

ساخت نانو کامپوزیت NiO-YSZ برای آند پیل سوختی اکسید جامد به روش لایه‌نشانی الکتروفورتیک

مینا ضرابیان*^۱، محمد علی فقیهی ثانی^۲ و عبدالرضا سیم‌چی^۳

چکیده

در این پژوهش، نانو کامپوزیت NiO-YSZ جهت استفاده به عنوان لایه‌ی AFL آند SOFC به روش لایه‌نشانی الکتروفورتیک ساخته شد. برای این منظور، ابتدا سوسپانسیون حاوی ذرات NiO و YSZ با نسبت ۵۰:۵۰ و با غلظت ۱۰ gr/Lit در محیط‌های غیر آبی متعددی تهیه شد. بررسی‌ها نشان داد که سوسپانسیون تهیه شده در ایزوپروپانول، با افزودن ید دارای بهترین شرایط برای انجام فرآیند الکتروفورتیک است. سپس این سوسپانسیون جهت لایه‌نشانی الکتروفورتیک در ولتاژ ثابت مورد استفاده قرار گرفت. اثر تغییر پارامترهای فیزیکی شامل میدان الکتریکی و زمان بر تغییر ترکیب کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن، اثر تغییر ترکیب سوسپانسیون بر تغییر ترکیب کامپوزیت نشانده شده در صورت (۱) کاربرد اکسید نیکل میکرومتری و (۲) کاربرد همزمان اکسید نیکل نانومتری و میکرومتری مطالعه شد. نتایج هم‌چنین نشان داد که افزودن اکسید نیکل نانومتری به سوسپانسیون سبب افزایش درصد وزنی NiO در کامپوزیت می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پیل سوختی اکسید جامد، لایه‌نشانی الکتروفورتیک، کامپوزیت، NiO-YSZ.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده‌ی مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف.

۲- دانشیار دانشکده‌ی مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف.

۳- استاد دانشکده‌ی مهندسی و علم مواد و پژوهشکده‌ی فناوری نانو دانشگاه صنعتی شریف.

*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: mina.zarabian@gmail.com

پیشگفتار

به دلیل پیش‌بینی بحران انرژی در دهه‌های آتی و نیز افزایش روز افزون آلودگی زیست محیطی، توجه بشر به استفاده از فناوری‌های پیشرفته‌ی تبدیل انرژی، نظیر پیل‌های سوختی جلب شده است. این پیل‌ها بر مبنای الکترولیت مورد استفاده به پنج دسته پیل‌های سوختی (۱) قلیایی، (۲) اسید فسفریک (PAFC)، (۳) کربنات مذاب، (۴) اکسید جامد و (۵) پلیمری تقسیم می‌شوند. در این میان، پیل‌های سوختی اکسید جامد به دلیل خواص ویژه یکی از جذاب‌ترین فناوری‌های تولید انرژی در عصر حاضر بشمار می‌روند. این نوع پیل سوختی می‌تواند با بسیاری از انواع سوخت‌ها از جمله CO کار کند و نسبت به وجود ناخالصی در سوخت کم‌تر از پیل‌های سوختی پلیمری حساس است. از مزایای دیگر این پیل‌ها می‌توان به بازده بالای تبدیل انرژی، عدم نیاز به کاتالیست‌های گران قیمت، بی‌صدا بودن، کم‌تر بودن مشکل خوردگی مواد در مورد آن و امکان استفاده از فناوری لایه نازک برای تولید اجزای آن، اشاره کرد [۱ و ۳]. با این وجود، کارکرد SOFC در دمای بالا، مشکلاتی را برای آن ایجاد کرده است. از جمله آن که برای ساخت این پیل‌ها باید از موادی استفاده نمود که در دمای بالا پایدار باشند، این دمای بالا امکان انتخاب مواد مناسب برای سایر بخش‌ها بویژه درزگیر و اتصال‌دهنده را با مشکل مواجه می‌کند [۴ و ۵].

اجزای اصلی پیل سوختی اکسید جامد شامل: الکترولیت، آند، کاتد و اتصال‌دهنده است. در پیل سوختی هر جزء وظایفی را بر عهده دارد و برای تامین این وظایف باید شرایطی ویژه را دارا باشد. اجزاء باید دارای پایداری مناسب، سازگاری شیمیایی با دیگر اجزاء و هدایت مناسب باشند. افزون بر این، اجزای اصلی پیل سوختی سرامیکی باید دارای ضریب انبساط گرمایی مشابه با هم باشند تا از جدایش و ترک خوردن آن‌ها در هنگام ساخت و عملکرد پیل جلوگیری شود.

