

Impacts of Shading on Photovoltaic Panel Performance and Mitigating Strategies

Shayan Bozorgpuore^a, Aslan Gholami^b

^a Department of Renewable Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran; Shayanbozorgpuore@gmail.com

^b Department of Renewable Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran; a_gholami@sbu.ac.ir

Abstract:

Photovoltaic technology has emerged as a central pillar of renewable energy generation and a vital enabler in the global transition toward sustainable, low-carbon energy systems. Among the multiple challenges faced by PV systems, shading represents one of the most prevalent and detrimental factors affecting their performance. Whether caused by nearby buildings, trees, transmission lines, or even temporary obstructions such as passing clouds, shading reduces the availability of solar irradiance on module surfaces, leading to significant power losses, hot spot formation, mismatch issues, and accelerated degradation of solar cells. Given the unavoidable nature of shading, especially in dense urban environments, comprehensive research into its impacts and the development of effective mitigation strategies have gained considerable momentum recently. This review article presents an in-depth analysis of shading phenomena on photovoltaic panels and critically evaluates the effectiveness of existing and emerging solutions. The study begins by classifying shading into various categories, such as horizontal, vertical, oblique, and scattered, each of which influences PV module output in distinct ways. Horizontal and vertical shadows typically create partial shading patterns that disproportionately affect series-connected cells, while scattered and oblique shading introduces irregular current mismatches that compromise both the fill factor and overall efficiency. The review highlights that even minimal partial shading can disproportionately reduce system output due to the series configuration of PV cells, where the weakest cell dictates the performance of the entire string. Furthermore, hot spots induced by shading not only lower output but also jeopardize the structural integrity and lifespan of the modules. To counter these adverse effects, three principal groups of mitigation strategies are examined. The first involves electrical devices such as bypass diodes, DC optimizers, and microinverters. Bypass diodes, when integrated at the cell or string level, provide alternative pathways for current flow, thereby limiting voltage drops and preventing local overheating. Studies reveal that modules with integrated bypass diodes exhibit substantially reduced power losses under single-cell or row shading compared with standard modules. DC optimizers, though costlier, further enhance individual panel performance by dynamically adjusting voltage and current, while microinverters enable independent operation of each module, reducing system-level mismatch. The second strategy relates to modifications in cell structure. Advances such as half-cut cells and shingled cells distribute shading effects more evenly across the module, thereby minimizing mismatch losses. Experimental evidence indicates that half-cell configurations can reduce current loss by over 25% compared to full-cell modules under localized shading. Similarly, shingled modules enhance both current pathways and compatibility with bypass diode integration, leading to improved resilience against irregular shadows. The third and most innovative category involves reconfigurations of PV array interconnections. Traditional series-parallel arrangements often exacerbate mismatch issues under partial shading, whereas advanced configurations offer superior shade tolerance. In particular, have demonstrated remarkable improvements in experimental and simulation studies. Reported results include up to 22.46% enhancement in maximum output power and as much as 53.68% reduction in mismatch losses compared with conventional methods. Moreover, physical rearrangement techniques that disperse shadowed cells more uniformly across the array further improve fill factor and reduce hot spot risks, making them promising candidates for large-scale deployment. Beyond technical solutions, the review underscores the importance of integrating predictive modeling, machine learning, and smart monitoring systems into PV management frameworks. Emerging approaches involve artificial intelligence-based shading prediction models, hybrid analyses that consider the combined effects of shading and soiling, and the exploration of novel PV technologies such as bifacial and flexible panels. These innovations not only mitigate shading impacts but also improve adaptability in diverse installation contexts. In conclusion, shading is a major challenge to photovoltaic efficiency but also an opportunity for innovation. While electrical devices and structural improvements benefit small-scale systems, advanced reconfiguration methods such as Sudoku arrays show great promise for larger and urban applications. Choosing the right strategy requires balancing performance, cost, and site conditions. Future research should focus on smart grid integration, economic and environmental assessments, and scaling up novel technologies to support the transition to sustainable energy.

Keywords: Photovoltaic Panels, Shading, Bypass Diode, Cells Configuration, Renewable Energy.

Date of sending the article: 2025/01/30

Acceptance date of the article: 2025/08/2

Name of responsible author: Aslan Gholami

Corresponding author's address: Department of Renewable Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran;

آثار سایه بر عملکرد پنل خورشیدی فتوولتائیک و روش‌های مقابله با آن

نوع مطالعه: پژوهشی

شایان بزرگپور، دانشجوی کارشناسی ارشد^۱؛ اصلا ن غلامی، دکتری^۲

1- مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران؛

Shayanbozorgpuore@gmail.com

2- گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران

a_gholami@sbu.ac.ir

چکیده:

پنل‌های فتوولتائیک، به‌عنوان یکی از رکن‌های اصلی تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، نقشی محوری در گذار اصلی به سمت استفاده از منابع پاک انرژی ایفا می‌کنند. با این حال، آثار مخرب سایه‌اندازی به‌عنوان یکی از چالش‌های اجتناب‌ناپذیر محیطی می‌تواند کارایی این سامانه‌ها را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. این مقاله مروری با هدف ارائه‌ی تحلیل جامع از تأثیر انواع سایه‌اندازی بر عملکرد پنل‌های فتوولتائیک و معرفی راهکارهای نوین کاهش آثار آن تدوین شده است. ابتدا انواع سایه شامل سایه‌های افقی، عمودی، مورب و پراکنده و آثار مستقیم آن‌ها بر کاهش بهره‌وری، ایجاد نقطه داغ و افت ضریب پرشدگی بررسی شده است. در ادامه، سه رویکرد اصلی مقابله با آثار سایه‌اندازی شامل استفاده از تجهیزات الکتریکی نظیر دیود بایپس، اپتیمایزرها و میکرواینورترها، بهینه‌سازی ساختار سلول‌ها از طریق طراحی‌هایی مانند سلول‌های نیمه و شینگل، و استفاده از پیکربندی‌های پیشرفته آرایه‌های خورشیدی نظیر پل کامل متقاطع و سودوکو مرور شده است. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که پیکربندی‌های نوآورانه مانند سودوکو و طراحی‌های مبتنی بر جابه‌جایی فیزیکی می‌توانند در کاهش تلفات توان و افزایش کارایی سیستم‌ها تحت شرایط سایه‌اندازی، عملکرد بهتری نسبت به روش‌های سنتی ارائه دهند. برخی از این روش‌های بازپیکربندی مانند توانسته میانگین افزایش توان خروجی را تا ۲۲.۴۶ درصد در مقایسه با روش‌های متداول، به‌ویژه روش پل کامل متقاطع، ارائه دهد و گاهی بازپیکربندی‌هایی مانند سودوکو، تلفات توان را در برخی مدل‌های سایه تا ۵۳.۶۸ درصد کاهش داده است. در نهایت، مسیرهای تحقیقاتی آینده شامل توسعه مدل‌های پیش‌بینی هوشمند سایه، تحلیل ترکیبی آثار سایه و آلودگی، و استفاده از فناوری‌های جدید در پنل‌های انعطاف‌پذیر معرفی شده‌اند. این مقاله مروری با هدف فراهم‌سازی دیدگاهی جامع برای ارتقای بهره‌وری سامانه‌های فتوولتائیک و کاهش اثر سایه تدوین شده است.

واژه‌های کلیدی: پنل فتوولتائیک، سایه‌اندازی، دیود بایپس، پیکربندی سلول‌ها، انرژی تجدیدپذیر.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱

نام نویسنده مسئول: اصلا ن غلامی

نشانی نویسنده مسئول: گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران؛ a_gholami@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

استفاده از سامانه‌های منفعل بهره‌وری از انرژی‌های موجود در طبیعت از دیرباز مورد توجه انسان بوده است (Y. Gholami et al., 2018). با افزایش جمعیت و تکنولوژی نیاز روزمره بشر به انرژی به سرعت رو به افزایش است و با توجه به آسیب‌های زیست محیطی و رو به اتمام بودن منابع سوخت‌های فسیلی، انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار مورد توجه جهان و بخصوص کشورهای صنعتی قرار گرفته است (Afkar et al., 2024; Minoofar et al., 2023). در میان انواع روش‌های تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، پنل‌های فتوولتائیک از ارزش بالایی برخوردار است (Ameri et al., 2023; Kazem, Al-Waeli, Chaichan, Sopian, Al Busaidi, et al., 2023). استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک به علت در دسترس بودن منبع اصلی آن و قابل نصب بودن در مقیاس‌های کوچک و خانگی بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Dehghan & Barzegar, 2011; Eslami et al., 2019, 2022).

پنل‌های فتوولتائیک، به عنوان مبدل‌های نور به انرژی الکتریکی شناخته می‌شوند و از اجزای اصلی سیستم‌های انرژی خورشیدی هستند (Razeghi Jahromi et al., 2024a). اما عملکرد آن‌ها می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلف محیطی متعددی مانند دمای محیط (Kazem, Chaichan, Al-Waeli, Al-Badi, et al., 2022; Rezvani et al., 2022)، گرد و غبار (A. Gholami, et al., 2021; Ameri, Zandi, Gavagsaz Ghoachani, et al., 2021; Gholami, Ameri, Zandi, & Gavagsaz-Ghoachani, 2021; Alenabi et al., 2024; A. Jafari et al., 2024)، رطوبت (A. Gholami, Ameri, Zandi, et al., 2019; Gavagsaz Ghoachani, et al., 2022; Kazem, Al-Waeli, Chaichan, Sopian, Gholami, et al., 2023)، و سایه قرار گیرد که بر بهره‌وری و توان خروجی پنل‌های فتوولتائیک تأثیر گذار هستند (Clement et al., 2020). از یک منظر، سایه ایجاد شده بر روی پنل فتوولتائیک می‌تواند سایه دور یا نزدیک باشد، از منظر دیگر می‌توان سایه را به سایه جزئی و یا سایه کامل نیز دسته بندی کرد (Hasan et al., 2019; Hosseini et al., 2022). به علت غیر قابل اجتناب بودن تشکیل سایه بر پنل‌های فتوولتائیک به خصوص در محیط‌های شهری، بررسی تأثیر آن بر عملکرد پنل بسیار با اهمیت است (Mamun et al., 2017). وجود سایه بر آرایه‌های فتوولتائیک می‌تواند باعث عوامل متعددی مانند کاهش توان خروجی، آسیب دیدن سلول تحت سایه و کاهش جریان خروجی سلول شود (Bimenyimana et al., 2017).

