۶۱	۳۸۱۱۱
pH=4	۸/۸۹	۹۴۹۶	۹۱۵۸	۱۸۶۵۴
pH=4.5	۷	۴۵۶۴	۷۱۹۶	۱۱۷۶۰

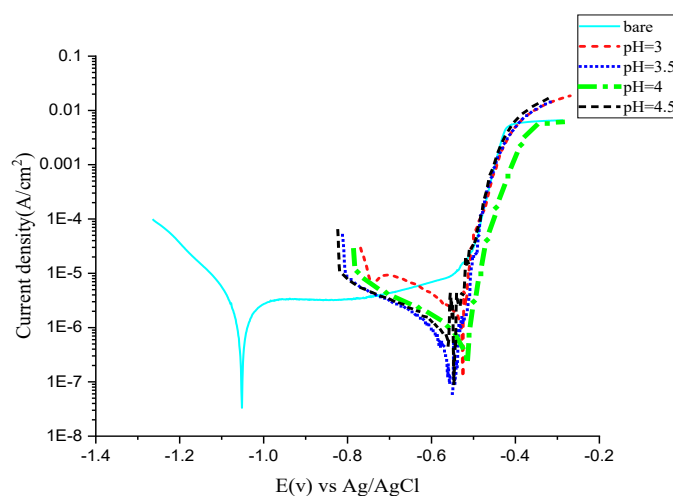
خوردگی نمونه‌های پوشش داده شده در محلول پوشش تبدیلی سریم با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سریم، ۰/۵ میلی‌لیتر بر لیتر آب‌اکسیژنه، زمان ۲۰ دقیقه، دمای محیط در pH های مختلف ۳، ۴، ۴/۵، ۴/۵ از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد. شکل ۶ منحنی‌های نایکوئیست و بد را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از برازش آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نمونه‌های پوشش دهی شده در pH های مختلف می‌توان دریافت که، به دلیل بالا بودن مقاومت به خوردگی نمونه‌های پوشش داده شده در محدوده‌ی pH ۳ تا ۴ نسبت به نمونه‌های بدون پوشش، محدوده تشکیل پوشش، pH های بین ۳ تا ۴ می‌باشد. در pH برابر ۳ به دلیل ایجاد پوشش به‌صورت جزئی و ساختاری با تراکم کمتر مقاومت به خوردگی افزایش چشمگیری پیدا نکرده است، درواقع در pH برابر ۳ زیر لایه دچار خوردگی می‌شود که این امر باعث کاهش رسوب پوشش تبدیلی سریم بر روی زیرلایه می‌شود. در pH برابر ۴/۵ به دلیل ایجاد شدن ساختاری متراکم از جنس پوشش تبدیلی سریم بیشترین مقاومت به خوردگی مشاهده شد. داده‌های حاصل از برازش آزمون طیف‌سنجی امپدانس برای نمونه‌های بدون پوشش و نمونه‌های

با افزایش میزان سریم‌نیتراژ مورد استفاده به دلیل غیریکنواختی پوشش تبدیلی سریم، میزان چگالی جریان خوردگی افزایش پیدا می‌کند. همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است عدم تغییر شیب‌های کاتدی و آنودی نشان‌دهنده عدم تغییر در مکانیزم خوردگی پوشش می‌باشد و ثابت می‌کند با افزایش میزان غلظت سریم نیتراژ تنها در میزان خوردگی تأثیر می‌گذارد. بزرگ‌تر بودن منطقه رسوب پوشش تبدیلی در فلزاتی با رفتار فعال - غیرفعال ازجمله آلومینیم نشان‌دهنده مقاومت به خوردگی بیشتر می‌باشد. همان‌طور که از نمودارها مشخص است بیشترین منطقه رسوب پوشش تبدیلی مربوط به نمونه حاوی ۲۰ گرم بر لیتر سریم نیتراژ است. داده‌های حاصل از آزمون پلاریزاسیون برای نمونه‌های بدون پوشش و نمونه‌های پوشش داده‌شده در محلول سریم نیتراژ (با غلظت‌های مختلف در pH برابر ۳/۵، غلظت ۰/۵ میلی‌لیتر بر لیتر آب‌اکسیژنه، زمان ۲۰ دقیقه و دمای محیط) در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید در جدول ۸ آورده شده است.

۳-۶ بررسی اثر pH

به‌منظور بررسی اثر pH بر رفتار الکتروشیمیایی و مقاومت به



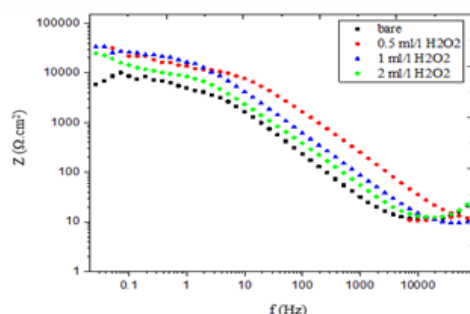
شکل ۷: منحنی پلاریزاسیون نمونه‌های بدون پوشش و پوشش دهی شده در محلول سریم نیتراژ با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سریم، ۰/۵ میلی‌لیتر بر لیتر آب‌اکسیژنه، زمان ۲۰ دقیقه، دمای محیط در pH های مختلف ۳ الی ۴/۵

