# تاثیر روش‌های مختلف سنتز $PbI_2$ برعملکرد سلول‌های خورشیدی پروسکایتی بدون انتقال دهنده حفره

ابراهیم یزدی[۱و۲]، عباس بهجت[۱و۲]، فرزانه ولی پور[۱و۲]، ، نعیمه ترابی[۱و۲]، علی ثانی[۱و۲]

[۱] گروه پژوهشی فوتونیک مرکز تحقیقات مهندسی، دانشگاه یزد
[۲] گروه اتمی و مولوکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد

**چکیده –سلول‌های خورشیدی ساخته شده از مواد پروسکایتی آلی- معدنی از جمله ادوات نوری نانوساختاری هستند که به دلیل ویژگی‌های خاص الکترواپتیکی ماده پروسکایت از قبیل گاف انرژی مناسب و مستقیم، طول پخش حامل‌های بار زیاد و فرآیند ساخت آسان، اخیرا مورد توجه محققین قرار گرفته است. معروفترین نوع این مواد آلی –معدنی $CH_3NH_3PbI_3$ می‌باشد که از ترکیب محلول‌های حاوی $PbI_2$ و$CH_3NH_3I$ ساخته می‌شود. در این پژوهش پودر $PbI_2$ با استفاده از روش گلدرین و با دو فرآیند مختلف پخت؛ سنتز شد و با پودر $pbI_2$ خریداری شده از شرکت شریف سولار –به عنوان پودر مرجع- مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که در نمونه هایی که هنگام بازپخت $PbI_2$ از شوک حرارتی استفاده شده است؛ از مشخصات فوتوولتائیکی نظیر جریان مدار کوتاه، ضریب پرشدگی و بازدهی بهتری برخوردار است. لازم به توضیح است داده‌های فوق از سلول‌های خورشیدی بدون انتقال دهنده حفره بدست آمده و گزارش گردیده است.**

**کلید واژه**- لایه جاذب نور، سلول خورشیدی پروسکاتی ، سنتز سرب یدید.

# The effect of synthesis method of PbI2 on the hole-transport–free perovskite solar cell performance

**E.Yazdi[1,2] , A. Behjat[1,2], F.Valipour[1,2] , N. Torabi [1,2] , A. Sani[1,2]**

[1] Photonics Research Group, Engineering Research Center, Yazd University, Yazd, Iran [2]

[2] Atomic and Molecular Group, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd,

Abstract- Solar cells fabricated by Organic–inorganic perovskite material because of optimal properties including direct band gap, large absorption coefficients, high carrier mobility and easier process is under consideration by the researcher, recently. One of these promising organic-inorganic material is CH3NH3PbI3 which prepare by mixture of $PbI_2$ and CH3NH3I. In this research, $PbI_2$ powder was synthesized with Golderin technique and by two different calcination procedures and used in preparing perovskite material. Then, the perovskite solar cells with planar structure were fabricated using these materials and also $PbI_2$ powder purchased from Sharif Solar Company as a reference. Then, the solar cell performance including photovoltaic performance and cell efficiencies were compared. Results indicate that the solar cell samples in which $PbI_2$ prepared with heat-shock -process have better photovoltaic performance such as short circuit current density, fill factor and efficiency. It should be noted that these reported data are related to hole-transport- free perovskite solar cells.

Keywords: Light absorber layer, Perovskites solar cell, lead iodide synthesis

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20 ]



این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

## ۱- مقدمه

اخیرا سلول‌های خورشیدی پروسکایتی توجه زیادی را در میان پژوهشگران به خود معطوف نموده است. این نوع سلول‌های خورشیدی که از سال ۲۰۰۹ معرفی شده‌اند[۱]. در طی سال-های اخیر، بیشترین سهم تحقیقات در حوزه‌ی انرژی‌های پاک و سلول‌های خورشیدی را در دنیا به خود اختصاص داده‌اند. سلول‌های خورشیدی پروسکایتی از چند لایه رسانا و نیمرسانا که بر روی هم با ترتیب خاص و منظمی قرار گرفته‌اند تشکیل می‌شوند.

در بین لایه‌های مختلف که به روش های گوناگون بر روی سطح مورد نظر لایه نشانی می‌شود؛ لایه پروسکایت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا پروسکایت، قلب یک سلول خورشیدی پروسکایتی محسوب می‌شود و وظیفه جذب نور و همچنین تولید الکترون-حفره را بر عهده دارد.

