



Energy and Exergy Analysis of 190 W Photovoltaic Cell

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sharfabad M.¹
Ghiasi, M. I.¹
Seraj A.²

How to cite this article

Sharfabad M., Ghiasi, M. I.,
Seraj A., Energy and Exergy Analysis
of 190 W Photovoltaic Cell. Modares
Mechanical Engineering, 2021; 21
(11):743-755.

¹ Development and Optimization of
Energy Technologies Division,
Research Institute of Petroleum
Industry (RIPI), Tehran, Iran
² Faculty of Mechanical Engineering,
University of Tehran

*Correspondence

Address: West Blvd. of Azadi Sports
Complex- Tehran - Iran
Phone: -
Fax: -
mazidim@ripi.ir

Article History

Received: 01 December, 2020
Accepted: 06 May, 2021
ePublished: 27 September, 2021

ABSTRACT

In this paper, the performance of a typical 190 W photovoltaic cell, located in the Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran, has been studied and evaluated from the energy and exergy point of view. A computer code has been developed for modeling and determining the electrical characteristics of the system such as open-circuit voltage, short circuit current, system resistances, maximum power point properties, and characteristic curves. The operational and electrical parameters of the system and the environmental conditions such as solar radiation, wind speed, and ambient temperature have been experimentally measured and logged on one typical day of May. For the validation of the model, the results obtained from the model have been compared with the data reported by the manufacturer as well as the experimental data. The results show that the energy efficiency varies from 11.22 to 13.94 percent during the study period (7:30 AM to 5:30 PM) and its average is equal to 13.19 percent. The exergy efficiency also varies from 14.77 to 16.66 percent during the study period and its average is 15.62 percent.

Keywords Photovoltaic Cell, Characteristic Curves, Energy Efficiency, Exergy Efficiency, Solar Plant

CITATION LINKS

[1] The thermodynamic analysis of a novel integrated transcritical CO₂ ... [2] Hydrogen Production Using Proposed Cycle from Sabalan Geothermal Wells ... [3] Energy and exergy analysis of hybrid photovoltaic thermal water collector ... [4] Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems ... [5] Energy and exergy analysis of 36 W solar photovoltaic module ... [6] Study of Experimental Energy and Exergy of mono-crystalline PV Panel ... [7] Effects of operational conditions on the energy efficiency of photovoltaic modules operating ... [8] Effects of partial shading on energy and exergy efficiencies ... [9] Energy and exergy analysis of a photovoltaic thermal ... [10] Performance analysis of solar powered airport based ... [11] Dynamic simulation and exergetic optimization ... [12] Thermal and electrical performance of low-concentrating PV/T ... [13] Experimental and numerical investigations on the performance of a G-PV/T system ... [14] Investigating the effects of various parameters on the performance of a water-based photovoltaic/thermal system ... [15] Comparison of Solar PV/T Panels ... [16] Energy simulation and parametric analysis of water cooled photovoltaic/thermal system .. [17] Solar engineering of thermal processes ... [18] Thermodynamic analysis of solar photovoltaic cell systems ... [19] Exergy of undiluted thermal radiation ... [20] Renewable energy: power for a sustainable future ... [21] Solar and wind induced external coefficients-solar collectors ... [22] <https://www.power-eng.com> [23] Temperature dependence of solar cell performance—an analysis ... [24] Behavior of four Solar PV modules with temperature variation ... [25] Energy-Principles SP. of Thermal Collection & Storage.

تحلیل انرژی و انرژی یک سلول فتوولتائیک ۱۹۰ وات

محمد مزیدی شرف آبادی*

پژوهشکده توسعه و بهینه‌سازی فناوری‌های انرژی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

محمد ایمان غیاثی

پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

علی سراج

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله عملکرد یک پنل خورشیدی ۱۹۰ وات، واقع در پژوهشگاه صنعت نفت در شهر تهران، از دیدگاه انرژی و انرژی مطالعه و ارزیابی می‌شود. به منظور مدل‌سازی و تعیین مشخصه‌های الکتریکی سیستم نظیر ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، مقاومت‌های موجود در سیستم، ویژگی‌های نقطه بیشترین توان و استخراج منحنی‌های مشخصه الکتریکی، یک کد کامپیوتری توسعه داده شده است. پارامترهای عملیاتی الکتریکی سیستم و شرایط محیطی نظیر میزان تشعشع، سرعت باد و دمای محیط نیز به صورت تجربی در یکی از روزهای اردیبهشت ماه اندازه‌گیری و ثبت شده است. همچنین برای اعتبارسنجی مدل‌سازی، نتایج حاصل از آن با داده‌های گزارش شده توسط سازنده و داده‌های تجربی، مقایسه شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بازده انرژی در طول مدت مطالعه (ساعت ۷:۳۰ تا ۱۷:۳۰) از ۱۱/۲۲ تا ۱۳/۹۴ درصد متغیر بوده و به طور میانگین برابر ۱۳/۱۹ درصد است. بازده انرژی نیز در طول این مدت از ۱۴/۷۷ تا ۱۶/۶۶ درصد متغیر است و به طور میانگین مقداری برابر با ۱۵/۶۲ درصد دارد.

کلیدواژه‌ها: سلول فتوولتائیک، منحنی‌های مشخصه، بازده انرژی، بازده انرژی، نیروگاه خورشیدی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۶

*نویسنده مسئول: mazidim@ripi.ir

۱- مقدمه

نیاز به انرژی همواره یکی از مهم‌ترین نیازهای بشر به شمار می‌آید. سوخت‌های فسیلی، برای سالیان طولانی مهم‌ترین منبع تأمین انرژی بوده‌اند. از بزرگترین مشکلات این سوخت‌ها، آلاینده‌گی و محدودیت در منابع آن‌ها است. به همین دلیل امروزه کشورهای مختلف به دنبال توسعه تجهیزات لازم جهت بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر، به عنوان منبع پاک و دائمی انرژی هستند^[1,2]. یکی از مهم‌ترین انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی است که با به‌کارگیری پنل‌های خورشیدی به انرژی مفید الکتریکی تبدیل می‌گردد. تحلیل انرژی و انرژی این پنل‌ها، نخستین گام در جهت توسعه این تکنولوژی به شمار می‌رود و معیاری مناسب را برای سنجش عملکرد پنل‌های خورشیدی فراهم می‌سازد. تحلیل انرژی بر اساس قانون اول ترمودینامیک و تحلیل انرژی بر اساس قانون دوم ترمودینامیک صورت می‌گیرد. معمولاً

تحلیل انرژی ابزار مفیدتری برای سنجش عملکرد تجهیزات به شمار می‌رود، زیرا تحلیل انرژی تنها به مقدار کمی انرژی ورودی و انرژی مفید توجه می‌کند و به پتانسیل انجام کار در فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی توجهی نمی‌کند. در مقابل، تحلیل انرژی به قابلیت انجام کار توجه می‌کند و انرژی را به صورت انرژی قابل تبدیل به کار (انرژی) و انرژی غیرقابل تبدیل به کار (بازگشت ناپذیری) تحلیل می‌کند.

سلول‌های فتوولتائیک می‌توانند تنها برای تولید انرژی الکتریکی استفاده شوند و بخشی از تأمین برق را بر عهده داشته باشند. همچنین می‌توانند تنها به منظور کاربردهای حرارتی و گرمایشی نظیر آبگرمکن‌های خورشیدی به کار روند. علاوه بر این دو، سیستم‌های فتوولتائیک - حرارتی نیز در سال‌های اخیر توسعه زیادی پیدا کرده‌اند که دو عملکرد مذکور را به صورت هم‌زمان انجام می‌دهند. پژوهش‌های بسیار متنوعی در ارتباط با انواع این سلول‌ها انجام گرفته است.

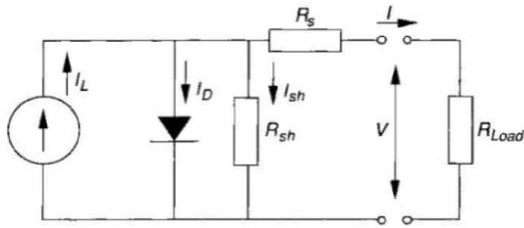
به منظور بررسی عملکرد سلول‌های فتوولتائیک می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد. این روش‌ها در حالت کلی نیازمند بررسی عملکرد الکتریکی و حرارتی (برای سلول‌های با کاربری حرارتی) این سلول‌ها هستند. عملکرد الکتریکی این سیستم‌ها تابعی از توان نامی، مقاومت‌های درونی مختلف سلول، ولتاژ و جریان الکتریکی کاری، جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز و مواردی از این دست است. در توان خروجی نهایی از سیستم مواردی نظیر شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط و سطح سلول، ضریب انتقال حرارت و ... اثر گذارند. برای ارزیابی عملکرد و تحلیل یک سیستم خورشیدی باید مدلی توسعه داده شود که تأثیر تمام مولفه‌های مذکور را در نظر گرفته و نهایتاً با استفاده از روش‌های مناسب، ارزیابی صحیحی از عملکرد سامانه ارائه دهد.

