

# تأثیر نسبت پوشش زمین بر عملکرد انواع نیروگاههای فتوولتائیک

عدنان رجائیان، روح‌الامین زینلی داورانی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته

کرمان، ایران

adnanrajaeyan@yahoo.com, r.zeinali@kgut.ac.ir

عرفان رجائیان

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد

اسلامی، بندرعباس، ایران

erfanrajaeyan@yahoo.com

های تجدید پذیر سرمایه‌گذاری در زمینه انرژی خورشیدی به دلیل فراوانی و سادگی در بهره‌برداری از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. با توجه به هزینه اولیه نسبتاً بالای احداث مزارع فتوولتائیک، همواره تلاش شده است تا با روش‌هایی مانند استفاده از ردیاب‌های خورشیدی راندمان این مزارع را افزایش دهدن. با این وجود، عوامل متعددی وجود دارد که راندمان مزارع فتوولتائیک را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد ولی کمتر به بررسی آنها پرداخته شده است. به طور مثال چنانچه میزان نسبت پوشش زمین در مناطق مختلف به درستی انتخاب نشود، فواصل لازم میان آرایه‌های فتوولتائیک رعایت نمی‌گردد. این امر سبب می‌شود که در این مزارع، ساعات زیادی از روز آرایه‌های فتوولتائیک بر روی یکدیگر سایه ایجاد کنند. در حالت کلی رفتار یک سلول فتوولتائیک مشابه با یک منبع جریان بوده و تحت شرایطی که سلول هیچ تابشی را از خورشید دریافت نکند، جریان منبع جریان به صفر خواهد رسید [۱و۲]. زمانی که مازولهای فتوولتائیک به صورت سری به هم متصل می‌شوند، تحت شرایطی که یکی از مازولهای داخل آرایه در معرض سایه قرار گیرد یا تابش کمتری را نسبت به دیگر مازولهای داخل آرایه دریافت کند، مازول سایه‌دار مشابه با یکبار عمل کرده و توان کلی سیستم به سبب اتلاف توان توسط آن مازول کاهش می‌یابد [۳و۴]. توان مصرف شده به وسیله سلول سایه‌دار به شکل گرما آزادشده و سبب ایجاد یک ناحیه داغ محلی بر روی سلول می‌شود که علاوه بر کاهش میزان تولید آرایه فتوولتائیک، طول عمر مفید آرایه فتوولتائیک را نیز کاهش می‌دهد [۵و۶].

«شکل ۱» تغییرات دمای یک سلول فتوولتائیک سایه‌دار را، نسبت به مدت زمان قرارگیری تحت سایه در درون مازول نشان می‌دهد [۷].

چکیده — در این مقاله راندمان نیروگاه فتوولتائیک ثابت و متحرک و همچنین میزان تأثیر نسبت پوشش زمین بر راندمان آنها در طی یک سال، در مناطق مختلف کشور ایران مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در صورت در نظر گرفتن نسبت پوشش زمین به میزان یکسان در مناطق مختلف، تلفات سایه در مناطق گوناگون متفاوت خواهد بود به گونه‌ای که اگر مساحت زمین طبق شرایط آیین‌نامه واگذاری زمین جهت احداث نیروگاه فتوولتائیک، به ازای هر مکار ۱/۵ هکتار برای مزارع ثابت و ۲ هکتار برای مزارع متحرک در نظر گرفته شود، تفاوت تلفات سایه در بیشترین و کمترین منطقه برای نیروگاه‌های ثابت  $39\%$  و برای نیروگاه‌های متحرک  $18\%$  خواهد بود. همچنین مشاهده می‌شود که اگر نسبت پوشش زمین به میزان  $2/0$  نسبت به شرایط فعلی کاهش یابد، حداکثر افزایش راندمان در مزارع ثابت حدود  $15\%$  و در مزارع متحرک حدود  $8\%$  خواهد بود. همچنین با استفاده از ردیاب خورشیدی، در شرایط آیین‌نامه مربوطه، حداکثر و حداقل افزایش راندمان نیروگاه‌های فتوولتائیک در مناطق گوناگون به ترتیب  $32/14\%$  و  $31/45\%$  خواهد بود.

واژه‌های کلیدی — ایران؛ افزایش راندمان؛ نسبت پوشش زمین؛ ردیاب خورشیدی؛ تلفات سایه؛

## ۱. مقدمه

از جنبه‌های مهم توسعه پایدار، ملاحظات زیست‌محیطی می‌باشد که یکی از ارکان آن استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر است. در میان انرژی

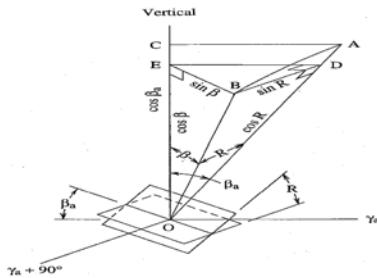
اثر نسبت پوشش زمین بر راندمان و تلفات ناشی از سایه در مناطق مختلف کشور بررسی شده است. در انتهای مقاله جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از نتایج بهدست آمده، ارائه شده است.