اساسی‌ترین وظیفه‌ی آند در SOFC تقویت فرآیند الکتروشیمیایی اکسیداسیون سوخت می‌باشد. در برخی موارد، آند نقش بنیان ساختاری سلول را نیز ایفا می‌کند که در این حالت خواص مکانیکی آن نیز دارای اهمیت

خواهد بود [۶ و ۲]. یکی از پرکاربردترین انواع آندها، آند سرامت Ni-YSZ است [۷]. در این سرامت متخلخل فاز فلزی Ni هدایت الکتریکی و فعالیت کاتالیستی مورد نیاز برای انجام فرآیند اکسیداسیون را فراهم می‌کند و فاز سرامیکی YSZ با کاهش ضریب انبساط حرارتی موجب تطبیق بهتر آند و الکترولیت می‌شود. میزان هدایت الکتریکی آند سرامت Ni-YSZ بستگی به نسبت حجمی Ni به YSZ دارد و کارایی پیل را به شدت تغییر می‌دهد [۸ و ۱۰]. روش‌های متعددی برای ساخت SOFC پیشنهاد شده است. روش پرس [۲]، ریخته‌گری دوغابی، ریخته‌گری نواری [۱۱]، غوطه‌وری [۱۲]، سل ژل و چاپ [۱۳] از جمله پرکاربردترین این روش‌هاست. روش لایه نشانی الکتروفوریتیک (EPD) به دلیل زمان شکل دهی کم، تجهیزات ساده و محدودیت کم در شکل زیرلایه در سال‌های اخیر مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است [۱۴ و ۱۶]. فرآیند EPD شامل دو مرحله است. در مرحله‌ی نخست، ذرات در محلول کلوییدی، در میدان الکتریکی ثابت حرکت می‌کنند و در مرحله‌ی دوم نشست بر سطح زیرلایه رسانا با بار مخالف صورت می‌گیرد [۱۷ و ۱۹]. دو دسته فراسنج بر فرآیند EPD موثر است: دسته‌ی نخست فراسنج‌های شیمیایی مربوط به سوسپانسیون مانند اندازه‌ی ذرات، ثابت دی الکتریک مایع، هدایت سوسپانسیون، ویسکوزیته و پتانسیل زتا و دسته‌ی دوم فراسنج‌های فیزیکی فرآیند مانند ماهیت الکتریکی الکترودها و شرایط الکتریکی (ولتاژ، زمان لایه نشانی و غیره) است [۲۰]. در سال ۲۰۰۶ بسرا و همکارانش [۲۱] برای نخستین بار، ساخت آند کامپوزیت NiO-YSZ به وسیله‌ی روش الکتروفوریتیک را مطرح نمودند. آن‌ها سوسپانسیون دو جزئی از ذرات NiO و YSZ را در محیط استیل استون تهیه نمودند. نتایج بدست آمده از پژوهش این گروه نشان داد که افزودن نانو اکسید نیکل کیفیت پوشش را به شدت بهبود می‌دهد. آن‌ها هم چنین اثر تغییر نسبت NiO : YSZ در سوسپانسیون را بر تغییر این نسبت در لایه گزارش کردند. پس از آن، پژوهشی جامع بر مطالعه سایر فراسنج‌های موثر بر فرآیند EPD کامپوزیت NiO-YSZ منتشر نشده است.

مغناطیسی بکار برده شد.

فرآیند EPD

پیش از لایه‌نشانی، سطح فولاد زنگ نزن L ۳۱۶ به عنوان زیرلایه، با آب و مواد شوینده کاملاً چربی‌زدایی گردید. سپس با استون شسته و در هوا خشک شد. سطح لایه‌نشانی با پوشاندن بقیه‌ی سطح به کمک چسب، برای همه‌ی نمونه‌ها 1 cm^2 در نظر گرفته شد. طراحی سل الکتروفوریتیک به گونه‌ای انجام شد که فاصله‌ی الکترودها در تمام آزمایش‌ها ۱۵mm باشد. ولتاژ در محدوده‌ی ۵۰V تا ۳۰۰V و زمان از ۳۰ sec تا ۱۰ min برای رسیدن به پوششی یکنواخت تغییر داده شد. در نهایت، کیفیت لایه‌ها به وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی مدل وگا تی اسکن ساخت کشور چک مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج و بحث

انتخاب نوع حلال

از میان الکل‌های متفاوتی که برای تهیه‌ی سوسپانسیون انتخاب شد، ایزوپروپانول ضمن داشتن پایداری مناسب در فاصله‌ی زمانی لایه‌نشانی، به دلیل بالاتر بودن ثابت دی الکتریک [۲۲] برای انجام فرآیند EPD از سایر الکل‌ها مناسب‌تر است. اگرچه در پژوهشی که بتازگی انجام شده است [۲۱]، استیل استون به عنوان حلال مناسب معرفی شده است، ولی مشاهده‌ها نشان داد که سرعت تخییر زیاد استیل استون در مقایسه با ایزوپروپانول باعث تغییر غلظت سوسپانسیون در طول فرآیند و ایجاد ترک در سطح لایه‌ها در حین خشک شدن می‌شود [۲۰]. از این رو، سایر مطالعات در محیط ایزوپروپانول انجام گرفت. شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ نوری را از دو پوشش ایجاد شده در استیل استون و ایزوپروپانول، در شرایط یکسان نشان می‌دهد. ضخامت این دو لایه به ترتیب $25 \mu\text{m}$ و $40 \mu\text{m}$ است. همان‌گونه که دیده می‌شود، لایه‌ی ایجاد شده در استیل استون با وجود داشتن ضخامتی به مراتب کم‌تر به شدت ترک خورده است.

