



بهینه‌سازی عملکرد سلول‌های خورشیدی پروسکایت با استفاده از گرافن در لایه انتقال دهنده الکترون و اعمال پوشش ضد بازتاب

مجتبی شهرکی^{1*}، ناصر جوانمرد²

1- استادیار، گروه مهندسی برق و الکترونیک، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق و الکترونیک، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
* زاهدان، صندوق پستی: ۹۸۷-۹۸۱۵۵ mo_shahraki@yahoo.com, m.shahraki@ece.usb.ac.ir

چکیده

یکی از مهمترین چالش‌های پیش رو در سلول‌های خورشیدی پروسکایت افزایش بازدهی این سلول‌ها می‌باشد. روش‌های مختلفی را می‌توان جهت بهبود بازدهی این سلول‌ها به کار گرفت که یکی از این روش‌ها تغییر مواد لایه‌های اطراف پروسکایت است. در این مقاله، به بررسی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ساختار سلول‌های خورشیدی پروسکایت پرداخته شده است. در این شبیه‌سازی از سه ماده مختلف شامل TiO_2 ، گرافن و ترکیب این دو ماده با درصد گرافن مختلف در لایه انتقال دهنده الکترون (ETL) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب 5٪ گرافن با TiO_2 بهترین عملکرد را با حداکثر چگالی جریان 22 میلی‌آمپر بر سانتی متر مربع ارائه می‌دهد. در ادامه، تأثیر ضخامت لایه‌های مختلف بر بازدهی سلول خورشیدی بررسی شده است و تأثیر تغییرات لایه‌های پروسکایت، لایه انتقال دهنده حفره، لایه انتقال دهنده الکترون و لایه اکسید شفاف بر میزان بازدهی مطالعه شده است. همچنین یک روش بهینه‌سازی انبوه ذرات برای دستیابی به بهترین ساختار ممکن استفاده گردیده است و در نهایت، با استفاده از یک لایه پوشش ضد بازتاب (ARC) از جنس دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2)، بازدهی ساختار به 16/49 درصد افزایش یافته است.

کلیدواژه‌گان: پروسکایت، لایه ضد انعکاس (ARC)، گرافن، بازدهی، لایه انتقال دهنده الکترون

Optimization of perovskite solar cell performance using graphene in the electron transport layer and using anti-reflection coating

Mojtaba Shahraki^{1*}, Naser Javanmard²,

1-Assistant Professor, Department of Electrical and Electronics Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
2- Post Graduate Student, Department of Electrical and Electronics Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
* P.O.B. 98155-97 Zahedan, Iran, mo_shahraki@yahoo.com, m.shahraki@ece.usb.ac.ir

Received: 30 July 2025 Accepted: 01 December 2025

Abstract

One of the most important challenges in perovskite solar cells is to increase their efficiency. Different methods are used to increase the efficiency of this solar cells, where changing the layers around the perovskite is one approach. In this paper, the structure of perovskite solar cells has been investigated, simulated, and optimized. In these simulations, three different materials including TiO_2 , graphene, and a combination of these two materials with different percentages of graphene in the electron transport layer (ETL) is used. The results show that the combination of 5% graphene with TiO_2 provides the best performance with a maximum current density of 22 mA/cm². Furthermore, the effect of the thickness of different layers on the efficiency of the solar cell has been investigated, and the impact of changes in the perovskite layer, hole transport layer, electron transport layer, and transparent oxide layer on the efficiency has been studied. Additionally, a particle swarm optimization method has been used to achieve the best possible structure. Finally, with the application of an anti-reflective coating made of silicon dioxide, the efficiency of the structure increased to 16.49%.

Keywords: Provskite, Anti Reflection coating, Graphene, Efficiency, Electron Transport Layer (ETL)

1- مقدمه

انرژی خورشیدی یکی از پاک‌ترین و در دسترس‌ترین منابع تجدیدپذیر است که می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی باشد. اما در گذشته به دلیل هزینه‌های اولیه بالا و عرضه ارزان نفت و گاز طبیعی، پیشرفت فناوری‌های خورشیدی محدود بود. پس از افزایش قیمت نفت در سال ۱۹۷۳، کشورهای صنعتی به تولید انرژی از منابع جایگزین توجه بیشتری کردند.

ایران با داشتن حدود 280 تا ۳۰۰ روز آفتابی در سال، یکی از بهترین مناطق برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی است. این پتانسیل بالا، در کنار پراکندگی روستاها و مناطق دورافتاده، استفاده از انرژی خورشیدی را به راه‌حلی کارآمد و پایدار برای برق‌رسانی تبدیل کرده است. در مناطقی که میانگین تابش خورشید بالاتر از 3/5 کیلووات ساعت بر مترمربع باشد، استفاده از فناوری‌های خورشیدی اقتصادی و به‌صرفه است. در بسیاری از نقاط ایران، میانگین انرژی تابشی خورشید بسیار فراتر از این مقدار است و حتی در برخی مناطق به ۷ یا ۸ کیلووات ساعت بر مترمربع نیز می‌رسد [1].

تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته با فناوری‌هایی مانند سلول‌های خورشیدی سیلیکونی، هیبریدی، معدنی و آلی انجام می‌شود و پیش‌تاز این فناوری‌ها سلول‌های خورشیدی سیلیکونی هستند. اما چالش‌هایی نظیر هزینه بالای تولید و عملکرد محدود در برخی شرایط در این سلول‌ها مشکل‌ساز می‌باشند. به همین دلیل، مواد جایگزینی برای رفع این محدودیت‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در حال حاضر، سلول‌های خورشیدی مبتنی بر پروسکایت (مواد هیبریدی آلی/غیرآلی)، به‌عنوان نسل جدید سلول‌های خورشیدی در حال توسعه هستند [2].

سلول‌های خورشیدی پروسکایت (Perovskite Solar Cells) نوعی از سلول‌های خورشیدی هستند که از مواد با ساختار پروسکایت برای جذب نور و تبدیل آن به الکتریسیته استفاده می‌کنند. ساختار پروسکایت به ترکیباتی با فرمول عمومی ABX_3 اشاره دارد، که در آن 'A' و 'B' کاتیون‌های مختلف و 'X' یک آنیون هالید (مانند کلر، برم یا ید) است. در سلول‌های خورشیدی پروسکایت، معمولاً از متیل‌آمونیم سرب یدید ($CH_3NH_3PbI_3$) به‌عنوان ماده پروسکایت استفاده می‌شود.

مواد پروسکایت، ارزش قابل توجهی را در زمینه کاربردهای سلول خورشیدی نشان داده‌اند. به طوری که بازدهی تبدیل انرژی برای سلول‌های خورشیدی پروسکایت در سال‌های اخیر افزایش قابل توجهی یافته است [3]. با این حال، چالش‌های اولیه در دستگاه‌های سلول‌های خورشیدی، پایداری و کارایی آن‌ها است که تلاش‌های تحقیقاتی گسترده‌ای را برای افزایش پایداری و کارایی آن‌ها برانگیخته است [4]. جامعه علمی اخیراً به دلیل کارایی قابل توجه پروسکایت در سلول‌های خورشیدی و کاربردهای فتوولتائیک، به پروسکایت‌ها علاقه‌مند شده است [5].

بر خلاف دیگر مواد، پروسکایت‌ها خواص الکترونیکی و نوری دلگرم‌کننده‌ای از خود نشان داده‌اند که از جمله این خواص می‌توان به جذب نوری بالا، طیف جذب گسترده، قابل تنظیم بودن و قابلیت تحرک بالای حامل‌ها اشاره کرد [6]. اگرچه ترکیبات مربوط به خواص ساختاری، الاستیک و اپتوالکترونیکی آن‌ها هنوز به طور کامل شناسایی نشده است، اما به‌عنوان

جایگزینی برای مواد پیشین، به منظور اصلاح ویژگی‌های نوری، فیزیکی، شیمیایی و الکترونیکی استفاده می‌شوند. یکی از نکات قابل توجه این مواد این است که دما و رطوبت بر پایداری حرارتی سلول‌های خورشیدی پروسکایت تأثیر گذاشته و عملکرد سلول را تحت تأثیر قرار می‌دهد [7-8].

