

شبیه‌سازی عملکرد سیستم خورشیدی با استفاده از نرم‌افزار SAM (System Advisor Modeling)، به منظور تولید انرژی برای شهر کرمان و مقایسه آن، با در نظر گرفتن تأثیرات Shading یا بدون آن

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه دولتی کرمان و کارشناس مکانیک معاونت شهرسازی و عمرانی شهرداری شیراز	مهدی اسلامی*
استاد تمام دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شیراز	محمود یعقوبی
مهندسی راه و ساختمان و دکترای جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری (شهردار شیراز)	علیرضا پاک‌فطرت
استادیار پژوهشکده انرژی دانشگاه صنعت پیشرفته کرمان	مسعود ایرانمنش

چکیده

از سویی محدود بودن انرژی فسیلی، آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف آن و افزایش گازهای گلخانه‌ای حاصل از این مصرف و از سوی دیگر مشکلات و محدودیت‌های برقرسانی به همراه افزایش روزافزون تقاضای انرژی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، دلایلی هستند که استفاده از دیگر منابع در دسترس، پاک، رایگان و دوستانه محیط زیست مانند انرژی خورشیدی و لزوم بهره‌برداری بیشتر از این منابع را امری بسیار ضروری و مهم می‌کند. کشور ایران به دلیل قرار گرفتن بر روی کمربند انرژی خورشیدی جهان، پتانسیل بسیاری برای استفاده از این انرژی دارد. روش‌های مختلفی برای استفاده و بهره‌گیری از انرژی خورشیدی و تولید الکتریسیته وجود دارد که از آن جمله می‌توان به تکنولوژی CSP نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی و یا سیستم‌های فتوولتاییک اشاره کرد. سیستم‌های فتوولتاییک به سیستم‌هایی گفته می‌شود که در آن انرژی خورشید به‌طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. عوامل مختلفی بر عملکرد و بازده سیستم‌های خورشیدی به‌ویژه سیستم‌های فتوولتاییک تأثیر گذارند که یکی از آنها تأثیرات سایه (Shading) است. در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار SAM، به بررسی تأثیر سایه و سایر پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک، در دو حالت با و وضعیت ثابت و سیستم با ردیاب تک‌محوره آرایه برای شهر کرمان پرداخته‌ایم و نتایج تولید متوسط ماهیانه برای حالت‌های مختلف آن ارزیابی و مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: انرژی فسیلی، انرژی خورشیدی، سیستم‌های فتوولتاییک، تولید الکتریسیته، سایه

۱- مقدمه

در عصر حاضر کمبود سوخت‌های فسیلی و آلودگی‌های ناشی از مصرف آن‌ها، سبب روی آوردن انسان به دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر برای تأمین نیازهای آینده خود شده است. انرژی خورشیدی که یکی از انرژی‌های تجدیدپذیر است؛ به دلیل فراوانی، پاکیزگی و دسترس آسان، از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. تولید برق با استفاده از انرژی خورشیدی از اواسط دهه هفتاد و همزمان با پیش‌آمدن بحران انرژی مورد توجه قرار گرفت و از آن سال به بعد در بسیاری از کشورها برای تولید الکتریسیته استفاده شد. از راه‌های استفاده از انرژی خورشیدی، پدیده فتوولتاییک است که بدون استفاده از مکانیزم‌های مکانیکی انرژی نورانی خورشید به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود و به هر سیستمی که از این خاصیت پیروی کند، سیستم فتوولتاییک می‌گویند. در این سیستم‌ها یک فوتون با انرژی کافی باعث جهش الکترون‌ها از لایه ظرفیت به

* نویسنده مسئول: meslamii890@gmail.com

لایه‌رسانی و در نتیجه ایجاد الکتریسیته می‌شود. در واقع اساس کار سیستم‌های فتوولتاییک بر پایه نظریه ذره‌ای بودن انرژی تابشی بنا شده است. تاکنون تحقیقات بسیاری را بر روی سیستم‌های فتوولتاییک و تأثیر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد این سیستم‌ها انجام داده‌اند؛ (Malathy & Ramaprabha, 2015) با استفاده از نرم‌افزار MATLAB تأثیر اندازه و پیکربندی آرایه‌های سیستم فتوولتاییک را با در نظر گرفتن الگوی سایه بر عملکرد انرژی یک سیستم PV مطالعه کرده‌اند. آن‌ها دریافته‌اند که اندازه آرایه و تأثیرات سایه، بر عملکرد سیستم فتوولتاییک نقشی بسیار مهم و حیاتی دارد. همچنین (Shams EL-Dein et al., 2011) برای عدم تطابق سطح تابش، با ارائه فرمول ریاضی، پیکربندی جدیدی را برای کاهش تلفات سایه در مزارع فتوولتاییک پیشنهاد داده‌اند. همچنین (Wang and Hsu, 2011) با مطالعه عملکرد ماژول سیستم فتوولتاییک با پیکربندی‌های مختلف با استفاده از دو روش نیوتن-رافسون و $PLPB^1$ به این نتیجه رسیدند که در نظر گرفتن هر دو روش پیکربندی TCT^2 بیشترین مقدار توان را ایجاد می‌کند. نتیجه مطالعه و بررسی (Belhachat & Larbes, 2015) بر روی مدل‌سازی و مقایسه عملکرد پیکربندی‌های مختلف آرایه سیستم فتوولتاییک تحت تأثیر شرایط جزئی سایه PSC^3 این بود که برای کاهش تلفات Mismatch یا همان عدم تطابق، انتخاب مناسب پیکربندی آرایه سیستم فتوولتاییک می‌تواند ماکزیمم توان و انرژی را فراهم کند. (TaherMaatallah et al., 2011) با بررسی عملکرد سیستم فتوولتاییک در سه حالت وضعیت ثابت، سیستم با ردیاب تک‌محوره و دو‌محوره تحت تأثیر پارامترهای مختلف، به این نتیجه دست یافتند که زاویه شیب بهینه سیستم‌های فتوولتاییک یک ویژگی مهم جهت دستیابی به حداکثر راندمان است و استفاده از سیستم ردیاب، انرژی سالیانه بیشتری را نسبت به سیستم با وضعیت ثابت حاصل می‌کند (عبدل‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷). برای شهر کرمان نیز درباره مقدار انرژی دریافتی با استفاده از زوایای بهینه پنل‌های خورشیدی و مقایسه آن با سطوح دیگر مطالعاتی انجام شد و به این نتیجه دست یافتند که مقدار انرژی دریافتی از خورشید در یک سال با استفاده از زوایای بهینه مربوط به ماه، فصل و سال در مقایسه با مقدار انرژی دریافتی از خورشید در یک سال بر روی سطح افق به ترتیب ۱۷، ۹/۱۵ و ۳۶/۹ درصد افزایش یافته است. همچنین (حیدرزاده و همکاران، ۱۳۹۴) با مطالعه زوایای چرخش مختلف برای آرایه‌های سیستم فتوولتاییک با ردیاب تک‌محوره ملاحظه کردند که بهترین زاویه بهینه چرخش برای دریافت بیشترین انرژی تابشی خورشید برای عرض‌های جغرافیایی کمتر از ۴۰ درجه به‌ویژه شهر کرمان، زاویه ۶۵ درجه است. در مقاله حاضر، عملکرد سیستم فتوولتاییک در دو حالت وضعیت ثابت و ردیاب تک‌محوره را برای شهر کرمان بررسی و مقایسه کردیم و در هر حالت با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن تأثیرات سایه شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار SAM⁴، انجام و نتایج ارزیابی شد. همچنین برای اعتبارسنجی، نتایج این شبیه‌سازی را با مطالعات (Taher Maatallah et al., 2011) مقایسه کردیم.

