DOR: 20.1001.1.24234931.1401.9.1.8.9

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۰۰/۰۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۰۰/۰۷/۲۵

سال نهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۱، ص ص ۷۹- ۸۶

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

بررسی تغییرات عوامل تأثیرگذار تولید توان در فصول مختلف در نیروگاه‌های فتوولتائیک

حسن یزدانی[۱]، مهدی رادمهر[۲*]، علیرضا قربانی[۲]

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ساری، ساری، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ساری، ساری، ایران

* ساری، ایران، ۴۸۱۶۱۱۹۳۱۸، radmehr@iausari.ac.ir

چکیده

یکی از مؤلفه‌های مهم در احداث و راه‌اندازی نیروگاه‌های خورشیدی، شناخت عوامل مؤثر در تولید توان در مناطق مورد نظر براساس فصل‌ها و میزان تابش در هر فصل جهت احداث نیروگاه خورشیدی می‌باشد. از این رو در این پژوهش با مطالعهٔ ظرفیت خروجی یک نیروگاه ۱ کیلوواتی کوچک و آنالیز داده‌های مؤثر در فصول مختلف و مقایسه نتایج عملی و شبیه‌سازی، توانستیم داده‌های مفید و منطبقی را برای عوامل تأثیرگذار در توان تولیدی نیروگاه شناسایی نماییم. در روند مطالعه این پروژه، شناخت یک واحد سلولی و رفتار آن و مطالعه شیوه‌ها و داده‌های سایر محققین نظیر وقوع نقطه داغ (Hotspot) و سایه مورد بررسی قرار گرفته است. سپس به بررسی تأثیر تغییرات دما بر روی هر واحد از سلول پرداخته شده و با استفاده از پنل‌های با مشخصات ۱۰۰ واتی YH100W-18-M اقدام به بررسی عملی داده‌ها مبتنی بر نرخ STC و همزمان شبیه‌سازی داده‌ها و تطابق آن و استخراج نتایج نهایی شده و در نهایت نمودار تأثیرگذاری بر روی توان و جریان نیروگاه در تمام فصول یک سال استخراج گردیده است. نتایج بدست آمده که بصورت پارامترهای مهم در تألیف این مقاله می‌باشد، بیانگر اثرگذاری پارامترها نظیر دمای محیط و میزان تابش می‌باشد که در توان خروجی نیروگاه با توجه به فصول مختلف، نتایج معناداری پیدا می‌کند.

کلیدواژگان: نیروگاه خورشیدی، آرایه‌های فتوولتائیک، نقطه داغ، پنل خورشیدی، شبیه‌سازی

Investigating the changes in the effective factors in power generation in different seasons in photovoltaic power plants

Hassan Yazdani[1], Mehdi Radmehr[2*], Alireza Ghorbani[2]

1- PhD Student, Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Sari Branch, Sari, Iran

2- Assistant of Professor, Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Sari Branch, Sari, Iran

* P.O.B. 4816119318, Sari, Iran, radmehr@iausari.ac.ir

Received: 1 May 2021 Accepted: 17 October 2021

Abstract

An essential component in the construction and operation of solar power plants is identifying the factors affecting power generation in the desired areas based on the season and the amount of radiation in each season for the construction of solar power plants. Therefore, in this study, by examining the output capacity of a small 1kW power plant and analyzing effective data in different seasons, as well as by comparing practical and simulation results, we could identify useful and consistent data about factors affecting the production capacity of the plant. Then, the effect of temperature changes on each cell unit was investigated. Using a 100W YH100W-18-M panel, a practical study of the data was performed based on the STC rate. Meanwhile, the data were simulated and matched, and the final results were extracted. Finally, the diagram of the impact on the power and current of the power plant in all seasons of the year was extracted. The obtained results, namely the effective parameters in compiling this article, indicated the effectiveness of parameters such as the ambient temperature and the amount of radiation, yielding significant results in the output power of the power plant in different seasons.

Keywords: Solar power plant, Photovoltaic arrays, Hotspot, Solar panel, Simulation

مالکیت معنوی این مقاله تحت گواهی بین المللی تخصیص ۴ کریتیو کامنز محفوظ است

۱- مقدمه

گرمای جهان و محدودیت منابع سوخت فسیلی نیاز به منابع انرژی تجدیدپذیر را افزایش داده است [۱]. تابش خورشیدی بزرگترین منبع انرژی تجدیدپذیر است [۳,۲]. انرژی‌های تجدیدپذیر و بخصوص انرژی خورشیدی در سبد انرژی کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه جایگاه ویژه‌ای یافته است. کشور ایران به‌دلیل برخورداری از موقعیت جغرافیایی مناسب و داشتن میانگین ۳۰۰ روز آفتابی در سال، مکان مناسبی جهت سرمایه‌گذاری در زمینه انرژی خورشدی فتوولتائیک است [۴].

در یک مطالعه و پژوهش [۵]، عوامل مؤثر بر انرژی خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته شد و سپس با توجه به ماهیت مکانی متغیرهای مؤثر در مکان‌یابی نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک و با تلفیق آن‌ها به وسیله روش فازی در محیط سیستم اطلاعات مکانی، مناطق مستعد در سطح کشور شناسایی و در چهار سطح نامناسب (۶۵ درصد)، خوب (۲۳ درصد)، خوب (۲۳ درصد)، عالی (۱۱ درصد) و ممتاز (۱ درصد) بر حسب بیشترین امتیاز برهم‌نهی فازی طبقه‌بندی شد. در این رتبه‌بندی استان‌های کرمان، خراسان جنوبی، فارس، یزد، هرمزگان و سیستان و بلوچستان به ترتیب مناسب‌ترین مناطق شناخته شدند. در مجموع مساحتی بالغ بر ۵۵۷۰۰۰ کیلومترمربع از خاک ایران دارای پتانسیل بالا جهت احداث نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک است.

با توجه به رشد بی‌رویه مصرف انرژی کشور در دهه ۹۰ خورشیدی، محققان پیش‌بینی کرده‌اند که تا قبل از افق ۱۴۰۴، ایران از یک کشور صادرکننده انرژی، به کشور وارد کننده انرژی تبدیل خواهد شد. برای مقابله با این تهدید، اجرای راهکارهای بهینه‌سازی تولید، توزیع و مصرف انرژی، اصلاح الگوی مصرف آن و به کارگیری انرژی‌های تجدید پذیر ضروری است. بر این اساس، دانشگاه‌ها و شرکت‌ها دانش‌بنیان با ورود به این حوزه باید پیش‌قدم باشند. خوشبختانه در راستای مطالعه و تحقیق در دانشگاه‌ها، دانشگاه علوم تحقیقات به عنوان یکی از اولین پیشگامان به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر در واحدهای دانشگاهی، یک نیروگاه خورشیدی ۱۲ کیلوواتی احداث نموده است [۶].