به دلیل اهمیت تحلیل انرژی و انرژی پنل‌های خورشیدی، پژوهش‌های بسیاری پیرامون این موضوع صورت گرفته است. این تحقیقات را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد؛ تحقیقاتی که درباره پنل‌های خورشیدی با هدف تولید برق انجام شده و تحقیقاتی که درباره پنل‌های خورشیدی با هدف تولید حرارت صورت گرفته است. میسرا و تیواری^[3] در سال ۲۰۱۳ میلادی، تحلیل انرژی و انرژی یک آبگرمکن خورشیدی هیبریدی با دمای ثابت کلکتور را انجام دادند و دو حالت متفاوت را برای چپ‌نش ماژول‌ها در سطح کلکتور، بررسی و مقایسه کردند. در حالت اول سطح کلکتور به صورت جزئی و در حالت دوم به صورت کامل توسط ماژول‌های خورشیدی پوشانده شد و مشاهده گردید که حالت اول از نظر بازده انرژی و حالت دوم از نظر تولید الکتریسیته مناسب‌تر است. لازاروی و همکاران^[4] در سال ۲۰۱۵ میلادی یک سیستم فتوولتائیک ساکن را با سیستم مجهز به ردیاب خورشیدی (sun tracker) مقایسه کردند. آن‌ها در این پژوهش دو سیستم را از منظر میزان تولید انرژی، در شرایط آب و هوایی مختلف به طور تجربی

انرژی را از ۱۲ درصد به ۲۴ درصد رساند. ژانگ و همکاران^[12] در سال ۲۰۱۹ میلادی، تأثیر وجود متمرکز کننده را بر عملکرد الکتریکی و حرارتی یک سامانه فتولتائیک - حرارتی بررسی کردند و به این منظور از مقایسه تجربی یک سیستم دارای متمرکز کننده با نسبت تمرکز هندسی ۴ و یک سیستم صفحه تخت رایج استفاده کردند. آن‌ها مشاهده کردند که توان الکتریکی و توان حرارتی سیستم مجهز به متمرکز کننده به ترتیب ۳ و ۲ برابر سیستم صفحه تخت رایج است. در سال ۲۰۲۰ میلادی، لی و همکاران^[13] عملکرد یک پنل خورشیدی با پوشش جاذب را با عملکرد یک پنل با پوشش شیشه‌ای مقایسه کردند. آن‌ها در این مطالعه با استفاده از روش‌های عددی و تجربی به این نتیجه رسیدند که بازده الکتریکی روزانه پنل با پوشش شیشه‌ای ۱۱/۶۶ درصد بوده که این مقدار برای پنل با پوشش جاذب، برابر ۹/۲۴ درصد است. یزدانی فرد و همکاران^[14] در سال ۱۳۹۵، یک سیستم فتولتائیک-حرارتی صفحه تخت آبی را در دو حالت با پوشش شیشه‌ای و بدون آن مدل‌سازی و کارایی سامانه فتولتائیک - حرارتی را از دیدگاه انرژی و انرژی به صورت عددی مطالعه کردند. بر اساس نتایج به دست آمده بازده انرژی سیستم فتولتائیک - حرارتی با پوشش شیشه‌ای همواره بیشتر از سیستم بدون پوشش شیشه‌ای است؛ اما بازده انرژی سیستم با پوشش شیشه‌ای در بیشتر موارد از سیستم بدون پوشش شیشه‌ای کمتر است. افزایش تابش و ضریب فشردگی سبب افزایش بازده انرژی و بازده انرژی می‌شود، اما افزایش دمای محیط سبب افزایش بازده انرژی و کاهش بازده انرژی می‌گردد. جهان‌شاه و همکاران^[15] در سال ۱۳۹۶، به بررسی سیستم‌های مختلف خورشیدی ترکیبی پرداخته و عملکرد آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کردند. در این مقاله روش‌های مختلفی برای خنک کردن کلکتورهای ترکیبی بیان شده است. مقایسه این روش‌ها نشان می‌دهد که بهترین مدل، طراحی حلزونی با بازدهی حرارتی ۱۲/۵ درصد و بازدهی الکتریکی ۱۱/۹۸ درصد است. شکوری و همکاران^[16] در سال ۱۳۹۷، شبیه‌سازی انرژی یک سامانه فتولتائیک - حرارتی آب خنک با استفاده از توسعه کد در نرم افزار متلب را انجام دادند. در این پژوهش تغییرات بازده کلی انرژی و افت فشار با تغییر دبی سیال خنک کن، فاصله بین لوله‌ها و قطر لوله‌ها بررسی شده است. نتایج نشان داد عملکرد سامانه فتولتائیک - حرارتی با دبی جرمی ۰/۱۶ کیلوگرم بر ثانیه و با لوله‌هایی به قطر خارجی ۱ سانتیمتر و با فاصله ۷ تا ۱۱ سانتیمتر از یکدیگر بهینه است.

به این ترتیب می‌توان مشاهده کرد که در سال‌های اخیر به مطالعه تجربی سلول‌های فتولتائیک و همچنین فتولتائیک - حرارتی توجه زیادی شده است. در این پژوهش‌ها غالباً مواردی نظیر تأثیر نوع سیال کاری، جنس سلول، خنک‌کاری، وجود ریب خورشیدی و هندسه سلول بر عملکرد سیستم خورشیدی مطالعه شده است. در پژوهش حاضر، عملکرد یک پنل خورشیدی ۱۹۰ وات واقع در

ارزیابی کردند و مشاهده نمودند که سیستم دارای ریب خورشیدی عملکرد بسیار مناسب‌تری را دارا است. سودهاکار و سیرواستاوا^[5] در سال ۲۰۱۴ میلادی، مدل‌سازی و تحلیل انرژی و انرژی را برای یک ماژول ۳۶ وات در شرایط آب و هوایی شهر بویال هند انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که بازده انرژی بین ۶ تا ۹ درصد و بازده انرژی برای تولید الکتریسیته بین ۸ تا ۱۰ درصد در طول روز تغییر می‌کند. همچنین در صورت کاهش دمای پنل، بازده انرژی آن افزایش بسزایی خواهد داشت. آون و همکاران^[6] در سال ۲۰۱۴ میلادی تحلیل انرژی و انرژی یک پنل خورشیدی تک کریستال را در شرایط جغرافیایی و آب و هوایی الجزایر انجام دادند که نشان داد در هوای ابری بازده انرژی بین ۱۰/۸۳ تا ۲۱/۸۵ درصد و بازده انرژی بین ۵/۳ تا ۱۲ درصد تغییر می‌کند، در حالی که در هوای صاف، بازده انرژی بین ۹/۲۸ تا ۲۲/۱ درصد و بازده انرژی بین ۱/۸ تا ۱۵/۵ درصد متغیر است. در سال ۲۰۱۷ میلادی، رحمان و همکاران^[7] تأثیر شرایط عملیاتی را بر بازده انرژی یک ماژول فتولتائیک بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در اثر افزایش دمای سلول به اندازه ۲۶ درجه سلسیوس، بازده الکتریکی در حدود ۶ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در اثر افزایش شدت تابش به اندازه ۱۰۰ وات بر متر مربع، دمای سلول به اندازه ۳/۸۲ درجه سلسیوس افزایش و بازده آن به اندازه ۰/۸۵ درصد کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۱۷ میلادی، بایراک و همکاران^[8] تأثیر سایه‌های جزئی را بر بازده انرژی و انرژی یک پنل خورشیدی ۷۵ وات را بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که سایه‌اندازی افقی بیشترین تأثیر را بر کاهش بازده انرژی دارد به طوری که در سایه - اندازی سلولی ۶۹/۹۲ درصد، سایه‌اندازی عمودی ۶۶/۹۳ درصد و سایه‌اندازی افقی ۹۹/۹۸ درصد کاهش بازده مشاهده شد. آبرومند و همکاران^[9] در سال ۲۰۱۸ میلادی، برای یک سامانه فتولتائیک - حرارتی خورشیدی با نانو سیال، تحلیل انرژی و انرژی را در قالب یک مطالعه تجربی انجام دادند. نتایج نشان دادند که خنک کردن سامانه به وسیله نانو سیال موجب افزایش قابل توجه بازده انرژی و انرژی می‌گردد. همچنین افزایش غلظت نانو سیال و دبی جرمی آن، باعث افزایش اثر مثبت آن بر بازده‌ها می‌گردد. سوکوماران و سودهاکار^[10] در سال ۲۰۱۸ میلادی عملکرد یک فرودگاه با برق خورشیدی در هند را بر اساس تحلیل انرژی و انرژی بررسی کردند. نیروگاه خورشیدی مطالعه شده در این پژوهش یک نیروگاه ۱۲ مگاواتی بود و تحلیل انرژی و انرژی نشان داد که اتلافات حرارتی سهم بسیار زیادی در کاهش بازده دارند و در چنین نیروگاه‌هایی نیاز به سیستم خنک‌کاری میانی، به شدت احساس می‌شود. کاراتاناسیس و همکاران^[11] در سال ۲۰۱۹ میلادی، شبیه‌سازی دینامیک و بهینه‌سازی انرژی یک سیستم فتولتائیک - حرارتی سهموی متمرکز کننده را انجام دادند. آن‌ها با انجام یک تحلیل انرژی نشان دادند که با افزایش بازده اپتیکی تا ۷۵ و بازده الکتریکی تا ۲۵ درصد، می‌توان بازده



شکل ۱) مدار معادل یک مبدل خورشیدی [17]

$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{V - IR_s}{a}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

که در آن $I_o(A)$ جریان اشباع بازگشتی دیود (The diode reverse saturation current) یا جریان تاریک $a(V)$ (Dark current) ضریب اصلاح شده ایده آل بودن (Modified ideality factor) است. جریان اشباع بازگشتی دیود یا جریان تاریک حداقل جریانی است که لازم است در نیمه‌رسانا برقرار شود تا یک جفت n و p تشکیل شود. ضریب a وابسته به ضریب مطلوب بودن، n ، و سایر کمیت‌های فیزیکی است. n ، برای دیود ایده آل برابر ۱ و برای دیود غیر ایده آل بین ۱ تا ۲ است.