همانطورکه در شکل ۱ نمایان است لایه‌ی پروسکایت توسط دو سطح انتقال دهنده‌ی الکترون (ETM) و انتقال دهنده حفره (HTM) محصور شده است. علت استفاده از این لایه‌ها کاهش بازترکیب و در پی آن افزایش کارایی سلول بیان شده است.

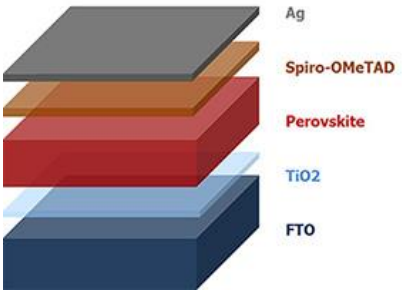
در این پژوهش از لایه انتقال دهنده‌ی حفره استفاده نشده است.

عمده ساختارهایی که برای سلول‌های خورشیدی معرفی شده-اند و توانسته‌اند نظر پژوهشگران را به خود جلب کنند با دو عنوان ساختار پلنر و مزوپروس شناخته می‌شوند.که در جدول ۱ و همچنین شکل‌های ۱ و۲ ساختار آنها توضیح داده شده است[۲].

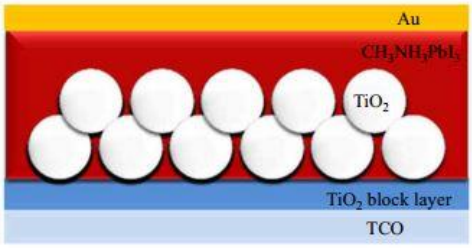
جدول۱: ساختار سلول های خورشیدی پروسکایتی

| | |
|---|---|
| مزوپروس | FTO/ETM/Pross/Provskite/HTM/Au |
| پلنر | FTO/ETM/Provskite/HTM/Au |

ساختاری که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته؛ در شکل۲ نشان داده شده است. در این ساختار نانو ذرات $TiO_2$ با ابعاد ۲۰ نانومتر وظیفه‌ی افزایش سطح مقطع جاذب نور و همچنین تسهیل در عبور الکترون‌های تولید شده توسط پروسکایت را بر عهده دارند.




شکل۱: ساختار لایه ای سلول خورشیدی پروسکایتی پلنر. دراین ساختار لایه $TiO_2$ انتقال دهنده الکترون و لایه Spiro-OMeTAD انتقال دهنده حفره می‌باشد.




شکل۲: ساختار سلول خورشیدی پروسکایتی نانو متخلخل بدون انتقال دهنده حفره

فرمول عمومی پروسکایت به صورت $ABX_3$ می‌باشد که فرمول شیمیایی شناخته شده ترین ماده پروسکایت مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی نانو ساختاری نسل سوم $CH_3NH_3PbI_3$ می‌باشد. برای تهیه‌ی این ساختار شیمیایی لازم است از دو پیش ماده متیل آمونیم یدید (MAI) با ساختار $CH_3NH_3I$ و سرب یدید با ساختار $PbI_2$ استفاده شود. در این پژوهش از سه نوع $PbI_2$ استفاده شده و نتیجه گرفته شد که در روش گلدرین همراه با شوک حرارتی نتایج بهتری حاصل می‌شود.

## ۲- روش انجام آزمایش

در این پژوهش برای لایه نشانی پروسکایت، از روش لایه نشانی دو مرحله‌ای استفاده شد که در ادامه توضیح داده می‌شود.

### ۲-۱-مواد مورد نیاز

شیشه‌ی رسانای Fluorine-doped Tin Oxid (FTO) ، هیدروکلریک اسید، پودر روی، اتانول، ایزوپروپانول، تیتانیوم ایزوپروکسید، خمیر نانوساختار تیتانیوم دی اکسید، دی متیل فرم آمید، پودر سرب یدید، پودر متیل آمونیوم یدید.

