



## کاربرد میکرو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و ذرات ضد آب شده با تکنولوژی نانو در پوشش‌های کامپوزیتی رنگ اپوکسی بر روی فولاد X52

امیر کاظمی<sup>۱</sup>، احمد منشی<sup>۲\*</sup>، مهدی بروجدنیا<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی مواد، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲. گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

\*نویسنده و مسئول مکاتبات: dr.ahmad.monshi@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۷/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۲

### چکیده

در این پژوهش دو نوع پوشش کامپوزیتی بر پایه رنگ اپوکسی تقویت شده توسط نانو و میکرو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و ذرات آبگریز شده آن به-طور جداگانه و با غلظت‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی برای بهبود ویژگی‌های رنگ اپوکسی تهیه شد. به منظور بررسی رفتار آن‌ها بر روی فولاد X52 اعمال گردیدند و سپس با انجام آزمون‌های خوردگی و سایش خواص آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. ضخامت پوشش‌ها توسط دستگاه ضخامت‌سنج دیجیتال بررسی شد و رفتار مقاومت به خوردگی پوشش‌ها با استفاده از روش پلاریزاسیون در محلول سدیم کلرید ۳/۵٪ ارزیابی شد. نتایج آزمون خوردگی نشان داد که با اضافه کردن و افزایش غلظت ذرات تقویت کننده در پوشش‌ها مقاومت به خوردگی بهبود یافته و همچنین پوشش کامپوزیتی رنگ اپوکسی دارای ۵ درصد وزنی تقویت کننده دی‌اکسید تیتانیوم آبگریز شده، مقاومت به خوردگی بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها از خود نشان می‌دهد. برای بررسی خواص مورفولوژی سطح از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز استفاده گردید. نتایج به دست آمده از این آنالیز توزیع مناسب و یکنواخت ذرات آبگریز شده در زمینه پوشش اپوکسی را نشان داده است. مقاومت به سایش پوشش‌ها توسط دستگاه آزمون گلوله بر روی دیسک انجام شد. نتایج آزمون سایش نشان داد که با اضافه کردن و افزایش غلظت ذرات تقویت کننده در پوشش مقاومت سایشی پوشش افزایش یافته، اما با مقایسه نمونه‌های کامپوزیتی اپوکسی مشخص گردید که آبگریز شدن ذرات تقویت کننده تأثیری بر مقاومت به سایش نداشته است.

**کلمات کلیدی:** رنگ اپوکسی، پوشش کامپوزیت، دی‌اکسید تیتانیوم ضد آب، مقاومت به خوردگی، مقاومت به سایش

### مقدمه

خوردگی پدیده مخربی است که واکنش شیمیایی یا الکتروشیمیایی بین یک ماده، معمولاً یک فلز و محیط اطراف آن می‌باشد که به تغییر خواص ماده منجر خواهد شد. پدیده خوردگی در تمامی دسته‌های اصلی مواد، شامل فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و کامپوزیت‌ها اتفاق می‌افتد، اما وقوع آن در فلزات آن قدر شایع و فراگیر بوده و اثرات مخربی به جای می‌گذارد که هرگاه صحبت از خوردگی به میان می‌آید، ناخودآگاه خوردگی یک فلز به ذهن متبادر می‌شود. مخلوط کردن ذرات پرکننده در یک سیستم کامپوزیتی مقاومت در برابر سایش و ضریب اصطکاک را بهبود می‌بخشد [۱]. خواص مکانیکی مانند استحکام خمشی و مدول خمشی با افزودن ذرات دی‌اکسید سیلیسیم به کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی - فیبر شیشه افزایش می‌یابد [۲]. خصوصیات مکانیکی و سایشی لغزش خشک کامپوزیت‌های اپوکسی پر شده با ذرات سیلیکون کاربید، اکسید آلومینیوم و اکسیدروی با استفاده از آزمون‌های سایشی (دستگاه پین بر روی دیسک)، افزایش سختی، استحکام کششی و استحکام خمشی کامپوزیت را با افزودن درصد حجمی ۱۰-۵٪ پرکننده را گزارش کردند [۳]. افزودن ذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO<sub>2</sub>)<sup>۱</sup> و دی‌اکسید سیلیسیم (SiO<sub>2</sub>)<sup>۲</sup> مقاومت خوردگی رزین‌های اپوکسی را بطور چشمگیری بهبود بخشیده که سختی رزین‌های اپوکسی توسط مخلوط کردن ۱٪ نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و دی‌اکسید سیلیسیم بهبود یافته است [۴]. افزودن نانو ذرات دی‌اکسید زیرکونیوم بر روی فولاد ضعیف در محلول سدیم کلرید ۳/۵٪ نرخ خوردگی پوشش‌های حاوی سیلان را به طور قابل

