



Techno-Economic Comparison of Monocrystalline and Concentrating Photovoltaic Thermal Power Plant in Kerman province

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Amiri Dogahe S.¹ MSc,
Jahanshahi Javaran E.*¹ PhD,
Abdolzadeh Dashtkhaki M.² PhD,
Sadeghi S.² PhD

How to cite this article

Amiri Dogahe S, Jahanshahi Javaran E, Abdolzadeh Dashtkhaki M, Sadeghi S. Techno-Economic Comparison of Monocrystalline and Concentrating Photovoltaic Thermal Power Plant in Kerman province. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(6):1511-1523.

¹Renewable Energies & Energy Conversion Department, Institute of Science & High Technology & Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

²Conversion & Energy Systems Engineering Department, Mechanical & Material Engineering Faculty, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

*Correspondence

Address: Graduate University of Advanced Technology, Haft Bagh Alavi Highway, Kerman.

Postal Code: 7631818356

Phone: +98 (34) 33778502

Fax: +98 (34) 33778502

e.jahanshahi@kgut.ac.ir

Article History

Received: November 12, 2018

Accepted: January 19, 2020

ePublished: June 20, 2020

ABSTRACT

In this study, techno-economic comparison of monocrystalline and concentrating photovoltaic power plants for the selected cities of Kerman province was carried out. After modeling the implied photovoltaic systems and validating the modeling results of the monocrystalline photovoltaic system with the measured data of an installed 5kW monocrystalline photovoltaic power plant at the Graduate University of Advanced Technology, daily and yearly electrical energies production analysis for both plants was presented. Then, the electrical efficiency and the performance factors, including capacity factor, final yield, reference yield and the performance ratio were determined. The economic analysis results showed that the northern cities of Kerman province had more favorable economic indicators, so internal rate of return, balanced cost of electricity, net present value, and benefit-cost ratio for the monocrystalline photovoltaic plant were 21-22.1%, 13.3-13.9 dollars per kilowatt, 2-4.2 thousand dollars, and 1.04-1.09, respectively and for the concentrating photovoltaic plant were 24.9-28.6%, 8.8-10.2 dollars per kilowatt, 17.1-30.5 thousand dollars, and 1.24-1.43, respectively. Finally, a comprehensive comparison was made between the conventional PV systems and the CPV system for two scenarios: the same capital investment cost and the same nominal installed power. Results showed that at both scenarios, the concentrating photovoltaic is superior to the monocrystalline PV plant, in a way that Kerman and Jiroft cities, as the best cities, had the net present value of 30.5 thousand dollars and 21 thousand dollars, respectively.

Keywords Concentrating Photovoltaic Thermal, Monocrystalline, Electricity, Economic

CITATION LINKS

[1] Solar energy ... [2] Design and fabrication of low concentrating second generation PRIDE ... [3] The performance analysis of the trough concentrating solar photovoltaic/thermal ... [4] Modeling of concentrating photovoltaic and thermal ... [5] Design and modeling of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system for a domestic ... [6] Electrical and thermal performance analysis for a highly concentrating photovoltaic/thermal ... [7] Feasibility and parametric evaluation of hybrid concentrated photovoltaic-thermoelectric ... [8] Parametric analysis of a nanofluid based photovoltaic thermal system, using computational fluid ... [9] Experimental investigation of using water and ethylene glycol as coolants in a photovoltaic thermal ... [10] Concentrating photovoltaic thermal (CPVT) collectors and systems: Theory, performance assessment and ... [11] Photovoltaic array performance ... [12] Solar engineering of thermal ... [13] On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power ... [14] High concentrator photovoltaics: Fundamentals, Engineering and Power ... [15] IEC 61724: Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and ... [16] Basics of engineering ... [17] Performance of photovoltaic modules of different solar ... [18] Feasibility of concentrated photovoltaic systems (CPV) in various united states geographic ... [19] Power generation technology data for integrated resource plan of South ... [20] Technical and economic assessments of grid-connected photovoltaic power plants: Iran case ... [21] Zanjan: Solar Panel Store ... [22] Tehran: Renewable Energy and Energy Efficiency Organization ... [23] Experimental and numerical studies of a U-shaped solar energy collector to track the maximum CPV/T system output by varying the flow ... [24] HCPV modules of SMALFOC design in versions for PV and PV/T ... [25] A miniature concentrating photovoltaic and thermal ... [26] Efficient, low cost dish concentrator for a CPV based cogeneration ... [27] Optimization of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system used for a domestic ...

مقایسه فنی- اقتصادی نیروگاه‌های فتوولتائیک مونوکریستال و متمرکزکننده حرارتی در استان کرمان

سامان امیری دوگانه MSc

گروه انرژی تجدیدپذیر و تبدیل انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

ابراهیم جهانشاهی جواران* PhD

گروه انرژی تجدیدپذیر و تبدیل انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

مرتضی عبدالزاده دستخاکي PhD

گروه مهندسی تبدیل و سیستم های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

صابر صادقی PhD

گروه مهندسی تبدیل و سیستم های انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده

در این مطالعه، مقایسه فنی-اقتصادی نیروگاه‌های فتوولتائیک مونوکریستال و متمرکزکننده برای چند شهر منتخب در استان کرمان انجام شد. پس از مدل‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک مورد نظر و اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی نیروگاه فتوولتائیک مونوکریستال با داده‌های اندازه‌گیری شده یک نیروگاه فتوولتائیک مونوکریستال ۵ کیلوواتی نصب شده در دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، تحلیل تولید انرژی الکتریکی روزانه و سالانه برای هر دو نیروگاه ارائه شد. سپس، راندمان و فاکتورهای عملکرد شامل ضریب ظرفیت، عملکرد نهایی، عملکرد مرجع و نسبت کارایی تعیین شده‌اند. نتایج آنالیز اقتصادی نشان داد که شهرهای شمالی استان کرمان دارای شاخص‌های اقتصادی مطلوب‌تری بود؛ به طوری که نرخ بازده داخلی، هزینه تراز شده الکتریسیته، ارزش خالص فعلی و نسبت منافع به مخارج این شاخص‌ها برای نیروگاه فتوولتائیک مونوکریستال به ترتیب، ۲۱ تا ۲۲/۱٪، ۱۳/۳ تا ۱۳/۹ دلار به ازای هر کیلووات، ۲ تا ۴/۲ هزار دلار و ۱/۰۴ تا ۱/۰۹ و برای نیروگاه فتوولتائیک متمرکزکننده به ترتیب، ۲۴/۹ تا ۲۸/۶٪، ۸/۸ تا ۱۰/۲ دلار به ازای هر کیلووات، ۱۷/۱ تا ۳۰/۵ هزار دلار و ۱/۲۴ تا ۱/۴۳ بودند. در نهایت، مقایسه جامعی بین سیستم‌های فتوولتائیک مرسوم و سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده در دو سناریوی هزینه سرمایه‌گذاری یکسان و توان نامی نصب شده یکسان انجام شد. نتایج نشان داد که در هر دو سناریو، سیستم‌های فتوولتائیک متمرکزکننده نسبت به سیستم فتوولتائیک مونوکریستال ارجحیت دارد، به نحوی که شهر کرمان و جیرفت به عنوان بهترین شهرها به ترتیب دارای ارزش خالص فعلی ۳۰/۵ هزار دلار و ۲۱ هزار دلار بودند.

کلیدواژه‌ها: فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی، مونوکریستال، الکتریسیته، اقتصادی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۹

*نویسنده مسئول: e.jahanshahi@kgut.ac.ir

مقدمه

نیاز جهانی به انرژی در سه دهه اخیر، به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرده است و پیش‌بینی‌های انجام شده مبین تداوم رشد مصرف انرژی در قرن حاضر است. هر چند که مصرف گسترده سوخت‌های

فسیلی، رشد سریع اقتصادی را در جوامع پیشرفته به ارمغان آورده است، اما آلودگی‌های زیست‌محیطی، تغییرات آب و هوایی، افزایش دمای زمین و رشد فزاینده هزینه سوخت‌های فسیلی، تمایل به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را افزایش داده است که در بین انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [1].

افزایش تقاضا برای بازار انرژی خورشیدی باعث افزایش استفاده از سیلیکون خام و در نتیجه کاهش این مواد اولیه شده است. سلول‌های فتوولتائیک (Photovoltaics) متمرکزکننده، امروزه توجه بسیاری از شرکت‌های بزرگ در زمینه فتوولتائیک را به عنوان یک جایگزین مناسب برای سلول‌های فتوولتائیک معمولی، معطوف خود کرده است؛ زیرا این تکنولوژی یکی از بهترین راه‌حل‌ها برای کاهش مصرف سیلیکون است. ایده اصلی در سلول‌های فتوولتائیک متمرکزکننده استفاده از روش‌های اپتیکی مانند لنزهای فرنل، آینه و غیره برای متمرکز کردن نور خورشید بر یک سلول کوچک موسوم به سلول خورشیدی چنداتصال است. متمرکز کردن نور، باعث افزایش شدت نور تابشی به سلول شده و از این طریق می‌توان انرژی بیشتری را از سلول به دست آورد. این مقدار انرژی دریافتی، می‌تواند با انرژی دریافتی از یک سلول بزرگ‌تر فتوولتائیک معمولی برابری کند. با کاهش سطح سلول استفاده شده و دریافت انرژی یکسان از سلول کوچک در مقایسه با سلول بزرگ، سیستم‌های فتوولتائیک متمرکزکننده مورد توجه بسیاری از کشورهای پیشرفته در زمینه انرژی قرار گرفته است [2].

