

# The Study of Different Electron Transporting Materials on the Optical Performance of the Perovskite Solar Cells

Arezoo Mohammadbeigi, Seyed Mohamad Bagher Ghorashi\*

Department of Physics, University of Kashan, Kashan, Iran

Received: 18.11.2018    Final revised: 12.11.2019    Accepted: 12.02.2020

DOI: [10.22055/JRMBS.2020.15559](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2020.15559)

## Abstract

For investigation of the processes occurred in solar cells, lots of optical and electrical modes are used. In this study, optical simulation of perovskite solar cell based on transfer matrix formalism using complex refractive index (as a function of wavelength) of multilayer structure is presented. In other words, optical properties such as, optical absorption, energy dissipation and incident electrical field distribution of the perovskite solar cells with different electron transporting materials by matrix method are studied. Then, in order to obtain the optimum thickness of the active layer, the effect of it's thickness on the short-circuit current density are investigated and the optimum structure is selected.

**Keywords:** Current density, Transfer matrix, Perovskite solar cell

---

\* Corresponding Author: [mghorashi@kashanu.ac.ir](mailto:mghorashi@kashanu.ac.ir)



## بررسی مواد انتقال‌دهنده الکترون متفاوت بر عملکرد اپتیکی سلول

### خورشیدی پروسکایتی

آرزو محمدبیگی، سید محمدباقر قریشی\*

گروه لیزر و فوتونیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

دریافت: 1397/08/27 ویرایش نهایی: 1398/08/21 پذیرش: 1398/11/23

DOI: [10.22055/JRMBS.2020.15559](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2020.15559)

#### چکیده

برای بررسی فرآیندهایی که در سلول‌های خورشیدی رخ می‌دهند، مدل‌های اپتیکی و الکتریکی بسیاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله، شبیه‌سازی اپتیکی سلول خورشیدی پروسکایتی بر اساس فرمولبندی ماتریس انتقال با استفاده از ضرایب شکست مختلط تابع طول موج ساختار چندلایه‌ای ارائه شده است. به عبارتی برای سلول خورشیدی پروسکایتی با انتقال دهنده‌های الکترون متفاوت، خواص اپتیکی از جمله جذب اپتیکی، انرژی اتلاف شده و توزیع میدان الکتریکی ورودی ساختار به روش ماتریس انتقال بررسی شده‌اند. سپس، به منظور دستیابی به ضخامت بهینه لایه فعال سلول، اثر ضخامت این لایه بر نمودار چگالی جریان مدار کوتاه ساختارها مورد مطالعه قرار گرفت و ساختار بهینه انتخاب شد.

کلیدواژگان: چگالی جریان، سلول خورشیدی پروسکایتی، شبیه‌سازی اپتیکی

#### مقدمه

الکترون-حفره، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. چند چالش وجود دارد که لازم است قسمت تحقیق و توسعه فناوری سلول خورشیدی آن را در نظر بگیرد تا یک راه حل عملی برای بحران انرژی ارائه کند و آن چالش‌ها عبارتند از، بازده بالای تبدیل توان، هزینه کم، طول عمر بالا و استفاده از مواد خام فراوان و زیست سازگار [1-3]. تبدیل انرژی خورشید به الکتریسیته توسط سلول‌های خورشیدی امکان‌پذیر است [4,5] که شامل سه نسل سیلیکونی [6]، نیمه‌هادی‌های لایه نازک [7-9] و حساس شده به رنگدانه و نیمه‌هادی‌های آلی [10-14] می‌باشد. از سال 2009 میلادی، نخستین بار پروسکایت به‌عنوان یک ماده هیبریدی آلی-معدنی در نسل سوم سلول‌های خورشیدی به کار رفت.

امروزه تأمین انرژی مورد نیاز بشر به وسیله منابع گوناگونی انجام می‌شود که بخش عمده‌ای از آن را سوخت‌های فسیلی تشکیل می‌دهند. بنابراین گسترش منابع انرژی تجدیدپذیر و متنوع به دلیل محدود بودن سوخت‌های فسیلی و افزایش دمای زمین امری ضروری است. در این میان، انرژی خورشید یکی از پاک‌ترین و در دسترس‌ترین منابع است. دستگاه‌های فوتوولتائیک، سیستم‌های اولیه تبدیل انرژی خورشیدی جهت دستیابی و بهره‌برداری از آن می‌باشند. این دستگاه‌ها که به‌طور ساده‌تر به‌عنوان سلول‌های خورشیدی شناخته شده‌اند، انرژی فوتون فرودی پرتو خورشید را با تولید و سپس جمع‌آوری جفت‌های

\* نویسنده مسئول: [mghorashi@kashanu.ac.ir](mailto:mghorashi@kashanu.ac.ir)



که تاکنون در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، به اکسیدهای فلزی، مولکول‌های آلی و مواد انتقال‌دهنده الکترون چندلایه‌ای تقسیم می‌شوند [28,29]. به‌کمک شبیه‌سازی می‌توان به اطلاعات مفیدی برای تحلیل و بررسی موادی که در یک فرآیند آزمایشگاهی استفاده می‌شوند، دست یافت و به این ترتیب با بهینه‌سازی ساختار به بازدهی بهتری رسید. شبیه‌سازی سلول خورشیدی پروسکایتی از نظر الکتریکی با نرم‌افزارهای مختلفی از جمله SCPAS، Comsol و AMPS و از نظر اپتیکی با نرم‌افزارهای Lumerical، Silvaco و Comsol انجام شده است. در این پژوهش با کدنویسی در نرم‌افزار متلب، عملکرد اپتیکی سلول خورشیدی پروسکایتی در حضور انتقال‌دهنده‌های الکترون متفاوت، شبیه‌سازی و بهینه شده است.

