

## بررسی تاثیر حرارت کلسیناسیون بر روی رشد نانوساختارهای اکسید نیکل از فوم نیکل جهت تولید اکسیژن به روش تجزیه الکترو شیمیایی

محمد احمدی دریاکناری<sup>۱\*</sup>، احمد احمدی دریاکناری<sup>۲\*</sup>، آرش منتظری<sup>۲</sup> و سمیه سپهری<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

۲- گروه نانوفناوری، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۴۰۲/۰۶/۰۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۲/۰۸/۲۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۲/۰۹/۲۲

### چکیده

در این پژوهش، یک روش مقرون به صرفه و ساده برای سنتز نانوذرات NiO پشتیبانی شده بر روی فوم نیکل برای واکنش تولید اکسیژن (OER) ارائه می شود. یک فرآیند بازپخت تک مرحله ای در دماهای مختلف (۳۰۰-۷۰۰ °C) برای دستیابی به دمای بهینه انجام می شود که در آن یک الکتروکاتالیست با مورفولوژی مناسب و فعالیت الکتروکاتالیستی بالا قابل دستیابی است. مکانیسم جوانه زنی و رشد این ذرات بر اساس پروسه بخار-جامد و استوالدراپینینگ است. در واقع ابتدا هسته های ذرات اکسید نیکل بر روی فوم نیکل بر اثر مکانیزم بخار-جامد تشکیل می شود و سپس با تحت تاثیر قرار گرفتن از پدیده استوالدراپینینگ رشد می کنند. در واقع بهترین فعالیت الکتروکاتالیستی توسط الکتروکاتالیست ساخته شده در دمای ۴۰۰ °C نشان داده می شود که چگالی جریان ۱۰ mA/cm<sup>2</sup> را در پتانسیل ۱/۵۹ mV در مقابل الکتروکاتالیست هیدروژن برگشت پذیر (RHE) در شرایط قلبی ارائه می دهد. آزمایش های مشخصه مواد مختلف همراه با اندازه گیری های الکتروشیمیایی برای روشن شدن علت فعالیت الکتروکاتالیستی عالی الکتروکاتالیست ساخته شده در دمای ۴۰۰ °C استفاده شده است.

**واژه های کلیدی:** الکتروکاتالیست، نانوساختار اکسید نیکل، کلسیناسیون، واکنش تولید اکسیژن به روش الکتروشیمیایی.

### ۱- مقدمه

انرژی به وجود آورده است [۱،۲]. از این رو، تلاش های گسترده تحقیقاتی برای توسعه منابع انرژی جایگزین، پاک و پایدار صورت گرفته است. هیدروژن به عنوان منبع انرژی پاک یکی از انرژی های تجدیدپذیر است که نگاه ویژه ای در آینده بازارهای انرژی به آن می شود. یکی از سیستم های تولید هیدروژن، تجزیه الکتروشیمی آب می باشد [۳،۴].

تقاضای جهانی مصرف انرژی به دلیل رشد مداوم و سریع جمعیت و صنعتی شدن در حال افزایش است. از این رو استفاده از سوخت های فسیلی به دلیل محدود بودن و تولید آلاینده های زیست محیطی نگرانی های زیادی در مورد بحران

\* عهده دار مکاتبات: احمد احمدی دریاکناری

نشانی: گروه نانوفناوری، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، ایران

تلفن: ۰۱۳-۳۳۴۷۱۹۱-۳۳۶۹۰۲۷۴، دورنگار: ۰۱۳-۳۳۶۹۰۲۷۴، پست الکترونیکی: ahmad.ahmadi1361@guilan.ac.ir

نیکل فوم، اکسید نیکل را سنتز کردند [۱۱-۱۳]. در این پژوهش فقط با حرارت دادن بهینه (کلسینه بهینه) لایه رویی فوم نیکل به پوشش نانوساختارهای اکسید نیکل با استفاده از روش رسوب‌دهی بخار-جامد و استوالد راینینگ تبدیل می‌شود و در مرحله بعدی فعالیت‌های الکتروکاتالیستی آن جهت آزاد شدن اکسیژن بررسی می‌شود. مکانیزم‌های فعال جوانه‌زنی و رشد در این نوع تحقیق بر اساس پروسه بخار-جامد و استوالد راینینگ است که قبلاً در اکسیدهای فلزی دیگر نظیر اکسید روی و اکسید مس کارهای تحقیقاتی انجام شده است [۱۴، ۱۵] و با توجه به دانش ما برای اولین بار توسط گروه تحقیقاتی دکتر احمد احمدی در دانشگاه گیلان، نانوساختارهای اکسید نیکل با استفاده از این روش سنتز شدند.

