

ساخت الکتروود مقابل SnSe به روش الکتروشیمیایی کاتدی به منظور ساخت سلول

خورشیدی حساس شده با رنگ

احمد ذاتی رستمی^{۱*}، فرشید مفیدنخعی^۱، حکمت مومن اف^۲

^۱دانشکده علوم و مهندسی، دانشکده فیزیک، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران
^۲آزمایشگاه فیزیک نظری بوگولوبوف، انستیتوی مشترک تحقیقات هسته ای، دینا، منطقه مسکو، روسیه

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۰/۱۸ تاریخ تصحیح: ۰۰/۰۹/۱۸ تاریخ پذیرش: ۰۰/۱۰/۰۴

چکیده

سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ یکی از انواع سلول‌های خورشیدی هستند که امروزه توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. برای دستیابی به محصولات صنعتی، اما این سلول‌ها نیازمند تحقیقات بیشتری هستند. الکتروودهای مقابل پلاتین که امروزه به صورت متداول در سلول‌های حساس شده با رنگ استفاده می‌شوند بسیار گران قیمت بوده و می‌بایست با مواد ارزان‌تر جایگزین شوند. در این تحقیق با استفاده از لایه نشانی الکتروشیمیایی SnSe بر روی ITO الکتروود مقابل جایگزینی را پیشنهاد می‌شود. بر اساس آنالیزهای ولتامتری چرخه‌ای و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی لایه‌ی پیشنهادی ما رفتار الکتروشیمیایی و همچنین ترابرد الکترونی بسیار خوبی را در تقابل با یون‌های الکتروولیت دید-تری دید از خود نشان می‌دهد. بهترین سلول ما بازدهی معادل تقریباً ۵٪ دارد که در برابر سلول ساخته شده از الکتروود مقابل پلاتین تنها کمی پایین‌تر است. به این ترتیب، مطالعه ما نشان می‌دهد که ماده SnSe به عنوان یک ماده ارزان قیمت و فراوان در پوسته‌ی زمین که به روش الکتروشیمیایی تهیه شده است، می‌تواند جایگزین مناسبی برای پلاتین در سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ باشند.

کلمات کلیدی: سلول خورشیدی حساس شده با رنگ، الکتروود مقابل، الکتروشیمیایی کاتدی، قلع سلناید.

۱- مقدمه

امروزه انرژی‌های تجدید پذیر به عنوان منابع انرژی آینده توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند [۱]. در این میان سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ به دلیل مقرون به صرفه بودن و کارایی بالا بسیار امیدوار کننده هستند [۲]. تحقیقات امروزی بر روی این سلول‌ها بیشتر روی پایداری و قیمت تمام شده‌ی آن و همچنین مواد جایگزین برای قسمت‌های مختلف سلول تمرکز کرده‌اند [۳، ۴]. تعداد الکترونهای انتقال یافته در ولتاژهای بالاتر به علت حذف پلاریزاسیون غلظتی بیشتر می‌شود [۵]. همچنین نانوذرات طلا با استفاده از تکنیک بیوسنتز تهیه شده و برای اصلاح سازی الکتروود بکار گرفته می‌شود. [۶].

شکی نیست که سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ (DSSCs) دارای نقش اساسی در میان نسل‌های مختلف سلول‌های خورشیدی هستند که چشم اندازی روشن پیش روی دارند [۷]. در این میان گران بودن Pt به کار رفته در الکتروود مقابل سلول، یکی از مهم‌ترین عوامل گران شدن سلول قلمداد می‌شود. به این ترتیب بسیاری از تحقیقات پیشنهاد می‌کنند که مواد جایگزین برای پلاتین جستجو و معرفی شوند [۸]. در سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگ (DSSCs)، برخورد الکتروولیت به سطح الکتروود آند (ITO) می‌تواند باعث باز ترکیب الکترون‌ها شود که امری نامطلوب است و باعث کاهش عملکرد سلول می‌شود. بهترین روش برای برطرف کردن این مسئله، استفاده از یک لایه مسدود کننده متراکم است که جدا سازی الکتریکی و شیمیایی بین الکتروود و نانوذرات را فراهم می‌کند. استفاده از یک لایه TiO_2 و ZnO تهیه شده توسط sputtering RF به عنوان لایه مسدود کننده، قابلیت افزایش راندمان DSSC را از ۴/۹٪ و ۵،۷٪ برای سلول‌های بدون لایه مسدود کننده و DSSC با یک لایه واحد مسدود کننده $\text{TiO}_2 / \text{ZnO}$ تا ۷،۱٪ را دارد [۹].

یک الکتروود مقابل خوب باید از رسانندگی و فعالیت الکتروکاتالیستی بالایی برخوردار باشد تا بتواند در تقابل با گونه‌های الکتروولیت عملکرد سریع و مناسبی داشته باشد. از مواد جایگزینی همچون پلیمرهای رسانا (پلی آنیلین)، مواد کربنی (کربن سیاه، گرافن) و اکسیدهای غیر آلی (V_2O_5 , WO_3)، کاربیدها (Fe_3C , TiC) و سولناید ها (SnSe , NiSe , MoSe_2) می‌توان نام برد. در میان این مواد قلع سلناید، SnSe که به وفور در پوسته‌ی زمین یافت می‌شود با داشتن رسانندگی حرارتی پایین، گاف ۱/۳ الکترون ولت و رسانندگی الکتریکی خوب، خواص الکتریکی و نوری مناسبی دارد و همچنان علی‌رغم ویژگی‌هایش تاکنون به عنوان الکتروود مقابل به خوبی برر سی نشده است [۱۰]. در حالت کلی پا سخ الکتروود به غلظت یونبر مورد استفاده وابسته است. [۱۱].