یکی دیگر از مباحثی که در سیستم‌های برق خورشیدی بسیار به آن کم پرداخته شده است، بررسی خطا و عوامل تأثیرگذار بر توان خروجی در این سیستم‌ها و روش‌های مانیتورینگ آن می‌باشد. برخلاف سایر مولدهای انرژی‌های نو نظیر توربین‌های بادی و هسته‌ای، در سیستم‌های برق خورشیدی خطایابی و پیدا کردن خطا در بخش پنل‌ها بسیار دشوارتر از آن است که به‌صورت انسانی و مکانیکی قابل تشخیص باشد. لذا باید براساس جغرافیای محیط و استفاده از مطالعات آماری و منطقه‌ای، رخدادهای تأثیرگذار در آرایه‌ها و پنل‌ها را به دقت بررسی کرد و حتی دلایل و احتمالات عیوب را نیز مشخص نمود. برای مثال در یک سیستم خورشیدی اینورترها مانند قلب سیستم عمل می‌کنند و برق DC تولید شده را به AC تبدیل می‌کنند. اختلال در وضعیت عملکرد این بخش می‌تواند تأثیر بالقوه‌ای بر تولید توان خروجی بگذارد.

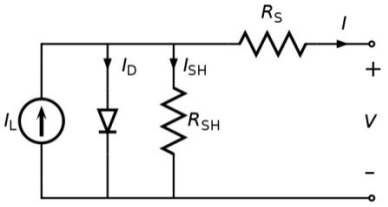
عوامل رایج فیزیکی موثر بر توان تولیدی پنل‌های خورشیدی که در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرند شامل عیوب اتصالات سلول، شکستگی پنل، تلفات حرارتی و وضعیت سایه می‌باشد که این موارد مجزا از تأثیرات تغییرات تابشی و دمایی فصلی است. همچنین یکی از موارد قابل توجه در پنل‌های خورشیدی اتصالات MC4 می‌باشد که بعد از پنل ممکن است یکی از دلایل بروز خطا به‌دلیل قطعی یا جدا شدن اتصال رخ دهد.

از طرف دیگر پیکربندی یک سیستم تولید برق فتوولتائیک (PV) به‌خصوص اگر مستعد سایه جزئی باشد، روی عملکرد مولد تأثیر دارد. در شبیه‌سازی‌ها، جریان دیود هرزگرد غیرموازی با سلول‌های سایه‌دار جهت جلوگیری از سوختگی سلول خورشیدی لحاظ شده است [۷].

مدل شبیه‌سازی شده به کار رفته در مقاله، با مقادیر مشخصه ماژول PV NAPS NP190GKg تطبیق داده شده است [۸].

۲- تأثیر سایه بر عملکرد پنل‌های خورشیدی

مدار معادل یک سلول خورشیدی در شکل ۱ درج شده است.



شکل ۱ مدار معادل سلول خورشیدی [۹]

هنگامی که سایه بر روی پنل‌های خورشیدی رخ می‌دهد، ۲ حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۰]:

الف) حالت اول پنل دارای دیود بای‌پس یا دیود بلاکینگ (سد کننده) نیست:

عملکرد تولید توان یک سلول بطور مستقیم تحت تأثیر میزان تابش است. اگر یک سلول از میان یک پنل (که از سری شدن سلول‌ها حاصل شده است) تحت سایه قرار بگیرد، جریان آن سلول کاهش یافته و عملکرد پنل دستخوش تغییر اساسی می‌شود؛ چون سلول‌هایی که به‌صورت سری قرار گرفته‌اند، جریان آن‌ها باید برابر باشد.

اما چون سلولی که تحت سایه است قادر به تولید جریان نیست، به ناچار سلول‌های دیگر که تحت سایه نیستند باید از سلول سایه افتاده پیروی کنند تا جریان مدار سری برابر شود. در نتیجه جریان خروجی پنل بطور چشمگیری کاهش یافته و عملاً پنل قادر به تولید توان نخواهد بود.

اما مسئله در همین جا تمام نمی‌شود، از دست رفتن تولید توان کل قضیهء سایه اندازی نیست و تنها یک طرف قضیه است. هنگامی که سایه روی سلول است ولتاژ دو سر سلولی که سایه روی آن افتاده است، قابل بحث است.

پنلی را در نظر می‌گیریم که از ۶۰ سلول سری شده تشکیل شده است؛ ۶ استرینگ ده تایی. با فرض اینکه هر سلول، ولتاژی برابر ۰/۶ ولت تولید می‌کند. اگر فرض کنیم سلول شماره ۱۶ دچار سایه شود، پتانسیل قطب‌های مثبت و منفی سلول برابر خواهد شد با:

$$V_{positive} = -(44) \times 0.6 = -26.4\ volt \quad (۱)$$

$$V_{negative} = +(15) \times 0.6 = 9\ volt \quad (۲)$$

در نتیجه ولتاژ دو سر سلول شماره ۱۶ برابر خواهد بود با:

$$V_{shaded_cell} = V_{positive} - V_{negative} = -26.4 - 9 = -35.4\ volt \quad (۳)$$

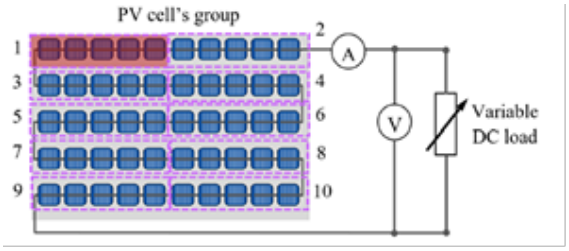
در سلول‌های خورشیدی بطور کلی ولتاژ شکست بایاس معکوس برابر با ۱۳- ولت می‌باشد [۱۱]. با توجه به اینکه ولتاژ دو سر سلولی که سایه روی

آن افتاده است بیشتر از ولتاژ شکست بایاس معکوس سلول می‌باشد، این ولتاژ باعث تولید گرمای زیاد و در نهایت آسیب جدی به سلول می‌شود که به پدیده نقطه داغ معروف است (شکل ۲).