محققان بسیاری به بررسی عملکرد سیستم‌های متمرکزکننده حرارتی در کشورهای مختلف پرداخته‌اند. لی و همکاران، سلول‌های با عملکرد بالا را به جای سلول‌های سنتی مورد مطالعه قرار داده و از یک بازتابنده خطی، یک سیستم بازتابی گرمای اتلافی به منظور بالاتر بردن عملکرد الکتریکی و حرارتی و همچنین از یک مکانیزم برای انتقال حرارت سیستم به منظور خنک‌سازی سلول‌ها و برای بهره‌برداری از انرژی حرارتی استفاده کردند [3]. هلمرس و همکاران، به مدل‌سازی یک سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی پرداختند. خروجی اصلی این سیستم، بازدهی الکتریکی و حرارتی است. در این مدل تنها تلفات اپتیکی وجود دارد و تلفات حرارتی توسط یک گیرنده ترکیبی استخراج می‌شود. آنها نشان دادند که با کاهش اتلافات حرارتی، بازدهی الکتریکی نیز افزایش می‌یابد و این سیستم با ضریب تمرکز ۳۰۰ به بازدهی کلی ۷۵٪ و دمای بالای ۱۶۰ درجه سلسیوس می‌رسد [4]. رنو و پتیو، یک مدل نظری از سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی برای تامین بارهای سرمایه‌ی و گرمایشی خانگی ارائه دادند که در آن به منظور استفاده از حرارت اتلافی در سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده، انرژی حرارتی در دمای بالا برای یک پمپ حرارتی جذبی، بازتابی و استفاده می‌شود. در تجزیه و تحلیل اقتصادی سرمایه اولیه ۱۱k€ و نرخ بازگشت داخلی ۱۳٪ و ارزش خالص فعلی ۱۰k€ نتیجه شد. مزیت این سیستم نسبت به سیستم سنتی فتوولتائیک، تامین دمای

در این پژوهش، مقایسه جامعی بین سیستم‌های فتوولتاییک مونوکریستال و متمرکزکننده حرارتی در دو سناریوی هزینه سرمایه‌گذاری یکسان و توان نامی نصب‌شده یکسان برای شهرهای منتخب شرکت‌های توزیع نیروی برق شمال و جنوب استان کرمان، برای اولویت‌بندی و انتخاب بهترین گزینه برای احداث نیروگاه فتوولتاییک انجام شد. لازم به ذکر است که تاکنون مقایسه فنی و اقتصادی جامعی بین سیستم‌های فتوولتاییک مونوکریستال و متمرکزکننده حرارتی در ایران، خصوصاً استان کرمان که از انرژی تابشی بالایی برخوردار است، انجام نشده است. همچنین فاکتورهای عملکرد، ضریب ظرفیت، عملکرد نهایی، عملکرد مرجع و نسبت کارایی برای اولین بار در نیروگاه‌های فتوولتاییک متمرکزکننده ارائه می‌شوند.

مدل‌سازی سیستم‌های فتوولتاییک

مدل‌سازی سیستم فتوولتاییک تخت

برای محاسبه انرژی الکتریکی تولیدی پنل‌های فتوولتاییک، نکته حائز اهمیت محاسبه دمای پنل‌ها است. برای محاسبه دمای پنل‌ها، رابطه ۱ توسط کینگ و همکاران در آزمایشگاه ملی سان‌دیا آمریکا ارائه شده است که به رابطه سان‌دیا (Sandia) مشهور است [11]:

$$T_m = I_T \times \exp(a + bV_{wind}) + T_a \quad (1)$$

در رابطه ۱، I_T تابش روی سطح شیب‌دار است که برای محاسبه آن مدل‌های متفاوتی وجود دارد. در این پژوهش از مدل ایزوتروپیک استفاده شده است که از رابطه ۲ محاسبه می‌شود [12]:

$$I_T = (R_b \times I_b) + \left(I_a \times \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \left(I \times \rho_g \times \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2)$$

در رابطه ۲، β شیب پنل، I_b تابش مستقیم، I_a تابش پراکنده، I تابش کل روی سطح افقی بوده و مقدار ρ_g برای یک سطح معمولی برابر با ۰/۲ و برای یک سطح پوشیده از برف یا آب برابر با ۰/۷ انتخاب می‌شود و فاکتور هندسی R_b نسبت تابش مستقیم روی سطح شیب‌دار به تابش مستقیم روی یک سطح افقی بوده و با استفاده از رابطه ۳ قابل محاسبه است که در این رابطه، θ زاویه برخورد اشعه و θ_z زاویه سمت‌الرأس خورشید است.

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (3)$$

همچنین در رابطه ۱، پارامترهای a و b به صورت تجربی و با توجه به نحوه پیکربندی پنل فتوولتاییک و نوع نصب آن روی زمین، پشت‌بام یا دنبال‌کننده تعیین می‌شود (جدول ۱)، T_a دمای محیط و V_{wind} سرعت باد است. پس از تعیین دمای پنل، دمای عملکردی سلول با رابطه ۴ قابل محاسبه است [11].

$$T_c = T_m + \left(\frac{I_T}{I_{T,ref}} \right) \times \Delta T_{cnd} \quad (4)$$

که در این رابطه، $I_{T,ref}$ تابش مرجع برابر با ۱۰۰۰ وات بر متر مربع است و همچنین ΔT_{cnd} با توجه به نوع پیکربندی از جدول ۱ به دست می‌آید.

خروجی مورد نیاز پمپ حرارتی جذبی تا ۹۰ درجه سلسیوس است [5]. نینگ و همکاران، با مطالعه روی یک سیستم ۳۰ کیلوواتی فتوولتاییک متمرکزکننده با تمرکز بالا، به این نتیجه رسیدند که بیشترین کارایی فتوولتاییک ۳۰٪ و بازده حرارتی نیز ۳۰٪ است که بازده کل این سیستم خورشیدی بالاتر از ۶۰٪ است. همچنین بالاترین بازده آگرژی ۳۵/۴٪ توسط این سیستم گزارش شده است [6]. رضانی و همکاران، با ترکیب یک سیستم فتوولتاییک متمرکزکننده و ژنراتور ترموالکتریک به این نتیجه رسیدند که سیستم ترکیبی بسیار کارآمدتر از سیستم فتوولتاییک متمرکزکننده است و نتایج نشان می‌دهد که سهم ژنراتور ترموالکتریک در تولید برق متناسب با نسبت تمرکز خورشیدی، افزایش می‌یابد [7]. حسین‌زاده و همکاران، یک سیستم فتوولتاییک تک‌کریستاله حرارتی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و مدل عددی سه‌بعدی و اثر پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم بر بازده الکتریکی و حرارتی با استفاده از نانوسیال اکسید روی- آب و آب خالص را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که چنانچه دمای سیال ورودی به کلکتور از ۲۰ به ۴۰ درجه سلسیوس افزایش یابد سیستم فتوولتاییک با نانوسیال دارای کاهش ۱۶/۲۱ درصدی در بازده حرارتی خواهد شد. همچنین تغییرات پارامترهای مختلف اثر اندکی بر بازده الکتریکی سیستم فتوولتاییک حرارتی داشته است؛ به نحوی که تغییرات بازدهی الکتریکی نسبت به سرعت باد، دمای محیط و تشعشع خورشید به ترتیب در بازه ۰/۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۶ نوسان خواهد داشت و افزایش نسبی بازده الکتریکی و حرارتی این سیستم با سیال کاری نانوسیال اکسید روی- آب با درصد جرمی ۱۲، نسبت به آب خالص به ترتیب ۲/۸ و ۱۲/۵۸٪ خواهد بود [8].

حسین‌زاده و همکاران، به بررسی تجربی استفاده از آب و اتیلن‌گلیکول برای خنک‌کاری سیستم فتوولتاییک حرارتی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که سیستم دارای این خنک‌کننده نسبت به سیستم معمولی، ۵/۴۱٪ توان الکتریکی خروجی بیشتری خواهد داشت و استفاده از سیال کاری آب خالص، بازده انرژی الکتریکی و حرارتی را نسبت به مخلوط آب و اتیلن‌گلیکول افزایش می‌دهد [9]. دانش‌آزریان و همکاران، به مطالعه بر سیستم فتوولتاییک متمرکزکننده حرارتی پرداختند و اثر پارامترهای نوع سلول، نوع کلکتور حرارتی، طراحی واحد متمرکزکننده، ضریب تمرکز، ردیاب، بازده الکتریکی و حرارتی، دوره بازپرداخت و هزینه بهره‌برداری را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بازده حرارتی سیستم با جمع‌کننده پارابولیک سهموی برابر با ۷۰٪ و بازده الکتریکی برابر با ۲۵٪ بوده و برای سیستم با جمع‌کننده فرنل خطی، بازده حرارتی ۶۰٪ و الکتریکی بیش از ۲۰٪ است. محدوده دمای عملیاتی سیستم با کلکتورهای صفحه‌تخت ۳۵ تا ۶۵ درجه سلسیوس، با کلکتورهای لوله خلاء، ۵۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس گزارش شد و در تجزیه و تحلیل اقتصادی هزینه تولید برق ۲/۳۷ \$/W و مجموع هزینه‌های الکتریکی و حرارتی ۸/۷ \$/W گزارش شده است [10].

پارامتر	توضیح
پیکربندی پنل	شیشه/سلول/شیشه
نحوه نصب پنل	در فضای باز روی پایه نگهدارنده
a	۰/۴۷
b	-۰/۰۵۹۴
$\Delta T_{end} (^{\circ}C)$	۳

دارد، علاوه بر این، توزیع طیفی تابش خورشید تحت تأثیر پارامترهای جوی در طول روز، ماه و سال دچار تغییرات می‌شود[۱۴]. در این پژوهش، از نسبت $\frac{n}{N}$ برای محاسبه فاکتور طیفی استفاده می‌شود که n ساعات آفتابی واقعی و N طول روز تئوری است[۱۵].