در این مطالعه با استفاده از لایه نشانی SnSe بر روی ITO به روش الکتروشیمیایی کاتدی به ساخت الکتروود مقابل سلول خورشیدی حساس شده با رنگ پرداختیم و خواص الکتروکاتالیتی، الکتروشیمیایی و فوتولتائیک آن را در سلول خورشیدی بررسی کردیم. در نهایت معتقد هستیم که روش الکتروشیمیایی شیوه‌ای بسیار ارزان و مناسب برای تهیه الکتروود مقابل سلول با خواص مناسب است.

۲- روش‌های تجربی

در این تحقیق با استفاده از روش لایه نشانی الکتروشیمیایی کاتدی به لایه نشانی SnSe از درون محلول الکتروولیت بر روی ITO (Nanobazar 7 Ω/\square) استفاده کردیم. برای این منظور، محلول ۱/۵ mM از H_2SeO_3 (Sigma-Aldrich) و ۲/۲ mM SnCl_2 (Merck) با هم ترکیب شدند. با استفاده از HCl (Merck) رقیق شده pH محلول بین ۲ تا ۳ کنترل شد. با استفاده از یک سلول سه الکتروودی استاندارد الکتروشیمیایی با الکتروود کار ITO، الکتروود مقابل پلاتین و الکتروود مرجع

استاندارد Ag/AgCl لایه نشانی SnSe در دمای ۴۵ درجه سانتی گراد و اعمال ولتاژ ثابت ۰/۷۵ V- توسط یک منبع پتانسیو استات انجام شد. نمونه‌های تهیه شده در این مقاله در مدت زمان‌های ۵ دقیقه، ۱۰ دقیقه و ۱۵ دقیقه ساخته شدند. به منظور ساخت فوتوآند از نانوذرات استاندارد TiO₂ و لایه بلاک فشرده‌ی TiO₂ استفاده شد. در این مرحله ابتدا زیرلایه ITO به مدت ۲۰ دقیقه به همراه محلول اتانول و آب مقطر در ظرف مخصوصی داخل دستگاه آلتراسونیک شستشو داده شد. سپس در مرحله خشک سازی با استفاده از فشار گاز نیتروژن خشک سازی شد. یک لایه بلاک به ضخامت ۱۰۰ نانومتر از هدف TiO₂ با استفاده از روش کندوپاش بر روی زیرلایه ITO نشانده شد. در مرحله‌ی ساخت خمیر، نانوذرات استاندارد P25 و اتانول ترکیب شدند و به مدت ۶۰ دقیقه روی همزن به شدت هم خوردند، سپس چند قطره Triton X-100 به همراه تریپینول و اتیلن سلولز به محلول اضافه شد و به مدت ۶۰ دقیقه دیگر محلول هم خورد. سپس دمای محلول با استفاده از گرم کن برقی به ۸۰ درجه سانتی گراد رسید و هم زدن ادامه پیدا کرد تا پس از مدت تقریبی ۱۲۰ دقیقه خمیری مناسب برای لایه نشانی تهیه گردد. این خمیر پس از سرد شدن به سادگی و به روش دکتر بلید روی زیر لایه ITO و لایه بلاک لایه نشانی شدند. سپس زیرلایه‌های لایه نشانی شده با خمیر به داخل کوره هوا منتقل شدند و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد حرارت دیدند. سپس از کوره بیرون آورده شدند و در حالی که هنوز گرم بودند به داخل محلول رنگدانه N719 فرو برده شدند. این رنگ آمیزی به مدت ۲۴ ساعت ادامه پیدا کرد. پس از این مدت، لایه‌ها از درون محلول رنگدانه بیرون کشیده شدند و توسط اتانول رنگدانه‌های اضافی بر روی آن‌ها شستشو می‌شود تا تنها یک لایه‌ی مولکولی بر روی نانوذرات فوتوآند قرار گرفته باشد. پس از خشک سازی، فوتوآند آماده است.

پس از تهیه فوتوآندهای یکسان، از لایه‌های متفاوت SnSe به شکل الکترود مقابل استفاده شد. در این مرحله، فوتوآندها توسط قطعه‌ای قاب شکل از سرلین (به منظور فاصله اندازی دو الکترود) پوشانده می‌شوند و الکترود مقابل SnSe که از پیش توسط یک دریل بسیار ریز سوراخ شده است بر روی آن قرار می‌گیرد. این مجموعه در دمای ۱۲۰ درجه حرارت می‌بیند تا با ذوب شدن سرلین دو الکترود به خوبی متصل شوند. سپس الکترود حاوی یون‌های I⁻/I₃⁻ از طریق سوراخ به درون سلول تزریق می‌شود و سوراخ با سرلین پوشانده و ایزوله می‌شود.

