



رشد نانوساختارهای نیکل کبالت سولفید بر فوم نیکل به منظور کاربرد در ابرخازن با کارایی بالا

عمران مرادلو*، هانیه شریف پور

گروه شیمی، دانشکده فیزیک - شیمی، دانشگاه الزهراء، تهران

چکیده: در این پژوهش، نانوساختارهای نیکل کبالت سولفید (S_2NiCo) با روش رسوب گذاری حمام شیمیایی بر فوم نیکل رشد داده شد تا در نهایت، به عنوان الکتروود ابرخازن $S_2NF/NiCo$ با کارایی بالا مورد استفاده قرار گیرد. پس از شناسایی و تعیین ریخت شناسی نمونه ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، رفتار ابرخازنی نمونه های ساخته شده با روش های متفاوت الکتروشیمیایی مانند ولتامتری چرخه ای (CV)، شارژ و دشارژ گالوانوستایی (GCD) و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) بررسی قرار گرفت. مقدار ذخیره ی بار برای الکتروود ابرخازن $S_2NF/NiCo$ در محلول KOH با غلظت ۱/۰ M برابر با $1.0 \text{ cm}^2 \text{ mF}$ در چگالی جریان $1.0 \text{ cm}^2 \text{ mA}$ بدست آمد. با بررسی نمودار EIS، مقاومت در برابر انتقال الکترون (R_{ct}) برابر با $5/5 \Omega$ به دست آمد که نشان می دهد الکتروود مبتنی بر نانوساختار سولفیدی تهیه شده دارای سرعت انتقال الکترون بالایی است.

واژگان کلیدی: نیکل کبالت سولفید، نانوصفحات، ابرخازن، فوم نیکل، سرعت انتقال الکترون، شارژ - دشارژ

moradlou@alzahra.ac.ir

۱- مقدمه

پس در سال های اخیر، به دلیل ظرفیت ویژه ی بالا، چرخه عمر طولانی، چگالی توان بالا، نگهداری ارزان تر، ایمنی، کاربرد در محیط های متفاوت زیستی و حتی درون بدن و مزایای عملکردی بهتر نسبت به باتری ها و سایر ذخیره سازهای انرژی، ابرخازن ها مورد توجه بیشتری قرار گرفته اند [۳-۵]. مواد ابرخازنی مناسب شامل مواد کربنی، بسپارهای رسانا، اکسیدها و سولفیدهای فلزات واسطه هستند. در میان این ترکیبات، الکترودهای مبتنی بر فلزات واسطه، علاوه بر ظرفیت دولایه ی الکتریکی، دارای ظرفیت شبه خازنی مناسبی بوده و قادر به شرکت در واکنش های اکسایش-کاهش برگشت پذیر هستند. اکسیدها و سولفیدهای فلزی می توانند چگالی انرژی بالاتری نسبت به مواد کربنی و پایداری الکتروشیمیایی بهتری نسبت به بسپارهای رسانا برای کاربرد در شبه خازن ها فراهم کنند. آنها نه تنها انرژی را به

انرژی زیرساخت اصلی رشد و توسعه اقتصادی و صنعتی کشورها است. افزایش تقاضای انرژی در جهان و توجه زیست محیطی بی شمار در زمینه ی استفاده از منابع تولید انرژی مرسوم مانند نفت و گاز، لزوم دسترسی به منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره کننده های کارآمد انرژی الکتریکی را بسیار مهم کرده است [۱]. [۲]. از طرف دیگر، منابع انرژی و ذخیره سازهای مبتنی بر واکنش های الکتروشیمیایی مانند باتری ها، ابرخازن ها و پیل های سوختی بخشی اجتناب ناپذیر از مبحث انرژی های پاک است. ابرخازن ها در مقایسه با باتری ها ابزارهایی با چگالی توان بالا و چرخه ی طول عمر بسیار بیشتر هستند و در مقابل، چگالی انرژی آنها کمتر از باتری ها است. همچنین، در مقایسه با یک خازن معمولی، ظرفیت ویژه ابرخازن ها چندین مرتبه بزرگی بالاتر است.