جدول ۱۰: نتایج آزمون منحنی پلاریزاسیون نمونه‌های بدون پوشش و پوشش دهی شده در محلول سریم نیتراژ با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سریم، ۰/۵ میلی‌لیتر بر لیتر آب‌اکسیژنه، زمان ۲۰ دقیقه، دمای محیط در pH های مختلف ۳ الی ۴/۵

شرایط نمونه	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	$E_{corr}(V)$	Corrosion rate (mm/year)
نمونه بدون پوشش	۹/۲	-۱/۰۵	۰/۰۱
pH=3	۱/۴	-۰/۵۲	۰/۰۱
pH=3.5	۰/۲	-۰/۵۵	۰/۰۰۳
pH=4	۰/۴۸	-۰/۵۱	۰/۰۰۵
pH=4.5	۰/۵۶	-۰/۵۵	۰/۰۰۶

متأثر از مقدار اکسیژن و همچنین واکنش های اکسیژن است. نتایج حاصل از این آزمون نشان می دهد pH برابر ۳/۵ کمترین میزان چگالی جریان خوردگی را دارد، که این نتایج مطابق با آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی می باشد.

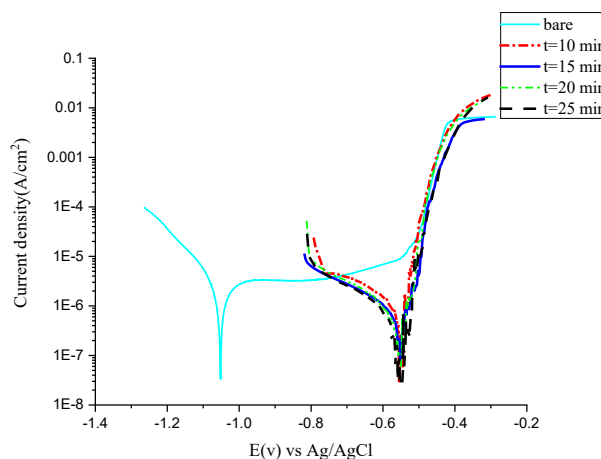
داده های حاصل از آزمون پلاریزاسیون برای نمونه های بدون پوشش و نمونه های پوشش داده شده در محلول پوشش تبدیلی سربوم با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سربوم، ۰/۵ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه، زمان ۲۰ دقیقه، دمای محیط در pH های مختلف ۳ الی ۴/۵ در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید در جدول ۱۰ آورده شده است.



شکل ۸: منحنی نایکوئیست بد، نمونه های بدون پوشش و پوشش دهی شده در محلول سربوم نیترات با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سربوم، ۰/۵ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه، دمای محیط، pH برابر ۳/۵ در زمان های مختلف (۱۰ الی ۲۵ دقیقه) در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید

جدول ۱۱: نتایج حاصل از برازش آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نمونه های بدون پوشش و پوشش دهی شده در محلول سربوم نیترات با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سربوم، ۰/۵ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه، دمای محیط، pH برابر ۳/۵ در زمان های مختلف (۱۰ الی ۲۵ دقیقه) در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید

شرایط نمونه	$R_p (Ω.cm^2)$	$R_{ct} (Ω.cm^2)$	$R_c (Ω.cm^2)$	$R_s (Ω.cm^2)$
نمونه بدون پوشش	۷۳۰۰	۲۷۹۲	۴۵۰۸	۹/۳
زمان ۱۰ دقیقه	۱۹۴۰۳	۹۸۱۲	۹۵۹۱	۸/۹
زمان ۱۵ دقیقه	۴۲۶۹۰	۳۲۵۲۴	۱۰۱۶۶	۸
زمان ۲۰ دقیقه	۳۸۱۱۱	۲۵۶۶۱	۱۲۴۵۰	۱۰
زمان ۲۵ دقیقه	۳۴۸۲۷	۲۳۵۹۵	۱۱۲۳۲	۴



شکل ۹: منحنی پلاریزاسیون نمونه های بدون پوشش و پوشش دهی شده در محلول سربوم نیترات با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سربوم، ۰/۵ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه، دمای محیط، pH برابر ۳/۵ در زمان های مختلف (۱۰ الی ۲۵ دقیقه) در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید

