

تهیه نانوپوشش‌های اپوکسی بر پایه گرافن مغناطیسی حاوی نانوذرات فلزی نیکل و کبالت با مقاومت بالا، ضد خوردگی و مقاوم در برابر آب برای مصارف صنعتی

عبدالرضا ابری* و فرزاد دهقان

گروه شیمی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

چکیده

پیشرفت‌های اخیر در فناوری نانو، با تحولات قابل ملاحظه در فرایندهای پوشش‌دهی و فرموله کردن آنها، کاربردهای موثری در مقابله با آتش‌سوزی، خوردگی، ضربه، حرارت، سایش، فرسودگی و سایر عوامل محیطی ایجاد کرده است. در این زمینه، امکان کنترل شاخص‌هایی چون اندازه، ویژگی‌های شیمیایی، محافظت سطح، فعالیت و واکنش‌پذیری نانوذرات فراهم شده است. کاربرد نانوپوشش‌ها در سازه‌های فولادی در صنایع سبک، سنگین و دریایی با توجه به ساختار ویژه آن‌ها و خواص ناشی از این ساختار تعیین می‌شود. هدف از کار پژوهشی حاضر، تهیه نانو پوشش‌های اپوکسی برپایه چندسازه گرافنی برای جلوگیری از خوردگی فلز فولاد است. برای تهیه این ترکیبات ابتدا گرافن اکسید به روش اصلاح شده هامر سنتز شد. سپس، با استفاده از فلزات آهن، نیکل و کبالت چندسازه مورد نظر تهیه و با استفاده از آنالیزهای TGA، EDX، XRD، FESEM، FTIR و DSC مورد شناسایی قرار گرفت. برای بررسی و ارزیابی مقاومت پوشش تهیه شده و اجزای آن در برابر خوردگی از منحنی‌های تافل استفاده شد.

واژه‌های کلیدی: نانوپوشش‌ها، نانوذرات آهن، گرافن اکسید مغناطیسی، خوردگی

ایمیل نویسنده مسئول: ar.abri@azaruniv.ac.ir

۱- مقدمه

سازه‌های موجود در مناطق ساحلی و در اقیانوس‌ها، تجهیزات استخراج و فرآوری نفت، پمپ‌ها، مخازن، خطوط لوله، ماشین‌آلات و مواردی از این قبیل با جنس فولاد در معرض آب شور، ضربه، سایش و عوامل محیطی اکسید کننده قرار دارند. نانو پوشش‌ها با ایجاد لایه نازک و فراهم کردن مسیر طولانی در برابر اکسیژن و رطوبت، مانع از دسترسی به بستر فلزی می‌شوند [۵-۱].

صنعت پوشش‌دهی یکی از گزینه‌های اصلی برای بهره‌گیری از فناوری نانو است. نانو پوشش‌ها ساختارهایی هستند که با متراکم کردن مواد در سطح مولکول به وجود می‌آیند و دارای مزایای متعددی نظیر ظاهر زیبا، مقاوم در برابر ترکیبات شیمیایی، هدایت الکتریکی و گرمایی مناسب و پایدار در مقابل خوردگی هستند. افزودن نانو ذرات باعث افزایش خاصیت ضدخراشیدگی و خودتمیز شوندگی در شیشه‌ها تا جذب رطوبت و ایجاد مقاومت به خوردگی در زیرلایه‌ها می‌شود [۶]. وجود خواصی نظیر شفافیت، درخشش و جلاء عالی، انعطاف‌پذیری، استحکام ساختاری و ترکیب شیمیایی منحصر به فرد موجب شده تا نانو پوشش‌ها کارایی بالاتری نسبت به پوشش‌های معمولی داشته باشند و با استفاده از روش‌های مختلف نظیر لایه نشانی شیمیایی و فیزیکی از فازبخار، لایه نشانی الکتروشیمیایی، روش سل ژل، لایه نشانی جرقه الکتریکی و اصلاح سطح با پرتو الکترونی تولید می‌شوند [۷-۱۳].

از بین نانوساختارهای مختلف، نانولوله‌های کربنی به علت ویژگی‌هایی منحصر به فرد چون سطح ویژه زیاد، استحکام مکانیکی بالا، وزن کم و مقاوم در برابر خراش، مقاومت بیشتری در برابر خوردگی از خود نشان دادند و در رنگ‌ها و پوشش‌های آلی با استفاده از روش‌های توزیع، عامل‌دار کردن و لایه‌نشانی موجب بهبود چسبندگی پوشش آلی به زیرلایه فلزی، افزایش سختی، ارتقای خواص مکانیکی و بهبود رفتار حفاظتی پوشش می‌شوند و در عین حال یک مسیر الکتریکی مناسب برای محافظت کاتدی فراهم می‌کنند [۱۴-۱۵]. گوپاکومار و همکارانش خواص پوشش رنگ‌های آکرلیکی پایه‌آبی حاوی (۵ و ۱۰ درصد وزنی) نانوذرات رس مونت‌موریلونیست و هیدرو تالسیت، نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره و فولرن را بررسی

کردند. نتایج بررسی نشان دادند که سرعت انتقال بخار آب از درون نانو پوشش‌های حاوی مونت‌موریلونیست، نانولوله‌های کربنی تک دیواره و فولرن کاهش یافت. بنابراین، نانوساختارهای کربنی عملکردی بهتر در افزایش مقاومت به خوردگی پوشش‌های آلی دارند [۱۶]. دنیس و همکارانش، نیز سه نوع پوشش پلی‌اتریمید حاوی گرافن غیر عامل‌دار، پلی‌اتریمید حاوی گرافن و نانولوله‌های کربنی و پلی‌اتریمید حاوی نانولوله‌های کربنی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که پس از ۳۱۴۴ ساعت غوطه‌وری در محلول نمک طعام، نمونه پلی‌اتریمید حاوی گرافن غیر عامل‌دار حاوی ۲ درصد وزنی از نانوذرات و پلی‌اتریمید حاوی گرافن و نانولوله‌های کربنی حاوی ۲۰ درصد وزنی نانوذرات دچار خوردگی نشدند. همچنین، پوشش پلی‌اتریمید حاوی نانولوله‌های کربنی حاوی ۲ درصد وزنی نانوذرات کمترین سرعت خوردگی را داشتند [۱۷-۲۰].

