

# ارائه الگوریتمی جدید برای پیکربندی آرایه‌های فتوولتائیک به منظور بهبود اثرات سایه با تکیه بر الگوهای مختلف

غالب مصطفایی، رضا قندهاری و مجید حروفیانی

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

دانشکده مهندسی برق

تهران، ایران

روزی به پایان خواهند رسید. از این رو صاحب‌نظران و کارشناسان به دنبال منابعی هستند که به تدریج جایگزین سوخت‌های فسیلی شوند. متخصصان بر این باورند که با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی، بادی، زمین گرمایی و هیدروژن به جای انرژی‌های حاصل از سوخت‌های فسیلی، از آلودگی‌های زیست محیطی و خطرات ناشی از آنها جلوگیری خواهد شد. خورشید بزرگترین منبع تجدیدپذیر انرژی روی کره زمین است و می‌توان گفت که در میان منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های فتوولتائیک (PV) تقریباً نسبت به سایر منابع از اقبال بیشتری برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی برخوردار هستند [۱].

استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک برای تولید انرژی همواره با چالش‌های زیادی مواجه بوده است. به‌طور مثال، ساختمان‌های مجاور، درختان، عبور ابرها و حتی آرایه‌های مجاور ممکن است باعث شوند که آرایه‌های PV تحت سایه جزئی قرار گیرند. در آلمان و ژاپن، در ساختمان‌هایی که از سیستم فتوولتائیک بهره می‌گیرند سایه جزئی سالیانه در حدود ۵٪-۱۰٪ تلفات ایجاد می‌کنند [۲]. در اسپانیا تلفات سالیانه انرژی ناشی از سایه جزئی در مزارع فتوولتائیک در حدود ۵٪-۶٪ گزارش شده است [۳]. در شرایط سایه جزئی عملکرد الکتریکی یک آرایه PV به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. نه تنها توان خروجی سلول‌های سایه شده کاهش می‌یابد بلکه به دلیل ارتباط الکتریکی آن‌ها با سلول‌های بدون سایه، اثر نامطلوبی روی عملکرد سلول‌های بدون سایه نیز دارد [۴]. اگر جریان تولیدی ناشی از یک سلول بدون سایه از یک سلول سایه‌دار عبور کند بر روی سلول سایه‌دار ولتاژ منفی ایجاد می‌شود و توان در این سلول تلف می‌شود که به این پدیده نقطه داغ گفته می‌شود که این موضوع منجر به سوختن سلول و حتی خرابی آرایه خواهد شد [۵].

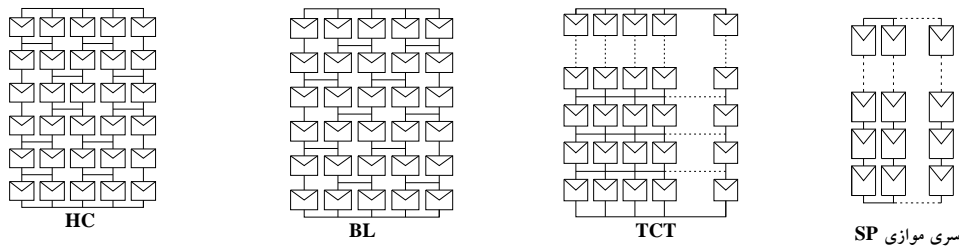
چکیده — در آرایه‌های فتوولتائیک سایه جزئی به شرایطی اتلاف می‌شود که در آن ماژول‌های مختلف آرایه به دلیل سایه، سطوح تابش متفاوتی را تجربه می‌کنند. این تفاوت باعث ایجاد اثر نامحجوری بین ماژول‌ها و همچنین نتایج نامطلوبی از قبیل کاهش توان تولیدی و پدیده نقطه داغ خواهد شد. یکی از کاربردی‌ترین شیوه‌های بهبود وضعیت آرایه خورشیدی در شرایط سایه جزئی پیکربندی مجدد آرایه به منظور توزیع سایه در آرایه می‌باشد. در این مقاله الگوریتمی پیشنهاد شده که بر اساس آن ماژول‌ها با توجه به الگوهای مختلف سایه و برای یک پیکربندی ثابت به گونه‌ای جابجا می‌شوند که حداکثر بهره‌وری در شرایط مختلف سایه، حاصل شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که پیکربندی و توزیع سایه در سطح آرایه خورشیدی با الگوریتم پیشنهادی بهبود مناسبی را در بهره‌وری بیشینه از آرایه‌های فتوولتائیک نسبت به دیگر روش‌های معرفی شده برای پیکربندی مجدد، داشته است.

واژه‌های کلیدی — سیستم‌های فتوولتائیک؛ سایه جزئی؛ پیکربندی

مجدد ثابت؛ کاهش تلفات؛

## ۱. مقدمه

توسعه شگرف علم و فناوری در جهان امروز ظاهراً آسایش و رفاه زندگی بشر را موجب شده است. اما این توسعه یافتگی، مایه بروز مشکلات تازه‌ای نیز برای انسان‌ها شده است که از آن جمله می‌توان به آلودگی محیط زیست، تغییرات گسترده آب و هوایی در زمین و غیره اشاره نمود. سوخت‌های فسیلی آلودگی‌های زیست محیطی بی‌شماری را ایجاد می‌کنند و از طرفی این منابع



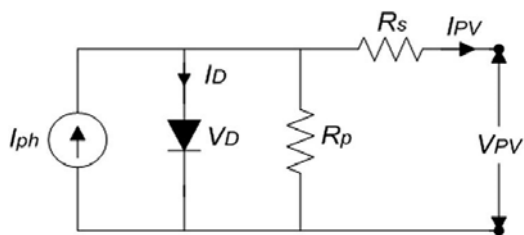
شکل ۱: پیکربندی‌های مختلف آرایه‌های فتولتاییک

الگو خواهد شد. در پیکربندی مجدد نوع دینامیکی برای متعادل کردن تابش ارتباط الکتریکی ماژول‌ها تغییر می‌کند. برای این کار از سوئیچ‌هایی استفاده می‌شود که این امر نیز تا حدی موجب افزایش هزینه خواهد شد [۱۹].