### ۲-۲-روش ساخت

برای ساخت سلول خورشیدی پروسکایتی ابتدا قسمتی از شیشه‌ی FTO توسط پودر روی و محلول هیدروکلریک اسید ۲ مولار لایه برداری شد سپس نمونه‌ی الگو دهی شده به ترتیب با آب و صابون، آب دیونیزه، استون، اتانول و ایزوپروپانول به



این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20 ]

مدت ۱۵ دقیقه در حمام اولتراسونیک قرار گرفت. بعد از اتمام مراحل شستشو به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار داده شد تا کاملا خشک شود. در این پژوهش از ماده‌ی bl-$TiO_2$ به عنوان لایه‌ی انتقال دهنده‌ی الکترون استفاده شده است که به روش لایه نشانی چرخشی با سرعت ۴۰۰۰ دور به مدت ۶۰ ثانیه لایه نشانی و سپس تحت دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. سپس از خمیر نانوذرات $TiO_2$ با ابعاد ۲۰ نانومتر به عنوان لایه‌ی متخلخل استفاده شده است.

برای تشکیل پروسکایت از روش دو مرحله ای استفاده شده است به این صورت که ابتدا سه نمونه $PbI_2$ تهیه شده را در حلال دی متیل فرم آمید(DMF) حل کرده و به روش چرخشی لایه‌نشانی می‌کنیم. سپس نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد پخت داده شده و در مرحله‌ی دوم در محلول متیل آمونیوم یدید (MAI) که از قبل آماده شده‌است ، فرایند غوطه‌وری انجام داده شد. در این مرحله لازم است سلول‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی-گراد به منظور تشکیل لایه‌ی نهایی پروسکایت پخت داده شود و در انتها لایه‌نشانی طلا به روش کندوپاش انجام شده است. به منظور تهیه‌ی محلول $PbI_2$ ، ۴۶۰میلی‌گرم پودر $PbI_2$ در یک سی‌سی (DMF) به مدت ۲ تا ۴ ساعت بوسیله‌ی همزن مغناطیسی تحت دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد همزده شد. همچنین برای تهیه‌ی محلول MAI ، ۸ میلی‌گرم پودر MAI در ۱ سی‌سی ایزوپروپانول حل شده‌است.

### ۲-۳-روش سنتز PbI2

نمونه‌ی (S1) از شرکت شریف سولار به عنوان پودر مرجع تهیه شده است.

نمونه (S2) و (S3) به روش گلدرین و به صورت زیر سنتز شد.

ابتدا یک گرم نیترات سرب در ۱۰۰سی سی آب دیونیزه حل کرده و به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بوسیله‌ی همزن مغناطیسی، همزده شد. همچنین یک گرم پتاسیم یدید در ۱۰۰ سی سی آب دیونیزه حل و به مدت دو ساعت تحت دمای ۱۰۰ درجه همزده شد. در این مرحله محلول نیترات سرب را بصورت قطره قطره به محلول پتاسیم یدید اضافه کرده و اجازه می‌دهیم تا واکنش شیمیایی بصورت کامل رخ داده و رسوب زرد رنگ $PbI_2$ حاصل شود. رسوبات $PbI_2$ پس از جداسازی از محلول به مدت ۱ ساعت تحت دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در آون پخت داده می‌شود. برای پخت لازم است افزایش دمای آون بصورت تدریجی انجام شود. بعد از پایین آمدن دمای آون پودر $PbI_2$ از آون خارج شد.

به منظور سنتز نمونه‌ی (S3) مراحل قبل را تکرار کرده با این تفاوت که در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد پودر را از آون خارج می‌کنیم تا یک شوک حرارتی به آن وارد شود.

## ۳- بحث و نتایج

برای هر نمونه پودر S1, S2, S3 شش سلول ساخته شد که بطور میانگین بازدهی آنها بصورت زیر بوده است.

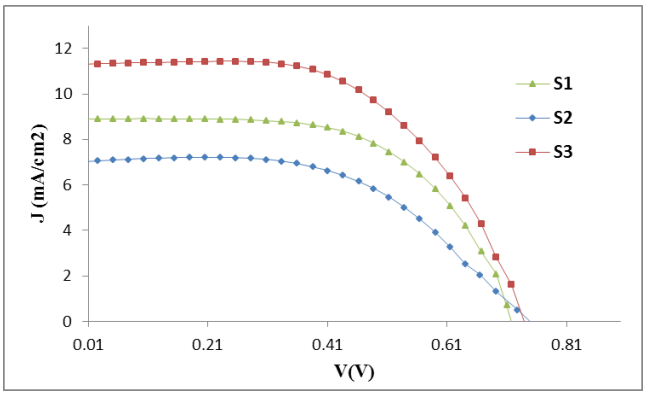
eff S3 > eff S1 > eff S2

همانطور که از جدول ۲ مشخص است جریان حاصل از نمونه S3 بیش از دو نمونه دیگر است زیرا در این نمونه حامل های بار تولید شده بهتر توانسته‌اند در مدار خارجی قرار گیرند. از عمده دلایلی که می‌توان برای این پدیده بیان کرد تشکیل پروسکایت و بلور های کامل‌تر می‌باشد