مانند مواد کربنی به صورت لایه دوگانه‌ی الکتروستاتیک ذخیره می‌کنند بلکه در کنار آن واکنش‌های فارادی الکتروشیمیایی بین مواد الکترودی و یون‌ها را در یک پنجره پتانسیلی مناسب انجام می‌دهند [۶]. سولفیدهای فلزات واسطه به دلیل وجود منابع طبیعی، فراوانی، قیمت ارزان، هدایت الکتریکی مناسب، انتقالات اکسایش-کاهش میان حالات متفاوت ظرفیتی و نیز دارا بودن مقاومت دمایی و مکانیکی بالا نسبت به اکسیدهای فلزی به-تازگی به طور وسیعی به‌عنوان مواد الکترودی در ابرخازن‌ها به کار می‌روند [۷]. سولفیدهای فلزی نانوساختار به دلیل انتقال بار سریع در واکنش‌های اکسایش-کاهش برای کاربردهای ابرخازنی مناسب هستند [۸]. سولفیدهای فلزی مانند [۹] CoS، [۱۰] MnS، [۱۱] NiS، [۱۲] MoS₂، [۱۳] ZnS و [۱۴] CoS₂ ترکیب‌های مهمی از مواد سازنده‌ی الکترودی هستند که واکنش-های اکسایش-کاهش برگشت پذیر، ظرفیت تئوری بالا و چرخه-ی عمر طولانی دارند و در ساخت ابرخازن‌ها کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند. در کاربردهای ابرخازنی، ترکیبات سولفیدی دوفلزی نسبت به تک فلزی‌ها دارای مزایایی مانند رسانایی الکتریکی و چگالی انرژی بالاتر هستند. از جمله، می‌توان به [۷] NiCo₂S₄، [۱۵] FeCo₂S₄، [۱۶] CuCo₂S₄، [۱۷] MnCo₂S₄ و [۱۸] NiMoS₂ اشاره کرد که به‌عنوان مواد سازنده‌ی الکترودها در پژوهش‌های به کار رفته‌اند. نیکل کبالت سولفید (NiCoS₂) به‌عنوان یک سولفید فلزی به دلیل واکنش‌های اکسایش-کاهش الکتروشیمیایی مناسب، ظرفیت تئوری ویژه بالا، پایداری محیطی و سیکل‌پذیری مناسب مورد توجه پژوهشگران در زمینه‌ی ساخت الکترودهای ابرخازنی قرار گرفته است [۵].

رسوب‌گذاری حمام شیمیایی (CBD) روش مناسبی برای رشد فیلم نازک اکسید یا سولفید فلزی بر بستر است. در این روش، در یک دمای نه چندان بالا، با قرار دادن بستر در محلول شامل پیش ماده‌ها، تشکیل رسوب و لایه نشانی بر بستر اتفاق می‌افتد. با این روش، فیلم‌های نازک از مواد اکسیدی یا سولفیدی تکی و یا چند جزئی، بیشتر از محلول‌های پیش‌ماده آبی در دمای زیر ۱۰۰ درجه سانتیگراد و بر بسترهای متفاوت تهیه شده‌اند. نکته قابل توجه تاثیر پارامترهای متفاوت مانند دمای محلول، pH محیط و غلظت پیش ماده‌ها بر لایه نشانی است. همچنین، بررسی تعاملات بین بستر و فیلم در حال رشد می‌تواند برای

توجیه پایداری فیلم و کنترل ریخت‌شناسی نانوساختارهای تشکیل شده و نحوه‌ی توزیع فضایی فیلم مورد استفاده قرار گیرد [۱۹]. در این پژوهش، به منظور لایه‌نشانی نیکل کبالت سولفید، از روش رسوب‌گذاری حمام شیمیایی (CBD) استفاده شده است. به منظور ساخت الکترود ابرخازن، از فوم نیکل به‌عنوان بستر مناسب برای رشد نانوساختارهای نیکل کبالت سولفید استفاده شد. نانوساختارهای نیکل کبالت سولفید به روش رسوب‌گذاری حمام شیمیایی بر فوم نیکل رشد داده شدند و پس از ساخت الکترود، ریخت‌شناسی سطح نمونه‌ها با میکروسوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، رفتار الکتروشیمیایی الکترود با روش‌های متفاوت الکتروشیمیایی مانند ولتامتری چرخه‌ای (CV)، شارژ و دشارژ گالوانوستایی (GCD) و طیف-سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) مورد بررسی قرار گرفت.

۲- بخش تجربی

برای سنتز نانوساختارهای نیکل کبالت سولفید با استفاده از روش رسوب‌گذاری حمام شیمیایی (CBD) بر بستر فوم نیکل (NF) جهت تهیه‌ی الکترود NiCo₂S₄/NF انجام یافت. به منظور دستیابی به الکترود بهینه، نانوساختارهای نیکل کبالت سولفید به روش شیمیایی و با قرار دادن فوم نیکل به مدت ۲۰ دقیقه تحت دمای ۷۰ °C در محلول حاوی NiSO₄ با غلظت ۱۰^{-۳} × ۱/۰ مولار، و تیواوره مولار، CoSO₄ با غلظت ۱۰^{-۳} × ۲/۰ مولار، و تیواوره (CH₄N₂S) با غلظت ۱۰^{-۳} × ۲/۰ مولار بر سطح فوم نیکل رشد داده شدند. برای انتخاب الکترود بهینه، تعداد ۷ نمونه با شرایط مندرج در جدول ۱ تهیه شدند. در نهایت، با انجام آنالیزهای الکتروشیمیایی و مقایسه منحنی‌های ولتاموگرام چرخه‌ای و تصاویر SEM نمونه بهینه انتخاب شد.