در ساختار پروسکایت مزومتخلخل، لایه‌ای با تخلخل مزو معمولاً از نانوکریستال تیتانیوم دی‌اکسید ساخته می‌شود و نقش داربست برای لایه پروسکایت را بازی می‌کند [9]. از جمله مشکلات این ساختار، نیاز به حرارت بالا برای پخت تیتانیوم دی‌اکسید و حساسیت آن به نور فرابنفش است، که باعث کاهش پایداری می‌گردد [10]. اما ساختار مسطح پروسکایت/گرافن را می‌توان با بازده بالاتر، پایداری و طول عمر بیشتر در دمای کمتر از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تولید کرد [11]. یک استراتژی مفید برای تثبیت مواد پروسکایت جایگزینی کاتیون‌های آلی است که تقاضا برای پروسکایت‌ها در راستای اهداف صنعتی و تجاری را افزایش داده است [12-13]. این مواد ویژگی‌های خاصی دارند که برای بسیاری از کاربردهای صنعتی مناسب هستند [14]. به عنوان مثال، سه ساختار مکعبی مختلف $BaCuF_3$ برای پیش‌بینی دقیق فاز پایدار آن مدل‌سازی شده است و خواص مکانیکی و اپتوالکترونیکی ترکیبات پایدار آن تعیین شده است [15].

در سال‌های اخیر بازدهی پروسکایت‌ها به‌طور چشمگیری افزایش یافته و چشم‌اندازهای جدیدی را برای پیشرفت سلول‌های خورشیدی به ارمغان آورده است [16]. شبیه‌سازی عددی و آنالیز سلول خورشیدی پروسکایت با استفاده از اکسید روی به عنوان ماده انتقال الکترون و پروسکایت به عنوان ماده جاذب، نشان دهنده افزایش بازدهی تبدیل انرژی است [17]. تحقیقات نشان داده‌اند که مواد کربنی مانند گرافن و نانولوله‌های کربنی به دلیل ویژگی‌های برجسته خود، در توسعه الکترودهای سلول خورشیدی جذاب هستند [18]. بهبود پایداری سلول‌های خورشیدی با استفاده از لایه‌های TiO_2 مزومتخلخل و اکسید گرافن نیز مورد مطالعه قرار گرفته است [19]. ژو و همکارانش بازدهی بالای 19%/3 را در یک سلول خورشیدی ناهمگون با استفاده از TiO_2 به عنوان ETM و OMeTAD-spiro به عنوان HTM به دست آوردند [20]. بهبود بازده تبدیل توان بدون به خطر انداختن سطوح بازدهی بالا با استفاده از استراتژی تنظیم‌شده تقارن در سطح مولکولی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است و عملکرد سلول خورشیدی پروسکایت با الکترودهای ساخته شده از مخلوط $CuSCN$ و مواد کربنی مختلف بهبود یافته است [21]. بهترین عملکرد PSC با الکتروده ساخته شده از CNT و $CuSCN$ نشان داده شده است. سونال و همکارانش در سال 2023، کاربردهای گرافن و مشتقات آن در فناوری فتوولتائیک خورشیدی را بررسی کرده و نشان داده‌اند که گرافن می‌تواند عملکرد سلول خورشیدی را به میزان قابل توجهی بهبود بخشد [22]. همچنین بهبود عملکرد و افزایش کارایی سلول‌های پروسکایت با استفاده از مواد مبتنی بر گرافن در پژوهش ژانگ و همکاران در سال 2024 بررسی شده است [23]. با توجه به آنچه بیان گردید استفاده از گرافن برای اصلاح سلول‌های خورشیدی پروسکایت به یک کانون تحقیقاتی تبدیل شده است. گرافن دارای شفافیت نوری بالا بوده و باعث جدایش موثرتر حامل‌های بار و کاهش بازترکیب درون سلول می‌شود و دارای خواص مکانیکی و الکترونیکی مناسبی می‌باشد. در همین

راستا از ماده گرافن، مشتقات آن به عنوان لایه انتقال الکترون یا جذب کننده نور استفاده می‌گردد.

با توجه به نیازهای جامعه امروز، علاوه بر سلول‌هایی با بازده بالا نیاز مبرم به سلول‌هایی سبک، نازک و منعطف برای کاربردهایی از قبیل هواپیماهای بدون سرنشین (پهپاد)، اتومبیل‌های الکتریکی، شارژرها، ماهواره‌ها، فضاییماها، تامین برق ساختمان‌ها و غیره می‌باشد که به طور ویژه یکی از ویژگی‌های مهم آن مقاومت دینامیکی بالا و انعطاف پذیری آن بوده و انتخابی ایده‌آل در این جهت می‌باشد [24].

یکی از چالش‌های موجود در سلول‌های خورشیدی پروسکایت، انتخاب ماده مناسب برای استفاده در لایه‌های ETL و HTL می‌باشد [25-26]. این لایه‌ها باید قابلیت تحرک بالای حامل‌ها را داشته باشند که بتوانند به شکل مناسبی حامل‌ها را به الکترودهای اطراف منتقل کنند [27]. در ساختار مورد نظر ما انتخاب لایه انتقال دهنده حفره از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد، زیرا این لایه که بالای پروسکایت قرار می‌گیرد، باید در طیف مورد نظر برای جذب نور خورشید شفاف باشد تا فوتون‌های تابیده شده در این محدوده به ماده پروسکایت برسند. یکی از مواد متداول جهت استفاده در این لایه TiO_2 می‌باشد که در ناحیه مورد نظر شفاف نیز است. اما یکی از مشکلات این ماده کم‌بودن قابلیت تحرک حامل‌ها می‌باشد که در نهایت بازدهی سلول خورشیدی را تحت تاثیر قرار می‌دهد [28]. برای رفع این مشکل می‌توان از گرافن جهت بهبود مشخصات لایه ETL بهره گرفت.

هر چند در سال‌های اخیر استفاده از گرافن به عنوان لایه انتقال‌دهنده الکترون یا حفره مورد بررسی قرار گرفته است [29-30]، اما در اکثر این پژوهش‌ها ماده گرافن به صورت لایه جداگانه در ساختار مورد نظر به کار رفته است. به عنوان مثال در مرجع [31] از دو لایه مجزا گرافن و PEDOT به عنوان ETL استفاده شده است. همچنین در مرجع [32] نیز از یک لایه گرافن به همراه یک لایه TiO_2 در لایه سدی استفاده شده است. باید توجه داشت که به دلیل تفاوت بسیار زیاد در گاف انرژی گرافن (حدود 0) با بقیه مواد، استفاده از چنین ترکیباتی می‌تواند منجر به تضعیف مشخصات الکتریکی سلول مورد نظر گردد.

پژوهش‌های عملی انجام شده این موضوع را تایید می‌کنند که استفاده از گرافن به عنوان یک لایه مجزا، به دلیل تغییر ناگهانی گاف انرژی، منجر به کاهش جمع‌آوری حامل‌ها و در نتیجه کاهش بازدهی سلول خورشیدی می‌گردد [33]. برای این منظور در پژوهش پیش رو ما قصد داریم تاثیر استفاده از یک لایه ETL که ترکیبی از گرافن و TiO_2 با درصدهای مختلفی از گرافن است را بررسی کنیم. تحت این شرایط با توجه به نزدیکی گاف انرژی ماده مورد نظر به بقیه مواد، جمع‌آوری حامل‌ها به خوبی انجام شده و بازدهی نهایی سلول خورشیدی تحت تاثیر موضوع بیان شده قرار نخواهد گرفت. از طرفی به دلیل بالا رفتن قابلیت تحرک حامل‌ها و تغییرات ضریب شکست نسبت به TiO_2 امکان بهبود چگالی جریان، ضریب پرتشنگی و در نهایت بازدهی سلول خورشیدی وجود دارد.

