

بهینه‌سازی ترکیب نانوساختار کربنی به عنوان زیر لایه در رشد الکتروکاتالیست‌های کبالت

محمد پوررضا^۱، نعیمه ناصری^۱ و شهناز قاسمی^۲

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲. پژوهشکده آب و انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

پست الکترونیکی: naseri@sharif.edu

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۰۳/۳۱)

چکیده

گرم شدن کره زمین و دیگر اثرات زیست محیطی نامطلوب ناشی از سوخت‌های فسیلی، جوامع بشری را به استفاده از انرژی‌های پاک و تجدید پذیر سوق داده است. در این حوزه، تولید هیدروژن از واکنش تجزیه آب رویکرد کلیدی به شمار می‌رود. به منظور کاهش پتانسیل اضافی مورد نیاز برای واکنش اکسیداسیون آب باید از نانوساختارهای الکتروکاتالیست ارزان قیمت مانند Ni, Co, Cu, Fe, Mn, Zn استفاده کرد. در این پژوهش از الکتروکاتالیست کبالت رشد یافته بر بستر توری استیل استفاده شده است و برای سهولت در لایه نشانی، روش الکتروشیمیایی مورد استفاده قرار گرفته است، زیرا این روش با توجه به سادگی می‌تواند در مقیاس تجاری نیز مفید باشد. طبیعتاً شرایط زیر لایه نیز نقش مهمی را در بازده الکتروکاتالیست دارد، بنابراین استفاده از پوشش‌های نانوساختار کربنی به صورت ترکیبی از اکسید گرافن و نانولوله‌های کربنی، به منظور کاهش پتانسیل اضافی و افزایش بازده الکتروکاتالیست استفاده شد. طبق نتایج به دست آمده، ۴۰ درصد وزنی از اکسید گرافن و ۶۰ درصد وزنی از نانولوله کربنی در خمیر کربنی تهیه شده منجر به رشد بهتر نانورقه‌های اکسید کبالت خواهد شد. در لایه مورد نظر، کبالت در فاز بلوری فلزی مشاهده شده و پتانسیل اضافی و مقاومت الکترونیکی به ترتیب ۳۰۵ mV و 20Ω اندازه‌گیری شده است.

واژه‌های کلیدی: الکتروکاتالیست، نانورقه‌های کبالت، ورقه‌های اکسید گرافن، نانولوله‌های کربنی، پتانسیل اضافی

۱. مقدمه

فسیلی است. بر این اساس، استفاده از روش‌های نوین تولید آن اجتناب‌ناپذیر است. یکی از این راهکارها، به کارگیری الکتروکاتالیست‌هایی به منظور شکست آب و تولید هیدروژن با کمک نور خورشید است [۱-۳]. الکتروکاتالیست مناسب برای فرایند تجزیه آب باید ارزان قیمت با فراوانی زیاد باشد تا از لحاظ تجاری نیز به صرفه باشد. در عین حال فعالیت کاتالیستی بالا، استحکام مکانیکی

نیاز روز افزون به انرژی و محدودیت و پیامدهای استفاده از انرژی فسیلی، ضرورت به کارگیری منابع تمیز و تجدیدپذیر را در پی داشته است. هیدروژن یک حامل انرژی پاک محسوب می‌شود که بخار آب تنها فراورده حاصل از سوختن آن به شمار می‌رود. روش‌هایی که امروزه برای تولید این سوخت به کار می‌رود عمدتاً مبتنی بر استفاده از ترکیبات حاصل از منابع

دادند که استفاده از نانولوله‌های کربنی به عنوان زیر لایه، بهتر از ترکیب نانولوله‌ها با کاتالیست مورد نظر است [۱۱]. به علاوه، گروه‌های دیگر نیز با استفاده از نانولوله‌های کربنی به عنوان زیر لایه نشان دادند که با افزایش فعالیت کاتالیستی، پتانسیل اضافی کاهش می‌یابد [۸ و ۱۲].

بهینه کردن نسبت اکسید گرافن به نانولوله‌های کربنی حائز اهمیت بوده و پتانسیل اضافی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اما تا به حال گزارشی مبنی بر تأثیر زیر لایه مرکب اکسید گرافن و نانولوله‌های کربنی بر فعالیت نانورقه‌های کبالت و نسبت بهینه اکسید گرافن و نانولوله‌های کربنی گزارش نشده است در حالی که انتظار می‌رود استفاده هم‌زمان از این دو نانوساختار، باعث افزایش سطح مؤثر و افزایش رسانایی الکتروکاتالیست نهایی شود. در این پژوهش با بررسی بهترین روش برای اولین بار نسبت بهینه اکسید گرافن به نانولوله‌های کربنی برای به دست آمده است. برای این منظور تأثیر خمیر ترکیبی متشکل از نانو صفحات اکسید گرافن و نانولوله‌های کربنی به عنوان زیر لایه در عملکرد الکتروکاتالیستی نانورقه‌های کبالت به منظور اکسایش آب بررسی خواهد شد.