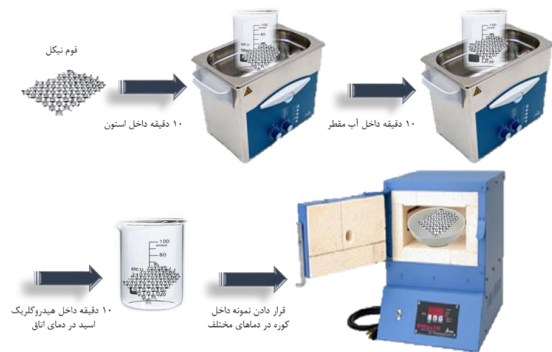
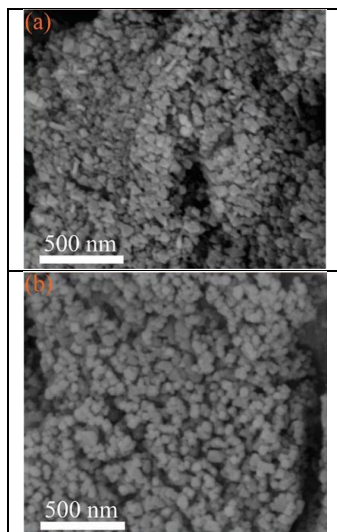
## ۲- فعالیت‌های تجربی

برای ساخت الکترودها، ابتدا فوم نیکل به ابعاد  $1 \text{ cm}^2 * 1$  تهیه شد، نمونه‌ها جهت چربی‌زدایی مورد شستشو قرار گرفت. شستشو در دو مرحله هر کدام به مدت ۱۰ min در معرض آلتراسونیک انجام شد. در مرحله اول از استون جهت چربی‌زدایی و در مرحله دوم از آب دیونیزه به برای شستشوی نمونه‌ها استفاده شده است. در مرحله سوم، اسیدشویی نمونه‌ها در محلول HCl، ۱ M، ۱۰۰ cc آب مقطر + ۱۰ ml اسید هیدروکلریک) به منظور حذف لایه‌های اکسیدی به مدت ۱۰ min دقیقه قرار گرفت.

در نهایت نمونه‌ها جهت کلسینه شدن در دماهای ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ °C به مدت ۱ h در کوره قرار داده شد. دمای کوره به مدت ۱ h از دمای محیط به دمای مورد نظر رسید و به مدت ۱ ساعت در آن دما باقی مانده است. بعد از اتمام زمان حرارت‌دهی، کوره خاموش شده و نمونه‌ها به آرامی سرد شد. با کلسینه کردن فوم‌های نیکل در دماهای مختلف، نانوساختارهای اکسید نیکل روی فوم نیکل ایجاد می‌شود که با استفاده از تست‌های الکتروشیمیایی و روش‌های مختلف آنالیز، به فعالیت الکتروکاتالیستی نمونه‌ها پرداخته می‌شود.

