

## برآورد اقتصادی نصب آرایه‌های خورشیدی در واحد سطح نیروگاه‌های فتوولتائیک با استفاده از پیکربندی مجدد آرایه‌ها

مجید حروفیانی<sup>۱</sup>، رضا قندهاری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> شرکت برق منطقه ای خراسان، مشهد، ایران

m.horoufiany@krec.ir

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

r\_ghandehari@srttu.edu

**چکیده:** تعیین فاصله بهینه بین آرایه‌های خورشیدی یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی نیروگاه‌های خورشیدی است. زیاد بودن این فاصله سبب افزایش قیمت زمین و کاهش تولید نیروگاه در واحد سطح گردیده و کم بودن آن نیز منجر به بروز سایه‌های متقابل بین آرایه‌ها و کاهش توان تولیدی آن‌ها می‌شود. این در حالی است که تمایل به تولید بیشتر در سطح مشخصی از زمین در مناطق محدود شهری نیاز به بازنگری در فواصل بین آرایه‌ها را ایجاد کرده است. در این مقاله با هدف افزایش ظرفیت نصب آرایه‌های خورشیدی در واحد سطح زمین نیروگاه، روش جدیدی برای پیکربندی مجدد آن‌ها ارائه شده و بر این اساس فواصل بهینه بین ردیف‌ها تعیین شده است. روش پیکربندی ارائه شده بر مبنای حداقل‌سازی تفاوت تابش، بین ماژول‌های قرار گرفته در ردیف‌های مختلف آرایه به‌ازای تمام سایه‌های متقابل محتمل است. برای این منظور ماهیت و ساختار سایه‌های متقابل بیان گردیده و روش جدیدی برای پیکربندی مجدد آن‌ها به‌منظور کاهش اثرات این سایه‌ها ارائه شده است. در ادامه به‌منظور افزایش بهره‌وری در نیروگاه تابع هدف کاهش هزینه تولید برق به‌عنوان معیار تعیین فاصله بهینه بین آرایه‌ها در نظر گرفته شده است.

**واژه‌های کلیدی:** آرایه‌های خورشیدی، سایه‌های متقابل، پیکربندی مجدد، هزینه تولید برق.

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، افزایش آلودگی هوا و گسترش گازهای گلخانه‌ای سبب تمایل بیشتر به بهره‌گیری از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر شده است [۱]. یکی از مهم‌ترین این منابع، انرژی خورشیدی است که در اکثر مناطق در دسترس بوده و فاقد آلاینده‌گی می‌باشد. استفاده از صفحات فتولتائیک رایج‌ترین شیوه دریافت و تبدیل این انرژی بوده و دو خصوصیت بی‌صدا و غیر آلاینده بودن، آن را به منبعی جذاب جهت به‌کارگیری در مناطق مسکونی و تجاری تبدیل کرده است. تمایل مشترکین کوچک به استفاده از این صفحات جهت تأمین انرژی مصرفی روزانه یا فروش انرژی آن به شبکه، سبب گسترش به‌کارگیری این منابع در زمین‌های کوچک و محدود شهری و روستایی مانند پشت بام ساختمان‌ها شده است. استفاده از این مکان‌ها به‌منظور نصب صفحات فتولتائیک در اثر عوامل دیگری همانند سایه‌های ایجادشده در آن، ساختار و موقعیت زمین و کاربردهای دیگر در آن مانند نصب تجهیزات محدودتر می‌شود. از سوی دیگر با افزایش تراکم جمعیت در یک منطقه، سطح زمین در دسترس کاهش یافته و محدودیت‌های نصب صفحات افزایش می‌یابد [۲]. این در حالی است که افزایش تراکم جمعیت در یک منطقه، جذابیت افزایش تولید توان در داخل یا نزدیک آن را به‌دلیل کاهش مشکلات و تلفات انتقال توان افزایش می‌دهد.

توان فتولتائیک دریافتی از واحد سطح زمین یک نیروگاه فتولتائیک تابعی از تعداد صفحات نصب‌شده در آن است. هرچه تعداد صفحات نصب‌شده در این سطح افزایش یابد، توان دریافتی از آن نیز افزایش می‌یابد. این مسئله با کاهش فواصل مابین صفحات امکان‌پذیر می‌شود. با وجود این، کاهش بیش از حد فاصله صفحات سبب بروز سایه‌های متقابل بین آن‌ها شده و نهایتاً توان تولیدی توسط صفحات را کاهش می‌دهد. سایه متقابل بین آرایه‌های خورشیدی به سایه‌ای اطلاق می‌شود که در اثر ممانعت از تابش مستقیم نور خورشید بر برخی از قسمت‌های یک آرایه توسط آرایه‌های ردیف جلویی ایجاد شده است. این سایه‌ها همانند دیگر سایه‌های جزئی سبب بروز پدیده ناهم‌جوری و به‌دنبال آن ایجاد تلفات و داغ شدن سلول‌ها می‌شود [۳-۴]. در صورت شدید بودن این ناهم‌جوری گرمای ایجادشده ممکن است سبب ایجاد نقاط داغ و نهایتاً سوختن سلول‌ها شود [۵]. بر این اساس یکی از عوامل اصلی تعیین‌کننده تعداد صفحات نصب‌شده در واحد سطح در زمین‌های با ابعاد محدود، جلوگیری از بروز سایه‌های متقابل است [۶].

تعیین فاصله بین ردیف‌های آرایه‌ها (D) بعد از تعیین ظرفیت نیروگاه و شیب نصب آرایه‌ها، مهم‌ترین مسئله در طراحی نیروگاه‌های فتولتائیک است [۷]. این فاصله از عوامل تأثیرگذار در بروز سایه‌های

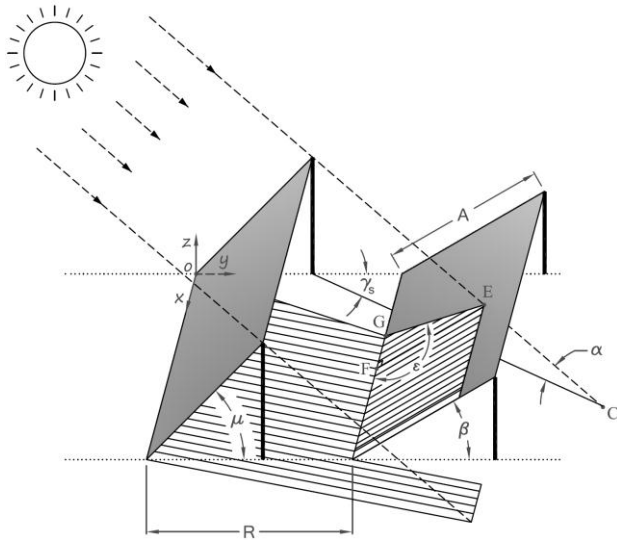
## برآورد اقتصادی نصب آرایه‌های خورشیدی در واحد سطح نیروگاه‌های... ۳