مطابق رابطه (۱)، مقادیر پنج مولفه I_L, I_o, R_s, R_{sh}, a ، در شرایط عملیاتی مختلف، برای محاسبه جریان بر حسب ولتاژ مورد نیاز است. برای محاسبه این پنج پارامتر نیاز به پنج معادله مستقل است. استخراج معادله‌ها و محاسبه این پنج مولفه ابتدا در شرایط مرجع، یعنی تابش لحظه‌ای $1000 (W/m^2)$ ، دمای سلول $25^\circ C$ و طیف نوری متناظر با جرم هوای $1.5G$ ، صورت می‌گیرد؛ زیرا معمولاً مقدار ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، ولتاژ و جریان در نقطه بیشترین توان در شرایط مرجع و همین طور، ضریب دمایی جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز توسط شرکت سازنده گزارش می‌شود.

با جای‌گذاری مقادیر گزارش شده توسط سازنده در معادله (۱)، به همراه روابط مربوط به ضریب دمایی جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز معادلات (۲) تا (۶) برای محاسبه مقادیر پنج مجهول I_L, I_o, R_s, R_{sh}, a در شرایط مرجع به دست می‌آید [17]. در تمامی این معادلات زیرنویس ref به مقدار مولفه‌ها در شرایط مرجع اشاره دارد. سپس با استفاده از روابط (۸) تا (۱۲)، ارتباط بین مقدار این مولفه‌ها در شرایط عملیاتی مختلف و مقدار آن‌ها در شرایط مرجع برقرار می‌شود [17]. در نهایت با استفاده از رابطه (۱) مقادیر جریان بر حسب ولتاژ استخراج می‌شود.

رابطه (۲)، مربوط به شرایط اتصال کوتاه است که در این حالت ولتاژ برابر صفر و جریان برابر $I_{sc,ref}$ است. با جای‌گذاری این مقادیر در رابطه (۱) خواهیم داشت [17]:

$$I_{sc,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[\exp\left(\frac{I_{sc,ref} R_{s,ref}}{a_{ref}}\right) - 1 \right] - \frac{I_{sc,ref} R_{s,ref}}{R_{sh,ref}} \quad (2)$$

نیروگاه ۲۰ کیلو واتی پژوهشگاه صنعت نفت در شهر تهران ارزیابی می‌شود و تحلیل انرژی و انرژی آن با در نظر گرفتن عوامل آب و هوایی نظیر شدت تابش، سرعت باد و دما صورت می‌پذیرد. همچنین به کمک کد کامپیوتری توسعه داده شده در نرم‌افزار متلب، منحنی‌های مشخصه عملکردی استخراج و از طریق مقایسه با منحنی‌های ارائه شده توسط سازنده صحت‌گذاری می‌شوند. نوآوری مهم این مقاله، ارائه یک مدل کامل به همراه توسعه یک کد نرم‌افزاری برای بررسی عملکرد خانواده‌ای از سلول‌های فتوولتائیک است. این مدل توانایی شبیه‌سازی عملکرد الکتریکی و همچنین ارزیابی عملکرد کلی سامانه را دارد. به علاوه از یک مدل واقعی رایج برای صحت‌گذاری مدل و انجام مطالعه تجربی استفاده شده است. در حقیقت پژوهش حاضر یک مطالعه جامع بر روی خانواده‌ای از سلول‌های فتوولتائیک است که ضمن توسعه یک مدل و کد نرم‌افزاری برای بررسی عملکرد این سلول‌ها، یک مطالعه تجربی نیز انجام داده و نتایج این دو را با یکدیگر مقایسه نموده است.

۲- مدل‌سازی و مطالعه تجربی

برای تحلیل عملکرد پنل‌های خورشیدی، در گام اول باید منحنی‌های مشخصه الکتریکی آن‌ها استخراج شود. این منحنی‌های مشخصه ارتباط میان ولتاژ، جریان و توان سیستم را در مقادیر تابش و دماهای متفاوت، برقرار می‌سازند. اطلاعات به دست آمده از منحنی‌های مشخصه الکتریکی، ورودی‌های تحلیل انرژی و انرژی را فراهم می‌کنند. در گام دوم با استفاده از معادلات و روابط مربوط به بازده انرژی و انرژی، پنل خورشیدی مورد نظر از دیدگاه انرژی و انرژی تحلیل می‌شود. در این بخش روند مدل‌سازی و معادله‌های حاکم بر آن ارائه می‌گردد.

۲-۱- مدل‌سازی الکتریکی

نخستین گام برای مدل‌سازی، رسم مدار الکتریکی معادل است. شکل ۱ مدار معادل یک سلول مستقل، یک مازول یا آرایه‌ای از سلول‌هاست که شامل یک منبع جریان است که جریان $I_L(A)$ را در مدار القا می‌کند. $R_s(\Omega)$ و $R_{sh}(\Omega)$ به ترتیب مقاومت شنت (یا موازی درونی) و مقاومت سری درونی (Series resistance) مدار هستند. $I_D(A)$ جریان الکتریکی در محل اتصال پایه‌های n و p سلول است و به‌عنوان جریان اتصال (Junction current) شناخته می‌شود. $I_{sh}(A)$ جریان عبوری از مقاومت‌های موازی است. $I(A)$ جریانی است که از باری به مقاومت $R_{Load}(\Omega)$ که افت پتانسیل $V(V)$ را سبب می‌شود، می‌گذرد.

مبنای مدل‌سازی در این پژوهش معادله زیر است که رابطه جریان و ولتاژ را در مدار شکل ۱ در شدت تابش و دما ثابت، بیان می‌کند [17]:

$$I_L = \frac{S}{S_{ref}} [I_{L,ref} + \mu_{I,sc}(T_c - T_{c,ref})] \quad (۹)$$

که در آن، $S(W/m^2)$ شدت تابش، S/S_{ref} نسبت جذب مؤثر پنل و $\mu_{I,sc}(A/K)$ ضریب دمایی جریان اتصال کوتاه است. همچنین برای I_o در شرایط عملیاتی بر حسب مقدار آن در شرایط مرجع طبق روابط (۱۰) خواهیم داشت [17]:

$$\frac{I_o}{I_{o,ref}} = \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)^3 \exp\left(\frac{E_g}{kT_c} \Big|_{T_{c,ref}} - \frac{E_g}{kT_c} \Big|_{T_c}\right) \quad (۱۰) \quad \text{الف}$$

$$\frac{E_g}{E_{g,ref}} = 1 - C(T_c - T_{c,ref}) \quad (۱۰) \quad \text{ب}$$

که در آن $E_g(J)$ گاف انرژی ماده سازنده سلول است و برای سیلیکون $(1.794 \times 10^{-19} eV)$ و $C = 0.0002677$ است. مقاومت شنت، R_{sh} ، وابستگی به دما ندارد و تنها به شدت تابش وابسته است و طبق رابطه (۱۱) با آن نسبت عکس دارد [17]:

$$\frac{R_{sh}}{R_{sh,ref}} = \frac{S_{ref}}{S} \quad (۱۱)$$

همچنین با تقریب خوبی می‌توان فرض کرد که تغییرات مقاومت سری با تغییر دما و شدت تابش صفر است، بنابراین [17]:

$$R_s = R_{s,ref} \quad (۱۲)$$

به این ترتیب با استفاده از معادلات (۸) تا (۱۲) ارتباط بین مقادیر مرجع و مقادیر عملیاتی تمام پارامترها برقرار می‌گردد و با روشی که شرح داده شد، مدل‌سازی الکتریکی تکمیل می‌گردد. خروجی این مدل‌سازی نمودارهای توان و جریان پنل خورشیدی بر حسب ولتاژ، در دماها و شدت‌های تابش مختلف خواهد بود. به‌طور خاص، از حل معادله (۱) در نقطه بیشترین توان، جریان و ولتاژ مربوط به آن از روابط (۱۳) محاسبه می‌شود [17]:

$$I_{mp} = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{V_{mp} - I_{mp}R_s}{a}\right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{R_{sh}} \quad (۱۳) \quad \text{الف}$$

$$\frac{I_{mp}}{V_{mp}} = \frac{\frac{I_o}{a} \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{a}\right) + \frac{1}{R_{sh}}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}} + \frac{I_o R_s}{a} \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{a}\right)} \quad (۱۳) \quad \text{ب}$$

یعنی پس از مشخص شدن ویژگی‌های سامانه و معین شدن ضرایب آن، معادلات (۱۳) ورودی‌های لازم برای تحلیل انرژی و انرژی را فراهم می‌کنند.

۲-۲- بازده انرژی

بازده انرژی یک پنل خورشیدی به‌صورت نسبت توان الکتریکی خروجی به انرژی ورودی به پنل از طریق نور خورشید تعریف می‌شود. بدیهی است که این مقدار به شدت تابش و دما وابسته است.