محاسبه انرژی الکتریکی سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی

انرژی الکتریکی ایده‌آل تولیدشده از هر سلول خورشیدی چنداتصال از رابطه ۱۱ محاسبه شد[۱۴].

$$P_{id} = I_{bT} \times A_{cell} \times X \times \eta_{cell} \quad (11)$$

در رابطه ۱۱، η_{cell} بازدهی سلول در شرایط استاندارد است که توسط رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود و A_{cell} مساحت هر سلول خورشیدی بر حسب متر مربع است و X غلظت موثر است که از رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود[۱۵].

$$\eta_{cell} = 0.298 + 0.014 \times \ln C + (-0.000715 + 0.0000697 \times \ln C) \times (T_c - 25^{\circ}C) \quad (12)$$

$$X = \eta_{opt} * C \quad (13)$$

در روابط ۱۲ و ۱۳، C ضریب تمرکز هندسی سیستم متمرکزکننده است که از رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود و η_{opt} بازدهی نوری متمرکزکننده است که از کاتالوگ متمرکزکننده استخراج می‌شود که برابر با ۰/۸۵ در نظر گرفته شده است[۱۵].

$$C = \frac{A_{aperture}}{A_{cell}} \quad (14)$$

در رابطه ۱۴، $A_{aperture}$ مساحت دهانه متمرکزکننده است. همان‌طور که در رابطه ۱۱ مشاهده می‌شود، اثری از فاکتورهای طیفی و حرارتی وجود ندارد که با ترکیب روابط ۹ تا ۱۴، انرژی الکتریکی تولیدی از هر سلول توسط رابطه ۱۵ بدست می‌آید[۱۵].

$$P = I_{bT} \times A_{cell} \times \eta_{cell} \times \eta_{opt} \times C \times TF \times SF \quad (15)$$

برای محاسبه انرژی واقعی این سیستم می‌بایست توان پمپ، ردیاب و بازدهی اینورتر را نیز از این مقدار کم کرد که به این اتلافات، اتلافات پارازیتی گفته می‌شود و از رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود[۱۵].

$$P_{par} = 0.023 \times A_{cell} \times C \times n_{cell} \times I_{bT} \quad (16)$$

در نهایت، انرژی الکتریکی واقعی از رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود:

$$P_{real} = P - P_{par} \quad (17)$$

محاسبه انرژی حرارتی سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی

انرژی حرارتی ایده‌آل ماژول، توسط رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود[۱۵].

$$Q_{th.id} = (1 - \eta_{pv}) \times \eta_{opt} \times C \times (I_{bT} \times f) \times A_{cell} \times n_{cell} \quad (18)$$

در فرمول ۱۸، با توجه به سیستم ردیاب غیرایده‌آل، f فاکتوری برابر با ۰/۹ است و بازدهی کلی سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده (η_{pv}) دارای رابطه‌ای است که در رابطه ۱۹ آورده شده است. همچنین k_t ضریب حرارتی توان است که نشان‌دهنده کاهش درصد برق تولیدی توسط سیستم در دمای عملیاتی است و با توجه به دمای سلول (T_c) و ضریب دمایی (σ_t) از رابطه ۲۰ قابل محاسبه است[۱۵].

$$\eta_{pv} = \eta_{cell} \times \eta_{mod} \times k_t \quad (19)$$

$$k_t = 1 + \sigma_t \times (T_c - 25) \quad (20)$$

علاوه بر این، پرتوهای خورشیدی که به سلول‌های سه‌اتصال

پس از محاسبه دمای سلول، برای محاسبه انرژی الکتریکی تولیدی، ابتدا ولتاژ و جریان تولیدی پنل‌های فتوولتائیک با استفاده از روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند[۱۳]:

$$I_{TC} = I_{STC} \times \left(\frac{I}{I_0}\right) \times (1 + \alpha \times (T_c - T_{STC})) \quad (5)$$

$$V_{TC} = V_{STC} \times (1 + \beta \times (T_c - T_{STC})) \quad (6)$$

I_{STC} و V_{STC} به ترتیب ولتاژ و جریان خروجی پنل فتوولتائیک در شرایط استاندارد (تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع و دمای ۲۵ درجه سلسیوس) هستند. α و β نیز به ترتیب ضرایب دمایی جریان و ولتاژ در شرایط استاندارد هستند که از کاتالوگ‌های هر پنل استخراج می‌شوند و I_0 میزان تابش خارج از جو است. با محاسبه ولتاژ و جریان خروجی پنل فتوولتائیک، انرژی الکتریکی تولیدی این پنل‌ها با در نظر گرفتن راندمان ۹۰ درصدی اینورتر (Power Inverter)، از رابطه ۷ محاسبه می‌شود[۱۳].

$$P_{TC} = V_{TC} \times I_{TC} \times \eta_{inv} \quad (7)$$

مدل‌سازی سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی

برای محاسبه انرژی الکتریکی تولیدی سلول‌های فتوولتائیک متمرکزکننده، نکته حائز اهمیت محاسبه فاکتور حرارتی و فاکتور طیفی آنها است که در ادامه توضیح داده خواهند شد.

فاکتور حرارتی

برای محاسبه دمای سلول‌ها از رابطه ۸ استفاده می‌شود که در آن a ضریب ویژه حرارتی متمرکزکننده بوده و برابر با ۰/۰۶ است[۱۴].

$$T_c = T_a + a * I_{bT} \quad (8)$$

در رابطه ۸، I_{bT} تابش مستقیم خورشیدی است. بیشتر کلکتورهای متمرکزکننده فقط از تابش مستقیم خورشید استفاده می‌کنند و از ردیاب برای دنبال کردن خورشید بهره می‌برند. برای کلکتورهایی که حول یک محور یا دو محور گردش می‌کنند تابش مستقیم خورشیدی از رابطه ۹ محاسبه می‌شود[۱۲].

$$I_{bT} = I_b \times R_b \quad (9)$$

از آنجایی که در بیشتر پنل‌های فتوولتائیک متمرکزکننده، از سلول‌های چنداتصال استفاده می‌شود، عملکرد الکتریکی این نوع پنل‌ها تنها با دمای سلول تغییر نمی‌کنند، بلکه تحت تأثیر فاکتوری به نام فاکتور حرارتی قرار دارند که برای محاسبه این فاکتور از رابطه ۱۰ استفاده می‌شود. γ بیشینه ضریب دمایی توان در تمرکز کارکردی است که برابر با ۰/۰۱۲- است[۱۴].

$$TF = 1 - \gamma \times (T_c - T_{STC}) \quad (10)$$

فاکتور طیفی

عملکرد سلول‌های چنداتصال وابستگی زیادی به طیف خورشید

$$LCOE = \frac{\sum_{n=0}^N \frac{C_t}{(1+d)^n}}{\sum_{n=0}^N \frac{E_t}{(1+d)^n}} \quad (۳۳)$$

در این روابط، C_t و E_t به ترتیب هزینه خالص سرمایه‌گذاری و الکتریسیته تولیدی ناشی از طرح در سال مربوطه، C هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، IG میزان مشوق‌ها و کمک‌های بلاعوض، C_{ener} میزان درآمد یا صرفه‌جویی انرژی سالانه، C_{capa} میزان درآمد یا ذخیره ظرفیتی سالانه، C_{RE} درآمد اعتباری سالانه حاصل از تولید انرژی تجدیدپذیر، C_{GHG} میزان درآمد ناشی از کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، $CO\&M$ هزینه تعمیر و نگهداری سالانه و C_{fuel} هزینه سوخت یا برق مصرفی سالانه، d نرخ تنزیل، B_t جریان نقدینگی منافع، C_t جریان نقدینگی هزینه‌های ناشی از اجرای طرح، i نرخ سود، N عمر مفید طرح (برحسب سال) و ACF درآمد سالانه پس از کسر هزینه‌ها هستند.

هزینه‌ها و درآمدها

دولت برای تشویق مردم و سرمایه‌گذاران به منظور ورود به حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر، اقدام به خرید تضمینی برق طبق تعرفه‌های مصوب نموده است. نرخ پایه خرید تضمینی برق از نیروگاه‌های مختلف مصوب سال ۱۳۹۵ و هزینه اولیه سرمایه‌گذاری، درصد هزینه‌های سالانه و همچنین متغیرهای مهم در ارزیابی فنی و اقتصادی در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به طول عمر تجهیزات اصلی اعم از پنل‌ها (۲۵ سال)، اینورترها (۱۰ سال) و خرید تضمینی برق ۲۰ ساله، تجزیه و تحلیل دوره برابر با ۲۵ سال در نظر گرفته شده است که در محاسبات مربوط به نیروگاه‌های با توان نامی یکسان، هزینه‌های کلی نیروگاه فتوولتاییک مونوکریستال برابر با ۳۸۰۶۱ دلار و برای نیروگاه فتوولتاییک متمرکزکننده برابر با ۶۲۸۷۱ دلار و در ارزیابی با هزینه اولیه یکسان در هر دو سیستم ۶۲۸۷۱ دلار در نظر گرفته شده است.

تشریح عملکرد

نمایی از نیروگاه فتوولتاییک نصب‌شده در دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته در شکل ۱ نشان داده می‌شود. این نیروگاه متشکل از دو سیستم ۵ کیلوواتی است که در این پژوهش از یک سیستم ۵ کیلوواتی داده‌برداری شده است. این سیستم شامل ۱۸ پنل مونوکریستال مدل KP280 Wp PUR است و سازه این بخش توانایی این را دارد که زاویه پنل‌های آن نسبت به سطح افق قابل تنظیم باشد که در این سیستم، زاویه شیب پنل‌ها ۳۰ درجه تنظیم شده است. در این سیستم برای هر ۹ پنل از یک اینورتر ۲/۵ کیلوواتی مدل SB2.5-SMA استفاده شده است. یک طرح کلی از سیستم فتوولتاییک متمرکزکننده در شکل ۲ آورده شده است. در این سیستم از پنل‌هایی با سلول‌های چنداتصال با توان ۶۶۰ وات مدل MagSun-TRK60 استفاده شده است. پس از تابش خورشید روی متمرکزکننده، این تابش، با ضریب تمرکز ۸۰۰ بر سلول‌های فتوولتاییک متمرکز می‌شود. تابش رسیده به سطح سلول‌ها علاوه بر تولید برق مقدار قابل توجهی حرارت نیز تولید می‌کند.

می‌رسند، دارای اتلافات حرارتی هستند که این اتلافات با رابطه ۲۱ محاسبه می‌شوند [5].

$$Q_{th,loss} = [h_c \times (T_c - T_a) + \varepsilon\sigma(T_c^4 - T_a^4)] \times A_{cell} \times n_{cell} \quad (۲۱)$$

در این رابطه، h_c ضریب انتقال حرارت جابجایی است که با لحاظ کردن سرعت باد توسط رابطه ۲۲ محاسبه می‌شود [12].

$$h_c = 2.8 + 3 \times V_{wind} \quad (۲۲)$$

حال انرژی حرارتی تولیدی واقعی توسط رابطه ۲۳ محاسبه خواهد شد.

$$Q_{th,real} = Q_{th,id} - Q_{th,loss} \quad (۲۳)$$

محاسبه دمای سیال خروجی از سیستم فتوولتاییک متمرکزکننده حرارتی

برای محاسبه دمای خروجی از سیستم فتوولتاییک متمرکزکننده از رابطه ۲۴ استفاده می‌شود [5].

$$Q_{th,real} = \dot{m} \times C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (۲۴)$$

که در این رابطه، T_{in} دمای سیال ورودی، T_{out} دمای سیال خروجی، C_p ظرفیت گرمایی ویژه سیال و \dot{m} دبی سیال ورودی به سیستم فتوولتاییک متمرکز است.

