

تهیه نانوپودر روی اکسید به روش سوختن ژل و استفاده از آن در ساخت پوشش‌های مقاوم به خوردگی کامپوزیتی پلیمر / روی اکسید

وجیهه خانی*، لیلا شریفی

یزد، سازمان جهاد دانشگاهی استان یزد، گروه پژوهشی سرامیک صنعتی، صندوق پستی ۱۴۶۱۵۱۴۵

آرش پیامی، حسین کوهانی

تهران، پژوهشگاه نیرو، گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، صندوق پستی ۱۴۶۶۵۵۱۷

سید حسین میرحسینی

یزد، سازمان جهاد دانشگاهی استان یزد، گروه پژوهشی سرامیک صنعتی، صندوق پستی ۱۴۶۱۵۱۴۵

چکیده: پوشش‌های کامپوزیتی پلیمر/ سرامیک از گزینه‌های مناسب برای جلوگیری از خوردگی لوله‌های انتقال آب و پساب محسوب می‌شوند. در این پژوهش، ابتدا نانوپودر روی اکسید به روش سوختن سل-ژل تولید شد و سپس دو نوع پوشش کامپوزیتی اپوکسی/ روی اکسید و پلی آنیلین/ روی اکسید، بر روی لوله‌های فولادی اعمال شد و ویژگی‌های آنها بررسی شد. به منظور بررسی ویژگی‌های نانوپودر و پوشش‌ها، آنالیزهای FT-IR، SEM، XRD و آزمون‌های ویژگی‌های مکانیکی انجام شد. میزان ورود عناصر پوشش به داخل آب آشامیدنی نیز اندازه‌گیری شد. نتیجه‌ها نشان داد که غلظت فلزهای وارد شده به آب کمتر از استاندارد بوده و سلامت آب را به خطر نمی‌اندازد. برای بررسی رفتار خوردگی پوشش اعمال شده بر لوله فلزی، پتانسیل مدار باز بر روی دو نوع پوشش انجام شد. برای ارزیابی توانایی پوشش در کاهش سرعت خوردگی نیز، منحنی‌های تافل رسم شدند و مطالعه‌های خوردگی بر روی نمونه‌ها صورت پذیرفت. نتیجه‌ها نشان دادند که حضور ذره‌های ۲۵ نانومتری روی اکسید در کنار پلیمر، مقاومت به خوردگی لوله‌های فولادی را به میزان زیادی افزایش می‌دهد، و در این رابطه پوشش‌های اپوکسی/ روی اکسید بهتر عمل می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: پوشش‌های نانو کامپوزیتی؛ روش سوختن ژل؛ پلیمر؛ روی اکسید؛ خوردگی شیمیایی.

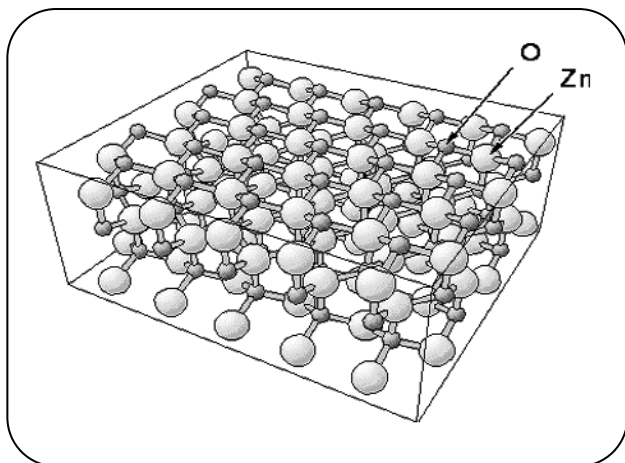
KEY WORDS: Nano composite coatings; Gel combustion; Polymer; Zinc oxide; Chemical corrosion.

مقدمه

آب و پساب و خطوط لوله‌های انتقال آب در صنایع گوناگون از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند. پدیده خوردگی در لوله‌ها و سامانه‌های توزیع آب آشامیدنی به علت تخریب و انهدام این سامانه‌ها، می‌تواند صدمه‌ها و خسارت‌های اقتصادی زیادی را موجب شود و خطراتی را در اثر ورود ترکیب‌های ناشی از خوردگی برای مصرف‌کنندگان ایجاد نماید [۱، ۲]. مسئله خوردگی شیمیایی در لوله‌های آب، همواره به‌عنوان یکی از مشکل‌های بزرگ صنعت مطرح بوده و سرمایه‌گذاری‌های کلانی در این بخش صورت می‌پذیرد. یکی از روش‌های مناسب برای کاهش هزینه‌های خوردگی، استفاده از لوله‌های پلیمری است اما با توجه به اینکه درصد زیادی از خطوط آب و پساب کشور از نوع لوله‌های فولادی هستند جایگزین کردن همه این لوله‌ها با انواع پلیمری به نظر منطقی نمی‌آید [۳-۵].

یکی از اصلی‌ترین روش‌های دیگر جلوگیری از خوردگی استفاده از پوشش‌ها می‌باشد که مانع از تماس سطوح با محیط خورنده می‌شود. استفاده از انواع پوشش‌ها شامل پوشش‌های سرامیکی، فلزی و آلی، موجب افزایش دوام و تأمین اهداف مورد نظر می‌شود [۶-۹]. مواد سرامیکی به دلیل شکننده بودن، به تنهایی قابلیت استفاده به‌عنوان پوشش را ندارند درحالی‌که دارای ویژگی‌های یگانه‌ای همچون مقاومت به خوردگی بالا و مقاومت در برابر مواد شیمیایی می‌باشند. بنابراین استفاده از این مواد به‌صورت کامپوزیت با پلیمر می‌تواند بسیار مثرتر باشد. پلیمرها به سبب ویژگی‌های برجسته‌ای چون سبکی، مقاومت در برابر خوردگی، قیمت مناسب و سرامیک‌ها به دلیل‌هایی چون مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت در برابر خزش، خستگی و گرما می‌توانند ویژگی‌های برجسته‌ای در پوشش درونی لوله‌ها به وجود آورند [۱۰ - ۱۲]. با رساندن اندازه ذره‌ها در اندازه نانو نیز بسیاری از ویژگی‌های کامپوزیت‌ها مانند ویژگی‌های مکانیکی، نوری و الکتریکی بهبود چشمگیری می‌یابد. امروزه ساخت پوشش‌های نانو کامپوزیتی درصد بالایی از پژوهش‌های علمی و صنعتی را به خود اختصاص داده است [۱۳-۱۶].