همچنین برای محاسبه بازده انرژی، فرض می‌شود که پنل در شرایط بیشترین توان در حال کار است و بیشترین توان الکتریکی ممکن در دما و تابش عملیاتی از آن گرفته می‌شود. همچنین فرض می‌شود که دمای سطح در تمام پنل یکسان است که فرض معقولی

رابطه (۳)، مربوط به شرایط مدار باز است که در این حالت جریان برابر صفر و ولتاژ برابر V_{oc} است [17]

$$I_{L,ref} = I_{o,ref} \left[\exp\left(\frac{V_{oc,ref}}{a_{ref}}\right) - 1 \right] + \frac{V_{oc,ref}}{R_{sh,ref}} \quad (۳)$$

رابطه (۴)، مربوط به نقطه بیشترین توان است و مقدار جریان و ولتاژ آن به ترتیب I_{mp} و V_{mp} است [17]:

$$I_{mp,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[\exp\left(\frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref}R_{s,ref}}{a_{ref}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref}R_{s,ref}}{R_{sh,ref}} \quad (۴)$$

مشقت توان الکتریکی نسبت به ولتاژ در نقطه بیشینه توان برابر صفر است. با توجه به این موضوع رابطه (۵) به دست می‌آید [17]:

$$\frac{I_{mp,ref}}{V_{mp,ref}} = \frac{\frac{I_{o,ref}R_{s,ref}}{a_{ref}} \exp\left(\frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref}R_{s,ref}}{a_{ref}}\right) + \frac{1}{R_{sh,ref}}}{1 + \frac{I_{o,ref}}{a_{ref}} \exp\left(\frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref}R_{s,ref}}{a_{ref}}\right) + \frac{R_{s,ref}}{R_{sh,ref}}} \quad (۵)$$

رابطه (۶) تضمین می‌کند که مدل توانایی پیش‌بینی مقدار درست ضریب دمایی ولتاژ مدار باز را داراست [17]:

$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T} = \mu_{V,oc} \approx \frac{V_{oc}(T_c) - V_{oc}(T_{c,ref})}{T_c - T_{c,ref}} \quad (۶)$$

که در آن $\mu_{V,oc}(V/K)$ ضریب دمایی ولتاژ مدار باز و $(T_c k)$ دمای سلول است.

در رابطه (۶) مقدار انتخاب شده برای T_c اهمیت چندانی ندارد، زیرا اگر مقدار آن بین ۱ تا ۱۰ درجه بالاتر از دمای مرجع باشد، تغییر چندانی در نتایج حاصل نخواهد کرد. V_{oc} در دمای T_c از طریق جای‌گذاری $I = 0$ در رابطه (۱) به‌صورت ضمنی به دست می‌آید، اما چون نمی‌توان آن را به‌صورت صریح محاسبه کرد، باید از روش‌های عددی استفاده نمود.

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، ضریب a وابسته به ضریب مطلوب بودن و همچنین کمیت‌های فیزیکی است. معادله (۷) رابطه بین a و n را بیان می‌کند [17]:

$$a \equiv \frac{nkT_c N_s}{q} \quad (۷)$$

که در آن $k = 1.38 \times 10^{-23} (J/K)$ ثابت بولتزمن، $q = 1.602 \times 10^{-19} (C)$ بار الکتریکی N_s تعداد سلول‌های سری است. ضریب مطلوب بودن، n ، برای دیود ایده‌آل برابر ۱ و برای دیود غیر مطلوب بین ۱ تا ۲ است [17].

طبق رابطه (۷) ضریب a با دما به‌صورت خطی تغییر می‌کند، بنابراین مقدار آن در شرایط عملیاتی از رابطه (۸) به دست خواهد آمد [۱۷]:

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_c}{T_{c,ref}} \quad (۸)$$

تغییرات جریان I_L با تابش لحظه‌ای تقریباً یک روند خطی دارد. در واقعیت برخی از تشعشع سنج‌ها جریان اتصال کوتاه سلول را به‌عنوان معیاری از میزان تشعشع در نظر می‌گیرند. این موضوع در رابطه (۹) مشهود است [17]:

که در آن زیرنویس $NOTC$ مربوط به مقادیر کمیت‌ها، متناظر با دمای کاری نامی سلول و $(\tau\alpha)$ ضریب مؤثر عبور-جذب (Effective transmittance-absorptance product) است.

همچنین اگزرژی الکتریکی، Ex_{el} ، از رابطه زیر به دست می‌آید[5]:

$$Ex_{el} = V_{mp} \times I_{mp} \quad (20)$$

همچنین مقدار اگزرژی تلف شده یا همان تخریب اگزرژی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Ex_{loss} = Ex_{in} - Ex_{el} - Ex_{th} \quad (21)$$

۲-۴- مطالعه تجربی

در این پژوهش یک پنل خورشیدی مدل SF160-24-1M ساخت شرکت جیانگسو لینیانگ سولارفا با قدرت ۱۹۰ وات واقع در نیروگاه خورشیدی ۲۰ کیلو واتی پژوهشگاه صنعت نفت در شهر تهران، با طول جغرافیایی $51^{\circ} 15' 32''$ و عرض جغرافیایی $35^{\circ} 44' 17''$ ارزیابی می‌شود. پنل رو به جنوب جغرافیایی و با زاویه شیب 33° درجه قرار گرفته است. برای صحت‌سنجی مدل‌سازی و نتایج حاصل از آن از داده‌های تجربی پنل مورد آزمایش استفاده می‌شود. در این مقاله، عملکرد پنل بین ساعت ۷:۳۰ تا ۱۷:۳۰ روز ۲۲ اردیبهشت ۱۳۹۴ از منظر انرژی و اگزرژی مطالعه می‌شود. عملکرد پویا اینورتر نیروگاه، همان تعیین نقطه کارکرد برای رسیدن به بیشترین کارایی در تولید توان است که به‌طور پیوسته در تمام زمان کارکرد اینورتر انجام می‌پذیرد؛ بنابراین ولتاژ و جریان خروجی پنل متناظر با نقطه بیشترین توان خواهد بود. دمای محیط، شدت تابش، سرعت باد، ولتاژ و جریان در نقطه بیشترین توان توسط دستگاه سانی سنسور باکس در فواصل ۵ دقیقه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. این دستگاه تجهیزاتی است که در کنار ماژول‌های نیروگاه نصب شده و با دریافت اطلاعات محیطی سایت امکان محاسبه بازده انرژی و اگزرژی و تأثیر مولفه‌های مختلف بر میزان آن‌ها را فراهم می‌آورد. پارامترهای ورودی تحلیل و مشخصات پنل خورشیدی مورد مطالعه در شرایط مرجع که توسط سازنده گزارش شده است به ترتیب در جدول ۱ و ۲ آورده شده است[22].

۳- نتایج و تفسیر آن‌ها

۳-۱- نتایج استخراج منحنی‌های مشخصه

در شکل ۲ نمودار جریان و توان بر حسب ولتاژ در شرایط مرجع،

جدول (۱) پارامترهای ورودی تحلیل

مقدار	پارامترهای ورودی
۴۵	دمای کاری نامی سلول، $T_{NOCT} (^{\circ}C)$
۸۰۰	شدت تابش در شرایط کاری نامی سلول، $S_{NOCT} (W/m^2)$
۲۰	دمای محیط در شرایط کاری نامی سلول، $T_{a,NOCT} (^{\circ}C)$
۰/۹	ضریب گسیل پنل، ε
۰/۹	ضریب مؤثر عبور-جذب پنل، $\alpha\tau$
۵۷۸۰	دمای خورشید، $T_{sun} (K)$

است[5]. با این فرضیات بازده انرژی پنل، η_{en} ، از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود[18]:

$$\eta_{en} = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{A \times S} \quad (14)$$

که در آن $A (m^2)$ مساحت پنل است. مقدار V_{mp} و I_{mp} از طریق مدلسازی محاسبه می‌گردد. مساحت پنل توسط شرکت سازنده گزارش می‌شود. مقدار شدت تابش در این پژوهش به‌صورت تجربی به دست می‌آید.

۳-۲- بازده اگزرژی

بازده اگزرژی، η_{ex} ، پنل‌های خورشیدی عبارت است از نسبت اگزرژی کل خروجی به اگزرژی کل تابش خورشید (اگزرژی ورودی) که در رابطه زیر آمده است[19]:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{out}}{Ex_{in}} \quad (15)$$

که در آن $Ex_{in}(W)$ و $Ex_{out}(W)$ به ترتیب اگزرژی خروجی و ورودی است.

اگزرژی ورودی، Ex_{in} ، فقط شامل اگزرژی تابش خورشید است که از طریق رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود[19]:

$$Ex_{in} = AS \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}} \right)^4 \right] \quad (16)$$

که در آن $T_a(K)$ دمای محیط و $T_{sun}(K)$ دمای خورشید است. اگزرژی خروجی شامل اگزرژی حرارتی و اگزرژی الکتریکی است. اگزرژی حرارتی، $Ex_{th}(W)$ ، از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود[5]:

$$Ex_{th} = (h_{conv} + h_{rad})A(T_c - T_a) \left[1 - \frac{T_a}{T_c} \right] \quad (17)$$

که در آن $h_{conv} (W/m^2k)$ ضریب انتقال حرارت جابجایی و $h_{rad} (W/m^2k)$ ضریب معادل انتقال حرارت تابشی است.

ضرایب انتقال حرارت جابجایی و تابشی از روابط (۱۸) به دست می‌آیند[20, 21]:

$$h_{conv} = 2.8 + 3v_w \quad (18-الف)$$

$$h_{rad} = \varepsilon\sigma(T_{sky} + T_c)(T_{sky}^2 + T_c^2) \quad (18-ب)$$

که در آن $v_w (m/s)$ سرعت باد، ε ضریب گسیل پنل، $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} (W/m^2K)$ ثابت استفان - بولتزمن و $T_{sky} (K)$ دمای مؤثر آسمان است که با تقریب مناسبی شش درجه کمتر از دمای محیط در نظر گرفته می‌شود[5].