سیستم‌هایی الکترولیزی که برای فعالیت‌های آزادسازی اکسیژن (Oxygen Evolution Reaction: OER) استفاده می‌شوند، در ساده‌ترین حالت به شکل یک سیستم دو الکترودی نشان داده می‌شوند، جایی که قسمت کاتد شامل واکنش آزادسازی گاز هیدروژن (Hydrogen Evolution Reaction: HER) و بخش آنود در سیستم دو الکترودی با واکنش آزادسازی و یا تصاعد گاز اکسیژن OER همراه می‌شود. OER یک واکنش ترکیبی الکترون-پروتون است، در حالی که HER تنها دو واکنش حاصل از انتقال الکترون است، از این رو می‌توان به راحتی انتظار داشت که OER نیاز بیشتری به اضافه ولتاژ ( $\eta$ ) (High Overpotential) برای غلبه بر مانع سینتیکی دارد ( $\eta_a > \eta_c$ ) [۵]. بهترین کاتالیست برای واکنش‌های تصاعد و آزادسازی گاز اکسیژن در الکترولیت‌های اسیدی و قلیایی اکسید روتنیوم ( $\text{RuO}_2$ ) با فاز روتایل است [۵، ۶]. اکسید ایریدیم ( $\text{IrO}_2$ )، نیز یکی دیگر از کاتالیست‌ها، با عملکرد بالا برای واکنش‌های OER است [۵]. این دو فلز بسیار گران قیمت هستند و نمی‌توان از این عناصر در مقیاس بزرگ صنعتی استفاده کرد، الکتروکاتالیست‌های جایگزین  $\text{RuO}_2$  و  $\text{IrO}_2$  باید جریان و واکنش‌های بهتری نسبت به این دو عنصر داشته باشند. اخیراً، برای سرعت بخشیدن به OER و کاهش هزینه کاتالیزور، مطالعات زیادی با استفاده از اکسیدهای فلزی غیرگران‌بها برای استفاده در OER انجام شده است. در این میان، اسپینل  $\text{AB}_2\text{O}_4$  (A: Fe, Co, Cu, Mn, Ni و غیره)، که در آن‌ها A و B به ترتیب یون‌های چهار ضلعی و هشت وجهی را نشان می‌دهند، بهترین جایگزین برای آندهای با ثبات برای فرآیند آنودی و محیط قلیایی هستند [۷-۱۰]. فانگ چا و همکاران در پژوهشی، با استفاده از فوم نیکل که ارزان و در بازار یافت می‌شود، اکسید نیکل را به عنوان کاتالیزور تولید اکسیژن، سنتز کردند. فوم نیکل به عنوان ماده متخلخل سه بعدی به دلیل خواص رسانایی الکتریکی بالا، انعطاف‌پذیری و کشش مکانیکی خوب به عنوان زیرلایه استفاده شده است، که در سه مرحله الکتروپولیش، آندایز و کلسینه کردن روی زیرلایه

است. همچنین به جهت درک بهتر از وضعیت مورفولوژی نانوساختارهای رشد داده شده، عکس‌های میکروسکوپ الکترونی عبوری برای نمونه‌های کلسینه شده در دماهای کلسینه شده ۴۰۰ و ۵۰۰ °C گرفته شده است و در تصاویر ۲e و مکانیزم جوانه‌زنی و رشد با افزایش دما به دلیل وابستگی سایز ذرات به تغییرات انرژی آزاد گیبس، با توجه به (شکل ۲) سایز ذرات بزرگتر می‌شوند. مکانیسم جوانه‌زنی و رشد این ذرات بر اساس پروسه بخار-جامد و استوالدراپینینگ است. در واقع ابتدا هسته‌های ذرات اکسید نیکل بر روی فوم نیکل بر اثر مکانیزم بخار-جامد تشکیل می‌شود و سپس با تحت تاثیر قرار گرفتن از پدیده استوالد-راپینینگ رشد می‌کنند. در پروسه بخار-جامد، گاز نیکل با اکسیژن وارد واکنش شده و تشکیل بخار اکسید نیکل می‌دهد. سپس گاز اکسید نیکل بر روی نیکل فوم، هسته‌های اولیه اکسید نیکل را تشکیل می‌دهد. با افزایش دما، هسته‌ها به دلیل تمایل برای رسیدن به حالت پایدار، انرژی آزاد خود را از دست داده و شروع به رشد و بزرگتر شدن می‌کنند [۱۴،۱۵]. از آنجایی که سایز ذرات با سطح ویژه آن رابطه عکس دارد، افزایش اندازه ذرات برای عملکرد الکتروکاتالیست OER مفید نیست زیرا با افزایش اندازه ذرات، سطح فعال کاهش می‌یابد. بنابراین دمای بهینه کلسینه کردن، دمای ۴۰۰ °C می‌باشد.