پوشش اپوکسی یک نوع بسیار گرما سخت است که از ترکیب دو جز اصلی رزین اپوکسی و سخت کننده تشکیل می‌شود. [۲۱]. سخت کننده‌ها نیز به دو گروه کلی پلی‌آمید و پلی‌آمین تقسیم می‌شوند. سخت کننده‌های آمینی را معمولاً برای اپوکسی‌های بدون حلال با کاربری چسب و کفپوش و یا برای کاربری‌هایی که ضخامت بالایی از مواد مد نظر است، مورد استفاده قرار می‌دهند. اما پلی‌آمیدها را نمی‌توان در ضخامت‌های بالا مورد استفاده قرار داد. به عبارت کلی‌تر می‌توان گفت اپوکسی‌های پلی آمینی به عنوان چسب و کفپوش و یا در صنایع قالب‌سازی و تزئینی و اپوکسی‌های پلی آمیدی به عنوان رنگ‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پوشش‌های اپوکسی به دلیل ویژگی‌های خاصشان در صنایع مختلف به عنوان رنگ‌های صنعتی ضد خوردگی، کف پوش‌ها، چسب، چندانسازها و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۲].

ساختار شیمیایی اپوکسی‌ها این اجازه را می‌دهد که بسیارهای گوناگونی با خواص بسیار متفاوت تولید شود. به‌طور کلی اپوکسی‌ها به خاطر چسبندگی، مقاومت شیمیایی و گرمایی، خواص خوب یا حتی عالی مکانیکی، و مقاومت الکتریکی بسیار خوب آن‌ها نسبت به اکثر رزین‌های دیگر شناخته می‌شوند. بسیاری از خواص اپوکسی‌ها را می‌توان تغییر داد، برای مثال اپوکسی‌های پر شده از نقره

واکنش به مدت ۲۴ ساعت در دمای 180°C رفلکس شد. در نهایت رسوب جداسازی، شستشو و به مدت ۲۴ ساعت در دمای 100°C خشک و کامل آسیاب شد.

۲-۳- تهیه نانو چندسازه گرافن مغناطیسی

پودر گرافن اکسید حاوی نیکل و کبالت در ۲۰۰ میلی لیتر آب دوبار تقطیر و پودر کلرید آهن (II) در ۱۰۰ میلی لیتر آب دوبار تقطیر با نسبت-های (۱:۱۰) به مدت یک ساعت در التراسونیک به صورت کامل دیسپرس می شوند. سپس هر دو محلول به مدت ۳۰ دقیقه حین همزدن شدید تحت گاز نیتروژن قرار گرفتند. محلول آهن کلرید به صورت قطره قطره به محلول چندسازه‌ای اضافه و دما تا 90°C درجه سانتی گراد افزایش یافت و به مدت ۱ ساعت در همین دما همزده شد. در ادامه آمونیاک ۲۵٪ تا تشکیل رسوب به محلول اضافه شد. در نهایت رسوب با آهن ربا جدا و چندین بار با آب دیونیزه شست و شو داده شد و در دمای 70°C خشک شد.

۲-۴- بررسی قدرت ضد خوردگی نانو چندسازه گرافنی

۲-۴-۱- آماده سازی الکتروود کار

الکتروود کار مورد استفاده از جنس فلز فولاد می باشد. برای آماده سازی الکتروود کار ابتدا سطح آن با کاغذ سمباده صیقل داده شد. سپس با مواد شوینده و آب دیونیزه شست و شو و با استون و اتانول به نسبت ۱:۱ در حمام التراسونیک به مدت ۳ دقیقه چربی-زدایی شد. نکته قابل توجه این است که جهت دستیابی به پوشش یکنواخت و رسیدن به تکرارپذیری مناسب در انجام آزمایشات مرحله آماده سازی باید با دقت انجام گیرد تا سطح الکتروود به صورت یکنواخت سایش و تمیز شود. برای دستیابی به یک پوشش با توزیع یکنواخت در سراسر الکتروود از دستگاه اسپین کوتینگ استفاده شد. این دستگاه که به لایه‌نشانی اسپینی (چرخشی) هم موسوم است، برای ساخت لایه‌های نازک با ضخامت‌های میکرومتری و نانومتری به کار می-رود. نیروی گرانش و تنش سطحی، پارامترهای اصلی قرارگیری فیلم بر روی سطح صاف هستند. در دستگاه لایه‌نشانی چرخشی، شتاب گریز از مرکز موجب گسترش ماده از مرکز به لبه بستر خواهد شد که منجر به ایجاد یک لایه نازک بر روی بستر

رسانایی الکتریکی خوب، پر شده از فلز روی مقاومت خوردگی مناسب و مخلوط آنها با ریز الیاف‌های کربن باعث افزایش رسانی می شوند و این در حالی است که اپوکسی خالص عایق الکتریکی است. در ضمن برخی از انواع آنها دارای خاصیت عایقی/رسانایی در برابر گرما و مقاومت الکتریکی بالا هستند که در صنایع الکترونیک کاربرد دارند [۲۳-۲۵].