بنابراین مسئله سایه‌افتادگی روی پنل دو پیامد منفی دارد:

۱- عدم تولید توان

۲- مسئله پدیده نقطه داغ



شکل ۲ اخلال در عملکرد پنل خورشیدی به‌علت از کار افتادن بخشی از سلول‌های آن به‌علت پدیده نقطه داغ [۱۲]

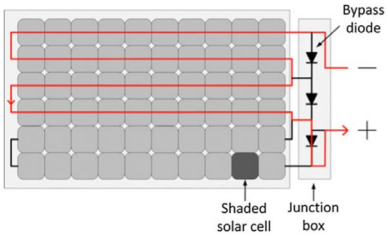
جا دارد اشاره شود هنگامی که سایه تنها روی یک سلول بیفتد، از نظر مسئله تولید حرارت بدترین شرایط ممکن است زیرا ولتاژ سلول‌های دیگر در نهایت به‌طور معکوس همگی روی آن سلول اعمال می‌شود. در این حالت می‌توان نوشت:

$$V_{shaded\ cell} = -(N_{cell} - 1) \times V_{cell} = -(60 - 1) \times 0.6 = -35.4\ volt \quad (۴)$$

ب) حالت دوم پنل دارای دیود بای‌پس باشد:

همانطور که اشاره شد، مسئله‌ی نقطه داغ تهدید جدی در سایه‌افتادگی روی پنل محسوب می‌شود. یک راه حل برای این مسئله استفاده از دیود بای‌پس می‌باشد. ابتدا به نظر می‌رسد که هر سلول دارای دیود بای‌پس باشد، اما این امر هم هزینه‌بر است و هم به لحاظ اجرایی آسان نیست. به همین خاطر جهت سهولت گروهی از سلول‌ها توسط یک دیود بای‌پس محافظت می‌شوند.

در برخی حالات فرضاً در یک پنل دارای ۶۰ سلول که به‌صورت ۶ استرینگ ۱۰ تایی سری شده‌اند، هر استرینگ توسط یک دیود بای‌پس محافظت می‌شوند و نیاز به ۶ عدد دیود می‌باشد؛ در موارد دیگر از جمله پنل‌های ینگلی سولار، هر دو استرینگ به عبارت دیگر هر ۲۰ سلول توسط یک دیود بای‌پس محافظت می‌شوند [۱۳]. برای اینکه دیود در حالت نرمال در شرایط بایاس معکوس باشد و هدایت نکند، آند دیود به قطب منفی سلول اول و کاتد دیود به قطب مثبت سلول متناظر در استرینگ بعدی وصل می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳ پنل خورشیدی دارای یک سلول سایه‌دار که منجر به دور زدن یک رشته از ۲۰ سلول خورشیدی می‌شود [۱۴]

در این حالت در شرایط نرمال که سایه روی پنل نباشد، ولتاژ دو سر هر دیود بای‌پس برابر خواهد بود با (ولتاژ دو سر هر یک از سلول‌های خورشیدی در حالت دریافت نور برابر ۰/۶ ولت است):

$$V_{diode\ unshaded} = -(20) \times 0.6 = -12\ volt \quad (۵)$$

چون ولتاژ دو سر دیود منفی می‌باشد، دیود در بایاس معکوس بوده و هدایت نمی‌کند. همچنین ولتاژ ۱۲- از ولتاژ شکست دیود بای‌پس کمتر بوده و مشکلی ایجاد نمی‌شود. اگر سایه روی پنل بیفتد، برای بررسی حداکثر ولتاژ معکوس، فرض می‌کنیم که تنها یک سلول دچار سایه‌افتادگی شده باشد.

در این حالت با توجه به اینکه ۲۰ سلول توسط یک دیود محافظت می‌شوند، خواهیم داشت:

$$V_{shaded\ cell} = -(20 - 1) \times 0.6 = -11.4\ volt \quad (۶)$$

در این حالت حداکثر ولتاژ معکوس روی سلول برابر ۱۱/۴- ولت خواهد بود که کمتر از ۱۳- ولت ولتاژ شکست آن می‌باشد. پس سلول در برابر پدیده نقطه داغ محافظت خواهد شد [۱۵].

در این حالت ولتاژ دو سر دیود بای‌پس صفر خواهد شد که این مقدار بالاتر از مقدار ۱۱/۴- ولت می‌باشد و دیود در بایاس مستقیم قرار گرفته و هدایت می‌کند. با هدایت دیود بای‌پس، سلول‌هایی که توسط آن دیود محافظت می‌شوند، بای‌پس شده و از مدار خارج می‌شوند و بقیه پنل به تولید توان خود ادامه می‌دهد و خللی در عملکرد ۴۰ سلول دیگر ایجاد نمی‌شود و پنل تنها یک سوم تولید خود را از دست می‌دهد. به عبارت دیگر استفاده از ۳ دیود بای‌پس پنل را به ۳ زیرمجموعه تقسیم می‌کند که عملکرد آن‌ها در سایه‌افتادگی همدیگر را تحت تأثیر قرار نخواهند داد.

با استفاده از دیود بای‌پس هم سلول‌های دچار سایه‌افتادگی در مقابل پدیده‌ی نقطه داغ محافظت می‌شوند و هم اینکه توان پنل ادامه خواهد یافت و با سایه‌افتادگی روی تنها یک سلول، کل توان پنل از دست نخواهد رفت.

۲-۱- تأثیر عملکرد دما بر روی پنل

فرض می‌کنیم β و α به ترتیب ضرایب I_0 و V_0 (که به ترتیب جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز در دمای مرجع T هستند) هستند و اگر دما به اندازه ΔT افزایش یابد I_{SC} و V_{OC} به‌صورت معادله ۷ و ۸ تغییر می‌کنند [۱۶]:

$$I_{SC} = I_0(1 + \alpha \times \Delta T) \quad (۷)$$

$$V_{OC} = V_0(1 - \beta \times \Delta T) \quad (۸)$$

در این صورت، توان برابر خواهد بود با:

$$P = VI = V_0(1 - \beta \times \Delta T) I_0(1 + \alpha \times \Delta T) \quad (۹)$$

و به‌صورت معادله ۱۰ ساده‌تر خواهد شد:

$$P = P_0[1 + (\alpha - \beta)\Delta T] \quad (۱۰)$$

برای یک سلول سیلیکونی مونوکریستال α در حدود ۲۰×۱۰^{-۶} و β در حدود ۵×۱۰^{-۳} است [۱۶]. در نتیجه برای توان خواهیم داشت:

$$P = P_0[1 + (20 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-3})\Delta T] \quad (۱۱)$$
$$= P_0[1 - 0.005\,\Delta T]$$

پس نتیجه می‌گیریم که با افزایش دما به اندازه یک درجه سانتیگراد، توان یک سلول سیلیکونی ۰/۵ درصد کاهش می‌یابد زیرا افزایش جریان خیلی کمتر از کاهش ولتاژ است.

