

## A Review of Recent Progress in Fabrication of Perovskite Solar Cells

Samira Fallahdoust Moghadam<sup>1</sup>, Neda Gilani<sup>1\*</sup>, Ali Akbar Yousefi<sup>2</sup>

1- Department of Chemical Engineering, University of Guilan, P. O. Box: 4199613776, Rasht, Iran.

2- Energy Division , Iran Polymer and Petrochemical Institute, P. O. Box: 14975-112, Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

Article history:

Received: 07- 02- 2023

Accepted: 26 -04 -2023

Available online: 13 -09- 2023

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOR:

**Keywords:**

Photovoltaic

Solar cell

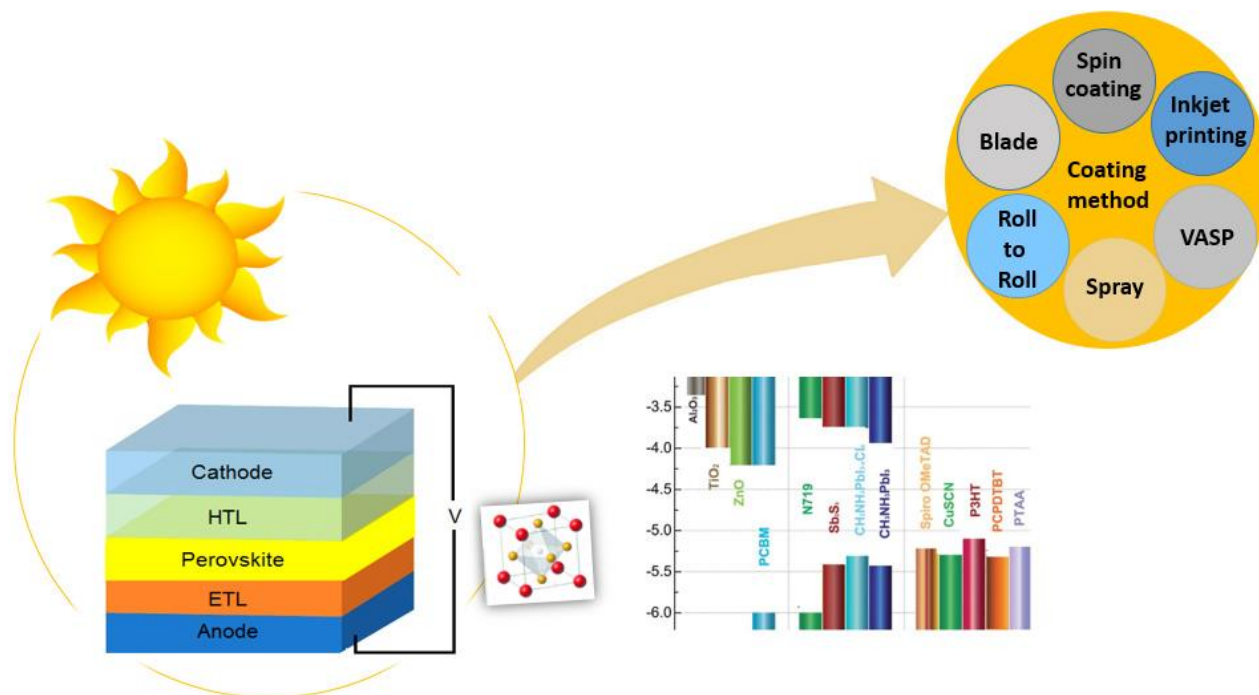
Perovskite

Coating

Conversion efficiency

### ABSTRACT

In recent years, perovskite solar cells have attracted attention due to their increased power conversion efficiency, simple manufacturing process, low-cost materials, and unique properties such as band tunability, high electron and hole mobility, and low exciton binding energy. Also, the efficiency of perovskite solar cells has exceeded 25 % due to the high quality of perovskite film, synthesis methods, coating, and appropriate electrode materials. This article examines the recent progress of perovskite solar cells, structure, and types of coating methods to understand better and gain complete insight into perovskite solar cells. In the following, some types of perovskites, holes, and electron transfer layers are compared, and their effect on solar cell efficiency is reported. Finally, the types of perovskite coating methods with large and small areas are discussed, and the challenges and opportunities of perovskite solar cell commercialization are suggested.



Corresponding author: [n.gilani@guilan.ac.ir](mailto:n.gilani@guilan.ac.ir)



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



## بررسی پیشرفت‌های اخیر در ساخت سلول‌های خورشیدی پروسکایت

سمیرا فلاح دوست مقدم<sup>۱</sup>، ندا گیلانی<sup>۲\*</sup>، علی اکبر یوسفی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، کدپستی: ۴۱۹۹۶۱۳۷۷۶.

۲- دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، کدپستی: ۴۱۹۹۶۱۳۷۷۶.

۳- استاد، گروه انرژی، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران، کدپستی: ۱۱۲-۱۴۹۷۵.

### چکیده

در سال‌های اخیر، سلول‌های خورشیدی پروسکایت به دلیل افزایش راندمان تبدیل توان، فرآیند ساخت ساده، مواد کم‌هزینه و خواص منحصر به فردی همچون گاف نواری قابل تنظیم، دامنه جذب نور بالا، انرژی پیوند اکسایش کم و تحرک زیاد الکترون و حفره مورد توجه قرار گرفته‌اند. اخیراً بازده سلول‌های خورشیدی پروسکایت با توجه به کیفیت بالای فیلم پروسکایت، روش‌های سنتز، لایه نشانی و مواد الکتروکود مناسب، از ۲۵ درصد فراتر رفته است. در این مقاله با هدف ایجاد درک بهتر و دستیابی به بینش کامل‌تر در خصوص سلول‌های خورشیدی مبتنی بر مواد پروسکایت، پیشرفت‌های اخیر سلول‌های خورشیدی پروسکایت، ساختار و انواع روش‌های لایه نشانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه برخی از انواع پروسکایت‌ها، لایه‌های انتقال‌دهنده حفره و الکترون با یکدیگر مقایسه شده و تأثیر آن‌ها بر بازده سلول خورشیدی گزارش می‌شود. در نهایت انواع روش‌های پوشش‌دهی پروسکایت با مساحت بزرگ و کوچک مورد بحث قرار گرفته و چالش‌ها و فرصت‌های تجاری‌سازی پیشنهاد شده است.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۶

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۲۲۳-۲۳۸۳

DOR: 20.1001.1.22517278.1402.13.2.3.7

### واژه‌های کلیدی:

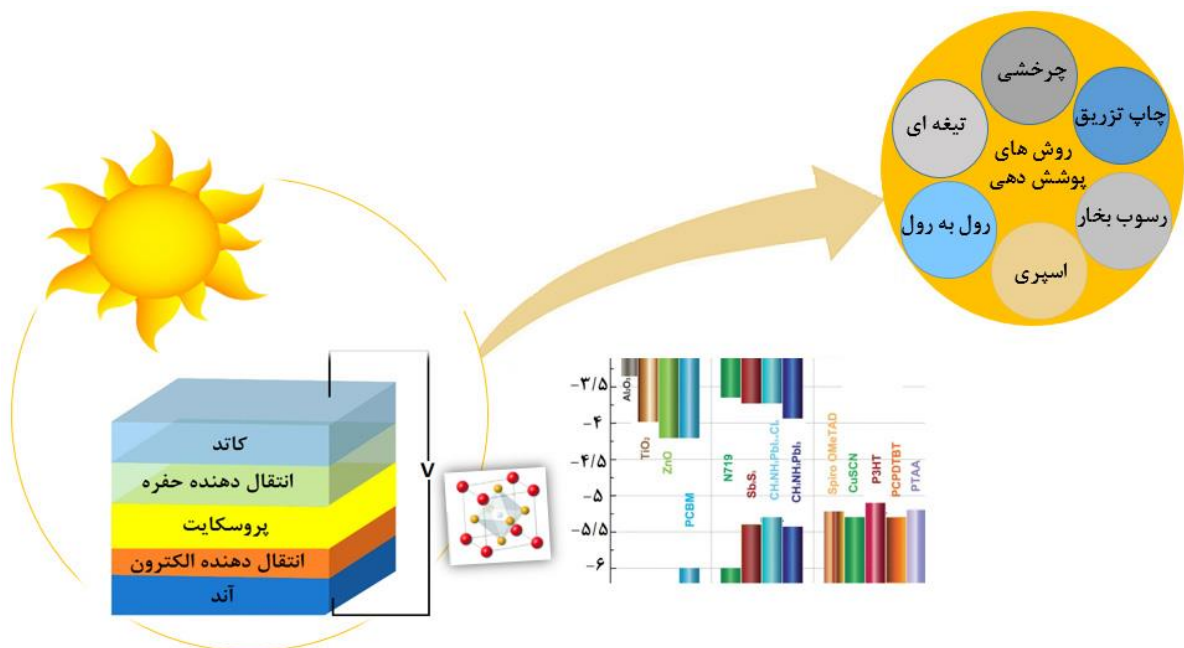
فوتولتائیک

سلول خورشیدی

پروسکایت

لایه‌نشانی

بازده تبدیل



## ۱- مقدمه

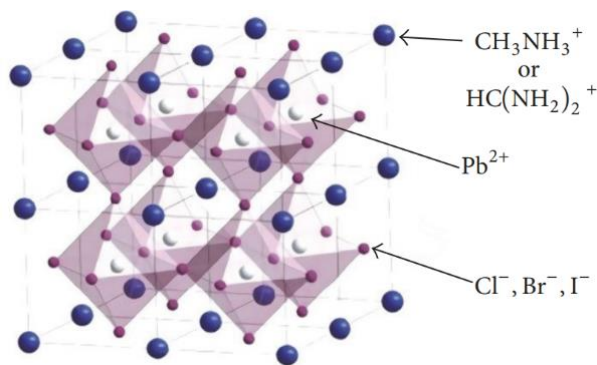
سال‌های زیادی بشر در جست‌وجوی منبعی از انرژی بوده است که نه تنها از نظر زیست‌محیطی پایدار باشد بلکه از نظر تجاری نیز مقرون‌به‌صرفه باشد. تقاضای فعلی برق جهانی حدود ۱۶ تراوات است و تخمین زده می‌شود که تا سال ۲۰۵۰ به ۳۰ تراوات افزایش یابد. بنابراین تحقیقات گسترده‌ای در حال انجام است تا یک سیستم تولید برق کارآمد به دست آید زیرا تقاضای انرژی توسط منابع متداول انرژی مانند نفت، زغال‌سنگ و گاز منجر به افزایش آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای می‌شود که این مسأله باعث ایجاد مشکلات زیست‌محیطی می‌شود (۱). آزاد شدن گازهایی مانند دی‌اکسید کربن، متان و اکسیدهای نیتروژن که دارای پرتو زیر قرمز است، سبب افزایش دما، ذوب شدن یخ‌ها و بالا آمدن سطح آب اقیانوس‌ها می‌شود. علاوه بر آن سوخت‌های فسیلی یک منبع غیرتجدیدپذیر هستند که برای بازتولید آن صدها میلیون سال زمان لازم است (۲). منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد، امواج دریا، جزر و مد، زمین‌گرایی و خورشیدی در بحران کمبود انرژی، کمک بسیاری خواهند کرد. در این میان انرژی خورشیدی به‌عنوان یکی از کارآمدترین منابع پیشنهاد می‌شود زیرا به‌وفور در دسترس است. مقدار انرژی تولید شده در خورشید روزانه معادل  $3/1 \times 10^{23} \text{ erg}$  ( $3/1 \times 10^{23} \text{ erg/day}$ ) می‌باشد. این انرژی دریاقتی زمین از خورشید مقدار قابل‌ملاحظه‌ای می‌باشد. این مقدار ۱۰۰۰ برابر بیشتر از مقدار انرژی مصرفی توسط جمعیت جهان است. اگر تنها یک دهم درصد از سطح زمین با استفاده از سلول‌های خورشیدی با بازدهی ۱۰ درصد پوشیده شود انرژی مورد نیاز جهان تأمین می‌شود (۴، ۳). در نتیجه اگر تمام انرژی خورشیدی به برق تبدیل شود یک ساعت روشنایی مداوم انرژی خورشیدی قادر به تأمین تقاضای انرژی سالانه ما است. بنابراین، به نظر می‌رسد استفاده از سلول‌های خورشیدی فوتولتائیک برای تولید برق یک روش امیدوارکننده باشد به دلیل آن‌که این سلول‌ها نور خورشید را مستقیماً به برق تبدیل می‌کنند. برای اولین بار در سال ۱۸۳۹، بکرل<sup>۱</sup> نور خورشید را به برق تبدیل کرد (۵). در سال ۱۸۷۳، اسمیت<sup>۲</sup> رسانایی نوری را در سلنیم کشف کرد. در سال ۱۸۸۳، فریتس<sup>۳</sup> اولین طرح سلول فوتولتائیک را پیشنهاد داد که بر اساس ویفرهای سلنیم ساخته شد. تئوری اثر فوتوالکتریک که توسط آلبرت اینشتین<sup>۴</sup> در سال ۱۹۰۵ ارائه شد، توضیح داد که چگونه نور الکترون

از سطح فلز خارج می‌شود. در سال ۱۹۱۸، چوچرالاسکی<sup>۵</sup> با توسعه یک روش برای پرورش سیلیکون یک بلور (Si)، سلول‌های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون (Si) را پایه‌ریزی کرد (۶). در سال ۱۹۵۴ پیرسون<sup>۶</sup> و همکاران در آزمایشگاه‌های بل ایالات‌متحده اولین قطعه سلول خورشیدی سیلیکون بلورین را تولید کردند و به بازده تبدیل ۴/۵ درصد دست‌یافتند. بنابراین دوره جدیدی برای استفاده از انرژی خورشیدی آغاز شد (۵). سلول‌های خورشیدی سیلیکون (پلی‌بلوری- تک‌بلوری) که در حال حاضر در کاربردهای صنعتی به کار می‌روند، بازده تبدیل فوتولتائیک بیش از ۲۰ درصد را بدست آورده‌اند. اما سلول‌های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون با هزینه زیاد، پیچیدگی فرآیند تولید سلول خورشیدی، گرانی سیلیکون، وزن زیاد و شکنندگی مشخص تولید می‌شوند و بدین منظور دارای محدودیت هستند (۷). در سال‌های اخیر، سلول‌های خورشیدی حساس‌شده به مواد رنگزا، در آزمایشگاه به بازده تبدیل فوتوالکتریک بیش از ۱۳ درصد رسیده‌اند. این سلول‌ها یکی از شاخه‌های حیاتی فناوری نسل سوم فوتولتائیک هستند که به ارزان‌ترین مولد انرژی با کارایی و عملکرد بالا گسترش یافته‌اند (۸). اما سلول‌های حساس‌شده به مواد رنگزا معایبی هم دارند. اولاً برای جذب کامل انرژی نور خورشید، لایه جذب آن‌ها ضخیم است (میکرومتر  $> 10$ ) زیرا دستیابی به جذب کامل نور با استفاده از یک لایه جذب‌کننده نازک‌تر در سلول‌های حالت جامد دشوار است. ثانیاً رنگ‌های آلی نمی‌توانند از پدیده سفید شدن نور جلوگیری کنند. این دو مشکل محققان را وادار به تولید مواد کاملاً جامد کرده است. در سال ۲۰۰۹ دانشمند ژاپنی کوچیما<sup>۷</sup> و همکارانش دریافتند که فلز آلی هالید پروسکایت<sup>۸</sup> به رنگ‌ها شبیه است و می‌تواند نور خورشید را جذب کند (۹). سلول خورشیدی پروسکایت کارآمدترین فناوری است که نوید یک مسیر ساخت ارزان‌تر و در دسترس برای تولید بازده تبدیل کارآمد (PCE)<sup>۹</sup> را می‌دهد. مواد پروسکایت تقریباً همه الزامات برای دستیابی به بهترین عملکرد را دارند (۱۰). ساخت جذب‌های پروسکایت به تجهیزات پیچیده احتیاج ندارد و می‌تواند در دماهای نسبتاً پایین در مقایسه با سیلیکون انجام شود (۱۱). این امر علاوه بر کارایی بالا، می‌تواند منجر به کاهش قابل‌توجه هزینه فناوری فوتولتائیک شود. در سلول‌های سیلیکونی که با خلوص بالا ساخته می‌شوند، مواد سیلیکونی جز اصلی هستند و بیش از ۷۰ درصد هزینه کل دستگاه را تشکیل می‌دهند (۱۲). همچنین آماده‌سازی سلول‌های خورشیدی فیلم نازک سیلیکون به دمای رسوب ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و به

<sup>5</sup> chocherlaski<sup>6</sup> Pirson<sup>7</sup> Kojima<sup>8</sup> Perovskite<sup>9</sup> Power conversion efficiency<sup>1</sup> Becquerel<sup>2</sup> Smith<sup>3</sup> Fritz<sup>4</sup> Einstein

در دهه ۱۹۹۰، میتزی<sup>۳</sup> و همکارانش خصوصیات اپتوالکترونیکی پروسکایت‌های آل- معدنی را بررسی کردند. به گفته آن‌ها این مواد ویژگی‌های قوی اکسایتون (جفت الکترون-حفره) را به نمایش می‌گذارند و می‌توانند در زمینه آل ای دی‌ها، ترانزیستورها و سلول‌های خورشیدی مورد استفاده قرار گیرند (۱۶). پروسکایت‌های آل- معدنی با ساختار  $ABX_3$  که در آن A سزیم (Cs)، متیل آمونیم (MA) یا فرم امیدینیم (FA) است. B، سرب (Pb) یا قلع (Sn) است. X، کلر (Cl)، برم (Br) یا ید (I) است، اخیراً به‌عنوان یک جاذب نیمه‌هادی به عنوان لایه فعال در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۷). علاوه بر این، ترکیب بین عناصر مختلفی از A، B و X با عنوان پروسکایت ترکیبی منجر به خواص متنوع و عملکرد جدیدی در سلول خورشیدی می‌شود. شکل ۱ ساختار شبکه سه‌بعدی پایدار پروسکایت را نشان می‌دهد که در آن A در رأس شبکه مکعب به صورت محور قرار دارد و کاتیون فلزی B و آنیون هالوژن X، به ترتیب هسته و رأس هشت‌ضلعی را اشغال می‌کنند. هشت‌ضلعی فلزی-هالوژن به هم متصل می‌شود و یک ساختار شبکه سه‌بعدی پایدار را تشکیل می‌دهد.

مواد پروسکایت به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود، مانند تحرک زیاد الکترون ( $800$  سانتی‌متر مربع بر ولتاژ)، طول انتشار حامل بالا (بیش از  $1$  میکرومتر) یکی از برجسته‌ترین مواد برای تکنولوژی فوتوولتائیک در نظر گرفته شده است (۱۹). تفاوت اصلی بین جاذب‌های معدنی و آل در نوع اکسایتون است. لایه جاذب آل اساساً دارای اکسایتون از نوع فرنکل<sup>۴</sup> (جفت الکترون-حفره مقید که در آن حفره در موقعیتی درون کریستال قرار دارد) است در حالی که لایه غیر آل از نوع وانیه<sup>۵</sup> (جفت الکترون-حفره مقید که در یک موقعیت کریستال قرار نگرفته است) برخوردار است. مواد پروسکایت مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی دارای اکسیتون نوع وانیه است.



شکل ۱: ساختار سه‌بعدی پروسکایت (۱۸).

Figure 1: Three-dimensional structure of perovskite (18).

روش رسوب بخار شیمیایی نیاز دارد. در مقابل فیلم‌های نازک پروسکایت با فرآیند رسوب حلال، رسوب بخار یا فرآیندهای ترکیبی تهیه می‌شوند که به‌عنوان تجهیزات ساده در نظر گرفته می‌شوند و به دنبال آن مرحله پخت در دامنه دمایی بین  $100$  و  $190$  درجه سانتی‌گراد است (۱۳). جدول ۱ برخی از خواص و ویژگی‌های مواد پروسکایت را نشان می‌دهد. خواص فوتوولتائیک عالی پروسکایت‌ها به مشخصات اپتوالکترونیکی عالی مانند ضریب جذب بالا، انرژی اتصال اکسایتون کم و شکاف باند انرژی قابل تنظیم نسبت داده می‌شود (۱۴). همانطور که مشاهده می‌شود فاصله باند برای مواد پروسکایتی می‌تواند دامنه وسیعی داشته باشد که از قابلیت تنظیم آسان آن‌ها ناشی می‌شود. ساختار پروسکایت امکان تغییرپذیری زیادی را فراهم می‌کند. در این مقاله مروری، پیشرفت‌های اخیر در سلول‌های خورشیدی پروسکایت، ساختارهای سلول و روش‌های ساخت و تأثیر آن‌ها بر بازده تبدیل و پایداری سلول‌ها مورد بررسی قرار گرفته می‌شود. علاوه بر این، مواد مورد استفاده در لایه‌های مختلف سلول و تأثیر آن‌ها بر پایداری و عملکرد سلول‌های خورشیدی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- ساختار پروسکایت

پروسکایت اساساً اکسید تیتانیم کلسیم ( $CaTiO_3$ ) است که یک ماده معدنی است که توسط گوستاو رز<sup>۱</sup> در کوه‌های اورال روسیه در سال ۱۹۳۹ یافت شده است. کنت لو آکسویچ پروسکی<sup>۲</sup>، یک متخصص کانی‌شناسی روسی تحقیقات بیشتری را انجام داد. بنابراین مواد به نام وی پروسکایت نامگذاری شد (۱۵).

