

Research Paper

The Effect of the Timing of Pouring Chlorobenzene Antisolvent in the Spin Coating Process in Perovskite Fabrication on Perovskite Solar Cell Efficiency¹

Saeed Salehpour², Ali Bahari*³, Hossain Milani Moghaddam⁴
and Seyed Nouredin Mirnia⁵

Received: 2022.12.22

Revised: 2023.03.05

Accepted: 2023.04.20

Abstract

In recent years, many studies have been conducted on the use of perovskite materials in solar cells. The process of pouring chlorobenzene affects the crystallinity of perovskite and thus the efficiency of the resulting solar cell. In this study, we found the best time interval to pour chlorobenzene after starting spin coating to obtain crystalline perovskite. After pouring the perovskite precursor on the substrate and starting the rotation, time intervals of 4, 6, 8, 9, and 12 seconds were tested for pouring chlorobenzene. The sample was then heated to form a perovskite layer, in some cases the layer was cloudy, indicating defective perovskite with incomplete crystallinity. Then, other layers, including Spiro-OMeTAD and metal contacts, were added. After reviewing the graphs and studies, it has been determined that the highest efficiency (16.71%) is obtained for the resulting solar cell in a time interval of 8 seconds for pouring chlorobenzene.

Keywords: *Perovskite, Solar Cells, Efficiency, Chlorobenzene, Crystallinity.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2023.42360.1307

² PhD Student, Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Mazandaran, University of Mazandaran, Iran. Email: sd.salehpour@gmail.com

³ Professor, Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, University of Mazandaran, Mazandaran, Iran. (Corresponding Author) Email: a.bahari@umz.ac.ir

⁴ Professor, Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, University of Mazandaran, Mazandaran, Iran. Email: milani@umz.ac.ir

⁵ Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, University of Mazandaran, Mazandaran, Iran. Email: snmir@umz.ac.ir

تأثیر زمان بندی ریختن ضد حلال کلروبنزن در فرآیند پوشش دهی چرخشی در ساخت پروسکایت بر بازده سلول خورشیدی پروسکایت^۱

سعید صالح پور^۲، علی بهاری^{۳*}، حسین میلانی مقدم^۴ و نورالدین میرنیا^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۳۱

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال سیزدهم، پیاپی ۳۴، پاییز ۱۴۰۲

صص ۶۵ - ۷۴

چکیده:

در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری در بکارگیری مواد پروسکایتی در سلول‌های خورشیدی انجام شده است. فرآیند ریختن کلروبنزن بر بلورینگی پروسکایت و در نتیجه بازدهی سلول خورشیدی بدست آمده تأثیرگذار است. هدف ما در این مطالعه، یافت بهترین فاصله‌ی زمانی برای ریختن کلروبنزن پس از شروع پوشش دهی چرخشی برای بدست آوردن پروسکایت با بیشترین بلورینگی بود. پس از ریختن پیش ماده‌ی پروسکایت بر روی زیرلایه و شروع چرخش، فواصل زمانی ۴، ۶، ۸، ۹ و ۱۲ ثانیه برای ریختن کلروبنزن مورد آزمایش قرار گرفت. سپس نمونه حرارت داده شد تا لایه‌ی پروسکایت تشکیل شود، در برخی موارد لایه کدر بود که نشان دهنده‌ی پروسکایت معیوب با بلورینگی ناقص است. سپس لایه‌های دیگر، از جمله اسپایروآمتاد و اتصالات فلزی لایه‌نشانی شد. بررسی نمودارها و مطالعات نشان می‌دهد که در فاصله زمانی ۸ ثانیه برای ریختن کلروبنزن، بیشترین بازده (۱۶/۷۱ درصد) برای سلول خورشیدی بدست می‌آید.

واژگان کلیدی: پروسکایت، سلول خورشیدی، بهره‌وری، کلروبنزن، بلورینگی.