(Gupta et al., 2021). بسته به شکل سایه و میزان پوشش سطح پنل، سایه منحنی مشخصه توان-ولتاژ و جریان-ولتاژ را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد (Goetz et al., 2019; Rajani & Ramesh, 2020). انواع سایه مانند سایه افقی، عمودی، مورب یا پراکنده می‌تواند آثار متفاوتی را روی پنل‌های فتوولتائیک ایجاد کند که برای کاهش این آثار روش‌های مختلفی شامل انتخاب مکان مناسب برای نصب پنل‌ها، انتخاب پیکربندی مناسب برای سلول‌ها، استفاده از تجهیزات الکتریکی و بهره‌مندی از فناوری‌های مختلف سلول خورشیدی در پژوهش‌های مختلف پیشنهاد شده است (Krishna & Moger, 2019; Laamami et al., 2017). مطالعه دقیق روی این آثار ضمن کمک به شناسایی و درک چگونگی تأثیر سایه بر پنل‌ها موجب بهبود طراحی و مکان‌یابی سامانه‌های خورشیدی فتوولتائیک و افزایش کارایی آن‌ها می‌شود (Fadhel et al., 2020). به همین دلیل در سال‌های اخیر مطالعه در زمینه تأثیر سایه بر عملکرد پنل‌های فتوولتائیک به شدت رو به افزایش است.

هم‌چنین مطالعه تأثیر سایه‌ها می‌تواند به توسعه فناوری‌هایی مانند میکرواینورترها^۱ و اپتیمایزرهای^۲ قدرت که به بهبود عملکرد پنل‌ها در شرایط سایه‌اندازی کمک می‌کنند نیز منجر شود. میکرواینورترها با تبدیل مستقیم جریان تولیدی هر پنل به جریان متناوب، امکان عملکرد مستقل هر پنل را فراهم می‌کنند و از تأثیر سایه بر کل سیستم جلوگیری می‌کنند (Ortiz-munoz et al., 2025). این فناوری‌ها به‌ویژه در محیط‌های شهری که سایه‌اندازی ناشی از ساختمان‌ها، درختان یا سایر موانع اجتناب‌ناپذیر است، کاربرد گسترده‌ای دارند (Abubakar et al., 2025). یکی از رویکردهای کلیدی در این حوزه، استفاده از پیکربندی‌های بهینه در آرایه‌های فتوولتائیک است. به عنوان مثال، پیکربندی سودوکو و یا پیکربندی‌های متقاطع می‌تواند اثر سایه‌های جزئی را کاهش دهند (Dergisi et al., 2025; Siddique et al., 2025). این پیکربندی‌ها با توزیع جریان و ولتاژ به گونه‌ای که سلول‌های تحت سایه تأثیر کمتری بر عملکرد کلی آرایه داشته باشند، به بهبود بهره‌وری کمک می‌کنند. علاوه بر این، استفاده از دیودهای بای‌پس در طراحی پنل‌ها می‌تواند از کاهش توان خروجی و آسیب به سلول‌های تحت سایه جلوگیری کند (Piryaee et al., 2025; Santra et al., 2024).

با توجه به اهمیت انرژی‌های تجدیدپذیر در مبارزه با تغییرات آب و هوایی (Ameri et al., 2024)، بهینه‌سازی عملکرد پنل‌های فتوولتائیک

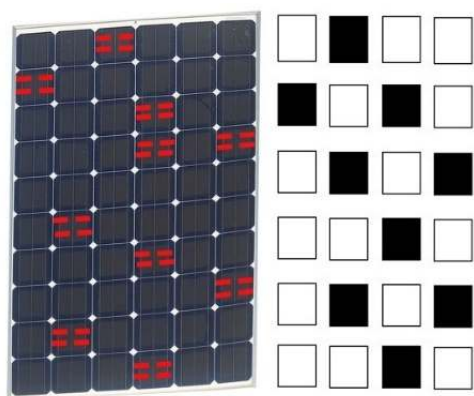
سایه بهبود بخشد (Sharma & Mishra, 2025; Soni et al., 2025). فناوری‌های جدید مانند سلول‌های خورشیدی دوجوهی که قادر به جذب نور از هر دو سطح پنل هستند، می‌توانند در محیط‌هایی با سایه پراکنده کارایی بیشتری داشته باشند (Karaduman & Parlak, 2025).

در این پژوهش، با مرور جامع مطالعه‌های سال‌های اخیر، ابتدا انواع سایه‌های مؤثر بر عملکرد پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک به اختصار بررسی می‌شود. سپس، روش‌های کاهش و مقابله با آثار منفی سایه‌اندازی بر عملکرد این پنل‌ها مورد تحلیل قرار می‌گیرد. با دسته‌بندی و مقایسه دقیق و جامع تمام این روش‌ها، پژوهش حاضر می‌تواند به‌عنوان مرجعی جامع برای شناخت آثار مخرب سایه و ارائه راهکارهای بهینه کاهش آثار آن مورد استفاده قرار گیرد که به غنای دانش موجود در این حوزه کمک می‌کند.

۲- انواع سایه و روش‌های مقابله با آن

مرور پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که متناسب یا اثری که سایه ممکن است بر رفتار الکتریکی پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک داشته باشد، انواع سایه از جمله سایه پراکنده (شکل (۱))، مورب (شکل (۲))، عمودی (شکل (۳)) یا افقی (شکل (۴)) می‌تواند روی سطح پنل ایجاد شود.

از آثار مخرب سایه می‌توان به‌وجود آمدن نقطه داغ^۲، کاهش طول عمر پنل و کاهش توان تولیدی پنل و افت عملکرد آن را نام برد (Gallardo et al., 2018). هر یک از انواع سایه اثر متفاوتی بر رفتار پنل خورشیدی فتوولتاییک دارند، بنابراین شناخت روش‌های کاهش اثر مخرب سایه و پیش‌بینی عملکرد پنل خورشیدی فتوولتاییک متناسب با هر نوع سایه از موارد مهم پژوهشی در زمینه توسعه سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی در سال‌های اخیر است و در بخش دسته‌بندی آن‌ها ارائه شده است (Vicente et al., 2015).



از طریق مطالعه اثر سایه‌ها می‌تواند به حفظ محیط زیست نیز کمک کند (Belhachat & Larbes, 2021; Ghosh et al., 2023). یکی از جنبه‌های کلیدی عملکرد پنل‌های فتوولتاییک، طراحی و بهره‌گیری از فناوری‌هایی است که آثار منفی سایه‌اندازی را کاهش می‌دهند. این شامل استفاده از مواد پیشرفته مقاوم به نقطه داغ (Razeghi Jahromi et al., 2024b)، توسعه الگوریتم‌های مدیریت انرژی (Hoorsun et al., 2024; A. Yaghoubi et al., 2024)، و آرایش‌های خاص پنل‌ها مانند موازی-سری برای کاهش تأثیر سایه‌اندازی بر جریان خروجی است (Nipu et al., 2016; Özkalay et al., 2024). همچنین، سیستم‌های هوشمند بر پایه یادگیری ماشین جهت شناسایی و مدیریت سایه با قابلیت بهینه‌سازی عملکرد سلول‌ها، از زمینه‌های تحقیقاتی مهم به شمار می‌روند (A. A. Yaghoubi, Gandomzadeh, Gholami, et al., 2024). علاوه بر این، تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی در مقیاس کلان امکان ارائه راهکارهای بهینه برای مناطق مختلف را فراهم می‌کند (Humada et al., 2016). پژوهش‌های پیش‌تر در این حوزه به توسعه سیستم‌های کارآمدتر و مقاوم‌تر در برابر سایه‌اندازی و سایر شرایط محیطی کمک می‌کند (Vadivel et al., 2021; Yousri et al., 2024). فنی، تحلیل‌های اقتصادی (A. A. Yaghoubi, Gandomzadeh, et al., 2024)، و زیست‌محیطی (Gholami, Gavagsaz Ghoachani, et al., 2024) نیز نقش مهمی در توسعه سیستم‌های فتوولتاییک مقاوم به سایه دارند (Razeghi Jahromi et al., 2023). مطالعات نشان داده‌اند که سرمایه‌گذاری در فناوری‌های کاهش‌دهنده اثرات سایه، مانند میکرواینورترها یا پنل‌های پیشرفته، می‌تواند در بلندمدت هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده و بازده اقتصادی را افزایش دهد (Madhanmohan et al., 2020; Sollazzo et al., 2025). از منظر زیست‌محیطی، بهبود عملکرد پنل‌های فتوولتاییک منجر به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود، که در راستای اهداف توسعه پایدار جهانی است (Aryanfar et al., 2021). برای مثال، در مناطقی با تابش خورشیدی بالا مانند ایران یا استرالیا (Aryanfar et al., 2022)، استفاده از سامانه‌های فتوولتاییک بهینه‌شده جایگزین مناسبی برای نیروگاه‌های فسیلی است و به کاهش آلودگی هوا کمک کند (Mohapatra et al., 2021; Parsay et al., 2025). از سوی دیگر، پیشرفت در مواد مورد استفاده در ساخت پنل‌های فتوولتاییک نیز به کاهش اثرات سایه کمک کرده است. توسعه سلول‌های خورشیدی با مقاومت بالاتر در برابر نقطه داغ و یا استفاده از مواد نیمه‌هادی نوین مانند پروسکایت می‌تواند عملکرد پنل‌ها را در شرایط

