

سلول خورشیدی منسوج پروسکایتی حاوی $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

زینب اسکافی^۱، وحید متقی طلب*^۲، لیلا میوه‌ای^۱، توماس ام براون^۳
^۱ گروه مهندسی شیمی نساجی و علوم الیاف، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، گیلان، ایران
^۲ گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، گیلان، رشت، ایران
^۳ موسسه تحقیقاتی انرژی خورشیدی آلی و هیبریدی، گروه مهندسی الکترونیک، دانشگاه تورورگاتا رم، رم، ایتالیا
 motaghitalab@guilan.ac.ir
 تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۷

چکیده

مقاله حاضر بر توسعه سلول‌های خورشیدی منسوج پروسکایتی با قابلیت انعطاف‌پذیری مکانیکی، ساخت در دمای پایین و مقرون به صرفه بودن متمرکز شده است. پلی اتیلن ترفتالات در مقایسه با سایر بسترهای شفاف مانند پلی اتیلن نفتالات به عنوان یک بستر انتخابی مورد توجه قرار گرفته است؛ زیرا نه تنها از نظر شیمیایی پایدار است، بلکه بسیار ارزان تر بوده، که عامل مهمی برای توسعه فناوری فتوولتائیک است. در این تحقیق برای نخستین بار اسپرو با نانوذرات CZTS در حلال ایزوپروپانول منجر به بالاترین بازده در سلول‌های انعطاف‌پذیر مبتنی بر لایه انتقال دهنده الکترون اکسید قلع جایگزین گردید. بهینه‌سازی غلظت نانوذرات CZTS در حلال ایزوپروپانول منجر به بالاترین بازده تبدیل انرژی ۲/۴٪ با ولتاژ مدار باز ۰/۸۷ V، جریان اتصال کوتاه ۹/۱ mA/cm² و فاکتور پرکنندگی ۳۰/۱٪ برای غلظت ۱۵ mg/mL و اندازه ذرات ۱۰ نانومتر گردید. عملکرد فتوولتائیکی بهتر این سلول‌ها مربوط به استخراج کارآمدتر حفره و کاهش بازترکیبی حامل‌های بار می‌باشد، که در نتیجه منجر به ایجاد مقاومت انتقال بار کم‌تر در مقایسه با غلظت‌های دیگر می‌گردد. در نهایت، سلول‌های انعطاف‌پذیر حاصل با موفقیت بر روی منسوج تعبیه گردید که نشان‌دهنده قابلیت آن‌ها برای یکپارچه‌سازی با تجهیزات الکترونیک هوشمند قابل حمل و پوشش خواهد بود.

واژگان کلیدی: سلول خورشیدی، منسوج پروسکایتی، سلول خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر، ماده انتقال دهنده، حفره غیرآلی، نانوذرات CZTS.

Perovskite Textile Solar Cells Containing $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

Zeynab Skafi¹, Vahid Mottaghitalab*², Leila Mivehi¹, Thomas M. Brown³

¹ Textile Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Guilan, Gilan, Rasht, Iran

² Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Guilan, Gilan, Rasht, Iran

³CHOSE (The Centre for Hybrid and Organic Solar Energy), Department of Electronic Engineering, University of Rome Tor Vergata, Via del Politecnico 1, 00133, Rome, Italy

motaghitalab@guilan.ac.ir

Abstract

Current paper has been focused on development of perovskite textile solar cells with mechanical flexibility, low-temperature manufacturing, and cost-effectiveness. Polyethylene terephthalate (PET) has become the substrate of choice compared to other transparent plastic substrates like polyethylene naphthalate (PEN) because it is not only chemically stable but also much cheaper, as an important factor for the photovoltaics (PV) technology development. Herein, spiro-OMeTAD was substituted with CZTS nanoparticles for the first time as an inorganic hole transporting material in flexible perovskite solar cells based on SnO_2 electron transport layer. Trough Optimization of CZTS concentration in IPA, the maximum PCE of 2.4% with open-circuit voltage (V_{oc}) of 0.87 V, short current (J_{sc}) of 9.1 mA/cm² and fill factor (FF) of 30.1% was achieved at a concentration of 15 mg/mL and particle size of 10 nm. The enhanced PV performance of these cells is related to more efficient hole-extraction and reduced carrier recombination, leading to less transport resistance of hole transport layer compared to other concentrations. Subsequently, the flexible cells were successfully embedded on a textile substrate, indicating cells can be seamlessly integrated with portable and wearable smart electronics.

Keywords: Perovskite textile solar cells, Flexible perovskite solar cells, Inorganic hole transport material, CZTS nanoparticles.

۱- مقدمه

مواد آلی نوع P هم چون اسپيرو، پلی تری آریل آمین (PTAA) [۱ و ۲] و پلی اتیلن دی اکسی تیوفن: پلی استایرن سولفونات (PEDOT:PSS) به طور مستقیم به عنوان لایه انتقال دهنده حفره در سلول های خورشیدی پروسکایتی با بازده های بالا مورد استفاده قرار می گیرند. اما، این مواد آلی مستعد تخریب در شرایطی محیطی و رطوبت بوده، همچنین به دلیل فرآیندهای سنتز پیچیده و نیاز به خالص سازی بالا، گران قیمت هستند. اکسیدهای فلزات واسطه نوع P غیر آلی با موفقیت به عنوان مواد انتقال دهنده حفره در سلول های خورشیدی پروسکایتی به دلیل هزینه کم، ثبات شیمیایی، تحرک پذیری حامل های بار بهتر نسبت به مواد آلی معرفی شده اند [۳] در بین این مواد انتقال دهنده حفره غیر آلی، اکسید نیکل (NiO) به نظر می رسد که جایگزین امیدوار کننده ای برای مواد انتقال دهنده حفره آلی باشد که امکان دستیابی سلول به بازده های بالا را فراهم می کند [۴-۶]. با این حال، کالکوژنیدها، اکسی کالکوژنیدها و هالیدهای بر پایه مس خصوصیات نوع p بهتری را نسبت به اکسیدها از خود نشان می دهند. اربیتال های p کالکوژنیدها (S, Se, Te) و هالوژن ها بیشتر از اربیتال های p اکسیژن اکسیدهای مس غیرمستقر است. در واقع جایگزینی اکسیژن با کالکوژنیدها می تواند منجر به یک هیبریداسیون قوی تر بین اربیتال های 3d مس و اربیتال های p کالکوژنیدها می شود و در نتیجه منجر به گستردگی بیشتر لایه ظرفیت و بهبود هدایت الکتریکی نوع

p شود. بنابراین کالکوژنیدهای بر پایه مس می توانند به عنوان گزینه های بهتری برای به کارگیری در لایه انتقال دهنده حفره مطرح شوند. یکی از انواع کالکوژنیدها، کالکوژنید چهار جزئی با فرمول عمومی $(I)_2(II)(III)(IV)_4$ است. Cu_2ZnSnS_4 (CZTS) یک ترکیب نیمه هادی است که در گروه کالکوژنیدهای چهار جزئی قرار می گیرد. این نوع کالکوژنید بر پایه مس دارای مزیت های مختلفی هم چون تحرک پذیری حفره بالا ($35 \text{ m}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$)، ضریب جذب بالا (10^{-4} cm^{-1})، شکاف انرژی پهن ($1/5 \text{ eV}$)، پیش ماده های در دسترس و غیرسمی و قابل پردازش با روش های لایه نشانی ساده محلولی است [۷]. CZTS به دلیل ضریب جذب بالا به طور گسترده در سلول های خورشیدی لایه نازک به عنوان ماده جاذب مورد بررسی قرار گرفته است، اما کاربرد آن به عنوان یک ماده انتقال دهنده حفره در سلول های خورشیدی پروسکایتی برای اولین بار در سال ۲۰۱۵ مطرح شد. وو و همکارانش در سال ۲۰۱۵ [۸] از CZTS با موفقیت به عنوان یک ماده انتقال دهنده حفره غیر آلی برای نخستین بار در سلول های خورشیدی پروسکایتی، با لایه پروسکایت متیل آمونیوم سرب (MAPbI_3) استفاده کردند و بازده تبدیل انرژی ۱۲/۷۵٪ به دست آوردند. در سال ۲۰۱۶ [۹] پس از حذف لیگاند های سطحی اولئیل آمین، نانوبلورهای CZTS بهبود قابل توجهی در هدایت الکتریکی و تحرک پذیری نشان دادند. همچنین نانوبلورهای CZTS خصوصیات انتقال دهنده حفره بسیار عالی را در سطح مشترک با لایه پروسکایت نشان دادند، به طوریکه

انتقال دهنده حفره CZTS گزارش کردند. با این حال، تمامی مقالات گزارش شده از به کارگیری نانوذرات CZTS به عنوان ماده انتقال دهنده حفره در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی مربوط به سلول‌های مبتنی بر بستر شیشه‌ای و لایه انتقال دهنده الکترون دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) بوده و تا به امروز هیچ گزارشی از استفاده این نانوذرات در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر وجود ندارد.