<sup>1</sup> Titanium dioxide

<sup>2</sup> Silicon dioxide



ملاحظه‌ای در مقایسه با پوشش اپوکسی ساده و تقویت نشده کاهش می‌دهد [۵]. تصاویر گرفته شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نانو ذرات سیلیکا در رزین‌های اپوکسی توزیع همگن ذرات در نانو کامپوزیت و عدم وجود هرگونه تراکم و آگلومره شدن را اثبات می‌کند. افزایش استحکام، سختی، چقرمگی و هدایت حرارتی و کاهش تنش‌های انقباضی و مکانیکی و ضریب انبساط حرارتی زمینه گزارش شده است [۶].

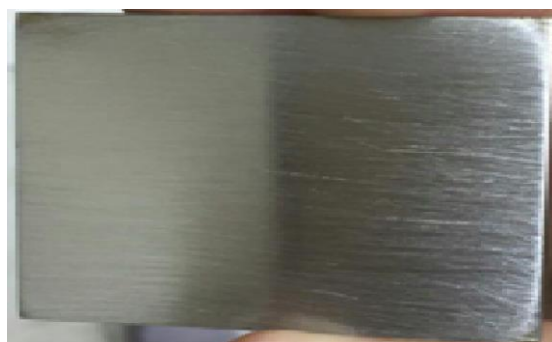
## روش کار

در این تحقیق ورق‌های فولادی X52 با ابعاد  $5 \times 2/5 \text{ cm}^2$ ،  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  و  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  و ضخامت ۵ میلی‌متر توسط دستگاه برش آب پر فشار (واتر جت) برش داده شدند. نمونه‌ها در مرحله آماده‌سازی با استفاده از دستگاه سنگ‌زنی، از آلودگی‌هایی مانند خاک، انواع نمک‌ها، مواد چرب و روغنی و غیره زدوده شده تا سطحی تمیز و در عین حال به مقدار کم زیر بدست آید. سپس نمونه‌ها با کاغذ سنباده ۶۰ با کمک دستگاه پولیش سنباده زده شدند. پس از تمیز کاری اولیه و بوجود آوردن زبری مناسب، سطح نمونه‌ها به مدت ۲ دقیقه و با کمک محلول الکل - استون چربی‌زدائی گردید. لازم به ذکر است به منظور جلوگیری از آلودگی مجدد سطح، زمان بین تمیزکاری و پوشش‌کاری باید کوتاه باشد. شکل (۱) فولاد API 5L X52 را با ترکیب شیمیایی ۹۸/۲ درصد آهن، ۰/۱-۰/۲۵ درصد مس، ۰/۰۴-۰/۲۵ درصد آلومینیوم، ۰/۰۱ درصد گوگرد، ۰/۰۱ درصد فسفر، ۰/۲۵-۰/۴ درصد سیلیسیم، ۱/۲-۱/۴ درصد منگنز و ۰/۱۷-۰/۱۴ درصد کربن قبل از عملیات آماده سازی نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمونه‌های فولاد API 5L X52 قبل از عملیات آماده سازی

شکل (۲) تصویری از نمونه آماده‌سازی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمونه فولاد X52 بعد از عملیات آماده سازی شده

جهت توزین مواد مورد استفاده (رنگ اپوکسی و پودر سرامیکی) از ترازوی دیجیتالی با حساسیت ۰/۰۱ میلی‌گرم و ماکزیمم محدوده وزنی ۲۲۰ گرم استفاده گردید. برای رسیدن به میزان پراکندگی مناسب و نیز بالا بردن ضریب اطمینان



جهت خوب هم خوردن ترکیب مورد نظر، از دستگاه همزن التراسونیک با توان  $80 \text{ w/cm}^2$  به مدت ۱۰ دقیقه استفاده شد. برای اعمال مخلوط کامپوزیتی رنگ اپوکسی - سیلیسیوم کاربید بر روی نمونه‌ها از دستگاه اسپری رنگ با اندازه نازل  $1/3$  میلی‌متر توسط پمپ هوا و مطابق دستورالعمل دستگاه با فشار هوای  $40 \text{ psi}$  استفاده گردید.