هدف اصلی از این پژوهش، بهبود دادن مشخصات سلول‌های خورشیدی با استفاده از گرافن، نسبت به نمونه‌های موجود می‌باشد. همچنین این هدف همراه با قابلیت انعطاف جهت کاربردهای مختلف شخصی، تجاری و صنعتی قابل بررسی می‌باشد. عمدتاً در مطالعات پیشین بر هر چه بهتر شدن وضعیت

سلول‌های خورشیدی در راستای زیست‌تخریب‌پذیری کمتر و سازگاری بیشتر با محیط و شرایط انسان‌ها تاکید و توجه شده است که در این پژوهش نیز این مسئله بسیار مهم، مد نظر قرار خواهد گرفت. در ادامه این پژوهش ابتدا به بررسی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سلول‌های خورشیدی پروسکایت پرداخته می‌شود. سپس در ادامه طرح‌هایی برای به‌کارگیری گرافن، بهینه‌سازی ضخامت، محل مناسب قرارگیری ماده جاذب، ETL و HTL بررسی خواهد شد. سپس نقش مواد مختلف در لایه‌های ETL و HTL و نحوه صحیح قرارگیری در ساختار، ابعاد، شکل و سایر ویژگی‌های آن‌ها بررسی شده و در نهایت انتخاب یک ساختار بهینه و کاربردی مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

2- ساختار سلول خورشیدی پروسکایت

سلول‌های خورشیدی پروسکایت از چندین لایه تشکیل شده‌اند که هر کدام نقش خاصی در تبدیل نور به الکتریسیته ایفا می‌کنند. ساختار کلی این سلول‌ها در شکل 1 نمایش داده شده است. لایه‌های اصلی یک سلول خورشیدی پروسکایت به شرح زیر می‌باشد:

1-2- لایه شفاف رسانا

این لایه معمولاً از اکسید قلع آلیایده با فلئوئور (FTO) یا اکسید ایندیوم قلع (ITO) تشکیل شده و به‌عنوان الکترود جلویی عمل می‌کند. این لایه باید شفاف بوده و اجازه عبور نور را فراهم کرده و جریان الکتریکی را هدایت کند.

2-2- لایه انتقال‌دهنده الکترون (ETL)

این لایه معمولاً از موادی مانند دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) ساخته می‌شود و وظیفه انتقال الکترون‌های تولیدشده در لایه پروسکایت به الکترود را دارد.

3-2- لایه پروسکایت

این لایه جاذب نور است و با جذب فوتون‌های نور خورشید، جفت‌های الکترون-حفره (در مواد پلیمری اکسیژن‌ها) تولید می‌گردند. ترکیبات پروسکایت معمولاً شامل متیل‌آمونیم سرب یدید ($CH_3NH_3PbI_3$) یا فرمول‌های مشابه هستند.

4-2- لایه انتقال‌دهنده حفره (HTL)

این لایه حفره‌های تولید شده را به الکترود پشتی منتقل می‌کند. موادی مانند اسپایرو-امتاد (Spiro-OMeTAD) برای این منظور استفاده می‌شوند.

5-2- الکترود

معمولاً از فلزاتی مانند طلا یا نقره تشکیل شده و برای جمع‌آوری حفره‌ها و تکمیل مدار الکتریکی عمل می‌کند. با تابش نور خورشید به سلول، لایه پروسکایت فوتون‌ها را جذب کرده و جفت‌های الکترون-حفره ایجاد می‌کند. الکترون‌ها به سمت لایه انتقال الکترون و حفره‌ها به سمت لایه انتقال حفره حرکت می‌کنند و در نهایت جریان الکتریکی در مدار خارجی ایجاد می‌شود.

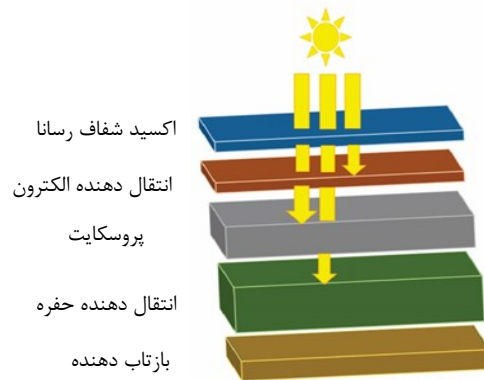
3- نحوه شبیه‌سازی ساختار

در این بخش به بررسی مراحل شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی در نرم‌افزار کامسول می‌پردازیم که شامل چندین مرحله تعیین پارامترهای لازم برای مدل-سازی و حل معادلات می‌باشد.

به میل الکترونی و شکاف باند ماده هستند. N_D و N_A مربوط به چگالی ناخالصی‌های گیرنده و دهنده بوده و τ_p و τ_n نیز طول عمر الکترون‌ها و حفره‌ها در هر ماده می‌باشند.

4- مطالعه ساختار و ارائه نتایج

در ابتدا ساختار پایه بیان شده در بخش 3 توسط ماژول‌های Wave Optics و Semiconductor نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی شده با شکل 2 منحنی جریان-ولتاژ شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با نتایج عملی در مرجع [33] را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی از سه ماده متفاوت در لایه ETL استفاده گردید و نتایج ترسیم شده است. مواد مورد استفاده TiO_2 ، گرافن و ترکیب این دو ماده با گرافن 5 درصد می‌باشد. مقایسه نتایج حاصل شده و مقایسه آن با نتایج عملی نشان‌دهنده صحت نتایج است.



شکل 1 ساختار یک سلول خورشیدی پروسکایت [8].

1-3- لایه‌های تشکیل‌دهنده سلول خورشیدی و مواد استفاده شده

در این پژوهش از FTO به عنوان لایه شفاف رسانا استفاده شده است. این ماده یک لایه شفاف است که اجازه عبور نور را می‌دهد و برای جمع‌آوری الکترون‌ها در بالا بکار برده می‌شود. نانوکامپوزیت گرافن- TiO_2 برای انتقال الکترون در لایه انتقال الکترون (ETL) استفاده شده است. ماده جاذب یا جذب‌کننده نور یک ماده پروسکایت است. ترکیب $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ یکی از پرکاربردترین و معروف‌ترین ترکیبات پروسکایت هالیدی مبتنی بر سرب است. این ماده با ساختار کریستالی خود امکان جذب کارآمد نور خورشید را فراهم کرده و به‌طور گسترده در ساخت سلول‌های خورشیدی پروسکایتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما چالش‌هایی مانند پایداری محیطی و سمی بودن سرب همچنان موضوعات تحقیقاتی مهمی هستند.

یکی از مواد پرکاربرد در لایه انتقال حفره (HTL) ماده Spiro-OMeTAD است که به دلیل ویژگی‌هایی نظیر رسانایی مناسب برای حفره‌ها، شفافیت بالا و سازگاری خوب با سایر لایه‌های سلول خورشیدی مورد توجه بوده و در این پژوهش نیز مورد استفاده قرار گرفته است. مواد آلی مانند PEDOT:PSS و PTAA و مواد غیرآلی مانند NiO و CuSCN نیز برای این لایه استفاده می‌شوند. الکتروود پستی از جنس طلا (Au) با ضخامت 60 نانومتر است و به عنوان یک الکتروود در انتشار جریان الکتریکی تولید شده در سلول‌های خورشیدی عمل می‌کند. تابش نور خورشید برابر با استاندارد AM 1.5G و میزان توان نیز برابر 100 mW/cm^2 می‌باشد و قابلیت پراکندگی و جذب نور در هر لایه وجود دارد. ولتاژ اعمال شده بین 0 تا $1/2$ ولت برای رسم منحنی JV در نظر گرفته می‌شود. تحلیل بخش نوری ساختار توسط ماژول Wave Optics نرم‌افزار Comsol انجام شده و میزان فوتون‌های جذب شده تحت تابش نور خورشید تعیین گردیده است. سپس این فوتون‌ها در ماژول Semiconductor این نرم‌افزار وارد شده تا منحنی‌های جریان-ولتاژ ساختار تعیین گردد. نحوه تعیین و محاسبه میزان جذب فوتون‌ها و همچنین جریان ساختار از طریق مراجع مرتبط قابل استخراج است [34]. همچنین ضرایب شکست و ضرایب جذب پروسکایت، TiO_2 و Spiro-Ometad به همراه مشخصات الکتریکی مواد از مراجع [33-36] استخراج شده است که در جدول 1 بیان شده است.

