



# تأثیر لایه های انتقال دهنده ی حفره PTAA و PEDOT:PSS بر ریخت شناسی و عملکرد در ساختار سلول خورشیدی پروسکایتی مسطح معکوس

زینب صفری<sup>۱</sup> | محمود برهانی زرندی<sup>۱\*</sup> | محمدرضا ناطقی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>گروه اتمی و مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد

<sup>۲</sup>گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد، یزد

**چکیده:** در این پژوهش، از ساختار سلول خورشیدی پروسکایتی مسطح معکوس به دلیل داشتن ویژگیهای برجسته از جمله، ساخت در دمای پایین و هزینه ساخت پایین، استفاده شده است، اثر دو لایه ی انتقال دهنده حفره PEDOT:PSS و PTAA (به عنوان لایه ی زیرین پروسکایت) بر ریخت شناسی لایه پروسکایت و پارامترهای موثر بر عملکرد سلول خورشیدی (Jsc, Voc, FF, PCE) بررسی شد. تصاویر SEM و AFM نشان داد، ریخت شناسی مناسب و پوشانندگی بالای فیلم پروسکایت با لایه ی PTAA در مقایسه با فیلم پروسکایت با لایه ی PEDOT:PSS، سبب افزایش جذب بیشتر نور و بهبود کارایی در سلول خورشیدی پروسکایت بر پایه PTAA شد. به طوریکه بازدهی آنها به ۱۱/۳۷٪ رسید، در حالی که بیشینه ی بازدهی بر سلول خورشیدی مبتنی بر PEDOT:PSS، ۹/۲۳٪ است.

**واژگان کلیدی:** سلول خورشیدی، پروسکایت، لایه انتقال دهنده حفره، ساختار مسطح معکوس، ریخت شناسی.

[mborhani@yazd.ac.ir](mailto:mborhani@yazd.ac.ir)

که این چیدمانها، بستگی به توالی لایه نشانی لایه های حامل های بار در اطراف پروسکایت دارد [۱۲ و ۱۳]. متداول ترین ماده-ی که به عنوان انتقال دهنده حفره و الکترون در سلول های خورشیدی پروسکایتی متخلخل مورد استفاده قرار می گیرد، به ترتیب Spiro-OMeTAD و TiO<sub>2</sub> است [۱۴ و ۱۵]. لایه ی TiO<sub>2</sub> به طور معمول نیاز به دمای پخت بسیار بالایی دارد (۵۰۰ درجه سانتیگراد)، که تجاری سازی سلول خورشیدی را محدود می سازد [۱۵ و ۱۶]. ماده ی Spiro-OMeTAD باعث افزایش چشمگیر بازدهی سلول های خورشیدی پروسکایت شده است، اما ماده ی Spiro-OMeTAD بسیار گرانبه است و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست [۱۷ و ۱۸]. مسئله ی قابل توجه در مورد Spiro-OMeTAD اینست که، برای افزایش تحرک پذیری حفره نیاز به ترکیبات افزودنی همچون نمکی از لیتیوم (Li-TFSI) و ترت بوتیل پیریدین به نسبت زیاد دارد. متأسفانه، این ترکیبات اغلب تأثیر منفی بر ثبات دستگاه دارند

## ۱- مقدمه

با پیدایش سلول های خورشیدی پروسکایتی هالیدی آلی-معدنی، توجه پژوهشگران بر این دستگاه های فتوولتائیک جدید متمرکز شده است، زیرا آنها مزایای خاصی را به ارمغان می آورند، دارای ویژگی های برجسته ی از جمله وزن سبک، هزینه پایین، ساخت ساده و بازده تبدیل قدرت بالا (بیش از ۲۲٪) هستند [۱-۴]. با این حال، سلول های خورشیدی پروسکایتی از معایبی، مانند ثبات و انعطاف پذیری پایین رنج می برند، که مانع از کاربرد تجاری آنها شده است [۵، ۶]. تاکنون تغییراتی در معماری و روش های ساخت برای بهبود عملکرد و پایداری این سلولها انجام شده است [۷-۹]. از جمله، ساختارهای که برای سلول های خورشیدی پروسکایتی مطرح شده، ساختارهای متخلخل و مسطح است [۱۰، ۱۱]. سلولهای خورشیدی پروسکایتی متخلخل/مسطح به دو صورت منظم (n-i-p) معکوس (p-i-n) دسته بندی می شوند،