تهیه پوشش‌های کامپوزیتی رنگ اپوکسی، از رنگ اپوکسی دو جزئی بر پایه رزین اپوکسی پلی‌آمید و سخت‌کننده پلی-آمین استفاده شد. در ساختار این پوشش از هیچ‌گونه حلال رقیق‌کننده استفاده نگردیده است. این رزین از شرکت رنگ سازی روناس تهیه شد. خصوصیات شیمیایی این رزین ثابت و در دراز مدت ساختار پلیمری آن دچار تغییر نمی‌گردد. از جمله خصوصیات که منجر به انتخاب این رنگ جهت انجام آزمایشات شده است چسبندگی عالی، مقاومت مکانیکی خوب، سختی بالا، دارا بودن خاصیت انعطاف‌پذیری می‌باشد. پرایمر اپوکسی زینک‌ریچ مورد استفاده در این پژوهش از اپوکسی زینک‌ریچ دو جزئی ساخت شرکت رنگ‌سازی روناس انتخاب گردید. مشخصات رنگ اپوکسی و پرایمر استفاده شده در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی و فیزیکی رنگ اپوکسی و پرایمر

رنگ پایه	رنگ اپوکسی	اپوکسی زینک ریچ
تعداد اجزاء رنگ	رزین اپوکسی - پلی‌آمید	رزین اپوکسی - پلی‌آمید
مکانیزم خشک شدن	واکنش شیمیایی	واکنش شیمیایی
رنگدانه اصلی	رنگدانه غیرسمی خنثی	پودر روی
میزان فلز روی در فیلم خشک	-	۸۹ تا ۹۱٪ وزنی
میزان مواد جامد	۷۴ تا ۷۶٪ وزنی	۸۹ تا ۹۱٪ وزنی
نقطه اشتعال	$28 \text{ }^\circ\text{C}$	$28 \text{ }^\circ\text{C}$
براقیت رنگ	مات	مات
فام رنگ	آبی	طوسی
وزن مخصوص	$1.60 \text{ gr/cm}^3$	$3.25 \text{ gr/cm}^3$

در مرحله عملیات پوشش‌کاری، پس از انجام کامل عملیات آماده‌سازی سطح، نمونه‌ها برای اعمال پوشش کامپوزیتی رنگ اپوکسی - سیلیسیوم کاربید بر روی آن‌ها آماده شده‌اند. جهت اعمال لایه پرایمر، ابتدا یک لایه پوشش اپوکسی زینک ریچ دو جزئی بر پایه رزین اپوکسی پلی‌آمید و پودر روی خالص و سخت‌کننده (هاردنر) پلی‌آمین تهیه شده از شرکت رنگ‌سازی روناس، به عنوان لایه زیر پوشش (پرایمر) برای حفاظت طولانی مدت در برابر خوردگی استفاده شده است. این پوشش به دلیل دارا بودن بیش از ۹۰ درصد پودر روی خالص در فیلم خشک، از سطوح فلزی در برابر خوردگی به طریق کاتدیک حفاظت می‌نماید. به منظور تهیه پرایمر مطابق دستورالعمل شرکت تولید کننده، ۱۰۰ واحد وزنی جزء A (رزین اپوکسی پلی‌آمید) و ۵ واحد وزنی جزء B (پلی‌آمین سخت‌کننده) با یکدیگر ترکیب نموده (قبل از مصرف، جزء A را با یک همزن مناسب به خوبی مخلوط کرده سپس جزء B را به آرامی به آن اضافه نموده تا مخلوط به خوبی یکنواخت شود)، یک بشر  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  که قطر کف آن ۶۰ میلی‌متر است را در نظر گرفته و همزن التراسونیک را طوری تنظیم کرده که فاصله نازل از کف ۳ میلی‌متر باشد. توان همزن را  $80 \text{ w/cm}^2$  تنظیم کرده و به مدت ۱۰ دقیقه عمل هم‌زدن ادامه داده می‌شود. ترکیب آماده شده را به روش اسپری معمولی توسط یک دستگاه اسپری رنگ با اندازه نازل  $1/3$  میلی‌متر با فشار هوای  $40 \text{ psi}$  بر روی نمونه‌ها اعمال کرده، زمان لازم جهت خشک شدن هر لایه در کلیه نمونه‌های پوشش داده شده بعد از اسپری شدن، به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط با رطوبت ۳۰ درصد می‌باشد. شکل (۳) نمونه‌ای پوشش داده شده با پرایمر را نشان می‌دهد.

