



بررسی شرایط ایجاد نانو پوشش های زیر کونیایی تهیه شده به روش الکتروفورتیک

فهیمة صابری^۱، بهروز شایق بروجنی

دانشگاه شهرکرد، دانشکده فنی مهندسی

چکیده

در سال های اخیر علاقه زیادی در زمینه تولید و استفاده از پوشش های نانو ساختار با دمای کاری بالا در صنعت به وجود آمده است. از جمله کاربردهای آن می توان به استفاده از آن در ساخت پیل های سوختی خصوصاً پیل های سوختی اکسید جامد (SOFCs) اشاره نمود. بدین منظور از نانو پودر زیرکونیا استفاده شد. در این تحقیق رسوب نشانی الکتروفورتیک نانو ذرات زیرکونیا در سوسپانسیون های تهیه شده از الکل های اتانول، ایزوپروپانول و بوتانول با افزودنی تری اتانول آمین مورد بررسی قرار گرفت. اثر نوع حلال، غلظت افزودنی و پتانسیل زتای ذرات مورد مطالعه قرار گرفت و سوسپانسیون های با پایداری بالا، جهت رسوب نشانی الکتروفورتیک تهیه گردید. اثر عوامل مختلف بر روی ریز ساختار پوشش ها، تغییرات دانسیته جریان و وزن نشست در طول فرایند، سرعت تشکیل رسوب و تاثیر عوامل مختلف بر روی این پارامترها بررسی شدند. نتایج نشان دادند که با افزایش دانسیته جریان وزن نشست افزایش یافته و با افزایش زمان سینتیک نشست کاهش می یابد. همچنین در ولتاژهای بسیار بالا کیفیت نشست کاهش یافته است. زبری پوشش های رسوب داده شده از هر سه سوسپانسیون با افزایش ولتاژ رسوب نشانی افزایش یافت.

واژه های کلیدی: نشست الکتروفورتیک، نانو ذرات زیرکونیا، اتانول، بوتانول، ایزوپروپانول، پیل سوختی اکسید جامد

¹ . f.saberi140@gmail.com

مقدمه

تکنیک رسوب‌دهی الکتروفوریتیک^۱ (EPD) با گستره‌ی وسیعی از کاربردهای جدید در فرایندهای تولید مواد سرامیکی پیشرفته و تولید پوشش‌ها، اخیراً در دو بخش صنعتی و دانشگاهی مورد توجه قرار گرفته است. علت این امر نه تنها به خاطر تطبیق‌پذیری این روش با مواد مختلف و قابلیت ترکیب شدن آن‌ها است، بلکه به خاطر تجهیزات ساده‌ی مورد نیاز برای رسوب‌دهی با این روش نیز می‌باشد [۱]. نشست الکتروفوریتیک یا EPD فرایندی است که در آن ذرات باردار موجود در سوسپانسیون تحت اثر میدان الکتریکی DC به سمت الکترود با بار مخالف حرکت می‌کنند، بر روی آن بار خود را از دست داده و فیلم چگالی را تشکیل می‌دهند. فرایند EPD ساده و کم هزینه است و می‌تواند برای شکل‌دهی فیلم‌های یکنواخت و نازک بر روی زیر لایه‌هایی با اشکال پیچیده مانند استک لوله‌ای پیل‌های سوختی^۲ به کار رود. علاوه بر آن، این روش دارای سرعت نشست بالا و یکنواخت در لایه تشکیل یافته می‌باشد [۲]. به طور خاص، با وجود اینکه این روش یک روش تر است، می‌توان به آسانی ضخامت و مورفولوژی فیلم رسوب داده‌شده را از طریق تنظیم زمان رسوب‌دهی و پتانسیل اعمالی، تغییر داد. این مزایا فرایند EPD را جهت ساخت پیل‌های سوختی مناسب ساخته است [۳].

پیل‌های سوختی اکسید جامد (SOFC)^۳ به منظور کاهش قیمت و بهینه‌سازی عملکرد پیل‌های سوختی به ویژه پیل سوختی کربنات طراحی شده‌اند. الکترولیت به کاررفته در آن‌ها از جنس سرامیک است. وجود الکترولیت جامد مشکلات مربوط به رسوب دادن الکترولیت را از بین می‌برد و امکان انتقال الکترولیت توسط گازهای اکسیدان و سوخت وجود ندارد. در این نوع پیل‌ها، خوردگی الکترولیت و تنظیم آن متفی است و طرح آن‌ها به علت جامد بودن اجزاء انعطاف‌پذیر می‌باشد. دمای عملکرد این پیل‌ها به دلیل امکان ایجاد رسانش یونی بالاست و به همین دلیل جایگزین مناسبی برای پیل‌های سوختی که تحمل دمای بالا را ندارند، است [۴].

در این تحقیق ابتدا سوسپانسیون پایدار از الکل‌های اتانول، ایزوپروپانول و بوتانول توسط تری اتانول آمین تهیه شد. سپس به بررسی تاثیرات دانسیته جریان و زمان در طول فرایند بر روی مورفولوژی نشست پرداخته شد. همچنین تاثیر نوع الکترولیت بر کیفیت لایه نشست یافته مورد بررسی قرار گرفت و پارامترهای بهینه ارائه گردید.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از ۳ الکل اتانول (۹۹/۵٪، #۱۰۰۹۸۳ merck)، ایزوپروپانول (۹۹/۵٪، #۱۰۰۹۹۵ merck)، بوتانول (۹۹/۵٪، #۱۰۱۹۹۰ merck) و نانو پودر زیرکونیا با خلوص ۹۹/۵٪ جهت تهیه سوسپانسیون پایدار استفاده شد. جنس زیرلایه‌ها فولادی انتخاب گردید. جهت پایدار سازی سوسپانسیون نیز از تری اتانول آمین (TEA) استفاده شد.