۲-۲- دمای واقعی سلول خورشیدی

دمای عملیاتی سلول‌های خورشیدی که دمایی بالاتر از دمای محیط دارند، به عوامل محیطی وابسته است که به کمک معادله ۱۲ محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$T_m = T_{amb} + (\frac{NOCT-20}{800}) \times s \quad (۱۲)$$

T_m برابر با دمای عملیاتی نامی سلول‌های خورشیدی، T_{amb} برابر با دمای محیط، NOCT (nominal operating cell temperature) برابر با دمای سلول در شرایط نامی و s برابر با تابش رسیده به زمین در منطقه مورد بررسی، بر حسب کیلووات بر مترمربع است. مقدار NOCT ثابت است درحالیکه مقادیر T_{amb} و s با گذشت زمان تغییر می‌کند.

۳- تأثیر عملکرد اتصالات و اینورتر بر توان خروجی

مطابق استاندارد IEC 61727 یا استاندارد ملی ۰۰۸۵۱، الزامات اتصال به شبکه یک نیروگاه فتوولتائیک بطور کلی شامل موارد زیر است:

۱. الزامات کیفیت توان
۲. الزامات تشخیص خطا و حفاظت
۳. الزامات سنکرونسازی و اتصال مجدد
۴. الزامات کیفیت توان توسط کنترل‌کننده اصلی

طبق جدول ۱ می‌توان رخداد عیوب بیشتری را در مجموعه نیروگاه خورشیدی بررسی کرد [۱۸]:

جدول ۱ تعداد تکرار گزارش‌ها و تلفات انرژی مربوط برای هر رخداد

General Root Cause	P_{ct} of tickets	P_{ct} of Kwh lost
Inverter	43%	36%
AC Subsystem	14%	20%
External	12%	20%
Other	9%	7%
Support Structure	6%	3%
DC Subsystem	6%	4%
Planned Outage	5%	8%
Modules	2%	1%
Weather Station	2%	0%
Meter	1%	0%

این حقیقت که بیشتر مسائل در اینورتر رخ می‌دهد به‌دلیل پیچیدگی و عملکرد فعال اینورتر نسبت به سایر بخش‌های سیستم، امری طبیعی است. این نتایج موافق با یافته‌های گزارش شده از سال ۲۰۰۹ تاکنون است [۱۹].

۴- روش‌ها و نتایج

روش انجام تحقیقات در این پژوهش و بدست آوردن نتایج، سه مرحله مطالعاتی را پشت سر گذاشته شده است که شامل شبیه‌سازی پارامترها در متلب، مقایسه پارامترها و صحت‌سنجی و آزمایش عملی بر روی پنل واقعی در فصول مختلف است.

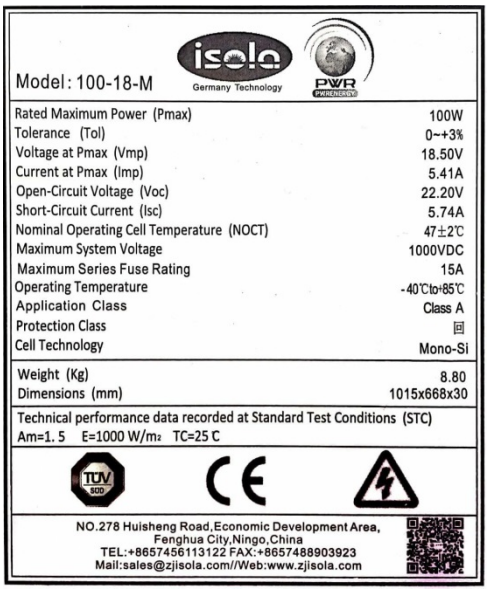
در این پژوهش مقدار تابش برابر با کمترین شرایط روشنایی در اقلیم ایران در نظر گرفته شده است و در استان مازندران شهرستان ساری مطالعات لازم از تاریخ فروردین ۹۸ الی بهمن ۹۹ به مدت ۲۲ ماه در نظر گرفته شده است.

توان نیروگاه مورد بررسی ۱ کیلووات بوده که با استفاده از ۱۰ عدد پنل خورشیدی ۱۰۰ وات با مشخصات YH100W-18-M از شرکت Isola با مشخصات شکل زیر مورد بهره‌برداری قرار گرفته شده است. یکی از دلایل استفاده از این نوع پنل در پژوهش فعلی، در دسترس بودن و همچنین امکان تهیه در تعداد کم بوده است و همچنین عدم تفاوت ساختاری معناگرا که موجب تغییرات گسترده در توان مجموعه شود، وجود نداشت و میان پنل‌های تولید داخل و تولید خارج، تفاوت محسوسی نبوده و به طور تقریبی دارای استاندارد یکسان در طراحی بوده‌اند.

همانطور که در شکل ۴ مشخص شده است، در برگه مشخصات فنی پنل‌های مورد پژوهش مشخصات فنی آن درج شده که برخی از پارامترهای مهمی که می‌توان به آن اشاره نمود به مقدار ولتاژ ماکزیمم که برابر با ۱۸/۵ ولت و همچنین جریان مؤثر است که ۵/۴۱ آمپر می‌باشد.

۴-۱- توان نامی آرایه‌های خورشیدی

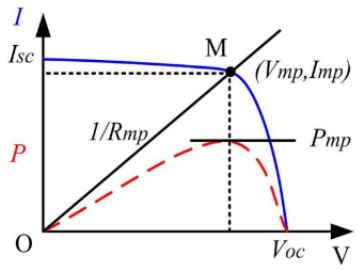
برای تعیین نرخ STC در آزمایشگاه، پنل خورشیدی را در شرایط ایده‌آل یا «پیک خورشیدی» که برابر است با ۱۰۰۰ وات تابش خورشید در یک مترمربع از سطح، آزمایش شده است. این شرایط برابر با تابش خورشید در ظهر در روز آفتابی در ناحیه خط استوا است.