در این مقاله یک الگوریتم جدید پیشنهاد شده که از نظر تقسیم بندی در نوع پیکربندی مجدد ثابت قرار می‌گیرد. این الگوریتم مشکل پیکربندی سودوکو یعنی محدودیت برابری سطر و ستون ندارد و همچنین برای الگوهای مختلف سایه نیز مناسب است. در این مقاله ابتدا الگوهای مختلف سایه مطرح می‌شود و در ادامه الگوریتم پیشنهادی ارائه شده و برای همه الگوهای مطرح شده شبیه‌سازی انجام می‌شود و نتایج با الگوریتم‌های قبلی مقایسه شده است.

## ۲. مدل سلول خورشیدی

مدل‌سازی سلول خورشیدی کمک زیادی به تعیین مشخصات پیکربندی در شرایط تابش یکنواخت و غیریکنواخت خورشید خواهد کرد. همان‌طوری که در «شکل ۲» نشان داده شده، سلول خورشیدی را می‌توان به صورت یک منبع جریان، یک دیود و مقاومت‌های  $R_p$  و  $R_s$  مدل کرد. منبع جریان تحت تابش خورشید جریان  $I_{ph}$  را تولید می‌کند. دیود  $D$  به واسطه وجود پیوند P-N در سلول در نظر گرفته می‌شود. مقادیر  $R_p$  و  $R_s$  به ترتیب مقاومت‌های سری و موازی درون سلول هستند و معمولاً مقدار  $R_p$  خیلی کم و  $R_s$  خیلی زیاد است و در ایده‌آل‌ترین حالت این مقاومت‌ها در مدل سلول PV در نظر گرفته نمی‌شوند.



شکل ۲: مدار معادل یک سلول خورشیدی

برای مقابله با مشکلات ناشی از سایه جزئی روش‌های زیادی ارائه شده که ساده‌ترین آن‌ها استفاده از دیودهای بای‌پس است که با سلول‌ها موازی شده و با محدود کردن ولتاژ معکوس دو سر سلول تلفات توان را کاهش می‌دهد [۶]. در [۷] عملکرد یک مدار بای‌پس جدید (CBS) با راه‌حل دیود شاتکی کلاسیک، مقایسه شده که نتایج نشان می‌دهد این مدار نسبت به دیود شاتکی، هم در شرایط سایه و هم در تابش کامل تلفات کمتری دارد. روش‌های دیگری نظیر بکارگیری آرایش‌های TCT، BL و HC به جای آرایش سنتی SP [۸-۱۰] مطابق آنچه در «شکل ۱» دیده می‌شود، استفاده از تکنیک‌های تشخیص نقطه بهینه (MPPT) [۱۱-۱۳]، ساختارهای مختلف سیستم‌های PV [۱۴]، توپولوژی‌های مختلف مدارات [۱۵] و پیکربندی مجدد آرایه‌ها جهت کاهش اثرات سایه نیز ارائه شده‌اند [۱۶-۱۹].

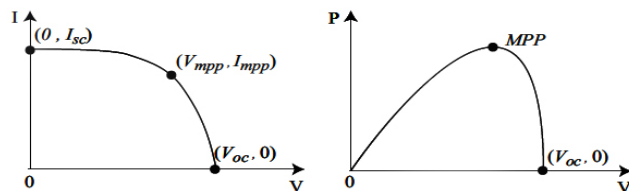
روش‌های پیکربندی مجدد آرایه‌ها به دو گروه ثابت و دینامیکی تقسیم می‌شوند. در نوع ثابت مبنای کار جابجایی فیزیکی محل ماژول‌ها در سطح پنل است بدون اینکه اتصال الکتریکی آن‌ها تغییر یابد به گونه‌ای که سایه در سطح آرایه پراکنده می‌شود [۱۶-۱۸]. یک روش پیکربندی ثابت در [۱۶] مطرح شده که الهام گرفته از جدول سودوکو معروف است. استفاده از قانون این جدول راهنمای خوبی برای ساخت یک الگوی مناسب جهت پراکنده کردن سایه است. متأسفانه هرچند بکارگیری چنین پیکربندی راندمان را بهبود می‌دهد، اما از نظر آرایش دوباره سیم‌بندی پرهزینه و دشوار است. مهم‌تر از همه اینکه این پیکربندی به یک ماتریس ۹×۹ محدود است و اگر تعداد سطرها و ستون‌های پنل PV برابر نباشند چنین الگویی ناممکن است. از سوی دیگر، الگوی گام به گام به عنوان پیکربندی‌ای استفاده می‌شود که با حرکت ستون‌های پنل PV به پایین با یک سلول نسبت به سمت چپ در آرایش TCT ایجاد می‌شود [۱۷-۱۸]. این آرایش به عنوان یک استراتژی بهبود یافته برای پیکربندی سودوکو معرفی می‌شود. هرچند این پیکربندی محدودیت‌های تعداد سطر و ستون‌های پنل PV را ندارد اما دارای یک ضعف اجتناب ناپذیر می‌باشد و سایه‌های قطری، به صورت ردیفی روی پنل قرار می‌گیرند که این امر باعث محدود شدن جریان و عملکرد بد این