۳-۷ بررسی اثر زمان غوطه‌وری

به منظور بررسی اثر زمان غوطه‌وری بر رفتار الکتروشیمیایی و مقاومت به خوردگی نمونه‌های پوشش داده شده در محلول پوشش تبدیلی سریم با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سریم، ۰/۵ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه، دمای محیط، pH برابر ۳/۵ در زمان‌های مختلف (۱۰ الی ۲۵ دقیقه) از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد. شکل ۸ منحنی‌های نایکوئیست بد را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نمونه‌های پوشش دهی شده در زمان‌های مختلف می‌توان دریافت که بیشترین مقاومت به خوردگی در زمان ۱۵ دقیقه اتفاق افتاده است که بهینه زمان غوطه‌وری در این پوشش انتخاب می‌شود. زمان غوطه‌وری ۱۰ دقیقه به دلیل این که برای تشکیل پوشش تبدیلی بر روی مناطق کاتدی کافی نیست، منجر به ایجاد لایه بسیار نازک که دارای تراکم مناسبی نیست، می‌گردد و در نتیجه مقاومت به خوردگی مناسبی را ایجاد نمی‌کند. در زمان‌های بیشتر از ۱۵ دقیقه نیز مقاومت به خوردگی کاهش پیدا می‌کند. افزایش زمان غوطه‌وری باعث تجمع ناهمگون پوشش روی مناطق کاتدی را ایجاد می‌کند و باعث ایجاد ترک ناشی از دست دادن آب و خشک شدن پوشش شود، در نتیجه پوشش مناسبی بر روی سطح شکل نمی‌گیرد و مقاومت به خوردگی کاهش پیدا می‌کند. بالاتر بودن میزان مقاومت در فرکانس‌های پایین نشان‌دهنده بالاتر بودن میزان مقاومت به خوردگی می‌باشد که بیشترین مقاومت

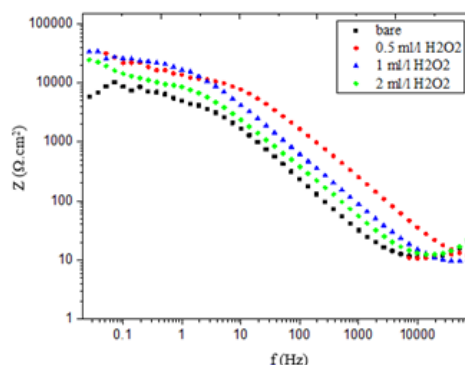
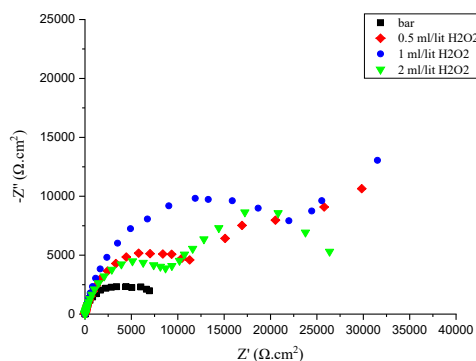
به خوردگی مربوط به نمونه پوشش داده شده در زمان ۱۵ دقیقه می‌باشد. درواقع می‌توان نتیجه گرفت که طبق مطالب گفته شده کاهش و افزایش زمان غوطه‌وری از مقدار بهینه، کاهش کیفیت پوشاندگی پوشش تبدیلی را باعث شده است.

داده‌های حاصل از برازش آزمون طیف‌سنجی امپدانس برای نمونه‌های بدون پوشش و نمونه‌های پوشش داده شده در محلول پوشش تبدیلی سریم با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سریم، ۰/۵ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه، دمای محیط، pH برابر ۳/۵ در زمان‌های مختلف (۱۰ الی ۲۵ دقیقه) در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید در جدول ۱۱ آورده شده است.

شکل ۹ منحنی پلاریزاسیون را برای نمونه‌های غوطه‌ور در محلول پوشش تبدیلی سریم در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود با اعمال پوشش در زمان‌های مختلف، دانسیته جریان خوردگی کاهش یافته است. همچنین مقادیر شیب خطوط تافلی آندی و کاتدی با ایجاد پوشش کاهش یافته‌اند که به دلیل ایجاد پوشش بر روی سطح می‌باشد. تأثیر پوشش ایجاد شده بر روی فلز و نوع کند کردن سرعت خوردگی را می‌توان با استفاده از شاخه‌های آندی و کاتدی مشاهده کنیم. با توجه به شکل ۹ واضح است که شیب هر دوشاخه آندی و کاتدی با اعمال پوشش تغییر کرده است ولی شیب شاخه‌های آندی و کاتدی نمونه‌های پوشش داده شده تغییری نداشته است که می‌توان نتیجه گرفت، در مکانیزم ایجاد پوشش در زمان‌های

جدول ۱۲: نتایج آزمون منحنی پلاریزاسیون نمونه‌های بدون پوشش و پوشش دهی شده در محلول سریم نیترا با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سریم، ۰/۵ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه، دمای محیط، pH برابر ۳/۵ در زمان‌های مختلف (۱۰ الی ۲۵ دقیقه) در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید

شرایط نمونه	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	E_{corr} (V)	Corrosion rate (mm/year)
نمونه بدون پوشش	۹/۲	-۱/۰۵	۰/۰۱
زمان ۱۰ دقیقه	۱/۴	-۰/۵۲	۰/۰۱
زمان ۱۵ دقیقه	۰/۲	-۰/۵۵	۰/۰۰۳
زمان ۲۰ دقیقه	۰/۴۸	-۰/۵۱	۰/۰۰۵
زمان ۲۵ دقیقه	۰/۵۶	-۰/۵۵	۰۰/۰۰۶



شکل ۱۰: منحنی نایکوئیست نمونه‌های بدون پوشش و پوشش دهی شده در محلول سریم نیترا با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سریم، pH برابر ۳/۵، دمای محیط، زمان ۱۵ دقیقه در غلظت‌های مختلف آب اکسیژنه (۰/۵ الی ۲ میلی لیتر بر لیتر) در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید

مختلف تغییری ایجاد نشده است. همچنین نتایج حاصل از این آزمون نشان می دهد زمان بهینه غوطه وری ۱۵ دقیقه می باشد که نتایج آزمون طیف سنجی امپدانس را تأیید می کند. داده های حاصل از آزمون منحنی پلاریزاسیون برای نمونه های بدون پوشش و نمونه های پوشش داده شده در محلول پوشش تبدیلی سربم با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سربم، ۰/۵ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه، دمای محیط، pH برابر ۳/۵ در زمان های مختلف (۱۰ الی ۲۵ دقیقه) در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید در جدول ۱۲ آورده شده است.

