

مدل سازی عددی و ارزیابی تجربی عملکرد سلول های خورشیدی تحت تمرکز نور خورشید

محمد علی بدری*

استادیار، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

علی اکبر عالم رجبی

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

بتول زمانی

کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

امروزه با توجه به رشد روز افزون مصرف انرژی در جهان، انرژی های تجدیدپذیر و مخصوصاً انرژی خورشید مورد توجه ویژه ای قرار دارند. از میان سیستم های خورشیدی رایج می توان به سیستم های فتوولتاییک اشاره کرد. استفاده از سیستم های متمرکزکننده برای افزایش شدت تابش روی سلول های خورشیدی موجب افزایش توان سیستم های فتوولتاییک و در نتیجه کاهش قیمت برق تولید شده توسط سیستم می شود. در بین سیستم های متمرکزکننده، سیستم های تمرکز پایین، با نسبت تمرکز کمتر از ۱۰، به دلیل استفاده از سلول های خورشیدی مونوکریستال و عدم نیاز به سیستم های خنک کاری پیچیده اهمیت دارند. در مقاله حاضر، عملکرد سلول های خورشیدی با سه مدل ایده آل، تک دیود و دو دیود بررسی شده و اعتبار و دقت این مدل ها با نتایج تجربی مقایسه شده است. در میان سه مدل ارائه شده، مدل دو دیود دقت بیشتری نشان داده است. سپس اثر تمرکز نور خورشید بر روی عملکرد سلول های خورشیدی مونوکریستال به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین عملکرد پنل خورشیدی مونوکریستال مدل شده و شبیه سازی به منظور بررسی تغییرات ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه و توان خروجی با تغییر شدت تابش روی پنل خورشیدی و دمای پنل انجام شده و با نتایج تجربی حاصل از سیستم متمرکزکننده مقایسه شده است. در این آزمایش ها که با تمرکز کردن نور خورشید به وسیله آینه ها صورت گرفته است، پارامترهای شدت تابش و دمای سلول ها تغییر کرده و بر عملکرد آن تأثیر گذاشته اند. با استفاده از سیستم متمرکزکننده، توان خروجی پنل خورشیدی تقریباً تا ۱/۹ برابر توان خروجی پنل در شرایط استاندارد افزایش یافته است.

واژه های کلیدی: سلول خورشیدی، متمرکزکننده های فتوولتاییک، مدل ایده آل، مدل تک دیود، مدل دو دیود.

Numerical Modeling and Experimental Performance Evaluation of Solar cells under Concentration of Sun-light

M.A. Badri

Research Institute for Subsea Sci. & Tech., Isfahan University Technology, Isfahan, Iran

A.A. Aalam Rajabi

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

B. Zamani

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract

Increasing energy consumption nowadays has caused consideration of renewable energies, in particular solar energy, using photovoltaic systems to be brought into attention. Using concentrating systems in order to increase radiation intensity on solar cells would cause increasing the power and hence decreasing the cost. Of these, systems with concentrating ratio of less than 10 are of great importance due to the usage of normal mono crystal solar cells with no complicated cooling systems. In this paper, the performance of a solar cell was stated by three models; ideal, mono diode and two diodes versions and the validity and the accuracy of models were evaluated by experimental results. Among three alternatives, the two-diode version showed more accurate results. Then, effect of concentrating sunlight on mono crystal solar cells were investigated experimentally. A mono crystal solar panel was modeled and variations in open circuit voltage, short circuit current and output power with changes in radiation intensity and panel temperature were simulated. The experimental results by a concentrating system were then compared with those of simulations. In these experiments, where concentrating of sun lights was achieved by using mirrors, radiation intensity and cell's temperature, changed. By using a concentrator system, output power of solar panel has increased up to 1.9 times in comparison with standard conditions.

Keywords: Solar cell, Photovoltaic concentrators, Ideal model, Mono diode model, Two diodes model.

متحده آمریکا^۱ و سازمان رادیویی آمریکا^۲ شروع به توسعه سلول های فتوولتاییک (خورشیدی) به منظور استفاده در ماهواره ها و سفرهای فضایی نمودند. در ۷ آگوست سال ۱۹۵۹ میلادی ماهواره اکسپلورر ۶ با یک آرایه متشکل از ۹۶۰۰ سلول خورشیدی (هر سلول با ابعاد ۲×۲ سانتی متر) به فضا پرتاب شد. در این زمان بازده سلول های خورشیدی در حدود ۱۰ درصد بود. به تدریج بازده سلول های خورشیدی افزایش یافت، این افزایش بازده به معنای آن بود که می توان از سطح کوچکتری یک توان تعیین شده را دریافت کرد. در دهه ۱۹۶۰