در این کار پژوهشی، نانوپوشش‌های اپوکسی بر پایه گرافن مغناطیسی حاوی نانوذرات فلزی نیکل و کبالت تهیه و با استفاده از آنالیزهای FTIR، TGA، EDX، XRD، FESEM شناسایی شد در ادامه مقاومت پوشش تهیه شده در برابر خوردگی مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد اولیه

در این پژوهش، مواد اولیه مورد نظر از نمایندگی شرکت های مرک، سیگما و آلد ریچ تهیه شدند. به منظور شناسایی چندسازه مورد نظر از آزمون FTIR با استفاده از دستگاه FT-IR Bruker PS-15 به صورت قرص جامد KBr در محدوده $4000 - 400\text{ cm}^{-1}$ ، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) با استفاده از دستگاه مدل Mira III - TeScan با ولتاژ شتاب دهی ۱۵ کیلو ولت، پراش اشعه ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه Bruker D8 Advance $\text{Cu K}\alpha$ $1/54$ مدل آنکستروم، نتایج آنالیز عنصری (EDX) با استفاده از دستگاه Phenom Pto X مدل و ترموگرام‌های TGA با استفاده از دستگاه Mettler- Toledo با سرعت روبش 10°C/min تحت گاز نیتروژن انجام گرفت.

۲-۲- تهیه نانو چندسازه گرافن

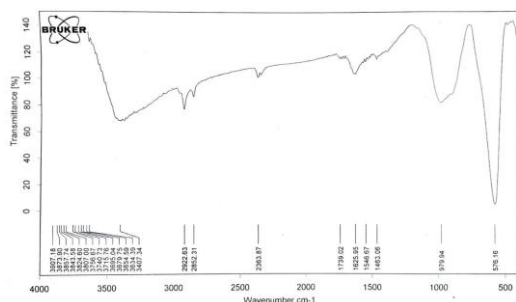
ابتدا گرافن اکسید با روش هامر تهیه [۲۶]. و با نیکل کلرید (II) و کبالت کلرید (II) به صورت جداگانه به نسبت‌های (۱:۵:۵) در ۱۰۰ میلی لیتر آب دیونیزه حل و هر کدام به مدت ۱ ساعت در دستگاه التراسونیک قرار گرفتند سپس هرسه محلول با هم مخلوط و به مدت ۱ ساعت رفلکس شد. در ادامه محلول سدیم هیدروکسید ۵ مولار به صورت قطره قطره در حین هم زدن به محلول اضافه شد تا pH محلول به حدود ۱۱ برسد. مخلوط

خوردگی است. بدین منظور چندسازه گرافنی برای بررسی میزان خوردگی فلز فولاد تهیه و در محلول خورنده سدیم کلرید ۳/۵٪ بادیستگاه پتانسیو استا-گالواناستا مورد مطالعه قرار گرفت. در ادامه، به بررسی نتایج حاصل و آنالیز طیفی چندسازه تهیه شده می‌پردازیم.

۳-۱-۳- شناسایی نانوجندسازه گرافنی

۳-۱-۱-۱- آزمون FTIR نانوجندسازه گرافنی

طیف FT-IR چندسازه تهیه شده اطلاعاتی در مورد گروه‌های عاملی ارائه می‌دهد. پیک در ناحیه 3407 cm^{-1} مربوط به گروه‌های OH ناشی از وجود یون هیدروکسل یا حضور آب در ساختار کریستالی، نوار در ناحیه 2922 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های C-H و نوار در ناحیه 1625 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های C=O روی گرافن اکسید است (شکل ۲).



شکل ۲. طیف FTIR نانوجندسازه گرافنی

۳-۱-۲- الگوی پراش پرتو ایکس (XRD)

نانوجندسازه گرافنی

به منظور تایید نتایج فوق و اثبات حضور نیکل و کبالت در نانوکاتالیست از آزمون XRD استفاده شد. بر اساس گزارش بای و همکاران الگوی پراش RGO/Co شامل پنج پیک در ۲ تناهای $41/9$ ، $44/7$ ، $47/3$ ، $50/7$ و $76/2$ است که متعلق به صفحه (۱۰۰)، (۰۰۲)، (۱۰۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰) ساختار شش‌وجهی فشرده (hcp) ذرات کبالت است [۲۷]. از طرفی حسین و همکارانش، گزارش کردند که الگوی XRD کاتالیست RGO/Ni شامل سه پیک در ۲ تناهای $44/1$ ، $51/6$ و $76/2$ است که مربوط به صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰) ساختار مکعبی مرکزوجهی ذرات نیکل است [۲۸]. از طرف دیگر، می‌دانیم گرافیت خالص دارای یک پیک قوی و تیز در $2\theta = 26/55$ درجه مربوط به

می‌شود. دو مرحله تبخیر و چرخش با سرعت ثابت، بیشترین تاثیر را بر ضخامت پوشش نهایی دارا هستند. ضخامت و دیگر خواص لایه نهایی به گراندروی، سرعت خشک شدن، درصد مواد جامد، کشش سطحی و پارامترهای سرعت چرخش نهایی، شتاب و تبخیر حلال بستگی دارد. طرحواره دستگاه اسپین کوتر با نحوه عملکرد آن در شکل (۱) آمده است.



