

اصلاح هدفمند و مهندسی شده فاصله بین لایه‌های نانوساختار کبالت دی‌سلنید (CoSe₂) با ترکیب آلی تترا-اتیلن پنتا آمین جهت استفاده در سامانه‌های ذخیره انرژی با عملکرد بالا

فرزاد روحی^{۱،۲} و حبیب اله کاظمی^{۱،۲}*

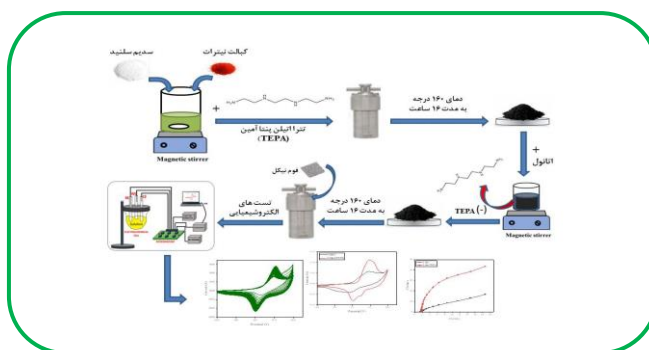
^۱دانشکده شیمی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، کدپستی ۴۵۱۳۷-۶۶۷۳۱، ایران
^۲مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم پژوهشات و فناوری، ایران

تاریخ پذیرش: ۳ مرداد ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: ۸ اردیبهشت ۱۴۰۴

چکیده: ابرخازن‌ها به عنوان یکی از منابع ذخیره کننده انرژی به دلیل چگالی توان بالا و پایداری چرخه‌ای بیشتر از باتری‌ها توجه زیادی را جذب کرده‌اند. به دنبال انقلاب گرافن، ساختارهای شبیه گرافن از دیگر مواد معدنی لایه‌ای به ویژه نانوصفحه‌های بسیار نازک از دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه با لایه‌های تک یا چند اتمی در جامعه علمی توجه‌ها را به خود جلب کرد. در این پژوهش، نانوساختارهای کالکوژنید کبالت دی‌سلنید توسط تترا-اتیلن پنتاآمین (TEPA) مهندسی ساختار شد و با روش آب گرمایی در دمای ۱۶۰ درجه سانتی گراد روی بستر فوم نیکل تثبیت گردید و به عنوان ماده الکترودی در ابرخازن‌ها مورد استفاده قرار گرفت. تترا-اتیلن پنتاآمین با دارا بودن ساختار خطی و گروه‌های آمین، در حین رشد نانوساختار در بین لایه‌های دی‌کالکوژنید کبالت دی‌سلنید قرار می‌گیرد و پس از سنتز، با خارج کردن از ساختار دی‌کالکوژنید، موجب افزایش فاصله بین لایه‌های می‌شود. این ویژگی به ورود و خروج آسان تر یون‌های الکتروولیت کمک کرده و باعث افزایش ظرفیت ویژه و پایداری چرخه‌ای می‌شود. همچنین تصویرهای به دست آمده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دهنده ایجاد حفره‌ها و لایه‌هایی در نانوساختار هستند که این ویژگی ساختاری، باعث افزایش سطح تماس الکتروولیت و ماده فعال، تسهیل انتقال یون‌ها و بازده الکتروشیمیایی بیشتر می‌شود. در نهایت، کالکوژنید سنتز شده مورد بررسی‌های الکتروشیمیایی قرار گرفت و توانست ظرفیت ویژه ۱۳۱۰ F/g را در چگالی جریان ۲ A/g ارائه دهد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب تترا-اتیلن پنتاآمین می‌تواند روشی مؤثر برای بهبود عملکرد الکترودهای مورد استفاده در ابرخازن‌های با کارایی بالا جهت ذخیره سازی انرژی باشد.

کلید واژه: ابرخازن، ذخیره انرژی، کالکوژنید، فاصله بین لایه‌ای، نانوساختارها



جمله‌ی آن‌ها می‌توان به پایان‌پذیر بودن این منابع با توجه به آهنگ مصرف کنونی، مشکلات آلودگی‌های محیط‌زیستی مانند افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای و همچنین افزایش قیمت جهانی این منابع اشاره کرد [۱ و ۲]. به همین دلیل در سال‌های اخیر،

۱- مقدمه

امروزه منبع اصلی تأمین انرژی بیشتر جوامع بشری، استفاده از سوخت‌های فسیلی مانند نفت و گاز است. مصرف سوخت‌های فسیلی مشکلات زیادی را به همراه دارد که از

نقش مهمی در بهبود انتقال یون‌ها و افزایش سطح فعال الکتروشیمیایی ایفا کند. استفاده از ترکیب‌های آلی نظیر تترااتیلن پنتامین به عنوان اصلاح کننده، امکان کنترل فاصله بین لایه‌ها و بهبود رفتار الکتروشیمیایی مواد کالکوژنیدی را فراهم می‌کند. این اصلاحات می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد الکترونیکی و ذخیره انرژی در ابرخازن‌ها و باتری‌های یون فلزی را بهبود دهد [۲۰ و ۲۱].