پس از گذشت زمان لازم برای خشک شدن لایه پرایمر به منظور تهیه کامپوزیت رنگ اپوکسی دوجزئی، ۱۰۰ واحد وزنی جزء A (اپوکسی پلی‌آمید) را با ذرات سیلیسیوم کاربید در مقادیر ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی بطور جداگانه با همزن التراسونیک با



توان  $80 \text{ w/cm}^2$  به مدت ۵ دقیقه مخلوط کرده، سپس ۲۰ واحد وزنی جزء B (پلی آمین سخت کننده) را به آرامی به ترکیب اضافه نموده و دوباره با استفاده از همزن التراسونیک به مدت ۵ دقیقه با یکدیگر ترکیب نموده (قبل از مصرف جزء A را با یک همزن مناسب به خوبی مخلوط کرده تا به خوبی یکنواخت شود).



شکل ۳: لایه پرایمر اعمال شده

ترکیب آماده شده را مانند روش اعمال لایه پرایمر، به روش اسپری معمولی بر روی نمونه‌ها اعمال شد. لازم به ذکر است جهت مقایسه آزمون‌ها نمونه‌ای از پوشش رنگ اپوکسی دو جزئی بدون حضور ذرات سیلیسیوم کاربرد همانند شکل (۴) آماده گردید.



شکل ۴: نمونه کامپوزیت رنگ اپوکسی تقویت شده با دی‌اکسید تیتانیوم

پس از گذشت زمان لازم برای خشک شدن لایه پرایمر به منظور تهیه کامپوزیت رنگ اپوکسی آب‌گریز شده، ابتدا ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در مقادیر ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی را به محلول ضد آب با پایه پلی‌سیلوکسان به ترتیب با نسبت‌های ۲:۱ اضافه کرده و به مدت ۱۰ دقیقه با همزن التراسونیک با توان  $80 \text{ w/cm}^2$  مخلوط کرده، سپس ترکیب بدست آمده را با ۱۰۰ واحد وزنی جزء A (اپوکسی پلی‌آمید) با همزن التراسونیک با توان  $80 \text{ w/cm}^2$  به مدت ۵ دقیقه مخلوط کرده و در نهایت ۲۰ واحد وزنی جزء B (پلی آمین سخت کننده) را به آرامی به ترکیب اضافه نموده و دوباره با استفاده از همزن التراسونیک به مدت ۵ دقیقه با یکدیگر ترکیب می‌شوند و ترکیب آماده شده مانند روش اعمال لایه پرایمر، به روش اسپری معمولی بر روی نمونه‌ها اعمال می‌گردد. شکل (۵) خاصیت آب‌گریز شدن نمونه‌های کامپوزیتی را به خوبی نشان می‌دهد که این امر را می‌توان به دلیل کم شدن ترشوندگی سطح نمونه‌ها نسبت داد.

برای تعیین ضخامت پوشش‌ها بعد از خشک شدن، از دستگاه ضخامت‌سنج پوشش دیجیتال استفاده گردید. ضخامت پوشش‌ها در حدود  $10 \pm 100 \mu\text{m}$  می‌باشد. به منظور بررسی رفتار خوردگی پوشش‌های مختلف فولاد API 5LX52 از یک پیل الکتروشیمیایی سه الکترودی با ظرفیت ۵۰۰ mL برای آزمایشات پلاریزاسیون استفاده گردید. از الکتروکد کالومل فوق اشباع به عنوان الکتروکد مرجع و الکتروکد پلاتین به منظور الکتروکد کمکی استفاده شد. محلول خورنده نیز کلرید سدیم با غلظت ۳/۵٪ می‌باشد. آزمایشات مطابق استاندارد ASTM G59 در دمای محیط انجام گردید.