به منظور بررسی ساختار بلوری الکترود مقابل از طیف سنجی پراش پرتو ایکس با دستگاه PHILIPS- PW1730 استفاده شد. برای بررسی مورفولوژی و سطح مقطع الکترود مقابل از میکروسکپ الکترونی جاروب اثر میدان (FESEM) TESCAN-MIRA III استفاده شد. همچنین آنالیز EDS توسط این دستگاه انجام شده است. به منظور بررسی خواص الکترو شیمیایی الکترودهای مقابل از آنالیزهای EIS و CV بهره بردیم که توسط دستگاه sharif solar co- PGE-18 به

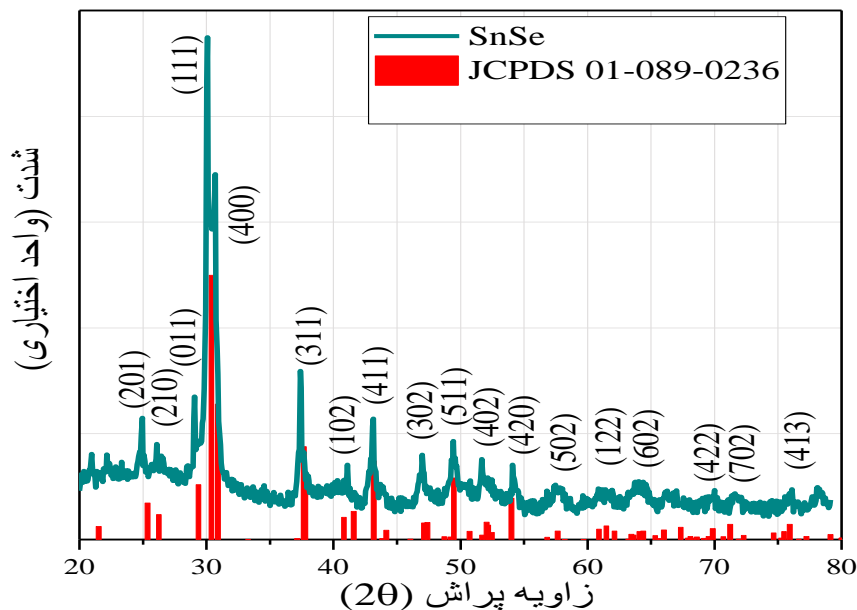
ثبت ر سید. همچنین آنالیز BET به منظور بررسی سطح ویژه موثر الکتروودهای مقابل با دستگاه Belsorp mini II انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی لایه SnSe ساخته شده به روش لایه نشانی کاتدی و مطالعه خواص بلوری و ساختاری آن، از لایه‌ی نمونه‌ی ۱۵ دقیقه طیف XRD تهیه شد. شکل ۱ طیف پراش پرتو ایکس را برای این الکتروود مقابل نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۱ بر می‌آید، این طیف تطابق بسیار خوبی با شماره کارت JCPDS 01-089-0236 که پیک‌های آن با ۱ ستون‌های قرمز نشان داده شده است، دارد. این شماره کارت به قلع سلناید ارتورومبیک با گروه فضایی Pnma مربوط می‌شود. همچنین پیک‌های ظاهر شده در زوایای 2θ ۲۴/۹، ۲۶/۱، ۲۹/۰، ۳۰/۱، ۳۰/۷، ۳۷/۴، ۴۱/۱، ۴۳/۱، ۴۷/۰، ۴۹/۴، ۵۱/۷، ۵۴/۱، ۵۷/۵، ۶۱/۴، ۶۴/۴، ۷۰/۰، ۷۱/۵ و ۷۶/۱ متعلق هستند به صفحات ۲۰۱، ۲۱۰، ۰۱۱، ۰۱۱، ۴۰۰، ۳۱۱، ۱۰۲، ۴۱۱، ۳۰۲، ۵۱۱، ۴۰۲، ۴۲۰، ۵۰۲، ۱۲۲، ۶۰۲، ۴۲۲، ۷۰۲ و ۴۱۳ قلع سلناید ارتورومبیک. همچنین با استفاده از رابطه‌ی دبی شرر می‌توان اندازه‌ی بلورک‌ها را در هر راستا پیدا کرد [12]:

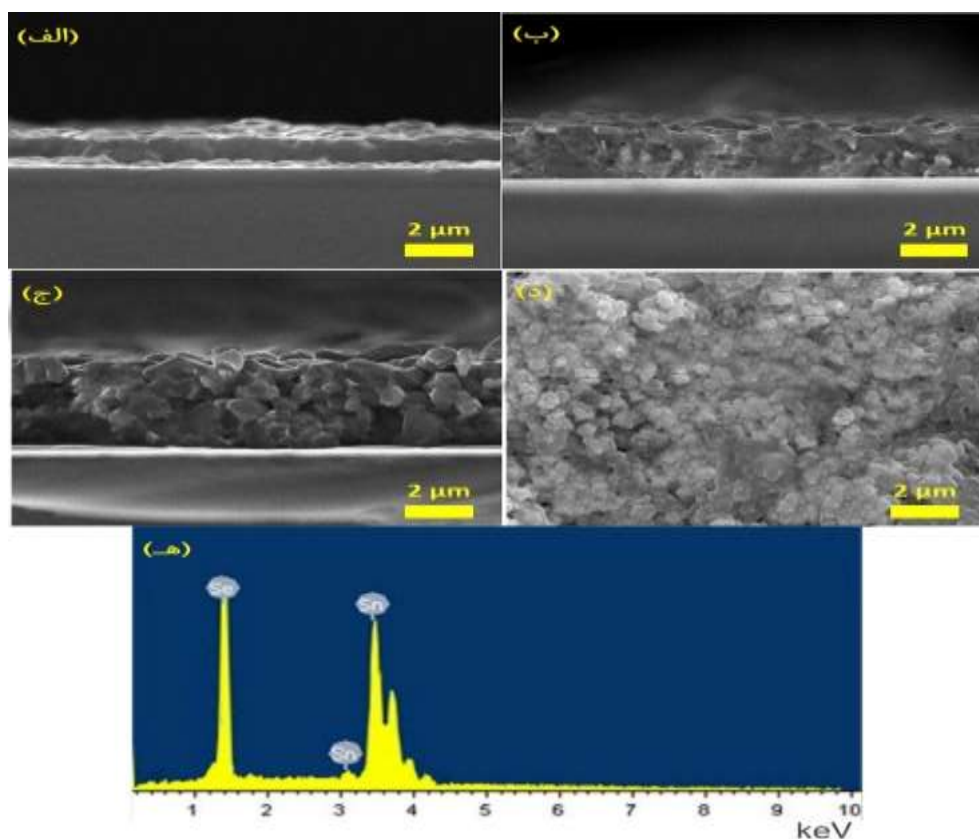
$$D = \frac{k \lambda}{\beta \cos(\theta)}$$