آن‌ها سایه ناشی از آرایه‌های مجاور است. سایه‌هایی مانند سایه‌های ابرها، پرندگان، گرد و غبار و برف سایه‌های قابل پیش‌بینی نیستند اما سایه‌هایی مانند سایه‌های ساختمان‌ها، درختان و سایه‌های آرایه‌های دیگر، قابل پیش‌بینی بوده و تنها متناسب با موقعیت عرض جغرافیایی و ایام سال این سایه‌ها تغییر می‌نمایند.

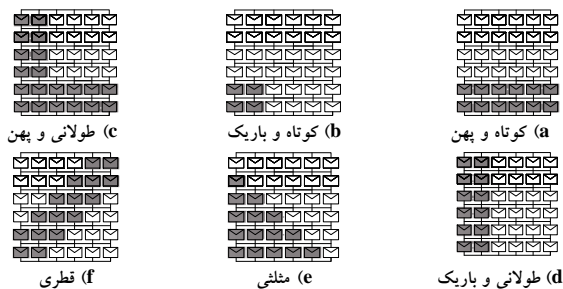
با توجه به ارتباط جریان اتصال کوتاه سلول PV با تابش نور، سایه جزئی منجر به کاهش جریان فوتون در سلول‌های PV تحت سایه می‌شود در حالی که سلول‌های بدون سایه به کار خود در جریان فوتون بالاتری ادامه می‌دهند.

### ۳-۱. الگوهای سایه

تلفات ناهم‌جوری نقش زیادی در کاهش راندمان انرژی دارد. هرچند این موضوع بستگی زیادی به الگوی سایه دارد. در [۲۱] چهار الگوی معروف سایه یعنی کوتاه و پهن (Short Wide)، کوتاه و باریک (Short Narrow)، طولانی و پهن (Long Wide) و طولانی و باریک (Long Narrow) مطرح شده است. الگوهای دیگری نیز قابل بحث هستند از جمله این‌ها می‌توان مدل مثلثی و مورب (قطری) و حتی الگوهای تصادفی را می‌توان نام برد که گونه‌های مختلف یاد شده در «شکل ۴» دیده می‌شوند.



شکل ۳: منحنی مشخصه‌های یک آرایه PV



شکل ۴: مدل‌های سایه

با سری شدن تعدادی سلول، یک ماژول تولید می‌شود و از اتصال تعدادی ماژول به‌صورت سری، موازی و یا آرایش‌های مختلف، آرایه به‌دست می‌آید. مشخصه I-V یک آرایه PV به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۲۰]:

$$I_{PV} = N_p \left( I_{ph} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{q(V_{PV} + R_s I_{PV})}{N_s A K T} \right)} - 1 \right] - \frac{(V_{PV} + R_s I_{PV})}{N_s R_p} \right) \quad (1)$$

که در آن  $I_{PV}$  و  $V_{PV}$  جریان و ولتاژ خروجی،  $N_p$  و  $N_s$  تعداد ماژول‌هایی که به‌صورت سری و موازی متصل شده‌اند،  $A$  ضریب ایده‌آل پیوند P-N،  $K$  ثابت بولتزمن ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)،  $T$  دمای سلول برحسب کلونین،  $I_0$  جریان اشباع معکوس و  $q$  بار الکترون ( $1.6 \times 10^{-19}$  C) است.

جریان اشباع معکوس سلول  $I_0$  تابعی از دما است و به‌صورت زیر قابل تعریف است:

$$I_0 = I_c \left( T / T_c \right)^3 e^{\left[ \left( \frac{E_g}{K A} \right) \left( \frac{1}{T_c} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (2)$$

که  $T_c$  دمایی است که به‌عنوان مرجع ( $25^\circ\text{C}$ ) در نظر گرفته می‌شود،  $I_c$  جریان اشباع معکوس در دمای  $T_c$  و  $E_g$  انرژی شکاف باند نیمه هادی استفاده شده در سلول است. جریان فوتون  $I_{ph}$  به‌عنوان تابعی از تابش خورشید و دمای سلول به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I_{ph} = [I_{scr} + K_i (T - T_c)] [G / 1000] \quad (3)$$

که  $I_{scr}$  جریان اتصال کوتاه سلول در دما و تابش مرجع ( $1000 \text{ W/m}^2$ )،  $K_i$  ضریب حرارتی جریان اتصال کوتاه و  $G$  تابش خورشید است.