روی اکسید از جمله مواد سرامیکی است که به دلیل ویژگی‌های یگانه کاربردهای بسیاری دارد. ZnO دارای ساختار ورتزیت^(۱) می‌باشد که در آن اتم‌های اکسیژن در یک شبکه شش وجهی^(۲)



شکل ۱- ساختار روی اکسید.

آرایش گرفته‌اند و اتم‌های روی نصف مواضع تتراهدرال را به خود اختصاص داده‌اند. سلول واحد روی اکسید شامل دو کاتیون روی و دو آنیون اکسیژن می‌باشد. ساختار بلوری روی اکسید را می‌توان به صورت لایه‌های متوالی اکسیژن - روی در نظر گرفت که در امتداد محور C یا صفحه (۰۰۱) قرار گرفته اند. شکل ۱ ساختار روی اکسید را نشان می‌دهد.

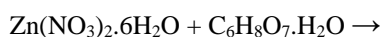
با توجه به اینکه ترکیب‌های روی اکسید به دلیل داشتن خواص ویژه، قابلیت حفاظت فلزها را از خوردگی دارند، به‌نظر می‌رسد تهیه پوشش‌های پلیمر/ روی اکسید با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، سبب بهبود ویژگی‌های ضد خوردگی نیز می‌شود. به‌کارگیری نانو ذره‌های روی و روی اکسید در تهیه نانو کامپوزیت‌ها، می‌تواند استحکام آنها را افزایش دهد و وزن آنها را کم کند، مقاومت شیمیایی و گرمایی آنها را بالا ببرد و واکنش آنها را در برابر نور و تابش‌های دیگر تغییر دهد. با استفاده از نانو ذره‌ها نسبت استحکام به وزن مواد کامپوزیتی به شدت افزایش خواهد یافت [۱۷، ۱۸].

روش سوختن سل - ژل یکی از روش‌های متداول در تولید نانو پودرها می‌باشد. در این روش که روشی جدید با ترکیبی بی‌همانند از روش سل - ژل و فرایند سوختن است، ابتدا مواد اولیه که بیشتر به صورت ترکیب‌های نیتراتی هستند در یک حلال آبی مانند سیتریک اسید در نسبت‌های مولی مناسب حل می‌شوند و در اثر گرما دادن و تبدیل شدن مواد به سل و سپس ژل و در ادامه سوختن مواد، نانو پودر مورد نظر تشکیل می‌شود.

(۱) wurtzite

(۲) Hexagonal close packed

روی اکسید نشان داده شده است. روی نیترات به همراه سوخت سیتریک اسید به نسبت ۲ به ۱ تهیه شدند. ابتدا مقدار ۵ گرم از روی نیترات به همراه ۳/۵۳ گرم از سیتریک اسید در ۵۰ میلی لیتر آب یون‌زدایی شده حل شد. از آنجایی که محلول غیرهمگن به سوخت ناقص منجر می‌شود و به منظور حل شدن مواد جامد اولیه در محلول، محلول در دمای °C ۷۰ به‌طور یکنواخت توسط یک گرم‌کن و همزن مغناطیسی به هم زده شد. پس از آن به‌منظور تنظیم pH محلول، در بازه‌ی ۲۰-۵ میلی لیتر محلول آمونیاک به‌طور تدریجی به محلول داخل بشر پس از سرد شدن در دمای محیط افزوده شد. سرد کردن محلول به دلیل کاهش بخارهای سمی ناشی از تبخیر آمونیاک و سادگی در زمان تنظیم pH محلول می‌باشد. در ادامه محلول با pHهای گوناگون در دمای °C ۱۰۰ به‌منظور تبخیر آب اضافی تا رسیدن به یک سل به‌طور کامل ویسکوز شده در داخل بشر در شرایط ثابت هم‌زن قرار گرفت. سپس سل ویسکوز شده به درون یک ظرف مسطح ریخته شد و در هوای آزاد به‌طور مستقیم در دمای °C ۱۵۰ گرما داده شد تا به‌صورت ژل در آمد. این در حالی است که محلول تا مرحله تشکیل ژل و تبخیر آب اضافی آن در درون ظرف مسطح همچنان در شرایط ثابت هم‌زدن قرار گرفت. با ادامه گرما دادن ژل به‌تدریج خشک شده و در این هنگام سوختن از درون ژل خشک شده از یک نقطه شروع شده و طی مدت زمان بسیار کم تمام ژل را فرا می‌گیرد. پس از پایان سوختن، فرآورده‌ی به‌دست آمده در °C ۵۰۰ کلسینه شدند. واکنش شیمیایی صورت پذیرفته در روش سوختن سل - ژل به صورت زیر می‌باشد:



در مرحله بعد نانو پودر تهیه شده به میزان ۲ درصد وزنی درون ماده پلیمر پلی آنیلین با فرمول $\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$ و پلیمر اپوکسی با فرمول $\text{C}_2\text{H}_4\text{N}$ پخش شد و بر روی قطعه آهنی پوشش داده شده و ویژگی‌های فرآورده‌ی پایانی مورد بررسی قرار گرفت. کلیه مواد شیمیایی استفاده شده فرآورده‌ی شرکت مرک آلمان بودند. در پوشش دهی از صفحه‌های فلزی با اندازه‌ی $10 \times 10 \text{ cm}^2$ از جنس فولاد کربنی و با ضخامت 0.8 میلی متر استفاده شد. زیرسازی لوله نیز به روش شن پاشی صورت پذیرفت. پس از زیرسازی با شن، پوشش‌دهی با روش پاشش بر روی سطح فلز انجام شد. پس از پوشش‌دهی ویژگی‌های مکانیکی پوشش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا بر اساس استاندارد ASTM D 1400، ضخامت پوشش‌ها اندازه‌گیری شده و سپس

در این روش ضمن استفاده از برتری‌های روش سل - ژل، می‌توان با ایجاد یک پدیده سوختن همراه با کاهش مدت زمان واکنش، به ذره‌های ریز و در حد نانو دست یافت. در روش سل - ژل از یک ماده ژلی کننده استفاده می‌شود و با تشکیل الکوکسیدهای فلزی و واکنش با آب می‌توان به یک ژل همگن دست یافت و در روش سوختن با استفاده از یک عامل سوختنی و انجام واکنش‌های احتراقی می‌توان سبب انجام خودبخودی واکنش و ایجاد نانو پودر شد. در روش سوختن سل - ژل با افزودن یک سوخت در مواد اولیه می‌توان هر دو روش سل - ژل و سوختن را در کنار یکدیگر داشت. در این روش گرما دادن محلول اولیه سبب تبدیل سل به یک ژل با ویسکوزیته بالا می‌شود. ژل به‌دست آمده با بالا رفتن دما طی یک فرایند سوختن به شدت گرمازا ناشی از واکنش مواد آلی به عنوان عامل احیا کننده و نیترات‌ها به عنوان عامل اکسید کننده، به خاکستری نرم و به شدت متخلخل تبدیل می‌شوند که با کلسینه کردن در دمای مناسب به فرآورده‌ی نهایی تبدیل می‌شود [۲۳، ۲۴، ۱۹].