۲. جزئیات تجربی

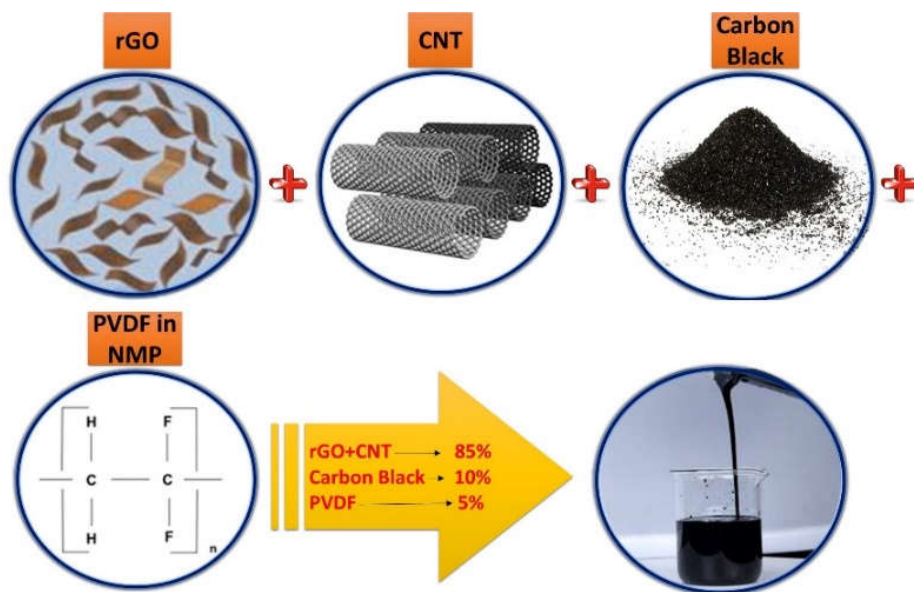
در این پژوهش نانوصفحات اکسید گرافن به روش هامر تهیه شده است [۱۳]. برای ساخت خمیر ترکیبی از محلول اکسید گرافن تهیه شده و نانولوله‌های کربنی با ضخامت ۳۰-۲۰ nm، طول حدود ۳۰ μm و درصد خلوص ۹۵٪ استفاده شده است. از آنجا که این دو ماده به خودی خود چسبندگی لازم را برای قرار گرفتن زیر لایه ندارد، از پیوند دهنده‌ای به نام PVDF^۱ استفاده شده است. PVDF ماده‌ای جامد است که برای انحلال آن حلال NMP^۲ به کار گرفته شده است. به دلیل استفاده از NMP و PVDF میزان رسانایی دو ماده اصلی یعنی اکسید گرافن و نانولوله‌های کربنی تحت تأثیر قرار

بالا و پتانسیل اضافی کم از دیگر مشخصه‌های یک الکتروکاتالیست مناسب است. از این رو اکسید فلزات مختلفی به دلیل استحکام و فعالیت کاتالیستی مناسب برای این منظور مورد بررسی قرار گرفتند. اکسید دو فلز Ru و Ir بیشترین فعالیت کاتالیستی و کمترین پتانسیل اضافی را از خود نشان دادند که به دلیل قیمت بالا مورد استفاده قرار نگرفتند. بنابراین اکسید فلزاتی مانند کبالت، منگنز، مس، آهن و نیکل را که به وفور یافت می‌شوند، مورد آزمایش قرار می‌گیرند [۴ و ۵]. اکسید کبالت علاوه بر پتانسیل اضافی کم دارای دو نوع سایت است که یکی از آنها واکنش اکسیداسیون را با سرعت بالا و دیگری با سرعت پایین انجام می‌دهد. افزایش مساحت مؤثر و رسانندگی نیز باعث بالا رفتن بازده الکتروکاتالیست می‌شود که برای این منظور از اکسید گرافن و نانولوله‌های کربنی به عنوان بستر رشد این الکتروکاتالیست‌ها استفاده می‌شود. اکسید گرافن و نانولوله‌های کربنی با توجه به پتانسیل اضافی کم می‌توانند منجر به بالا رفتن بازده در این سیستم‌ها شوند.