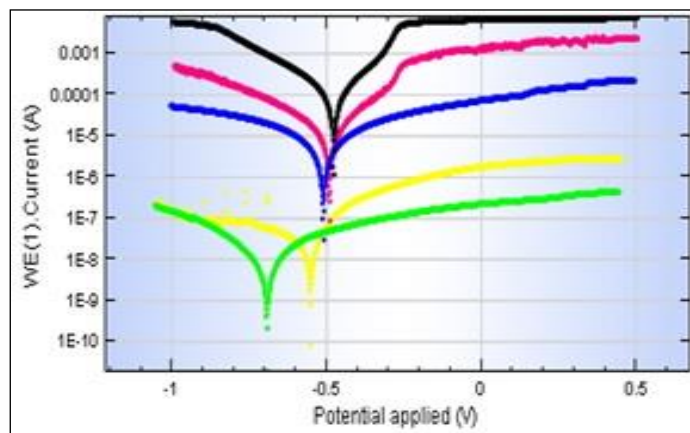
شکل ۵: نمونه کامپوزیت رنگ اپوکسی تقویت شده با دی‌اکسید تیتانیوم ضد آب

تمامی آزمایشات الکتروشیمیایی با استفاده از دستگاه Auto Lab مدل PGSTAT 302 که توسط یک رایانه کنترل می‌شد در محدوده  $\pm 100$  میلی ولت انجام گردید. نتایج بدست آمده نیز توسط نرم افزار NOVA 1.8 مورد آنالیز قرار گرفت. جهت بررسی مورفولوژی پوشش‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی که مجهز به آنالیز شیمیایی (EDX<sup>۳</sup>) است، استفاده گردید. برای بررسی پوشش اعمال شده بر روی زیر لایه فولادی از دستگاه XRD<sup>۴</sup> مدل GNR MPD3000 با منبع تشعشع  $\text{Cu-K}\alpha$  ( $\lambda=0.15406 \text{ \AA}$ ) استفاده گردید. پایش نمونه‌ها در  $2\theta$  در محدوده ۳۰ تا ۸۰ درجه، و زمان محاسبه ۱ ثانیه صورت گرفته است. برای بررسی مقاومت به سایش پوشش‌های اعمال شده از دستگاه سایش پین بر روی دیسک استفاده گردید. جهت انجام این آزمون نمونه‌هایی در ابعاد  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  تهیه شد. دستگاه توسط یک رایانه کنترل شده و داده‌های ذخیره شده (نمودار ضریب اصطلاک، کاهش وزن نمونه) به صورت نمودار در محیط اکسل بررسی گردیدند. آزمایش طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS<sup>۵</sup>) به منظور رسیدن به حالت پایدار به مدت ۹۰ دقیقه در محدوده فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱۰ مگا هرتز و با دامنه ۱۰ mV حول پتانسیل مدار باز انجام شد.

## نتایج

### نتایج پلاریزاسیون پتانسیودینامیک چرخه‌ای

منحنی‌های پلاریزاسیون فولاد کربنی API 5L X52 در محلول سدیم کلرید ۳/۵ درصد نشان می‌دهد که وجود پوشش ضد آب بر روی ذرات نانو سبب سطح جدایش و کاهش ترشوندگی شده است. مقاومت به خوردگی نانو بهتر از میکرو بوده و ذرات ضدآب به ذرات نانو بهتر از میکرو چسبیده‌اند. در شکل‌های (۶) تا (۸) درصد حجمی رنگ‌های صورتی، آبی، سبز، زرد و مشکی به ترتیب ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد بود.