بسیاری از پژوهش‌های گذشته، بر روی سنتز مواد کالکوژنیدی با ساختار نانو و بهبود رسانایی آن‌ها متمرکز بوده است، اما کمتر به بهینه‌سازی کنترل شده فاصله بین‌لایه‌ای و تأثیر ترکیب‌های آلی بر نفوذپذیری یون‌ها و افزایش مکان‌های فعال پرداخته‌اند [۲۵-۲۲].

در مقایسه با مطالعه‌های پیشین، این پژوهش با تمرکز بر مهندسی هدفمند فاصله بین‌لایه‌ای در نانو ساختارهای کالکوژنید کبالت دی‌سلنید گامی فراتر در بهبود عملکرد الکترونیکی ابرخازن برداشته است. به این ترتیب که با استفاده از تترااتیلن پنتامین به عنوان عامل تنظیم کننده فاصله بین لایه‌ای در نانو ساختارهای کبالت دی‌سلنید، به بررسی و ارزیابی تأثیر اصلاحات بر خواص الکتروشیمیایی پرداخته شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند افق‌های جدیدی برای طراحی نانو ساختارهای بهینه جهت کاربردهای ذخیره‌کننده انرژی با کارایی بالا فراهم آورد. همچنین توسعه سامانه‌های ذخیره انرژی به استفاده بیشینه و مؤثر از منابع انرژی موجود کمک کرده که متعاقباً اقتصاد جامعه را بهبود می‌بخشد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد شیمیایی و دستگاه‌ها

اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی با استفاده از دو دستگاه پتانسیواستات-گالوانواستات میکرو اتولب مدل پی‌جی‌استات ۱۰۱ ساخت کشور هلند و دستگاه زانر/زنوم ساخت کشور آلمان با قابلیت انجام آنالیز امپدانس الکتروشیمیایی و ولتاژتری چرخه‌ای، انجام شده است. بررسی‌های ریخت و ساختار الکترودها با استفاده از طیف زیرقرمز، میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف پراش انرژی پرتو ایکس انجام شد. تمام مراحل مطالعه‌های الکتروشیمیایی در دمای محیط آزمایشگاه انجام شده است. مواد شیمیایی مورد استفاده شامل: فوم نیکل، نمک کبالت نیترات شش آبه و سدیم سلنید (خریداری شده از شرکت سیگما-آلدریج)، تترااتیلن پنتامین و پتاسیم هیدروکسید (خریداری شده از شرکت مرک آلمان) است که بدون نیاز خالص‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. برای تهیه محلول‌ها از آب دو بار تقطیر استفاده شد.

نیاز به سامانه‌های ذخیره کننده انرژی با عملکرد بالا مانند ابرخازن‌های الکتروشیمیایی، به طور چشمگیری افزایش یافته است. مواد با ساختار نانومتری، به دلیل خواص منحصر به فردشان مانند سطح ویژه بالا، هدایت الکترونیکی و نفوذپذیری مطلوب به عنوان یکی از مواد کلیدی در این زمینه شناخته می‌شوند [۳ و ۴]. به دنبال انقلاب گرافن، ساختارهای مشابه گرافن به ویژه دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه با لایه‌های تک یا چند اتمی توجه قابل ملاحظه‌ای را در انواع ابزارهای ذخیره سازی انرژی مانند پیل‌های سوختی، پیل‌های خورشیدی، حسگرها، واکنش‌های احیای هیدروژن به عنوان کاتالیست، باتری‌های یون لیتیوم و ابرخازن‌ها به خود جلب کرده‌اند [۵-۸]. سنتز کالکوژنیدهای لایه‌ای شبیه گرافن به دو دسته تقسیم می‌شود: (۱) روش‌های بالا به پایین بر اساس لایه‌لایه کردن کالکوژنیدهای توده‌ای با استفاده از لایه برداری مکانیکی، لایه برداری و تداخل شیمیایی لیتیم، تراش الکتروشیمیایی همراه با تداخل لیتیم و لایه برداری لیزری می‌باشد. (۲) روش‌های پایین به بالا مانند تهیه شیمیایی محلول (به عنوان مثال آب گرمایی و حلال گرمایی)، روش شیمیایی تر و روش رسوب بخار شیمیایی می‌باشد [۹-۱۲].

در میان این مواد، کالکوژنیدهای فلزی مانند کبالت دی‌سلنید (CoSe_2) به دلیل خواص برجسته‌ای مانند ظرفیت ویژه بالا، پایداری شیمیایی، قیمت ارزان، فراوانی عناصر و هدایت الکترونیکی مناسب مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه لایه‌ای شامل نظم هگزگونالی از اتم‌های فلزات واسطه گروه ۶ که بین دو لایه از اتم‌های کالکوژن، مانند S و Se و Te ساندویچ شده است [۱۵-۱۳].

دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه با فرمول MX_2 ($\text{M}=\text{Mo}, \text{Co}$ و $\text{X}=\text{S}, \text{Se}$) با ساختارهای لایه به لایه به دلیل ویژگی‌های منحصر بفردشان بسیار مورد توجه هستند. در این ترکیب‌ها اتم فلزی بین دو کالکوژن فلزی به صورت ساندویچی به وسیله پیوند قوی کوالانسی قرار گرفته است. در حالی که تک‌لایه‌های آن‌ها به وسیله نیروهای ضعیف و اندروالسی روی هم انباشته شده‌اند، که اجازه می‌دهد برهمکنش‌های مختلف اتمی بین لایه‌ها انجام شود. این ویژگی ساختاری باعث می‌شود دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه لایه به لایه، یکی از مواد میزبان بسیار امیدوارکننده برای برهمکنش‌های اتمی باشد. بنابراین، دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه لایه‌ای شده کاربرد زیادی در زمینه ذخیره سازی انرژی دارند. با این وجود، محدودیت‌هایی مانند تغییرات حجمی در حین شارژ و دشارژ، تجمع نانو ذرات، کاهش پایداری چرخه‌ای و نفوذپذیری یونی ناکافی در ساختارهای کالکوژنیدی، نیازمند اصلاحات مهندسی شده برای بهبود عملکرد آن است [۱۶-۱۹].

یکی از راهکارهای نوین برای بهینه سازی این نانو ساختارها، تنظیم هدفمند فاصله بین لایه‌ای است که می‌تواند

الکتروشیمیایی شامل ولتامتری چرخه‌ای، شارژ-دشارژ گالوانوستاتیک و مطالعه‌های امپدانس الکتروشیمیایی توسط سامانه سه الکترودی شامل الکتروود مرجع $Ag/AgCl/KCl_{sat}$ ، الکتروود کار (کالکوژنید اصلاح ساختار شده $CoSe_2$) و الکتروود پلاتین با سطح بزرگ به عنوان الکتروود کمکی در محلول ۳ مولار KOH مورد بررسی قرار گرفت. مقدار وزن ماده الکترودی نشاندهنده شده بر روی الکتروود به روش توزین ۱/۱ میلی‌گرم به-دست آمد.

۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- بررسی‌های ساختاری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از تتراتیلن پنتامین، به عنوان عامل تنظیم کننده فاصله بین لایه‌ای در نانوساختارهای کبالت دی‌سلنید، به طور قابل توجهی خواص الکتروشیمیایی این مواد را بهبود می‌دهد. داده‌های ولتامتری چرخه‌ای و امپدانس الکتروشیمیایی بیانگر کاهش مقاومت انتقال بار و افزایش سطح فعال در دسترس الکتروشیمیایی است که به دلیل اصلاح موفقیت‌آمیز ساختار نانومتری و تنظیم هدفمند فاصله بین لایه‌ها می‌باشد. همچنین، بررسی‌های ریخت شناسی با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که ساختار اصلاح شده دارای نظم بهتری بوده و مساحت سطح بیشتری برای واکنش‌های الکتروشیمیایی فراهم کرده است که در ادامه نتایج این بررسی‌ها ارائه شده است. مقایسه نمونه‌های اصلاح شده با نمونه‌های اصلاح نشده، افزایش قابل توجه ظرفیت ویژه و پایداری چرخه‌ای در طول فرایندهای شارژ-دشارژ و همچنین پایداری حرارتی در آنالیزهای دمایی و ساختاری را نشان می‌دهد. برای اطمینان یافتن از تشکیل نانوساختار دی‌کلکوژنید $CoSe_2$ در حضور ماده جداکننده تتراتیلن پنتامین، طیف زیرقرمز نمونه ثبت شد که نتایج آن در شکل ۱ نشان داده شده است. در این طیف، نوار $709/53 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاش کششی CH_2 می‌باشد که به ساختار زنجیره‌ای تتراتیلن پنتامین نسبت داده می‌شود، نوار موجود در $1614/49 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاش کششی CoO ، از تشکیل پیوندهای فلز-اکسیژن ناشی از اکسایش سطحی کبالت در ساختار نتیجه می‌شود. نوار موجود در $1721/68 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به گروه‌های آمینی NH_2 بوده و بیانگر اتصال احتمالی تتراتیلن پنتامین به ساختار $CoSe_2$ می‌باشد. همچنین، نوارهای موجود در $3257/86$ ، $3387/67$ و $3531/53 \text{ cm}^{-1}$ نیز به ترتیب به دلیل وجود گروه‌های C-N و N-H می‌باشد که تأییدی بر حضور تتراتیلن پنتامین و برهم‌کنش آن با سطح نانوساختارهای کبالت دی‌سلنید است.