۳-۸ بررسی اثر آب اکسیژنه

اثر غلظت آب اکسیژنه بر رفتار الکتروشیمیایی و مقاومت به خوردگی نمونه های پوشش داده شده در محلول پوشش تبدیلی سربم با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سربم، pH برابر ۳/۵، دمای محیط، زمان ۱۵ دقیقه در غلظت های مختلف آب اکسیژنه (۰/۵ الی ۲ میلی لیتر بر لیتر) از آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد. شکل ۱۰ منحنی های نایکوئیست و بد را نشان می دهد. نتایج حاصل از برازش آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نمونه های پوشش دهی شده در غلظت های مختلف آب اکسیژنه نشان می دهد که بیشترین میزان مقاومت به خوردگی در غلظت ۱ میلی لیتر بر لیتر می باشد. در این غلظت از آب اکسیژنه میزان اکسیدکنندگی

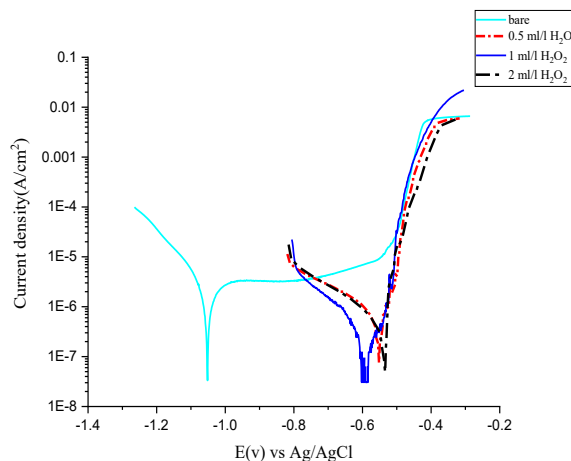
مناسب بوده و سربم سه ظرفیتی به سربم چهار ظرفیتی به آسانی به مناسبی تبدیل می شود که متعاقباً سربم چهار ظرفیتی به آسانی به هیدروکسید سربم تبدیل شده و بر روی سطح نمونه رسوب می کند. در غلظت ۰/۵ میلی لیتر بر لیتر به دلیل کم بودن سرعت واکنش پوشش به طور کامل تشکیل نشده است که این امر منجر به ایجاد پوشش غیریکنواخت می شود. همچنین در غلظت ۲ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه نیز افت مقاومت به خوردگی را مشاهده می کنیم که به دلیل افزایش سرعت واکنش محلولی ناپایدار ایجاد می گردد که باعث کاهش نرخ رسوب گذاری بر روی سطح نمونه ها شده است.

داده های حاصل از برازش آزمون طیف سنجی امپدانس برای نمونه های بدون پوشش و نمونه های پوشش داده شده در محلول پوشش تبدیلی سربم با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سربم، pH برابر ۳/۵، دمای محیط، زمان ۱۵ دقیقه در غلظت های مختلف آب اکسیژنه (۰/۵ الی ۲ میلی لیتر بر لیتر) در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید در جدول ۱۳ آورده شده است.

شکل ۱۱ اثر غلظت آب اکسیژنه بر رفتار الکتروشیمیایی و مقاومت به خوردگی نمونه های پوشش داده شده در محلول پوشش تبدیلی سربم با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سربم، pH برابر ۳/۵، دمای محیط، زمان ۱۵ دقیقه در غلظت های مختلف آب اکسیژنه (۰/۵، ۱، ۲ میلی لیتر بر لیتر) بر منحنی پلاریزاسیون را نشان می دهد. با اعمال

جدول ۱۳: نتایج حاصل از برازش آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نمونه های بدون پوشش و پوشش دهی شده در محلول سربم نیترات با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سربم، pH برابر ۳/۵، دمای محیط، زمان ۱۵ دقیقه در غلظت های مختلف آب اکسیژنه (۰/۵ الی ۲ میلی لیتر بر لیتر) در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید

شرایط نمونه	$R_s (\Omega.cm^2)$	$R_c (\Omega.cm^2)$	$R_{ct} (\Omega.cm^2)$	$R_p=R_c+R_{ct} (\Omega.cm^2)$
نمونه بدون پوشش	۹/۳	۴۵۰۸	۲۷۹۲	۷۳۰۰
۰/۵ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه	۸	۱۰۱۶۶	۳۲۵۲۴	۴۲۶۹۰
۱ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه	۶/۴۵	۲۱۹۸۸	۳۶۱۲۳	۵۸۱۱۱
۲ میلی لیتر بر لیتر آب اکسیژنه	۹	۱۰۵۷۴	۱۵۹۱۴	۲۶۴۸۸



شکل ۱۱: منحنی پلاریزاسیون نمونه های بدون پوشش و پوشش دهی شده در محلول سربم نیترات با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سربم، pH برابر ۳/۵، دمای محیط، زمان ۱۵ دقیقه در غلظت های مختلف آب اکسیژنه (۰/۵ الی ۲ میلی لیتر بر لیتر) در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید

سیریم با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سیریم، pH برابر ۳/۵، دمای محیط، زمان ۱۵ دقیقه در غلظت‌های مختلف آب‌اکسیژنه (۰/۵، ۱، ۲ میلی‌لیتر بر لیتر) در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید در جدول ۱۴ آورده شده است.