به منظور انجام آزمون‌های الکتروشیمیایی از الکتروآنالیزورهای مدل PGSTAT 101N و PGSTAT 302N ساخت شرکت Metrohm/Autolab در یک سیستم الکتروشیمیایی سه الکترودی متشکل از الکترود ساخته شده به‌عنوان الکترود کار، صفحه پلاتین (Pt) به‌عنوان الکترود کمکی و الکترود Ag/AgCl (KCl 3.0 M) به‌عنوان الکترود مرجع استفاده شد. برای مشاهده داده‌های بدست‌آمده و بررسی آنها، نرم‌افزار NOVA نسخه‌ی ۲/۱ به کار گرفته شد. برای مشاهده ریخت-

شناسی سطح نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل VEGA3 ساخت شرکت TESCAN استفاده شد.

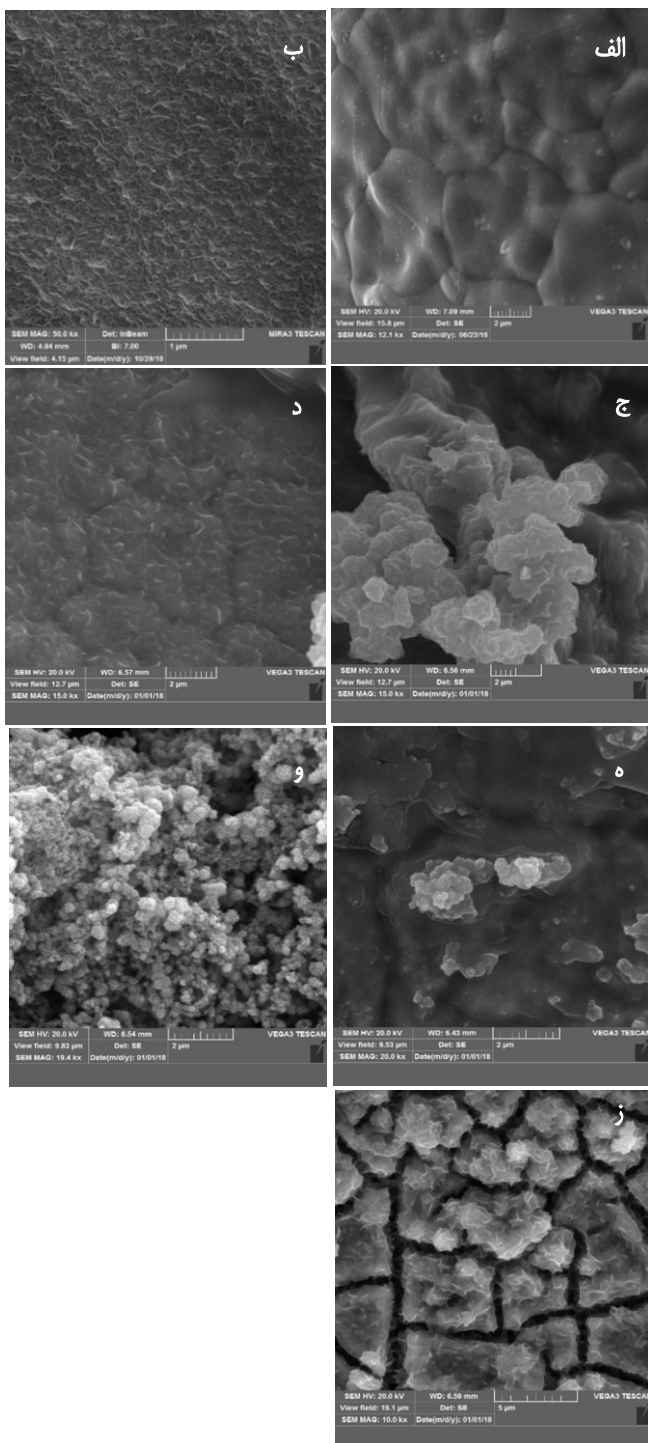
جدول ۱. نمونه‌های NF/NiCo₂S₄ سنتز شده در شرایط متفاوت آزمایشگاهی

نام الکتروود	دمای لایه نشانی (°C)	مدت زمان لایه‌نشانی (min)	غلظت پیش‌ماده (× ۱۰ ^{-۳} M)
NF/ NiCo ₂ S ₄ -۱	۷۰	۵	۱
NF/ NiCo ₂ S ₄ -۲	۷۰	۲۰	۱
NF/ NiCo ₂ S ₄ -۳	۷۰	۴۰	۱
NF/ NiCo ₂ S ₄ -۴	۵۰	۲۰	۱
NF/ NiCo ₂ S ₄ -۵	۹۰	۲۰	۱
NF/ NiCo ₂ S ₄ -۶	۷۰	۲۰	۱۰۰
NF/ NiCo ₂ S ₄ -۷	۷۰	۲۰	۱۰

