وهش فيرد

مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۷، شمارهٔ ۵، زمستان ۱۳۹۶

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

محمد پوررضا^ر، نعیمه ناصری^ر 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 نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۶/۰۳/۳۱)

چکیدہ

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 Co, Cu, Fe, Mn, Zn و Ni 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 ابازده الکتروکاتالیست دارد، بنابراین استفاده از پوشش های نانوساختار کربنی به صورت توکیبی از اکسید گرافن و نانولوله های کربنی، به منظور کاهش پتانسیل اضافی و افزایش بازده الکتروکاتالیست استفاده شد. طبی توکیبی از اکسید گرافن و نانولوله های کربنی، به منظور از نانولوله کربنی در خمیر کربنی تهیه شده منجر به رشد بهتر نانوورقههای اکسید کبالت خواهد شد. در لایه نور ناز بلوری اوری و در دیگر مشاهده شده و پتانسیل اضافی و افزایش بازده الکتروکاتالیست استفاده شد. طبی تامد، ۴۰ در دی و نانولوله ای کربنی، به منظور از نانولوله کربنی در خمیر کربنی تهیه شده منجر به رشد بهتر نانوورقههای اکسید کبالت خواهد شد. در لایهٔ مورد نظر، کبالت در فاز بلوری فلزی مشاهده شده و پتانسیل اضافی و مقاومت الکتروکی به تر تیب ۳۲۰ و ۲۰ ۲۰ الدازه گیری شده است.

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

۱. مقدمه

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 فراوردهٔ 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

فسیلی است. بر این اساس، استفاده از روش های نوین تولید آن اجتنابناپذیر است. یکی از این راهکارها، به کارگیری الکتروکاتالیست هایی به منظور شکست آب و تولید هیدروژن با کمک نور خورشید است [۱–۳].

الکتروکاتالیست مناسب برای فرایند تجزیهٔ آب باید ارزان قیمت با فراوانی زیاد باشد تا از لحاظ تجاری نیز بـه صـرفه باشد. در عین حال فعالیت کاتالیستی بالا، استحکام مکانیکی

بالا و پتانسیل اضافی کم از دیگر مشخصه های یک الكتروكاتاليست مناسب است. از اين رو اكسيد فلزات مختلفی به دلیل استحکام و فعالیت کاتالیستی مناسب برای این منظور مورد بررسی قرار گرفتند. اکسید دو فلز Ir و Ru بیشترین فعالیت کاتالیستی و کمتـرین پتانسـیل اضـافی 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 می شوند، مورد آزمایش قرار مي گيرند [۴و ۵]. اکسيد کبالت علاوه بر يتانسيل اضافي کم دارای دو نےوع سےایت اسےت کے یکے از آنھےا واکےنش اکسیداسیون را با سرعت بالا و دیگری با سرعت پایین انجام میدهد. افزایش مساحت مؤثر و رسانندگی نیز باعث بالا رفتن بازده الكتروكاتاليست مي شود كه بـراي ايـن منظـور از اکسید گرافن و نانولولههای کربنی به عنوان بستر رشد ایـن الكتروكاتاليست،ها استفاده مريشود. اكسيد گرافن و نانولولههای کربنی با توجه به پتانسیل اضافی کم می توانند منجر به بالا رفتن بازده در این سیستمها شوند.

صفحهٔ 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 الكتروكاتاليست اكسيد كبالت به كار برده بود، منتشر شـد [٢]. در این پژوهش گرافن عاملی با استحکام مکانیکی بـالا و ارزان قیمت برای رشد بهتر نانوورقههای کبالت معرفی شد که با افزودن أن يتانسيل اضافي الكتروكاتاليست كاهش يافت. عـلاوه بر ایـن، گـروههـاي ديگـر نيـز بـا اضـافه كـردن گـرافن بـه الكتروكاتاليست كبالت و بعضاً افزودن نيتروژن موجب افـزايش فعالیت کاتالیستی و در نتیجه کاهش پتانسیل اضافی شدهاند [۶ – ۹]. در سال (۲۰۱۲) اولین گزارش که تأثیر زیر لایـهای از جنس نانولوله های کربنی را بر فعالیت اکسید کبالت نشان میداد، منتشر شد که در نتیجهٔ آن نانولولههای کربنی با فراهم کردن مکان هایی برای فعالیت بیشتر کبالت منجر به پتانسیل اضافی کمتر، فعالیت کاتالیستی و مقاومت مکانیکی بیشتر می شود [۱۰]. در سال (۲۰۱۳)، یولونگ لیو و همکارانش نشان