## ۲. مدل‌سازی ریاضی نیروگاه فتوولتائیک

### ۲.۱. محاسبه زاویه تابش خورشید و زاویه بهینه

#### چرخش سیستم ردیاب خورشیدی

همان‌طور که در «شکل ۲» نشان داده شده است، اشعه خورشید را می‌توان در راستای محورهای پنل تصویر نمود. در این حالت می‌توان اشعه از خورشید و خط عمود بر سطح پنل با  $\theta$  (زاویه تابش) نشان داده شده است. همچنین در این شکل شبیه صفحه پنل نسبت به سطح زمین با  $\beta$  (زاویه شبیب)، زاویه پنل نسبت به محور جنوب با  $\gamma$  (زاویه آزیموت) و زاویه چرخش پنل نسبت به محور شرق به غرب با  $R$  (زاویه چرخش) نشان داده شده است.



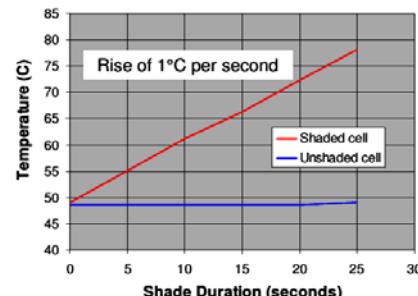
شکل ۲: مدل هندسی تابش دریافتی پنل [۱۱].

زاویه چرخش، برای چرخش در جهت عقربه‌های ساعت مثبت و برای چرخش برخلاف جهت عقربه‌های ساعت منفی در نظر گرفته می‌شود. در ساعات ظهر شرعی که اشعه خورشید عمود بر راستای افق می‌باشد، زاویه چرخش صفر است. با توجه به «شکل ۲» میزان تابش دریافتی از خورشید برای پنل ثابت و پنل متحرک مطابق روابط زیر محاسبه می‌گردد [۱۱].

با توجه به اینکه مثلث AOC و AOC' مشابه‌اند، اضلاع آن‌ها متناسب هستند، پس می‌توان شبیه صفحه را به صورت (۱) بیان نمود.

$$\beta = \cos^{-1} [\cos R \cdot \cos \beta_a] \quad (1)$$

آزیموت سطح به صورت (۲) محاسبه می‌شود.



شکل ۱: افزایش دمای یک سلول سایه‌دار درون یک مژول [۷].

آزمایش‌هایی که در آلمان، بر روی ۱۰۰۰ سیستم فتوولتائیک خانگی انجام شد، نشان داد که ۴۱ درصد از سیستمهای نصب شده تحت تأثیر سایه جزئی قرار گرفته و ۱۰ درصد تلفات انرژی داشته‌اند [۸]. آزمایش‌های میدانی در [۹] نشان می‌دهد که تحت تأثیر اثر سایه جزئی ناشی از مژول‌های ردیف‌های مجاور در هنگام طلوع و غروب خورشید، توان خروجی سیستم‌های فتوولتائیک تا حدود ۹۴ درصد کاهش می‌یابد. یکی از راههای کاهش اثر سایه جزئی، تعیین فاصله مناسب میان آرایه‌های مزروعه فتوولتائیک می‌باشد. بر اساس دستورالعمل سازمان انرژی‌های تجدید پذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)، حداکثر مساحت زمین موردنیاز جهت احداث مزارع فتوولتائیک ثابت، به ازای هر مگاوات،  $1/5$  هکتار ( $GCR=0.8$ ) و مزارع فتوولتائیک متحرک به ازای هر مگاوات  $2$  هکتار ( $GCR=0.6$ ) در نظر گرفته شده است [۱۰]. این در حالی است که با توجه به موقعیت جغرافیایی مناطق مختلف کشور، زاویه تابش خورشید متفاوت بوده و لذا طول سایه ایجاد شده توسط آرایه‌های فتوولتائیک در مناطق مختلف، متفاوت می‌گردد. در این مقاله بر اساس تئوری‌های میزان دریافت انرژی از خورشید و همچنین استفاده از نرم‌افزارهای Matlab و System Advisor Model، Meteonorm راندمان یک نیروگاه خورشیدی و میزان تلفات ناشی از سایه در مساحت‌های متفاوت زمین در طی یک سال برای نیروگاه ثابت و متحرک مورد ارزیابی قرار گرفته است. این بررسی در تمام مراکز استان‌های کشور صورت گرفته است. همچنین در این مطالعه تأثیر عوامل متعددی از جمله سرعت باد، میزان تشعشع، ارتفاع از سطح دریا، دمای محیط، تلفات دیود و اتصالات، تلفات سیم‌کشی DC و AC، مصرف برق اینورتر، مصرف اینورتر در شب، تلفات آلودگی و گردوغبار، تلفات ناشی از مژول فتوولتائیک، تلفات ناشی از عدم هماهنگی مژول‌ها، راندمان اینورتر، تلفات اشیاع اینورتر و تلفات سایه در نظر گرفته شده است. در ادامه ابتدا نحوه مدل‌سازی نیروگاه فتوولتائیک و همچنین محاسبات ابعاد سایه ایجاد شده بر آرایه‌ها شرح داده شده است. سپس با مدل‌سازی یک نیروگاه خورشیدی در نرم‌افزار

<sup>۱</sup> Ground Coverage Ratio

$$X = \frac{\sin \theta_z \sin(\gamma_s - \gamma_a)}{\sin \theta_z \cos(\gamma_s - \gamma_a) \sin \beta_a + \cos \theta_z \cos \beta_a} \quad (9)$$