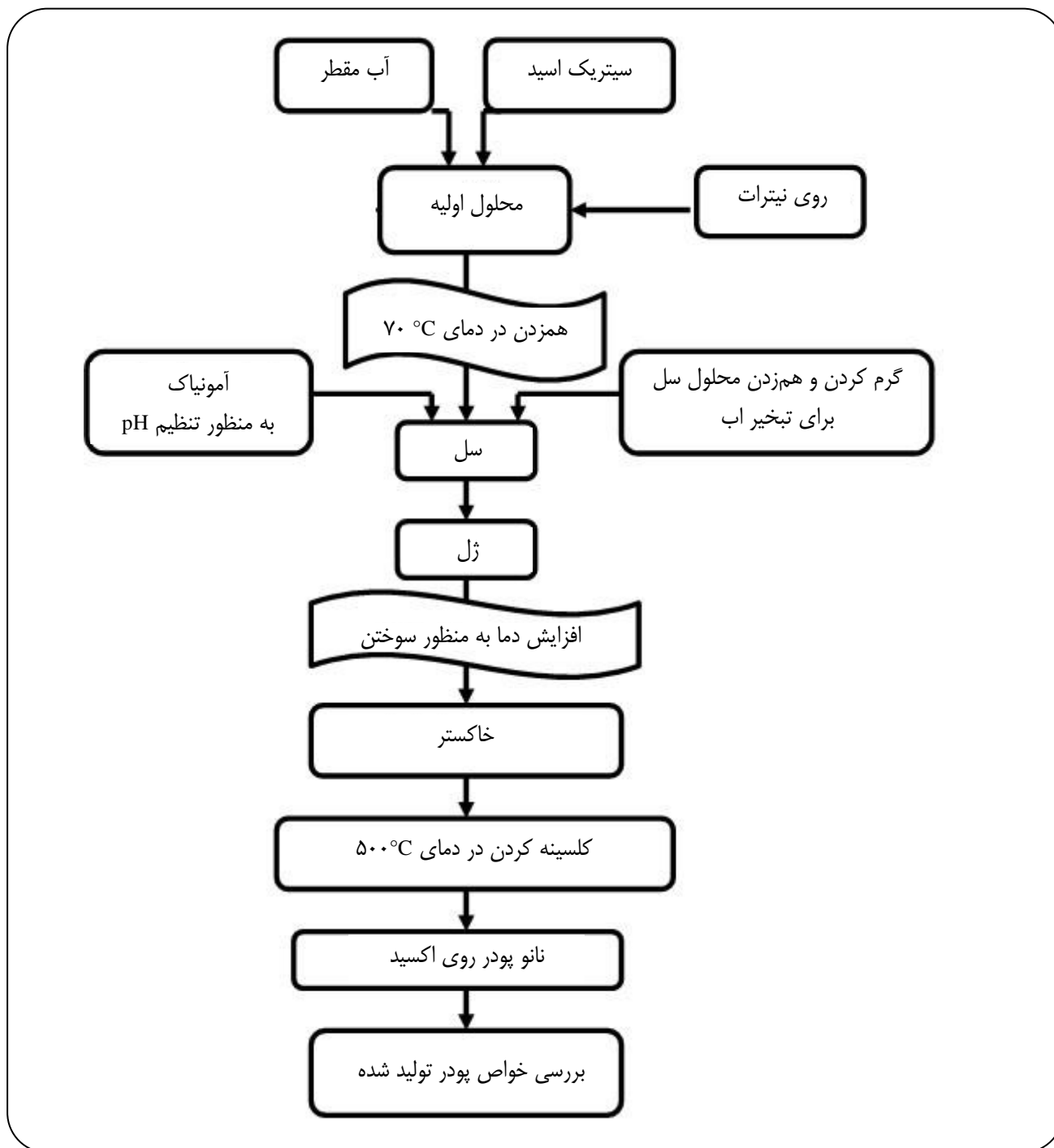
V.C.Sousa و همکاران [۲۰] از جمله پژوهشگرانی بودند که بر روی تهیه احتراقی پودر روی اکسید پژوهش‌هایی انجام داده‌اند. این پژوهشگران از نیترات‌های فلزی به همراه اوره برای ساخت پودر روی اکسید استفاده کردند و به پودر روی اکسید با اندازه‌هایی در حدود ۴۰۰-۵۰۰ nm دست یافتند. *Tsung-Yung Wu* و *Hwang C. Ching* پژوهشگران دیگری بودند که بر روی ساخت نانو پودر روی اکسید با استفاده از روش سوختن پژوهش‌هایی انجام دادند [۲۱، ۲۲]. این پژوهشگران از سوخت گلاسیسین و نیترات‌های فلزی استفاده کردند و بهترین نسبت را نسبت استوکیومتری دانستند. *ریاحی و همکاران* [۲۵] با روش سوختن سل - ژل و استفاده از سیتریک اسید به عنوان عامل ژله‌ای شدن و عامل سوخت، نانو پودر روی اکسید برای کاربرد ورستوری را تولید کردند. در این پژوهش، در مرحله اول، نانو پودر روی اکسید به روش سوختن تولید شده و سپس در مرحله دوم، دو نوع پوشش کامپوزیتی پلیمر/سرامیک برای اعمال بر لوله‌های فولادی تهیه شد. این پوشش‌ها پس از ساخت، به روش پاشش بر روی لوله‌های فلزی اعمال شده و ویژگی‌های آنها بررسی شد.

بخش تجربی

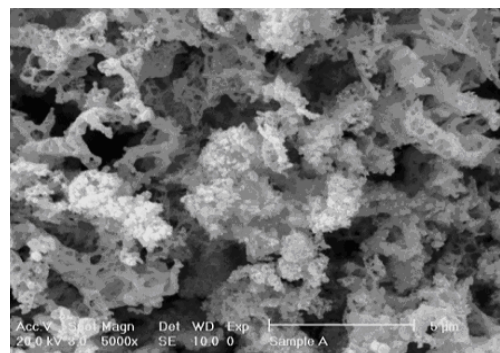
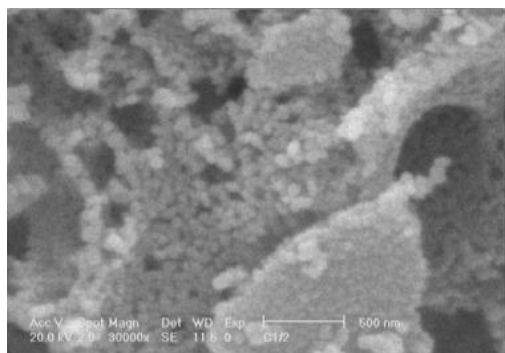
در این پژوهش، ابتدا نانو پودر روی اکسید با استفاده از روش ژل سوختن تهیه می‌شود. شکل ۲ نمودار تهیه تهیه نانو پودر

جدول ۱- مواد مصرفی برای تهیه نانو ذره‌های اکسید روی به روش سل ژل احتراقی.