دادند که استفاده از نانولولههای کربنی به عنوان زیر لایه، بهتر از ترکیب نانولولهها با کاتالیست مورد نظر است [11]. به عـلاوه، 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 نانولوله های کربنی حائز اهمیت بوده و پتانسیل اضافی را تحت تأثیر قرار می دهد. اما تا به حال گزارشی مبنی بر تأثیر زیر لایهٔ مرکب اکسید گرافن و نانولوله های کربنی برفعالیت نانوورقه های کبالت و نسبت بهینهٔ اکسید گرافن و نانولوله های کربنی گزارش نشده است در حالی که انتظار می رود استفاده هم زمان 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 بهینهٔ اکسید گرافن به نانولوله های کربنی برای به دست آمده است. برای این منظور تأثیر خمیر ترکیبی متشکل از نانو صفحات اکسید گرافن و نانولوله های کربنی به عنوان زیر لایه در عملکر الکتروکاتالیستی نانوورقه های کبالت به منظور اکسایش آب

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 مس ۳۰ –۲۰، طول حدود س۳ ۳۰ 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 استفاده شده است. PVDF مادهای جامد است که برای انحلال آن حلال PMA^۲ به کار گرفته شده است. به دلیل استفاده از PMM و PVDF میزان رسانایی دو مادهٔ اصلی یعنی اکسید گرافن و نانولولههای کربنی تحت تاثیر قرار

Downloaded from ijpr.iut.ac.ir at 10:05 IRST on Saturday February 24th 2018

^{1.} Poly Vinylidene Di Fluoride

Y. N-Methyl Pyrrolidone



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

می گیرد، بنابراین مقداری کربن سیاه^۱ برای جبران اثر PVDF به محلول نهایی اضافه شده است. درصد وزنی اکسید گرافن با مقادیر ۱۰۰، ۷۵، ۵۰، ۵۰، ۴۰، ۲۵ و صفر درصد انتخاب شد. در خمیر ترکیبی پایانی درصد مادهٔ 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 آمدهٔ قبل [۱۴]، زیر لایهٔ توری استیل با ویژگی های مثبتی نظیر انعطاف پذیری، وزن اندک، سطح بالا و قیمت پایین برای ساخت الکترود کاتالیستی نسبت به برگهٔ تیتانیوم، مس و فوم نیکل برتری دارد و به همین دلیل در این پژوهش نیز از توری استیل تجاری در ابعاد ۲m۲×۱ به عنوان زیر لایه استفاده شد. برای ریختن خمیر نهایی بر روی توری استیل، از یک گرمکن با دمای صفحهٔ حدود ۷۰ درجهٔ سانتی گراد 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 درجهٔ ا. Carbon Black

سانتی گراد 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 مرحلهٔ نهایی بستر کربنی به دست آمده به عنوان زیر لایه برای رشد الکثروشیمیایی نانوورقههای کبالت استفاده شد.

مرحلهٔ لایه نشانی کبالت به روش الکتروشیمیایی انجام شده، زیرا این روش نسبت به روش های دیگر بسیار ساده تر و ارزان تر میباشد و مانند برخی از روش های لایه نشانی نیاز به سیستم پرهزینه ای مانند خلأ ندارد. در این مرحله محلول آبی از نمک کبالت کلرید (CoCl₇.۶H₂O) و اسید بوریک (H₇BO₇) به غلظت ۲۵ ۲۵ به عنوان الکترولیت انتخاب شد. از پلاتین (Pt) به عنوان الکترود کمکی و از الکترود مورت جریان ثابت معادل ^۲MA/۲۰ 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، نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در محلول نمونه ها، وزن لایهٔ کبالت رشد یافته و مقدار ماده نانوساختار

۷۵۵



شکل ۲. (رنگی در نسخهٔ 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 ۲± ۲۸ و ۱٫۵ میلی گرم بوده است. اندازه گیری های الکتروشیمیایی به منظور سنجش عملکرد الکتروکاتالیستی کبالت در یک سیستم سه الکترودی مشابه با مرحلهٔ 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 میلی هرتز تا ۱ مگا هرتز و در پتانسیل ثابت ۵٫۵ ولت استفاده شد. همچنین از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) با مشخصات زاویه سنجی ۵۰٫۶۰ درجه و آند مس برای بررسی ساختار بلوری و میکروسکوپ الکترونی روبش

۳. نتايج و بحث

پس از فراهم کردن بستر کربنی و لایه نشانی کبالت بر روی آن، آنالیز XRD انجام شد تا ساختار بلوری نمونهٔ ساخته شده مشخص شود. شکل ۲ طیف پراش پرتو ایکس در بازهٔ ۵ تا ۸۰ درجه برای نمونه با غلظت ۵۰٪ از اکسید گرافن را نشان میدهد.