۳-۹ بررسی پوشش تبدیلی سیریم در شرایط بهینه

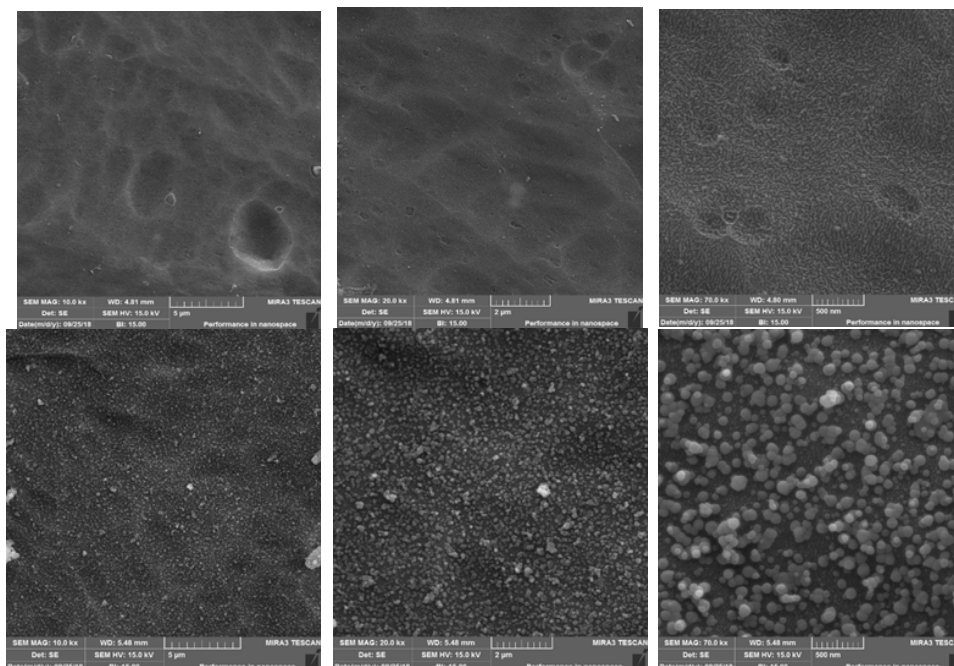
شکل ۱۲ مورفولوژی سطح نمونه آلومینیمی را قبل و بعد از اعمال پوشش تبدیلی سیریم در بزرگ‌نمایی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصاویر FE-SEM مشاهده می‌کنیم سطح نمونه پوشش داده شده در شرایط بهینه دارای نقاط بسیار ریزی که حاصل ایجاد رسوبات سیریم است وجود دارد. این نقاط، تجمع‌اتی با آرایش یافتگی مختلف بر روی سطح نمونه ایجاد کرده است. تشکیل رسوبات سیریم حاصل از پوشش تبدیلی سیریم در شرایط بهینه باعث بهبود خواص مقاومت به خوردگی و بهبود چسبندگی نمونه خواهد شد از طرفی تصاویر FE-SEM نشان می‌دهد که رسوبات سیریم تمام سطح نمونه را پوشش نداده است و پوشش

پوشش در تمامی غلظت‌های آب‌اکسیژنه مشاهده می‌کنیم که دانسته جریان خوردگی کاهش یافته است. همچنین مقادیر شیب خطوط تافلی آندی و کاتدی با ایجاد پوشش کاهش یافته‌اند که به دلیل ایجاد پوشش بر روی سطح می‌باشد. تأثیر پوشش ایجاد شده بر روی فلز و نوع کند کردن سرعت خوردگی را می‌توان با استفاده از شاخه‌های آندی و کاتدی که در آزمون پلاریزاسیون به دست می‌آوریم، مشاهده نمائیم. با توجه به شکل ۱۱ واضح است که شیب هر دوشاخه آندی و کاتدی با اعمال پوشش تغییر کرده است و نتیجه‌ای که می‌توان گرفت این است که پوشش تبدیلی سیریم، بر روی هر دو واکنش آندی و کاتدی اثر گذاشته و سرعت خوردگی را کاهش داده است. نتایج حاصل از این آزمون نشان می‌دهد غلظت ۱ میلی‌لیتر بر لیتر کمترترین میزان چگالی جریان خوردگی را دارد، که این نتایج مطابقت با آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی است.