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریخت‌شناسی سطح الکتروود

برای مشاهده ریخت‌شناسی سطح الکتروودهای S_۲NF/NiCo؛ معرفی شده در جدول ۱ از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. تصاویر SEM الکتروودهای تهیه شده در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به تصاویر SEM مشخص است که مدت زمان لایه‌نشانی ۵ دقیقه به دلیل عدم وجود فرصت کافی در لایه نشانی، ترکیب سولفیدی کمی بر سطح بستر رشد یافته است. از بین نمونه‌های تهیه شده، در الکتروود S_۲NF/NiCo-۲، ترکیب سولفیدی S_۲NiCo؛ دارای ریخت‌شناسی منظمی است (شکل ۱ ب). کاهش دما از دمای ۷۰°C به دمای ۵۰°C در نمونه S_۲NF/NiCo-۴ نسبت به نمونه S_۲NF/NiCo-۲، باعث لایه نشانی مقدار کمتری از ترکیب سولفیدی بر بستر شده است. در مقابل، افزایش دمای لایه‌نشانی در ساخت نمونه S_۲NF/NiCo-۵ به ۹۰°C، ریخت‌شناسی ترکیب لایه‌نشانی شده را تغییر داده است به طوری که در برخی از نقاط سطح، ترکیب به مقدار بیشتری رشد کرده است. تصاویر SEM نشان می‌دهند که رشد ترکیب سولفیدی به صورت منظم و با ریخت‌شناسی نانوصفحه بر سطح الکتروود S_۲NF/NiCo-۲ انجام یافته است.

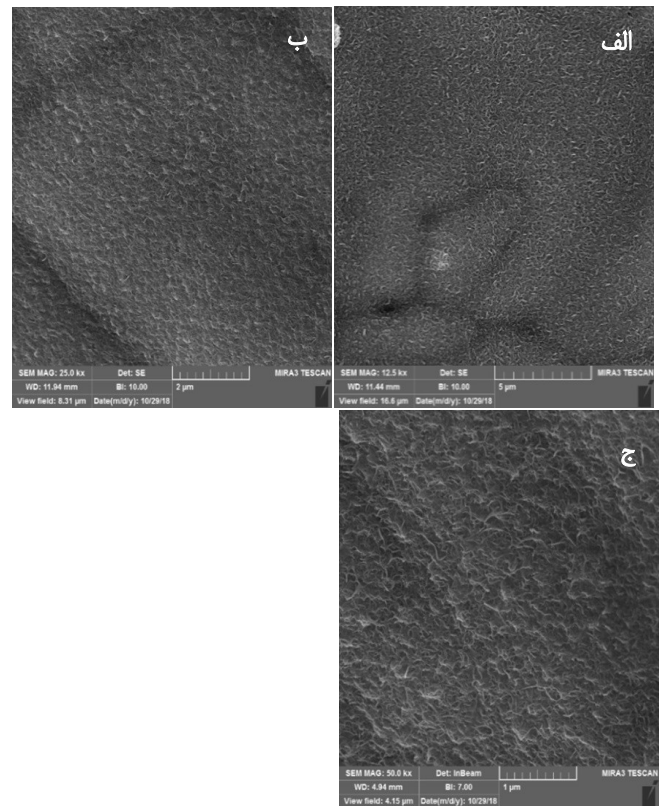


شکل ۱. تصاویر SEM الکتروودهای (الف) S_۲NF/NiCo-۱، (ب) S_۲NF/NiCo-۲، (ج) S_۲NF/NiCo-۳، (د) S_۲NF/NiCo-۴، (ه) S_۲NF/NiCo-۵، (و) S_۲NF/NiCo-۶، (ز) S_۲NF/NiCo-۷ ساخته شده طبق شرایط مندرج در جدول (۱).

به منظور بررسی بهتر ریخت‌شناسی سطح تصاویر SEM سطح الکتروود S_۲NF/NiCo-۲ در بزرگنمایی‌های متفاوت بررسی شد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نیکل کبات سولفید به صورت نانوصفحات کوچک و با یکنواختی بسیار مناسب بر فوم