محاسبه کارایی سیستم‌های فتوولتاییک

کارایی نیروگاه‌های فتوولتاییک را با پارامترهای عملکردی آنها می‌سنجند و از نتایج حاصله برای مقایسه عملکرد آنها در مکان‌ها و شرایط آب و هوایی مختلف استفاده می‌شود. از مهم‌ترین پارامترهای عملکردی می‌توان به عملکرد نهایی، عملکرد مرجع، نسبت کارایی و ضریب ظرفیت اشاره کرد که توسط روابط ۲۵ تا ۲۸ محاسبه می‌شوند [15].

$$Y_f = \frac{E_{AC}}{PPV_{Rated}} \quad (۲۵)$$

$$Y_r = \frac{G_T}{G_{STC}} \quad (۲۶)$$

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (۲۷)$$

$$CF = \frac{Y_f}{hours} \quad (۲۸)$$

تحلیل اقتصادی

یکی از قسمت‌های اصلی هر طرح سرمایه‌گذاری، بررسی و تحلیل مالی و اقتصادی آن است. از این رو یکی از محورهای مهم مطالعات امکان‌سنجی هر پروژه‌ای، ارزیابی اقتصادی آن است. در این پژوهش به بررسی شاخص‌های مرسوم نظیر ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی، نسبت منافع به هزینه‌ها، بازگشت سرمایه ساده و هزینه ترازنده تولید برق پرداخته خواهد شد که این شاخص‌ها توسط روابط ۲۹ تا ۳۳ محاسبه می‌شوند [16].

$$NPV = -IC + \frac{\sum_{n=1}^N ACF_n}{(1+i)^n} \quad (۲۹)$$

$$NPV = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1+IRR)^n} = 0 \quad (۳۰)$$

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{B_t}{(1+d)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{C_t}{(1+d)^n}} \quad (۳۱)$$

$$SP = \frac{C-IG}{(C_{ener}+C_{capa}+C_{RE}+C_{GHG})-(C_{O\&M}+C_{fuel})} \quad (۳۲)$$

مرجع	مقدار	پارامتر
		هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (\$/kW)
[17]	۱۴۸۱	با استفاده از ماژول مونوکریستال
[18]	۲۰۷۰	با استفاده از سلول چنداتصال و متمرکزکننده
		هزینه تعمیر و نگهداری (\$/kW-Year)
[19]	۱۹/۸	در شیب ثابت
[17]	۲۲/۶	با ردیاب تک‌محوره
[19]	۲۵	با ردیاب دو محوره
[20]	۵٪ از هزینه اولیه	ارزش اسقاطی
		هزینه ردیاب (\$/kW)
[17]	۳۹۸	تک محوره
[17]	۶۹۲	دو محوره
[21]	۴۰۰	هزینه اینورتر (\$/kW)
[20]	۰/۲۵	نرخ بیمه سالانه (%)
[20]	۰/۵	نرخ کاهش توان خروجی سالانه (%)
[20]	۵	نرخ افزایش فروش برق (%)
		خرید برق از مزعه خورشیدی (ریال بر کیلووات‌ساعت)
[22]	۷۰۰۰	کمتر از ۱۰۰ کیلووات
[22]	۸۰۰۰	کمتر از ۲۰ کیلووات
[20]	۱۵	نرخ تورم
[20]	۲۰	نرخ تنزیل

پس از دریافت و اعتبارسنجی داده‌های هواشناسی مورد نیاز، نتایج مدل‌سازی سیستم فتوولتائیک مونوکریستال نصب‌شده در دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته ارائه شده و با داده‌های تجربی این نیروگاه مقایسه و صحت‌سنجی شدند تا بتوان از مدل ارائه‌شده برای سایر شهرها که داده‌های تجربی برای آنها موجود نیست استفاده کرد. پس از آن میزان انرژی الکتریکی تولیدی سالانه و همچنین بازدهی و کارایی برای شهرهای منتخب حوزه شرکت توزیع نیروی برق شمال استان کرمان (کرمان، رفسنجان، زرنده و راور) و شرکت توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان (بم، ارزوئیه، سیرجان و جیرفت) با استفاده از مدل اعتبارسنجی‌شده ذکر شدند. سپس، نتایج مربوط به میزان انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدی روزانه و سالانه سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده برای شهرهای منتخب استان ارائه شدند. در ادامه، نتایج مربوط به ارزیابی اقتصادی سیستم‌های ذکرشده گزارش شدند. لازم به ذکر است که مقایسه نیروگاه‌های فتوولتائیک مونوکریستال و متمرکزکننده از دو منظر، توان نامی یکسان و هزینه اولیه یکسان مورد بررسی قرار گرفته‌اند و در بخش توان نامی یکسان از سه ماژول فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی هرکدام با ظرفیت ۶۰۰ وات به مدل MagSun-TRK60 و ۶۶ ماژول مونوکریستال با ظرفیت ۳۰۰ وات به مدل Suntech-STP300 در نظر گرفته شده است. تمام ارزیابی‌ها به‌صورت ساعتی انجام شده است ولی نتایج ارائه‌شده به‌صورت روزانه و سالانه هستند.

اعتبارسنجی و ارزیابی فنی- اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک مونوکریستال در شهرهای منتخب استان کرمان

اعتبارسنجی

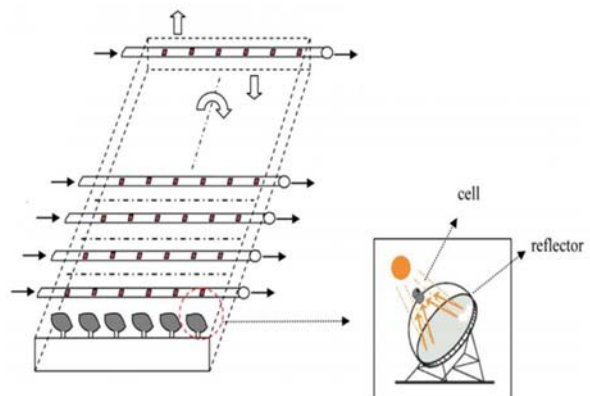
برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک مونوکریستال، داده‌های انرژی الکتریکی ثبت‌شده نیروگاه فتوولتائیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان در بازه یک‌ساله استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مدل ارائه‌شده و داده‌های جمع‌آوری‌شده و همچنین میزان خطای نسبی در جدول ۳ آورده شده است. غیر از ۲۱ آوریل تا ۲۱ می ۲۰۱۸، که به دلیل شرایط جوی خاص تابش کمتری در مقایسه با میانگین داده‌ها ثبت شده است، خطای نسبی بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده در محدوده قابل قبولی قرار دارند. از این رو، در ادامه پژوهش، این مدل اعتبارسنجی‌شده مبنای محاسبات سیستم‌های فتوولتائیک مونوکریستال قرار گرفت.

انرژی الکتریکی تولیدی سالانه

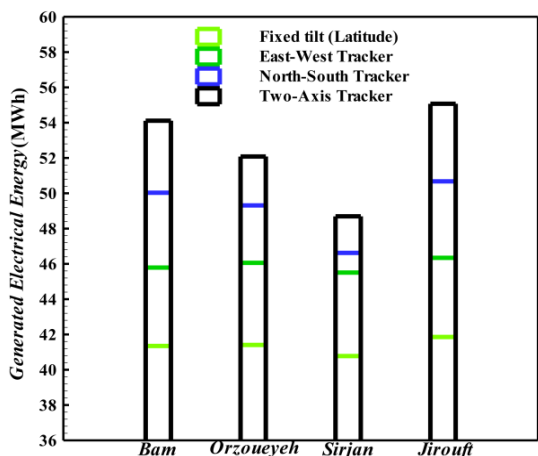
انرژی الکتریکی تولیدی سالانه در شیب ثابت و انواع مختلف ردیاب‌ها، برای شهرهای منتخب حوزه شرکت توزیع نیروی برق شمال استان کرمان (کرمان، رفسنجان، زرنده و راور) و شرکت توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان (بم، ارزوئیه، سیرجان و جیرفت)، در نمودارهای ۱ و ۲ آورده شده است. بیشترین تولید انرژی الکتریکی سالانه توسط شهرهای شمال استان کرمان بود به‌نحوی که توسط



شکل ۱) تصویری از نیروگاه خورشیدی دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته



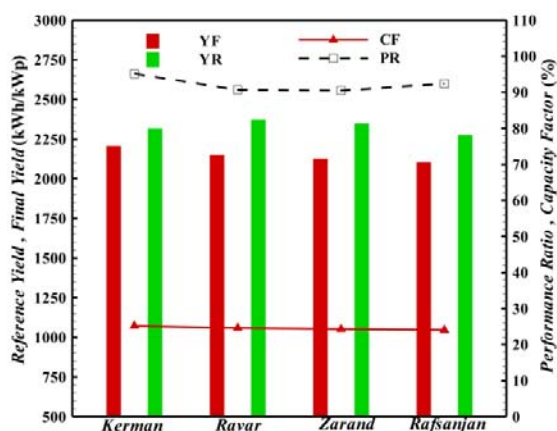
شکل ۲) شماتیکی از نیروگاه فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی [5]



نمودار ۲) انرژی الکتریکی تولیدی سالانه در شهرهای جنوب استان کرمان

پارامترهای کارایی

پارامترهای عملکرد و کارایی نیروگاه فتوولتاییک مونوکریستال برای شهرهای منتخب حوزه شرکت توزیع نیروی برق شمال استان کرمان (کرمان، رفسنجان، زرنده و راور) و شرکت توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان (بم، ارزوئیه، سیرجان و جیرفت)، در نمودارهای ۳ و ۴ آورده شده است. ضریب ظرفیت در شهرهای شمال استان کرمان، بین ۲۳/۹ تا ۲۵/۲٪ و شهرهای جنوب استان کرمان بین ۲۳/۵ تا ۲۴/۲٪ و همچنین نسبت کارایی در شهرهای شمال استان کرمان بین ۹۰ تا ۹۵/۲٪ و شهرهای جنوب استان کرمان بین ۹۰ تا ۹۴/۱٪، بود. این نتایج نشان می‌دهد که شهرهای شمال استان کرمان (که دارای میزان انرژی الکتریکی بیشتری بودند)، شرایط مساعدتری برای احداث نیروگاه فتوولتاییک مونوکریستال داشتند؛ به نحوی که در بین شهرهای شمال استان کرمان، شهر کرمان و در بین شهرهای جنوب استان کرمان، شهر جیرفت دارای بیشترین ضریب ظرفیت و نسبت عملکرد بودند و بیشتر بودن این مقادیر به دلیل بالاتر بودن عملکرد نهایی در این شهرها است.