جدول۲: مشخصات فوتوولتاییکی سلول‌های ساخته شده

نمودار ولتاژ - جریان نشان داده شده در زیر به وضوح نتایج جدول فوق را نشان می‌دهد.

| sample | $V_{oc}$ | $I_{sc}$ (mA) | $J_{sc}$ (mA/cm2) | FF | eff |
|---|---|---|---|---|---|
| S1 | 0.722 | 0.448 | 8.90 | 0.58 | 3.82 |
| S2 | 0.745 | 0.354 | 7.03 | 0.553 | 2.846 |
| S3 | 0.731 | 0.569 | 11.30 | 0.573 | 4.736 |




نمودار ۱: نمودار ولتاژ- جریان (I-V) برای سه نمونه $PbI_2$ مختلف .

نمودارهای فوق مؤید آن است که اتلاف حامل‌های بار نمونه‌ی S2 بیش از دیگر نمونه‌ها می‌باشد که با بررسی نتایج SEM وجود نا کاملی در این سلول‌ها را به وضوح نشان می‌دهد.

از آنجایی که در پروسکایت‌های آلی- معدنی هیبریدی در روش دو مرحله‌ای کاتیون فلزی زیر بنای رشد بلور پروسکایت می-باشد بنابراین در نمونه سنتز شده نانو ذرات $PbI_2$ به روش گلدرین همراه با شوک حرارتی ساختار بلوری منظم تری

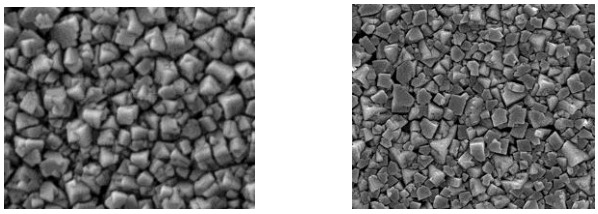


این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

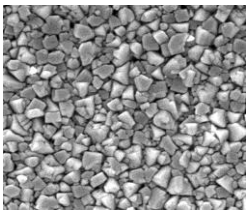
[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20 ]

تشکیل شده است که در تصاویر SEM هم می‌توان آن را به وضوح دید .

(الف) (ب)



(ج)



شکل ۳: الف مربوط به نمونه S1 ، ب مربوط به نمونه S2 و ج مربوط به نمونه S3 می‌باشد.

تصاویر SEM گرفته شده از سطح پروسکایت نشان میدهد که در نمونه S3 است بلورهای و بهتر با چینش منظم‌تری تشکیل شده استو به همین علت شاهد مشخصات فتوولتائیکی بهتری در نمونه‌ی S3 می‌باشیم. در نمونه S1 بلورهای تشکیل شده بزرگتر می‌باشد ولی نظم کمتری دارد وهمچنین ناکاملی‌هایی هم در آن مشاهده می‌شود. با وجوداینکه شکل بلورهای تشکیل شده در نمونه S1 و S3 شبیه به هم می‌باشند اما این تفاوت بازدهی مربوط به این امر می‌باشد که در نمونه S1 منافذ و ناکاملی‌های زیادی وجود دارد به همین علت حامل های بار تولید شده دچار اتلاف می‌شوند و به راحتی نمی‌توانند از بلور خارج شده و در مدار خارجی قرار گیرند.

## سپاسگزاری

از شرکت ادوات نوری ساختاری ایساتیس که ما را در تمام مراحل سنتز و انجام این پژوهش یاری نمود و همچنین از اعضای گروه پژوهشی فوتونیک دانشگاه یزد تشکر و قدردانی می‌شود.

## مراجع

[۱] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, and T. Miyasaka, "Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 131, pp. 6050-6051, 2009/05/06 2009.

[۲] G. Park, -.H.-S. Kim, S. H. Im, and N "Organolead halide perovskite: new horizons in solar cell research," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 118, pp. 5615-5625, 2014.



این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20 ]