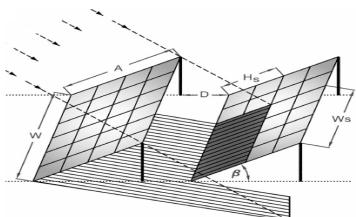
$$\begin{aligned} \psi &= 0^\circ && \text{if } X = 0, \\ &&& \text{or if } X > 0 \text{ and } (\gamma_s - \gamma_a) > 0, \\ &&& \text{or if } X < 0 \text{ and } (\gamma_s - \gamma_a) < 0 \\ \psi &= +180^\circ && \text{if } X < 0 \text{ and } (\gamma_s - \gamma_a) > 0 \\ \psi &= -180^\circ && \text{if } X > 0 \text{ and } (\gamma_s - \gamma_a) < 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\gamma = \gamma_a + \sin^{-1} \left( \frac{\sin R}{\sin \beta} \right) \quad (2)$$

معادله (۲) با فرض  $0 \neq \beta$  برقرار است. اگر  $\beta$  برابر صفر باشد، نمی‌توان زاویه آزیموت سطح پنل را از (۲) محاسبه نمود. در این شرایط، هر مقداری به  $\gamma$  اعطا می‌شود، زیرا سطح افقی است و زاویه پنل نسبت به محور جنوب تأثیری در توان تولیدی پنل نخواهد داشت. زاویه تابش را می‌توان با استفاده از (۳) محاسبه نمود.

## ۲.۲. محاسبه ابعاد سایه

در مزارع فتوولتاویک که متشکل از چند ردیف آرایه خورشیدی هستند، ممکن است دو مدل سایه ایجاد شود. در مدل اول، پهنه‌ای آرایه‌ها از فاصله بین ستون‌های آرایه‌ها کمتر است و احتمال بروز سایه تنها در یک سمت از آرایه وجود خواهد داشت. طبق [۱۲]، در این حالت، در صورت برابر بودن شبیه صفحات و زاویه نصب نسبت به جنوب، فرم سایه ایجادشده مستطیل شکل خواهد بود. «شکل ۳» ایجاد سایه بین آرایه‌ها در این شرایط را نشان می‌دهد.



شکل ۳: ایجاد سایه بین آرایه‌ها در یک ستون.

ابعاد سایه ایجادشده در این حالت از (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$W_s = W - (D + A \cos \beta) \times \frac{\sin \beta |\sin(\gamma_s - \gamma_c)|}{\tan \alpha \cdot \cos \beta + \sin \beta \cdot \cos(\gamma_s - \gamma_c)} \quad (11)$$

$$H_s = A \left\{ 1 - \frac{D + A \cos \beta}{\frac{(A \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma_c) + A \cos \beta)}{\tan \alpha}} \right\} \quad (12)$$

که در آنها،  $\gamma$  و  $\alpha$  به ترتیب زاویه عرضی و طولی خورشید در آسمان و  $\gamma$  زاویه نصب صفحات نسبت به خط واصل بین دو قطب است. همچنین  $D$  فاصله بین آرایه‌ها و  $\beta$  شبیه نصب آنها است.  $W$  و  $A$  نیز طول و عرض آرایه‌ها می‌باشند. در مدل دوم پهنه‌ای آرایه‌ها از فاصله بین ستون‌های آرایه‌ها

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \theta_z + \sin \beta \sin \theta_z \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (3)$$

که در آن  $\theta_z$  زاویه سمت و  $\gamma$  زاویه آزیموت خورشید است.  $\gamma_s$  از جهت جنوب اندازه‌گیری می‌شود و در بعد از ظهرها مثبت و قبل از ظهرها منفی است. زاویه سمت خورشید از (۴) محاسبه می‌شود.

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (4)$$

که در آن  $\delta$  زاویه انحراف،  $\phi$  عرض جغرافیایی و  $\omega$  زاویه ساعت است. زاویه انحراف و زاویه ساعت به ترتیب از (۵) و (۶) محاسبه می‌شود.

$$\delta = 23.45 \sin \left( \frac{360n}{365} \right) \quad (5)$$

$$\omega = 15(t - 12) \quad (6)$$

که در آنها  $n$  شماره روز سال بر اساس سال شمسی است و برای اول فوروردين یک می‌شود. همچنین  $t$  زمان برحسب ساعت است. با استفاده از روابط بیان شده رابطه میان زاویه تابش خورشید و زاویه چرخش سیستم ردیاب خورشیدی به صورت (۷) حاصل می‌شود.

$$\cos \theta = \cos R \left( \sin \theta_z \cos(\gamma_s - \gamma_a) \sin \beta_a + \cos \theta_z \cos \beta_a \right) + \sin R \sin \theta_z \sin(\gamma_s - \gamma_a) \quad (7)$$

برای ردیابی بهینه، باید مقدار  $\cos \theta$  به حداقل میزان خود افزایش یابد. برای تحقق این هدف از (۷) برحسب  $R$  مشتق گرفته و برابر صفر قرار داده می‌شود. مقدار  $R$  به دست آمده در (۸) نشان داده شده است.

$$R = \tan^{-1}(X) + \psi \quad (8)$$

که در آن مقدار  $X$  از (۹) و مقدار  $\psi$  از (۱۰) حاصل می‌شود.