۳-۲- بررسی رفتار الکتروشیمیایی S_۲NF/NiCo؛

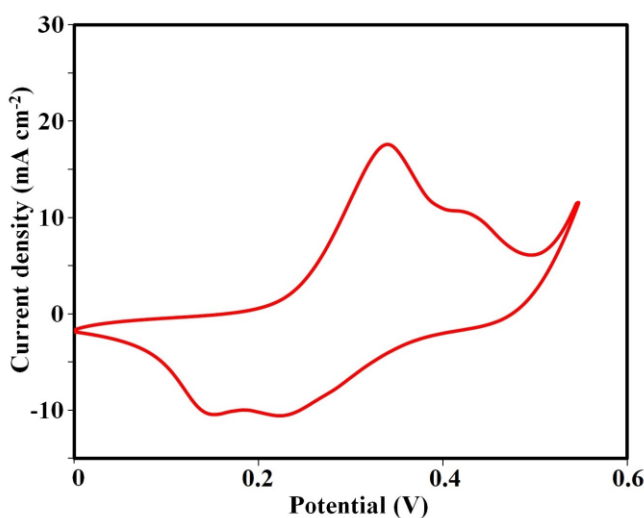
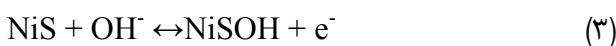
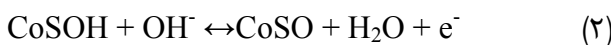
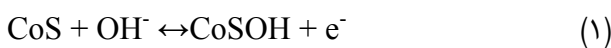
نیکل رشد یافته است. ضخامت نانوصفحات بسیار نازک و به طور میانگین در حدود ۲۰ نانومتر است.



شکل ۲. تصاویر SEM سطح الکتروکود S_۲NF/NiCo-2 در بزرگنمایی های متفاوت (الف) ۱۲,۵۰۰ برابر، (ب) ۲۵ هزار برابر و (ج) ۵۰ هزار برابر.

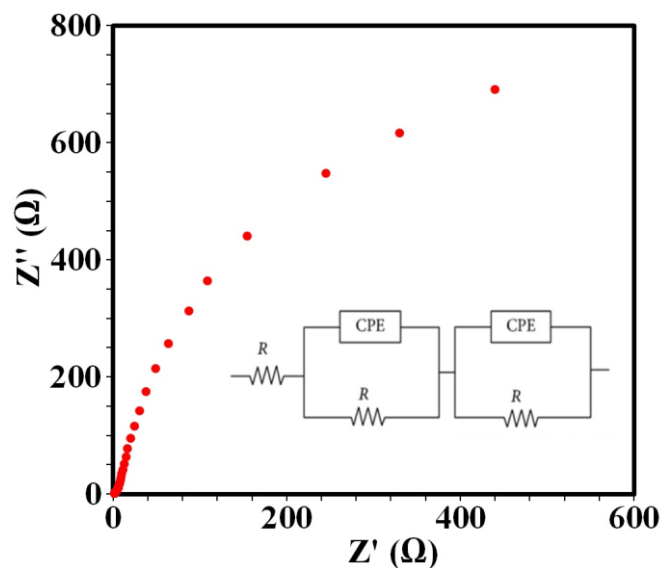
از طرف دیگر، یکنواختی سطح و عدم وجود حفرات بزرگ در بین نانوصفحات، احتمال وجود حجم مرده برای الکترولیت در سطح این الکتروکود را به شدت کاهش می دهد. این موضوع باعث می شود که حرکت یون ها در سطح برای انجام واکنش الکتروشیمیایی سریع و برگشت پذیر باشد. لذا، انتظار می رود که در این الکتروکود به عنوان الکتروکود بهینه، افزایش سطح در دسترس برای تبدلات یونی، انتقال بار را تسهیل کرده و رفتار ابرخازنی الکتروکود مبتنی بر این نانوساختارها را بهبود بخشد. پس، این الکتروکود به عنوان الکتروکود بهینه (با عنوان S_۲NF/NiCo) در بررسی های الکتروشیمیایی در مراحل بعدی مورد استفاده قرار گرفت.

پس از مطالعه ریخت شناسی سطح، رفتار الکتروشیمیایی الکتروکود S_۲NF/NiCo؛ در یک سامانه سه الکترودی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. شکل ۳ منحنی ولتاموگرام چرخه ای بدست آمده برای نمونه ی تهیه شده را در محلول الکترولیت KOH با غلظت ۱/۰ مولار با نرخ روبش ۰/۲ Vs⁻¹ نشان می دهد. همانطور که مشخص است، پیک های اکسایش و کاهش نیکل و کبالت سولفید در محدوده ی پنجره ی پتانسیل انتخابی ۰/۶ V - ۰ مشاهده می شوند. واکنش های اکسایش-کاهش نیکل کبالت سولفید در محلول KOH شامل روابط (۱-۱) تا (۳-۱) است. پیک های اکسایش-کاهش در منحنی ولتامتری چرخه ای (CV) نشان دهنده ی ویژگی شبه خازنی نیکل کبالت سولفید و مربوط به واکنش های زوج اکسایش-کاهش Co³⁺/Co⁴⁺، Co²⁺/Co³⁺ و Ni²⁺/Ni³⁺ است. پیک های اکسایش و کاهش در پتانسیل های ۰/۱۵، ۰/۲۴ و ۰/۴۸ ولت به واکنش اکسایش-کاهش برای الکتروکود S_۲NF/NiCo؛ در محلول ۱/۰ مولار KOH ارتباط دارد [۸ و ۲۰].