سلول‌های خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر بر روی بسترهای پلاستیکی قابلیت تعبیه شدن و یکپارچه شدن با سطوح مختلف را دارند. به این ترتیب، این سلول‌ها با قابلیت انعطاف‌پذیری مکانیکی و تطبیق‌پذیری بالا و شفافیت قابل قبول (که برای کاربردهای فتوولتائیک حائز اهمیت است)، قابلیت ساخت در دماهای پایین، مقرون به صرفه بودن و نسبت توان خروجی بالا نسبت به وزن (قابل رقابت در بین سلول‌های خورشیدی) زمینه را برای استفاده بالقوه آن‌ها در دستگاه‌های الکترونیکی خم‌شونده فراهم می‌کنند [۱۵]. [۱۶]. در واقع، این ویژگی‌ها، سلول‌های خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر را به گزینه‌ای ایده‌آل برای ساخت و ادغام با مواد زیرلایه جدید بسیار نازک و سبک مبدل می‌سازد [۱۷-۱۹]. از جمله این کاربردها می‌توان به ساختمان‌های هوشمند، دستگاه‌های الکترونیکی پوشیدنی و قابل حمل، و اینترنت اشیا (IoT) خود تغذیه شونده اشاره کرد [۲۰-۲۳]. بنابراین، ادغام‌سازی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی

بازده تبدیل انرژی به ۱۵/۴٪ افزایش یافت. سنتز این نانوذرات در شرایط محیط و به روش سل ژل در سال ۲۰۱۸ [۱۰] منجر به تولید سلول‌های خورشیدی پروسکایتی با لایه پروسکایت آلاینده شده با کلرید قلع (SnCl_2) ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{I}_{3-y}\text{Cl}_y$) با بازده ۹/۶۶٪ شد. سند و همکارانش در سال ۲۰۱۹ [۱۱] سنتز نانوذرات Cu_2MSnS_4 ($M = \text{Zn}, \text{Mn}, \text{Ni}, \text{Co}$) را با استفاده از روش هیدروترمال، بدون حلال و با کمک ماده فعال سطحی گزارش کردند. بازده تبدیل انرژی سلول‌های تهیه شده بر پایه مواد انتقال دهنده حفره سنتز شده به ترتیب ۸/۳۵، ۶/۲۴، ۷/۵۵ و ۴/۱۶٪ برای Zn^{2+} و Cu_2MSnS_4 ($M = \text{Mn}^{2+}, \text{Co}^{2+}, \text{Ni}^{2+}$) گزارش شد. کاو و همکارانش در سال ۲۰۲۰ [۱۲] نانوذرات CZTS با استفاده از روش تزریق داغ* سنتز و سپس با استفاده از محلول این نانوذرات در ۱-هگزانتیول بیشترین بازده ۱۲/۹۸٪ برای لایه انتقال دهنده حفره غیرآلی CZTS با ضخامت ۱۰۰ nm را به دست آوردند. رستگار مقدم گوهری و همکارانش در سال ۲۰۲۲ [۱۳] بالاترین بازده تبدیل انرژی ۱۲/۸۴٪ را از طریق بهینه‌سازی ضخامت لایه CZTS در یک سل خورشیدی پروسکایتی سه کاتیون گزارش کردند. در همان سال، حیدری رمشه و همکارانش [۱۴] با استفاده از بهینه‌سازی نسبت Zn/Sn در کامپوزیت لایه انتقال دهنده حفره/الکتروپشتی CZTS/کربن در یک سلول خورشیدی پروسکایتی با ساختار معمول، بازده ۱۴/۸۶٪ را با نسبت یک به پنج Zn/Sn در لایه

* Hot-injection

دستگاه‌های الکترونیک قابل حمل و پوشش و در نتیجه گسترش بازار سیستم‌های فتوولتائیک در شرایط نور داخلی هدف مهم این مقاله خواهد بود.

۲- تجربیات

۲-۱- آماده سازی محلول نانوذرات CZTS

به منظور یافتن حلال مناسب برای تهیه محلول ماده انتقال دهنده حفره غیرآلی CZTS غلظت مشخصی (۲۰ mg/mL) از آن در حلال‌های مختلف تهیه شد. لازم به ذکر است، با توجه به آسیب‌پذیری لایه پروسکایت به حلال‌های قطبی انتخاب حلال مناسب با محدودیت روبرو است. به این ترتیب، حلال‌های ایزوپروپانول، متانول، اتانول، کلروبنزن و ترکیب حلال‌های مخلوط ایزوپروپانول/اتانول و ایزوپروپانول/متانول (با نسبت حجمی ۱:۱) انتخاب شدند. به منظور ایجاد یک محلول پایدار از نانوذرات در حلال‌های ذکر شده، دو روش حمام التراسونیک و هم‌زن مغناطیسی استفاده شد. در روش حمام التراسونیک محلول‌ها در داخل حمام با دمای 25°C به مدت زمان‌های ۴، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه قرار گرفتند. در حالی که، محلول‌ها به مدت ۱، ۲ و ۳ روز با استفاده از هم‌زن مغناطیسی تهیه شدند. بعد از تهیه محلول‌ها، به منظور حذف ذرات آگلومره (به هم چسبیده) شده در داخل محلول از یک فیلتر سر سرنگی پلی‌وینیلیدین فلوراید (PVDF) با اندازه تخلخل $0.2\ \mu\text{m}$ استفاده گردید. توزیع اندازه نانوذرات CZTS توسط نانو زتاسایزر (ZS90) متصل به یک دستگاه پراکندگی نور مکانیکی (Malvern Instruments, UK) اندازه‌گیری شد.

انعطاف‌پذیر با منسوجات، شرایط را برای ساخت یک منبع تامین انرژی سبک و مقرون به صرفه در منسوجات روزمره از جمله کلاه، کوله پشتی، چادرهای صحرایی و ... برای کاربردهای هوشمند قابل حمل و قابل پوشش فراهم می‌سازد [۲۴]. در بین زیرلایه‌های انعطاف‌پذیر، پلی‌اتیلن ترفتالات به عنوان مقرون به صرفه‌ترین و پرکاربردترین بستر پلیمری مطرح است که شفافیت و انعطاف‌پذیری خوبی را نیز ارائه می‌دهد. با این حال، طیف وسیعی از مواد انعطاف‌پذیر برای تعبیه کردن سلول‌های خورشیدی پروسکایتی بر روی آن‌ها در مقالات گزارش شده‌اند که از جمله می‌توان به شیشه انعطاف‌پذیر [۲۵]، فویل‌های فلزی مانند فولاد ضد زنگ [۲۶]، آلومینیوم [۲۷]، تیتانیوم [۲۸] و مس [۲۹]، و همچنین زیرلایه‌های زیست تخریب‌پذیر مانند سلفون [۳۰]، کاغذ سلولزی [۳۱]، الیاف فلزی و پلیمری [۳۲]، و منسوجات [۳۳، ۳۴] اشاره نمود.

در این مقاله، برای نخستین بار (با توجه به مرور تحقیقات رسمی گزارش شده و قابل دسترس تاکنون) نانوذرات CZTS به عنوان یک ماده انتقال دهنده حفره غیرآلی جایگزین اسپيرو در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی سه کاتیون انعطاف‌پذیر مبتنی بر بستر پلی‌اتیلن ترفتالات و لایه انتقال دهنده الکترون اکسید قلع (SnO_2) استفاده شد. همچنین تعبیه سلول انعطاف‌پذیر حاصل بر روی منسوج پلی‌استری که نشان‌دهنده قابلیت این سلول کارآمد و پایدار روی فیلم‌های نازک پلی‌اتیلن ترفتالات کم هزینه با هدف یکپارچه‌سازی با

افزایش ترشوندگی سطح، به مدت ۱۵ دقیقه تحت تابش لامپ فرابنفش- ازن ساز (UV-Ozone) قرار گرفتند. به منظور ساخت لایه انتقال دهنده الکترون، محلول کلئیدی دی اکسید قلع با استفاده از آب دیونیزه تا غلظت 0.1 M رقیق شد و سپس روی بستر PET/ITO با استفاده از روش لایه نشانی چرخشی با سرعت 3500 دور در دقیقه به مدت 35 s لایه نشانی شد. به منظور ایجاد یک لایه متراکم از SnO_2 ، لایه‌های تهیه شده در دمای 100°C به مدت ۱ ساعت در شرایط هوای محیط پخت شدند. محلول پروسکایت سه کاتیون با استفاده از حل کردن مخلوط پیش ماده‌های فرمامیدینیم یدید (1 M) (FAI)، سرب (II) یدید (PbI_2) (M) $1/2$ ، متیل آمونیوم برومید (0.2 M) (MABr)، و سرب (II) برومید (0.2 M) (PbBr_2)، سزیم یدید (0.08 M) (CsI) در محلول مخلوط حلال‌های دی متیل سولفوکسید: دی متیل فرمامید ($\text{DMF}:\text{DMSO}$) با نسبت حجمی $3/16$: ۱ تهیه شد [۳۵]. سپس، محلول پروسکایت بر روی لایه SnO_2 با روش لایه نشانی چرخشی دو مرحله‌ای در 1000 و 5000 دور در دقیقه به ترتیب برای ۱۰ و ۳۰ ثانیه لایه نشانی شد. در مرحله دوم فرآیند لایه نشانی، 150 میکرو لیتر کلروبنزن (CB) به عنوان ضد حلال بر روی بستر چرخان، ۷ ثانیه قبل از پایان مرحله دوم لایه نشانی چرخشی ریخته شد. این مرحله به منظور تسریع تبخیر حلال‌های پروسکایت و فرآیند بلوری شدن است. فیلم پروسکایت بلافاصله در دمای 100°C به مدت ۱ ساعت پخت شد تا لایه پروسکایت سه کاتیون

برای این منظور، نانوذرات CZTS با غلظت 15 mg/mL در حلال ایزوپروپانول با استفاده از هم‌زن مغناطیسی به مدت سه روز پراکنده شد، سپس توسط فیلتر سر سرنگی پلی‌وینیلیدین فلوراید فیلتر شد. در نهایت، محلول حاصل به دلیل محدودیت آزمایش پراکندگی نور مکانیکی در اندازه‌گیری اندازه ذرات در محلول‌های با غلظت بالا، با استفاده از حلال تا غلظت mg/mL ۱ رقیق شد.