بیان شده است. برای تبدیل ولتاژ DC به AC از اینورتر مدل Power Electronics: FS1 100CU15O3 600v [CEC 20018] استفاده شده است. «جدول ۳» اطلاعات مربوط به اینورتر مورداستفاده را بیان می‌کند. سایر اطلاعات مزرعه فتوولتائیک، در «شکل ۵» و «شکل ۶» بیان شده است.

جدول ۲: مشخصات فنی پنل فتوولتائیک مورداستفاده در شبیه‌سازی.

Company Name	Sun Power
Module Name	SPR-X20-445-COM
Nominal efficiency	20.5763 %
Maximum Power ( $P_{mp}$ )	444.860 wdc
$V_{mp}$	76.7 vdc
$I_{mp}$	5.8 Adc
$V_{oc}$	90.5 vdc
$I_{sc}$	6.2 Adc
NOCT	44.5 °C
Temp coefficient of $P_{max}$	-0.39 %/°C
Temp. coefficient of $V_{oc}$	-0.291 %/°C
Temp. coefficient of $I_{sc}$	0.013 %/°C
Module area	2.162 m <sup>2</sup>
Material	Mono-c-si
Number of cells	128

جدول ۳: مشخصات فنی اینورتر مورداستفاده در شبیه‌سازی.

CEC Weighted efficiency	98.467 %
European Weighted efficiency	98.319 %
Maximum AC Power	1.17644 e+06 Wac
Maximum DC Power	1.19431e+06 Wdc
Power consumption during operation	2066.88 Wdc
Power consumption at night	358.91 Wac
Nominal AC voltage	600 Vac
Maximum DC voltage	1200 Vdc
Maximum DC current	1270.54 Adc
Minimum MPPT DC voltage	849 Vdc
Nominal DC Voltage	940 Vdc
Maximum MPPT DC voltage	1200 Vdc

Modules		Inverters	
Nameplate capacity	10,004.012 kWdc	Total capacity	10,587.996 kWac
Number of modules	22,488	Total capacity	10,748.790 kWdc
Modules per string	12	Number of inverters	9
Strings in parallel	1,874	Maximum DC voltage	1,200.0 Vdc
Total module area	48,619.1 m <sup>2</sup>	Minimum MPPT voltage	849.0 Vdc
String Voc	1,086.0 V	Maximum MPPT voltage	1,200.0 Vdc
String Vmp	920.4 V	Battery maximum power	0.000 kWdc

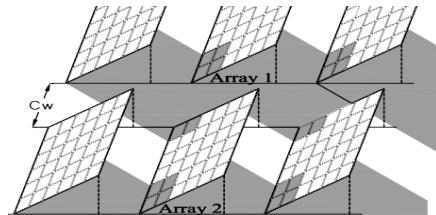
شکل ۵: مشخصات فنی مزرعه فتوولتائیک شبیه‌سازی شده.

Subarray 1	Subarray 2	Subarray 3	Subarray 4
Edit shading...	Edit shading...	Edit shading...	Edit shading...
Strings allocated to subarray	470	468	468
Number of modules along side of row	4	4	4
Number of modules along bottom of row	47	36	36
Number of rows	30	39	39
Modules in subarray from System Design page	5,640	5,616	5,616

شکل ۶: نحوه چیدمان پنل‌ها در مزرعه فتوولتائیک.

به دلیل آنکه تلفات سایه مدنظر است، میزان ظرفیت کل اینورتر را از

بیشتر است. در این حالت با توجه به کم بودن فاصله بین ستون‌های نصب آرایه‌ها احتمال بروز سایه در دو سوی آرایه پشتی وجود دارد. «شکل ۴» این پدیده را به خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۴: ایجاد سایه در دو طرف آرایه فتوولتائیک.

این مدل از سایه در اثر آرایه‌های ردیف جلویی واقع در ستون آرایه و ستون‌های مجاور آن ایجاد می‌شود. در این حالت ارتفاع سایه‌های ایجادشده در دو سوی آرایه با یکدیگر برابر بوده و از (۱۲) محاسبه می‌شود. پهنای سایه واقع شده در سمت مخالف محل خورشید در آسمان نسبت به ظهر محلی با توجه به (۱۱) محاسبه می‌شود. پهنای سایه ایجادشده در سمت قرارگیری خورشید در آسمان ( $W'_s$ ) از (۱۳) محاسبه می‌گردد.

$$W'_s = \frac{(D + A \cos \beta) \sin \beta |\sin(\gamma_s - \gamma_c)|}{\tan \alpha \cdot \cos \beta + \sin \beta \cdot \cos(\gamma_s - \gamma_c)} - C_w \quad (13)$$

مساحت زمین مورداستفاده برای احداث نیروگاه بر حسب هکتار طبق (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$Area = \frac{\text{Total Module Area} \times 0.0002471}{GCR} \quad (14)$$

در این رابطه، GCR نسبت پوشش زمین است.

فاصله قرارگیری آرایه‌ها از یکدیگر، بر اساس مقادیر مختلف نسبت پوشش زمین، در «جدول ۱» بیان شده است.