[۱۹]. بنابراین، گرانیقیمت بودن و پایداری محدود از نقاط ضعف این ماده است [۱۸ و ۱۹]. بنابراین، برای کاهش دما و قیمت تولید، سلول‌های خورشیدی پروسکایتی مسطح معکوس و مستقیم به سرعت در حال توسعه هستند [۱۱ و ۱۲]. پژوهشگران به تازگی ساختارهای مسطح معکوس را ارجحتر می‌دانند، چون این ساختارها به‌طور معمول هیستریزیس ناچیزی را نشان می‌دهند [۱۲]، برخلاف سلول‌های خورشیدی پروسکایتی مسطح مستقیم که منحنی ولتاژ-جریان از هیستریزیس بالا رنج می‌برد. بنابراین، سلول‌های خورشیدی پروسکایتی مسطح معکوس پتانسیل زیادی در دستیابی به سلول‌های با قابلیت اطمینان بالا دارند [۲۰]. برای غلبه بر چالش دما و قیمت، مواد انتقال دهنده‌ی حفره که به‌طور گسترده در ساختارهای مسطح معکوس استفاده می‌شوند، عبارتند از: پلی‌استایرن سولفونات PDOT:PSS، پلی‌تری‌آریل‌آمین PTAA، نیکل‌اکسید NiO، مس تیوسانت CuSCN و مس‌یدید CuI است [۲۱-۲۵]. لازم به ذکر است، لایه‌های انتقال دهنده حفره نقش مهمی در ساختار سلول خورشیدی پروسکایتی دارند. آنها انتقال، حفره را بهبود می‌بخشند و تاثیر زیادی بر روی ولتاژ مدار باز (Voc) دارند. در واقع، انتخاب یک لایه انتقال دهنده حفره مناسب منجر به بالا رفتن Voc تا گستره‌ی ۱/۵ تا ۱/۶۱ ولت در سلول خورشیدی پروسکایت می‌شود [۲۲ و ۲۶]. همچنین، لایه انتقال دهنده‌ی حفره به عنوان لایه‌ی زیرین فیلم پروسکایت در موارد بسیاری باعث بهبود کیفیت سطح لایه پروسکایت شده، در مقایسه با حالتی که از حضور آنها در ساختار سلول خورشیدی مسطح معکوس صرف نظر شده باشد [۲۶]. همچنین، با توجه به توالی لایه‌نشانی این لایه‌ها از تماس مستقیم پروسکایت با الکترودها ساختار سلول خورشیدی جلوگیری کرده در نتیجه از بازترکیب حامل‌های بار جلوگیری می‌کند و منجر به بهبود عملکرد دستگاه می‌شوند [۲۷]، از دیگر مزایای استفاده از آن، سبب بهبود عملکرد سلول خورشیدی می‌شود. PDOT:PSS از محبوب‌ترین مواد انتقال دهنده‌ی حفره در ساختارهای مسطح معکوس است. از ویژگی‌های برجسته این انتقال دهنده حفره می‌توان به قابلیت پوشش‌دهی خوب، پایداری حرارتی بالا، انعطاف پذیری مکانیکی خوب، شفافیت مطلق نوری، دمای پخت پایین و همچنین سطح مناسب انرژی اشاره کرد [۱۲ و ۲۱]. به‌طور معمول PDOT:PSS بر

الکترودهای شفاف ITO با روش‌های چرخشی لایه‌نشانی می‌شود. ضخامت PDOT:PSS بر بسترهای ITO بسته به گرانیروی، میزان رسوب، بین ۱۰ تا ۲۰ نانومتر گزارش شده است [۲۸، ۲۹]. در حقیقت، به علت ویژگی اسیدی PDOT:PSS، ضخیم بودن این لایه باعث تخریب فیلم پروسکایت دز ساختارهای مستقیم می‌شود. افزون بر این، لایه‌ی PDOT:PSS با ضخامت زیاد و بدون میدان الکتریکی درونی می‌تواند منجر به کاهش تحرک‌پذیری حامل‌های بار می‌شود و عملکرد سلول را تخریب می‌کند. بنابراین، ضخامت و پوشش مناسب لایه PDOT:PSS بسیار در عملکرد سلول تاثیرپذیر است [۲۹]. بطوریکه، ایجاد یک پوشش نامناسب PDOT:PSS بر سطح ITO سبب افزایش جریان نشتی در سلول خورشیدی پروسکایتی می‌شود و به شدت عملکرد دستگاه را تضعیف می‌کند. یکی دیگر از محبوب‌ترین لایه‌های انتقال دهنده‌ی حفره در ساختارهای مسطح معکوس PTAA است [۳۰]. از جمله ویژگی‌های PTAA می‌توان به تحرک‌پذیری بالای الکترون‌ها، شفافیت زیاد، پایداری محیطی و نیاز نداشتن به دمای پخت بالا اشاره کرد [۳۰]. علاوه بر این، از آنجا که پارامترهای موادهای بسیاری مانند وزن مولکولی و انحلال‌پذیری به‌طور قابل توجهی بر تحرک حامل‌های بار و ریخت شناسی فیلم اثر می‌گذارد، ماده انتقال دهنده بسیاری PTAA مستثنی از این قضیه ناست [۳۱]. اخیراً در گزارشی تاثیر وزن مولکولی PTAA را بر عملکرد سلول خورشیدی بررسی کرده‌اند و بیشترین بازدهی (۱۶٪/۴۶) را برای PTAA با وزن مولکولی بالا گزارش کردند [۳۲]. در یک گزارش دیگر، در مقایسه‌ی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی با لایه انتقال دهنده حفره PTAA و Spiro-OMeTAD، دستگاه‌های مبتنی بر PTAA دارای مقدار تخریب بسیار پایین‌تر نسبت به دستگاه‌های مبتنی بر Spiro-OMeTAD را هستند [۳۳]. به عنوان مثال، Duong و همکارانش نشان دادند، سلول‌های خورشیدی پروسکایتی با لایه انتقال دهنده PTAA پایداری گرمایی بهتری در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد دارند [۳۴].

در این پژوهش، از دو انتقال‌دهنده حفره‌ی PTAA و PDOT:PSS در ساختار سلول خورشیدی پروسکایتی مسطح معکوس استفاده کردیم و به مقایسه‌ی طیف جذب در گستره‌ی طول موج (۸۵۰-۴۰۰ نانومتر)، ریخت‌شناسی و توزیع نانوذرات

پروسکایت رشد داده شده بر سطح بر دو انتقال دهنده‌ی حفره PTAA و PDOT:PSS پرداختیم. در ادامه، عملکرد سلول‌های خورشیدی ساخته شده مبتنی بر این دو لایه انتقال دهنده حفره را بررسی کردیم.