در این جدول ϵ_r ثابت دی‌الکتریک نسبی ماده، N_C چگالی حالات موثر در باند هدایت و N_V چگالی حالات موثر در باند ظرفیت هر ماده می‌باشد. همچنین μ_n و μ_p به ترتیب قابلیت تحرک الکترون‌ها و حفره‌ها می‌باشند. χ و E_g نیز مربوط

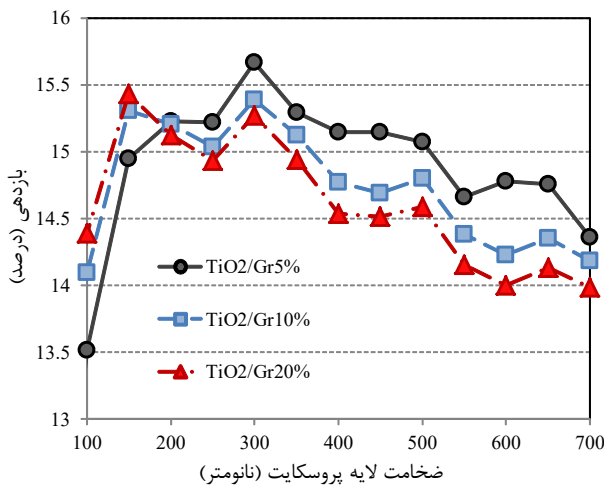
جدول 1 مشخصات الکتریکی مواد مورد استفاده در پژوهش [33-36]

TiO ₂ /Gr5%	TiO ₂ /Gr10%	TiO ₂ /Gr5%	TiO ₂	پروسکایت	مشخصه-ماده
7.3	7.5	7.8	9	6.5	ϵ_r
1e19	1e19	1e19	1e19	2.2e18	N_C (cm ⁻³)
1e19	1e19	1e19	1e19	1.8e19	N_V (cm ⁻³)
350	125	12	0.02	0.5	μ_n (cm ² /V.s)
350	125	12	2	0.5	μ_p (cm ² /V.s)
4.31	4.28	4.24	4.2	3.93	χ (eV)
2.4	2.7	3.1	3.3	1.55	E_g (eV)
-	-	-	-	1e13	N_A (cm ⁻³)
5e18	5e18	5e18	1e19	-	N_D (cm ⁻³)
0.5	1	2	5	8	τ_n (ns)
0.5	1	2	2	8	τ_p (ns)

این نمودار، چگالی جریان (Current Density) به‌ازای ولتاژ (Voltage) را برای سه نمونه مختلف بررسی می‌کند که TiO_2 مربوط به نقاط چین‌دار مشکی، گرافن خط‌چین قرمز و $\text{TiO}_2/\text{Gr5\%}$ خط کامل مشکی هستند.

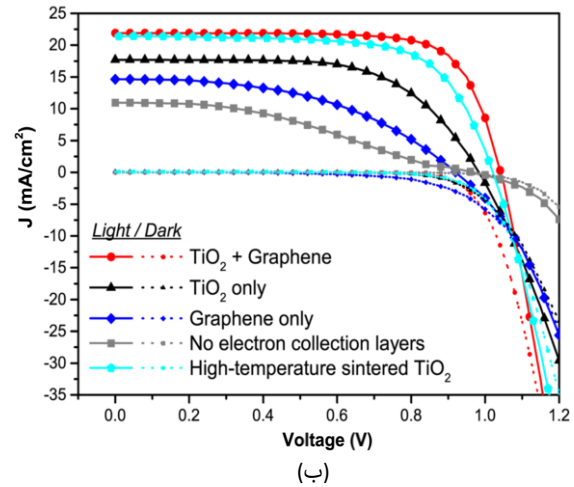
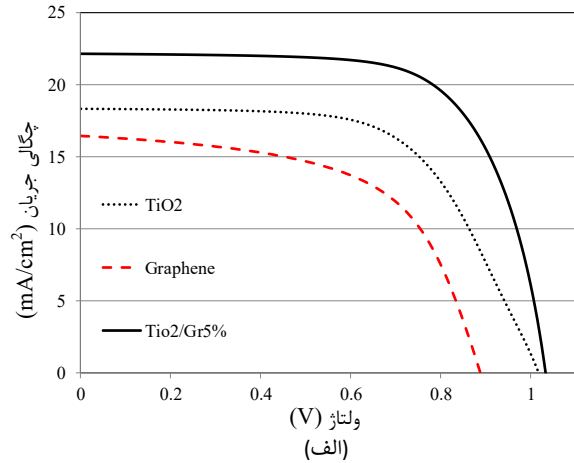
بوده و محور عمودی بیانگر بازدهی بر حسب درصد (٪) است. نتایج با $\text{TiO}_2/\text{Gr}5\%$ با دایره‌های سیاه رنگ، $\text{TiO}_2/\text{Gr}10\%$ با مربع‌های آبی رنگ و $\text{TiO}_2/\text{Gr}20\%$ با مثلث‌های قرمز رنگ نشان داده شده است. نمودار نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه پروسکایت، بازدهی ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد.

برای هر سه نمونه، بازدهی در ضخامت‌های مختلف متفاوت است و بیشترین بازدهی در ضخامت‌های حدود 200 تا 300 نانومتر مشاهده می‌شود. به عنوان مثال، در ضخامت حدود 250 نانومتر، $\text{TiO}_2/\text{Gr}10\%$ بیشترین بازدهی را نشان می‌دهد. در حالی که در ضخامت‌های کمتر یا بیشتر، بازدهی کاهش می‌یابد. همچنین، نمونه $\text{TiO}_2/\text{Gr}20\%$ در ضخامت‌های کمتر از 200 نانومتر بازدهی بیشتری دارد، اما با افزایش ضخامت به بیش از 300 نانومتر، بازدهی آن کاهش می‌یابد. با توجه به این نمودار، می‌توان نتیجه گرفت که تنظیم دقیق ضخامت لایه پروسکایت برای بهینه‌سازی بازدهی سلول‌های خورشیدی پروسکایت اهمیت دارد.