شکل ۳. منحنی ولتاموگرام الکتروکود S_۲NF/NiCo؛ در نرخ روبش ۰/۲ Vs⁻¹.

الکتروود نسبت داده می شود. بخش خطی پس از نیمکره در ناحیه فرکانسی پایین نشان دهنده‌ی مقاومت واربرگ و فرایند انتشار یون است. پس از برازش داده‌ها با نرم افزار NOVA، مدار معادل متناسب با نمودار نایکوئیست و مقاومت های محلول و انتقال بار سامانه به دست آمد که در شکل ۵ گزارش شده است. نتایج حاصل از برازش داده‌های امپدانس الکتروشیمیایی در جدول ۲ آمده است.



شکل ۵. نمودار نایکوئیست و مدار معادل الکتروود S₇NF/NiCo در گستره‌ی فرکانس ۱۰^{-۵} Hz – ۰/۱، پتانسیل مدار باز و دامنه پتانسیل ۱۰/۰ mV.

جدول ۲. پارامترهای الکتروشیمیایی مربوط به طیف امپدانس الکتروشیمیایی الکتروود S₇NF/NiCo

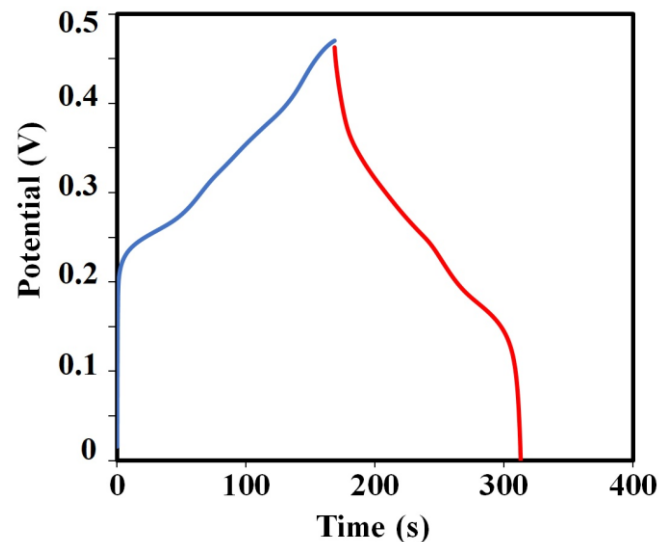
پارامتر (واحد)	R _s (Ω)	C _p (mF)	R _p (Ω)	C _{dl} (mF)	R _{ct} (Ω)
مقدار	۱/۸	۳/۱	۲۱۳۳	۱/۳	۵/۵

مقاومت داخلی (R_s) نشان دهنده‌ی مجموع مقاومت‌های یونی و مقاومت الکتروولیت است که در واقع، مجموع مقاومت ذاتی مواد الکتروفعال و مقاومت تماسی بین مواد الکتروفعال محلول و جمع کننده‌ی جریان است و مقدار آن از بخش خطی نمودار نایکوئیست در ناحیه فرکانسی پایین بدست می‌آید. پارامترهای pC نشان دهنده‌ی مقدار ظرفیت شبه خازنی الکتروود سنتز شده، pR مقدار پلاریزش و dlC مقدار ظرفیت لایه‌ی دوگانه‌ی الکتریکی است. ناحیه نیم‌دایره‌ی نمودار نایکوئیست (نیم‌دایره کوچک) مربوط به واکنش‌های فارادی انجام شده است و قطر آن، مقدار

نمودار شارژ-دشارژ گالوانوستاتی الکتروود S₇NF/NiCo؛ در محلول KOH با غلظت ۱/۰ M در چگالی جریان گذرنده برابر با ۱/۰ mA cm⁻² مطالعه و بررسی شد (شکل ۴). مدت زمان دشارژ به دست آمده برای الکتروود برابر با ۱۵۱/۹ ثانیه است. با توجه به اینکه مساحت سطح الکتروود ۱/۰ cm² است، مقدار بار ذخیره شده در نیم‌چرخه دوم (دشارژ) در این الکتروود براساس رابطه (۴) برابر با ۳۰۳ mF cm⁻² به دست می‌آید.

$$C = \frac{I \Delta t}{\Delta V} \quad (4)$$

در این رابطه، I شدت جریان عبوری از الکتروود (mA)، t مدت زمان دشارژ (s)، A مساحت سطح الکتروود (cm²) و V محدوده ولتاژ موثر (V) است. تقارن مشاهده شده در منحنی شارژ - دشارژ (شکل ۴) نشان دهنده‌ی آن است که همان مقدار انرژی که صرف شارژ الکتروود ابرخازن شده است در مرحله‌ی دشارژ آزاد می‌شود و این نشان می‌دهد که الکتروود ساخته شده رفتار ابرخازنی مناسبی دارد.



شکل ۴. نمودار شارژ - دشارژ الکتروود S₇NF/NiCo؛ در چگالی جریان گذرنده ۱/۰ mA cm⁻².