دمای سطح سلول را نیز می‌توان با دمای کاری نامی سلول طبق روابط (۱۹) تخمین زد که رابطه (۱۹-ب) به دلیل در نظر گرفتن تأثیر سرعت باد و عبور و جذب تشعشع در پنل، رابطه دقیق‌تری است[17, 22]:

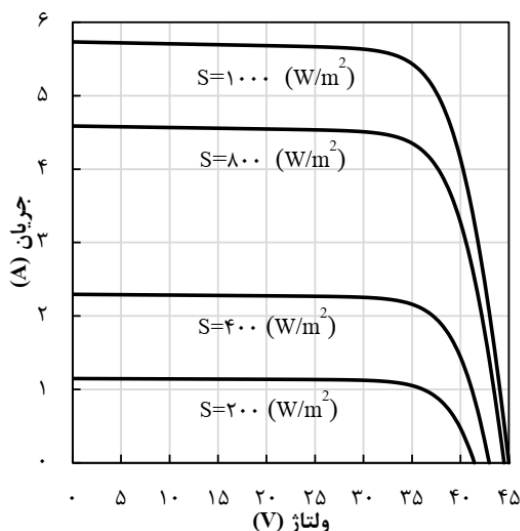
$$\frac{T_c - T_a}{T_{NOCT} - T_{a,NOCT}} = \frac{S}{S_{NOCT}} \quad (19-الف)$$

$$\frac{T_c - T_a}{T_{NOCT} - T_{a,NOCT}} = \frac{S}{S_{NOCT}} \frac{9.5}{(5.7 + 3.8v_w)} \left[1 - \frac{\eta_{en}}{\tau\alpha} \right] \quad (19-ب)$$

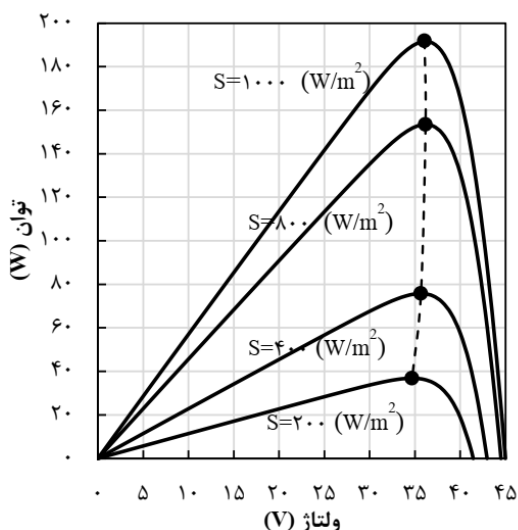
خورشیدی اشاره دارد. همچنین، n تعداد کل داده‌ها است. میزان خطای جذر میانگین مربعات در محاسبه جریان ۰/۱۲۹۷ آمپر و در محاسبه توان ۲/۷۱۳۸ وات است.

در شکل ۳ و ۴ به ترتیب نمودار جریان و توان بر حسب ولتاژ در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و به ازای شدت تابش‌های مختلف رسم شده است.

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که افزایش جریان اتصال کوتاه متناسب با افزایش شدت تابش است درحالی‌که افزایش ولتاژ با شدت تابش نسبت لگاریتمی دارد. جریان اتصال کوتاه تا نزدیکی ولتاژ مدار باز، تقریباً وابستگی به ولتاژ ندارد و فقط متناسب با سطح تابش است. از این رو اگر فرض شود که در دمای ثابت، تابش برخوردی به سطح، دارای طیف نشری ثابتی باشد، آنگاه می‌توان جریان اتصال کوتاه را معیاری از میزان تابش برخوردی و بالعکس در نظر گرفت. از آنجا که با افزایش شدت تابش در دمای ثابت، انرژی ورودی به سیستم افزایش می‌یابد، طبیعی است که توان



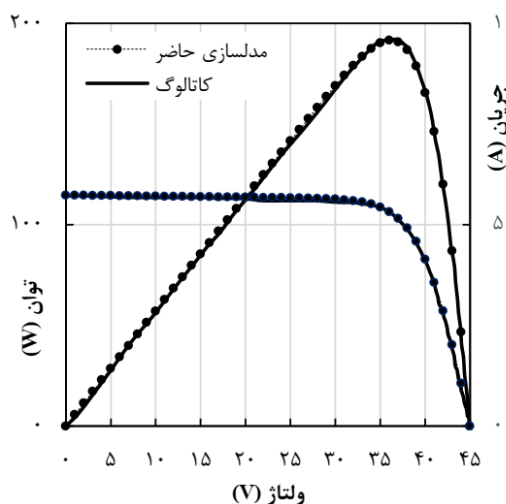
شکل ۳ نمودار جریان بر حسب ولتاژ در شدت تابش‌های مختلف



شکل ۴ نمودار توان بر حسب ولتاژ در شدت تابش‌های مختلف

جدول ۲) مشخصات پنل خورشیدی مورد مطالعه در شرایط مرجع [22]

مقدار	مشخصات
۱۹۱/۸۶۱	بیشترین توان، $P_{mp}(W)$
۴۴/۹۸۸	ولتاژ مدار باز، $V_{oc}(V)$
۵/۷۳۳	جریان اتصال کوتاه، $I_{sc}(A)$
۳۶/۰۵۵	ولتاژ نقطه بیشترین توان، $V_{mp}(V)$
۵/۳۲۱	جریان نقطه بیشترین توان، $I_{mp}(A)$
۳۸۸/۴۸۵	مقاومت شنت، $R_{sh}(\Omega)$
۰/۹۸۲	مقاومت سری، $R_s(\Omega)$
-۰/۰۰۳۳	ضریب دمایی ولتاژ مدار باز، $\mu_{V,oc}(V/K)$
۰/۰۰۰۳	ضریب دمایی جریان اتصال کوتاه، $\mu_{I,sc}(A/K)$
۷۲ (۶×۱۲)	تعداد سلول‌ها
۱۵۸۰×۸۰۸×۴۵	ابعاد (mm)



شکل ۲) صحنه‌گذاری منحنی‌های مشخصه عملکردی در شرایط مرجع

شدت تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع و دمای ۲۵ درجه سلسیوس، ارائه و با مقایسه با اطلاعات ارائه شده توسط شرکت سازنده پنل خورشیدی اعتبارسنجی شده است [22].

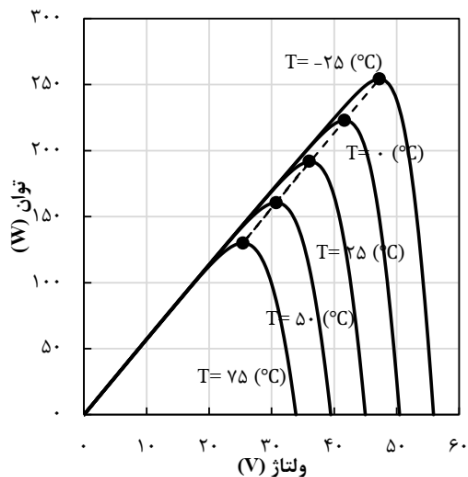
همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود مقادیر مربوط به توان و جریان حاصل از مدل‌سازی بسیار نزدیک به مقادیر ارائه شده توسط سازنده هستند و همپوشانی بالایی دارند که نشانگر دقت بالای مدل‌سازی است. میزان خطای جذر میانگین مربعات معیار مناسبی برای مقایسه دقت نتایج با یکدیگر است.

به کمک این کمیت می‌توان اثر افزایش خطا در داده‌های اندازه‌گیری شده بر روی دقت تخمین را بررسی کرد. میزان این خطا با معادله (۲۲) محاسبه می‌شود:

$$e_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{Num} - I_{Exp})^2} \quad (۲۲-الف)$$

$$e_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{Num} - P_{Exp})^2} \quad (۲۲-ب)$$

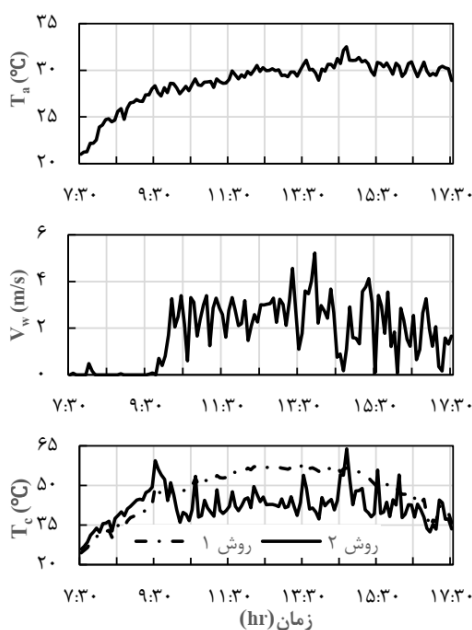
که در آن‌ها زیرنویس Num به مقادیر جریان و توان حاصل از مدل‌سازی در یک ولتاژ خاص و زیرنویس Exp به مقادیر دقیق آن‌ها بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط شرکت سازنده پنل



شکل ۶ نمودار توان بر حسب ولتاژ در دماهای مختلف

۲-۳- نتایج مدل‌سازی در شرایط عملیاتی

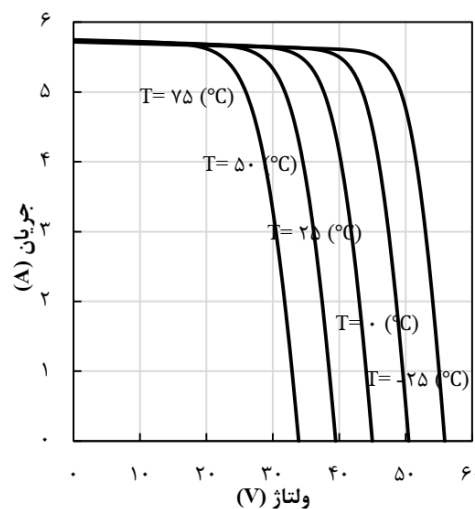
در ادامه نتایج حاصل از مدل‌سازی پنل خورشیدی مورد مطالعه در شرایط عملیاتی همراه با مولفه‌های اندازه‌گیری شده در قالب نمودارهایی ارائه خواهند شد. این نمودارها به همراه اطلاعات ارائه شده توسط سازنده، به‌عنوان ورودی‌های تحلیل انرژی و انرژی استفاده می‌شوند. تغییرات دمای محیط، سرعت باد و دمای سلول تخمین زده شده به دو روش ارائه شده در رابطه (۱۹)، در طول مدت آزمایش در شکل ۷ آورده شده‌اند. مطابق این نمودارها سرعت باد از صفر تا ۵/۲۲ متر بر ثانیه متغیر است. همچنین دمای محیط در طول روز بین ۲۱/۰۱ تا ۳۲/۵۲ درجه سلسیوس و دمای سلول از ۲۵/۸۶ تا ۶۳/۸۵ درجه سلسیوس در روش دوم تغییر می‌کند. روش دوم در مقایسه با روش اول به دلیل در نظر گرفتن اثرات سرعت باد، بازده انرژی و ویژگی‌های تشعشعی پنل بر روی دمای سلول دقیق‌تر است و مبنای محاسبات قرار گرفته است.