## ۲- بخش تجربی

### ۲-۱- مواد و تجهیزات مورد استفاده

حلال‌های استون، اتانول (۹۸٪)، تولوئن (۹۸٪)، ان دی اتیل فرم امید (DMF) و دی‌متیل سولفواکسید (DMSO) از شرکت مرک، سرب یدید (PbI<sub>2</sub>) ۹۹٪، متیل‌آمونیم یدید (MAI) ۹۸٪، پلی‌تری‌آریل‌آمین (PTAA) و پلی‌استایرن سولفونات (PDOT:PSS) از شرکت سیگما آلدریج، PCBM و BCP از شرکت Ossila تهیه گردیده است.

برای مطالعه و بررسی سطح پوشش و ریخت شناسی پروسکایت ایجاد شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی Carl Zeiss Auriga40 Crossbeam و برای مطالعه توپوگرافی پروسکایت از میکروسکوپ نیروی اتمی مدل (model DEM Doalscope DS95) استفاده شده است. برای بررسی عملکرد فتوولتائیکی و مشخصه‌یابی‌های ولتاژ-جریان برای تعیین بازده سلول، اندازه‌گیری جریان مدار کوتاه و ولتاژ مدار باز از دستگاه شبیه‌ساز سلول خورشیدی Keithley 2400 با شدت نور استاندارد خورشید معادل AM 1.5G استفاده شد. طیف‌های جذب فیلم پروسکایت پوشش داده شده بر PTAA و PDOT:PSS با استفاده از اسپکتروفومتر UV-Vis (SPECORD 250) استخراج شد.

### ۲-۲- روش ساخت

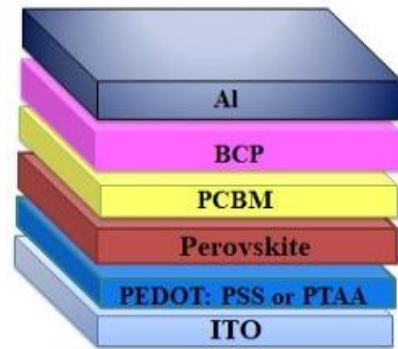
به منظور ساخت سلول، از ITO به‌عنوان زیرلایه استفاده شد. سلول‌های خورشیدی لایه نازک و نانو ساختار، نسبت به آلودگی‌های سطحی زیرلایه، بسیار حساس هستند. به همین منظور زیرلایه‌ها در چندین مرحله شستشو داده می‌شوند. ابتدا شیشه‌های ITO با آب و صابون شستشو داده و درون یک بشر قرار داده می‌شوند و با محلول آب دو بار تقطیر، استون و اتانول به

مدت ۱۵ دقیقه به ترتیب هر کدام در حمام فراصوت شستشو داده می‌شوند. سپس زیرلایه‌ها با جریان گاز N<sub>2</sub> خشک شده تا مرحله شستشو به اتمام برسد. در ادامه برای لایه‌نشانی، لایه انتقال دهنده‌ی حفره، ابتدا مقدار ۲/۵ میلی‌گرم از PTAA و در ۱ میلی‌لیتر تولوئن حل کرده، سپس، محلول PTAA و PDOT:PSS را با استفاده از دستگاه لایه‌نشانی چرخشی با دو سرعت ۵۰۰۰ و ۶۰۰۰ دور بر دقیقه و به مدت ۶۰ ثانیه بر بستری‌های ITO لایه‌نشانی شده و هر دو فیلم به ترتیب در دمای ۱۱۰ و ۱۵۰ درجه سانتیگراد خشک می‌شوند. در مرحله بعدی، به منظور تشکیل فیلم پروسکایت به روش تک مرحله‌ی بر روی لایه‌های PTAA و PDOT:PSS، محلول پروسکایت که متشکل از ۴۶۱ میلی‌گرم سرب یدید، ۱۵۹ میلی‌گرم پودر مای، ۶۳۵ میکرولیتر DMF و ۷۱ میکرولیتر DMSO به روش لایه‌نشانی چرخشی بر روی زیرلایه‌های انتقال دهنده‌ی حفره لایه‌نشانی می‌شوند. سپس، دو لایه انتقال دهنده‌ی الکترون و سد کننده حفره PCBM و BCP به ترتیب با سرعت ۶۰۰۰ و ۹۰۰۰ دور بر دقیقه لایه‌نشانی شدند. در نهایت لایه نازک آلومینیم با ضخامت ۵۰ نانومتر با روش تبخیر در خلأ بر روی لایه BCP قرار گرفت.

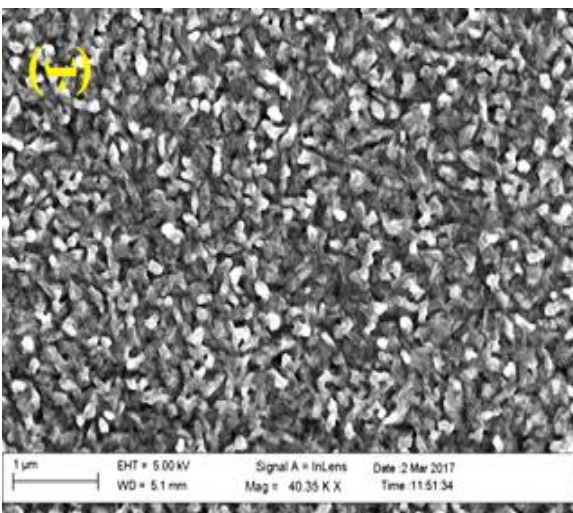
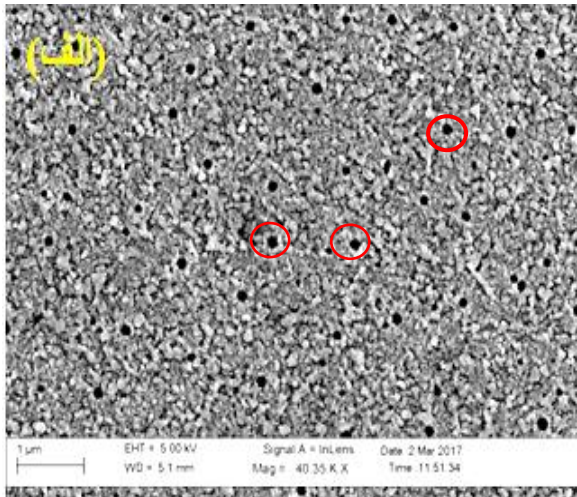
## ۳- نتایج و بحث