و یا جعبه سفید استفاده نمود (Kazem, Chaichan, Al-Waeli, & Gholami, 2022). مدل‌های جعبه سفید مانند مدل‌های دیودی در حال حاضر، معمول‌ترین روش‌های مدل‌سازی پنل‌های فتوولتائیک می‌باشند (A. Gholami, Ameri, Zandi, & Gavagsaz, 2022). با این وجود توسعه روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، استفاده از روش‌های مدل‌سازی جعبه سیاه را سرعت بخشیده است. مدل‌های دیودی به دلیل دقت بالا و توانایی در شبیه‌سازی رفتار غیرخطی پنل‌های خورشیدی تحت شرایط سایه‌اندازی، کاربرد گسترده‌ای دارند (A. Gholami, Ameri, Zandi, Ghoachani, et al., 2022). این مدل‌ها با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر جریان فتوولتائیک، مقاومت سری و موازی، امکان تحلیل دقیق افت توان و کارایی پنل را فراهم می‌کنند (A. Gholami, Ameri, Zandi, & Gavagsaz, 2023). معادله (۱)-(۴) نمونه‌ای از ساده‌ترین مدل دیودی در مدل‌سازی پنل‌های فتوولتائیک می‌باشد (Abdulrazzaq, 2025).

$$(1) \quad I = I_{ph} - I_D - I_{sh}$$

$$(2) \quad I_D = I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nKT}} - 1 \right)$$

$$(3) \quad I_{sh} = \frac{V_s + IR}{V_{sh}}$$

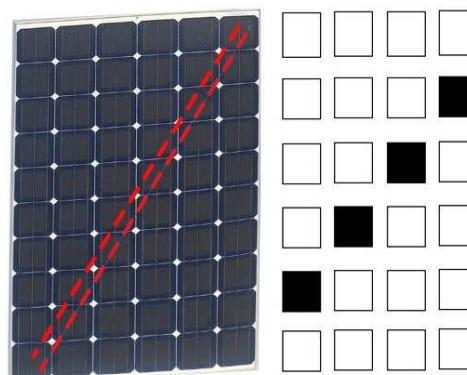
$$(4) \quad I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

که در آن I و V ولتاژ و جریان خروجی پنل، و I_{ph} ، I_D ، I_{sh} و I_0 به ترتیب جریان منبع، جریان دیود، جریان مقاومت و جریان اشباع معکوس هستند. همچنین R_s و R_{sh} دو مقاومت سری و موازی، n تعداد سلول سری در پنل، K ثابت بولتزمن، T دمای سلول و q بار الکترون است (A. Gholami, Ameri, Zandi, & Gavagsaz, 2021).

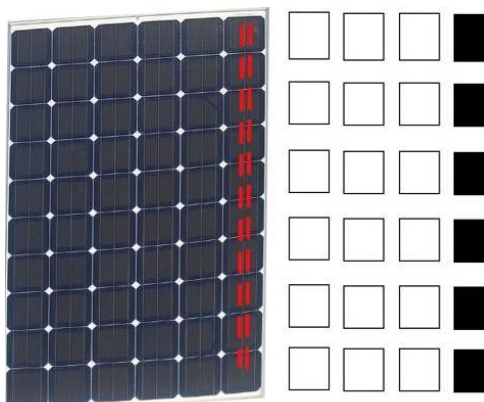
۱-۲-۱- روش‌های مبتنی بر تجهیزات الکتریکی

روش‌های مبتنی بر تجهیزات الکتریکی مانند استفاده از دیودهای بایس و اپتیمایزرها با توجه به تعداد تجهیز استفاده شده می‌تواند در کاهش آثار مخرب سایه و طول عمر پنل و بهبود بهره‌وری آن تأثیر مثبت بسیاری داشته باشد (Dhimish et al., 2018; Vieira et al., 2020). زمانی که یک سلول خورشیدی تحت سایه قرار می‌گیرد، تولید جریان آن کاهش می‌یابد. در این شرایط، دیود بای‌پس به صورت موازی با گروهی از سلول‌های خورشیدی نصب می‌شود و در شرایط سایه‌اندازی فعال می‌گردد. این دیود با ایجاد مسیر جایگزین برای جریان، از عبور آن از سلول‌های تحت سایه جلوگیری می‌کند و از بروز افت ولتاژ، نقاط داغ، و آسیب به سلول‌ها جلوگیری می‌کند. بنابراین، استفاده از دیود بایس با تعداد بالاتر در پنل فتوولتائیک می‌تواند بهره‌وری بالاتری به همراه داشته باشد. به عنوان مثال، در پژوهش انجام در این زمینه نشان داده شده است که استفاده از دیود بایس در تمام سلول‌های پنل فتوولتائیک

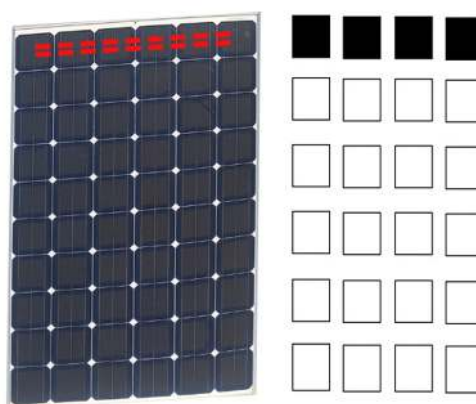
شکل (۱): طرح‌واره‌ای از سایه پراکنده بر پنل خورشیدی فتوولتائیک



شکل (۲): طرح‌واره‌ای از سایه مورب بر پنل خورشیدی فتوولتائیک



شکل (۳): طرح‌واره‌ای از سایه عمودی بر پنل خورشیدی فتوولتائیک



شکل (۴): طرح‌واره‌ای از سایه افقی بر پنل خورشیدی فتوولتائیک

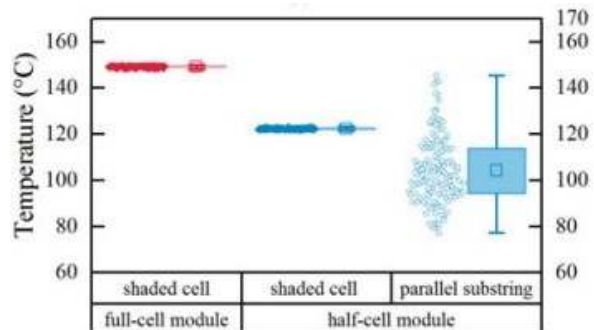
۱-۲-۲ روش‌های کاهش اثر سایه

روش‌های کاهش اثر سایه به سه دسته روش‌های مبتنی بر تجهیزات الکتریکی، پیکربندی متفاوت سلول‌های پنل خورشیدی فتوولتائیک و تغییر در ساختار سلول‌ها تقسیم می‌گردد. به منظور مدل‌سازی عملکرد پنل‌ها می‌توان از روش‌های جعبه سیاه (A. Gholami, Ameri, Zandi, & Gavagsaz, 2023; Ghoachani, Jafarzadegan Gerashi, et al., 2023).

شکل (۵): تاثیر تعداد دیود بایپس در دو سایه با شدت متفاوت

۲-۱-۲- مواد و فناوری سلول‌ها

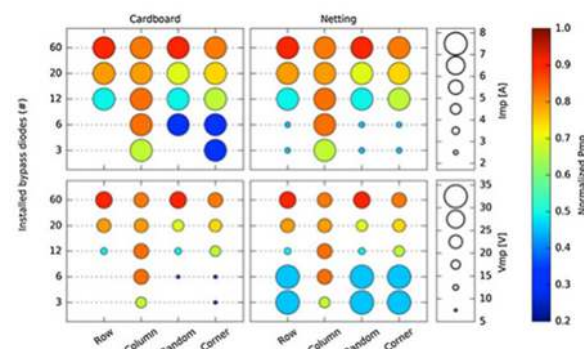
با برش و تغییر در ساختار سلول فتوولتائیک و تبدیل آن به نیم‌سلول‌ها و سلول‌های شینگل می‌توان باعث عملکرد بهتر پنل خورشیدی فتوولتائیک بخصوص در سایه‌های پراکنده و جزئی شد (Park et al., 2020). با تبدیل سلول پنل فتوولتائیک به نیم سلول، پنل فتوولتائیک در مقابل سایه جزئی یکسان عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال پژوهش انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که در شرایط سایه‌اندازی موضعی بر روی سه سلول کامل در پنل با ساختار سلول کامل و شش نیم‌سلول در پنل با ساختار نیم‌سلول، میزان کاهش جریان در پنل نیم‌سلولی تنها ۱۷٪ بوده، در حالی که این مقدار در پنل با سلول کامل به ۴۴٪ می‌رسد (Attia et al., 2021). از سوی دیگر تغییر در ساختار سلول‌ها می‌تواند بر دمای سلول‌های پنل خورشیدی فتوولتائیک تحت سایه نیز تاثیرگذار باشد (شکل (۶)).