صفحه گرافنی دارای استحکام مکانیکی بالاست و سطحی مناسب برای رشد نانو ذراتی نظیر کبالت دارد. در سال (۲۰۱۱) اولین گزارش که گرافن را به عنوان زیر لایه برای الکتروکاتالیست اکسید کبالت به کار برده بود، منتشر شد [۲]. در این پژوهش گرافن عاملی با استحکام مکانیکی بالا و ارزان قیمت برای رشد بهتر نانورقه‌های کبالت معرفی شد که با افزودن آن پتانسیل اضافی الکتروکاتالیست کاهش یافت. علاوه بر این، گروه‌های دیگر نیز با اضافه کردن گرافن به الکتروکاتالیست کبالت و بعضاً افزودن نیتروژن موجب افزایش فعالیت کاتالیستی و در نتیجه کاهش پتانسیل اضافی شده‌اند [۶ - ۹]. در سال (۲۰۱۲) اولین گزارش که تأثیر زیر لایه‌ای از جنس نانولوله‌های کربنی را بر فعالیت اکسید کبالت نشان می‌داد، منتشر شد که در نتیجه آن نانولوله‌های کربنی با فراهم کردن مکان‌هایی برای فعالیت بیشتر کبالت منجر به پتانسیل اضافی کمتر، فعالیت کاتالیستی و مقاومت مکانیکی بیشتر می‌شود [۱۰]. در سال (۲۰۱۳)، یولونگ لیو و همکارانش نشان

۱. Poly Vinylidene Di Fluoride

۲. N-Methyl Pyrrolidone



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مراحل ساخت خمیر ترکیبی اکسید گرافن/ نانولوله‌های کربنی.

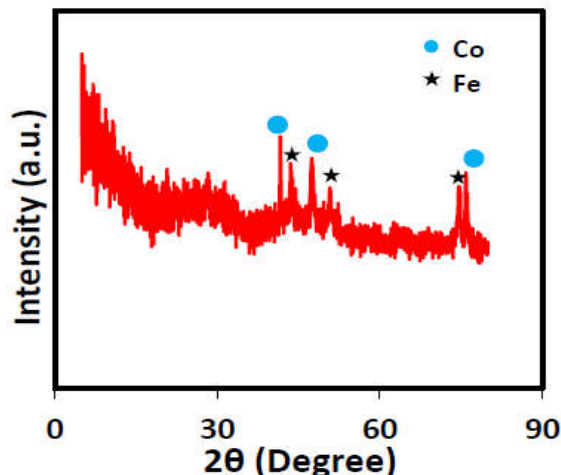
سانتی‌گراد قرار گرفتند. برای جلوگیری از وارد شدن شوک دمایی به نمونه‌ها، به مدت ۱۳ ساعت داخل کوره ماندند تا دمای کوره به آهستگی کاهش یابد و به دمای محیط برسد. در مرحله نهایی بستر کربنی به دست آمده به عنوان زیر لایه برای رشد الکتروشیمیایی نانورقه‌های کبالت استفاده شد.

مرحله لایه نشانی کبالت به روش الکتروشیمیایی انجام شده، زیرا این روش نسبت به روش‌های دیگر بسیار ساده‌تر و ارزان‌تر می‌باشد و مانند برخی از روش‌های لایه نشانی نیاز به سیستم پرهزینه‌ای مانند خلأ ندارد. در این مرحله محلول آبی از نمک کبالت کلرید ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) و اسید بوریک (H_3BO_3) به غلظت ۰/۲۵ M به عنوان الکترولیت انتخاب شد. از پلاتین (Pt) به عنوان الکترود کمکی و از الکترود Ag/AgCl به عنوان الکترود مرجع استفاده شد. لایه نشانی به صورت جریان ثابت معادل $7\text{mA}/\text{cm}^2$ و برای مدت ۲۰۰۰ ثانیه انجام شد. نهایتاً برای تکمیل اکسیداسیون سطح کبالت و تغییر آن از فاز فلزی به اکسید/ هیدروکسید و در نتیجه فعال شدن سطح الکتروکاتالیست، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محلول ۱ M از KOH غوطه ور شدند. بر اساس نتایج حاصل از توزین نمونه‌ها، وزن لایه کبالت رشد یافته و مقدار ماده نانوساختار