متقابل بین آرایه‌های خورشیدی به شمار می‌رود. تاکنون مقالات متعددی برای تعیین فواصل بهینه ردیف‌های آرایه‌ها در یک سیستم فتولتائیک ارائه شده است. این مقالات در دو گروه قابل دسته‌بندی‌اند. در گروه اول فاصله بهینه به‌صورتی که هیچ‌گونه سایه‌اندازی در طول سال بر روی آرایه‌ها وجود نداشته باشد، تعیین شده است [۷-۸]. در مرجع [۷] با استفاده از مدل‌سازی توسط نرم‌افزار PVSYST فواصل بین آرایه‌ها جهت افزایش سود نیروگاهی در منطقه‌ای در کشور اسپانیا برای دو ساختار نصب آرایه‌ها به‌صورت ثابت (جهت نصب شمال-جنوب) و متحرک (جهت حرکت شرق-غرب) تعیین شده است. در این منطقه، آرایه‌های نصب ثابت با شرط عدم سایه‌اندازی در ساعات‌های ۹ تا ۱۵ در فصل زمستان با فاصله  $3/5$  متر و آرایه‌های نصب متحرک با شرط ۵ درصد سایه‌اندازی با فاصله  $4/5$  متر، حداکثر سود را برای نیروگاه فراهم کرده‌اند. در مرجع [۸]، با ارائه روابط دقیق ریاضی برای سایه‌های ایجادشده در پشت یک آرایه، فاصله بهینه بین آرایه‌ها به‌صورتی که هیچ‌گونه سایه‌اندازی در طول سال بر روی آرایه‌های پشتی وجود نداشته باشد تعیین شده است. در این مقاله، سایه‌های ایجادشده برای ساعات مفید تابش (۴ تا ۸ ساعت) در طول روز محاسبه شده است. در گروه دوم سایه‌های متقابل تا حدودی مورد پذیرش قرار گرفته و هدف عموماً افزایش توان دریافتی از سطح مشخصی از زمین است [۹-۱۰]. در مرجع [۹] فاصله بین آرایه‌ها برای سه حالت افزایش توان خروجی نیروگاه در طول سال، حداقل‌سازی زمین موردنیاز برای نیروگاه و افزایش توان دریافتی بر واحد سطح تعیین شده است. در این مقاله بدون انجام آنالیز اقتصادی نشان داده شده است که با پذیرش سایه‌های متقابل می‌توان دریافتی از نیروگاه را در ۱۵ درصد زمین کمتر ۲۰ درصد افزایش داد. در مرجع [۱۰]، ساعات متفاوت تابش مفید بر روی آرایه‌ها را بین ۶۵ تا ۸۵ درصد طول روز در نظر گرفته و برای این بازه‌ها فاصله بهینه‌ای را که میزان سایه‌اندازی در طول سال برای آن در حد کم و قابل قبولی باشد، انتخاب می‌کند.

تاکنون برای کاهش اثرات ناشی از سایه‌های جزئی مانند سایه‌های متقابل روش‌های متعددی ارائه شده است. استفاده از دیود بای پس<sup>۱</sup> [۱۱]، استفاده از توپولوژی مبدل‌ها<sup>۲</sup> [۱۲]، استفاده از مدارات تزریق جریان و ولتاژ [۱۳-۱۴] و روش‌های پیکربندی مجدد دینامیکی و ثابت [۱۵-۱۹] برخی از این روش‌ها هستند. در بین این روش‌ها استفاده از پیکربندی مجدد ثابت آرایه‌های خورشیدی، یکی از روش‌های ارزان‌قیمت و تأثیرگذار بر کاهش تلفات ناشی از سایه‌های جزئی به شمار می‌رود. در این روش با جابه‌جایی و سپس ثابت کردن مکان قرارگیری

1. Bypass Diode  
2. Converters Topologies

پیکربندی بهینه برای کاهش آثار این سایه‌ها به شمار می‌رود. شکل (۱) یک نمونه سایه ایجادشده در اثر سایه‌اندازی متقابل بین آرایه‌ها را نشان می‌دهد. اصولاً زوایای صفحات آرایه‌ها نسبت به زمین برابر است، اما در اینجا برای بررسی دقیق‌تر الگوی سایه، این زاویه برای دو آرایه پشت سر هم متفاوت لحاظ شده است.



شکل (۱): ساختار سایه ایجادشده در اثر سایه‌اندازی متقابل بین آرایه‌ها

بر اساس روابط ارائه‌شده در مرجع [۲۲]، زاویه ایجادشده بین ضلع کناری سایه (خط GE) و ضلع پایینی صفحه فتولتائیک از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon = \tan^{-1}\left(\frac{FE}{FG}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{Z_E}{\sin \beta (X_E - R \frac{P_X}{P_Y})}\right) \quad (1)$$

در این رابطه،  $Z_E$  و  $X_E$  مختصات نقطه E را در صفحه مختصات سه‌بعدی با مرکزیت O به ترتیب بر روی محور Z و X نشان می‌دهند. شایان ذکر است که صفحه فتولتائیک جلویی بر روی محور X و با شیب  $\mu$  قرار گرفته است. نقطه شروع این صفحه از مبدأ مختصات (نقطه O) در نظر گرفته می‌شود. شیب صفحه پشتی برابر  $\beta$  بوده که در راستای محور X و با فاصله R از آن قرار گرفته است. اندازه نقطه C بر روی محور X و Y از نقطه O به ترتیب با  $P_X$  و  $P_Y$  در نظر گرفته شده‌اند و در روابط (۲) و (۳) طریقه محاسبه آن‌ها نشان داده شده است.

$$P_x = \frac{A \sin \mu \sin \gamma_s}{\tan \alpha} \quad (2)$$

$$P_y = \frac{A \sin \mu \cos \gamma_s}{\tan \alpha} + A \cos \mu \quad (3)$$

در این روابط، A ارتفاع آرایه بوده و  $\alpha$  و  $\gamma_s$  به ترتیب زاویه طولی