شرکت تولید کننده	جرم مولکولی (g/mol)	فرمول شیمیایی	مواد اولیه
مرک	۲۹۷/۴۶	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	روی نیترات
مرک	۲۱۰/۱۴	$C_6H_8O_7 \cdot H_2O$	سیتریک اسید



شکل ۲- تهیه نانو پودر اکسید روی با افزودنی‌ها به روش سوختن سل - ژل.



شکل ۳- تصویرهای نانو پودر تهیه شده روی اکسید در بزرگنمایی‌های گوناگون.

شده است. تصویرهای SEM تشکیل ذره‌های کمتر از ۱۰۰ نانومتر ZnO را نشان می‌دهند.

بررسی فازی نانو پودر روی اکسید تهیه شده

به منظور تعیین دمای مناسب برای عملیات حرارتی، از پودر به دست آمده از فرایند سوختن سل - ژل آزمون DTATG گرفته شد. در طیف به دست آمده پیک گرماگیر در دمای ۴۱۰ درجه سلسیوس دیده شد که مربوط به خروج مواد فرار و ترکیب‌های آلی بوده است و اثبات می‌کند که دمای مناسب برای عملیات حرارتی در بازه‌ی ۴۰۰-۵۰۰ درجه سلسیوس قرار دارد. بنابراین پودرهای تهیه شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس کلسینه شدند. پرتوی XRD پودر کلسینه شده در شکل ۴ نشان دهنده تشکیل روی اکسید است (مقایسه با کارت شماره 05-0664). همان‌گونه که در تصویر مشخص می‌باشد الگوهای ZnO به صورت تیز و کامل به وجود آمده‌اند و دمای عملیات حرارتی دمای مناسبی انتخاب شده است. برای به دست آوردن اندازه بلورک‌های نانو پودر روی اکسید، از فناوری شرر استفاده شد و اندازه بلورک‌های تهیه شده روی اکسید از روی نتیجه‌های XRD محاسبه شد.

$$D = \frac{0.9\lambda}{(B^2 - b^2)^{1/2} \cos \theta}$$

D: اندازه کریستالیت

λ : ثابتی مربوط به دستگاه (در صورت $\text{nm} = \text{cu} \text{ k}\alpha$)

(۰٫۱۵۴)

β : نصف پهنا‌ی پیک بیشینه (بر حسب رادیان)،

b: نصف پهنا‌ی پیک نمونه استاندارد،

θ : زاویه مربوط به پیک

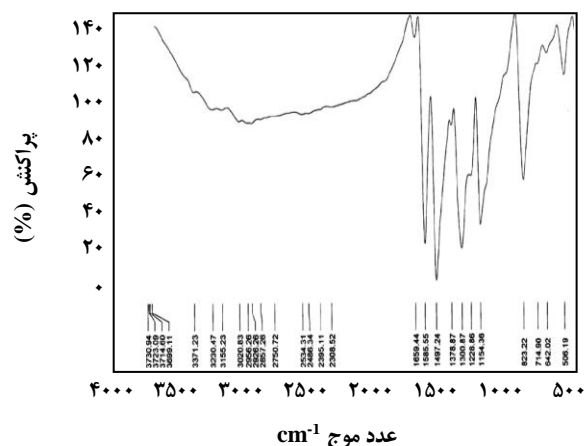
بر اساس استاندارد ASTM D 3350، چسبندگی لایه‌ها اندازه‌گیری شد. در ادامه سختی پوشش نیز بر اساس استاندارد ASTM D 4360 و ضربه پذیری پوشش‌ها بر اساس استاندارد ASTM D 2194 مورد سنجش قرار گرفت. برای بررسی ورود عناصر پوششی به درون آب آشامیدنی از استاندارد ASTM D 3630 استفاده شد. بعد از پوشش‌دهی نمونه‌ها با آب مقطر شسته شده و درون محلول‌های الکترولیت هیدروکلریک اسید ۰٫۱ مولار، سولفوریک اسید ۰٫۱ مولار و نمک طعام ۳٫۵٪ وزنی قرار داده شدند و ویژگی‌های ضد خوردگی آنها با استفاده از روش الکتروشیمیایی تافل و روش ثبت نمودارهای پتانسیل/زمان بررسی شد. به منظور انجام آزمایش‌های خوردگی از دستگاه EG&G Potentiostat/Galvanostat Model 273 A استفاده شد.

برای انجام آزمون SEM و دیدن ریزساختار نانو پودرهای تهیه شده و همچنین دیدن اندازه تقریبی مواد تشکیل دهنده اکسیدی از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM (model Philips XL30) استفاده شد. برای بررسی فازهای تشکیل شده آنالیز پراش پرتوی ایکس بر روی نانو پودر تهیه شده و پوشش کامپوزیتی، توسط دستگاه XRD (model EXPERT Phillips) انجام شد. پرتوی ایکس ایجاد شده دستگاه Cu-K α با طول موج ۱٫۵۴۰۵۶ آنگستروم و با صافی نیکلی بود. دستگاه FT-IR مورد استفاده در این پژوهش مدل IFS 48 ساخت شرکت Bruker بود.