### مدل اپتیکی ماتریس انتقال

مدل اپتیکی با استفاده از فرمول‌بندی ماتریس انتقال، اولین بار توسط هیون برای لایه‌های نازک معرفی شد و سپس توسط پترسون و همکاران برای سلول خورشیدی آلی مورد استفاده قرار گرفت [30,31]. برای سلول خورشیدی پروسکایتی تاکنون از این مدل در کارهای محدودی استفاده شده است [32-34]. این مدل برای تجزیه و تحلیل موج الکترومغناطیسی در لایه‌های سلول خورشیدی، فرضیاتی به‌صورت زیر در نظر می‌گیرد:

- 1- همگن و همسانگرد بودن لایه‌ها
- 2- مسطح و موازی بودن فصل‌های مشترک
- 3- توصیف نور فرودی با امواج الکترومغناطیسی تخت
- 4- شرکت کردن همه بارهای تولیدشده در جریان

پروسکایت‌ها که معمولاً نقش جاذب نور را دارند، موادی نسبتاً ارزان قیمت هستند و به‌دلیل ویژگی‌های خاص از جمله شکاف نواری مستقیم و مناسب، ضریب جذب بالا، طول پخش زیاد و تحرک‌پذیری بالای حامل، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [15-17]. ساختار کلی پروسکایت معمولاً به‌صورت  $ABX_3$  می‌باشد که A و B کاتیون با اندازه‌های متفاوت (A بزرگتر از B) و X آنیونی از گروه هالیدها است [18]. عمومی‌ترین ماده پروسکایت دارای فرمول شیمیایی به‌صورت  $CH_3NH_3PbX_3$  است. طول پخش الکترون-حفره در این نوع پروسکایت در محدوده یک میکرون و گاف انرژی آن حدود  $1/5$  الکترون‌ولت است [19]. افزایش سریع بازدهی این سلول‌ها در بازه زمانی کوتاه چشمگیر است به‌گونه‌ای که در ابعاد آزمایشگاهی به بیش از 24% افزایش یافته‌است [20,21]. یکی از تقسیم‌بندی‌های سلول‌های خورشیدی پروسکایتی براساس وجود یا عدم وجود لایه متخلخل در ساختار این سلول‌ها است که به دو گروه مسطح و مزومتخلخل تقسیم می‌شوند. در گروه اول از لایه متخلخل استفاده نمی‌شود و لایه مسطح پروسکایت بین دو لایه انتقال‌دهنده الکترون و حفره قرار می‌گیرد. در حالی که در ساختار گروه دوم از یک لایه نانوساختار متخلخل استفاده می‌شود [22,23]. سلول‌های خورشیدی پروسکایتی از چندین لایه شامل شیشه پوشیده شده با اکسید رسانای شفاف مانند FTO، لایه انتقال‌دهنده الکترون (ETL)، پروسکایت، لایه انتقال‌دهنده حفره (HTL) و الکتروود شمارش‌گر (کاتد) تشکیل شده‌اند [24]. لایه انتقال‌دهنده الکترون علاوه بر اینکه در انتقال الکترون‌ها از لایه پروسکایت به کاتد یا آند نقش مهمی را ایفا می‌کند، با اصلاح کردن فصل مشترک لایه پروسکایت و الکتروود، بازترکیب الکترون را کاهش می‌دهد [25]. به‌طور کلی، مواد انتقال‌دهنده الکترونی

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \left( \prod_{v=1}^m I_{(v-1)v} L_v \right) \cdot I_{m(m+1)} \quad 3$$

با استفاده از عناصر ماتریسی رابطه اخیر، برآیند ضرایب مختلط بازتاب و عبور به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$r = \frac{E_0^-}{E_0^+} = \frac{S_{21}}{S_{11}} \quad 4$$

$$t = \frac{E_{m+1}^+}{E_0^+} = \frac{1}{S_{11}}$$

و بنابراین میدان الکتریکی کل در فاصله دلخواه  $x$  لایه  $j$  برحسب موج تخت فرودی در جهت مثبت محور  $x$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_j(x, \lambda) = \frac{S_{j11}'' e^{-i\xi_j(d_j-x)} + S_{j21}'' e^{i\xi_j(d_j-x)}}{S_{j11}' S_{j11}'' e^{-i\xi_j d_j} + S_{j12}' S_{j21}'' e^{i\xi_j d_j}} E_0^+ \quad 5$$