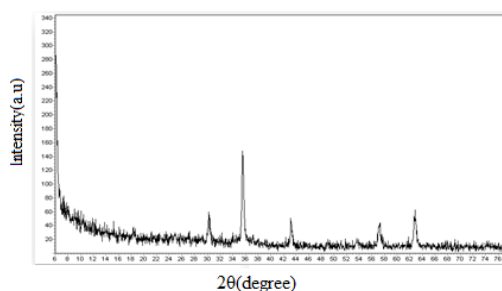
شکل ۱. طرحی از مراحل مختلف لایه‌گذاری با پوشش دورانی

۲-۴-۲- ارزیابی مقاومت خوردگی پوشش‌های تهیه شده

برای بررسی مقاومت خوردگی اجزای تهیه شده از رزین اپوکسی به عنوان پوشش استفاده شد. بنابراین الکترودهای فولادی به صورت، بدون پوشش، پوشش داده شده با رزین اپوکسی، هیدروکسید نیکل، هیدروکسید کبالت، گرافن اکسید، آهن مغناطیسی و فولاد پوشش داده شده با چندسازه گرافنی آماده شدند. برای اندازه‌گیری الکتروشیمیایی خوردگی از یک دستگاه پتانسیو استا-گالواناستا مدل Nova 2.1.3 مجهز به یک سل تک قسمتی سه الکترودی شامل الکترود فولاد خالی، الکترود پوشش داده شده با هر کدام از موارد ذکر شده، الکترود پلاتین و الکترود مرجع Ag/AgCl (Cl^- / مرجع 3M) و حجم ۲۰ میلی‌لیتری از محلول ۳/۵٪ سدیم کلرید به عنوان محیط خورنده استفاده شد. کلیه آزمایش‌ها در شرایط محیط آزمایشگاه و بدون هم زدن محلول انجام و برای ارزیابی خوردگی از تکنیک پلاریزه شدن تافلی با نرم‌افزار NOVA استفاده شد. ابتدا الکترود کار پوشش داده شده در محلول خورنده به مدت ۲۴ ساعت غوطه‌ور شد. پتانسیل از ۲۰۰- تا ۲۰۰+ میلی‌ولت نسبت به پتانسیل مدار باز (OCP) با سرعت روبش ۵/۰ میلی‌ولت بر ثانیه روبش شد و سپس منحنی پتانسیودینامیکی پلاریزه شدن رسم شد.

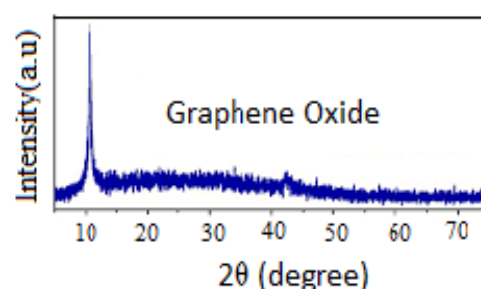
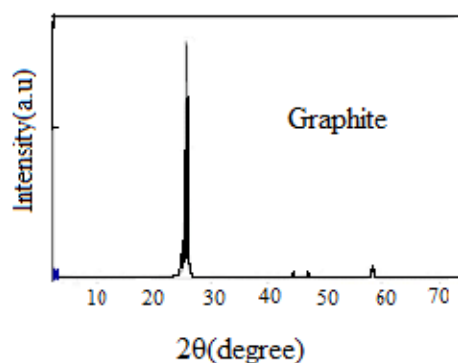
۳- تجزیه و تحلیل نتایج

همان‌طور که اشاره شد هدف از کار پژوهشی حاضر، تهیه نانوپوشش‌هایی مقاوم در برابر



شکل ۴: طیف XRD نانو چندسازه گرافنی

ساختار صفحه‌ای گرافیت شش ضلعی با فاصله بین لایه ۰/۳۴ نانومتر است. پس از اکسایش شیمیایی و لایه برداری به اکسید گرافن، قله ۲۶/۵۵ درجه ناپدید و به جای آن یک پیک پهن در $2\theta = 11/78$ درجه با فاصله بین لایه‌های ۰/۸۳ نانومتر ظاهر می‌شود. افزایش فاصله بین لایه‌های بین صفحات کربن متوالی به واسطه گروه‌های عاملی اکسیژن و مولکول‌های آب در ساختار لایه کربن نسبت داده می‌شود. هم‌چنین شدت پیک نیز نسبت به پیک گرافیت اولیه به شدت کاهش می‌یابد که بیانگر افزایش فاصله بین صفحات و نشان دهنده خروج از حالت کریستالی گرافیت است (شکل ۳).

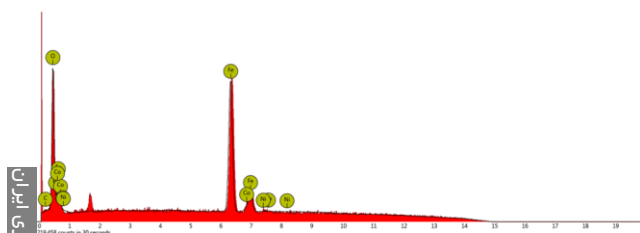


شکل ۳: طیف XRD گرافیت و گرافن اکسید

با این توضیح ناپدید شدن پیک مشخصه گرافیتی در $2\theta = 26$ و ظاهر شدن پیک‌های در نواحی ۳۰، ۳۶، ۴۳، ۵۷، ۶۳ نشان دهنده سنتز موفقیت‌آمیز چندسازه مورد نظر هستند (شکل ۴).

۳-۱-۳- بررسی آنالیز EDX نانو چندسازه گرافنی

طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDX) (شامل استفاده از انرژی پرتو ایکس، برای تجزیه و تحلیل ساختاری و تعیین ترکیب شیمیایی یک نمونه در مقیاس‌های بسیار کوچک است و می‌تواند همراه با دستگاه‌های دیگری همچون انواع میکروسکوپ‌های الکترونی برای آنالیز کیفی و کمی بر روی طیف وسیعی از نمونه‌ها شامل نمونه‌های معدنی و زمین‌شناسی، نمونه‌های مربوط به مطالعات نانو، نمونه‌های متالورژی و سرامیک‌ها، اتصالات الکتریکی، نمونه‌های زیستی و غیره انجام گیرد.

