

## تاثیر افزودن سولفید کادمیم بر اتصال P-N

آی لار زمانی، مجید جعفریان\*

دانشکده شیمی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

**چکیده:** افزایش گرمای کره زمین و نیاز روز افزون به انرژی موضوعات مهمی هستند که موجب گسترش انواع انرژی تجدید پذیر شده است. هدف بررسی اثر افزودن سولفید کادمیم و سولفید روی در سولفید مس و سولفید سرب و بهبود حساسیت سل ساخته شده به روش جذب و واکنش متوالی لایه یونی در شرایط نور و تاریکی است. بهترین سل ساخته شده در طی انجام این پروژه سل  $Cu\ sheet / 8CuS/2CdS / 8 PbS (0.5 M)$  می باشد. بیشترین اختلاف شدت جریان تاریکی و نورسل مذکور در پتانسیل یک ولت ۱۴ میلی آمپر است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سل مذکور نشان داد ذرات نیمه هادی در حد نانومتر است. بررسی خاصیت فتوالکتروشیمیایی به کمک تکنیک های الکتروشیمیایی کرونوآمپرومتری، ولتامتری چرخه ای و کرونو پتانسیومتری انجام شده است.

**واژه های کلیدی:** سلول خورشیدی، نقاط کوانتومی، سیلار، سولفید کادمیم.

**KEYWORDS:** Solar cell, Quantum dot, Silar, Cadmium sulfide

### مقدمه

مختلف وجود دارد. ۲- برای جمع آوری انرژی خورشیدی نیاز به سطح زیادی است، در واقع هر چه سطح بزرگتر باشد، شدت جریان بیش تری تولید خواهد شد [۶]. نسل سوم سلول های خورشیدی با هدف بازدهی بالاتر و قیمت پایین تر در مقایسه با نسل اول و دوم طراحی شده اند. از مهم ترین انواع این نسل از سلول های خورشیدی، می توان به سلول های خورشیدی رنگدانه ای، پلیمری و نقاط کوانتومی<sup>۱</sup> اشاره کرد [۷]. اخیراً مفهوم نسل چهارم نیز در جامعه فتولتاییک ارایه شده است [۸]. ماکزیمم بازده تئوری پیش بینی شده برای سلول های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی بیشتر از سلول های خورشیدی حساس شده با رنگدانه است. از ویژگی های الکتروند ضدکارگر نیاز به فعالیت کاتالیزوری بالا، هدایت خوب، هزینه کم و پایداری می توان اشاره نمود [۷]. الکتروند ضد کارگر سل های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی جزء پنج دسته فلزات نجیب،

امروزه بشر با دو مشکل اساسی کمبود سوخت فسیلی و آلودگی حاصل از سوزاندن آنها مواجه است. استفاده از این سوخت ها مشکلات زیست محیطی زیادی مانند آلودگی هوا، اثر گلخانه ای، خشکسالی شدید، بالا آمدن سطح دریاها و سیل ایجاد کرده است [۱-۳]. افزایش گرمای کره زمین و نیاز روز افزون به انرژی موضوعات مهمی هستند که موجب گسترش انواع انرژی تجدید پذیر شده است [۱]. چندین منبع انرژی تجدید پذیر در حال بررسی است. در میان این منابع، سلول های خورشیدی که از طریق اثر فتوالکتروشیمیایی یا فتوالکتریک مستقیماً انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند بهترین جایگزین برای سوخت های فسیلی هستند [۴، ۵]. علاوه بر این انرژی خورشیدی ایمن ترین، پاکترین و فراوان ترین منبع انرژی تجدید پذیر است [۲]. در استفاده از انرژی خورشیدی دو مشکل اساسی وجود دارد: ۱- تغییر مقادیر انرژی خورشیدی در مکان ها و زمان های

\* عهده دار مکاتبات

+E-mail: mjafarian@kntu.ac

(۱) Quantum dot

به روش سیلار<sup>۲</sup> انجام شده است. این روش برای اولین بار توسط نیکولا<sup>۴</sup> در سال ۱۹۸۵ میلادی گزارش شد. روش سیلار شامل فرو بردن بستر در پیش ماده کاتیونی و پیش ماده آنیونی است. از پارامترهای موثر در تشکیل رسوب به این روش می‌توان به سیکل‌های سیلار، غلظت پیش ماده‌ها و ... اشاره نمود [۱۵]. در سال‌های اخیر نانو مواد زیادی به صورت لایه‌های نازک فلزات، نیمه هادی‌ها، سرامیک‌ها و مواد پلیمری به روش سیلار تولید شده اند [۱۶].

### بخش تجربی

#### مواد

مواد شیمیایی مورد استفاده نمک‌های سرب (II) نیترات<sup>۵</sup>، مس (II) سولفات پنج آبه<sup>۶</sup>، نیترات کادمیم<sup>۷</sup>، سولفات روی<sup>۸</sup> و سدیم سولفید از شرکت مرک خریداری شده است.

بسترهای مورد استفاده شیشه‌های ایندیم تین اکسید<sup>۹</sup> یا ورقه‌های مسی هستند که در ابعاد ۱ \* ۲ برش داده شده‌اند. در لایه نشانی سل شیشه ایندیم تین اکسید، از خود سل به‌عنوان الکتروکار، گرافیت الکتروود مقابل و از الکتروود Ag/AgCl به‌عنوان الکتروود رفرنس استفاده شده است.