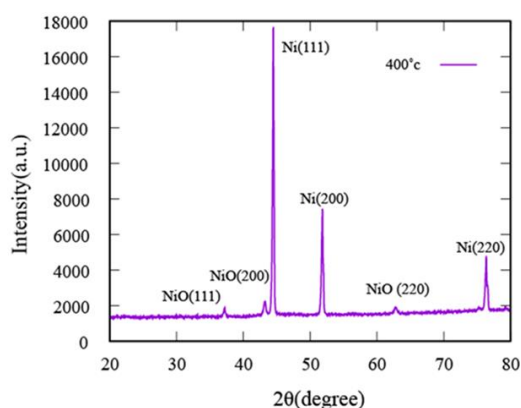


شکل ۱: روند فعالیت‌های انجام شده روی فوم نیکل جهت آماده‌سازی اولیه.

تست‌های ولتامتری روبشی خطی و پایداری به ترتیب جهت بررسی کارایی الکتروشیمیایی تولید اکسیژن و مدت زمان پایداری عملکرد الکترودهای اکسید نیکل که در دماهای مختلف سنتز شده‌اند، انجام شده است. در این پژوهش منحنی‌های ولتامتری روبشی خطی و پایداری در محلول ۱ مولار هیدروکسید سدیم و با نرخ روبش ۲ میلی‌ولت بر ثانیه بدست آمده است. شیب تافل و پتانسیل اضافی پارامترهای موثری برای مقایسه فعالیت الکتروکاتالیست‌های مختلف در واکنش تجزیه آب هستند. از این رو برای مقایسه فعالیت الکتروکاتالیست‌ها نمودار شیب تافل نمونه‌ها نیز مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. ریخت‌شناسی و ساختار الکترودهای سنتز شده فوم نیکل در دماهای مختلف، به ترتیب به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و پراش اشعه ایکس (XRD) تعیین شد. به منظور تعیین پیوندهای ساختار اکسید نیکل روی فوم نیکل از آنالیز طیف تبدیل فوریه مادون قرمز (FT-IR) و طیف‌سنجی رامان (RAMAN) استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای نمونه‌های کلسینه شده در دماهای مختلف ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ °C با بزرگنمایی یکسان نشان می‌دهد. اندازه ذرات الکترودی که در دمای ۴۰۰ °C کلسینه شده است تقریباً بین ۲۴-۳۵ nm است که تصویر آن در شکل ۲a نشان داده شده



شکل ۳- الگوی پراش اشعه ایکس از الکتروود نیکل اکساید سنتز شده در دمای ۴۰۰ °C.

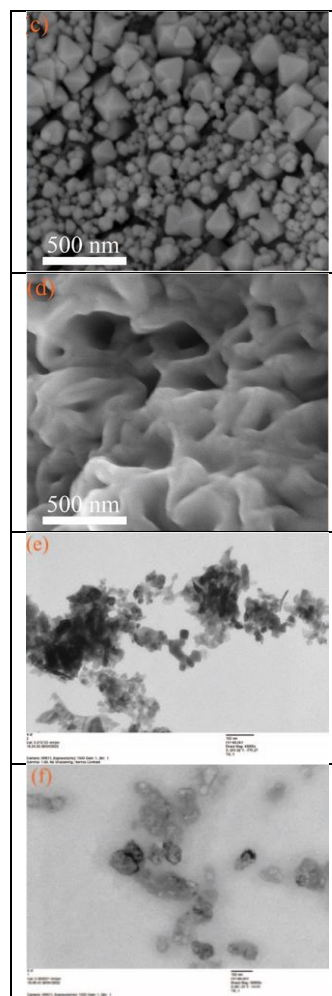
دیده است را با استفاده از رابطه دبای شرر ۲۲ نانومتر بدست می آید.

فرمول دبای شرر به صورت معادله (۱) است:

$$D = (K \times \lambda) / (\beta \times \cos \theta) \quad (1)$$

D اندازه کریستالیت،  $\lambda$  طول موج اشعه ایکسی که در آنالیز XRD استفاده شده است، K فاکتور شکل (معمولاً عددی نزدیک به یک مثل ۰/۹ در فرمول قرار داده می شود و  $\beta$  پهنای بلندترین پیک در نیمه ارتفاع ماکزیمم، برحسب رادیان است.