شکل 3 ارتباط بین ضخامت لایه پروسکایت و بازدهی (Efficiency)

از نمودار شکل 3، می‌توان نتیجه گرفت که بازدهی ابتدا با افزایش ضخامت پروسکایت بهبود می‌یابد تا به یک نقطه اوج برسد، سپس با افزایش بیشتر ضخامت، بازدهی کاهش می‌یابد. این رفتار ناشی از مشکلات ایجاد شده هنگام انتقال الکترون‌ها می‌باشد که با ضخامت زیادتر پروسکایت، باز ترکیب حامل‌ها افزایش یافته و کارایی سلول کمتر می‌شود. در ادامه‌ی این مطلب، در شکل 4-الف تاثیر ضخامت لایه ETL بر بازدهی سلول خورشیدی آورده شده است. این نمودار رابطه بین ضخامت لایه ETL (Electron Transport Layer - لایه انتقال الکترون) و بازدهی (Efficiency) را نشان می‌دهد. محور افقی ضخامت لایه ETL را بر حسب نانومتر (nm) از 10 تا 100 نانومتر نشان می‌دهد و محور عمودی بیانگر بازدهی بر حسب درصد می‌باشد. نقاط داده‌ها با دایره‌های توپر و خطی که آن‌ها را به هم متصل می‌کند، نمایش داده شده‌اند. نمودار شکل 4-الف، نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه‌های ETL بازدهی سلول خورشیدی به طور تدریجی بهبود پیدا می‌کند. به‌ویژه در ضخامت‌های میان 40 تا 50 نانومتر، بیشترین افزایش در بازدهی مشاهده می‌شود. این امر منجر به افزایش



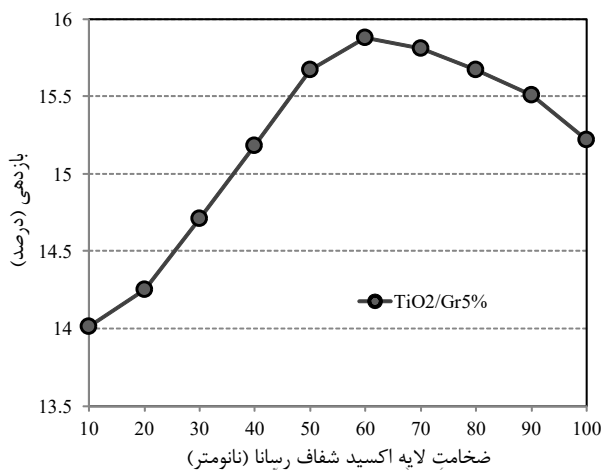
شکل 2 الف) منحنی JV سلول شبیه سازی شده در نرم افزار کامسول ب) منحنی JV مرجع مورد بررسی [33].

TiO_2 به‌عنوان لایه انتقال‌دهنده الکترون (ETL) متداول در سلول‌های خورشیدی استفاده می‌شود. در این حالت چگالی جریان حداکثر 17/48 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع است و نمودار رفتار نیمه‌هادی معمولی را نشان می‌دهد. اما همان‌گونه که اشاره شد، یکی از مشکلات این ماده، پایین بودن قابلیت تحرک الکترون‌ها است که منجر به کاهش بازدهی می‌گردد. گرافن دارای خواص ویژه‌ای مانند هدایت الکتریکی بالا و شفافیت نوری است، اما عملکرد آن نسبت به TiO_2 ضعیفتر است. حداکثر چگالی جریان حدود 15 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع است و افت چگالی جریان نسبت به ولتاژ در این ماده شدیدتر است که به دلیل نقص در انتقال الکترون یا ناپایداری می‌باشد. ترکیب 5٪ گرافن با TiO_2 بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. چگالی جریان حداکثر حدود 22 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع است و پایداری جریان در محدوده ولتاژهای پایین بهتر است. این ترکیب باعث بهبود انتقال الکترون و کاهش باز ترکیب بارهای الکتریکی شده است. تمامی نتایج بیان شده با مقادیر عملی اندازه‌گیری شده مطابقت دارد.

نمودار شکل 3 ارتباط بین ضخامت لایه پروسکایت (Perovskite Layer Thickness) و بازدهی (Efficiency) را برای سه نمونه مختلف از TiO_2/Gr نشان می‌دهد، که محور افقی بیانگر ضخامت لایه پروسکایت بر حسب نانومتر (nm)

پدیده‌های موثر منجر به ایجاد دو ضخامت بهینه در اطراف 230 و 400 نانومتر می‌گردد. در ادامه مبحث ضخامت 400 نانومتر برای این لایه در نظر گرفته شده است.

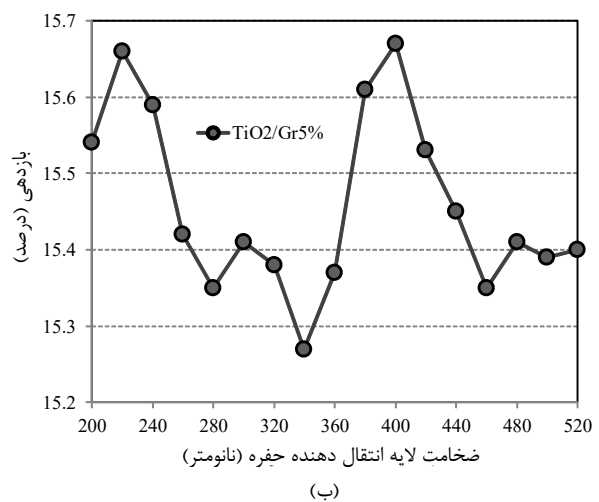
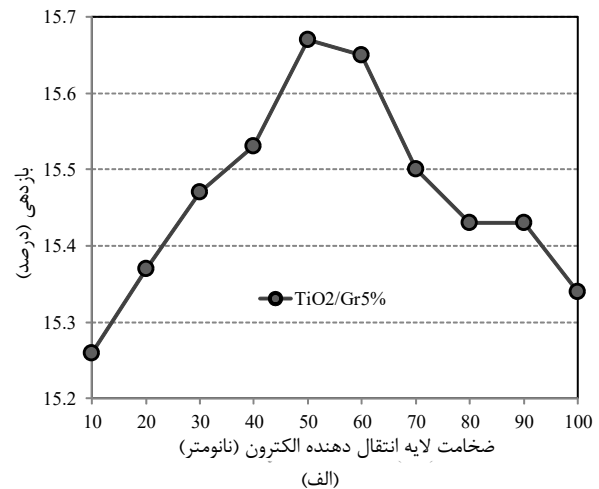
شکل 5، رابطه بین ضخامت لایه TCO (Transparent Conductive Oxide) - اکسید شفاف رسانا) و بازدهی (Efficiency) را نشان می‌دهد. محور افقی ضخامت لایه TCO را از 10 تا 100 نانومتر نشان می‌دهد و محور عمودی بیانگر بازدهی بر حسب درصد (%) از 13/5 تا 16 می‌باشد. داده‌ها مربوط به ترکیب $TiO_2/Gr5\%$ هستند. از شکل 5، می‌توان دریافت که ضخامت لایه TCO تاثیر زیادی بر بازده سلول خورشیدی دارد. به طوری که با افزایش ضخامت لایه، ابتدا بازده به طور پیوسته‌ای افزایش پیدا می‌کند تا در ضخامت 60 نانومتر به حدود 15/8٪ برسد. سپس، در ضخامت‌های بالاتر شروع به کاهش می‌کند. در نمودارهای شکل‌های 3 تا 5 سعی شد تا با تغییر ضخامت لایه‌های مختلف، عملکرد سلول خورشیدی مورد نظر بهبود یابد. اما توجه به این نکته ضروری است که نمی‌توان ادعا کرد که ساختار به دست آمده بهترین ساختار ممکن است. علت این موضوع این است که در هر شکل تنها یکی از متغیرها تغییر کرده و بقیه متغیرها ثابت فرض شده‌اند. به این منظور در ادامه از یک روش بهینه‌سازی برای به دست آوردن بهترین ساختار ممکن استفاده گردیده است. برای بهینه‌سازی از روش بهینه‌سازی انبوه ذرات استفاده شده است [37].