^۱ DOI: 10.22051/ijap.2023.42360.1307

^۲ دانشجوی دکترا، گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه مازندران، مازنداران، ایران. Email: sd.salehpour@gmail.com

^۳ استاد، گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه مازندران، مازنداران، ایران. (نویسنده مسئول). Email: a.bahari@umz.ac.ir

^۴ استاد، گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه مازندران، مازنداران، ایران. Email: milani@umz.ac.ir

^۵ استادیار، گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه مازندران، مازنداران، ایران. Email: snmir@umz.ac.ir



۱. مقدمه

امروزه استفاده از انرژی خورشیدی به دلیل مزایای اقتصادی و زیست محیطی آن در کشورها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. انرژی خورشیدی پاک، رایگان و همه جا در دسترس است. مشکل گرمایش زمین ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی، با جایگزینی انرژی خورشیدی قابل حل است. تاکنون نسل‌های مختلفی از سلول‌های خورشیدی با هدف افزایش بازده و کاهش هزینه‌های تولید ساخته شده‌اند. در میان این نسل‌ها، سلول‌های خورشیدی مبتنی بر پروسکایت به دلیل ارزان بودن قطعات، سهولت ساخت و بازده بالا از برتری اقتصادی بالایی برخوردار هستند. پروسکایت‌ها ترکیباتی با فرمول کلی ABX_3 هستند که در آن A یک کاتیون تک‌ظرفیتی (چون متیل‌آمونیم) و B یک کاتیون دوظرفیتی (چون سرب) و X یک آنیون هالید است (به عنوان نمونه، I, Cl, Br) که به هر دوی این مواد متصل می‌شود [۱، ۲]. بلورینگی پروسکایت تأثیر زیادی بر بازده سلول خورشیدی دارد، بلورینگی بیشتر بازده بیشتری را به همراه دارد [۳]، بلورینگی کم به معنای وجود نقص در شبکه است که می‌تواند با ایجاد ترازهای تله سبب به دام افتادن الکترون و افزایش باز ترکیب الکترون و حفره شود و بدین ترتیب بازده سلول کاهش یابد.

پیش از شروع فرآیند پوشش‌دهی، ابتدا پیش‌ماده‌ی پروسکایت و سپس نوبت به کلروبنزن می‌رسد که باید پس از شروع چرخش نمونه انجام شود. کلروبنزن نقش مهمی در بلورینگی پروسکایت دارد. کلروبنزن با حلال DMF آمیخته می‌شود و چون سرعت تبخیر DMF پایین است، با آمیختن با کلروبنزن سرعت تبخیرش افزایش می‌یابد. افزایش سرعت تبخیر، سبب افزایش سرعت بلورینگی (هسته‌زایی) می‌گردد از این رو، بلورک‌های بزرگ‌تری بدست می‌آید و مرزهای بلورک‌ها، نقص‌ها و تهی‌جاها در شبکه کاهش می‌یابند و همچنین، بدین روش از ورود رطوبت به ساختار می‌توان جلوگیری کرد [۴ و ۱۰]. بسته به فاصله ریختن کلروبنزن از ابتدای چرخش نمونه، ممکن است پروسکایت‌هایی با درجه‌ی بلورینگی متفاوت بدست آیند. به گفته ونگ و همکاران [۵]، دلیل تفاوت در بلورینگی این است که اگر کلروبنزن زود ریخته شود، غلظت پیش‌ماده همچنان بالاست و مقدار کلروبنزن برای تولید پروسکایت بلوری کافی نیست و اگر کلروبنزن دیر ریخته شود، بیشتر سطح محلول پروسکایت خشک می‌شود و پروسکایت جامد از عبور کلروبنزن به سمت بخش پایین‌تر لایه جلوگیری می‌کند. از این رو، بلورینگی بخش پایین‌تر لایه‌ی پروسکایت کمتر است. در نتیجه، یافتن زمان مناسب برای ریختن کلروبنزن برای بدست آوردن بهترین بلورینگی پروسکایت ضروری است. در کار حاضر در مقایسه با دیگر پژوهش‌ها، تأثیر زمان‌بندی ریختن کلروبنزن بر بازده سلول خورشیدی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.