۲- موقعیت کشور ایران و شهر کرمان

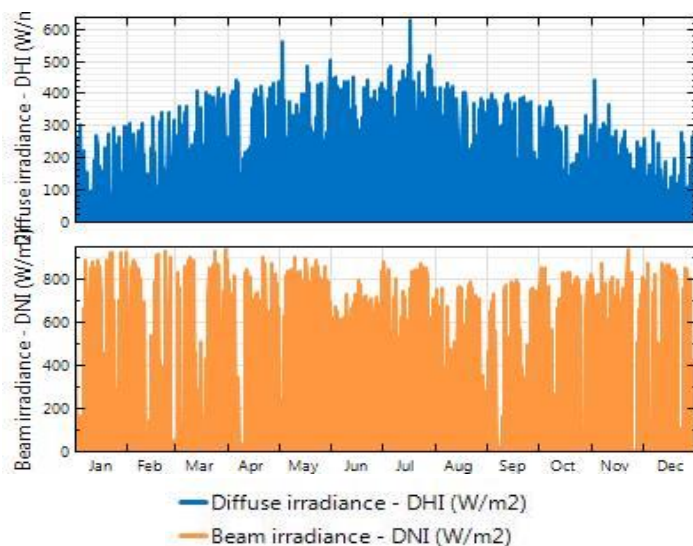
کشور ایران بین مدارهای ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی قرار دارد و از لحاظ جغرافیایی بر روی کمربند خورشیدی جهان واقع شده است. میزان تابش سالانه انرژی خورشیدی در ایران را بین ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع تخمین زده‌اند که بالاتر از میزان متوسط جهانی است. در استان کرمان، بر اساس اطلاعات مربوط به نقشه تابش خورشیدی از سازمان انرژی‌های نو (سانا)، میزان ساعت‌های آفتابی در طول سال به‌طور متوسط ۳۲۰۰ ساعت گزارش شده است که از میانگین کشور نیز بالاتر بوده و در بعضی روزها نیز تا ۱۳ ساعت، آفتاب با شدت مناسب می‌تابد. از این رو کرمان دارای پتانسیل بسیار خوبی جهت بهره‌گیری از انرژی تابشی خورشید برای تولید برق است. شهر کرمان در عرض جغرافیایی ۳۰/۳ درجه و طول جغرافیایی ۵۷/۱ درجه قرار گرفته است. ارتفاع در شهر کرمان با سطح دریا ۱۷۵۴ متر اختلاف دارد. شکل ۱ توزیع میزان تابش خورشیدی پخش و مستقیم را بر اساس خروجی از نرم‌افزار SAM برای شهر کرمان در ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهد.

1. Piecewise Linear Parallel Branches

2. Total-Cross-Tied

3. Partial Shading Conditions

4. System Advisor Modeling



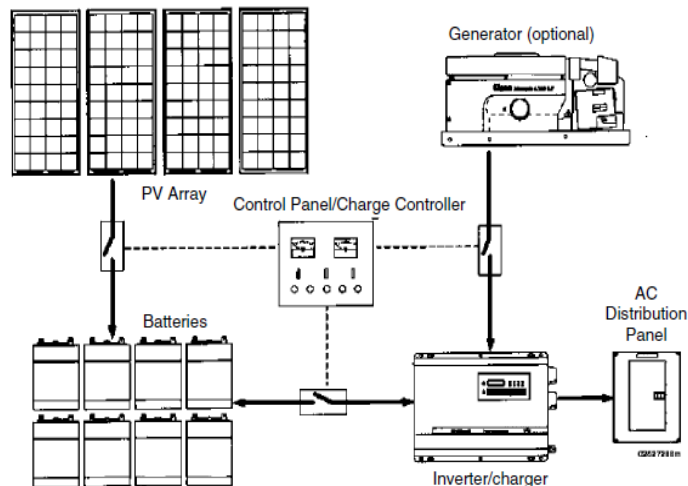
شکل ۱: توزیع تابش ساعتی بخشی و مستقیم شهر کرمان در طول سال

شدت تابش خورشید، یکی از عوامل تعیین‌کننده بازده سیستم‌های فتوولتائیک است. میزان و مقدار انرژی تابشی خورشید به دو عامل شرایط آب و هوایی و طول و عرض جغرافیایی محل بستگی دارد و زمانی که پرتوهای نور خورشید به صورت عمودی و مستقیم به سطح زمین بتابند بیشترین مقدار انرژی خورشیدی دریافت می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ نیز مشاهده شد، با توجه به موقعیت جغرافیایی و شرایط آب و هوایی شهر کرمان، مقدار تابش مستقیم در اکثر روزهای کرمان بالاتر از میزان تابش بخشی است.

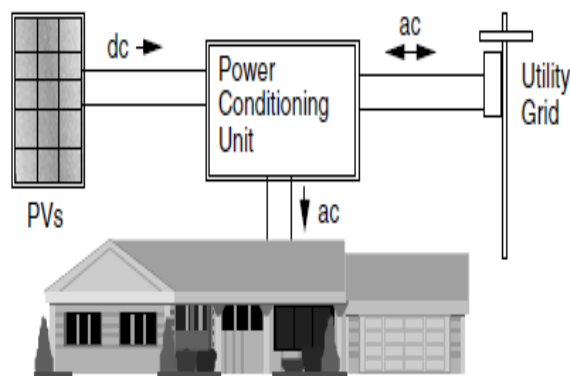
۳- معرفی سیستم‌های فتوولتائیک

در یک تعریف ساده (Gilbert & Masters, 2004)، به سیستم‌هایی که به صورت مستقیم و با استفاده از انرژی تابشی خورشید، برق و الکتریسیته تولید می‌کنند سیستم‌های فتوولتائیک می‌گویند. عملکرد این سیستم‌ها به این صورت است که الکترون‌های موجود در عنصرهایی با خاصیت نیمه‌رسانا مانند Si، فوتون‌هایی با انرژی کافی را جذب کرده و باعث حرکت الکترون‌ها از لایه ظرفیت به سمت لایه رسانایی می‌شوند. این الکترون‌ها از عنصر جدا شده و حفره ایجاد می‌کنند. سپس الکترون‌ها و حفره‌ها در خلاف جهت یکدیگر به سمت میدان الکتریکی موجود در پیوند p-n می‌روند و به واسطه ناخالصی‌های موجود در ساختار کریستال‌ها از یکدیگر جدا می‌شوند و اختلاف پتانسیل، در نتیجه تولید الکتریسیته را ایجاد می‌کنند. به‌طور کلی سیستم‌های فتوولتائیک شامل دو نوع سیستم‌های متصل به شبکه و مستقل از شبکه می‌باشند (Gilbert & Masters, 2004). سیستم‌های متصل به شبکه قابلیت اعتماد بسیار خوبی دارند و به علت اجباری نبودن سیستم ذخیره‌ساز مانند باتری ساده‌تر و کم‌هزینه‌ترند. در این سیستم‌ها ماژول PV⁵ می‌تواند وارد شبکه شود و برق اضافی را نیز به شبکه بفروشد. سیستم‌های جدا از شبکه، برای مناطق دورافتاده استفاده می‌شود که امکان دسترسی به شبکه برق سراسری وجود ندارد و برای تولید برق در این مناطق مقرون‌به‌صرفه‌تر است. این سیستم‌ها، سیستم ذخیره‌ساز مانند باتری، کنترلر شارژ و دشارژر دارند. همچنین در صورت نیاز برای تأمین انرژی نیز ژنراتور به سیستم اضافه می‌شود. در شکل ۲ شماتیکی از سیستم‌های متصل به شبکه و مجزا از شبکه نشان داده شده است.