### ۳. سایه جزئی

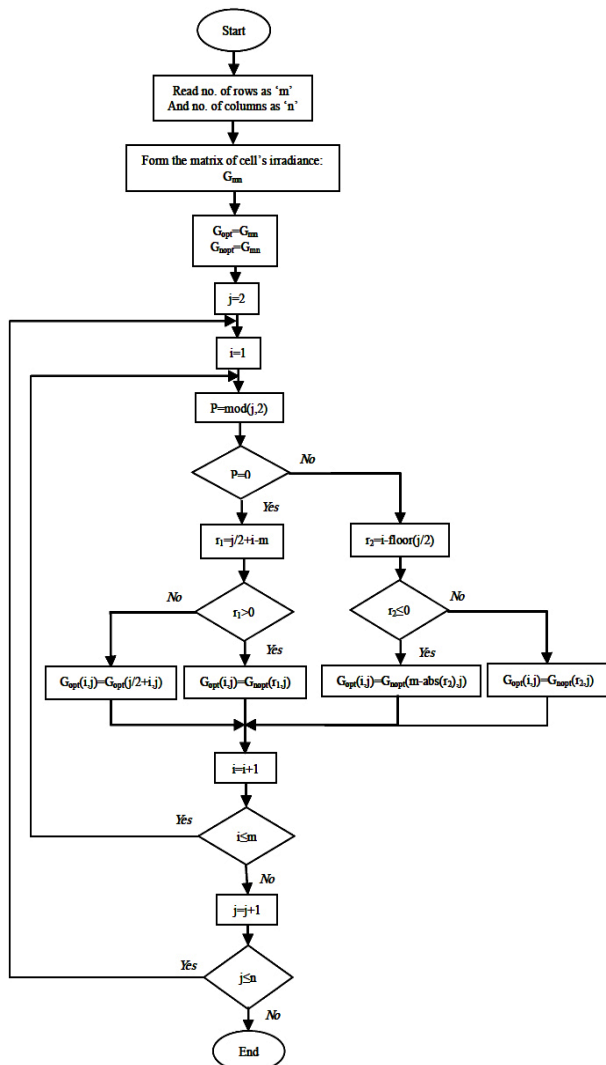
در حالت ایده‌آل اگر کلیه سلول‌ها تحت تابش یکسانی قرار گیرند، منحنی مشخصه‌های I-V و P-V مربوط به همه سلول‌ها مانند «شکل ۳» یکسان خواهد بود. در نتیجه کلیه سلول‌ها همزمان در نقطه بهینه (MPP) خود عمل می‌کنند و توان خروجی تمامی آرایه‌ها در ماکزیمم مقدار خود قرار دارد. عوامل مختلف مانند کهنگی و فرسودگی، گرد و غبار و سایه جزئی منجر به عدم تطابق منحنی‌ها و همچنین عدم عملکرد یکدست کلیه سلول‌ها خواهد شد.

سایه جزئی یک پدیده شایع است و زمانی که بعضی از سلول‌های درون یک ماژول و یا آرایه توسط ساختمان‌ها، پرندگان، عبور ابرها، آرایه‌های مجاور و یا اشیای دیگر تحت سایه قرار می‌گیرند، رخ می‌دهد که غالب‌ترین

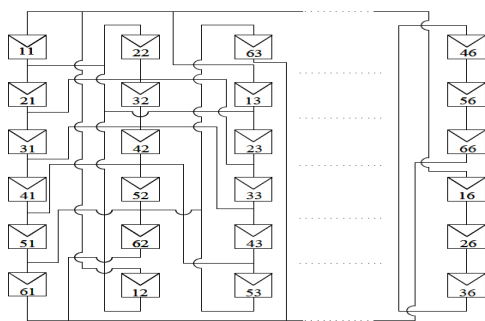
## ۴. الگوریتم پیشنهادی

همان‌گونه که اشاره شد برای مقابله با اثرات ناشی از سایه جزئی از روش‌های پیکربندی ثابت استفاده می‌شود. پیکربندی سودوکو (Su Do Ku) و جابجایی گام به گام (Step Wise) از این دست روش‌ها هستند. روش پیکربندی سودوکو برای یک آرایه  $m \times m$  بدین شکل است که آرایه به  $m$  زیرآرایه تقسیم می‌شود و همانند جدول سودوکو ماژول‌ها باید به‌صورتی مرتب شوند که در هر زیرآرایه، از هر ردیف تنها یک ماژول وجود داشته باشد. این موضوع برای سطرها و ستون‌های جدول نیز باید برقرار باشد. این روش در [۱۶] برای یک آرایه  $9 \times 9$  اجرا شده است. در روش جابجایی گام به گام که برای آرایه‌های با تعداد سطر و ستون غیرمساوی قابل اجرا است برای ستون  $j$ ام، از انتها به ابتدای ستون  $j-1$  ماژول جابجا می‌شوند که این روش در [۱۷] برای یک آرایه  $7 \times 5$  اجرا شده است. مبنای کار روش ارائه شده در این مقاله بدین‌صورت است که برای ستون‌های زوج، جابجایی ماژول از ردیف ابتدایی به ردیف انتهایی و برای ستون‌های فرد، جابجایی ماژول از ردیف انتهایی به ردیف ابتدایی صورت می‌گیرد که با این کار مشکل پراکنندگی سایه قطری نیز حل خواهد شد.

همان‌طور که الگوریتم روش پیشنهادی به‌صورت فلوچارت در «شکل ۵» نشان داده شده، اگر  $j$  عددی زوج برای ستون  $j$ ام باشد،  $j-1$  ماژول از ابتدای ستون به انتهای ستون و برای ستون  $(j+1)$ ام،  $j-1$  ماژول از انتها به ابتدای ستون جابجا خواهند شد. زمانی که تعداد ستون بیشتر از تعداد سطر باشد برای  $j > m$ ،  $j = \text{mod}(j, m)$  و سپس مراحل قبلی تکرار خواهند شد. البته بدیهی است که هرچه تعداد سطرهای آرایه بیشتر باشد بهتر می‌توان سایه را در ردیف‌های مختلف پراکنده نمود. برای درک بهتر الگوریتم ارائه شده، یک آرایه  $6 \times 6$  قبل و بعد از پیکربندی مجدد در «شکل ۶» نشان داده شده که ماژول‌های آن با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در سطح آرایه جابجا شده‌اند.