شکل 5 نمودار رابطه ضخامت TCO و بازدهی

در این روش ابتدا مقادیر اولیه مشخصی برای پارامترها تعیین گردیده و سپس طی فرآیندهای بهینه‌سازی، این پارامترها به سمت مقایر بهینه حرکت می‌کنند. این روش طی تکرارهای (Iteration) متعدد به سمت مقایر بهینه حرکت می‌کند. شکل 6-الف روند بهینه‌سازی را به ازای تکرارهای مختلف نشان می‌دهد. مشخص است که بعد از حدود 20 تکرار، بازدهی تقریباً به مقدار نهایی خود رسیده و افزایش تکرارها تاثیری بر افزایش بازدهی نخواهد داشت. در شکل 6-ب منحنی جریان ولتاژ دو حالت بهینه شده و بهینه نشده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این نمودار منحنی جریان-ولتاژ (J-V) را در دو حالت مختلف مقایسه می‌کند. منحنی حالت بهینه‌سازی نشده با خط چین قرمز و حالت بهینه‌سازی شده با خط سیاه نشان داده شده است. محور افقی ولتاژ (V) و محور عمودی چگالی جریان (mA/cm^2) را نشان می‌دهد. با مقایسه دو منحنی

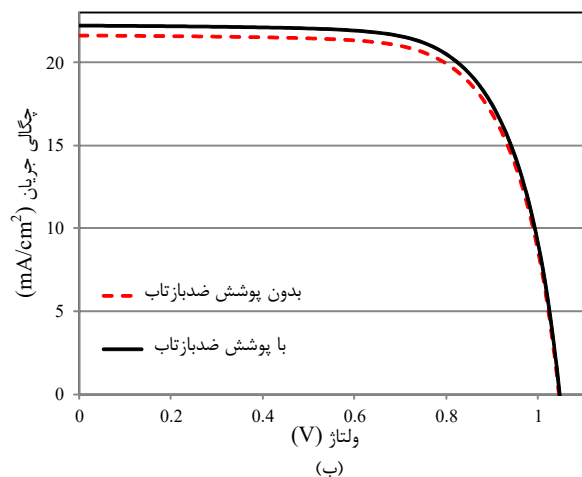
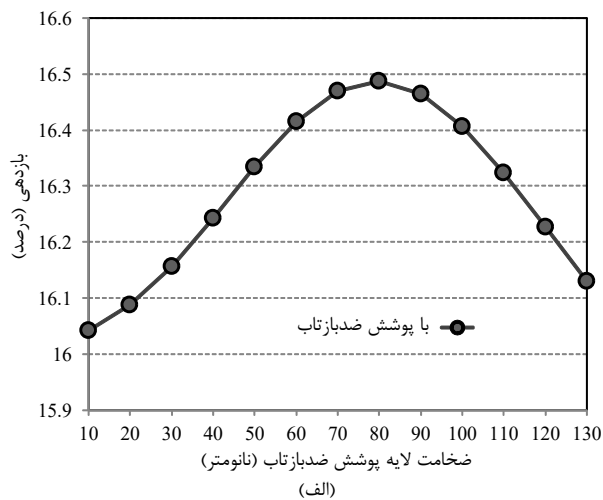
بازدهی در این ضخامت می‌گردد. همچنین در ضخامت‌های خیلی زیاد به دلیل باز ترکیب حامل‌ها در مسیر عبور از این لایه، میزان بازدهی کاهش خواهد یافت.



شکل 4 رابطه بین بازدهی و الف) ضخامت ETL (لایه انتقال الکترون) و ب) ضخامت لایه HTL (لایه انتقال حفره)

اما پس از این نقطه، روند افزایش بازدهی کند شده و در نهایت در ضخامت‌های بالاتر از 90 نانومتر، بازده کمی کاهش پیدا می‌کند. این روند معمولاً نشان‌دهنده یک نقطه بهینه برای ضخامت لایه‌ها است که می‌تواند حداکثر عملکرد را فراهم کند. افزایش بیشتر ضخامت لایه ETL ممکن است به دلایلی همچون مشکلات در انتقال بارهای الکتریکی منجر به کاهش بازده شود. در واقع در ضخامت مشخصی، میزان تداخل امواج انتقالی و بازتاب امواج تابیده شده به نحوی خواهد بود که حداکثر تمرکز میدان در ناحیه جاذب ایجاد شده و حداکثر جذب صورت می‌گیرد. این داده‌ها نشان می‌دهند که ضخامت‌های بهینه ETL برای عملکرد سلول خورشیدی در حدود 50 نانومتر است، جایی که بیشترین بازده مشاهده می‌شود. ضخامت‌های کمتر و بیشتر از این مقدار باعث کاهش بازده می‌شوند. همچنین تاثیر ضخامت لایه HTL بر بازدهی سلول خورشیدی در شکل 4-ب نشان داده شده است. عوامل موثر بر این نمودار همان عوامل موثر بر لایه ETL می‌باشند. با این تفاوت که برآیند

ضخامت این لایه در شکل 7-الف ترسیم شده است. طبق این شکل بهترین تطبیق امیدانس در ضخامت 60 نانومتر رخ می‌دهد که منجر به بازدهی 16/49 درصد می‌گردد. منحنی جریان-ولتاژ بدون پوشش ضدبازتاب و با استفاده از پوشش ضدبازتاب در شکل 7-ب مقایسه شده‌اند. همانگونه که مشخص است استفاده از پوشش ضدبازتاب تاثیر خاصی در ولتاژ اتصال باز سلول خورشیدی نداشته است. اما به دلیل کاهش بازتاب که ناشی از تطبیق امیدانس بین لایه‌ها می‌باشد، میزان جذب در لایه فعال و در نتیجه جریان اتصال کوتاه ساختار افزایش یافته است.

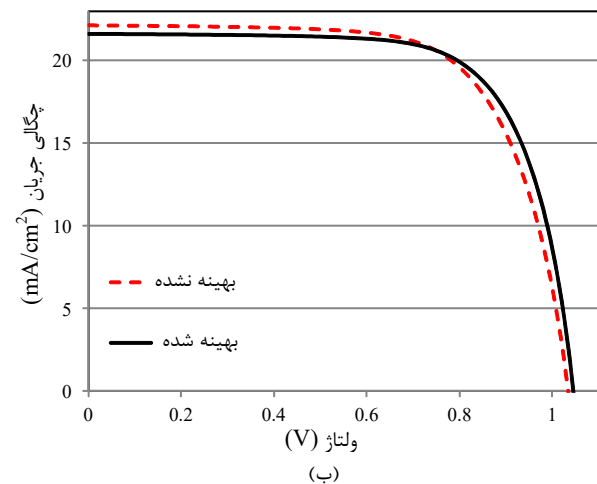
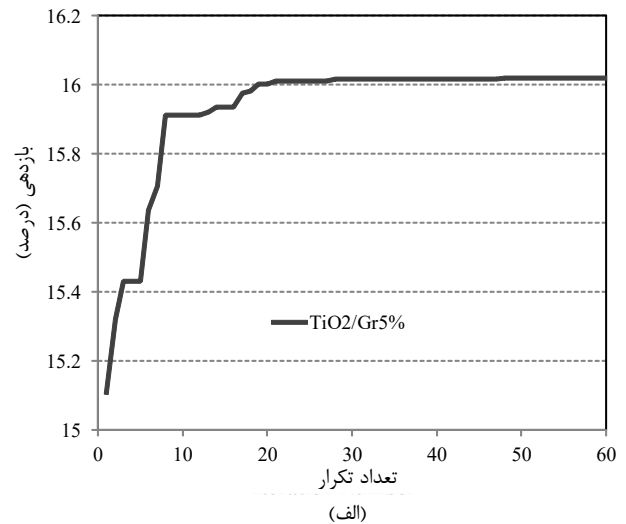


شکل 7 الف) نمودار رابطه ضخامت لایه ضد انعکاس و بازدهی و ب) نمودار جریان-ولتاژ برای دو حالت بدون پوشش ضدبازتاب و با پوشش ضدبازتاب

چنانچه بازدهی نهایی ساختار را با ساختاری که تنها از TiO_2 در لایه ETL استفاده کرده و دارای بازدهی 14/67 بوده است مقایسه کنیم می‌توان نتیجه گرفت که مجموع ترکیب $TiO_2/Gr5\%$ در لایه انتقال‌دهنده حفره، بهینه‌سازی ضخامت لایه‌ها و همچنین کاربرد پوشش ضدبازتاب منجر به افزایش بازدهی به 16/49 درصد گردیده است.