۲-۲- سنتز نانوساختار کبالت سلنید

در ابتدا، ۲۵۰ میلی‌گرم کبالت نیترات شش آب و ۱۷۳ میلی‌گرم سدیم سلنید در مقدار مشخصی آب مقطر در یک بشر با هم مخلوط شدند. در مرحله‌ی بعد، نسبت ۲ به ۱ از محلول ماده تتراتیلن پنتامین نسبت به آب تهیه شد. در ادامه کار محلول تهیه شده آرام آرام به مخلوط کبالت نیترات و سدیم سلنید اضافه شد و مخلوط حاصل به مدت یک ساعت بر روی هم زن به هم زده شد. سپس این محلول به یک اتوکلاو منتقل و به مدت ۱۶ ساعت و در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد در داخل آن قرار داده شد. در ادامه رسوب حاصل چندین بار با مقادیر زیاد آب مقطر و سپس اتانول شستشو داده شد. در نهایت رسوب به دست آمده در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت خشک شد.

۳-۲- سنتز نانوساختار کبالت سلنید مهندسی شده

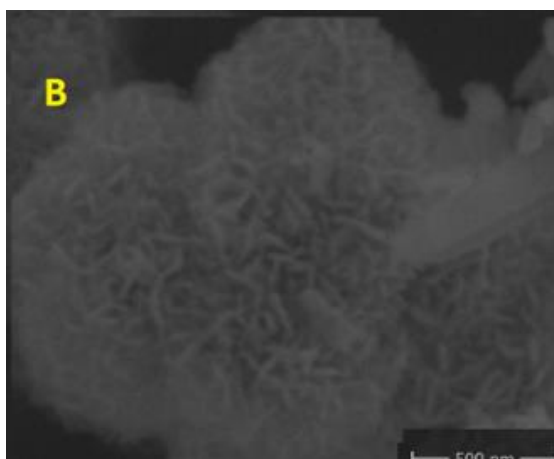
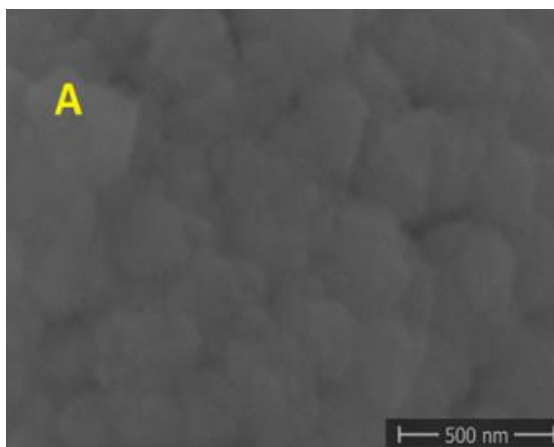
کبالت دی سلنید به روش آب گرمایی سنتز شد. به رسوب حاصل ۵۰ میلی لیتر اتانول اضافه و در دمای ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه حرارت داده شد تا ماده آلی تتراتیلن پنتامین خارج شود. همچنین برای اطمینان از خارج شدن تتراتیلن پنتامین، محلول کلونییدی کبالت دی‌سلنید و اتانول به مدت ۱۰ دقیقه در حمام فراصوت قرار داده شد. در ادامه‌ی کار، رسوب صاف و به مدت ۶ ساعت در آن خلاء خشک شد. در این مرحله نانوساختار کالکوژنید کبالت دی‌سلنید مهندسی شده به دست آمد [۲۰].

۲-۴- آماده سازی بستر فوم نیکل

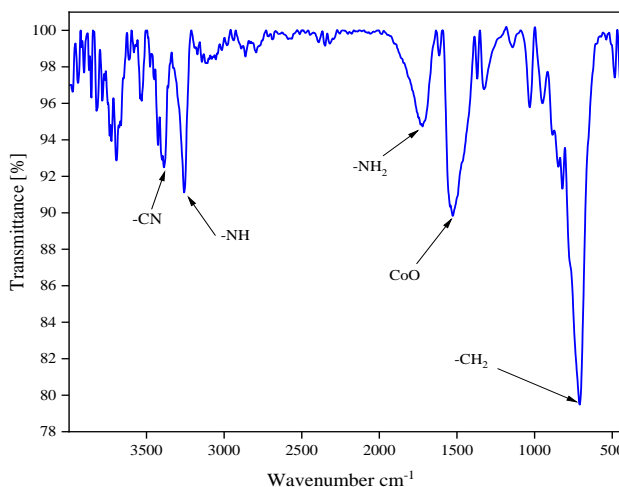
ابتدا فوم نیکل در ابعاد 1×1 سانتی‌متر برش و سپس الکتروود با استفاده از حمام فراصوت جاوی محلول هیدروکلرید اسید ۱ مولار به مدت ۵ دقیقه شستشو داده شد. در ادامه، با استفاده از اتانول و استون و در نهایت با آب مقطر و در شرایط یکسان با مراحل قبلی شستشو داده شد تا الکتروود آماده‌ی استفاده به عنوان بستر الکتروود ابرخازنی باشد.