#### دستگاه‌های مورد استفاده

از گالوانواستات/پتانسیواستات EG & G (Galvanostat – Potentiostat) مدل ۲۷۳ A با PC مناسب برای نرم افزار M 270- M 398 و اینترفیس GPIB و تحلیلگر پاسخ فرکانس EG & G مدل ۲۵ ۱۰ و لامپ تنگستن ۲۰۰ W ساخت شرکت پارس شهاب ایران جهت تولید شرایط نور و تاریکی استفاده شده است.

#### روش ساخت سل

برای لایه نشانی سل‌های ساخته شده با شیشه‌های ایندیم تین اکسید قبل از لایه نشانی به روش جذب و واکنش متوالی لایه یونی، تمام سطح شیشه برش داده شده پس از شست و شو با آب و صابون و اتانول، درون محلول سولفات مس با غلظت ۰/۱ مولار قرار داده شده و از پتانسیل ۱- تا ۰ با سرعت ۱۰۰ mV/s به روش الکتروشیمیایی ۲۵ سیکل زده شده است. روش لایه نشانی به صورت سه الکتروودی و درون محلول است. پس از این مرحله فقط ابعاد ۱ \* ۱ شیشه

سولفیدهای فلزی، کربن، پلیمرهای رسانا یا الکترودهای کامپوزیتی هستند [۹]. نقاط کوانتومی با توجه به ویژگی‌های یگانه تحقیقات زیادی را در زمینه پیشرفت سلول‌های خورشیدی به خود جلب کرده‌اند. نقاط کوانتومی روی یک نیمه هادی با باندگپ بزرگ رسوب می‌کنند [۱۰]. از ویژگی‌های یگانه سلول‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی می‌توان به هزینه تولید پایین، دوستدار محیط زیست، فرآیند تولید ساده، جذب زیاد نور، تولید چند اکسیژن، باندگپ قابل تنظیم نقاط کوانتومی، راندمان بالا، وجود روش‌های مختلف در سنتز نیمه هادی و پایداری بالا در برابر گرما اشاره کرد. در این زمینه از تشکیل الکتروولیت‌های شبه جامد یا ژل مبتنی بر پلیمر استفاده شده است که به طور چشمگیری ثبات الکتروولیت به دلیل ماهیت نیمه جامد افزایش و میزان تبخیر کاهش یافته است. اما از طرفی به دلیل ماهیت نیمه جامد آن الکتروولیت‌ها اثر فتولتاییک کاهش یافته است که در این زمینه [۱۱] سینک و همکاران<sup>۱</sup> از اثر دوپ کردن Poly(ethylene Oxide) PEO بر پایه الکتروولیت‌های پلیمری با نقاط کوانتومی سولفید کادمیم که با سولفیدروی پوشش داده شده است استفاده کرده‌اند. از روش‌های ساخت سولفیدمس می‌توان به واکنش بخار مرطوب، تابش فراصوت، ماکروبو واکنش بخارشیمیایی، رسوب گذاری الکتروکی، رسوب گذاری لایه اتمی اشاره کرد [8, 10-12].

امروزه با هدف ساخت الکترودهای کمکی سولفیدسرب و سولفیدمس رفتار شیمیایی بسترهای سربی و برنجی مورد بررسی قرار گرفته است. الکترودهای کمکی مبتنی بر فلز دارای ساختار متخلخل با خواص کاتالیستی متوسط هستند. برای مثال در سال ۲۰۱۶ میلادی [۱۳] صمدپور و همکاران<sup>۲</sup> از نانو کامپوزیت Graghen/Cus/Pbs به عنوان الکتروود ضد کارگر در سل‌های خورشیدی حساس شده با نقاط کوانتومی استفاده کرده‌اند، نتایج حاصل نشان می‌دهد پیش رسوب گرافن موجب افزایش فاکتور پرشدگی و بازدهی سل شده است. در سال ۲۰۲۰ میلادی [۱۴] زیندین و همکاران<sup>۳</sup> با ایجاد نقص در شبکه کریستال نانو ساختارهای سولفیدمس با افزایش غلظت سرب دوپ شده، خاصیت نوری و فتوکاتالیستی را بهبود بخشیده‌اند. در این پروژه از دو نیمه هادی سولفیدمس و سولفیدسرب برای ساخت سل خورشیدی و از دو نیمه هادی سولفید کادمیم و سولفیدروی برای بهبود خواص آن‌ها استفاده شده است. لایه نشانی نیمه هادی‌ها

(۱) Singh. et al

(۳) Successive Ionic Layer Adsorption And Reaction

(۵) Lead(II) nitrate

(۷) Cadmium nitrate

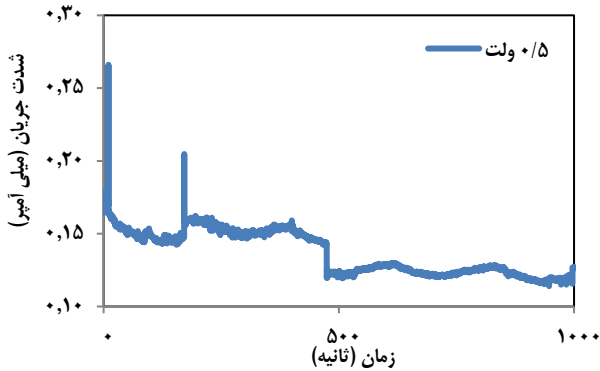
(۹) ITO(Indium tin oxide)