شکل (۶): مقایسه دمای سلول تحت سایه با ساختارهای مختلف نیم‌سلول و تمام سلول

طبق گزارش آتیا و همکارانش دمای سلول تحت سایه در پنل با ساختار سلول کامل بین ۱۴۸ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد بوده در حالی که این مقدار برای یک سلول در پنل با ساختار نیم سلولی چیزی بین ۱۲۱ تا ۱۲۲ درجه سانتی‌گراد و برای یک رشته از پنل نیم سلولی این مقدار بین ۷۷ تا ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد است (Qian et al., 2018). از طرفی شینگل کردن یا نیم سلول بودن پنل‌های فتوولتائیک می‌تواند باعث استفاده مفیدتر از تجهیزات الکتریکی در آن شود و بهره‌وری پنل را بهبود بخشد. با مقایسه دو نوع ماژول با متفاوت بودن شینگل بودن سلول‌های یکی از آنها که موجب استفاده از دو دیود بایپس بیش‌تر شده است، در حالت‌های مختلف وجود سایه بر روی ماژول، ۲۴۳٪ عملکرد بهتری را از نظر حداکثر توان تولیدی از خود نشان می‌دهد (Wen et al., 2019).

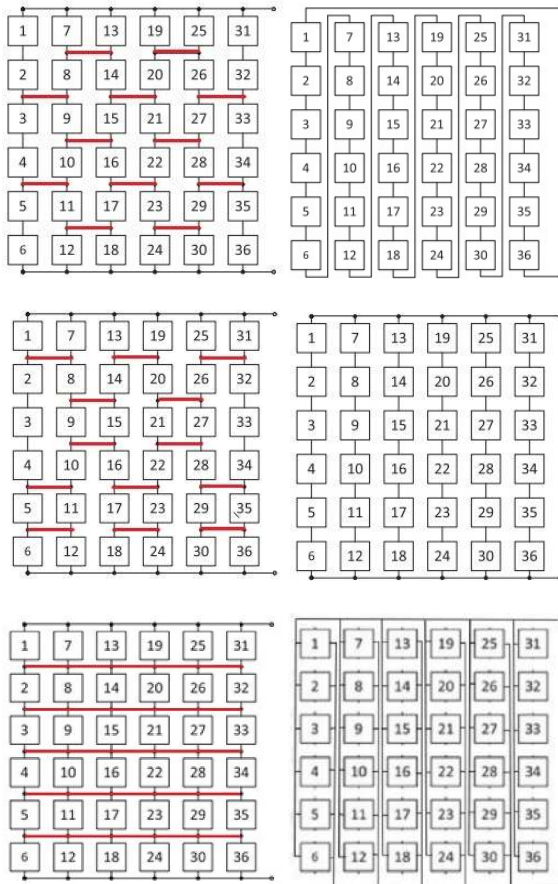
در سایه‌های متفاوت عملکرد بهتری را نسبت به پنل‌های فتوولتائیک استاندارد دارد. به‌عنوان مثال، پنل با دیود بایپس یکپارچه در شرایط سایه تک سلولی تنها ۳۵٪ افت توان دارد، در صورتی که برای ماژول استاندارد ۳۳۳٪ کاهش توان اتفاق می‌افتد و به همین ترتیب برای سایه تک ردیفی برای ماژول استاندارد همان افت خطی ۳۳۳٪ و برای ماژول با دیود بایپس یکپارچه افت ۷٪ اتفاق می‌افتد و در شرایط سایه جزئی چند ردیفی در ماژول استاندارد هیچ توانی تولید نمی‌شود اما در ماژول با دیود بایپس یکپارچه همواره مقداری تولید توان اتفاق می‌افتد (Hanifi et al., 2018). از طرفی عملکرد پنل فتوولتائیک تحت سایه جزئی علاوه بر تعداد دیود بایپس به شدت و نوع سایه نیز بستگی دارد. به‌عنوان نمونه در یک ماژول با ۶۰ سلول تاثیر تعداد دیود بایپس بر عملکرد پنل فتوولتائیک در سایه جزئی با میزان عبور نور ۳۸٪ و ۰ که از طریق یک توری فلزی و یک مقوا ایجاد می‌شد، مطابق شکل (۵) است. پنل در حالت ۶۰ دیود عملکرد قابل قبولی را بخصوص در حالت‌های سایه ردیفی و تصادفی از خود در زمینه حداکثر توان تولیدی نشان می‌دهد. البته شدت این بهبود در تعداد دیود بین ۲۰ تا ۶۰ عدد با شیب کم‌تری اتفاق می‌افتد (Pannebakker et al., 2017). یکی دیگر از تجهیزات الکتریکی مورد استفاده برای مقابله با آثار مخرب سایه‌اندازی استفاده از اپتیمایزهای قدرت است. اپتیمایزهای قدرت تجهیزاتی هستند که به هر پنل متصل و با تنظیم جداگانه ولتاژ و جریان آن، عملکرد سیستم را در شرایط سایه‌اندازی یا کثیفی بهینه می‌کنند. به عنوان مثال، در یک سامانه فتوولتائیک با توان ۱۰۲۵ کیلووات-پیک تحت سایه سنگین و سبک تصادفی، استفاده از اپتیمایزر بین ۵۴۸٪ (در سایه سنگین) تا ۶۴۸٪ (در سایه سبک) افزایش توان خروجی را نسبت به پنل‌های معمول با دیود بایپس در پی دارد، البته این تجهیز به اندازه دیودهای بایپس تاثیرگذار نیست و در پنل‌های فتوولتائیک کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Ramli & Salam, 2019). نکته دیگر در استفاده از روش‌های مبتنی بر تجهیزات الکتریکی، هزینه مربوط به تجهیزات است که باید متناسب با شرایط و با بهینه‌سازی هزینه‌ها، تعداد مناسب را در نظر گرفت.



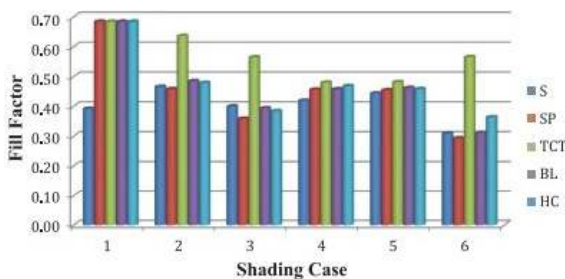
۳-۱-۲- پیکربندی‌های متفاوت سلول‌ها

پنل خورشیدی فتوولتائیک می‌تواند پیکربندی‌های متفاوتی مانند پیکربندی سری، سری-موازی، موازی، پل لینک‌دار^۴، شانه عسل^۵ و پل کامل متقاطع^۶ داشته باشند (شکل (۷))، که هر یک از این پیکربندی‌ها واکنش متفاوتی در مقابل وجود سایه‌های متفاوت روی پنل از خود نشان می‌دهند (R. Pachauri et al., 2018; K. Pachauri et al., 2021). طبق گزارش بینگل و همکاران در مقایسه با سایر پیکربندی‌ها، پل کامل متقاطع کم‌ترین تأثیر در بین پیکربندی‌های سنتی را از سایه جزئی با کاهش ۱۲٪ توان حداکثر نسبت به شرایط بدون سایه جزئی می‌پذیرد و بیش‌ترین توان حداکثر را در تمام شرایط سایه مورد بررسی ارائه می‌دهد. پیکربندی سری-موازی بیش‌ترین تأثیر را از سایه جزئی با کاهش ۲۲٪ توان حداکثر از خود نشان می‌دهد. عملکرد پیکربندی‌های پل لینک شده و شانه ی عسل به طور متوسط تحت تأثیر سایه جزئی قرار می‌گیرد. از طرفی عملکرد این پیکربندی‌ها با معیارهای دیگر توان حداکثر و ضریب پر شدگی و تلفات توان ناسازگاری^۷ نیز در سایه‌های جزئی مختلف قابل مقایسه‌اند. اگرچه بالاترین توان خروجی در انواع حالت‌های سایه جزئی متعلق به پیکربندی پل کامل متقاطع است که کم‌ترین مقدار تلفات ناسازگاری و بالاترین ضریب پر شدگی را در تمام حالت‌ها دارد (شکل ۸ و شکل ۹) (Bingöl & Özkaya, 2018).

در پژوهشی دیگر سایپراکاش و همکاران پیکربندی پل کامل متقاطع را با پیکربندی‌های شانه عسل، سری-موازی و پل لینک دار از نظر بیشینه توان خروجی و میزان ضریب پر شدگی با استفاده از متلب سیمولینک در پنج حالت سایه‌اندازی متفاوت شامل «کوتاه و باریک»، «بلند و پهن»، «بلند و باریک عمودی»، «کوتاه و پهن افقی» و «سایه قطری» مقایسه کردند. طبق گزارش ارائه شده توسط آن‌ها که خلاصه آن در جدول (۱) و جدول (۲) ارائه شده است، پیکربندی پل کامل متقاطع بهترین عملکرد را از نظر بیشینه توان تولیدی و ضریب پر شدگی در تمام حالت‌های سایه‌اندازی در بین این پیکربندی‌های سنتی از خود نشان داد (Saiprakash et al., ۲۰۲۱).



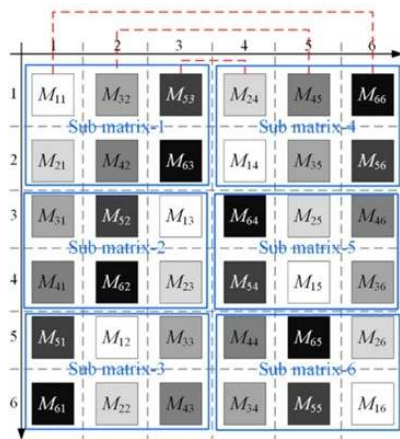
شکل (۷): پیکربندی‌های سری (بالا-راست)؛ سری-موازی (وسط-راست)؛ موازی (پایین-راست)؛ پل لینک دار (چپ-بالا)؛ شانه عسل (چپ-وسط)؛ پل کامل متقاطع (چپ-پایین).