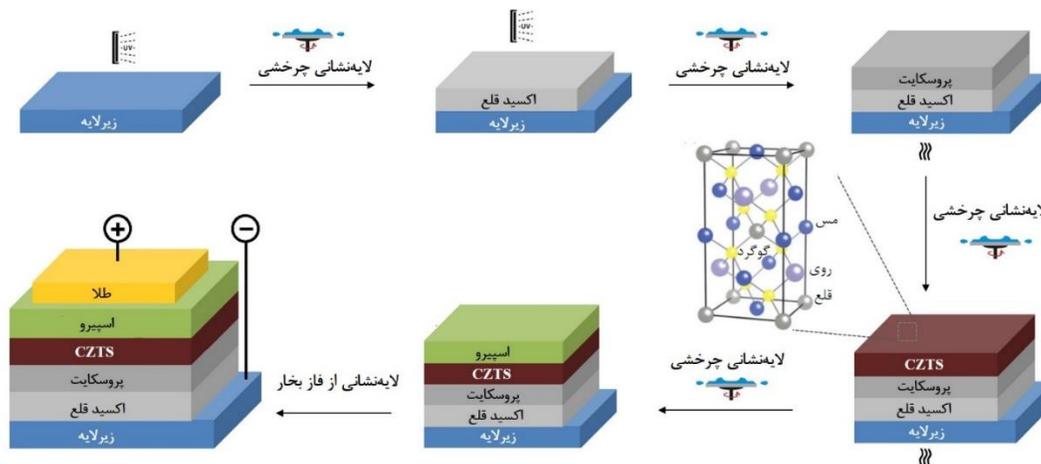
۲-۲- ساخت سلول‌های خورشیدی پروسکایتی

انعطاف پذیر

در ابتدا زیر لایه PET/اکسید ایندیم آلاینده شده با قلع (ITO) با استفاده از دستگاه لیزر پیکوثانیه (Wophotonics,) $(\text{Yb:KGW}, \lambda = 355 \text{ nm}, 5 \text{ ps})$ حکاکی لیزری شد. در این فرآیند، فیلم ITO با استفاده از خطوط بسیار نازک با استفاده از دستگاه لیزر حکاکی شیار دار می‌شوند، تا در نهایت چهار سطح فعال ایجاد شود که در آن الکتروود پایینی ITO از الکتروود بالایی طلا که در پایان فرآیندهای لایه نشانی بر روی سلول‌ها لایه نشانی می‌شود، جدا گردد. سپس، فرآیند شستشوی زیر لایه‌های حکاکی شده به صورت متوالی توسط یک محلول ۱٪ تمیز کننده قلیایی آبی ($\text{Hellmanex}^{\text{®}} \text{ III}$)، آب دیونیزه، ایزوپروپانول (IPA) و دوباره آب دیونیزه برای هر کدام به مدت ۱۰ دقیقه داخل حمام التراسونیک انجام شد. در ادامه، بسترها با استفاده از جریان هوای فشرده خشک شدند و به دنبال آن برای حذف هر گونه ذرات آلی باقی‌مانده و

بر این، به منظور جایگزینی ماده انتقال دهنده حفره اسپرو با نانوذرات CZTS، غلظت‌های متفاوتی (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ mg/mL) از آن در حلال ایزو پروپانول تهیه شد و با استفاده از پارامترهای مشابه با فرآیند لایه نشانی لایه اسپرو به طور مستقیم بر روی لایه پروسکایت لایه نشانی شد. در نهایت، ۱۰۰ nm فیلم طلا با استفاده از روش تبخیر حرارتی تحت خلاء به عنوان الکترود بالایی تهیه شد. تصویر شماتیک از مراحل آماده‌سازی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر در شکل ۱ نشان داده شده است.

$Cs_{0.08}(FA_{0.78}MA_{0.16})Pb(I_{0.84}Br_{0.16})_3$ مورد نظر به دست آید. به منظور تهیه لایه انتقال دهنده حفره، محلول اسپرو با غلظت ۷۳/۵ mg/mL در حلال CB با $16/6 \mu l$ میکرولیتر از محلول لیتیوم بیس (تری فلئورومتیل سولفونیل) ایمید (Li-TFSI) (۵۲۰ mg/mL) در حلال استونیتریل (ACN)، $7/2 \mu l$ از محلول کبالت بیس (تری فلئورومتیل سولفونیل) ایمید (FK209) (۳۷۶ mg/mL) در حلال (ACN) و $26/8$ میکرو لیتر از ۴- ترت بوتیل پیریدین (tBP) آلاینده شده و با چرخش ۲۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ ثانیه لایه نشانی شد. علاوه



شکل ۱- تصویر شماتیک از تکنیک فرآیند ساخت سلول خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر مبتنی بر ماده انتقال دهنده حفره غیرآلی CZTS به همراه ساختار کریستالی CZTS [۳۶].

۲-۳- آنالیز و مشخصه‌یابی سلول‌های خورشیدی

انعطاف‌پذیر

خورشیدی کلاس A (Abet Technologies, Sun 2000) استفاده شد که لامپ (زنون) آن با استفاده از یک پیرانومتر کالیبره شده بود. در تمام اندازه‌گیری‌ها، سلول انعطاف‌پذیر با یک ماسک پلاستیکی سیاه متشکل از چهار فضای مربعی شکل به ابعاد 0.9 cm^2 پوشانده شدند تا ناحیه فعال سلول‌ها

بازده تبدیل انرژی و منحنی‌های جریان-ولتاژ (J-V) سلول - های خورشیدی تحت شرایط استاندارد STC اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری‌ها در تابش AM1.5G، از یک شبیه‌ساز

ایکس (XRD) با استفاده از یک پراش‌سنج Rigaku SmartLab SE 1D Type مجهز به منبع $\text{Cu K}\alpha$ و آشکارساز D/teX Ultra 250 انجام شد. به منظور ادغام‌سازی سلول‌های انعطاف‌پذیر تهیه شده با منسوج از یک فیلم ترموپلاستیک آب‌بندی (Meltonix 1170-25PF) با ضخامت $25 \mu\text{m}$ استفاده شد، که به طور معمول برای لمینیت کردن الکترودهای سلول‌های خورشیدی حساس شده به رنگزا (DSSC) مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای این منظور، در ابتدا یک سلول کامل که مشکل از چهار پیکسل می‌باشد، برای آماده‌سازی اتصالات انتخاب شد. برای هر پیکسل دو اتصال وجود دارد، یک اتصال از ITO و اتصال دیگر از الکتروده فلزی بالا (طلا). بعد از پاک کردن لایه‌های پروسکایت و اسپیرو از دو لبه سلول با استفاده از محلول مخلوطی از DMF و زایلین (با نسبت حجمی ۱:۷)، خمیر نقره به طور مستقیم روی الکتروده پایینی ITO و بالایی طلا قرار داده شد. بعد از خشک شدن خمیر نقره، با استفاده از سیم نقره به طول چهار تا پنج سانتی‌متر از روی لایه خمیر نقره از هر پیکسل دو اتصال خروجی گرفته شده و دوباره بر روی فصل مشترک خمیر و سیم نقره، خمیر نقره اضافی قرار داده شد. سپس، سلول به همراه اتصالات‌های خروجی سیم نقره در بین دو تکه از فیلم ترموپلاستیک آب‌بندی به ابعاد 16 cm^2 قرار داده شده و در نهایت از سمت الکتروده بالایی طلا بر روی منسوج قرار داده شد. در مرحله نهایی با استفاده از دستگاه پرس داغ در دمای

ثابت بماند. لازم به ذکر است که بازده تبدیل انرژی سلول‌های حاصل از طریق پارامترهای فتوولتائیک با استفاده از معادله ذیل [۳۷] محاسبه شد.

$$\eta (\%) = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad \text{معادله (۱-۱)}$$

$$= \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}}$$

در حالی که P_{max} نقطه حداکثر توان خروجی، P_{in} توان نور ورودی، J_{sc} جریان اتصال کوتاه، V_{oc} ولتاژ مدار باز و FF فاکتور پرکنندگی است.