۲-۵- آماده سازی الکتروود کار

رسوب کبالت دی‌سلنید به دست آمده در مرحله قبل به اتوکلاو منتقل و دو قطعه الکتروود فوم نیکل آماده شده به آن اضافه شد. اتوکلاو در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۶ ساعت در داخل آن قرار داده شد تا نانوساختار کبالت دی سلنید مهندسی شده بر روی فوم نیکل رسوب کند. در این مرحله الکتروود کبالت دی‌سلنید به عنوان الکتروود کار آماده شد. بررسی های



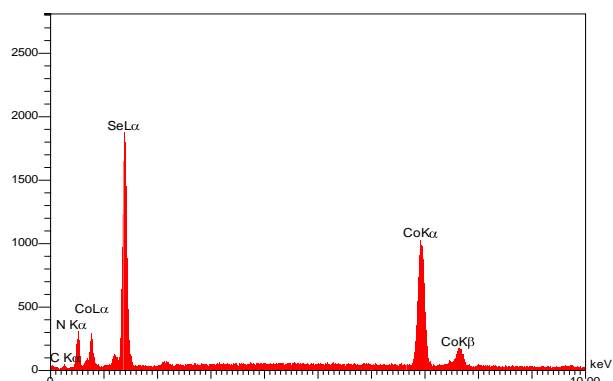
شکل ۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به کبالت دی‌سلنید: (A) قبل از تاثیر فاصله دهنده لایه‌ها و (B) بعد از مهندسی ساختار با تتراتیلین پنتامین.



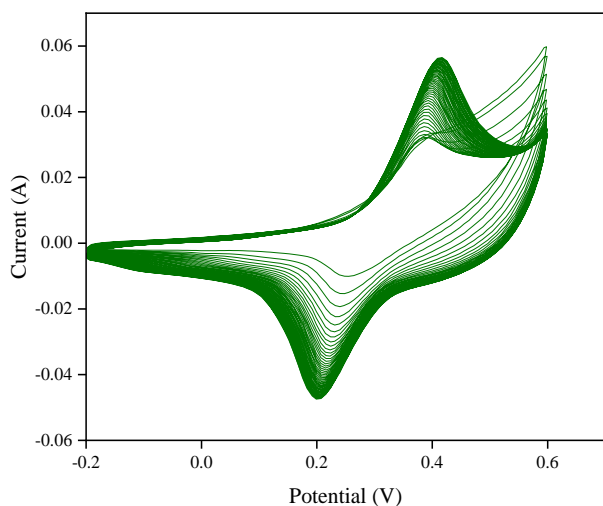
شکل ۱. طیف زیرقرمز مربوط به نانوساختار کالکوژنید کبالت دی‌سلنید اصلاح شده با تتراتیلین پنتامین.

در ادامه بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوساختار کالکوژنید کبالت دی‌سلنید اصلاح ساختار شده، توسط ماده تتراتیلین پنتامین انجام شد. شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوساختار کالکوژنید CoSe_2 را قبل و بعد از زمانی که از جداکننده تتراتیلین پنتامین استفاده شد، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نانوساختارهای کبالت دی‌سلنید سنتز شده در تصویر B در حضور ترکیب آلی تتراتیلین پنتامین نسبت به تصویر A که از ترکیب آلی استفاده نشده است، دارای ساختار لایه به لایه منظم شده است. که این یکی از ویژگی‌های مهم این نانوساختارها است. همچنین این نانومواد با داشتن لایه‌های منظم، باعث افزایش سطح فعال و ورود آسان‌تر یون‌های الکترولیت به داخل نانوساختار می‌شود که این امر موجب افزایش ظرفیت ابرخازن خواهد شد.

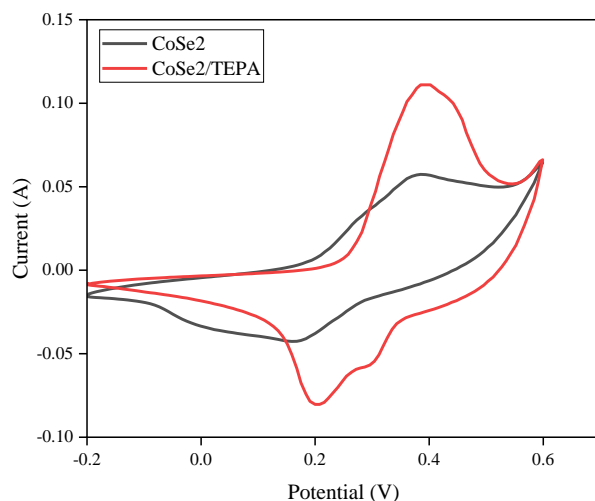
برای اطمینان یافتن از تشکیل موفق نانوساختار کالکوژنید کبالت دی‌سلنید مهندسی‌شده با تتراتیلین پنتامین، آنالیز پراش پراش انرژی پرتو ایکس مورد استفاده قرار گرفت که نتایج مربوط به آن در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود وجود عناصر کبالت، سلنیم، نیتروژن و کربن اثبات کننده تشکیل نانوساختار مورد نظر است. وجود عناصر کربن و نیتروژن دلیلی برای اثبات وجود تتراتیلین پنتامین در نانوساختار می‌باشد.