تست ولتامتری روبشی خطی برای نمونه های کلسینه شده در دماهای ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ °C مورد بررسی قرار گرفت همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، با اعمال پتانسیل (۰/۷-۰/۲) نسبت به ولتاژ (Ag/AgCl) با نرخ روبش ۲ mV/s، مقدار پتانسیل شروع برای الکترودهای ساخته شده با دماهای کلسینه ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ °C به ترتیب برابر ۰/۴۷، ۰/۵۵، ۰/۶۲ و ۰/۶۴۷ بدست آمد. همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، الکتروودی که در دمای ۴۰۰ °C سنتز شده است، با توجه به چگالی جریان های موجود در منحنی های ولتامتری روبشی خطی، واضح است که الکتروود

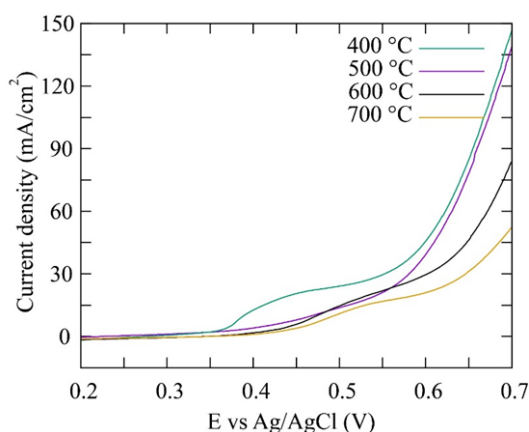


شکل ۲: تصاویر SEM از نمونه های کلسینه شده در دماهای مختلف با شرایط سنتز یکسان. (a) ۴۰۰، (b) ۵۰۰، (c) ۶۰۰، (d) ۷۰۰ °C و تصاویر TEM (e) ۴۰۰ و (f) ۵۰۰ °C.

جهت بررسی ساختار کریستالی نمونه کلسینه شده در دمای ۴۰۰ °C از الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) استفاده شد، که تصویر آن در ۳ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، ۶ پیک در حدود ۳۷، ۴۳/۵ و ۶۳ در اندازه زاویه ۲θ دیده می شود که به ترتیب متعلق به صفحات کریستالی ۱۱۱، ۲۰۰ و ۲۲۰ ترکیب NiO و زوایای ۴۵، ۵۲، ۷۶/۵ به ترتیب متعلق به صفحات کریستالی ۱۱۱، ۲۰۰ و ۲۲۰ ساختار Ni است. حضور پیک های NiO نشان دهنده تشکیل ساختار اکسید نیکل است [۱۶، ۱۷].

اندازه کریستالیت نیکل فومی که در دمای ۴۰۰ °C حرارت

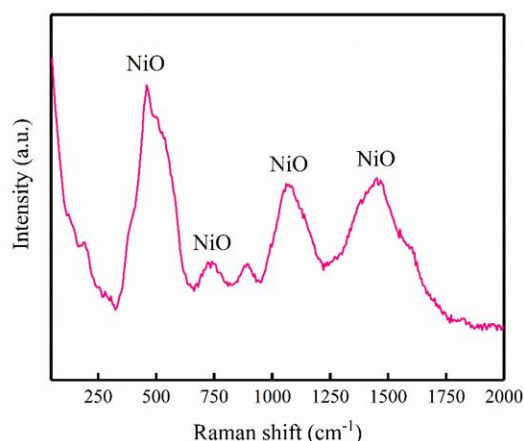
شکل ۶ نشان داده شده است، الکترودی که در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  سنتز شده است، با توجه به چگالی جریان‌های موجود در منحنی‌های ولتامتری روبشی خطی، واضح است که الکترود ساخته شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  دارای بازده بهتری برای عمل OER در مقایسه با سایر الکترودها است. دلیل این بهبود سطح زیاد نانوذرات سنتز شده بر روی زیرلایه فوم نیکل است.



شکل ۵: منحنی‌های ولتامتری روبشی خطی در محلول ۱ مولار NaOH با نرخ روبش  $0.002\text{ V/s}$  برای الکترودهای ساخته شده با دمای کلسینه  $400^{\circ}\text{C}$ ،  $500^{\circ}\text{C}$ ،  $600^{\circ}\text{C}$  و  $700^{\circ}\text{C}$ .