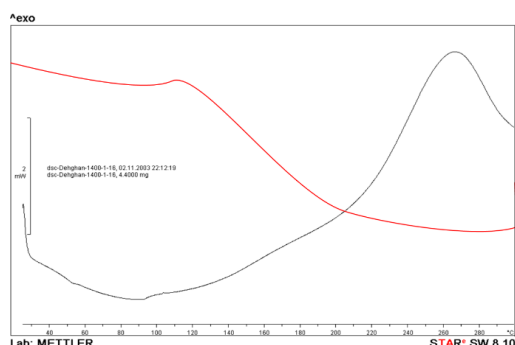


Element Number	Element Symbol	Element Name	Atomic Concentration	Error
26	Fe	Iron	48.3	0.9
8	O	Oxygen	47.1	1.0
27	Co	Cobalt	1.9	0.2
6	C	Carbon	2.4	1.1
28	Ni	Nickel	0.3	1.3

شکل ۵: آنالیز EDX نانو چندسازه گرافنی

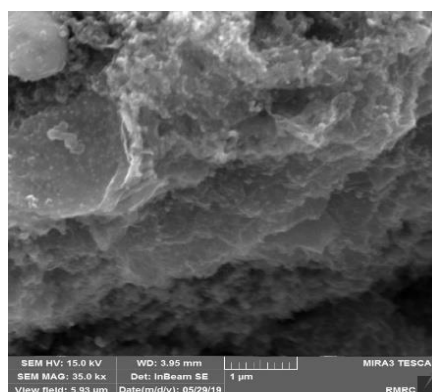
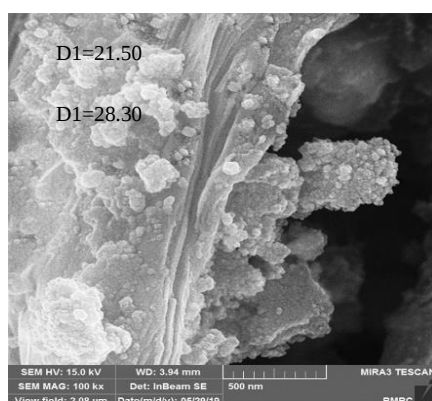
با این توضیح و با استفاده از این روش، نانو چندسازه مورد تجزیه قرار گرفت و درصد غلظت

اتمی عناصر حاصل از آن نشان دهنده موفقیت آمیز سنتز فوق بود (شکل ۵).



شکل ۷. طیف DSC/TGA نانوجندسازه گرافنی

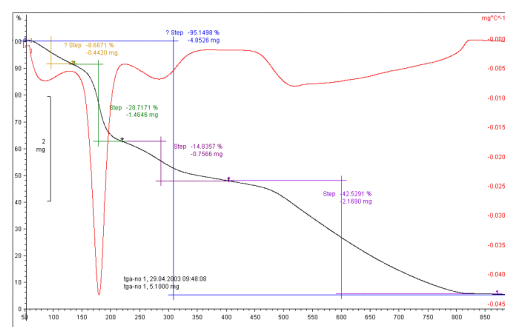
تصاویر FESEM مربوط به نانوجندسازه گرافنی، حالت لایه لایه گرافن اکسید و حالت شفاف و متخلل گرافنی را به وضوح نشان می‌دهند که بیانگر ریخت‌شناسی گرافن اکسید و نانو بودن صفحات گرافنی است (شکل ۸).



شکل ۸. تصاویر FESEM نانو چندسازه گرافنی

۳-۱-۴- بررسی طیف آنالیز TGA گرافن اکسید و DSC/TGA نانوجندسازه گرافنی

بررسی آنالیز ترموگرام گرافن اکسید نشان دهنده کاهش چند مرحله ای وزن این ماده است. نخستین مرحله از کاهش وزن در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد رخ می‌دهد که مربوط به تبخیر مولکولهای آبی است که در ساختار ترکیب باقی مانده اند. مرحله دوم از کاهش وزن از دمای ۱۶۰ درجه سانتی گراد شروع و تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد ادامه پیدا می‌کند که مربوط به تخریب گروه-های اکسیژن دار کربوکسیلیکی است که منجر به تولید گاز CO_2 میشود و در نهایت تخریب نهایی در دمای ۴۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی گراد رخ می‌دهد (شکل ۶).



شکل ۶. طیف TGA گرافن اکسید

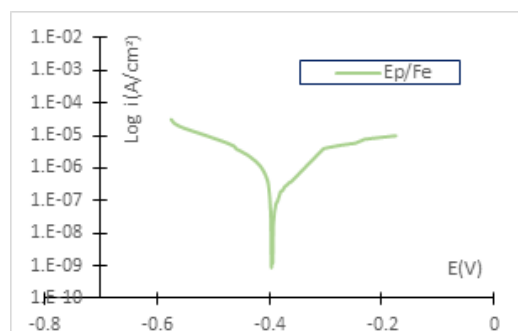
همانطوری که در منحنی TGA نانو چندسازه گرافنی مشاهده می‌شود کاهش وزنی در دمای $^{\circ}C$ ۵۰-۱۰۰، مطابق با یک پیک در ناحیه $^{\circ}C$ ۹۰ در منحنی DSC است که مربوط به تبخیر مولکولهای آبی است که به صورت فیزیکی جذب شده‌اند. کاهش چشمگیر وزن در منحنی TGA که از دمای $^{\circ}C$ ۱۴۰ شروع و تا دمای $^{\circ}C$ ۳۰۰ ادامه می‌یابد که مطابق با پیک شاخص گرمازا در $^{\circ}C$ ۲۶۳ در منحنی DSC، نشان دهنده تخریب نهایی چندسازه مورد نظر است. عدم مشاهده پیک در دمای بالاتر حاکی از این واقعیت است که هیچ کربنی در ترکیب مورد نظر باقی نمانده است (شکل ۷).