ماژول‌های یک آرایه بدون تغییر در اتصالات الکتریکی آن‌ها، جریان تولیدی توسط ردیف‌های مختلف یک آرایه با پیکربندی TCT<sup>۱</sup> متعادل شده و تلفات ناشی از نامتعادلی تابش حداقل می‌شود. سادگی ساختار و عدم نیاز به سرویس و نگهداری از مزایای این روش به شمار می‌روند. استفاده از این روش برای سایه‌هایی با ساختار و الگوی از قبل مشخص شده می‌تواند اثرگذاری آن را افزایش دهد [۱۶]. با توجه به ماهیت و الگوی از قبل مشخص سایه‌های ناشی از سایه‌اندازی آرایه‌ها، استفاده از پیکربندی مجدد ثابت‌شده می‌تواند در کاهش اثرات این سایه‌ها بسیار مؤثر واقع شود [۲۰-۲۱]. در مرجع [۲۰] با تعیین تعداد حداکثر و حداقل ماژول‌های سایه‌شده<sup>۲</sup> در حالت بهینه به‌ازای سایه‌های محتمل متقابل ایجادشده روی آرایه، اقدام به تعیین پیکربندی مجدد جهت کاهش اثرات این سایه‌ها کرده است. در مرجع [۲۱] نقاط ضعف پیکربندی مجدد سودکو<sup>۳</sup> در برابر سایه‌های متقابل ارائه شده، سپس این پیکربندی جهت کاهش اثرات این سایه‌ها بهینه‌سازی گردیده است.

در این مقاله، راهکاری برای افزایش بهره‌وری نیروگاه‌های فتولتائیک به وسیله افزایش تعداد صفحات فتولتائیک نصب‌شده در واحد سطح ارائه شده است. برای این منظور، آرایه‌های خورشیدی برای حداقل سازی تلفات ناشی از سایه‌اندازی‌های متقابل پیکربندی مجدد گردیده و از سوی دیگر فواصل بهینه بین آرایه‌ها با حداقل سازی هزینه تولید برق، متناسب با آرایه‌های جدید تعیین شده است. پیکربندی ارائه‌شده بر مبنای حداقل سازی تفاوت تابش بین قسمت‌های سایه‌شده و غیرسایه در هنگام بروز سایه‌های متقابل محتمل بر روی آرایه تعیین شده است. این پیکربندی قادر است تا تأثیرات سایه‌های متقابل را به حداقل برساند. معیار تعیین فواصل بهینه بین آرایه‌ها در این مقاله، کمینه نمودن هزینه تولید برق در نیروگاه در نظر گرفته شده است. به‌طور کلی، ساختار مقاله را می‌توان بدین صورت بیان نمود: در ابتدا الگوی سایه‌های متقابل در نیروگاه‌های فتولتائیک بیان گردیده و سپس پیکربندی بهینه برای کاهش اثرات این سایه‌ها ارائه شده است. در ادامه با هدف تعیین فاصله بهینه آرایه‌های نصب‌شده در واحد سطح در نیروگاه تابع هدف حداقل سازی هزینه تولید در نیروگاه ارائه شده است. در انتها با انجام شبیه‌سازی‌ها صحت مطالب ارائه‌شده نشان داده شده است.

## ۲. تشریح سیستم

### ۱.۲. الگوی سایه‌های متقابل

تعیین ساختار و الگوی سایه‌های متقابل یکی از نکات مهم در تعیین

1. Total Cross Tied
2. Shaded Modules
3. Sudoku Reconfiguration

## ۵ برآورد اقتصادی نصب آرایه‌های خورشیدی در واحد سطح نیروگاه‌های ...

سایه‌ها دارای فرم مستطیلی بوده و متناسب با روز سال، موقعیت جغرافیایی، فاصله و شیب آرایه‌ها، ابعاد سایه‌های ایجادشده متفاوت خواهند بود. تابع هدف ارائه‌شده برای تعیین پیکربندی بهینه یک آرایه با ابعاد  $m \times n$  در رابطه (۹) ارائه شده است.

$$\min f_{loss} = \sum_{k \in \{sh\}} \sum_{i=1}^m \left( \frac{\sum_{z=1}^m \sum_{j=1}^n G_{zj}^k}{m} - \sum_{j=1}^n G_{ij}^k \right)^2 \quad (9)$$

$$sh = \{sh_1, sh_2, sh_3, \dots, sh_L\}$$

در روابط فوق،  $sh_i$  بیانگر  $i$  امین مدل سایه ایجادشده بر روی آرایه است.  $G_{ij}^k$  نیز عددی دوتایی<sup>۱</sup> بوده و بیانگر دریافت یا عدم دریافت شدت تابش مستقیم توسط ماژول<sup>۲</sup> واقع در  $i$  امین ستون  $i$  امین ردیف در صورت بروز  $k$  امین مدل سایه است. در رابطه (۹) عبارت اول برای نمایش تعداد مجاز ماژول سایه‌شده در هر ردیف و عبارت دوم بیانگر تعداد ماژول سایه‌شده موجود در هر ردیف است. بر این اساس در صورتی که ماژولی در اثر سایه‌اندازی متقابل، تابش مستقیم را دریافت نکند  $G$  آن معادل یک بوده و در غیر این صورت صفر در نظر گرفته می‌شود، به عبارت دیگر:

$$G_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{if } Ib_{ij}^k = 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

در این رابطه،  $Ib_{ij}^k$  بیانگر شدت تابش مستقیم بر روی ماژول واقع در ستون  $j$  امین ردیف در صورت بروز مدل سایه  $k$  ام است.  $L$  یا تعداد مدل‌های ممکن سایه متقابل ایجادشده روی آرایه مذکور برابر است با:

$$L = (m \times n) + (m \times n - 1) \quad (11)$$

در رابطه فوق قسمت اول مربوط به تعداد سایه‌های ممکن قبل و هنگام ظهر محلی است و قسمت دوم مربوط به تعداد سایه‌های ممکن بعد از ظهر محلی است. در قبل و بعد از ظهر محلی، سایه در دو سوی متفاوت آرایه خواهد بود. با توجه به رابطه (۱۱)، به دلیل وجه مشترک سایه‌ها در هنگام ظهر محلی، این مدل سایه‌ها با سایه‌های قبل از ظهر در نظر گرفته شده‌اند. در هنگام ظهر در صورت وجود سایه متقابل، این سایه‌ها کل عرض آرایه را تحت تأثیر قرار خواهند داد.