شکل (۱) ساختار طرح‌واره سلول خورشیدی پروسکایت مسطح معکوس و شکل (۲) ساختار مولکول‌های PTAA، PDOT:PSS، PCBM و BCP را نشان می‌دهند. ماده PCBM علاوه بر انتقال دهنده‌ی الکترون مناسب، سبب افزایش عملکرد و کاهش هیستریزس در سلول خورشیدی پروسکایتی می‌شود [۳۵، ۳۶]. ماده BCP به عنوان سد کننده‌ی حفره کاربرد دارد، علاوه بر اینکه سبب بهبود انتقال الکترون می‌شود مانند سدی از عبور حفره جلوگیری می‌کند [۳۷].

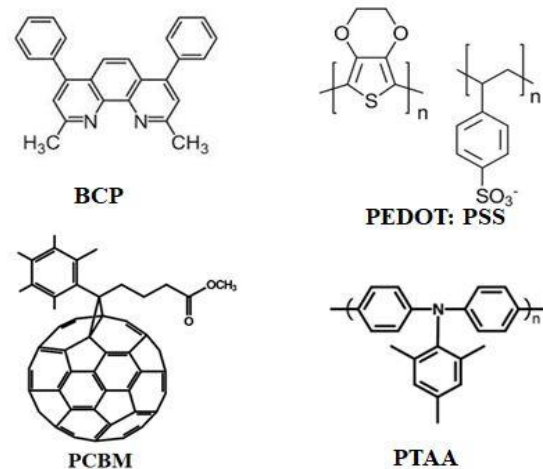
شکل ۳-الف) به وضوح مشخص است (دایره‌های قرمز رنگ در شکل ۳-الف) تعداد معدودی از حفره‌ها را نشان می‌دهد. این پوشش فیلم‌های پروسکایت نمی‌تواند برای یک دستگاه سلول خورشیدی با کارایی بالا مناسب باشد.



شکل (۱): ساختار سلول خورشیدی پروسکایت مسطح معکوس



شکل (۳): تصاویر SEM از سلولهای پروسکایتی ساخته شده، بر لایه‌های انتقال دهنده‌ی حفره PEDOT: PSS (الف) و PTAA (ب)



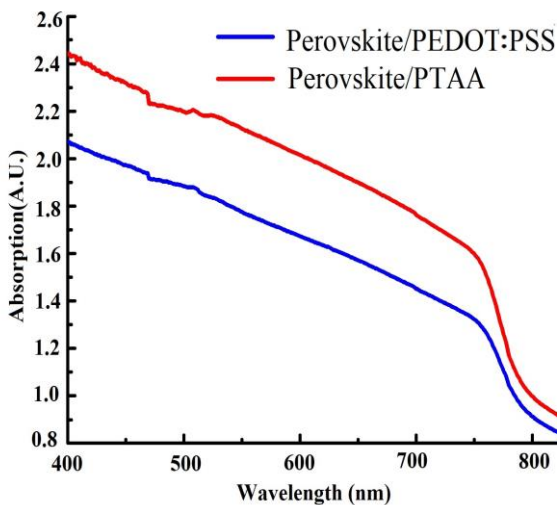
شکل (۲): ساختار مولکولی BCP، PCBM، PEDOT: PSS و PTAA

ماده‌های PTAA و PEDOT: PSS لایه‌های انتقال دهنده‌ی حفره هستند و همانطور که از طرح‌واره شکل (۱) مشخص است به‌عنوان زیر لایه‌ی برای فیلم پروسکایت محسوب می‌شوند، بنابراین، داشتن پوشش مناسب از این ماده‌ها سبب بالا رفتن کیفیت فیلم پروسکایت خواهد شد. یکی دیگر از پارامترهای بسیار تاثیرگذار بر عملکرد سلولهای خورشیدی پروسکایت بلورینگی و ریخت شناسی نانوذرات، لایه پروسکایت است [۳۸]. شکل (۳) تصاویر SEM مربوط به ریخت‌شناسی نانوذرات در لایه پروسکایت رشد داده شده بر بستری PEDOT: PSS و PTAA را نشان می‌دهد. نانو بلورهای پروسکایت مبتنی بر PTAA پوشش فشرده‌تری دارد. پوشاندگی بالای نانوذرات، لایه‌ی پروسکایت باعث جذب بیشتر نور و کارایی سلول خورشیدی می‌شود. در حالیکه حفره‌های ریزی در سطح فیلم پروسکایت پوشش داده شده بر سطح PEDOT: PSS

افزون بر این، سایز دانه‌های پروسکایت ابعاد کوچکتری در حالتی که PEDOT: PSS لایه‌ی انتقال دهنده حفره است، دارد. سایز کوچک بلورهای پروسکایت باعث افزایش تعداد مرزدانه‌ها شده و عامل مخربی در عملکرد دستگاه محسوب می‌شود. به‌خوبی شناخته شده است که حضور حفره‌های ریز و افزایش تعداد مرزدانه‌ها در فیلم پروسکایت، سبب افزایش بازترکیب الکترون‌ها و حفره‌ها می‌شود و در نهایت ثبات و عملکرد دستگاه را محدود می‌سازد [۴].