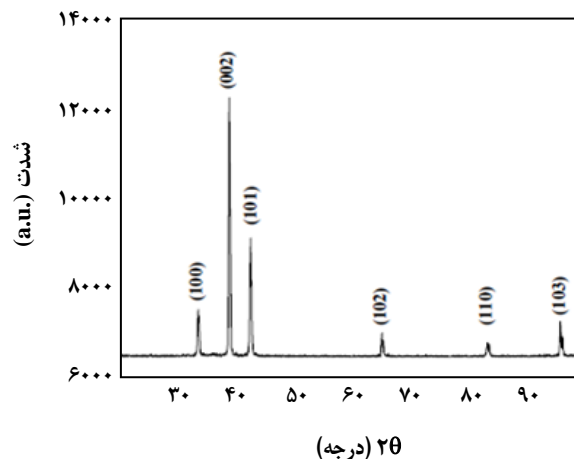
نتیجه‌ها و بحث

بررسی ریزساختاری نانو ذره‌های روی اکسید تهیه شده

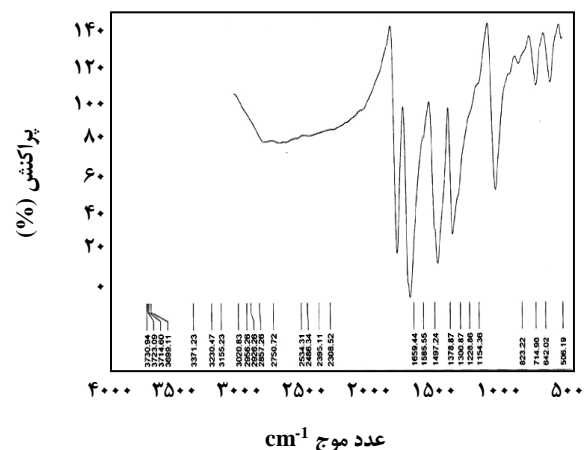
ریزساختار نانو پودر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مطالعه شد. تصویر ریزساختاری نانو پودر در شکل ۳ آورده



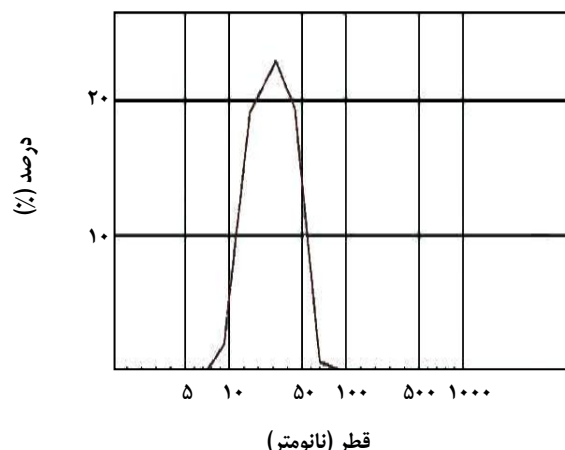
شکل ۶- پرتو FT-IR کامپوزیت پلی آنیلین / روی اکسید به عنوان پوشش ۱.



شکل ۴- پرتو XRD از نانو ذره روی اکسید سنتز شده.



شکل ۷- پرتو FT-IR کامپوزیت اپوکسی / روی اکسید به عنوان پوشش ۲.



شکل ۵- توزیع اندازه ذره‌های پودر تهیه شده.

بررسی فازی پوشش‌های کامپوزیتی

پرتوهای XRD پوشش‌های کامپوزیتی پلیمر به همراه ۲٪ روی اکسید جهت اعمال بر روی لوله‌های فلزی تهیه شد. شکل‌های ۸ و ۹، نتیجه‌های این آزمون را نشان می‌دهند. همان‌گونه که در شکل ۹ دیده می‌شود، پیک اول در ماده پلیمری مورد استفاده در زاویه $(2\theta=15/30)$ با فاصله بین لایه‌ای ۵/۷۸۵ آنگستروم ظاهر شده است. این پیک در مورد کامپوزیت پلی آنیلین / سرامیک در مقدارهای زاویه پایین‌تر $(2\theta=15/25)$ با فاصله بین لایه‌ای ۵/۹۶۷ آنگستروم دیده می‌شود که نشان دهنده افزایش فضای بین لایه‌ای در این حالت می‌باشد.

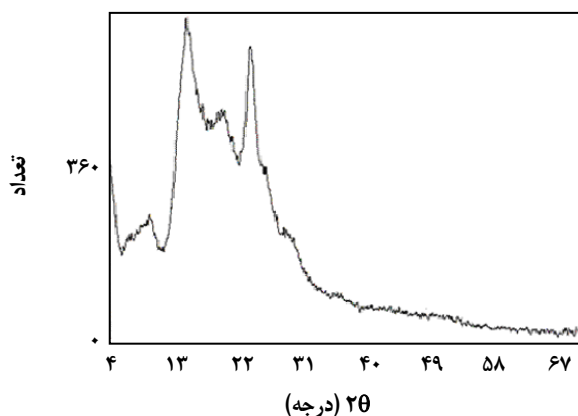
با جایگذاری عددهای مربوط به فناوری شر، اندازه بلورک روی اکسید تهیه شده، ۲۵ nm محاسبه شد. همچنین با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات مدل NanotracerWave (DLS) شرکت Microtrac، توزیع اندازه ذره‌ها مشخص شد. همان‌گونه که از شکل ۵ قابل دیدن است، توزیع اندازه ذره‌های نانو پودر تهیه شده زیر ۱۰۰ nm می‌باشد.

پرتو سنجی فروسخ تبدیل فوریه پوشش‌های کامپوزیتی

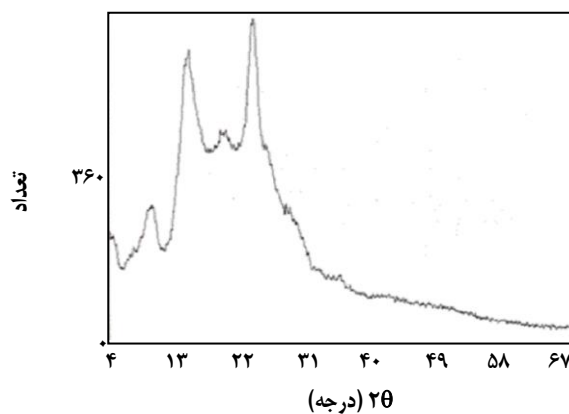
نانو پودر روی اکسید به میزان ۲ درصد وزنی با دو نوع پلیمر پلی آنیلین و اپوکسی مخلوط و ماده اولیه جهت پوشش به دست آمد. پرتو FT-IR ماده اولیه پوشش در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده است.

جدول ۲- ویژگی‌های مکانیکی پوشش‌ها.

نوع پوشش	ضخامت (میکرون)	چسبندگی	سختی	ضربه پذیری (lb.in)
پلی آنیلین / اکسید روی	25 ± 235	5A=100%	10 ± 145	25
اپوکسی / اکسید روی	25 ± 300	5A=100%	6 ± 110	20



شکل ۹ - پرتو XRD کامپوزیت اپوکسی / سرامیک مورد استفاده در ماده پوشش ۲.



شکل ۸ - پرتو XRD کامپوزیت پلی آنیلین / سرامیک مورد استفاده در ماده پوشش ۱.

