

بهبود عملکرد سلول‌های خورشیدی پروسکایتی از طریق مهندسی ضدحلال

چکیده

در پژوهش حاضر، اثر ضدحلال‌های اتیل‌استات، کلروبنزن و دی‌اتیل اتر بر کیفیت لایه پروسکایت و عملکرد سلول‌های خورشیدی مبتنی بر آنها بررسی شد. لایه‌های پروسکایت متبلور شده با این ضدحلال‌ها به کمک روش‌های مشخصه‌یابی ساختاری، مورفولوژیکی و نوری ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که انتخاب ضدحلال نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود ویژگی‌های لایه جاذب دارد. در میان نمونه‌های بررسی‌شده، اتیل‌استات منجر به تشکیل لایه‌ای با بلورینگی بالاتر، یکنواختی مورفولوژیکی بهتر و توانایی جذب نوری بهبودیافته شد. نتایج عملکرد فتوولتائیک سلول‌ها نشان داد که استفاده از اتیل‌استات منجر به دستیابی به بازده تبدیل انرژی ۱۲/۶۷ درصد شد که در مقایسه با کلروبنزن (۱۱/۱۶ درصد) و دی‌اتیل اتر (۴/۹۳ درصد)، به ترتیب بهبود حدود ۱۳ و ۱۵۶ درصدی را نشان می‌دهد. همچنین، بیشینه بازده کوانتومی خارجی برای سلول بهینه‌شده با اتیل‌استات به حدود ۸۰ درصد رسید که گویای اثربخشی بالاتر این ضدحلال در کاهش تله‌های ساختاری و بهبود انتقال بار است.

واژه‌های کلیدی: سلول خورشیدی پروسکایتی، لایه جاذب نور، تبلور ضدحلال، اتیل‌استات.

Enhancing the Performance of Perovskite Solar Cells through Antisolvent Engineering

ABSTRACT

In the present study, the impact of antisolvents—ethyl acetate, chlorobenzene, and diethyl ether—on the quality of the perovskite layer and the performance of the resulting solar cells was investigated. The perovskite layers, crystallized using these antisolvents, were evaluated through structural, morphological, and optical characterization techniques. The results demonstrate that the choice of antisolvent plays a crucial role in improving the properties of the absorber layer. Among the investigated samples, ethyl acetate led to the formation of a layer with higher crystallinity, improved morphological uniformity, and enhanced light absorption capability. Photovoltaic performance results indicated that the device optimized with ethyl acetate achieved a power conversion efficiency of 12.67%, representing an improvement of approximately 13% and 156% compared to those prepared with chlorobenzene (11.16%) and diethyl ether (4.93%), respectively. Furthermore, the maximum external quantum efficiency for the ethyl acetate-optimized cell reached approximately 80%, indicating the superior effectiveness of this antisolvent in reducing structural defects and facilitating charge transfer.

Keywords: Perovskite solar cells, light-absorbing layer, antisolvent crystallization, ethyl acetate.

در سال‌های اخیر سلول‌های خورشیدی پروسکایتی^۱ به عنوان یک فناوری نوظهور و تحول‌آفرین در حوزه فتوولتائیک، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند. پیشرفت‌های چشمگیر علمی و قابلیت تولید آن‌ها با هزینه‌های نسبتاً پایین، این دسته از سلول‌ها را در کانون تحقیقات انرژی‌های تجدیدپذیر قرار داده است. در کمتر از یک دهه، بازدهی تبدیل انرژی^۲ آن‌ها به طرز چشمگیری افزایش یافته و به رکورد ۲۷ درصد رسیده است. علاوه بر این، پیکربندی‌های تاندم^۳ با تلفیق با سلول‌های سیلیکونی، به بازدهی فراتر از ۳۰ درصد دست یافته‌اند [۱]. این سلول‌ها علاوه بر کارایی بالا، از مزایای دیگری نظیر فرآیندهای ساخت ساده، دسترسی به مواد اولیه ارزان و فراوان و ظرفیت کاربرد در طیف وسیعی از فناوری‌ها از جمله اینترنت اشیا^۴، فتوولتائیک ترکیبی با ساختمان^۵، ادوات الکترونیکی پوشیدنی و کاربردهای فضایی برخوردارند [۲].

ساختار یک سلول خورشیدی پروسکایتی متعارف شامل چندین لایه عملکردی است: زیرلایه رسانای اکسید قلع آلایش‌شده با فلئور (FTO)^۶، لایه انتقال‌دهنده الکترون^۷ مانند تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) یا قلع دی‌اکسید (SnO_2)، لایه جاذب پروسکایت هالیدی آلی-معدنی، لایه انتقال‌دهنده حفره^۸ و یک الکتروود فلزی (مانند طلا یا کربن) به عنوان کاتد. تحت تابش نور، لایه پروسکایت فوتون‌ها را به طور مؤثر جذب کرده و اکسایتون‌ها^۹ را تولید می‌کند. به دلیل ساختار نواری، اکسایتون‌ها به سرعت به حامل‌های بار آزاد (الکترون و حفره) تفکیک می‌شوند. سپس، لایه‌های انتقال‌دهنده الکترون و انتقال‌دهنده حفره به ترتیب الکترون‌ها را به سمت زیرلایه شیشه‌ای و حفره‌ها را به سمت کاتد هدایت می‌کنند که این فرآیند منجر به جداسازی مؤثر بار و تولید جریان الکتریکی خارجی می‌شود [۳].

روش‌های ساخت سلول‌های خورشیدی پروسکایتی معمولاً شامل انحلال مواد پیش‌ساز در حلال‌های قطبی نظیر دی‌متیل‌فرمامید [۴]، دی‌متیل‌سولفوکسید [۵] و گاما-بوتیرولاکتون [۶] است. پس از رسوب محلول پیش‌ساز بر روی زیرلایه، حذف سریع و کنترل‌شده حلال برای بهینه‌سازی سینتیک هسته‌زایی و رشد بلورهای پروسکایت ضروری است [۷]. این مرحله به تشکیل لایه‌های پروسکایت با مورفولوژی بهبودیافته، اندازه دانه بزرگ‌تر و یکنواختی بیشتر کمک می‌کند. چنین ویژگی‌هایی به نوبه خود منجر به کاهش چگالی نقص و در نتیجه افزایش چشمگیر عملکرد فتوولتائیک می‌گردد [۸]. به همین منظور، استفاده از ضدحلال‌ها^{۱۰} به عنوان یک خط‌مشی مؤثر برای کنترل مورفولوژی لایه پروسکایت به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعات نشان داده‌اند که سازگاری ضدحلال با حلال اصلی و حلالیت پیش‌سازهای آلی در ضدحلال، نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی لایه ایفا می‌کند. سازوکار این فرآیند بر پایه کاهش ناگهانی حلالیت پیش‌ماده‌ها در حلال اصلی و القای سریع حالت فوق‌اشباع در فیلم تر استوار است که منجر به رشد دانه