⁵. Photovoltaic



(الف)



(ب)

شکل ۲: شماتیکی از سیستم‌های متصل به شبکه (الف) و مجزا از شبکه (ب)

یک سیستم فتوولتاییک از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است که با توجه به کاربرد، موقعیت مکانی و نوع سیستم انتخاب می‌شوند (Gilbert & Masters, 2004). به‌طور کلی یک سیستم فتوولتاییک از این اجزا تشکیل می‌شوند: آرایه‌های PV؛ سیستم دنبال‌کننده خورشید که آرایه‌ها به آن متصل‌اند؛ سیستم ذخیره‌ساز که در سیستم‌های متصل به شبکه، اختیاری و در سیستم‌های مستقل از شبکه، اجباری است؛ مبدل یا اینورتور که جریان DC را به AC تبدیل می‌کند؛ سیستم MMPT^۶ که القاگر، سیستم قطع و وصل‌کننده و دیود (یکسوکندنه جریان) باهم ترکیب شده و ولتاژ را متناسب با هم تغییر می‌دهد و سبب ایجاد بیشترین توان می‌شود.

استفاده از سیستم ردیاب خورشیدی به‌منظور تعقیب لحظه‌ای مسیر خورشید و همچنین تولید انرژی بیشتر به‌کار می‌رود. عوامل مختلفی بر میزان دسترسی به انرژی خورشیدی تأثیرگذارند. یکی از این عوامل تأثیرات سایه بر سیستم‌های فتوولتاییک است. موقعیت و محل قرارگیری پنل‌های فتوولتاییک باید به‌گونه‌ای باشد که اثر سایه به‌هیچ‌وجه بر روی آن نباشد؛ زیرا سبب کاهش بازده و آسیب دیدن سلول‌ها خواهد شد.

استفاده از سیستم‌های فتوولتاییک به دلایلی همچون بی‌نیازی به سوخت‌های فسیلی برای تأمین انرژی، طول عمر مناسب و سهولت در

⁶ Maximum Power Point Tracking

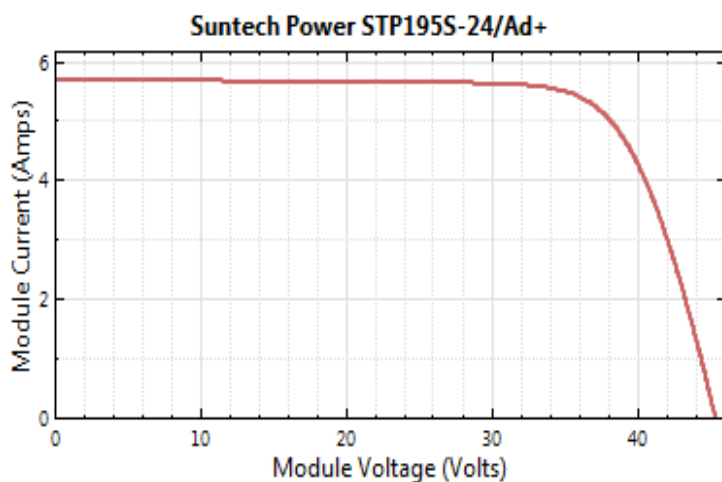
بهره‌برداری، قابلیت نصب و راه‌اندازی متناسب با نیاز مصرف‌کننده، قابلیت نصب بر نما و سقف ساختمان و همچنین قابلیت ذخیره انرژی در باتری برای استفاده در سیستم‌های مجزا از شبکه، بسیار مرکز توجه است. زیاده‌بودن هزینه‌های مرتبط با سرمایه‌گذاری اولیه در سیستم‌های فتوولتائیک، به‌ویژه در سیستم‌های متصل به شبکه، مهم‌ترین عامل بر سر راه توسعه و ترویج استفاده از این سیستم‌ها است که توجه به توسعه زیرساخت‌ها، حمایت‌ها و سوبسیدهای دولت از جمله راهکارهای فعالیت‌هایی است که می‌تواند به توسعه و ترویج استفاده از این سیستم‌ها کمک کند.

۴- شبیه‌سازی و مدل‌سازی سیستم فتوولتائیک

باتوجه به اطلاعات مندرج در جدول ۱، با استفاده از نرم‌افزار SAM سیستم فتوولتائیک برای موقعیت شهر کرمان در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی می‌شود. ماژول و مبدل انتخاب‌شده برای شبیه‌سازی در تمامی حالت‌ها یکسان و دارای مشخصات مندرج در شکل‌های ۳ و ۴ هست. همچنین در جدول ۲ سایر مشخصات کلی مانند تعداد و ساختار ماژول و مبدل مدنظر برای مدل‌سازی آمده است.

جدول ۱: موقعیت شهر کرمان در نرم‌افزار SAM

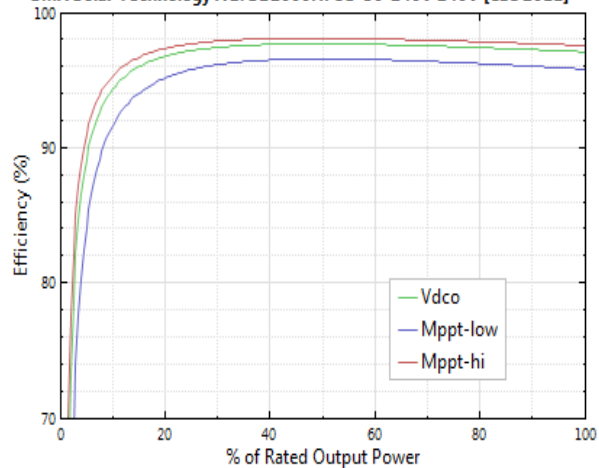
City	kerman	Time zone	GMT 3	Latitude	30 °N
State	krmn	Elevation	1754 m	Longitude	57 °E
Country	IRAN	Data Source	IRST	Station ID	40841



Nominal efficiency	15.2763 %	Temperature coefficients	
Maximum power (Pmp)	195.078 Wdc	-0.437 %/°C	-0.852 W/°C
Max power voltage (Vmp)	36.6 Vdc		
Max power current (Imp)	5.3 Adc		
Open circuit voltage (Voc)	45.4 Vdc	-0.326 %/°C	-0.148 V/°C
Short circuit current (Isc)	5.7 Adc	0.034 %/°C	0.002 A/°C