در این رابطه k ضریب شکل و تقریباً برابر ۰/۸۹، λ طول موج پرتو ایکس برابر ۰/۱۵۴ نانومتر، β عرض کامل در نصف بیشینه هر قله و θ زاویه پراش است. به صورت میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها برای تمام راستاهای مختلف تقریباً برابر ۲۵ نانومتر است. همچنین با توجه به تطابق خوب طیف پراش با نمونه استاندارد کارت PDF2 می‌توان گفت لایه‌ی ساخته شده از خلوص



شکل ۱: الگوی پراش پرتو ایکس الکتروود مقابل SnSe

بسیار بالایی برخوردار است و فازهای اضافی نیز در آن دیده نمی شود. به منظور بررسی مورفولوژی لایه‌های ساخته شده از الکترودهای مقابل ساخته شده تصاویر FESEM سطح مقطع تهیه شد. تصویر ۲ نمایشی است از سطح مقطع لایه های ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه. همچنین تصویر ۲.د نمایش فوقانی سطح الکترودهای مقابل لایه ی ۱۰ دقیقه است. همانطور که می توان مشاهده کرد با افزایش زمان لایه نشانی الکتروشیمیایی، ضخامت لایه‌ها بیشتر شده است که امری کاملاً طبیعی است. ضخامت این لایه‌ها به ترتیب برای لایه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه برابر است با ۱/۲، ۲/۲ و ۴ میکرون. همچنین مورفولوژی سطح مقطع نشان می‌دهد که این لایه‌ها با کیفیت خوبی به صورت هموار و تخت تشکیل شده‌اند و از ضخامت تقریباً یک دستی برخوردار هستند. مورفولوژی سطح بالایی هم گواه این است که سطح لایه‌ها از زبری و سطح مقطع مناسبی برای تبادل الکترون با الکترولیت برخوردار است. علاوه بر آن تصویر ۲.ه آنالیز EDS را برای نمونه ۱۰ دقیقه نشان می‌دهد. درصدهای اتمی برای Sn و Se در این نمونه به ترتیب برابر ۵۱/۴ و ۴۸/۶ است که بر اساس آن می‌توان تأیید کرد که الکترودهای مقابل از ترکیب SnSe و بدون

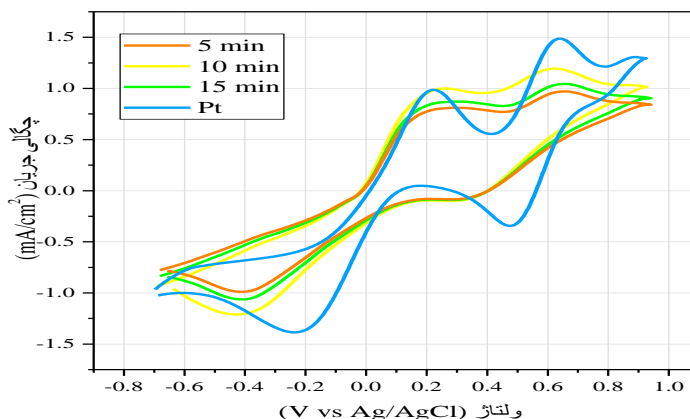


شکل ۲: تصاویر FESEM از لایه های SnSe به همراه طیف EDS لایه ۱۰ دقیقه

عناصر ناخالصی تشکیل یافته است.

از مهمترین آنالیزهای مربوط به بررسی خواص الکترودهای مقابل در سلول‌های حساس شده با رنگ، آنالیز ولتامتری چرخه‌ای است. به این منظور و برای بررسی اثرات الکتروکاتالیتی از نمونه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ آنالیز CV تهیه شد و در کنار آنالیز CV یک الکترودهای مقابل پلاتین که به صورت متداول در سلول‌های حساس شده با رنگ به عنوان الکترودهای مقابل به کار می‌رود قرار

گرفت. نتایج این آنالیز را می‌توان در شکل ۳ مشاهده نمود. در این آنالیز از یک سلول استاندارد سه الکترودی با الکتروده کار SnSe و الکتروده مرجع Ag/AgCl استفاده شد و با استفاده از سرعت روبش پتانسیل ۵۰ mV/s، منحنی CV در یک دوره