جدول ۱: فاصله قرارگیری آرایه‌های فتوولتائیک از یکدیگر

0.8	0.6	0.4	GCR
7.66853	7.66853	7.66853	Length of side (m)
9.58567	12.7809	19.1713	Row spacing estimate (m)

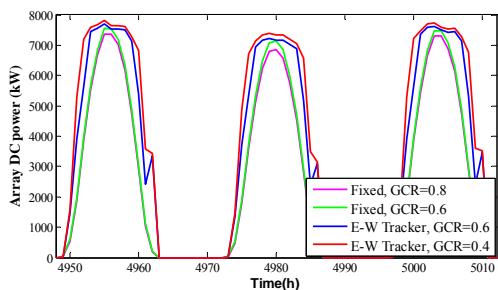
### ۳. شبیه‌سازی نیروگاه فتوولتائیک

یک مزرعه ۱۰ مگاوات ثابت و یک مزرعه ۱۰ مگاوات دارای سیستم ردیاب خورشیدی شرق به غرب در شرایط اقلیمی مرکز استان‌های کشور ایران شبیه‌سازی شده است. مشخصات پنل مورداستفاده در «جدول ۲»

ظرفیت کل مازول‌ها، کمی بیشتر گرفته تا تلفات اشباع اینورتر به صفر برسد.

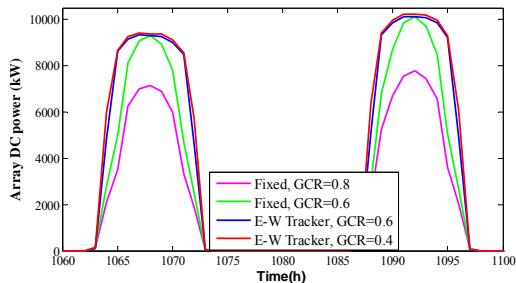
#### ۴. نتایج شبیه‌سازی

برای نمونه برای چند روز خاص در منطقه بجنورد میزان تابش دریافتی، جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدارباز، توان DC و توان AC خروجی آرایه فتوولتائیک ثابت و متحرک در حالت‌های مختلف نیروگاه به ترتیب در «شکل ۷» تا «شکل ۱۲» نشان داده شده است.

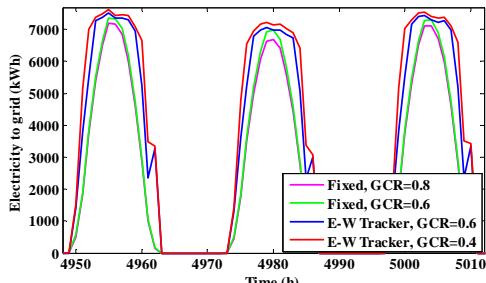


شکل ۱۰: توان DC خروجی آرایه فتوولتائیک، در چند روز خاص در بجنورد.

تأثیر نسبت پوشش زمین بر افزایش راندمان، در ماههای مختلف سال متفاوت است. «شکل ۱۱» خروجی DC آرایه فتوولتائیک را در ماه فوریه برای بجنورد نشان می‌دهد.

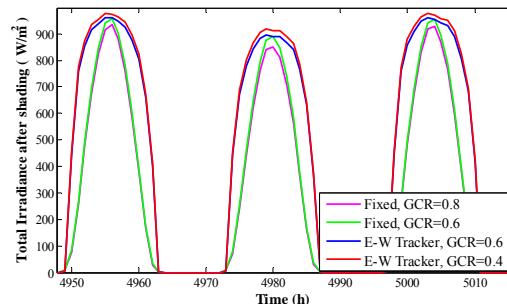


شکل ۱۱: خروجی DC آرایه، در چند روز خاص از ماه فوریه، در بجنورد.



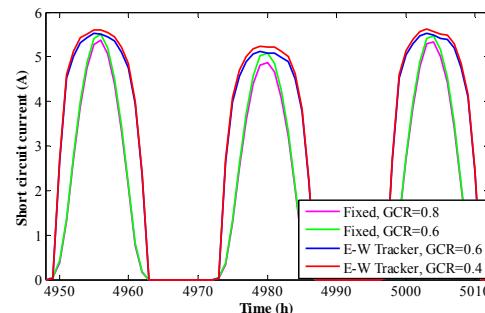
شکل ۱۲: توان AC خروجی آرایه فتوولتائیک، در چند روز خاص در بجنورد.

همان‌گونه که از نتایج مشخص است، در منطقه بجنورد کاهش نسبت پوشش زمین از ۰/۸ به ۰/۶ در مزارع ثابت، راندمان آن‌ها را حدود ۱۵٪ در سال افزایش داده است. همچنین کاهش آن از ۰/۶ به ۰/۴ برای مزارع متحرک، راندمان آن‌ها را حدود ۷٪ در سال افزایش داده است. همچنین استفاده از ردیاب خورشیدی در شرایط آبی‌نامه مربوطه (نسبت پوشش زمین ۰/۸ برای ثابت و ۰/۶ برای متحرک)، توان تولیدی آرایه را حدود ۴۴٪ افزایش داده است. «شکل ۱۳» میزان تولید انرژی AC را در شرایط آبی‌نامه مربوطه، برای مزارع ثابت و متحرک در مناطق مختلف نشان می‌دهد. ترتیب مناطق در «شکل ۱۳» از سمت چپ به راست، در «جدول ۴» بیان شده است.