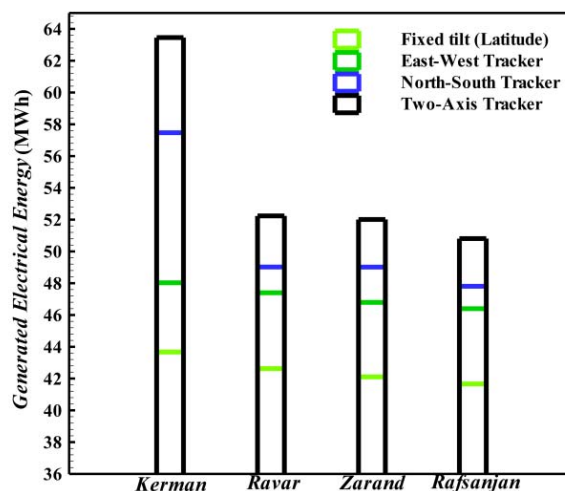
نمودار ۳) پارامترهای عملکردی در شهرهای شمال استان کرمان

ردیاب دو محوری بین ۵۱/۵ تا ۶۳/۵ مگاوات ساعت در سال و در شیب ثابت بین ۴۲ تا ۴۴ مگاوات ساعت در سال است؛ در حالی که این مقادیر برای شهرهای منتخب جنوب استان کرمان توسط ردیاب دو محوری، حدوداً بین ۴۸/۵ تا ۵۴/۵ مگاوات ساعت در سال و در شیب ثابت حدوداً بین ۴۱ تا ۴۲ مگاوات ساعت در سال است. در بین شهرهای شمال استان کرمان، شهر کرمان و در بین شهرهای جنوب استان کرمان، شهر جیرفت دارای بیشترین انرژی الکتریکی تولیدی بودند. به طور کلی به دلیل عمودی بودن تابش در شهرهای استان کرمان، انرژی الکتریکی تولیدی در سال توسط ردیاب شمالی- جنوبی نسبت به ردیاب شرقی- غربی بیشتر بود. همچنین دلیل افزایش انرژی الکتریکی تولیدی توسط ردیاب دو محوره، افزایش تابش دریافتی است.

جدول ۳) مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی نیروگاه فتوولتاییک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته در سال ۲۰۱۸ میلادی

دوره زمانی	خطای نسبی	نتایج اندازه‌گیری شده (کیلووات ساعت)	نتایج شبیه‌سازی شده (کیلووات ساعت)
۲۲ Dec - ۲۰ Jan	۳/۲۹	۶۸۰/۸	۶۵۸/۳
۲۱ Jan - ۱۹ Feb	۷/۸۳	۶۹۴/۴	۷۴۸/۸
۲۰ Feb - ۲۰ Mar	۲/۷۰	۷۶۲/۸	۷۸۳/۴
۲۱ Mar - ۲۰ Apr	۳/۸۷	۸۵۰/۲	۸۱۷/۲
۲۱ Apr - ۲۱ May	۱۳/۶۸	۷۸۲/۷	۸۸۹/۸
۲۲ May - ۲۱ Jun	۶/۶۹	۸۲۸/۸	۸۸۴/۳
۲۲ Jun - ۲۲ Jul	۳/۰۹	۹۲۹/۶	۹۵۸/۴
۲۳ Jul - ۲۲ Aug	۹/۱	۹۱۸/۷	۱۰۰۲
۲۳ Aug - ۲۲ Sep	۹/۴۵	۹۰۹/۶	۹۹۵/۶
۲۳ Sep - ۲۲ Oct	۸/۴۵	۸۲۱/۲	۸۹۰/۳

Relative error: ۶/۸۷ :MBE :۹/۷۵ :RMSE :۰/۳۸ :MPE



نمودار ۱) انرژی الکتریکی تولیدی سالانه در شهرهای شمال استان کرمان

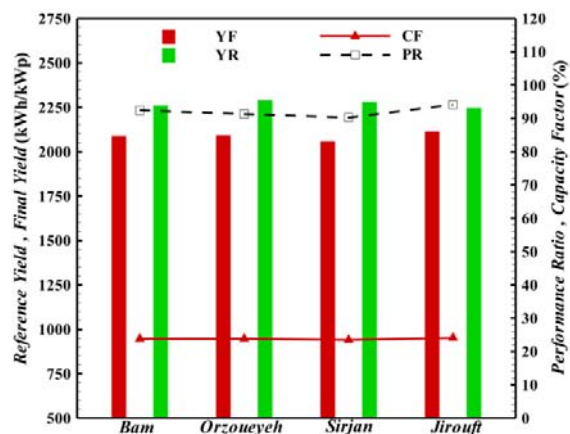
۵/۲ بوده و نشان دهنده این مساله است که در جایی که ارزش خالص فعلی ارزش عددی بیشتری دارد، دوره بازگشت سرمایه کمتری خواهد داشت. در بین شهرهای شمال استان کرمان، شهر کرمان با ۴/۸۵ سال و در بین شهرهای جنوب استان کرمان، شهر جیرفت با ۵/۰۶ سال، دارای کمترین دوره بازگشت سرمایه بودند. نتایج نشان می‌دهد که در شهرهای با انرژی الکتریکی تولیدی بیشتر، ارزش خالص فعلی به مراتب افزایش یافته و به تبع آن دوره بازگشت سرمایه کمتری به دست خواهد آمد. این موارد در حالی است که هزینه تراز شده تولید برق نیز با افزایش انرژی الکتریکی تولیدی کمتر خواهد شد. در ضمن قابل ذکر است که برای رسیدن به نقطه سر به سر نیاز به تولید ۲۱۵ مگاوات ساعت برق است، همچنین سوددهی بلندمدت برای شهرهای مختلف در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است.

اعتبارسنجی و ارزیابی فنی- اقتصادی سیستم فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی در شهرهای منتخب استان کرمان

برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی نیروگاه فتوولتائیک متمرکزکننده حرارتی، به دلیل عدم وجود داده‌های تجربی، تنها می‌توان با استفاده از بازدهی الکتریکی و حرارتی نیروگاه‌های مشابه به این امر پرداخت (جدول ۶).

انرژی الکتریکی تولیدی روزانه

انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدی روزانه برای شهرهای کرمان و بم به عنوان نمونه در نمودارهای ۵ و ۶ آورده شده است. شهر کرمان در ماه‌های سرد سال انرژی الکتریکی تولیدی بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلووات ساعت در روز و انرژی حرارتی تولیدی ۲۵۰ تا ۵۰۰ کیلووات ساعت در روز را دارد. این در حالی است که شهر بم در این ماه‌ها انرژی الکتریکی تولیدی بین ۱۴۰ تا ۲۲۰ کیلووات ساعت در روز و انرژی حرارتی تولیدی برابر با شهر کرمان را دارد. همچنین، شهر کرمان در ماه‌های گرم سال انرژی الکتریکی تولیدی ۲۵۰ تا ۳۹۰ کیلووات ساعت در روز و انرژی حرارتی ۵۰۰ تا ۶۹۰ کیلووات ساعت در روز را دارد؛ در حالی که این مقادیر برای شهر بم برای انرژی الکتریکی تولیدی بین ۲۵۰ تا ۳۳۰ کیلووات ساعت در روز و انرژی حرارتی تولیدی بین ۵۰۰ تا ۶۳۰ کیلووات ساعت در روز بود. انرژی الکتریکی تولیدی روزانه، در بیشترین حالت ممکن در شهرهای کرمان و بم به ترتیب برابر با ۳۸۸ و ۳۳۶ کیلووات ساعت بود. این مقادیر برای انرژی حرارتی تولیدی روزانه، در بیشترین حالت ممکن در شهرهای کرمان و بم به ترتیب برابر با ۶۸۸ و ۶۳۴ کیلووات ساعت خواهد بود.



نمودار ۴) پارامترهای عملکردی در شهرهای جنوب استان کرمان

ارزیابی اقتصادی

نتایج نسبت منافع به مخارج، هزینه تراز شده تولید برق، ارزش خالص فعلی، دوره بازگشت سرمایه ساده و نرخ بازده داخلی در شهرهای منتخب حوزه شرکت توزیع نیروی برق شمال استان کرمان (کرمان، رفسنجان، زرنده و راور) و شهرهای منتخب شرکت توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان (بم، ارزوئیه، سیرجان و جیرفت) در جدول‌های ۴ و ۵ آورده شده است. شهرهای شمال استان کرمان با هزینه تراز شده تولید برق ۱۳/۳ تا ۱۳/۹ سنت به ازای هر کیلووات ساعت و شاخص منافع به مخارج بین ۱/۰۴ تا ۱/۰۹ و نرخ بازده داخلی بین ۲۱ تا ۲۲٪، از لحاظ اقتصادی نسبت به شهرهای جنوب استان کرمان با هزینه تراز شده تولید برق ۱۳/۸۹ تا ۱۴/۲۶ سنت به ازای هر کیلووات ساعت و شاخص منافع به مخارج بین ۱/۰۲ تا ۱/۰۵ و نرخ بازده داخلی بین ۲۰/۵ تا ۲۱/۱۲٪، ارجحیت دارند؛ این در حالی است که تمام شهرهای مورد نظر به دلیل داشتن نرخ بازده داخلی بالای ۲۰٪ از نظر سوددهی قابل توجه بوده و همچنین شاخص منافع به مخارج در تمام شهرها عددی بیشتر از یک است. در بین شهرهای شمال استان کرمان، شهر کرمان و در بین شهرهای جنوب استان کرمان، شهر جیرفت دارای کمترین هزینه تراز شده تولید برق بود.