۳-۱-۵- بررسی تصاویر FESEM نانو چندسازه گرافنی

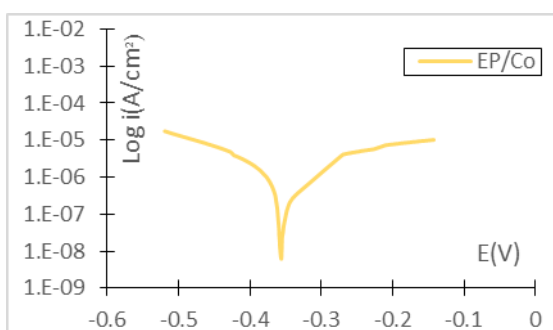
۳-۱-۶- بررسی مقاومت در برابر خوردگی

چندسازه تهیه شده

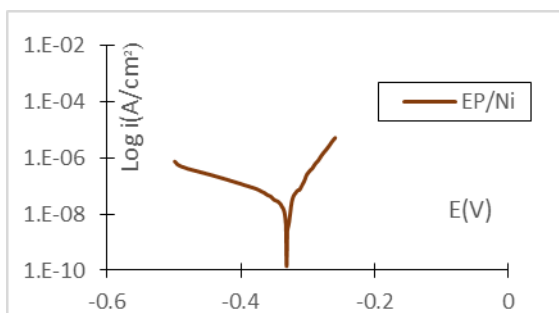
منحنی های قطبی شدن فولاد در محلول سدیم کلرید ۳/۵٪ در حضور پوشش های: فاقد نانوجندسازه (bare) (شکل ۹)، اپوکسی خالص (pure epoxy) (شکل ۱۰)، در حضور پوشش اپوکسی/ آهن (شکل ۱۱)، اپوکسی/ کبالت (EP/CO) (شکل ۱۲)، اپوکسی/ نیکل (EP/Ni) (شکل ۱۳)، اپوکسی/ گرافن اکسید (EP/GO) (شکل ۱۴)، و پوشش اپوکسی با گرافن اکسی مغناطیسی در حضور ذرات کبالت و نیکل را نشان می دهد (شکل ۱۵). پارامترهای الکتروشیمیایی حاصل از این منحنی ها، پتانسیل خوردگی (E_{corr})، چگالی جریان خوردگی (I_{corr})، شیب کاتدی (b_c)، شیب آنودی (b_a)، مقاومت پلاریزه شدن (R_p) و سرعت خوردگی (C_R) بدست آمده از برون یابی خط های تافل در جدول آورده شده است.



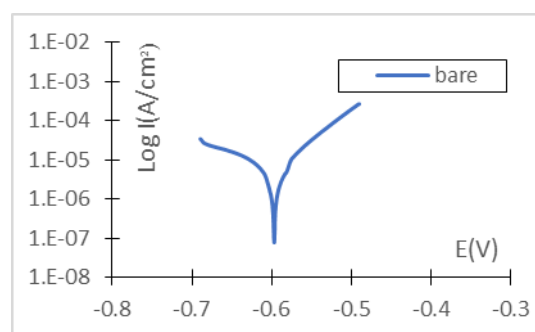
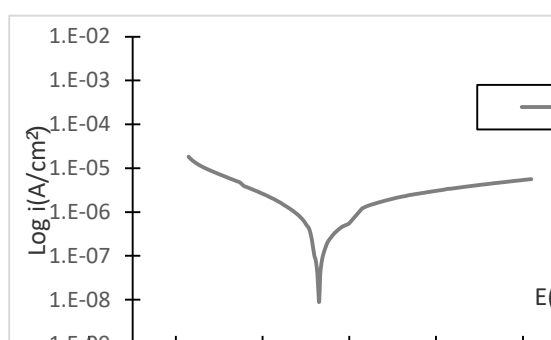
شکل ۱۱. منحنی پلاریزه شدن حاصل از فولاد در سدیم کلرید ۳/۵٪ در حضور نانوجندسازه اپوکسی و آهن مغناطیسی



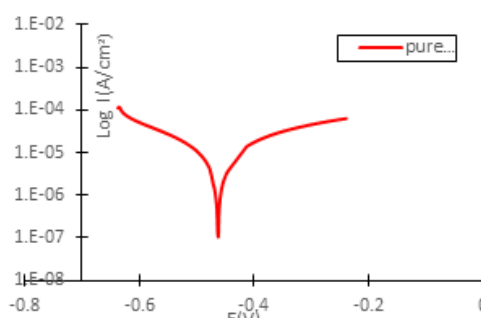
شکل ۱۲. منحنی پلاریزه شدن حاصل از فولاد در سدیم کلرید ۳/۵٪ در حضور نانوجندسازه اپوکسی و کبالت



شکل ۱۳. منحنی پلاریزه شدن حاصل از فولاد در سدیم کلرید ۳/۵٪ در حضور نانوجندسازه اپوکسی و نیکل



شکل ۹. منحنی پلاریزه شدن حاصل از فولاد در سدیم کلرید ۳/۵ درصد در حضور پوشش شاهد



شکل ۱۰. منحنی پلاریزه شدن حاصل از فولاد در سدیم کلرید ۳/۵٪ در حضور پوشش اپوکسی

با پوشش‌های اعمالی روی سطح فولاد در محیط سدیم کلرید ۳/۵٪ نسبت به پوشش شاهد تمام منحنی‌های بدست آمده نسبت به پوشش شاهد دارای پتانسیل خوردگی مثبت‌تری هستند به طوری که مقدار پتانسیل خوردگی از ۵۹۶/۸ - میلی‌ولت برای پوشش شاهد، به ۱۵۸/۹ - میلی‌ولت برای پوشش نانوچندسازه‌ی نهایی تغییر یافته است. این جابجایی مثبت در مقدار پتانسیل نشان می‌دهد که سطح فولاد توسط پوشش نانوچندسازه‌ی از خوردگی در محیط نمکی حفاظت شده است و حفاظت نیز به صورت آندی است.