داده‌های حاصل از آزمون پلاریزاسیون برای نمونه‌های بدون پوشش و نمونه‌های پوشش داده‌شده در محلول پوشش تبدیلی

جدول ۱۴: نتایج منحنی پلاریزاسیون نمونه‌های بدون پوشش و پوشش دهی شده در محلول سیریم نیترا با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر سیریم، pH برابر ۳/۵، دمای محیط، زمان ۱۵ دقیقه در غلظت‌های مختلف آب‌اکسیژنه (۰/۵ الی ۲ میلی‌لیتر بر لیتر) در محلول ۳/۵ درصد وزنی سدیم کلراید

شرایط نمونه	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	E_{corr} (V)	Corrosion rate (mm/year)
نمونه بدون پوشش	۹/۲	-۱/۰۵	۰/۰۱
۰/۵ میلی‌لیتر بر لیتر آب‌اکسیژنه	۰/۱۷	-۰/۵۳	۰/۰۰۱
۱ میلی‌لیتر بر لیتر آب‌اکسیژنه	۰/۱۴۴	-۰/۵۹	۰/۰۰۱
۲ میلی‌لیتر بر لیتر آب‌اکسیژنه	۰/۴	-۰/۵۳	۰/۰۰۴



شکل ۱۲: تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی از نمونه های پوشش داده نشده (ردیف بالا) و پوشش داده‌شده (ردیف پایین) در شرایط بهینه در بزرگ‌نمایی های مختلف

ایجاد شده به صورت غیریکنواخت ایجاد گردیده است.

شکل ۱۳ نمودار آنالیز عنصری سطح نمونه بدون پوشش و نمونه پوشش داده شده توسط پوشش تبدیلی سربومی در شرایط بهینه را نشان می دهد. نتایج آنالیز عنصری سطح (EDS) نشان می دهد که درصد وزنی عنصر اکسیژن برای سطح نمونه پوشش داده شده در شرایط بهینه بیشتر شده است که علت این افزایش درصد وزنی اکسیژن در مکانیزم تشکیل پوشش تبدیلی سربومی می باشد. این آزمون ثابت می کند که بر روی سطوح نمونه سربومی به صورت هیدروکسید و اکسید سربومی رسوب کرده است. همچنین نتایج نشان می دهد که مقدار مس کاهش پیدا کرده است که دلیل این کاهش، حضور هیدروکسیدهای سربومی بر روی مناطق کاتدی (ذرات بین فلزی مس) می باشد.

۳-۱۰ نتایج و بحث آزمون چسبندگی

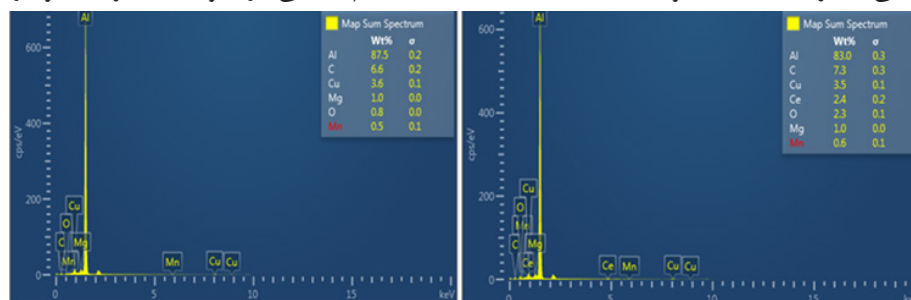
یکی از آزمون های مهم برای تعیین میزان چسبندگی در چسب های پلیمری آزمون lap shear است، با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۱۵ همان طور که از آزمون های گرفته شده در آزمون pull off نشان داده شد میزان چسبندگی برای نمونه های پوشش داده شده به مقدار زیادی افزایش پیدا کرده است. افزایش ۱۱۴ درصدی استحکام چسبندگی برای نمونه ی پوشش داده شده نشان می دهد که افزایش زبری سطح در افزایش چسبندگی که یکی از مکانیزم های این پدیده است بسیار مؤثر خواهد بود. بنابراین با افزایش چسبندگی از طریق ایجاد زبری میزان چسبندگی به میزان قابل توجهی برای آلومینیوم ۲۰۲۴ که چسبندگی مناسبی ندارند افزایش پیدا کرد [۲۲].

با توجه به جدول ۱۵ می توان دریافت که در حضور پوشش تبدیلی روی سطح، چسبندگی بالاتری نسبت به نمونه ای که با استفاده

از پوشش تبدیلی اصلاح سطحی نشده، مشاهده می گردد و دلیل اصلی این افزایش چسبندگی پوشش به زیرآیند را می توان به تغییر مورفولوژی و شیمی سطح زیرآیند با استفاده از پوشش تبدیلی بر پایه سربومی نسبت داد، هرچند حضور ذرات گرافن نیز می تواند باعث افزایش ناچیز در چسبندگی شود [۲۳]. 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 فلز چسبندگی بالاتری را می توان 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 حفره ها شاهد بهبود چسبندگی خواهیم بود. به عبارتی بین مکانیزم ها و تئوری های مختلفی که برای چسبندگی ارائه شده است و همگی دارای نقص ها و نقاط قوتی هستند، به نظر می رسد 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 مکانیزم ها باشد. عامل دیگری که در نمونه ها با پوشش تبدیلی بر پایه سربومی می توان اشاره کرد بحث تغییر شیمی سطح زمینه آلومینیومی می باشد. حضور عنصر سربومی با ظرفیت های متنوع می تواند احتمالاً سبب ایجاد باندهای شیمیایی بیشتر و در نهایت چسبندگی بالاتری شود [۲۴].