شکل ۳: مشخصات نوع ماژول انتخاب‌شده در نرم‌افزار SAM

SMA Solar Technology AG: SB2000HFUS-30-240V 240V [CEC 2011]



CEC weighted efficiency	97.321	%		
European weighted efficiency	96.951	%		
Maximum AC power	2050	Wac	C0	-1.06e-005 1/Wac
Maximum DC power	2111.65	Wdc	C1	-6.09e-005 1/Vdc
Power consumption during operation	11.2037	Wdc	C2	-0.00201 1/Vdc
Power consumption at night	0	Wac	C3	-0.00159 1/Vdc
Nominal AC voltage	240	Vac		
Maximum DC voltage	600	Vdc		
Maximum DC current	12.2	Adc		
Minimum MPPT DC voltage	175	Vdc		
Nominal DC voltage	400.224	Vdc		
Maximum MPPT DC voltage	480	Vdc		

شکل ۴: مشخصات نوع مبدل انتخاب شده در نرم افزار SAM

جدول ۲: مشخصات کلی مبدل و ماژول سیستم فتوولتاییک در نظر گرفته شده

Inverters	
SMA Solar Technology AG: SB2000HFUS-30-240V 240V	
Unit capacity	2.05 AC kW
Input voltage	175 - 480 VDC DC V
Quantity	1
Total capacity	2 AC kW
DC to AC Capacity Ratio	1.33
AC losses (%)	3.0

Modules	
Suntech Power STP195S-24/Ad+	
Cell material	Mono-c-Si
Module area	1.3 m ²
Module capacity	195.1 DC Watts
Quantity	14
Total capacity	2.7 DC kW
Total area	17 m ²

پس از مشخص شدن نوع ماژول و مبدل، سیستم فتوولتاییک را در دو حالت و وضعیت ثابت و ردیاب تک محوره آرایه با توجه به مشخصات موجود در جدول ۳ و با در نظر گرفتن تأثیرات سایه، مدل سازی و نتایج را ارزیابی می کنیم.

جدول ۳: مشخصات آرایه مدنظر برای سیستم فتوولتاییک با در نظر گرفتن تأثیرات سایه ستون سمت چپ (حالت اول) در وضعیت ثابت و ستون سمت راست (حالت دوم) با ردیاب تک‌محوره

Array	
Strings	2
Modules per string	7
String voltage (DC V)	256.2
Tilt (deg from horizontal)	30
Azimuth (deg E of N)	180
Tracking	fixed
Backtracking	-
Rotation limit (deg)	-
Shading	yes
Soiling	yes
DC losses (%)	4.5

Array	
Strings	2
Modules per string	7
String voltage (DC V)	256.2
Tilt (deg from horizontal)	30
Azimuth (deg E of N)	180
Tracking	1 axis
Backtracking	no
Rotation limit (deg)	65
Shading	yes
Soiling	yes
DC losses (%)	4.5

تعیین زاویه شیب بهینه سیستم‌های فتوولتاییک یکی از عوامل مهم به‌منظور دستیابی به راندمان بیشتر و به‌عنوان تابعی از عرض جغرافیایی محل است. در مقاله حاضر همان‌طور که در جدول ۳ نیز مشاهده شد، زاویه شیب^۷ آرایه سیستم فتوولتاییک را برابر با عرض جغرافیایی شهر کرمان (۳۰ درجه) و زاویه سمت (آزیموس^۸ خورشیدی) به سمت جنوب و برابر با ۱۸۰ درجه در نظر گرفتیم. همچنین در طراحی بیشتر سیستم‌های انرژی خورشیدی، اغلب تخمین احتمالی سایه‌اندازی به وسیله پارامترهای مختلف مهم و ضروری است. از این‌رو، برای تعیین سایه‌اندازی لازم است سایه ایجادشده به‌صورت تابعی از زمان در هر روز سال مشخص شود. در شبیه‌سازی سیستم فتوولتاییک، در مقاله حاضر

7. Tilt

8. Azimuth

برای محاسبه و در نظر گرفتن تأثیرات سایه، همان طور که در شکل های ۵ و ۶ نیز آمده، به صورت گرافیکی و در حالت سه بعدی پارامترهای مدنظر برای ایجاد سایه انتخاب شده است.

Shading and Snow Losses

Use the shade calculator to draw a 3D representation of the photovoltaic system and nearby objects. The calculator generates a diurnal table of shading losses and automatically populates the shading factors table for each subarray in the system. (For systems with more than one subarray, use the group name in the shade calculator to identify subarrays.) See help for details.

Open 3D shade calculator...

	Subarray 1	Subarray 2	Subarray 3	Subarray 4
Modules in subarray (from System Design page)	14	0	0	0
GCR (from System Design page)	0.3	0.3	0.3	0.3
Number of modules along side of row	2	2	2	2
Number of modules along bottom of row	9	9	9	9

Module area (from Module page) m²

GCR = length of side + row spacing
 module width = module area + 1.7

number of modules along side

number of modules along bottom

row spacing

modules (portrait)

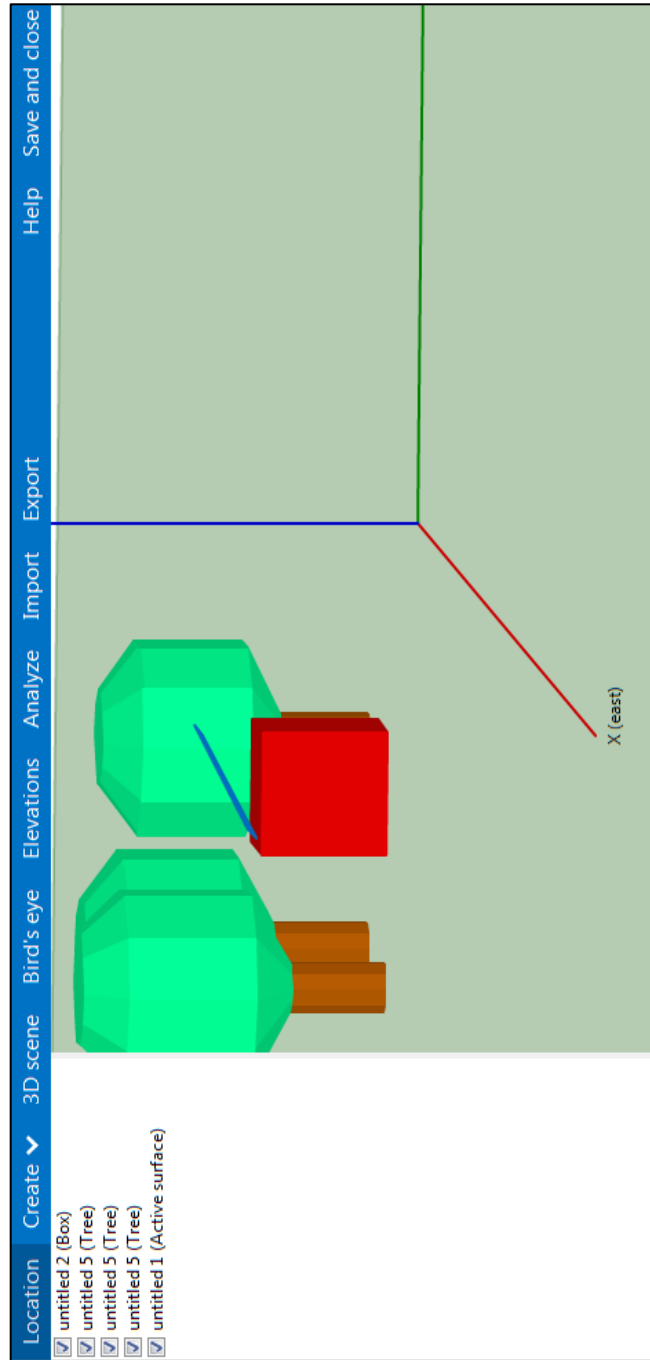
-System Design

Edit shading losses

-External Shading

Edit shading... Edit shading... Edit shading... Edit shading...