که در آن  $0 \leq x \leq d_j$  است و  $S_j'$  و  $S_j''$  به ترتیب ماتریس‌های انتقال لایه‌های بالایی و پایینی لایه  $j$  نام هستند. با استفاده از رابطه 4 می‌توان متوسط انرژی جذب شده در واحد زمان را برحسب ضریب جذب به دست آورد:

$$Q_j(x, \lambda) = \frac{1}{2} c \epsilon_0 \alpha_j n_j |E_j(x, \lambda)|^2 \quad 6$$

$$\alpha_j = \frac{4\pi\kappa_j}{\lambda}$$

و براساس این رابطه، چگالی جریان مدار کوتاه با رابطه زیر داده می‌شود [33]:

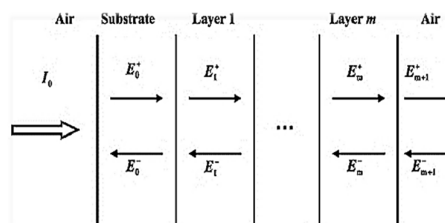
$$J_{sc} = e \iint \frac{Q_j(x, \lambda) \lambda}{hc} d\lambda dx \quad 7$$

که در آن  $h$  ثابت پلانک و  $e$  بار الکترون می‌باشد.

### مدلسازی

با استفاده از برنامه نوشته شده، که محدودیتی برای تعداد لایه‌های ورودی نداریم، می‌توان نمودارهای جذب اپتیکی، انرژی اتلاف شده، توزیع میدان الکتریکی ورودی و چگالی جریان مدار کوتاه را ترسیم و به

با این فرضیات، عملکرد اپتیکی سلول خورشیدی، براساس روابط فرنل برای بازتاب و عبور با ماتریس‌های پراکندگی  $2 \times 2$  در تابش عمودی مورد بررسی قرار می‌گیرد. البته معادلات حاکم بر میدان الکتریکی خطی‌اند و مؤلفه‌های مماسی آن نیز باید پیوسته باشند. در حالت کلی، یک ساختار  $m$  لایه‌ای که بین دو محیط شفاف قرار دارد در نظر می‌گیریم، شکل 1 موج تختی با شدت  $I_0$  را نشان می‌دهد که به صورت عمودی از سمت زیرلایه بر آن فرود می‌آید. هر لایه  $(j=1, 2, \dots, m)$  دارای ضخامت  $d_j$  می‌باشد و خواص نوری آن با ضریب شکست مختلط تابع طول موج نور فرودی توصیف می‌شود. در هر نقطه از ساختار، میدان الکتریکی براساس انتشار در جهت و یا خلاف جهت محور  $x$  می‌تواند به دو مؤلفه متناظر با میدان الکتریکی کل تجزیه شود.



شکل 1. ساختار چند لایه‌ای

به این ترتیب، ماتریس فصل مشترک بین دو لایه  $j$  و  $k$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_{jk} = \frac{1}{t_{jk}} \begin{bmatrix} 1 & r_{jk} \\ r_{jk} & 1 \end{bmatrix} \quad 1$$

که  $r_{jk}$  و  $t_{jk}$  به ترتیب ضرایب بازتاب و عبور فرنل در فصل مشترک  $jk$  هستند. همچنین ماتریس فاز توصیف کننده انتشار نور در لایه  $j$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L_j = \begin{bmatrix} e^{-i\xi_j d_j} & 0 \\ 0 & e^{i\xi_j d_j} \end{bmatrix}, \quad \xi_j = \frac{2\pi}{\lambda} (n_j + i\kappa_j) \quad 2$$

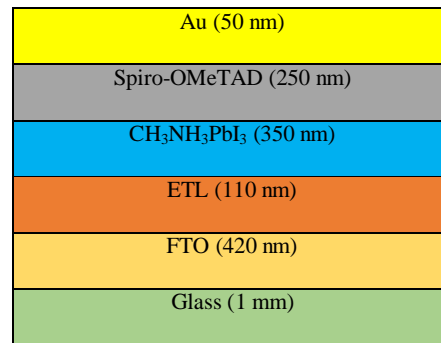
که  $n_j$  و  $\kappa_j$  به ترتیب قسمت حقیقی و موهومی ضریب شکست لایه  $j$  نام هستند. برای ماتریس انتقال کل سیستم داریم:

در این مقاله، تأثیر انتقال‌دهنده‌های الکترون ZnO، TiO<sub>2</sub>، C<sub>60</sub>، IZO، SnO<sub>2</sub> و SrTiO<sub>3</sub> بر عملکرد اپتیکی سلول خورشیدی پروسکایتی مورد مقایسه قرار گرفته است.