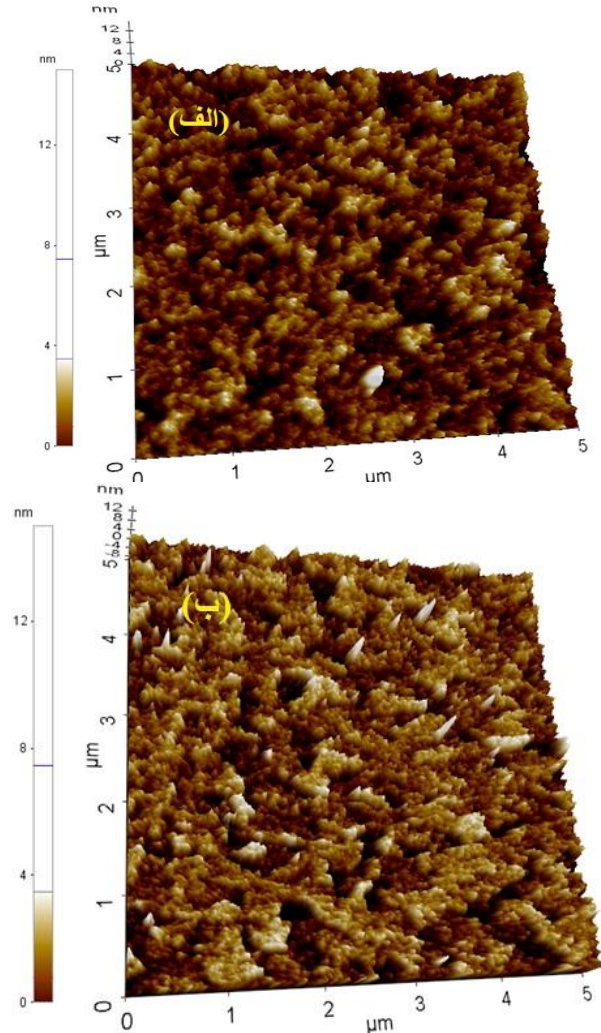
مشاهده می‌شود. حضور حفره‌ها و سایز بسیار ریز نانوذرات فیلم پروسکایت مبتنی بر PEDOT:PSS که باعث افزایش تعداد مرزخانه‌ها شد، همچنین، سبب باعث کاهش جذب در این فیلم پروسکایت نسبت به پروسکایت مبتنی بر PTAA می‌شود (نمودار جذب شکل (۵)). در نمودار طیف جذب برای هر دو حالت، یک پیک به نسبت ضعیف در گستره طول موج ۴۵۰ نانومتر مشاهده می‌شود که حضور مقدار کمی از  $PbI_2$  در فیلم پروسکایت را تایید می‌کند که برای دستیابی به ولتاژ مدار-باز بالاتر مفید است.



شکل (۵): نمودار طیف جذب از سلولهای پروسکایتی ساخته شده، بر لایه‌های انتقال دهنده حفره PEDOT:PSS و PTAA

تصاویر سطح مقطع سلول خورشیدی پروسکایت با انتقال‌دهنده‌های حفره PEDOT:PSS و PTAA در شکل (۶) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ضخامت کل فیلم‌های PTAA/Perovskite/PCBM/BCP در سلول خورشیدی پروسکایت تقریباً ۶۲۴ نانومتر و ضخامت کل فیلم‌های PEDOT:PSS/Perovskite/PCBM/BCP در سلول خورشیدی پروسکایتی فوق تقریباً ۶۶۵ نانومتر است. با توجه به اینکه شرایط یکسانی در هر دو نوع سلول خورشیدی برای لایه‌نشانی لایه‌ها (پروسکایت و انتقال دهنده‌های الکترون) در نظر گرفته شده است، انتظار می‌رود ضخامت لایه پروسکایت و لایه‌های PCBM و BCP در هر دو ساختار یکسان باشد. بنابراین، این اختلاف در ضخامت ساختارها، به دلیل ضخامت متفاوت لایه‌های PEDOT:PSS و PTAA است. شواهد

در شکل (۴)، تصویر AFM از سطح فیلم پروسکایت لایه نشانی شده بر ماده‌های انتقال‌دهنده حفره PEDOT:PSS مشاهده می‌شود.



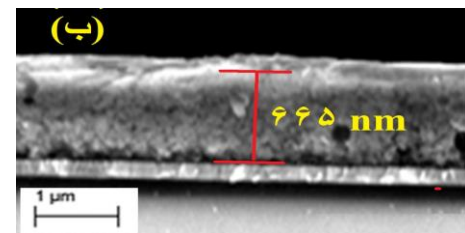
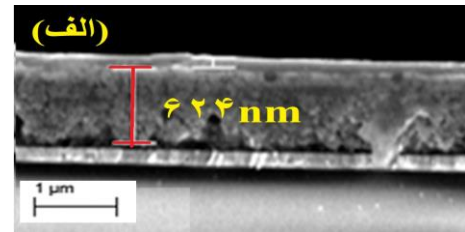
شکل (۴): تصاویر AFM از سلولهای پروسکایتی ساخته شده، بر لایه‌های انتقال دهنده حفره PEDOT:PSS و PTAA (الف) و (ب)

لکه‌های تیره (سیاه رنگ) در تصویر AFM فیلم پروسکایت لایه نشانی شده بر سطح PEDOT:PSS (شکل ۴-ب) نشان دهنده تخریب زنجیره‌ی PSS در فیلم PEDOT:PSS است. به نظر می‌رسد، حلال DMSO موجود در محلول پروسکایت در فرایند لایه‌نشانی و آماده‌سازی فیلم پروسکایت سبب تخریب فیلم PEDOT:PSS شده است. ممکن است، سبب کاهش ولتاژ مدار باز شود و کارایی سلول خورشیدی را تخریب کند.