1 - electrophoretic deposition

2 - Tubular Cell Stack

3 - Solid oxide fuel cell

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

برای پایداری سازی سوسپانسیون، ابتدا سوسپانسیون با مقادیر مختلف TEA (v/v % ۰/۶ و ۰/۴۵، ۰/۳، ۰/۱۵، ۰) همراه با میزان ۱۰ g/l نانوپودر زیر کونیا تهیه شد. پس از آن ۱۵ min آلتراسونیک گردید و به مدت ۴۸ hr پیرسازی شد. به دنبال آن پس از ۳۰ min آلتراسونیک، سوسپانسیونی پایدار بدست آمد. سوسپانسیون ها به لوله های ۱۰ ml منتقل شدند و به مدت ۱۵ دقیقه و ۵ روز در مکانی ثابت، بدون حرکت و یا تنش بیرونی نگه داشته شدند. پس از زمان مورد نظر، حجم سوسپانسیون ها ثبت گردید. جهت آماده سازی سوسپانسیون ها برای انجام آزمون از سه الکل اتانول، ایزوپروپانول و بوتانول همراه با مقادیر مختلف TEA (v/v % ۰/۶ و ۰/۴۵، ۰/۳، ۰/۱۵، ۰) استفاده گردید. سپس آزمون پتانسیل زتا توسط دستگاه زتامتر (Malvern instrument, Worcestershire, U.K.) انجام شد. برای انجام این تست، دستگاه بر روی light-scattering تنظیم بود. بنابراین میبایست از سوسپانسیونی رقیق استفاده می شد که بدین منظور غلظت ذرات ۰/۵ g/l انتخاب گردید.

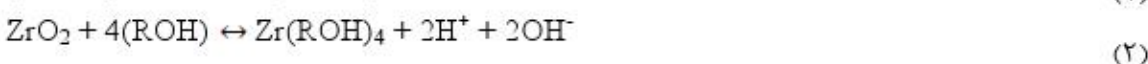
به منظور بررسی جذب شیمیایی TEA توسط ذرات نانو پودر زیر کونیا، ابتدا سوسپانسیون با مقادیر بهینه TEA (اتانول+۰/۱۵/v TEA، ایزوپروپانول+۰/۳/v TEA و بوتانول+۰/۴۵/v TEA) که توسط دو آزمون ته نشینی و پتانسیل زتا بدست آمده بود و میزان ۱۰ g/l پودر زیر کونیا آماده شد. پس از آن با بستن سل الکتروفوریتیک، اعمال ولتاژ و انجام فرایند EPD، لایه نشانی بر روی الکتروود زیر لایه صورت گرفت. پوشش نشست یافته بر روی الکتروود در مجاورت هوا و در دمای اتاق خشک شد و پودر نشست یافته از زیر لایه جدا گشت. آنالیز توسط دستگاه FT Infrared Spectroscopy, Jasco, FT/IR-6300 ساخت کشور ژاپن در محدوده طول موج cm^{-1} ۴۰۰-۴۰۰۰ انجام شد.

به منظور انجام فرایند الکتروفوریتیک، ورق فولادی با مساحت سطح 1 cm^2 به عنوان الکتروود زیر لایه، و ورق فولادی با مساحت سطح $1/5 \text{ cm}^2$ به عنوان الکتروود کمکی مورد استفاده قرار گرفت. الکتروود زیر لایه و الکتروود کمکی به فاصله ۱ cm از یکدیگر قرار گرفتند. به دلیل آنکه ذرات دارای بار مثبت بودند، سل EPD به گونه ای بسته شد که زیر لایه به عنوان کاتد به سر منفی منبع تغذیه متصل شد و الکتروود کمکی به عنوان آند قرار گرفت. آزمون EPD در ولتاژهای مختلف (۱۲۰ V و ۱۰۰، ۶۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰) و زمان های مختلف (۳۰۰ s و ۲۴۰، ۱۸۰، ۱۲۰، ۶۰) در سوسپانسیون پایدار شده با مقادیر بهینه TEA انجام شد. پس از لایه نشانی بر روی زیر لایه در زمان و ولتاژ معین، زیر لایه در مجاورت هوا و دمای اتاق خشک شد. جهت بررسی زیر لایه، ابتدا لایه نشانی در ولتاژهای ۶۰ V و ۲۰ به مدت ۳ دقیقه در سوسپانسیون های پایدار شده از هر الکل پوشش دهی و خشک گردید. سپس ریز ساختار پوشش حاصل و مورفولوژی سطح نمونه ها توسط میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (Field Emission SEM) مدل Mira 3-XMU بررسی شد.

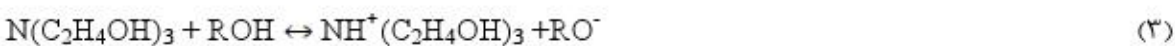
نتایج و بحث

حجم سوسپانسیون برای سوسپانسیون های الکلی با غلظت های مختلف TEA بعد از ۱۵ min و ۵ day در شکل نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۱- الف دیده می شود با اضافه کردن TEA، هر سه سوسپانسیون دارای پایداری مناسبی می باشند. در زمان های طولانی با افزایش میزان TEA پایداری سوسپانسیون تا جایی افزایش یافته و پس از آن کاهش می یابد (شکل ۱- ب). حجم سوسپانسیون در غلظت های ۰/۴۵، ۰/۳ و ۰/۱۵ درصد حجمی به ترتیب برای اتانول، ایزوپروپانول و بوتانول بالاترین مقدار بود. این غلظت ها به عنوان غلظت های بهینه انتخاب گردید.

نتایج اندازه گیری پتانسیل زتا برای سوسپانسیون های الکلی با غلظت های مختلف TEA در شکل ۲ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می گردد با اضافه کردن TEA، مقادیر پتانسیل زتا افزایش یافته و پس از آن کاهش می یابد. در یک سوسپانسیون با زیرکونیای پایدار شده در الکل، دو قطبی گروه -OH روی سطح زیرکونیا تمایل به گرفتن پروتون از الکل برای تشکیل بار مثبت روی سطح ذرات دارد (واکنش ۱) [۵]. علاوه بر این واکنش شیمیایی بین زیرکونیا و الکل (واکنش ۲) نیز باعث آزاد شدن تعداد زیادی پروتون می گردد [۶]. هر دو این واکنش ها کمک به تشکیل زتا پتانسیل مثبت بر روی ذرات می کند.



با اضافه کردن TEA به سوسپانسیون، به دلیل وجود جفت الکترون غیر پیوندی روی اتم نیتروژن، TEA به عنوان یک پایه ضعیف آلی عمل کرده و می تواند از مولکول های الکل پروتون بگیرد و تشکیل ترکیبات $NH^+(C_2H_4OH)_3$ دهد (واکنش ۳). TEA پروتونه شده به طور مؤثر جذب نانو ذرات زیرکونیا در سوسپانسیون های اتانول، ایزوپروپانول و بوتانول می شود. باندهای N-H روی طیف های FTIR گویای این مدعا است. بنابراین این ترکیبات باعث غنی تر شدن بار سطحی ذرات شده و پتانسیل زتای مثبت ذرات را افزایش خواهند داد.