جدول ۱: برخی از خواص مواد پروسکایت (۱۰).

Table 1: Some properties of perovskite (10).

| Properties   | Materials           |
|--|---------------------|
| The energy gap suitable for the solar spectrum (1.5-2.5 eV)              | Low costs           |
| Strong absorption coefficient ( $105 \text{ cm}^{-1}$ )                  | Non-toxic           |
| Excellent and balanced carrier mobility ( $800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) | Long term stability |
| Fault tolerance  | High performance    |
| Bipolar capability   | -                   |
| Long carrier lifetime and emission                                       | -                   |
| - Low coupling with excitons (less than 10 meV)                          | -                   |
| PI quantum efficiency (70%)  | -                   |

<sup>3</sup> Mitzi

<sup>4</sup> Franckel

<sup>5</sup> vanie

<sup>1</sup> Rose

<sup>2</sup> Count Lev Alekseevich Perovski

مروری، بالاترین بازده به ۲۷/۱ درصد رسید که توسط آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر تأیید شد (۲۷). با این حال، چالش برانگیزترین جنبه سلول‌های خورشیدی پروسکایت رشد یک لایه پروسکایت آب‌گریز است که می‌تواند یک سلول پایدار و با عملکرد بالا تولید کند. این می‌تواند با اصلاح سطح لایه پروسکایت از طریق مواد افزودنی، مایعات یونی و ترکیب چند پروسکایت حاصل شود. برای ساخت سلول خورشیدی پروسکایت با بازده بالا، فیلم‌های پروسکایت با کیفیت بالا با دانه‌های بزرگ و مرز دانه کمتر نیاز است. برای این منظور، مهندسی افزودنی به‌عنوان یکی از راه‌های کارآمد برای دستیابی به بلورهای پروسکایت بدون عیب در طول فرآیند پوشش‌دهی در نظر گرفته می‌شود. افزودنی‌های موجود در محلول‌های پیش‌ساز پروسکایت برای نقص‌های غیرفعال نه‌تنها در حجم بلکه در مرزهای دانه در هنگام تشکیل فاز پروسکایت مفید هستند (۲۸). علاوه بر این یک افزودنی خاص می‌تواند یک پروسکایت ناپایدار در شرایط محیط را بهبود بخشد. به‌طور مثال افزودنی‌های حاوی کلرید (Cl<sup>-</sup>) به‌عنوان جایگزین یدید پیشنهاد می‌شوند زیرا آنیون کلرید به عنوان کمک‌کننده به رشد دانه همراه با جهت‌گیری دانه‌های پروسکایت، مناسب است. همچنین سلول‌های خورشیدی پروسکایت مخلوط I-Br تک پیوندی نیز عملکرد بسیار امیدوارکننده از خود نشان داده و با بالاترین بازده در حال حاضر به ۲۱/۱ درصد رسیده‌اند. علاوه بر این، نشان داده شده است که پروسکایت‌های مخلوط I-Br دارای مقاومت در برابر رطوبت و پایداری حرارتی عالی هستند، هر دو برای تحقق پایداری طولانی‌مدت سلول‌های خورشیدی بسیار مهم هستند (۲۹). مواد معمولی پروسکایت، به عنوان مثال MAPbI<sub>3</sub>، MAPbI<sub>3</sub>-xCl<sub>x</sub>، CsPbI<sub>3</sub>، به دلیل داشتن باند پهن، نمی‌توانند فوتون‌های بالای ۸۰۰ نانومتر را جذب کنند، در نتیجه ولتاژ مدار باز (V<sub>oc</sub>) بالا و جریان محدود دارند. بنابراین انتخاب و به‌کارگیری مواد آلی نقش مهمی در تعیین عملکرد نهایی سلول دارد. در سال‌های گذشته انواع مختلفی از مواد آلی و ترکیبات مواد معدنی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (۳۰). بیشترین تحقیق استفاده از سلول‌های خورشیدی پروسکایت به MAPbI<sub>3</sub> اختصاص داده شده است. اما بی‌ثباتی حرارتی، تفکیک هالید و حساسیت بیشتر به رطوبت این نوع پروسکایت موضوع بحث زیادی بوده است (۳۱). کاتیون مبتنی بر فرمامیدینیوم (FA) در مقایسه با یون متیل آمونیم (MA) پایداری حرارتی و ویژگی انتقال بالاتری دارد. نشان داده شده است که مخلوطی از کاتیون‌های آلی و معدنی FA: Cs<sup>+</sup> از نظر ساختاری و حرارتی در دمای بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد پایدار هستند (۳۲). در بین مواد پروسکایت، FA<sub>x</sub>MA<sub>1-x</sub>PbI<sub>3</sub>، در لایه فعال بسیار مورد استفاده است. از آنجایی که اندازه کمی بزرگ‌تر (شعاع یونی= ۲/۷۹ Å) از MA<sup>+</sup> (شعاع یونی= ۲/۷۰ Å) است، FA<sub>x</sub>MA<sub>1-x</sub>PbI<sub>3</sub> دارای شکاف باند کم‌تری نسبت به MAPbI<sub>3</sub> است.

بنابراین حامل‌های بار تولید شده همان رفتاری را دارند که در مواد غیرآلی انجام می‌دهند. این مواد دارای انرژی باند ۲/۵-۱/۵ eV و ضریب جذب ۱۰۵ cm<sup>-1</sup> هستند. همچنین مقدار انرژی اتصال اکسیژن آن‌ها کمتر از ۱۰ meV است (۲۰).

### ۳- تاریخچه پروسکایت

فیلم‌های نازک پروسکایت آلی - معدنی برای دستگاه‌های الکترونیکی آلی در اوایل سال ۱۹۹۸ از محلول تهیه شده‌اند اما نمک آلی از نظر حرارتی پایدار نبود و مشکلات ناشی از پایداری حالت ظرفیت مشاهده شد (۲۱). بیش از ده سال طول کشید که کوچیما<sup>۱</sup> و همکارانش اولین سلول خورشیدی پروسکایت را با الکترولیت مایع، شبیه سلول‌های خورشیدی حساس‌شده به ماده رنگزا، تولید کردند و بازده تبدیل (PCE) ۳/۸ درصد را ارائه دادند. در این گزارش از پروسکایت‌های MAPbI<sub>3</sub> و MAPbBr<sub>3</sub> استفاده شده است و سلول به ترتیب بازده ۳/۸۱ و ۳/۲ درصد را به دست آورد (۲۲). دو سال بعد، ایم<sup>۲</sup> و همکارانش با استفاده از سلول‌های خورشیدی نقطه کوانتومی با استفاده از MAPbI<sub>3</sub> به عنوان یک لایه فعال به بازده ۶/۵ درصد دست یافتند (۲۳). این سلول‌های خورشیدی مبتنی بر مایع دارای مسائل پایداری هستند به‌طوری‌که پروسکایت‌ها تمایل دارند به سرعت در الکترولیت‌های مایع تخریب شوند. این مسأله در سال ۲۰۱۲ توسط کیم<sup>۳</sup> و همکارانش حل شد. آن‌ها الکترولیت مایع را با مواد جامد Spiro OMeTAD<sup>۴</sup> جایگزین کردند که به‌عنوان یک ماده انتقال‌دهنده حفره عمل می‌کند. این سلول‌های حالت‌جامد به بازده ۹/۷ درصد رسیدند و افزایش پایداری آن‌ها دستیابی به موفقیت در فناوری پروسکایت شد (۲۴). در سال ۲۰۱۳ بروشکا<sup>۵</sup> و همکارانش با استفاده از روش رسوب پی‌درپی ۲ مرحله‌ای راندمان ۱۵ درصد را به دست آوردند. آن‌ها روش رسوب متوالی را به کار گرفتند به طوری که ابتدا لایه PbI<sub>2</sub> و سپس لایه MAI رسوب داده شد. این ساختار به دلیل ایجاد یک لایه پروسکایت متراکم و یکنواخت، جریان (J<sub>sc</sub>) بالایی (۲۰ میلی‌آمپر در سانتی‌متر مربع) داشت (۲۵). جوردانو<sup>۶</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۵، با افزودن لیتیوم (Li) به ساختار پروسکایت، خصوصیات الکترونیکی لایه تیتانیا مزوپور (m-TiO<sub>2</sub>) را بهبود بخشیدند و با بازده ۱۹/۳ درصد به عملکرد برتر سلول خورشیدی دست یافتند (۲۶). پروسکایت‌ها در طی چند سال گذشته به بازدهی بیشتر از ۲۳ درصد رسیده‌اند. هنگام نوشتن این مقاله

<sup>1</sup> Kojima

<sup>2</sup> Im

<sup>3</sup> Kim

<sup>4</sup> 2,20,7,70-tetrakis(N,N-di-pmethoxyphenylamine)-9,90-spiro-bifluorene

<sup>5</sup> Burschka

<sup>6</sup> Giordano

درحالی‌که مخلوط کردن MA و FA دمای انتقال را به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌دهد که برای پروسکایت‌های منعطف سازگارتر است. برای افزایش پایداری سلول‌های خورشیدی پروسکایت، افزودن کاتیون‌های معدنی یک رویکرد منطقی است. اخیراً کاتیون‌های مخلوط حاوی سزیم (Cs) و روبیدیم (Rb) یافت شدند که از نظر پایداری و کارایی در ساختار عادی مؤثر هستند (۳۵). پروسکایت مبتنی بر سزیم به عنوان مثال  $\text{Cs}_{0.1}\text{FA}_{0.74}\text{MA}_{0.13}\text{PbI}_{2.48}\text{Br}_{0.39}$  ولتاژ بالاتر از ۱/۵ ولت را به دست آورده است. جریان نسبتاً کم این پروسکایت‌ها مانع می‌شود که این ترکیبات به عنوان یک لایه امیدوارکننده باشند. اما این پروسکایت‌ها به دلیل پایداری حرارتی بالا توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده‌اند. لازم به ذکر است که عدم قطعیت در مورد سمیت مواد پروسکایت هالید بر پایه سرب و انحلال آسان آن‌ها در آب نیازمند جست‌وجو برای مواد جایگزین مشابه پروسکایت است. به لطف آینده‌نگری دانشمندان و تجربه آن‌ها در تهیه پروسکایت هالید بر پایه سرب، نتایج قابل‌توجهی در مدت‌زمان کوتاهی با استفاده از ترکیبات پروسکایت بدون سرب به دست آمده است. باین‌حال، بازده کمتر تبدیل خورشید به انرژی و مسائل پایداری طولانی‌مدت، اشکالات جدی هستند که مانع از پیشرفت این مواد می‌شوند. در رقابت برای جایگزینی سرب در پروسکایت‌ها، قلع (Sn) به دلیل سمیت کم در شرایط آزمایشی مختلف در مقایسه با سرب، اولین و امیدوارکننده‌ترین کاندیدا در سال‌های اخیر بوده است. اما همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود این نوع پروسکایت‌ها بازده کم‌تری در مقایسه با سرب دارند.

بدین ترتیب بازده بیشتری در برداشت نور خورشیدی دارد. عمدتاً، مقدار کمی از کاتیون MA با کاتیون FA برای تولید پروسکایت  $\text{FA}_x\text{MA}_{1-x}\text{PbI}_3$  دوپینگ شده است که باعث ایجاد فاز کاتیون FA فعال نسبت به  $\text{FAPbI}_3$  خالص می‌شود و منجر به کارایی بالای سلول می‌شود (۳۳). جدول ۲ پیکربندی مختلف پروسکایت به همراه عوامل عملکرد آن‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود برای پروسکایت‌های با شکاف انرژی گسترده معمولاً از  $\text{MAPbI}_3$  (پهنای باند ۱/۵۱-۱/۵۵ eV) استفاده می‌کنند که می‌تواند به اندازه کافی نور زیر ۸۰۰ نانومتر را جذب کند و حامل‌های شارژ را به سرعت به الکترودهای مربوطه منتقل کند و از ضریب جذب بالای آن‌ها بهره‌مند شود. اما شکاف باند الکترونیکی (۱/۴۳ eV)  $\text{FAPbI}_3$  واجد شرایطتر از  $\text{MAPbI}_3$  (۱/۶۴ eV) است. مطالعات نشان داد که ساختار کاتیون  $\text{FA}^+$  منجر به بهبود خواص الکتریکی می‌شود (۳۴). پروسکایت‌های دیگر، به‌عنوان مثال آنیون مخلوط پروسکایت  $(\text{MAPbBr}_3)_{1-x}(\text{FAPbI}_3)_x$  می‌توانند به ترتیب به ولتاژ ۱/۲۵ و ۱/۴ ولت برسند. به‌طوری‌که در مقایسه با پروسکایت  $\text{MAPbI}_3$ ، به دلیل ولتاژ بالا، عملکرد بالاتری در پروسکایت‌ها به دست می‌آید. همچنین گزارش شده است که ترکیب کاتیون‌های متیل آمونیوم (MA) و فرمانیدینیم (FA) باعث کاهش شکاف نواری جاذب‌های پروسکایت می‌شود و در نتیجه جریان نور تولید شده را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، دمای باز پخت بالای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برای  $\text{FAPbI}_3$  برای از بین بردن فاز زرد نامطلوب (فاز  $\delta$ ) بسیار مهم است که به طور نامطلوبی بر عملکرد سلول تأثیر می‌گذارد و کاربرد آن بر روی بستری‌های انعطاف‌پذیر را متوقف می‌کند.

جدول ۲: برخی از انواع پروسکایت-لایه انتقال حفره-الکترون و بازده تبدیل آن‌ها.

Table 2: Some types of perovskite, hole transfer layer, electron transfer layer and their conversion efficiency.

| Anode | Cathode | HTL          | ETL  | Mesoporous layer                     | Active layer   | PCE          | Year | Ref. |
|-------|---------|--------------|--|--------------------------------------|--|--------------|------|------|
| FTO   | Au      | Spiro-OMeTAD | TiO <sub>2</sub>                           |                                      | MAPbI <sub>3</sub>   | 9.7          | 2012 | (24) |
| FTO   | Au      | Spiro-OMeTAD | TiO <sub>2</sub>                           |                                      | MAPbI <sub>3</sub>   | 15           | 2013 | (25) |
| FTO   | Au      | Spiro-OMeTAD | TiO <sub>2</sub>                           | p-TiO <sub>2</sub>                   | MAPbI <sub>3</sub>   | 17.01        | 2014 | (36) |
| FTO   | Carbon  | Free         | SnO <sub>2</sub><br>TiO <sub>2</sub>       | -<br>TiO <sub>2</sub>                | MAPbI <sub>3</sub>   | 14.5<br>11.5 | 2015 | (37) |
| FTO   | Au      | Spiro-OMeTAD | TiO <sub>2</sub>                           |                                      | (FAPbI <sub>3</sub> ) <sub>x</sub> (MAPbBr <sub>3</sub> ) <sub>1-x</sub>   | 20.27        | 2016 | (38) |
| FTO   | Au      | Spiro-MeOTAD | -  | TiO <sub>2</sub><br>TiO <sub>2</sub> | MAPbI <sub>3</sub><br>FAPbI <sub>3</sub>   | 20<br>15.6   | 2017 | (39) |
| FTO   | Au      | Spiro-OMeTAD | TiO <sub>2</sub> /Cl                       |                                      | MASnI <sub>3-x</sub> Br <sub>x</sub>   | 7.5          |      |      |
| FTO   | Au      | Spiro-OMeTAD | TiO <sub>2</sub> /Cl                       |                                      | (Cs <sub>0.02</sub> FA <sub>0.98</sub> PbI <sub>3</sub> ) <sub>0.97</sub> (MAPbBr <sub>3</sub> ) <sub>0.03</sub>                 | 21.7         | 2018 | (40) |
| FTO   | Au      | Spiro-OMeTAD | TiO <sub>2</sub>                           |                                      | Cs <sub>0.1</sub> FA <sub>0.74</sub> MA <sub>0.13</sub> PbI <sub>2.48</sub> Br <sub>0.39</sub>                                   | 18.65        | 2018 | (41) |
| FTO   | Au      | NiO          | PCBM/BCP/Cr/Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                                      | (FA <sub>0.83</sub> MA <sub>0.17</sub> ) <sub>0.95</sub> Cs <sub>0.05</sub> Pb(I <sub>0.9</sub> Br <sub>0.1</sub> ) <sub>3</sub> | 19.8         | 2019 | (42) |

(ادامه جدول ۲)

| Anode | Cathode | HTL               | ETL                | Mesoporous layer | Active layer   | PCE   | Year | Ref. |
|-------|---------|-------------------|--------------------|------------------|--|-------|------|------|
| FTO   | Au      | spiro-OMeTAD      | PEDOT: PSS         |                  | Cs <sub>0.05</sub> (MA <sub>0.17</sub> FA <sub>0.83</sub> ) <sub>0.95</sub> Pb(I <sub>0.83</sub> Br <sub>0.17</sub> ) <sub>3</sub> | 19.3  | 2020 | (43) |
| FTO   | Ag      | PCBM/ BCP         | PTAA               |                  | MAPbI <sub>3</sub>   | 20.14 | 2020 | (44) |
| FTO   | Ag      | spiro-MeOTAD      | SnO <sub>2</sub>   |                  | FAPbI <sub>3</sub> 0.96(MAPbBr <sub>3</sub> ) <sub>0.04</sub>  | 23.22 | 2021 | (28) |
| FTO   | Au      | Spiro- OMeTAD     | PEDOT:PSS          |                  | Cs <sub>0.05</sub> (FA <sub>0.85</sub> MA <sub>0.15</sub> ) <sub>0.95</sub> Pb(I <sub>0.85</sub> Br <sub>0.15</sub> ) <sub>3</sub> | 20.56 | 2021 | (45) |
| FTO   | Ag      | C60/BCP           | PEDOT: PSS         |                  | FASnI <sub>3</sub>   | 10.20 | 2022 | (46) |
| FTO   | Ag      | CF3PEAI/PCBM/ BCP | PEDOT:PSS          |                  | FA <sub>0.75</sub> MA <sub>0.25</sub> SnI <sub>2.75</sub> Br <sub>0.25</sub>   | 10.35 | 2022 | (47) |
| FTO   | Ag      | Spiro-OMeTAD      | m-SnO <sub>2</sub> |                  | MAPbI <sub>3</sub>   | 13    | 2023 | (48) |

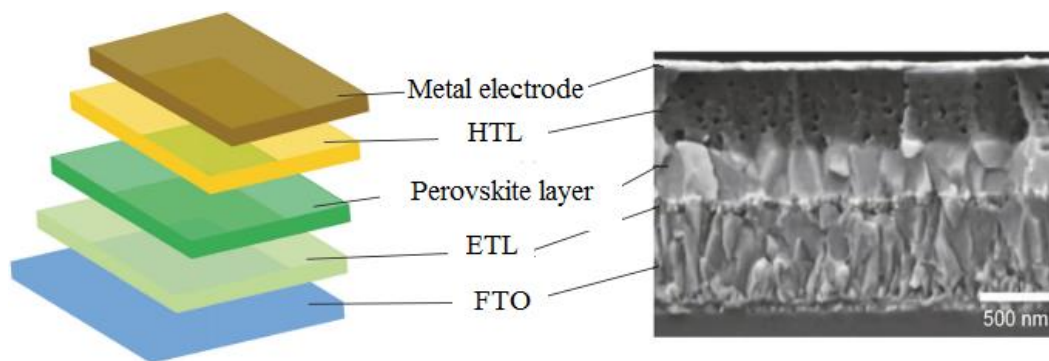
نشان داده شده است یک سلول خورشیدی مزوپور متشکل از یک الکتروود TCO، یک لایه انتقال الکترون متراکم، یک لایه اکسید مزوپور، یک لایه پروسکایت، یک لایه انتقال دهنده حفره و یک لایه الکتروود است. تیتانیوم دی‌اکسید (TiO<sub>2</sub>) معمول‌ترین ماده مزوپور است که به نانوبلورهای پروسکایت اجازه می‌دهد که محلول به داخل منافذ TiO<sub>2</sub> مزوپور نفوذ کرده و یک لایه جاذب بهم پیوسته تشکیل دهد. فوتوآنند مزوپور متشکل از شبکه نانوذرات TiO<sub>2</sub> است. TiO<sub>2</sub> از مزایای سطح ویژه بالا، تخلخل قابل تنظیم و پایداری شیمیایی برخوردار است بدین منظور از آن به عنوان یک ماده پر کاربرد در لایه انتقال الکترون استفاده می‌شود (۵۲). در سلول خورشیدی پروسکایت علاوه بر TiO<sub>2</sub>، اکسیدهای فلزی مزوپور دیگری مانند ZnO، Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و ZrO<sub>2</sub> به‌عنوان لایه مزوپور مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساختار مسطح معمولی سلول‌های خورشیدی پروسکایت در شکل ۴ نشان داده شده است. تفاوت اصلی با ساختار مزوپور این است که ساختار مسطح چارچوب اکسید فلز متخلخل را از بین می‌برد. در این حالت دو رابط بین مواد پروسکایت و دولایه (لایه انتقال الکترون و لایه انتقال حفره) تشکیل می‌شود. بنابراین جفت الکترون-حفره توسط لایه انتقال الکترون و لایه انتقال حفره از هم جدا می‌شوند. پروسکایت‌های مسطح بیشتر به دو ساختار تقسیم می‌شوند. n-p-i مسطح و p-i-n مسطح (شکل b و c). ساختار p-i-n شامل رسوب مواد پروسکایت بر روی لایه‌های شفاف است که با یک انتقال دهنده حفره پوشانده شده‌اند (ساختار معکوس). پروسکایت‌ها بر اساس ساختار مزوپور و مسطح از عملکرد و پایداری بالایی برخوردار هستند (۵۳). در سلول خورشیدی پروسکایت جذب نور، تولید اکسیتون، جداسازی و نهایتاً تولید حامل‌های شارژ توسط لایه فعال پروسکایت انجام می‌شود. زمانی که گپ انرژی بین بالاترین اوربیتال مولکولی پر شده (HOMO)<sup>۶</sup> و پایین‌ترین اوربیتال مولکولی پر نشده (LUMO)<sup>۷</sup> به اندازه مناسبی کوچک باشد جذب نور مرئی باعث تهییج الکترون و در نتیجه ایجاد زوج اکسایتون (یا جفت الکترون-حفره) می‌شود.