۱- مقدمه

اثر فتوولتاییک نخستین بار توسط ادmond بکرل، فیزیکدان فرانسوی، در سال ۱۸۳۹ میلادی مورد توجه قرار گرفت. او دریافت که مواد معینی در هنگام قرار گرفتن در معرض نور مقدار کمی جریان الکتریکی تولید می کنند. در سال ۱۹۰۵ میلادی، آلبرت انیشتین طبیعت نور و اثر فتوالکتریک را تشریح کرد. نخستین ماژول فتوولتاییک در سال ۱۹۵۴ با راندمان ۶٪ در آزمایشگاه بل ساخته شد. در سال ۱۹۵۶ میلادی گروهی از دانشمندان (در آزمایشگاه های سیگنال ایالات

1 U.S.Signal Corps

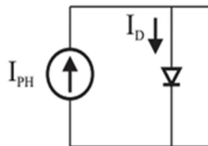
2 Radio Corporation of America (RCA)

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: malbdr@cc.iut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۴

می‌کند که رابطه مستقیمی با شدت تابش، G ، دارد. زمانی که هیچ نوری برای تولید جریان وجود ندارد، سلول خورشیدی به عنوان یک دیود عمل می‌کند. هنگامی که شدت نور تابیده به سلول افزایش می‌یابد، جریانی متناسب با شدت نور ورودی به وسیله سلول خورشیدی تولید می‌شود. این جریان نوری بین مقاومت متغیر دیود و بار، با نسبتی که بستگی به مقاومت بار و شدت تابش دارد تقسیم می‌شود. در یک سلول ایده آل، کل جریان I با جریان تولید شده توسط اثر فتوالکتریک، I_{PH} ، منهای جریان دیود، I_D ، برابر است، رابطه (۱).



شکل ۱- مدار معادل یک سلول خورشیدی ایده آل

$$I = I_{PH} - I_D \Rightarrow I = I_{PH} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{AKT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

در رابطه فوق I_0 ، جریان اشباع دیود در شرایط بدون نور، A ، ضریب ایده‌آلی (کیفیت) دیود که مقداری بین ۱ و ۲ دارد، q ، بار الکتریکی، k ، ثابت بولتزمن و T دمای سلول خورشیدی بر حسب کلون است.

در این مدل پارامترهای نامعلوم شامل جریان فتوالکتریک، جریان اشباع دیود و ضریب کیفیت دیود است. برای محاسبه I_{PH} ، با استفاده از اطلاعات نقطه اتصال کوتاه داریم:

$$I = I_{sc} \text{ \& } V = 0 \Rightarrow I_{PH} = I_{sc} \quad (2)$$

با استفاده از اطلاعات در نقطه مدار باز می‌توان مقدار جریان اشباع دیود را محاسبه کرد:

$$I = 0 \text{ \& } V = V_{oc} \Rightarrow 0 = I_{PH} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{AKT}\right) - 1 \right] \Rightarrow I_0 = \frac{I_{sc}}{\left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{AKT}\right) - 1 \right]} \quad (3)$$

برای محاسبه مقدار جریان اشباع دیود باید مقدار ضریب کیفیت دیود را مشخص کرد. حال پارامتر مجهول A را می‌توان با استفاده از مقادیر جریان و ولتاژ در نقطه توان بیشینه محاسبه کرد:

$$I = I_{mp} \text{ \& } V = V_{mp} \quad (4)$$

$$I_{mp} = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_{mp}}{AKT}\right) - 1 \right]$$

با جایگذاری I_0 در معادله فوق داریم:

$$I_{mp} = I_{sc} - \frac{I_{sc}}{\left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{AKT}\right) - 1 \right]} \left[\exp\left(\frac{qV_{mp}}{AKT}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

با مرتب سازی معادله فوق و با استفاده از روش نیوتن می‌توان مقدار A را محاسبه کرد. با مشخص شدن پارامترهای مجهول در این مدل می‌توان با استفاده از نرم افزار MATLAB، برنامه ای برای ترسیم نمودار $I-V$ نوشت.

میلادی این فناوری به طور جدی در صنعت فضایی به کار گرفته شد. در طی بحران انرژی در دهه ۱۹۷۰ فناوری فتوولتائیک به عنوان منبعی از انرژی برای برنامه‌های غیرفضایی به رسمیت شناخته شد [۱-۳]. اما قیمت سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بسیار بالا بود. برای حل این مشکل دو ایده اصلی مطرح شد که اولی ساخت ماژول‌های ارزان با استفاده از فیلم نازک بود و راه دیگر استفاده از متمرکزکننده‌ها بود [۲ و ۴].