۴- نتیجه گیری

برای افزایش چقرمگی رزین های اپوکسی از انواع لاستیک های بوتادینی ABS و MBS استفاده شد. نتایج حاصل از آزمون تنش کرنش نشان داد در حضور زنجیرهای لاستیکی ABS میزان استحکام کششی در نمونه ها بیشتر شده و در درصد های ۴۰۲،



شکل ۱۳: تصویر آنالیز عنصری سطحی از نمونه با پوشش تبدیلی سربومی و نمونه ی پوشش داده نشده

جدول ۱۵: نتایج آزمون های چسبندگی در حضور پوشش تبدیلی

نام نمونه	Lab shear (Mpa)	Pull off (MPa)
E	۱۷.۸	۴.۴
EA4G1	۲۴	۴.۱
C EA4G1	۳۸.۱	۱۰.۹

۵- مراجع

- [1] Unnikrishnan, K. P., and Eby Thomas Thachil. "Toughening of epoxy resins." *Designed monomers and polymers* 9, no. 2 (2006): 129-152.
- [2] Dadian, Alireza, Saeed Rahnema, and Abbas Zolfaghari. "Experimental study of the CTBN effect on mechanical properties and mode I and II fracture toughness of a new epoxy resin." *Journal of Adhesion Science and Technology* (2020): 1-16.
- [3] Pascault, Jean-Pierre, and Roberto JJ Williams, eds. *Epoxy polymers: new materials and innovations*. John Wiley & Sons, 2009.
- [4] Srivastava K, Rathore AK, Srivastava D. Studies on the structural changes during curing of epoxy and its blend with CTBN. *Spectrochim Acta Part A*. (2018); 188:99-105.
- [5] Zhao, Yang, Zhen-Kun Chen, Yu Liu, Hong-Mei Xiao, Qing-Ping Feng, and Shao-Yun Fu. "Simultaneously enhanced cryogenic tensile strength and fracture toughness of epoxy resins by carboxylic nitrile-butadiene nano-rubber." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 55 (2013): 178-187.
- [6] Abadyan, M., R. Bagheri, and M. A. Kouchakzadeh. "Fracture toughness of a hybrid-rubber-modified epoxy. I. Synergistic toughening." *Journal of applied polymer science* 125, no. 3 (2012): 2467-2475.
- [7] Yahyaee, Hossein, Morteza Ebrahimi, Hamed Vakili Tahami, Ehsan R. Mafi, and Esmaeil Akbarinezhad. "Toughening mechanisms of rubber-modified thin-film epoxy resins: Part 2—Study of abrasion, thermal and corrosion resistance." *Progress in Organic Coatings* 113 (2017): 136-142.
- [8] Wang, Yan, Zixing Shi, Junrong Yu, Lei Chen, Jing Zhu, and Zuming Hu. "Tailoring the characteristics of graphite oxide nanosheets for the production of high-performance poly (vinyl alcohol) composites." *Carbon* 50, no. 15 (2012): 5525-5536.
- [9] Hu, Bing, Yue-hua Cong, Bao-yan Zhang, Lei Zhang, Yu Shen, and Hao-zhou Huang. "Enhancement of thermal and mechanical performances of epoxy nanocomposite materials based on graphene oxide grafted by liquid crystalline monomer with Schiff base." *Journal of Materials Science* 55, no. 8 (2020): 3712-3727.
- [10] Liu, Qinghong, Xufeng Zhou, Xinyu Fan, Chunyang Zhu, Xiayin Yao, and Zhaoping Liu. "Mechanical and thermal properties of epoxy resin nanocomposites reinforced with graphene oxide." *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 51, no. 3 (2012): 251-256.
- [11] Galpaya, Dilini, Mingchao Wang, Graeme George, Nunzio Motta, E. Waclawik, and Cheng Yan. "Preparation of graphene oxide/epoxy nanocomposites with significantly improved mechanical properties." *Journal of Applied Physics* 116, no. 5 (2014): 053518.
- [12] Hughes, Anthony E., Nick Birbilis, Johannes MC Mol, Santiago J. Garcia, Xiaorong Zhou, and George E. Thompson. "High strength Al-alloys: microstructure, corrosion and principles of