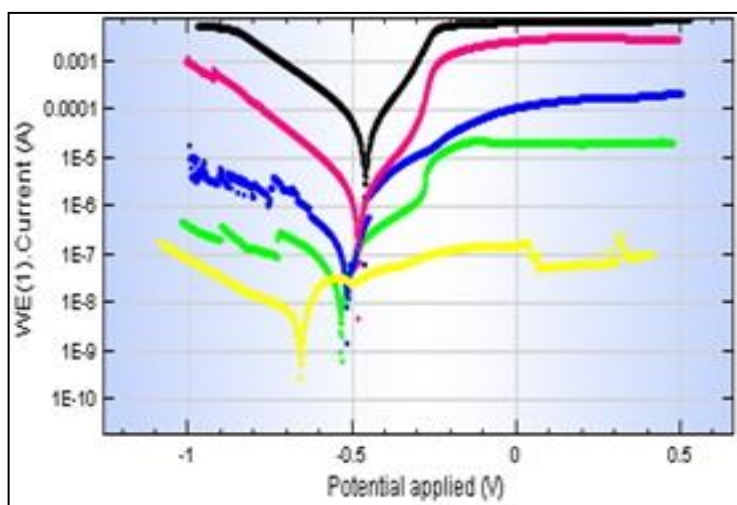


شکل ۶: منحنی پلاریزاسیون نانو دی‌اکسید تیتانیوم ضد آب

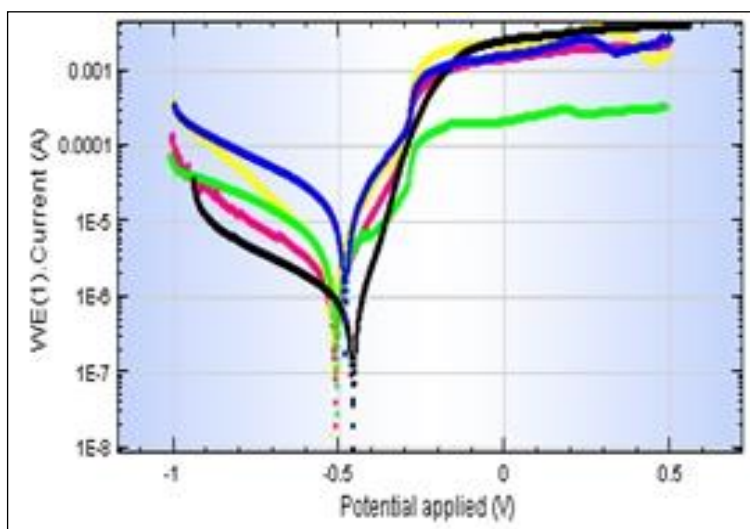
<sup>3</sup> Energy Dispersive X ray

<sup>4</sup> X-ray Diffraction

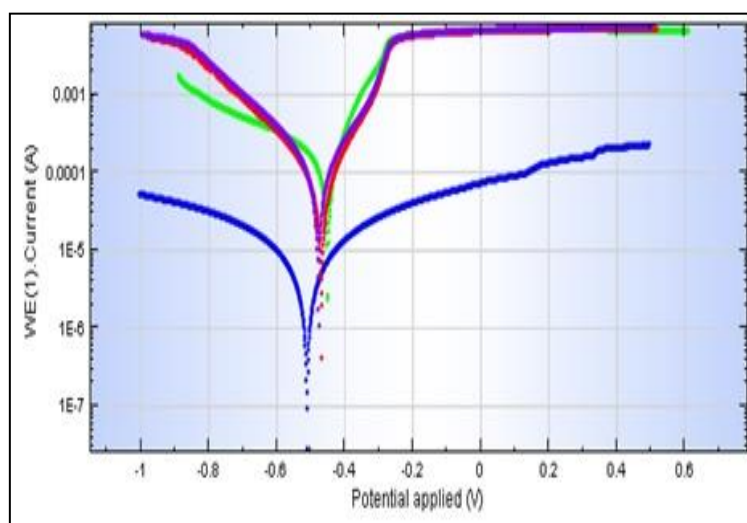
<sup>5</sup> Executive information system



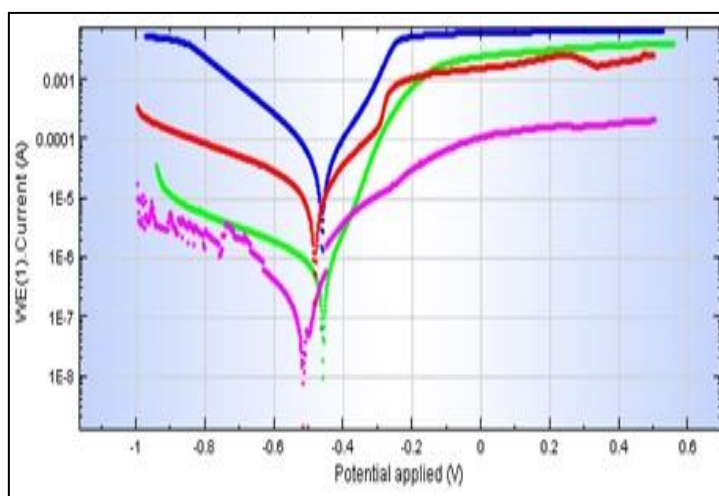
شکل ۷: منحنی پلاریزاسیون نانو دی‌اکسید تیتانیوم



شکل ۸: منحنی پلاریزاسیون میکرو دی‌اکسید تیتانیوم ضدآب



شکل ۹: منحنی پلاریزاسیون ذرات نانو و میکرو دی‌اکسید تیتانیوم



شکل ۱۰: منحنی پلاریزاسیون ذرات نانو و میکرو دی‌اکسید تیتانیوم ضدآب

در شکل‌های (۹) و (۱۰) درصد حجمی ۲ و ۵ درصد بترتیب با رنگ های قرمز و سبز برای میکرو و آبی و بنفش برای نانو نمایش داده شده است.