برای بررسی بیشترین فعالیت الکتروکاتالیستی الکترودهای NiO، مقادیر شیب تافل از منحنی قطبش تعیین شد. شکل ۷ نمودار شیب تافل برای نمونه‌های کلسینه شده در دماهای  $400^{\circ}\text{C}$ ،  $600^{\circ}\text{C}$  و  $700^{\circ}\text{C}$  نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷، الکترود کلسینه شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  دارای مقدار شیب تافل  $21/4$  است که در مقایسه با  $500^{\circ}\text{C}$  ( $37/4$ )،  $600^{\circ}\text{C}$  ( $54$ ) و  $700^{\circ}\text{C}$  ( $25/73$ ) کمتر است. هرچه میزان شیب تافل کمتر باشد بازده عملکرد الکترود در فرآیند OER افزایش می‌یابد از این رو نمونه کلسینه شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  فعالیت الکتروکاتالیستی بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشته که این امر به دلیل کاهش سایز ذرات و افزایش سطح ویژه است [۱۸].

ساخته شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  دارای بازده بهتری برای عمل OER در مقایسه با سایر الکترودها است. دلیل این بهبود سطح زیاد نانوذرات سنتز شده بر روی زیرلایه فوم نیکل همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود پیک‌هایی در محدوده  $420$ ،  $1075$  و  $1430\text{ cm}^{-1}$  ظاهر شده است. که به ترتیب مربوط به مدهای اپتیکی NiO می‌باشد.



شکل ۶: طیف‌سنجی رامان الکترود ساخته شده در دمای  $400^{\circ}\text{C}$ .

جهت مقایسه فعالیت الکتروکاتالیستی نمونه‌ها، تست‌های الکتروشیمیایی انجام شد. تمام آزمایش‌های این بخش با الکترودهای کار در اندازه  $1 \times 1$  سانتی‌متر مربع و الکترودهای Pt و Ag/AgCl به ترتیب به عنوان الکترود کاتد و الکترود مرجع در محلول  $1\text{ M NaOH}$  به عنوان الکترولیت صورت گرفته است.

تست ولتامتری روبشی خطی برای نمونه‌های کلسینه شده در دماهای  $400^{\circ}\text{C}$ ،  $500^{\circ}\text{C}$ ،  $600^{\circ}\text{C}$  و  $700^{\circ}\text{C}$  مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، با اعمال پتانسیل  $0/2-0/7$  نسبت به ولتاژ (Ag/AgCl) با نرخ روبش  $2\text{ mV/s}$  مقدار پتانسیل شروع برای الکترودهای ساخته شده با دماهای کلسینه  $400^{\circ}\text{C}$ ،  $500^{\circ}\text{C}$ ،  $600^{\circ}\text{C}$  و  $700^{\circ}\text{C}$  به ترتیب برابر  $0/1$ ،  $0/55$ ،  $0/62$  و  $0/64\text{ V}$  بدست آمد. همان‌طور که در

الکتروکاتالیست آماده شده در این تحقیق نسبت به تحقیقات دیگر نتایج عالی می‌باشد.

جدول ۱: نتایج مقایسه‌ای الکتروکاتالیست‌های پایه نیکل با نتایج تحقیق فعلی (نانوذرات اکسید نیکل بر روی فوم نیکل).

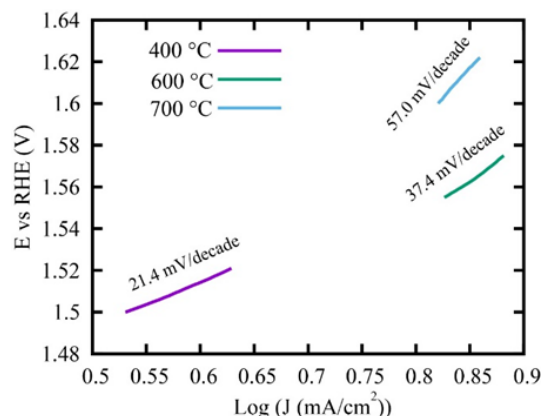
الکتروکاتالیست	پتانسیل اضافی شروع	الکترولیت	شیب تافل	منبع
NiMn LDH/NiCo <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	310	1.0 M KOH	99	[۱۹]
Ni/NiO@G-SH	270	0.1 M KOH	96	[۲۰]
NiO/Mn@PANI	345	0.1 M KOH	42	[۲۱]
Ni/NiO-carbon	49.48	1.0 M KOH	74	[۲۲]
Nitrogen-doped NiO nanosheets	270	1.0 M KOH	83	[۲۳]
Fe-NiO-Ni CHNAs	245	1.0 M KOH	43.4	[۲۴]
Ni <sub>3</sub> S <sub>2</sub> @FeNi <sub>2</sub> S <sub>4</sub> @NF	379	1.0 M KOH	92	[۲۵]
NiFeSe <sub>2</sub>	267	1.0 M KOH	67	[۲۶]
NiO nanoparticles/NF	280	1.0 M NaOH	24	تحقیق فعلی

