

رسوب‌دهی الکتروشیمیایی سلنید نیکل بر زیرلایه‌ی فوم نیکل اصلاح شده با rGO جهت انجام واکنش‌های تصاعد اکسیژن و هیدروژن

مهدی بهرامی^۱، تقی شهربابی فراهانی^{۱*}، یداله یعقوبی‌نژاد^۲

^۱ بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

* نویسنده مسئول: tshahrabi34@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۱

چکیده

تقاضای روزافزون به منابع انرژی بیشتر، و مشکلات زیست محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، ایجاد منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر را مورد توجه قرار داده است. هیدروژن، یکی از منابع انرژی امیدوارکننده برای سوخت‌های آینده است. هیدروژن را می‌توان با خلوص بالا و بدون ایجاد آلاینده‌گی، از شکافت الکتروشیمیایی آب تولید نمود، اما این روش، نیازمند الکتروکاتالیست‌هایی مقرون به صرفه، فعال، پایدار و با مقاومت به خوردگی مطلوب است. از این رو سلنید فلزات انتقالی به ویژه نیکل، مورد توجه تحقیقات قرار گرفت. اما اشکال اساسی سلنیدهای فلزات انتقالی، هدایت الکتریکی پایین آن‌ها است. از این رو، در این پژوهش برای اصلاح هدایت الکتریکی در کنار افزایش سطح فعال الکتروشیمیایی از اکسید گرافن احیاشده استفاده شد. در نتیجه، اکسید گرافن احیا شده با روش رسوب‌دهی الکتروشیمیایی بر سطح فوم نیکل پوشش داده شد. در ادامه با رسوب‌دهی الکتروشیمیایی پالس کاتدی، پوشش سلنید نیکل بر سطح rGO/NF پوشش داده شد. در نتیجه هدایت الکتریکی بالا در کنار سطح در دسترس بالا، سبب دستیابی به مقادیر کم پتانسیل اضافی شد. این مقادیر برای HER و OER به ترتیب برابر با ۶۸ mV در چگالی جریان ۱۰ mA.cm⁻² و ۲۸۱ mV در چگالی جریان ۲۰۰ mA.cm⁻² بود. علاوه بر این، نتایج ۲۴ ساعت آزمون کرونیو پتانسیومتری، در ناحیه‌های آندی و کاتدی، نویدبخش پایداری بالا و مقاومت به خوردگی الکتروکاتالیز شده در محیط قلیایی ۱ M KOH می‌باشد.

کلیدواژه: واکنش تصاعد هیدروژن، واکنش تصاعد اکسیژن، اکسید گرافن احیاشده، سلنید نیکل، رسوب‌دهی الکتروشیمیایی.

Electrodeposition of Nickel Selenide on rGO-Modified Nickel Foam Substrate for Oxygen and Hydrogen Evolution Reactions

M. Bahrami¹, T. Shahrabi Farahani^{1*}, Y. Yaghoubinezhad²

¹ Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Department of Materials Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

* Corresponding Author: tshahrabi34@modares.ac.ir

Submission: 2023, 03, 21 Acceptance: 2023, 07, 22

Abstract

The increasing demand for energy resources and the environmental problems due to the consumption of fossil fuels has drawn attention to the creation of clean and renewable energy resources. Hydrogen is one of the promising energy resources for future fuels. Hydrogen can be produced with high purity and without emitting pollution via electrochemical water splitting. Notably, this method requires low-cost, active, and stable electrocatalysts with good corrosion resistance. Therefore, the selenide of transition metals, especially Nickel, was considered in research. Besides, one of the most important disadvantages of transition metals selenides is their low electrical conductivity. Therefore, this research used reduced graphene oxide to improve the electrical conductivity and increase the electrochemical active surface area. Therefore, reduced graphene oxide was electrodeposited on the surface of nickel foam. Furthermore, nickel selenide was coated on the rGO/NF surface via electrodeposition. As a result, the high electrical conductivity and high available surface area led to the achievement of low overpotential at the current density of 10 mA.cm⁻². These values for HER and OER were 68 mV at current density of 10 mA.cm⁻² and 281 mV at current density of 200 mA.cm⁻², respectively. In addition, the results of the 24 hours chronopotentiometry test in both anodic and cathodic regions promise high stability and corrosion resistance of the synthesized electrode in the alkaline environment of 1 M KOH solution.

Keywords: Hydrogen Evolution Reaction, Oxygen Evolution Reaction, Reduced graphene oxide, Nickel selenide, Electrodeposition.