شکل ۵: در نظر گرفتن سایه در نرم افزار SAM



شکل ۶: پارامترهای انتخاب شده برای ایجاد سایه به صورت سه بعدی و در حالت گرافیکی

در ادامه با توجه به همه مشخصات ذکر شده، سیستم فتوولتاییک را شبیه سازی کرده و نتایج را بررسی کردیم.

۱- نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم فتوولتاییک در حالت های اول و دوم

همان طور که در جدول ۴ نیز نشان داده شده است، سیستم فتوولتاییک با در نظر گرفتن تأثیرات سایه در حالت با ردیاب تک محوره در مقایسه با حالت وضعیت ثابت آرایه، میزان بازده و انرژی الکتریسیته بیشتری را تولید و هزینه تراز شده کمتری را ایجاد می کند که نشان دهنده عملکرد بهتر

این سیستم است. اطلاعات بیشتر از عملکرد سالیانه دو حالت در جدول ۵ درج شده است.

جدول ۴: مقایسه نتایج پارامترهای مختلف حاصل از شبیه‌سازی سیستم فتوولتائیک با در نظر گرفتن تأثیرات سایه ستون سمت چپ (حالت اول) در وضعیت ثابت و ستون سمت راست (حالت دوم) با ردیاب تک‌محوره

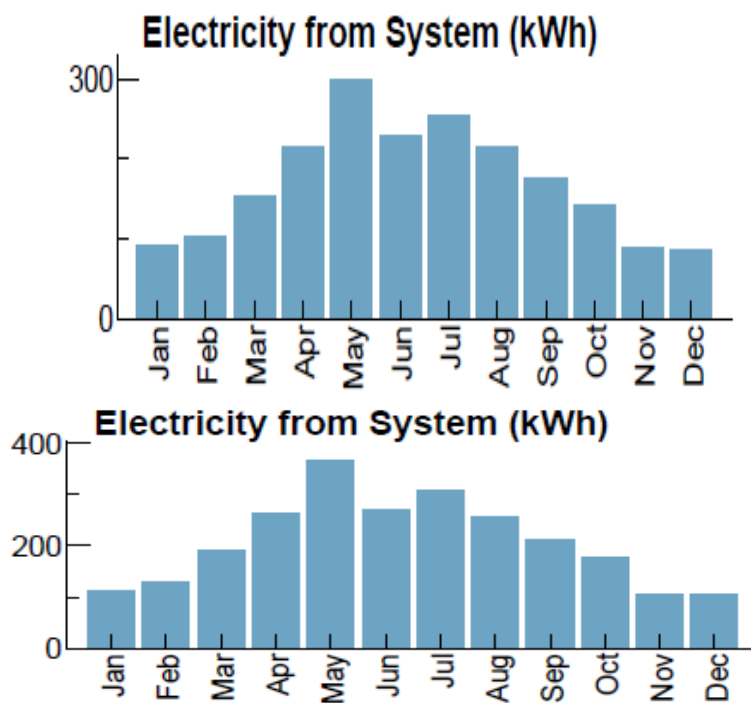
Metric	Value	Metric	Value
Annual energy	2,499 kWh	Annual energy	2,061 kWh
Capacity factor	10.4%	Capacity factor	8.6%
First year kWhAC/kWDC	915 kWh/kW	First year kWhAC/kWDC	755 kWh/kW
Performance ratio	0.42	Performance ratio	0.44
Battery efficiency	0.00%	Battery efficiency	0.00%
Levelized COE (nominal)	17.38 ¢/kWh	Levelized COE (nominal)	21.07 ¢/kWh
Levelized COE (real)	14.25 ¢/kWh	Levelized COE (real)	17.29 ¢/kWh
Electricity cost without system	\$826,030	Electricity cost without system	\$826,030
Electricity cost with system	\$825,814	Electricity cost with system	\$825,858
Net savings with system	\$215	Net savings with system	\$172
Net present value	\$-2,055	Net present value	\$-2,324
Payback period	NaN	Payback period	NaN
Net capital cost	\$6,959	Net capital cost	\$6,959
Equity	\$0	Equity	\$0
Debt	\$6,959	Debt	\$6,959

جدول ۵: مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم فتوولتائیک برای شهر کرمان در یک سال با در نظر گرفتن تأثیرات سایه ستون سمت چپ (حالت اول) در وضعیت ثابت و ستون سمت راست (حالت دوم) با ردیاب تک‌محوره

Annual Results (in Year 1)	
GHI kW/m ² /day	4.3
POA kW/m ² /day	2.0
DC kWh from array	2,320
Net to inverter	2,210 DC kWh
Gross from inverter	2,120 AC kWh
Net to grid	2,060 AC kWh
Capacity factor	8.61
Performance ratio	0.44

Annual Results (in Year 1)	
GHI kW/m ² /day	4.3
POA kW/m ² /day	3.0
DC kWh from array	2,800
Net to inverter	2,680 DC kWh
Gross from inverter	2,570 AC kWh
Net to grid	2,490 AC kWh
Capacity factor	10.45
Performance ratio	0.42

بررسی میزان الکتریسیته تولید شده در ماه‌های مختلف سال نیز نشان‌دهنده این موضوع است که با در نظر گرفتن سیستم فتوولتاییک با ردیاب تک‌محوره می‌توان به مقدار بیشتری از انرژی الکتریسیته در مقایسه با سیستم فتوولتاییک در وضعیت ثابت دست یافت که این موضوع در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: عملکرد سیستم فتوولتاییک به‌طور ماهیانه برابر یک سال برای شهر کرمان با در نظر گرفتن تأثیرات سایه (حالت اول)

شکل سمت چپ با وضعیت ثابت و (حالت دوم) شکل سمت راست با سیستم ردیاب تک‌محوره

از بررسی نتایج بالا مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن اثرات سایه، سیستم فتوولتاییک با وضعیت ثابت، انرژی سالانه کمتری را نسبت به سیستم با ردیاب تک‌محوره ایجاد می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد برای جذب بیشتر انرژی خورشیدی، استفاده از سیستم ردیاب خورشیدی، به دلیل وابستگی توان تولید شده با سیستم فتوولتاییک به شدت نور جذب شده توسط آن، بسیار مفید است. همچنین استفاده از سیستم ردیاب خورشیدی سبب افزایش ضریب ظرفیت سیستم فتوولتاییک است که به صورت نسبت انرژی تولید شده به انرژی تولیدی بر اساس ظرفیت اسمی تعریف می‌شود و تولید برق را افزایش می‌دهد.