در این پژوهش با استفاده از روش EPD، ساخت لایه کاری آند پیل سوختی مطالعه شده است. هم‌چنین اثر افزودن نانو اکسید نیکل، تغییر زمان، ولتاژ و تغییر ترکیب سوسپانسیون بر تغییر ترکیب کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه

در این پژوهش از پودر زیرکونیای پایدار شده با ایتریا (TZ-8Y) ساخت شرکت توسو با اندازه‌ی ذرات حدود $0.2 \mu\text{m}$ و پودر اکسید نیکل میکرونی با اندازه‌ی ذرات نسبتاً بزرگ (کم‌تر از $1.0 \mu\text{m}$) از شرکت سیگما آلدریج استفاده شد. این پودر به مدت یک ساعت توسط کاپ و گلوله‌های زیرکونیایی با نسبت گلوله ۱ به ۵ در محیط اتانول به وسیله‌ی دستگاه Spex 8000 آسیاب شد که اندازه‌ی ذرات آن به کم‌تر از $5 \mu\text{m}$ کاهش یافت. هم‌چنین، پودر اکسید نیکل دیگر، با اندازه‌ی حدود $50 \mu\text{m}$ نانومتر از شرکت سیگما آلدریج در برخی از نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱ ریخت شناختی پودر زیرکونیا، اکسید نیکل میکرونی و اکسید نیکل نانومتری را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، پودرها دارای ریخت شناختی کروی و یکسانی هستند.

تهیه‌ی سوسپانسیون

جهت تهیه‌ی سوسپانسیون، 0.24 gr ماده‌ی جامد با نسبت‌های NiO:YSZ، $50:50$ ، $40:60$ و $30:70$ به 24 ml از حلال الکلی افزوده شد. از آن‌جا که پوشش ایجاد شده در ایزوپروپانول دارای کیفیت بهتری بود، سایر مشاهدات در ایزوپروپانول انجام گرفت. جهت افزایش بار سطحی ذرات، مقدار 0.25 gr/Lit ید به سوسپانسیون افزوده شد. برای افزایش هدایت الکتریکی سوسپانسیون در صورت استفاده از پودر میکرونی، از آب مقطر به میزان 1 ml و در صورت استفاده از مخلوط پودر میکرومتری و نانومتری، از تری اتانول آمین به میزان 0.2 ml استفاده شد. برای شکستن آگلومرها، سوسپانسیون‌ها به مدت 30 min پیش از استفاده، آتراسونیک شدند. هم‌چنین بمنظور تهیه‌ی پوششی یکنواخت، در حین فرآیند همزن

فرآیند EPD با پودر اکسید نیکل میکرونی

در آند سرامت Ni-YSZ کاهش اندازه‌ی ذرات NiO اولیه سبب افزایش هدایت الکتریکی آند می‌شود. هم‌چنین هر قدر NiO اولیه کوچک‌تر باشد، مقدار لازم از آن برای تشکیل یک فاز پیوسته کاهش می‌یابد، ولی کوچک شدن بیش از حد ذرات، سبب متراکم شدن بیش از حد آند و عدم امکان ورود گاز می‌شود [۱]. هم‌چنین بر اساس پژوهشی که در سال ۲۰۱۱ به‌وسیله‌ی عبدلی و همکارانش [۲۰] منتشر شده است، مشاهده می‌شود که احتمال ترک خوردن پوشش‌های تشکیل شده از ذرات میکرومتری در حین خشک شدن کم تر است. علت این امر کم تر بودن مقدار نیروهای مویینه‌ی این پوشش‌ها در مقایسه با پوشش‌های تشکیل شده از ذرات نانومتری است. بنابراین، برای لایه‌نشانی از پودر میکرونی با میانگین اندازه‌ی ذرات $1\ \mu\text{m}$ (پودر آسیاب شده) استفاده شد. ضخامت لایه‌ی مورد نظر برای AFL در حدود $120\text{--}40\ \mu\text{m}$ گزارش شده است [۲۳]. به کمک فراسنج‌های گوناگون در فرآیند EPD مانند ولتاژ، زمان، فاصله‌ی الکترودها، غلظت سوسپانسیون و بار سطحی ذرات می‌توان میزان ضخامت لایه‌ی نشانده شده را کنترل نمود [۱۸]. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، افزایش ولتاژ سبب افزایش وزن و ضخامت لایه‌ی نشانده شده می‌شود. این افزایش تا ولتاژ $300\ \text{V}$ رفتاری نزدیک به رفتار خطی دارد. افزایش ولتاژ افزون بر آن، بر کیفیت سطحی پوشش اثر می‌گذارد. ۴۰ اثر افزایش ولتاژ در ایجاد حفره و ترک بر سطح کامپوزیت را نشان می‌دهد. با افزایش ولتاژ به دلیل افزایش سرعت لایه‌نشانی، ذرات فرصت کافی برای یافتن مکان مناسب و ایجاد ساختار متراکم را پیدا نمی‌کنند. هم‌چنین افزایش پتانسیل سبب تشدید جریان‌های توربلانسی و تخریب پوشش به وسیله‌ی حرکت مایع حلال می‌شود [۲۲]. بنابراین، لایه‌نشانی باید در ولتاژی انجام شود که ضمن داشتن بالاترین ضخامت، کیفیت سطحی لایه مناسب باشد. گفتنی است که وجود ترک حتی در ابعاد میکرومتری به شدت موجب کاهش عمر کارکرد پیل می‌شود. بنابراین، در ادامه‌ی این پژوهش از ولتاژ در محدوده‌ی $150\ \text{V}$ برای انجام لایه‌نشانی استفاده شد. جهت افزایش ضخامت لایه، زمان فرآیند در

این ولتاژ تا $5\ \text{min}$ افزایش یافت. بررسی‌ها نشان داد که افزایش زمان فرآیند بیش از این اندازه منجر به ایجاد ترک‌های سطحی می‌شود.