کنترل شده و کاهش تشکیل فازهای ناخواسته می شود [۹]. ضدحلال های متنوعی جهت بهبود کیفیت لایه در فرآیند ساخت گزارش شده اند [۱۰]، [۱۱]، [۱۲] و [۱۳]. با بررسی پیشینه پژوهش ها مشخص می شود که عمدتاً کلروبنزن به عنوان ضدحلال مرجع مورد استفاده قرار می گیرد [۱۴]. با این حال، با توجه به قابلیت استفاده طیف گسترده ای از ضدحلال ها در این حوزه، دو گزینه دی اتیل اتر و اتیل استات به واسطه مزایای متعدد، ظرفیت بالاتری برای جایگزینی با گزینه های متداول نشان می دهند. این حلال ها نه تنها از نظر سمیت و اثرات زیست محیطی نسبت به حلال های آروماتیک و هالوژنه برتری دارند [۱۵]، [۱۶] و [۱۷]، بلکه به دلیل نرخ تبخیر مطلوب، کنترل دقیق تری بر فرآیند فوق اشباع سازی و تبلور فراهم می کنند [۱۸] و [۱۹]. افزون بر این، سازگاری مطلوب این دو ماده با پارامترهای حلالیت، استخراج کارآمد حلال اصلی را بدون آسیب به یکپارچگی ساختار لایه تضمین می نماید [۲۰] و [۲۱].

با توجه به نقش محوری ضدحلال ها در کنترل مورفولوژی و خواص نوری لایه پروسکایت و تأثیر مستقیم آن بر عملکرد سلول خورشیدی، پژوهش حاضر با هدف بررسی و مقایسه اثر دو ضدحلال اتیل استات و دی اتیل اتر در مقایسه با کلروبنزن بر مشخصه های فتوولتائیکی سلول های خورشیدی پروسکایتی انجام می شود. در این مطالعه، به طور خاص، تأثیر ضدحلال بر مورفولوژی، خواص نوری، باند شکاف^{۱۱} و خواص جذب نوری لایه پروسکایت بررسی خواهد شد. همچنین عملکرد فتوولتائیک سلول ها با اندازه گیری و تحلیل پارامترهای چگالی جریان مدار کوتاه^{۱۲}، ولتاژ مدار باز^{۱۳}، فاکتور پرکنندگی^{۱۴}، بازدهی تبدیل فوتون به جریان و بازدهی کوانتومی^{۱۵} مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. نتایج حاصل از این بررسی می تواند انتخاب ضدحلال کارآمد برای تولید نسل بعدی سلول های خورشیدی پروسکایتی با عملکرد بهبود یافته کمک کند.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه

کلیه مواد شیمیایی مورد استفاده در این پژوهش بدون هیچ گونه خالص سازی بیشتر مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲- مراحل ساخت

به منظور آماده سازی فتوآندها^{۱۶} ابتدا زیرلایه های شیشه ای رسانای اکسید قلع آلاینش شده با فلئوئر (شرکت دای سل) از طریق فرآیند اچینگ شیمیایی، الگودهی شدند^{۱۷}. در این راستا، نواحی مورد نظر با استفاده از چسب پوشانده شده و سپس پودر روی (شرکت مرک، خلوص ۹۵ درصد) به صورت یکنواخت بر روی سطوح در معرض واکنش قرار گرفت. پس از افزودن محلول ۲ مولار اسید کلریدریک (شرکت مرک، خلوص ۳۷ درصد) بر روی پودر، واکنش شیمیایی به مدت ۶۰ ثانیه ادامه یافت و در نهایت، زیرلایه ها با آب مقطر شست و شو داده شدند.

سپس، زیرلایه‌های شیشه‌ای به مدت ۱۰ دقیقه تحت تابش اوزون-فرابنفش قرار گرفتند. در ادامه، این زیرلایه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد آنیل^{۱۸} شدند تا باقیمانده‌های آلی حذف گردند.

برای آماده‌سازی لایه‌های انتقال‌دهنده الکترون، نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید با قطر متوسط ۲۰ نانومتر، با نسبت وزنی ۱ به ۳/۵ در اتانول (شرکت مرک، خلوص ۹۹/۹ درصد) پراکنده شدند. سوسپانسیون حاصله با استفاده از دستگاه پوششدهی چرخشی در سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۳۰ ثانیه روی زیرلایه شیشه‌ای نشاند. سپس، این لایه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد آنیل شدند [۲۲] و [۲۳].

محلول پیش‌ساز پروسکایت با ترکیب $\text{Cs}_{0.05}(\text{MA}_{0.17}\text{FA}_{0.83})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$ و غلظت ۱/۳ مولار، با افزودن ۵۰۷ میلی‌گرم سرب یدید (شرکت تی‌سی‌آی، خلوص ۹۹/۰ درصد)، ۸۱ میلی‌گرم سرب برمید (شرکت تی‌سی‌آی، خلوص ۹۹/۹۹ درصد)، ۱۷۱ میلی‌گرم فرم‌آمیدینیوم یدید (شرکت تی‌سی‌آی، خلوص ۹۹/۹۹ درصد) و ۲۲ میلی‌گرم متیل‌آمونیم برومید (شرکت گریت‌سل، خلوص ۹۹/۹۹ درصد) در یک سیستم حلال دوتایی متشکل از ۰/۸ میلی‌لیتر دی‌متیل‌فرمامید (شرکت سیگما، خلوص ۹۹/۸ درصد) و ۰/۲ میلی‌لیتر دی‌متیل‌سولفوکسید (شرکت سیگما، خلوص ۹۹/۷ درصد) تهیه شد. به طور جداگانه، ۱۳ میلی‌گرم سزیوم یدید (شرکت مرک، خلوص ۹۹/۹ درصد) ابتدا در حداقل حجم دی‌متیل‌سولفوکسید حل شده و سپس به سیستم حلال دوتایی اضافه گردید. محلول به هم زده شد تا تمامی اجزا به طور کامل حل شوند. برای نشان دادن محلول پروسکایت روی لایه‌های انتقال‌دهنده الکترون، از روش پوششدهی چرخشی^{۱۹} دو مرحله‌ای داخل گلوباکس تحت اتمسفر خنثی استفاده شد. پارامترها در مرحله اول ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۲ ثانیه و در مرحله دوم ۶۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۲۰ ثانیه تنظیم گردید. عملیات ضدحلال ۸ ثانیه قبل از پایان مرحله دوم از طریق تزریق ۲۵۰ میکرولیتر ضدحلال اتیل‌استات (شرکت سیگما، خلوص ۹۹/۸ درصد)، کلروبنزن (شرکت سیگما، خلوص ۹۹/۸ درصد) و دی‌اتیل اتر (شرکت سیگما، خلوص ۹۷/۵ درصد) انجام شد. سپس لایه‌های تهیه شده به مدت ۵ دقیقه در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند [۲۴].