#### ۴- ساختار سلول خورشیدی پروسکایت

معمولاً یک سلول خورشیدی پروسکایت شامل یک لایه جذب نور پروسکایتی<sup>۱</sup> است که بین یک لایه انتقال حفره<sup>۲</sup> (HTL) و یک لایه انتقال الکترون<sup>۳</sup> (ETL) قرار دارد. هنگامی که جاذب پروسکایت در معرض نور قرار می‌گیرد یک الکترون و حفره را در مواد حمل‌کننده نوع n و نوع p وارد می‌کند تا حامل‌های بار تولید کند. الکترون‌های تولید شده با عبور از لایه بینابینی و مدار خارجی، به کاتد می‌رسند. همچنین قسمت متراکم شده مواد انتقال دهنده حفره، پروسکایت اکسید شده را بازبایی می‌کند و به رسیدن به حالت اولیه کمک می‌کند. بر این اساس حفره‌های خارج شده از لایه انتقال دهنده حفره در جهت الکترودهای مخالف پخش می‌شوند و در نهایت با الکترون ترکیب شده و جریان را تأمین می‌کنند (۴۹). لایه‌های بالا و پایین سلول، الکترودهای رسانای اکسید شفاف (TCO-ITO-FTO) و فلزاتی چون (Ag, Cu, Al) هستند (۵۰). در سال‌های اخیر ساختارهای مختلفی از سلول‌های خورشیدی پروسکایت از جمله ساختار مزوپور و ساختار مسطح ساخته شده است. شکل ۲ ساختار سلول خورشیدی پروسکایت معمولی را با لایه‌های مختلف آن نشان می‌دهد.

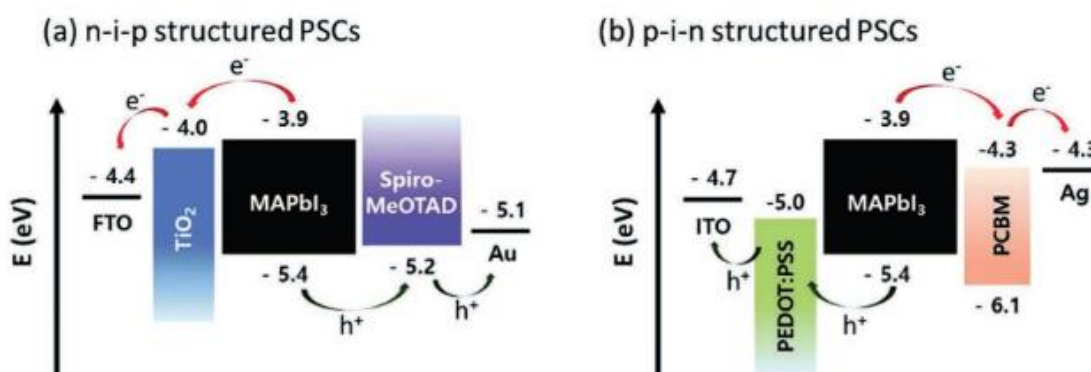
شکل ۳ ساختار مزوپور<sup>۴</sup> و مسطح<sup>۵</sup> سلول خورشیدی پروسکایت را نشان می‌دهد. به‌طور معمول ساختار مزوپور دارای پیکربندی n-i-p است. ETL/مزوپور/پروسکایت/HTL/الکتروود (شکل ۳-a). مواد مزوپور به دلیل تخلخل زیاد و سطح ویژه زیاد (تا ۱۰۰۰ مترمربع در گرم) به‌طور گسترده مورد مطالعه و استفاده قرار گرفته‌اند. استفاده از مواد مزوپور در سلول‌های خورشیدی پروسکایت به جاذب پروسکایت اجازه می‌دهد تا به منظور افزایش ناحیه نورگیر مواد حساس به نور و بهبود کارایی سلول به چارچوب اکسید فلز مزوپور بچسبند (۵۱). همانطور که در شکل ۴ (a)

<sup>1</sup> Active Layer<sup>2</sup> Hole transfer layer<sup>3</sup> Electron transfer layer<sup>4</sup> Mesoporous<sup>5</sup> planar<sup>6</sup> Highest Occupied Molecular Orbitals<sup>7</sup> Lowest Unoccupied Molecular Orbitals



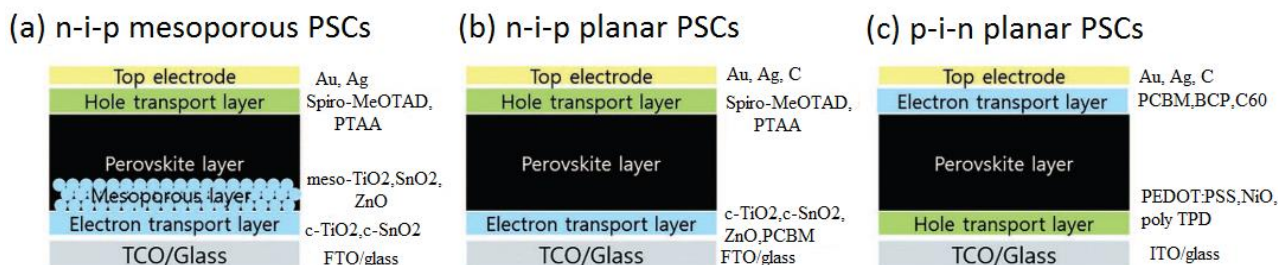
شکل ۲: ساختار سلول خورشیدی پروسکایت معمولی (۱۸).

Figure 2: Normal perovskite solar cell structure (18).



شکل ۳: ساختار p-i-n سلول خورشیدی پروسکایتی (a) ساختار n-i-p پروسکایت (b) پروسکایت (۵۱).

Figure 3: (a) p-i-n structured perovskite solar cell, (b) n-i-p structured perovskite (51).



شکل ۴: (a) ساختار مزوپور سلول خورشیدی پروسکایتی، (b) ساختار مسطح n-i-p و (c) ساختار مسطح p-i-n (۵۳).

Figure 4: (a) perovskite solar cell mesoporous structure, (b) n-i-p planar structure, and (c) p-i-n planar structure (53).

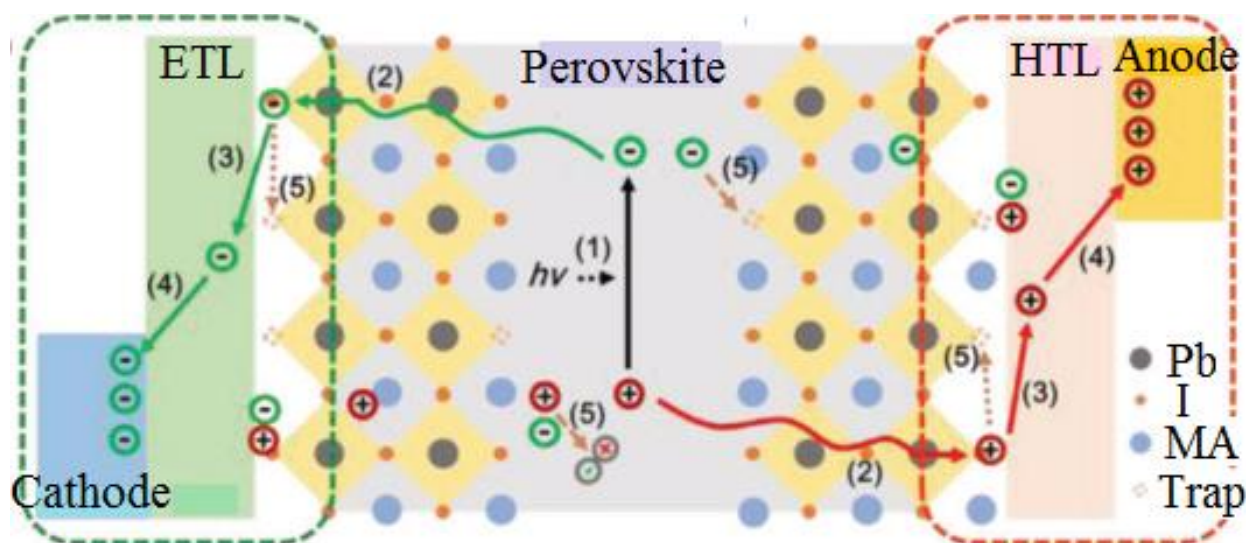
حفره به سمت الکترودهای مثبت و منفی، ۴- خروج الکترون و حفره و ۵- ترکیب الکترون و حفره نشان داده شده است.

#### ۴-۱- لایه انتقال‌دهنده الکترون (ETL)

سلول‌های خورشیدی پروسکایت با بازده بالا معمولاً به تماس خوب بین مواد انتقال‌دهنده الکترون (ETL) و مواد پروسکایت نیاز دارند تا موانع احتمالی انتقال الکترون را کاهش دهند و انتقال حفره را مسدود نکنند.

مکانیزم تولید حامل‌های شارژ در این دسته از سلول‌های خورشیدی بدین صورت است که پس از تابش نور و جذب فوتون‌ها توسط لایه فعال پروسکایت، الکترون با کسب انرژی لازم از اوربیتال هومو مولکول به اوربیتال لومو آن نقل مکان کرده و در این مرحله در اوربیتال هومو یک حفره با بار مثبت ایجاد می‌شود (۵۴). شکل ۵ ساختار و انتقال شارژ بین لایه‌های مختلف سلول خورشیدی پروسکایتی را نشان می‌دهد که در آن به ترتیب مراحل ۱- جدایی جفت الکترون- حفره، ۲- انتشار الکترون و حفره، ۳- انتقال الکترون و





شکل ۵: نحوه انتقال الکترون و حفره در ساختار یک سلول خورشیدی پروسکایت (۵۵).

Figure 5: Electrons transfer and holes transfer in a perovskite solar cell (55).

انتقال‌دهنده حفره بدون دوپانت مانند پلی ۳، ۴- اتیلن دی اوکسی تیوفن: پلی استایرن سولفونات (PEDOT: PSS) و پلی (۳-هگزیل تیوفن-۲، ۵- دی یل (P<sub>3</sub>HT) نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد (۶۱).

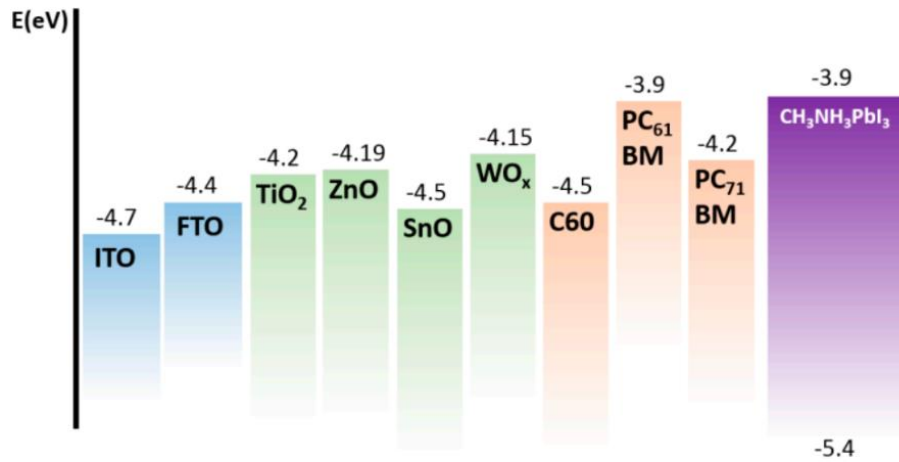
اگرچه انتقال‌دهنده حفره آلی معیایی نظیر بی‌ثباتی و سنتز چندمرحله‌ای دارد، تقریباً در همه پروسکایت‌های پیشرفته مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقایسه، انتقال‌دهنده حفره معدنی از ثبات خوب، تحرک زیاد و هزینه کم برخوردار است. تاکنون، انتقال‌دهنده حفره معدنی Cu<sub>2</sub>O، CuO، CuI، CuSCN، NiOx، MoS<sub>2</sub> و مورد مطالعه قرار گرفته و عملکرد بسیار خوبی نشان داده است. علاوه بر این، WOx، MoOx، CuCrO<sub>2</sub>، CuS نیز گزارش شده است. سطوح انرژی انتقال‌دهنده‌های حفره نسبت به پروسکایت در شکل ۷ نشان داده شده است (۶۲).

در چند سال گذشته، بازده تبدیل توان سلول‌های خورشیدی پروسکایت نوع مزوپور با بهینه‌سازی رشد لایه نازک و مواد جاذب افزایش یافته است. امروزه، تقریباً همه پروسکایت‌های با بازده بالا بر اساس نوع بینابینی ساخته می‌شوند که اغلب نیاز به درجه حرارت بالا دارند تا لایه مزوپور را برای بهترین بازده متخلخل کنند و این امر کاربرد آن را در سلول‌های انعطاف‌پذیر و پشت سر هم محدود می‌کند. به منظور غلبه بر این مسأله، پروسکایت نوع مسطح شامل فیلم‌های نازک مسطح انباشته با استفاده از فرآیندهای سنتز با دمای پایین و هزینه کم توسعه یافته است. با این حال، در مقایسه با پروسکایت نوع مزوپور، نوع مسطح آن از بازده کم‌تری برخوردار است (۶۴). جدول ۳ برخی از انواع انتقال‌دهنده حفره و الکترون را در ساختارهای مسطح و مزوپور سلول خورشیدی پروسکایت نشان می‌دهد.

به طوری که ترکیب دوباره الکترون و حفره و تشکیل اکسایتون به حداقل برسد. مواد انتقال‌دهنده الکترون، برای استخراج الکترون‌ها از لایه پروسکایت و جلوگیری از ترکیب مجدد بین الکترون‌ها در آند و حفره‌های لایه پروسکایت نقش اساسی دارند (۵۶). یک انتقال‌دهنده الکترون مناسب برای پروسکایت‌ها باید برخی از الزامات مانند تراز انرژی مناسب بین مواد پروسکایت و الکترون، تحرک زیاد الکترون، انحلال آسان در یک حلال آلی و پایداری خوب در هوا را داشته باشد. انتقال‌دهنده‌های الکترون رایج در پروسکایت‌های n-i-p شامل ZnO، SnO<sub>2</sub>، TiO<sub>2</sub> و اکسیدهای دوپ شده است (۵۷). انتقال‌دهنده الکترون در پروسکایت‌های p-i-n معمولاً از فولرن یا یکی از مشتقات آن تشکیل شده است. شکل ۶ برخی از رایج‌ترین انواع انتقال‌دهنده الکترون را به همراه تراز انرژی آن‌ها نشان می‌دهد.

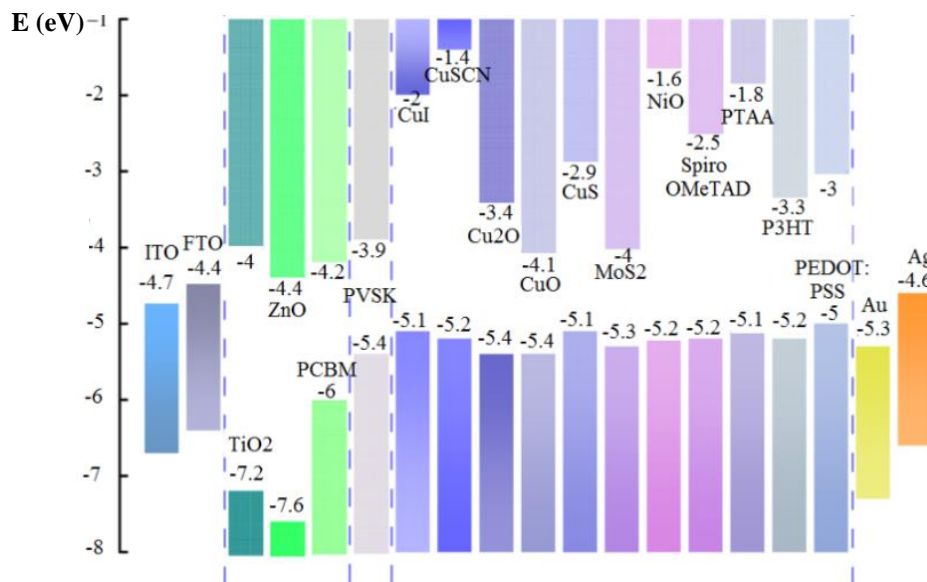
#### ۴-۲- لایه انتقال‌دهنده حفره (HTL)

لایه انتقال‌دهنده حفره عموماً با استفاده از کمترین امکان ترکیب مجدد الکترون و حفره، الکترون را بین پروسکایت و کاتد مسدود می‌کند تا کارایی سلول خورشیدی افزایش یابد. انتقال‌دهنده حفره نقش اساسی در افزایش کارایی پروسکایت‌ها دارد. به طور خاص، انتقال‌دهنده حفره در ساختارهای معمولی نقش مهمی در انتقال حفره‌ها، مسدود کردن الکترون‌ها و محافظت از پروسکایت در برابر عوامل خارجی، از جمله رطوبت، گرما و اکسیژن دارد (۵۹). انتقال‌دهنده حفره معمولاً در تمام پروسکایت‌های حالت جامد به کار گرفته می‌شود و در بیشتر موارد از Spiro-OMeTAD آلی استفاده می‌شود (۶۰). تاکنون، Spiro OMeTAD همچنان محبوب‌ترین انتقال‌دهنده حفره برای پروسکایت‌های با عملکرد بالا است.



شکل ۶: سطوح انرژی برخی از مواد انتقال الکترون (ETL) (۵۸).

Figure 6: Energy levels of electron transport materials (ETL) (58).



شکل ۷: سطوح انرژی برخی از مواد انتقال حفره (HTL) (۶۳).

Figure 7: Energy levels of hole transport materials (HTL) (63).

جدول ۳: مروری بر سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، نوع ساختار، لایه‌های انتقال دهنده الکترون و حفره.