#### نتایج سایش

نتایج تست نمونه‌های سایش در جدول (۲)، روند افزایش مقاومت به سایش را در شرایط یکسان با اضافه کردن هم میکرو و هم نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم نشان می‌دهد. وجود این ذرات مقاومت به سایش را بالا برده و استدلال این موضوع مشارکت تقویت کننده سرامیکی در کامپوزیت سازی نسبت به در صد حجمی پوشش می باشد.

جدول ۲: نتایج تست سایش در نمونه های مختلف

درصد حجمی	٪۱	٪۲	٪۳	٪۴	٪۵
نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم	۱۰۰۰-۱۴۰۰	۱۱۰۰-۱۴۰۰	۱۱۰۰-۱۳۰۰	۱۲۰۰-۱۴۰۰	۱۱۰۰-۱۶۰۰
میانگین	۱۲۰۰	۱۳۰۰	۱۲۰۰	۱۲۵۰	۱۴۸۰
میکرو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم	۱۴۰۰-۱۶۰۰	۱۱۰۰-۱۳۰۰	۱۱۰۰-۱۵۰۰	۸۰۰-۱۳۰۰	۱۴۵۰-۱۶۰۰
میانگین	۱۴۵۰	۱۲۵۰	۱۳۰۰	۱۱۵۰	۱۵۵۰

#### نتایج چسبندگی

در نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در مقادیر کم (۱٪ و ۲٪)، ضدآب کردن نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم حدوداً ۴۰٪ افزایش استحکام چسبندگی ایجاد کرده است و در میکرو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم افزایش استحکام در درصدهای بالا (۴٪ و ۵٪) رخ داده که با ضدآب شدن، ۱/۵ تا ۳ برابر افزایش استحکام موجب گردید. نتایج تست چسبندگی در جدول (۳) آورده شده است.

#### بررسی مورفولوژی سطح

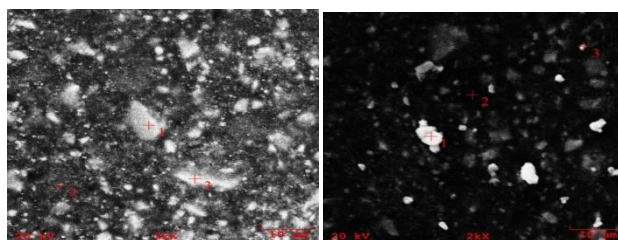
تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های فولاد کربنی API 5L X52 در محلول اسید کلریدریک ۱ مولار در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود. ترکیبات مورد نظر با تشکیل یک لایه سطحی محافظ، راندمان بازدارندگی بالایی را موجب می‌شوند. توزیع ذرات دی-اکسید تیتانیوم در سطح نسبتاً یکنواخت و همه قسمت‌های سطح را پوشانده است، اگرچه گاهی آثار آگلومره شدن و درشت



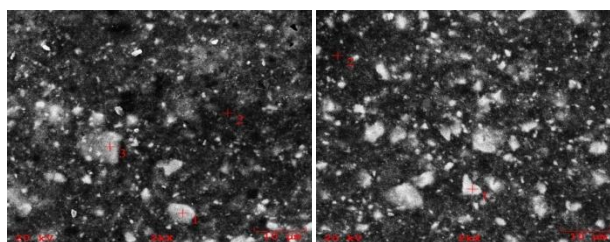
شدن از اندازه واقعی خود نشان می‌دهند که آن نیز به خاطر جاذبه‌های سطحی بین ذرات ریزتر دی‌اکسید تیتانیوم درون محفظه رنگ است. در تصاویر سمت چپ خوردگی بصورت حفرات مشکی تیره نشان داده است.