#### ۴- نتیجه گیری

یک روش ساده و اقتصادی حرارت‌دهی فوم نیکل به جهت سنتز نانوساختارهای اکسید نیکل روی فوم نیکل روی فوم نیکل استفاده شده است. در این روش نانوساختارهای اکسید نیکل روی فوم نیکل با استفاده از تمیزکاری شیمیایی و حرارت‌دهی در محیط سنتز شده‌اند. نمونه‌ای که در دمای ۴۰۰ °C سنتز شده است، بهترین عکس‌العمل را در بین نمونه‌های دیگر به علت اندازه ذرات خیلی کوچک اکسید نیکل از خود نشان داده است. شیب تافل این نمونه ۲۴ mV/decade است و دارای پایداری بسیار خوبی می‌باشد.

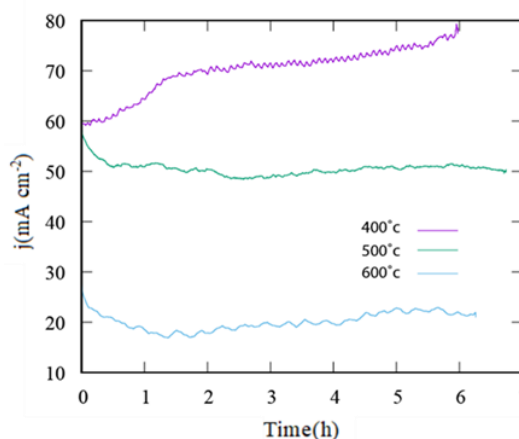
#### مراجع

- [1] F. Ajdari, E. Kowsari, M. Shahrak, A. Ehsani, Z. Kiaei, H. Torkzaban, M. Ershadi, *Coordination Chemistry Reviews*, **422**, 2020, 213441.
- [2] S. Hao, J. Liu, Q. Cao, Y. Zhao, X. Zhao, K. Pei, J. Zhang, G. Chen, R. Che, *J. Colloid Interface Sci.*, **559**, 2020, 282.
- [3] J. Abe, A. Popoola, E. Ajenifuja, O. Popoola, *Int. J. Hydrogen Energy*, **44**, 2019, 15072.
- [4] O. Mohammadi, Y. Bahari, A.A. Daryakenari, F.J. Koldeh, X. Zhang, Z.Q. Tian, P.K. Shen, *Int. J. Hydrogen Energy*, **47**, 2022, 34943.
- [5] N. Suen, S. Hung, Q. Quan, N. Zhang, Y. Xu, H. Ming Chen, *Chemical Society Reviews*, **46**, 2017, 337.
- [6] X. Wang, L. Yu, B. Guan, S. Song, X. Lou, *Advanced Materials*, **30**, 2018, 1801211.
- [7] L. Yang, Z. Liu, S. Zhu, L. Feng, W. Xing, *Mater. Today Phys*, **16**, 2020, 100292.



شکل ۶: نمودار شیب تافل برای نمونه‌های کلسینه شده در دماهای ۴۰۰، ۶۰۰، و ۷۰۰ °C.

برای نشان دادن پایداری نمونه‌های کلسینه شده در دماهای مختلف ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ °C تست کروم آمپرومتری گرفته شده است (شکل ۸). در این تست نمونه مورد نظر در محلول یک مولار NaOH تحت پتانسیل ۰/۶۵ V با استاندارد Ag/AgCl به مدت ۷ h قرار گرفته است. همان‌طور که در نمودار مشخص است نمونه کلسینه شده در دمای ۴۰۰ °C از پایداری بالایی برخوردار است.