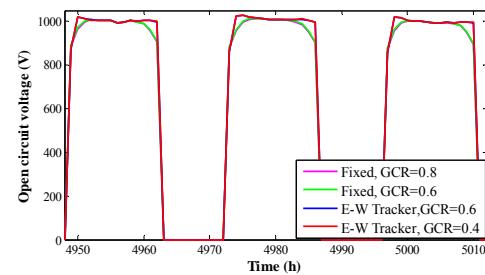


شکل ۷: تابش دریافتی توسط آرایه فتوولتائیک برای چند روز خاص در بجنورد.

با کاهش نسبت پوشش زمین (افزایش مساحت زمین)، میزان تابش دریافتی توسط پنل‌ها افزایش یافته است. همچنین تابش دریافتی سیستم متحرک بسیار بیشتر از سیستم ثابت است.



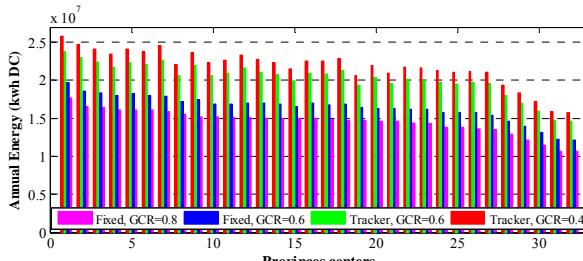
شکل ۸: جریان اتصال کوتاه آرایه فتوولتائیک برای چند روز خاص در بجنورد.



شکل ۹: ولتاژ مدارباز آرایه فتوولتائیک برای چند روز خاص در بجنورد.

بین بیشترین و کمترین مناطق، برای مزارع ثابت ۳۹٪ و برای مزارع متحرک ۱۸٪ خواهد بود. همچنین با کاهش نسبت پوشش زمین (افزایش مساحت زمین) تلفات سایه در مناطق گوناگون به میزان نابرابری کاهش یافته است. برای مثال در مزارع ثابت، با تغییر نسبت پوشش زمین به ۰/۶، بندرعباس با کاهش زیاد تلفات سایه، به رتبه ۲۴ در «جدول ۵» نقل مکان خواهد کرد و گرگان نیز با وجود کاهش تلفات، به رتبه یک «جدول ۵» نقل مکان می‌نماید. وجود اختلاف زیاد تلفات سایه در میان مناطق مختلف بیانگر آن است که تخصیص میزان برابر زمین در مناطق مختلف جهت احداث مزارع فتوولتائیک مناسب نمی‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در مزارع متحرک با وجود نسبت پوشش زمین ۰/۶، اختلاف تلفات میان مناطق حداقل ۱۸ درصد است که بیانگر شرایطی بهتر نسبت به مزارع ثابت با نسبت پوشش زمین ۰/۸ است. با کاهش نسبت پوشش زمین برای مزارع ثابت به ۰/۶ (تخصیص ۲ هکتار برای هر مگاوات) و مزارع متحرک به ۰/۴ (تخصیص ۳ هکتار برای هر مگاوات)، اختلاف تلفات بین بیشترین و کمترین مناطق، برای مزارع ثابت ۲۱/۵ درصد و برای مزارع متحرک ۱۱ درصد خواهد بود.

«شکل ۱۵» میزان تولید انرژی DC سالانه مزارع فتوولتائیک ثابت و متحرک را در حالات مختلف با یکدیگر مقایسه می‌کند. ترتیب قرارگیری مناطق در «شکل ۱۵» از سمت چپ به راست، در «جدول ۴» بیان شده است.

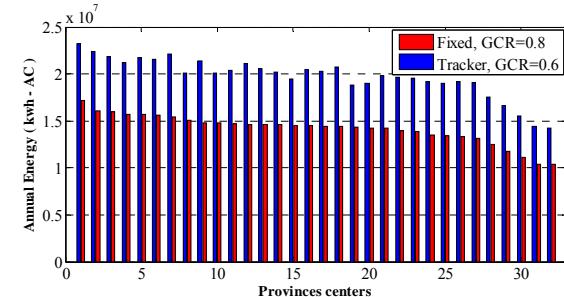


شکل ۱۵: توان DC خروجی سالانه نیروگاه ثابت و متحرک در حالات مختلف.

میزان افزایش راندمان مزارع فتوولتائیک ثابت و متحرک در اثر کاهش نسبت پوشش زمین به ترتیب در «جدول ۶» و «جدول ۷» بیان شده است.

جدول ۶: افزایش بازده مزارع ثابت با کاهش نسبت پوشش زمین از ۰/۸ به ۰/۶.

افزایش٪ بازده%	نام	افزایش٪ بازده%	نام	افزایش٪ بازده%	نام	افزایش٪ بازده%	نام
۱۲/۰۶	ایلام	۱۳/۰۱	تبریز	۱۳/۸۹	کرج	۱۵/۰۶	بنجنورد
۱۲/۰۵	کرمان	۱۲/۹۹	بیرجند	۱۳/۸۶	قزوین	۱۴/۹۱	ساری
۱۱/۸۵	Zahedan	۱۲/۸۴	اصفهان	۱۳/۷۸	زنجان	۱۴/۸۲	گرگان
۱۱/۸۱	بندرعباس	۱۲/۸۰	ارومیه	۱۳/۶۲	قم	۱۴/۶۰	سمنان
۱۱/۳۲	بوشهر	۱۲/۵۵	خرمآباد	۱۳/۳۵	تهران	۱۴/۰۴	رشت
۱۱/۲۶	شیراز	۱۲/۲۴	اهواز	۱۳/۲۴	اراک	۱۴/۰۹	اردبیل
۱۱/۲۱	شهرکرد	۱۲/۲۲	سنندج	۱۲/۱۰	همدان	۱۴/۰۶	پیشانی
۱۰/۵۲	یاسوج	۱۲/۰۷	یزد	۱۳/۱۰	کرمانشاه	۱۴	مشهد