۲. روش ها و جزئیات تجربی

ساخت سلول خورشیدی پروسکایتی مراحل مختلفی دارد از جمله:

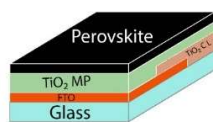
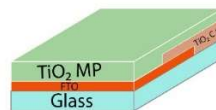
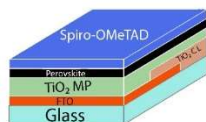
- ۱- انتخاب زیرلایه ی FTO (اکسید قلع آلایش یافته با فلئوئور) مناسب، ۲- زدایش^۱ یک نوار روی زیرلایه ی FTO و پاک سازی زیرلایه، ۳- لایه نشانی لایه ی فشرده دی اکسید تیتانیوم به روش گرماکافت افشانه ای^۲، ۴- لایه نشانی لایه ی متخلخل دی اکسید تیتانیوم به روش پوشش دهی چرخشی، ۵- لایه نشانی لایه ی پروسکایت به روش پوشش دهی چرخشی، ۶- لایه نشانی لایه ی اسپایرو اُمتاد^۳ به روش پوشش دهی چرخشی، ۷- حذف تمام لایه ها برای آزاد سازی بخشی از سطح به اندازه ی یک نوار جهت لایه نشانی اتصال فلزی، ۸- لایه نشانی اتصال فلزی به روش تبخیر حرارتی فیزیکی [۶-۹].



۱- انتخاب زیرلایه

۲- زدایش و پاک سازی

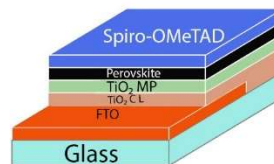
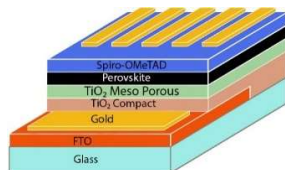
۳- لایه نشانی لایه فشرده دی اکسید تیتانیوم



۴- لایه نشانی لایه متخلخل دی اکسید تیتانیوم

۵- ساخت لایه پروسکایت

۶- لایه نشانی لایه اسپایرو اُمتاد



۷- زدایش برای لایه نشانی اتصال فلزی

۸- لایه نشانی اتصال فلزی

شکل ۱ طرحی از مراحل ساخت سلول خورشیدی پروسکایت.

¹ Etching

² Spray pyrolysis

³ Spiro-OMeTAD

(۱) انتخاب زیرلایه‌ی FTO

انتخاب زیرلایه‌ی FTO مناسب در یکنواختی تمام لایه‌های دیگر تاثیرگذار است. از این رو، زیرلایه‌ای انتخاب شد که سمت FTO زیرلایه هیچ خراش و سوراخ و غیریکنواختی نداشته باشد تا لایه‌های بعدی یکنواخت باشند (این کار به صورت چشمی انجام شد).

(۲) زدایش و پاک‌سازی زیرلایه

بخشی از لایه‌ی FTO لازم است از سطح زدوده شود، یک ناحیه با عرض $0/8$ سانتی‌متر از زیرلایه‌ی FTO به روش زدایش شیمیایی^۱ تر زدوده شد، برای این کار بخشی از سطح زیرلایه را با نوارچسب پوشانده و بخشی از سطح خالی گذاشته شد. در مرحله بعد، روی بخشی که بدون چسب بود با پودر اکسید روی پوشانده و سپس هیدروکلریک اسید ۲ مولار روی پودر ریخته شد تا واکنش صورت گیرد و در آخر سطح با چوب پنبه تمیز شد.

بعد از زدایش، زیرلایه‌ها به روش استاندارد پاک‌سازی شدند. ابتدا نوارچسب استفاده شده برای پوشاندن سطح از سطح جدا شد. سپس زیرلایه‌ها با آب و مایع ظرفشویی و برس شسته شدند تا باقیمانده‌ی مواد واکنش پاک شوند. در مرحله بعد، زیرلایه‌ها در ظرف مخصوص^۲ قرار گرفت و با هر یک از محلول‌های آب دیونیزه + مایع ظرفشویی، استون، اتانول و ۵۰ درصد اتانول + ۵۰ درصد ایزوپروپانول در دستگاه اولتراسونیک به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفت. در پایان، نمونه‌ها با تفنگ هوای فشرده (گاز نیتروژن) خشک شدند. همچنین به منظور حذف آلودگی‌ها از سطح زیرلایه‌ها، داخل محفظه‌ی فرابنفش قرار گرفتند.