۱ - مقدمه

با توجه به افزایش تقاضای به منابع انرژی و مشکلاتی که سوخت‌های فسیلی ایجاد نموده‌اند، دستیابی به منابع انرژی پاک، تجدیدپذیر و در دسترس را به یک موضوع اساسی در پژوهش‌ها تبدیل کرده است [۱]. هیدروژن یکی از سوخت‌هایی است که به عنوان جایگزین معرفی می‌شود [۲]. از میان روش‌های مختلفی که برای تولید هیدروژن پیشنهاد شده است، شکافت الکتروشیمیایی آب طی فرآیند برقکافت یکی از روش‌های پاک و امیدوارکننده برای تولید هیدروژن است [۳]. این فرآیند شامل دو نیم واکنش تصاعد هیدروژن^۱ و واکنش تصاعد اکسیژن^۲ است [۴]. با توجه به پیشروی کند OER، این واکنش به عنوان یکی از واکنش‌های تاثیرگذار در فرآیند به حساب می‌آید، از این رو برای انجام فرآیند برقکافت، الکتروکاتالیست‌هایی دوگانه با کارایی بالا نیاز است [۵]. الکتروکاتالیست‌های بر پایه‌ی فلزات نجیب Pt و اکسید عنصری مثل Ru/Ir به ترتیب به عنوان الکتروکاتالیست جهت انجام HER و OER معرفی شده‌اند ولی مشکلاتی نظیر پایداری پایین و قیمت بالای این الکتروکاتالیست‌ها، کاربرد آن‌ها در صنعت را محدود کرده است. از این رو فلزات واسطه به عنوان موادی ارزان قیمت مورد توجه قرار گرفتند [۶]. نیکل یکی از فلزات واسطه‌ای است که تحقیقات بسیاری بر روی عملکرد الکتروکاتالیستی آن انجام شده است. از طرفی سلنید نیکل به عنوان یکی از کلکوژنیدهای امیدوارکننده برای ساخت الکتروکاتالیست‌های شکافت الکتروشیمیایی آب شناخته می‌شود. با این حال، یکی از مشکلات سلنید فلزات واسطه، هدایت الکتریکی پایین آن‌هاست که مانع از انتقال الکترون میان سطح الکتروکاتالیست و بستر می‌گردد [۷]. مواد پایه کربنی مانند اکسید گرافن احیا شده^۳ به جهت افزایش هدایت الکتریکی، در مصارف الکتروکاتالیستی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۸]. در این پژوهش از اثر هم‌افزایی پوشش سلنید نیکل و rGO برای دستیابی به الکتروکاتالیستی فعال و کارآمد استفاده شد. از میان

روش‌های مختلف برای پوشش دهی، رسوب‌دهی الکتروشیمیایی به جهت قابل کنترل بودن و نیاز به تجهیزات کم، روشی مناسب برای ساخت الکتروکاتالیست است [۹]. در این پژوهش رسوب‌دهی rGO به صورت پالس برگشتی جریان انجام شد که ضمن رسوب‌دهی در چگالی جریان آندی، احیا در چگالی جریان کاتدی صورت می‌گیرد [۱۰]. همچنین رسوب‌دهی پالس مستقیم جریان برای لایه نشانی سلنید نیکل بر فوم نیکل^۴ اصلاح شده با rGO انجام شد.

۲ - مواد و روش تحقیق

پودر اکسید گرافن احیا شده به روش هامر سنتز شد. از فوم نیکل با ضخامت ۱/۵ mm و با خلوص بالای ۹۹ درصد، به عنوان بستر لایه‌نشانی استفاده شد. سایر مواد مصرفی شامل K_2HPO_4 ، $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ و $NaOH$ ، KOH ، HCl ، $LiCl$ ، SeO_2 ، KH_2PO_4 از شرکت مرک تهیه شد. تمامی فرآیندهای الکتروشیمیایی شامل لایه‌نشانی و آزمون‌ها در سیستم سه الکترودی (ورق پلاتین به عنوان شمارنده، الکترود کالومل اشباع به عنوان مرجع و نمونه به عنوان الکترود کاری) به وسیله‌ی دستگاه Autolab 302 N انجام شد. تصویربرداری FESEM توسط دستگاه MIRA3 TESCAN-XMU انجام گردید. آزمون تفرق اشعه‌ی ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه PANalytical X'Pert Pro انجام شد. آزمون طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) با دستگاه Thermo Fisher Nicolet IR 100 انجام شد.