5- بحث و بررسی نتایج

می‌توان دریافت علی‌رغم اینکه حالت بهینه نشده چگالی جریان بیشتری دارد، اما میزان ولتاژ اتصال باز و همچنین ضریب پخش‌دهی کمتری دارد که منجر به کاهش بازدهی در این ساختار گردیده است. میزان بازدهی سلول خورشیدی برای حالت بهینه‌شده و بهینه‌نشده به ترتیب برابر با 16/02 و 15/8 است که نشان‌دهنده بهبود قابل ملاحظه بازدهی پس از بهینه‌سازی است.



شکل 6 الف- نمودار رابطه تعداد تکرارها و بازدهی در فرآیند بهینه‌سازی و ب) نمودار جریان-ولتاژ برای دو حالت بهینه‌سازی شده و بهینه نشده

ضخامت لایه انتقال‌دهنده حفره در ساختار بهینه شده 303/8 نانومتر، ضخامت لایه انتقال‌دهنده الکترون 57/2 نانومتر، ضخامت لایه پروسکایت 226/3 نانومتر و ضخامت لایه اکسید شفاف 66/4 نانومتر می‌باشند. در انتها با استفاده از یک لایه پوشش ضد بازتاب (Anti-Reflection Coating (ARC)) سعی شده است که بازدهی ساختار بهبود یابد. پوشش ضدبازتاب به عنوان یک لایه واسط بین هوا و لایه جذب، کمک می‌کند که میزان بازتاب به حداقل رسیده و میزان جذب نور در لایه فعال افزایش یابد. پوشش ضدبازتاب مورد استفاده از جنس دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2) بوده که با توجه به اینکه ضریب شکست آن بین هوا و پروسکایت است به خوبی نقش تطبیق امیدانس بین این لایه‌ها را ایفا کرده و میزان بازتاب را کاهش می‌دهد. میزان بازدهی بر حسب

- [3] R. A. Afre, D. Pugliese, Perovskite Solar Cells: A Review of the Latest Advances in Materials, Fabrication Techniques, and Stability Enhancement Strategies, *Micromachines*, Vol. 15, No. 2, pp. 192, 2024.
- [4] N. M. Park, Perovskite Solar Cells: An Emerging Photovoltaic Technology, *Materials Today*, Vol. 18, No. 2, pp. 65–72, 2015.
- [5] C. Yang, W. Hu, J. Liu, C. Han, Q. Gao, A. Mei, Y. Zhou, F. Guo, H. Han, Achievements, Challenges, and Future Prospects for Industrialization of Perovskite Solar Cells, *Light: Science & Applications*, Vol. 13, No. 1, pp. 227, 2024.
- [6] L. Gu, F. Zhiyong, Perovskite/Organic-Semiconductor Heterojunctions for Ultrasensitive Photodetection, *Light: Science & Applications*, Vol. 6, pp. e17090, 2017.
- [7] G. M. Meheretu, A. K. Worku, M. T. Yihunie, R. K. Koech, G. A. Wubetu, The Recent Advancement of Outdoor Performance of Perovskite Photovoltaic Cells Technology, *Heliyon*, Vol. 10, No. 17, pp. e36710, 2024.
- [8] M. Dadashbeik, D. Fathi, M. Eskandari, Design and simulation of perovskite solar cells based on graphene and TiO₂/graphene nanocomposite as electron transport layer, *Solar Energy*, Vol. 207, pp. 917–924, 2020.
- [9] N. Islam, M. Yang, K. Zhu, Z. Fan, Mesoporous scaffolds based on TiO₂ nanorods and nanoparticles for efficient hybrid perovskite solar cells, *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 48, pp. 24315–24321, 2015.
- [10] B. Feleki, G. Bex, R. Andriessen, Y. Galagan, F. Di Giacomo, Rapid and low temperature processing of mesoporous TiO₂ for perovskite solar cells on flexible and rigid substrates, *Materials Today Communications*, Vol. 13, pp. 232–240, 2017.
- [11] C. Motta, F. El-Mellouhi, S. Kais, N. Tabet, F. Alharbi, S. SanvitoMotta, Revealing the role of organic cations in hybrid halide perovskite CH₃NH₃PbI₃, *Nature Communications*, Vol. 6, pp. 7026, 2015.
- [12] F. El-Mellouhi, E. T. Bentría, S. N. Rashkeev, S. Kais, F. H. Alharbi, Enhancing Intrinsic Stability of Hybrid Perovskite Solar Cell by Strong, yet Balanced, Electronic Coupling, *Scientific Reports*, Vol. 6, pp. 30305, 2016.
- [13] A. Giuri, R. Matria, A. RizzGiuri, The Path Toward Metal-Halide Perovskite Industrialization, *Cell Reports Physical Science*, Vol. 10, pp. 102245, 2024.
- [14] C. Rossel, Perovskites: A Class of Materials with Multiple Functionalities and Applications, *Europhysics News*, Vol. 49, No. 3, pp. 10–13, 2018.
- [15] M. Ali, Z. Bibi, M. W. Younis, M. Mubashir, M. Iqbal, M. U. Ali, M. Asif Iqbal, An Accurate Prediction of Electronic Structure, Mechanical Stability, and Optical Response of BaCuF₃ Fluoroperovskite for Solar Cell Application, *Solar Energy*, Vol. 267, pp. 112199, 2024.
- [16] J. Han, K. Park, S. Tan, Y. Vaynzof, J. Xue, E. W.-. Diau, M. G. Bawendi, J.-W. Lee, I. Jeon, Perovskite solar cells, *Nature Reviews Methods Primers*, Vol. 5, pp. 3, 2025.
- [17] S. N. R. Nanduri, M. K. Siddiki, G. M. Chaudhry; Y. Z. Alharthi, Numerical Simulation and Performance Optimization of Perovskite Solar Cell, in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Washington, DC, USA, pp. 1018–1021, 2017.
- [18] Z. Ku, Y. Rong, M. Xu, T. Liu, H. Han, Full printable processed mesoscopic CH₃NH₃PbI₃/TiO₂ heterojunction solar cells with carbon counter electrode, *Scientific Reports*, Vol. 3, pp. 3132, 2013.
- [19] F. Biccari, F. Gabelloni, E. Burzi, M. Gurioli, S. Pescetelli, A. Agresti, A. E. D. R. Castillo, A. Ansaldo, E. Kymakis, F. Bonaccorso, A. D. Carlo, A. Vinattieri, Graphene-Based Electron Transport Layers in Perovskite Solar Cells: A Step-Up for an Efficient Carrier Collection, *Advanced Energy Materials*, Vol. 7, No. 21, pp. 1701349, 2017.
- [20] H. Zhou, Q. Chen, G. Li, S. Luo, T.-B. Song, H.-S. Duan, Z. Hong, J. You, Y. Liu, Y. Yang, Interface Engineering of Highly Efficient Perovskite Solar Cells, *Science*, Vol. 345, No. 6196, pp. 542–546, 2014.
- [21] E. Barruna, A. Saniah, R. Bhaskara, S. F. Rahman; A. Zulfia, N. R. Poespawati "Carbon Nanotubes, Graphite, and Reduced Graphene Oxide in CuSCN Incorporated Carbon Electrodes in Perovskite

هر چند سلول‌های خورشیدی پروسکایت در بسیاری از موارد هنوز در مرحله تحقیقات بوده و از لحاظ بازدهی با موارد تجاری موجود قابل قیاس نمی‌باشند، اما به دلیل کاهش قابل توجه هزینه‌های مربوط به این نوع از سلول‌های خورشیدی، بخش عظیمی از تحقیقات بین‌المللی در زمینه سلول‌های خورشیدی به این ماده اختصاص پیدا کرده است.