در ادامه، شبیه‌سازی سیستم فتوولتاییک به منظور مشخص کردن تأثیرات سایه در جذب انرژی خورشیدی و در نتیجه تولید انرژی توسط سیستم فتوولتاییک برای دو حالت بالا، بدون در نظر گرفتن تأثیرات سایه انجام و نتایج مقایسه می‌شود. در جدول ۶ مشخصات آرایه در نظر گرفته شده برای سیستم فتوولتاییک را بدون در نظر گرفتن تأثیرات سایه نشان داده‌ایم.

جدول ۶: مشخصات آرایه در نظر گرفته شده سیستم فتوولتائیک بدون در نظر گرفتن تأثیرات سایه ستون سمت چپ (حالت سوم)

در وضعیت ثابت و ستون سمت راست (حالت چهارم) با ردیاب تکمحوره

Array	
Strings	2
Modules per string	7
String voltage (DC V)	256.2
Tilt (deg from horizontal)	30
Azimuth (deg E of N)	180
Tracking	fixed
Backtracking	-
Rotation limit (deg)	-
Shading	no
Soiling	yes
DC losses (%)	4.5

Array	
Strings	2
Modules per string	7
String voltage (DC V)	256.2
Tilt (deg from horizontal)	30
Azimuth (deg E of N)	180
Tracking	1 axis
Backtracking	no
Rotation limit (deg)	65
Shading	no
Soiling	yes
DC losses (%)	4.5

۵- نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم فتوولتائیک در حالت های سوم و چهارم

همان طور که در جدول ۶ آورده ایم، نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم فتوولتائیک بدون در نظر گرفتن تأثیرات بیان می کند استفاده از یک سیستم فتوولتائیک در حالت با ردیاب تکمحوره (حالت چهارم) در مقایسه با وضعیت ثابت آرایه (حالت سوم)، علاوه بر اینکه میزان بیشتری از انرژی الکتریسیته را تولید می کند، هزینه های کمتری را نیز ایجاد می کند. همچنین با اضافه شدن سیستم ردیاب تکمحوره، ضریب ظرفیت سیستم فتوولتائیک افزایش پیدا کرده است که این موضوع مزیت استفاده از سیستم ردیاب تکمحوره را نشان می دهد.

جدول ۷: مقایسه نتایج پارامترهای مختلف شبیه‌سازی سیستم فتوولتاییک بدون در نظر گرفتن تأثیرات سایه ستون سمت چپ (حالت سوم) در وضعیت ثابت و ستون سمت راست (حالت چهارم) با ردیاب تک‌محوره

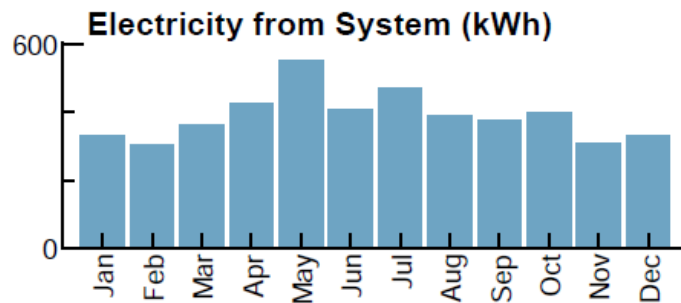
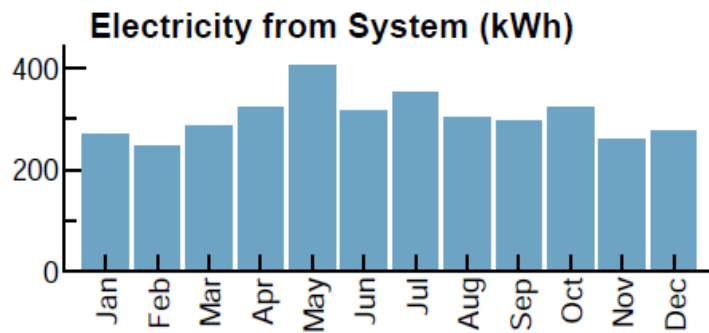
Metric	Value
Annual energy	3,636 kWh
Capacity factor	15.2%
First year kWhAC/kWDC	1,331 kWh/kW
Performance ratio	0.78
Battery efficiency	0.00%
Levelized COE (nominal)	11.94 ¢/kWh
Levelized COE (real)	9.80 ¢/kWh
Electricity cost without system	\$826,030
Electricity cost with system	\$825,704
Net savings with system	\$326
Net present value	\$-1,367
Payback period	NaN
Net capital cost	\$6,959
Equity	\$0
Debt	\$6,959

Metric	Value
Annual energy	4,644 kWh
Capacity factor	19.4%
First year kWhAC/kWDC	1,701 kWh/kW
Performance ratio	0.78
Battery efficiency	0.00%
Levelized COE (nominal)	9.35 ¢/kWh
Levelized COE (real)	7.67 ¢/kWh
Electricity cost without system	\$826,030
Electricity cost with system	\$825,560
Net savings with system	\$470
Net present value	\$-468
Payback period	NaN
Net capital cost	\$6,959
Equity	\$0
Debt	\$6,959

جدول ۸: مقایسه نتایج شبیه‌سازی سیستم فتوولتاییک برای شهر کرمان در یک سال، بدون در نظر گرفتن تأثیرات سایه ستون سمت چپ (حالت سوم) در وضعیت ثابت و ستون سمت راست (حالت چهارم) با ردیاب تک‌محوره

Annual Results (in Year 1)	
GHI kW/m ² /day	4.3
POA kW/m ² /day	4.0
DC kWh from array	4,080
Net to inverter	3,900 DC kWh
Gross from inverter	3,740 AC kWh
Net to grid	3,630 AC kWh
Capacity factor	15.20
Performance ratio	0.78

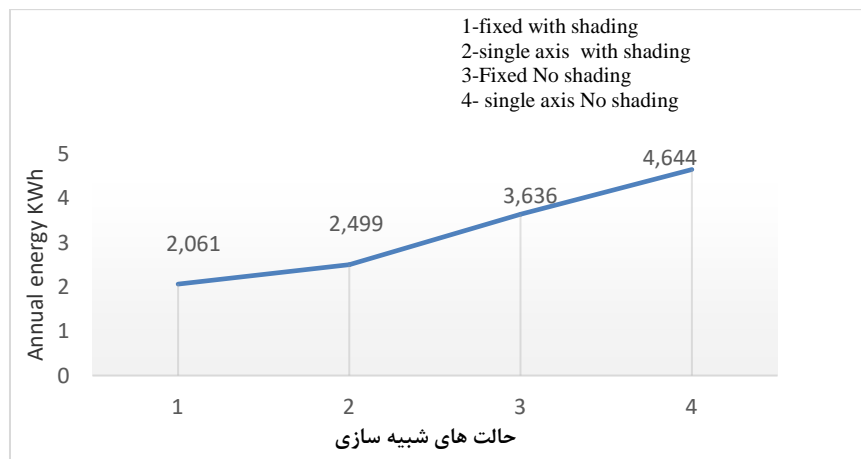
Annual Results (in Year 1)	
GHI kW/m ² /day	4.3
POA kW/m ² /day	5.0
DC kWh from array	5,230
Net to inverter	4,990 DC kWh
Gross from inverter	4,780 AC kWh
Net to grid	4,640 AC kWh
Capacity factor	19.41
Performance ratio	0.78