متمرکزکننده‌ها بر حسب نسبت تمرکز به سه دسته تقسیم می‌شوند که سیستم‌هایی با نسبت تمرکز پایین‌تر از ۱۰ در دسته تمرکز پایین قرار می‌گیرند، سیستم‌های با نسبت تمرکز ۱۰ تا ۱۰۰ در دسته متوسط و بالاتر از ۱۰۰ در دسته تمرکز بالا قرار می‌گیرند. در سیستم‌های با نسبت تمرکز پایین می‌توان از سلول‌ها و پنل‌های سیلیکونی مونوکریستال رایج استفاده کرد. این سلول‌ها در مقایسه با سلول‌های پلی‌کریستال راندمان بالاتری دارند در نتیجه تمرکز روی آن‌ها به صرفه است. از طرفی سلول‌های چندپیوندی راندمان بالاتری دارند ولی هنوز قیمت بالایی دارند، از این رو بیشتر در صنایع فضایی و سیستم‌های تحت تمرکز با نسبت تمرکز بالا کاربرد دارند. سلول‌های خورشیدی تحت تمرکز پایین نیاز به خنک‌سازی پیشرفته‌ای ندارند و همچنین به دلیل سادگی طراحی متمرکزکننده‌ها با نسبت تمرکز پایین این سیستم‌ها هم اکنون کاربرد بیشتری دارند.

در کار پژوهشی حاضر علاوه بر کار آزمایشگاهی، مدل‌سازی عملکرد سلول‌های خورشیدی انجام شده است که در آن پارامترهای شدت تابش و دما به عنوان ورودی دریافت و با داشتن مشخصات پنل خورشیدی در شرایط استاندارد یعنی دمای ۲۵ درجه سلسیوس و شدت تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع، که توسط شرکت سازنده ارائه می‌شود، نمودارهای جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ در شرایط مورد نظر ترسیم می‌شود.

۲- مدل‌سازی

مدل‌سازی سلول خورشیدی و ماژول‌ها، برای طراحی و بررسی عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک مورد نیاز است. در مدل‌سازی این سیستم‌ها، پارامترهای فیزیکی با استفاده از مقادیر اندازه گیری شده توسط تولیدکنندگان که روی صفحه مشخصات ماژول‌ها موجود می‌باشد، محاسبه می‌شوند. این اطلاعات شامل جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز، توان بیشینه، ولتاژ و جریان در توان ماکزیمم، راندمان ماژول و ضرایب دمایی می‌باشد. این مقادیر در شرایط مرجع یعنی دمای ۲۵ درجه سلسیوس برای عملکرد ماژول و تحت شرایط هوا-جرم (AM) ۱/۵ با تابش خورشیدی ۱۰۰۰ وات بر متر مربع تعیین می‌شود [۵]. در ادامه مدل ایده آل^۱، مدل تک دیود^۲ و مدل دو دیود^۳ بررسی می‌شوند.

۱-۲- مدل ایده‌آل

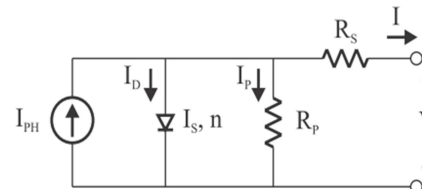
سلول خورشیدی را می‌توان به صورت یک منبع جریان موازی با یک دیود مدل نمود. منبع جریان، جریان فتوالکتریک I_{PH} را تولید

1 Single diode model
2 One diode model
3 Two diode model

۲-۲- مدل تک دیود

برای دستیابی به ارائه بهتر از رفتار الکتریکی سلول خورشیدی در مدل تک دیود مقاومت ماده و تلفات مقاومتی در اثر سطوح اتصال در نظر گرفته می‌شوند. این اتلاف توسط مقاومت سری R_s ، در مدار معادل ارائه می‌شود. همچنین تلفات ناشی از جریان ناشی با مقاومت موازی R_p ، نشان داده می‌شود.

مدار معادل مدل تک دیود در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- مدار معادل سلول خورشیدی، مدل تک دیود

با استفاده از روابط مربوط به سلول خورشیدی می‌توان برای مدل تک دیود رابطه (۶) را ارائه داد [۱۰-۶]:

$$I = I_{PH} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_S)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_p} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، I_{PH} جریان فتوالکتریک، I_0 جریان اشباع یا تاریک سلول، ضریب ایده‌آلی دیود (بین ۱ و ۲)، R_S و R_P به ترتیب مقاومت‌های سری و موازی (شنت)، q بار الکترون، k ثابت بولتزمن و T دمای سلول را نشان می‌دهند. برای رسم منحنی $I-V$ پنل خورشیدی ابتدا باید پارامترهای موجود در رابطه (۶) را در شرایط استاندارد محاسبه نمود. در نقطه اتصال کوتاه $I = I_{SC}$ و $V = 0$ نتیجه می‌شود:

$$I_{SC} = I_{PH} - I_0 \left(e^{\frac{qI_{SC}R_S}{AKT}} - 1 \right) - \frac{I_{SC}R_S}{R_p} \quad (7)$$