۲-۱ - رسوب‌دهی الکتروشیمیایی rGO بر فوم نیکل

فوم نیکل در ابعاد ۱×۱ cm، در استون به مدت ۱۰ دقیقه، در محلول ۲ M HCl به مدت ۲ دقیقه و در اتانول به مدت ۳ دقیقه، تحت امواج فراصوت، چربی‌زدایی و آماده‌سازی گردید و از شستشو با آب دیونیزه، تحت دمش هوای گرم، خشک شدند.

¹ Hydrogen Evolution Reaction² Oxygen Evolution Reaction³ Reduced Graphene Oxide⁴ Nickel Foam

واکنش‌های الکتروشیمیایی خواهد شد. همانطور که در شکل ۲ (ب) مشخص است، ساختار کروی $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ به خوبی سطح را پوشانده است که مورفولوژی مناسبی را ایجاد نموده است. اثر هم‌افزایی این ریزساختار در کنار تخلخل بالای فوم نیکل باعث بهبود عملکرد الکتروکاتالیستی الکتروکاتالیست شده، خواهد شد. در ادامه، جهت بررسی ساختار پوشش تشکیل شده، آزمون XRD در محدوده‌ی 2θ ۱۰ تا ۸۰ درجه انجام شد. با توجه به نتایج به دست آمده در شکل ۲ (ج)، پوشش ایجاد شده بر سطح الکتروکاتالیست، دارای ساختار $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ می‌باشد. پیک‌های موجود در مقادیر 2θ در حدود ۳۳ و ۴۴/۵ درجه به خوبی با (JCPDS No. 18-0888) همخوانی دارد و به ترتیب متعلق به صفحات (۱۰۲) و (۱۰۱) در ساختار $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ می‌باشند. برآمدگی در حدود ۲۵ درجه را می‌توان به صفحه‌ی (۰۰۲) نسبت داد. آزمون FTIR جهت بررسی گروه‌های عاملی بر نمونه‌ی rGO، $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}/\text{rGO}$ و (د) نمایش داده شده است. با توجه به نمودار FTIR مربوط به GO، گروه‌های عاملی فراوانی شامل C=O، C-O، C=C و O-H، برای این نمونه مشاهده می‌گردد. از طرفی گروه عاملی C=O در 1721 cm^{-1} که پیک مشخصه GO است، به خوبی در نمودارهای مربوط به rGO و $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}/\text{rGO}$ حذف گردیده است. همچنین کاهش شدت سایر پیک‌های گروه‌های اکسیژن-دار نسبت به GO در این نمودارها، نمایانگر احیای GO می‌باشد.

پودر اکسید گرافن در محلول PBS mM $(\text{KH}_2\text{PO}_4/\text{K}_2\text{HPO}_4)$ ۶۷ به مقدار ۱ g/L اضافه شد. پس از همگن کردن سوسپانسیون توسط اعمال امواج فراصوت، pH به کمک NaOH به محدوده‌ی ۹-۱۰ رسید. در ادامه، رسوبدهی طبق تصویر شماتیک در شکل ۱ انجام شد. لایه‌نشانی پالسی توسط اعمال چگالی جریان 300 mA.cm^{-2} و -200 در مدت زمان ۱ دقیقه بر فوم نیکل انجام شد. هر نیم چرخه‌ی لایه‌نشانی ۰/۲ ثانیه بود. لازم به ذکر است در نیم چرخه‌ی آندی لایه‌نشانی صورت می‌گیرد و در نیم چرخه‌ی کاتدی احیا انجام می‌شود.

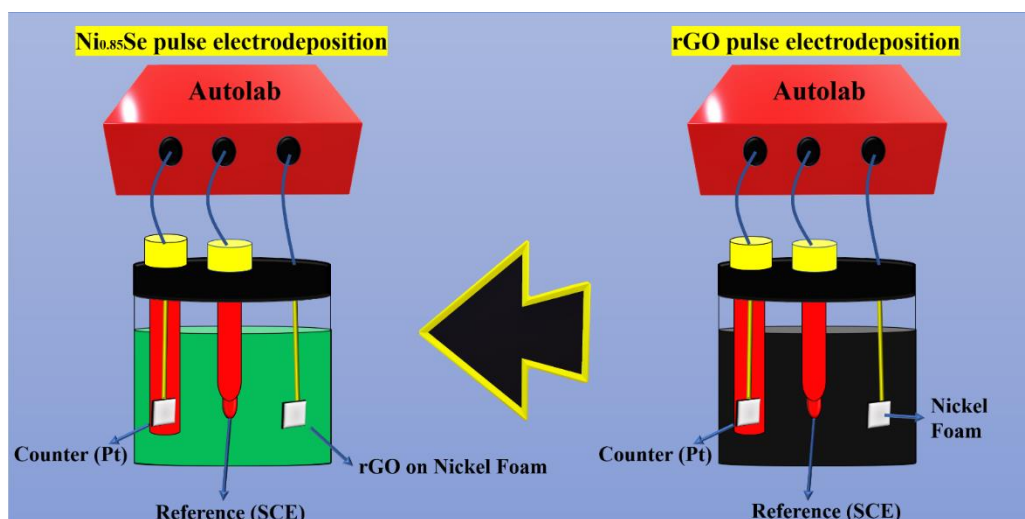
۲-۲- رسوبدهی الکتروشیمیایی $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ بر rGO