به منظور ساخت سلول‌های خورشیدی، یک لایه انتقال‌دهنده حفره روی فوتوآندهای تهیه شده لایه‌نشانی شد. در این راستا، دو محول مجزا تهیه شد. محلول اول حاوی ۷/۸۶ گرم اسپایروامتات (شرکت سولارونیکس) در ۱ میلی‌لیتر کلروبنزن و محلول دوم حاوی ۰/۳۶ میلی‌گرم لیتیم بیس(تری‌فلوئورومتیل‌سولفونیل)‌آمید (شرکت سیگما خلوص ۹۷/۰ درصد) در ۱ میلی‌لیتر استونیتریل (شرکت مرک، خلوص ۹۹/۹ درصد) بودند. متعاقباً، دو محلول اول و دوم به نسبت حجمی ۱۷ به ۳ با هم ترکیب شدند. محلول نهایی با استفاده از فرآیند پوششدهی چرخشی به طور یکنواخت بر روی لایه‌های پروسکایت لایه‌نشانی شد. در نهایت، یک لایه نازک طلا به عنوان الکترود پستی (کاتد) سلول با روش تبخیر حرارتی بر روی انتقال‌دهنده حفره ایجاد شد [۲۴].

۲-۳- آزمون‌های مشخصه‌یابی

مورفولوژی فیلم‌های پروسکایت با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^{۲۰} مدل MIRA3TESCAN-XMU تحلیل شد. طیف‌های فوتولومینسانس حالت پایدار^{۲۱} با استفاده از طیف‌سنج Cary Eclipse جمع‌آوری گردیدند. برای ارزیابی عملکرد فتوولتائیک، سلول‌ها تحت تابش خورشیدی شبیه‌سازی شده استاندارد AM 1.5G قرار گرفتند. یک ماسک آلومینیومی آندایز شده، با روزنه به مساحت 0.09 سانتی‌متر مربع، برای تعریف ناحیه فعال هر سلول در طول اندازه‌گیری‌ها مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات جریان-ولتاژ^{۲۲} با استفاده از سورس‌متر PalmSense 2400، با نرخ پایش 50 میلی‌ولت بر ثانیه، ثبت شدند. اندازه‌گیری‌های بازده تبدیل فوتون به جریان برخوردی^{۲۳} توسط دستگاه Oriel IQE 200 انجام گرفت.

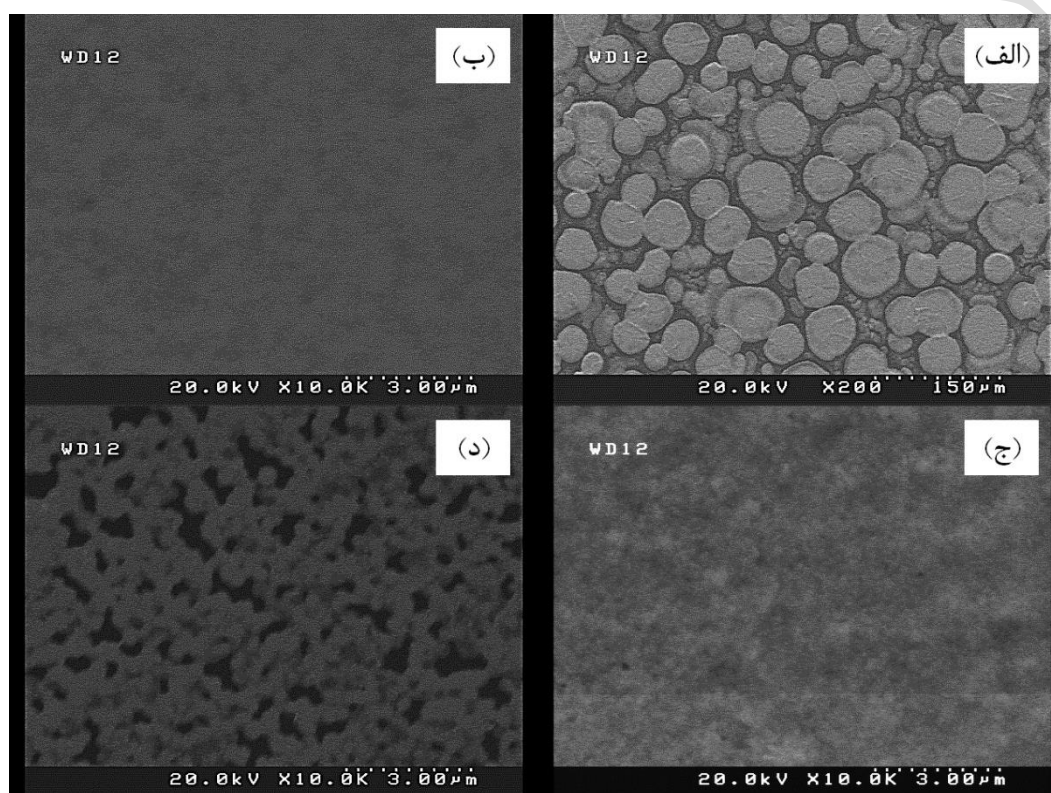
۳- نتایج و بحث

۳-۱- ریزساختار

بررسی‌های ریزساختاری انجام‌شده با میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی از سطح لایه‌های پروسکایت فتوآندهای لایه‌نشانی شده، تفاوت‌های چشمگیری را در مورفولوژی فیلم‌ها در پاسخ به عملیات‌های ضدحلال مختلف آشکار می‌سازد که این تفاوت‌ها مستقیماً با عملکرد فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی مرتبط هستند. شکل (۱-الف) مورفولوژی لایه پروسکایت را پیش از اعمال هرگونه عملیات ضدحلال (نمونه مرجع) به نمایش می‌گذارد. در این حالت، سطح لایه با دانه‌های پروسکایت نامنظم و اندازه‌های متفاوت مشخص می‌شود. وجود فضاهای خالی قابل توجه و عدم پیوستگی کامل بین دانه‌ها نشان‌دهنده یک پوشش متخلخل و غیریکنواخت است. این مورفولوژی نامطلوب، منجر به افزایش مراکز بازترکیب حامل‌های بار و کاهش جذب مؤثر فوتون‌ها می‌شود، که در نهایت به پایین‌ترین بازدهی توان تبدیل در میان تمامی نمونه‌ها می‌انجامد [۲۵]. در مقابل، استفاده از ضدحلال‌ها به طور قابل توجهی مورفولوژی لایه را بهبود می‌بخشد. در شکل (۱-ب)، لایه پروسکایت حاصل از عملیات با ضدحلال دی‌اتیل‌اتر، اگرچه چگالی بالاتری نسبت به نمونه مرجع از خود نشان می‌دهد، اما همچنان دارای تخلخل نسبتاً بالایی است و فضاهای خالی نامنظمی بین دانه‌ها مشاهده می‌شود.