شکل ۴ مشخصات فنی پنل ۱۰۰ وات شرکت Isola

در شکل ۵، منحنی جریان-ولتاژ (I-V) و منحنی توان-ولتاژ (P-V) پنل خورشیدی نشان داده شده است. در اینجا V_{oc} و I_{sc} به ترتیب به ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه پنل اشاره دارد. نقطهٔ حداکثر توان (MPP)، نقطه‌ای است که در آن قلهٔ منحنی P-V حاصل شود، یا نقطه‌ای بر روی منحنی I-V است که بزرگترین ناحیهٔ مستطیل شکل ممکن (برابر با $I_{mp} \times V_{mp}$) تحت این

منحنی را تعریف نماید. هرچند ولتاژ نقطهٔ MPP با تغییر مقدار تابش، چندان تغییر نمی‌کند، اما با کاهش دما، به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. بنابراین، به منظور اطمینان از حصول حداکثر توانِ ممکن تحت شرایط کاری مختلف، معمولاً یک تابع ردیابی نقطهٔ MPP در سیستم نیروگاه خورشیدی گنجانده می‌شود.

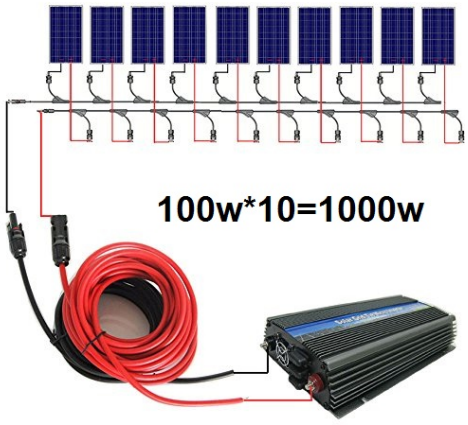


شکل ۵ منحنی V-I (خط ممتد) و منحنی P-V (نقطه چین) پنل خورشیدی بدون سایه اندازی

در این پژوهش برای بهترین عملکرد و پایداری بیشتر از سنسورهای جریان CT که به‌صورت غیر تهاجمی به‌دلیل تطبیق و هماهنگی بهتر با کابل‌های MC4 است، استفاده شده است.

۴-۲- نقشه اتصالات نیروگاه ۱۰۰۰ واتی

همانگونه که در شکل ۶ مشخص شده با استفاده از ۱۰ عدد پنل ۱۰۰ واتی و اتصال آن توسط رابط‌های MC4 به اینورتر سینوسی و بدون باتری بک‌آپ برای بررسی عملکرد و آزمایش‌های گوناگون مقدار ۱۰۰۰ وات برابر ۱ کیلووات انرژی جهت تولید به بار خواهیم داشت.



شکل ۶ نقشه اتصالات مجموعه ۱۰۰۰ واتی توسط ۱۰ عدد پنل ۱۰۰ وات

در این پژوهش پنل‌ها در شرایط مختلف و آزمون‌های گوناگون و بعضاً مجزا مورد آنالیز و تست قرار گرفته تا نتایج دقیق‌تری برای بررسی عملکرد پارامترهای مورد بررسی در نیروگاه مورد مطالعه قرار گیرد.

شرایط دمایی و میانگین تابش مورد مطالعه در جدول ۲ نمایش داده شده است که براساس داده‌های مندرج در دیتابیس سازمان هواشناسی جهانی استخراج شده است.

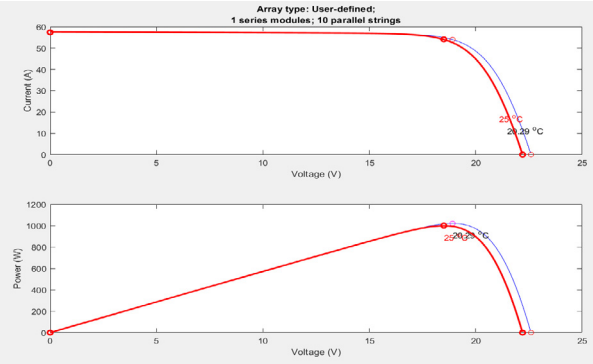
جدول ۲ میانگین دما و تابش در فصول سال

	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
میانگین دما (درجه سانتیگراد)	۲۰/۲۹	۲۶/۳۳۶	۱۴/۷۱۳	۸/۸۷۶
میانگین تابش (وات بر متر مربع)	۱۹۳۰/۸۵	۱۷۶۵/۳۸۳	۹۶۳/۶	۱۱۵۹/۴۸۳

۴-۳- استخراج توان و جریان خروجی در فصل‌های مختلف

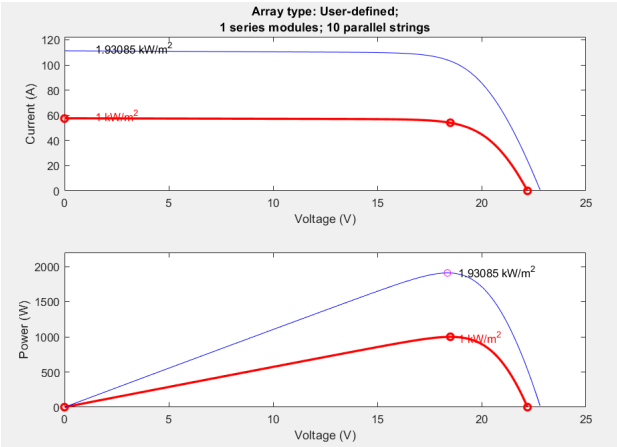
برای درک بهتر تأثیر عوامل مؤثر در توان خروجی نیروگاه خورشیدی، نیاز به قرائت جریان‌های خروجی و استخراج توان و تطبیق داده‌های STC و هواشناسی در شبیه‌سازی متلب می‌باشد تا نتایج نهایی در فصول مختلف سال بدست آید.

پارامترهای ذکر شده در تمامی نمودارهای بخش ۳-۴ در پژوهش فعلی، با دو رنگ مختلف نشان داده شده است. رنگ قرمز داده‌های مرتبط با شرایط STC و رنگ آبی داده‌های شبیه‌سازی شده است تا صحت‌سنجی و آنالیز در این پژوهش با کمترین خطا صورت پذیرد. هم‌چنین تأثیر پارامترهای مختلف بر روی توان خروجی نیروگاه خورشیدی در حالت شبیه‌سازی و واقعیت در فصول مختلف از سال (شکل ۷ الی شکل ۱۴) و در جدول‌های جداگانه‌ای (جدول ۳ الی جدول ۶) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۷ مقایسه توان ماکزیمم و جریان خروجی نیروگاه خورشیدی در دمای استاندارد و در میانگین دمای فصل بهار تحت تابش ثابت ($1000\ W/m^2$)

توان ماکزیمم در دمای ۲۵ درجه، ۱۰۰۱ وات و در دمای ۲۰/۲۹ درجه، ۱۰۲۱ وات که نشان از افزایش تقریباً ۲ درصدی در توان ماکزیمم خروجی آرایه‌های خورشیدی است (شکل ۷).