نمودار طیف جذب برای هر دو سلول ساخته شده با انتقال دهنده‌های حفره PEDOT:PSS و PTAA در شکل (۵)

حاکی آن است که ضخامت لایه PTAA کمتر از لایه PEDOT:PSS است.

انتقال دهنده حفره	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	Voc (V)	PCE (%)
PTAA	۱۵/۲۵	۶۹/۸	۱/۰۷	۱۱/۳۷
PEDOT: PSS	۱۳/۹۷	۶۴/۲	۱/۰۳	۹/۲۳



شکل (۶): تصاویر SEM از سطح مقطع سلول خورشیدی پروسکایت با لایه‌های انتقال دهنده حفره PEDOT (الف) و PEDOT:PSS (ب)

همان‌طور که از نتایج جدول مشهود است، بازدهی در سلول خورشیدی پروسکایتی ساخته شده مبتنی PTAA به ۱۱/۳۷٪ است در حالی که، بازدهی در سلول خورشیدی پروسکایتی با لایه PEDOT: PSS، ۹/۲۳٪ است. این افزایش بازدهی به دلیل اینست که چگالی جریان و فاکتور پرشوندگی در این سلول نسبت به سلول مبتنی بر PEDOT: PSS بیشتر است. علت بهبود FF به ریخت شناسی نانوذرات و کیفیت لایه‌ها بخصوص لایه پروسکایت برمی‌گردد. در واقع، لایه PTAA سبب بهبود کیفیت لایه پروسکایت و ایجاد پوشش فشرده‌تر پروسکایت می‌شود، مقدار حفره در این فیلم پروسکایت کمتر است، که این عوامل باعث بهبود FF می‌شود. از طرفی کیفیت بالای لایه پروسکایت دلیل دیگری برای انتقال بیشتر الکترون-حفره و بهبود تحرک حامل‌های بار است، که سبب بهبودی J<sub>sc</sub> می‌شود. از عامل موثر بر افزایش V<sub>oc</sub> در سلول‌های خورشیدی پروسکایت انتخاب ماده‌های انتقال دهنده حفره با گاف باند انرژی مناسب است. بهبود V<sub>oc</sub> در سلول خورشیدی با لایه انتقال حفره PTAA به دلیل گاف باند انرژی به نسبت بزرگ این ماده است. در شکل (۷) و (۸) به ترتیب، نمودار مربوط به چگالی جریان-ولتاژ سلولها با انتقال دهنده‌ی PTAA و PEDOT: PSS و شماتیک ساختار گاف نواری سلول خورشیدی نشان داده شده است.

بررسی اثر لایه‌های انتقال دهنده حفره PEDOT: PSS و PTAA بر عملکرد سلول خورشیدی و پارامترهای فتوولتائیکی (J<sub>sc</sub>: چگالی جریان مدار کوتاه، V<sub>oc</sub>: ولتاژ مدار باز، FF: عامل پرشوندگی و PCE: بازده تبدیل توان) با استفاده از دستگاه Keithley 2400 و شبیه‌ساز خورشیدی با AM 1.5G استخراج شد. لازم به ذکر است که بازده تبدیل توان سلول خورشیدی به سه پارامتر فتوولتائیکی (J<sub>sc</sub>, V<sub>oc</sub>, FF) وابسته است. معادلات (۱) و (۲) وابستگی بازده تبدیل توان سلول را به این پارامترهای فتوولتائیکی را نشان می‌دهد.

در این روابط، V<sub>max</sub> و J<sub>max</sub> به ترتیب ولتاژ و چگالی جریان ماکزیمم، Pin توان نور هستند.

$$FF = \frac{V_{max} \times J_{max}}{V_{oc} \times J_{sc}} \quad (1)$$

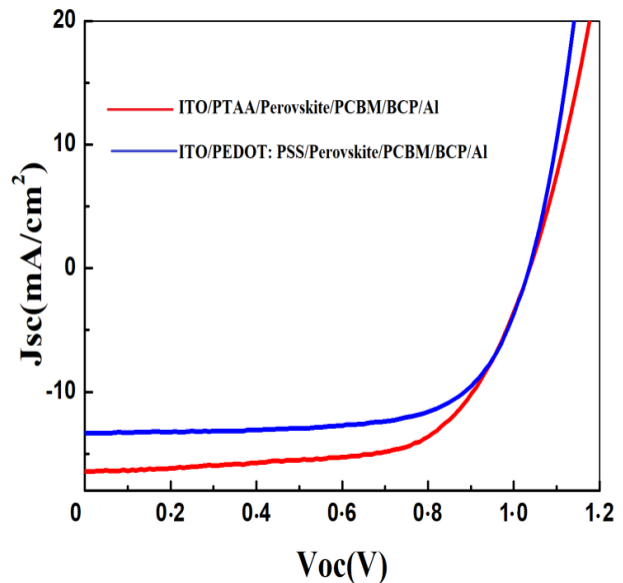
$$PCE = \frac{V_{oc} \times J_{sc} \times FF}{P_{in}} \quad (2)$$

نتایج پارامترهای فتوولتائیکی و اندازه آنها، در جدول (۱) آورده شده است.