(۳) ساخت لایه‌ی فشرده‌ی دی‌اکسیدتیتانیوم

محلول لازم برای لایه‌نشانی با نسبت ۱ به ۹، تیتانیوم ایزوپروپوکساید و استیل استونات به محلول اتانول بدون آب تهیه شد. برای این منظور ۶۰۰ میکرولیتر از محلول اول اندازه‌گیری شد، ۴۰۰ میکرولیتر استیل استونات به آن افزوده شد و سپس ۹ میلی‌لیتر اتانول فوق‌خالص به آن افزوده شد. برای لایه‌نشانی لایه‌ی فشرده‌ی دی‌اکسیدتیتانیوم لازم است که بخشی از سطح زیرلایه پوشانده شود تا بدون لایه‌ی دی‌اکسیدتیتانیوم باشد. این بخش ناحیه‌ای به عرض $0/8$ سانتیمتر است که برای پوشاندن آن از یک شیشه‌ی FTO به عنوان ماسک استفاده شد و سمتی از ماسک که شامل FTO است، روی زیرلایه قرار گرفت تا پوشیده شود، به این صورت از گازدهی ماسک حین فرآیند گرمادهی جلوگیری می‌شود.

¹ Etching

² Cuvette



لایه نشانی به روش گرماکافت افشانه ای انجام شد، ابتدا زیرلایه ها روی اجاق بشقابی قرار گرفتند و دمای دستگاه از دمای اتاق تا ۴۴۰ درجه ی سانتی گراد در مدت ۲۵ دقیقه بالا رفت. زمانی که دمای زیرلایه به ۴۴۰ درجه ی سانتی گراد رسید، لایه نشانی محلول پیش ماده ی لایه ی فشرده ی دی اکسید تیتانیوم را به روش گرماکافت افشانه ای شروع و پیش ماده با استفاده از اکسیژن به عنوان گاز حامل با فاصله های زمانی یک دقیقه به مدت ۶ تا ۸ دقیقه روی نمونه ها اسپری شد. سپس گرمادهی لایه در دمای ۴۴۰ درجه ی سانتی گراد به مدت ۳۵ دقیقه ادامه یافت. پس از توقف فرآیند گرمادهی، نمونه ها تا ۱۵۰ درجه ی سانتی گراد سرد شدند.

۴) ساخت لایه ی متخلخل دی اکسید تیتانیوم

برای تهیه ی محلول لایه نشانی، ۴۵۰ میلی گرم خمیر دی اکسید تیتانیوم (محصول شرکت گریسل) به ۳ میلی لیتر اتانول فوق خالص افزوده شد و محلول بدست آمده به مدت یک شبانه روز در دمای اتاق هم زده شد تا همگن شود.

پیش از لایه نشانی لایه ی متخلخل دی اکسید تیتانیوم، نمونه ها به مدت ۱۵ دقیقه در محفظه ی فرابنفش تحت تابش قرار داده شدند تا آلودگی های سطحی نمونه به کمینه مقدار برسند. سپس نمونه ها روی اجاق بشقابی قرار گرفتند و برای ۱۰ دقیقه در ۱۰۰ درجه ی سانتی گراد گرمادهی شدند تا اطمینان از حذف رطوبت از لایه ی فشرده ی دی اکسید تیتانیوم بدست آید و در آخر، نمونه ها تا دمای اتاق سرد شدند.

از روش پوشش دهی چرخشی برای ساخت لایه ی متخلخل دی اکسید تیتانیوم استفاده شد. پیش از شروع پوشش دهی چرخشی سطح نمونه ها به وسیله ی جریان هوای نیتروژن تمیز شد، سپس ۱۰۰ میکرو لیتر از پیش ماده که قبلاً تهیه شد را در وسط نمونه ریخته و چرخش انجام شد. تنظیمات لازم برای پوشش دهی چرخشی برابر زمان ۱۰ ثانیه، سرعت چرخش ۲۰۰۰ RPM و شتاب چرخش ۲۰۰۰ RPM/s بود. پس از پایان چرخش، نمونه روی اجاق بشقابی گرفت تا در دمای ۱۰۰ درجه ی سانتی گراد به مدت ۵ دقیقه گرمادهی شود.