در این مرحله، مقدار $60\text{ mM NiCl}_2.6\text{H}_2\text{O}$ ، 42 mM SeO_2 و 200 mM LiCl در آب دیونیزه شده حل شد و سپس pH محلول به کمک NaOH به ۳/۶ رسید [۱۱]. لایه‌نشانی در چگالی جریان $10-20\text{ mA.cm}^{-2}$ انجام شد. کل زمان لایه‌نشانی ۲۸ دقیقه بود. زمان هر نیم سیکل بر ۰/۲ ثانیه تنظیم گردید.

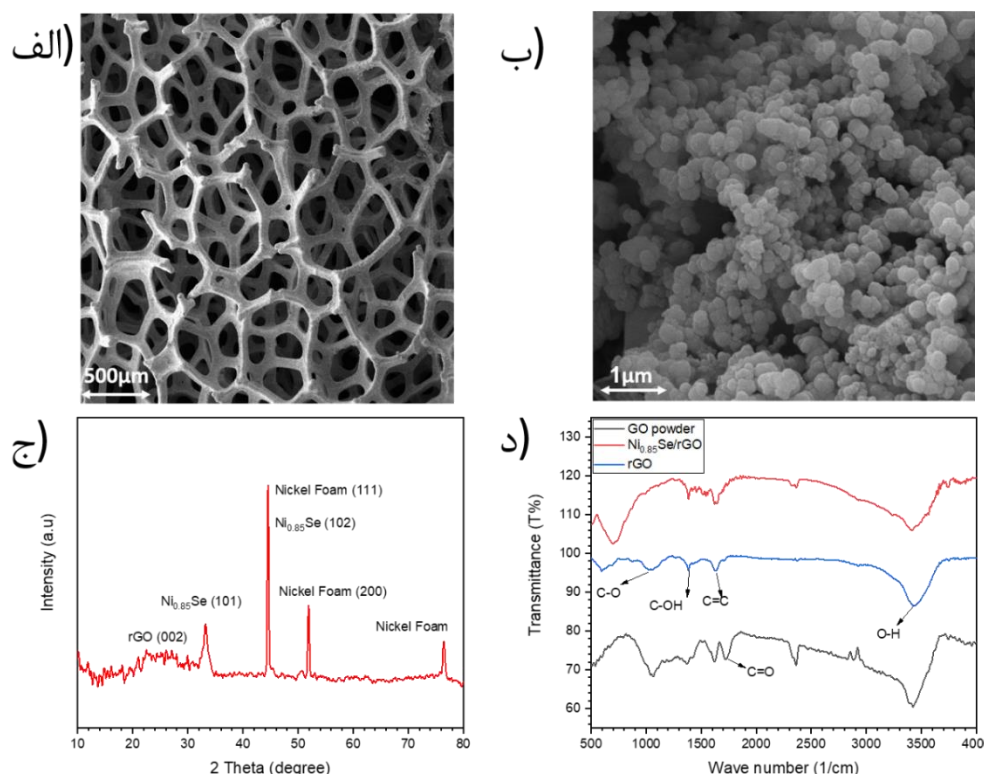
۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشخصه‌یابی الکتروشیمیایی

تصاویر FESEM برای نمونه‌ی $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}/\text{rGO}$ در شکل ۲ (الف) و (ب) مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۲ (الف)، سطح متخلخل فوم نیکل باعث ایجاد سطح در دسترس بالایی جهت انجام



شکل ۱- شماتیک فرآیند رسوبدهی پوشش $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}/\text{rGO}$ بر فوم نیکل.



شکل ۲- الف و ب) تصاویر FESEM از الکتروکاتالیست $\text{Ni}_{0.85}\text{Se/rGO}$ ، ج) طیف XRD الکتروکاتالیست $\text{Ni}_{0.85}\text{Se/rGO}$ د) نمودار FTIR مربوط به الکتروکاتالیست‌های rGO، NF و $\text{Ni}_{0.85}\text{Se/rGO}$.

توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۱، فوم نیکل جهت ایجاد چگالی جریان ۱۰، ۲۰ و $100 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ به ترتیب به پتانسیل اضافی ۲۶۰، ۲۸۹، 376 mV vs. RHE نیاز دارد. این مقادیر پس از رسوبدهی برای rGO به ترتیب ۱۸۱، ۲۰۵ و 274 mV و برای $\text{Ni}_{0.85}\text{Se/rGO}$ به ترتیب ۶۸، ۸۸ و 150 mV بود. یکی از شاخصه‌های مهم جهت بررسی سینتیک فرآیند، شیب تافل می‌باشد. از این رو شیب‌های تافل از نمودارهای LSV در شکل ۳ (الف) استخراج شدند. همانطور که در شکل ۳ (ب) نمایش داده شده است، میزان شیب تافل الکتروکاتالیست‌های $\text{Ni}_{0.85}\text{Se/rGO}$ ، rGO و NF به ترتیب برابر با ۵۰، ۹۰ و 133 mV/dec می‌باشند. از این رو سینتیک انجام واکنش با رسوبدهی پوشش $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ و rGO به شکل قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. در نتیجه‌ی این افزایش شیب تافل، سرعت تولید گاز هم افزایش می‌یابد. در ادامه آزمون LSV پتانسیواستاتیک در ناحیه‌ی آندی جهت بررسی

۳-۲- آزمون‌های الکتروشیمیایی

تمامی آزمون‌های الکتروشیمیایی در محلول قلیایی KOH ۱ M انجام شد. ولتامتری روبشی خطی^۱ پتانسیواستاتیک به عنوان اولین آزمون جهت بررسی عملکرد الکتروکاتالیستی الکترودهای فوم نیکل، rGO و $\text{Ni}_{0.85}\text{Se/rGO}$ با نرخ رویش 5 mV/s انجام گردید. مقادیر پتانسیل به کمک رابطه ۱ از مبنای SCE^۲ به مبنای RHE^۳ تغییر کرد. همچنین میزان افت پتانسیل نیز به کمک آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی محاسبه، و در نمودارهای LSV اصلاح شد. با توجه به نمودارهای LSV در شکل ۳ (الف) که در ناحیه‌ی کاتدی و جهت بررسی عملکرد HER انجام شده است. عملکرد الکتروکاتالیستی فوم نیکل با اعمال پوشش‌های rGO و $\text{Ni}_{0.85}\text{Se}$ بهتر شده است و میزان چگالی جریان ایجاد شده در پتانسیل‌های اضافی مشخص، افزایش پیدا کرده است. با