برای لایه‌ی AFL آند SOFC علاوه بر کیفیت میکروساختاری و ضخامت مناسب، ترکیب نیز دارای اهمیت است. به بیان دیگر، نسبت NiO به YSZ برای این کامپوزیت باید در محدوده‌ی بهینه باشد. نتایج تجزیه‌ی جذب اتمی نشان داد که برای یک سوسپانسیون با نسبت برابر از دو ماده، در لایه‌ی نشانده شده تحت ولتاژ $150\ \text{V}$ و زمان $5\ \text{min}$ ، تنها حدود ۲۰٪ وزنی اکسید نیکل وجود دارد. برای افزایش این نسبت لازم است سوسپانسیون‌هایی با درصد بیش تر از NiO نسبت به YSZ تهیه شود. شکل ۵ نحوه‌ی تغییرات درصد وزنی NiO در پوشش را نسبت به درصد NiO موجود در سوسپانسیون نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تهیه‌ی سوسپانسیون با ۷۰٪ وزنی از اکسید نیکل منجر به تهیه‌ی کامپوزیتی با تنها ۳۳٪ وزنی NiO می‌شود. این مقدار برای AFL کافی نیست، از سوی دیگر، افزایش NiO موجود در سوسپانسیون بیش از این اندازه، سبب ترک خوردن شدید کامپوزیت می‌شود. بنابراین، برای افزایش درصد وزنی NiO و جلوگیری از ایجاد ترک در لایه‌ها از اکسید نیکل نانومتری استفاده شد. اثر تغییر ترکیب سوسپانسیون و افزودن نانو اکسید نیکل جهت اصلاح ترکیب و میکروساختار کامپوزیت NiO-YSZ، ۵۰٪ وزنی از اکسید نیکل موجود در سوسپانسیون از نانو اکسید نیکل تامین شد. افزودن نانو اکسید نیکل سبب افزایش میزان NiO در پوشش می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۶ دیده می‌شود، در صورت استفاده از نانو اکسید نیکل، از سوسپانسیونی با ۵۰٪ وزنی اکسید نیکل، پوششی با حدود ۴۰٪ وزنی اکسید نیکل ایجاد می‌شود. هم‌چنین، افزایش درصد NiO در سوسپانسیون موجب افزایش درصد آن در پوشش، با شیبی نسبتاً ثابت می‌شود. در شکل ۷ تصویر سطحی از دو نانو کامپوزیت با درصدهای متفاوت از NiO نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، افزایش درصد وزنی NiO در سوسپانسیون تا ۷۰٪ وزنی سبب ایجاد میکروتورک‌هایی بر سطح شده است. وجود این

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از همکاری سرکار خانم آزاده یزدان‌یار جهت آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی برای تهیه‌ی این مقاله قدردانی و تشکر بسیار می‌نمایند.

منابع

- 1- A. Atkinson., S. Barnett., R. J. Gorte., J. T. S. Irvine., A. J. McEvoy, M. Mogensen., S. C. Singhal., and J. Vohs., Advanced anodes for high-temperature fuel cells. *Nat Mater*;3:17. 2004.
- 2- J. W. Fergus., R. Hui., X. Li., D. P. Wilkinson., and J. Zhang., Solid oxide fuel cells : materials properties and performance: CRC Press. 2009.
- 3- I. Tatsumi., S. Keiji., and T. Yusaku., Electrophoretic Deposition of Y_2O_3 -Stabilized ZrO_2 Electrolyte Films in Solid Oxide Fuel Cells. *Journal of the American Ceramic Society*;79:913. 1996.
- 4- J. r. Fleig., Solid Oxide Fuel Cell Cathodes: Polarization Mechanisms and Modeling of the Electrochemical Performance. *Annual Review of Materials Research*;33:361. 2003.
- 5- J. San Ping., Siew Hwa C. A review of anode materials development in solid oxide fuel cells. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE*;39:4405. 2004.
- 6- J. B. Goodenough., and Y. H. Huang., Alternative anode materials for solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*;173:1. 2007.
- 7- A. Hassan., N. Menzler., G. Blass., and M. Ali., Buchkremer H, Stöver D. Development of an Optimized Anode Functional Layer for Solid Oxide Fuel Cell Applications. *Advanced Engineering Materials*, 4:125. 2002.
- 8- F. Zhao., and A. V. Virkar., Dependence of polarization in anode-supported solid oxide fuel cells on various cell parameters. *Journal of Power Sources*;141:79. 2005.
- 9- Y. J. Leng., S. H. Chan., K. A. Khor., and S. P. Jiang., Performance evaluation of anode-supported solid oxide fuel cells with thin film YSZ electrolyte. *International Journal of Hydrogen Energy*;29:1025. 2004.
- 10- H. Koide., Y. Someya., and T. Yoshida., Maruyama T. Properties of Ni/YSZ cermet as anode for SOFC. *Solid State Ionics*;132:253. 2000.
- 11- M. Radovic., and E. Lara-Curzio., Mechanical properties of tape cast nickel-