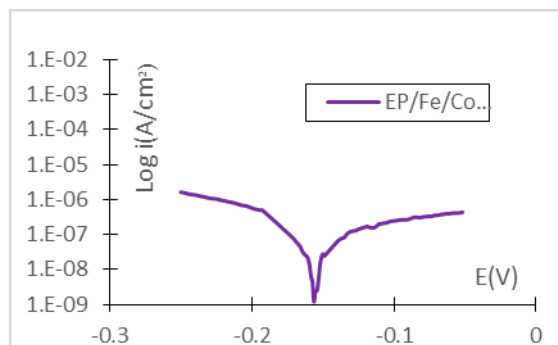
۴. نتیجه‌گیری

همانطور که گفته شد هدف از این کار پژوهشی تهیه نانو پوشش‌هایی برای جلوگیری از خوردگی فلز فولاد بود. با توجه به نتایج به دست آمده از معادلات تافل و جدول ۱ می‌توان چنین استنباط کرد که در حضور نانو چندسازه گرافنی، چگالی جریان خوردگی و سرعت خوردگی کاهش و مقاومت قطبی شدن افزایش یافت. این طرح به سادگی در کلیه صنایع سبک و سنگین قابل اجرا است.

منابع

- [1] Stankovich S, Dikin DA, Dommett GH, Kohlhaas KM, Zimney EJ, Stach EA, et al. Graphene-based composite materials. *nature*. 2006;442(7100):282-6. <https://doi.org/10.1038/nature04969>
- [2] Tawabini B, Al-Khaldi S, Atieh M, Khaled M. Removal of mercury from water by multi-walled carbon nanotubes. *Water science and technology*. 2010;61(3):591-8. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.897>
- [3] Pyrzyńska K, Bystrzejewski M. Comparative study of heavy metal ions sorption onto activated carbon, carbon nanotubes, and carbon-encapsulated magnetic nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2010;362(1-3):102-9. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.03.047>
- [4] Choi H-J, Park J-H, Min T-B, Jang H-O, Lee H-S. An Experimental Study on the Evaluation of EMP Shielding Performance of Concrete Applied with ATMSM Using

شکل ۱۴ منحنی پلاریزه شدن حاصل از فولاد در سدیم کلرید ۳/۵٪ در حضور نانوچندسازه اپوکسی و گرافن اکسید



شکل ۱۵ منحنی پلاریزه شدن حاصل از فولاد در سدیم کلرید ۳/۵٪ در حضور نانوچندسازه اپوکسی، آهن، کبالت، نیکل و گرافن اکسید

همانطور که در منحنی‌های تافلی دیده می‌شود، واضح است که کاربرد نانوچندسازه‌ها در تهیه پوشش‌ها با تغییر شیب کاتدی و آندی و پتانسیل خوردگی، جریان و سرعت خوردگی کاهش و در نهایت مقاومت در برابر خوردگی افزایش می‌یابد. داده‌های بدست آمده از بررسی خوردگی فولاد به روش قطبی شدن در سدیم کلرید ۳/۵٪ و در حضور انواع مختلف نانوچندسازه در جدول (۱) خلاصه شده است.

با توجه به داده‌های حاصل از جدول مشاهده می‌شود که چگالی جریان خوردگی از $10^{-6} \times 1/22$ آمپر بر سانتی‌متر مربع برای شاهد به $10^{-3} \times 2/1$ برای پوشش چندسازه نهایی کاهش می‌یابد یعنی باعث جلوگیری از خوردگی شده است. و همچنین سرعت خوردگی از $10^{-3} \times 2/1$ برای پوشش اپوکسی خالص به $10^{-4} \times 2/4$ برای پوشش نانوچندسازه نهایی کاهش پیدا کرده است. داده‌های حاصل از برون‌یابی این منحنی‌ها نشان می‌دهد که در حضور انواع مختلف نانوچندسازه‌های با پوشش اپوکسی جریان خوردگی از بالا به پایین جدول کاهش و مقاومت پلاریزاسیون افزایش یافته است به طوری که مقاومت قطبی شدن از $40/5$ اهم برای پوشش شاهد به $2/04 \times 10^5$ اهم برای نانوچندسازه نهایی اعم از اپوکسی، آهن مغناطیسی، کبالت، نیکل، گرافن اکسید افزایش یافته است. همانطور که مشاهده می‌شود، با حضور نانوچندسازه‌های مختلف

symmetric supercapacitor application. Journal of Electronic Materials. 2019;48(2):717-44.

<https://doi.org/10.1007/s11664-018-6811-7>

[12] Ranjan P, Kumar A, Thakur AD. Free standing graphene oxide films for gas sensing applications. Materials Today: Proceedings. 2018;5(1):732-6.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.140>

[13] Jeong W-J, Oh Y-C, Kim S-H. Effect of Hydrogen in Rapid Thermal Annealing on the Graphene-Zinc Oxide Electrode for Supercapacitor. Journal of the Korean institute of surface engineering. 2019;52(3):123-9.

<https://doi.org/0.3390/ma9080695>

[14] Fakoya MF, Shah SN. Emergence of nanotechnology in the oil and gas industry: Emphasis on the application of silica nanoparticles. Petroleum. 2017;3(4):391-405.

<https://doi.org/10.1016/j.petlm.2017.03.001>

[15] Gopakumar T, Patel N, Xanthos M. Effect of nanofillers on the properties of flexible protective polymer coatings. Polymer composites. 2006;27(4):368-80.