¹ Linear Sweep Voltammetry

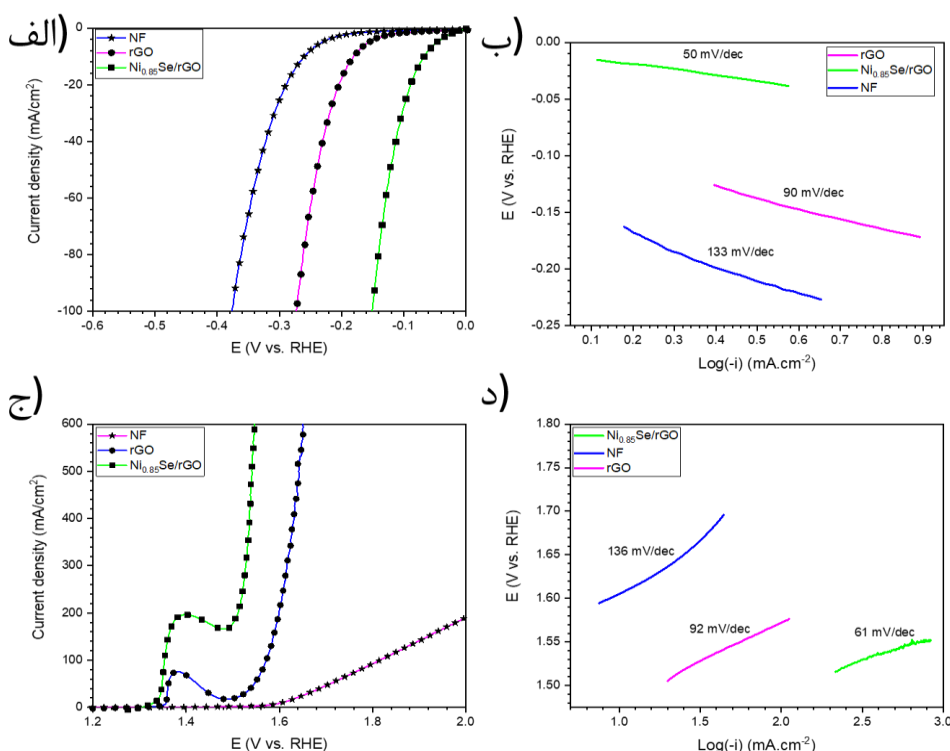
² Saturated Calomel Electrode

³ Reversible Hydrogen Electrode

ضعیف تری را نسبت به الکتروود $\text{Ni}_{0.85}\text{Se/rGO}$ از خود نشان می دهند. همچنین شیب های تافل مستخرج از نمودارهای LSV در شکل ۳ (ج)، در شکل ۳ (د) نمایش داده شده است. همانطور که انتظار میرفت، سینتیک OER بر سطح الکتروود، در اثر رسوبدهی افزایش پیدا کرده و فعالیت الکتروود را در جهت انجام OER بهبود داده است. میزان شیب تافل OER برای $\text{Ni}_{0.85}\text{Se/rGO}$ ، rGO و NF به ترتیب ۶۱، ۹۲ و 136 mV/dec بود. بنابراین رسوبدهی الکتروشیمیایی پوشش دولایه ی $\text{Ni}_{0.85}\text{Se/rGO}$ به طور قابل توجهی فعالیت الکتروکاتالیستی فوم نیکل را افزایش داده است.

$$\text{رابطه (۱)} \quad E (\text{V vs. RHE}) = (0.242 \text{ V vs. SCE}) + 0.059 \text{ pH} + E (\text{V vs. SCE})$$

عملکرد OER نمونه ها انجام شد. به دلیل ایجاد پیک اکسیداسیون در منحنی های OER، مقادیر بالاتر پتانسیل اضافی مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور میزان پتانسیل اضافی در چگالی جریان 100 mV vs. RHE و 200 mV گزارش شده است. همانطور که در شکل ۳ (ب) مشاهده می شود، با اعمال پوشش، نمودارهای LSV به سمت مقادیر کمتر پتانسیل شیفته شده اند. مقادیر پتانسیل اضافی در جدول ۲ گزارش شده است. الکتروود $\text{Ni}_{0.85}\text{Se/rGO}$ جهت انجام OER در چگالی جریان 200 mA.cm^{-2} به پتانسیل های اضافی 281 mV نیاز دارد. از طرفی فوم نیکل در پتانسیل اضافی 584 mV و 788 mV به چگالی جریان 100 و 200 mA.cm^{-2} می رسد. rGO جهت دستیابی به چگالی جریان 100 و 200 mA.cm^{-2} به پتانسیل اضافی 342 و 369 mV نیاز دارد که عملکرد



شکل ۳ - الف) نمودار مربوط به آزمون ولتامتری روبشی خطی جهت انجام HER، ب) شیب تافل مربوطه، ج) نمودار ولتامتری روبشی خطی جهت انجام OER و د) شیب تافل مربوطه برای الکتروکاتالیست های NF، rGO و $\text{Ni}_{0.85}\text{Se/rGO}$ در محلول 1 M KOH و نرخ روبش 5 mV/s .

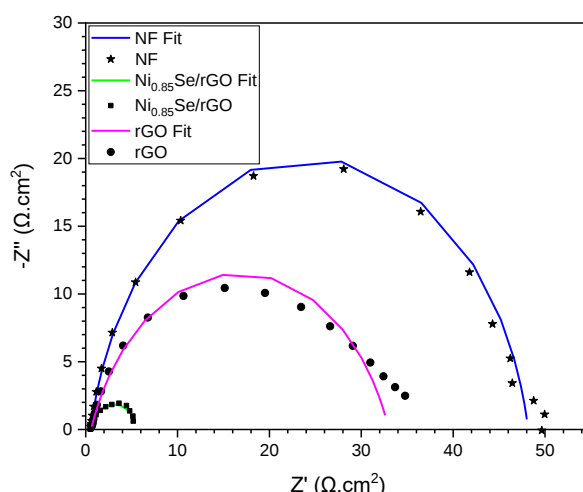
جدول ۱ - مقادیر پتانسیل اضافی مربوط به نمودارهای LSV در شکل ۳.

پتانسیل اضافی (mV vs. RHE)					الکتروکاتالیست
OER		HER			
۲۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۰	۱۰	
۷۸۸	۵۸۴	۳۷۶	۲۸۹	۲۶۰	NF
۳۶۹	۳۴۲	۲۷۴	۲۰۵	۱۸۱	rGO
۲۸۱	—	۱۵۰	۸۸	۶۸	Ni0.85Se/rGO

پوشش rGO و Ni_{0.85}Se/rGO نشان دهنده‌ی عملکرد بهتر الکتروکاتالیست‌ها می‌باشد. این میزان برای فوم نیکل، rGO و Ni_{0.85}Se/rGO به ترتیب ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۱ و $F/s^{-1}/cm^2$ و ۰/۱۳ بود.