تصویر سطح دو نمونه بلورینه شده با ضدحلال‌های کلروبنزن و اتیل‌استات در اشکال (۱-ب و ۱-ج) نشان‌دهنده مورفولوژی مشابه و بهبودیافته نسبت به نمونه دی‌اتیل‌اتر و نمونه مرجع است. در این دو نمونه، لایه پروسکایت دارای دانه‌های ریزتر، متراکم‌تر و با پیوستگی ساختاری بالاتری مشاهده می‌شود. این ویژگی‌های مورفولوژیکی، شامل افزایش تراکم دانه‌ها و کاهش چشمگیر فضاهای خالی بین‌دانه‌ای، نشان‌دهنده فرآیند بلورینه‌شدن کنترل‌شده‌تر در حضور این دو ضدحلال است. چنین ساختار یکنواخت و منسجمی می‌تواند از طریق کاهش

مسیرهای نفوذ و کاهش نواحی مرزی ناشی از تخلخل، ظرفیت بهبود در انتقال حامل‌های بار و جذب نوری را فراهم آورد. در مجموع، این مشاهدات نشان می‌دهد که انتخاب ضدحلال کلروبنزن و اتیل‌استات منجر به تشکیل لایه‌ای با پوشش کامل‌تر و کاهش نواحی نقص ساختاری در مقایسه با سایر نمونه‌ها می‌گردد که نتایج ارائه شده توسط ژانگ و همکارانش [۲۶]. همچنین لی و همکارانش [۲۷] گزارش کردند که ضدحلال حاوی افزودنی استونیتریل منجر به تهیه لایه‌های یکنواخت‌تر و متراکم‌تر با دانه‌های بزرگ‌تر و نقص کمتر می‌شود.

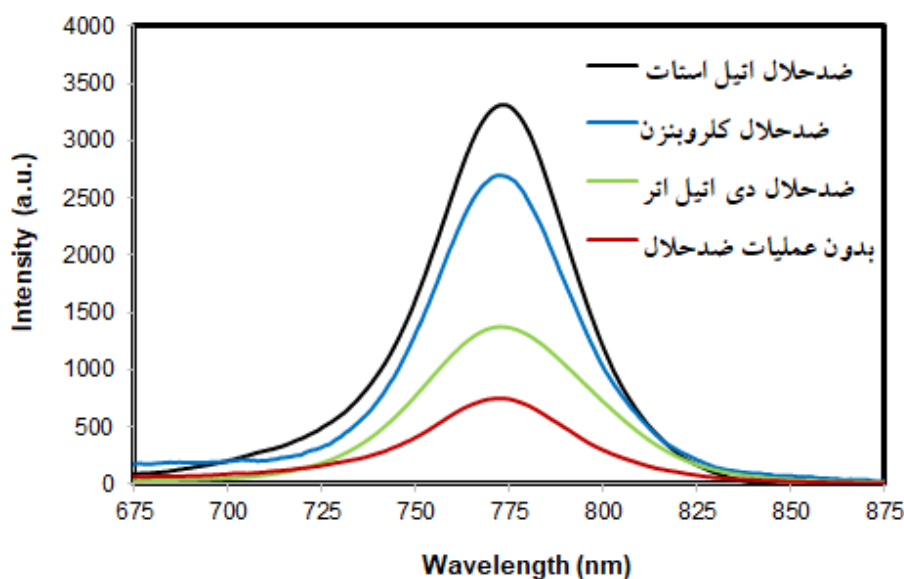


شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی از سطح لایه پروسکایت فتوآندهای لایه‌نشانی شده: (الف) قبل از عملیات ضدحلال، (ب) ضدحلال کلروبنزن، (ج) ضدحلال اتیل‌استات و (د) ضدحلال دی‌اتیل‌اتر.

۲-۳- طیف‌سنجی فتولومینسانس

در شکل (۲) طیف فتولومینسانس از لایه پروسکایت فتوآندهای تهیه شده با ضدحلال‌های مختلف آورده شده است. پیک اصلی PL در تمامی نمونه‌ها در حدود ۷۷۰ نانومتر مشاهده شد. با استفاده از روش تاک^{۲۴} انرژی باند شکاف تمامی لایه‌های تهیه شده حدود ۱/۶ الکترون-ولت محاسبه گردید که مطابق با مطالعات پیشین [۲۸] و [۲۹] نشان‌دهنده تشکیل فاز پروسکایت مورد نظر است.

تفاوت اصلی این نمونه‌ها در شدت گسیل PL نمایان است. از آنجا که شدت PL شاخص حساس برای ارزیابی کیفیت بلوری و میزان مراکز بازترکیب غیرتابشی است، تحلیل شدت‌ها نشان می‌دهد که نمونه تهیه شده با اتیل‌استات دارای بالاترین شدت گسیل است. این امر بیانگر کاهش مراکز بازترکیب غیرتابشی و افزایش بازدهی بازترکیب تابشی در این لایه است که با نتایج حاصل از تحلیل مورفولوژی نیز همخوانی دارد [۳۰]. تفاوت اصلی نمونه‌ها در شدت گسیل PL نمایان است. از آنجا که شدت PL شاخص حساس برای ارزیابی کیفیت بلوری و میزان مراکز بازترکیب غیرتابشی است، تحلیل شدت‌ها نشان می‌دهد که نمونه تهیه شده با اتیل‌استات دارای بالاترین شدت گسیل است. این امر بیانگر کاهش مراکز بازترکیب غیرتابشی و افزایش بازدهی بازترکیب تابشی در این لایه است که با نتایج حاصل از تحلیل مورفولوژی نیز همخوانی دارد. نمونه تهیه شده با کلروبنزن نیز شدت PL قابل توجهی را نشان داد که مؤید کیفیت ساختاری مطلوب لایه است [۳۱]. در مقابل، نمونه دی‌اتیل‌اتر و به‌ویژه نمونه مرجع، کمترین شدت PL را از خود نشان دادند. این کاهش شدت گسیل در این دو نمونه، با وجود تخلخل بیشتر و تمرکز بالاتر مراکز بازترکیب غیرتابشی (ناشی از نقص‌های ساختاری و عدم پیوستگی لایه) که در تحلیل‌های میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی مشاهده شد، همبستگی مستقیم دارد [۳۲].



شکل ۲- طیف فتولومینسانس از لایه پروسکایت فتوآندهای تهیه شده با ضدحلال‌های مختلف.