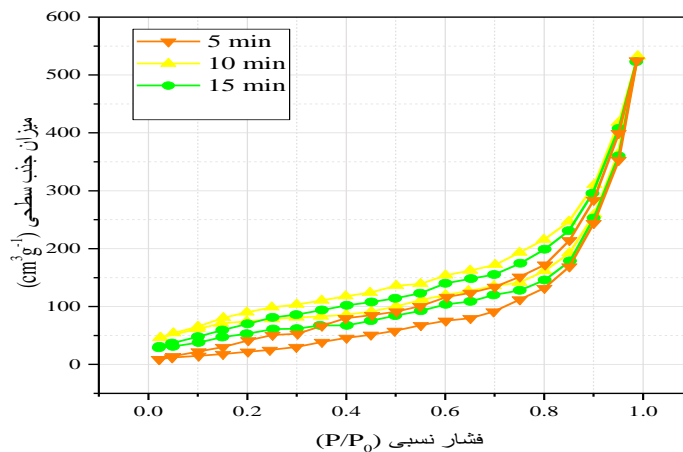


شکل ۳: نمودار CV مربوط به الکترودهای مقابل مختلف SnSe و Pt

اندازه گیری و ثبت شد. همچنین برای بررسی اثر الکتروده مقابل با واکنش‌های الکترولیتی سلول خورشیدی رنگدانه، از الکترولیت حاوی یون های I^- / I_3^- یعنی 50 mM LiI، 10 mM I_2 و 0.5 M $LiClO_4$ استفاده شد. در این نمودارها دو پیک اکسایشی و دو پیک کاهش‌ی مشاهده می‌شود که واکنش‌های $2I_3^- \leftrightarrow 3I_2 + 2e^-$ و $3I^- \leftrightarrow I_3^- + 2e^-$ را رقم می‌زنند. همانطور که دیده می‌شود پیک‌های جریان واکنش‌ها در الکتروده Pt از الکترودهای SnSe بلندتر است و این نشان از فعالیت الکتروکاتالیتی بهتری نسبت به الکترودهای مقابل SnSe دارد. اما به هر حال الکترودهای SnSe با سطح مشابهی به گونه‌های الکترولیت یدی تری یدی دارند و شکل منحنی CV آنها قابل مقایسه با منحنی Pt است. همچنین میزان پیک کاهش و اکسایش الکتروده ۱۰ دقیقه نسبت به الکترودهای ۵ دقیقه و ۱۵ دقیقه بیشتر است و از بیشتر بودن فعالیت الکتروکاتالیتی این الکتروده نسبت به دو الکتروده دیگر متصور شد. همچنین ولتاژ پیک تا پیک الکتروده پلاتین نسبت به سایر الکترودها کمتر است که نشان می‌دهد فرآیندهای اکسایش و کاهش سریع تر رخ می‌دهند. اما ولتاژ پیک تا پیک لایه‌های قلع سلناید تقریباً در یک مقیاس هستند و از این نظر برابری می‌کنند. در نتیجه بهتر بودن لایه‌ها از نظر الکتروکاتالیتی را تنها میزان جریان آنها مشخص می‌کند. همانطور که می‌دانیم فعالیت‌های مختلف الکتروکاتالیتی در الکترودهای مقابل مختلف را می‌توان به میزان سطح ویژه آن الکترودها مرتبط دانست [13]. سطح بیشتر کمک می‌کند تا برهمکنش گونه‌های الکترولیت با سطح بیشتر شود و فعالیت الکتروکاتالیتی تقویت شود. به این منظور از الکترودهای مقابل ساخته شده از SnSe آنالیز BET تهیه شد که نتایج آن را می‌توان در شکل ۴ مشاهده کرد. به این ترتیب الکترودهای مقابل ۵، ۱۰ و ۱۵ به ترتیب دارای مساحت سطح ویژه $39/3 \text{ m}^2/\text{g}$ ، $48/0 \text{ m}^2/\text{g}$ و $42/6 \text{ m}^2/\text{g}$ هستند. آنچنان که مشاهده می‌شود الکتروده مقابل ۱۰ دقیقه بیشترین میزان