در ادامه جهت بررسی پایداری پوشش دو لایه‌ی سنتز شده، آزمون پایداری الکتروشیمیایی در چگالی جریان‌های ۲۵۰- و 250 mA.cm^{-2} به ترتیب برای بررسی عملکرد HER و OER به مدت ۲۴ ساعت به روش کروئوپتانسیومتری انجام شد. با توجه به شکل ۵ در میزان افزایش پتانسیل اضافی مورد نیاز پس از ۲۴ ساعت ناچیز بوده و الکتروکاتالیست سنتز شده، پایداری الکتروشیمیایی بالایی را برای HER و OER از خود نشان می‌دهد.

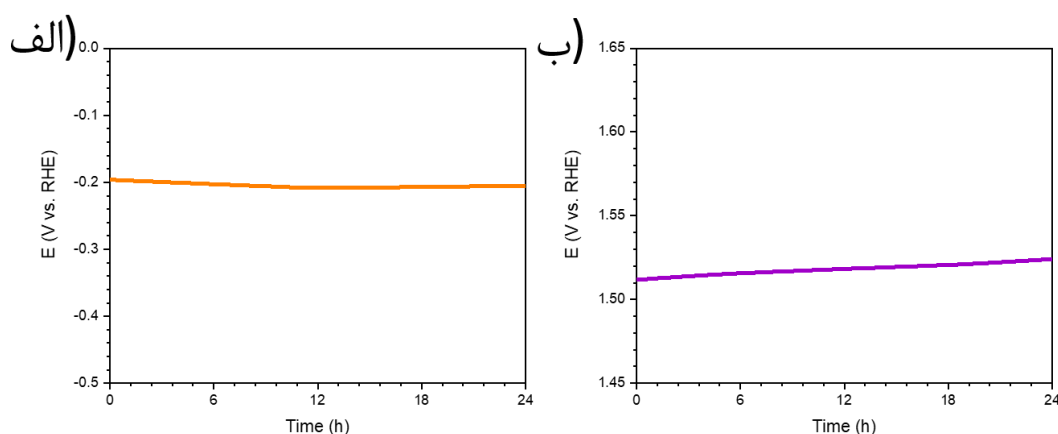
در ادامه جهت به بررسی میزان هدایت الکتریکی الکترودهای سنتز شده پرداخته شد. از این رو آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در محدوده فرکانس ۱۰۰ kHz تا ۱۰ mHz با دامنه‌ی تغییرات پتانسیل $\pm 10 \text{ mV}$ انجام شد. این آزمون، با اعمال پتانسیل اضافی 100 mV vs. RHE انجام شد. جدول ۲، نتایج به دست آمده از برازش منحنی‌های امپدانس در شکل ۴ را نمایش می‌دهد. میزان مقاومت انتقال بار فوم نیکل، rGO و Ni_{0.85}Se/rGO به ترتیب برابر با ۴۷/۵۹، ۳۲/۴۲ و $5/18 \Omega.cm^2$ است. علاوه بر این کوچک‌تر شدن نمودار نایکوئیست پس از اعمال لایه‌نشانی، تاییدی بر کاهش R_{ct} می‌باشد. لازم به ذکر است این کاهش مقاومت انتقال بار، سبب عملکرد الکتروکاتالیستی بهتر الکتروود خواهد شد. علاوه بر این افزایش میزان CPE الکترودها پس از لایه‌نشانی



شکل ۴ - آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در پتانسیل اضافی ۱/۱۶۸ V vs. SCE در محلول ۱ M KOH.

جدول ۲ - مقادیر R_{ct} و CPE حاصل از برازش منحنی های نایکوئیست در شکل ۴.

الکتروکاتالیست	CPE ($F/s^{n-1}/cm^2$)	R_{ct} ($\Omega.cm^2$)
NF	۰/۰۰۰۵	۴۷/۵۹
rGO	۰/۰۰۱	۳۲/۴۲
Ni _{0.85} Se/rGO	۰/۱۳	۵/۱۸



شکل ۵ - نمودارهای کروئوپتانسیومتری در محلول ۱ M KOH و در چگالی جریان الف) -250 mA.cm^{-2} جهت انجام HER و ب) $+250 \text{ mA.cm}^{-2}$ جهت انجام OER.