شکل ۸: عملکرد سیستم فتوولتائیک به طور ماهیانه برابر یک سال برای شهر کرمان بدون نظر گرفتن تأثیرات سایه (حالت سوم)

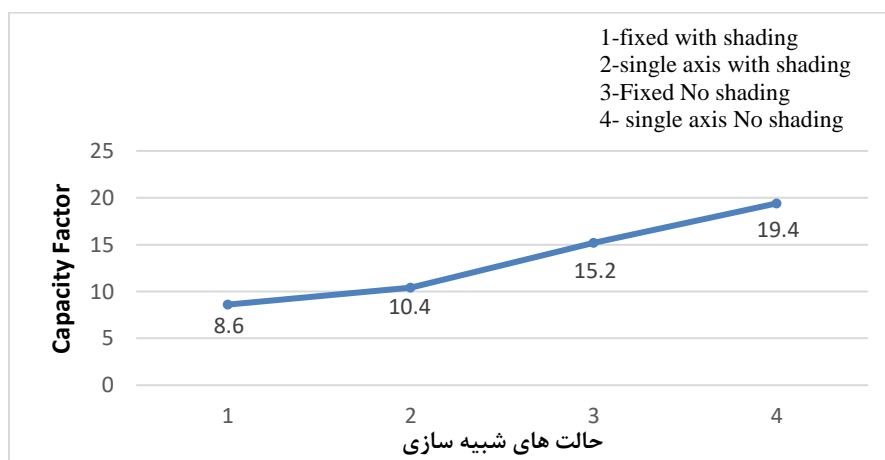
شکل سمت چپ در وضعیت ثابت و شکل سمت راست (حالت چهارم) سیستم با ردیاب تک‌محوره

مقایسه عملکرد سیستم فتوولتائیک شبیه‌سازی شده را در چهار حالت ذکر شده در شکل‌های ۹ الی ۱۱ نمایش داده‌ایم.

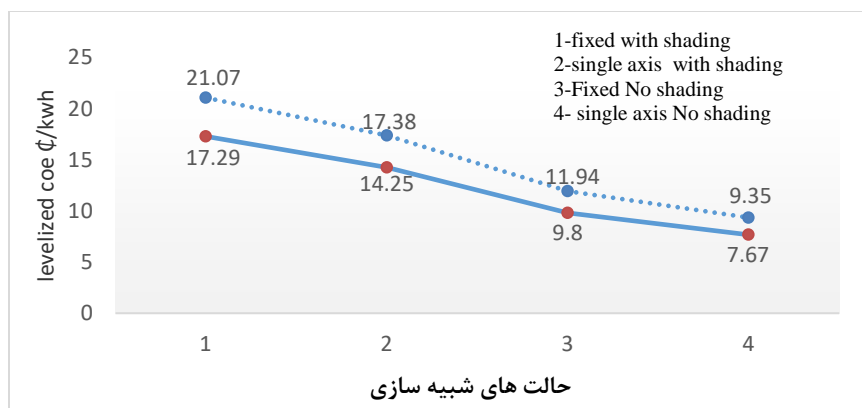


شکل ۹: مقایسه عملکرد سیستم فتوولتائیک در چهار حالت شبیه‌سازی شده برحسب

Annual Energy برای شهر کرمان



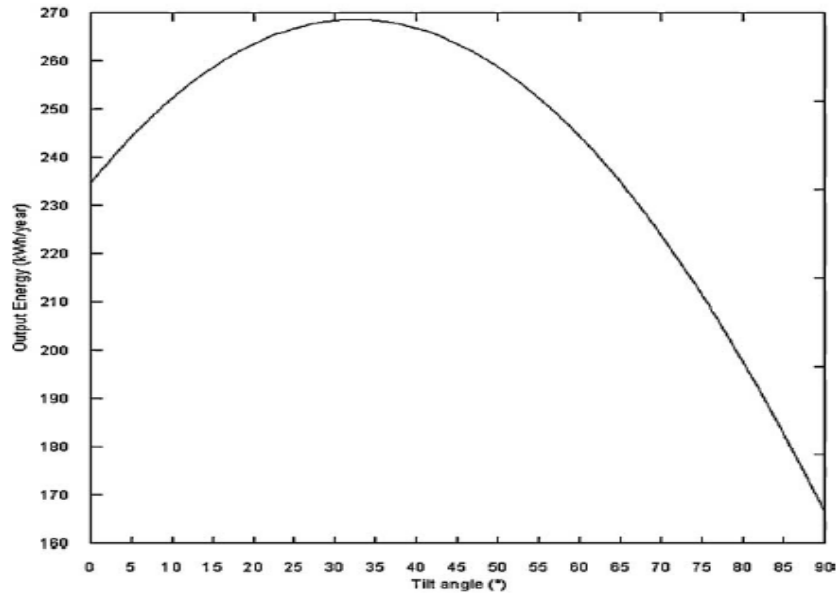
شکل ۱۰: مقایسه عملکرد سیستم فتوولتائیک در چهار حالت شبیه‌سازی شده برحسب **Capacity Factor** برای شهر کرمان



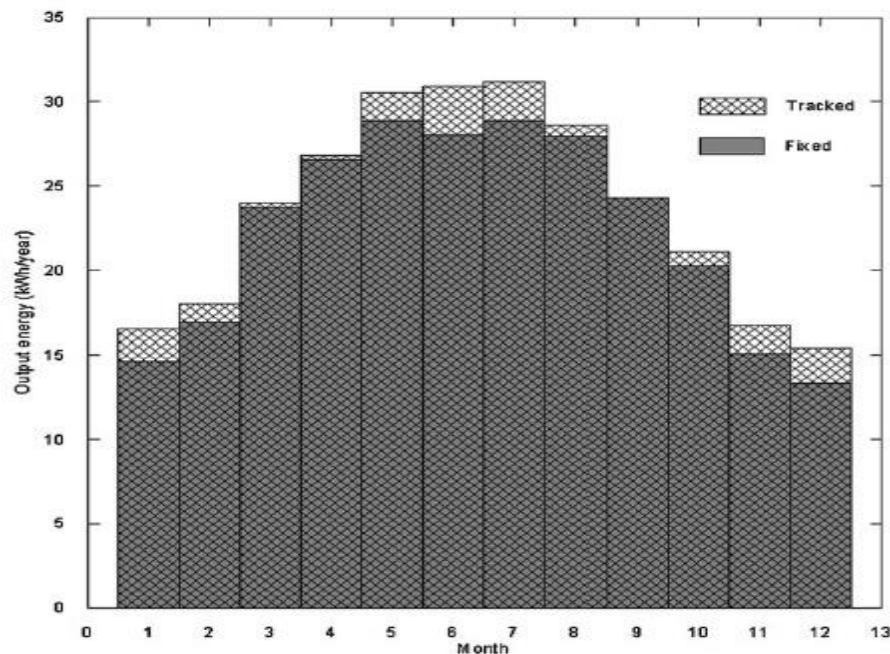
شکل ۱۱: مقایسه عملکرد سیستم فتوولتائیک در چهار حالت شبیه سازی شده برحسب COST Levelized COE حالت خطچین (Nominal) و حالت آبی رنگ (Real) برای شهر کرمان

از مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی با استفاده از نرم افزار SAM در تمامی حالت های ذکر شده، همان طور که مشاهده شد در یک سیستم فتوولتائیک استفاده از یک سیستم ردیاب تک محوره نسبت به سیستمی با وضعیت ثابت آرایه ها علاوه بر افزایش ضریب ظرفیت، میزان انرژی الکتریسیته بیشتر و هزینه های تولیدی کمتری ایجاد می کند. همچنین بدون در نظر گرفتن تأثیرات سایه، انرژی تولید شده توسط سیستم ردیاب تک محوره (حالت چهارم) حداکثر میزان را در بین تمامی حالت ها مدنظر دارد.