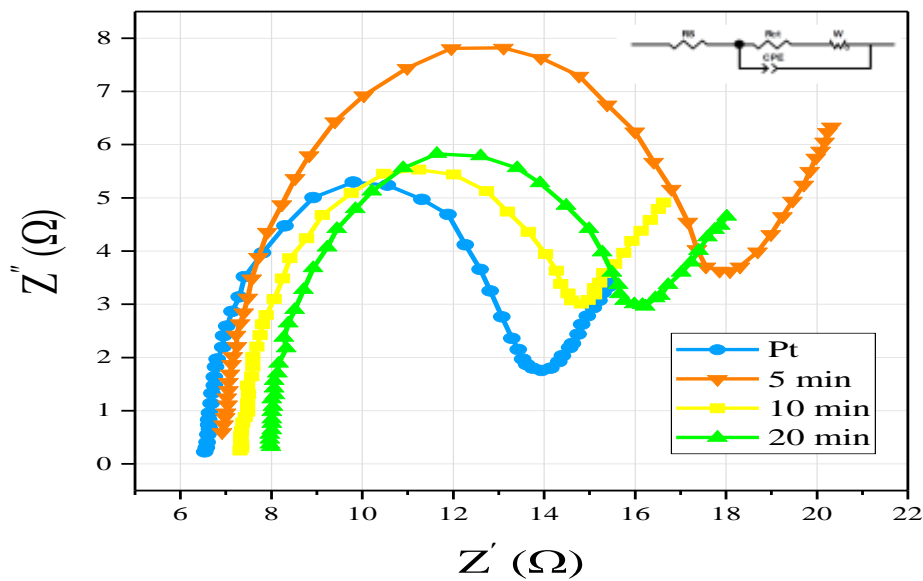
مساحت سطح ویژه را دارد که از این حیث می‌تواند توجیه کننده فعالیت بیشتر الکتروکاتالیستی این الکتروود باشد. اینکه الکتروود ۱۰ دقیقه میزان سطح ویژه‌ی بیشتری نسبت به الکتروود ۵ دقیقه داشته باشد امری طبیعی است زیرا تشکیل لایه‌ها در مراحل اول لایه نشانی الکتروشیمیایی یکنواخت تر و چگال تر است و به مرور زمان لایه‌ها با نظم کمتر و در نتیجه سطح بیشتر شکل می‌گیرند. اما به نظر می‌رسد الکتروود ۱۵ دقیقه با این نتیجه سازگار نیست و در ادامه میزان سطح ویژه کمتر شده است. این رفتار البته پیشتر نیز مشاهده شده است و چنان که دوپوند و دانی [14] نشان دادند با افزایش مدت زمان لایه نشانی الکتروشیمیایی و پر شدن منافذ بلوری بار دیگر ممکن است سطح ویژه‌ی لایه کمتر شود.

برای بررسی هر چه بیشتر خاصیت الکتروکاتالیستی و خواص انتقالی الکتروودهای مقابل SnSe از آن‌ها آنالیز امپدانس الکتروشیمیایی، EIS تهیه شد. برای این منظور تنها از الکتروودهای کار SnSe و Pt بهره گرفته شده است و از کل ساختار



شکل ۴: نمودار جذب و واجذب گاز نیتروژن برای الکتروودهای مقابل SnSe

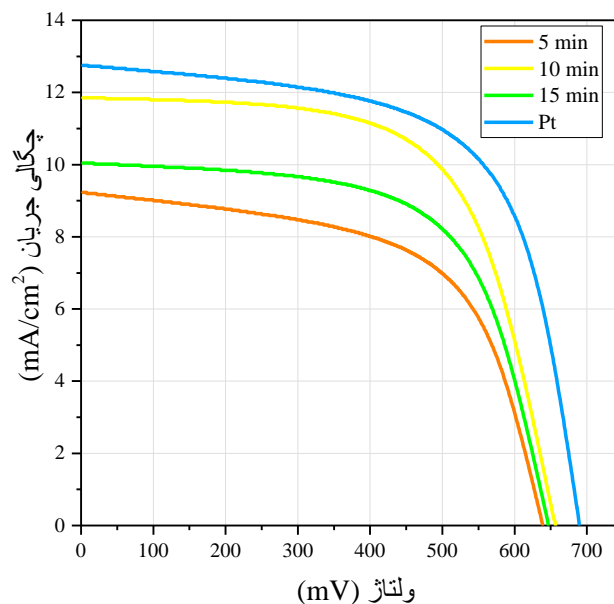
سلول آنالیز EIS گرفته نشده است. به این ترتیب یک سلول الکتروشیمیایی استات ندارد با ساختار $ITO \setminus CE \setminus (I \setminus I_3^-) \setminus CE \setminus ITO$ تهیه شد که یک ساختار متقارن را تشکیل می‌دهد و اثرات الکتروود فوتوآند را در بر ندارد. با استفاده از چیدمان EIS و با ولتاژ اختلالی ۱۰ mV آنالیز EIS بین فرکانس‌های ۰/۱ Hz تا ۱۰ kHz در شرایط خاموش صورت گرفت و نتایج این آنالیز به صورت منحنی‌های نایکویست در تصویر ۵ قابل دیدن است. در این منحنی‌ها تنها یک نیم دایره دیده می‌شود که ناشی از انتقال بار بین الکتروود مقابل و الکتروولیت است. چون الکتروود مقابل نیز همانند الکتروود کار از یک جنس انتخاب شده است اثرات ناشی از انتقال بار بین الکتروولیت و سطوح دیگر که معمولاً در آنالیزهای EIS سلول‌های خورشیدی رنگدانه‌ای در فرکانس‌های میانی اتفاق می‌افتد دیده نمی‌شود. همچنین دنباله‌ی خطی این نیم‌دایره‌ها به دلیل اثرات امپدانس واربورگ که ناشی از پخش گونه‌های الکتروولیت است ظاهر شده است. با استفاده از قطر نیم دایره‌ی اصلی می‌توان مقدار R_{ct} یعنی مقاومت انتقال بار بین الکتروود مقابل را با الکتروولیت تخمین زد. با استفاده از منحنی‌های نایکویست



شکل ۵: نمودار نایکوئست مربوط به طیف امپدانس الکتروشیمیایی الکتروودهای مقابل مختلف Pt و SnSe