Table 3: An overview of perovskite solar cells, structure, electron and hole transfer layers.

| Cell structure                             | Type of structure | ETL         | HTL                | $V_{oc}/V$ | $J_{SC}/mAc_m^{-2}$ | FF    | PCE % | Year | Ref. |
|--|-------------------|-------------|--------------------|------------|---------------------|-------|-------|------|------|
| ITO/CuOx/PVSK/PCBM/C60/BCP/Ag              | Planar p-i-n      | PCBM        | CuOx               | 1.11       | 22.5                | 0.75  | 19    | 2016 | (74) |
| ITO/PEDOT:PSS/PVSK/PCBM/BCP/Ag             | Planar p-i-n      | PCBM        | PEDOT:PSS          | 1.02       | 21.93               | 0.76  | 17.22 | 2017 | (75) |
| ITO/PTAA/SANs/PVSK/PC61BM/Bphen/Al         | Planar p-i-n      | PC61BM      | SANs               | 1.11       | 23.46               | 0.767 | 20.05 | 2018 | (76) |
| FTO/Cu@CuI/PVSK/PCBM/ZnO/Ag                | Planar p-i-n      | PCBM        | CuI                | 1.06       | 23.31               | 0.76  | 18.8  | 2019 | (77) |
| ITO/PTAA/PVSK/C60/BCP/Cu                   | Planar p-i-n      | C60/BCP     | PTAA               | 1.17       | 24.1                | 0.81  | 23    | 2020 | (78) |
| ITO/PEDOT:PSS/PTAA/TFB/PVSK/PC60BM/SnO2/Ag | Planar p-i-n      | PC60BM/SnO2 | PEDOT:PSS/PTAA/TFB | 1.09       | 20.3                | 0.71  | 15.7  | 2021 | (67) |

(ادامه جدول ۳)

| Cell structure  | Type of structure | ETL                                      | HTL               | $V_{oc}/V$ | JSC/<br>mAcm <sup>-2</sup> | FF    | PCE   | Year | Ref. |
|---|-------------------|--|-------------------|------------|----------------------------|-------|-------|------|------|
| ITO/2PACz/PVSK/C <sub>60</sub> /BCP/AG                                  | Planar p-i-n      | C60/BCP                                  | 2PACz             | 1.11       | 19.3                       | 0.72  | 15.8  | 2022 | (79) |
| FTO/cp-TiO <sub>2</sub> /mp-TiO <sub>2</sub> /PVSK/P3HT/Au              | Mesoporous n-i-p  | cp-TiO <sub>2</sub> /mp-TiO <sub>2</sub> | P <sub>3</sub> HT | 0.97       | 23.9                       | 0.62  | 14.4  | 2016 | (80) |
| FTO/cp-TiO <sub>2</sub> /mp-TiO <sub>2</sub> /PVSK/PTAA/Au              | Mesoporous n-i-p  | cp-TiO <sub>2</sub> /mp-TiO <sub>2</sub> | PTAA              | 1.11       | 25                         | 0.817 | 22.6  | 2017 | (81) |
| FTO/cp-TiO <sub>2</sub> /mp-TiO <sub>2</sub> /PVSK/spiro-OMeTAD/Au      | Mesoporous n-i-p  | cp-TiO <sub>2</sub> /mp-TiO <sub>2</sub> | SpiroOMeTAD       | 1.162      | 23.78                      | 0.788 | 22    | 2018 | (82) |
| FTO/cp-TiO <sub>2</sub> /mp-TiO <sub>2</sub> /PVSK/Cu <sub>2</sub> O/Au | Mesoporous n-i-p  | cp-TiO <sub>2</sub> /mp-TiO <sub>2</sub> | Cu <sub>2</sub> O | 1.15       | 22.20                      | 0.74  | 18.9  | 2019 | (83) |
| FTO/cp-TiO <sub>2</sub> /mp-TiO <sub>2</sub> /PVSK/SpiroOMeTAD/Au       | Mesoporous n-i-p  | cp-TiO <sub>2</sub> /mp-TiO <sub>2</sub> | /SpiroOMeTAD      | 1.11       | 23.81                      | 0.66  | 17.59 | 2021 | (84) |
| FTO/cp-TiO <sub>2</sub> /mp-TiO <sub>2</sub> /PVSK/spiroOMeTAD/Au       | Mesoporous n-i-p  | cp-TiO <sub>2</sub> /mp-TiO <sub>2</sub> | SpiroOMeTAD       | 1.11       | 23.5                       | 0.77  | 20    | 2022 | (65) |
| FTO/md-SnO <sub>2</sub> /PVSK/spiroOMeTAD/Ag                            | Mesoporous n-i-p  | md-SnO <sub>2</sub>                      | Spiro-OMeTAD      | 1.04       | 20.63                      | 0.61  | 13    | 2023 | (48) |
| FTO/TiO <sub>2</sub> /PVSK/spiroOMeTAD/Au                               | Planar n-i-p      | TiO <sub>2</sub>                         | SpiroOMeTAD       | 1.01       | 23.5                       | 0.79  | 20.27 | 2017 | (38) |
| FTO/TiO <sub>2</sub> /PVSK/SCZF-5/MoO <sub>3</sub> /Ag                  | Planar n-i-p      | TiO <sub>2</sub>                         | SCZF-5            | 1.11       | 24.4                       | 0.74  | 22.1  | 2018 | (85) |
| ITO/SnO <sub>2</sub> /PVSK/PEAI/spiro-OMeTAD/Au                         | Planar n-i-p      | SnO <sub>2</sub>                         | SpiroOMeTAD       | 1.16       | 24.9                       | 0.81  | 23.56 | 2019 | (86) |
| FTO/TiO <sub>2</sub> /PVSK/spiroOMeTAD/Au                               | Planar n-i-p      | TiO <sub>2</sub>                         | SpiroOMeTAD       | 1.32       | 15.32                      | 0.83  | 16.79 | 2020 | (87) |
| FTO/PEDOT:PSS/PVSK/spiroOMeTAD/Au                                       | Planar n-i-p      | PEDOT:PSS                                | SpiroOMeTAD       | 1.1        | 23.98                      | 0.79  | 20.56 | 2021 | (45) |
| FTO/TiO <sub>2</sub> /PVSK/spiroOMeTAD/Au                               | Planar n-i-p      | TiO <sub>2</sub>                         | SpiroOMeTAD       | 1.1        | 21.8                       | 0.73  | 17.5  | 2022 | (65) |

نتیجه جمع‌آوری حامل بار کارآمد آسان می‌شود و بازده افزایش می‌یابد. نشان داده شده است که خواص ساختاری لایه mp-TiO<sub>2</sub> مانند اندازه ذرات، ضخامت و تخلخل، نه تنها بر عملکرد پروسکایت‌ها بلکه بر روی خواص فوتوالکتریک لایه نیز تأثیر قابل توجهی دارد (۶۵). در مورد کاربرد پشت سر هم سلول‌های خورشیدی پروسکایت، بالاترین راندمان با سلول‌های پروسکایت در ساختار نوع p-i-n به دست آمده است. برای توسعه سلول‌های پشت سر هم با کارایی بالا، به نظر می‌رسد بهینه‌سازی اتصالات نیمه‌شفاف پروسکایت با ساختار نوع p-i-n ضروری است. این نوع سلول به تدریج بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته و بازدهی بر این اساس تا ۱۷ درصد افزایش یافته است. ضعف اصلی این ساختارها پایین بودن مقدار  $V_{oc}$  به دلیل استفاده از لایه‌های رابط نامناسب نوع P و N است. این مسئله از عملکرد بهینه لایه پروسکایت جلوگیری می‌کند و به نوترکیب تابشی کمک می‌کند (۶۷).

۳-۴- تأثیر مواد آلی بر لایه‌های سلول خورشیدی پروسکایت  
مواد آلی به‌طور گسترده در سلول خورشیدی پروسکایت به کار می‌روند. اصلاح دستگاه‌های پروسکایت عمدتاً در جهت‌های زیر انجام می‌شود: الف. بهبود کیفیت جاذب پروسکایت، ب. افزایش حامل بار و

تحقیقات نشان داده است که سلول‌های خورشیدی پروسکایت مزوپور دارای بازده بالاتری نسبت به سلول‌های مسطح هستند که عمدتاً به دلیل ناحیه سطحی پروسکایت mp-TiO<sub>2</sub> بزرگ‌تر و طول عمر بیشتر حامل‌های بار تولید شده است (۶۵). سلول‌های خورشیدی پروسکایت مسطح به دلیل داشتن پیکربندی ساده و مقیاس‌پذیر مفید هستند. دی‌اکسید تیتانیم (TiO<sub>2</sub>) بیشتر به عنوان یک لایه انتقال الکترون در پروسکایت‌ها استفاده شده است، زیرا پهنای باند آن ( $E_g = 3.2 \text{ eV}$ ) مناسب برای به حداقل رساندن جذب انرژی است (۵۲). این نیمه‌رسانا تراز باند مناسب با پروسکایت برای تزریق الکترون کارآمد، و قابلیت انتقال الکترون بالا دارد. کیفیت لایه انتقال‌دهنده الکترون نقش مهمی در بهبود عملکرد پروسکایت‌ها دارد. یک ETL الکترون‌های القا شده با نور را از پروسکایت دور می‌کند و در همان زمان، به عنوان یک لایه مسدودکننده عمل می‌کند که از تماس مستقیم بین حفره‌ها و اکسید قلع دوپ شده با فلئوئر (FTO) جلوگیری می‌کند. بنابراین، لایه‌های TiO<sub>2</sub> باید یکنواخت، بدون حفره بوده و سطح آن کاملاً پوشیده باشد (۶۶). در مورد پروسکایت‌های مسطح، ضخامت یک ETL در محدوده ۲۰-۳۰ نانومتر است. با رسوب یک لایه مزوپور (mp-TiO<sub>2</sub>) بر روی دی‌اکسید تیتانیم بلوری، طول انتقال حامل کاهش یافته و سطح تماس افزایش می‌یابد، در

پلی آنیلین (PANI)، پلی کاپرولاکتون<sup>۱۵</sup> (PCL) و پلی یورتان<sup>۱۶</sup> (PU) به عنوان یک راه‌حل مؤثر برای بهبود عملکرد و پایداری پروسکایت‌ها گزارش شده است (۷۱). ژائو<sup>۱۷</sup> و همکارانش با استفاده از پلی اتیلن گلیکول (PEG)، سلول خورشیدی پروسکایت با مقاومت قابل توجه در برابر رطوبت محیط ساختند. رطوبت‌سنجی بالای PEG، که می‌تواند چندین مولکول آب را درگیر کند، ریشه این اثر می‌باشد. آن‌ها سازوکار برهم‌کنش بین PEG و دید سرب متیل آمونیوم (MAPbI<sub>3</sub>) را مورد بررسی قرار دادند. تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین بخش‌های آمونیوم و چندین اتم اکسیژن PEG نشان داد که این مواد می‌توانند به عنوان یک پایدارکننده در سلول‌های خورشیدی پروسکایت استفاده شوند (۷۲). همچنین به منظور افزایش خواص مواد انتقال‌دهنده الکترون بهتر و دستیابی به پروسکایت‌های با کارایی بالا و پایدار، دوپینگ برخی از پلیمرها در این لایه‌ها گزارش شده است. به عنوان مثال سیوانیا<sup>۱۸</sup> و همکارانش با استفاده از پلی متیل متاکریلات (PMMA)<sup>۱۹</sup> یک فیلم با کیفیت بالا ارائه دادند که به افزایش خواص سطحی بین لایه انتقال‌دهنده الکترون و پروسکایت کمک کرده بنابراین منجر به تبلور بهتر لایه فعال و بهبود کیفیت شده است (۷۱). استفاده از پلیمرهای دیگری همچون پلی (۹،۹-دیوکتیل فلورن)، پلی (۹،۹-دیوکتیل فلورن-کوبنوتیادیازول) به پلیمر PC<sub>61</sub>BM به منظور افزایش کارایی انتقال الکترون از لایه پروسکایت گزارش شده است (۶۹). همانطور که برای افزودنی‌های لایه پروسکایت و انتقال‌دهنده الکترون دیده شد افزودن مواد پلیمری آلی به لایه انتقال‌دهنده حفره هم می‌تواند باعث بهبود در راندمان سلول خورشیدی پلیمری شود. سانگ<sup>۲۰</sup> و همکارانش با افزودن دو پلیمر معروف، PMMA و پلی استایرن (PS)<sup>۲۱</sup> به لایه انتقال‌دهنده حفره بازده ۲۰/۳ درصد را به دست آوردند. بهبود راندمان به دلیل غیرفعال شدن نوترکیب سطحی است. علاوه بر این، انتقال الکترون به طور مؤثر مسدود می‌شود و استخراج حامل‌ها به سمت الکترودهای مناسب صورت می‌گیرد که منجر به بهبود Voc می‌شود. آن‌ها از پلیمر PCDTBT، به عنوان ناخالصی انتقال‌دهنده حفره استفاده کردند و راندمان از ۱۴/۳ به ۱۸ درصد افزایش یافت (۷۳). مواد پلیمری دیگری همچون PTAA و PVBI-TFS<sup>۲۱</sup> به عنوان افزودنی در لایه انتقال‌دهنده حفره برای بهبود راندمان و طول عمر سلول خورشیدی پروسکایت گزارش شده است (۶۹).

ج. افزایش پایداری محیطی دستگاه‌ها. کاربردهای مواد آلی در سلول‌های خورشیدی به عنوان مواد انتقال‌دهنده بار، حفره یا الکترون، یا به عنوان مواد افزودنی بسیار متنوع شده است که در لایه‌های ترکیبی یا به عنوان یک لایه بافر استفاده می‌شوند. لایه‌های انتقال‌دهنده حفره پلیمری مانند PEDOT:PSS<sup>۱</sup>، P3HT<sup>۲</sup>، PTAA<sup>۳</sup> و پلی (TPD)<sup>۴</sup> به طور گسترده در سلول خورشیدی پروسکایت استفاده شده‌اند. مزایای این مواد از جمله ساخت محلول در دماهای پایین، انعطاف‌پذیری مکانیکی، تحرک حفره بالا توسط ساختارهای مزدوج و قابلیت تشکیل لایه‌های نازک تر است. با این وجود، این مواد نسبتاً گران هستند که قیمت کل ساخت سلول‌ها را افزایش می‌دهند. در نتیجه از پلیمرهای دیگری برای تولید سلول‌های خورشیدی پروسکایت ارزان قیمت و مؤثر استفاده می‌شود. پلی آنیلین (PANI) یک پلیمر رسانای نوع p است که به دلیل سنتز آسان، انتقال خوب، پایداری محیطی و رسانایی مناسب معمولاً در دستگاه‌های الکترونیکی مانند سلول‌های خورشیدی حساس به مواد رنگزا، دیوده‌های ساطع‌کننده نور آلی، حسگرها و دستگاه‌های الکتروکرومیک به کار گرفته شده است (۶۸، ۶۹). در لایه فعال پروسکایت به عنوان افزودنی‌های پلیمری مشتقات فولرن از قبیل PC70BM<sup>۵</sup> و PC60BM<sup>۶</sup> استفاده می‌شود. در گزارشی دو مشتق فولرن C60، شامل ۲- (۳ اتوکسی کربونیل پروپیلوکسی) - (۵، ۸) دی هیدرونافتیل - (۶، ۷) - (۶، ۶) - C60 و ۲-بنزیلوکسی - (۵، ۸) دی هیدرونافتیل - (۶، ۷) - (۶، ۶) - C60 سنتز شده و به عنوان انتقال‌دهنده حفره در ساختار سطح نوع p-n استفاده شده است که با افزایش بازده تا ۷ درصد همراه بوده است (۳۴). افزودنی‌های پلیمری دیگری همچون PTB7<sup>۷</sup>، m-MTDATA<sup>۸</sup> و PDPT<sup>۹</sup> در لایه فعال گزارش شده است (۷۰). استفاده از پلیمرهای آلی مختلف به عنوان مواد افزودنی برای عملکرد و پایداری سلول مفید است. تشکیل سریع بلورهای پروسکایت با تشکیل نقص در ساختار مرتبط است. این نقص ریشه بیشتر مسیره‌های تخریب پروسکایت‌ها است. بنابراین، یافتن راهی برای کاهش این نقص مهم است. استفاده از مواد پلیمری همچون پلی اتیلن گلیکول (PEG)<sup>۱۰</sup>، پلی اتیلن ایمین<sup>۱۱</sup> (PEI)، PCDTBT<sup>۱۱</sup>، پلی (وینیل پیرولیدون)<sup>۱۲</sup> (PVP)، پلی (پروپیلن کربنات)<sup>۱۳</sup> (PPC)،

<sup>1</sup> poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate

<sup>2</sup> Poly(3-hexylthiophene)

<sup>3</sup> poly(triaryl amine)

<sup>4</sup> Poly(N,N'-bis-4-butylphenyl-N,N'-bisphenyl)benzidine

<sup>5</sup>-(۶، ۶) phenyl-C60-butyric acid methyl ester

<sup>6</sup> (6,6)-phenyl-C70-butyric acid methyl ester

<sup>7</sup> Thieno(3,4 b)thiophene-alt-benzodithiophene

<sup>8</sup>-(۶، ۶) Tris(phenyl(m-tolyl)amino)triphenylamine

<sup>9</sup> 3-(2-pyridyl)-5,6-diphenyl-1,2,4-triazine

<sup>10</sup> Polyethylene glycol

<sup>11</sup> Polyethylenimine

<sup>12</sup> Poly(N-9'-heptadecanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazole))

<sup>13</sup> Polyvinylpyrrolidone

<sup>14</sup> Polypropylene carbonate

<sup>15</sup> Polycaprolactone

<sup>16</sup> Polyurethane

<sup>17</sup> Zhao

<sup>18</sup> Sivanian

<sup>19</sup> Poly(methyl methacrylate)

<sup>20</sup> Song

<sup>21</sup> Polystyrene

ادامه تشریح شده‌اند.

### ۵-۱-۱- پوشش‌دهی چرخشی<sup>۲</sup>

پوشش‌دهی چرخشی ساده‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین روش پردازش شده با محلول است که برای رسوب یکنواخت لایه‌های پروسکایت استفاده می‌شود. این روش عمدتاً برای تولید سلول‌های خورشیدی در سطح کوچک استفاده می‌شود. به‌طور معمول، در پوشش چرخشی، ابتدا مقدار مناسب محلول پیش‌ساز روی لایه‌های زیرین ریخته می‌شود. پس از آن، بستر با سرعت بالا چرخانده می‌شود تا محلول اضافی و حلال از بین برود. پس از چرخش و لایه‌نشانی این فیلم پخته می‌شود تا لایه‌های کاملاً متبلور پروسکایت تولید شود زیرا پخت منجر به چسبندگی و اتصال قوی بین کاتیون‌های فلزی و آنیون‌های هالوژن می‌شود (۹۴). لایه‌نشانی به روش چرخشی به دو صورت تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای صورت می‌گیرد (شکل ۸). با تنظیم سرعت چرخش، شتاب و زمان پوشش چرخشی، می‌توان ضخامت و کیفیت فیلم را بهینه کرد. بالاترین راندمان ثبت شده در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از این روش حدود ۲۲/۱ درصد گزارش شده است (۹۵).

<sup>۱</sup> Bis(trifluoromethylsulfonyl) imide

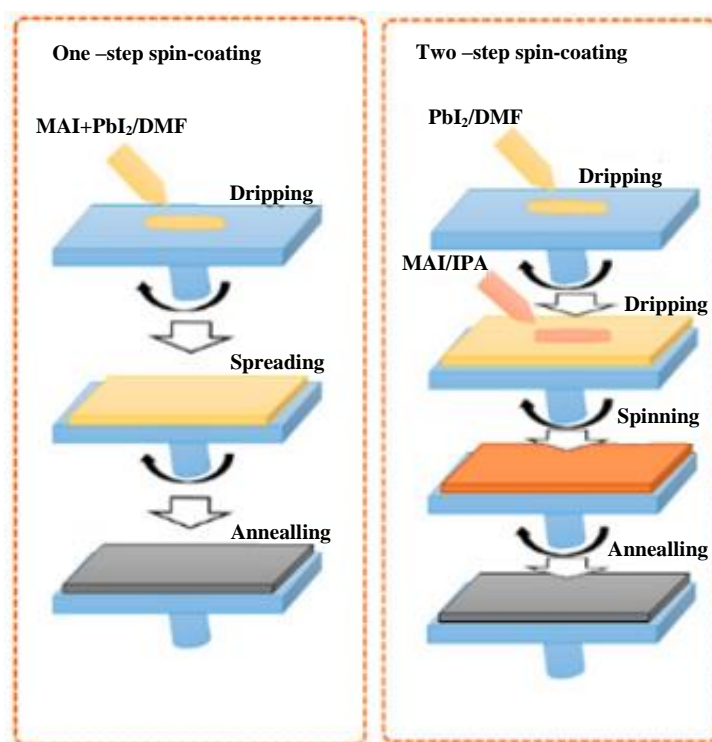
<sup>۲</sup> Spin Coating

### ۵- معرفی روش‌های لایه‌نشانی پروسکایت

روش‌های لایه‌نشانی پروسکایت به صورت محلول، بخار و زیرمجموعه آن‌ها می‌باشد. لایه‌نشانی با استفاده از روش رسوب یک مرحله‌ای یا دومرحله‌ای انجام می‌شود. طول عمر الکترون به طور مستقیم به نوع فیلم رسوب یافته بستگی دارد (۲۰). به‌طور مثال رسوب یک مرحله‌ای پروسکایت رسوب فیلم نازک با استفاده از مخلوطی از  $\text{PbI}_2$  و  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  است درحالی‌که رسوب دومرحله‌ای با استفاده از رسوب جدا هر دو ماده  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  و  $\text{PbI}_2$  انجام می‌شود تا لایه‌های کاملاً یکنواخت و عاری از نقص تولید شود. لایه‌هایی که با استفاده از رسوب یک مرحله‌ای به دست می‌آیند حاوی حفره‌هایی هستند که منجر به ترکیب مجدد حفره با الکترون می‌شوند. از این‌رو، طول عمر الکترون در لایه‌نشانی رسوب دومرحله‌ای تقریباً یک مرتبه بزرگ‌تر از فیلم‌های رسوب یک مرحله‌ای می‌باشد. همچنین، در رسوب دو مرحله‌ای کنترل ریخت نسبت به رسوب یک مرحله‌ای بهتر است (۸۸).