### ۳.۲ معیار تعیین فواصل بهینه آرایه‌ها

معیار تعیین بهینه بودن فاصله صفحات فتوولتائیک به منظور افزایش ظرفیت

و عرضی خورشید در آسمان را نشان می‌دهند. با استفاده از روابط مثلثاتی  $X_E$  از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$X_E = \frac{P_x}{P_y - A \cos \mu} \left( \frac{Z_E}{\tan \beta} + R - A \cos \mu \right) \quad (4)$$

که در این رابطه:

$$Z_E = A \sin \mu \frac{P_y - R}{P_y - A \cos \mu + A \sin \mu / \tan \beta} \quad (5)$$

با فرض برابر بودن شیب صفحات ( $\beta = \mu$ ) و جایگذاری رابطه (۵)

در رابطه (۴) می‌توان نشان داد:

$$X_E = R \frac{P_x}{P_y} \quad (6)$$

با استفاده از روابط (۱) و (۶) در صورتی که شیب صفحات نصب‌شده برابر باشند، زاویه  $\alpha$  برابر  $90^\circ$  درجه بوده و خط  $GE$  عمود بر لبه پایینی آرایه خواهد بود. این مسئله با توجه به برابر بودن شیب صفحات نصب‌شده در نیروگاه‌های فتوولتائیک با نصب ثابت سبب ایجاد سایه‌هایی با ابعاد مستطیلی شکل می‌گردد که در قسمت پایینی آرایه تشکیل شده و با توجه به تغییر ساعت روز ابعاد این سایه‌ها تغییر می‌کند. ارتفاع ( $H_s$ ) و پهنای ( $W_s$ ) سایه‌های ایجادشده در این حالت با استفاده از روابط زیر تعیین می‌شوند.

$$H_s = A \left( 1 - \frac{D + A \cos \beta}{A \cos \beta + A \sin \beta \cos \gamma_s / \tan \alpha} \right) \quad (7)$$

$$W_s = \frac{(D + A \cos \beta)(\sin \beta |\sin \gamma_s|)}{\tan \alpha \cos \beta + \sin \beta \cos \gamma_s} \quad (8)$$

همان‌طور که در این روابط مشخص شده، سایه ایجادشده تابعی از ارتفاع خورشید در آسمان، زاویه عرضی خورشید، شیب و راستای نصب صفحات و فاصله این صفحات از یکدیگر است [۲۲-۲۴]. با توجه به متعدد بودن این عوامل لازم است تا طرحی به منظور پیکربندی تعیین گردد که تلفات ناشی از هرکدام از این سایه‌ها را به حداقل برساند.

### ۲.۲ پیکربندی مجدد بهینه برای کاهش اثرات سایه‌های

#### متقابل

هدف اصلی از پیکربندی مجدد آرایه‌های خورشیدی، متعادل کردن جریان تولیدی توسط ماژول‌های سری‌شده به منظور کاهش اثرات ناهم‌جوری است. پیکربندی مجدد ثابت‌شده عموماً بر روی آرایه‌هایی با آرایش TCT پیاده‌سازی شده و در آن مکان قرارگیری ماژول‌ها در آرایه به گونه‌ای که سایه‌های جزئی در ردیف‌های مختلف آرایه پراکنده گردند، تغییر می‌یابد. با توجه به خصوصیات سایه‌های مطرح‌شده این

تفاوت این دو نیروگاه فقط در پیکربندی آرایه‌های آنهاست. در نیروگاه اول از آرایه‌هایی با آرایش TCT ساده و در نیروگاه دوم از آرایه‌هایی با پیکربندی ارائه شده در این مقاله استفاده شده است. موقعیت جغرافیایی شهر تهران برای انجام بررسی‌ها در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج به دست آمده در مرجع [۲۸] زاویه نصب نسبت به جنوب جهت دریافت حداکثر انرژی دریافتی صفر درجه در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر شیب صفحات نیز، برای دریافت بیشینه انرژی در طول سال، تقریباً برابر با عرض جغرافیایی منطقه مورد آزمایش و حدود ۳۰ درجه تنظیم شده است [۲۷]. نرخ کاهش تولید سالیانه آرایه‌ها ( $de$ ) سالانه ۱ درصد، نرخ تورم ( $r$ ) سالیانه ۳ درصد و هزینه‌های بهره‌برداری و سرویس و نگهداری تجهیزات نیز سالانه ۲ درصد هزینه اولیه نصب تجهیزات در نیروگاه، لحاظ شده است. در انجام محاسبات، حداقل فاصله بین دو آرایه در هر دو نیروگاه نیز ۰/۱ متر تعیین شده است.

جدول (۱): مشخصات ماژول‌های به کاررفته در آرایه‌های نیروگاه‌های مورد بررسی در شرایط استاندارد	
پارامتر	اندازه
توان	[W] ۳/۶
ولتاژ عملکرد	[V] ۶
جریان عملکرد	[mA] ۶۰۰
ولتاژ مدار باز	[V] ۷/۲
جریان اتصال کوتاه	[mA] ۶۵۵
ابعاد (پهنای × عرض × طول)	[mm] ۱۷۵ × ۱۷۵ × ۲,۸

### ۱.۳. تعیین پیکربندی بهینه

برای محاسبه پیکربندی بهینه از الگوریتم ژنتیک به منظور کمینه‌سازی رابطه (۹) بهره گرفته شده است. با توجه به رابطه (۱۱) تعداد مدل سایه‌های متقابل محتمل برای آرایه‌های مذکور ۱۵۳ عدد است. از این تعداد ۸۱ عدد مربوط به سایه‌های قبل و هنگام ظهر و ۷۲ عدد مربوط به سایه‌های بعدازظهر است. در بهینه‌سازی فوق، متغیر مسئله مکان قرارگیری ماژول‌ها در آرایه است. هر پیکربندی که تابع هدف (۹) را کمینه نماید، می‌تواند برای انجام پیکربندی نهایی استفاده گردد. شکل (۲) یک پیکربندی بهینه که تابع هدف ارائه شده در رابطه (۹) را صفر می‌کند، نشان می‌دهد.

پیکربندی بهینه به دست آمده با پراکنده کردن سایه‌های متقابل در ردیف‌های مختلف آرایه، اثر ناهم‌جوری و تلفات ناشی از سایه جزئی را کاهش می‌دهد. سه نمونه از سایه‌های مربوط به سایه‌اندازی قبل، هنگام ظهر و بعدازظهر در شکل (۳) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌گردد، سایه‌های قبل از ظهر از سمت چپ آرایه‌ها و سایه‌های بعدازظهر به سمت راست آرایه‌ها منتهی می‌شود. در هنگام ظهر نیز سایه تمام پهنای آرایه را در بر می‌گیرد.