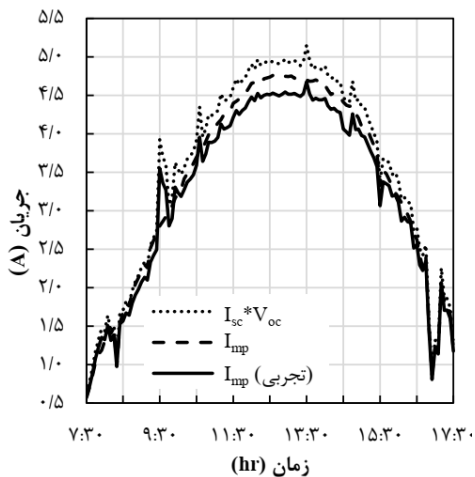
شکل ۷ تغییرات دمای محیط، سرعت باد و دمای سلول در طول روز

خروجی نیز مطابق شکل ۴ افزایش پیدا کند که در ولتاژ معین، به معنی افزایش جریان الکتریکی است و از طرف دیگر به دلیل عدم وابستگی جریان به ولتاژ در ولتاژهای پایین، یک رابطه تقریباً خطی بین ولتاژ و توان برقرار می‌شود. به عبارتی شکل‌های ۳ و ۴ تأییدکننده یکدیگر و همچنین فیزیک حاکم بر مدلسازی هستند. همچنین با افزایش اختلاف ولتاژ و نزدیک شدن آن به ولتاژ مدار باز، جریان به‌سرعت شروع به کاهش می‌کند که نتیجه‌ای قابل پیش‌بینی است و همین موضوع باعث می‌شود توان نیز کاهش یابد تا جایی که در ولتاژ مدار باز، مقدار این دو کمیت به صفر برسد. در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب نمودار جریان و توان بر حسب ولتاژ در شدت تابش ثابت ۱۰۰۰ وات بر متر مربع و دماهای مختلف رسم شده است.

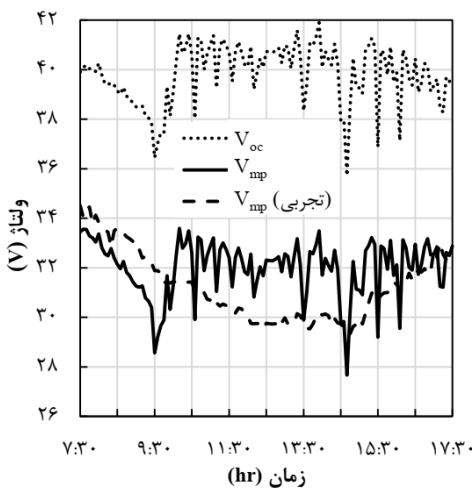
همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزایش دما، ولتاژ مدار باز به‌سرعت کاهش پیدا می‌کند، در حالی که جریان اتصال کوتاه مقدار اندکی افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع آن است که با افزایش دما، گاف انرژی نیمه رساناها کاهش می‌یابد و طبق رابطه (۱۰- الف) مقدار I_0 به‌صورت لگاریتمی به گاف انرژی وابسته است. از آنجایی که ولتاژ مدار باز نیز به لگاریتم I_0 وابسته است، این ولتاژ به‌سرعت کاهش می‌یابد [23, 24]. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، این کاهش سریع ولتاژ مدار باز باعث می‌شود که توان بیشینه کاهش پیدا کند و در ولتاژهای پایین‌تری واقع شود. دلیل این کاهش شدید نیز همان ارتباط ولتاژ و جریان مدار باز به گاف انرژی نیمه رساناها است. همچنین مشابه با شکل ۴، در این شکل نیز واضح است که در هر دمایی، برای رسیدن به توان بهینه، یک ولتاژ خاص وجود دارد. این ولتاژ با افزایش دما به اندازه ۱۰۰ درجه سلسیوس، حدود ۴۸ درصد کاهش یافته است. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که بین ولتاژهای متناظر با نقطه بیشترین توان و مقدار توان بیشینه در دماهای مختلف، یک وابستگی نسبتاً خطی وجود دارد.



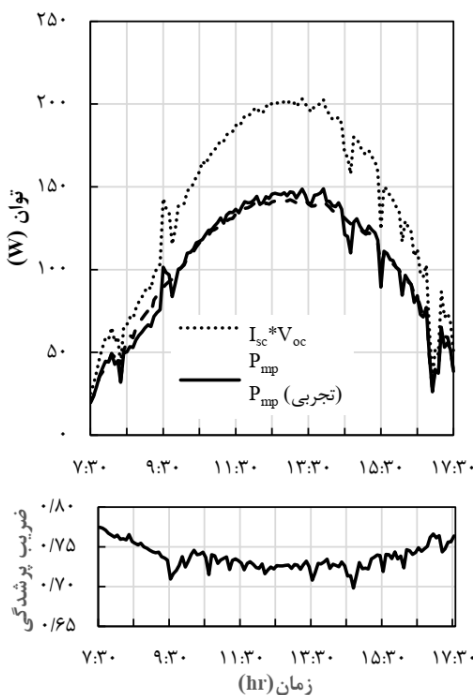
شکل ۵ نمودار جریان بر حسب ولتاژ در دماهای مختلف



شکل ۹) تغییرات جریان در نقطه بیشترین توان و جریان اتصال کوتاه در طول روز



شکل ۱۰) تغییرات ولتاژ در نقطه بیشترین توان و ولتاژ مدار باز در طول روز



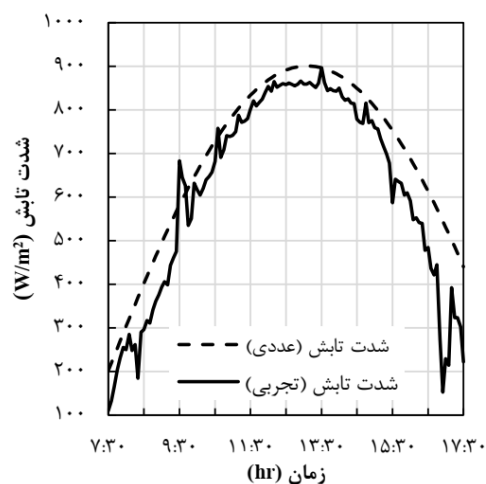
شکل ۱۱) تغییرات بیشترین توان و ضریب پرشدگی در طول روز

همچنین شدت تابش اندازه‌گیری شده در طول روز به همراه شدت تابش تخمین زده شده با استفاده از روابط ارائه شده در مرجع [25] در شکل ۸ آورده شده است که هم‌پوشانی خوبی را نشان می‌دهند. در نهایت برای محاسبه توان خروجی نیاز است تا ولتاژ و جریان نقطه بیشترین توان در طول روز، بر اساس روابط (۱۳)، محاسبه شوند. نمودار جریان و ولتاژ در نقطه بیشترین توان و تغییرات بیشترین توان در طول روز، به ترتیب در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ آورده شده‌اند. همچنین داده‌های تجربی برای این پارامترها که به وسیله سنسورهای اندازه‌گیری پارامترهای الکتریکی نیروگاه به دست آمده‌اند، در این شکل‌ها ارائه شده‌اند که اعتبار و دقت مدل‌سازی را تأیید می‌کنند.