شکل ۵ مقدار R_{ct} برای نمونه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ Pt به ترتیب برابر است با ۱۱/۵، ۸/۱، ۸/۷ و ۷/۴ اهم. همانطور که می‌دانیم در حالت خاموش بزرگتر بودن مقدار R_{ct} بین الکتروود مقابل و الکتروولیت به این معناست که مقاومت انتقال بار بیشتری در برابر انتقال الکترون‌ها وجود دارد و بدین سبب الکتروودهای پلاتین و الکتروود ۱۰ دقیقه نسبت به الکتروودهای ۵ و ۱۵ دقیقه خاصیت تراپردی و همچنین الکتروکاتالیتی بهتری نشان می‌دهند. همچنین باید توجه کرد که الکتروود ۵ دقیقه به خاطر داشتن ضخامت کمتر البته ممکن است مقاومت سری کمتری نسبت به الکتروودهای ۱۰ و ۱۵ دقیقه داشته باشد که این امر از طول از مبدا نمودار نایکوئست روشن است. آنچنان که می‌دانیم طول از مبدا نمودار نایکوئست برآوردی از مقاومت سری کل مجموعه است و به دلیل اثرات یکسان در همه‌ی موارد می‌توان نتیجه گرفت که الکتروودهای ۵ دقیقه و Pt مقاومت سری کمتری نسبت به ۱۰ و ۱۵ دقیقه دارند که البته به دلیل خطی بودن رابطه مقاومت و ضخامت لایه امری بدیهی است. اما به هر حال به دلیل خواص انتقال باری بین الکتروود مقابل و گونه‌های الکتروولیت، الکتروودهای Pt و ۱۰ دقیقه عملکرد بهتری نسبت به دیگران دارند و می‌توان اینگونه متصور شد که در نقش الکتروود مقابل در سلول DSSC نیز کارایی بهتری داشته باشند.

نمودار شکل ۶ رفتار جریان بر حسب اختلاف پتانسیل را برای سلول‌های ساخته شده از فوتوآند TiO_2 و الکتروود مقابل SnSe با مدت زمان‌های لایه نشانی ۵، ۱۰، ۱۵ دقیقه و همچنین الکتروود مقابل Pt نشان می‌دهد. همچنین پارامترهای فوتوولتائیک استخراج شده از این منحنی را می‌توان در جدول شماره ۱ ملاحظه کرد. سلول کنترل ما که در اینجا Pt بوده است با ولتاژ مدار باز 689 mV ، جریان 12.7 mA/cm^2 و FF برابر 0.64 ، بازدهی برابر $5/6\%$ دارد. گرچه بازدهی سلول‌هایی که با الکتروود مقابل SnSe ساخته شده‌اند کمتر از بازدهی سلول متداول پلاتینی است اما نزدیکی بازدهی این سلول‌ها به نمونه‌ی پلاتینی قابل ملاحظه است. چنانچه از جدول ۱ بر می‌آید، بازده سلول ۱۰ دقیقه $4/9\%$ است که نسبت به سلول با الکتروود مقابل Pt تنها 14% کمتر توان تولید دارد. سلول ۱۰ دقیقه با داشتن ولتاژ مدار باز 657 میلی ولت ، جریان اتصال کوتاه $11/8 \text{ mA/cm}^2$ و ضریب پر شدگی 0.63 بیشترین بازدهی را بین سلول‌های خورشیدی با الکتروودهای مقابل SnSe دارد. چنانچه می‌توان دید جریان تولید شده در این سلول نسبت به سلول‌های ۵ دقیقه و ۱۵ دقیقه بیشتر است. افزایش جریان



شکل ۶: نمودار مشخصه سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ با الکتروودهای مقابل مختلف Pt و SnSe

عبوری در این سلول را با توجه به یکسان بودن سایر ویژگی‌های این سلول‌ها را می‌توان به تاثیر مستقیم الکتروود مقابل دانست. چنانچه در آنالیزهای CV و EIS مشاهده شد الکتروود مقابل ۱۰ دقیقه نسبت به الکتروودهای مقابل ۵ و ۱۵ دقیقه دارای قابلیت تبادل الکترونی بهتر و خاصیت الکتروکاتالیتی بهتری بود. این امر باعث شده است حضور الکتروود مقابل ۱۰ دقیقه در قیاس با الکتروودهای ۵ و ۱۵ دقیقه رفتار بهتری داشته باشد.

جدول ۱: مشخصات فوتوولتائیک سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ با الکترودهای مقابل مختلف SnSe و Pt

سلول ساخته شده با الکتروود مقابل	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
۵ دقیقه	۶۳۶	۹/۲	۶۰	۳/۵
۱۰ دقیقه	۶۵۷	۱۱/۸	۶۳	۴/۹
۱۵ دقیقه	۶۴۵	۱۰/۰	۶۳	۴/۱
Pt	۶۸۹	۱۲/۷	۶۴	۵/۶

نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر دارای رقابت پذیری و حتی بهبود چشم گیری نسبت به پژوهش‌های پیشین است. به عنوان مثال می‌توان به مطالعه گولاس و همکاران [15] در سال ۲۰۲۰ اشاره کرد که با استفاده از الکتروود مقابل طلا تنها به بازدهی ۴,۲٪ دست یافتند یا در کار دیگری، چن و همکارانش با استفاده از الکتروود مقابل کربن سیاه به بازدهی ۳,۷٪ رسیدند [16]. در سلول‌های با الکتروود مقابل مشابه و حتی با استفاده از نانوذرات دی اکسید تیتانیوم نیز رستمی و همکاران به بازدهی مشابه ۴,۹ درصدی دست یافتند [17]. نتایج این مقایسه به صورت قیاس پارامترهای فوتوولتائیک پژوهش‌های اشاره شده در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲: مشخصات فوتوولتائیک سلول‌های خورشیدی حساس شده با رنگ با الکترودهای مقابل مختلف در سایر پژوهش‌ها