شکل ۸: تست کروم آمپرومتری الکتروکاتالیست ساخته شده در دماهای ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ °C در محلول ۱ مولار NaOH با پتانسیل ۰/۶ V ولت به مدت ۷ h.

جدول ۱، کارآرایی الکتروکاتالیست اکسید نیکل سنتز شده را با دیگر الکتروکاتالیست‌های سنتز شده بر پایه نیکل را مقایسه می‌کند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، نتایج

- [18] S. Sekar, D. Kim, S. Lee, *Nanomaterials*, **10**, 2020, 1382.
- [19] L. Yang, L. Chen, D. Yang, X. Yu, H. Xue, *J. Power Sources*, **392**, 2018, 23.
- [20] A. Munir, T.U. Haq, A. Qurashi, H.U. Rehman, A. Ul-Hamid, I. Hussain, *ACS Appl. Energy Mater.*, **2**, 2019, 363.
- [21] R. Elakkiya, R. Ramkumar, G. Maduraiveeran, *Mater. Res. Bull.*, **116**, 2019, 98.
- [22] J. He, M. Wang, W. Wang, R. Miao, W. Zhong, S.Y. Chen, S. Poges, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 2017, 42676.
- [23] A.A. Daryakenari, B. Mosallanejad, E. Zare, M.A. Daryakenari, A. Montazeri, A. Apostoluk, J.J. Delaunay, *Int. J. Hydrogen Energy*, **46**, 2020, 7263.
- [24] Y. Lei, T. Xu, S. Ye, L. Zheng, P. Liao, W. Xiong, J. Hu, Y. Wang, J. Wang, X. Ren, C. He, Q. Zhang, J. Liu, X. Sun, *Appl. Catal. B*, **285**, 2021, 119809.
- [25] Yang, H. Meng, C. Kong, S. Yan, W. Ma, H. Zhu, F. Ma, C. Wang, Z. Hu, *J. Colloid Interface Sci.*, **599**, 2021, 300.
- [26] L. Lv, Z. Li, K. Xue, Y. Ruan, X. Ao, H. Wan, X. Miao, B. hang, J. Jiang, C. Wang, *Nano Energy*, **47**, 2018, 275.
- [8] M. Siahroudi, A. Ahmadi Daryakenari, Q. Cao, M. Ahmadi Daryakenari, J. Delaunay, H. Siavoshi, F. Molaei, *Int. J. Hydrogen Energy*, **45**, 2020, 30357.
- [9] N. Suen, S. Hung, Q. Quan, N. Zhang, Y. Xu, H. Chen, *Chem. Soc. Rev.*, **46**, 2017, 337.
- [10] X. Chuah, C. Hsieh, C. Huang, D. Senthil Raja, H. Lin, S. Lu, *Electrocatalyst. ACS Appl. Energy Mater.*, **2**, 2018, 743.
- [11] V.D. Silva, T.A. Simoes, J.P.F. Grilo, E.S. Medeiros, D.A. Macedo, *J. Mater. Sci.*, **55**, 2020, 6648.
- [12] Z. Yu, Y. Bai, N. Zhang, W. Yang, J. Ma, Z. Wang, W. Sun, J. Qiao, K. Sun, *J. Alloys Compd.*, **15**, 2020, 155067.
- [13] F. Cheng, X. Fan, X. Chen, C. Huang, Z. Yang, F. Chen, M. Huang, S. Cao, W. Zhang, *Ind. Eng. Chem. Re.*, **58**, 2019, 16581.
- [14] X. Jiang, T. Herricks, Y. Xia, *Nano Lett.*, **2**, 2002 1333.
- [15] N. Akhiruddin, R. Muhammad, Y. Wahab, Z. Ibrahim, *Solid State Phenomena*, **268**, 2017, 249.
- [16] X. Liu, J. Wu, *Electrochim. Acta*, **320**, 2019, 134577.
- [17] C. Mahala, M. Basu, *ACS omega*, **2**, 2017, 7559.