با توجه به جدول ۳ می‌توان نتیجه‌گیری نمود که غلظت فلزهای اندازه‌گیری شده در هر دو حالت کمتر از میزان استاندارد بوده است و تنها درصد مواد فلزی بالاتر از حد استاندارد می‌باشد. در نتیجه با توجه به نتیجه‌های به دست آمده می‌توان ادعا نمود که این پوشش‌ها سلامت آب آشامیدنی را به خطر نمی‌اندازند و استفاده از آنها در لوله‌های انتقال آب از نظر بهداشتی اشکالی ندارد.

بررسی پتانسیل مدار باز پوشش‌های کامپوزیتی

برای بررسی پوشش اعمال شده بر لوله فلزی، اندازه‌گیری پتانسیل مدار باز بر نمونه‌های فلزی با دو نوع پوشش ۱ و ۲ و نمونه‌های بدون پوشش مورد بررسی قرار گرفت. این آزمون در الکترولیت‌های هیدروکلریک اسید ۰/۱ مولار، سولفوریک اسید ۰/۱ مولار و نمک طعام ۳/۵٪ وزنی انجام شد. شکل ۱۰ نتیجه این آزمون را نشان می‌دهد.

معرفی کدهای به کار رفته در نمودار به صورت زیر می‌باشد:

A : پوشش کامپوزیتی (اپوکسی / سرامیک) (محلول هیدروکلریک اسید ۰/۱ مولار)

از آنجا که درصد جزء تقویت کننده (روی اکسید) در پوشش‌های کامپوزیتی ۲٪ است روشن است که در پرتو XRD از پوشش کامپوزیتی، پیک‌های روی اکسید به‌طور محسوس مشخص نخواهند بود.

بررسی ویژگی‌های مکانیکی پوشش‌های کامپوزیتی

برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی دو نوع پوشش، ضخامت پوشش، چسبندگی پوشش، سختی پوشش و ضربه پذیری آنها بر اساس استانداردهای مربوطه بررسی شد. نتیجه‌های این آزمون‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

همان‌گونه که از جدول ۲ قابل دیدن است، چسبندگی هر دو پوشش بسیار مناسب می‌باشد. اگرچه در حالت استفاده از پوشش اپوکسی / روی اکسید، ویژگی‌های مکانیکی مناسب‌تری نسبت به پوشش پلی آنیلین / روی اکسید به دست می‌آید.

بررسی ورود عناصر پوشش به داخل آب آشامیدنی

برای بررسی ورود عناصر پوشش‌ها به داخل آب آشامیدنی که از اهمیت زیادی برخوردار است، از استاندارد ASTM D 6330 استفاده شد. نتیجه‌های این آزمون در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- نتیجه‌های بررسی ورود عناصر پوششی به داخل آب آشامیدنی.

استاندارد WHO (ppm)	میزان اندازه گیری شده (ppm)	ترکیب‌های مورد آزمایش	نوع پوشش
۱	۱۰	مواد فنلی	پوشش اپوکسی / سرامیک
۵۰	<۱۰	سرب	
۵	<۱	کادمیم	
۵۰	<۵۰	کرم	
۱۰۰	<۱۰	منگنز	
۱۰۰۰	<۵۰	مس	
۱	۸۰	مواد فنلی	پوشش پلی آنیلین / سرامیک
۵۰	<۲۰	سرب	
۵	<۳	کادمیم	
۵۰	<۵۰	کرم	
۱۰۰	<۲۰	منگنز	
۱۰۰۰	<۱۰۰	مس	

طبق نتیجه‌های گزارش شده در شکل ۱۰ تغییرهای پتانسیل برای همه نمونه‌ها با گذشت زمان ابتدا کاهش یافته و سپس به مقدار به تقریب ثابتی می‌رسد. در واقع کاهش پتانسیل تا رسیدن به مقدار پایدار ناشی از نفوذ یون‌های خورنده محیط به سطح پوشش داده شده می‌باشد. بنابراین پوششی که مقاومت بالاتری داشته باشد یون‌های خورنده به داخل آن کمتر نفوذ می‌کند و در پتانسیل‌های بالاتری به پایداری می‌رسد.

بررسی خوردگی لوله‌های پوشی داده شده با مواد کامپوزیتی

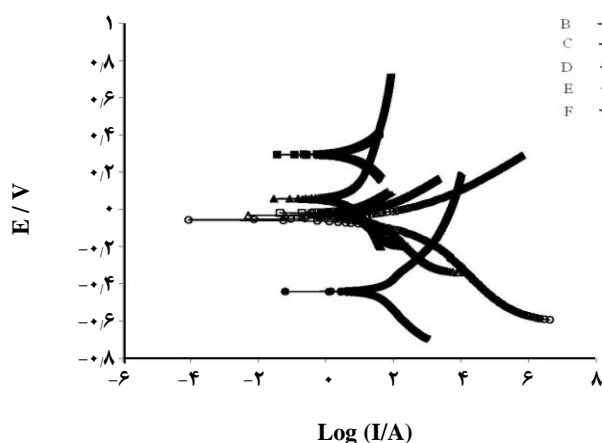
برای ارزیابی توانایی دو نوع پوشش کامپوزیتی پلیمر / سرامیک در کاهش سرعت خوردگی ورقه‌های آهن، دو نوع پوشش از کامپوزیت پلیمر / سرامیک بر روی ورقه آهنی ایجاد شد و منحنی‌های تافل رسم شدند و مطالعه‌های خوردگی بر روی نمونه‌ها صورت پذیرفت. شکل ۱۱ منحنی‌های تافل نمونه‌های پوشش داده شده با کامپوزیت پلیمر / سرامیک را نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۳ نتیجه‌های استخراج شده از منحنی‌های تافل آورده شده است. گفتنی است که منحنی‌های تافل در محلول‌های HCl با ۰/۱ مولار، H_2SO_4 ۰/۱ مولار و NaCl ۳/۵٪ اندازه گیری شده است. ویژگی‌های کد نمونه‌های اندازه‌گیری شده به شرح زیر می‌باشد.