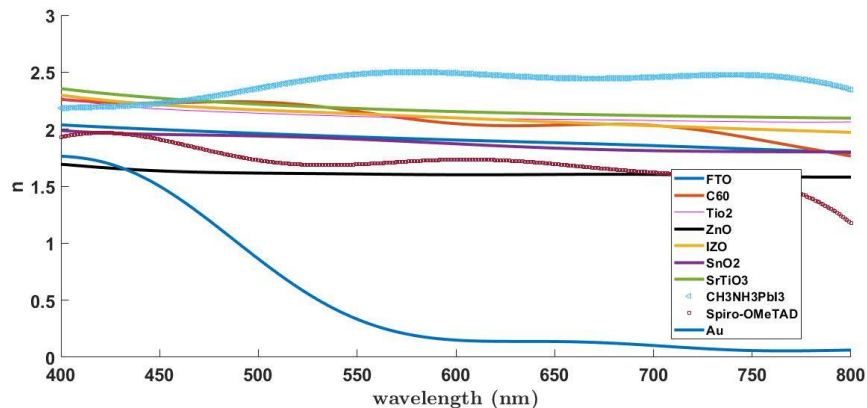
برای انجام شبیه‌سازی که با نرم‌افزار متلب انجام شد، ضرایب شکست مختلط وابسته به طول موج تمامی لایه‌ها و ضخامت مربوط به آن‌ها از جمله ورودی‌های مهم مسئله می‌باشند که تمامی محاسبات بر اساس آنها انجام می‌شوند.

بدین منظور، ضرایب شکست مختلط مورد نیاز برای لایه‌های مربوطه که از کارهای تجربی گزارش شده استخراج شده‌اند در شکل‌های 3 و 4 نشان داده شده است [34,35].

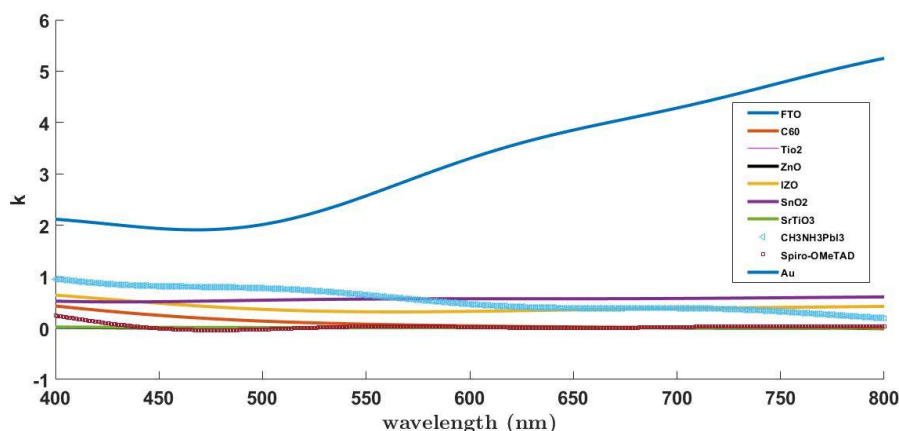
ضخامت بهینه برای لایه جاذب ساختار دست یافت. شکل 2 طرح‌واره‌ای از ساختار سلول خورشیدی پروسکایتی شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد که به ترتیب متشکل از زیرلایه، لایه انتقال‌دهنده الکترون، جاذب پروسکایت، انتقال‌دهنده حفره و کاتد طلا می‌باشد.



شکل 2. طرح کلی سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده.



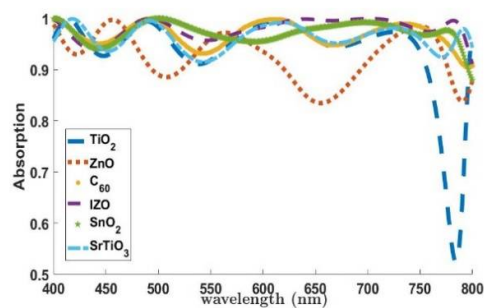
شکل 3. قسمت حقیقی ضریب شکست مختلط تمامی لایه‌های ساختار



شکل 4. قسمت موهومی ضریب شکست مختلط تمامی لایه‌های ساختار

### بررسی نتایج شبیه‌سازی

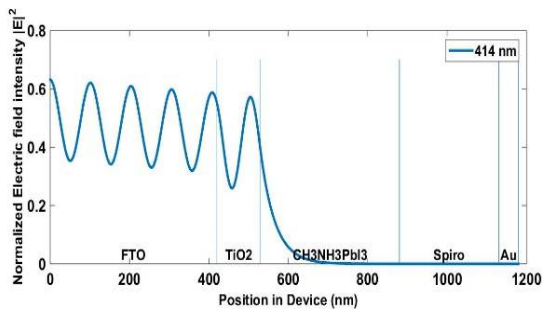
ابتدا با استفاده از مدل ماتریس انتقال (رابطه 4)، جذب کل ساختار نشان داده شده در شکل 2 برای انتقال‌دهنده‌های الکترون محاسبه شد و سپس نمودار جذب برحسب طول موج رسم گردید. همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌کنید، جذب در سلول خورشیدی با رساننده‌های الکترون  $ZnO$ ،  $TiO_2$ ،  $C_{60}$ ،  $IZO$ ،  $SrTiO_3$  و  $SnO_2$  به ترتیب در طول موج‌های 414، 456، 491، 492 و 500 نانومتر بیشینه است.