نصب شده در واحد سطح در این مقاله، حداقل سازی هزینه برق تولید شده ( $LCOE^1$ ) در نظر گرفته شده است. هزینه برق تولید شده در واقع قیمت تمام شده فروش انرژی توسط این صفحات را نشان می‌دهد. رابطه (۱۲) یکی از روابط محاسبه هزینه برق تولید شده را نمایش می‌دهد [۲۵].

$$LCOE = \frac{IC + GC + \sum_{t=1}^T \frac{(FSOMC_t)'}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T E_t \frac{(1-de)^t}{(1-r)^t}} \quad (12)$$

در این رابطه،  $IC$  هزینه خرید صفحات خورشیدی، تجهیزات نصب آنها، اینورترهای مورد نیاز، کابل‌ها و تجهیزات جانبی برحسب دلار بوده و به صورت تابعی از ظرفیت صفحات فتوولتائیک نصب شده محاسبه می‌گردد.  $GC$  نیز هزینه زمین مورد نیاز برای نصب تجهیزات برحسب دلار است.  $FSOMC_t$  هزینه کلی سرویس و نگهداری تجهیزات در سال  $t$  ام از زمان بهره‌برداری آرایه‌هاست ( $\$/kW per year$ ). نرخ تورم و نرخ کاهش توان تولیدی توسط آرایه‌ها نیز به ترتیب با  $r$  و  $de$  نشان داده شده‌اند.  $E_t$  توان تولیدی نیروگاه در سال  $t$  ام بوده و مدت زمان عمر مفید نیروگاه با  $T$  نشان داده شده است. فاصله‌ای که هزینه تولید برق را در واحد سطح کمینه کند، به عنوان فاصله بهینه در نظر گرفته خواهد شد. قیود مربوط به تعیین فاصله ردیف‌ها ( $D$ ) در ادامه بیان شده‌اند.

$$D_{min} \leq D \quad (13)$$

$$D \leq \frac{Lg}{R} - A \cos \beta \quad (14)$$

در روابط فوق،  $D_{min}$  حداقل فاصله لازم بین آرایه‌ها (به منظور سرویس و نگهداری) بوده و  $Lg$  و  $R$  به ترتیب طول زمین محل نصب و تعداد ردیف‌های نصب آرایه‌ها را مشخص می‌کند.

### ۳. شبیه‌سازی و بررسی نتایج

برای ارزیابی استفاده از روش پیکربندی ارائه شده به منظور افزایش ظرفیت تولید در یک سطح مشخص از زمین و نیز تعیین فواصل بهینه آرایه‌ها از یکدیگر، مدل سازی دو نیروگاه فتوولتائیک در نرم‌افزار متلب<sup>۲</sup> انجام شده است. فرض بر این است که در دو نیروگاه فوق، از آرایه‌هایی با نصب ثابت استفاده شده است. هریک از این آرایه‌ها از تعداد ۸۱ ماژول با آرایش TCT و ساختار ۹×۹ تشکیل شده‌اند. جدول (۱) مشخصات ماژول‌های به کاررفته در این نیروگاه‌ها را در شرایط استاندارد (تابش  $\frac{W}{m^2}$  ۱۰۰۰ و دمای ۲۵ °C) نشان می‌دهد.

1. Levelized Cost of Energy
2. Inverters
3. Matlab



## برآورد اقتصادی نصب آرایه‌های خورشیدی در واحد سطح نیروگاه‌های... ۷

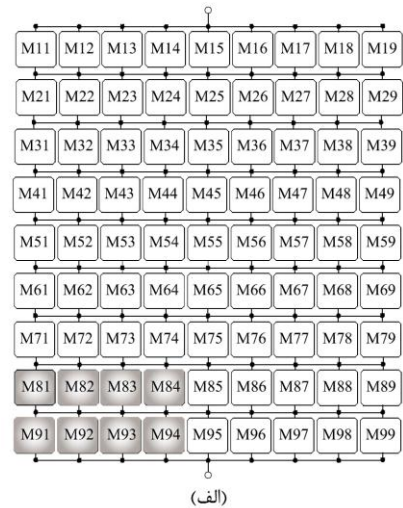
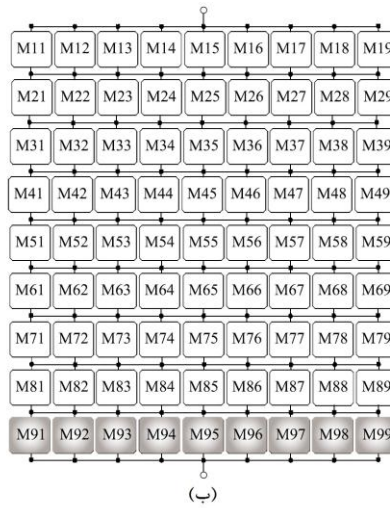
پیکربندی مجدد نشان داده شده است. همان طور که در این شکل نشان داده شده، پیکربندی ارائه شده سایه‌های مذکور را به صورت تقریباً یکنواخت در آرایه، پراکنده کرده است.

به منظور نمایش کاهش اثرات سایه نیز شکل (۵) منحنی ولتاژ-جریان آرایه‌های مذکور را به ازای سایه  $2 \times 4$  قبل از ظهر نمایش می‌دهد. این منحنی به ازای تفاوت تابش ۵۰ درصدی در قسمت سایه شده و قسمت سایه نشده به دست آمده است. همان طور که در این شکل نشان داده شده، پراکنده کردن سایه به طور کامل در ردیف‌های مختلف آرایه، سبب عدم نیاز به استفاده از دیودهای کنارگذر نیز شده است.

M71	M62	M23	M44	M85	M36	M17	M98	M59
M31	M12	M53	M94	M75	M26	M87	M68	M49
M81	M42	M93	M14	M55	M66	M27	M38	M79
M51	M22	M73	M64	M35	M46	M97	M88	M19
M41	M92	M33	M84	M15	M76	M57	M28	M69
M61	M82	M13	M54	M25	M96	M77	M48	M39
M21	M72	M43	M34	M95	M16	M67	M58	M89
M91	M32	M83	M74	M65	M56	M47	M18	M29
M11	M52	M63	M24	M45	M86	M37	M78	M99