۵) ساخت لایه ی پروسکایت

ابتدا پیش ماده ها و حلال های لازم اندازه گیری شد. این مواد عبارتند از ۲۳۵ میلی گرم متیل آمونیوم یداد، ۱ میلی لیتر دی متیل فرم آمید، ۹۵ میکرو لیتر دی متیل سولفو کساید، ۶۸۱/۵ میلی گرم سرب یداید. سپس، ۱ میلی لیتر دی متیل فرم آمید و ۹۵ میکرو لیتر دی متیل سولفو کساید به ۶۸۱/۵ میلی گرم سرب یداید افزوده و شیشه تکان داده شد تا حل شود. پیش از شروع ساخت پروسکایت، ۲۳۵ میلی گرم متیل آمونیوم یداد به محلول قبلی افزوده تا پیش ماده ی پروسکایت آماده شود.



لازم به یادآوری است که ساخت لایه‌ی پروسکایت درون گلاوباکس نیتروژن و در غیاب اکسیژن و بخار آب و به روش پوشش‌دهی چرخشی انجام شد. تنظیمات دستگاه پوشش‌دهی چرخشی برای ساخت پروسکایت عبارت از مدت زمان چرخش ۵۰ ثانیه، سرعت چرخش ۴۰۰۰RPM و شتاب چرخش ۴۰۰۰ RPM/s بود.

پیش از شروع ساخت پروسکایت، نمونه‌ها دوباره گرمادهی شدند تا رطوبت از لایه‌ی مزومتخلخل حذف شود. برای این منظور نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتیگراد روی اجاق بشقابی گرمادهی شدند.

بعد از فرایند گرمادهی اعمال پیش‌ماده‌ی پروسکایت (پیشتر آماده شده بود) انجام شد. به این منظور، ۵۰ میکرولیتر از محلول بر روی زیرلایه ریخته و سپس با یک فاصله‌ی زمانی اندک ۵۰۰ میکرولیتر ضدحلال کلروبنزن روی نمونه‌ی در حال چرخش افزوده شد که این فاصله‌ی زمانی نقش کلیدی در کیفیت بلورینگی لایه‌ی پروسکایت بدست آمده دارد. فواصل زمانی ۴، ۶، ۸، ۹ و ۱۲ ثانیه برای ریختن کلروبنزن آزمایش شد. پس از ریختن کلروبنزن نمونه‌ها دوباره تحت دمای ۱۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۵ دقیقه گرمادهی شدند. با انجام این گرمادهی مشاهده شد که به تدریج لایه‌ی پروسکایت بلورینه شده و آینه‌وار می‌گردد. اگرچه، این اتفاق برای تمام نمونه‌ها رخ نداد، بلکه در بعضی نمونه‌ها بلورینگی بهتری مشاهده شد. همچنین با اندازه‌گیری بازده سلول خورشیدی متناظر با این نمونه‌ها مشخص شد، نمونه‌های با بلورینگی بهتر بازده بهتری هم دارند. از جمله عوامل تاثیرگذار دیگر بر این زمان‌بندی برای تزریق کلروبنزن می‌توان به وجود بخارات مواد حلال در فضای گلاوباکس اشاره کرد که تاثیر منفی بر بلورینگی و در نتیجه بازده سلول دارد.