می‌گیرد، بنابراین مقداری کربن سیاه^۱ برای جبران اثر PVDF به محلول نهایی اضافه شده است. درصد وزنی اکسید گرافن با مقادیر ۱۰۰، ۷۵، ۶۰، ۵۰، ۴۰، ۲۵ و صفر درصد انتخاب شد. در خمیر ترکیبی پایانی درصد ماده فعال (اکسید گرافن + نانولوله‌های کربنی) حدود ۸۵٪، PVDF به میزان ۵٪ و کربن سیاه به میزان ۱۰٪ است. شکل ۱ طرحی کلی از ساخت خمیر ترکیبی مذکور را نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج به دست آمده قبل [۱۴]، زیر لایه توری استیل با ویژگی‌های مثبتی نظیر انعطاف پذیری، وزن اندک، سطح بالا و قیمت پایین برای ساخت الکترود کاتالیستی نسبت به برگه تیتانیوم، مس و فوم نیکل برتری دارد و به همین دلیل در این پژوهش نیز از توری استیل تجاری در ابعاد $1 \times 1 \text{ cm}^2$ به عنوان زیر لایه استفاده شد. برای ریختن خمیر نهایی بر روی توری استیل، از یک گرمکن با دمای صفحه حدود ۷۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. بدین منظور با استفاده از لایه نشانی قطره‌ای (drop casting) در چند مرحله سطح توری استیل با خمیر کربنی پوشانده شد. پس از ریختن ترکیب مورد نظر بر روی توری استیل، نمونه‌ها به منظور ایجاد چسبندگی لازم به مدت ۱ ساعت در داخل کوره با دمای ۸۰ درجه

۱. Carbon Black



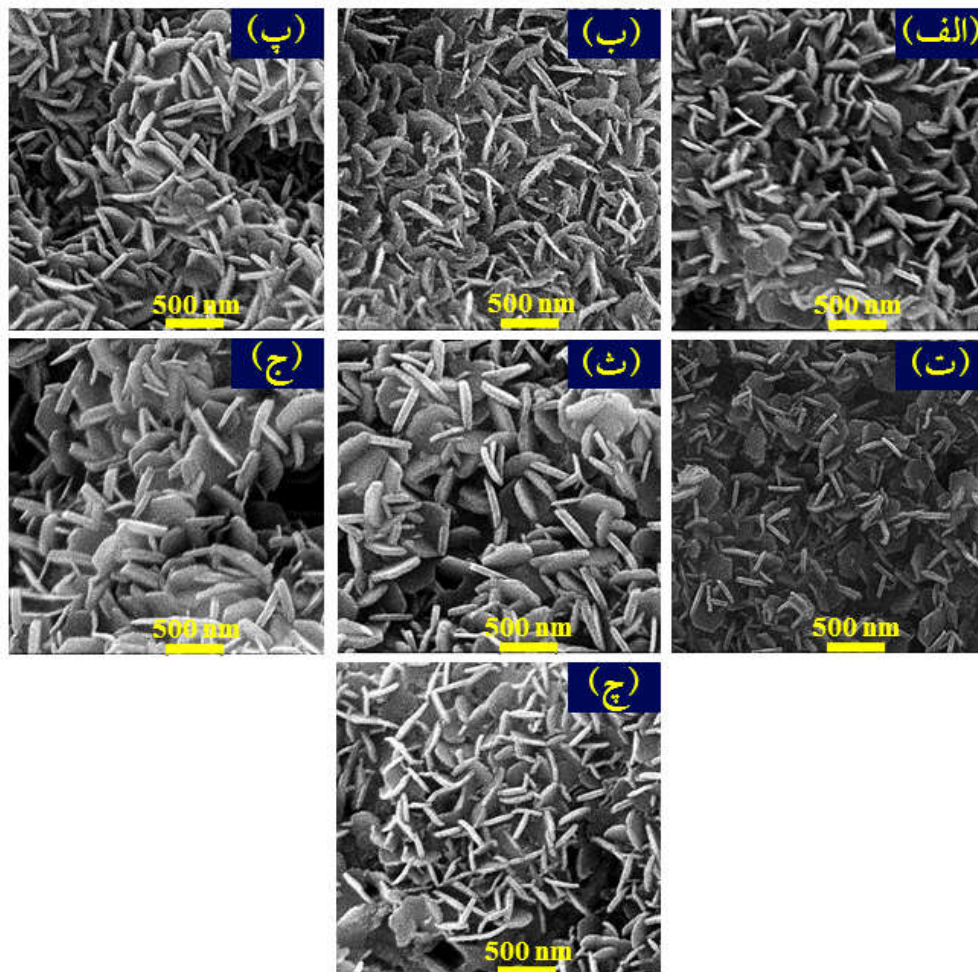
شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طرح پراش پرتو ایکس برای نمونه با غلظت ۵۰٪ از اکسید گرافن.