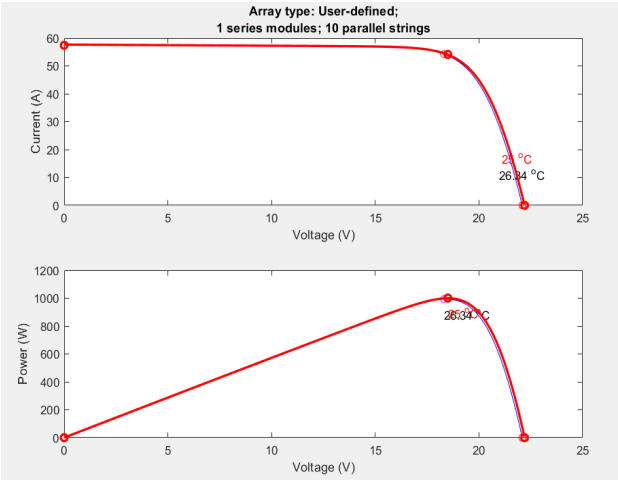


شکل ۸ مقایسه توان ماکزیمم و جریان خروجی نیروگاه خورشیدی در تابش استاندارد و در میانگین تابش فصل بهار تحت دمای ثابت (۲۵ درجه سانتیگراد)

توان ماکزیمم در تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع، ۱۰۰۱ وات و در تابش ۱۹۳۰/۸۵ وات بر متر مربع، ۱۹۰۹ وات که نشان از افزایش تقریباً ۹۰/۷ درصدی در توان ماکزیمم خروجی آرایه‌های خورشیدی است (شکل ۸).

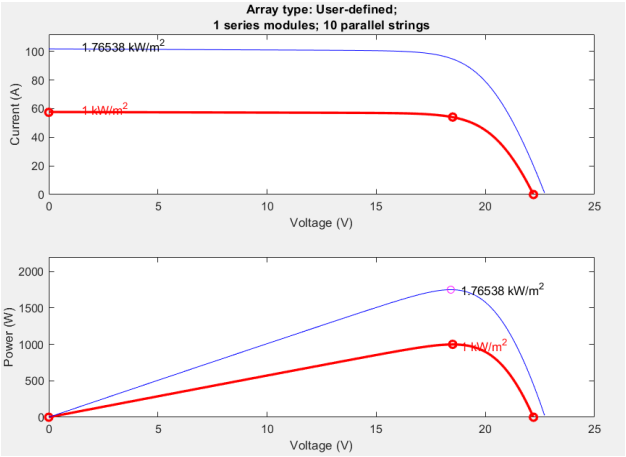
جدول ۳ مقایسه تأثیر پارامترهای مختلف بر روی توان خروجی نیروگاه خورشیدی در حالت شبیه‌سازی و واقعیت – فصل بهار

پارامترهای موثر	تأثیر توان خروجی در حالت شبیه سازی	تأثیر توان خروجی در حالت واقعی
دمای محیط و پنل‌ها	۲ درصد افزایش	۱۰ درصد افزایش
میزان تابش بر متر مربع	۹۰/۷ درصد افزایش	۲۸ درصد افزایش



شکل ۹ مقایسه توان ماکزیمم و جریان خروجی نیروگاه خورشیدی در دمای استاندارد و در میانگین دمای فصل تابستان تحت تابش ثابت ($1000\ W/m^2$)

توان ماکزیمم در دمای ۲۵ درجه، ۱۰۰۱ وات و در دمای ۲۶/۳۴ درجه، ۹۹۸/۲ وات که نشان از کاهش تقریباً ۰/۲۸ درصدی در توان ماکزیمم خروجی آرایه‌های خورشیدی است (شکل ۹).

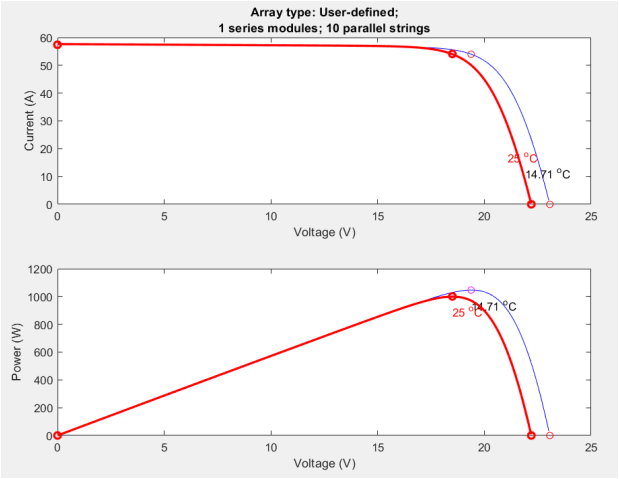


شکل ۱۰ مقایسه توان ماکزیمم و جریان خروجی نیروگاه خورشیدی در تابش استاندارد و در میانگین تابش فصل تابستان تحت دمای ثابت (۲۵ درجه سانتیگراد)

توان ماکزیمم در تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع، ۱۰۰۱ وات و در تابش ۱۷۶۵/۳۸وات بر متر مربع، ۱۷۵۱ وات که نشان از افزایش تقریباً ۷۴/۹۳ درصدی در توان ماکزیمم آرایه‌های خورشیدی است (شکل ۱۰).