به منظور اعتبار سنجی، نتایج حاصل از مقاله حاضر را با نتایج حاصل از تحقیقات (TaherMaatallah et al., 2011) /بررسی عملکرد و مدل سازی سیستم فتوولتائیک در سه حالت با وضعیت ثابت آرایه و ردیاب تک محوره و دو محوره شهر موناستیر کشور تونس) مقایسه کردیم. در این پژوهش، ابتدا به بررسی پارامترهای مختلفی مانند تأثیرات زاویه شیب بر انرژی خروجی سالیانه سیستم های فتوولتائیک پرداختیم و همان طور که در شکل ۱۲ نیز نشان داده شد، نتیجه گرفتیم با توجه به عرض جغرافیایی محل مذکور، زاویه شیب ۳۰ درجه یکی از بهینه ترین زاویه ها برای دستیابی به بیشترین راندمان است. سپس همان طور که در شکل ۱۳ دیدیم میزان الکتریسیته تولیدی با استفاده از یک سیستم ردیاب تک محوره در مقایسه با سیستم با وضعیت ثابت آرایه تا حدود ۱۰/۳۴ درصد برای فصل تابستان و ۱۵ درصد برای فصل زمستان افزایش دارد که در مقاله حاضر برای زاویه ۳۰ درجه برای شهر کرمان نیز برای حالت ها بدون در نظر گرفتن تأثیرات سایه، ۱۲/۸ درصد و برای حالت ها با در نظر گرفتن تأثیرات ۱۲/۱ درصد افزایش داشت.



شکل ۱۲: انرژی خروجی سالانه سیستم فتوولتائیک بر حسب زاویه‌های شیب مختلف



شکل ۱۳: نتایج حاصل از مقایسه سیستم فتوولتائیک در دو حالت سیستم با وضعیت ثابت آرایه و سیستم با ردیاب تک‌محوره
نتیجه‌گیری

عوامل مختلفی می‌توانند بر راندمان یک سیستم فتوولتائیک تأثیرگذار باشند. یکی از این عوامل تأثیرات سایه است که باعث کاهش مقدار انرژی و آسیب دیدن سلول‌ها می‌شود. علاوه بر این، پارامترهایی مانند زاویه شیب بهینه سیستم فتوولتائیک و همچنین نوع، اندازه و پیکربندی آرایه یک سیستم فتوولتائیک نیز نقش بسیار مهمی در دریافت میزان انرژی تابشی خورشید و در نتیجه تولید الکتریسیته دارند. مطالعه حاضر نشان داد استفاده از سیستم‌هایی با وضعیت ردیاب تک‌محوره نسبت به وضعیت ثابت، میزان انرژی بیشتر و هزینه کمتری را تولید می‌کنند. ملاحظه شد که بالاترین میزان برق سالیانه یک سیستم ردیاب تک‌محوره بدون در نظر گرفتن تأثیرات سایه، در حدود ۴۶۴۴ کیلووات ساعت و

برق سالیانه تولیدی یک سیستم فتوولتاییک با وضعیت ثابت، ۳۶۳۶ کیلووات ساعت است که مقدار برق تولیدی در حدود ۱۲/۸ در صد افزایش دارد. اما با در نظر گرفتن تأثیرات سایه، استفاده از یک سیستم فتوولتاییک با ردیاب تک محوره ۲۴۹۹ کیلووات ساعت و یک سیستم با استفاده از وضعیت ثابت آرایه‌ها، مقدار ۲۰۶۱ کیلووات ساعت برق تولید می‌کند که افزایش تولید ۱۲/۱ در صدی برق را به همراه دارد. ویژگی دیگر، زاویه چرخش متناسب برای آرایه‌های یک سیستم فتوولتاییک با ردیاب تک محوره است. به گونه‌ای که انتخاب زاویه چرخش بهینه می‌تواند در میزان دریافت بیشتر انرژی تابشی خورشید مؤثر باشد. همچنین ملاحظه شد ضریب ظرفیت سیستم فتوولتاییک که به صورت نسبت میزان انرژی تولید شده در یک بازه زمانی مشخص برای یک سیستم فتوولتاییک، به میزان انرژی تولید شده بر اساس ظرفیت اسمی تعریف می‌شود، با حضور یا عدم حضور سیستم ردیاب خورشیدی متفاوت می‌باشد و استفاده از سیستم ردیاب خورشیدی ضریب ظرفیت سیستم فتوولتاییک را افزایش می‌دهد و در نتیجه سبب ایجاد مقدار الکتریسیته تولیدی بیشتر و قیمت برق تولیدی کمتری در این سیستم‌ها می‌شود.

کتابنامه

- حیدرزاده، مجتبی؛ حیدرزاده، مهدی و زارعی پورهیر، عاطفه (۱۳۹۴). انرژی خورشیدی و بررسی چگونگی بازده حداکثری آن‌ها و بررسی موردی شهر کرمان. دومین همایش ملی مدیریت انرژی‌های نو و پاک.
- عبدل زاده، مرتضی؛ جعفری، سعید؛ رهنما، محمد و عامری، مهراڻ (۱۳۸۷). تعیین زاویه بهینه پنل‌های خورشیدی ثابت برای دریافت بیشترین انرژی تشعشعی در شهر کرمان. نشریه بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۹(۱۰)، ۹۸-۹۱.
- وبسایت سازمان انرژی‌های نو ایران، سانا، پتانسیل تابش و نقشه تابش خورشیدی ایران.
- Belhachat, F., and C. Larbes. "Modeling, analysis and comparison of solar photovoltaic array configurations under partial shading conditions." *Solar Energy* 120 (2015): 399-418.
- El-Dein, M. S., Kazerani, M., & Salama, M. M. A. (2011, July). Novel configurations for photovoltaic farms to reduce partial shading losses. In *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting* (pp. 1-5). IEEE.
- Gilbert, M. (2004). *Masters, Renewable and efficient electric power systems*. Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, 75, 76.
- Maatallah, T., El Alimi, S., & Nassrallah, S. B. (2011). Performance modeling and investigation of fixed, single and dual-axis tracking photovoltaic panel in Monastir city, Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 4053-4066.
- Malathy, S., & Ramaprabha, R. (2015). Comprehensive analysis on the role of array size and configuration on energy yield of photovoltaic systems under shaded conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 672-679.
- Wang, Y. J., & Hsu, P. C. (2011). An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells. *Energy*, 36(5), 3069-3078.