استحکام کششی به مقدار ۲۰ و ۴۵ درصد افزایش یافت. اما با افزایش ABS به مقادیر ۶ درصد استحکام کششی کاهش یافته است. همچنین نتایج این آزمون برای MBS نشان داد که میزان مقاومت و استحکام کششی میکرو کامپوزیت در مقایسه با اپوکسی کمتر شده است. تصاویر SEM نیز نشان داد نمونه‌های حاوی MBS چون دارای سطوح صافی هستند چقرمگی کمتری نسبت به نمونه‌های ABS دارند. همچنین در مقایسه‌ای که بین EA ها صورت گرفت با توجه به سطوح چین‌خورده‌ای که دارند هرچه نواحی سفید بیشتری در تصاویر وجود داشت تغییر شکل پلاستیک آن‌ها بیشتر بوده و نمونه‌ها چقرمه تر بودند. در حضور نانوذرات مدول کامپوزیت‌ها در ترکیب درصدهای ۱ و ۲ درصد به ترتیب به میزان ۴۵ و ۶۳ درصد افزایش پیدا کرده است. همچنین استحکام کششی کامپوزیت‌ها نیز نسبت به آلیاژ اپوکسی حدود ۵۲ و ۲۷ درصد افزایش داشته است. اعمال پوشش تبدیلی سریم با غلظت سریم ۲۰ گرم بر لیتر، غلظت آب اکسیژنه ۱ میلی‌لیتر بر لیتر، زمان ۱۵ دقیقه و در دمای محیط با توجه به انجام آزمون‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و منحنی پلاریزاسیون بهترین عملکرد را نشان دادند. انجام آزمون آنالیز عنصری سطحی از سطح نمونه‌های بدون پوشش و پوشش داده شده در شرایط بهینه حضور سریم و اکسیژن را در پوشش‌های اعمالی نشان می‌دهد. آزمون‌های lap shear و pull off نشان دادند که در حضور پوشش‌های تبدیلی چسبندگی به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. افزایش ۱۱۴ درصدی استحکام چسبندگی در آزمون lap shear نسبت به نمونه‌ی اپوکسی خالص مشاهده شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌ی نهایی چسب اپوکسی ساخته شده علاوه بر استحکام مناسب چسبندگی قوی با سطح آلومینیوم حاوی پوشش تبدیلی داشته است.

protection.” Recent Trends in Processing and Degradation of Aluminium Alloys 1 (2011).

[8] Shao, Bo, Yiqun Fang, Bo Chen, Jing Shen, Shihua Xu, Rongxian Ou, and Qingwen Wang. “Statistical distribution of mechanical properties and energy absorption of laminated cotton fabric reinforced epoxy composites.” Polymer Composites (2020).

[13] Vakili, H., B. Ramezanzadeh, and R. Amini. “The corrosion performance and adhesion properties of the epoxy coating applied on the steel substrates treated by cerium-based conversion coatings.” Corrosion Science 94 (2015): 466-475.

[14] Asemani, H. R., P. Ahmadi, A. A. Sarabi, and H. Eivaz Mohammadloo. “Effect of zirconium conversion coating: Adhesion and anti-corrosion properties of epoxy organic coating containing zinc aluminum polyphosphate (ZAPP) pigment on carbon mild steel.” Progress in Organic Coatings 94 (2016): 18-27.

[15] Mahidashti, Z., T. Shahrabi, and B. Ramezanzadeh. “A new strategy for improvement of the corrosion resistance of a green cerium conversion coating through thermal treatment procedure before and after application of epoxy coating.” Applied Surface Science 390 (2016): 623-632.

[16] Ramezanzadeh, B., and M. Rostami. “The effect of cerium-based conversion treatment on the cathodic delamination and corrosion protection performance of carbon steel-fusion-bonded epoxy coating systems.” Applied Surface Science 392 (2017): 1004-1016.

[17] Hinton, B. R. W. “Corrosion inhibition with rare earth metal salts.” Journal of Alloys and Compounds 180, no. 1-2 (1992): 15-25.

[18] Pinc, W., S. Geng, M. O’keefe, William Fahrenholtz, and T. O’keefe. “Effects of acid and alkaline based surface preparations on spray deposited cerium based conversion coatings on Al 2024-T3.” Applied Surface Science 255, no. 7 (2009): 4061-4065.

[19] Mirmohseni-Namin, Abdolreza, Saeid Nikafshar, and Farid Mirmohseni. “Increasing toughness and tensile strength of an epoxy-diamine system using an inorganic ultra-accelerator.” RSC Advances 5, no. 65 (2015): 53025-53035.

[20] Mousavi, Sayed Rasoul, and Iraj Amiri Amraei. “Toughening of dicyandiamide-cured DGEBA-based epoxy resin using MBS core-shell rubber particles.” Journal of Composite Materials 49, no. 19 (2015): 2357-2363.

[21] Pathak, Abhishek K., Munu Borah, Ashish Gupta, T. Yokoze-ki, and Sanjay R. Dhakate. “Improved mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide-epoxy hybrid composites.” Composites Science and Technology 135 (2016): 28-38.

[22] Sydlik, Stefanie A., Jae-Hwang Lee, Joseph J. Walish, Edwin L. Thomas, and Timothy M. Swager. “Epoxy functionalized multi-walled carbon nanotubes for improved adhesives.” Carbon 59 (2013): 109-120.

[23] Pourhashem, Sepideh, Mohammad Reza Vaezi, Alimorad Rashidi, and Mohammad Reza Bagherzadeh. “Exploring corrosion protection properties of solvent based epoxy-graphene oxide nanocomposite coatings on mild steel.” Corrosion Science 115 (2017):

78-92.

[24] Eivaz Mohammadloo, H; Sarabi, A.A; Sabbagh Alvani, A.A.; “The effect of solution temperature and pH on corrosion performance and morphology of nanoceramic-based conversion thin film”, Mater. Corros., 64(2012), p. p. 535-543.