کربنی (مجموع نانولوله و صفحات گرافنی) در تمام نمونه‌ها یکسان و به ترتیب معادل 318 ± 2 و ۱٫۵ میلی گرم بوده است. اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی به منظور سنجش عملکرد الکتروکاتالیستی کبالت در یک سیستم سه الکترودی مشابه با مرحله قبل و در الکترولیت یک مولار پتاس صورت گرفت و از دو تکنیک جریان سنجی در روبش خطی پتانسیل (LSV) و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) در بازه ۱ میلی‌هرتز تا ۱ مگا هرتز و در پتانسیل ثابت ۰٫۵ ولت استفاده شد.

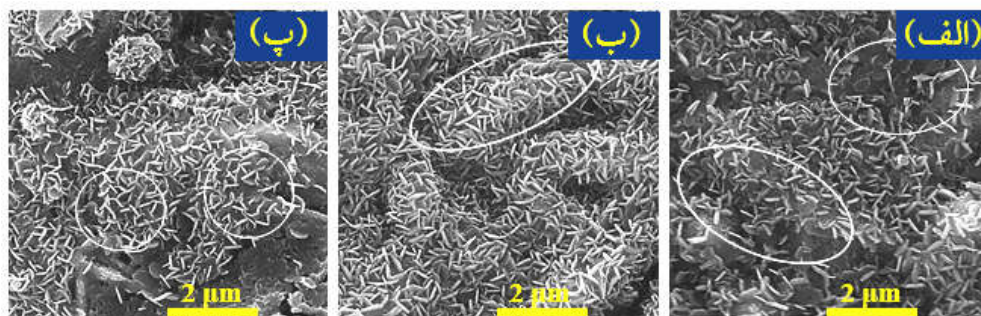
همچنین از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) با مشخصات زاویه‌سنجی $PW3050/60$ با گام‌های 0.01° درجه و آند مس برای بررسی ساختار بلوری و میکروسکوپ الکترونی روبش (SEM, TESCAN) برای مطالعه مورفولوژی لایه‌ها استفاده شد. اثر تغییر نسبت اکسید گرافن به نانولوله‌های کربنی به عنوان زیر لایه بروی مورفولوژی نانورقه‌های رشد یافته کبالت در تصاویر SEM این نمونه‌ها و در شکل ۳، قابل مشاهده است. در تصاویر فوق، چگالی نانورقه‌ها در غلظت‌های مختلف از اکسید گرافن در زیر لایه کربنی، تقریباً برابر است، زیرا تمامی نمونه‌ها در شرایط کاملاً یکسان لایه نشانی شده‌اند. اما نکته جالب در تصاویر SEM آن است که غلظت‌های میانی اکسید گرافن منجر به شکل‌گیری الکتروکاتالیست‌های نهایی با سطوح بیشتری شده است. برای مشاهده بهتر این موضوع تصاویر SEM برای سه نمونه انتخابی در بزرگ‌نمایی کمتر در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.

با توجه به شکل ۴، کاملاً مشهود است که سطح کاتالیستی در دسترس برای نمونه ۵۰٪ موجب افزایش سایت‌های فعال

۳. نتایج و بحث
پس از فراهم کردن بستر کربنی و لایه نشانی کبالت بر روی آن، آنالیز XRD انجام شد تا ساختار بلوری نمونه ساخته شده مشخص شود. شکل ۲ طیف پراش پرتو ایکس در بازه ۵ تا ۸۰ درجه برای نمونه با غلظت ۵۰٪ از اکسید گرافن را نشان می‌دهد. فاز بلوری کبالت در این نمونه hcp (هگزگونال) است [۱۵]. این مشاهده نشان می‌دهد که تنها سطح نانورقه‌های