فاز بلوری کبالت در ایـن نمونـه hcp (هگزاگونـال) اسـت [۱۵]. این مشاهده نشان میدهد که تنهـا سـطح نانوورقـههـای

کبالت اکسید شده است و مقدار لایهٔ اکسید آن قدر کم است که پیک بلوری آن دیده نشده است. بنابراین مغز نانوورقهها در حالت فلزی است. به علاوه آهن مشاهده شده مربوط به زیر لایهٔ استیل و در نتیجه عمق نفوذ پرتو ایکس است. با توجه به محدودیت حساسیت دستگاه، طیف گیری، مقدار اندک نانوساختارهای کربنی در هر لایه و اندازهٔ کوچک نانوساختارهای دو بعدی (گرافن) و یک بعدی (نانولوله) کربنی قله مربوط به این ساختارها در طیف مشاهده نشده است.

اثر تغییر نسبت اکسید گرافن به نانولولههای کربنی به عنوان زیر لایه بروی مورفولوژی نانوورقههای رشد یافتهٔ کبالت در تصاویر MES این نمونهها و در شکل ۳، قابل مشاهده است. در تصاویر فوق، چگالی نانوورقهها در غلظت های مختلف از اکسید گرافن در زیر لایهٔ کربنی، تقریباً برابر است، زیرا تمامی نمونهها در شرایط کاملاً یکسان لایه نشانی شدهاند. اما نکتهٔ جالب در تصاویر SEM آن است که غلظتهای میانی اکسید گرافن منجر به شکل گیری الکتروکاتالیستهای نهایی با سطوح بیشتری شده است. برای مشاهدهٔ بهتر این موضوع تصاویر SEM برای سه نمونهٔ انتخابی در بزرگنمایی کمتر در شکل ۴ نشان داده شدهاند.

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



۰٪، (ب) ۲۵٪، (پ) ۴۰٪، (ت) ۵۰٪، (ث) ۶۰٪، (ج) ۷۵٪ و (چ) ۱۰۰٪ از اکسید گرافن



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

کبالت شده است. تغییرات مورفولوژی نمونهها را می توان بـه این صورت توضیح داد که در لایههایی که حـاوی نانولولـه یـا

اکسید گرافن به صورت خالص (۰٪ و ۱۰۰٪) و یا درصد عمدهٔ وزنی (۲۵٪ و ۷۵٪) بودهاند، سطح لایه در هنگام لایه نشانی



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

الكتروشيميايي كبالت تقريبا از لحاظ رسانندگي 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 نانوورقههای کبالت مؤثرتر خواهد بود. در نمونههای نامبرده، این اتفاق تقریباً یکسان است اما در نمونههایی که غلظـتهـای میـانی از اکسـید گـرافن را دارنـد. رسانندگی برخی نقاط بیشتر از نقاط دیگر است. در طول لایـه نشانی کبالت، رشد کبالت از نقاط رساناتر انجام می شود که در شکل ۴. ب بـه صـورت نقـاط برآمـده نشـان داده شـدهانـد (دایر مهای سفید رنگ). یس از آن در زمان های بعدی نانوورقههای کبالت روی این شانهها رشد کرده و سطح مؤثر بیشتری را پوشش میدهند. بدین ترتیب می توان نتیجـه گرفـت که غلظتهای میانی از اکسید گرافن در خمیر کربنی اولیه منجر به شکل گیری زبریهای چند مرتبهای و سطح کاتالیستی بیشـتر در لایههای حاوی کبالت شده است. انتظار میرود که این افزایش سطح تأثیر خود را در کاهش پتانسیل اضافی نشان دهد، البته بايد توجه داشت كه كاهش پتانسيل اضافي به افزايش رسانندگی نمونهها نیز بستگی دارد.

شکل ۵، نمودارهای LSV و پتانسیل اضافی به دست آمده برای هر نمونه (پتانسیل متناظر با جریان آندی ۲ ۱۰ mA/cm) را نشان میدهد.