### ۵-۱- روش‌های بر پایه محلول

روش مبتنی بر محلول پرکاربردترین روش برای رسوب فیلم‌های نازک پروسکایت است. رسوب با محلول با استفاده از روش‌های مختلف مانند پوشش‌دهی چرخشی (۸۹)، پوشش‌دهی تیغه (۹۰)، پوشش‌دهی پاششی (۹۱)، چاپ جوهرافشان (۵۴)، چاپ گراور (۹۲) و پوشش‌دهی با هد شکافدار (۹۳) انجام می‌شود. این روش‌ها در



شکل ۸: پوشش‌دهی چرخشی یک مرحله‌ای و دومرحله‌ای (۵۱).

Figure 8: One-step and two-step spin coating (51).

است که نیازی به چرخش بستر نیست. همچنین ضخامت و خصوصیات فیلم به حجم پراکندگی و غلظت بستگی دارد. متغیرهای دیگری که بر ساختار فیلم تأثیر می‌گذارند خیس شدن بستر، سرعت تبخیر و فرآیند خشک شدن است. به‌طور کلی حلال‌های فرار برای این روش ترجیح داده می‌شوند. یکی از مزایای آن نسبت به پوشش چرخی، هدر رفت کمتر مواد است. از طرف دیگر، کاستی‌های مختلفی از جمله مشکل در کنترل ضخامت فیلم و تشکیل فیلم غیریکنواخت در اندازه‌های بزرگ با این روش وجود دارد (۹۸). می<sup>۴</sup> و همکارانش این روش را با انتقال ساده محلول پیش‌ساز پروسکایت بر روی بستر انجام دادند. سپس با استفاده از گرمایش، حلال اضافی را حذف کردند. در این روش به تجهیزات خاصی نیاز نیست (۹۹). ساخت پروسکایت با استفاده از ریختن قطره اولین بار توسط هان<sup>۵</sup> و همکارانش استفاده شد. بعدها نیو<sup>۶</sup> و همکارانش از یک روش ریخته‌گری گرم مبتنی بر محلول برای ساخت لایه پروسکایت استفاده کردند. آن‌ها لایه یکنواخت بدون حفره با بازده ۱۸ درصد در ساختار مسطح به دست آوردند. آنها از این روش برای ساخت یک پنل پروسکایت ۱۰ × ۱۰ سانتی‌متر مربع استفاده کردند که در آن ۱۰ سلول به طور سری با مساحت ۴۹ سانتی‌متر مربع متصل شدند. در این روش سه‌لایه  $\text{TiO}_2$ ،  $\text{ZrO}_2$  و کربن روی سطح به صورت داربست چاپ شد سپس پروسکایت با روش قطره‌ای در سمت کربن چکانده شد. این پنل برای بیش از ۱۰۰۰ ساعت با بازده ۱۰/۴ درصد عملکرد پایداری را نشان داد (۱۰۰). با این حال، راندمان به دست آمده با این روش هنوز بسیار پایین‌تر از آن است که با روش مرسوم پوشش‌دهی چرخی به دست می‌آید. شکل ۹ لایه‌نشانی به روش قطره‌ای را نشان می‌دهد.

این روش می‌تواند برای ساخت ساختارهای پروسکایت معکوس و منظم مورد استفاده قرار گیرد. بهره‌وری به دست آمده با استفاده از روش پوشش چرخی بسیار زیاد است اما این روش محدودیت تولید فیلم یکنواخت در مقیاس بزرگ‌تر را دارد.

#### ۵-۱-۱-۱- لایه‌نشانی تک‌مرحله‌ای

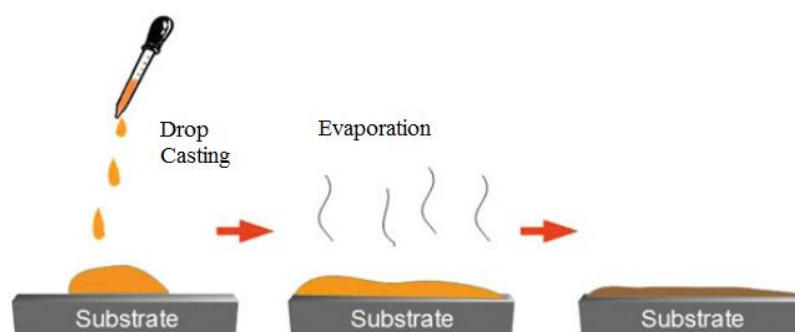
رسوب محلول یک مرحله‌ای به طور گسترده‌ای برای ساخت فیلم پروسکایت استفاده می‌شود که در آن محلول حلال  $\gamma$ -بوتیرولاکتون (GBL)، دی‌متیل فرمامید (DMF) یا دی‌متیل سولفوکسید (DMSO) حاوی MAI و  $\text{PbI}_2$  است و مخلوط به طور مستقیم بر روی لایه‌های زیرین قرار می‌گیرد (۹۶). جنگ<sup>۱</sup> و همکارانش اولین سلول خورشیدی پروسکایت معکوس را بر اساس فیلم‌های پروسکایت تهیه شده با پوشش‌دهی چرخی تک‌مرحله‌ای محلول پیش‌ساز DMF از MAI و  $\text{PbI}_2$  گزارش کردند و به بازده ۳/۹ درصد دست یافتند (۹۷).

#### ۵-۱-۱-۲- لایه‌نشانی دو مرحله‌ای

برای کنترل موثرتر اندازه دانه و تبلور فیلم‌های پروسکایت، روش‌های مختلف رسوب محلول دو مرحله‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. بروشکا<sup>۲</sup> و همکارانش روند رسوب متوالی فیلم‌های پروسکایت را گزارش کردند که در آن ابتدا  $\text{PbI}_2$  محلول در DMF بر روی فیلم‌های اکسید فلز مزوپور به روش چرخی، لایه‌نشانی می‌شود و پس از چند ثانیه با غوطه‌ور کردن در MAI محلول در الکل ایزو پروپیل به پروسکایت تبدیل می‌شود (۲۵).

#### ۵-۱-۲- پوشش‌دهی قطره‌ای<sup>۳</sup>

پوشش‌دهی قطره‌ای محلول پیش‌ساز پروسکایت یک روش سازنده برای ساخت ماژول‌های پروسکایت است. این روش کم‌هزینه، آسان و دارای نرخ تولید بالایی است که تولید در مقیاس بزرگ را امکان‌پذیر می‌کند. این روش مشابه پوشش چرخی است، اما تفاوت عمده این



شکل ۹: لایه‌نشانی پروسکایت به روش قطره‌ای (۸۸).

Figure 9: Perovskite coating by drop casting method (88).

<sup>1</sup> Jeng

<sup>2</sup> Burschka

<sup>3</sup> Drop Casting

<sup>4</sup> Mei

<sup>5</sup> Han

<sup>6</sup> New

۵-۱-۳- پوشش‌دهی تیغه‌ای<sup>۱</sup>

در پوشش‌دهی تیغه‌ای، از یک ابزار پوشش برای پخش محلول بر روی سطح یک بستر استفاده می‌شود. ضخامت فیلم‌های پوشش داده‌شده با این روش به شکل تیغه، جریان محلول در تیغه و سرعت خشک شدن حلال بستگی دارند. با توجه به نوع ابزار پوشش، روش‌های معمول این نوع پوشش‌دهی شامل پوشش‌دهی تیغه، پوشش‌دهی شکافدار و پوشش‌دهی میله‌ای است (۱۰۱). در هر روش امکان تولید فیلم در مساحت وسیع وجود دارد. در پوشش تیغه، یک ابزار پوشش چاقویی به صورت خطی در سراسر بستر حرکت می‌کند، محلول را پخش می‌کند و محلول اضافی را از بین می‌برد. پوشش‌دهی تیغه‌ای یک روش مقیاس‌پذیر، ساده و کم‌هزینه است. رزا<sup>۲</sup> و همکارانش یک فرآیند پوشش‌دهی تیغه با کمک جریان هوا برای لایه‌نشانی  $PbI_2$  طراحی کردند. ابتدا یک لایه فشرده و صاف  $PbI_2$  به روش پوشش‌دهی تیغه‌ای پوشانده شد و سپس در محلول متیل آمونیم یدید (MAI) غوطه‌ور شد و یک لایه پروسکایت تشکیل شد. آن‌ها برای مازولی با مساحت فعال  $10/1$  سانتی‌متر مربع و  $100$  سانتی‌متر مربع به ترتیب بازده  $10/4$  و  $4/3$  درصد را گزارش کردند (۱۰۲). شکل ۱۰ (a) طرحی از روش پوشش تیغه‌ای را نشان می‌دهد.

۵-۱-۴- پوشش‌دهی شکافدار<sup>۳</sup>

پوشش‌دهی شکافدار به دلیل داشتن جوهر مداوم، فرآیندی سازگار با رول به رول برای ساخت پروسکایت‌های با مساحت بزرگ است. این روش شامل انتقال محلول پروسکایت از مخزن جوهر سر شکاف به زیر لایه و تشکیل فیلم پروسکایت در دمای بالا است (شکل ۱۰ (b) (۱۰۳)). ژو<sup>۴</sup> و همکارانش یک فرآیند پوشش‌دهی شکافدار برای ساخت پروسکایت‌ها در دمای اتاق و در محیط نشان دادند و بازده آن را  $18$  درصد به دست آوردند (۱۰۴). به‌طور خاص، یک جوهر پیش‌ساز پروسکایت خوب که در فرآیند پوشش‌دهی شکافدار استفاده می‌شود، می‌تواند در روش‌های دیگر رسوب مانند پوشش‌دهی تیغه، پوشش‌دهی پاششی و پوشش‌دهی چرخشی نیز مورد استفاده قرار

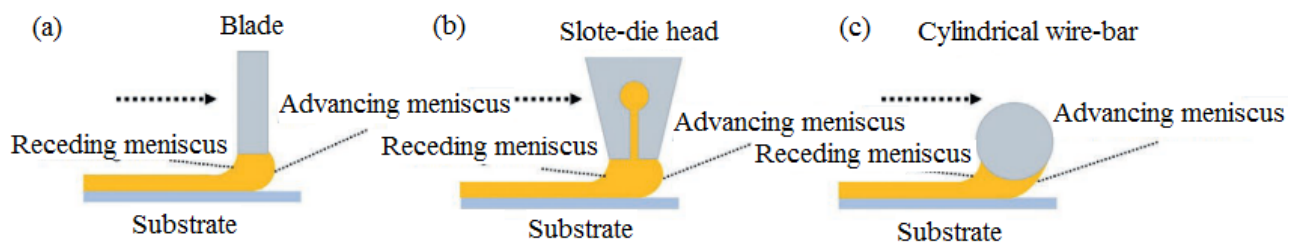
گیرد.

۵-۱-۵- پوشش‌دهی میله‌ای<sup>۵</sup>

در پوشش‌دهی میله از سیم میله‌ای استوانه‌ای به‌عنوان پوشش استفاده می‌شود. محلول پوشش را می‌توان روی بستر یا میله بارگذاری کرد. در طی فرآیند پوشش، محلول موجود در شکاف سیم که شبیه شکاف خوراک در پوشش شکافدار است، بر روی بستر باقی می‌ماند و فیلم‌های مرطوب را تشکیل می‌دهد. روش پوشش میله‌ای می‌تواند ضخامت فیلم را با قابلیت تولید مجدد بالا کنترل کند و از بین رفتن محلول را به حداقل برساند. در سال  $2017$ ، اولین بار از پوشش میله‌ای برای رسوب لایه پروسکایت در ساختار مسطح استفاده شد (۱۰۵). شکل ۱۰ (c) روش میله‌ای را نشان می‌دهد.

۵-۱-۶- چاپ رول به رول<sup>۶</sup>

ضخامت قابل کنترل و استفاده زیاد از مواد باعث می‌شود که چاپ گراور سازگارترین روش‌ها با فرآیند رول به رول (R2R) در تولید مقیاس بزرگ باشد. چاپ گراور غالباً برای رسوب مدل‌های طرحدار در مازول‌های سلول خورشیدی پروسکایتی استفاده می‌شود (۱۰۶). در این زمینه هو<sup>۷</sup> و همکارانش نانوسیم‌های پروسکایت  $MAPbI_3$  با مساحت زیاد را گزارش کردند که این نمونه ساخته شده توسط یک فرآیند چاپ میکرو گراور رول به رول در مقیاس بزرگ روی بستر انعطاف‌پذیر پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) تولید شده است. آن‌ها بازده را  $9$  درصد گزارش کردند (۱۰۷). همچنین لایه پروسکایت را به روش رول به رول لایه‌نشانی کردند. بازده‌های پروسکایت‌های انعطاف‌پذیر کاتیونی که با استفاده از چاپ متوالی رول به رول ساخته شده‌اند تا  $10/56$  درصد گزارش شده است (۶۶). شکل ۱۱ فرآیند روش چاپ رول به رول را برای یک سلول خورشیدی پروسکایتی نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Blade Coating<sup>2</sup> Rosa<sup>3</sup> Slot-die<sup>4</sup> Zhuo<sup>5</sup> Bar Coating<sup>6</sup> Roll to Roll<sup>7</sup> Hou

شکل ۱۰: طرح‌واره (a) پوشش‌دهی تیغه، (b) پوشش‌دهی قالب شکافی و (c) پوشش‌دهی میله‌ای (۱۰۱).

Figure 10: Schematic diagram of meniscus coatings, a) Blade coating, b) Slot-die coating, and c) Bar coating (101).

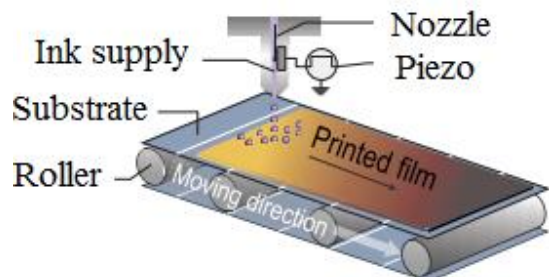


شکل ۱۱: طرحی از سیستم چاپ رول به رول (۹۲).  
**Figure 11:** A schematic of roll-to-roll printing system (92).

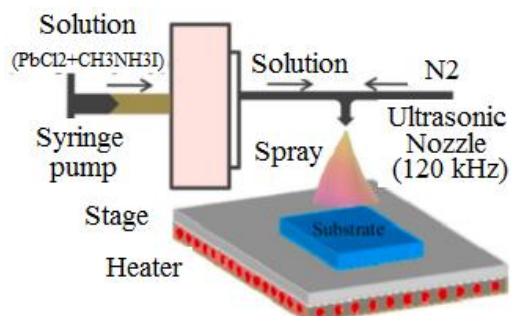
اجزای آلی (یدید فرمامیدینیم، برامید فرمامیدینیم، کلرید متیل آمونیم) از طریق رسوب بخار شیمیایی لایه‌نشانی شدند. برای این ماژول با مساحت ۱۲ سانتی‌متر مربع، بازده ۱۴/۷ درصد نشان داده شده است (۱۱۴). شکل ۱۳ روش لایه‌نشانی پاششی را نشان می‌دهد.

#### ۵-۲- رسوب بخار<sup>۶</sup>

روش سنتز رسوب بخار (VASP) لایه پروسکایت به‌طور کلی در شرایط خلأ انجام می‌شود. به‌عنوان مثال در این روش، دو ترکیب  $PbX_2$  و MAX با تبخیر حرارتی به‌طور هم‌زمان یا متناوب روی بستر  $TiO_2$  از قبل پوشانده شده رسوب می‌کنند.



شکل ۱۲: طرح روش چاپ جوهرافشان (۱۱۰).  
**Figure 12:** Schematic of inkjet printing method (110).



شکل ۱۳: لایه نشانی فیلم پروسکایت به روش پاششی (۱۱۵).  
**Figure 13:** Perovskite sprayed with a spray method (115).

#### ۵-۱-۷- چاپ جوهر افشان<sup>۱</sup>

این روش امکان چاپ فیلم‌های نازک با الگو و وضوح بالا در شرایط محیط را فراهم می‌کند. شماتیک کلی چاپگر جوهرافشان در شکل ۱۲ نشان داده شده است، جایی که سر چاپگر در بالای لایه زیرین قرار دارد. هد چاپگر به منبع مداوم جوهر متصل است. با اعمال یک پالس ولتاژ کوتاه به هد چاپگر، یک قطره ایجاد می‌شود و چاپ انجام می‌شود (۱۰۸). در سال ۲۰۱۴، وی<sup>۲</sup> و همکارانش برای اولین بار از فرآیند دو مرحله‌ای جوهرافشان برای ساخت پروسکایت استفاده کردند که در آن جوهر مخلوط کربن سیاه و MAI روی یک لایه  $PbI_2$  چاپ شد (۱۰۹). اخیراً پاناسونیک کروپ با این روش به بالاترین بازده جهان برای ماژول خورشیدی پروسکایتی بزرگ ( $>80\%$  سانتی‌متر مربع) با بازده ۱۷/۹ درصد رسید. چنین نتیجه‌ای نشان می‌دهد که این روش تأثیر قابل توجهی در کاربرد ماژول پروسکایت دارد (۱۱۰).

#### ۵-۱-۷- پاشش<sup>۳</sup>

در مقایسه با سایر روش‌های مقیاس‌پذیر، رسوب پاششی دارای دو مزیت است. اول این که پوشش‌دهی پاششی اغلب به‌طور قابل توجهی سریع‌تر از سایر روش‌ها است زیرا یک سر پاشش می‌تواند بیش از ۵ متر در دقیقه روی یک لایه حرکت کند. دوم این که هزینه‌های تولید کم‌تری نسبت به سایر روش‌های پوشش‌دهی دارد (۱۱۱). پوشش‌دهی پاششی در اوایل سال ۲۰۰۴ برای ساخت مواد هیبریدی آلی-غیر معدنی مانند پروسکایت استفاده شد (۱۱۲). اما اولین استفاده از پروسکایت‌های پوشش‌داده‌شده به روش پاششی در سلول‌های خورشیدی توسط باروس<sup>۴</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۴ گزارش شد (۱۱۳). جیانگ<sup>۵</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۹ ماژول‌های خورشیدی ساختند که در آن لایه یدید سرب توسط پوشش‌دهی پاششی فراصوت اسکن شد و به‌صورت شطرنجی رسوب داده شد و

<sup>1</sup> Inkjet printing

<sup>2</sup> Wei

<sup>3</sup> Spray

<sup>4</sup> Barrows

<sup>5</sup> Jiang

<sup>6</sup> Vapour-assisted processing



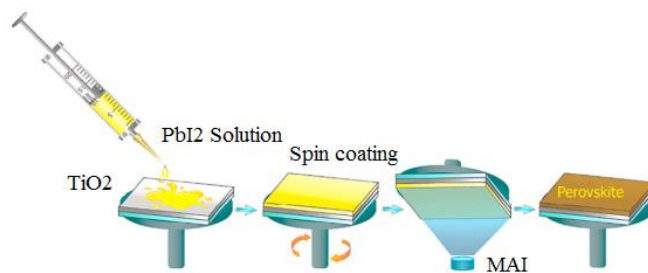
توسط رسوب متوالی به طور قابل توجهی به دمای بستر بستگی دارد. چن<sup>۲</sup> و همکارانش گزارش دادند که سلول‌های مبتنی بر فیلم‌های نازک پروسکایت  $\text{MAPbI}_3$  تهیه شده با روش قرارگیری بخار پی‌درپی بازده  $15/4$  درصد دارند (۱۱۹). شکل ۱۴ روش رسوب بخار را به طور خلاصه به تصویر کشیده است.