با توجه به نتایج حاصل از آزمون های ته نشینی و پتانسیل زتا مقادیر بهینه TEA برای سوسپانسیون های اتانول، ایزوپروپانول و بوتانول به ترتیب ۰/۴۵، ۰/۳ و ۰/۱۵ درصد حجمی انتخاب گردید. نتایج به دست آمده از آنالیز FTIR برای پودرهای جدا شده از سوسپانسیون های اتانول، ایزوپروپانول و بوتانول در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل، پودرهای جدا شده از سوسپانسیون های اتانول، ایزوپروپانول و بوتانول، ۴ پیک در محدوده 1570 cm^{-1} ، 3400 cm^{-1} ، 1360 cm^{-1} و 1080 cm^{-1} را نشان می دهد که به ترتیب متعلق به ارتعاشات

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

خمشی H-O-H و ارتعاشات کششی C-H، O-H و C-N می‌باشد [۷-۹]. این نتایج حاکی از جذب تری اتانول آمین پروتون‌دار بر سطح ذرات زیر کونیا در این سوسپانسیون است. در مورد این سه الکل، به دلیل بزرگ بودن اندازه مولکول‌ها، واکنش حلالیت بین این مولکول‌ها و مولکول‌های تری اتانول آمین پروتون‌دار ضعیف است. بنابراین تری اتانول آمین پروتون‌دار می‌تواند از پوسته اطراف الکل آزاد شود و جذب نانو ذرات زیر کونیا گردد. در شکل ۴ وزن نشست سوسپانسیون ZrO_2 بر حسب زمان نشان داده شده است. وزن نشست (w) می‌تواند به صورت تابع‌نمایی از زمان تعریف شود که توسط دو معادله زیر معرفی گردیده است [۱۰]:

$$w = w_0 (1 - e^{-kt})$$

$$k = \frac{A}{V} \frac{\varepsilon \zeta}{4\pi\eta} (E - \Delta E)$$

در جایی که w_0 وزن لایه نشانی اولیه در سوسپانسیون، A مساحت سطح الکتروود، ε ثابت دی‌الکتریک مایع، ζ پتانسیل زتای ذرات، V حجم سوسپانسیون، η ویسکوزیته حلال، E پتانسیل اعمالی و ΔE افت پتانسیل می‌باشد. در آغاز فرایند EPD (در زمان‌های کوتاه) مقدار افت ولتاژ ناچیز است. از این رو برای سرعت نشست می‌توان یک معادله خطی با ضریب اطمینان بالا مطرح کرد. در زمان‌های نشست طولانی به دلیل تشکیل لایه عایق ZrO_2 روی الکتروود هادی، ولتاژ افت می‌کند. بنابراین حرکت ذرات با بار مثبت در مقابل الکتروود کاهش می‌یابد. به بیانی دیگر اختلاف در غلظت ذرات اطراف الکتروود سینتیک نشست را از خطی بودن به غیرخطی تغییر می‌دهد که می‌تواند به وسیله معادله زیر بیان شود [۱۱]:

$$w = (A + Bt)^{1/2} + C$$

که در اینجا A ، B و C ثابت هستند.

همان‌گونه که از نمودارها مشخص است در تمامی ولتاژها و در زمان‌های ثابت، وزن نشست سوسپانسیون اتانول (TEA ۰/۱۵/v) به ترتیب از ایزوپروپانول (TEA ۰/۳/v) و بوتانول (TEA ۰/۴۵/v) بیشتر است که این مسئله به دلیل بالاتر بودن هدایت الکتریکی سوسپانسیون اتانول نسبت به سوسپانسیون‌های ایزوپروپانول و بوتانول به ترتیب می‌باشد (جدول ۱). جریان الکتریکی گذرا از سوسپانسیون‌ها با میزان بهینه TEA اندازه‌گیری شد و توسط رابطه مقاومت سوسپانسیون‌ها به دست آمد:

$$R = \frac{V}{I}$$

در جاییکه R مقاومت سوسپانسیون، V ولتاژ اعمالی و I جریان گذرا از سوسپانسیون می‌باشد. هدایت الکتریکی سوسپانسیون ($E.C$) نیز از رابطه محاسبه شد و در جدول ثبت گردید.

$$E.C = \frac{1}{R}$$

هنگامی که هدایت الکتریکی سوسپانسیون بالا باشد حرکت ذرات تحت تأثیر میدان الکتریکی به سمت زیر لایه سریع تر خواهد بود و به این ترتیب وزن لایه نشست یافته بیشتر خواهد شد.

شکل ۵ رابطه بین دانسیته جریان پودر ZrO_2 در سوسپانسیون های اتانول (TEA ۰/۱۵/v) به ترتیب از ایزوپروپانول (TEA ۰/۳/v) و بوتانول (TEA ۰/۴۵/v) به عنوان تابعی از ولتاژ اعمالی DC را نشان می دهد. دانسیته جریان متناسب با ولتاژ اعمالی است و تمایل به ناپایداری با افزایش ولتاژ را دارد. می توان فهمید که دانسیته جریان ناپایدار بر تشکیل رسوب یکنواخت در طی EPD پودر ZrO_2 مؤثر است. با توجه به شکل برای هر سه سوسپانسیون ناپایداری جریان در ولتاژهای بالای ۶۰ ولت مشهود است. بنابراین برای داشتن پوشش با کیفیت مناسب لازم است ولتاژ اعمالی $V > 60$ انتخاب گردد.

تصاویر FESEM پوشش نشست یافته از سوسپانسیون های الکلی مختلف با غلظت بهینه TEA در ولتاژهای V ۶۰ و ۲۰ و زمان ۳ min در شکل ۶ نشان داده شده است. تأثیر میزان ولتاژ بر روی کیفیت فیلم خام زیرکونیا به وضوح قابل مشاهده است. با افزایش ولتاژ لایه نشانی از V ۲۰ به V ۶۰ تخلخل های بیشتر و یکنواختی کمتری در میکرو ساختار پوشش دیده می شود. این مسئله می تواند به دلیل آن باشد که در ولتاژهای بالای نشست، نانو ذرات به سرعت در جلو الکتروود با بار مخالف حرکت می کنند در نتیجه زمان کافی برای نشست در مکان مناسب درجایی که باعث تشکیل میکرو ساختار یکنواخت با دانسیته بالا شود، وجود ندارد [۱۲]. در میدان های الکتریکی بسیار بالا ($100 V/cm <$)، کاهش کیفیت رسوب محسوس تر می باشد [۱۳].