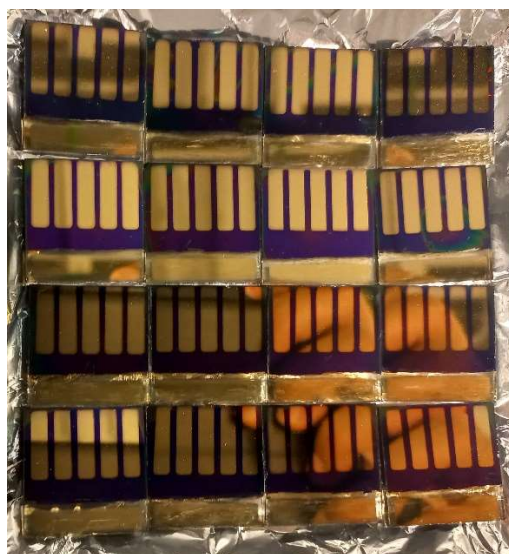
۶) پوشش‌دهی چرخشی لایه‌ی اسپایروآمتاد

ابتدا محلول لازم برای ساخت لایه آماده و مقدار ۷۲/۳ میلی‌گرم اسپایروآمتاد به ۱ میلی‌لیتر کلروبنزن افزوده شد. سپس ۲۸/۸ میکرولیتر ترت‌بوتیل‌پیریدین و در آخر، ۱۷/۵ میکرولیتر از محلول ۵۲۰ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر LITFSI در استونیتریل به آن اضافه شد تا محلول مورد نظر بدست آید. ساخت لایه‌ی اسپایروآمتاد به روش پوشش‌دهی چرخشی انجام شد. تنظیمات دستگاه پوشش‌دهی چرخشی برای لایه‌نشانی اسپایروآمتاد برابر زمان چرخش ۳۰ ثانیه، سرعت چرخش ۴۰۰۰RPM و شتاب ۸۰۰ RPM/s بود. یک ثانیه بعد از شروع چرخش نمونه، ۵۰ میکرولیتر از محلول پیش‌ماده‌ی اسپایروآمتاد بر روی نمونه ریخته شد.



۷) لایه نشانی اتصال فلزی

مرحله ی بعد لایه نشانی اتصال فلزی سلول است. برای این منظور طلا به روش تبخیر حرارتی فیزیکی بر روی سلول در فشار 10^{-6} تور لایه نشانی شد. پیش از این کار نیاز بود که لایه نشانی یک سمت نمونه حذف شود تا اتصال طلا به جای آن لایه نشانی شود. برای حذف این لایه نشانی از یک زیرلایه ی FTO استفاده شد و با خراشیدن یک سمت نمونه در سمت مخالفی که FTO حکاکی شده، آن حذف شد. برای تبخیر طلا از یک ماسک روی سلول استفاده شد تا طلا در نواحی ویژه ای لایه نشانی شود و ۵ عدد خانه ی مجزا روی سلول شکل گیرد (شکل ۲).



شکل ۲ سلول ها بعد از لایه نشانی طلا.

۸) اندازه گیری مشخصات سلول های خورشیدی پروسکایت

بعد از آماده سازی نمونه ها بازده هر خانه ی^۱ آن ها اندازه گیری شد، برای این منظور از طیف استاندارد شده ی با شدت تابش 1000 W/m^2 استفاده شد. اندازه گیری ها به کمک دستگاه شبیه ساز خورشیدی ABET TECHNOLOGIES Sun 2000 انجام شد. دقت اندازه گیری جریان، میکروآمپر و دقت اندازه گیری ولتاژ، میلی ولت بود.

^۱ Pixel

۳. بحث و نتیجه گیری

نمودارهای جریان بر حسب ولتاژ تعدادی از سلول‌ها در شکل ۳ و جدول ۱ آمده است. با توجه به منحنی‌ها، ملاحظه می‌شود که بازده سلول در زمان بندی ۸ ثانیه برای ریختن کلروبنزن^۱ بیشینه است و بعد از ۸ ثانیه کاهش می‌یابد.

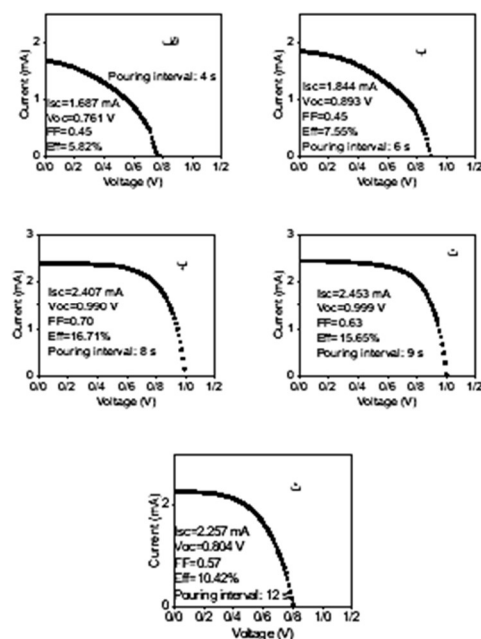
در زمان‌های پیش از ۸ ثانیه غلظت پیش‌ماده همچنان بالاست و مقدار کلروبنزن برای تولید پروسکایت بلوری کافی نیست، به همین دلیل سلول‌های مربوط به آن بازده پایینی دارند. در زمان‌های بیشتر از ۸ ثانیه نیز چون سطح لایه خشک شده از نفوذ کلروبنزن به بخش پایین تر جلوگیری کرده و بلورینگی کمتری در بخش پایین تر پروسکایت بدست می‌آید که منجر به تشکیل نواقص و تهی جاها و در نتیجه بازده پایین می‌گردد.