شکل ۵: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی



ج

۱۱	۲۲	۶۳	۳۴	۵۵	۴۶
۲۱	۳۲	۱۳	۴۴	۶۵	۵۶
۳۱	۴۲	۲۳	۵۴	۱۵	۶۶
۴۱	۵۲	۳۳	۶۴	۲۵	۱۶
۵۱	۶۲	۴۳	۱۴	۳۵	۲۶
۶۱	۱۲	۵۳	۲۴	۴۵	۳۶

ب

۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶
۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶
۴۱	۴۲	۴۳	۴۴	۴۵	۴۶
۵۱	۵۲	۵۳	۵۴	۵۵	۵۶
۶۱	۶۲	۶۳	۶۴	۶۵	۶۶

الف

شکل ۶: الف) آرایش ماژول‌ها در آرایه  $6 \times 6$  قبل از پیکربندی مجدد. ب) آرایش ماژول‌ها بعد از پیکربندی مجدد. ج) نحوه جابجایی ماژول‌ها در سطح آرایه بدون تغییر در اتصالات الکتریکی براساس الگوریتم پیشنهادی.

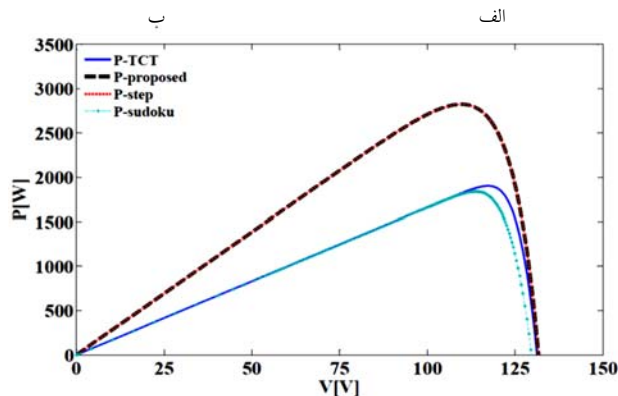
دیده می‌شود، روش پیشنهادی در این مقاله برای الگوهای متنوع سایه به-  
خوبی عمل نموده است.

## ۵. شبیه‌سازی

برای نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی از یک آرایه ۶×۶ استفاده شده است. در شرایط ناهمجوری آرایش TCT تقریباً نسبت به سایر آرایش‌ها عملکرد بهتری داشته و بنابراین برای شبیه‌سازی از این آرایش استفاده شده است. این سیستم در MATLAB شبیه‌سازی شده و در ادامه، نتایج آن برای چند الگوی مختلف سایه مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج مربوط به TCT ساده، الگوی گام به گام و پیکربندی سودوکو مقایسه شده است. در این بخش، آرایه فتوولتائیک برای الگوهای سایه کوتاه و پهن، کوتاه و باریک، طولانی و پهن، طولانی و باریک، مثلثی، قطری و یک نمونه الگوی تصادفی شبیه‌سازی شده است. برای این کار آرایه PV به دو قسمت بدون سایه و سایه‌دار به ترتیب با تابش‌های  $1000 \text{ W/m}^2$  و  $500 \text{ W/m}^2$  تقسیم شده است. در «شکل‌های ۷ تا ۱۳» الگوهای مورد نظر سایه و همچنین نحوه پراکنده شدن سایه در سطح آرایه بر اساس الگوریتم پیشنهادی به نمایش درآمده و منحنی P-V آرایه نیز برای چهار روش TCT ساده، الگوی گام به گام، پیکربندی سودوکو و روش پیشنهادی در این مقاله نشان داده شده است. در پایان کار در «جدول ۱» نتایج روش پیشنهادی با این روش‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌گونه که از شکل‌ها و نتایج مندرج در جدول

۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶
۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶
۴۱	۴۲	۴۳	۴۴	۴۵	۴۶
۵۱	۵۲	۵۳	۵۴	۵۵	۵۶
۶۱	۶۲	۶۳	۶۴	۶۵	۶۶

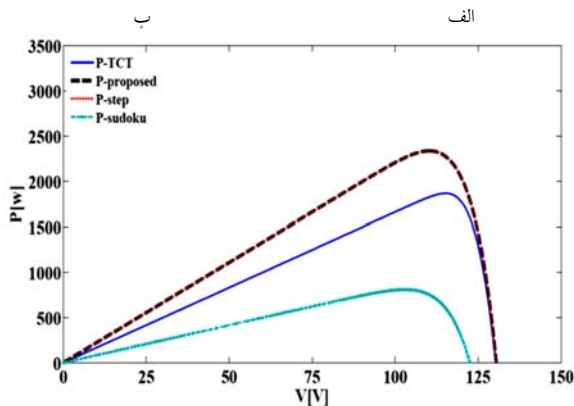
۱۱	۲۲	۶۳	۳۴	۵۵	۴۶
۲۱	۳۲	۱۳	۴۴	۶۵	۵۶
۳۱	۴۲	۲۳	۵۴	۱۵	۶۶
۴۱	۵۲	۳۳	۶۴	۲۵	۱۶
۵۱	۶۲	۴۳	۱۴	۳۵	۲۶
۶۱	۱۲	۵۳	۲۴	۴۵	۳۶



شکل ۷: الگوی سایه نوع کوتاه و پهن. الف) پیکربندی بر اساس الگوریتم پیشنهادی. ب) پراکنده‌گی سایه بر اساس آرایش پیشنهادی. ج) مقایسه منحنی‌های P-V در روش‌های مختلف پیکربندی.

۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶
۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶
۴۱	۴۲	۴۳	۴۴	۴۵	۴۶
۵۱	۵۲	۵۳	۵۴	۵۵	۵۶
۶۱	۶۲	۶۳	۶۴	۶۵	۶۶

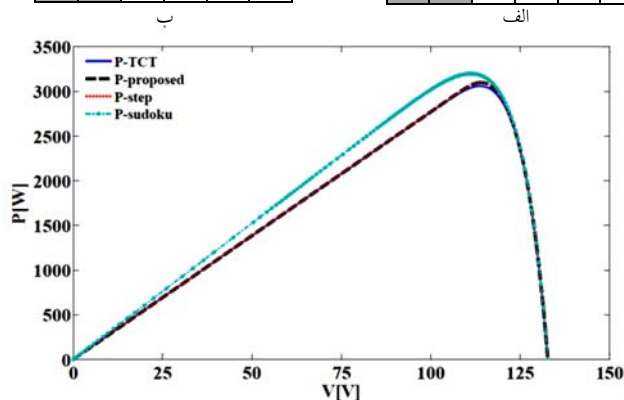
۱۱	۲۲	۶۳	۳۴	۵۵	۴۶
۲۱	۳۲	۱۳	۴۴	۶۵	۵۶
۳۱	۴۲	۲۳	۵۴	۱۵	۶۶
۴۱	۵۲	۳۳	۶۴	۲۵	۱۶
۵۱	۶۲	۴۳	۱۴	۳۵	۲۶
۶۱	۱۲	۵۳	۲۴	۴۵	۳۶



شکل ۸: الگوی سایه نوع طولانی و پهن. الف) پیکربندی بر اساس الگوریتم پیشنهادی. ب) پراکنده‌گی سایه بر اساس آرایش پیشنهادی. ج) مقایسه منحنی‌های P-V در روش‌های مختلف پیکربندی.

۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶
۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶
۴۱	۴۲	۴۳	۴۴	۴۵	۴۶
۵۱	۵۲	۵۳	۵۴	۵۵	۵۶
۶۱	۶۲	۶۳	۶۴	۶۵	۶۶

۱۱	۲۲	۶۳	۳۴	۵۵	۴۶
۲۱	۳۲	۱۳	۴۴	۶۵	۵۶
۳۱	۴۲	۲۳	۵۴	۱۵	۶۶
۴۱	۵۲	۳۳	۶۴	۲۵	۱۶
۵۱	۶۲	۴۳	۱۴	۳۵	۲۶
۶۱	۱۲	۵۳	۲۴	۴۵	۳۶



شکل ۹: الگوی سایه نوع کوتاه و باریک. الف) پیکربندی بر اساس الگوریتم پیشنهادی. ب) پراکنده‌گی سایه بر اساس آرایش پیشنهادی. ج) مقایسه منحنی‌های P-V در روش‌های مختلف پیکربندی.

۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶
۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶
۴۱	۴۲	۴۳	۴۴	۴۵	۴۶
۵۱	۵۲	۵۳	۵۴	۵۵	۵۶
۶۱	۶۲	۶۳	۶۴	۶۵	۶۶

ب

۱۱	۲۲	۶۳	۳۴	۵۵	۴۶
۲۱	۳۲	۱۳	۴۴	۶۵	۵۶
۳۱	۴۲	۲۳	۵۴	۱۵	۶۶
۴۱	۵۲	۳۳	۶۴	۲۵	۱۶
۵۱	۶۲	۴۳	۱۴	۳۵	۲۶
۶۱	۱۲	۵۳	۲۴	۴۵	۳۶

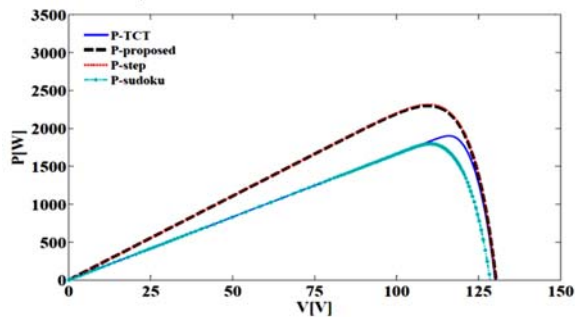
الف

۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶
۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶
۴۱	۴۲	۴۳	۴۴	۴۵	۴۶
۵۱	۵۲	۵۳	۵۴	۵۵	۵۶
۶۱	۶۲	۶۳	۶۴	۶۵	۶۶

ب

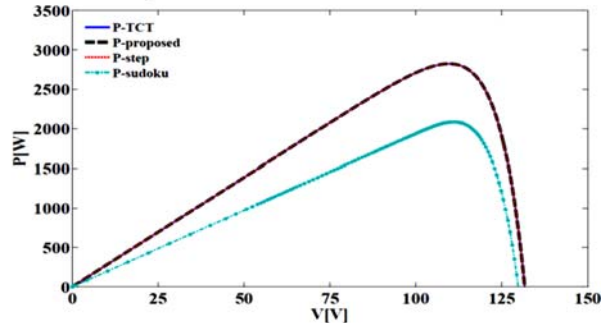
۱۱	۲۲	۶۳	۳۴	۵۵	۴۶
۲۱	۳۲	۱۳	۴۴	۶۵	۵۶
۳۱	۴۲	۲۳	۵۴	۱۵	۶۶
۴۱	۵۲	۳۳	۶۴	۲۵	۱۶
۵۱	۶۲	۴۳	۱۴	۳۵	۲۶
۶۱	۱۲	۵۳	۲۴	۴۵	۳۶