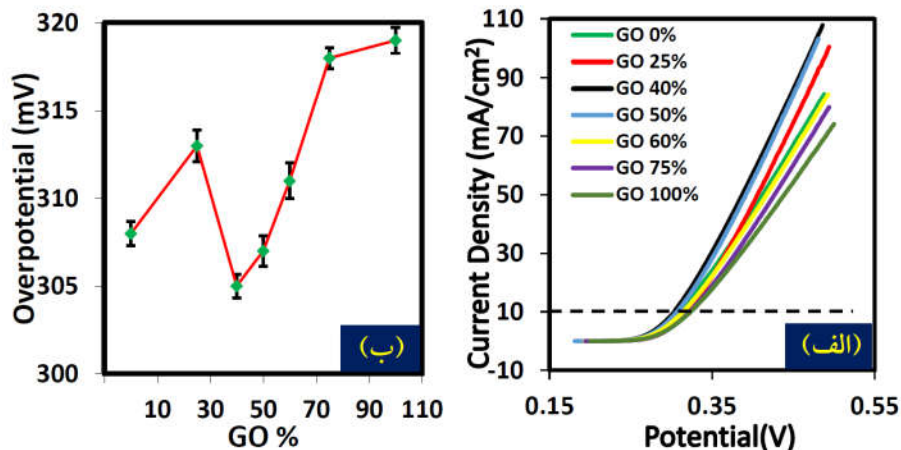


شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تصاویر SEM نمونه‌های لایه نشانی شده با کبالت بر روی بستر نانوساختار کربنی در درصدهای (الف) ۰٪، (ب) ۲۵٪، (پ) ۴۰٪، (ت) ۵۰٪، (ث) ۶۰٪، (ج) ۷۵٪ و (ج) ۱۰۰٪ از اکسید گرافن.



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تصاویر SEM نمونه‌های لایه نشانی شده بر روی بستر کربنی در درصدهای (الف) ۰٪، (ب) ۵۰٪، (پ) ۱۰۰٪ از اکسید گرافن.

کبالت شده است. تغییرات مورفولوژی نمونه‌ها را می‌توان به این صورت توضیح داد که در لایه‌هایی که حاوی نانولوله یا اکسید گرافن به صورت خالص (۰٪ و ۱۰۰٪) و یا درصد عمده وزنی (۲۵٪ و ۷۵٪) بوده‌اند، سطح لایه در هنگام لایه نشانی

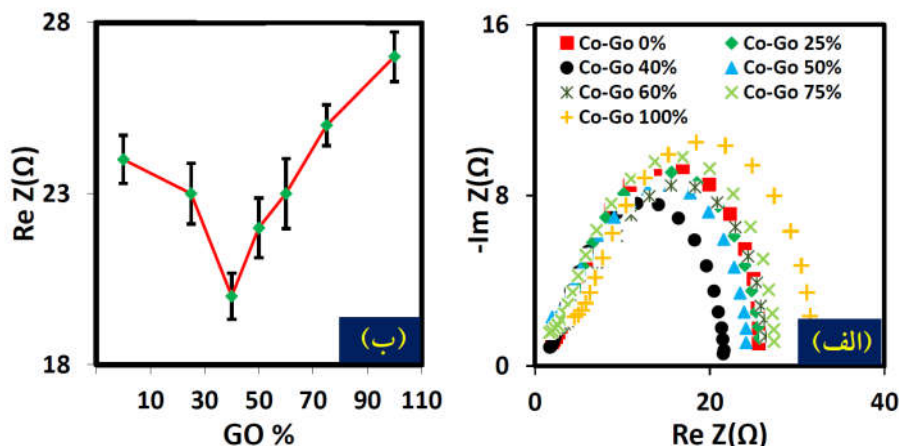


شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار (الف) LSV و (ب) پتانسیل اضافی بر حسب تغییرات درصد اکسید گرافن برای بسترهای کربنی لایه نشانی شده با کبالت.

همان طور که در شکل ۵ دیده می‌شود پتانسیل اضافی نمونه ۴۰٪ برابر با ۳۰۵ mV و کمتر از بقیه نمونه‌ها است و پتانسیل اضافی نمونه ۱۰۰٪ برابر با ۳۱۹ mV است و بیشترین مقدار را دارد. از نتایج شکل ۵ به نظر می‌رسد که نمونه حاوی ۲۵٪ اکسید گرافن روند تغییر در پتانسیل اضافی را کمی به هم می‌زند و افزایش غیر منتظره‌ای نشان می‌دهد. حال آن‌که در نمونه ۴۰٪ مجدداً پتانسیل اضافی به اندازه ۸ mV کاهش می‌یابد. با توجه به تکرار پذیری این نتیجه پس از ۴ دفعه لایه نشانی مجزا، منشاء این اثر ممکن است احیای موضعی اکسید گرافن توسط نانولوله‌های کربنی باشد [۱۶] که در برخی نمونه‌ها به طور مؤثرتری رخ می‌دهد. در شکل ۵ مشهود است که با افزایش درصد اکسید گرافن از ۴۰٪ به بالا، پتانسیل اضافی افزایش می‌یابد که این موضوع را می‌توان با کاهش رسانایی لایه کربنی توجیه کرد. رسانایی نانولوله‌های کربنی بیشتر از رسانایی اکسید گرافن است و افزایش درصد اکسید گرافن به معنای کاهش رسانایی است. البته افزایش اکسید گرافن باعث افزایش سطح نیز خواهد شد، اما بررسی نمودار نشان می‌دهد که کاهش رسانایی نسبت به افزایش سطح نقش بیشتری را داشته و باعث کاهش پتانسیل اضافی می‌شود. همچنین پتانسیل اضافی دو نمونه ۱۰۰٪ و ۷۵٪ که به ترتیب برابر با ۳۱۹ mV و ۳۱۸ mV هستند بسیار به یکدیگر نزدیک است، این موضوع نشان می‌دهد