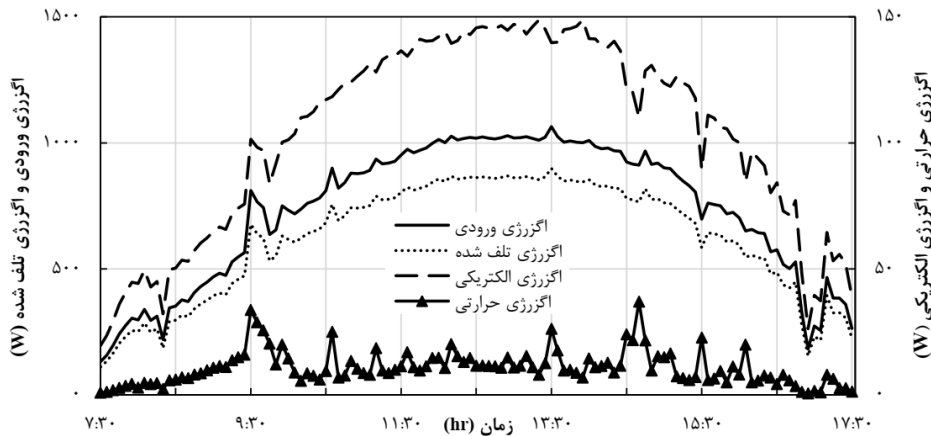
در نمودارهای ۹ و ۱۰ تغییرات جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز نیز در هر لحظه مشاهده می‌شود. از مقایسه شکل ۸ با شکل‌های ۹ و ۱۱ همبستگی میان این نمودارها به وضوح مشاهده می‌شود. اگرچه تحلیل حساسیت از اهداف این مقاله به حساب نمی‌آید، اما می‌توان مشاهده کرد که شدت تابش، تقریباً تعیین‌کننده‌ترین عامل در توان و جریان خروجی است. در شکل ۱۱، مقدار ضریب پرشدگی (Fill factor)، FF ، که حاصل تقسیم توان حداکثر نظری (حاصل ضرب ولتاژ مدار باز در جریان اتصال کوتاه) بر بیشترین توان عملی است، استخراج و تغییرات آن در طول روز رسم شده است. همچنین، نمودار تغییرات توان حداکثر نظری در این شکل مشاهده می‌شود. ضریب توان حاصل از این مدل‌سازی می‌تواند به عنوان یکی از مشخصه‌های سامانه استفاده شود.

۳-۳- نتایج تحلیل انرژی و آگرزژی

تحلیل انرژی و آگرزژی با استفاده از نتایج حاصل از مدل‌سازی الکتریکی و اندازه‌گیری‌های تجربی انجام می‌گیرد. معمولاً تحلیل آگرزژی، تحلیل مناسب‌تری به شمار می‌رود، چرا که بین انرژی قابل استفاده و انرژی غیرقابل استفاده تفاوت قائل می‌شود. به همین دلیل در این پژوهش تمرکز بیشتری بر تحلیل آگرزژی شده است.



شکل ۸) تغییرات شدت تابش در طول روز



شکل ۱۲) اگرژی ورودی، تلف شده، الکتریکی و گرمایی

که سیستم‌های فتوولتائیکی که هم‌زمان توان و حرارت مفید تولید می‌کنند، افزایش چشمگیری در بازده خواهند داشت. در شکل ۱۳ تغییرات بازده انرژی و اگرژی در طول روز مشاهده می‌شود. در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که حوالی ظهر، یعنی درست زمانی که اگرژی ورودی در بیشترین مقدار خود قرار دارد، بازده اگرژی افت می‌کند که دلیل آن افزایش دما در ساعات اوج تابش است که اثر به شدت منفی بر بازده می‌گذارد. این موضوع نشان می‌دهد که خنک‌کاری پنل‌ها یکی از اساسی‌ترین موضوعاتی است که باید به آن توجه شود. بیشترین مقدار بازده اگرژی در ساعات قبل از ظهر (ساعت ۹:۳۰) رخ می‌دهد که شدت تابش نسبتاً بالا و دما نسبتاً پایین است. کمترین بازده اگرژی نیز در حوالی ساعت ۱۷:۰۰ رخ می‌دهد که متناظر با کمترین شدت تابش در طول روز است. همچنین در این شکل بازده انرژی و اگرژی نیز با یکدیگر مقایسه شده‌اند. طبیعتاً بازده اگرژی بالاتر است چرا که بخشی از انرژی‌های تلف شده از منظر انرژی مانند حرارت، از دیدگاه اگرژی جزء انرژی‌های قابل استفاده هستند و به‌عنوان اگرژی تلف شده شناخته نمی‌شوند. طبق نمودار بالا بازده انرژی در طول مدت مطالعه، به حداکثر ۱۳/۹۴ درصد و بازده اگرژی به حداکثر ۱۶/۶۶ درصد می‌رسد. همچنین میانگین بازده انرژی و اگرژی در این مدت به ترتیب ۱۳/۱۹ و ۱۵/۶۲ درصد است. نکته جالب توجه این است که تقریباً در نقاطی که بازده اگرژی در نقاط بیشینه‌نسبی خود قرار می‌گیرد، بازده انرژی در نقاط کمینه نسبی است. دلیل این موضوع آن است که با افزایش شدت تابش، اگرژی ورودی نیز افزایش می‌یابد و به‌طور کلی باعث افزایش بازده اگرژی می‌شود و روند تغییرات این بازده، تقریباً مشابه تغییرات شدت تابش است. نقاط بیشینه و کمینه نسبی در نمودار شدت تابش بر حسب زمان، تقریباً همان نقاط بیشینه و کمینه نمودار بازده اگرژی بر حسب زمان است؛ اما طبیعتاً در نقاط بیشینه تابش، دما نیز بسیار بالا می‌رود.

در شکل ۱۲ میزان اگرژی ورودی، تلف شده، گرمایی و الکتریکی مشاهده می‌شوند. مطابق انتظار، با نزدیک شدن به ظهر، بالاترین میزان شدت تابش رخ می‌دهد و با نزدیک شدن به غروب از میزان آن کاسته می‌شود. به‌طور کلی همین روند نیز برای اگرژی ورودی قابل پیش‌بینی است، زیرا طبق رابطه (۱۶) شدت تابش تأثیر مستقیمی بر اگرژی ورودی دارد. همچنین از مقایسه شکل‌های ۸ و ۱۲ مشاهده می‌شود که در اواسط روز بیشترین اختلاف بین اگرژی ورودی و شدت تابش به وجود می‌آید، یعنی تغییرات شدت تابش با زمان، سریع‌تر از تغییرات اگرژی ورودی است؛ به عبارت دیگر شیب نمودار اگرژی بر حسب زمان، به‌طور کلی پایین‌تر از شیب نمودار شدت تابش است. دلیل این موضوع آن است که طبق رابطه (۱۶) اگرژی ورودی با دمای محیط رابطه عکس دارد و همین موضوع در دماهای بالاتر، از رشد اگرژی ورودی جلوگیری می‌کند؛ اگرچه تأثیر آن کمتر از شدت تابش است؛ بنابراین به‌طور کلی با نزدیک شدن به ظهر و زمان بیشینه شدن شدت تابش، اگرژی افزایش می‌یابد، اما چون افزایش شدت تابش در عمل باعث افزایش دمای محیط نیز می‌شود، این افزایش دما جلوی افزایش سریع اگرژی ورودی را در حوالی ظهر می‌گیرد؛ اما در حوالی صبح و عصر، روند تغییرات شدت تابش هماهنگی بیشتری با نرخ تغییرات اگرژی ورودی دارد. در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که نزدیک به ۸۵ درصد اگرژی ورودی به علت بازگشت‌ناپذیری‌ها تلف می‌شود و در بهترین حالت از نظر شدت تابش، تنها حدود ۱۵۰ وات از اگرژی ورودی به اگرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. بیشترین مقدار اگرژی حرارتی نیز در طول روز به حدود ۳۷ وات می‌رسد، این موضوع نشان می‌دهد که پنل‌های تولیدی، به‌رغم مزایای فراوانی که دارند، همچنان بخش عظیمی از اگرژی را هدر می‌دهند و فاصله زیادی تا یک بازده قابل قبول دارند. همچنین مشاهده می‌شود که اگرژی حرارتی حدود ۲۰ درصد اگرژی الکتریکی است. اگر سامانه ای بتواند از هر دو این اگرژی‌ها استفاده کند، قطعاً بازدهی اگرژی آن سامانه افزایش می‌یابد. به همین دلیل است

۱- میانگین بازده انرژی این پنل در طول روز ۱۳/۱۹ درصد است. در طول آزمایش، بیشترین مقدار بازده لحظه‌ای انرژی ۱۳/۹۴ و کمترین مقدار آن ۱۱/۲۲ درصد محاسبه شد.

۲- میانگین بازده آگرژی این پنل در طول روز ۱۵/۶۲ درصد است. به عبارتی تنها حدود ۱۶ درصد از آگرژی دریافتی از خورشید به انرژی قابل استفاده تبدیل می‌شود و بقیه آن به صورت بازگشت ناپذیری تلف می‌گردد که نشان دهنده بازده پایین فرآیند تبدیل انرژی در این پنل است. در طول آزمایش، بیشترین مقدار بازده لحظه‌ای آگرژی ۱۶/۶۶ و کمترین مقدار آن ۱۴/۷۷ درصد محاسبه شد.

۳- این پنل در زمانی که بیشترین شدت تابش وجود داشته باشد، ۱۰۶۵ وات آگرژی ورودی از طریق تابش خورشیدی دریافت می‌کند که در بهترین شرایط حدود ۱۵۰ وات از آن به آگرژی الکتریکی تبدیل می‌شود و بقیه آن به صورت آگرژی حرارتی و هدررفت آگرژی (بازگشت ناپذیری) هدر می‌رود. بیشترین مقدار آگرژی حرارتی نیز در طول مدت مطالعه ۳۷ وات محاسبه شد. البته آگرژی حرارتی می‌تواند برای مصارف گرمایشی نظیر آن چه در سامانه های فتوولتائیک حرارتی اتفاق می‌افتد، استفاده شود.

۴- افزایش شدت تابش و کاهش دما مهمترین عوامل افزایش توان الکتریکی و بازده آگرژی هستند؛ پس بهترین شرایط کارکرد این پنل خورشیدی، شرایطی است که بیشترین شدت تابش و پایین‌ترین دما را داشته باشد.