همان طور که در شکل ۵ دیـده مـیشـود پتانسـیل اضـافی نمونهٔ ۴۰٪ برابر با ۳۰۵ mV و کمتر از بقیهٔ نمونه ها است و پتانسیل اضافی نمونهٔ ۱۰۰٪ برابر با ۳۱۹ mV است و بیشترین مقدار را دارد. از نتایج شکل ۵ به نظر میرسد که نمونهٔ حاوی ۲۵٪ اکسید گرافن روند تغییر در پتانسیل اضافی را کمی به هـم میزند و افزایش غیر منتظرهای نشان میدهـد. حـال آنکـه در نمونهٔ ۴۰٪ مجدداً پتانسیل اضافی به اندازهٔ mV کاهش مییابد. با توجه به تکرار پذیری این نتیجه پس از ۴ دفعه لایـه نشاني مجزا، منشاء اين اثر ممكن است احياي موضعي اكسيد 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 می یابد که این موضوع را می توان با کاهش رسانایی لایه کربنی توجیه کرد. رسانایی نانولولههای کربنی بیشتر از رسانایی اکسید گرافن است و افزایش درصد اکسید گرافن به معنای كاهش رسانايي است. البته افزايش اكسيد گرافن باعث افزايش سطح نیز خواهد شد، اما بررسی نمودار نشان میدهد که کاهش رسانایی نسبت به افزایش سطح نقش بیشتری را داشته و باعث كاهش پتانسيل اضافي مي شود. همچنين پتانسيل اضافي دو نمونهٔ ۱۰۰٪ و ۷۵٪ که به ترتیب برابر با ۳۱۹ mV و ۳۱۸ mV هستند بسیار به یکدیگر نزدیک است، این موضوع نشان می دهد



شکل ۶. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) نمودار (الف) امپدانس و (ب) مقادیر مقاومت الکتریکی نمونهها بر حسب تغییرات درصـد اکسـید گـرافن برای بسترهای کربنی قبل از لایه نشانی کبالت.

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

برای بررسی بهتر اثر مقدار اکسید گرافن بر مقاومت انتقال بار بر سطح نمونه ها، نتایج تکنیک EIS برای لایه های کربنی فاقد کبالت در شکل ۶ نشان داده شده است. این نمودار تأثیر رسانایی را به طور جداگانه نشان می دهد. قطر نیم دایره ها یه نحوی بیانگر مقاومت الکتریکی نمونه ها است و هرچه قطر نیم دایرهٔ نمونه ای کمتر باشد، آن نمونه رسانایی بیشتری در سطح دارد.

مشاهده می شود که بیشترین مقاومت برابر با Ω ۲۷ و مربوط به اکسید گرافن خالص (۱۰۰٪) است و کمترین مقاومت برابر با Ω ۲۰ و مربوط به نمونهٔ ۴۰٪ از اکسید گرافن با کمترین پتانسیل اضافی است. اختلاف مقاومت الکتریکی نمونههای ۰٪ و ۲۵٪ (Ω ۱) کمتر از اختلاف مقاومت الکتریکی نمونههای ۵۷٪ و ۱۰۰٪ (Ω ۲) است. دلیل این مشاهده آن است که در غلظت بالای نانولولههای کربنی در نمونهٔ ۰٪، نانولولههای کربنی بر روی یکدیگر انباشته شدهاند که این

موضوع باعث می شود درصدهای اضافی از این ماده نقش زیادی در رسانایی نداشته باشند، زیرا رسانایی و ترابرد حامل های بار به منظور واکنش اکسیداسیون، بر روی سطح صورت می گیرد. از سوی دیگر در نمونه با غلظت ۷۵٪ اکسید گرافن، به دلیل افزایش درصد نانولوله ها بر روی سطح نشسته و نمونه با ۱۰۰۰٪ اکسید گرافن، نانولوله ها بر روی سطح نشسته و مشاهده می شود که با افزایش درصد اکسید گرافن از ۰٪ تا مشاهده می شود که با افزایش درصد اکسید گرافن از ۰٪ تا گرافن، پتانسیل افزایش سطح ناشی از افزایش درصد اکسید مثاهده می شود که با افزایش درصد اکسید گرافن از ۰٪ تا گرافن، پتانسیل افزایش سطح ناشی از افزایش درصد اکسید یکدیگر چندان تفاوت ندارد (Ω ۴) و می توان کاهش یافته است.

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 (۳۵ mV) و کمترین مقاومت عبوری بار بر سطح (Ω ۲۰) را دارد که این مطلب به بازده بیشتر الکتروکاتالیست

۰۹۷

قدردانی

نویسندگان مقاله برخود لازم میدانند تا از حمایت های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف (گرنت شماره ۹۵۰۲۱۲) و همچنین پژوهشگاه نیرو در راستای انجام این پژوهش قدردانی و تشکر کنند.

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 Esfandiar, 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.

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 الکتروکاتالیست های کبالت شده و این امر عملکرد الکتروکاتالیست کبالت را تقویت میکند.

مراجع

- W T Eckenhoff, W R McNamara, P Du, R Eisenberg, Biochimica et Biophysica Acta 1827 (2013) 958.
- Y Liang, Y Li, H Wang, J Zhou, J Wang, T Regier and H Dai, *Nat. Mater* 10 (2011) 780.
- 3. Y C Liu, J A Koza, J A Switzer, *Electrochimica Acta* 140 (2014) 359.
- 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.
- 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.
- 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