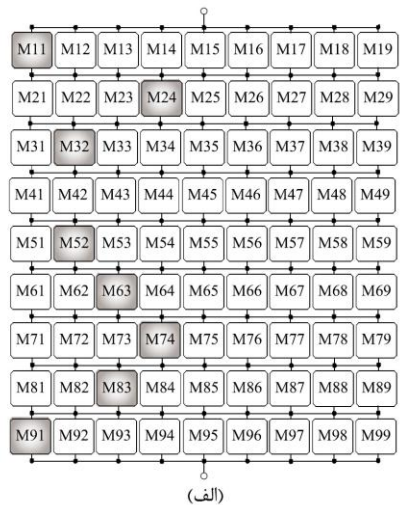
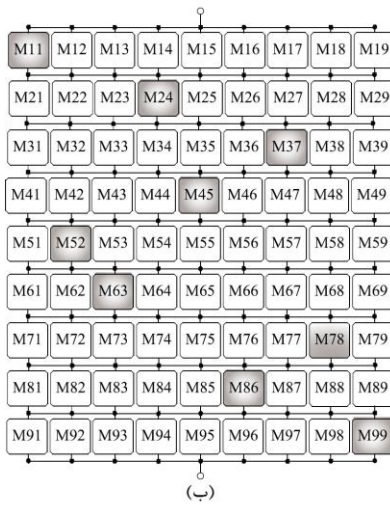
شکل (۲): ساختار پیکربندی بهینه برای کاهش اثرات سایه‌های متقابل

در شکل (۴) پراکنده‌گی سایه‌های ایجاد شده در شکل (۳) بعد از



شکل (۳): سه الگوی سایه ایجاد شده در اثر سایه‌اندازی متقابل آرایه‌های خورشیدی:

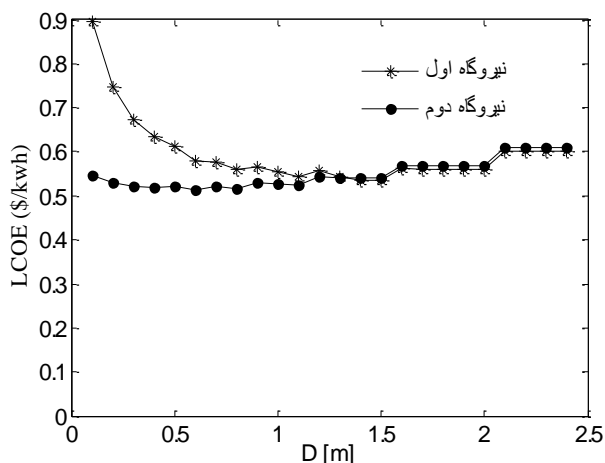
الف. سایه  $2 \times 4$  قبل از ظهر، ب. سایه  $1 \times 9$  هنگام ظهر، پ. سایه  $4 \times 4$  بعد از ظهر



شکل (۴): پراکنده‌گی سایه‌های متقابل در پیکربندی بهینه پیشنهادی

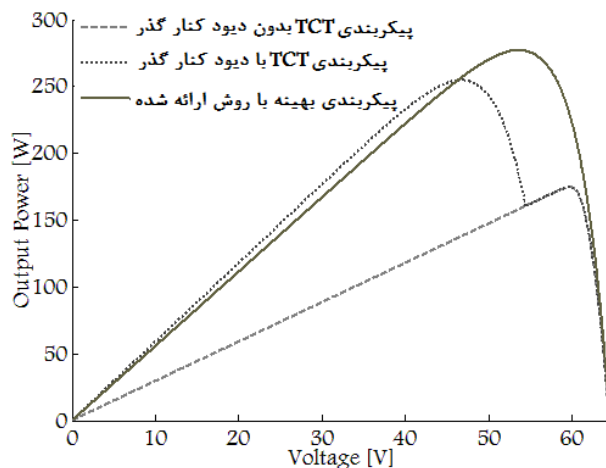
الف. سایه  $2 \times 4$  قبل از ظهر، ب. سایه  $1 \times 9$  هنگام ظهر، پ. سایه  $4 \times 4$  بعد از ظهر

جزئی و افزایش توان خروجی سالیانه هر آرایه تا ۱/۵ برابر شده است. با توجه به برابر بودن توان تولیدی دو نیروگاه، از فاصله ۱/۷ متر به بعد مشخص می‌شود که این فاصله حداقل فاصله بین آرایه‌هاست که به‌ازای آن هیچ سایه‌اندازی بین آرایه‌ها وجود ندارد. بر اساس توان‌های تولیدی محاسبه‌شده، مقدار LCOE به‌ازای عمر مفید ۲۵ سال برای دو نیروگاه در شکل (۷) نشان داده شده است. در این محاسبات، هزینه اولیه تجهیزات برای نیروگاه اول  $1 \text{ \$/W}$  در نظر گرفته شده است [۲۹]. این هزینه برای نیروگاه دوم به دلیل افزایش هزینه ساخت آرایه‌ها به‌واسطه افزایش طول سیم‌های ارتباطی در آرایه  $1/0.2 \text{ \$/W}$  لحاظ شده است. شایان ذکر است که طول زمین نیروگاه ۲۰ متر و هزینه اولیه آن ۱۰۰۰ دلار برآورد شده است. برای بررسی تأثیرگذاری روش پیشنهادی، فرض شده که در هر دو نیروگاه، آرایه‌ها تنها در یک ستون و در پشت سر یکدیگر نصب شده‌اند.



شکل (۷): محاسبه LCOE به‌ازای فواصل مختلف آرایه‌ها در نیروگاه

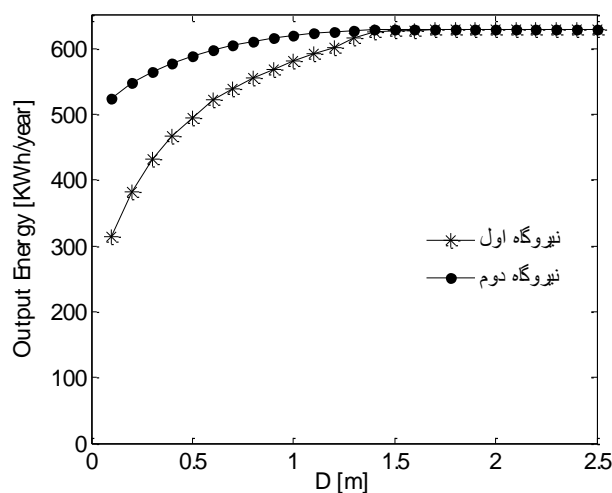
بر اساس شکل (۷) حداقل هزینه تولید در نیروگاه اول  $\text{\$/kWh}$  ۰/۵۳ در فاصله ۱/۵ m بوده و در نیروگاه دوم، این میزان به  $\text{\$/kWh}$  ۰/۵۱ در فاصله ۰/۶ m کاهش یافته است. علاوه بر این کاهش هزینه تولید، انرژی تولیدی سالانه نیروگاه دوم با فاصله ۰/۶ متر بین آرایه‌ها ۲۷ درصد بیشتر از انرژی تولیدی نیروگاه اول با فاصله ۱/۵ متر بین آرایه‌هاست. از فاصله ۱/۷ متر به بعد که سایه‌اندازی بین آرایه‌ها به صفر می‌رسد، به‌علت بالا بودن قیمت اولیه آرایه‌ها در نیروگاه دوم، هزینه تولید برق در این نیروگاه نسبت به نیروگاه دیگر افزایش یافته است. در نیروگاه اول، فواصل کم بین آرایه‌ها سبب قیمت بالایی در برق تولیدی می‌شود. این مسئله به‌علت تلفات بالای سایه‌های متقابل در فواصل کم است. در این نیروگاه با افزایش فاصله تا فاصله‌ای که سایه‌اندازی به مقدار کمی برسد (۱/۵ متر) این هزینه به حداقل مقدار خود رسیده و با افزایش فاصله از این مقدار به‌علت کاهش تراکم