(۲) R.Zeinodin .et al

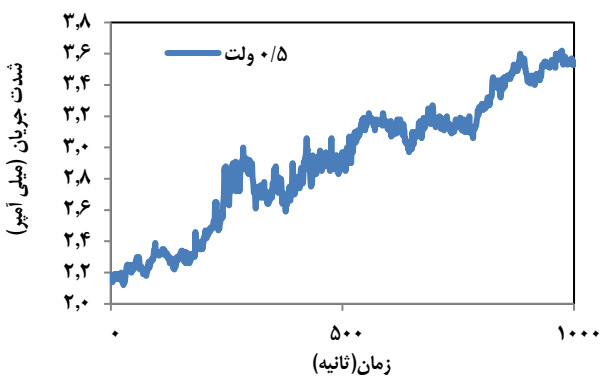
(۴) Nicolau

(۶) CuSO4· 5H2O (pentahydrate)

(۸) Zinc sulfate



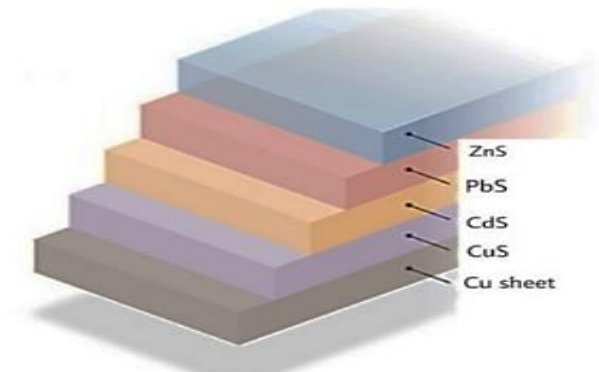
شکل ۲- کروئوآمپرومتری سل ITO در پتانسیل ۰/۵ ولت (به ترتیب ۱۰۰ ثانیه تاریکی و ۱۰۰ ثانیه نور)



شکل ۳- کروئوآمپرومتری سل ITO/Cu Sub/10CuS/2CdS/10PbS/2ZnS (IM) در پتانسیل ۰/۵ ولت (به ترتیب ۱۰۰ ثانیه تاریکی و ۱۰۰ ثانیه نور)

کرده است. گویای این است سل ساخته شده نسبت به نور حساس تر شده است. با اعمال پتانسیل به سل بدلیل اکسید و احیا کریستال‌ها تغییر کرده که این خود باعث ایجاد روند صعودی در نمودار شده است. به هدف ساخت سل حساس تر با هدایت بیشتر و مقاومت کمتر به بررسی سل‌های ساخته شده با بستر مسی پرداخته شده است. در ابتدا برای ساخت سل‌های مسی از تعداد لایه‌های متفاوت نیمه هادی‌های سولفیدمس و سولفیدسرب استفاده شده است. برای بررسی رفتار سل‌های ساخته شده منحنی‌های کروئوآمپرومتری هر یک از سل‌ها به مدت زمان ۱۰۰۰ ثانیه در سه پتانسیل متفاوت گرفته شده است.

جدول ۱ نشان می‌دهد در سیکل‌های کمتر چون لایه نشانی به صورت جزئی انجام شده، حساسیت کمی در سل دیده شده است و با افزایش تعداد سیکل‌های سیلار، چگالی جریان و حساسیت سل افزایش یافته است. با افزایش تعداد سیکل‌های سیلار بدلیل افزایش اندازه ذرات نیمه هادی‌های لایه نشانی شده با افزایش میزان پتانسیل تغییرات اختلاف شدت جریان سل کاهش یافته است.



شکل ۱- شماتیک ترتیب لایه نشانی سلول خورشیدی حساس شده با بستر مسی در این پروژه

در محلول کاتیونی با غلظت ۱ مولار به مدت ۵ ثانیه قرارداده شده است. پس از خشک شدن به مدت ۵ ثانیه در پیش ماده آنیونی قرار داده شده است. در مرحله آخر با خشک کن خشک شده است. برای شست و شوی سل ساخته شده با بستر مسی از آب، صابون و اتانول استفاده شده است. در لایه نشانی این سل‌ها به روش سیلار از دو پیش ماده کاتیونی و آنیونی استفاده شده است. برای این کار تمام سطح سل مسی مورد نظر در محلول کاتیونی با غلظت ۱ یا ۰/۵ مولار به مدت ۵ ثانیه قرارداده شده است. پس از خشک شدن به مدت ۵ ثانیه در پیش ماده آنیونی (سولفیدسرب) قرار داده شده است. در مرحله آخر با خشک کن خشک شده است. برای لایه نشانی رسوبات دیگر سولفیدکادمیم، سولفیدسرب و سولفیدروی به روش سیلار مثل مراحل فوق انجام شده با این تفاوت که برای لایه نشانی هر کدام از پیش ماده کاتیونی مربوطه استفاده شده است.