میکروترک‌ها به شدت سبب کاهش عمر مفید پیل می‌شود.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع این پوشش‌ها در شکل ۸ دیده می‌شود. همان گونه که مشاهده می‌شود، در صورت استفاده‌ی همزمان از پودرهای اکسید نیکل نانومتری و میکرومتری، ضخامت نانوکامپوزیت با تغییر درصد وزنی اجزاء تغییر نمی‌کند و در حدود $124 \mu m$ است، ولی ضخامت کامپوزیت NiO-YSZ که تنها با استفاده از NiO میکرومتری تهیه شده است، در شرایط مشابه الکتروفورتیک، به مراتب کم تر و تنها $37 \mu m$ است. هم چنین مشابه شکل پیش، مشاهده می‌شود که افزایش درصد وزنی NiO تا ۷۰٪ وزنی در سوسپانسیون حاوی نانو اکسید نیکل، سبب ترک خوردن لایه می‌شود. از سوی دیگر، افزایش درصد وزنی اکسید نیکل نانو نسبت به اکسید نیکل میکرونی اگرچه سبب افزایش درصد وزنی اکسید نیکل در کامپوزیت و نیز کاهش مقدار لازم از اکسید نیکل برای تشکیل فاز پیوسته می‌شود [۲]، ولی سبب متراکم شدن شدید آند پس از فرآیند زینتر می‌شود و در نتیجه ورود گاز به سیستم و انجام واکنش‌ها با مشکل مواجه خواهد شد [۲۱].

نتایج تجزیه‌ی جذب اتمی از این پوشش‌ها هم چنین نشان داد که افزایش ولتاژ از $50V$ تا $300V$ و تغییر زمان پوشش‌دهی از 30 sec تا 10 min تغییر شایان توجهی در ترکیب نانو کامپوزیت ایجاد نمی‌کند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش نانو کامپوزیت NiO-YSZ جهت استفاده به عنوان لایه‌کاری آند پیل سوختی اکسید جامد از روش الکتروفورتیک تهیه شد. نتایج نشان داد که افزودن اکسید نیکل نانومتری نه تنها سبب افزایش ضخامت و بهبود کیفیت پوشش می‌شود بلکه موجب افزایش شدید درصد وزنی NiO در کامپوزیت نیز می‌شود. هم‌چنین بررسی‌ها نشان داد که تغییر زمان و میدان الکتریکی تغییری در ترکیب کامپوزیت ایجاد نمی‌کند.

deposition techniques in ceramics processing. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*;6:251. 2002.

18- I. Corni, M. P. Ryan., and A. R. Boccaccini., Electrophoretic deposition: From traditional ceramics to nanotechnology. *Journal of the European Ceramic Society*;28:1353. 2008.

19- B. A. Ferrari., and R. Moreno., EPD kinetics: A review. *Journal of the European Ceramic Society*;30:1069.

20- H. Abdoli., M. Zarabian., P. Alizadeh., S. K. Sadrnezhad., Fabrication of aluminum nitride coatings by electrophoretic deposition: Effect of particle size on deposition and drying behavior. *Ceramics International*;37:313.

21- L. Besra., S. Zha., M. Liu., Preparation of NiO-YSZ/YSZ bi-layers for solid oxide fuel cells by electrophoretic deposition. *Journal of Power Sources*;160:207. 2006.

22- L. Besra., and M. Liu., A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD). *Progress in Materials Science* 2007;52:1.

23- J. Kong., K. Sun., D. Zhou., N. Zhang., J. Mu., and J. Qiao., Ni-YSZ gradient anodes for anode-supported SOFCs. *Journal of Power Sources* 2007;166:337.

based anode materials for solid oxide fuel cells before and after reduction in hydrogen. *Acta Materialia*;52:5747. 2004.

12- Y. Zhang., J. Gao., D. Peng., M. Guangyao., and X. Liu., Dip-coating thin yttria-stabilized zirconia films for solid oxide fuel cell applications. *Ceramics International* 2004;30:1049.

13- D. Rotureau., J. P. Viricelle., C. Pijolat., N. Caillol., and M. Pijolat., Development of a planar SOFC device using screen-printing technology. *Journal of the European Ceramic Society*;25:2633. 2005.

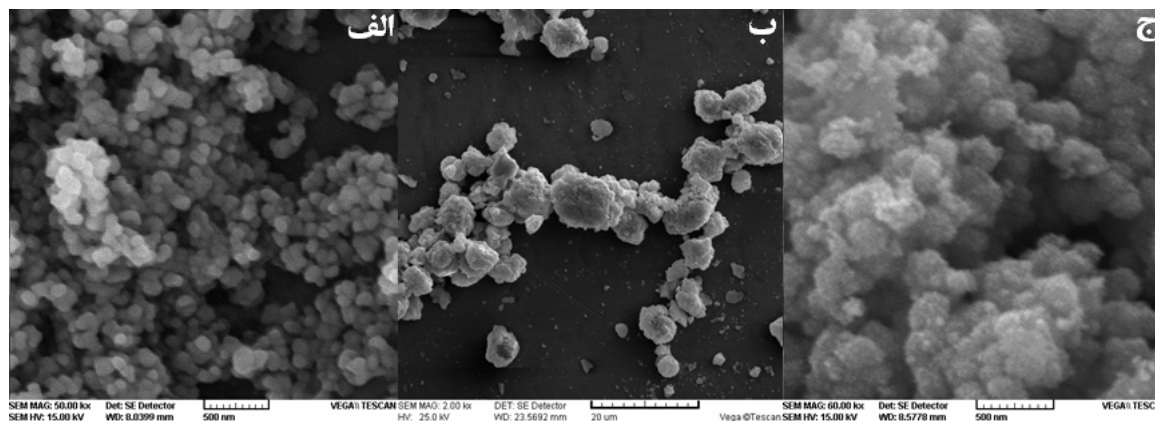
14- S. T. Aruna., and K. S. Rajam., A study on the electrophoretic deposition of 8YSZ coating using mixture of acetone and ethanol solvents. *Materials Chemistry and Physics*;111:131. 2008.