شهرهای شمال استان کرمان دارای ارزش عددی بیشتری در بخش ارزش خالص فعلی، نسبت به شهرهای جنوب استان کرمان، هستند. همچنین دوره بازگشت سرمایه در شهرهای شمال استان کرمان بین ۴/۸۵ تا ۵/۰۸ سال و در شهرهای جنوب استان کرمان بین ۵/۰۶ تا

جدول ۴) پارامترهای اقتصادی در شهرهای شمال استان کرمان

شهر	SP (Year)	B/C	LCOE (c\$/Kwh)	IRR (%)	سودآوری (10³\$)
کرمان	۴/۸۵	۱/۰۹	۱۳/۳	۲۲/۱	۲۰۷
رفسنجان	۵/۰۸	۱/۰۴	۱۳/۹	۲۱	۱۹۱
روار	۴/۹	۱/۰۷	۱۳/۶	۲۱/۵	۱۹۹
زرنده	۵	۱/۰۵	۱۳/۸	۲۱/۲	۱۹۵

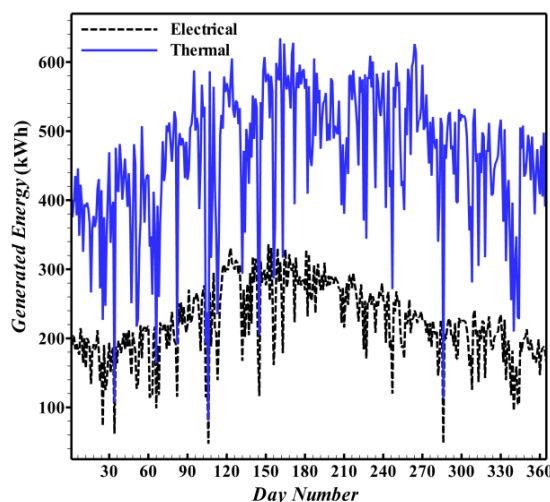
شهر	SP (Year)	B/C	LCOE (c\$/Kwh)	IRR (%)	سودآوری (10 ³ \$)
بم	۵/۱۲	۱/۰۳۸	۱۴/۰۶	۲۰/۸۵	۱۸۹/۴
ارزوئیه	۵/۱۱	۱/۰۴	۱۴/۰۴	۲۰/۸۸	۱۸۹/۹
سیرجان	۵/۲	۱/۰۲	۱۴/۲۶	۲۰/۵	۱۸۴/۹
جیرفت	۵/۰۶	۱/۰۵	۱۳/۸۹	۲۱/۱۲	۱۹۳/۴

جدول (۶) مقایسه نتایج مطالعه حاضر و سایر پژوهش‌ها

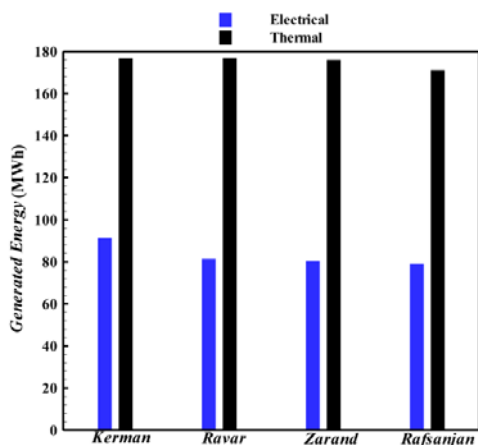
ویژگی	مطالعه حاضر					
	[27]	[26]	[25]	[24]	[23]	کرمان
فاکتور تمرکز	۹۰۰	۱۵۰	۵۰۰	۴۸۰	۲۲	۸۰۰
حداکثر راندمان الکتریکی	۲۲	۲۱	۲۰	۲۲	-۲۴	۲۳/۳۶
حداکثر راندمان دمایی	۷۰	۵۰	۶۰	۴۷	-۴۸	۵۲/۸۶
بهره‌وری کل	۸۸	۷۰	۸۰	۷۰		۷۶/۲۲

انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدی سالانه

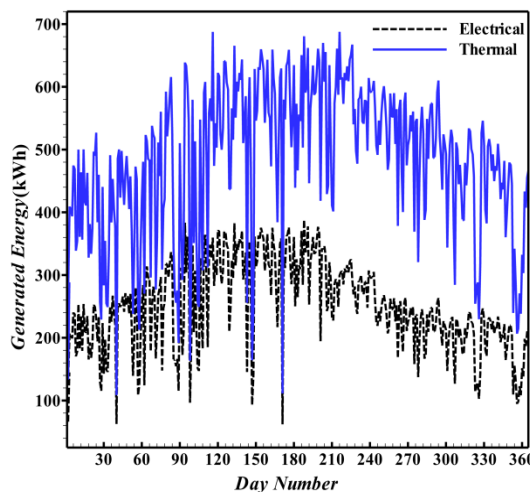
انرژی الکتریکی تولیدی سالانه سیستم‌های فتوولتاییک متمرکزکننده، برای شهرهای منتخب حوزه شرکت توزیع نیروی برق شمال استان کرمان (کرمان، رفسنجان، زرد و راور) و شرکت توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان (بم، ارزوئیه، سیرجان و جیرفت)، در نمودارهای ۷ و ۸ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که شهرهای شمال استان کرمان با تولید انرژی الکتریکی سالانه بین ۷۹ تا ۹۱ مگاوات‌ساعت در سال و انرژی حرارتی سالانه بین ۱۷۱ تا ۱۷۷ مگاوات‌ساعت در سال، نسبت به شهرهای جنوب استان کرمان با تولید انرژی الکتریکی سالانه ۷۶ تا ۸۲ مگاوات‌ساعت در سال و انرژی حرارتی ۱۶۷ تا ۱۶۹ مگاوات‌ساعت در سال، دارای شرایط بهتری از لحاظ تولید انرژی سالانه هستند. این در حالی است که در شمال (شهرهای کرمان و راور) و در جنوب استان (شهرهای جیرفت و بم) به نسبت دارای تولید انرژی بیشتری هستند. در مقایسه کلی، شهرهای شمالی استان به دلیل داشتن تابش مستقیم بیشتر نسبت به شهرهای جنوبی دارای انرژی الکتریکی تولیدی بیشتری بودند.



نمودار (۵) انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدی روزانه در شهر بم

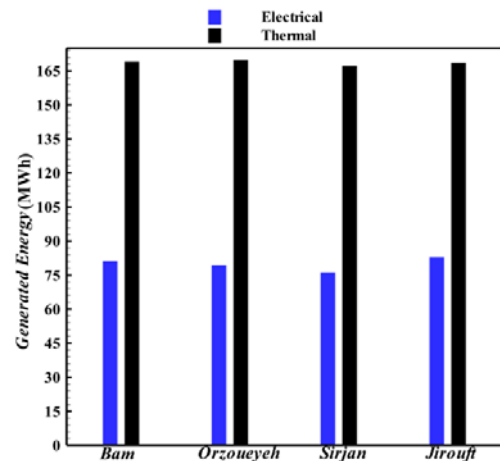


نمودار (۷) انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدی سالانه در شهرهای شمال استان کرمان



نمودار (۶) انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدی روزانه در شهر کرمان

اقتصادی نسبت به شهرهای جنوب استان کرمان با هزینه تراشده تولید برق ۹/۷ تا ۱۰/۶ سنت به ازای هر کیلووات ساعت و شاخص منافع به مخارج بین ۱/۱۹ تا ۱/۳ و نرخ بازده داخلی بین ۲۴ تا ۲۶٪، ارجحیت دارند. در بین شهرهای شمال استان کرمان، شهر کرمان و در بین شهرهای جنوب استان کرمان، شهر جیرفت دارای کمترین هزینه تراشده تولید برق بودند. شهرهای شمال استان کرمان دارای ارزش عددی بیشتری در بخش ارزش خالص فعلی، نسبت به شهرهای جنوب استان کرمان، هستند. همچنین دوره بازگشت سرمایه در شهرهای شمال استان کرمان بین ۳/۸ تا ۴/۳۶ سال و در شهرهای جنوب استان کرمان بین ۴/۱۷ تا ۴/۵۲ بوده و در بین شهرهای شمال استان کرمان، شهر کرمان و در بین شهرهای جنوب استان کرمان، شهر جیرفت دارای کمترین دوره بازگشت سرمایه بودند. قابل ذکر است که برای رسیدن به نقطه سر به سر نیاز به تولید ۳۵۵ مگاوات ساعت برق است، همچنین سوددهی بلندمدت برای شهرهای مختلف در جدول های ۷ و ۸ آورده شده است.



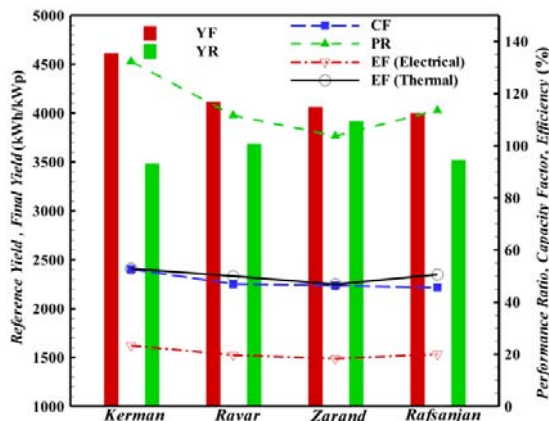
نمودار ۸) انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدی سالانه در شهرهای جنوب استان کرمان