B: بدون پوشش (محلول هیدروکلریک اسید ۰/۱ مولار)
 C: پوشش کامپوزیتی (پلی آنیلین / سرامیک) (محلول هیدروکلریک اسید ۰/۱ مولار)
 D: پوشش کامپوزیتی (اپوکسی / سرامیک) (محلول نمک طعام ۳/۵٪)
 E: بدون پوشش (محلول نمک طعام ۳/۵٪)
 F: پوشش کامپوزیتی (پلی آنیلین / سرامیک) (محلول نمک طعام ۳/۵٪)
 G: پوشش کامپوزیتی (اپوکسی / سرامیک) (محلول سولفوریک اسید ۰/۱ مولار)
 H: بدون پوشش (محلول سولفوریک اسید ۰/۱ مولار)
 I: پوشش کامپوزیتی (پلی آنیلین / سرامیک) (محلول سولفوریک اسید ۰/۱ مولار)

همان‌گونه که از شکل ۱۰ قابل دیدن است، پتانسیل مدار باز بعد از گذشتن حدود ۵۰۰ دقیقه به یک پتانسیل ثابت می‌رسد. در محلول‌های خورنده پتانسیل باز در مورد نمونه پوشش داده شده با کامپوزیت اپوکسی / سرامیک مثبت‌تر از نمونه پوشش داده شده با اپوکسی / سرامیک و نمونه بدون پوشش است ولی جریان خوردگی در کامپوزیت اپوکسی / سرامیک کمتر از سایر نمونه‌ها است. بنابراین تمایل به خوردگی در مورد آهن نمونه پوشش داده شده با کامپوزیت اپوکسی / سرامیک کمتر می‌باشد.

جدول ۴- مقدارهای پتانسیل خوردگی، شدت جریان خوردگی و سرعت خوردگی برای نمونه های پوشش داده شده.

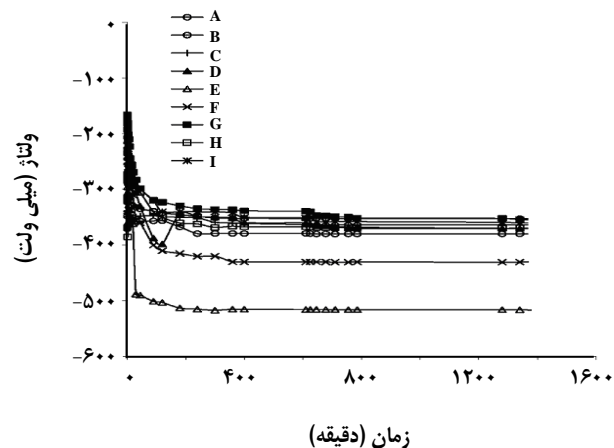
کد نمونه	پتانسیل خوردگی (V)	شدت جریان خوردگی (A)	سرعت خوردگی (mm/year)
A	۰٫۰۵۷	۳٫۰۳۶	۰٫۰۳۲۸
B	۰٫۱۲۱	۱٫۰۱۲	۰٫۰۱۱۲
C	۰٫۲۱۶	۲٫۵۳۱	۰٫۰۳۴۱
D	۰٫۱۳۴	۵٫۶۸۶	۰٫۰۵۶۳
E	۰٫۱۲۳	۹٫۷۱۸	۰٫۱۱۴۱
F	۰٫۱۳۶	۴٫۶۵۱	۰٫۰۵۲۷



شکل ۱۱ - منحنی تافل مربوط به نمونه های پوشش داده شده با نوع پوشش کامپوزیتی پلیمر/سرامیک.

چگالی جریان، جابه‌جایی کم در این محور سبب اختلاف بزرگی در مقیاس حقیقی می‌شود. از سوی دیگر پتانسیل خوردگی پوشش‌های اپوکسی در مقایسه با پوشش‌های آنیلین در محیط‌های یکسان نشان می‌دهد که نجیب‌تر شده است بنابراین این نوع پوشش‌ها، عملکرد خوبی در مقابل تبادل الکترون‌ها در لایه دوگانه داشته و محافظت قابل قبولی از سطح زیرلایه در برابر نفوذ یون‌های خورنده دارند.

پوشش کامپوزیتی پلیمر/سرامیک باعث کاهش سرعت خوردگی می‌شود علت این امر می‌تواند از اثر خاصیت کاتالیستی پلیمر اکسایش - کاهش و اثر جلوگیری فیزیکی نانو ذره‌های سرامیکی و حفاظت آندی این نانو ذره‌ها ناشی شده باشد. همان‌گونه که از جدول ۴ نیز قابل دیدن است، سرعت خوردگی در محیط‌های خورنده در مورد نمونه پوشش داده شده با کامپوزیت اپوکسی/سرامیک نسبت به نمونه پوشش داده شده با پلی آنیلین/سرامیک کمتر است.



شکل ۱۰ - نتایج اندازه‌گیری پتانسیل مدار باز.

- A : کامپوزیت اپوکسی / سرامیک (محلول سولفوریک اسید ۰٫۱ مولار)
 B : کامپوزیت اپوکسی / سرامیک (محلول هیدروکلریک اسید ۰٫۱ مولار)
 C : کامپوزیت اپوکسی / سرامیک (محلول نمک طعام ۳٫۵٪)
 D : کامپوزیت پلی آنیلین / سرامیک (محلول سولفوریک اسید ۰٫۱ مولار)
 E : کامپوزیت پلی آنیلین / سرامیک (محلول هیدروکلریک اسید ۰٫۱ مولار)
 F : کامپوزیت پلی آنیلین / سرامیک (محلول نمک طعام ۳٫۵٪)

با توجه به منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به دو پوشش اپوکسی و آنیلین در محلول همانند می‌توان گفت که پوشش‌های اپوکسی چگالی جریان کمتری دارند. باید توجه کرد که هر چند مقدار این اختلاف کم است، ولی به دلیل لگاریتمی بودن محور

نتیجه گیری

ویژگی‌های آنها بررسی شد. نتیجه‌ها نشان داد که اعمال پوشش‌های نانوکامپوزیتی، مقاومت به خوردگی لوله‌های فولادی را به میزان زیادی افزایش می‌دهد، و در این رابطه پوشش‌های اپوکسی/روی اکسید بهتر عمل می‌کنند. درحالی‌که استفاده از این پوشش‌ها سلامت آب آشامیدنی را نیز حفظ می‌کنند. به دلیل امکان تهیه و تولید مواد اولیه این پوشش‌ها در داخل کشور، هزینه تولید این نوع پوشش‌ها پایین بوده و با توجه به گسترش صنایع آب و پساب و پتروشیمی می‌توان کاربردهای صنعتی و تجاری زیادی برای این پوشش‌ها در نظر گرفت.