15- A. Boccaccini., Electrophoretic deposition: fundamentals and applications in materials science. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE*;41:8029. 2006.

16- K. Kanamura., and J. I. Hamagami., Innovation of novel functional material processing technique by using electrophoretic deposition process. *Solid State Ionics*;172:303. 2004

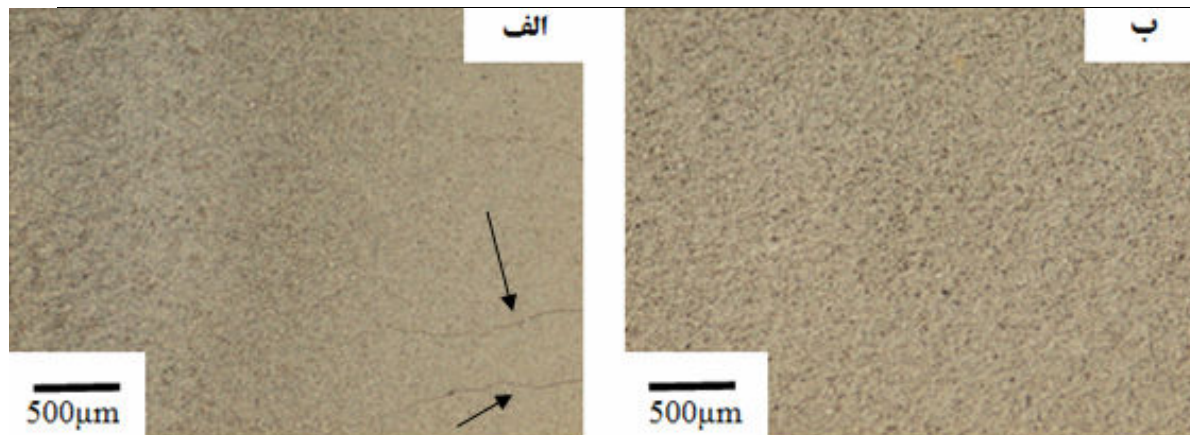
17- A. R. Boccaccini., and I. Zhitomirsky., Application of electrophoretic and electrolytic

پیوست‌ها

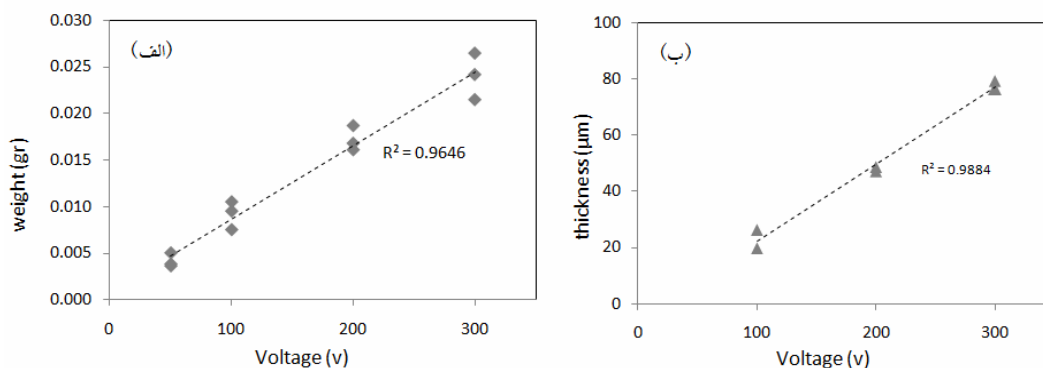


شکل ۱- ریخت شناسی پودرهای الف) 8YSZ و ب) NiO میکرونی پس از آسیاب کاری و ج) NiO

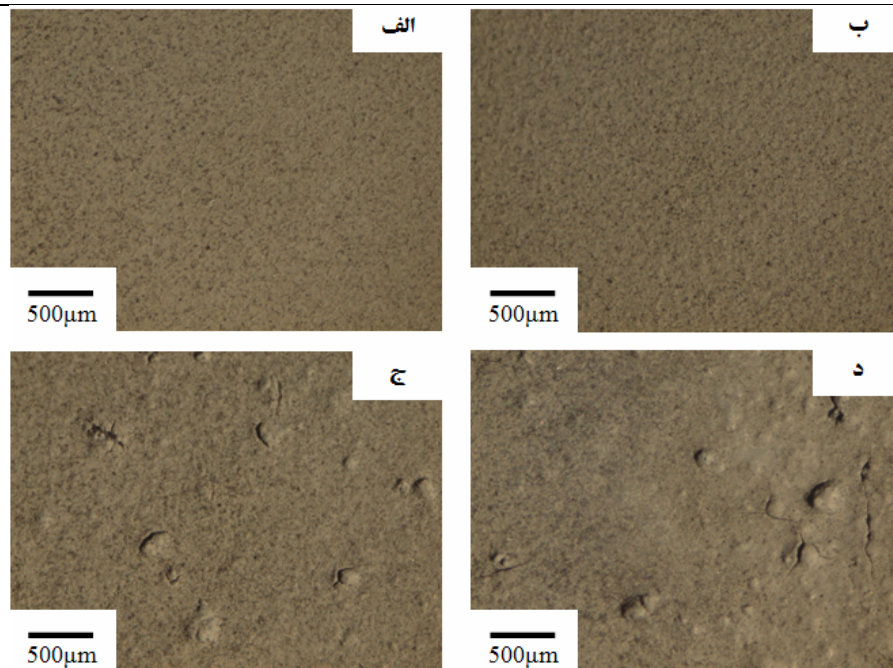
نانومتري.