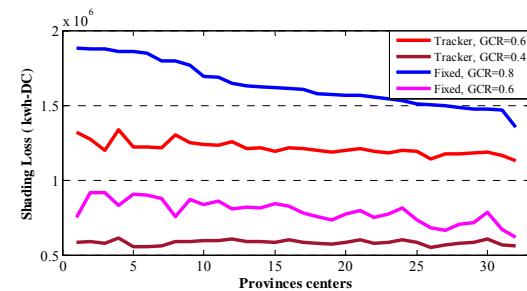


شکل ۱۳: توان AC خروجی سالانه نیروگاه ۱۰ مگاواتی ثابت و متحرک.

جدول ۴: ترتیب مناطق در شکل ۱۳.

شماره	نام	شماره	نام	شماره	نام	شماره	نام
۱	زاهدان	۹	سمنان	۱۷	اراک	۲۵	کرج
۲	اصفهان	۱۰	شهرکرد	۱۸	زنجان	۲۶	بجنورد
۳	کرمان	۱۱	ایلام	۱۹	اردبیل	۲۷	بندرعباس
۴	شیراز	۱۲	تبریز	۲۰	مشهد	۲۸	اهواز
۵	بیرونی	۱۳	کرمانشاه	۲۱	سنندج	۲۹	گرگان
۶	یزد	۱۴	خرمآباد	۲۲	همدان	۳۰	ساری
۷	ارومیه	۱۵	یاسوج	۲۳	رشت	۳۱	تهران
۸	بوشهر	۱۶	قزوین	۲۴	پیشانی	۳۲	پیشانی

تلفات سایه نیروگاههای فتوولتائیک ثابت و متحرک برای مناطق مختلف، در «شکل ۱۴» و ترتیب قرارگیری مناطق از چپ به راست در «جدول ۵» بیان شده است.



شکل ۱۴: مقایسه تلفات سایه در نیروگاه ثابت و متحرک در حالات مختلف.

جدول ۵: ترتیب مناطق در شکل ۱۴.

شماره	نام	شماره	نام	شماره	نام	شماره	نام
۱	پیشانی	۹	مشهد	۲۵	بیرونی	۲۹	پیشانی
۲	گرگان	۱۰	کرج	۲۶	یاسوج	۲۶	اصفهان
۳	همدان	۱۱	شهرکرد	۱۹	شیراز	۲۷	کرمان
۴	اهواز	۱۲	کرمانشاه	۲۰	یزد	۲۸	اردبیل
۵	پیشانی	۱۳	سمنان	۲۱	قزوین	۲۹	اصفهان
۶	رشت	۱۴	خرمآباد	۱۸	تبریز	۲۶	ارومیه
۷	ساری	۱۵	ایلام	۱۹	اردبیل	۳۱	کرمان
۸	بوشهر	۱۶	زنجان	۲۲	تبریز	۳۲	زاهدان

همانگونه که از «شکل ۱۴» مشخص است تلفات سایه در مناطق مختلف در شرایطی یکسان متفاوت خواهد بود به گونه‌ای که اختلاف تلفات

مزارع متحرک حدود ۸٪ خواهد بود. همچنین با استفاده از ردیاب خورشیدی تکمحوره شرق به غرب، در شرایط آبین‌نامه مربوطه، حداکثر وحداقل افزایش راندمان نیروگاههای فتوولتائیک نسبت به نیروگاههای ثابت در مناطق گوناگون به ترتیب ۴۵/۳۲ درصد و ۳۱/۱۴ درصد خواهد بود.

## منابع

- [1] Ishaque, K., Salam, Z., and Taheri, H., Accurate MATLAB simulink PV system simulator based on a two-diode model, Journal of Power Electronics, vol. 11, pp. 179-187, 2011.
- [2] Masters, G. M., Renewable and efficient electric power systems, John Wiley & Sons, 2013.
- [3] Shimizu, T., Hashimoto, O., and Kimura, G., A novel high-performance utility-interactive photovoltaic inverter system, Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 18, pp. 704-711, 2003.
- [4] Quaschning, V. and Hanitsch, R., Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells, Solar Energy, vol. 56, pp. 513-520, 1996.
- [5] Bishop, J., Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits, Solar cells, vol. 25, pp. 73-89, 1988.
- [6] KOK SOON, T. and Saad, M., Modified incremental conductance algorithm for photovoltaic system under partial shading conditions and load variation, 2014.
- [7] Hernday, P., Field Applications of I-V Curve Tracers in the Solar PV Industry, IEEE Santa Clara Valley November 14, 2012.J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68-73.
- [8] Jahn, U. and Nasse, W., Operational performance of grid-connected PV systems on buildings in Germany, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 1 ,pp. 441-448, 2004.
- [9] Thakkar, N., Cormode, D., Lonij, V. P., Pulver, S., and Cronin, A. D., A simple non-linear model for the effect of partial shade on PV systems, in Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE, pp. 002321-002326.K. Elissa, "Title of paper if known," unpublished.
- [10] [http://www.satba.gov.ir/suna\\_content/media/image/2016/07/4719\\_orig.pdf](http://www.satba.gov.ir/suna_content/media/image/2016/07/4719_orig.pdf)
- [11] William F. Marion and Aron P. Dobos. "Rotation Angle for the Optimum Tracking of One-Axis Trackers." Technical Report NREL/TP-6A20-58891 .July 2013. Prepared under Task No. SS13.5030
- [12] Horoufiany,M. and Ghandehari, R., Optimal fixed reconfiguration scheme for PV arrays power enhancement under mutual shading conditions, IET Journal of Renew. Power Gener., 2017, Vol. 11 Iss. 11, pp. 1456-1463