شکل (۸): ضریب پر شدگی پیکربندی‌های متفاوت در سایه‌های جزئی

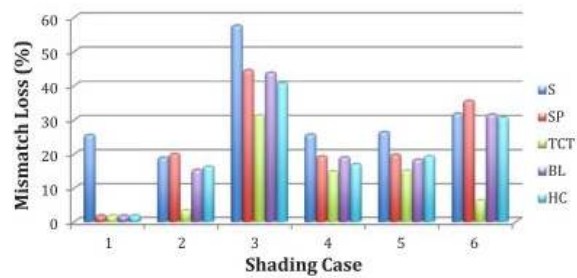
^۶ Totally Cross-Tied
^۷ Mismatch Losses

^۴ Bridge-Linked
^۵ Honeycomb



شکل (۱۰): پیکربندی سودوکو

یه^۸ و همکاران با استفاده از نرم افزار سیمولینک متلب یک پیکربندی سودوکوی متفاوت (شکل (۱۰)) را با پیکربندی پل کامل متقاطع از نظر تلفات ناسازگاری و توان حداکثری در ۶ نوع سایه مختلف مورد مقایسه قرار دادند. با توجه به گزارش این مطالعه این نوع پیکربندی در مقایسه با پل کامل متقاطع ۱۴.۶٪ بهبود حداکثر توان و ۱۱.۱٪ کاهش تلفات ناسازگاری داشته است (Ye et al., 2021). در این مطالعه نشان داده شد این نوع پیکربندی در شرایط سایه‌های گوشه‌ای پنل عملکرد بسیار بهتری (تا ۲۸٪) را از خود به نمایش می‌گذارد. از طرفی با تغییر در چینش فیزیکی سلول‌های پنل خورشیدی فتوولتائیک می‌توان میزان تراکم سایه جزئی را در بخش‌های مختلف پنل فتوولتائیک تقسیم نمود. در همین زمینه مقایسه‌ای بین روش بهینه‌سازی بازپیکربندی آرایه‌های فتوولتائیک بر اساس الگوریتم سودوکو و پیکربندی پل کامل متقاطع سه‌گانه^۹ ارائه شده است. این روش با استفاده از بازپیکربندی فیزیکی پنل‌ها بدون تغییر اتصالات الکتریکی، سایه را به‌طور یکنواخت در آرایه توزیع کرده و تلفات ناشی از ناسازگاری را کاهش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط سایه‌اندازی جزئی، این روش توانسته است توان نقطه بیشینه اصلی را تا ۱۱.۵۹ درصد افزایش دهد و تلفات ناسازگاری را تا ۱۴.۱۵ درصد کاهش دهد. همچنین، این روش ضریب پرشدگی را تا ۱۶.۹ درصد و بازدهی سیستم را تا ۱۳.۸۵ درصد بهبود داده است. به دلیل کارایی بالا و عدم نیاز به تجهیزات اضافی، این روش برای پروژه‌های بزرگ یا مناطق با سایه‌اندازی مکرر توصیه می‌شود (Kumar & Agarwal, 2023). یکی دیگر از روش‌های تغییر فیزیکی ساختار سلول‌ها روش جابجایی حلقوی به عقب^{۱۰} است که با توزیع یکنواخت سایه روی آرایه‌های فتوولتائیک، عملکرد سیستم را در شرایط



شکل (۹): تلفات توان ناسازگاری پیکربندی‌های متفاوت در سایه‌های جزئی

جدول (۱): نتایج توان بیشینه در پیکربندی‌های آزمایش.

سایه قطری	افقی	عمودی	بلند و پهن	کوتاه و باریک	
۶۶۳۰.۴	۵۰۴۵.۹	۶۰۲۵.۸	۴۴۷۱.۳	۶۲۷۸.۳	پل کامل متقاطع
۵۹۲۸.۶	۴۹۸۰.۹	۵۸۹۸.۶	۴۴۷۱.۲	۶۰۸۲.۲	شانه عسل
۵۹۲۷.۷	۴۸۵۰.۷	۵۷۹۵	۴۲۸۵.۲	۵۹۴۰.۶	سری- موازی
۵۹۶۳.۳	۴۹۷۲.۲	۵۸۸۳.۵	۴۴۶۸.۸	۵۹۷۱.۵	پل لینک دار

جدول (۲): نتایج ضریب پرشدگی در پیکربندی‌های آزمایش.

سایه قطری	افقی	عمودی	بلند و پهن	کوتاه و باریک	
۰.۷۱	۰.۵۲	۰.۶۷	۰.۷۴	۰.۶۵	پل کامل متقاطع
۰.۶۱	۰.۵۱	۰.۶۵	۰.۷۳	۰.۶۲	شانه عسل
۰.۶۱	۰.۵۰	۰.۶۴	۰.۶۹	۰.۶۱	سری- موازی
۰.۶۱	۰.۵۱	۰.۶۵	۰.۷۳	۰.۶۱	پل لینک دار

 Cyclic Back Shift^{۱۰}

 Ye^۸
Triple-Tied-Cross-Link^۹

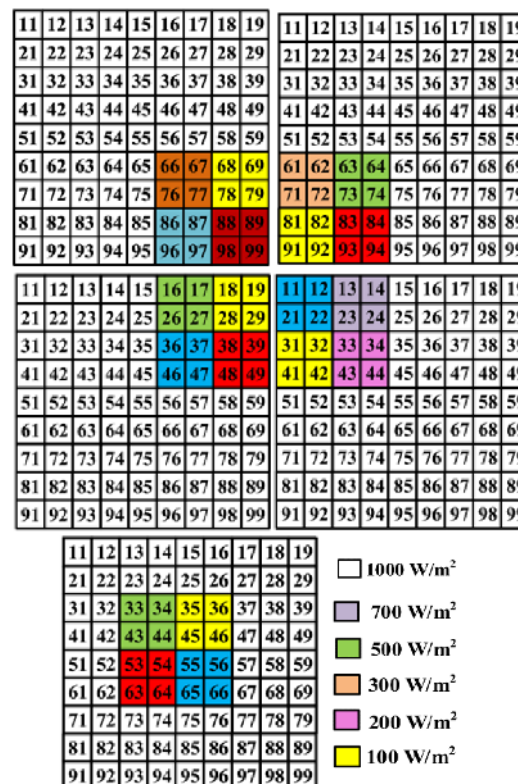
نشریه علمی - پژوهشی کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران سال چهاردهم شماره ۲ شماره پیاپی ۳۹ تابستان ۱۴۰۴

هزینه‌های نصب را افزایش دهد (Ramesh & Anbalagan, 2024). خلاصه‌ای از میزان تاثیر سایه‌های متفاوت بر عملکرد پیکربندی معرفی شده در این پژوهش در جدول (۳) ارائه شده است. مطابق این نتایج پیکربندی پیشنهادی، نسبت به پیکربندی کامل متقاطع، بین ۹.۷۳٪ تا ۲۲.۴۶٪ افزایش توان خروجی را از خود نشان داده است. در پژوهشی دیگر، کریشنا و همکاران اثر سایه‌اندازی جزئی بر بازدهی پنل‌های فتوولتائیک را بررسی کرده و روشی مبتنی بر ماتریس سودوکو را برای بهبود عملکرد آرایه‌های فتوولتائیک پیشنهاد داده‌اند. این روش با تغییر موقعیت فیزیکی ماژول‌ها، سایه‌ها را به صورت یکنواخت در آرایه توزیع می‌کند و تأثیر منفی سایه‌اندازی جزئی را کاهش می‌دهد. این بازپیکربندی بدون نیاز به تغییر در اتصالات الکتریکی، توان نقطه بیشینه اصلی را افزایش داده و تلفات توان ناشی از ناسازگاری را به حداقل می‌رساند. در این روش، با کاهش تلفات و بهبود ضریب پرشدگی، بازدهی سیستم بهبود می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش سودوکوی بهبودیافته توانسته است توان نقطه بیشینه اصلی را به طور میانگین ۳۹.۰۷ درصد افزایش و تلفات توان را تا ۵۳.۶۸ درصد کاهش دهد. همچنین، ضریب پرشدگی از ۰.۴۹ به ۰.۶۴ بهبود یافته و بازدهی سیستم افزایش قابل توجهی داشته است. این روش به دلیل سادگی و عدم نیاز به تجهیزات اضافی، گزینه‌ای ایده‌آل برای سیستم‌های کوچک و متوسط است (Sai Krishna & Moger, 2019).