با رفع بسیاری از مشکلات موجود در زمینه این سلول‌ها (از جمله موضوع بازدهی، پایداری و تکنولوژی‌های ساخت)، آینده بسیار روشنی برای این مواد در حوزه سلول‌های خورشیدی پیش‌بینی می‌گردد. تمرکز اصلی ما در این پژوهش بر روی بهبود بازدهی این سلول‌های خورشیدی از طریق مدیریت لایه‌های مختلف بوده است. موضوع اصلی پژوهش، به‌کارگیری ماده ترکیبی گرافن و TiO₂ در لایه ETL است که می‌تواند به طور همزمان نیازهای شفاف بودن و بالابودن طول عمر حامل‌ها را فراهم سازد. در این پژوهش نشان داده شد که استفاده از ترکیب 5 درصد از گرافن در لایه ETL می‌تواند بهترین نتایج را در بازدهی سلول خورشیدی فراهم آورد. همچنین با مدیریت ضخامت لایه‌های مختلف و با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی، حداکثر بازدهی 16/02 درصد حاصل گردید که نسبت به ساختار بدون گرافن (14/67) افزایش یافته است.

همچنین با استفاده از یک پوشش ضدبازتاب بازدهی ساختار تا 16/49 نیز افزایش پیدا کرد. هر چند استفاده از لایه‌های جدید با ترکیبات مختلف نیازمند به کارگیری تکنولوژی‌های جدید و مراحل ساخت بیشتری در فرآیند تولید می‌باشد، اما با توجه به میزان افزایش حاصل شده در بازدهی این سلول‌ها قطعاً بررسی بیشتر این ساختار جهت کاربرد در محصولات آزمایشگاهی یا تجاری از نقطه نظر تکنولوژی و اقتصادی قابل توجیه می‌باشد.

6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا تاثیر استفاده از گرافن در لایه انتقال‌دهنده الکترون بر عملکرد سلول خورشیدی پروسکایت مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب 5٪ گرافن با TiO₂ در لایه انتقال‌دهنده الکترون (ETL) منجر به بهترین عملکرد در سلول خورشیدی پروسکایت می‌گردد. سپس برای ساختاری که دارای ترکیب 5٪ گرافن است، تاثیر ضخامت لایه‌های مختلف بر عملکرد سلول خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که برای هر یک از لایه‌ها در ضخامت مشخصی حداکثر بازدهی حاصل می‌گردد.

در انتها یک روند بهینه‌سازی برای انتخاب بهترین ضخامت برای همه لایه‌ها بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی PSO مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که ساختار بهینه‌شده از ترکیب گرافن - TiO₂ به بازدهی 16/02 درصد می‌رسد، در حالی که این بازدهی برای ساختار پایه بدون گرافن 14/67 است. درنهایت با اعمال پوشش ضدبازتاب، بازدهی نهایی سلول خورشیدی به 16/49 درصد افزایش یافته است.

7- مراجع

- [1] S. S. Gharahyali, *Zero to One Hundred of Solar Energy*, Dibagaran Cultural and Artistic Institute, Tehran, 2019. (in persian)
- [2] S. Maranghi, M. L. Parisi, R. A. Sinicropi, Environmental Profile of the Manufacturing Process of Perovskite Photovoltaics: Harmonization of Life Cycle Assessment Studies, *Energies*, Vol. 12, No. 19, pp. 1-19, 2019.

- Solar Cells, in *Proceedings of the 11th Electrical Power, Electronics, Communications, Control, and Informatics Seminar (EECCIS 2022)*, IEEE, Malang, Indonesia, pp. 119–122, 2022.
- [22] S. Santosh, S. Patel, M. M. Malik, P. K. Patel, Recent Advancements in Applications of Graphene to Attain Next-Level Solar Cells, *C*, Vol. 9, No. 3, pp. 70, 2023.
- [23] C. Zhang, Applications of Graphene in Perovskite Solar Cells, *Highlights in Science, Engineering and Technology*, Vol. 111, pp. 241–245, 2024.
- [24] Stauffer, Nancy W. Transparent, Flexible Solar Cells, *MIT News*, 28 July 2017.
<https://news.mit.edu/2017/mit-researchers-develop-graphene-based-transparent-flexible-solar-cells-0728>
- [25] E. Karimi, S. M. Bagher Ghoreishy, Designing and optimization of perovskite solar cells using different electron-transporting materials, *Journal of Research on Many body Systems*, Vol. 9, No. 17, pp. 123-133, 2010. (in persian)
- [26] J. Han, K. Park, S. Tan, Y. Vaynzof, J. Xue, E. Wei-Guang Diao, M. G. Bawendi, J.-W. Lee, I. Jeon, Perovskite solar cells, *Nature Reviews Methods Primers*, Vol. 5, No.3, pp. 1-27, 2025.
- [27] M. Afroz, R. K. Ratnesh, S. Srivastava, J. Singh, Perovskite solar cells: Progress, challenges, and future avenues to clean energy, *Solar Energy*, Vol. 287, pp. 113205, 2025.
- [28] M. Gantumur, Md. Shahiduzzaman, M. I. Hossain, Md. Akhtaruzzaman, M. Nakano, M. Karakawa, J. Michel Nunzi, T. Taima, Revolutionizing light capture: a comprehensive review of back-contact perovskite solar cell architectures, *Materials Today*, Vol. 90, pp. 441-465, 2025.
- [29] S. Sucharitakul, V. Yarangsi, S. Thanasanvorakun, T. Sintiam, S. Yarin, K. Hongstith, S. Phadungdhitidhada, S. Chooon, Enhanced perovskite solar cells with TiO₂-Graphene nanocomposite quantum dots in electron transport layer, *Electrochimica Acta*, Vol. 521, pp. 145901, 2025.
- [30] T. Sewela, R. O. Ocaya, T. D. Malevu, Recent insights into the transformative role of Graphene-based/TiO₂ electron transport layers for perovskite solar cells, *Energy Science & Engineerin*, Vol. 13, pp. 4-26, 2024.
- [31] A. Daraiee, Simulation and Optimization of the Performance of a Graphene/Perovskite-Based Solar Cell, Master's Thesis, Central Library of Shahrood University of Technology, Department of Electrical Engineering, 2019. (in persian)
- [32] M. Norouzi, H. Fatemi Imam Gheis, Z. Monfared, A. Rahimpour, The effect of the application of graphene in the blocking layer structure to increase efficiency of perovskite solar cell, *The 33rd National Conference on Physics of Iran*, 2017. (in persian)
- [33] J. T. W. Wang, J. M. Ball, E. M. Barea, A. Abate, J. A. A. Webber, J. Huang, M. Saliba, I. M. Sero, J. Bisquert, H. J. Snaith, R. J. Nicholas, Low-Temperature Processed Electron Collection Layers of Graphene/TiO₂ Nanocomposites in Thin Film Perovskite Solar Cells, *Nano Letters*, Vol. 14, No. 2, pp. 724–730, 2014.
- [34] S. L. Mortazavifar, M. R. Salehi, M. Shahraki, E. Abiri, Optimization of light absorption in ultrathin elliptical silicon nanowire arrays for solar cell applications, *Journal of Modern Optics*, Vol. 69, No. 7, pp. 368-380, 2022.
- [35] P. Löper, M. Stuckelberger, B. Niesen, J. Werner, M. Filipič, S. J. Moon, J. H. Yum, M. Topič, S. D. Wolf, C. Ballif, Complex Refractive Index Spectra of CH₃NH₃PbI₃ Perovskite Thin Films Determined by Spectroscopic Ellipsometry and Spectrophotometry, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, Vol. 6, No. 1, pp. 66-71, 2014.
- [36] I. M. D. L. Santos, H. J. C. Marrero, M. A. R. Sánchez, L. H. Difur, F. J. S. Rodríguez, M. Courel, H. Hu, Optimization of CH₃NH₃PbI₃ perovskite solar cells: A theoretical and experimental study, *Solar Energy*, Vol. 199, pp. 198-205, 2020.
- [37] M. R. Bonyadi, Z. Michalewicz, Particle Swarm Optimization for Single Objective Continuous Space Problems: A Review, *Evolutionary Computation*, Vol. 25, No. 1, pp. 1-54, 2017.