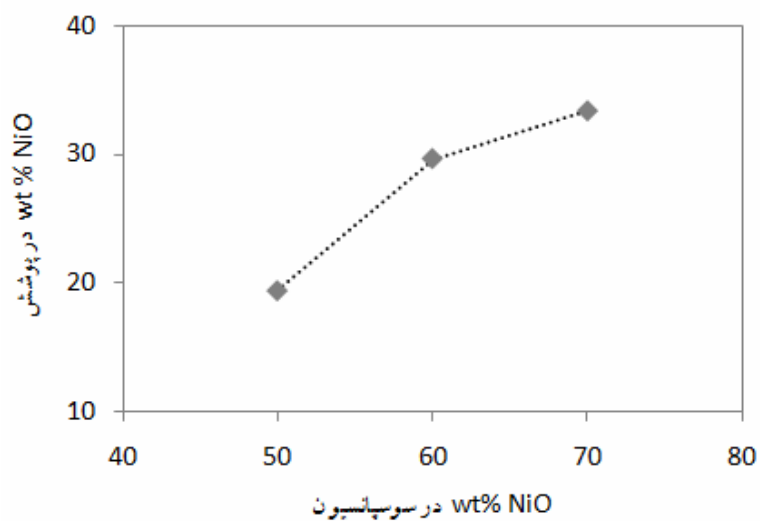
شکل ۲- پوشش ایجاد شده در ۱۵۰V به مدت ۳ min از NiO و YSZ در حلال الف) استیل استون و ب) ایزوپروپانول.



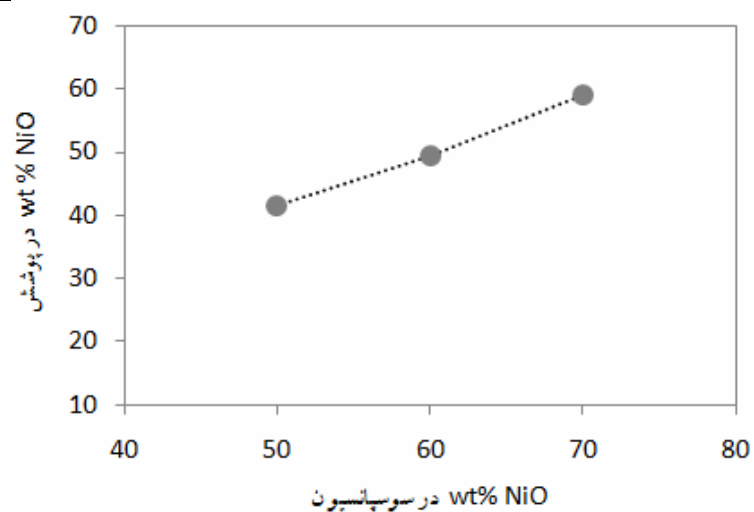
شکل ۳- نحوه‌ی تغییرات الف) وزن و ب) ضخامت پوشش نسبت به ولتاژ اعمالی در کامپوزیت با اندازه‌ی ذرات میکرونی از NiO و YSZ.



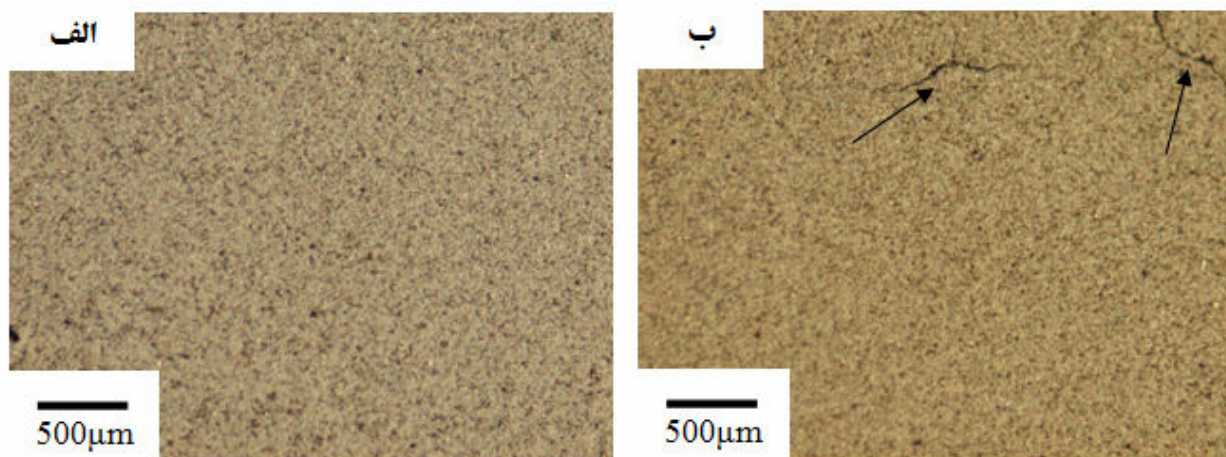
شکل ۴- اثر ولتاژ بر کیفیت پوشش NiO-YSZ با اندازه‌ی ذرات میکرونی الف) ۵۰ V (ب) ۱۰۰V (ج) ۲۰۰V و (د) ۳۰۰ V به مدت ۳ دقیقه.