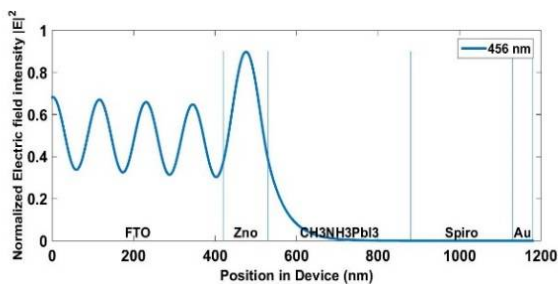
شکل 5. جذب محاسبه‌شده در سلول

سپس در طول موج‌هایی که بیشینه جذب را در سلول داشتیم، مجذور میدان الکتریکی  $|E|^2$  برحسب فاصله از فصل مشترک زیرلایه و FTO محاسبه شد که نتایج شبیه‌سازی آن در شکل‌های 6، 7، 8، 9، 10 و 11 نشان داده شده است. مشخص است که در طول موج‌های مذکور، مجذور میدان الکتریکی در ناحیه فعال روند نزولی دارد که نشان می‌دهد لایه جذب در این طول موج برای تمامی ساختارها جذب زیادی دارد. لازم به ذکر است که در مدل اپتیکی استفاده شده، شدت میدان الکتریکی در هر لایه ناشی از دو میدان فرودی و برگشتی می‌باشد. همچنین مزیت این روش محاسباتی در این است که انرژی‌های بازگشتی از کاتد را در نظر می‌گیرد؛ لذا با توجه به برهم‌کنش این دو موج الکترومغناطیسی، افزایش مجذور میدان الکتریکی در لایه  $ZnO$  (شکل 7) نسبت به میدان ورودی قابل توجه

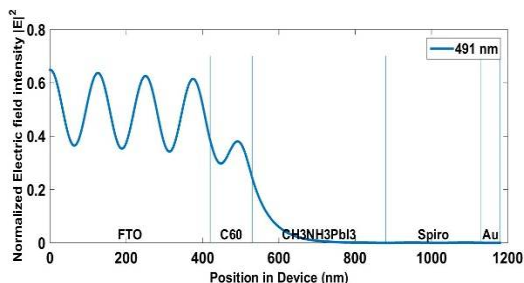
است. در ادامه، متوسط انرژی جذب شده در واحد زمان با همین طول موج‌ها برحسب فاصله از فصل مشترک زیرلایه و FTO محاسبه شد. همان‌طور که در شکل 12 مشاهده می‌کنید، متوسط انرژی جذب‌شده تابع گسسته‌ای از  $x$  می‌باشد و از طرفی در لایه جذب بیشترین مقدار را دارد.