برای درک دقیق سازوکار انتقال بار در الکتروود بهینه و اندازه‌گیری مقدار مقاومت در برابر انتقال بار، از روش طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) استفاده شد. شکل ۵ نمودار نایکوئیست برای الکتروود بهینه S₇NF/NiCo؛ را در گستره‌ی فرکانس ۱۰^{-۵} Hz – ۰/۱، پتانسیل مدار باز و دامنه‌ی پتانسیل ۱۰/۰ میلی‌ولت نشان می‌دهد. نیم‌کره در ناحیه فرکانس بالا به مقاومت انتقال بار

[3] M. Salanne, B. Rotenberg, K. Naoi, K. Kaneko, P.-L. Taberna, C. P. Grey, B. Dunn & P. Simon, "Efficient storage mechanisms for building better supercapacitors", *Nature Energy* 1, 16070-16078, 2016.

[4] L. Qinghao, L. Wen, L. Zhipeng, N. Jiqiang, Z. Yijun, H. Yong, "Hierarchical MoS₂/NiCo₂S₄@C urchin-like hollow microspheres for asymmetric supercapacitors" *Chemical Engineering Journal*, 380, 122544-122549, 2020.

[5] L. Na, P. Zhenghui, D. Xiaoyu, Y. Jie, X. Guoguang, L. Linge, W. Qi, L. Meinan, Z. Yuegang, "In-situ growth of vertically aligned nickel cobalt sulfide nanowires on carbon nanotube fibers for high capacitance all-solid-state asymmetric fiber-supercapacitors" *Journal of Energy Chemistry*, 41, 209-215, 2020.

[6] Z. Dan-Dan, B. Shu-Juan, Z. Wen-Jia, L. Hu-Lin, "Preparation of hexagonal nanoporous nickel hydroxide film and its application for electrochemical capacitor" *Electrochemistry Communications*, 9, 869-874, 2007.

[7] L. Delong, G. Youning, P. Chunxu, "Facile synthesis of hybrid CNTs/NiCo₂S₄ composite for high performance supercapacitors" *Scientific reports*, 6, 29788-29794, 2016.

[8] D. -Y. Kim, G. S. Ghodake, N. C. Maile, A. A. Kadam, Dae Sung Lee, V. J. Fulari & S. K. Shinde, "Chemical synthesis of hierarchical NiCo₂S₄ nanosheets like nanostructure on flexible foil for a high performance supercapacitor" *Scientific Reports*, 7, 9764-9772, 2017.

[9] G. Pan, W. Yu-Xuan, L. Woon-Ming, L. Hao, L. Li-Min, "CoS nanosheet arrays grown on nickel foam as an excellent OER catalyst" *Journal of Alloys and Compounds*, 723, 772-777, 2017.

[10] K. Vijay S, L. Yong Rok, R. Choon Sup, T. Dirk, M. Bong-Ki, S. Jae-Jin, Modified "chemical synthesis of MnS nanoclusters on nickel foam for high performance all-solid-state asymmetric supercapacitors" *RSC Advances*, 7, 16348-16359, 2017.

[11] Y. Bo, S. Yujie, "Hierarchically porous nickel sulfide multifunctional superstructures" *Advanced Energy Materials*, 6, 1502333-1502338, 2016.

مقاومت انتقال بار iR_t را برای سطح الکتروود بیان می‌کند [۲۱]. مقدار مقاومت محلول و مقاومت در برابر انتقال الکترون برای الکتروود ساخته‌شده به ترتیب برابر با $1/8$ و $5/5$ اهم است. مقادیر مقاومت‌های به دست آمده نسبت به مقادیر گزارش شده برای الکتروودهای مبتنی بر سولفیدهای فلزی مقادیر قابل مقایسه‌ای است. از این رو، با توجه به مقدار ذخیره بار بالا و مقاومت در برابر انتقال الکترون پایین به دست آمده، نتیجه‌گیری می‌شود که الکتروود مبتنی بر نانوساختارهای نیکل کبالت سولفید ساخته شده، رفتار ابرخازنی مناسبی دارد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، نانوساختار نیکل کبالت سولفید بر روی فوم نیکل به روش شیمیایی لایه نشانی شد و رفتار ابرخازنی الکتروود ساخته شده با روش‌های متفاوت الکتروشیمیایی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که الکتروود مبتنی بر نانوساختارهای نیکل کبالت سولفید دارای ظرفیت ویژه بالا و برابر با $mFcm^{-2}$ در چگالی جریان برابر با $1/0 mA cm^{-2}$ و مقاومت در برابر انتقال الکترون پایین و برابر با $5/5 \Omega$ است که نشان می‌دهد الکتروود ابرخازن $S_2NF/NiCo$ ؛ رفتار ابرخازنی مناسبی دارد.