بهبود در ساختار سلول خورشیدی پروسکایت و فرآیندهای ساخت که بازده دستگاه را بهبود بخشیده است، منجر به تبدیل شدن تجاری پروسکایت به یک روند غیرقابل توقف شده است. تجاری‌سازی پروسکایت‌ها اکنون به تدریج با ایجاد خطوط تولید آزمایشی برای دستگاه‌های فتوولتائیک پروسکایت با عملکرد خوب و هزینه تولید به‌طور مؤثر با استفاده از روش‌های شناخته شده محقق می‌شود. با این حال، پایداری دستگاه همچنان موضوعی برای محققان و صنایع بوده است. جدول ۴ کاربرد موفقیت‌آمیز پروسکایت در مساحت متفاوت با روش‌های ساخت لایه نازک مورد بحث در این مقاله را، نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Snaith

<sup>2</sup> Chen

$\text{MAPbX}_3$  در دمای مناسب تشکیل شده و سپس به یک فیلم پروسکایت متبلور می‌شود (۱۱۶). این روش بر اساس واکنش جنبشی MAX و پایداری ترمودینامیکی پروسکایت در طی فرآیند رشد استوار است و فیلم‌هایی با ساختار دانه خاص، اندازه‌های بلور بزرگ، پوشش کلی سطح و زبری ناچیز سطح را به وجود می‌آورد. با استفاده از این روش از طریق تبلور جامد به گاز می‌توان ریخت‌شناسی و اندازه دانه را کنترل کرد. با این حال، این روش در واکنش‌های جامد گاز محدود است. بازده پروسکایت‌ها بر اساس فیلم‌های تهیه شده از طریق روش سنتز رسوب بخار به  $12/1$  درصد رسیده است (۱۱۷). اسنیث<sup>۱</sup> و همکارانش اولین فیلم رسوب داده شده  $\text{MAPbI}_3$  به روش بخار را گزارش دادند و آن را در سلول‌های خورشیدی پروسکایت ناهمگن مسطح اعمال کردند و به بازده  $15/7$  درصد دست یافتند (۱۱۸). با این حال این روش برای تبخیر  $\text{PbI}_2$  جامد به بخار به دمای بالا نیاز دارد و ممکن است گازهای سمی تولید کند. به دنبال این مشکل، مشابه فرآیند محلول دو مرحله‌ای، یک روش رسوب بخار اصلاح شده، به نام "رسوب بخار متوالی" پیشنهاد شده است، که در آن  $\text{PbX}_2$  ابتدا با تبخیر حرارتی لایه‌نشانی می‌شود و پس از آن بخار MAX، روی آن رسوب داده می‌شود. عملکرد فتوولتائیک دستگاه‌های تهیه شده



شکل ۱۴: تصویر لایه‌نشانی پروسکایت به‌وسیله فرآیند رسوب بخار (۱۱۶).

Figure 14: Schematic illustration for obtaining perovskite layer by vapour-assisted solution process (116).

جدول ۴: روش‌های پوشش‌دهی سلول‌های خورشیدی پروسکایتی.

Table 4: Coating methods of perovskite solar cells.

| Coating method | Perovskite  | Active layer $\text{cm}^2$ | $V_{oc}/V$ | $J_{sc}/\text{mAcm}^{-2}$ | FF    | PCE % | Year | Ref.  |
|----------------|---|----------------------------|------------|---------------------------|-------|-------|------|-------|
| Spin coating   | $\text{MAPbI}_3$  | 0.16                       | 1.11       | 23                        | 0.74  | 19.3  | 2016 | (26)  |
| Spin coating   | $\text{MAPbI}_3$  | 1                          | 0.96       | 21.89                     | 0.788 | 16.6  | 2017 | (123) |
| Spin coating   | $\text{MAPbI}_3$  | 31.71                      | 13.65      | 1.25                      | 0.65  | 11.09 | 2018 | (124) |
| Spin coating   | $\text{MAPbI}_3$  | 10                         | 5.13       | 4.76                      | 0.64  | 15.62 | 2019 | (125) |
| Spin coating   | $\text{Cs}_{0.05}(\text{FA}_{0.92}\text{MA}_{0.08})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{0.92}\text{Br}_{0.08})_3$ | 1.1                        | 1.17       | 24.1                      | 0.816 | 23    | 2020 | (78)  |
| Spin coating   | $\text{FA}_{1-y}\text{Cs}_y\text{Pb}(\text{I}_{1-x}\text{Br}_x)_3$                                      | 0.34                       | 1.09       | 20.3                      | 0.71  | 15.9  | 2021 | (67)  |
| Spin coating   | $\text{MAPbI}_3$  | 1                          | 1.11       | 23.5                      | 0.77  | 20    | 2022 | (65)  |
| Spin coating   | $\text{MAPbI}_3$  | 1.1                        | 1.04       | 20.63                     | 0.61  | 13    | 2023 | (48)  |
| Blade coating  | $\text{MAPbI}_3$  | 1.1                        | 0.95       | 22.05                     | 0.77  | 16.26 | 2018 | (123) |

(ادامه جدول ۴)

| Coating method  | Perovskite   | Active layer cm <sup>2</sup> | V <sub>oc</sub> /V | JSC/<br>mAcm <sup>-2</sup> | FF    | PCE (%) | Year | Ref.  |
|-----------------|--|------------------------------|--------------------|----------------------------|-------|---------|------|-------|
| Blade coating   | MAPbI <sub>3</sub>                                   | 1.1                          | 1.14               | 22                         | 0.8   | 20      | 2019 | (126) |
| Blade coating   | MAPbI <sub>3</sub> -xClx                             | 10.08                        | 4.67               | 14.96                      | 0.664 | 15.38   | 2020 | (44)  |
| Blade coating   | FA0.83Cs0.17Pb(10.87Br0.13)3                         | 0.24                         | 1.13               | 19.3                       | 0.77  | 16.9    | 2021 | (127) |
| Blade coating   | PbI <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> I | 1                            | 1.13               | 23.4                       | 0.78  | 20.7    | 2022 | (128) |
| Slot-die        | MAPbI <sub>3</sub> -xCl                              | 151.87                       | 21.2               | 17.8                       | 0.679 | 11.1    | 2018 | (129) |
| Slot-die        | MA0.6FA0.38Cs0.02PbI2.975Br0.025                     | 0.1                          | 0.92               | 16.8                       | 0.76  | 11.62   | 2019 | (130) |
| Slot-die        | MAPbI <sub>3</sub>                                   | 60.08                        | 2.43               | 8.5                        | 0.61  | 12.87   | 2020 | (131) |
| Slot-die        | Cs <sub>s</sub> yFA1-yPb(1-xBrx)3                    | 0.09                         | 1.024              | 22.4                       | 0.78  | 18      | 2021 | (132) |
| Slot-die        | (Cs0.22FA0.78)Pb(10.85Br0.15)3                       | 1                            | 1.2                | 20.7                       | 0.78  | 19.52   | 2022 | (133) |
| Spray coating   | MAPbI <sub>3</sub>                                   | 1                            | 0.99               | 19                         | 0.69  | 13      | 2017 | (134) |
| Spray coating   | MAPbI <sub>3</sub>                                   | 1.1                          | 0.87               | 22.5                       | 0.63  | 12.6    | 2018 | (135) |
| Spray coating   | MAPbI <sub>3</sub>                                   | 56.25                        | 1.03               | 21.6                       | 0.76  | 16.9    | 2019 | (136) |
| Spray coating   | CsFAPbI <sub>3</sub>                                 | 5.9                          | 1.06               | 20.6                       | 0.71  | 15.2    | 2020 | (137) |
| Spray coating   | CsFAMAPbI <sub>3</sub> -xBrx                         | 3.2                          | 0.93               | 19.9                       | 0.68  | 14.1    | 2021 | (114) |
| Spray coating   | MAPbI <sub>3</sub>                                   | 0.56                         | 1                  | 18.2                       | 0.65  | 13.32   | 2022 | (138) |
| Spray coating   | Cs0.17FA0.83 Pb(10.83Br0.17) <sub>3</sub>            | 1                            | 1.22               | 20.2                       | 0.73  | 18.4    | 2023 | (115) |
| Inkjet printing | MAPbI <sub>3</sub>                                   | 0.54                         | 1.35               | 19.3                       | 0.69  | 16.6    | 2016 | (116) |
| Inkjet printing | MAPbI <sub>3</sub>                                   | 1                            | 1                  | 18.4                       | 0.56  | 11.3    | 2017 | (139) |
| Inkjet printing | MAPbI <sub>3</sub>                                   | 2.02                         | 1.06               | 21.88                      | 0.765 | 15.74   | 2018 | (30)  |
| Inkjet printing | MAPbI <sub>3</sub>                                   | 0.54                         | 1.08               | 22.71                      | 0.69  | 17.04   | 2019 | (139) |
| Inkjet printing | FAPbIxBr3-x  | 4                            | 1.08               | 16.87                      | 0.69  | 12.26   | 2020 | (138) |
| Inkjet printing | Cs0.2FA0.8Pb(10.6Br0.4) <sub>3</sub>                 | 1.1                          | 1.9                | 13.8                       | 0.66  | 11.2    | 2021 | (140) |
| Inkjet printing | CsPb(BrxI1x) <sub>3</sub>                            | 1                            | 1.1                | 22.85                      | 0.73  | 17.89   | 2022 | (141) |
| HCVD            | MAPbI <sub>3</sub>                                   | 10                           | 5.67               | 3.56                       | 0.65  | 13.89   | 2016 | (142) |
| HCVD            | CsSnBr3  | 12                           | 7.5                | 2.56                       | 0.68  | 12.71   | 2017 | (142) |
| HCVD            | CsxFA1-xPbI3   | 12                           | 5.85               | 3.76                       | 0.681 | 14.6    | 2018 | (143) |
| HCVD            | FAPbIxBr3-x  | 12                           | 6.29               | 3.55                       | 0.665 | 14.7    | 2019 | (144) |
| HCVD            | MAPbI <sub>3</sub>                                   | 21                           | 6.71               | 3.68                       | 0.73  | 18.13   | 2020 | (142) |
| HCVD            | Rb0.04Cs0.14FA0.86Pb(BryI1y)3                        | 10                           | 6.243              | 3.51                       | 0.7   | 15.13   | 2021 | (122) |
| HCVD            | Cs0.24FA0.76PbI3yBry(SrI)                            | 16.07                        | 6.28               | 3.29                       | 0.67  | 13.92   | 2022 | (122) |
| Roll to Roll    | MAPbI <sub>3</sub>                                   | 1.1                          | 1.7                | 19.81                      | 0.72  | 15      | 2016 | (143) |
| Roll to Roll    | MAPbI <sub>3</sub>                                   | 12                           | 0.99               | 17.39                      | 0.64  | 11.16   | 2018 | (145) |
| Roll to Roll    | (FAPbI3)0.95(MAPbBr3)0.05                            | 160                          | 1.01               | 21.9                       | 0.736 | 16.5    | 2020 | (92)  |
| Roll to Roll    | MAPbI <sub>3</sub>                                   | 100                          | 1.06               | 18.9                       | 0.69  | 13.8    | 2021 | (146) |
| Roll to Roll    | MAPbI <sub>3</sub>                                   | 1                            | 1                  | 20.3                       | 0.52  | 11.24   | 2022 | (147) |

هستند. این کار اجازه می‌دهد تا مقاومت کاهش یابد، در نتیجه ساخت ماژول‌های کوچک با عملکرد بالا راحت‌تر می‌شود. گالاگان<sup>۲</sup> و همکارانش توزیع جریان را در ماژول‌های با عرض‌های مختلف سلول‌های فرعی شبیه‌سازی کردند تا به بهینه‌سازی ماژول‌ها کمک کنند. نتایج نشان داد که ماژول‌های مبتنی بر بسترهای TCO با مقاومت ورق  $10 \Omega/\text{sq}$  حداکثر عملکرد با عرض سلول ۵ میلی‌متر را دارند. پس سلول‌های فرعی زیادی در یک ماژول پروسکایت بزرگ وجود خواهد داشت، در نتیجه تعداد بیشتری از اتصالات افزایش می‌یابد بنابراین چگالی جریان کاهش می‌یابد و بازده افزایش می‌یابد (۱۲۱). با توجه به جدول ۴ بازده پروسکایت‌های بررسی شده برای سلول با مساحت کوچک ۱ سانتی‌متر مربع از طریق پوشش‌دهی تیغه (۲۰/۷ درصد) و پوشش‌دهی شکاف (۲۰/۷ درصد) از پروسکایت‌های ساخته شده از طریق روش چرخشی (۲۴/۱ درصد) بیشتر نیستند. برای پروسکایت‌های با روش پوشش تیغه، بازده تا حد زیادی به کیفیت فیلم‌های پروسکایت بستگی دارد. اخیراً روش رسوب بخار برای ساخت در مقیاس بزرگ امیدوارکننده بوده است. سلول‌های خورشیدی مبتنی بر روش رسوب بخار، همگی از ساختار منظم p-i-n استفاده می‌کنند. ساختار معکوس هنوز اعمال نشده است و ممکن است راهی بالقوه برای بهبود بیشتر عملکرد سلول و به‌ویژه پایداری عملیاتی باشد. روش رسوب بخار برای ساخت سلول‌های خورشیدی پروسکایتی در مقیاس بزرگ و کم‌هزینه و با پایداری بالا امیدوارکننده خواهد بود (۱۲۲).

## ۶- نتیجه‌گیری و چشم‌انداز

از بین همه فناوری‌های فوتوولتائیک، سلول‌های خورشیدی پروسکایت با توجه به رشد سریع در بازده تبدیل انرژی، مورد توجه و علاقه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند. بازده سلول‌های خورشیدی پروسکایت طی چند سال گذشته از ۳/۸ به ۲۷/۱ درصد افزایش یافته است. علاوه بر این، سلول‌های خورشیدی پروسکایت دارای عملکرد جذب نور عالی، گاف نواری قابل تنظیم و دامنه جذب نور بالا هستند که از این جهت ایده‌آل‌تر از سلول‌های خورشیدی مبتنی بر سیلیکون هستند. در این مقاله مروری، تاریخچه پروسکایت، ساختار پروسکایت‌ها به‌عنوان لایه جاذب نور، برخی از ساختارهای مورد استفاده در لایه‌های انتقال الکترون و حفره و روش پوشش‌دهی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که تحقیقات پژوهشگران در حوزه سلول‌های خورشیدی پروسکایتی بر سه هدف متمرکز شده است که عبارتند از: افزایش بازده سلول، افزایش پایداری و افزایش سطح فعال پروسکایت با هدف تجاری‌سازی. به‌منظور دستیابی به حوزه اول، بهینه‌سازی

بیش از جدول ۴ به شرح زیر است:

- از نظر اندازه پروسکایت‌های ساخته شده با مساحت بزرگ، رتبه‌بندی به ترتیب نزولی به این صورت است: پوشش رول به رول (۱۶۰ سانتی‌متر مربع)، پوشش شکافی (۱۵۱/۸۷ سانتی‌متر مربع)، پوشش‌دهی پاششی (۵۶/۲۵ سانتی‌متر مربع)، پوشش چرخشی (۳۱/۷۱ سانتی‌متر مربع)، تبخیر (۲۱ سانتی‌متر مربع)، چاپ جوهرافشان (۴ سانتی‌متر مربع).
- از نظر بازده پروسکایت‌های تولید شده با مساحت بزرگ، رتبه‌بندی به ترتیب نزولی به این صورت است: لایه‌نشانی به کمک رسوب شیمیایی بخار (۱۸/۱۳ درصد)، پوشش‌دهی پاششی (۱۶/۹ درصد)، روش رول به رول (۱۶/۵)، پوشش‌دهی تیغه (۱۵/۳۶ درصد)، چاپ جوهرافشان (۱۲/۲۶ درصد)، پوشش‌دهی شکافی (۱۱/۱ درصد)، پوشش چرخشی (۱۱/۰۹).
- از نظر اولویت‌های محققان پروسکایت، رتبه‌بندی روش‌های ساخت به ترتیب نزولی عبارت است از: پوشش‌دهی پاششی، پوشش‌دهی چرخشی، پوشش‌دهی تیغه، چاپ جوهرافشان، رسوب بخار شیمیایی، تبخیر هم‌زمان (۵۸). با توجه به جدول ۴ درحالی‌که پروسکایت‌ها ساختارهای مشابهی داشته‌اند مواد مورد استفاده در لایه‌های دیگر و اندازه سلول به طور قابل‌توجهی متغیر بوده است، بنابراین به تنوع گسترده در نتایج تجربی کمک کرده است. با این حال، با روش‌های مختلف ساخت فیلم پروسکایت، عملکرد پروسکایت‌های مساحت بزرگ با همان اندازه را می‌توان با روشی استاندارد مقایسه کرد. همان‌طور که در جدول ۴ خلاصه شده است، بیشتر پروسکایت‌های نشان داده شده با عملکرد خوب در یک منطقه کوچک تعریف شده‌اند، به‌طوری‌که بازده ماژول نسبتاً پایین و بسیار کمتر از درخواست تجاری است. جدا از یکنواختی و ریخت لایه پروسکایت در یک مساحت بزرگ، طراحی و پردازش نیز نقش مهمی در توسعه یک ماژول خورشیدی با کارایی بالا دارند. هو<sup>۱</sup> بیلی و همکارانش روشی را برای مدل‌سازی دقیق اثر ساختارهای مختلف بر بازده سلول‌های خورشیدی گزارش کردند. برای یک سلول پروسکایت با مساحت کوچک با شکاف باند  $eV$  ۱/۴۸، بازده می‌تواند به ۲۵ درصد برسد. با این حال، با افزایش عرض سلول، بیشینه بازده به سرعت کاهش می‌یابد، در صورتی که عرض ۲ سانتی‌متر (مساحت ۴ سانتی‌متر مربع برای یک سلول مربعی) باشد بازده سلول تا ۲۵ درصد، و هنگامی که عرض سلول ۱۵/۶ سانتی‌متر (مساحت ۱۲۴۳ سانتی‌متر مربع برای یک سلول مربعی) باشد بازده به ۱۹ درصد محدود می‌شود (۱۲۰). یک روش برای حل کردن این مسأله، تقسیم یک سلول بزرگ به چندین از سلول‌های فرعی کوچک است که همه به صورت سری متصل

<sup>2</sup> Galagan

<sup>1</sup> Hu-Beili

قرار گرفته است. روش‌های مورد بحث عبارت است از پوشش‌دهی پاششی، پوشش‌دهی شکافی، پوشش‌دهی تیغه، چاپ جوهرافشان، روش رسوب بخار شیمیایی و چاپ رول به رول. این روش‌ها هزینه‌های متفاوتی دارند و لایه‌های پروسکایتی با کیفیت (همگنی، ریخت و ضخامت)، پایداری و بازده متفاوت تولید می‌کنند. با توجه به تمام روش‌های بررسی شده در این مقاله، پوشش چرخشی رایج‌ترین روش استفاده شده در تحقیقات آزمایشگاهی است که این امر به دلیل هزینه پایین و قابلیت کنترل فرآیند است. سلول‌های خورشیدی ساخته شده با این روش به بازده بیشتر از ۲۵ درصد رسیدند. سایر روش‌های پوشش‌دهی همچون پوشش‌دهی رسوب شیمیایی بخار، پوشش‌دهی پاششی، پوشش‌دهی تیغه جذاب‌ترین چشم‌اندازها را برای تولید پروسکایت‌های با مقیاس بزرگ و بازده بالا ارائه می‌دهند. بررسی‌ها نشان داده است که پروسکایت‌های تولید شده با مساحت بزرگ به روش رسوب شیمیایی بخار، پوشش‌دهی پاششی، روش رول به رول، پوشش‌دهی تیغه، توانستند به ترتیب به بازده ۱۸/۱۳ درصد، ۱۶/۹ درصد، ۱۶/۵ درصد و ۱۵/۳۶ درصد برسند.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از حمایت‌های دانشگاه گیلان قدردانی می‌نمایند.