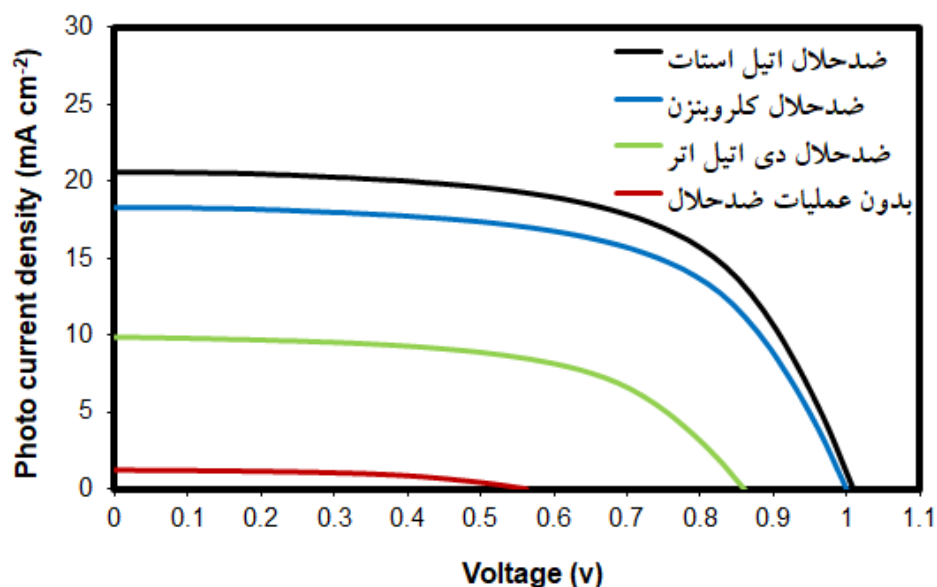
۳-۳- عملکرد فتوولتائیک

در شکل (۳) نمودارهای چگالی جریان مدار کوتاه بر حسب ولتاژ مدار باز سلول‌های خورشیدی مونتاژ شده برپایه ضدحلال‌های مختلف آورده شده است. به منظور کاهش خطا، به ازای هر ضدحلال، ۸ سلول خورشیدی مونتاژ شد که توزیع آماری پارامترهای فتوولتائیک (بازدهی، فاکتور پرکنندگی، چگالی جریان مدار کوتاه و

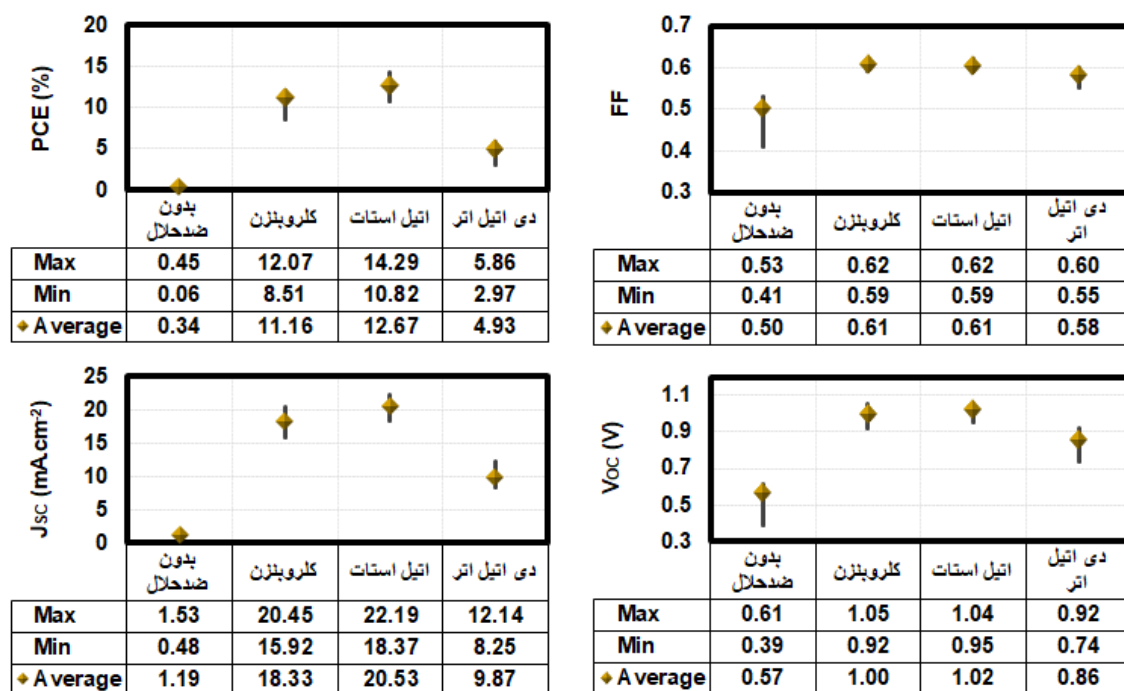
ولتاژ مدار باز) آنها در شکل (۴) نشان داده شده است. پارامترهای میانگین به عنوان معیار مقایسه در این پژوهش مدنظر قرار گرفته‌اند که در جدول (۱) خلاصه شده‌اند.

جدول ۱- مشخصات فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی مونتاژ شده بر پایه ضدحلال‌های مختلف

ضدحلال	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA cm ⁻²)	FF (درصد)	بازدهی (درصد)
بدون عملیات ضد حلال	۰/۵۷	۱/۱۹	۵۰	۰/۳۴
کلروبنزن	۱/۰۰	۱۸/۳۳	۶۱	۱۱/۱۶
اتیل استات	۱/۰۲	۲۰/۵۳	۶۱	۱۲/۶۷
دی اتیل اتر	۰/۸۶	۹/۸۷	۵۸	۴/۹۳



شکل ۳- نمودارهای چگالی جریان مدار کوتاه بر حسب ولتاژ مدار باز سلول‌های خورشیدی مونتاژ شده بر پایه ضدحلال‌های مختلف.



شکل ۴- توزیع آماری پارامترهای فتوولتائیک (بازدهی، فاکتور پرکنندگی، چگالی جریان مدار کوتاه و ولتاژ مدار باز) سلول‌های خورشیدی پروسکایتی ساخته شده (به ازای هر ضدحلال ۸ سلول خورشیدی مونتاژ شده است).