جدول ۷: افزایش بازده مزارع متحرک با کاهش نسبت پوشش زمین از ۰/۶ به ۰/۴

افزایش بازده ٪	نام	افزایش بازده(٪)	نام	افزایش بازده(٪)	نام	افزایش بازده(٪)	نام
۷/۶۲	قم	۷/۷۹	کرمان	۷/۹۶	یاسوج	۸/۲۸	ارومیه
۷/۶۰	زنجان	۷/۷۷	ساری	۷/۹۵	کرج	۸/۲۶	زاهدان
۷/۵۹	رشت	۷/۷۷	بزد	۷/۹۳	اردبیل	۸/۱۶	شهرکرد
۷/۵۶	پنجورد	۷/۷۶	خرمآباد	۷/۹۰	قزوین	۸/۱۲	پیرجند
۷/۴۹	گرگان	۷/۷۴	شیراز	۷/۸۵	کرمانشاه	۸/۱۱	ایلام
۷/۱۵	بوشهر	۷/۷۱	بندرانزلی	۷/۸۳	همدان	۸/۰۵	سنندج
۶/۹۵	اهواز	۷/۶۳	اصفهان	۷/۸۰	مشهد	۸/۰۲	تبریز
۶/۷۹	بندرعباس	۷/۶۲	سمنان	۷/۷۹	تهران	۷/۹۸	اراک

میزان افزایش راندمان مزارع فتوولتائیک در صورت استفاده از ردیاب خورشیدی، در صورتی که نسبت پوشش زمین برای مزرعه ثابت و متحرک به ترتیب ۰/۸ و ۰/۶ باشد، در «جدول ۸» بیان شده است.

جدول ۸: افزایش بازده مزارع مجهز به ردیاب خورشیدی نسبت به ثابت.

افزایش بازده ٪	نام	افزایش بازده(٪)	نام	افزایش بازده(٪)	نام	افزایش بازده(٪)	نام
۳۶/۵۵	کرمان	۳۹/۵۷	ساری	۴۰/۹۲	تهران	۴۵/۳۲	اردبیل
۳۶/۳۹	شهرکرد	۳۹/۴۳	اصفهان	۴۰/۷۲	کرمانشاه	۴۴/۷۱	سمنان
۳۵/۱۴	زاهدان	۳۹/۰۸	ایلام	۴۰/۵۸	اراک	۴۲/۵۶	پنجورد
۳۵/۰۳	شیراز	۳۸/۸۴	خرمآباد	۴۰/۵۸	گرگان	۴۳/۹۹	تبریز
۳۴/۱۲	اهواز	۳۸/۴۱	پیرجند	۴۰/۵۰	قم	۴۳/۸۶	زنجان
۳۳/۶۲	یاسوج	۳۸/۲۸	رشت	۴۰/۳۴	همدان	۴۳/۲۲	ارومیه
۳۳/۰۲	بوشهر	۳۷/۹۰	بزد	۴۰/۰۴	مشهد	۴۲/۳۱	قزوین
۳۱/۱۴	بندرعباس	۳۷/۴۸	بندرانزلی	۳۹/۷۹	سنندج	۴۱/۴۱	کرج

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله بر اساس تئوری‌های موجود و استفاده از نرم‌افزارهای Meteonorm System Advisor Model Matlab فتوولتائیک ثابت و متحرک و میزان تأثیر نسبت پوشش زمین بر آن‌ها در طی یک سال برای مناطق مختلف ایران مورد ارزیابی قرارگرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در صورت در نظر گرفتن نسبت پوشش زمین، به میزان یکسان در مناطق مختلف، تلفات سایه در مناطق گوناگون، تفاوت خواهد بود به‌گونه‌ای که اگر مساحت زمین طبق شرایط آبین‌نامه واگذاری زمین جهت احداث نیروگاه فتوولتائیک، به ازای هر مگاوات ۱/۵ هکتار برای مزارع ثابت و ۲ هکتار برای مزارع متحرک در نظر گرفته شود، تفاوت تلفات سایه در بیشترین و کمترین منطقه برای نیروگاه‌های ثابت ۰/۳۹٪ و برای نیروگاه‌های متحرک ۰/۱۸٪ خواهد بود. همچنین مشاهده می‌شود که اگر نسبت پوشش زمین به میزان ۰/۲ نسبت به شرایط فعلی کاهش یابد، حداکثر افزایش راندمان در مزارع ثابت حدود ۱۵٪ و در