### تعارض و منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

ترکیب مواد پروسکایت، انتخاب مواد مناسب حامل بار، انتقال‌دهنده الکترون و حفره مناسب مورد بررسی قرار داده شده است تا با تغییر در گپ انرژی لایه‌ها، جذب نور در ناحیه مرئی امکان‌پذیر شود و بازده سلول‌ها نسبت به سلول‌های خورشیدی سیلیکون تک‌بلوری افزایش یابد. با این حال، چالش برانگیزترین جنبه پروسکایت‌ها رشد یک لایه پروسکایت آب‌گریز است که می‌تواند یک سلول پایدار و با عملکرد بالا تولید کند. این می‌تواند از طریق اصلاح سطح لایه پروسکایت با مواد افزودنی حاصل شود. به‌طور مثال افزودنی‌های حاوی کلرید (Cl<sup>-</sup>) به‌عنوان جایگزین یدید پیشنهاد می‌شوند زیرا آنیون کلرید به عنوان کمک‌کننده به رشد دانه همراه با جهت‌گیری دانه‌های پروسکایت، مناسب است و بازده را تا ۷ درصد افزایش می‌دهد. همچنین سلول‌های خورشیدی پروسکایت مخلوط I-Br تک پیوندی نیز عملکرد امیدوارکننده‌ای تا ۱۰ درصد نشان داده‌اند. بر اساس رویکرد دوم، تعدادی از عوامل، از جمله طراحی ساختار، افزودن برخی از مواد آلی به لایه‌های سلول خورشیدی، مواد انتقال بار، آماده‌سازی مواد الکتروود و روش‌های کیسوله‌سازی، در نظر گرفته شده است. کیسوله‌سازی نقشی حیاتی در بهبود پایداری سلول‌های خورشیدی پروسکایت ایفا می‌کند که به تسریع فناوری در رسیدن به هدف تجاری‌سازی کمک می‌کند. در خصوص جنبه سوم ایده‌های جدیدی در روش ساخت مقیاس‌پذیر برای تولید تجاری لایه‌های نازک پروسکایتی بررسی شده است. اما هنوز تا راه‌اندازی تجاری آن راه زیادی در پیش است زیرا ساخت پروسکایت‌های بزرگ و پایدار همیشه مشکل‌ساز بوده است. به‌طور خاص، با بزرگ‌تر شدن سطح فعال سلول‌های خورشیدی، بازده آن کمتر می‌شود. در این مقاله برخی از روش‌های ساخت سلول خورشیدی پروسکایت مورد بررسی

### ۷- مراجع

1. Shaikh JS, Shaikh NS, Mali SS, Patil JV, Pavar KK, Kanjanaboos P, Hung CK. Nanoarchitectures in dye-sensitized solar cells: metal oxides, oxide perovskites and carbon material. *Soc Chem.* 2018;4987-5034. <https://doi.org/10.1039/C7NR08350E>.
2. Hoseinnezhad M. Review on Metal-based Complex Dyes for Dye-sensitized Solar Cells. *J Stud Color World.* 2021;3:45-54. <https://doi.org/10.1001.1.22517278.1400.11.3.4.6> (In Persian).
3. Yousefi AA, Mohebbi A, Fallahdoust Moghadam S. Polymer Solar Cells: Components, Production, Applications, and the Market, Polymerization. *Polymer.* 2019;4:65-78. <https://doi.org/10.22063/basparesh.2018.2027.1381> (In Persian).
4. Hosseinnezhad F, Naji L. Solar cells are a big step towards using renewable energies. *Green Chem Tech.* 2018;2:84-96. <https://doi.org/10.1298/106328.html> (In Persian).
5. Rathore N, Panwar NL, Yettou F, Gama A. A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications. *Int J Amb Energy.* 2019;9:1-18. <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1592774>.
6. Gao Y, Zhang J. Chitosan modified zeolite molecular sieve particles as a filter for ammonium nitrogen removal from water. *Int J Mol Sci.* 2020;21(7). <https://doi.org/10.3390/ijms21072383>.
7. Berendjchi A, Yousefi AA, Fallahdoust Moghadam S. Economic Estimation of Polymer Solar Cells Fabrication. *Polymerization.* 2021;4:69-85.

- <https://doi.org/10.22063/basparesh.2018.2027.1381> (In Persian).
8. Rouhani S, Hosseinneshad M, Nasiri S, Gharanjig K, Salem A, Ranjbar Z. Investigation of the Effect of rGO/TiO<sub>2</sub> on Photovoltaic Performance of DSSCs Devices. *Prog Color Colorants Coat*. 2022;15:123-131. <https://doi.org/10.30509/pccc.2021.166738.1094>.
  9. Kojima A, Teshima K, Shirai Y. Novel Photo-electrochemical Cell with Mesoscopic Electrodes Sensitized by Lead-Halide Compounds. *Meet Abstr*. 2006;2:397. <https://doi.org/10.1149/ma2007-02/8/352>.
  10. Roy A, Ghosh A, Bhandari S, Sundaram S, Mallick TK. Perovskite solar cells for bipv application: A review. *Build*. 2020;10:1–33. <https://doi.org/10.3390/buildings10070129>.
  11. Liang Z, Zhang S, Xu X, Wang N. A large grain size perovskite thin film with a dense structure for planar heterojunction solar cells via spray deposition under ambient conditions. *RSC Adv*. 2015;5:60562–60569. <https://doi.org/10.1039/c5ra09110a>.
  12. Müller A, Ghosh M, Sonnenschein R, Woditsch P. Silicon for photovoltaic applications. *Mater Sci Eng B Solid-State Mater Adv Technol*. 2006;134(2-3):257–262. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2006.06.054>.
  13. Song Z, Wathage SC, Phillips AB, Heben MJ. Pathways toward high-performance perovskite solar cells: review of recent advances in organo-metal halide perovskites for photovoltaic applications. *J Photo Energy*. 2016;6(2):21–30. <https://doi.org/10.1117/1.jpe.6.022001>.
  14. Maleki E, Ranjbar M, Kahani SA. The Effect of Antisolvent Dropping Delay Time on the Morphology and Structure of the Perovskite Layer in the Hole Transport Material Free Perovskite Solar Cells. *Prog Color Colorant Coat*. 2021;14:47–54. <https://doi.org/10.30509/pccc.2021.81671>.
  15. Miyata A, Mitiaglio A, Polochocka P, Portugall O, Wang W. Direct Measurement of the Exciton Binding Energy and Effective Masses for Charge carriers in an Organic-Inorganic Tri-halide Perovskite. *Chem*. 2015;1–22. <https://doi.org/10.1038/nphys3357>.
  16. Mitzi DB, Chondroudis K, Kagan CR. Organic-inorganic electronics. *IBM J Res Dev*. 2001;45(1):29–45. <https://doi.org/10.1147/rd.451.0029>.
  17. Gholipour S, Saliba M. From Exceptional Properties to Stability Challenges of Perovskite Solar Cells. *Phys*. 2018;1–10. <https://doi.org/10.1002/sml.201802385>.
  18. Zhou D, Zhou T, Tian Y, Zhu X, Tu Y. Perovskite-based solar cells: materials, methods, and future perspectives. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2018;8:45–51. <https://doi.org/10.1155/2018/8148072>.
  19. Valverde-Chávez DA. Second charge generation dynamics in single crystal CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>. *Energy Environ Sci*. 2015;8(12):3700–3707. <https://doi.org/10.1039/c5ee02503f>.
  20. Roy P, Kumar Sinha N, Tiwari S, Khare A. A review on perovskite solar cells: evolution of architecture, fabrication techniques, commercialization issues and status. *Sol Energy*. 2020;198:665–688. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.080>.
  21. Liang K, Mitzi DB, Prikas MT. Synthesis and Characterization of Organic-Inorganic Perovskite Thin Films Prepared Using a Versatile Two-Step Dipping Technique. *Chem Mater*. 2013;4756(8):403–411. <https://doi.org/10.1021/cm970568f>.
  22. Kojima A, Teshima K, Shirai Y, Miyasaka T. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *J Am Chem Soc*. 2009;131(17):6050–6051. <https://doi.org/10.1021/ja809598r>.
  23. Im JH, Lee CR, Lee JW, Park SW, Park NG. 6.5% Efficient Perovskite Quantum-Dot-Sensitized Solar Cell. *Nanoscale*. 2011;3(10):4088–4093. <https://doi.org/10.1039/c1nr10867k>.
  24. Kim HS. Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9%. *Sci Rep*. 2012;2:1–7. <https://doi.org/10.1038/srep00591>.
  25. Burscha J. Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells. *Nature*. 2013;499(7458):316–319. <https://doi.org/10.1038/nature12340>.
  26. Giordano F, Lim S, Wang W. Enhanced electronic properties in mesoporous TiO<sub>2</sub> via lithium doping for high-efficiency perovskite solar cells. *Nat Commun*. 2016;7:1–6. <https://doi.org/10.1038/ncomms10379>.
  27. NREL improves efficiency and stability of perovskite solar cell (Internet). *Energy Monitor*; 2020 (cited 2023 Apr 12). Available from: <https://www.energymonitor.ai/tech/renewables/nrel-improves-efficiency-and-stability-of-perovskite-solar-cell/>.
  28. Yang IS, Park NG. Dual Additive for Simultaneous Improvement of Photovoltaic Performance and Stability of Perovskite Solar Cell. *Adv Funct Mater*. 2021;20:1–7. <https://doi.org/10.1002/adfm.202100396>.
  29. Zhou Y, Wang F, Fang HH. Distribution of bromine in mixed iodide-bromide organolead perovskites and its impact on photovoltaic performance. *J Mater Chem A*. 2016;41:16191–16197. <https://doi.org/10.1039/c6ta07647e>.
  30. Eggers H. Inkjet-Printed Micrometer-Thick Perovskite Solar Cells with Large Columnar Grains. *Adv Energy Mater*. 2020;6. <https://doi.org/10.1002/aenm.201903184>.
  31. Bati ASR, Zhong YL, Burn PL, Nazeeruddin MK, Shaw PE, Batmunkh M. Next-generation applications for integrated perovskite solar cells. *Commun Mater*. 2023;4(1):1–24. <https://doi.org/10.1038/s43246-022-00325-4>.
  32. Deepa M, Salado M, Calio L, Kazim S, Shivaprasad SM, Ahmad S. Cesium power: Low Cs<sup>+</sup> levels impart stability to perovskite solar cells. *Phys Chem Chem Phys*. 2017;5:4069–4077. <https://doi.org/10.1039/c6cp08022g>.
  33. Maqsood A, Lin Y, Meng J. Perovskite Solar Cells Based on Compact, Exceeding 22%. *Chem*. 2020;10:292–310. <https://doi.org/10.1019/j.chik.2020.07.021>.
  34. Targhi FF, Jalili YS, Kanjouri F. MAPbI<sub>3</sub> and FAPbI<sub>3</sub> perovskites as solar cells: Case study on structural, electrical and optical properties. *Results Phys*. 2018;10:616–627. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.07.007>.
  35. Najafi M. Highly Efficient and Stable Flexible Perovskite Solar Cells with Metal Oxides Nanoparticle Charge Extraction Layers. *Small*. 2018;14(12):1–10. <https://doi.org/10.1002/sml.201702775>.
  36. Im JH, Jang IH, Pellet N, Grätzel M, Park NG. Growth of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> cuboids with controlled size for high-efficiency perovskite solar cells. *Nat Nanotechnol*. 2014;11:927–932. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.181>.
  37. Gong J, Darling SB, You F. Perovskite photovoltaics: Life-cycle assessment of energy and environmental

- impacts. *Energy Environ Sci*. 2015;7:1953–1968. <https://doi.org/10.1039/c5ee00615e>.
38. Jiang Q. Enhanced electron extraction using SnO<sub>2</sub> for high-efficiency planar-structure HC(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> PbI<sub>3</sub>-based perovskite solar cells. *Nat Energy*. 2017;2(1). <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.177>.
  39. Zhang J, Gao X, Deng Y, Zha Y, Yuan C. Comparison of life cycle environmental impacts of different perovskite solar cell systems. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2017;166:9–17. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.03.008>.
  40. Zhao Y, Cheng J, Hung W. Perovskite seeding growth of formamidinium-lead-iodide-based perovskites for efficient and stable solar cells. *Nat Commun*. 2018;9(1):1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04029-7>.
  41. Cho KT, Grancini G, Lee Y, Oveisi E, Ryu J, Tschumi M, Schouwink A, Seo G, Heo S, Park J, Jang JY, Paek S. Selective growth of layered perovskites for stable and efficient photovoltaics. *Energy Environ Sci*. 2018;1(4):952–959. <https://doi.org/10.1039/c7ee03513f>.
  42. Chen B, Wang S, Zhang X, Zhu W, Cao Z, Hao F. Reducing the interfacial voltage loss in tin halides perovskite solar cells. *Chem Eng J*. 2022;445:136769. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136769>.
  43. Salhi B, Wudil YS, Hossain MK, Al-Ahmed A, Al-Sulaiman FA. Review of recent developments and persistent challenges in stability of perovskite solar cells. *Renew Sustain Energy Rev*. 2018;90:210–222. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.058>.
  44. Hima A, Lakhdar N, Benhaoua B, Saadoun A. Superlattices and Microstructures An optimized perovskite solar cell designs for high conversion efficiency Front contact. *Superlattices Microstruct*. 2019;129:240–246. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2019.04.007>.
  45. Muradov A, Frolushkina D, Samusenkov V, Zhamanbayeva G, Kot S. Methods of Stability Control of Perovskite Solar Cells for High Efficiency. *Energies*. 2021;14:2918. <https://doi.org/10.3390/en14102918> 2021.
  46. Sanchez-diaz J, Rafael S, Masi S. Supplemental information Tin perovskite solar cells with > 1, 300 h of operational stability in N<sub>2</sub> through a synergistic chemical engineering approach. *Joule*. 2022;6:2012. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.02.014>.
  47. Ullah S, Bou Z. Mesoporous SnO<sub>2</sub> Nanoparticle-Based Electron Transport Layer for Perovskite Solar Cells. *ACS Appl Nano Mater*. 2022;245:341. <https://doi.org/10.1021/acsnm.2c00840>.
  48. Bai S, Li P, Wang C, Yuan Z, Fu Z, Kawecki F, Liu M, Sakai X, Wang N, Huettner JT, Buecheler S, Fahlman M, Gao M, Snaith F, Huang H. Planar perovskite solar cells with long-term stability using ionic liquid additives. *Nature*. 2019;571(7764):245–250. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1357-2>.
  49. Rong B, Jin S, Chen X, Wei Y, Fang Y, Zhao Y, Guo Q, Huang Y, Fan L, Wu J. Improving the efficiency of perovskite solar cells by additive engineering with ditetrabutylammonium dichromate. *Org Electro*. 2020;5:105845. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2020.105845>.
  50. Hu J, Wang C, Qiu S, Zhao Y, Gu E, Zeng L, Yang Y, Li C, Liu X, Forberich K, Li J, Nazeeruddin MK, Mai Y, Guo F. Spontaneously Self-Assembly of a 2D/3D Heterostructure Enhances the Efficiency and Stability in Printed Perovskite Solar Cells. *Adv Energy Mater*. 2020;10(17):1–10. <https://doi.org/10.1002/aenm.202000173>.
  51. Li J, Bua T, Lina Z, Mo Y, Cha N, Gaoc X, Jia M, Li Z, Cheng Y, Huang F. Efficient and stable perovskite solar cells via surface passivation of an ultrathin hydrophobic organic molecular layer. *Chem Eng J*. 2021;405:126712. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126712>.
  52. Mohammadian J, Haratizade H, Arabi AM, qaranjig K, Hoseinnezhad M. A Review of the Effect of Metal Doped Titanium Dioxide on the Dye-Sensitized Solar Cells. *J Stud Color World*. 2022;11(4):63-75. <https://dori.net/20.1001.1.22517278.1400.11.4.5.9> (In Persian).
  53. Wang R, Mujahid M, Duan Y, Wang ZK, Xue J, Yang Y. A Review of Perovskites Solar Cell Stability. *Adv Funct Mater*. 2019;29(47). <https://doi.org/10.1002/adfm.201808843>.
  54. Mathies F, List-Kratochvil EJW, Unger EL. Advances in Inkjet-Printed Metal Halide Perovskite Photovoltaic and Optoelectronic Devices. *Energy Technol*. 2020;8(4). <https://doi.org/10.1002/ente.201900991>.
  55. Leng X. Recent progress and challenges of electron transport layers in organic inorganic perovskite solar cells. *Adv Mater*. 2019. <https://doi.org/10.1002/adma.201805708>.
  56. Li S, Cao YL, Li WH, Bo ZS. A brief review of hole transporting materials commonly used in perovskite solar cells. *Rare Met*. 2021;10:2712–2729. <https://doi.org/10.1007/s12598-020-01691-z>.
  57. Chen C, Cheng Y, Dai Q, Song H. Radio Frequency Magnetron Sputtering Deposition of TiO<sub>2</sub> Thin Films and Their Perovskite Solar Cell Applications. *Sci Rep*. 2015;5:1–12. <https://doi.org/10.1038/srep17684>.
  58. Kim T, Lim J, Song S. Recent progress and challenges of electron transport layers in organic inorganic perovskite solar cells. *Energies*. 2020;13(21):1–16. <https://doi.org/10.3390/en13215572>.
  59. Krishna A, Grimsdale AC. Hole transporting materials for mesoscopic perovskite solar cells-towards a rational design? *J Mater Chem A*. 2017;5(32):16446–16466. <https://doi.org/10.1039/c7ta01258f>.
  60. Yan J, Savenije TJ, Mazzarella L, Isabella O. Progress and challenges on scaling up of perovskite solar cell technology. *Sustain Energy Fuels*. 2022;6(2):243–266. <https://doi.org/10.1039/d1se01045j>.
  61. Liu C, Zhang L, Li Y, Zhou X, She S, Wang X, Tian Y, Jen AKY, Xu B. Highly Stable and Efficient Perovskite Solar Cells with 22.0% Efficiency Based on Inorganic–Organic Dopant-Free Double Hole Transporting Layers. *Adv Funct Mater*. 2020;30(28):1–8. <https://doi.org/10.1002/adfm.201908462>.
  62. Pitchaiya S, Natarajan M, Santhanam A, Asokan V, Yuvapragasam A, Ramakrishnan VM, Palanisamy SE. A review on the classification of organic/inorganic/carbonaceous hole transporting materials for perovskite solar cell application. *Arab J Chem*. 2020;13(1):2526–2557. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.06.006>.
  63. Li S, Cao YL, Li WH, Bo ZS. A brief review of hole transporting materials commonly used in perovskite solar cells. *Rare Met*. 2021;10:2712–2729. <https://doi.org/10.1007/s12598-020-01691-z>.
  64. Yang D. High efficiency planar-type perovskite solar cells with negligible hysteresis using EDTA-complexed SnO<sub>2</sub>. *Nat Commun*. 2018;1. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05760-x>.