جدول ۱ مشخصات اندازه‌گیری شده‌ی سلول‌ها.

نام سلول	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	ضریب پرشوندگی	بازده (%)	زمان ریختن کلروبنزن (s)
سلول a	۱/۶۸۷	۰/۷۶۱	۰/۴۵	۵/۸۲	۴
سلول b	۱/۸۴۴	۰/۸۹۳	۰/۴۵	۷/۵۵	۶
سلول c	۲/۴۰۷	۰/۹۹۰	۰/۷۰	۱۶/۷۱	۸
سلول d	۲/۴۵۳	۰/۹۹۹	۰/۶۳	۱۵/۶۵	۹
سلول e	۲/۲۵۷	۰/۸۰۴	۰/۵۷	۱۰/۴۲	۱۲

^۱ Pouring Interval





شکل ۳ نمودار جریان بر حسب ولتاژ سلول‌ها (الف) سلول a، (ب) سلول b، (پ) سلول c، (ت) سلول d، (ث) سلول e را نشان می‌دهد.

۴. تقدیر و تشکر

از دانشگاه مازندران به دلیل در اختیار قرار دادن آزمایشگاه نانوالکترونیک، تشکر می‌کنیم.

منابع

- [1] Xiang L., Fangliang Gao , Yunxuan Cao , *et al.*, Progress on the stability and encapsulation techniques of perovskite solar cells, *Organic Electronics*, **106**, 106515-106525, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2022.106515>.
- [2] Petrović M., Chellappan V. and Ramakrishna S., Perovskites: Solar cells & engineering applications – materials and device developments, *Solar Energy*, **122**, 678-699, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.09.041>.

- [3] Wang Z., Chen S. and Gao X., PTB7 as additive in Anti-solvent to enhance perovskite film surface crystallinity for solar cells with efficiency over 21%, *Applied Surface Science*, **575**, 151737-151747, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151737>.
- [4] El-naggar A. M., Osman M. M., Heiba Z. K., *et al.*, Effect of chlorobenzene on the optical and structural properties of CH₃NH₃PbI₃:DMF perovskite films, *Journal of Materials Research and Technology*, **14**, 287-297, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.035>.
- [5] Wang Y., Zou X., Zhu J., *et al.*, Effect of anti-solvent chlorobenzene on bottom micro-porous structure of perovskite light-absorbing layer, *Materials Letters*, **302**, 130430-130440, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130430>.
- [6] Chen Q., De Marco N., Yang Y., *et al.*, Under the spotlight: The organic-inorganic hybrid halide perovskite for optoelectronic applications, *Nano Today*, **10**, 355-396, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2015.04.009>.
- [7] Park N.-G., Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology, *Materials Today*, **18**, 65-72, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.07.007>.
- [8] Wang Q., Chen H., Liu G., *et al.*, Control of organic-inorganic halide perovskites in solid-state solar cells: a perspective, *Science Bulletin*, **60**, 405-418, 2015, <https://doi.org/10.1007/s11434-015-0734-y>.
- [9] Habibi M., Zabihi F., Ahmadian-Yazdi M. R., *et al.*, Progress in emerging solution-processed thin film solar cells - Part II: Perovskite solar cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **62**, 1012-1031, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.042>.
- [10] Liu X., Xu C. and Lee E.-C., Chlorobenzene-Mediated Control of Crystallization in Perovskite Films for High-Performance Solar Cells, *ACS Applied Energy Materials*, **3**, 12291-12297, 2020, <https://doi.org/10.1021/acsaem.0c02342>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