## نتیجه‌ها و بحث

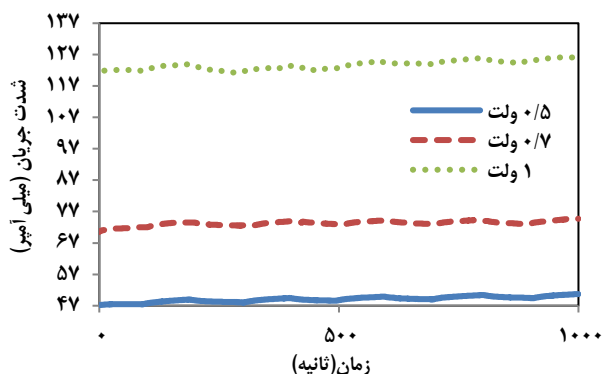
در ابتدای کار حساسیت سل ITO به کمک تکنیک کروئوآمپرومتری در پتانسیل ۰/۵ ولت مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق منحنی کروئوآمپرومتری شکل ۲ ITO نسبت به نور و تاریکی دارای حساسیت کم است. حساسیت مشاهده شده مربوط به اکسید قلع ایندیوم است ولی به دلیل مقاومت بالای شیشه میزان شدت جریان مشاهده شده و تغییرات آن در تاریکی و نور در حد میکروآمپر است. در ادامه به منظور افزایش میزان هدایت و حساسیت برای ساخت سل پس از لایه نشانی مس روی شیشه ITO ده لایه سولفیدمس دو لایه سولفیدکادمیم ده لایه سولفیدسرب و دو لایه سولفیدروی به روش سیلار لایه نشانی شده است. مطابق منحنی‌های کروئوآمپرومتری شکل ۲ و ۳ میزان شدت جریان از ۰/۲ به ۳ میلی آمپر افزایش یافته و میزان مقاومت به کمک لایه نشانی نیمه هادی‌ها کاهش پیدا

جدول ۱- اثر اختلاف تاریکی و نور سه سل ساخته شده با تعداد لایه های سولفید مس و سولفید سرب متفاوت

نام سل	اختلاف شدت جریان در تاریکی و روشنایی در کروئوآمپرومتری ۰/۵ ولت (برحسب میلی آمپر)	اختلاف شدت جریان در تاریکی و روشنایی در کروئوآمپرومتری ۰/۷ ولت (برحسب میلی آمپر)	اختلاف شدت جریان در تاریکی و روشنایی در کروئوآمپرومتری ۱ ولت (برحسب میلی آمپر)
Cu sheet / 4CuS / 4 PbS (1 M)	۰/۳۰	۱	۳
Cu sheet / 8CuS / 8 PbS (1M)	۰/۴۰	۰/۶۰	۳
Cu sheet / 10CuS / 10 PbS (1 M)	۱/۴۰	۱/۵۰	۱/۷۰

جدول ۲- اثر اختلاف تاریکی و نور با افزایش مقدار کم سولفید کادمیم و سولفید روی به ده سیکل سولفید مس و ده سیکل سولفید سرب

نام سل	اختلاف شدت جریان در تاریکی و روشنایی در کروئوآمپرومتری ۰/۵ ولت (برحسب میلی آمپر)	اختلاف شدت جریان در تاریکی و روشنایی در کروئوآمپرومتری ۰/۷ ولت (برحسب میلی آمپر)	اختلاف شدت جریان در تاریکی و روشنایی در کروئوآمپرومتری ۱ ولت (برحسب میلی آمپر)
Cu sheet / 10CuS/2 CdS / 10PbS (1 M)	۰/۶۰	۰/۸۰	۱
Cu sheet / 10 CuS /10PbS /2 ZnS (1M)	۰/۶۰	۰/۴۰	۰/۴۰
Cu sheet / 10CuS/2CdS /10 PbS /1 ZnS (1 M)	۰/۳۸	۱	۲/۵۰
Cu sheet / 10CuS/1CdS /10 PbS /2 ZnS (1 M)	۰/۳۰	۰/۷۰	۱/۵۰



شکل ۴- کروئوآمپرومتری Cu sheet / 10CuS / 10 PbS (1 M) در سه پتانسیل (به ترتیب ۱۰۰ ثانیه تاریکی و ۱۰۰ ثانیه نور)

نسبت به سولفیدروی (در سل شماره ۳) در مقایسه با حالتی که تعداد سیکل های سیلار سولفیدروی بیشتر از سولفیدکادمیم است (در سل شماره ۴) سل حساس تری حاصل کرده است. به این یعنی فوتون های نوری بیشتری توسط سل حاصله جذب شده که افزایش غلظت حاملین بار را در پی داشته است و لایه نشانی سولفید روی موجب افزایش مقاومت سل شده است. به طور کلی مقایسه حساسیت چهار سل جدول ۲ نشان دهنده این است حساسیت سل در زمان استفاده از چهار نیمه هادی بهبود یافته است.

در ادامه تحقیقات سل ها مشابه سری قبل از دو سولفیدمس و سولفیدسرب ساخته شده اما به هدف ساخت سل پهنه با حساسیت

سل ساخته شده با ده سیکل سولفیدمس و سولفیدسرب نسبت به دو سل دیگر حساسیت بیشتری دارد. به همین منظور در ادامه منحنی های کروئوآمپرومتری حساس ترین سل ساخته شده در سه پتانسیل بررسی خواهد شد.