۴- جمع‌بندی

سایه‌اندازی به عنوان یکی از چالش‌های کلیدی در بهره‌وری پنل‌های فتوولتائیک، تأثیر قابل توجهی بر کاهش توان تولیدی، تشکیل نقاط داغ، و کاهش طول عمر سیستم دارد. راهکارهای متعددی برای کاهش آثار سایه شامل استفاده از تجهیزات الکتریکی، بهینه‌سازی ساختار سلول‌ها، و تغییر در پیکربندی آرایه‌های خورشیدی است. هر یک از این روش‌ها تأثیر متفاوتی دارد و در پژوهش حاضر، با مرور پژوهش‌های پیشین این روش‌ها ارزیابی و مقایسه شدند. جدول (۴)، خلاصه‌ای از مقایسه میزان اثرگذاری روش‌های مختلف در کاهش آثار منفی سایه‌اندازی بر پنل‌های فتوولتائیک را ارائه می‌دهد. بررسی پژوهش‌ها نشان داد که استفاده از دیودهای بای‌پس به عنوان یکی از موثرترین روش‌ها است که با ایجاد مسیر جایگزین برای جریان، افت ولتاژ، امکان ایجاد نقاط داغ و آسیب به سلول‌ها را کاهش می‌دهد. این روش در شرایط سایه‌اندازی جزئی می‌تواند افت توان را تا ۳.۵٪ محدود کند، در حالی که پنل‌های استاندارد در شرایط مشابه کاهش ۳۳.۳٪ را تجربه کرده‌اند. همچنین، اپتیمایزرهای قدرت با تنظیم ولتاژ و جریان بهینه برای هر پنل، افزایش توان خروجی بین ۵.۴۸٪ تا ۶.۴۸٪ را به همراه داشته‌اند، اما به دلیل هزینه‌های بالا و تأثیر کمتر نسبت به دیودهای بای‌پس، جایگاه پایین‌تری

سایه‌اندازی جزئی بهبود می‌بخشد. استفاده از این روش با کاهش تلفات ناشی از ناسازگاری و افزایش توان نقطه بیشینه اصلی همراه است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، این روش توانسته در پنج حالت سایه‌اندازی (شکل (۱۱))، میانگین افزایش توان خروجی را تا ۲۲.۴۶ درصد در مقایسه با روش‌های متداول، به‌ویژه روش پل کامل متقاطع، ارائه دهد.



شکل (۱۱): حالت‌های: سایه ۱ (پایین-راست)؛ سایه ۲ (پایین-چپ)؛ سایه ۳ (بالا-راست)؛ سایه ۴ (بالا-چپ)؛ سایه ۵ (وسط).

جدول (۳): تاثیر سایه‌های متفاوت بر عملکرد پیکربندی.

نوع سایه	توان تولیدی پیکربندی پل کامل متقاطع	توان تولیدی روش پیشنهادی	درصد بهبود
حالت (۱)	۱۴۷۴۰	۱۷۴۷۰	۱۸.۵۲٪
حالت (۲)	۱۶۰۴۰	۱۷۶۰۰	۹.۷۳٪
حالت (۳)	۱۴۰۷۰	۱۷۲۳۰	۲۲.۴۶٪
حالت (۴)	۱۵۴۲۰	۱۷۷۲۰	۱۴.۹۲٪
حالت (۵)	۱۵۳۸۰	۱۷۷۶۰	۱۵.۴۷٪

این روش به دلیل پیاده‌سازی ساده و نیاز به تغییرات حداقلی در ساختار الکتریکی، برای آرایه‌های کوچک و متوسط مناسب است. با این حال، یکی از محدودیت‌های آن استفاده بیش‌تر از سیم‌های اتصال است که می‌تواند

- Functions. *Journal of Computational Electronics*, 24(2), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10825-025-02282-w>
- Abubakar, S. I., See, C. H., Member, S., Sukki, M., Member, S., & Mahendiran, R. (2025). Deploying Agrivoltaics in Sub-Saharan Africa: A Sustainable Pathway Towards Energy-Food Security-Challenges and Opportunities: A Review. *IEEE Access*, 13, 1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3568717>
- Afkar, M., Gholami, A., Gavagsaz-Ghoachani, R., Phattanasak, M., & Pierfederici, S. (2024). Sustainable Education for Sustainable Future: Art of Storytelling for Enhancing Creativity, Knowledge Retention on the Acme of Successful Education. *IEEE Access*, 12, 101782–101796. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3432030>
- Alenabi, S. A., Mansouri, A., Gholami, A., & Gavagsaz-Ghoachani, R. (2024). Simulation of wind flow effect on the cooling of solar panels (in Tehran). *2024 11th Iranian Conference on Renewable Energy and Distribution Generation (ICREDG)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICREDG61679.2024.10607775>
- Ameri, M., Gandomzadeh, M., Yaghoubi, A. A., Gholami, A., Zandi, M., & Gavagsaz-Ghoachani, R. (2024). Revolutionizing Solar Panel Maintenance in Photovoltaic Systems: Reviewing Intelligent UAV Solutions for Efficient Dust Mitigation and Perspectives. *7th International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME 2024)*, 11(1), 111–119. http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- Ameri, M., Minoofar, A., Gholami, A., Gholami, A., Eslami, S., & Zandi, M. (2023). Energy Efficiency and Solar Energy Implementation Opportunities for Dairy Farms. *11th Global Conference on Global Warming (GCGW-2023)*, 1–4.
- Aryanfar, A., Gholami, A., Ghorbannezhad, P., Yeganeh, B., Pourgholi, M., Zandi, M., & Stevanovic, S. (2022). Multi-criteria prioritization of the renewable power plants in Australia using the fuzzy logic in decision-making method (FMCDM). *Clean Energy*, 6(1), 16–34. <https://doi.org/10.1093/ce/zkab048>
- Aryanfar, A., Gholami, A., Pourgholi, M., & Zandi, M. (2021). Multicriteria wind potential assessment using fuzzy logic in decision making: A case study of Iran. *Wind Energy*, February, we.2640. <https://doi.org/10.1002/we.2640>
- Attia, O., Souissi, H., Khalil, M., & Salah, C. Ben. (2021). Functioning of the Half-Cells Photovoltaic Module in hybrid EV under Partial Shading. *2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals*

دارند. بهینه‌سازی ساختار سلول‌ها با استفاده از فناوری‌هایی مانند سلول‌های نیمه و شینگل نیز موجب کاهش سطح مؤثر سایه بر هر سلول و عملکرد بهتر می‌شود. این فناوری‌ها علاوه بر کاهش دمای نقاط داغ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد، به کاهش آسیب و افزایش طول عمر پنل‌ها کمک می‌کنند. در زمینه پیکربندی آرایه‌های خورشیدی، روش‌های نوآورانه مانند سودوکو و پل کامل متقاطع اثربخشی قابل توجهی در کاهش آثار سایه نشان داده‌اند. پیکربندی سودوکو، با توزیع یکنواخت سایه و بازپیکربندی فیزیکی پنل‌ها، توانسته است میانگین افزایش توان خروجی را تا ۲۲.۴۶٪ ارائه دهد و تلفات توان را تا ۵۳.۶۸٪ کاهش دهد.

جدول (۴): مقایسه اثرگذاری روش‌های مختلف به ترتیب.

روش	بهبود بهره‌وری	هزینه	محدودیت‌ها
پیکربندی‌های سنتی	۰٪ تا ۱۰٪	کم	افت شدید بهره‌وری تحت سایه‌های جزئی و کامل
ساختار شینگل	۲٪ تا ۳٪	بالا	نیازمند فناوری پیشرفته تولید
اوپتیمایزر قدرت	۴٪ تا ۷٪	بالا	هزینه‌بر برای سیستم‌های بزرگ
پیکربندی پل کامل متقاطع	۱۲٪ تا ۲۵٪	کم	پیچیدگی در طراحی
دیودهای بایپس	وابسته به تعداد دیود	متوسط	هزینه بر در تعداد دیود بالا
ساختار نیم‌سلول	۲۷٪ تا ۳۰٪	متوسط	نیازمند فناوری پیشرفته تولید
جابه‌جایی فیزیکی پیکربندی‌ها	۴۰٪ تا ۴۵٪	متوسط	افزایش مصرف سیم و هزینه نصب
سودوکو	۲۲٪ تا ۳۹٪	کم	نیازمند طراحی دقیق و محاسبات

به طور کلی، انتخاب راهکار مناسب به شرایط محیطی، نوع پنل، و محدودیت‌های اقتصادی وابسته است. در حالی که روش‌های مبتنی بر تجهیزات الکتریکی و بهینه‌سازی ساختار سلول‌ها برای پروژه‌های کوچک مناسب‌تر هستند، پیکربندی‌های نوآورانه مانند سودوکو گزینه‌ای ایده‌آل برای سیستم‌های بزرگ و مناطق با سایه‌اندازی مکرر محسوب می‌شوند. با رشد سامانه‌های فتوولتائیک در ایران، مدل‌سازی‌های هوش مصنوعی برای تحلیل آثار سایه و آلودگی و بهینه‌سازی بهره‌وری ضروری است. همچنین، پیکربندی‌های هوشمند آرایه‌ها و فناوری‌های نوین می‌توانند کارایی سیستم‌های بزرگ‌مقیاس را افزایش دهند.