بررسی عملکرد فتوولتائیک سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، که با استفاده از ضدحلال‌های مختلف (کلروبنزن، اتیل‌استات، دی‌اتیل اتر) و نمونه مرجع (بدون عملیات ضدحلال) آماده‌سازی شدند، ارتباط مستقیمی را بین کیفیت مورفولوژی لایه پروسکایت، شدت گسیل فتولومینسانس (PL) و بازدهی نهایی سلول نشان داد. نمونه مرجع پایین‌ترین بازدهی تبدیل برابر با ۰/۳۴ درصد را داشت. ولتاژ مدار باز این نمونه ۰/۵۷ ولت، چگالی جریان مدار کوتاه $1/19 \text{ mA cm}^{-2}$ و فاکتور پرکنندگی آن ۵۰ درصد اندازه‌گیری شد. مورفولوژی مشاهده شده، دانه‌های نامنظم و فضاهای خالی متعددی را نشان می‌داد که منجر به تشکیل یک پوشش متخلخل و غیریکنواخت شده بود. این ساختار نامطلوب، که باعث افزایش مراکز بازترکیب حامل‌های بار و کاهش جذب مؤثر فوتون‌ها می‌گردد، کارایی سلول خورشیدی را به شدت محدود می‌سازد. در مقابل، استفاده از ضدحلال‌ها به طور قابل توجهی مورفولوژی لایه‌ها را بهبود بخشید. ضدحلال دی‌اتیل اتر، چگالی لایه پروسکایت را نسبت به نمونه مرجع افزایش داد، اما همچنان درجاتی از تخلخل و نواقص ساختاری در آن مشاهده شد. این موضوع در نهایت منجر به بازدهی پایین ۴/۹۳ درصد، ولتاژ مدار باز این نمونه ۰/۸۶ ولت، چگالی جریان مدار کوتاه $9/87 \text{ mA cm}^{-2}$ و فاکتور پرکنندگی آن ۵۸ درصد گردید. ضدحلال‌های کلروبنزن و اتیل‌استات، موثرترین روش‌ها برای دستیابی به لایه‌های پروسکایت با کیفیت بالا بودند. این دو نمونه، لایه‌هایی متراکم‌تر، یکنواخت‌تر و با دانه‌های ریزتر و به هم پیوسته‌تر را تشکیل دادند. این تراکم بالاتر و کاهش

تخلخل، جذب نور کارآمدتر و تسهیل انتقال حامل‌های بار را به همراه داشت. نمونه کلروبنزن به بازدهی ۱۱/۱۶ درصد رسید. ولتاژ مدار باز این نمونه ۱/۰۰ ولت، چگالی جریان مدار کوتاه $18/33 \text{ mA cm}^{-2}$ و فاکتور پرکنندگی آن ۶۱ درصد اندازه‌گیری شد. نمونه اتیل‌استات، بهترین عملکرد را با بازدهی ۱۲/۶۷ درصد، ولتاژ مدار باز ۱/۰۲ ولت، چگالی جریان مدار کوتاه $20/53 \text{ mA cm}^{-2}$ و فاکتور پرکنندگی آن ۶۱ درصد نشان داد. شدت بالای گسیل PL مشاهده شده برای این دو نمونه، مؤید حداقل تعداد مراکز بازترکیب غیرتابشی و حداکثر بازدهی بازترکیب تابشی است. این همبستگی میان مورفولوژی ایده‌آل (متراکم و یکنواخت) و شدت بالای PL، مستقیماً به دستیابی به بالاترین بازدهی توان تبدیل منجر شده است.

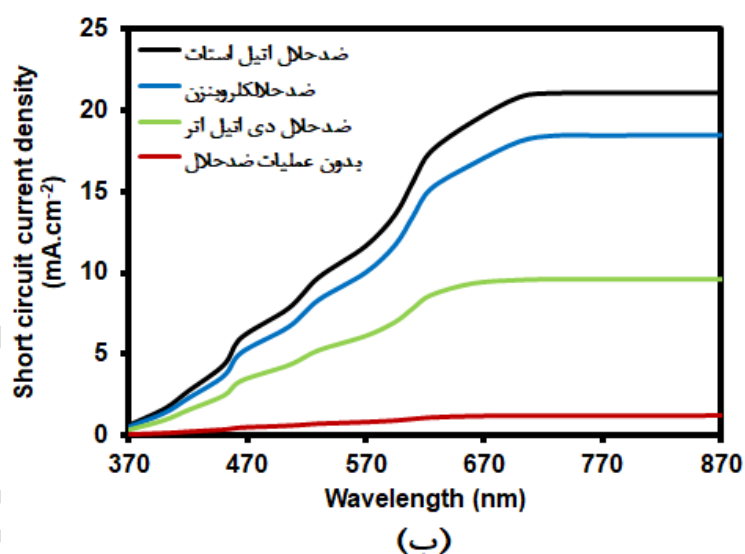
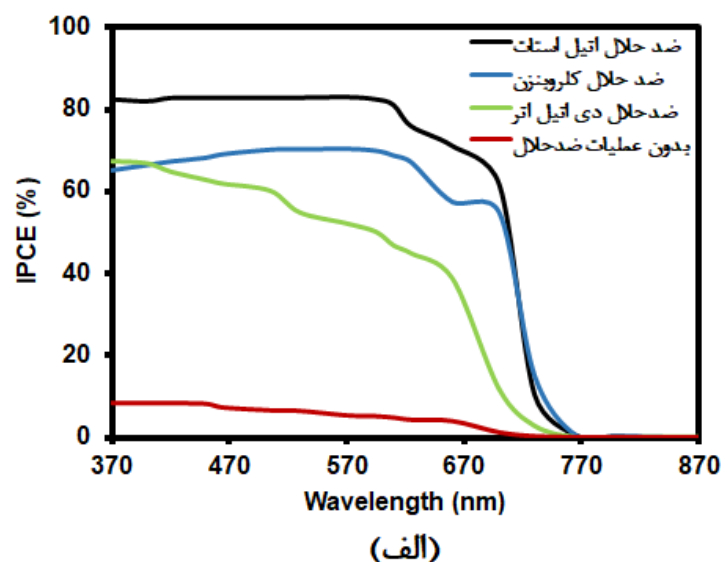
بازدهی بدست آمده برای سلول خورشیدی ساخته شده بر پایه ضدحلال اتیل‌استات (۱۲/۶۷ درصد) با نتایج گزارش شده توسط نوئل و همکارانش [۳۳] همخوانی دارد. ایشان اتیل‌استات را به عنوان جایگزینی سبز برای کلروبنزن معرفی و بازدهی‌هایی در محدوده ۱۱ الی ۱۴ درصد گزارش کرده‌اند. ژانگ و همکارانش [۲۱] از ضدحلال برای تبلور پروسکایت لایه نشانی شده روی SnO_2 در ساختار سلول‌های خورشیدی دماپایین استفاده و بازدهی در محدوده ۱۶/۵ الی ۱۸ درصد را گزارش کرده‌اند. راوی و همکارانش [۳۴] نیز بازدهی بین ۱۴ الی ۱۷ درصد را از طریق ضدحلال اتیل‌استات حاوی پتاسیم تیوسیانیات بدست آوردند.