مطابق شکل (۴) به دلیل افزایش جذب حاملین بار در حضور نور، جریان افزایش و در شرایط تاریکی به دلیل باز ترکیبی الکترون و حفره کاهش یافته است و مطابق قانون اهم با افزایش پتانسیل، شدت جریان افزایش پیدا کرده است. نمودارها کاملاً مثلی است و این مثالی بودن به دلیل کنترل جریان بوسیله سینتیک واکنش اکسید و احیا بر اثر اعمال پتانسیل است به طوری که اگر سینتیک کنترل کننده نباشد منحنی خیلی سریع افزایش و کاهش خواهد داشت. در پتانسیل ۰/۷ ولت بعد از چندین بار اعمال تاریکی و نور تغییر چشمگیری در شدت جریان عبوری ایجاد نشده و جریان به صورت متناوب تکرار شده است. این یعنی سل تقریباً به پایداری رسیده است و با تغییر شرایط نور و تاریکی شیفث مثبت و منفی به یک اندازه می باشد. به منظور ساخت این سل با حساسیت بیشتر دو نیمه هادی سولفیدکادمیم و سولفیدروی به دو سولفید قبل اضافه شده است. نتایج حاصل از جدول ۲ نشان می دهد اضافه کردن دو سیکل سولفیدروی یا اضافه شدن دولایه سولفیدکادمیم به ده سیکل سولفیدمس و سولفیدروی موجب کاهش حساسیت سل و افزایش مقاومت آن شده است. بیشتر بودن تعداد سیکل های سیلار سولفیدکادمیم

جدول ۳- اثر اختلاف تاریکی و نور با افزایش مقدار کم سولفید کادمیم و سولفید روی به شش سیکل سولفید مس و شش سیکل سولفید سرب

نام سل	اختلاف شدت جریان در تاریکی و روشنایی در کروئوآمپرومتری ۰/۵ ولت (برحسب میلی آمپر)	اختلاف شدت جریان در تاریکی و روشنایی در کروئوآمپرومتری ۰/۷ ولت (برحسب میلی آمپر)	اختلاف شدت جریان در تاریکی و روشنایی در کروئوآمپرومتری ۱ ولت (برحسب میلی آمپر)
۱	۰/۰۷	۰/۱۰	۰/۳۰
۲	۰/۳۶	۳/۵۰	*
۳	۰/۴۰	۰/۹۰	۱/۸۰
۴	۰/۳۵	۰/۷۰	۲

جدول ۴- اثر اختلاف تاریکی و نور با افزایش مقدار کم سولفید کادمیم و سولفید روی به هشت سیکل سولفید مس و هشت سیکل سولفید سرب

نام سل	اختلاف شدت جریان در تاریکی و روشنایی در کروئوآمپرومتری ۰/۵ ولت (برحسب میلی آمپر)	اختلاف شدت جریان در تاریکی و روشنایی در کروئوآمپرومتری ۰/۷ ولت (برحسب میلی آمپر)	اختلاف شدت جریان در تاریکی و روشنایی در کروئوآمپرومتری ۱ ولت (برحسب میلی آمپر)
۱	۰/۰۲	۰/۱۰	۰/۱۰
۲	۳	۸	۱۴
۳	۰/۱۵	۱/۶۰	*
۴	۰/۱۷	۰/۳۰	۱/۲۰

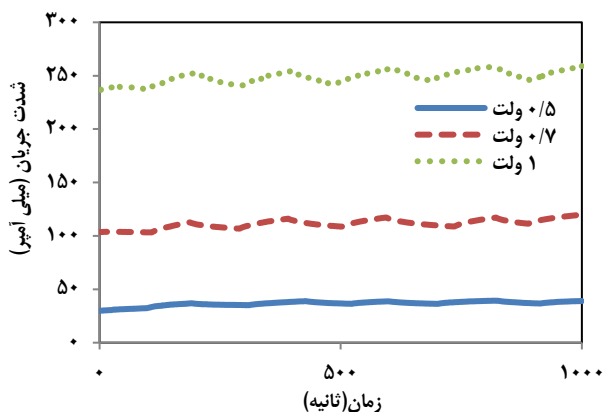
جدول ۵- اثر اختلاف تاریکی و نور با افزایش مقدار کم سولفید کادمیم و سولفید روی به ده سیکل سولفید مس و ده سیکل سولفید سرب

نام سل	اختلاف شدت جریان در تاریکی و روشنایی در کروئوآمپرومتری ۰/۵ ولت (برحسب میلی آمپر)	اختلاف شدت جریان در تاریکی و روشنایی در کروئوآمپرومتری ۰/۷ ولت (برحسب میلی آمپر)	اختلاف شدت جریان در تاریکی و روشنایی در کروئوآمپرومتری ۱ ولت (برحسب میلی آمپر)
۱	۰/۴۰	۰/۶۰	۰/۸۰
۲	۰/۳۰	۰/۵۰	۰/۷۰
۳	۰/۵۴	۰/۵۵	۰/۶۰
۴	۰/۱۳	۰/۲۰	۱/۵

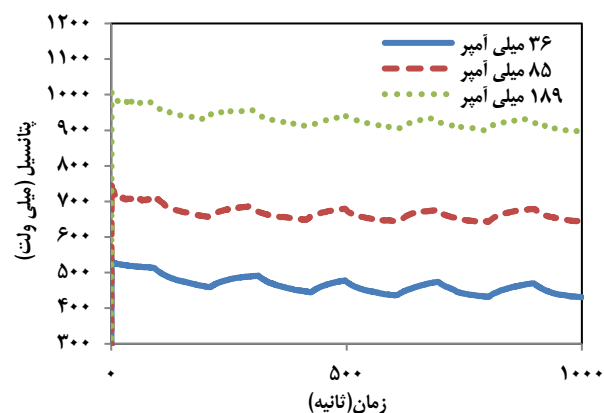
بدلیل تغییر اندازه نقاط کوانتومی حاصل از لایه نشانی سیلار بیشترین حساسیت و اختلاف شدت جریان در شرایط تاریکی و نور متعلق به سل ساخته شده با هشت سیکل سولفید مس و دو سیکل سولفید کادمیم و هشت سیکل سولفید سرب است.