مراجع

- Abdulrazzaq, A. K. B. G. P. B. (2025). Enhanced Single-Diode Model Parameter Extraction Method for Photovoltaic Cells and Modules Based on Integrating Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, and Comparative Objective

- <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.035>
 Gandomzadeh, M., Yaghoubi, A. A., Hoorsun, A., Parsay, A., Gholami, A., Zandi, M., Gavagsaz-Ghoachani, R., & Kazem, H. A. (2025). Dust mitigation methods and multi-criteria decision-making cleaning strategies for photovoltaic systems: Advances, challenges, and future directions. *Energy Strategy Reviews*, 57(October 2024), 101629.
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101629>
 Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., & Gavagsaz-Ghoachani, R. (2021). A Review on Dust Activities in Iran and Parameters Affecting Dust Accumulation on Photovoltaic Panels. *Journal of Renewable and New Energy*, 8(2), 146–158.
<https://doi.org/20.1001.1.24234931.1400.8.2.16.2>
 Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., & Gavagsaz-Ghoachani, R. (2021). A single-diode model for photovoltaic panels in variable environmental conditions: Investigating dust impacts with experimental evaluation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47(October), 101392. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101392>
 Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., & Gavagsaz-Ghoachani, R. (2022). Electrical, thermal and optical modeling of photovoltaic systems: Step-by-step guide and comparative review study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101711.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101711>
 Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., Gavagsaz-Ghoachani, R., Gavagsaz-Ghoachani, R., Gavagsaz-Ghoachani, R., Aslan, G., Majid, Z., Roghayeh, G. G., & Mohammad, A. (2021). Dust Accumulation On Photovoltaic Modules: A Review On The Effective Parameters. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 39(1), 45–57.
 Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., Gavagsaz-Ghoachani, R., & Gholami, M. (2023). A fast and precise double-diode model for predicting photovoltaic panel electrical behavior in variable environmental conditions. *International Journal of Ambient Energy*, 44(1), 1298–1315.
<https://doi.org/10.1080/01430750.2023.2173290>
 Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., Gavagsaz-Ghoachani, R., Jafarzagdegar Gerashi, S., Kazem, H. A., & Al-Waeli, A. H. A. (2023). Impact of harsh weather conditions on solar photovoltaic cell temperature: Experimental analysis and thermal-optical modeling. *Solar Energy*, 252, 176–194.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.01.039>
 Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., Gavagsaz-Ghoachani, R., & Kazem, H. A. (2022). Predicting solar photovoltaic electrical output under variable environmental conditions: Modified semi-empirical correlations for dust. *Energy for Sustainable Development*, 71, 389–405.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.10.012>
 Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., Ghoachani, R. G., Pierfederici, S., & Kazem, H. A. (2022). Step-By-
 & *Devices (SSD)*, 1252–1257.
<https://doi.org/10.1109/SSD52085.2021.9429410>
 Belhachat, F., & Larbes, C. (2021). PV array reconfiguration techniques for maximum power optimization under partial shading conditions: A review. *Solar Energy*, 230, 558–582.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.09.089>
 Bimenyimana, S., Asemota, G. N. O., Kemunto, M. C., & Li, L. (2017). Shading effects in photovoltaic modules: Simulation and experimental results. *2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, 904–909.
<https://doi.org/10.1109/ICPRE.2017.8390665>
 Bingöl, O., & Özkaya, B. (2018). Analysis and comparison of different PV array configurations under partial shading conditions. *Solar Energy*, 160, 336–343.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.004>
 Clement, C. E., Singh, J. P., Birgersson, E., Wang, Y., & Khoo, Y. S. (2020). Hotspot development and shading response of shingled PV modules. *Solar Energy*, 207, 729–735.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.078>
 Dehghan, A. A., & Barzegar, A. (2011). Thermal performance behavior of a domestic hot water solar storage tank during consumption operation. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 468–476.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.075>
 Dergisi, B., Journal, K., & Sciences, E. (2025). *IMPACT OF PARTIAL SHADING GEOMETRY ON THE ENERGY AND EXERGY PERFORMANCE*. 8055, 321–335. <https://doi.org/10.36306/konjes.1573123>
 Dhinish, M., Holmes, V., Mather, P., & Sibley, M. (2018). Novel hot spot mitigation technique to enhance photovoltaic solar panels output power performance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 179(February), 72–79.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.02.019>
 Eslami, S., Gholami, A., Akhbari, H., Zandi, M., & Noorollahi, Y. (2022). Solar-based multi-generation hybrid energy system; simulation and experimental study. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 2963–2975.
<https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1785937>
 Eslami, S., Gholami, A., Bakhtiari, A., Zandi, M., & Noorollahi, Y. (2019). Experimental investigation of a multi-generation energy system for a nearly zero-energy park: A solution toward sustainable future. *Energy Conversion and Management*, 200(May), 112107.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112107>
 Fadhel, S., Diallo, D., Delpha, C., Migan, A., Bahri, I., Trabelsi, M., & Mimouni, M. F. (2020). Maximum power point analysis for partial shading detection and identification in photovoltaic systems. *Energy Conversion and Management*, 224, 113374.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113374>
 Gallardo-Saavedra, S., & Karlsson, B. (2018). Simulation, validation and analysis of shading effects on a PV system. *Solar Energy*, 170, 828–839.

- ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 11(7), 4896–4903.
- Jafari, H., Poursalan, A., Gholami, A., Gavagsaz-Ghoachani, R., & Phattanasak, M. (2024). A Review of Solar Tracking Technologies: Mechanisms, Challenges, and Future Directions. 2024 International Conference on Materials and Energy: Energy in Electrical Engineering (ICOME 2024), 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICOME-EE64119.2024.10845331>
- Karaduman, Ö., & Parlak, K. Ş. (2025). A Dual-Adaptive Perspective on PV Array Reconfiguration with Genetic Algorithms Under Partial Shading Conditions. Applied Sciences (Switzerland), 15(4). <https://doi.org/10.3390/app15041762>
- Kazem, H. A., Al-Waeli, A. H. A., Chaichan, M. T., Sopian, K., Al Busaidi, A. S., & Gholami, A. (2023). Photovoltaic-thermal systems applications as dryer for agriculture sector: A review. Case Studies in Thermal Engineering, 47, 103047. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103047>
- Kazem, H. A., Al-Waeli, A. H. A., Chaichan, M. T., Sopian, K., Gholami, A., & Alnaser, W. E. (2023). Dust and cleaning impact on the performance of photovoltaic: an outdoor experimental study. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 45(1), 3107–3124. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2191064>
- Kazem, H. A., Chaichan, M. T., Al-Waeli, A. H. A., Al-Badi, R., Fayad, M. A., & Gholami, A. (2022). Dust impact on photovoltaic/thermal system in harsh weather conditions. Solar Energy, 245(July), 308–321. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.09.012>
- Kazem, H. A., Chaichan, M. T., Al-Waeli, A. H. A., & Gholami, A. (2022). A systematic review of solar photovoltaic energy systems design modelling, algorithms, and software. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 44(3), 6709–6736. <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2100517>
- Krishna, S. G., & Moger, T. (2019). Optimal SuDoKu Reconfiguration Technique for Total-Cross-Tied PV Array to Increase Power Output Under Non-Uniform Irradiance. IEEE Transactions on Energy Conversion, 34(4), 1973–1984. <https://doi.org/10.1109/TEC.2019.2921625>
- Kumar, A., & Agarwal, R. (2023). Enhancement of power output of partially shaded photovoltaic system using optimal Sudoku puzzle based triple-tied-cross-link reconfiguration techniques. Engineering Research Express, 5(4), 045036. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad0198>
- Laamami, S., Benhamed, M., & Sbita, L. (2017). Analysis of shading effects on a photovoltaic array. 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS), 1–5. <https://doi.org/10.1109/GECS.2017.8066212>
- Madhanmohan, V. P., Nandakumar, M., & Saleem, A. (2020). Enhanced performance of partially shaded Step Guide to Model Photovoltaic Panels: An Up-To-Date Comparative Review Study. IEEE Journal of Photovoltaics, 12(4), 915–928. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2022.3169525>
- Gholami, A., Eslami, S. H., Tajik, A., Ameri, M., Gavagsaz Ghoachani, R., & Zandi, M. (2019). A review of dust removal methods from the surface of photovoltaic panels. Mechanical Engineering, Sharif Journal, 35(2), 117–127. <https://doi.org/10.24200/j40.2019.52496.1496>
- Gholami, Y., Gholami, A., Ameri, M., & Zandi, M. (2018). Investigation of Applied Methods of Using Passive Energy In Iranian Traditional Urban Design, Case Study of Kashan. 4th International Conference on Advances In Mechanical Engineering: ICAME 2018, 3–12.
- Ghosh, S., Singh, S. K., & Yadav, V. K. (2023). Experimental investigation of hotspot phenomenon in PV arrays under mismatch conditions. Solar Energy, 253, 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.02.033>
- Goetz, S. M., Wang, C., Li, Z., Murphy, D. L. K., & Peterchev, A. V. (2019). Concept of a distributed photovoltaic multilevel inverter with cascaded double H-bridge topology. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 110, 667–678. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.03.054>
- Gupta, A. K., Maity, T., H, A., & Chauhan, Y. K. (2021). An electromagnetic strategy to improve the performance of PV panel under partial shading. Computers & Electrical Engineering, 90, 106896. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106896>
- Hanifi, H., Dassler, D., Turek, M., & Schneider, J. (2018). Evaluation and Comparison of PV Modules With Different Designs of Partial Cells in Desert and Moderate Climates. IEEE Journal of Photovoltaics, 8(5), 1266–1273. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2841515>
- Hasan, K., Yousuf, S. B., Tushar, M. S. H. K., Das, B. K., Das, P., & Islam, M. S. (2022). Effects of different environmental and operational factors on the PV performance: A comprehensive review. Energy Science & Engineering, 10(2), 656–675. <https://doi.org/10.1002/ese3.1043>
- Hoorsun, A., Gandomzadeh, M., Yaghoubi, A., Parsay, A., Gholami, A., & Zandi, M. (2024). Insights and Research Trends of Dust and Cleaning in Solar Energy: A Bibliometric Review Study. 9th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM 2024), 1–5.
- Hosseini, S. A., Kermani, A. M., & Arabhosseini, A. (2019). Experimental study of the dew formation effect on the performance of photovoltaic modules. Renewable Energy, 130, 352–359. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.063>
- Humada, A. M., Sulaiman, M. H. Bin, Hojabri, M., Hamada, H. M., & Ahmed, M. N. (2016). A review on photovoltaic array behavior, configuration strategies and models under mismatch conditions.