شکل ۳. طیف انرژی پرتو ایکس نانوساختار کالکوژنید کبالت دی‌سلنید مهندسی شده با تتراتیلین پنتامین.



شکل ۳. منحنی ولتامتری چرخه‌ای فعال سازی کبالت دی‌سلنید مهندسی شده با تتراتیلین پنتاآمین در سرعت روبش ۵۰ میلی ولت بر ثانیه.



شکل ۴. منحنی مقایسه ولتامتری چرخه‌ای کبالت دی‌سلنید مهندسی شده با تتراتیلین پنتاآمین و کبالت دی‌سلنید تنها.

همچنین ابرخازن‌های کبالت دی‌سلنید مهندسی شده با تتراتیلین پنتاآمین و کبالت دی‌سلنید تنها به وسیله طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل ۶، مقاومت انتقال بار در ابرخازن کبالت دی‌سلنید مهندسی شده بسیار کمتر از کبالت دی‌سلنید اصلاح نشده است. این کاهش مقاومت بیانگر تسهیل انتقال الکترون‌ها در سطح الکتروود و بهبود

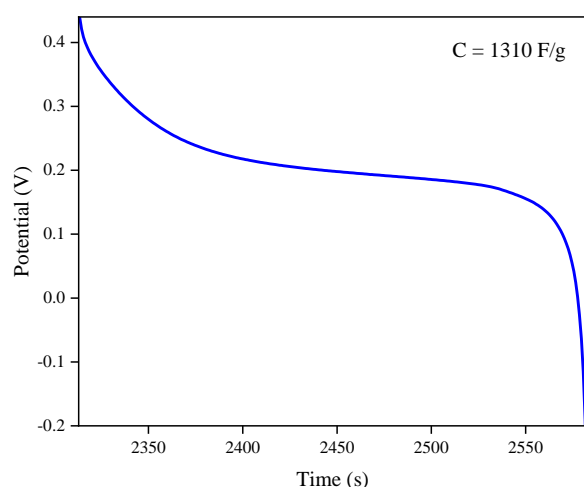
۳-۲- بررسی‌های الکتروشیمیایی

سامانه سه الکتروود شامل الکتروود مرجع نقره/نقره کلرید، الکتروود کمکی پلاتین و الکتروود کار (کالکوژنید کبالت دی‌سلنید مهندسی شده با ترکیب آلی آلکیل آمین تتراتیلین پنتا آمین در محلول ۳ مولار پتاسیم هیدروکسید می‌باشد.

برای فعال سازی الکتروود کبالت دی‌سلنید در حضور جداکننده تتراتیلین پنتا آمین، ولتامتری چرخه‌ای در سرعت روبش ۵۰ میلی‌ولت بر ثانیه و در ۵۰ چرخه گرفته شد. با توجه به شکل ۴ با افزایش زمان میزان جریان و مساحت سطح افزایش پیدا کرد. این افزایش مساحت سطح در کالکوژنید مهندسی شده نشان دهنده افزایش تعداد مکان‌های فعال سطحی است که می‌تواند به دلیل بازآرایی تدریجی یا فعال تر شدن ساختار سطحی کبالت دی‌سلنید باشد. به ویژه حضور تتراتیلین پنتاآمین می‌تواند ساختار کالکوژنید را پایدار کند که منجر به در دسترس بودن تعداد بیشتری از مکان‌های فعال برای انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی می‌شود. همچنین، تتراتیلین پنتاآمین باعث بهبود نفوذپذیری یون‌های الکتروولیت به سطح الکتروود و تسهیل ورود و خروج یون در الکتروود می‌شود و در نتیجه ظرفیت را بالا می‌برد.

برای مقایسه رفتار الکتروود نانوساختار کالکوژنید کبالت دی‌سلنید در حضور جدا کننده تتراتیلین پنتا آمین و الکتروود کبالت دی‌سلنید تنها روش ولتامتری چرخه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت و مساحت سطح زیر نمودار برای این الکتروودها محاسبه شد. همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، جریان و مساحت سطح زیر نمودار الکتروود مهندسی شده تا حدود ۱/۵ برابر افزایش پیدا کرد. این افزایش تأیید کننده اثر تتراتیلین پنتاآمین بر لایه‌های کالکوژنید کبالت دی‌سلنید است. به طور کلی، مقایسه نتایج ولتامتری چرخه‌ای حاکی از آن است که استفاده از تتراتیلین پنتاآمین در مهندسی ساختار کبالت دی‌سلنید، نقش مهمی در بهبود دسترسی به مکان‌های فعال، افزایش انتقال یون‌ها و ارتقاء کلی بازده الکتروشیمیایی الکتروود ایفا کرده است.

طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و ولتامتری چرخه‌ای به آن‌ها اشاره شد، از جمله: افزایش سطح فعال در اثر مهندسی ساختار، بهبود رسانایی الکتریکی و تسهیل نفوذ یون‌ها به درون ساختار الکتروود. افزون بر این، پایداری ساختار در طی چرخه‌های شارژ و دشارژ، از اتلاف انرژی جلوگیری کرده و موجب حفظ عملکرد خازنی در طول زمان شده است. در مجموع، نتایج آزمون شارژ-دشارژ مؤید این نکته است که مهندسی ساختار با تتراتیلن پنتاآمین توانسته ظرفیت ذخیره سازی انرژی در کبات دی‌سلنید را به شکل چشم‌گیری بهبود دهد.

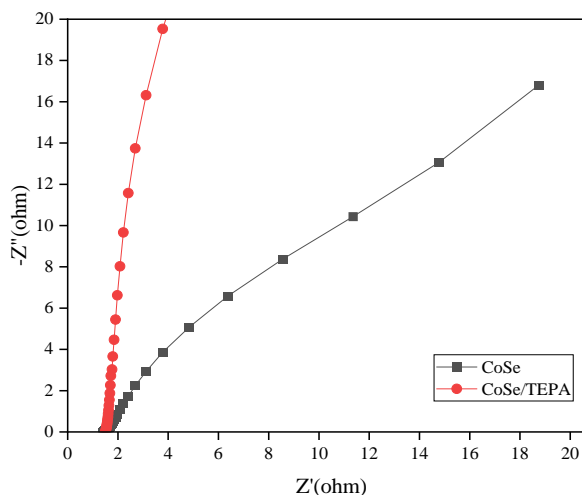


شکل ۷. نمودار گالوانواستاتیک دشارژ کبات دی‌سلنید مهندسی شده با تتراتیلن پنتاآمین.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که مهندسی هدفمند فاصله بین لایه‌ای در نانوساختارهای کالکوزنیدی، با استفاده از ترکیب‌های آلی مانند تتراتیلن پنتاآمین، با منظم کردن فاصله بین لایه‌ای که باعث ورود و خروج راحت‌تر یون‌های الکتروولیت به درون نانوساختار یک راهکار مؤثر برای افزایش ظرفیت ابرخازن و بهبود بازده در سامانه‌های ذخیره‌کننده انرژی است. این نتایج می‌تواند به طراحی مواد و اصلاح آن‌ها برای استفاده در ابرخازن‌ها و باتری‌ها با کارایی بالاتر کمک کند. برای پژوهشات آینده، بررسی اثر سایر ترکیب‌های آلی با ساختار و طول زنجیره متفاوت بر روی عملکرد الکتروود و همچنین مطالعه اثر هم‌زمان متغیرهای مختلف از جمله نوع الکتروولیت و انواع جداکننده‌های آلی برای درک بهتر سازوکارهای بهبود عملکرد و بهینه‌سازی

ورود و خروج یون‌های الکتروولیت است. همچنین شیب خط واربرگ مربوط به آن نیز به زاویه ۹۰ درجه نزدیکتر است. این رفتار نشان‌دهنده نفوذ سریع‌تر یون‌های الکتروولیت به داخل ساختار الکتروود و تاییدی بر رفتار شبه‌خازنی یا نزدیک به خازن ایده‌آل است. در مقابل، الکتروود بدون تتراتیلن پنتاآمین دارای شیبی کمتر و مقاومت بالاتری است که به دلیل محدودیت‌های نفوذی و انتقال‌کننده بار در آن نمونه است.



شکل ۶. مقایسه رفتار امپدانس الکتروشیمیایی کبات دی‌سلنید مهندسی شده با تتراتیلن پنتاآمین و کبات دی‌سلنید تنها.

در ادامه، مطالعه‌های گالوانواستاتیک شارژ-دشارژ بر روی ابرخازن کبات دی‌سلنید مهندسی شده با تتراتیلن پنتاآمین انجام شد. نمودار دشارژ این ابرخازن در شکل ۷ نشان داده شده است. برای تعیین ظرفیت خازن از معادله ۱ استفاده شد.

$$C = \frac{i(\Delta t)}{m(\Delta v)} \quad (1)$$

که در این معادله، C نشان‌دهنده ظرفیت خازنی، و پارامترهای i ، Δt و Δv به ترتیب بیانگر جریان اعمالی، بازه زمانی دشارژ و بازه پتانسیلی پس از افت اهمی است. با استفاده از این معادله، ظرفیت ویژه 1310 F/g محاسبه شد که ظرفیت نسبتاً بالایی بوده و بیان‌گر توانایی این ماده در ذخیره انرژی است. چنین ظرفیتی را می‌توان به عوامل متعددی نسبت داد که پیش‌تر نیز در تحلیل‌های