شکل 6. مجذور میدان الکتریکی سلول با  $TiO_2$  به عنوان ETL

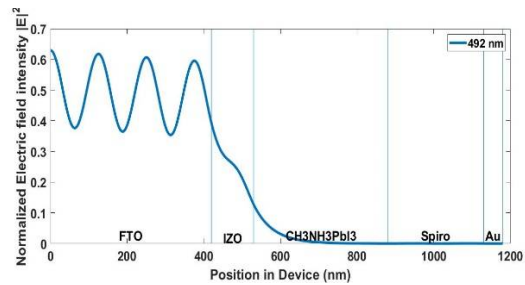


شکل 7. مجذور میدان الکتریکی سلول با  $ZnO$  به عنوان ETL

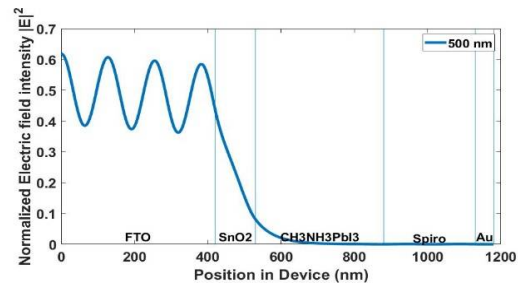


شکل 8. مجذور میدان الکتریکی سلول با  $C_{60}$  به عنوان ETL

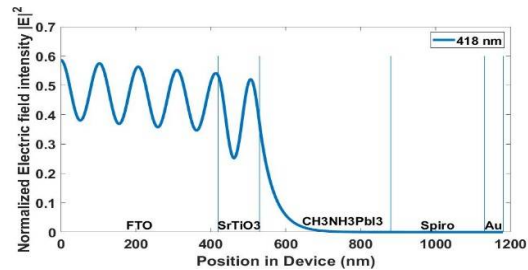
ضخامت این لایه را از 0 تا 500 نانومتر انتخاب کردیم [36,37]. بر این اساس، ضخامتی که دارای بیشترین جریان است، به‌عنوان ضخامت بهینه لایه فعال مشخص می‌شود و با انتخاب آن می‌توان بیشترین بازدهی و کارایی را برای سلول داشت. با توجه به شکل 13، ضخامت‌های بهینه به‌دست آمده برای لایه فعال با رساننده‌های الکترون  $\text{SnO}_2$ , IZO,  $\text{C}_{60}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  و  $\text{SrTiO}_3$  به ترتیب 500، 460، 495، 500، 490 و 500 نانومتر می‌باشد. همچنین ساختاری که در آن از  $\text{TiO}_2$  به‌عنوان سدکننده حفره استفاده می‌شود، دارای بیشترین چگالی جریان  $22.77 \text{ mA/Cm}^2$  است و بنابراین در این ساختار با انتخاب ضخامت 500 نانومتر برای لایه جاذب می‌توان به بیشترین بازدهی رسید. البته بیشترین چگالی جریان شبیه‌سازی شده در این مقاله، با مقدار تجربی ( $22.6 \text{ mA/Cm}^2$ ) تقریباً هم‌خوانی خوبی دارد [34]. بنابراین با استفاده از برنامه شبیه‌سازی در این مقاله، ابتدا می‌توانیم ضخامت بهینه لایه جاذب ساختار مورد نظرمان را به‌دست آوریم و سپس برای انجام کار تجربی در آزمایشگاه از این ضخامت بهینه استفاده کنیم. لازم به‌ذکر است که چون عوامل متعددی در داشتن بازدهی و کارایی بالا مؤثرند، بنابراین داشتن ضخامت بهینه یکی از عوامل مؤثر در داشتن بیشترین بازدهی برای ساختار می‌باشد که در این پژوهش این عامل را از نظر ایتیکی مورد بررسی قرار دادیم. به این ترتیب که ساختار معرفی شده با بهترین عملکرد در این مقاله، از نظر عوامل دیگر نیز باید مورد ارزیابی قرار گیرد.



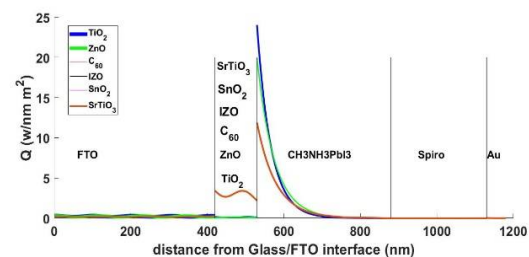
شکل 9. مجذور میدان الکتریکی سلول با IZO به‌عنوان ETL



شکل 10. مجذور میدان الکتریکی سلول با  $\text{SnO}_2$  به‌عنوان ETL.



شکل 11. مجذور میدان الکتریکی سلول با  $\text{SrTiO}_3$  به‌عنوان ETL



شکل 12. توزیع متوسط انرژی جذب‌شده در هر شش ساختار.

در نهایت با شبیه‌سازی ایتیکی، نمودار چگالی جریان مدار کوتاه ساختارها برحسب ضخامت‌های مختلف لایه جاذب رسم شد. لازم به‌ذکر است محدوده تغییرات

[2] J. Zhao, A. Wang, M.A. Green, 24.5% efficiency PERT silicon solar cells on SEH MCZ substrates and cell performance on other SEH CZ and FZ substrates, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **66** (2001) 27-36. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00155-0](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00155-0)

[3] K.R. Catchpole, M.J. McCann, K.J. Weber, A.W. Blakers, A review of thin film crystalline silicon for solar cell applications. Part 2: Foreign substrates, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **68** (2001) 173-215. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00246-4](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00246-4)

[4] P. Boland, K. Lee, G. Namkoong, Device optimization in PCPDTBT: PCBM plastic solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **94** (2010) 915-920. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.01.022>

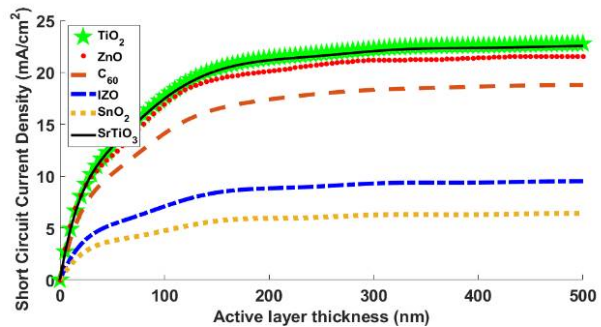
[5] C. Liang, Y. Wang, D. Li, X. Ji, F. Zhang, Z. He, Modelling and simulation of bulk heterojunction polymer solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **127** (2014) 67-86. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.04.009>

[6] J. Perlin, Silicon Solar Cell Turns 50, *National Renewable Energy Laboratory, United States*, (2004).