الف



ج

شکل ۱۱: الگوی سایه نوع مثلثی. الف) پیکربندی بر اساس الگوریتم پیشنهادی. ب) پراکندگی سایه بر اساس آرایش پیشنهادی. ج) مقایسه منحنی‌های P-V در روش‌های مختلف پیکربندی.



ج

شکل ۱۰: الگوی سایه نوع طولانی و باریک. الف) پیکربندی بر اساس الگوریتم پیشنهادی. ب) پراکندگی سایه بر اساس آرایش پیشنهادی. ج) مقایسه منحنی‌های P-V در روش‌های مختلف پیکربندی.

۱۱	۲۱	۳۱	۴۱	۵۱	۶۱
۱۲	۲۲	۳۲	۴۲	۵۲	۶۲
۱۳	۲۳	۳۳	۴۳	۵۳	۶۳
۱۴	۲۴	۳۴	۴۴	۵۴	۶۴
۱۵	۲۵	۳۵	۴۵	۵۵	۶۵
۱۶	۲۶	۳۶	۴۶	۵۶	۶۶

ب

۱۱	۲۲	۳۶	۴۳	۵۵	۶۴
۱۲	۲۳	۳۱	۴۴	۵۶	۶۵
۱۳	۲۴	۳۲	۴۵	۵۱	۶۶
۱۴	۲۵	۳۳	۴۶	۵۲	۶۱
۱۵	۲۶	۳۴	۴۱	۵۳	۶۲
۱۶	۲۱	۳۵	۴۲	۵۴	۶۳

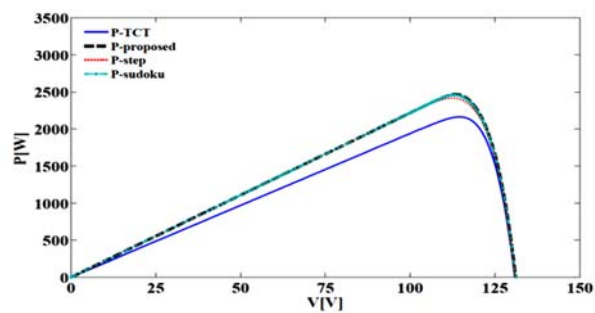
الف

۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶
۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶
۴۱	۴۲	۴۳	۴۴	۴۵	۴۶
۵۱	۵۲	۵۳	۵۴	۵۵	۵۶
۶۱	۶۲	۶۳	۶۴	۶۵	۶۶

ب

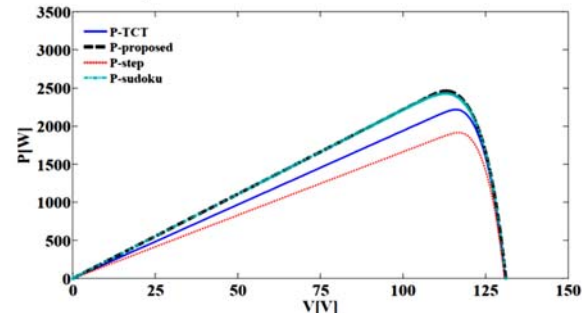
۱۱	۲۲	۶۳	۳۴	۵۵	۴۶
۲۱	۳۲	۱۳	۴۴	۶۵	۵۶
۳۱	۴۲	۲۳	۵۴	۱۵	۶۶
۴۱	۵۲	۳۳	۶۴	۲۵	۱۶
۵۱	۶۲	۴۳	۱۴	۳۵	۲۶
۶۱	۱۲	۵۳	۲۴	۴۵	۳۶

الف



ج

شکل ۱۳: الگوی سایه نوع تصادفی. الف) پیکربندی بر اساس الگوریتم پیشنهادی. ب) پراکندگی سایه بر اساس آرایش پیشنهادی. ج) مقایسه منحنی‌های P-V در روش‌های مختلف پیکربندی.



ج

شکل ۱۲: الگوی سایه نوع قطری. الف) پیکربندی بر اساس الگوریتم پیشنهادی. ب) پراکندگی سایه بر اساس آرایش پیشنهادی. ج) مقایسه منحنی‌های P-V در روش‌های مختلف پیکربندی.