- A. Jana, N. K. Shrestha, M. Jalalah, Y. -Y. Noh, S. A. Patil, *Dalt. Trans.* **49**, 14191–14200 (2020).
- [21] S. Kamila, M. Kandasamy, B. Chakraborty, B. K. Jena, *J. Energy Storage* **89**, 111614 (2024).
- [22] K. S. Bhat, S. Shenoy, H. S. Nagaraja, K. Sridharan, *Electrochim. Acta* **248**, 188–196 (2017).
- [23] Y. Song, A. Ran, Z. Peng, W. Huang, B. Huang, X. Jian, C. Mu, *Compos. Part B Eng.* **174**, 107001 (2019).
- [24] N. Ahmed, B. A. Ali, N. K. Allam, *Electrochim. Acta* **396**, 139191 (2021).
- [25] G. Xiao, J. Fan, H. Liao, S. Gao, S. Li, K. Cui, W. -B. Luo, C. -Q. Niu, Z. -S. Chao, *Energy & Fuels* **36**, 5928–5936 (2022).

سامانه‌های ذخیره سازی انرژی پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت‌های معنوی و مالی این کار پژوهشی توسط دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان قدردانی بعمل می‌آورند.

عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، کدپستی ۴۵۱۳۷-۶۶۷۳۱، استان زنجان، شهر زنجان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، دانشکده شیمی. پیام نگار: habibkazemi@iasbs.ac.ir

منابع

- [1] J. Wang, F. Liu, F. Tao, Q. Pan, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* **9**, 27745–27753 (2017).
- [2] J. Yu, X. Gao, Z. Cui, Y. Jiao, Q. Zhang, H. Dong, L. Yu, L. Dong, *Energy Technol.* **7**, 1900018 (2019).
- [3] J. Xu, J. Zhang, W. Zhang, C. Lee, *Adv. Energy Mater.* **7**, 1700571 (2017).
- [4] Z. Shi, X. Qi, Z. Zhang, Y. Song, J. Zhang, C. Guo, W. Xu, K. Liu, Z. Zhu, *Nanoscale* **13**, 6890–6901 (2021).
- [5] M. Sajjad, M. Amin, M. S. Javed, M. Imran, W. Hu, Z. Mao, W. Lu, *J. Energy Storage* **43**, 103176 (2021).
- [6] B. B. Sahoo, V. S. Pandey, A. S. Dogonchi, P. K. Mohapatra, D. N. Thatoi, N. Nayak, M. K. Nayak, *J. Energy Storage* **65**, 107335 (2023).
- [7] L. Gao, M. Cao, C. Zhang, J. Li, X. Zhu, X. Guo, Z. Toktarbay, *Adv. Compos. Hybrid Mater.* **7**, 1–11 (2024).
- [8] A. Muzaffar, M. B. Ahamed, C. M. Hussain, *Elsevier*, 227–254 (2023).
- [9] L. Ma, L. Xu, X. Zhou, X. Xu, L. Zhang, *RSC Adv.* **6**, 91621–91628 (2016).
- [10] A. T. Massey, R. Gusain, S. Kumari, O. P. Khatri, *Ind. Eng. Chem. Res.* **55**, 7124–7131 (2016).
- [11] A. Eftekhari, *Appl. Mater. Today* **8**, 1–17 (2017).
- [12] T. Chen, S. Li, P. Gui, J. Wen, X. Fu, G. Fang, *Nanotechnology* **29**, 205401 (2018).
- [13] S. Yuan, S. -Y. Pang, J. Hao, *Appl. Phys. Rev.* **7** (2020).
- [14] Y. Hu, C. Huang, S. Jiang, Y. Qin, H. C. Chen, *J. Colloid Interface Sci.* **558**, 291–300 (2020).
- [15] M. Muska, J. Yang, Y. Sun, J. Wang, Y. Wang, Q. Yang, *ACS Appl. Nano Mater.* **4**, 5796–5807 (2021).
- [16] D. Xie, W. Tang, Y. Wang, X. Xia, Y. Zhong, D. Zhou, D. Wang, X. Wang, J. Tu, *Nano Res.* **9**, 1618–1629 (2016).
- [17] L. Li, J. Gong, C. Liu, Y. Tian, M. Han, Q. Wang, X. Hong, Q. Ding, W. Zhu, J. Bao, *ACS Omega* **2**, 1089–1096 (2017).
- [18] Y. Zhang, Q. Zhou, W. Ma, C. Wang, X. Wang, J. Chen, T. Yu, S. Fan, *Nano Res.* **16**, 9519–9529 (2023).
- [19] T. Ahmed, J. Zha, K. K. H. Lin, H. Kuo, C. Tan, D. Lien, *Adv. Mater.* **35**, 2208054 (2023).
- [20] I. Rabani, S. Hussain, D. Vikraman, Y. -S. Seo, J. Jung,