راندمان تبدیل توان تثبیت شده (MPPT) در طول زمان در بایاس ثابت و نقطه حداکثر ولتاژ نیز با استفاده از یک نرم‌افزار (Cicci Research s.r.l) متصل به سیستم شبیه‌ساز نور خورشید اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری بازده کوانتومی خارجی (EQE) به عنوان تابعی از طول موج با استفاده از یک ماژول یکپارچه بازده تبدیل فوتون‌های ورودی به جریان (IPCE) در سیستم اندازه‌گیری قابل تنظیم (Arkeo (Cicci Research s.r.l) انجام شد. طیف جذبی فیلم‌های پروسکایت لایه نشانی شده روی لایه انتقال دهنده الکترون SnO_2 و بستر PET/ITO با استفاده از یک اسپکتروفتومتر فرابنفش- مرئی (Shimadzu UV-2550) مجهز به یک کره یکپارچه اندازه‌گیری شد. همچنین، گاف انرژی فیلم پروسکایت با استفاده از روش تائوک [۳۸] محاسبه گردید. مورفولوژی فیلم پروسکایت توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با وضوح بالا (TESCAN MIRA) مشاهده شد. اندازه‌گیری پراش اشعه

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین توزیع (در حدود ۸۵٪) برای اندازه ذرات در حدود ۱۰ نانومتر و با پتانسیل زتا ۳۱/۳- میلی‌ولت است. از آنجایی که اندازه ذرات ماده CZTS توسط شرکت سازنده ۸ نانومتر گزارش شده است، این نتایج نشان‌دهنده تشکیل یک محلول تقریباً پایدار از نانوذرات CZTS در حلال ایزوپروپانول بعد از سه روز هم خوردن توسط هم‌زن مغناطیسی و بدون استفاده از هیچ‌گونه ماده فعال سطحی می‌باشد. به طور کلی در سلول‌های خورشیدی فیلم نازک به منظور به حداقل رساندن مقاومت‌های انتقال بار، لایه‌های انتقال دهنده حامل‌های بار باید دارای ضخامتی در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ نانومتر باشند. همچنین برای لایه انتقال حفره نانوذرات، ذرات با اندازه کمتر از ۲۰۰ nm و عاری از ذرات آگلومره شده ضروری است. فیلم‌های همگن را تنها می‌توان از محلول‌های کلوییدی پایدار با اندازه ذرات کوچک و غیر آگلومره تهیه کرد، زیرا پایداری محلول کلوییدی تنها با ذرات کوچک‌تر از اندازه ذرات بحرانی حاصل می‌شود [۳۹، ۴۰]. علاوه بر اندازه ذرات، حلال مورد استفاده برای تهیه محلول کلوییدی اهمیت به‌سزایی در پراکندگی ذرات دارد. به این ترتیب ایزوپروپانول به عنوان حلال بهینه، جهت تهیه غلظت‌های مختلفی از محلول نانوذرات CZTS برای لایه‌نشانی لایه انتقال دهنده حفره بر روی سطح فیلم پروسکایت انتخاب شد.

۹۰ °C، فشار ۴ bar و زمان ۷۰ s فرآیند ادغام‌سازی سلول با منسوج تکمیل گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- انتخاب حلال مناسب برای محلول ماده انتقال

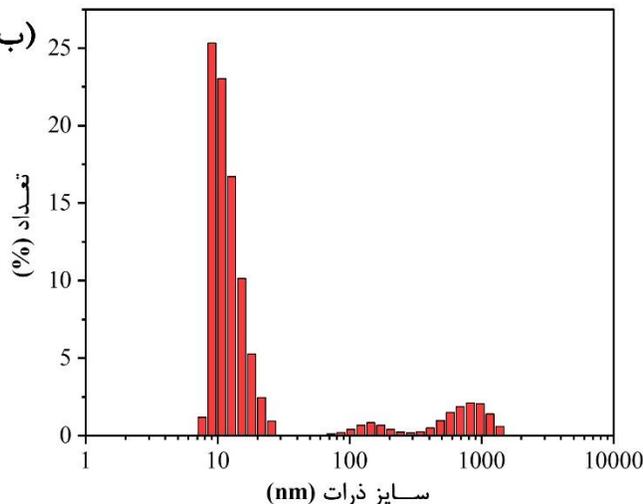
دهنده حفره غیرآلی CZTS

تهیه یک محلول کلوییدی پایدار از نانوذرات CZTS که در زمان فرآیند لایه‌نشانی پایدار بوده و شروع به آگلومره شدن نکند برای ایجاد فیلم نازک همگن بسیار حائز اهمیت است. بنابراین، به منظور یافتن حلال مناسب برای تهیه محلول ماده انتقال دهنده حفره غیرآلی CZTS، غلظت مشخصی (mg/mL) (۲۰) از آن در حلال‌های مختلف تهیه شد. در بین دو روش انتخاب شده برای پراکنده کردن نانوذرات در حلال، روش حمام التراسونیک حتی بعد از ۶۰ دقیقه نیز کارآمد نبوده و محلول‌های حاصل پایدار نبودند. لازم به ذکر است که در همه محلول‌های مورد استفاده با روش التراسونیک بعد از انجام فرآیند فیلتراسیون تنها حلال‌های مورد استفاده از فیلتر خارج شد. در مقایسه با روش حمام التراسونیک، استفاده از هم‌زن مغناطیسی بعد از سه روز نتایج قابل قبولی را برای حلال‌های اتانول، ایزوپروپانول/اتانول، ایزوپروپانول و متانول نشان داد. همان‌طور که در شکل ۲ الف مشاهده می‌شود، بعد از انجام فرآیند فیلتراسیون محلول CZTS در حلال ایزوپروپانول یک محلول پایدار و حاوی نانوذرات CZTS را نشان داد. منحنی توزیع اندازه ذرات CZTS در شکل ۲ ب نشان داده شده است.

(الف)



(ب)



شکل ۲- الف- تصویر محلول نانوذرات CZTS در حلال‌های مختلف بعد از فرآیند فیلتراسیون و ب) توزیع پراکندگی اندازه ذرات محلول CZTS در حلال ایزوپروپانول اندازه‌گیری شده با استفاده از آنالیز پراکندگی نور دینامیکی (DLS)

و در نظر گرفته شد. همچنین، نمودارهای تائوک استخراج شده از طیف‌های جذبی مربوطه در شکل ۳ ب نشان می‌دهد که گاف انرژی فیلم پروسکایت سه‌کاتیونه با فرمول $\text{Cs}_{0.08}(\text{FA}_{0.78}\text{MA}_{0.16})\text{Pb}(\text{I}_{0.84}\text{Br}_{0.16})_3$ $1/637 \text{ eV}$ است [۴۲]. اندازه‌گیری گاف انرژی فیلم پروسکایت از این رو برای ما حائز اهمیت است که در ادامه با جایگزینی لایه انتقال دهنده حفره آلی اسپرو با لایه انتقال دهنده حفره غیرآلی CZTS، نیاز به مقایسه سطوح انرژی فیلم‌های به کار برده شده به منظور توضیح عملکرد سلول‌های تهیه شده است.

به منظور بررسی ریخت‌شناسی سطحی فیلم پروسکایت بر روی لایه انتقال دهنده الکترون SnO_2 از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. شکل ۳ ج تصویر SEM سطح فیلم پروسکایت مذکور را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ساختار بلوری سه‌بعدی پروسکایت متشکل

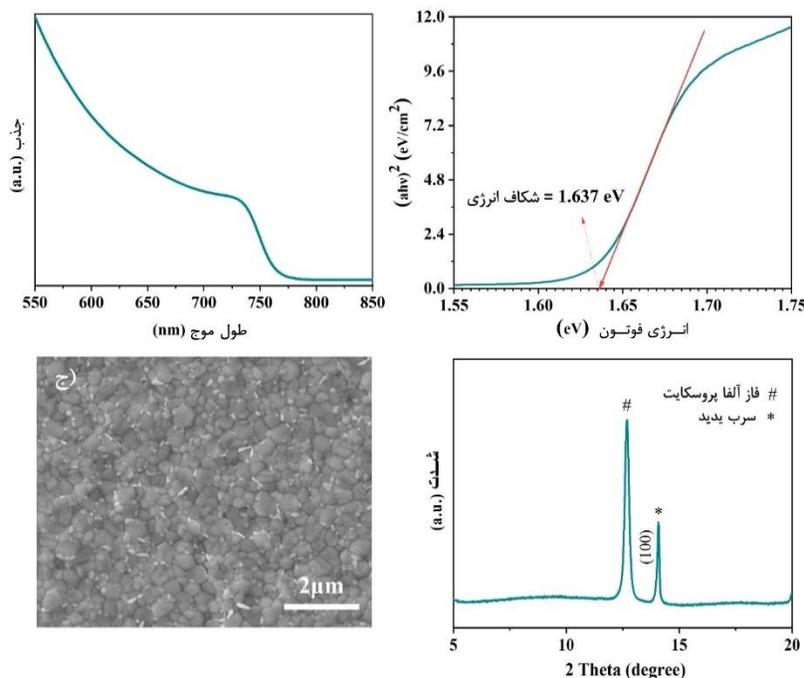
۲-۳- بررسی خصوصیات نوری و مورفولوژی فیلم