بازدهی الکتریکی و حرارتی سالانه و پارامترهای کارایی

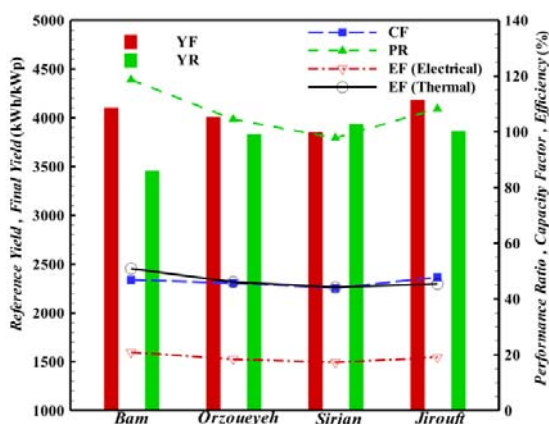
پارامترهای عملکردی شامل عملکرد نهایی، عملکرد مرجع، نسبت کارایی و ضریب ظرفیت و همچنین بازدهی الکتریکی و حرارتی، برای شهرهای منتخب حوزه شرکت توزیع نیروی برق شمال استان کرمان (کرمان، رفسنجان، زرنده و راور) و شرکت توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان (بم، ارزوئیه، سیرجان و جیرفت)، در نمودارهای ۹ و ۱۰ آورده شده است. شهرهای شمال استان کرمان دارای ضریب ظرفیت بین ۴۵ تا ۵۲٪، نسبت کارایی ۱۱۱ تا ۱۳۲٪، بازدهی الکتریکی بین ۱۸ تا ۲۳٪ و بازدهی حرارتی بین ۴۶ تا ۵۳٪ هستند و شهرهای جنوب استان کرمان دارای ضریب ظرفیت بین ۴۳ تا ۴۷٪، نسبت کارایی ۹۷ تا ۱۱۸٪، بازدهی الکتریکی بین ۱۷ تا ۲۱٪ و بازدهی حرارتی بین ۴۵ تا ۵۱٪ بودند. لازم به ذکر است که در این سیستمها به دلیل پایین بودن ضریب افت توان با دما به هر میزان که تابش دریافتی بیشتر شود، شاهد افزایش بازدهی الکتریکی خواهیم بود که در سیستمهای فتوولتاییک مونوکریستال به دلیل بالا بودن این ضریب خلاف این نتایج حاصل می شود. در حالت کلی شهرهای شمال استان شرایط بهتری داشته و در بین شهرهای شمال استان کرمان، شهر کرمان و در بین شهرهای جنوب استان کرمان، شهر بم دارای نتایج مطلوبتری بودند. بیشتر بودن مقادیر ضریب ظرفیت و نسبت عملکرد در شهرهای شمالی استان به دلیل بالاتر بودن عملکرد نهایی بوده و بیشتر بودن بازدهی الکتریکی و حرارتی نیز به دلیل داشتن تابش مستقیم بیشتر و به تبع آن تولید انرژی الکتریکی و حرارتی بیشتر در این شهرها است.

ارزیابی اقتصادی

نتایج نسبت منافع به مخارج، هزینه تراشده تولید برق، ارزش خالص فعلی، دوره بازگشت سرمایه ساده و نرخ بازده داخلی در شهرهای منتخب استان کرمان در جدول های ۷ و ۸ آورده شده است. شهرهای شمال استان کرمان با هزینه تراشده تولید برق ۸/۸ تا ۱۰/۲ سنت به ازای هر کیلووات ساعت و شاخص منافع به مخارج بین ۱/۲۴ تا ۱/۴۳ و نرخ بازده داخلی بین ۲۴/۹ تا ۲۸/۶٪، از لحاظ



نمودار ۹) پارامترهای عملکردی و بازدهی نیروگاه فتوولتاییک متمرکزکننده در شهرهای شمال استان کرمان



نمودار ۱۰) پارامترهای عملکردی و بازدهی نیروگاه فتوولتاییک متمرکزکننده در شهرهای جنوب استان کرمان

جدول ۷) پارامترهای اقتصادی در شهرهای شمال استان کرمان

شهر	SP (Year)	B/C	LCOE (c\$/Kwh)	IRR (%)	سودآوری (10 ³ \$)
کرمان	۳/۸	۱/۴۳	۸/۸	۲۸/۶	۵۳۰
رفسنجان	۴/۳۶	۱/۲۴	۱۰/۲	۲۴/۹	۴۳۵
روار	۴/۲۴	۱/۲۷	۹/۸۹	۲۵/۶	۴۵۳
زرنند	۴/۲۹	۱/۲۶	۱۰/۰۲	۲۵/۲۹	۴۴۵

جدول ۸) پارامترهای اقتصادی در شهرهای جنوب استان کرمان

شهر	SP (Year)	B/C	LCOE (c\$/Kwh)	IRR (%)	سودآوری (10 ³ \$)
بم	۴/۲۵	۱/۲۷	۹/۹۱	۲۵/۵	۴۵۱
ارزوئیه	۴/۳۵	۱/۲۴	۱۰/۱۶	۲۴/۹	۴۳۶
سیرجان	۴/۵۲	۱/۱۹	۱۰/۶	۲۴	۴۱۲
جیرفت	۴/۱۷	۱/۳	۹/۷	۲۶	۴۶۴

به ۱۲۶٪ رسید. همچنین، به هر میزان که توان تولیدی بیشتر می‌شود، ارزش خالص فعلی و نرخ بازده داخلی نیز بیشتر شد. در بین شهرهای شمال استان کرمان، شهر کرمان و در بین شهرهای جنوب استان کرمان، شهر جیرفت دارای بیشترین ارزش خالص فعلی و به تبع آن نرخ بازده داخلی بالاتری بود. به نحوی که شهر کرمان دارای نرخ بازده داخلی در نیروگاه‌های فتوولتاییک متمرکزکننده حرارتی و نیروگاه‌های فتوولتاییک با پنل مونوکریستال به ترتیب برابر با ۲۸/۵۶٪، ۲۲/۱٪ و شهر جیرفت نیز به ترتیب برابر با ۲۶/۰۱٪ و ۲۱/۱۲٪ بودند.

مقایسه نیروگاه‌های فتوولتاییک با شرایط اولیه متفاوت

توان تولیدی، ارزش خالص فعلی و نرخ بازده داخلی را برای نیروگاه‌های با توان نامی یکسان برابر با ۱۹/۸ کیلووات در جدول ۹ و برای نیروگاه‌های با هزینه اولیه یکسان (نیروگاه متمرکزکننده حرارتی با توان نامی ۱۹/۸ کیلوواتی، نیروگاه مونوکریستال با توان نامی ۳۲/۷ کیلووات) در جدول ۱۰، ارایه شد.

جدول ۹) مقایسه نیروگاه‌ها با توان نامی یکسان

شهر	سیستم	IRR (%)	NPV (10 ³ \$)	انرژی تولیدشده سالانه (MWh)
کرمان	Mono	۲۲/۱	۴/۲	۴۳/۶
	CPV	۲۸/۵	۳۰	۹۱/۳
رفسنجان	Mono	۲۱	۲	۴۱/۶
	CPV	۲۴/۹	۱۷	۷۹/۲
روار	Mono	۲۱/۵	۳/۱	۴۲/۶
	CPV	۲۵/۶	۱۹	۸۱/۴
زرنند	Mono	۲۱/۲	۲/۵	۴۲/۱
	CPV	۲۵/۲	۱۸	۸۰/۴
بم	Mono	۲۰/۸	۱/۷	۴۱/۳
	CPV	۲۵/۵	۱۹	۸۱/۲
ارزوئیه	Mono	۲۰/۹	۱/۷	۴۱/۴
	CPV	۲۴/۹	۱۷	۷۹/۳
سیرجان	Mono	۲۰/۵	۱	۴۰/۷
	CPV	۲۴	۱۴	۷۶/۲
جیرفت	Mono	۲۱/۱	۲/۲	۴۱/۸
	CPV	۲۶	۲۱	۸۲/۸

جدول ۱۰) مقایسه نیروگاه‌ها با هزینه سرمایه‌گذاری یکسان

شهر	سیستم	IRR (%)	NPV (10 ³ \$)	انرژی تولیدشده سالانه (MWh)
کرمان	Mono	۲۲/۰۸	۷	۷۲/۰۵
	CPV	۲۸/۵۶	۳۰	۹۱/۳
رفسنجان	Mono	۲۰/۹۹	۳/۳	۶۸/۷۴
	CPV	۲۴/۸۹	۱۷	۷۹/۲
روار	Mono	۲۱/۵۲	۵/۱	۷۰/۳۳
	CPV	۲۵/۵۹	۱۹	۸۱/۴
زرنند	Mono	۲۱/۲۴	۴/۱	۶۹/۴۷
	CPV	۲۵/۲۸	۱۸	۸۰/۴
بم	Mono	۲۰/۸۳	۲/۷	۶۸/۲۲
	CPV	۲۵/۵۴	۱۹	۸۱/۲
ارزوئیه	Mono	۲۰/۸۶	۲/۸	۶۸/۳۲
	CPV	۲۴/۹۳	۱۷	۷۹/۳
سیرجان	Mono	۲۰/۵۱	۱/۷	۶۷/۲۸
	CPV	۲۳/۹۸	۱۴	۷۶/۲
جیرفت	Mono	۲۱/۱	۳/۷	۶۹/۰۶
	CPV	۲۶/۰۱	۲۱	۸۲/۸

نتیجه‌گیری

ابتدا، نتایج مدل‌سازی سیستم فتوولتاییک نصب‌شده در دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته ارایه و با داده‌های تجربی مقایسه و صحت‌سنجی شد تا بتوان از مدل ارایه‌شده برای

برای نیروگاه‌های با توان نامی یکسان و هزینه اولیه یکسان، در تمام شهرها توان تولیدی نیروگاه متمرکزکننده حرارتی بیشتر از نیروگاه‌های با پنل مونوکریستال بود، با این تفاوت که در مقایسه بین نیروگاه‌های با توان نامی یکسان مشاهده می‌شود که انرژی الکتریکی تولیدی نیروگاه‌های متمرکزکننده حرارتی در اکثر شهرها حدود ۲۰٪ بیشتر از نیروگاه فتوولتاییک مونوکریستال بود؛ در حالی که این مقدار برای نیروگاه‌های با هزینه اولیه یکسان نهایتاً

اقتصادی برای کلیه سیستم‌های بررسی شده از دو منظر با توان نامی یکسان ۱۹/۸ کیلوواتی و با هزینه اولیه یکسان، پرداخته شد. بر اساس مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل اقتصادی، پارامترهای فنی و اقتصادی به‌طور خلاصه در جدول ۱۱ آورده شده است که به‌صورت زیر نیز بیان می‌شود.

سایر شهرها که داده‌های تجربی برای آنها موجود نیست، استفاده کرد. پس از اعتبارسنجی مدل ارائه شده، میزان انرژی الکتریکی تولیدی روزانه و سالانه و همچنین بازدهی و کارایی برای شهرهای منتخب حوزه شرکت‌های توزیع نیروی برق شمال و جنوب استان کرمان با استفاده از مدل حاضر ذکر شد. در نهایت، به ارزیابی

جدول ۱۱) پارامترهای فنی و اقتصادی در شهرهای استان کرمان

شهرهای استان کرمان	نوع نیروگاه	انرژی الکتریکی تولیدی (مگاوات ساعت در سال)	دوره بازگشت سرمایه (سال)	هزینه تراز شده تولید الکتریسیته (c\$/Kwh)	ضریب ظرفیت (%)	نسبت عملکرد (%)
شهرهای شمالی	مونوکریستال	۴۱/۶ تا ۴۳/۶	۵/۸ تا ۴/۸۵	۱۳/۳ تا ۱۳/۹	۲۴/۰۲ تا ۲۵/۱۷	۹۵/۱۷ تا ۹۰/۴۹
شهرهای جنوبی	مونوکریستال	۴۰/۷ تا ۴۱/۸	۵/۶ تا ۵/۲	۱۳/۸۹ تا ۱۴/۲۶	۲۳/۰۵ تا ۲۴/۱۳	۹۵/۱ تا ۹۰/۲۹
شهرهای جنوبی	متمرکزکننده	۷۶/۲ تا ۸۲/۸	۴/۱۷ تا ۴/۵۲	۹/۷ تا ۱۰/۶	۴۳/۹۶ تا ۴۷/۷۶	۹۷/۷۶ تا ۱۱۸/۶۸

۱۰/۶ سنت دلار به‌ازای هر کیلووات ساعت است.