65. Ašmonta S. Photoelectric Properties of Planar and Mesoporous Structured Perovskite Solar Cells. *Materials* (Basel). 2022;15(12). <https://doi.org/oi:10.3390/ma15124300>.
66. Gong C, Tong K, Huang K, Li H, Huang H, Zhang J, Yang J. Flexible Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells Fabricated via Sequential Roll-to-Roll Microgravure Printing and Slot-Die Coating Deposition. *Sol RRL*. 2020;4(2):1–9. <https://doi.org/10.1002/solr.201900204>.
67. Lemercier T, Perrin L. *Materials Advances* 17 % efficiency : processing and characterization. 2021;3:7907–7921. <https://doi.org/10.1039/d1ma00819f>.
68. Hosseinezhad M. Review on Dye-sensitized Solar Cells Performance Contain Transparent Polymers. *J Stud Col World*. 2020;10(1):1–10. <https://doi.org/10.1001/1.22517278.1399.10.1.2.3> (In Persian).
69. Shariatinia Z. Recent progress in development of diverse kinds of hole transport materials for the perovskite solar cells: A review. *Renew Sustain Energy Rev*. 2020;119:109608. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109608>.
70. Ibn-Mohammed T. Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies. *Renew Sustain Energy Rev*. 2017;80:1321–1344. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.095>.
71. Collavini S, Cabrera-espinoza A, Delgado JL. Organic Polymers as Additives in Perovskite Solar Cells. 2021. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.1c00665>.
72. Zhao Y. polymer scaffold for self-healing perovskite solar cells. *Nat Commun*. 2016;1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms10228>.
73. Jung HI, Zhang F, Song J, Hu R, Xiang Y, He J, Hao Y, Lian J, Zhang B, Zeng P, Qu J. interfacial Passivation of the p-Doped Hole-Transporting. *Small*. 2018;1–10. <https://doi.org/10.1002/sml.201704007>.
74. Rao H, Ye S, Sun W, Yan W, Li Y, Peng H. 19 % efficiency achieved in CuO x -based inverted CH<sub>3</sub> NH<sub>3</sub> PbI<sub>3-x</sub> Cl x solar cells by an effective Cl doping method. *Nano Energy*. 2016;0–23. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.06.044>.
75. Liu X. Highly Efficient and Stable Carbon-Based Planar Perovskite Solar Cells Employing Ni-doped Rutile TiO<sub>2</sub> as Electron Transport Layer. *Nano Energy*. 2018;50:201–211. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.05.031>.
76. Zhang F. perovskite solar cells and its doping. *Adv Mater*. 2018;30(38):1–9. <https://doi.org/10.1002/adma.2018.03244>.
77. Cao J, Wu B, Peng J, Feng X, Li C, Tang Y. Copper-copper iodide hybrid nanostructure as hole transport material for efficient and stable inverted perovskite solar cells. *Sci China Chem*. 2019;62(3):363–369. <https://doi.org/10.1007/s11426-018-9386-5>.
78. Zheng X, Hou Y, Bao C, Yin J, Yuan F, Huang Z, Song K, Liu J, Troughton J, Gasparini N, Zhou C, Lin Y, Xue D, Chen B, Johnston AK, Wei N, Hedhili MN, Wei M, Alsalloum AY, Maity P, Turedi B, Yang C, Baran D, Anthopoulos TD. Managing grains and interfaces via ligand anchoring enables 22.3%-efficiency inverted perovskite solar cells. *Nat Energy*. 2020;5(2):131–140. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0538-4>.
79. Feleki BT, Bouwer RKM, Zardetto V, Wienk MM, Janssen RAJ. Perovskite Solar Cells on Steel Substrates. 2022. <https://doi.org/10.1021/acsaem.2c00291>.
80. Zhang Y, Elawad M, Yu Z, Jiang X, Lai J, Sun L. Enhanced performance of perovskite solar cells with P3HT hole-transporting materials: Via molecular p-type doping. *RSC Adv*. 2016;6(110):108888–108895. <https://doi.org/10.1039/c6ra21>
81. Yang WS, Park B, Jung E, Jeon NJ, Kim Y, Lee DU, Shin SS, Seo J, Kim E, Noh JH, Seok SI. Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells. *Science*. 2017;356(6345):1376–1379. <https://doi.org/10.1126/science.aan2301>.
82. Seo JY, Kim H, Akin S, Stojanovic M, Simon E, Fleischer M, Hagfeldt A, Zakeeruddin SM, Graetzel M. Novel p-dopant toward highly efficient and stable perovskite solar cells. *Energy Environ Sci*. 2018;11(10):2985–2992. <https://doi.org/10.1039/c8ee01500g>.
83. Liu C, Zhou X, Chen S, Zhao X, Dai S, Xu B. Hydrophobic Cu<sub>2</sub>O Quantum Dots Enabled by Surfactant Modification as Top Hole-Transport Materials for Efficient Perovskite Solar Cells. *Adv Sci*. 2019;7:1–9. <https://doi.org/10.1002/advs.201801169>.
84. Gao J, Liao C, Guo Y, Zhou D, Zeng Z, Cai C. The effect of methyl ammonium chloride doping for perovskite solar cells on structure, crystallization and power conversion efficiency. *Mod Phys Lett*. 2021;35(5):1–11. <https://doi.org/10.1142/S0217984921500962>.
85. Zhu XD, Ma X, Wang Y, Li Y, Gao C, Wang Z, Jiang Z, Liao LS. Hole-Transporting Materials Incorporating Carbazole into Spiro-Core for Highly Efficient Perovskite Solar Cells. *Adv Funct Mater*. 2019;29(5):1–8. <https://doi.org/10.1002/adfm.201807094>.
86. Jiang Q. Surface passivation of perovskite film for efficient solar cells. *Nat Photonics*. 2019;13(7):460–466. <https://doi.org/10.1038/s41566-019-0398-2>.
87. Han Y, Zhao H, Duan C, Yang S, Yang Z, Liu Z, Liu S. Controlled n-Doping in Air-Stable CsPbI<sub>2</sub>Br Perovskite Solar Cells with a Record Efficiency of 16.79%. *Adv Funct Mater*. 2020;30(12):1–8. <https://doi.org/10.1002/adfm.201909972>.
88. Kajal P, Ghosh K, Powar S. Manufacturing Techniques of Perovskite Solar Cells Manufacturing Techniques of Perovskite Solar Cells. 2018;10:720. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7206-2>.
89. Han GS, Kim J, Bae S, Han S, Kim YJ, Gong Y, Lee P, Ko MJ, Jung HS. Spin-Coating Process for 10 cm × 10 cm Perovskite Solar Modules Enabled by Self-Assembly of SnO<sub>2</sub> Nanocolloids. *ACS Energy Lett*. 2019;10:953. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.9b00953>.
90. Peng E. with doctor-bladed active layers Energy & Environmental Science trihalide perovskite solar cells with doctor-bladed. *Energy Environ Sci*. 2015;390. <https://doi.org/10.1039/C4EE03907F>.
91. Lau CJ, Deng X, Ma Q, Zheng J, Yun JS, Green MA, Huang S, Ho-Baillie AWY. CsPbI<sub>2</sub>Br Perovskite Solar Cell by Spray Assisted Deposition. *ChemPhysChem*. 2016;33. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.6b00341>.
92. Kim YY, Yang TY, Suhonen R, Kempainen A, Hwang K, Jeon NJ, Seo J. Roll-to-roll gravure-printed flexible perovskite solar cells using eco-friendly antisolvent bathing with wide processing window. *Nat Commun*. 2020;11:1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18940-5>.
93. Patidar R, Burkitt D, Hooper K, Richards D, Watson T. Slot-die coating of perovskite solar cells: An overview. *Mater Today Commun*. 2020;22:100808. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100808>.

94. Jeon NJ, Noh JH, Kim YC, Yang WS, Ryu S, Seok SI. Inorganic-organic hybrid perovskite solar cells. 2014;1-7. <https://doi.org/10.1038/NMAT4014>.
95. Yang S, Fu W, Zhang Z, Chen H, Li C. Efficiency, stability and lead-free perovskite. 2017;11462-11482. <https://doi.org/10.1039/c7ta00366h>.
96. Docampo P, Ball JM, Darwich M, Eperon GE, Snaith HJ. Efficient organometal trihalide perovskite planar-heterojunction solar cells on flexible polymer substrates. *Nat Commun.* 2013;4:1-6. <https://doi.org/10.1038/ncomms3761>.
97. Jeng JY. CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> perovskite/fullerene planar-heterojunction hybrid solar cells. *Adv Mater.* 2013;25(27):3727-3732. <https://doi.org/10.1002/adma.201301327>.
98. Chang CY, Huang YC, Tsao CS, Su WF. Formation Mechanism and Control of Perovskite Films from Solution to Crystalline Phase Studied by in Situ Synchrotron Scattering. *ACS Appl Mater Interfaces.* 2016;8(40):26712-26721. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b07468>.
99. Mei A. A hole-conductor-free, fully printable mesoscopic perovskite solar cell with high stability. *Science.* 2014;345(6194):295-298. <https://doi.org/10.1126/science.1254763>.
100. Niu G, Guo X, Wang L. Review of recent progress in chemical stability of perovskite solar cells. *J Mater Chem A.* 2015;17:8970-8980. <https://doi.org/10.1039/c4ta04994b>.
101. Li D, Zhang D, Lim KS, Hu Y, Rong Y, Mei A, Park NG, Han H. A review on Scaling Up Perovskite Solar Cells. *Adv Funct Mater.* 2021;31(12):1-27. <https://doi.org/10.1002/adfm.202008621>.
102. Razz S, Giakomo F. Perovskite solar cells and large area modules (100 cm<sup>2</sup>) based on an air flow-assisted PbI<sub>2</sub> blade coating deposition process. *J Power Sources.* 2015;277:286-291. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.12.008>.
103. Chang JH, Liu K, Lin SY, Yuan YB, Zhou CH, Yang JL. Solution-processed perovskite solar cells. *J Cent South Univ.* 2020;27(4):1104-1133. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04289>.
104. Whitaker JB, Kim DH, Larson BW, Zhang F, Berry JJ, van Hest MF, Zhu K. Scalable slot-die coating of high performance perovskite solar cells. *Sustain Energy Fuels.* 2018;2(11):2442-2449. <https://doi.org/10.1039/c8se00368h>.
105. Liu X, Xia X, Cai Q, Cai F, Yang L. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells with weak hysteresis fabricated via bar coating. *Sol Energy Mater Sol Cells.* 2017;159:412-417. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.09.046>.
106. Yang J, Vak D, Clark N, Subbia J. Organic photovoltaic modules fabricated by an industrial gravure printing proofer. *Sol Energy Mater Sol Cells.* 2013;109:47-55. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.10.018>.
107. Hu Q, Wu H, Sun J, Yan D, Gao Y, Yang J. Large-area perovskite nanowire arrays fabricated by large-scale roll-to-roll micro-gravure printing and doctor blading. *Nanoscale.* 2016;8(9):5350-5357. <https://doi.org/10.1039/c5nr08277c>.
108. Yang P, Fan HJ. Inkjet and Extrusion Printing for Electrochemical Energy Storage: A Minireview. *Adv Mater Technol.* 2020;5(10):1-11. <https://doi.org/10.1002/admt.202000217>.
109. Wei Z, Chen H, Yan K, Yang S. Inkjet Printing and Instant Chemical Transformation of a CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>/Nanocarbon Electrode and Interface for Planar Perovskite Solar Cells. *Angew Chemie.* 2014;126(48):13455-13459. <https://doi.org/10.1002/ange.201408638>.
110. Wang Y, Duan C, Lv P, Ku Z, Lu J, Huang F, Cheng Y. Printing strategies for scaling-up perovskite solar cells. *Natl Sci Rev.* 2021. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab075>.
111. Bruening K, Dou B, Simonaitis J, Lin YY, van Hest MFAM, Tassone CJ. Scalable Fabrication of Perovskite Solar Cells to Meet Climate Targets. *Joule.* 2018;2(11):2464-2476. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.09.014>.
112. Cheng ZY, Wang HF, Quan ZW, Lin CK, Lin J, Han YC. Layered organic-inorganic perovskite-type hybrid materials fabricated by spray pyrolysis route. *J Cryst Growth.* 2005;285(3):352-357. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.08.031>.
113. Barrows AT, Pearson AJ, Kwak CK, Dunbar ADF, Buckley AR, Lidzey DG. Efficient planar heterojunction mixed-halide perovskite solar cells deposited via spray-deposition. *Energy Environ Sci.* 2014;7(9):2944-2950. <https://doi.org/10.1039/c4ee01546k>.
114. Sansoni S, Bastiani MD, Aydin E, Ugur E, Isikgor FH, Zahrani A, Lamberti F, Laquai F, Meneghetti M, De Wolf S. Eco-Friendly Spray Deposition of Perovskite Films on Macroscale Textured Surfaces. *Adv Mater Technol.* 2020;5(2):1-6. <https://doi.org/10.1002/admt.201901009>.
115. Alanazi TI. Current spray-coating approaches to manufacture perovskite solar cells. *Results Phys.* 2023;106144. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2022.106144>.
116. Jamal MS, Bashar MS, Hassan AKM, Almutairi ZA, Karim MR. Fabrication techniques and morphological analysis of perovskite absorber layer for high-efficiency perovskite solar cell: A review. *Renew Sustain Energy Rev.* 2018;98:469-488. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.016>.
117. Zhang T, Yang M, Zhao Y, Zhu K. Controllable Sequential Deposition of Planar CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> Perovskite Films via Adjustable Volume Expansion. *Nano Lett.* 2015;15(6):3959-3963. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b00843>.
118. Liu M, Johnston MB, Snaith HJ. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition. *Nature.* 2013;501(7467):395-398. <https://doi.org/10.1038/nature12509>.
119. Chen CW, Kang HW, Hsiao SY, Yang PF, Chiang KM, Lin HW. Efficient and Uniform Planar-Type Perovskite Solar Cells by Simple Sequential Vacuum Deposition. *Adv Mater.* 2014;38:6647-6652. <https://doi.org/10.1002/adma.201402461>.
120. Wilkinson B, Chang NL, Green MA, Ho-Baillie AWY. Scaling limits to large area perovskite solar cell efficiency. *Prog Photovoltaics Res Appl.* 2018;26(8):659-674. <https://doi.org/10.1002/pip.3035>.
121. Galagan Y, Coenen EWC, Verhees WJH, Andriessen R. Towards the scaling up of perovskite solar cells and modules. *J Mater Chem A.* 2016;15:5700-5705. <https://doi.org/10.1039/c6ta01134a>.
122. Qiu L, He S, Jiang Y, Qi Y. Chemical vapor deposition. 2021;22759-22780. <https://doi.org/10.1039/d1ta06459b>.



123. Tian C, Kochiss K, Castro E, Betancourt-Solis G, Han H, Echegoyen L. A dimeric fullerene derivative for efficient inverted planar perovskite solar cells with improved stability. *J Mater Chem A*. 2017;5(16):7326–7332. <https://doi.org/10.1039/c7ta00362e>.
124. Li K, Xiao J, Yu X, Bu T, Li T, Deng X, Liu S, Wang J, Ku Z, Zhong J, Huang F, Zhong Z, Peng Y, Li W, Cheng YB. Influence of Hot Spot Heating on Stability of Large Size Perovskite Solar Module with a Power Conversion Efficiency of 4%. *ACS Appl Energy Mater*. 2018;1(8):3565–3570. <https://doi.org/10.1021/acsaeem.8b00803>.
125. Liu Q, Zhao Y, Ma Y, Sun X, Ge W, Fang Z, Bai H, Tian Q, Fan B, Zhang T. A mixed solvent for rapid fabrication of large-area methylammonium lead iodide layers by one-step coating at room temperature. *J Mater Chem A*. 2019;7(31):18275–18284. <https://doi.org/10.1039/c9ta06084g>.
126. Wu WQ, Yang Z, Rudd PN, Shao Y, Dai X, Wei H, Zhao J, Fang Y, Wang Q, Liu Y, Deng Y, Xiao X, Feng Y, Huang J. Bilateral alkylamine for suppressing charge recombination and improving stability in blade-coated perovskite solar cells. *Sci Adv*. 2019;5(3):1–10. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav8925>.
127. Küffner J, Hanisch J, Wahl T, Zillner J, Ahlswede E, Powalla M. One-Step Blade Coating of Inverted Double-Cation Perovskite Solar Cells from a Green Precursor Solvent. *ACS Appl Energy Mater*. 2021;4:11700–11710. <https://doi.org/10.1021/acsaeem.1c02425>.
128. Bi Z, Xu X, Chen X, Zhu Y, Liu C, Yu H, Zheng Y, Troshin PA, Guerrero A, Xu G. High-performance large-area blade-coated perovskite solar cells with low ohmic loss for low lighting indoor applications. *Chem Eng J*. 2022;446:137164. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137164>.
129. Di Giacomo F. Up-scalable sheet-to-sheet production of high efficiency perovskite module and solar cells on 6-in. substrate using slot die coating. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2018;10:59. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.11.010>.
130. Kim JE, Kim SS, Zuo C, Gao M, Vak D, Kim DY. Humidity-Tolerant Roll-to-Roll Fabrication of Perovskite Solar Cells via Polymer-Additive-Assisted Hot Slot Die Deposition. *Adv Funct Mater*. 2019;29(26):1–9. <https://doi.org/10.1002/adfm.201809194>.
131. Zhang A, Fang G. Microscopic perovskite solar mini-modules fabricated with slot-die coating. *Nano Energy*. 2020;74:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104842>.
132. Fievez M. Slot-die coated methylammonium-free perovskite solar cells with 18% efficiency. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2021;230. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111189>.
133. Xu K, Ashouri A, Peng A, Köhnen ZW, Hempel E, Akhundova H, Marquez F, Tockhorn JA, Shargaieva P, Ruske O, Zhang F, Dagar J, Stannowski R, Unold B, van Abou-Ras T, Unger D, Korte E, Liu S, Albrecht S. Slot-Die Coated Triple-Halide Perovskites for Efficient and Scalable Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells. *ACS Energy Lett*. 2022;7(10):3600–3611. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.2c01506>.
134. Remeika M, Raga SR, Zhang S, Qi Y. Transferrable optimization of spray-coated PbI<sub>2</sub> films for perovskite solar cell fabrication. *J Mater Chem A*. 2017;5(12):5709–5718. <https://doi.org/10.1039/c6ta09922j>.
135. Leijtens T, Ro Prasanna, Bush KA, Eperon GE, Raiford JA, Parker AG, Wolf EJ, Swifter SA, Boyd CC, Wang HP, Toney MF, Bent SF, McGehee MD. Free-lead halide perovskites with improved thermal and air stability for efficient all-perovskite tandem solar cells. *Sustain Energy Fuels*. 2018;2(11):2450–2459. <https://doi.org/10.1039/c8se00314a>.
136. Park M, Cho W, Lee G, Hong SC, Kim M. Highly Reproducible Large-Area Perovskite Solar Cell Fabrication via Continuous Megasonic Spray Coating. 2019;4:1–7. <https://doi.org/10.1002/sml.201804005>.
137. Kristensen F, Sverre J, Bustad S. A Cost-Utility Analysis of Insulin Glargine (Lantus) in the Treatment of Patients With Type 1 Diabetes. *Value Health*. 2003;6(6):682. [https://doi.org/10.1016/s1098-3015\(10\)61744-5](https://doi.org/10.1016/s1098-3015(10)61744-5).
138. Hamukwaya SL, Hao H, Zhao Z, Xing J, Li H, Mashingaidze MM. A Review of Recent Developments in Preparation Methods for Large-Area Perovskite Solar Cells. *Coatings*. 2022;12(2). <https://doi.org/10.3390/coatings12020252>.
139. Karunakaran SK, Arumugam GM, Yang W, Ge S, Khan SN, Lin X, Yang G. Recent progress in inkjet-printed solar cells. *J Mater Chem A*. 2019;7(23):13873–13902. <https://doi.org/10.1039/c9ta03155c>.
140. Pendyala NK, Magdassi S, Etgar L. Fabrication of Perovskite Solar Cells with Digital Control of Transparency by Inkjet Printing. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2021. <https://doi.org/10.1021/acsmi.1c04407>.
141. Näsström H, Shargaieva O, Becker P, Mathies F, Zizak I, Schröder VR, List-Kratochvil EJW, Unold T, Unger E. Combinatorial inkjet printing for compositional tuning of metal-halide perovskite thin films. *J Mater Chem A*. 2022;8588–8596. <https://doi.org/10.1039/d1ta08841f>.
142. Bae SR, Heo DY, Kim SY. Recent progress of perovskite devices fabricated using thermal evaporation method: Perspective and outlook. *Mater Today Adv*. 2022;100:232. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2022.100232>.
143. Jiang Y, Remeika M, Zhao Y, Juarez-Perez EJ, Qiu L, Liu Z, Kim T, et al. Large-Area Perovskite Solar Modules: Combination of Hybrid CVD and Cation Exchange for Upscaling Cs-Substituted Mixed Cation Perovskite Solar Cells with High Efficiency and Stability. *Adv Funct Mater*. 2018;28(1):187–197. <https://doi.org/10.1002/adfm.201870007>.
144. Jiang Y, Remeika M, Hu Z, Juarez-Perez EJ, Qiu L, Liu Z, Kim T, Ono LK, Son D, Hawash Z, Leyden MR, Wu Z, Meng L, Hu J, Qi Y. Negligible-Pb-Waste and Upscalable Perovskite Deposition Technology for High-Operational-Stability Perovskite Solar Modules. *Adv Energy Mater*. 2019;9(13):1–12. <https://doi.org/10.1002/aenm.201803047>.
145. Zuo C, Vak D, Angmo D, Ding L, Gao M. One-Step Roll-to-Roll Air Processed High Efficiency Perovskite Solar. *Nano Energy*. 2018;18:30045–4. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.01.037>.
146. Richards D, Burkitt D, Patidar R, Beynon D, Watson T. Predicting a process window for the roll-to-roll deposition of solvent-engineered SnO<sub>2</sub> in perovskite solar cells. *Mater Adv*. 2022;8588–8596. <https://doi.org/10.1039/d2ma00841f>.
147. Chandrasekhar PS, Chapagain S, Blake M, Armstrong PJ, Grapperhaus C, Druffel TL. Rapid scalable fabrication of

roll-to-roll slot-die coated flexible perovskite solar cells using intense pulse light annealing. Sustain Energy Fuels.

2022;5316–5323. <https://doi.org/10.1039/d2se00911k>.

**How to cite this article:**

Fallahdoust Moghadam S, Gilani N, Yousefi AA. A Review of Recent Progress in Fabrication of Perovskite Solar Cells. J Stud color world. 2023;13(2): 159-184. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1402.13.2.3.7> [In Persian].