[7] A.V. Shah, H. Schade, M. Vanecek, J. Meier, E. Vallat-Sauvain, N. Wyrsh, U. Kroll, C. Droz, J. Bailat, Thin-film silicon solar cell technology, *Progress in Photovoltaics Research and applications* **12** (2004) 113-142. <https://doi.org/10.1002/pip.533>

[8] K.L. Chopra, P.D. Paulson, V. Dutta, Thin-film solar cells: an overview, *Progress in Photovoltaics Research and applications* **12** (2004) 69-92. <https://doi.org/10.1002/pip.541>

[9] A. Goetzberger, J. Luther, G. Willeke, Solar cells: Past, present, future, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **74** (2002)



شکل 13. چگالی جریان مدار کوتاه هر شش ساختار برحسب ضخامت لایه فعال.

### بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش، با استفاده از مدل اپتیکی ماتریس انتقال اثر جذب در لایه‌های مختلف سلول خورشیدی پروسکایتی بررسی شده است. به عبارتی با در نظر گرفتن رساننده‌های الکترون متفاوت در ساختار نرمال، ابتدا در طول موج‌های مختلف جذب کل سلول محاسبه شد و سپس در طول موجی که بیشترین جذب صورت گرفت، توزیع میدان الکتریکی و متوسط انرژی جذب شده در ساختار برحسب فاصله از فصل مشترک زیرلایه و FTO رسم شدند. در نهایت با شبیه‌سازی اپتیکی، نمودار چگالی جریان مدار کوتاه ساختار در ضخامت‌های مختلف لایه جاذب رسم شد و با تحلیل آن، ضخامت بهینه لایه فعال سلول به دست آمد. این شبیه‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار متلب انجام شدند و نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در ساختاری با انتقال‌دهنده الکترون  $\text{TiO}_2$  و ضخامت 500 نانومتر برای لایه فعال، امکان دستیابی به بازدهی بالا وجود دارد.

### مرجع‌ها

[1] M.I. Khan, A Study on the Optimization of Dye-Sensitized Solar Cells, *Graduate Theses and Dissertations* (2013) 1-74. <https://scholarcommons.usf.edu/etd/4519>



- Nano Letters* **13** (2013) 1764- 1769.  
<https://doi.org/10.1021/nl400349b>
- [18] M.A. Green, A. Ho-baillie, H.J. Snaith, The emergence of perovskite solar cells, *Nature Photonics* **8** (2014) 506-514.  
<https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.134>
- [19] S.D. Stranks, G.E. Eperon, G. Grancini, C. Menelaou, M.J. Alcocer, T. Leijtens, L. M. Herz, A. Petrozza, H.J. Snaith, Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber, *Science* **342** (2013) 341-344.  
<https://doi.org/10.1126/science.1243982>
- [20] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, T. Miyasaka, Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells, *Journal of the American Chemical Society* **131**, (2009) 6050-6051.  
<https://doi.org/10.1021/ja809598r>
- [21] Y. Tang, M. Li, Y. Zhang, Zh. Wang, X. Hou, Ch. Dong, Ch. Qin, Sh. Cao, Y.H. Jiang, Ultrafast carrier dynamics in high-performance  $\alpha$ -bis-PCBM doped organic-inorganic hybrid perovskite solar cell, *Organic Electronics* **75** (2019) 105384.  
<https://doi.org/10.1016/j.orgel.2019.105384>
- [22] N.J. Jeon, H. Na, E.H. Jung, T.-Y. Yang, Y.G. Lee, G. Kim, H.-W. Shin, S.II Seok, J. Lee, J. Seo, A fluorene-terminated hole-transporting material for highly efficient and stable perovskite solar cells, *Nature Energy* **3**, (2018) 682-689.  
<https://doi.org/10.1038/s41560-018-0200-6>
- [23] See <http://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png> for more information about Best Research Cell Efficiencies (last accessed: October 2018).
- [24] P. Chen, E. Wang, X. Yin, H. Xie, M. Que, B. Gao, W. Que, Additive-assisted One-step Formed Perovskite/Hole conducting Materials Graded Heterojunction for Efficient Perovskite Solar Cells, *Journal of Colloid and Interface* **1-11**.  
[https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00042-9](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00042-9)
- [10] A. Hagfeldt, M. Grätzel, Molecular Photovoltaics, *Accounts of Chemical Research* **33** (2003) 269–277.  
<https://doi.org/10.1021/ar980112j>
- [11] D. Wöhrle, D. Meissner, Organic Solar Cells, *Advanced Materials* **3** (1991) 129–138.  
<https://doi.org/10.1002/adma.19910030303>
- [12] M. Grätzel, Dye-sensitized solar cells, *Journal of photochemistry and photobiology C: Photochemistry Reviews* **4** (2003) 145–153.  
[https://doi.org/10.1016/S1389-5567\(03\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S1389-5567(03)00026-1)
- [13] H. Hoppe, N.S. Sariciftci, Organic solar cells: An overview, *Journal of Materials Research* **19** (2011) 1924–1945.  
<https://doi.org/10.1557/JMR.2004.0252>
- [14] M.A. Green, Third generation photovoltaics: Solar cells for 2020 and beyond, *Physica E: Low Dimensional Systems and Nanostructures* **14** (2002) 65-70.  
[https://doi.org/10.1016/S1386-9477\(02\)00361-2](https://doi.org/10.1016/S1386-9477(02)00361-2)
- [15] G. Liu, L. Zhu, H. Zheng, X. Xu, A. Alsaedi, T. Hayat, X. Pan, S. Daia, Highly efficient and humidity stable perovskite solar cells achieved by introducing perovskite-like metal formate material as the nanocrystal scaffold, *Journal of Power Sources* **402** (2018) 229–236.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.014>
- [16] G.E. Eperon, S.D. Stranks, C. Menelaou, M.B. Johnston, L.M. Herz, H.J. Snaith, Formamidinium lead trihalide: a broadly tunable perovskite for efficient planar heterojunction solar cells, *Energy & Environmental Science* **7** (2014) 982-988.  
<https://doi.org/10.1039/C3EE43822H>
- [17] J.H. Noh, S.H. Im, J.H. Heo, T.N. Mandal, S.I. Seok, Chemical management for colorful, efficient, and stable inorganic organic hybrid nanostructured solar cells,