از طرفی دیده می شود که در سوسپانسیون اتانولی زیرکونیا در هر دو ولتاژ به صورت زیر و ناهموار همراه با ترک، رسوب یافته است. در مورد حلال اتانولی، ذرات به دلیل وجود پروتون کم در حمام، به خوبی پراکنده نشده اند. در نتیجه ذرات آگلومره شده و باعث پوششی زیر و ناهموار می شود. در مورد سوسپانسیون بوتانولی به دلیل پایداری مناسب، یکنواختی بیشتر، تخلخل ها و ترک های کمتری به ترتیب نسبت به ایزوپروپانول و اتانول مشاهده می شود.

شکل ۷ تصاویر ترک های فیلم خام حاصل از لایه نشانی ذرات زیرکونیا با ولتاژ اعمالی V ۶۰ توسط سوسپانسیون های اتانول (TEA ۰/۱۵/v) به ترتیب از ایزوپروپانول (TEA ۰/۳/v) و بوتانول (TEA ۰/۴۵/v)، در زمان ۳ دقیقه را نشان می دهد. اتانول الکلی دارای دو کرین، ایزوپروپانول و بوتانول هر کدام به ترتیب دارای سه و چهار کرین می باشند. بنابراین وزن مولکولی اتانول بیشتر از ایزوپروپانول و بوتانول بوده و دارای سرعت تبخیر بیشتری نسبت به آن دو می باشد. هنگامی که فرایند الکتروفوریتیک به پایان می رسد، الکتروود لایه نشانی شده برای خشک شدن در معرض هوا قرار می گیرد.

شانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح

بنابراین هرچه سرعت تیخیر الکل بالاتر باشد، تنش بیشتری بر لایه نشست یافته وارد می‌گردد و باعث ایجاد ترک‌های عمیق و گسترده‌تری در سطح پوشش می‌شود. همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است، پوشش حاصل از اتانول دارای ترک‌های عمیق‌تر و بیشتری نسبت به دو سوسپانسیون دیگر می‌باشد. عمق کم و ناپوستگی ترک‌های سوسپانسیون بوتانول حاکی از کیفیت بالاتر این پوشش نسبت به پوشش‌های دیگر است.

تغییرات ولتاژ نیز کیفیت پوشش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش ولتاژ اعمالی در فرایند الکتروفورتیک باعث ایجاد تلاطم و ناپایداری جریان می‌شود (شکل ۵) و همین مسئله موجب تجمع نامناسب ذرات، ایجاد تنش و در نتیجه تشکیل ترک می‌گردد. به طوری که در ولتاژهای بالای ۱۰۰ V در مورد سوسپانسیون اتانولی پوشش پوسته‌پوسته شد. همان‌گونه که از شکل ۸ ملاحظه می‌شود، با افزایش ولتاژ اعمالی از ۲۰ به ۶۰ V در مورد سوسپانسیون اتانول (TEA ۰/۴۵/۷)، پوشش دارای ترک‌های گسترده‌تر و عمیق‌تری بود. پوشش‌های حاصل از ایزوپروپانول و بوتانول در ۲۰ V بدون ترک بودند.

نتیجه‌گیری

- ۱) TEA به‌عنوان یک پایدارکننده مؤثر برای سوسپانسیون اتانولی (با غلظت بهینه ۰/۴۵/۷)، سوسپانسیون ایزوپروپانولی (با غلظت بهینه ۰/۳/۷) و سوسپانسیون بوتانولی (با غلظت بهینه ۰/۱۵/۷) می‌باشد.
- ۲) بیشترین سرعت نشست در فرایند الکتروفورتیک مربوط به سوسپانسیون اتانولی بود زیرا اتانول از هدایت الکتریکی بالاتری برخوردار است.
- ۳) تصاویر FESEM از پوشش‌های حاصل از این سوسپانسیون‌ها نشان داد که در مورد سوسپانسیون بوتانولی با لایه‌نشانی در ولتاژهای پایین سطح نمونه صاف، یکنواخت و بدون ترک می‌باشد.
- ۴) افزایش ولتاژ و ناپایداری جریان موجب پایین آمدن کیفیت سطح پوشش می‌گردد.

تشکر و قدردانی

از اساتید محترم و محققین دانشگاه شهرکرد جهت راهنمایی‌شان سپاسگزار می‌نمایم.

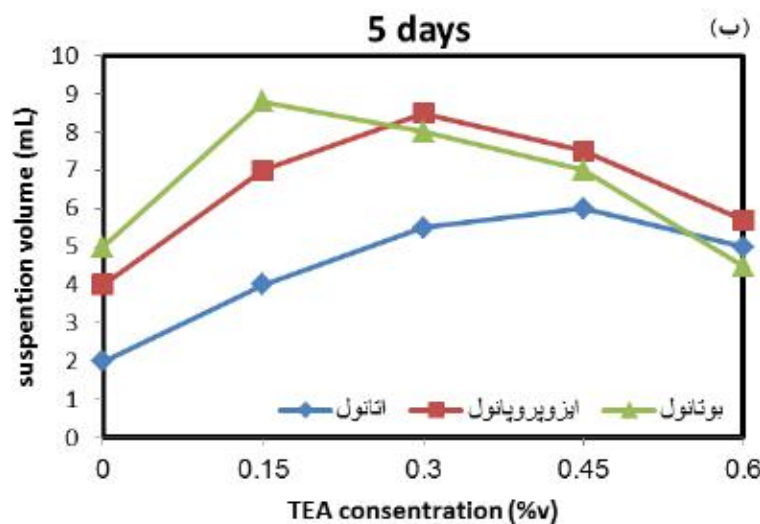
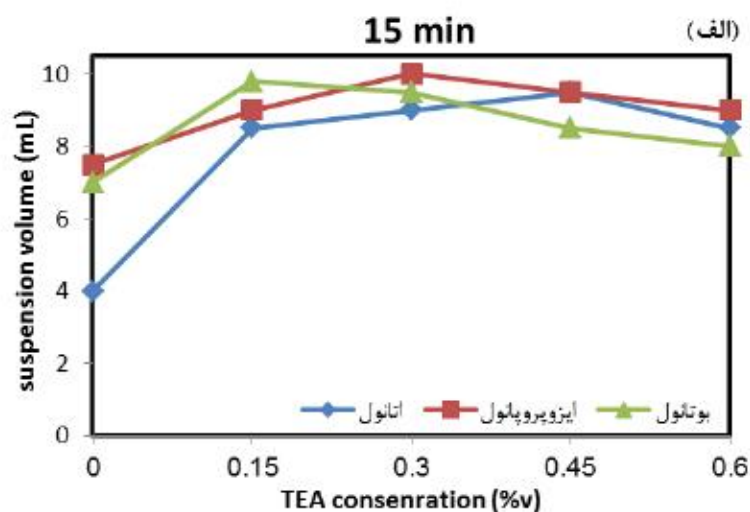
مراجع