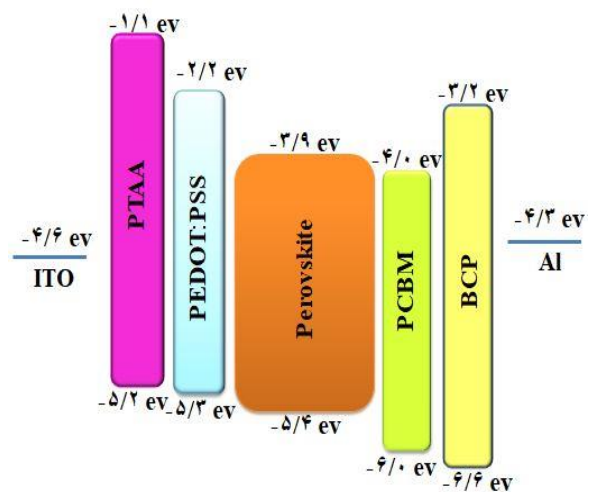
کوچکتر هستند، بنابراین، تعداد مرزخانه ها در فیلم پروسکایت مبتنی بر PEDOT: PSS بیشتر است و همچنین ریخت شناسی فیلم پروسکایت مبتنی بر PTAA با کیفیت تر و فشرده تر است در حالیکه حفره‌های ریزی در ریخت شناسی پروسکایت پوشش داده شده بر PEDOT: PSS وجود دارد. زیرا حلال DMSO موجود در محلول پروسکایت در فرایند لایه نشانی و آماده سازی فیلم پروسکایت سبب تخریب فیلم PEDOT: PSS شده است و باعث ایجاد حفره‌ها در لایه پروسکایت شده است. بنابراین ریخت شناسی نامناسب لایه پروسکایت مبتنی بر PEDOT: PSS سبب افزایش باز ترکیب الکترون - حفره و کاهش عملکرد سلول خورشیدی می‌شود. در نتیجه، لایه PTAA در کنترل ریخت شناسی لایه پروسکایت بسیار موثر بوده است، بنابراین عملکرد به ۱۱/۳۷٪ رسید در حالی که بیشینه بازدهی بر سلول خورشیدی مبتنی بر PEDOT PSS، ۹/۲۳٪ است.

## مراجع

- [1] Anaraki, E.H., et al., "Highly efficient and stable planar perovskite solar cells by solution-processed tin oxide," *Energy & Environmental Science*, 9, 3128-3134, 2016.
- [2] Zuo, C., et al., "Advances in perovskite solar cells," *Advanced Science*, 3, 1500324, 2016.
- [3] Correa-Baena, J.-P., et al., "The rapid evolution of highly efficient perovskite solar cells," *Energy & Environmental Science*, 10, 710-727, 2017.
- [4] Safari, Z., M.B. Zarandi, and M.R. Nateghi, "Improved environmental stability of HTM free perovskite solar cells by a modified deposition route," *Chemical Papers*, 1-12, 2019.
- [5] Troughton, J., et al., "Highly efficient, flexible, indium-free perovskite solar cells employing metallic substrates," *Journal of Materials Chemistry A*, 3, 9141-9145, 2015.
- [6] Jeon, I., et al., Carbon nanotubes versus graphene as flexible transparent electrodes in inverted perovskite solar cells," *The*



شکل (۷): نمودار چگالی جریان- ولتاژ برای سلول خورشیدی پروسکایتی با لایه‌های انتقال دهنده‌ی حفره PTAA و PEDOT: PSS



شکل (۸): طرحواره ساختار گاف نواری ولتاژ برای سلول خورشیدی پروسکایت

## ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، با استفاده از لایه‌های انتقال دهنده حفره، در ساختار سلول خورشیدی پروسکایتی مسطح معکوس، اثر دو لایه‌ی PTAA و PEDOT: PSS به‌عنوان لایه زیرین فیلم پروسکایت بر ریخت شناسی نانوذرات، بلورینگی لایه پروسکایت و پارامترهای فتوولتائیکی موثر بر بازده سلول خورشیدی ساخته شده به روش تک مرحله‌ی بررسی شد. سایز نانو ذرات پروسکایت تشکیل شده بر سطح PEDOT: PSS نسبت PTAA به