الکتروشیمیایی کبالت تقریباً از لحاظ رسانندگی همسانگرد بوده است. همان گونه که گفته شد، لایه نشانی با تکنیک جریان ثابت انجام شده است. یعنی در نقاطی که رسانندگی بیشتر باشد، تجمع بار بیشتر و رشد نانورقه‌های کبالت مؤثرتر خواهد بود. در نمونه‌های نامبرده، این اتفاق تقریباً یکسان است اما در نمونه‌هایی که غلظت‌های میانی از اکسید گرافن را دارند، رسانندگی برخی نقاط بیشتر از نقاط دیگر است. در طول لایه نشانی کبالت، رشد کبالت از نقاط رساناتر انجام می‌شود که در شکل ۴ ب به صورت نقاط برآمده نشان داده شده‌اند (دایره‌های سفید رنگ). پس از آن در زمان‌های بعدی نانورقه‌های کبالت روی این شانه‌ها رشد کرده و سطح مؤثر بیشتری را پوشش می‌دهند. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که غلظت‌های میانی از اکسید گرافن در خمیر کربنی اولیه منجر به شکل‌گیری زبری‌های چند مرتبه‌ای و سطح کاتالیستی بیشتر در لایه‌های حاوی کبالت شده است. انتظار می‌رود که این افزایش سطح تأثیر خود را در کاهش پتانسیل اضافی نشان دهد، البته باید توجه داشت که کاهش پتانسیل اضافی به افزایش رسانندگی نمونه‌ها نیز بستگی دارد.

شکل ۵، نمودارهای LSV و پتانسیل اضافی به دست آمده برای هر نمونه (پتانسیل متناظر با جریان آندی ۱۰ mA/cm²) را نشان می‌دهد.



شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار (الف) امپدانس و (ب) مقادیر مقاومت الکتریکی نمونه‌ها بر حسب تغییرات درصد اکسید گرافن برای بسترهای کربنی قبل از لایه نشانی کبالت.

موضوع باعث می‌شود درصدهای اضافی از این ماده نقش زیادی در رسانایی نداشته باشند، زیرا رسانایی و ترابرد حامل‌های بار به منظور واکنش اکسیداسیون، بر روی سطح صورت می‌گیرد. از سوی دیگر در نمونه با غلظت ۷۵٪ اکسید گرافن، به دلیل افزایش درصد نانولوله‌های کربنی نسبت به نمونه با ۱۰۰٪ اکسید گرافن، نانولوله‌ها بر روی سطح نشسته و موجب افزایش رسانایی شده است. اما در مورد پتانسیل اضافی مشاهده می‌شود که با افزایش درصد اکسید گرافن از ۰٪ تا ۴۰٪، به دلیل افزایش سطح ناشی از افزایش درصد اکسید گرافن، پتانسیل اضافی حدود ۳ mV کاهش یافته است. با توجه به نتایج امپدانس الکتروشیمیایی، رسانایی این نمونه‌ها با یکدیگر چندان تفاوت ندارد (4Ω) و می‌توان کاهش پتانسیل اضافی را تنها مربوط به افزایش سطح مؤثر دانست.

۴. نتیجه‌گیری

بهترین نسبت اکسید گرافن به نانولوله‌های کربنی به عنوان بستر کربنی در رشد الکتروشیمیایی نانو ورقه‌های کبالت در واکنش اکسیداسیون آب، ۴۰٪ وزنی از اکسید گرافن یافت شد. مطابق نتایج به دست آمده، این درصد وزنی کمترین مقدار پتانسیل اضافی (۳۰۵ mV) و کمترین مقاومت عبوری بار بر سطح (20Ω) را دارد که این مطلب به بازده بیشتر الکتروکاتالیست

که افزایش سطح ناشی از افزایش اکسید گرافن تأثیر چندانی در کاهش پتانسیل اضافی نداشته است، زیرا مقادیر بیشتر از اکسید گرافن بر روی یکدیگر انباشته شده و حضور بیش از حد نانوصفحات در ساختار کربنی مفید نیست. در نتیجه با افزایش درصد اکسید گرافن به بیش از ۴۰٪، کاهش رسانایی نقش پررنگ تری را در افزایش پتانسیل اضافی دارد.