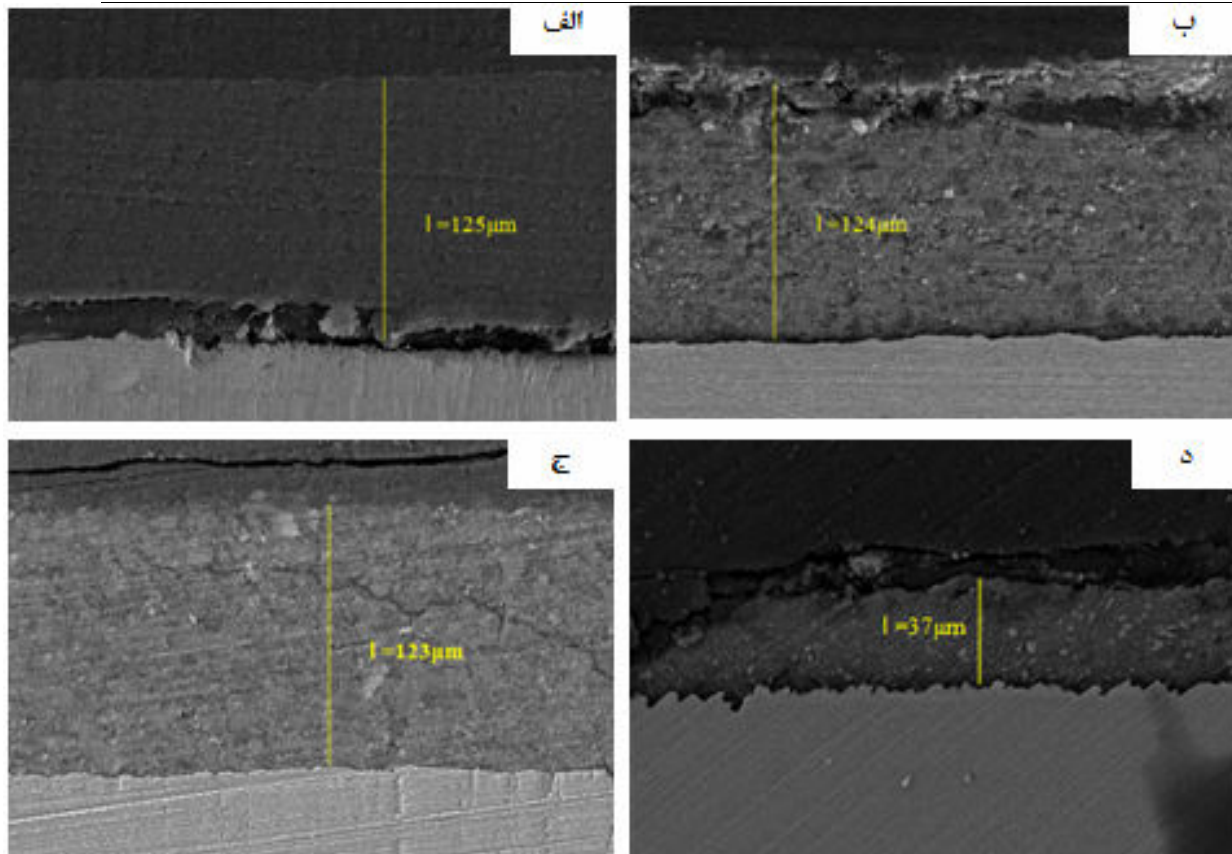
شکل ۵- ارتباط میان درصد NiO در پوشش نسبت به درصد آن در سوسپانسیون NiO-YSZ با اندازه‌ی ذرات میکرونی در ولتاژ ۱۵۰V و زمان ۳ min.



شکل ۶- ارتباط میان درصد NiO در پوشش نسبت به درصد آن در سوسپانسیون با افزودن نانو اکسید نیکل در ولتاژ ۱۵۰ V و زمان ۳ min.



شکل ۷- تصویر نانو کامپوزیت NiO-YSZ نشانده شده در ولتاژ ۱۵۰V و زمان ۵min با نسبت وزنی NiO:YSZ (الف) ب ۶۰:۴۰ و (ب) ۷۰:۳۰.



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع نانوکامپوزیت نشانده شده در ولتاژ ۱۵۰V و زمان ۵min با نسبت وزنی NiO:YSZ (الف) ۵۰:۵۰ (ب) ۶۰:۴۰، (ج) ۷۰:۳۰ و (د) کامپوزیت NiO-YSZ نشانده شده در ولتاژ ۱۵۰V و زمان ۵min با نسبت وزنی NiO:YSZ=70:30