- [1] Besra, L., and Liu, M., "A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD)", *Progress in Materials Science*, Vol. 52, pp. 1-61, 2007.

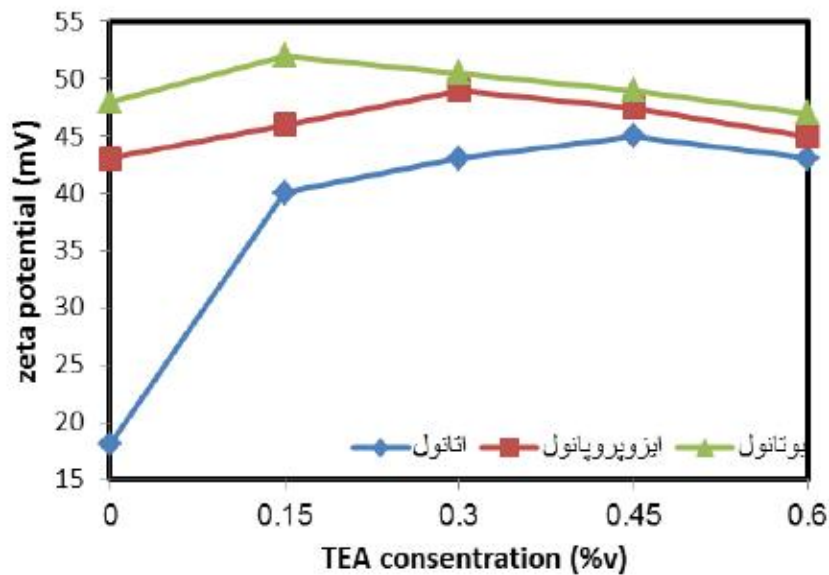
- [۲] طالبی، ط.، رئیسی، ب.، و مقصودی پور، ا.، "ساخت لایه الکترولیت زیرکونیای پایدار شده با ایتریا (YSZ) بر کامپوزیت NiO-YSZ به روش نشست الکتروفوریتیک (EPD) جهت کاربرد در پیل سوختی اکسید جامد (SOFC)"، مجله بین المللی انرژی هیدروژن، جلد ۳۵، شماره ۱۶، صص ۹۴۵۵-۹۴۵۹، ۱۳۹۰.
- [3] Zhitomirsky, I., and Petric, A., "Electrophoretic deposition of electrolyte materials for solid oxide fuel cell", *Journal of Materials Science*, Vol. 39, pp. 825-831, 2004.
- [۴] مقدس، ش.، مقصودی پور، ا.، عباد زاده، ت.، و عزیزاده، م.، "تهیه الکترولیت زیرکونیای پایدار شده با ایتریا (YSZ) به روش غوطه وری"، اولین کنفرانس بین المللی هیدروژن و پیل سوختی، ۱۳۸۷.
- [5] Ji, C., Lan, W. and Xiao, P., "Fabrication of yttria-stabilized zirconia coatings using electrophoretic deposition: packing mechanism during deposition", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 91, no. 4, pp. 1102-1109, 2008.
- [6] Yuan, Y., Wang, X. and Xiao, P., "Attrition milling of metallic ceramic particles in acetylacetone", *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 24, no. 8, pp. 2233-2240, 2004.
- [7] Paul, J. B., Provencal, R. A., Chapo, C., Roth, K., Casaes, R., and Sakally, R. J., "Infrared Cavity Ringdown Spectroscopy of the Water Cluster Bending Vibrations", *J. Phys. Chem. A.*, Vol. 103, no. 16, pp. 2972-2974, 1999.
- [8] Shen, Y., and Wu, P., "Two-Dimensional ATR-FTIR Spectroscopic Investigation on Water Diffusion in Polypropylene Film: Water Bending Vibration", *J. Phys. Chem. A.*, Vol. 107, no. 18, pp. 4224-4226, 2003.
- [9] Pavia, D. L., Lampman, G. M., Kriz, G. S., and James, Vyvyan, A., "Infrared Spectroscopy", Edited by Lockwood, L., Kirksey, B., Woods, E., Brown, K., and Kauser, B., Thomson Learning Inc, USA, New York, pp. 15-104, 2001.
- [10] Zhang, Z., Huang, Y., and Jiang, Z., "Electrophoretic deposition forming of SiC-TZP composites in a nonaqueous sol media", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 77, no. 7, pp. 1946-1949, 1994.
- [11] Chen, CY., Chen, SY., and Liu, DM., "Electrophoretic deposition forming of porous alumina membranes", *Acta Mater.*, Vol. 47, no. 9 pp. 2717-2726, 1999.
- [12] Besra, L., and Liu, M., "A Review on Fundamental and Applications of Electrophoretic Deposition" *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 52, no. 1, pp. 1-61, 2007.
- [13] Basu, R. N., Randall, C. A., and Mayo, M. J., "Fabrication of Dense Zirconia Electrolyte Films for Tubular Solid Oxide Fuel Cells by Electrophoretic Deposition", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 84, no. 1, pp. 33-40, 2001.