۳-۳- بازدهی کوانتومی

بهبود عملکرد سلول خورشیدی آماده‌سازی شده با اتیل‌استات، ناشی از عوامل متعددی است. از جمله این عوامل می‌توان به کاهش چگالی نقص‌های بلوری در لایه پروسکایت اشاره کرد که این موضوع با استفاده از طیف‌های بازده کوانتومی و چگالی جریان اتصال کوتاه در شکل (۵) بررسی شده است. منحنی‌های بازده کوانتومی برای تمامی سلول‌ها، پاسخ نوری مشخصه پروسکایت را نشان می‌دهند؛ به طوری که مقادیر بالایی در ناحیه طیف مرئی (تقریباً ۴۵۰ تا ۷۵۰ نانومتر) مشاهده شده و پس از آن، در نزدیکی لبه باند جذب، کاهش ناگهانی رخ می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت، طیف‌های چگالی جریان مدار کوتاه به دقت روند بازده کوانتومی را دنبال می‌کنند و این امر، رابطه مستقیم بین بازده تبدیل فوتون و تولید جریان را تأیید می‌نماید. علاوه بر این، مقادیر چگالی جریان به دست آمده از اندازه‌گیری‌های بازده کوانتومی با نتایج حاصل از تست‌های فتوولتائیک، مطابقت دارد.

سلول آماده‌سازی شده با اتیل‌استات، بالاترین بازده کوانتومی را در میان تمامی ادوات مونتاژ شده کسب کرده و در محدوده طیف مرئی از ۸۰٪ فراتر رفته است که این امر به تشکیل یک لایه پروسکایت متراکم و یکنواخت منجر شده است. در مقابل، سلول‌های دیگر به دلیل تمرکز بیشتر نقص‌ها و مورفولوژی نامطلوب‌تر لایه، بازده

کوانتومی کمتری از خود نشان می‌دهند که این مسئله منجر به افزایش تلفات ناشی از بازترکیب حامل‌ها می‌شود.



شکل ۵- تغییرات (الف) بازدهی کوانتومی و (ب) چگالی جریان مدار کوتاه سلول‌های خورشیدی پروسکایتی مونتاژ شده بر حسب طول موج ورودی.

۴- جمع‌بندی

در این پژوهش تأثیر استفاده از ضدحلال‌های اتیل‌استات و دی‌اتیل‌اتر در مقایسه با کلروبنزن بر کیفیت ساختاری و عملکرد فتوولتائیک لایه‌های پروسکایت بررسی شد. نتایج میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی

نشان داد که انتخاب ضدحلال نقشی تعیین کننده در کنترل مورفولوژی لایه دارد؛ به طوری که برخلاف نمونه دی اتیل اتر که دارای ساختاری متخلخل و دانه بندی غیریکنواخت بود، استفاده از اتیل استات و کلروبنزن منجر به ایجاد لایه ای با پیوستگی ساختاری بالا و دانه های متراکم گردید. در مقابل، استفاده از اتیل استات و کلروبنزن با ایجاد ساختاری متراکم، پیوسته و با حداقل فضای خالی بین دانه ای، فرآیند بلورینه شدن را بهبود بخشید. تحلیل های طیف سنجی فتولومینسانس نیز این یافته ها را تأیید کرد؛ به گونه ای که نمونه تهیه شده با اتیل استات با نشان دادن بیشترین شدت گسیل، حاکی از کمترین تراکم مراکز باز ترکیب غیرتابشی و بیشترین کیفیت بلوری در مقایسه با سایر نمونه ها بود. این برتری ساختاری و نوری، در عملکرد فتوولتائیک سلول ها نمود عینی یافت؛ به طوری که سلول بهینه شده با اتیل استات به بازده تبدیل انرژی ۱۲/۶۷ درصد دست یافت، که در مقایسه با نمونه های کلروبنزن (۱۱/۱۶ درصد) و دی اتیل اتر (۴/۹۳ درصد)، به ترتیب بهبود حدود ۱۳ و ۱۵۶ درصدی را نشان می دهد. همچنین، دستیابی به بازده کوانتومی ۸۰ درصد در نمونه اتیل استات، گویای اثربخشی این ضدحلال در کاهش تله های ساختاری و تسهیل انتقال بار است.

۵- تشکر و قدردانی

از دانشگاه علم و صنعت ایران بابت حمایت از انجام این پژوهش سپاسگزاری می گردد.

واژه نامه

1. Perovskite solar cells (PSCs)
2. Power conversion efficiency (PCE)
3. Tandem
4. Internet of things (IoT)
5. Building-integrated photovoltaics (BIPV)
6. Fluorine doped tin oxide (FTO)
7. Electron-transporting layer (ETL)
8. Hole-transporting layer (HTL)
9. Exciton
10. Antisolvent
11. Band gap
12. Short circuit current density (J_{sc})

13. Open circuit voltage (V_{oc})
14. Fill factor
15. Quantum efficiency
16. Photoanode
17. Patterned etching
18. Annealing
19. Spin-coating
20. Field emission scanning electron microscopy (FESEM)
21. Steady-state photoluminescence (PL) spectroscopy
22. Current density-voltage (J-V)
23. Incident photon to current efficiency (IPCE)
24. Tauc model

مراجع

- [1] "NREL Best Research-Cell Efficiency Chart. Photovoltaic Research," NREL. Accessed: May 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency>
- [2] Q. Jiang *et al.*, "Towards linking lab and field lifetimes of perovskite solar cells," *Nature*, vol. 623, no. 7986, 2023, doi: 10.1038/s41586-023-06610-7.
- [3] I. Mora-Seró, "How Do Perovskite Solar Cells Work?," 2018. doi: 10.1016/j.joule.2018.03.020.
- [4] C. H. Chiang, M. K. Nazeeruddin, M. Grätzel, and C. G. Wu, "The synergistic effect of H₂O and DMF towards stable and 20% efficiency inverted perovskite solar cells," *Energy Environ. Sci.*, vol. 10, no. 3, 2017, doi: 10.1039/c6ee03586h.
- [5] J. Li *et al.*, "20.8% Slot-Die Coated MAPbI₃ Perovskite Solar Cells by Optimal DMSO-Content and Age of 2-ME Based Precursor Inks," *Adv. Energy Mater.*, vol. 11, no. 10, 2021, doi: 10.1002/aenm.202003460.
- [6] O. A. Khaleel and D. S. Ahmed, "Introduction of γ -butyrolactone (GBL) solvent to assist perovskite crystallization and develop stable and efficient perovskite solar cells," *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 126, 2022, doi: 10.1016/j.optmat.2022.112148.
- [7] H. J. Kim *et al.*, "Environmentally Viable Solvent Management in Perovskite Solar Cell Recycling Process," *ACS Energy Lett.*, vol. 8, no. 10, 2023, doi: 10.1021/acsenergylett.3c01542.