تشکر و قدردانی

از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه الزهراء از این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

۵- مراجع

[1] H. Yan, Z. Jie, W. Di, S. Jiangbo, Z. Li, L. Yanjie, G. Shiqiu, C. Yanbin, "Urchin-like NiCo₂S₄ structures synthesized through a one-step solvothermal process for high-performance supercapacitors", *Particuology*, 45, 66-73, 2019.

[2] Z. Enmin, T. Liangliang, C. Zhengfu, F. Chunping, "Design of NiO flakes@CoMoO₄ nanosheets core-shell architecture on Ni foam for high-performance supercapacitors" *Nanoscale Research Letters*, 14, 221-232, 2019.

asymmetric supercapacitors" Scientific reports, 6, 38620-38629, 2016.

[21] C. Jinbing, L. Yang, Q. Kangwen, Y. Hailong, X. Jinyou, H. Lei, L. Xianming, L. Jingshan, K. Jang-Kyo, L. Yongsong, "Hierarchical core/shell NiCo₂O₄@NiCo₂O₄ nanocactus arrays with dual-functionalities for high performance supercapacitors and Li-ion batteries" Scientific reports, 5, 12099-12105, 2015.

[12] F. Bamidele D, W.Tomasz, S. Ian I, "Electrodeposition of MoS₂ for charge storage in electrochemical supercapacitors" Journal of the Electrochemical Society, 163, 568-574, 2016.

[13] K. Sabira, P. Saheeda, El. Anila, S. Jayalekshmi, "Highly luminescent and free-standing, PVDF/doped ZnS nanocomposite films for flexible device applications" Journal of Luminescence, 188, 490-496, 2017.

[14] S. Aatreyee, Ch. Amit K, B. Supriya, K. Satheesh, "novel hydrothermal synthesis of CoS₂/MWCNT nanohybrid electrode for supercapacitor: a systematic investigation on the influence of MWCNT" The Journal of Physical Chemistry C, 122, 18237-18246, 2018.

[15] D. Cuifen, Y. Lishan, Y.Chunming, S. Ping, Z. Liping, W. Zhiyu, W. Chunhui, Li.Junhua, Q. Dong, "Spinel FeCo₂S₄ nanoflower arrays grown on Ni foam as novel binder-free electrodes for long-cycle-life supercapacitors" Applied Surface Science, 428, 148-153, 2018.

[16] Ch. Liang, Z. Yinze, Zh. Yu, G.Yanmin, "Facile synthesis of ultrathin CuCo₂S₄ nanosheets for high-performance supercapacitors" International Journal of Electrochemical Science, 13, 1343-1354, 2018.

[17] E. Abdelnaby M, Li. Xin, Zh. Hong, Hu. Yating, Ho. Kuan Hung, G. Cao, W. John, "Controllable MnCo₂S₄ nanostructures for high performance hybrid supercapacitors" Journal of Materials Chemistry A, 5, 7494-7506, 2017.

[18] E.S. Güler, E. Konca, and İ. Karakaya, "Effect of electrodeposition parameters on the current density of hydrogen evolution reaction in Ni and Ni-MoS₂ composite coatings" Int. Journal of Electrochemical Science, 8, 5496-5505, 2013.

[19] De. Mark R, B. Luciana Pitta, P. Harshil. B. Joachim, "Chemical bath deposition, in Chemical solution deposition of functional oxide thin films" Springer. p. 319-339, 2013.

[20] Hu. Yuanyuan, Sh. Tielin, J. Shulan, Ch. Siyi, T. Xiangxu, Zh. Yan, Li. Guanglan, Tang. Zirong, "Enhanced cycling stability of NiCo₂S₄@ NiO core-shell nanowire arrays for all-solid-state



Growth of NiCo₂S₄ nanostructures on nickel foam for its application as high performance supercapacitor electrode

Omran Moradlou*, Hanieh Sharifpour

Department of Chemistry, Faculty of Physics and Chemistry, Alzahra University, P.O. Box: 1993893973, Tehran, Iran

Abstract: In this work, NiCo₂S₄ nanostructures were grown on nickel foam by using chemical bath deposition (CBD) method for the construction of high performance supercapacitor electrode. The morphology of the samples was characterized with scanning electron microscopy (SEM) and the supercapacitive behavior of the electrode was investigated by various electrochemical techniques including cyclic voltammetry (CV), Galvano static charge-discharge (GCD) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The fabricated electrode provides a specific capacitance of 303 mF cm⁻² at 1 mA cm⁻² in 1.0 M KOH. Electron transfer resistance (R_{ct}) of the electrode was studied by EIS and obtained to be 5.5 Ω . The electrochemical performance parameters of the fabricated electrode show that the proposed metal sulfide-based composite is an appropriate electrode for the supercapacitor applications.

Keywords: Nickel cobalt sulfide, nanoplates, supercapacitor, nickel foam, charge transfer rate, charge-discharge