جدول ۱- مقادیر مقاومت الکتریکی و هدایت الکتریکی سوسپانسیون‌های مختلف در طول فرایند EPD

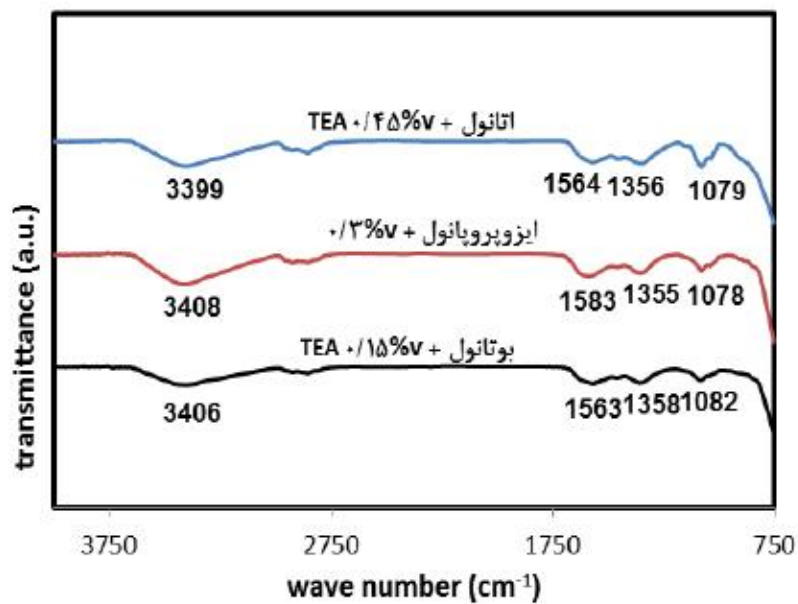
نام سوسپانسیون	اتانول (TEA ۰/۴۵/۷)	ایزوپروپانول (TEA ۰/۳/۷)	بوتانول (TEA ۰/۱۵/۷)
مقاومت الکتریکی	۴/۳۵	۲۰/۶۹	۲۴/۱۴
هدایت الکتریکی	۰/۲۲۹	۰/۰۴۸	۰/۰۴۱



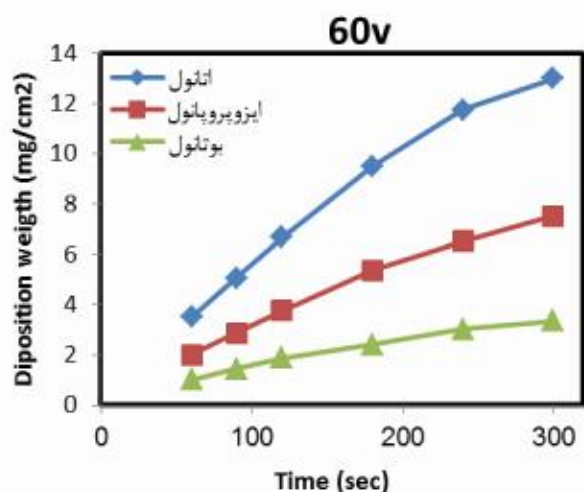
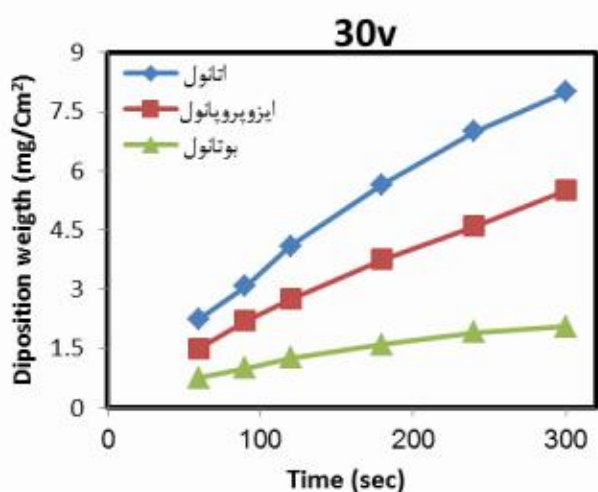
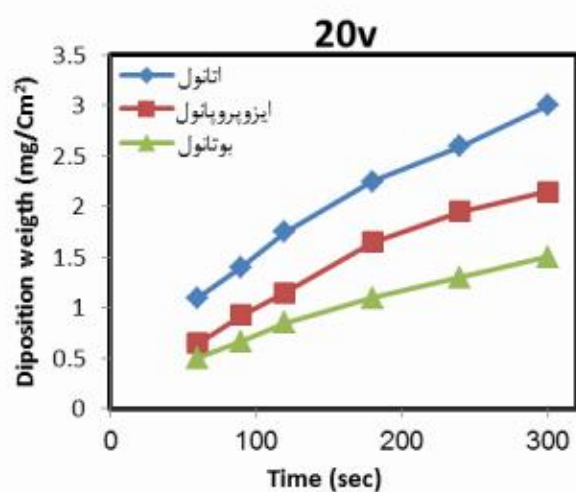
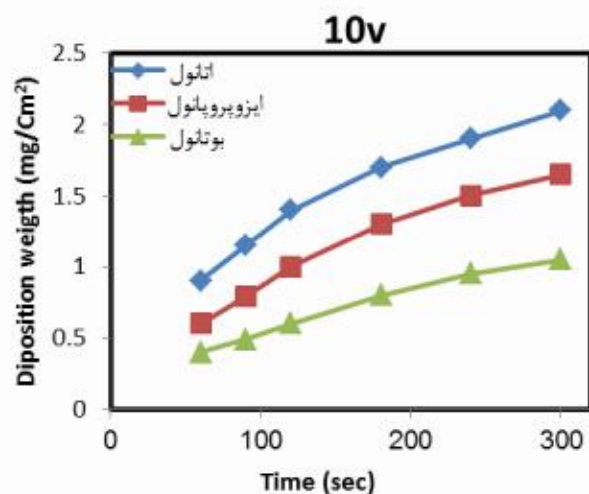
شکل ۱- حجم سوسپانسیون از سوسپانسیون‌های با غلظت‌های متفاوت TEA پس از زمان‌های الف) ۱۵ min و ب) ۵ روز