جدول ۱: مقایسه توان ماکزیمم آرایه بر اساس روش‌های مختلف،

برای الگوهای متنوع سایه

	Short Wide	Short Narrow	Long Wide	Long Narrow	Triangle	Diagonal	Random
TCT	۱۹۰۲	۳۰۵۸	۱۸۶۶	۲۸۲۳	۱۹۰۱	۲۲۱۷	۲۱۶۳
Step Wise	۲۸۲۳	۳۰۹۷	۲۳۳۵	۲۸۲۳	۲۳۱۹	۱۹۱۵	۲۴۱۷
Su Do Ku	۱۸۴۲	۳۱۹۸	۸۰۸/۶	۲۰۸۷	۱۷۹۸	۲۴۳۰	۲۴۶۰
Proposed	۲۸۲۳	۳۰۹۷	۲۳۳۵	۲۸۲۳	۲۲۹۸	۲۴۶۰	۲۴۶۸

## نتیجه گیری

با توجه به اینکه سایه جزئی یکی از چالش‌های مهم سیستم‌های فتولتاییک است، بنابراین راهکار برای حل این مشکل از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله روشی بیان شده که برای الگوهای مختلف سایه مناسب است و پس از پیکربندی آرایه بر اساس این الگوریتم پیشنهادی، سایه به‌خوبی در سطح آرایه پراکنده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی برای ۷ الگوی سایه نشان می‌دهد که توان ماکزیمم آرایه براساس روش پیشنهادی نسبت به روش‌های TCT ساده، الگوی گام به گام و پیکربندی سودوکو در حد قابل قبولی بهبود یافته‌است. از مزیت‌های دیگر این روش این است که مشکل ردیفی شدن سایه‌های قطری در روش گام به گام، حل شده است.

## منابع

- [14] E. Roman, R. Alonso, P. Ibanez, S. Elorduizapatarietxe, and D. Goitia, "Intelligent PV module for grid-connected PV systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1066–1073, Aug. 2006.
- [15] S. Busquets-Monge, J. Rocabert, P. Rodriguez, S. Alepuz, and J. Bordonau, "Multilevel diode-clamped converter for photovoltaic generators with independent voltage control of each solar array," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 7, pp. 2713–2723, Jul. 2008.
- [16] B. Rani, G. Ilango and C. Nagamani, "Enhanced Power Generation From PV Array Under Partial Shading Conditions by Shade Dispersion Using Su Do Ku Configuration," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 594–601, 2013.
- [17] Himanshu Sekhar Sahu, Sisir Kumar Nayak. "Power Enhancement of Partially Shaded PV Array by Using a Novel Approach for Shade Dispersion," *IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, 2014.
- [18] P. Srinivasa Rao, G. Saravana Ilango and C. Nagamani, "Maximum Power from PV Arrays Using a Fixed Configuration Under Different Shading Conditions," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 2, pp. 679–686, 2014.
- [19] D. Nguyen and B. Lehman, "An adaptive solar photovoltaic array using model-based reconfiguration algorithm," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 7, pp. 2644–2654, July 2008.
- [20] VillaLFL, HoTien-Phu, CrebierJC, "A power electronics equalizer application for partially shaded photovoltaic modules" .*IEEE Trans Ind Electron* 2012;60:1179–90.
- [21] L. F. L. Villa, D. Picault, B. Raison, S. Bacha, and A. Labonne, "Maximizing the power output of partially shaded photovoltaic plants through optimization of the interconnections among its modules," *IEEE J. Photovol.*, vol. 2, no. 2, pp. 154–163, Apr. 2012.
- [1] Makbul Anwari, "Power quality analysis of grid-connected photovoltaic system with Adjustable Speed Drives", *Control Automation and Systems (ICCAS)*, 2010 International Conference on, vol.1, 2010.
- [2] *Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects, and Engineers*, 2nd ed. London, Sterling,VA: Earth scan., 2008, pp. 152–157, The German Energy Society.
- [3] M. García, J. A. Vera, L. Marroyo, E. Lorenzo, and M. Pérez, "Solar tracking PV plants in Navarra: A 10 MW assessment," *Prog. Photovoltaics: Res. Applicat.*, Apr. 2009, (2009).
- [4] N. D. Kaushika and R. Anilk, "An investigation of mismatch losses in solar photovoltaic cell networks," *Energy*, vol. 32, pp. 755–759, 2007.
- [5] E. Karatepe, M. Boztepe, and M. Colak, "Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells," *Sol. Energy*, vol. 81, no. 8, pp. 977–992, Aug. 2007.
- [6] A. Karavadi, "Power electronics design implications of novel photovoltaic collector geometries and their application for increased energy harvest," M.S. thesis, Dept. Electr. Comput. Eng., Texas A&M Univ., College Station, 2011.
- [7] G. Acciari, D. Graci, and A. La Scala, "Higher PV Module Efficiency by a Novel CBS Bypass", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 26, No. 5, May 2011.
- [8] G. Velasco-Quesada, F. Guinjoan-Gispert, R. Pique-Lopez, M. Roman Lumbreras, and A. Conesa-Roca, "Electrical PV array reconfiguration strategy for energy extraction improvement in grid-connected PV systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4319–4331, Nov. 2009.
- [9] D. Dzung and B. Lehman, "A reconfigurable solar photovoltaic array under shadow conditions," in *Proc. Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, 2008, pp. 980–986.
- [10] G. Lijun, R. A. Dougal, L. Shengyi, and A. P. Iotova, "Parallel-connected solar PV system to address partial and rapidly fluctuating shadow conditions," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 5, pp. 1548–1556, May 2009.
- [11] H. Patel and V. Agarwal, "Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 4, pp. 1689–1698, Apr. 2008.
- [12] K. Kobayashi, I. Takano, and Y. Sawada, "A study of a two stage maximum power point tracking control of a photovoltaic system under partially shaded insolation conditions," *Solar Energy Mater. Solar Cells*, vol. 90, pp. 2975–2988, Nov. 2006.
- [13] T. L. Nguyen and K. S. Low, "A global maximum power point tracking scheme employing DIRECT search algorithm for photovoltaic systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 10, pp. 3456–3467, Oct. 2010.