نتیجه گیری

در این پژوهش، رسوبدهی پوشش دو لایه ی Ni_{0.85}Se/rGO بر فوم نیکل به روش پالس الکتروشیمیایی جریان در دو مرحله انجام شد. تصاویر FESEM سطح در دسترس بالایی را برای انجام فعالیت های الکتروکاتالیستی نشان می دهد. با توجه به نتایج به دست آمده در آزمون HER، میزان پتانسیل اضافی در چگالی جریان 10 mA.cm^{-2} فوم نیکل پس از رسوبدهی الکتروشیمیایی rGO از 260 mV به 181 mV کاهش پیدا کرد. در ادامه با رسوبدهی Ni_{0.85}Se بر الکتروود فوم نیکل اصلاح شده با rGO، این میزان برای HER به مقدار 67 mV رسید. همچنین الکتروودهای rGO، Ni_{0.85}Se/rGO و NF برای انجام OER به پتانسیل اضافی 281 ، 369 و 788 mV نیاز دارد. از طرفی با توجه به آزمون های امپدانس الکتروشیمیایی، پوشش Ni_{0.85}Se/rGO بر فوم نیکل، میزان هدایت الکتریکی را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. در ادامه الکتروکاتالیست مذکور پایداری عالی در آزمون کروئوپتانسیومتری از خود نشان داد که کاربرد آن در صنعت را توجیه می کند.

مراجع

- [1] J. Niu, Y. Yue, C. Yang, Y. Wang, J. Qin, X. Zhang, Z.-S. Wu, Ultrarapid synthesis Ni-Cu bifunctional electrocatalyst by self-etching electrodeposition for high-performance water splitting reaction, Applied Surface Science, 561 (2021) Pp. 150030.
- [2] W. Liu, T. Xia, Y. Ye, H. Wang, Z. Fang, Z. Du, X. Hou, Self-supported Ni₃N nanoarray as an efficient nonnoble-metal catalyst for alkaline hydrogen evolution reaction, International Journal of Hydrogen Energy, 46 (2021) Pp. 27037-27043.

- [3] Y. Yang, H. Meng, S. Yan, H. Zhu, W. Ma, C. Wang, F. Ma, Z. Hu, The in-situ construction of NiFe sulfide with nanoarray structure on nickel foam as efficient bifunctional electrocatalysts for overall water splitting, *Journal of Alloys and Compounds*, 874 (2021) Pp. 159874 .
- [4] Z. Wu, Z. Wang, F. Geng, Radially aligned hierarchical nickel/nickel-iron (oxy)hydroxide nanotubes for efficient electrocatalytic water splitting, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10 (2018) Pp. 8585-8593.
- [5] L. Lin, M. Chen, L. Wu, Hierarchical iron-doped nickel diselenide hollow spheres for efficient oxygen evolution electrocatalysis, *ACS Applied Energy Materials*, 2 (2019) Pp. 4737-4744.
- [6] Y. Li, Y. Sun, Y. Qin, W. Zhang, L. Wang, M. Luo, H. Yang, S. Guo, Recent advances on water-splitting electrocatalysis mediated by noble-metal-based nanostructured materials, *Advanced Energy Materials*, 10 (2020) Pp. 1903120.
- [7] L. Han, K. Feng, Z. Chen, Self-supported cobalt nickel nitride nanowires electrode for overall electrochemical water splitting, *Energy Technology*, 5 (2017) Pp.1908-1911.
- [8] N. Ullah, W. Zhao, X. Lu, C.J. Oluigbo, S.A. Shah, M. Zhang, J. Xie, Y. Xu, In situ growth of M-MO (M= Ni, Co) in 3D graphene as a competent bifunctional electrocatalyst for OER and HER, *Electrochimica Acta*, 298 (2019) Pp. 163-171.
- [9] T.-Y. Chen, B. Vedhanarayanan, S.-Y. Lin, L.-D. Shao, Z. Sofer, J.-Y. Lin, T.-W. Lin, Electrodeposited NiSe on a forest of carbon nanotubes as a free-standing electrode for hybrid supercapacitors and overall water splitting, *Journal of Colloid and Interface Science*, 574 (2020) Pp. 300-311.
- [10] Y. Yaghoubinezhad, A. Afshar, Design of experiments for pulse reverse electrodeposition of graphene oxide toward hydrogen evolution reaction, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 4 (2015) M7.
- [11] S. Esmailzadeh, T. Shahrabi, Y. Yaghoubinezhad, G.B. Darband, Optimization and characterization of pulse electrodeposited nickel selenide nanostructure as a bifunctional electrocatalyst by response surface methodology, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (2021) Pp. 18898-18912.