پروسکایت بر روی زیرلایه PET

با توجه به گزارشات موجود در منابع، فیلم‌های پروسکایت سه کاتیونه از نظر حرارتی پایدارتر هستند و کمتر تحت تاثیر متغیرهای محیطی مانند دما، بخارات حلال یا دمای کاری در شرایط بیرونی (زیر نور خورشید) قرار می‌گیرند. این پایداری برای تکرارپذیری مهم است، که یکی از الزامات کلیدی برای تولید مقرون به صرفه سلول‌های خورشیدی پروسکایتی در مقیاس بزرگ است. بنابراین دلیل انتخاب ما از پروسکایت سه کاتیونه، اهمیت آن در تولید سلول‌های پایدار و کم هزینه در مقیاس صنعتی است [۴۱]. طیف جذبی فرابنفش-مرئی فیلم پروسکایتی سه کاتیونه در شکل ۳ الف نشان داده شده است. لازم به ذکر است که قبل از اندازه‌گیری فیلم‌های پروسکایت، طیف جذبی PET/ITO/SnO_2 ، به عنوان مرجع، اندازه‌گیری

بلوری واقع شده‌اند، نشان دهنده نمک سرب یدید (PbI_2) است که به میزان حدود ۵٪ اضافی در تهیه محلول پروسکایت استفاده شده است. پیک مشخصه ساختار بلوری مکعبی PbI_2 در $2\theta = 14^\circ$ واقع شده است. این سرب یدید اضافی در فیلم پروسکایتی می‌تواند حمل و نقل حامل‌های بار را تسهیل کرده و همچنین منجر به غیرفعال کردن نقص‌های سطحی بلورهای پروسکایت شود [۴۳]. به طور کلی، با توجه به منحنی پراش اشعه ایکس، این دو پیک مشخصه یعنی پیک مشخصه فاز آلفای فعال نوری پروسکایت و سرب یدید در اینجا حائز اهمیت است.

از دانه‌های بلوری با مرزهای به هم پیوسته تشکیل شده است. همچنین، تشکیل ساختار بلوری پروسکایت با استفاده از آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) تایید شده است. همان‌طور که در شکل ۳ د مشاهده می‌شود، پیک مشخصه ساختار بلوری شش ضلعی پروسکایت (فاز سیاه فعال نوری) در $2\theta = 12/7^\circ$ نشان‌دهنده تشکیل فاز بلوری پروسکایت می‌باشد [۴۲]. [۴۳]. تشکیل این ساختار بلوری سه بعدی در عملکرد سلول-ها بسیار حائز اهمیت است؛ چرا که نشان دهنده تشکیل فاز فعال نوری پروسکایت با میزان نقص‌های سطحی کم‌تر بوده که در عملکرد نهایی سلول مهم است. علاوه بر این، در تصویر SEM وجود ذرات با رنگ روشن که عمدتاً در مرز دانه‌های



شکل ۳- الف) طیف جذبی، ب) نمودار تائوک فیلم‌های پروسکایت، ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) سطح فیلم و د) طیف پراش اشعه ایکس (XRD) فیلم سه کاتیونه $CS_{0.08}(FA_{0.78}MA_{0.16})Pb(I_{0.84}Br_{0.16})_3$ بر روی لایه انتقال دهنده الکترون اکسید قلع (SnO_2) و زیرلایه پلی اتیلن ترفتالات (PET).

۳-۳- اندازه‌گیری جریان-ولتاژ سلول‌های

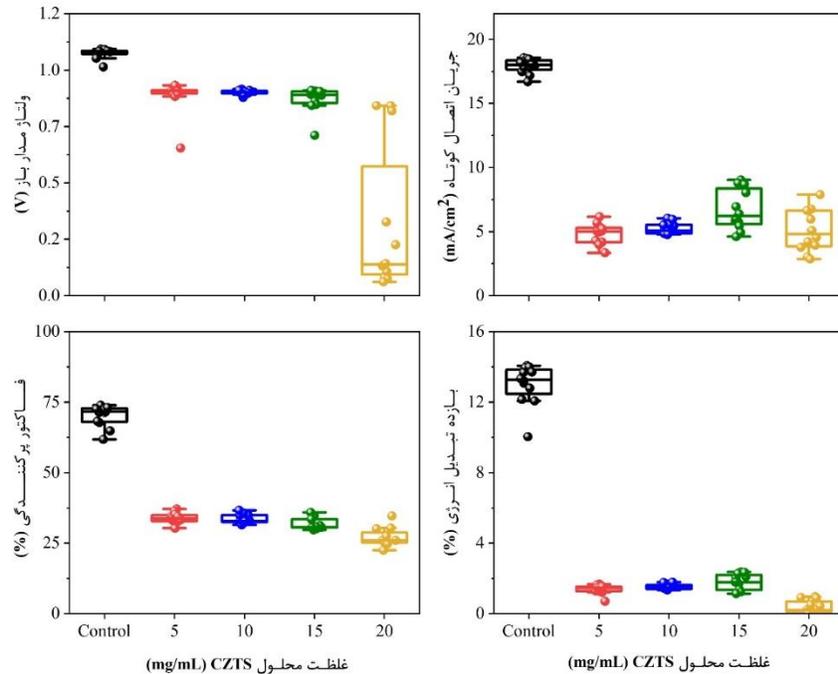
خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر

اندازه‌گیری‌های جریان-ولتاژ سلول‌های خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر با استفاده از لایه جاذب پروسکایتی سه کاتیونه $\text{Cs}_{0.08}(\text{FA}_{0.78}\text{MA}_{0.16})\text{Pb}(\text{I}_{0.84}\text{Br}_{0.16})_3$ تحت شرایط تست استاندارد انجام شد. به منظور بهینه کردن غلظت محلول نانوذرات CZTS که به طور مستقیم بر روی ضخامت لایه انتقال دهنده حفره اثر می‌گذارد، سلول‌های خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر با غلظت‌های مختلفی (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ mg/mL) از این محلول تهیه و تحت شرایط یکسان از فرآیند لایه نشانی چرخشی (سرعت ۲۰۰۰ rpm و زمان ۲۰ s) بر روی فیلم پروسکایتی لایه نشانی شدند. شکل ۴، پارامترهای فتوولتائیک (ولتاژ مدار باز (Voc)، جریان اتصال کوتاه (Jsc) و فاکتور پرکنندگی (FF)) و بازده تبدیل انرژی (PCE) آماری مستخرج از دوازده سلول خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر کنترل (ساخته شده با لایه انتقال دهنده حفره آلی اسپيرو) و با لایه انتقال دهنده حفره غیرآلی CZTS (با معماری نشان داده شده در شکل ۱) در غلظت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از لایه انتقال دهنده حفره CZTS در مقایسه لایه انتقال دهنده حفره اسپيرو منجر به کاهش چشم‌گیر پارامترهای فتوولتائیک، خصوصاً جریان اتصال کوتاه و فاکتور پرکنندگی و در نتیجه بازده تبدیل انرژی می‌شود. این کاهش به مطابقت سطوح انرژی نانوذرات CZTS با لایه پروسکایتی

مرتبط است. سطح LUMO ماده CZTS ۳/۹ eV است در حالی که برای ماده اسپيرو ۲/۳ eV است. بنابراین اسپيرو با سطح LUMO دورتر نسبت به پروسکایت در مقایسه با نانوذرات CZTS، خاصیت بلوکه‌کنندگی الکترون بالاتری را داشته که به موجب آن منجر به کاهش بازترکیبی حامل‌های بار و در نتیجه عملکرد فتوولتائیک بهتر سلول خواهد شد (شکل ۵ الف را ببینید). از طرف دیگر با توجه به توزیع اندازه ذرات از تست پراکندگی نور مکانیکی، حدود ۱۲٪ از ذرات CZTS دارای اندازه در حدود ۷۰۰ nm هستند که نشان‌دهنده آگلومره شدن شده نانوذرات می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، چنان‌چه محلول‌های کلوییدی در طول فرآیند لایه-نشانی پایدار نباشند، ذرات شروع به آگلومره شدن کرده که منجر به تشکیل فیلم‌های نازک ناهمگن خواهد شد. این ذرات آگلومره شده منجر به محدود کردن ضخامت فیلم لایه نشانی شده به اندازه ذرات آگلومره می‌شود (در اینجا ۷۰۰ nm). همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، به منظور به حداقل رساندن مقاومت‌های انتقال بار، لایه‌های انتقال دهنده حامل‌های بار باید دارای ضخامتی در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ nm باشند. بنابراین، در فیلم‌های نانوذرات CZTS تهیه شده این ذرات آگلومره شده با محدود کردن ضخامت لایه انتقال دهنده حفره منجر به افزایش مقاومت انتقال بار و ایجاد اتصال بین لایه‌های انتقال دهنده حامل‌های بار و در نتیجه عملکرد پایین سلول-های خورشیدی می‌شوند. این افزایش مقاومت انتقال بار و افزایش ضخامت، با کاهش استخراج کارآمد حفره و در نتیجه