مطابق جدول ۵ افزودن هم زمان دو سیکل سولفید کادمیم و سولفید روی به سل ساخته شده با ده سیکل سولفید مس و ده سیکل سولفید سرب در پتانسیل یک ولت موجب حساس تر شدن سل شده است این یعنی الکتروود هادی تر شده و فوتون های نوری بیشتری جذب شده که افزایش غلظت حاملین بار را در پی داشته است. اما بدلیل مقاومت حاصل از لایه نشانی ده سیکل سولفید مس و ده سیکل سولفید سرب حساسیت زیادی در سل های ساخته شده مشاهده نشده است.

بیشتر میزان غلظت نیمه هادی ها به ۰/۵ مولار کاهش یافته است. در ردیف دوم جدول ۳ در پتانسیل یک ولت داده وجود ندارد. جدول ۳ نشان می دهد در سل ساخته شده با شش سیکل سولفید مس به همراه دو سیکل سولفید کادمیم و شش سیکل سولفید سرب با تغییر پتانسیل از ۰/۵ به ۰/۷ ولت میزان اختلاف شدت جریان ده برابر شده است. در سل ساخته شده با شش سیکل سولفید مس و شش سیکل سولفید سرب افزودن دو نیمه هادی سولفید کادمیم و سولفید روی موجب افزایش حساسیت سل شده است. در ردیف سوم جدول ۴ در پتانسیل یک ولت داده وجود ندارد. جدول ۴ نشان می دهد افزودن سولفید کادمیم و سولفید روی به سولفید مس و سولفید سرب به طور هم زمان یا جداگانه موجب افزایش میزان حساسیت سل شده است. مطابق داده های بدست آمده



شکل ۶- کروئوپرومتری سل  $\text{Cu sheet} / 8\text{CuS}/2\text{CdS}/8\text{PbS} (0.5\text{ M})$  در سه پتانسیل (به ترتیب ۱۰۰ ثانیه تاریکی و ۱۰۰ ثانیه نور)

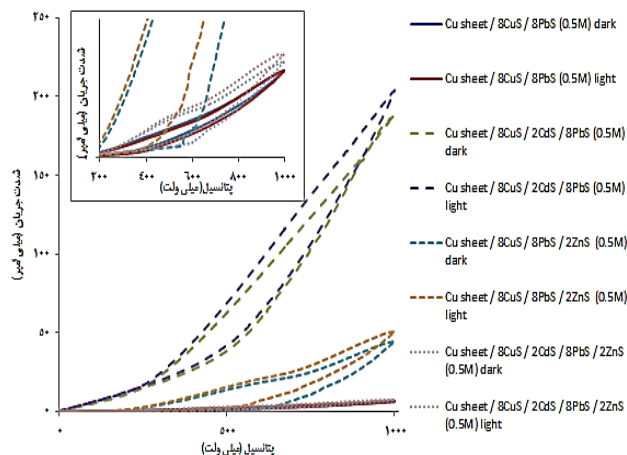


شکل ۷- کروئوپتانسیومتری سل  $\text{Cu sheet} / 8\text{CuS}/2\text{CdS}/8\text{PbS} (0.5\text{ M})$  در جریان های مختلف (به ترتیب ۱۰۰ ثانیه تاریکی و ۱۰۰ ثانیه نور)

بار دیگر مشاهده کرد. در زمان تابش نور با جذب فوتون های نوری چون الکترون ها از باند والانس به باند هدایت منتقل شده اند، تعداد الکترون ها در باند هدایت افزایش و در باند والانس کاهش یافته است. در هر منحنی کروئوپتانسیومتری شدت جریان ثابت است و چون با تابش نور میزان مقاومت کاهش یافته، کاهش پتانسیل مشاهده شده است. مطابق منحنی کروئوپتانسیومتری شکل ۷ با افزایش میزان شدت جریان پتانسیل هم افزایش یافته است.

#### بررسی ریخت شناسی سل ساخته شده

در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱</sup> شکل ۸ گرفته شده از سل ساخته شده  $\text{Cu sheet} / 8\text{CuS}/2\text{CdS}/8\text{PbS} (0.5\text{ M})$  بدلیل لایه نشانی سه نیمه هادی سولفیدمس سولفیدکادمیم و سولفیدسرب ریخت شناسی های مختلف را می توان مشاهده کرد.



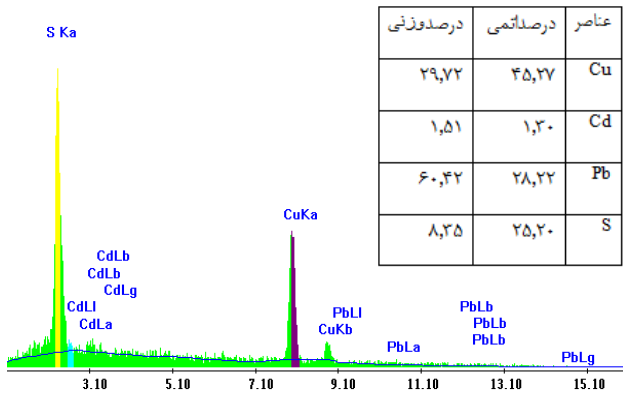
شکل ۵- بررسی اثر C-V سل های ساخته شده با هشت سیکل سولفید مس و سولفید سرب به همراه سولفید کادمیم و سولفید روی با غلظت ۰/۵M تحت اثر نور تاریکی در بازه پتانسیلی ۰ تا ۱ ولت