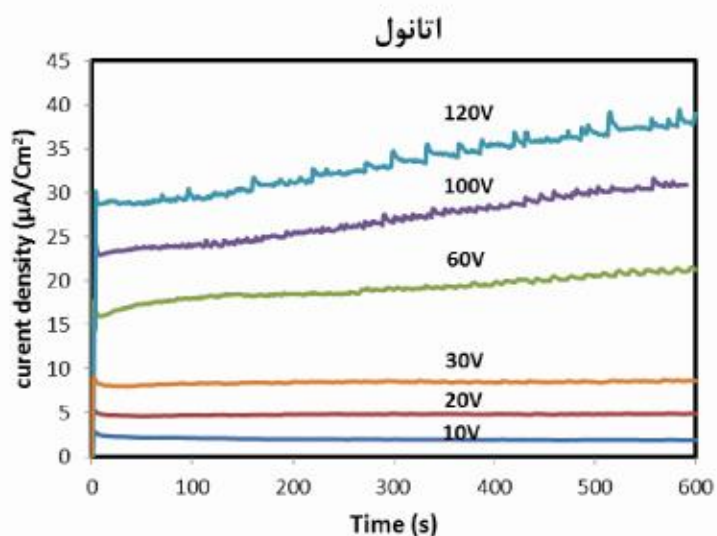
شکل ۲- پتانسیل زتای نانو ذرات زیرکونیا در سوسپانسیون های مختلف با غلظت های متفاوت TEA

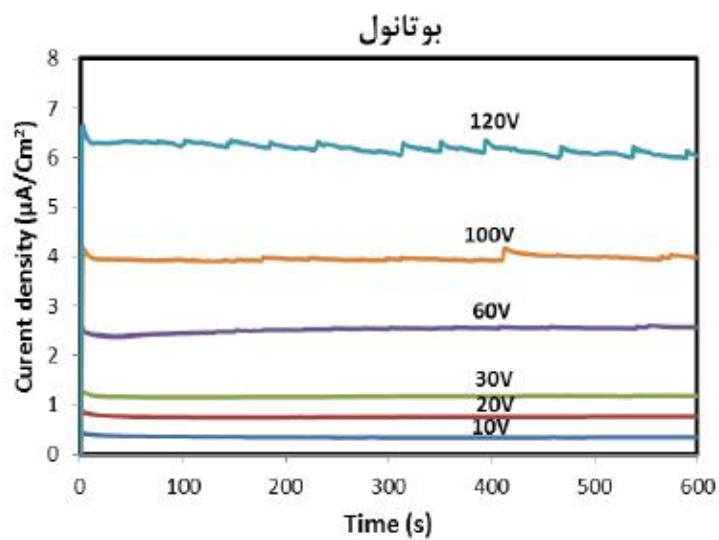
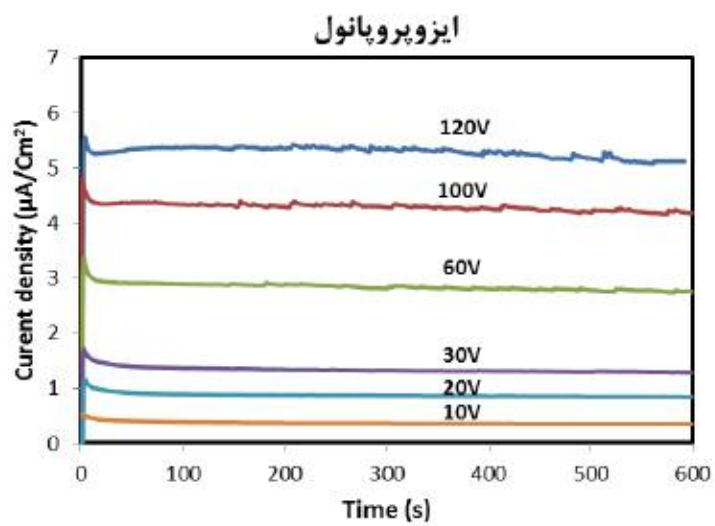