- organic thin films, *Journal of Applied Physics* **86** (1999) 487–496.  
<https://doi.org/10.1063/1.370757>
- [32] Ch. Chen, Sh. Hsiao, Ch. Chen, H. Kang, Zh. Huang, H. Lin, Optical properties of organometal halide perovskite thin films and general device structure design rules for perovskite single and tandem solar cells, *Journal of Materials Chemistry A* **3** (2015) 9152–9159.  
<https://doi.org/10.1039/C4TA05237D>
- [33] Q. Lin, A. Armin, R. Nagiri, P. Burn, P. Meredith, Electro-optics of perovskite solar cells, *Nature Photonics* **9**, (2015) 106–112.  
<https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.284>
- [34] J.M. Ball, S.D. Stranks, M.T. Hörantner, S. Hüttner, W. Zhang, E.J.W. Crossland, I. Ramirez, M. Riede, M.B. Johnston, R.H. Friend, H.J. Snaith, Optical properties and limiting photocurrent of thin-film perovskite solar cells, *Energy and Environmental science* **8** (2015) 602–609.  
<https://doi.org/10.1039/C4EE03224A>
- [35] E. Petoukhoff, K. Vijapurapu, M. O'carroll, Computational comparison of conventional and inverted organic photovoltaic performance parameters with varying metal electrode surface work function, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **120** (2014) 572–583.  
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.09.041>
- [36] D. Liu, M.K. Gangishetty, T.L. Kelly, Effect of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  thickness on device efficiency in planar heterojunction perovskite solar cells, *Journal of Materials Chemistry A* **2** (2014) 19873–19881.  
<https://doi.org/10.1039/C4TA02637C>
- [37] A.A.B. Baloch, Sh.P. Aly, M.I. Hossain, F. El-Mellouhi, N. Tabet, F.H. Alharbi, Full space device optimization for solar cells, *Scientific Reports* **7** (2017) 1–14.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-12158-0>
- Science* **532** (2018) 182–189.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.07.100>
- [25] J. Cui, H. Yuan, J. Li, X. Xu, Y. Shen, H. Lin, M. Wang, Recent progress in efficient hybrid lead halide perovskite solar cells, *Science and Technology of Advanced Materials* **16** (2015) 1–14.  
<https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/3/036004>
- [26] T.C. Sum, N. Mathews, Advancements in Perovskite Solar Cells: Photophysics behind the Photovoltaics, *Energy & Environmental science* **7** (2014) 2518–2534.  
<https://doi.org/10.1039/C4EE00673A>
- [27] S. Zheng, G. Wang, T. Liu, L. Lou, S. Xiao, S. Yang, Materials and structures for the electron transport layer of efficient and stable perovskite solar cells, *Science China Chemistry* **62** (2019) 800–809.  
<https://doi.org/10.1007/s11426-019-9469-1>
- [28] M.F. Mohamad Noh, Ch. Hoong Teh, R. Daik, E. Liang Lim, Ch. Chin Yap, M. Adib Ibrahim, N.A. Ludin, Abd. R. Mohd Yusoff, J. Jang, M. Mat Teridi, The architecture of the electron transport layer for a perovskite solar cell, *Journal of Materials Chemistry C* **6** (2018) 682–712.  
<https://doi.org/10.1039/C7TC04649A>
- [29] H. Chang, C.W. Kung, H.W. Chen, T.Y. Huang, S.Y. Kao, H.C. Lu, M.H. Lee, K.M. Boopathi, C.W. Chu, Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells Incorporating Metallic-Organic Framework Nanocrystals, *advanced Materials* **27** (2015) 7229–7235.  
<https://doi.org/10.1002/adma.201502537>
- [30] O.S. Heavens, Thin films and lasers, *Annals of the New York Academy of Sciences* **122** (1965) 638–642.  
<https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1965.tb20244.x>
- [31] L.A.A. Pettersson, L.S. Roman, O. Inganäs, Modeling photocurrent action spectra of photovoltaic devices based on