طبق نمودار ولتامتری چرخه ای شکل ۵ با اعمال پتانسیل ۰ تا ۱ ولت در تاریکی و روشنایی  $200\text{ mw/cm}^2$  شدت جریان در حضور نور افزایش یافته است. افزودن سولفیدکادمیم و سولفیدروی به دو نیمه هادی سولفیدمس و سولفیدسرب موجب هادی تر شدن سل حاصله شده است. بدلیل اثر لایه سولفید کادمیم بیشترین میزان هدایت و اختلاف شدت جریان در شرایط تاریکی و نور متعلق به سل ساخته شده با هشت سیکل سولفیدمس و سولفیدسرب به همراه دو سیکل سولفیدکادمیم است. برای تایید نتایج بدست آمده نمودار شکل ۵ در ادامه منحنی کروئوپرومتری هر سل در سه پتانسیل به مدت ۱۰۰۰ ثانیه گرفته شده است.

سل بهینه در طی انجام این پروژه سل ساخته شده با هشت سیکل سولفید مس و هشت سیکل سولفید سرب به همراه دو سیکل سولفید کادمیم است. برای بررسی رفتار سل در حضور نور و تاریکی منحنی کروئوپرومتری آن گرفته شده است. مطابق شکل ۶ بدلیل اینکه تولید الکترون و باز ترکیب الکترون حفره در این سل به یک مقدار بوده و از طرفی بدلیل سینتیک پایدار واکنش اکسید و احیا سل به تعادل ترمودینامیکی رسیده و مقدار شیفت مثبت و منفی شدت جریان به یک میزان است. مطابق قانون اهم با افزایش پتانسیل شدت جریان افزایش یافته است.

برای تایید اطلاعات حاصل از ولتامتری چرخه ای و کروئوپرومتری، منحنی کروئوپتانسیومتری شکل ۷ گرفته شده است. با کمک تکنیک کروئوپتانسیومتری علاوه بر اندازه گیری مقدار پتانسیل تولیدی سل ساخته شده می توان حساسیت سل را نسبت به نور و تاریکی

(۱) scanning electron microscope



شکل ۱۰- تصویر EDS گرفته شده از سل ساخته شده  
Cu sheet / 8CuS/2CdS / 8 PbS (0.5 M)

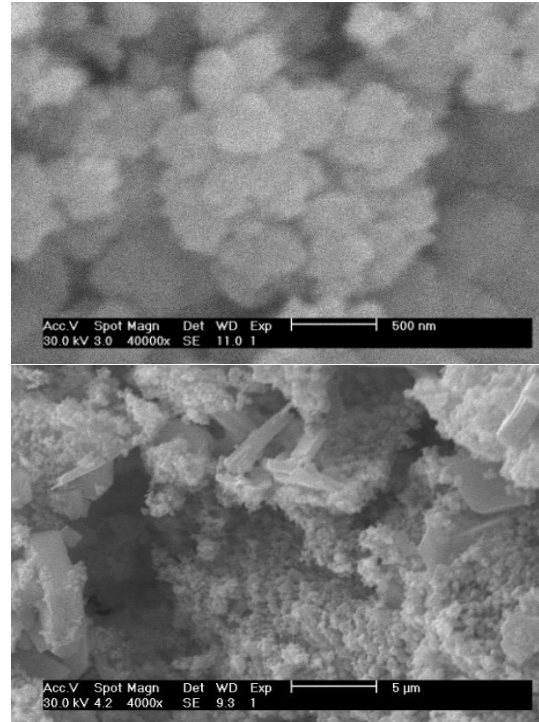
### نتایج آنالیز EDS<sup>۱</sup>

شکل ۱۰ طیف EDS گرفته شده از سل به همراه درصد عناصر مواد استفاده شده در ساخت سل، نشان می‌دهد بدلیل لایه نشانی هشت سیکل سولفیدمس و سولفیدسرب درصد اتمی مس و سرب چند ده برابر کادمیم می‌باشد و مشخص می‌کند سل به خوبی لایه نشانی شده است.

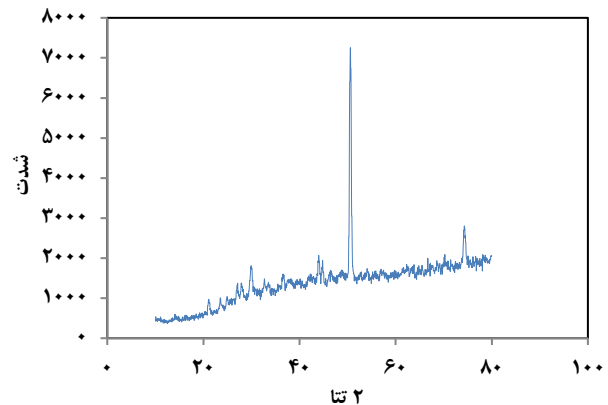
### نتیجه گیری

بر اساس نتایج بدست آمده بهترین سل ساخته شده سل Cu sheet / 8CuS/2CdS / 8 PbS (0.5 M) است. چون بیشترین میزان حساسیت و اختلاف شدت جریان در شرایط نور و تاریکی در سه پتانسیل ۰,۵، ۰,۷ و ۱ ولت به ترتیب ۳ و ۸ و ۱۴ میلی آمپر متعلق به سل مذکور است که به روش سیلار لایه نشانی شده است. در طی انجام این پروژه افزودن نیمه هادی‌های سولفید کادمیم و سولفیدروی به دو نیمه هادی سولفیدمس و سولفیدسرب موجب افزایش حساسیت سل‌های حاصله شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی سل مذکور نشان داد ذرات نیمه هادی در حد نانومتر است. علاوه بر این سل‌های ساخته شده به صورت تک سل بوده و از ورق مس به عنوان بستر استفاده شده است. این ورق‌ها ارزان هستند، پایداری بالایی دارند و در ضخامت‌های مختلف می‌توان آنها را تهیه نمود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۹