جریان‌های اتصال کوتاه و فاکتورهای پرکنندگی پایین‌تر در سلول‌های خورشیدی مبتنی بر لایه انتقال دهنده حفره غیرآلی CZTS در مقایسه با سلول‌های کنترل مبتنی بر اسپيرو همراه است [۴۴]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین جریان اتصال کوتاه بعد از جایگزینی لایه انتقال دهنده حفره اسپيرو با CZTS در تمامی غلظت‌ها تقریباً نصف شده است. علاوه بر این، میزان فاکتور پرکنندگی که به ضخامت لایه‌های انتقال دهنده بار وابسته است، با محدود شدن ضخامت لایه به اندازه ذرات آگلومره شده به دلیل کاهش استخراج حفره و افزایش بازترکیبی حامل‌های بار در تمامی غلظت‌های ماده انتقال دهنده حفره CZTS، کاهش پیدا کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این کاهش در سلول‌های مبتنی بر غلظت ۲۰ mg/mL بیشتر است، که احتمالاً به آگلومره شدن بیشتر نانوذرات در این غلظت و در نتیجه نایکنواختی و افزایش ضخامت لایه در برخی از نقاط فیلم و متعاقباً افزایش مقاومت انتقال بار و بازترکیبی حامل‌ها بار خواهد شد. همچنین، میزان ذرات آگلومره شده بیشتر و بزرگ‌تر در این غلظت منجر به افزایش احتمال اتصال لایه‌های انتقال دهنده بار و در نتیجه کاهش چشم‌گیر ولتاژ مدار بار و

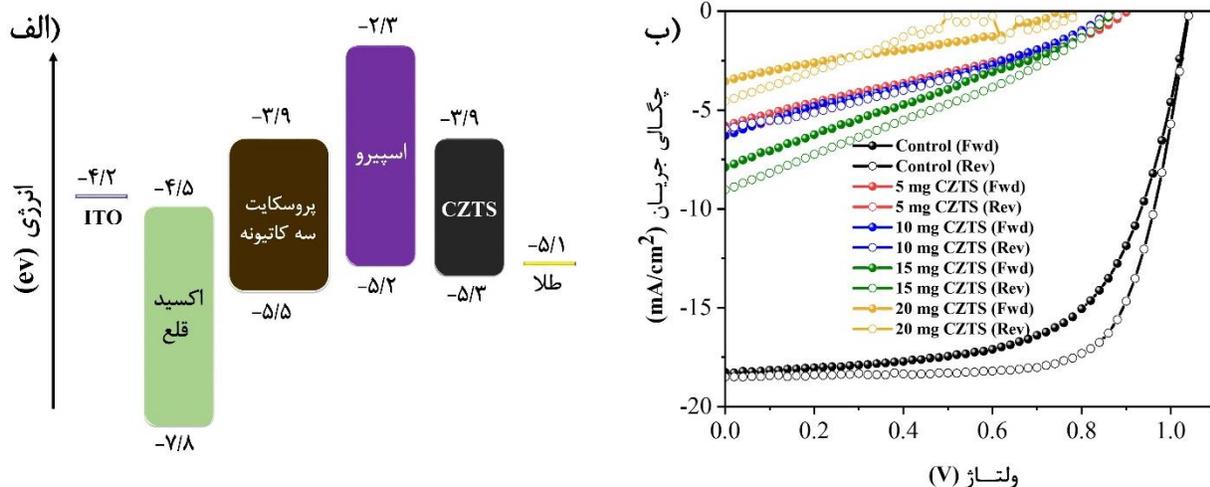
افزایش احتمال شانت شدن سلول‌ها (افزایش پراکندگی میزان ولتاژ مدار بار در داده‌های آماری نشان داده شده در نمودار ولتاژ مدار بار شکل ۴) خواهد شد. به این ترتیب در غلظت ۲۰ mg/mL به دلیل کاهش قابل توجه ولتاژ مدار بار و جریان اتصال کوتاه و همچنین کاهش میزان فاکتور پرکنندگی، کمترین میانگین بازده تبدیل انرژی حاصل شد. با این حال، سلول‌های مبتنی بر ماده انتقال دهنده حفره CZTS با غلظت ۱۵ mg/mL با میانگین جریان اتصال کوتاه بالاتر (2 mA/cm^2) در مقایسه با غلظت‌های دیگر، میانگین بازده تبدیل انرژی بالاتری ($0.4 \pm 1.8\%$) را نشان می‌دهند. عملکرد بهتر سلول‌های مبتنی بر ماده انتقال دهنده حفره CZTS با غلظت ۱۵ mg/mL مربوط به استخراج کارآمدتر حفره‌ها و کاهش بازترکیبی حامل‌های بار است. این غلظت بهینه شده منجر به ایجاد یک لایه انتقال دهنده حفره با ضخامت مناسب و مقاومت انتقال بار کمتر در مقایسه با غلظت‌های دیگر می‌باشد. برای غلظت‌های کمتر (یعنی ۵ mg/mL و ۱۰ mg/mL) احتمال ایجاد لایه‌های غیریکنواخت بر روی فیلم پروسکایتی منجر به بازده‌های تبدیل انرژی پایین‌تر در مقایسه با غلظت ۱۵ mg/mL می‌شود.



شکل ۴- پارامترهای آماری فتوولتائیک (ولتاژ مدار باز (V_{oc}), جریان اتصال کوتاه (J_{sc}) و فاکتور پر کنندگی (FF)) و بازده تبدیل انرژی (PCE) سلول‌های خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر مبتنی بر ماده انتقال دهنده حفره اسپرو (کنترل (Control)) و ماده غیرآلی CZTS با غلظت‌های مختلف ($x \text{ mg CZTS}$) که تحت شرایط استاندارد نور خورشید AM1.5G برای دوازده سلول اندازه‌گیری شده است (اندازه ناحیه فعال سلول‌ها 0.09 cm^2 می‌باشد).

برای تنظیم سطوح انرژی، قابل بهبود خواهد بود. همچنین، تهیه محلول‌های کلوییدی پایدار نانوذرات و بدون ذرات آگلومره شده، با بهینه‌سازی بیشتر محلول نانوذرات CZTS منجر به افزایش یکنواختی فیلم و حذف نقاط با ذرات آگلومره شده (با ضخامت بالا) و در نتیجه کاهش مقاومت انتقال حفره، بهبود استخراج کارآمد حامل‌های بار، کاهش باز ترکیبی حامل‌های بار و بهبود عملکرد سلول‌ها خواهد شد. علاوه بر این، پارامترهای فتوولتائیک و بازده تبدیل انرژی اندازه‌گیری شده برای سلول‌های با بهترین عملکرد و همچنین مقادیر میانگین آن‌ها (مستخرج از دوازده سلول)، در جدول ۱ گردآوری شده است.

منحنی‌های جریان-ولتاژ در اسکن‌های رفت (رو به جلو) و برگشت (معکوس) برای بهترین سلول‌ها در هر غلظت از ماده انتقال دهنده حفره CZTS به همراه سلول مبتنی بر اسپرو نیز در شکل ۵ ب نشان داده شده است. مشابه با میانگین بازده تبدیل انرژی که در داده‌های آماری ذکر شد، بالاترین بازده به دست آمده برای سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر مبتنی بر لایه انتقال دهنده حفره CZTS (با غلظت بهینه شده 15 mg/mL (۲/۳۵٪) است. لازم به ذکر است، این نتایج برای سلول‌های خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر مبتنی بر ماده انتقال دهنده حفره CZTS ارزان قیمت بسیار امیدوار کننده است، که با بهینه‌سازی لایه پروسکایت و به کارگیری لایه‌های بین سطحی (بین لایه‌های پروسکایت سه کاتیون و CZTS)،



شکل ۵- الف) تصویر شماتیک از سطوح انرژی لایه‌های تشکیل دهنده سلول خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر کنترل (با لایه انتقال دهنده حفره آلی اسپیرو) و مبتنی بر لایه انتقال دهنده حفره غیرآلی CZTS و ب) منحنی‌های جریان-ولتاژ (با اسکن‌های رو به جلو (Fwd) و معکوس (Rev)) بهترین سلول-های خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر مبتنی بر ماده انتقال دهنده حفره اسپیرو (کنترل (Control)) و ماده غیرآلی CZTS با غلظت‌های مختلف (x mg CZTS) که تحت شرایط استاندارد نور خورشید AM1.5G شده است (اندازه ناحیه فعال سلول‌ها 0.09 cm^2 می‌باشد).

جدول ۱- پارامترهای آماری فتوولتائیک و بازده تبدیل انرژی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر مبتنی بر ماده انتقال دهنده حفره اسپیرو (کنترل) و ماده غیرآلی CZTS با غلظت‌های مختلف (x mg CZTS) که تحت شرایط استاندارد نور خورشید AM1.5G برای دوازده سلول اندازه‌گیری شده است.