<https://doi.org/10.1002/pc.20199>

[16] Gray J, Luan B. Protective coatings on magnesium and its alloys—a critical review. Journal of alloys and compounds.2002;336(1-2):88-113.

[https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(01\)01899-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(01)01899-0)

[17] Mozumder MS, Mourad A-HI, Pervez H, Surkatti R. Recent developments in multifunctional coatings for solar panel applications: A review. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2019;189:75-102.

<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.09.015>

[18] Larcher MN, Cayron C, Blatter A, Soullignac R, Logé RE. The thermally activated distortion with amplification effect and related variant selection in red gold alloys. Acta

[19] Park N-G, Zhu K. Scalable fabrication and coating methods for perovskite solar

Zn-Al Alloy Wire. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2019;19(3):209-17.

<https://doi.org/10.5345/JKIBC.2019.19.3.209>

[5] Chen H, Li C, Qu L. Solution electrochemical approach to functionalized graphene: History, progress and challenges. Carbon. 2018;140:41-56.

<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.08.027>

[6] Geim AK, Novoselov KS. The rise of graphene. Nanoscience and technology: a collection of reviews from nature journals: World Scientific; 2010. p. 11-9.

<https://doi.org/10.1038/nmat1849>

[7] Meng Q, Wu H, Zhao Z, Araby S, Lu S, Ma J. Free-standing, flexible, electrically conductive epoxy/graphene composite films. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.2017;92:42-50.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.028>

[8] Mishra N, Boeckl J, Motta N, Iacopi F. Graphene growth on silicon carbide: A review. physica status solidi Materialia.2020;198:242-56.

<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.07.064>

(a).2016;213(9):2277-89.

<https://doi.org/10.1002/pssa.201600091>

[9] Megawati M, Chua CK, Sofer Z, Klímová K, Pumera M. Nitrogen-doped graphene: effect of graphite oxide precursors and nitrogen content on the electrochemical sensing properties. Physical Chemistry Chemical Physics. 2017;19(24):15914-23.

<https://doi.org/10.1039/C7CP00520>

[10] Zaaba N, Foo K, Hashim U, Tan S, Liu W-W, Voon C. Synthesis of graphene oxide using modified hummers method: solvent influence. Procedia engineering. 2017;184:469-77.

<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.118>

[11] Ciszewski M, Koszorek A, Radko T, Szatkowski P, Janas D. Review of the selected carbon-based materials for



free, magnetically recoverable and cost effective catalyst for Sonogashira cross-coupling reactions, RSC Advances, 2015; 5(125): 103105-103115. DOI <https://doi.org/10.1039/C5RA22601E>

cells and solar modules. Nature Reviews Materials. 2020:1-18.

<https://doi.org/10.1038/s41578-019-0176-2>

[20] Ingrole RS, Gill HS. Microneedle coating methods: a review with a perspective. Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics. 2019;370(3):555-69.

<https://doi.org/10.1124/jpet.119.258707>

[21] Pham HQ, Marks MJ. Epoxy resins. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 2000.

https://doi.org/10.1002/14356007.a09_547

[22] Jin F-L, Li X, Park S-J. Synthesis and application of epoxy resins: A review. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2015;29:1-11.

<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.026>

[23] May C. Epoxy resins: chemistry and technology: Routledge; 2018.

[24] Rakotomalala M, Wagner S, Döring M. Recent developments in halogen free flame retardants for epoxy resins for electrical and electronic applications. Materials. 2010;3(8):4300-27.

<https://doi.org/10.3390/ma3084300>

[25] Mohan P. A critical review: the modification, properties, and applications of epoxy resins. Polymer-plastics technology and engineering. 2013;52(2):107-25.

<https://doi.org/10.1080/03602559.2012.727057>

[26] Marcano DC, Kosynkin DV, Berlin jM, Sinitskii A, Sun Z, Slesarev A, Tour J.M, Improved synthesis of graphene oxide, ACS Nano. 2010; 4(8): 4806-4814.

[27] Bai S, Shen X, Zhu G, Li M, Xi H, Chen K, In situ Growth of NixCo100-x Nanoparticles on Reduced Graphene Oxide Nanosheets and Their Magnetic and Catalytic Properties, ACS applied materials & interfaces, 2012; 4(5): 2378-2386.

<https://doi.org/10.1021/am300310d>
[28] Hussain N, Gogoi P, Khare P, Das MR, Nickel nanoparticles supported on reduced graphene oxide sheets: a phosphine

Preparation of epoxy nanocoatings based on magnetic graphene containing nickel and cobalt metal nanoparticles with high resistance, anti-corrosion and water resistance for industrial use

A.Abri* and F.Deghan

Chemistry Department, Faculty of Science, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz.
Iran

Abstract:

The advances achieved in nanotechnology have brought significant changes in the coating and formulating processes, which have created practical applications in dealing with fire, corrosion, impact, heat, wear, wear and tear and other environmental factors. In this context, it is possible to control indicators such as size, chemical properties, surface protection, activity, and reactivity of nanoparticles. The application of nanocoatings in steel structures in light and heavy industries and marine is determined according to their specific design and the properties resulting from this structure. The aim of the present research work is to prepare epoxy nanocoatings based on graphene composite to prevent the corrosion of steel. Graphene oxide was first synthesized by the modified Hamer method to prepare these compounds. Then, by using iron, nickel and cobalt metals, the desired composite was prepared and identified using FTIR, FESEM, XRD, EDX, TGA and DSC analyses. TOEFL curves were used to check and evaluate the resistance of the prepared coating and its components against corrosion.

Keywords: Nanocoatings, Iron nanoparticles, Magnetic graphene oxide, Corrosion, Epoxy