شکل ۸- تصاویر SEM سل Cu sheet / 8CuS/2CdS / 8 PbS (0.5 M) با بزرگنمایی ۵ میکرومتر و ۵۰۰ نانومتر



شکل ۹- تصویر XRD سل ساخته شده Cu sheet / 8CuS/2CdS / 8 PbS (0.5 M)

با توجه به شکل این احتمال وجود دارد که ذرات لایه نشانی شده در حد نانومتر است.

طیف سنجی پراش اشعه ایکس<sup>۱</sup> برای مطالعه بیشتر ساختار بلوری و خواص فیزیکی سل ساخته شده گرفته شده است. تصویر XRD و طول موج عناصر لایه نشانی شده نشان می‌دهد سل ساخته شده به خوبی لایه نشانی شده است.

(۱) X-ray diffraction

(۲) Energy-dispersive X-ray spectroscopy

## مراجع

- [1]. Kim H.J., et al. [Facile Chemical Bath Deposition of CuS Nano Peas Like Structure as a High Efficient Counter Electrode for Quantum-Dot Sensitized Solar Cells](#). *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **739**: (Elsevier B.V., 2015).
- [2]. Ajayan J., et al. [A Review of Photovoltaic Performance of Organic/Inorganic Solar Cells for Future Renewable and Sustainable Energy Technologies](#). *Superlattices Microstruct.* **143**: 106549 (2020).
- [3]. Rabaia M.K.H., et al. [Environmental impacts of solar energy systems: A review](#). *Sci. Total Environ.* **754**: 141989 (2021).
- [4]. Samadpour M., Jun H.K., Parand P., Najafi M.N., [CdS Quantum Dots Pre-Deposition for Efficiency Enhancement of Quantum Dot-Sensitized Solar Cells](#). *Sol. Energy* **188**: 825–830 (2019).
- [5]. Xing M., Zhang Y., Shen Q., Wang R., [Temperature Dependent Photovoltaic Performance of TiO<sub>2</sub>/PbS Heterojunction Quantum Dot Solar Cells](#). *Sol. Energy* **195**: 1–5 (2020).
- [6]. Kershaw S.V., Jing L., Huang X., Gao M., Rogach A.L., [Materials Aspects of Semiconductor Nanocrystals for Optoelectronic Applications](#). *Mater. Horizons* **4**: 155–205 (2017).
- [7]. Zheng W., Zhang S., [The Effect of CuS Counter Electrode Microtopography on the Properties of Quantum Dot Sensitized Solar Cells](#). *Inorg. Chem. Commun.* **122**: 108294 (2020).
- [8]. Sahu A., Garg A., Dixit A., [A Review on Quantum dot Sensitized Solar Cells: Past, Present and Future Towards Carrier Multiplication with a Possibility for Higher Efficiency](#). *Sol. Energy* **203**: 210–239 (2020).
- [9]. Li W., et al. [Improved Performance of Quantum Dot-Sensitized Solar Cells by Full-Spectrum Utilization](#). *Superlattices Microstruct.* **148**: 106730 (2020).
- [10]. Badawi A., et al. [Study of the Back Recombination Processes of PbS Quantum Dots Sensitized Solar Cells](#). *Superlattices Microstruct.* **100**: 694–702 (2016).
- [11]. Dissanayake M.A.K.L., Liyanage T., Jaseetharan T., Senadeera G.K.R., Dassanayake B.S., [Effect of PbS Quantum Dot-Doped Polysulfide Nanofiber Gel Polymer Electrolyte on Efficiency Enhancement in CdS Quantum Dot-Sensitized TiO<sub>2</sub> Solar Cells](#). *Electrochim. Acta* **347**: 136311 (2020).
- [12]. Khalili S.S., Dehghani H., Afroz M., [Composite Films of Metal Doped CoS/Carbon Allotropes; Efficient Electrocatalyst Counter Electrodes for High Performance Quantum Dot-Sensitized Solar Cells](#). *J. Colloid Interface Sci.* **493**: 32–41 (2017).
- [13]. Samadpour M., Arabzade S., [Graphene/CuS/PbS Nanocomposite as an Effective Counter Electrode for Quantum dot Sensitized Solar Cells](#). *J. Alloys Compd.* **696**: 369–375 (2017).
- [14]. Zeinodin R., Jamali-Sheini F., Cheraghizade M., [Physical Properties of Pb-Doped CuS Nanostructures for Optoelectronic Applications](#). *Mater. Sci. Semicond. Process.* **123**: 105501 (2021).
- [15]. Deshmukh S.G., Kheraj V., Panchal A.K., [Preparation of Nanocrystalline CdS Thin Film by Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction \(SILAR\) Method](#). *Mater. Today Proc.* **5**: 21322–21327 (2018).
- [16]. Muradov M.B., et al. [Formation Mechanism of Cd<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>S/PVA Nanocomposites by SILAR Method](#). *Results Phys.* **18**: 103280 (2020).