- Hole - Conductor - Free Fully Printable Mesoscopic Perovskite Solar Cells,” *Advanced Materials*, 29, 1606608, 2017.
- [18] Hua, Y., et al., Facile synthesis of fluorene-based hole transport materials for highly efficient perovskite solar cells and solid-state dye-sensitized solar cells,” *Nano Energy*, 26, 108-113, 2013.
- [19] Yang, L., et al., “Initial light soaking treatment enables hole transport material to outperform spiro-OMeTAD in solid-state dye-sensitized solar cells,” *Journal of the American Chemical Society*, 135, 7378-7385, 2013.
- [20] Meng, L., et al., “Recent advances in the inverted planar structure of perovskite solar cells,” *Accounts of chemical research*, 49, 155-165, 2015.
- [21] Wu, C.-G., et al., “High efficiency stable inverted perovskite solar cells without current hysteresis,” *Energy & Environmental Science*, 8, 2725-2733, 2015.
- [22] Fu, F., et al., “High-efficiency inverted semi-transparent planar perovskite solar cells in substrate configuration,” *Nat. Energy*, 2, 16190, 2016.
- [23] Hu, L., et al., “Sequential deposition of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> on planar NiO film for efficient planar perovskite solar cells,” *Acs Photonics*, 1, 547-553, 2014.
- [24] Ye, S., et al., CuSCN-based inverted planar perovskite solar cell with an average PCE of 15.6%,” *Nano letters*, 15, 3723-3728, 2015.
- [28] Yan, W., et al., “Hole - Transporting Materials in Inverted Planar Perovskite Solar Cells,” *Advanced Energy Materials*, 6, 1600474, 2016.
- [28] Bakr, Z.H., et al., “Advances in hole transport materials engineering for stable and efficient perovskite solar cells,” *Nano Energy*, 34, 271-305, 2017.
- [27] Liu, Y., et al., “A dopant-free organic hole transport material for efficient planar heterojunction perovskite solar cells,” *Journal of Materials Chemistry A*, 3, 11940-11947, 2015.
- journal of physical chemistry letters, 8, 5395-5401, 2017.
- [7] Wu, M.-C., et al., “Enhanced Photovoltaic Performance of Perovskite Solar Cells by Tuning Alkaline Earth Metal-Doped Perovskite-Structured Absorber and Metal-Doped TiO<sub>2</sub> Hole Blocking Layer,” *ACS Applied Energy Materials*, 1, 4849-4859, 2018.
- [8] Susrutha, B., L. Giribabu, and S.P. Singh, “Recent advances in flexible perovskite solar cells,” *Chemical communications*, 51, 14696-14707, 2015.
- [9] Yang, Y., “Device architecture and characterization of organic and hybrid perovskite photovoltaic. 2015, UCLA.
- [10]. Lee, M.M., et al., “Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites,” *Science*, 338, p. 643-647, 2012.
- [11] Liu, M., M.B. Johnston, and H.J. Snaith, “Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition,” *Nature*, 501, 395, 2013.
- [12] Heo, J.H., et al., “Hysteresis-less inverted CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> planar perovskite hybrid solar cells with 18.1% power conversion efficiency,” *Energy & Environmental Science*, 8, 1602-1608, 2015.
- [13] Chatterjee, S. and A.J. Pal, “Introducing Cu<sub>2</sub>O thin films as a hole-transport layer in efficient planar perovskite solar cell structures,” *The Journal of Physical Chemistry C*, 120, 1428-1437, 2016.
- [14] Zhou, H., et al., “Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells,” *Science*, 345, 542-546, 2014.
- [15] Kim, H.-S. and N-G. Park, “Parameters affecting I-V hysteresis of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> perovskite solar cells: effects of perovskite crystal size and mesoporous TiO<sub>2</sub> layer,” *The journal of physical chemistry letters*, 5, 2927-2934, 2014.
- [16] Yamada, Y., et al., “Near-band-edge optical responses of solution-processed organic-inorganic hybrid perovskite CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> on mesoporous TiO<sub>2</sub> electrodes,” *Applied Physics Express*, 7, 032302, 2014.
- [17] Zhang, H., et al., “SrCl<sub>2</sub> Derived Perovskite Facilitating a High Efficiency of 16% in



- [38] Zadeh, N.J., M.B. Zarandi, and M.R. Nateghi, "Effect of crystallization strategies on CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> perovskite layer deposited by spin coating method: Dependence of photovoltaic performance on morphology evolution," *Thin Solid Films* 660, 65-74, 2018.
- [28] Malinkiewicz, O., et al., "Perovskite solar cells employing organic charge-transport layers," *Nature Photonics*, 8, 128, 2014.
- [29] Hu, L., et al., "PEDOT: PSS monolayers to enhance the hole extraction and stability of perovskite solar cells," *Journal of Materials Chemistry A*, 6, 16583-1658, 2018.
- [30] Saliba, M., et al., "How to Make over 20% Efficient Perovskite Solar Cells in Regular (n-i-p) and Inverted (p-i-n) Architectures," *Chemistry of Materials*, 30, 4193-4201, 2018.
- [31] Nia, N.Y., et al., "High - efficiency perovskite solar cell based on poly (3 - hexylthiophene): influence of molecular weight and mesoscopic scaffold layer," *ChemSusChem*, 10, 3854-3860, 2017.
- [32] Ko, Y., et al., "Investigation of hole-transporting poly (triarylamine) on aggregation and charge transport for hysteresisless scalable planar perovskite solar cells," *ACS applied materials & interfaces*, 10, 11633-11641, 2018.
- [33] Vivo, P., J. Salunke, and A. Priimagi, "Hole-transporting materials for printable perovskite solar cells," *Materials*, 10, 1087, 2017.
- [34] Duong, T., et al. "Impact of Light on the Thermal Stability of Perovskite Solar Cells and Development of Stable Semi-transparent Cells," in 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)(A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC), 2018.
- [35] Zhao, C., et al., "Revealing underlying processes involved in light soaking effects and hysteresis phenomena in perovskite solar cells," *Advanced Energy Materials*, 5, 1500279, 2015.
- [36] Xiong, J., et al., "Efficient and non-hysteresis CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>/PCBM planar heterojunction solar cells," *Organic Electronics*, 24, 106-112, 2015.
- [37] Wang, Q., et al., "Large fill-factor bilayer iodine perovskite solar cells fabricated by a low-temperature solution-process," *Energy & Environmental Science*, 7, 2359-2365, 2014.



# Effect of Hole transport layer PTAA and PEDOT:PSS on the Morphology and Efficiency in Inverted Planer Perovskiet Cell Solar Architecture

---

Z. Safari<sup>1</sup>, M. Borhani Zarandi\*<sup>1</sup>, M. Nateghi<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>Atomic and Molecular Group, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd

<sup>2</sup>Department of Chemistry, Islamic Azad University, Yazd Branch, Yazd

**Abstract:** In this study, the structure of the inverted planer solar cell was used because of its prominent features, such as low temperature construction and low cost construction, the effect of two layers of PDOT:PSS and PTAA (as the underlying perovskite) on the morphology perovskite layer and parameters affecting solar cell performance ( $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , FF, PCE) were investigated.

SEM and AFM images showed that Proper morphology and high coverage of perovskite film with PTAA compared to perovskite film with PEDOT: PSS resulted in increased light absorption and efficiency in perovskite solar cell with PTAA. Their yields reached 11.37%, while the maximum PDOT: PSS-based solar cell efficiency was 9.23%.

**Keywords:** Solar cell, Perovskite, Hole transport layer, Inverted Planer structure, performance