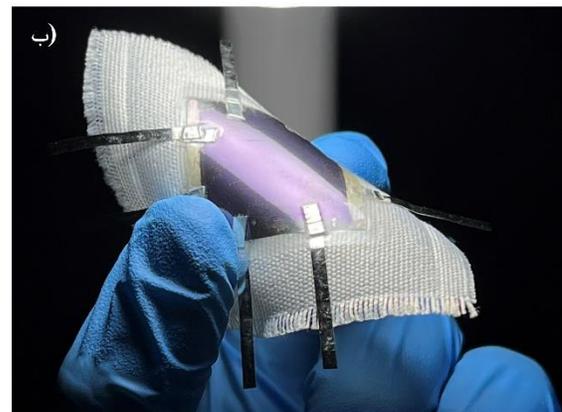
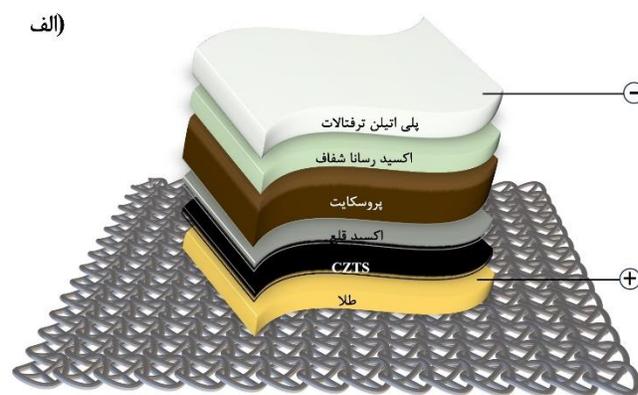
غلظت CZTS (mg/mL)	ولتاژ مدار باز (V)	جریان اتصال کوتاه (mA/cm^2)	فاکتور پر کنندگی (%)	بازده تبدیل انرژی (%)
کنترل (بهترین)	05.1	5.18	0.73	1.14
کنترل (میانگین)	02.0 ± 03.1	5.0 ± 9.17	6.3 ± 2.70	1.1 ± 0.13
5 (بهترین)	90.0	2.6	3.30	7.1
5 (میانگین)	07.0 ± 85.0	8.0 ± 8.4	8.1 ± 0.34	2.0 ± 4.1
10 (بهترین)	87.0	0.6	0.35	8.1
10 (میانگین)	01.0 ± 86.0	4.0 ± 3.5	6.1 ± 5.33	1.0 ± 5.1
15 (بهترین)	87.0	1.9	1.30	4.2
15 (میانگین)	05.0 ± 84.0	5.1 ± 7.6	0.2 ± 8.31	4.0 ± 8.1
20 (بهترین)	79.0	5.4	7.34	0.1
20 (میانگین)	3.0 ± 30.0	6.1 ± 1.5	1.3 ± 0.27	3.0 ± 4.0

۳-۴- تعبیه سلول‌های خورشیدی پروسکایتی

انعطاف‌پذیر تهیه شده با منسوج

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، سلول‌های خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر بر روی بسترهای پلاستیکی قابلیت ادغام و یکپارچه شدن با سطوح مختلف را دارند. بنابراین، ادغام-سازی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر با منسوجات، شرایط را برای ساخت یک منبع تامین انرژی سبک و مقرون به صرفه در منسوجات روزمره از جمله کلاه، کوله پشتی، چادرهای صحرایی و غیره برای کاربردهای قابل حمل و قابل پوشش فراهم می‌سازد. از آنجایی که هر شخص حداقل نیمی از زمان شبانه روز خود را در محیط‌های داخلی (خانه، ادارات و سوپر مارکت‌ها) می‌گذراند، تامین انرژی بخش فتوولتائیک سیستم‌های الکترونیکی قابل حمل و پوشش در شرایط نور داخلی نیز حائز اهمیت است. بدین ترتیب، ساخت و افزایش بازده تبدیل انرژی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر کارآمد و پایدار تحت تابش نور داخلی که تمرکز

اصلی این رساله بوده، در گسترش بازار و آینده سیستم‌های الکترونیکی خود تغذیه شونده با استفاده از سلول‌های خورشیدی پروسکایتی از اهمیت به سزایی برخوردار است. بر همین اساس، ما تصمیم گرفتیم تا سلول‌های خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر مبتنی بر زیرلایه پلی‌اتیلن ترفتالات و ماده انتقال دهنده حفره غیرآلی CZTS را بر روی منسوج پلی‌استری ادغام کنیم. شکل ۶ الف تصویر شماتیک از ساختار سلول خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر مبتنی بر ماده انتقال دهنده حفره غیرآلی CZTS تعبیه شده روی منسوج را نشان می‌دهد. همچنین، تصویر این سلول خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر که با استفاده از یک فیلم ترموپلاستیک آب‌بندی و دستگاه پرس داغ، به طور هم‌زمان بر روی پارچه پلی‌استر ادغام و کپسوله‌سازی شده در شکل ۶ ب نشان داده شده است. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود، سلول بعد از فرآیند ادغام و کپسوله‌سازی قابلیت بالای انعطاف‌پذیری خود را حفظ کرده است.



شکل ۶- الف) تصویر شماتیک از ساختار سلول خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر مبتنی بر لایه انتقال دهنده حفره غیرآلی که بر روی منسوج پلی-استری تعبیه شده است. ب) تصویر سلول خورشیدی منسوج پروسکایتی انعطاف‌پذیر.

۴- نتیجه‌گیری

در اینجا، برای نخستین بار نانوذرات CZTS به عنوان یک ماده انتقال دهنده حفره غیرآلی با اسپرو در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی انعطاف‌پذیر مبتنی بر لایه انتقال دهنده الکترون دما پایین اکسید قلع جایگزین شد. سلول‌های انعطاف‌پذیر مبتنی CZTS با غلظت بهینه ۱۵ mg/mL در حلال ایزوپروپانول منجر به بالاترین بازده تبدیل انرژی ۲/۴٪ تحت شرایط تست استاندارد نشان دادند. عملکرد بهتر این سلول‌ها به استخراج کارآمدتر حفره‌ها و در نتیجه کاهش باز ترکیبی حامل‌های بار در که در نتیجه ایجاد یک لایه انتقال دهنده حفره با ضخامت مناسب و مقاومت انتقال بار کمتر در مقایسه با غلظت‌های دیگر مربوط می‌باشد. با توجه به هزینه بسیار

پایین‌تر ماده انتقال دهنده غیرآلی CZTS در مقایسه با اسپرو، نتایج حاصل شده برای سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر با به کارگیری فرآیندهای تولید دما پایین، امیدوار کننده است. علاوه بر این، سلول‌های انعطاف‌پذیر حاصل با موفقیت با استفاده از یک فیلم ترموپلاستیک آب‌بندی به طور همزمان بر روی منسوج پلی‌استری تعبیه و کپسوله‌سازی شدند. بدین ترتیب انتظار می‌رود، این سلول‌های انعطاف‌پذیر مبتنی بر زیرلایه پلی‌اتیلن ترفتالات با ماده انتقال دهنده حفره غیرآلی ارزان قیمت پتانسیل به کارگیری به عنوان یک منسوج فتوولتائیک را در کاربردهای قابل حمل و پوشش داشته باشند.

۵- مراجع

- [1] J. Qi, H. Xiong, C. Hou, Q. Zhang, Y. Li, and H. Wang, "A kirigami-inspired island-chain design for wearable moistureproof perovskite solar cells with high stretchability and performance stability," *Nanoscale*, vol. 12, no. 6, pp. 3646–3656, 2020, doi: 10.1039/c9nr10691j.
- [2] Q. Wang, Q. Dong, T. Li, A. Gruverman, and J. Huang, "Thin Insulating Tunneling Contacts for Efficient and Water-Resistant Perovskite Solar Cells," *Adv. Mater.*, vol. 28, no. 31, pp. 6734–6739, Aug. 2016, doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201600969>.
- [3] S. Sajid, S. Alzahmi, I. Ben Salem, J. Park, and I. M. Obaidat, "Inorganic hole transport materials in perovskite solar cells are catching up," *Mater. Today Energy*, vol. 37, p. 101378, 2023, doi: 10.1016/j.mtener.2023.101378.
- [4] C. Li, Y. Zhang, X. Zhang, P. Zhang, X. Yang, and H. Chen, "Efficient Inverted Perovskite Solar Cells with a Fill Factor Over 86% via Surface Modification of the Nickel Oxide Hole Contact," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 33, no. 13, p. 2214774, Mar. 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202214774>.

[5] B. Zhang et al., "NiO/Perovskite Heterojunction Contact Engineering for Highly Efficient and Stable Perovskite Solar Cells," *Adv. Sci.*, vol. 7, no. 11, p. 1903044, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/advs.201903044>.

[6] S. Zhang et al., "Printable and Homogeneous NiOx Hole Transport Layers Prepared by a Polymer-Network Gel Method for Large-Area and Flexible Perovskite Solar Cells," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 31, no. 47, p. 2106495, Nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202106495>.

[7] J. Ge, C. R. Grice, and Y. Yan, "Cu-based quaternary chalcogenide Cu₂BaSnS₄ thin films acting as hole transport layers in inverted perovskite CH₃NH₃PbI₃ solar cells," *J. Mater. Chem. A*, vol. 5, no. 6, pp. 2920–2928, 2017, doi: <https://doi.org/10.1039/C6TA08426E>.

[8] Q. Wu et al., "Kesterite Cu₂ZnSnS₄ as a low-cost inorganic hole-transporting material for high-efficiency perovskite solar cells," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 7, no. 51, pp. 28466–28473, 2015, doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.5b09572>.

[9] L. S. Khanzada et al., "Effective ligand engineering of the Cu₂ZnSnS₄ nanocrystal surface for increasing hole transport efficiency in perovskite solar

cells,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 26, no. 45, pp. 8300–8306, 2016, doi: 10.1002/adfm.201603441 Effective.

[10] S. B. Patel, A. H. Patel, and J. V. Gohel, “A novel and cost effective CZTS hole transport material applied in perovskite solar cells,” *CrystEngComm*, vol. 20, no. 47, pp. 7677–7687, 2018, doi: 10.1039/c8ce01337c.