- Park, J.-S., Oh, W.-J., Joo, J.-H., Yi, J.-S., Hong, B.-Y., & Lee, J.-H. (2020). Design of High-Power and High-Density Photovoltaic Modules Based on a Shingled Cell String. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 20(11), 6996–7001. <https://doi.org/10.1166/jnn.2020.18837>
- Parsay, A., Gandomzadeh, M., Yaghoubi, A. A., Hoorsun, A., Gholami, A., Zandi, M., Gavagsaz-ghoachani, R., & Kazem, H. A. (2025). Enhancing photovoltaic efficiency: An in-depth systematic review and critical analysis of dust monitoring, mitigation, and cleaning techniques. *Applied Energy*, 388(February), 125668. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125668>
- Piryaei, Z., Gholami, A., & Zandi, M. (2025). 4E performance evaluation of renewable microgrids: Comparing hydrogen and battery storage for nearly net zero energy buildings. *Energy Conversion and Management*, 332(February), 119711. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119711>
- Qian, J., Thomson, A., Blakers, A., & Ernst, M. (2018). Comparison of Half-Cell and Full-Cell Module Hotspot-Induced Temperature by Simulation. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(3), 834–839. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2817692>
- Rajani, K., & Ramesh, T. (2020). Maximum power enhancement under partial shadings using modified Sudoku reconfiguration. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(6), 1187–1201. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.01100>
- Ramesh, D., & Anbalagan, K. (2024). Cyclic back shift method for maximizing PV array power under partial shading. *Electrical Engineering*, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02855-1>
- Ramli, M. Z., & Salam, Z. (2019). Performance evaluation of dc power optimizer (DCPO) for photovoltaic (PV) system during partial shading. *Renewable Energy*, 139, 1336–1354. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.072>
- Razeghi Jahromi, D., Gordali, M. M., Gholami, A., & Zandi, M. (2024a). Floating Photovoltaic Solar Systems: Component Selection, Design, Installation, Operation, and Maintenance. *Journal of Renewable and New Energy*, 12(1), 173–181. <https://doi.org/10.22034/jrenew.2025.206117>
- Razeghi Jahromi, D., Gordali, M. M., Gholami, A., & Zandi, M. (2024b). The causes and effects of the degradation of solar photovoltaic panels' components. *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, 12(4), 18–32. <http://ieiqip.ir/article-1-955-en.html>
- Razeghi Jahromi, D., Minoofar, A., Ghorbani, G., Gholami, A., Ameri, M., & Zandi, M. (2023). Harnessing Sunlight on Water: A Comprehensive Analysis of Floating Photovoltaic Systems and their Implications Compared to Terrestrial. *Journal of Renewable Energy and Environment*. <https://doi.org/10.30501/jree.2023.400301.1601>
- Rezvani, M., Gholami, A., Gavagsaz-Ghoachani, R., photovoltaic arrays using diagonally dispersed total cross tied configuration. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 47(1), 477–495. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1826008>
- Mamun, M. A. Al, Hasanuzzaman, M., & Selvaraj, J. (2017). Experimental investigation of the effect of partial shading on photovoltaic performance. *IET Renewable Power Generation*, 11(7), 912–921. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0902>
- Minoofar, A., Gholami, A., Eslami, S., Hajizadeh, A., Gholami, A., Zandi, M., Ameri, M., & Kazem, H. A. (2023). Renewable energy system opportunities: A sustainable solution toward cleaner production and reducing carbon footprint of large-scale dairy farms. *Energy Conversion and Management*, 293, 117554. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117554>
- Mohapatra, A., Nayak, B., & Mohanty, K. B. (2021). Analytical approach to locate multiple power peaks of photovoltaic array under partial shading condition and hybrid array configuration schemes to reduce mismatch losses. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 47(1), 9193–9214. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1945710>
- Nipu, N. N. N. N., Saha, A., Khan, M. F., & Khan, F. (2016). Effect of accumulated dust on the performance of solar PV module. *International Journal of Engineering & Technology*, 6(1), 9. <https://doi.org/10.14419/ijet.v6i1.6316>
- Ortiz-munoz, D., Luviano-cruz, D., Perez-dominguez, L. A., Garcia-luna, F., & Rodriguez-ramirez, A. G. (2025). Hybrid Fuzzy – DDPG Approach for Efficient MPPT in Partially Shaded Photovoltaic Panels. *Özkalay, E., Valoti, F., Caccivio, M., Virtuani, A., Friesen, G., & Ballif, C. (2024). The effect of partial shading on the reliability of photovoltaic modules in the built-environment. EPJ Photovoltaics*, 15, 7. <https://doi.org/10.1051/epjpv/2024001>
- Pachauri, R. K., Bai, J., Kansal, I., Mahela, O. P., & Khan, B. (2021). Shade dispersion methodologies for performance improvement of classical total cross-tied photovoltaic array configuration under partial shading conditions. *IET Renewable Power Generation*, 15(8), 1796–1811. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12147>
- Pachauri, R., Yadav, A. S., Chauhan, Y. K., Sharma, A., & Kumar, V. (2018). Shade dispersion-based photovoltaic array configurations for performance enhancement under partial shading conditions. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 28(7), e2556. <https://doi.org/10.1002/etep.2556>
- Pannebakker, B. B., de Waal, A. C., & van Sark, W. G. J. H. M. (2017). Photovoltaics in the shade: one bypass diode per solar cell revisited. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25(10), 836–849. <https://doi.org/10.1002/pip.2898>

- Photovoltaic Array by Optimal Reconfiguration and Current Injection Schemes. *Energies*, 14(19), 6332. <https://doi.org/10.3390/en14196332>
- Vicente, P. D. S., Pimenta, T. C., & Ribeiro, E. R. (2015). Photovoltaic Array Reconfiguration Strategy for Maximization of Energy Production. *International Journal of Photoenergy*, 2015, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2015/592383>
- Vieira, R., de Araújo, F., Dhimish, M., & Guerra, M. (2020). A Comprehensive Review on Bypass Diode Application on Photovoltaic Modules. *Energies*, 13(10), 2472. <https://doi.org/10.3390/en13102472>
- Wen, Z., Chen, J., Cheng, X., Niu, H., & Luo, X. (2019). A new and simple split series strings approach for adding bypass diodes in shingled cells modules to reduce shading loss. *Solar Energy*, 184, 497–507. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.099>
- Yaghoubi, A. A., Gandomzadeh, M., Gholami, A., Gavagsaz-Ghoachani, R., Zandi, M., & Phattanasak, M. (2024). Harnessing Machine Learning with Advanced Linear Regression Models to Forecast PV System. *2024 International Conference on Materials and Energy: Energy in Electrical Engineering (ICOME 2024)*, MI, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICOME-EE64119.2024.10845673>
- Yaghoubi, A. A., Gandomzadeh, M., Gholami, A., Gavagsaz-Ghoachani, R., Zandi, M., & A. Kazem, H. (2024). Optimize photovoltaic panels cleaning scheduling framework based on variations of hourly-based active electricity pricing in the market. *Solar Energy*, 275(May), 112633. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112633>
- Yaghoubi, A., Gandomzadeh, M., Parsay, A., Gholami, A., Gavagsaz-Ghoachani, R., & Majid, Z. (2024). A Review on Machine Learning Model Implementation for Photovoltaic Systems. *The 11th Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG 2024)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICREDG61679.2024.10607821>
- Ye, C.-E., Tai, C.-C., Huang, Y.-P., & Chen, J.-J. (2021). Dispersed partial shading effect and reduced power loss in a PV array using a complementary SuDoKu puzzle topology. *Energy Conversion and Management*, 246, 114675. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114675>
- Yousri, D., Babu, T. S., Pachauri, R. K., Zeineldin, H., & El-Saadany, E. F. (2024). A novel argyle puzzle for partial shading effect mitigation with experimental validation. *Renewable Energy*, 225, 120307. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120307>
- Phattanasak, M., & Zandi, M. (2022). A review of the factors affecting the utilization of solar photovoltaic panels. *2022 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovative Electricals and Electronics (RI2C)*, 62–69. <https://doi.org/10.1109/RI2C56397.2022.9910278>
- Sai Krishna, G., & Moger, T. (2019). Improved SuDoKu reconfiguration technique for total-cross-tied PV array to enhance maximum power under partial shading conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 333–348. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.037>
- Saiprakash, C., Mohapatra, A., Nayak, B., & Ghatak, S. R. (2021). Analysis of partial shading effect on energy output of different solar PV array configurations. *Materials Today: Proceedings*, 39, 1905–1909. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.307>
- Santra, S. B., Mohanty, S. K., & Roy Choudhury, T. (2024). Simplified circuit model of novel bypass diode based PV array for circulating current and power loss minimization under partial shading. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 44(1), 1–18. <https://doi.org/10.1108/COMPEL-06-2024-0257>
- Sharma, P., & Mishra, R. K. (2025). Comprehensive study on photovoltaic cell's generation and factors affecting its performance: A Review. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 14(1), 1–28. <https://doi.org/10.1007/s40243-024-00292-5>
- Siddique, M. A. B., Zhao, D., & Rehman, A. U. (2025). Emerging maximum power point control algorithms for PV system: review, challenges and future trends. *Electrical Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00202-025-03002-0>
- Sollazzo, L., Mangherini, G., Diolaiti, V., & Vincenzi, D. (2025). A Comprehensive Review of Agrivoltaics: Multifaceted Developments and the Potential of Luminescent Solar Concentrators and Semi-Transparent Photovoltaics. *Sustainability (Switzerland)*, 17(5). <https://doi.org/10.3390/su17052206>
- Soni, A. K., Jana, K. C., Gupta, D. K., Pal, P. K., & Jha, A. K. V. (2025). Design and Analysis of an Adaptive Global Maximum Power Point Tracking Algorithm for Enhanced Partial Shading Detection and GMPP Tracking. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-025-10018-y>
- Vadivel, S., Boopthi, C. S., Ramasamy, S., Ahsan, M., Haider, J., & Rodrigues, E. M. G. (2021). Performance Enhancement of a Partially Shaded