سلول ساخته شده با الکتروود مقابل	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)	مرجع
طلا	۹۰۰	۹/۱	۵۲	۴/۲	گولاس [۱۲]
کربن سیاه	۵۹۳	۱۲/۲۱	۵۲	۳/۷	چن [۱۳]
SnSe ₂	۷۶۰	۱۰/۲	۶۳	۴/۹	رستمی [۱۴]
SnSe	۶۵۷	۱۱/۸	۶۳	۴/۹	این پژوهش

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق الکتروود مقابل ساخته شده از لایه‌ی SnSe نشانده شده به روش الکتروشیمیایی کاتدی پیشنهاد شد. این الکتروود جایگزین مناسبی برای الکتروود مقابل متداول Pt است. اگرچه بازده سلول‌های ساخته شده با الکتروود SnSe همچنان به Pt نمی‌رسد ولی این نتایج بسیار به هم نزدیک هستند. بهترین سلول ساخته شده با الکتروود مقابل قلع سلناید بازده ۴/۹٪ از خود نشان داد که در مقابل بازده ۵/۶٪ سلول پلاتین دار تنها ۱۴٪ افت بازدهی دارد. همچنین عملکرد خوب الکتروود مقابل قلع سلناید ناشی از رفتار بسیار خوب الکتروشیمیایی و الکتروکاتالیتی آن است که توسط آنالیزهای EIS و CV بررسی شدند. همچنین نشان داده شد که ماده‌ی SnSe که به وفور در پوسته‌ی زمین یافت می‌شود و قیمت ارزانی در برابر پلاتین دارد می‌تواند جایگزینی مناسبی برای Pt باشد.

۵- مراجع

- [1] Sadasivuni KK, Deshmukh K, Ahipa T, Muzaffar A, Ahamed MB, Pasha SK, et al. Flexible, biodegradable and recyclable solar cells: a review. *Journal of Materials Science, Materials in Electronics*. **30(2)** (2019) 951.
- [2] Zatirostami A. Electro-deposited SnSe on ITO: A low-cost and high-performance counter electrode for DSSCs. *Journal of Alloys and Compounds*., **844** (2020) 156151.
- [3] Kumar DK, Kříž J, Bennett N, Chen B, Upadhayaya H, Reddy KR, et al. Functionalized metal oxide nanoparticles for efficient dye-sensitized solar cells (DSSCs): A review. *Materials Science for Energy Technologies*. 2020.
- [4] Zainudin S, Abdullah H, Markom M. Electrochemical studies of tin oxide based-dye-sensitized solar cells (DSSC): a review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*., **30(6)** (2019) 5342.
- [5] k.kakaei, G.Ghadimi, *J. Of Applied Chemistry*, **52** (1398) 51, in Persian.
- [6] M.Abbas-Ghorbani, *J. Of Applied Chemistry*, **52** (1398) 77, in Persian.
- [7] Zatirostami A. A new electrochemically prepared composite counter electrode for dye-sensitized solar cells. *Thin Solid Films*. 2020:137926.
- [8] Saeidi M, Abrari M, Ahmadi M. Fabrication of dye-sensitized solar cell based on mixed tin and zinc oxide nanoparticles. *Applied Physics A*., **125(6)** (2019) 409.
- [9] Zatirostami A. Increasing the efficiency of TiO₂-based DSSC by means of a double layer RF-sputtered thin film blocking layer. *Optik*., **207** (2020) 164419.
- [10] Li Z, Guo Y, Zhao F, Nie C, Shi J, Liu X, et al. The effect of substrate temperature and Sn/Se mass ratio on the co-evaporated SnSe thin film for photovoltaic application. *Vacuum*. 2020:109343.
- [11] M.Abbas-Ghorbani, *J. Of Applied Chemistry*, **48** (1397) 269, in Persian.
- [12] Abrari M, Ahmadi M, Ghanaatshoar M, Moazami HR, Davarani SSH. Fabrication of dye-sensitized solar cells based on SnO₂/ZnO composite nanostructures: A new facile method using dual anodic dissolution. *Journal of Alloys and Compounds*., **784** (2019) 1036.
- [13] Li J, Yun S, Zhou X, Hou Y, Fang W, Zhang T, et al. Incorporating transition metals (Ta/Co) into nitrogen-doped carbon as counter electrode catalysts for dye-sensitized solar cells. *Carbon*., **126** (2018) 145.
- [14] Dupont MF, Donne SW. Nucleation and growth of electrodeposited manganese dioxide for electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta*., **120** (2014) 219.
- [15] Gullace S, Nastasi F, Puntoriero F, Trusso S, Calogero G. A platinum-free nanostructured gold counter electrode for DSSCs prepared by pulsed laser ablation. *Applied Surface Science*., **506** (2020) 144690.

[16]Chen P-W, Lee C-P, Chang L-Y, Chang J, Yeh M-H, Lin L-Y, et al. Dye-sensitized solar cells with low-cost catalytic films of polymer-loaded carbon black on their counter electrode. *RSC advances.*, **3(17)** (2013) 5871.

[17]Ramasamy P, Manivasakan P, Kim J. Phase controlled synthesis of SnSe and SnSe₂ hierarchical nanostructures made of single crystalline ultrathin nanosheets. *Cryst. Eng. Comm.*, **17(4)** (2015) 807.