[11] M. M. S. Sanad, A. M. Elseman, M. M. Elsenety, M. M. Rashad, and B. A. Elsayed, “Facile synthesis of sulfide-based chalcogenide as hole-transporting materials for cost-effective efficient perovskite solar cells,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 30, no. 7, pp. 6868–6875, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01001-z>.

[12] Y. Cao et al., “Cu₂ZnSnS₄ as an efficient hole transporting material for low temperature paintable carbon electrode based perovskite solar cells,” *Org. Electron.*, vol. 76, p. 105455, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2019.105455>.

[13] Z. Rastegar Moghadamgohari, M. Heidariramsheh, N. Taghavinia, R. Mohammadpour, and R. Rasuli, “Cu₂ZnSnS₄ as a hole-transport layer in triple-cation perovskite solar cells: Current density versus layer thickness,” *Ceram. Int.*, vol. 48, no. 1, pp. 711–719, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.09.151>.

[14] M. Heidariramsheh, M. Forouzandeh, N. Taghavinia, and S. M. Mahdavi, “Effect of Zn/Sn Ratio on Perovskite Solar Cell Performance Applying Off-Stoichiometric Cu₂ZnSnS₄/Carbon Hole-Collecting Electrodes,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 14, no. 15, pp. 17296–17311, Apr. 2022, doi: 10.1021/acsami.2c00206.

[15] H. S. Jung, G. S. Han, N. G. Park, and M. J. Ko, “Flexible Perovskite Solar Cells,” *Joule*, vol. 3, no. 8, pp. 1850–1880, 2019, doi: 10.1016/j.joule.2019.07.023.

[16] V. Zardetto, T. M. Brown, A. Reale, and A. Di Carlo, “Substrates for flexible electronics: A practical investigation on the electrical, film flexibility, optical, temperature, and solvent resistance properties,” *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, vol. 49, no. 9, pp. 638–648, May 2011, doi: <https://doi.org/10.1002/polb.22227>.

[17] F. Di Giacomo, A. Fakhruddin, R. Jose, and T. M. Brown, “Progress, challenges and perspectives in flexible perovskite solar cells,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 9, no. 10, pp. 3007–3035, 2016, doi: 10.1039/c6ee01137c.

[18] S. A. Hashemi, S. Ramakrishna, and A. G.

Aberle, “Recent progress in flexible-wearable solar cells for self-powered electronic devices,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 13, no. 3, pp. 685–743, 2020, doi: 10.1039/C9EE03046H.

[19] G. Tang and F. Yan, “Recent progress of flexible perovskite solar cells,” *Nano Today*, vol. 39, p. 101155, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2021.101155>.

[20] Z. Wu, P. Li, Y. Zhang, and Z. Zheng, “Flexible and Stretchable Perovskite Solar Cells: Device Design and Development Methods,” *Small Methods*, vol. 2, no. 7, pp. 1–18, 2018, doi: 10.1002/smt.201800031.

[21] J. Liu, T. Ye, D. Yu, S. (Frank) Liu, and D. Yang, “Recoverable Flexible Perovskite Solar Cells for Next-Generation Portable Power Sources,” *Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 62, no. 40, p. e202307225, Oct. 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/anie.202307225>.

[22] J. Panidi, D. G. Georgiadou, T. Schoetz, and T. Prodromakis, “Advances in Organic and Perovskite Photovoltaics Enabling a Greener Internet of Things,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 32, no. 23, p. 2200694, Jun. 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202200694>.

[23] A. Roy, A. Ghosh, S. Bhandari, S. Sundaram, and T. K. Mallick, “Perovskite Solar Cells for BIPV Application: A Review,” *Buildings*, vol. 10, no. 7, 2020, doi: 10.3390/buildings10070129.

[24] N. Rafizadeh Zaeem; K. yaghoubi; R. Khajavi " Application of smart materials for textile: a review " *Journal of appraael and textile science technology*" Volume 12, Issue 4, March 2024, Pages 107-135.

[25] S. Castro-Hermosa, G. Lucarelli, M. Top, M. Fahland, J. Fahlteich, and T. M. Brown, “Perovskite Photovoltaics on Roll-To-Roll Coated Ultra-thin Glass as Flexible High-Efficiency Indoor Power Generators,” *Cell Reports Phys. Sci.*, vol. 1, no. 5, p. 100045, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100045>.

[26] “Solar RRL - 2022 - Feleki - Perovskite Solar Cells on Polymer-Coated Smooth and Rough Steel Substrates.pdf.”

[27] X. Sun et al., “Fabrication of opaque aluminum electrode-based perovskite solar cells enabled by the interface optimization,” *Org. Electron.*, vol. 104, p. 106475, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2022.106475>.

[28] G. S. Han, S. Lee, M. L. Duff, F. Qin, and J.-K. Lee, “Highly Bendable Flexible Perovskite Solar

- Cells on a Nanoscale Surface Oxide Layer of Titanium Metal Plates,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 10, no. 5, pp. 4697–4704, Feb. 2018, doi: 10.1021/acsami.7b16499.
- [29] B. Abdollahi Nejad, P. Nazari, S. Gharibzadeh, V. Ahmadi, and A. Moshaii, “All-inorganic large-area low-cost and durable flexible perovskite solar cells using copper foil as a substrate,” *Chem. Commun.*, vol. 53, no. 4, pp. 747–750, 2017, doi: 10.1039/C6CC07573H.
- [30] H. Li et al., “Ultraflexible and biodegradable perovskite solar cells utilizing ultrathin cellophane paper substrates and TiO₂/Ag/TiO₂ transparent electrodes,” *Sol. Energy*, vol. 188, pp. 158–163, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.061>.
- [31] S. Castro-Hermosa, J. Dagar, A. Marsella, and T. M. Brown, “Perovskite solar cells on paper and the role of substrates and electrodes on performance,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 38, no. 9, pp. 1278–1281, 2017, doi: 10.1109/LED.2017.2735178.
- [32] I. Hussain et al., “Conductive glass free carbon nanotube micro yarn based perovskite solar cells,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 478, pp. 327–333, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.233>.
- [33] J.-Y. Lam et al., “A stable, efficient textile-based flexible perovskite solar cell with improved washable and deployable capabilities for wearable device applications,” *RSC Adv.*, vol. 7, no. 86, pp. 54361–54368, 2017.
- [34] P. Chen, Y. Bai, S. Wang, M. Lyu, J. H. Yun, and L. Wang, “In Situ Growth of 2D Perovskite Capping Layer for Stable and Efficient Perovskite Solar Cells,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 28, no. 17, pp. 1–10, 2018, doi: 10.1002/adfm.201706923.
- [35] B. Taheri et al., “Laser-Scribing Optimization for Sprayed SnO₂-Based Perovskite Solar Modules on Flexible Plastic Substrates,” *ACS Appl. Energy Mater.*, vol. 4, no. 5, pp. 4507–4518, 2021, doi: 10.1021/acsaem.1c00140.
- [36] S. N. Hood et al., “Status of materials and device modelling for kesterite solar cells,” *JPhys Energy*, vol. 1, no. 4, p. 42004, 2019, doi: 10.1088/2515-7655/ab2dda.
- [37] I. Mártil and G. González-Díaz, “Determination of the dark and illuminated characteristic parameters of a solar cell from I-V characteristics,” *Eur. J. Phys.*, vol. 13, p. 193, Jul. 2000, doi: 10.1088/0143-0807/13/4/009.
- [38] P. Makuła, M. Pacia, and W. Macyk, “How To Correctly Determine the Band Gap Energy of Modified Semiconductor Photocatalysts Based on UV-Vis Spectra,” *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 9, no. 23, pp. 6814–6817, Dec. 2018, doi: 10.1021/acs.jpcclett.8b02892.
- [39] K. C. Icli and M. Ozenbas, “Fully metal oxide charge selective layers for n-i-p perovskite solar cells employing nickel oxide nanoparticles,” *Electrochim. Acta*, vol. 263, pp. 338–345, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.01.073>.
- [40] Aliasghar Alamdar yazdi; azam soheilipour, "Assessment of Stability in the Nano Particles of Persian Gum for Increase of Resistance in Historical Cellulose Textiles" Volume 6, Issue 4, March 2018, Pages 57-63.
- [41] M. Saliba et al., “Cesium-containing triple cation perovskite solar cells: improved stability, reproducibility and high efficiency,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 9, no. 6, pp. 1989–1997, 2016, doi: 10.1039/C5EE03874J.
- [42] Z. Skafi et al., “Highly Efficient Flexible Perovskite Solar Cells on Polyethylene Terephthalate Films via Dual Halide and Low-Dimensional Interface Engineering for Indoor Photovoltaics,” *Sol. RRL*, vol. 7, no. 20, p. 2300324, Oct. 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/solr.202300324>.
- [43] Z. Ma et al., “Excess PbI₂ evolution for triple-cation based perovskite solar cells with 21.9% efficiency,” *J. Energy Chem.*, vol. 66, pp. 152–160, 2022, doi: 10.1016/j.jechem.2021.07.030.
- [44] R. Zhang, C. Fei, B. Li, H. Fu, J. Tian, and G. Cao, “Continuous Size Tuning of Monodispersed ZnO Nanoparticles and Its Size Effect on the Performance of Perovskite Solar Cells,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9, no. 11, pp. 9785–9794, Mar. 2017, doi: 10.1021/acsami.7b00726.