شکل (۵): مشخصه ولتاژ-جریان آرایه قبل و بعد از پیکربندی پیشنهادی در الگوی سایه  $2 \times 4$  قبل از ظهر

### ۲.۳. تعیین فواصل بهینه

توان تولیدی سالیانه یک آرایه در دو نیروگاه به‌ازای مقادیر مختلف D در شکل (۶) نشان داده شده است. برای این منظور، این فاصله از ۰/۱ متر که حداقل فاصله قابل قبول بین آرایه‌ها بوده تا ۲/۵ متر تغییر داده شده و توان تولیدی سالیانه این دو آرایه به‌ازای این فواصل ترسیم شده است. برای محاسبه توان سالیانه، توان تولیدی روزانه هر نیروگاه بر اساس شدت تابش لحظه‌ای در بازه‌های زمانی ۲۰ دقیقه‌ای محاسبه شده است. مدل مورد استفاده برای تعیین شدت تابش پراکندگی، مدل isotropic sky بوده است [۲۸].



شکل (۶): توان خروجی سالیانه یک آرایه در ردیف دوم به بعد در هریک از نیروگاه‌ها به‌ازای تغییر فاصله بین آرایه‌ها

بر اساس شکل (۶) با افزایش فاصله و کاهش سایه‌های متقابل، تفاوت توان تولیدی نیروگاه‌ها به‌مراتب کم شده است. در فواصل کم بین آرایه‌ها استفاده از پیکربندی مجدد، سبب کاهش اثرات سایه‌های

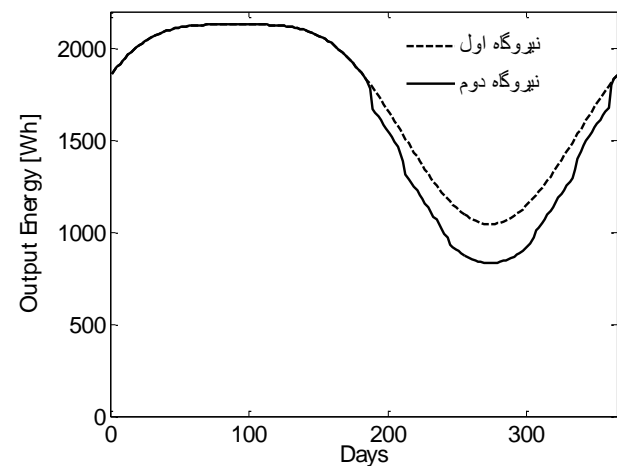
بر اساس شکل (۸) توان تولیدی آرایه‌های نیروگاه دوم فقط در نیمه دوم سال در اثر سایه‌اندازی نسبت به نیروگاه اول کاهش می‌یابد. با وجود این تلفات سایه‌اندازی، ۳۰ درصد ظرفیت نصب‌شده بیشتر در این نیروگاه به‌واسطه فاصله کمتر بین صفحات توان تولیدی بیشتری را نسبت به نیروگاه اول فراهم خواهد کرد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، طرحی جدید به‌منظور پیکربندی مجدد آرایه‌های خورشیدی با هدف افزایش ظرفیت نصب این آرایه‌ها در واحد سطح ارائه شد. طرح پیکربندی ارائه‌شده قادر است تا به‌خوبی اثرات هر سایه متقابلی را در نیروگاه‌هایی که دارای آرایه‌هایی با شیب و جهت مشابه هستند کاهش دهد. بر این اساس، روش فوق قادر به حداقل‌سازی تلفات سایه‌های جزئی در نیروگاه بوده و امکان نزدیک نمودن فواصل آرایه‌ها را به یکدیگر فراهم می‌کند.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله، با کاهش ۶۰ درصدی در فواصل بین آرایه‌های پیکربندی‌شده با روش ارائه‌شده، سالانه ۲۷ درصد به توان تولیدی توسط نیروگاه افزوده شده است. علاوه بر این، هزینه تولید برق در این حالت کمتر از آرایه‌هایی با پیکربندی TCT ساده است. بنا بر نتایج یادشده، استفاده از آرایه‌هایی با پیکربندی پیشنهادی در مکان‌های محدود شهری و مکان‌هایی که قیمت زمین بالایی دارند، می‌تواند به‌عنوان راهکاری مناسب با تأثیرگذاری بالا جهت افزایش ظرفیت تولید و کاهش هزینه تولید برق به شمار رود.

نصب صفحات در واحد سطح و پررنگ شدن قیمت زمین، این هزینه دوباره افزایش می‌یابد. در نیروگاه دوم در فواصل کم بین آرایه‌ها، قیمت مانند نیروگاه اول بالا نبوده و پیکربندی بهینه، میزان تلفات سایه را به مراتب کم نموده است. این کم شدن تلفات سبب حداقل شدن هزینه در فواصل کمتر آرایه‌ها نسبت به نیروگاه اول شده است. از سوی دیگر در فواصل بیشتر از ۰/۶ در این نیروگاه هزینه آرایه‌ها بر تولید غلبه کرده و سبب بالا رفتن هزینه تولید برق شده است. شکل (۸) توان تولیدی روزانه هر آرایه در این دو نیروگاه را در طول یک سال به‌ازای فواصل بهینه تعیین‌شده نمایش می‌دهد.