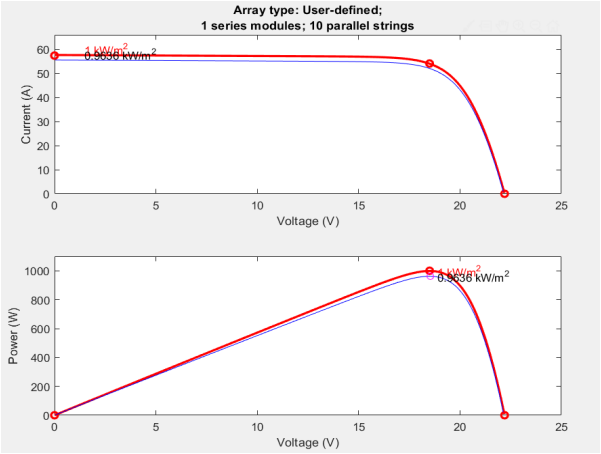
جدول ۴ مقایسه تأثیر پارامترهای مختلف بر روی توان خروجی نیروگاه خورشیدی در حالت شبیه‌سازی و واقعیت – فصل تابستان

پارامترهای موثر	تأثیر توان خروجی در حالت شبیه سازی	تأثیر توان خروجی در حالت واقعی
دمای محیط و پنل‌ها	۰/۲۸ درصد کاهش	۱۶ درصد کاهش
میزان تابش بر متر مربع	۷۴/۹۳ درصد افزایش	۱۰ درصد افزایش



شکل ۱۱ مقایسه توان ماکزیمم و جریان خروجی نیروگاه خورشیدی در تابش استاندارد و در میانگین تابش فصل پاییز تحت تابش ثابت ($1000\ W/m^2$)

توان ماکزیمم در دمای ۲۵ درجه، ۱۰۰۱ وات و در دمای ۱۴/۷۱ درجه، ۱۰۴۷ وات که نشان از افزایش تقریباً ۶/۴ درصدی در توان ماکزیمم خروجی آرایه‌های خورشیدی است (شکل ۱۱).

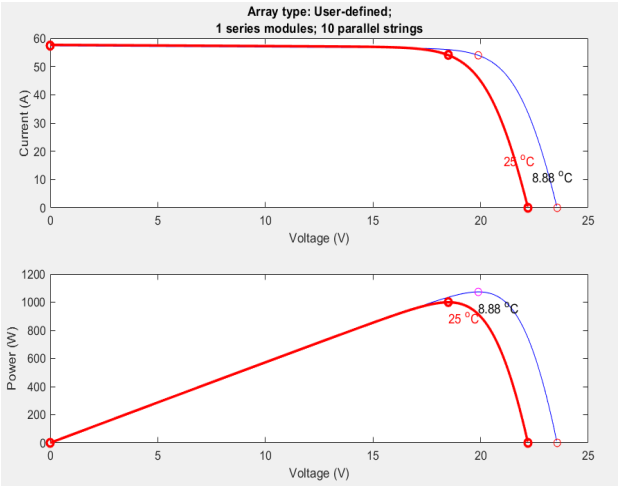


شکل ۱۲ مقایسه توان ماکزیمم و جریان خروجی نیروگاه خورشیدی در تابش استاندارد و در میانگین تابش فصل پاییز تحت دمای ثابت (۲۵ درجه سانتیگراد)

توان ماکزیمم در تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع، ۱۰۰۱ وات و در تابش ۹۶۳/۶ وات بر متر مربع، ۹۶۲/۷ وات که نشان از کاهش تقریباً ۳/۷۴ درصدی در توان ماکزیمم خروجی آرایه‌های خورشیدی است (شکل ۱۲).

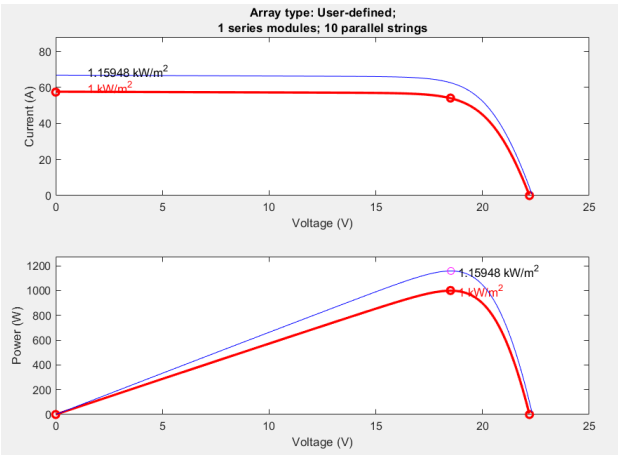
جدول ۵ مقایسه تأثیر پارامترهای مختلف بر روی توان خروجی نیروگاه خورشیدی در حالت شبیه‌سازی و واقعیت – فصل پاییز

پارامترهای موثر	تأثیر توان خروجی در حالت شبیه سازی	تأثیر توان خروجی در حالت واقعی
دمای محیط و پنل‌ها	۶/۴ درصد افزایش	۸ درصد افزایش
میزان تابش بر متر مربع	۳/۷۴ درصد کاهش	۷ درصد کاهش



شکل ۱۳ مقایسه توان ماکزیمم و جریان خروجی نیروگاه خورشیدی در تابش استاندارد و در میانگین تابش فصل زمستان تحت تابش ثابت ($1000\ W/m^2$)

توان ماکزیمم در دمای ۲۵ درجه، ۱۰۰۱ وات و در دمای ۸/۸۸ درجه، ۱۰۷۳ وات که نشان از تقریباً افزایش ۷/۲ درصدی در توان ماکزیمم خروجی آرایه‌های خورشیدی است (شکل ۱۳).



شکل ۱۴ مقایسه توان ماکزیمم و جریان خروجی نیروگاه خورشیدی در تابش استاندارد و در میانگین تابش فصل زمستان تحت دمای ثابت (۲۵ درجه سانتیگراد)

توان ماکزیمم در تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع، ۱۰۰۱ وات و در تابش ۱۱۵۹/۴۸ وات بر متر مربع، ۱۱۵۹ وات که نشان از افزایش تقریباً ۱۵/۷۸ درصدی در توان ماکزیمم خروجی آرایه‌های خورشیدی است (شکل ۱۴).

جدول ۶ مقایسه تأثیر پارامترهای مختلف بر روی توان خروجی نیروگاه خورشیدی در حالت شبیه‌سازی و واقعیت – فصل زمستان

پارامترهای موثر	تأثیر توان خروجی در حالت شبیه سازی	تأثیر توان خروجی در حالت واقعی
دمای محیط و پنل‌ها	۷/۲ درصد افزایش	۷ درصد افزایش
میزان تابش بر متر مربع	۱۵/۷۸ درصد افزایش	۶ درصد افزایش

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تغییرات عوامل تأثیرگذار تولید توان در فصول مختلف در نیروگاه‌های فتوولتائیک پرداخته شده است. به همین منظور مدلی برای نیروگاه یک کیلوواتی (شامل ۱۰ عدد پنل ۱۰۰ واتی از نوع مونوکریستال) در محیط سیمولینک متلب و نمونه واقعی ارائه و مقایسه شده است. در این مدل به منظور بررسی جداگانه تأثیر مقدار تابش و مقدار دما بر توان خروجی نیروگاه فتوولتائیک آزمایش‌های مختلفی صورت گرفته است. نتایج بیانگر آن است که هر چه دمای پنل و محیط کمتر باشد، ماکزیمم توان خروجی نیروگاه بیشتر است. از سوی دیگر، از نظر تابش نور خورشید، مواقعی که بیشترین تابش بر روی پنل باشد، ماکزیمم توان خروجی نیروگاه فتوولتائیک نیز افزایش می‌یابد.