- [8] M. Fang *et al.*, “Residual solvent extraction via chemical displacement for efficient and stable perovskite solar cells,” *Journal of Energy Chemistry*, vol. 61, 2021, doi: 10.1016/j.jechem.2021.02.017.
- [9] A. D. Taylor *et al.*, “A general approach to high-efficiency perovskite solar cells by any antisolvent,” *Nat. Commun.*, vol. 12, no. 1, 2021, doi: 10.1038/s41467-021-22049-8.
- [10] Q. He *et al.*, “Improvement of green antisolvent-isopropanol and additive-thiourea on carbon based CsPbIBr₂ perovskite solar cells,” *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 150, 2022, doi: 10.1016/j.mssp.2022.106940.
- [11] L. Qiu *et al.*, “A simple fabrication of high efficiency planar perovskite solar cells: controlled film growth with methylammonium iodide and green antisolvent sec-butyl alcohol,” *J. Mater. Chem. C Mater.*, vol. 8, no. 36, 2020, doi: 10.1039/d0tc02535f.
- [12] S. Paek *et al.*, “From Nano- to Micrometer Scale: The Role of Antisolvent Treatment on High Performance Perovskite Solar Cells,” *Chemistry of Materials*, vol. 29, no. 8, 2017, doi: 10.1021/acs.chemmater.6b05353.
- [13] V. R. Yandri *et al.*, “Crystal structures and photoluminescence characteristics of cesium lead bromide perovskite nanoplatelets depending on the antisolvent and ligand used in their syntheses,” *Heliyon*, vol. 10, no. 1, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e23276.
- [14] N. J. Jeon *et al.*, “Compositional engineering of perovskite materials for high-performance solar cells,” *Nature*, vol. 517, no. 7535, 2015, doi: 10.1038/nature14133.
- [15] Q. Sun *et al.*, “Perovskite Crystallization Regulation by a Green Antisolvent for High-Performance NiO_x-Based Inverted Solar Cells,” *Nano Lett.*, vol. 25, no. 10, pp. 3883–3890, Mar. 2025, doi: 10.1021/acs.nanolett.4c05993.
- [16] Y. Yang *et al.*, “Green anti-solvent engineering for high-efficiency and environmentally friendly perovskite solar cells,” *RSC Adv.*, vol. 14, no. 44, pp. 32370–32388, 2024, doi: 10.1039/D4RA05082G.
- [17] Y. Gou, S. Tang, C. Yuan, P. Zhao, J. Chen, and H. Yu, “Research progress of green antisolvent for perovskite solar cells,” *Mater. Horiz.*, vol. 11, no. 15, pp. 3465–3481, 2024, doi: 10.1039/D4MH00290C.
- [18] J. Troughton, K. Hooper, and T. M. Watson, “Humidity resistant fabrication of CH₃NH₃PbI₃ perovskite solar cells and modules,” *Nano Energy*, vol. 39, pp. 60–68, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.nanoen.2017.06.039.
- [19] Y. Shang, W. Meng, F. Lu, H. Li, Z. Yuan, and N. Li, “A High-Throughput Approach to Identifying Environment-Friendly Artificial Antisolvents for Efficient Perovskite Solar Cells,” *Advanced Materials*, vol. 37, no. 29, Jul. 2025, doi: 10.1002/adma.202504602.
- [20] M. Migliozi, V. Pal, J. Damian, Y. Jung, and J. Lee, “Enhancing Uniform Crystallization and Grain Growth of Halide Perovskite Films by Combining Multipass

Inkjet Printing and Antisolvent Bathing,” *Advanced Energy and Sustainability Research*, vol. 6, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.1002/aesr.202400218.

- [21] W. Zhang, Y. Li, X. Liu, D. Tang, X. Li, and X. Yuan, “Ethyl acetate green antisolvent process for high-performance planar low-temperature SnO₂-based perovskite solar cells made in ambient air,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 379, p. 122298, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.cej.2019.122298.
- [22] A. M. Bakhshayesh and N. Farajisafiloo, “Uniform nanostructured photoelectrodes made of a zinc-stabilized TiO₂ gel for dye-sensitized solar cell applications,” *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 32, 2015, doi: 10.1016/j.mssp.2014.12.042.
- [23] A. M. Bakhshayesh, S. S. Azadfar, and N. Bakhshayesh, “Multi-layered architecture of electrodes containing uniform TiO₂ aggregates layers for improving the light scattering efficiency of dye-sensitized solar cells,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 26, no. 12, 2015, doi: 10.1007/s10854-015-3653-4.
- [24] M. Mirhosseini, A. M. Bakhshayesh, R. Khosroshahi, N. Taghavinia, and H. Abdizadeh, “Development of a triple-cation Ruddlesden–Popper perovskite structure with various morphologies for solar cell applications,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 31, no. 4, 2020, doi: 10.1007/s10854-019-02816-6.
- [25] L. Zheng *et al.*, “Morphology control of the perovskite films for efficient solar cells,” *Dalton Transactions*, vol. 44, no. 23, pp. 10582–10593, 2015, doi: 10.1039/C4DT03869J.
- [26] P. Zhang *et al.*, “The disappearing additive: introducing volatile ethyl acetate into a perovskite precursor for fabricating high efficiency stable devices in open air,” *Nanoscale*, vol. 14, no. 13, pp. 5204–5213, 2022, doi: 10.1039/D1NR08483F.
- [27] J. Li *et al.*, “Green antisolvent additive engineering to improve the performance of perovskite solar cells,” *Journal of Energy Chemistry*, vol. 66, pp. 1–8, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.jechem.2021.06.023.
- [28] F. Lang *et al.*, “Proton Radiation Hardness of Perovskite Tandem Photovoltaics,” *Joule*, vol. 4, no. 5, 2020, doi: 10.1016/j.joule.2020.03.006.
- [29] M. Nur-E-Alam *et al.*, “Anti-solvent materials enhanced structural and optical properties on ambiently fabricated perovskite thin films,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 19995, Aug. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-70344-3.
- [30] B. R. Sutherland, “Solar Materials Find Their Band Gap,” 2020. doi: 10.1016/j.joule.2020.05.001.
- [31] W. Feng *et al.*, “Near-Stoichiometric and Homogenized Perovskite Films for Solar Cells with Minimized Performance Variation,” *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 62, no. 17, 2023, doi: 10.1002/anie.202300265.
- [32] L. Wagner *et al.*, “Distinguishing crystallization stages and their influence on quantum efficiency during perovskite solar cell formation in real-time,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-13855-6.

- [33] N. K. Noel *et al.*, “A low viscosity, low boiling point, clean solvent system for the rapid crystallisation of highly specular perovskite films,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 145–152, 2017, doi: 10.1039/C6EE02373H.
- [34] M. K. A. Mohammed *et al.*, “Improving the potential of ethyl acetate green anti-solvent to fabricate efficient and stable perovskite solar cells,” *RSC Adv.*, vol. 12, no. 50, 2022, doi: 10.1039/d2ra05454j.