۵- افزایش دما در طول روز تأثیر بسیار مخربی بر بازده آگرژی و توان خروجی می‌گذارد؛ بنابراین می‌توان به خنک‌کاری این پنل‌ها به‌عنوان راهی برای افزایش بازدهی توجه کرد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان مقاله تعهد می‌نمایند که این مقاله در زمان ارسال برای این مجله در هیچ نشریه ایرانی یا غیرایرانی در حال بررسی نبوده و تا تعیین تکلیف قطعی در این نشریه برای هیچ نشریه ایرانی یا غیرایرانی دیگری ارسال نخواهد شد.

تعارض منافع: نویسندگان با اختیار و آگاهی کامل، کلیه حقوق مادی مربوط به انتشار این مقاله را به نشریه دانشگاه تربیت مدرس واگذار مینمایند.

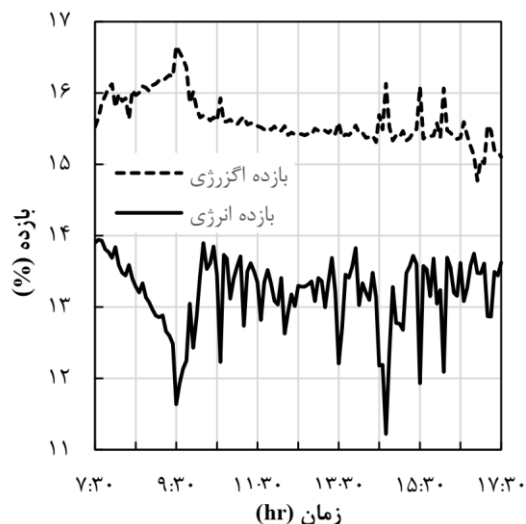
سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع مالی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

a	ضریب اصلاح شده ایده آل بودن، V
A	مساحت پنل، m ²
C	ضریب تناسب
e	خطا
E	انرژی، J



شکل ۱۳) تغییرات بازده انرژی و آگرژی در طول روز

از آنجا که انرژی حرارتی در محاسبه بازده انرژی به‌عنوان انرژی مفید به حساب نمی‌آید و از طرف دیگر، با افزایش دما نرخ تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی الکتریکی کاهش می‌یابد، در این نقاط بازده انرژی نیز کاهش پیدا می‌کند. در این شکل به‌طور کلی بازده آگرژی بالاتر از بازده انرژی است که منعکس‌کننده کیفیت بالاتر استحصال انرژی در سامانه‌ها در نتیجه پایداری بیشتر سامانه است؛ در حالی که بازده آگرژی پایین‌تر از بازده انرژی به دلیل عوامل برگشت ناپذیر داخلی است و در نتیجه کیفیت پایین انرژی و ناپایداری بیشتر را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش تحلیل یک نمونه پنل خورشیدی از دیدگاه انرژی و آگرژی بود. برای این منظور ابتدا مدل‌سازی الکتریکی پنل خورشیدی انجام شد تا منحنی‌های مشخصه عملکردی آن به دست آیند. این منحنی‌های مشخصه شامل نمودارهای جریان و توان بر حسب ولتاژ، در شدت‌های تابش و دماهای متفاوت بود. برای مدل‌سازی به روش تحلیلی یک کد کامپیوتری در نرم افزار متلب توسعه داده شد و نتایج حاصل از آن از طریق مقایسه با داده‌های گزارش شده توسط سازنده و همچنین نتایج تجربی اعتبارسنجی شد که بیانگر صحت و دقت مناسب مدل‌سازی بود. تحلیل و محاسبه بازده سیستم از دیدگاه انرژی بر اساس قانون اول ترمودینامیک و از دیدگاه آگرژی بر اساس قانون دوم ترمودینامیک با استفاده از نتایج حاصل از مدل‌سازی الکتریکی انجام شد. داده‌های لازم برای تحلیل نیز از طریق تجربی و در شرایط عملیاتی پنل خورشیدی اندازه‌گیری و استفاده شد تا دقت بالاتری حاصل گردد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که:

geothermal wells. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(2):335-46.

2- Abdolalipouradl M, Khalilarya S, Mohammadkhani F. Hydrogen Production Using Proposed Cycle from Sabalan Geothermal Wells via Proton Exchange Membrane Electrolysis. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(2): 267-278.

3- Mishra RK, Tiwari GN. Energy and exergy analysis of hybrid photovoltaic thermal water collector for constant collection temperature mode. Solar Energy. 2013;90:58-67.

4- Lazaroiu GC, Longo M, Roscia M, Pagano M. Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption. Energy Conversion and Management. 2015;92:143-8.

5- Sudhakar K, Srivastava T. Energy and exergy analysis of 36 W solar photovoltaic module. International Journal of Ambient Energy. 2014;35(1):51-7.

6- Aoun N, Nahman B, Chenni R. Study of Experimental Energy and Exergy of mono-crystalline PV Panel in Adrar Region, Algeria. International Journal of Scientific and Engineering Research. 2014;5(10):2229-5518.

7- Rahman MM, Hasanuzzaman M, Abd Rahim N. Effects of operational conditions on the energy efficiency of photovoltaic modules operating in Malaysia. Journal of cleaner production. 2017; 143:912-24.

8- Bayrak F, Ertürk G, Oztop HF. Effects of partial shading on energy and exergy efficiencies for photovoltaic panels. Journal of cleaner production. 2017;164:58-69.

9- Aberoumand S, Ghamari S, Shabani B. Energy and exergy analysis of a photovoltaic thermal (PV/T) system using nanofluids: An experimental study. Solar Energy. 2018;165:167-77.

10- Sukumaran S, Sudhakar K. Performance analysis of solar powered airport based on energy and exergy analysis. Energy. 2018;149:1000-9.

11- Karathanassis IK, Papanicolaou E, Belessiotis V, Bergeles GC. Dynamic simulation and exergetic optimization of a Concentrating Photovoltaic/Thermal (CPVT) system. Renewable Energy. 2019;135:1035-47.

12- Zhang H, Liang K, Chen H, Gao D, Guo X. Thermal and electrical performance of low-concentrating PV/T and flat-plate PV/T systems: A comparative study. Energy. 2019;177:66-76.

13- Li Z, Ji J, Yuan W, Song Z, Ren X, Uddin MM, Luo K, Zhao X. Experimental and numerical investigations on the performance of a G-PV/T system comparing with A-PV/T system. Energy. 2020;194:116776.

14- Yazdanifard F, Ameri M, Ebrahimniai Bajestan E, Investigating the effects of various parameters on the performance of a water-based photovoltaic/thermal system, Journal of energy engineering & management, 2016; 6(2): 46-59. (in Persian)

15- Jahanshah F, Hashemi A, Jahanshah F. Comparison of Solar PV/T Panels In Terms of Design and Performance. Journal of Renewable and New Energy. 2018;4(2):39-48.

اگرژی، W	Ex
ضریب انتقال حرارت، W/m ² K	h
جریان الکتریکی، A	I
ثابت بولتزمن، J/K	k
ضریب ایده آل بودن	n
تعداد سلول	N
توان الکتریکی، W	P
بار الکتریکی، C	q
مقاومت الکتریکی، Ω	R
شدت تابش، W/m ²	S
دما، K	T
سرعت، m/s	v
ولتاژ، V	V
علائم یونانی	
ضریب گسیل	ε
بازده	η
ضریب دمایی	μ
ثابت استفان - بولتزمن، w/m ² K	σ
ضریب مؤثر عبور-جذب	α _T
زیرنویس	
محیط	a
سلول	c
همرفت	conv
اتصال	D
الکتریکی	el
انرژی	en
اگرژی	ex
گاف انرژی	g
ورودی	in
القایی	L
بار	Load
ماژول	m
نقطه بیشترین توان	mp
تعداد داده‌ها	n
شرایط کاری نامی سلول	NOTC
عددی	Num
جریان تاریک	o
مدار باز	oc
خروجی	out
تابش	rad
مرجع	ref
جذر میانگین مربعات	rms
سری	s
اتصال کوتاه	sc
شدت	sh
آسمان	sky
خورشید	sun
گرمایی	th
باد	w

منابع

1- Abdolalipouradl M, Khalilarya S, Jafarmadar S. The thermodynamic analysis of a novel integrated transcritical CO₂ with Kalina 11 cycles from Sabalan

- 16- Shakoori M, Noorpoor A, Golzari S, Zamen M. Energy simulation and parametric analysis of water cooled photovoltaic/thermal system. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2019;50(6):1361-74.
- 17- Duffie JA, Beckman WA, Worek WM. *Solar engineering of thermal processes*.
- 18- Sahin AD, Dincer I, Rosen MA. Thermodynamic analysis of solar photovoltaic cell systems. *Solar energy materials and solar cells*. 2007;91(2-3):153-9.
- 19- Petela R. Exergy of undiluted thermal radiation. *Solar energy*. 2003;74(6):469-88.
- 20- Boyle G. *Renewable energy: power for a sustainable future*. Oxford University Press; 1996.
- 21- Watmuff JH, Charters WW, Proctor D. *Solar and wind induced external coefficients-solar collectors*. Cooperation Mediterranee pour l'Energie Solaire. 1977:56.
- 22- www.solarfun-power.com
- 23- Singh P, Ravindra NM. Temperature dependence of solar cell performance—an analysis. *Solar energy materials and solar cells*. 2012;101:36-45.
- 24- Al-Khazzar AA. Behavior of four Solar PV modules with temperature variation. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*. 2016;6(3):1091-9.
- 25- *Energy-Principles SP. of Thermal Collection & Storage*. SP Sukhatme, JK Nayak. 2009.