بررسی‌ها نشان داد که در فصل بهار پارامترهای دما و تابش موجب افزایش توان خروجی نیروگاه خورشیدی می‌شود. هم چنین در این فصل پارامتر تابش نسبت به دما، تأثیر بیشتری بر روی توان خروجی نیروگاه خورشیدی دارد. در فصل تابستان اگر چه افزایش دما موجب کاهش توان خروجی نیروگاه خورشیدی می‌شود اما با افزایش پارامتر تابش در این فصل، توان خروجی نیروگاه افزایش می‌یابد. در فصل پاییز با کاهش میزان تابش، توان خروجی نیروگاه اندکی کاهش می‌یابد اما با کاهش دما توان خروجی نیروگاه خورشیدی در مجموع به مقدار بسیار کمی افزایش می یابد. در فصل زمستان پارامتر دما و هم پارامتر تابش باعث عدم تأثیرگذاری بر افت شدید توان خروجی نیروگاه خورشیدی می‌شود. همه این نتیجه‌گیری‌ها در شرایط آب و هوایی استان مازندران و با STC جغرافیای مورد مطالعه استخراج شده است.

در مجموع می‌توان این نتیجه‌گیری را کرد که پارامترهای دما و تابش در هر فصل دارای روابط معناگرا و خاصی هستند که این روابط استخراج شده نقش اساسی در تولید توان نیروگاه فتوولتائیک را ایفا می‌کنند و با تغییر هر یک از این پارامترها، تولید توان نیروگاه فتوولتائیک نیز تغییر خواهد کرد.

۶- قدردانی

از پدر و مادر عزیزم قدرانی می‌کنم که با حمایت‌های خود باعث شده تا در مسیر پژوهش و کشف ایده‌های تازه قدم بردارم.

همچنین از اساتید راهنما و مشاور خود که نام آنان در آغاز این مقاله ذکر شده تشکر می‌نمایم که با کمک‌های علمی خود به این مقاله کمک کردند و در پایان از تمامی پرسنل شرکت توانا الکترونیک شمال در ایران بابت در

اختیار قرار دادن امکانات و زمان خود که در جهت پیش برد این پژوهش کمک کرده‌اند، قدردانی می‌نمایم.

۷- مراجع

[1] B. Bose, Global Warming: Energy, Environmental Pollution, and the Impact of Power Electronics, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Vol. 4, No. 1, pp. 6-17, 2010.

[2] B. Kroposki, R. Margolis and D. Ton, Harnessing the sun, *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 7, No. 3, pp. 22-33, 2009.

[3] M. Liserre, T. Sauter and J. Hung, Future Energy Systems: Integrating Renewable Energy Sources into the Smart Power Grid Through Industrial Electronics, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Vol. 4, No. 1, pp. 18-37, 2010.

[4] A. Rajaeian and E. Rajaeian, Potentiometric analysis of Kerman province for the construction of photovoltaic plants, *the 5th International Conference on Technology and Energy Management With the approach of energy*, 2019. (in Persian)

[5] M. Rezaei, F. Hosseinali, and A. R. Sharifi, Evaluating the Potential Area for Constructing Photovoltaic Power Plant in Iran using Fuzzy Approach, *Journal of Geomatics Science and Technology,* Research Vol. 9, No. 3, pp. 159-171, 2020.

[6] Accessed 20 February 2021; http: //www. solarsorena. com

[7] A. Mäki and S. Valkealahti, Power Losses in Long String and Parallel-Connected Short Strings of Series-Connected Silicon-Based Photovoltaic Modules Due to Partial Shading Conditions, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 27, No. 1, pp. 173-183, 2012.

[8] S. R. Wenham, M. A. Green, M. E. Watt, and R. Corkish, The behavior of solar cells, in *Applied Photovoltaics*, Second Edition, pp. 43–56, London, U. K.: Earthscan, 2007.

[9] Accessed 25 February 2021; http: //nrc. iust. ac. ir

[10] J. Tsanakas, D. Chrysostomou, P. Botsaris and A. Gasteratos, Fault diagnosis of photovoltaic modules through image processing and Canny edge detection on field thermographic measurements, *International Journal of Sustainable Energy*, Vol. 34, No. 6, pp. 351-372, 2013.

[11] J. Bauer et al., Hot spots in multicrystalline silicon solar cells: avalanche breakdown due to etch pits, *physica status solidi (RRL) - Rapid Research Letters*, Vol. 3, No. 2-3, pp. 40-42, 2008.

[12] J. Gosumbonggot and G. Fujita, Global Maximum Power Point Tracking under Shading Condition and Hotspot Detection Algorithms for Photovoltaic Systems, *Energies*, Vol. 12, No. 5, p. 882, 2019.

[13] Accessed 20 February 2021; http://yinglisolar.com

[14] B. Pannebakker, A. de Waal and W. van Sark, "Photovoltaics in the shade: one bypass diode per solar cell revisited", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 25, No. 10, pp. 836-849, 2017.

[15] Accessed 23 February 2021; http://www.power-solar.co/

[16] A. Moushtagh dezfooli and R. Roushandel, Investigation of the effect of temperature changes on the output power of photovoltaic panels in solar power systems, *International Conference on Research in Science and Technology*, 2015. (in Persian)

[17] K. Moharram, M. Abd-Elhady, H. Kandil and H. El-Sherif, Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 4, No. 4, pp. 869-877, 2013.

[18] A. Golnas, PV System Reliability: An Operator's Perspective, *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 3, No. 1, pp. 416-421, 2013.

[19] S. Voss, A. Golnas, S. Hester, and M. Culpepper, Service & service architecture, yield monitoring, optimization and reporting for commercial scale solar utility installations, *Photovoltaics Int.* , Vol. 5, pp. 173–179, 2009.