شکل (۸): توان تولیدی روزانه یک آرایه از دو نیروگاه مورد بررسی در بازه زمانی یکساله به‌ازای فواصل بهینه تعیین شده

#### ۵. مراجع

- [1] Horoufiyani, M., Zanganeh, A., and Ghandehari, R., "A Multi-Objective Reactive Power Pricing Approach of Distributed Generation Units within Distribution Networks", *Tabriz Journal of Electrical Engineering*, Vol. 46, No. 3, pp. 150-159, 2016.
- [2] Wiginton, L., Nguyen, H., and Pearce, J., "Quantifying Rooftop Solar Photovoltaic Potential for Regional Renewable Energy Policy", *Computers, Environment and Urban Systems Journal*, Vol. 34, No. 4, pp. 345-357, 2010.
- [3] Ramaprabha, R., and Mathur, B. L., "A Comprehensive Review and Analysis of Solar Photovoltaic Array Configurations under Partial Shaded Conditions", *International Journal of Photo Energy*, Vol. 2012, pp. 1-16, 2012.
- [4] Sun, Y., Chen, S., Xie, L., Hong, R., and Shen, H., "Investigating the Impact of Shading Effect on the Characteristics of a Large-Scale Grid-Connected PV Power Plant in Northwest China", *International Journal of Photo Energy*, Vol. 2014, pp. 1-9, 2014.
- [5] Sanseverino, E., Ngoc, T., Cardinale, M., Li Vigni, V., Musso, D., Romano, P., and Viola, F., "Dynamic Programming and Munkres Algorithm for Optimal Photovoltaic Arrays Reconfiguration", *Solar Energy*, Vol. 122, pp. 347-358, 2015.
- [6] Kerekes, T., Koutroulis, E., Séra, D., Teodorescu, R. and Katsanevakis, M., "An Optimization Method for Designing Large PV Plants", *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 3, No. 2, pp. 814-822, 2013.
- [7] Sun jianping "An Optimum Layout Scheme for Photovoltaic Cell Arrays using PVSYS", In Proceedings in International Conference on Mechatronic Science,



- electric engineering and computer, China, 2011.
- [8] Castellano, N., Gázquez Parra, J., Valls-Guirado, J., and Manzano-Agugliaro, F., "Optimal Displacement of Photovoltaic Array's Rows using a Novel Shading Model", *Applied Energy*, Vol. 144, pp. 1-9, 2015.
- [9] Weinstock, D., and Appelbaum, J., "Optimal Solar Field Design of Stationary Collectors", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 126, No. 3, p. 898, 2004.
- [10] Biswas, P., Jhahharia, S., Bhattacharya, S., Khanuja, A., Warthi, A., Tiwari, R., Mathur, J., "An Analytical Approach to Calculate the Spacing between Two Parallel Rows of Non-tracked South Oriented Solar PV Modules Setup in India", In *Proceedings in International Conference on Energy, Automation, and Signal (ICEAS)*, India, 2011.
- [11] Nashih, S., Fernandes, C., Torres, J., Gomes, J., and Costa Branco, P., "Validation of a Simulation Model for Analysis of Shading Effects on Photovoltaic Panels", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 138, No. 4, pp. 044503-6, 2016.
- [12] Bidram, A., Davoudi, A., and Balog, R., "Control and Circuit Techniques to Mitigate Partial Shading Effects in Photovoltaic Arrays", *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 2, No. 4, pp. 532-546, 2012.
- [13] Mishima, T., and Ohnishi, T., "A Power Compensation And Control System for a Partially Shaded PV Array", *Journal of Electrical Engineering in Japan*, Vol. 146, pp. 74-82, Sep. 2004.
- [14] Karatepe, E., Hiyama, T., Boztepe, M., and Colak, M., "Power Controller Design for Photovoltaic Generation System under Partially Shaded Insolation Conditions", in *Proc in 14th Intell. Syst. Appl. Power Syst.*, 2007
- [15] InduRani, B., Saravanallango, G., and Nagamani, C., "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, 2013.
- [16] Shams El-Dein, M., Kazerani, M., and Salama, M., "An Optimal Total Cross Tied Interconnection for Reducing Mismatch Losses in Photovoltaic Arrays", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, Vol. 4, No. 1, pp. 99-107, 2013.
- [17] Srinivasa Rao, P., Saravana Ilango, G., and Nagamani, C., "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.
- [18] SekharSahu, H., Kumar Nayak, S., "Power Enhancement of Partially Shaded PV Array by Using a Novel Approach for Shade Dispersion", *IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, 2014
- [19] Nguyen, D., and Lehman, B., "An Adaptive Solar Photovoltaic Array using Model-Based Reconfiguration Algorithm", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 55, No. 7, pp. 2644-2654, July 2008.
- [20] Horoufiany, M., and Ghandehari, R., "Optimal Fixed Reconfiguration Scheme for PV Arrays Power Enhancement under Mutual Shading Conditions", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 11, No. 11, pp. 1456-1463, 2017.
- [21] Horoufiany, M., and Ghandehari, R., "Optimization of the Sudoku Based Reconfiguration Technique for PV Arrays Power Enhancement under Mutual Shading Conditions", *Solar Energy*, 2017.
- [22] Bany and J. Appelbaum, "The Effect of Shading on the Design of a Field of Solar Collectors", *Solar Cells*, Vol. 20, No. 3, pp. 201-228, 1987.
- [23] Weinstock, D. and Appelbaum, J., "Shadow Variation on Photovoltaic Collectors in a Solar Field", 23<sup>th</sup> *Proceedings IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers*, 2004.
- [24] Moghadam H., and Deymeh, S., "Determination of Optimum Location and Tilt Angle of Solar Collector on the Roof of Buildings With Regard to Shadow of Adjacent Neighbors", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 14, pp. 215-222, 2015.
- [25] Kenton D. S., "Comparison of the Cost and Financial Returns for Solar Photovoltaic Systems Installed by Businesses in Different Locations Across the United States", *Renew Energy*, 2013.
- [26] Talebizadeh, P., mehrabian, M. A., Abdolzadeh, M., "Effect of Solar Angles on Incident Energy of the Flat Collectors". *Journal of Energy, Engineering & Management*. Vol. 2, No. 4, pp. 12-23, 2012.
- [27] Khorasanizadeh, H., "Determination of the Monthly, Seasonal, Semi-Yearly and Yearly Optimum Tilt Angles of Flat Plate Solar Collectors in Kashan", *Journal of Energy, Engineering & Management*, Vol. 3, No. 4, pp. 38-49, 2014.
- [28] Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., and Menicucci, D., "A New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces", *Solar Energy*, Vol. 39, No. 3, pp. 221-231, 1987.

- [29] Martinez-Rubio, A., Sanz-Adan, F., and Santamaria, J.,  
"Optimal Design of Photovoltaic Energy Collectors with  
Mutual Shading for Pre-Existing Building Roofs",  
Renewable Energy, Vol. 78, pp. 666-678, 2015.