برای بررسی بهتر اثر مقدار اکسید گرافن بر مقاومت انتقال بار بر سطح نمونه‌ها، نتایج تکنیک EIS برای لایه‌های کربنی فاقد کبالت در شکل ۶ نشان داده شده است. این نمودار تأثیر رسانایی را به طور جداگانه نشان می‌دهد. قطر نیم دایره‌ها به نحوی بیانگر مقاومت الکتریکی نمونه‌ها است و هرچه قطر نیم دایره نمونه‌ای کمتر باشد، آن نمونه رسانایی بیشتری در سطح دارد.

مشاهده می‌شود که بیشترین مقاومت برابر با 27Ω و مربوط به اکسید گرافن خالص (۱۰۰٪) است و کمترین مقاومت برابر با 20Ω و مربوط به نمونه ۴۰٪ از اکسید گرافن با کمترین پتانسیل اضافی است. اختلاف مقاومت الکتریکی نمونه‌های ۰٪ و ۲۵٪ (1Ω) کمتر از اختلاف مقاومت الکتریکی نمونه‌های ۷۵٪ و ۱۰۰٪ (2Ω) است. دلیل این مشاهده آن است که در غلظت بالای نانولوله‌های کربنی در نمونه ۰٪، نانولوله‌های کربنی بر روی یکدیگر انباشته شده‌اند که این

قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند تا از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف (گرت شماره ۹۵۰۲۱۲) و همچنین پژوهشگاه نیرو در راستای انجام این پژوهش قدردانی و تشکر کنند.

منجر خواهد شد. همچنین آرایش اکسید گرافن و نانولوله‌های کربنی در غلظت‌های وزنی تقریباً یکسان منجر به شکل‌گیری زبری‌های چند مرتبه‌ای با سطح مؤثر بیشتر در الکتروکاتالیست‌های کبالت شده و این امر عملکرد الکتروکاتالیست کبالت را تقویت می‌کند.

مراجع

1. W T Eckenhoff, W R McNamara, P Du, R Eisenberg, *Biochimica et Biophysica Acta* **1827** (2013) 958.
2. Y Liang, Y Li, H Wang, J Zhou, J Wang, T Regier and H Dai, *J. Am. Chem. Soc* **134** (2012) 15849.
3. Y C Liu, J A Koza, J A Switzer, *Electrochimica Acta* **140** (2014) 359.
4. R D L Smith, B Sporinova, R D Fagan, S Trudel, C P Berlinguette, *Chem. Mater* **26** (2014) 1654.
5. T W Kim, K S Choi, *Science* **343** (2014) 990.
6. Y Zhang, J Rosen, G S Hutchings, F Jiao, *Catal. Today* **225** (2014) 171.
7. X. Lu and C. Zhao, *J. Mater. Chem. A* **1** (2013) 12053.
8. L Lv, T Ye, L Gong, K Wang, J Su, X Li and J Chen, *Chem. Mater* **27** (2015) 544.
9. M Yun, J Choe, J You, M S Ahmed, K Lee, Z Ustundag and S Jeon, *Food Chem* **169** (2015) 114.
10. Y Liang, H Wang, P Diao, W Chang, G Hong, Y Li, M Gong, L Xie, J Zhou, J Wang, T Z Regier, F Wei and H Dai, *J. Am. Chem. Soc* **134** (2012) 15849.
11. Y Liu, D C Higgins, J Wu, M Fowler, Z Chen, *Electrochem. Commun* **34** (2013) 125.
12. A Aijaz, J Masa, C Rçsler, W Xia, P Weide, A J R Botz, R A Fischer, W Schuhmann and M Muhler, *Angew. Chem. Int. Ed* **55** (2016) 4087.
13. Y Li, Y Wu, *J. Am. Chem. Soc* **131** (2009) 5851.
14. N Naseri, A Esfandiari, M Qorbani, A Z Moshfegh, *ACS Sus Chem Eng*, **4** (2016) 2151.
15. D Pelecky, M Bonder, T Martin, E M Kirkpatrick and X Q Zhang, *IEEE Trans. Magn* **34** (1998) 4.
16. J Yang, S Gunasekaran, *CARBON* **51** (2013) 36.