جدول ۳: مقادیر نیروی محاسبه شده جدایش در تست چسبندگی (Mpa)

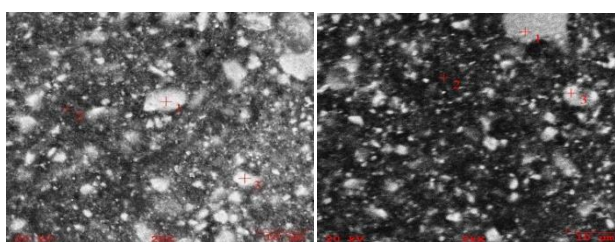
در صد حجمی	%۱	%۲	%۳	%۴	%۵
نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم	۱۰/۷۹	۸/۹۲	۱۲/۵۹	۱۱/۲۹	۱۲/۹۵
نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم ضد آب	۱۴/۲۴	۱۳/۴۵	۱۲/۴۴	۱۳/۳۸	۱۲/۰۸
میکرو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم	۹/۹۹	-	۱۱/۶۵	۵/۸۹	۱۰/۰۷
میکرو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم ضد آب	۹/۰۶	۱۵/۵۴	-	۱۵/۶۸	۱۵/۹۷



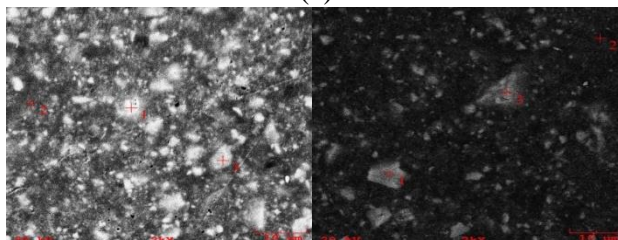
(a)



(b)



(c)



(d)

شکل ۱۱: تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های فولاد کربنی API 5L X52 در محلول اسید کلریدریک ۱ مولار (۳,۵ سدیم کلرید)

(a) TiO<sub>2</sub>/۲٪ (b) TiO<sub>2</sub>/۵٪ (c) TiO<sub>2</sub>/۲٪ ضد آب شده (d) TiO<sub>2</sub>/۵٪ ضد آب شده





### نتیجه‌گیری

ذرات سرامیک مقاومت بهتری نسبت به پلیمرها در برابر سایش از خود نشان می‌دهند و در موقع کامپوزیت‌سازی هر کدام از زمینه و تقویت کننده به اندازه درصد حجمی خود افزایش مقاومت به سایش مشارکت می‌کنند. وجود پوشش ضدآب بر روی ذرات نانو/میکرو دی‌اکسید تیتانیوم سبب سطح جدایش و کاهش ترشوندگی و چسبندگی می‌شود. میکرونیزه کردن دی‌اکسید تیتانیوم علی‌رغم درشت بودن، اما بهتر از نانو در تست چسبندگی تاثیر می‌گذارد. در محلول اسید کلریدریک ۱ مولار ترکیبات مورد نظر با تشکیل یک لایه سطحی محافظ، راندمان بازدارندگی بالایی را موجب می‌شوند. پیشنهاد می‌گردد دیگر ترکیبات سرامیکی مانند دی‌اکسید سلیسیم و دی‌اکسید زیرکونیوم در شرایط این تحقیق بررسی شود

### مراجع

- [1] Xing, X. S., Li, R. K. Y., (2004), Wear Behavior of Epoxy-Matrix Composites Filled with Uniform Sized Sub-Micron Spherical Silica Particles, *Wear*, 256, pp 21-26.
- [2] Ramesh, K., Nayak, A. D., Ray, B. C., (2014), Effect of epoxy modifiers (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>) on mechanical performance of epoxy/glass fiber hybrid composites, *Procedia Materials Science*, 6, pp 1359-1364.
- [3] Kali, D. (2013), Study on Mechanical and Dry Sliding Wear Characteristics of Meta-Cresol Novalac Epoxy Composites Filled with Silicon Carbide, Aluminum Oxide, and Zinc Oxide Particulates, *Tribology Transactions*, 57 (2), pp 157-172
- [4] Hongwei, Sh., (2007), Characterization of protective performance of epoxy. Reinforced with nanometer-sized TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>, *Progress in Organic Coatings*, 62, pp 359-368.
- [5] Behzadnasab, M., (2011), Corrosion performance of epoxy coatings containing silane treated ZrO<sub>2</sub> nanoparticles on mild steel in 3.5% NaCl solution, *Corrosion Science*, 53, pp 89-98.
- [6] Mahrholz. T., (2009), Quantitation of the reinforcement effect of silica nanoparticles in epoxy resins used in liquid composite moulding processes, *Composites*, 40, pp 235-243.