تشکر و قدردانی: بدین‌وسیله مراتب تقدیر و تشکر از دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان و شرکت توزیع نیروی برق جنوب استان کرمان اعلام می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در هیچ نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. همچنین محتویات علمی و ادبی این مقاله نیز مستخرج از فعالیت علمی نویسندگان است.

تعارض منافع: نویسندگان این مقاله اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تعارض منافی با نهاد یا سازمانی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: سامان امیری دوگانه (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ ابراهیم جهانشاهی جواران (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۲۵٪)؛ مرتضی عبدالزاده دشتخاکی (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۲۵٪)؛ صابر صادقی (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی (۱۰٪).

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

فهرست علائم

A	مساحت (m ²)
SF	فاکتور طیفی
TF	فاکتور حرارتی
X	غلظت موثر
Q	انرژی حرارتی (kWh)
I	شدت تابش ($\frac{W}{m^2}$)
β	شیب صفحه، °
γ	بیشینه ضریب دمایی تحت تمرکز
σ	ثابت استفان بولتزمن ($\frac{W}{k^4 \times m^2}$)
σ_t	ضریب دمایی (%/°C)
ϵ	ضریب انتشار
ρ	ضریب انعکاس
η	راندمان (%)
زیرنویس	
Bt	مستقیم روی سطح شیب‌دار
Bn	مستقیم نرمال

در مطالعه تجربی، اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین انرژی الکتریکی تولیدی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در مدت داده‌برداری مشاهده نشد به‌نحوی که درصد خطاهای RE، RMSE، MBE و MPE به‌ترتیب برابر ۶/۸۱، ۹/۷۵، ۶/۹۷ و ۵/۳۸٪ است. عملکرد نهایی در سیستم‌های فتوولتاییک مونوکریستال برای شهرهای شمال استان کرمان بین ۲۱۰۴ تا ۲۲۰۵ kWh/kWp (بیشترین مقدار برای شهر کرمان) و برای شهرهای جنوب استان کرمان بین ۲۰۵۹ تا ۲۱۱۳ kWh/kWp (بیشترین مقدار برای شهر جیرفت) است. ضریب ظرفیت در سیستم‌های فتوولتاییک مونوکریستال برای شهرهای شمال استان کرمان بین ۲۴/۰۲ تا ۲۵/۱۷٪ (بیشترین مقدار برای شهر کرمان) و برای شهرهای جنوب استان کرمان بین ۲۳/۵ تا ۲۴/۱۳٪ (بیشترین مقدار برای شهر جیرفت) است؛ در حالی که برای سیستم‌های فتوولتاییک متمرکزکننده در شهرهای شمال استان ۴۵/۶۵ تا ۵۲/۶۳٪ (بیشترین مقدار برای شهر کرمان) بوده و در شهرهای جنوب استان کرمان بین ۴۳/۹۶ تا ۴۷/۷۶٪ که بیشترین مقدار برای شهر جیرفت است.

نسبت عملکرد در سیستم‌های فتوولتاییک مونوکریستال برای شهرهای شمال استان کرمان بین ۹۰/۴۹ تا ۹۵/۱۷٪ (بیشترین مقدار برای شهر کرمان) بوده و برای شهرهای جنوب استان کرمان بین ۹۰/۲۹ تا ۹۴/۱٪ (بیشترین مقدار برای شهر جیرفت) است. برای سیستم‌های فتوولتاییک متمرکزکننده در شهرهای شمال استان کرمان ۱۰۳/۷۶ تا ۱۳۲/۳۵٪ (بیشترین مقدار برای شهر کرمان) بوده و در شهرهای جنوب استان کرمان بین ۹۷/۷۶ تا ۱۱۸/۶۸٪ (بیشترین مقدار برای شهر جیرفت) است.

هزینه تراز شده تولید برق در شهرهای شمال استان کرمان برای سیستم‌های فتوولتاییک تخت بین ۱۳/۳ تا ۱۳/۹ سنت دلار به‌ازای هر کیلووات ساعت و برای شهرهای جنوب استان کرمان بین ۱۳ تا ۱۴/۲۶ سنت دلار به‌ازای هر کیلووات ساعت است. در حالی که این مقادیر در سیستم‌های فتوولتاییک متمرکزکننده حرارتی در شهرهای شمال استان کرمان بین ۸/۸ تا ۱۰/۲ سنت دلار به‌ازای هر کیلووات ساعت و برای شهرهای جنوب استان کرمان بین ۹/۷ تا

12- Duffie JA, Beckman WA. Solar engineering of thermal processes. New Jersey: John Wiley & Sons; 2013.

13- Skoplaki E, Palyvos JA. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*. 2009;83(5):614-624.

14- Pérez-Higueras P, Fernández EF, editors. High concentrator photovoltaics: Fundamentals, Engineering and Power Plants. 1st Edition. Salmon Tower Building New York City: Springer International Publishing; 2015.

15- IEC 61724: Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis. Commission Electrotechnique Internationale; 1998.

16- Blank LT, Tarquin AJ. Basics of engineering economy. New York City: McGraw-Hill Companies, Incorporated; 2007.

17- Gaur A, Tiwari G. Performance of photovoltaic modules of different solar cells. *Journal of Solar Energy*. 2013;2013: ID 734581.

18- Jo JH, Waszak R, Shawgo M. Feasibility of concentrated photovoltaic systems (CPV) in various united states geographic locations. *Energy Technology & Policy*. 2014;1(1):84-90.

19- Barry M, Ramachandran G. Power generation technology data for integrated resource plan of South Africa. California: Electric Power Research Institute (EPRI); 2010.

20- Edalati S, Ameri M, Iranmanesh M, Tarmahi H, Gholampour M. Technical and economic assessments of grid-connected photovoltaic power plants: Iran case study. *Energy*. 2016;114:923-934.

21- Avestamarket [Internet]. Zanjan: Solar Panel Store; 2018 [cited 2018 March 21]. Available from: www.avestamarket.com. [Persian]

22- SATBA [Internet]. Tehran: Renewable Energy and Energy Efficiency Organization; 2018 [cited 2018 March 21]. Available from: www.satba.gov.ir. [Persian]

23- Hussain MI, Lee CH. Experimental and numerical studies of a U-shaped solar energy collector to track the maximum CPV/T system output by varying the flow rate. *Renewable Energy*. 2015;76:735-742.

24- Rumyantsev VD, Andreev VM, Chekalin AV, Davidyuk NY, Sadchikov NA. HCPV modules of SMALFOC design in versions for PV and PV/T operation. 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 8-13 June 2014, Denver, CO, USA. Piscataway: IEEE; 2014. pp. 2720-2723.

25- Kribus A, Kaftori D, Mittelman G, Hirshfeld A, Flitsanov Y, Dayan A. A miniature concentrating photovoltaic and thermal system. *Energy Conversion and Management*. 2006;47(20):3582-3590.

26- Chayet H, Kost O, Moran R, Lozovsky I. Efficient, low cost dish concentrator for a CPV based cogeneration system. AIP Conference Proceedings. 2011;1407(1):10.1063/1.3658337.

27- Renno C. Optimization of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system used for a domestic application. *Applied Thermal Engineering*. 2014;67(1-2):396-408.

لنز سلول	<i>Lens</i>
سلول	<i>Cell</i>
اپتیکال	<i>Opt</i>
تعمیر و نگهداری	<i>O&M</i>
حرارتی ایده‌آل	<i>Th,id</i>
اتلافات حرارتی	<i>Th,loss</i>

منابع

1- Crabtree GW, Lewis NS. Solar energy conversion. *Physics today*. 2007;60(3):37-42.

2- Mallick TM, Eames PC. Design and fabrication of low concentrating second generation PRIDE concentrator. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2007;91(7):597-608.

3- Li M, Li G, Ji X, Yin F, Xu L. The performance analysis of the trough concentrating solar photovoltaic/thermal system. *Energy Conversion and Management*. 2011;52(6):2378-2383.

4- Helmers H, Bett AW, Parisi J, Agert C. Modeling of concentrating photovoltaic and thermal systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2014;22(4):427-439.

5- Renno C, Petito F. Design and modeling of a concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) system for a domestic application. *Energy and Buildings*. 2013;62:392-402.

6- Xu N, Ji J, Sun W, Huang W, Jin Z. Electrical and thermal performance analysis for a highly concentrating photovoltaic/thermal system. *International Journal of Photoenergy*. 2015;2015:ID 537538.

7- Rezaia A, Rosendahl LA. Feasibility and parametric evaluation of hybrid concentrated photovoltaic-thermoelectric system. *Applied Energy*. 2017;187:380-389.

8- Hosseinzadeh M, Salari A, Sardarabadi M, Passandideh-Fard M. Parametric analysis of a nanofluid based photovoltaic thermal system, using computational fluid dynamic. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(9):195-204. [Persian]

9- Hosseinzadeh M, Kazemian A, Sardarabadi M, Passandideh-Fard M. Experimental investigation of using water and ethylene glycol as coolants in a photovoltaic thermal system. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(11):12-20. [Persian]

10- Daneshazarian R, Cuce E, Cuce PM, Sher F. Concentrating photovoltaic thermal (CPVT) collectors and systems: Theory, performance assessment and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;81:473-492.

11- Kratochvil JA, Boyson WE, King DL. Photovoltaic array performance model. United States: Sandia National Laboratories, a Lockheed Martin Company, for the United States Department of Energy's National Nuclear Security Administration; 2004 Dec. Reaport No.: SAND2004-3535. Contract: DE-AC04-94AL85000.