شکل ۳- نتایج حاصل از آنالیز FTIR برای پودرهای جدا شده از سوسپانسیون های مختلف

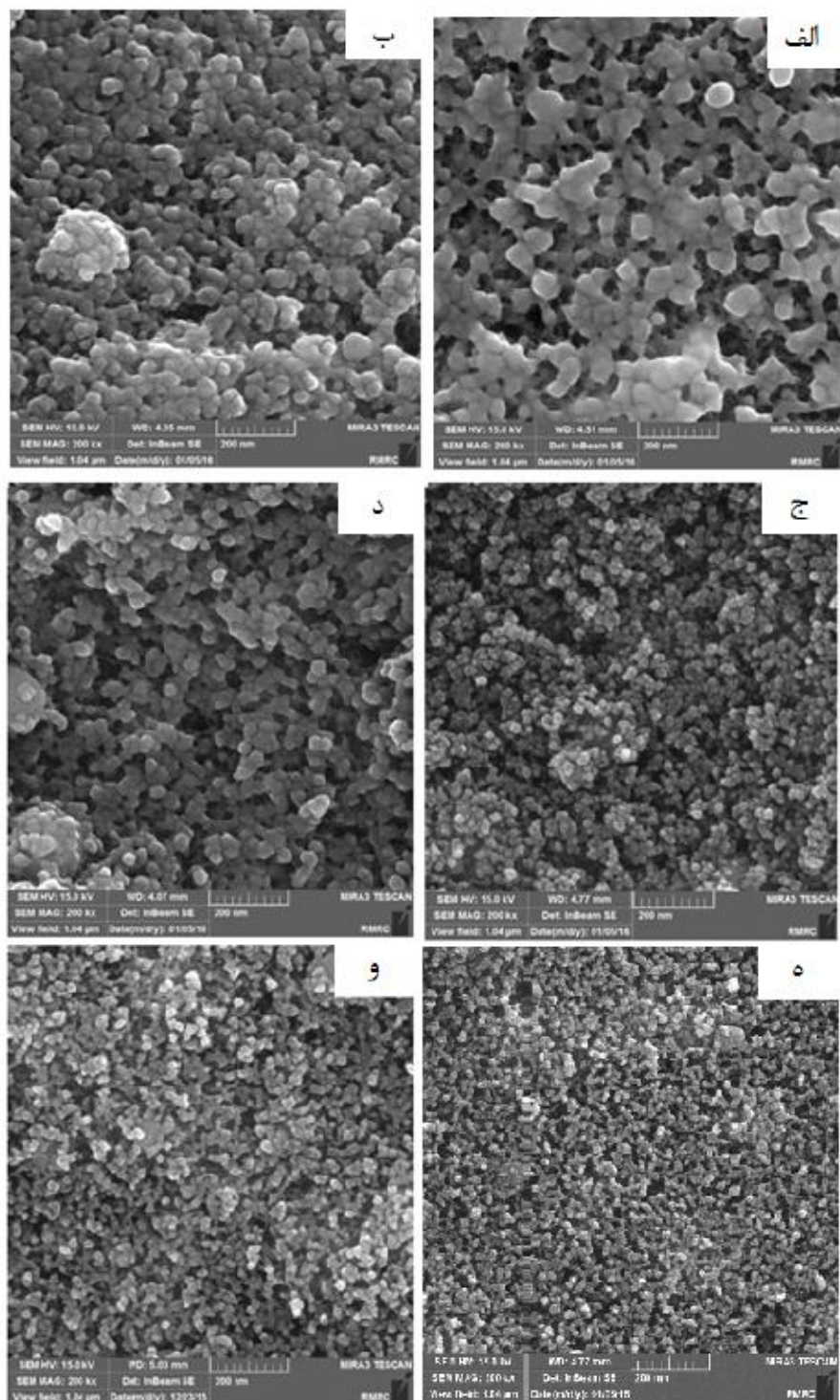


شکل ۴- وزن ZrO_2 نشست یافته از سوسپانسیون‌های مختلف بر حسب زمان در ولتاژهای الف (۲۰V، ب) ۲۰V، ج) ۳۰V و د) ۶۰V

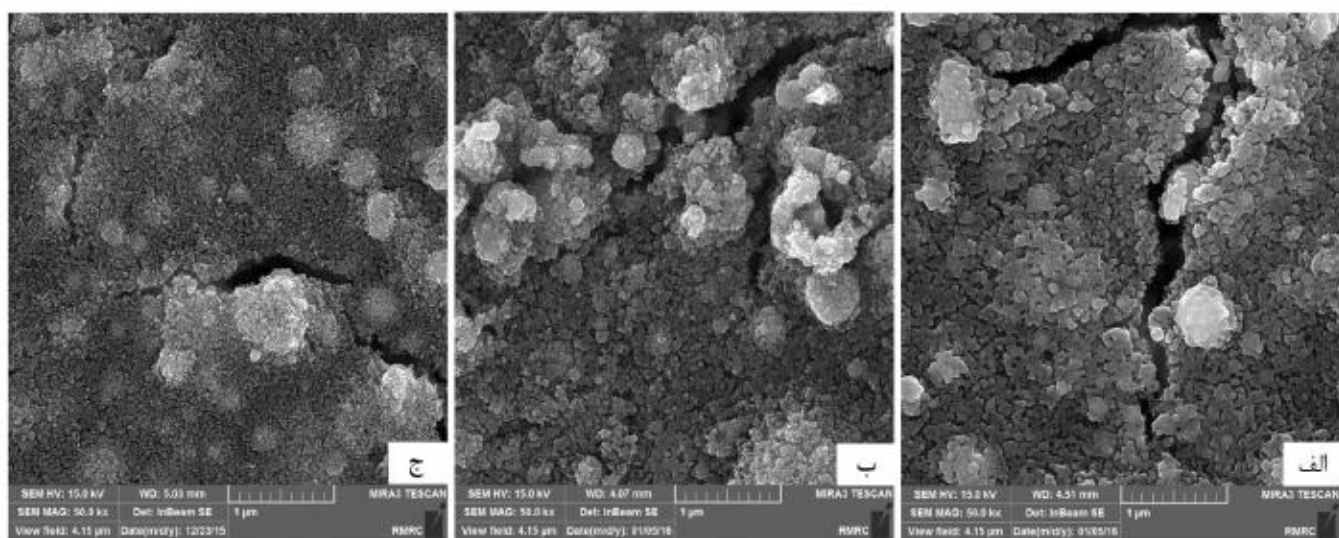




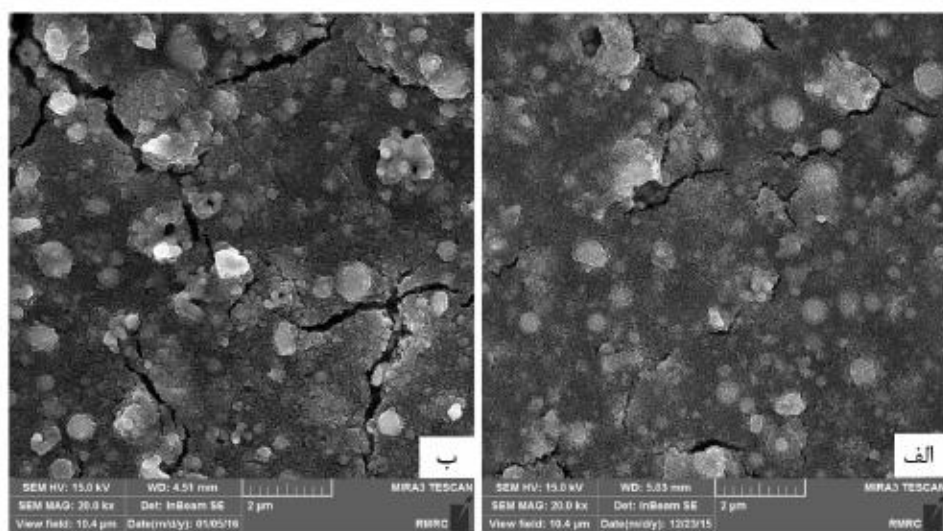
شکل ۵- رابطه بین دانسیته جریان و ولتاژ اعمالی برای سوسپانسیون های الف) ایزوپروپانول، ب) اتانول و ج) بوتانول



شکل ۶- تصاویر FESEM از فیلم ZrO_2 نشست داده شده بر سطح زیرلایه فولادی با سوسپانسیون و ولتاژ: (الف) اتانولی و ۲۰ V، (ب) اتانولی و ۶۰ V، (ج) ایزوپروپانولی و ۲۰ V، (د) ایزوپروپانولی و ۶۰ V، (ه) بوتانولی و ۲۰ V و (و) بوتانولی و ۶۰ V.



شکل ۷- تصاویر FESEM، ترک های فیلم خام حاصل از لایه نشانی ذرات ZrO_2 در ولتاژ ثابت ۶۰ V توسط سوسپانسیون های: الف) اتانول، ب) ایزوپروپانول و ج) بوتانول



شکل ۸- تصاویر FESEM، ترک های فیلم خام حاصل از لایه نشانی ذرات ZrO_2 توسط سوسپانسیون اتانول در ولتاژهای: الف) ۲۰ V و ب) ۶۰ V



مجموعه نشریات علمی و فناوری ایران