یکی از راه‌های مهم برای جلوگیری از خوردگی لوله‌های انتقال آب و پساب، پوشش‌دهی است. مواد کامپوزیتی پلیمر/سرامیک از گزینه‌های مناسب جهت پوشش‌دهی محسوب می‌شوند. با توجه به اینکه ترکیب‌های روی اکسید قابلیت حفاظت فلزها را از خوردگی دارند، تهیه پوشش‌های نانوکامپوزیتی پلیمر/روی اکسید با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، سبب بهبود ویژگی‌های خوردگی می‌شود. در این پژوهش، ابتدا نانوپودر روی اکسید با اندازه ۲۵ نانومتر به روش سوختن ژل تهیه شد و سپس دو نوع پوشش کامپوزیتی اپوکسی/روی اکسید و پلی آنیلین/روی اکسید، برای اعمال پوشش بر لوله‌های فولادی آماده شد و

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۶/۱۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۳/۱۸

مراجع

- [1] Pontius F.W., "Drinking Water Regulation and Health", John Wiley and Sons, p. 50 (2003).
- [2] Young W.F., Horth H., Crane R., Ogden T., Arnott M., Taste and Odour Threshold Concentration of Potential Potable Water Contaminants, *Journal of Water Research.*, **30**(2): 331-340 (1996).
- [3] AWWA and DVGW- "International Conference Corrosion of Water Distribution System", (1989).
- [4] Hem L.J., Potential Water Quality Deterioration of Drinking Water Caused by Leaking of Organic Compounds from Materials in Contact with the Water, "Proceedings of 20th Nodding Conference", (2002).
- [5] Farzaneh Akvan¹, Jaber Neshati, Jamshid Mofidi, An Electrochemical Measurement for Evaluating the Cathodic Disbondment of Buried Pipeline Coatings under Cathodic Protection, *Iran.J.Chem.Chem.Eng.(IJCCE)*, **34**(2): 83-91(2015).
- [6] Lehtola M.J., Laxander M., Miettinen I.K., Hirvonen A., Vartiainen T., Martikainen P.J., The Effect of Changing Water Flow Velocity on the Formation of Biofilms and Water Quality in Pilot Distribution System Consisting of Copper of Polyethylene Pipes, *Journal of Water Research*, **40**(11): 2151-2160 (2006).
- [7] Zhao H.X., Yamamoto M., Matsumura M., Slurry Erosion Properties of Ceramic Coatings and Functionally Gradient Materials, *Wear*, **186**: 473-479 (1995).
- [8] Wood R.J.K., The Sand Erosion Performance of Coatings, *Materials & Design*, **20**: 179-191 (1999).
- [9] Li-Piin Sung., Jeffrey Comer, Scratch Behavior of Nano-Alumina/Polyurethane Coatings, *J. Coat. Technol. Res.*, **5**(4): 419-430 (2008).
- [10] Shreepathi S., Bajaj P., Electrochemical Impedance Spectroscopy Investigations of Epoxy Zinc Rich Coatings: Role of Zn Content on Corrosion Protection Mechanism, *Electrochimica Acta*, **55**: 5129-5134 (2010).

- [11] Olad A., Barati M., Shirmohammadi H., Conductivity and Anticorrosion Performance of Polyanilin/Zinc Composites Investigation of Zinc Particle Size and Distribution Effect, *Progress in Organic Coating*, **72**: 599-604 (2011).
- [۱۲] اشرفی حبیب آبادی، علی؛ گلغزار، محمد علی؛ "پوشش‌دهی فولاد با پلی پیرول، پلی متیل پیرول به روش پلیمر شدن الکتروشیمیایی و بررسی مقاومت به خوردگی آن"، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- [۱۳] خبازی قهرودی، هادی؛ گلغزار، محمد علی؛ "بررسی عوامل مؤثر بر افزایش کیفیت پوشش پودری پلی پروپیلین اصلاح شده بر فولاد ساده کربنی به روش الکترواستاتیک پاششی"، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- [۱۴] هاتفی اردکانی، هاجر؛ علیخانی، شیرین؛ مؤید، فاطمه؛ رضایی، عباداله؛ **مروری بر فعالیت‌های ایران در حوزه نانوکامپوزیت‌ها، ماهنامه فناوری نانو، ۱۳۵(۱۰): ۵۸۴ تا ۵۹۰ (۱۳۸۷)**.
- [15] Xiliang L., Anthony J., Killard D., Malcolm R., Electrochemical Preparation of Distinct Polyaniline Nanostructures by Surface Charge Control of Polystyrene Nanoparticle Templates, *Chemical Communications*, **13**(7): 2138-2144 (2007).
- [16] Mirmohseni A., Oladegaragoze A., Anti-Corrosive Properties of Polyaniline Coating on Iron, *Synthetic Metals*, **114**(2): 105 (2000).
- [17] McCullough D.H., Zhai L., Regioregular Polythiophene/Gold Nanoparticle Hybrid Materials, *J. Mater. Chem*, **14**: 141-143 (2004).
- [18] Tuken T., Yazici B., Erbil M., Zinc Modified Polyaniline Coating for Mild Steel Protection, *Material Chemistry and Physics*, **99**: 459-464 (2006).
- [19] Cheng-Hsiung Peng, Chyi-Ching Hwang, Ching-Kai Hong, San-Yuan Chen, Self Propagation High Temperature Synthesis of Ni-Ferrite Powder Synthesis, *Materials Science and Engineering B*, **107**: 295-300 (2004).
- [20] Sangtae K., Joachim M., Electrical Properties of ZnO: Nanocrystalline vs. Microcrystalline Ceramics, *Solid-State Letter*, **6**(11): 7-9 (2003).
- [21] Chyi-Ching H., Tsung-Yung W., Synthesis and Characterization of Nanocrystalline ZnO Powders by a Novel Combustion Synthesis Method, *Materials Science and Engineering B* **111**: 197-206 (2004).
- [22] Matei A., Cernica I., Cadar O., Synthesis and Characterization of ZnO-Polymer Nanocomposite, *International Journal of Material Forming*, **1**: 767-770 (2008).
- [۲۳] آزاد منجیری، جلال؛ سید ابراهیمی، سید علی، سنتز پودر فریت نیکل با ابعاد نانومتر به روش سل - ژل خود احتراقی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۳۹(۲): ۸۳ تا ۸۸ (۱۳۸۴)**.
- [۲۴] کاظمی نژاد، ایرج؛ جهانگیرنژاد، محمود؛ ساکی، قاسم؛ رحیم زاده لرکی مریم، ساخت نانوپودر هیدروکسی آپاتیت به روش سل-ژل احتراقی و بررسی کاربرد آن در ترمیم ضایعات استخوان پاریتال موش صحرائی، مجله علمی پزشکی جندی شاپور، **۱۲(۲): ۱۴۹ تا ۱۵۷ (۱۳۹۲)**.

- [25] Riahi-Noori N., Sarraf-Mamoory R., Alizadehb P., Mehdikhani A., [Synthesis of ZnO Nano Powder by a Gel Combustion Method](#), *Journal of Ceramic Processing Research*. **9**(3): 246-249 (2008).