با توجه به کوچک بودن مقدار I_0 و زیاد بودن مقدار R_P می‌توان با تقریب خوبی جریان فتوالکتریک در شرایط استاندارد را برابر با جریان اتصال کوتاه قرار داد.

$$I_{PH,STC} = I_{SC,STC} \quad (8)$$

زیرنویس STC نشان دهنده شرایط استاندارد می‌باشد. در نقطه ولتاژ مدار باز داریم:

$$I_{PH} - I_0 \left(e^{\frac{qV_{OC}}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V_{OC}}{R_p} = 0 \quad (9)$$

می‌توان در رابطه (۹) از جمله V_{OC}/R_p صرف‌نظر نمود. با استفاده از رابطه (۸) و (۹) برای جریان اشباع دیود داریم:

$$I_{0,STC} = I_{SC,STC} \left(e^{-\frac{V_{OC,STC}}{AVT}} - 1 \right) \quad (10)$$

در این رابطه، $V_T = kT/q$ می‌باشد، که ولتاژ گرمایی سلول نامیده می‌شود.

ضریب ایده‌آلی دیود A ، مقداری بین ۱ و ۲ دارد. دو پارامتر باقیمانده R_S و R_P با تکرار محاسبه شده است. در این روش از مطابقت توان بیشینه استفاده شده است [۱۱]. بدین ترتیب که در هر مرحله مقدار R_S افزایش یافته و R_P طبق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود. سپس

با استفاده از رابطه (۶) و روش نیوتن مقادیر جریان و ولتاژ محاسبه و توان از رابطه $P=I \times V$ به دست آمده است و توان بیشینه محاسبه شده در هر مرحله با توان بیشینه ارائه شده در مشخصات پنل خورشیدی مقایسه گردیده است.

$$R_p = \frac{V_{mp,STC} + I_{mp,STC}R_s}{\left\{ I_{PV} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{mp,STC} + I_{mp,STC}R_s}{AVT} \right) - 1 \right] - \frac{P_{max,E}}{V_{mp,STC}} \right\}} \quad (11)$$

مقادیر اولیه برای هر دو مقاومت به صورت زیر می‌باشد:

$$R_{S0} = 0; \quad R_{P0} = \frac{V_{mp,STC}}{I_{sc,STC} - I_{mp,STC}} - \frac{V_{oc,STC} - V_{mp,STC}}{I_{mp,STC}} \quad (12)$$

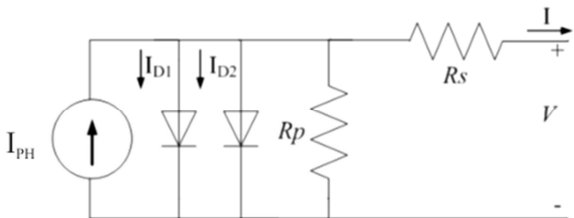
مقدار I_{PH} را می‌توان ثابت و برابر I_{SC} در نظر گرفت و یا در هر مرحله طبق رابطه (۱۳) محاسبه نمود که در کار حاضر از این رابطه استفاده شده است.

$$I_{PH} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{SC,STC} \quad (13)$$

۲-۳- مدل دو دیود

مدار معادل یک سلول خورشیدی در مدل دو دیود که از مدل تک دیود دقیق‌تر است در شکل ۳ نشان داده شده و معادله جریان آن به صورت زیر است:

$$I = I_{PH} - I_{S1} \left(e^{\frac{q(V+IR_S)}{n_1KT}} - 1 \right) - I_{S2} \left(e^{\frac{q(V+IR_S)}{n_2KT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_p} \quad (14)$$



شکل ۳- مدار معادل یک سلول خورشیدی (مدل دو دیود)

در رابطه (۱۴) پارامترها به صورت زیر تعریف شده‌اند:

I_{PH} : جریان فتوالکتریک (A)

I_0 : جریان اشباع در شرایط بدون نور (A)

I_{S1} : جریان اشباع مغناطیسی به دلیل پراکندگی (A)

I_{S2} : جریان اشباع مغناطیسی به دلیل شکل گیری جفت

الکترون-حفره در فضای لایه ظرفیت (A)

R_S : مقاومت سری سلول (Ω)

R_P : مقاومت موازی سلول (Ω)

n_1, n_2 : ضرایب ایده‌آلی (کیفیت) دیود

q : بار الکتریکی $1.6 \times 10^{-19} C$

k : ثابت بولتزمن $1.38 \times 10^{-23} J/K$

T : دمای سلول خورشیدی (K)

در این مدل تعداد مجهولات هفت عدد است که شامل I_{S1} ، I_{PH} ، R_S ، R_P ، n_1 ، n_2 می‌باشد و برای محاسبه این پارامترها نیاز به هفت معادله می‌باشد؛ در بسیاری از موارد مقدار n_1 را برابر یک و مقدار

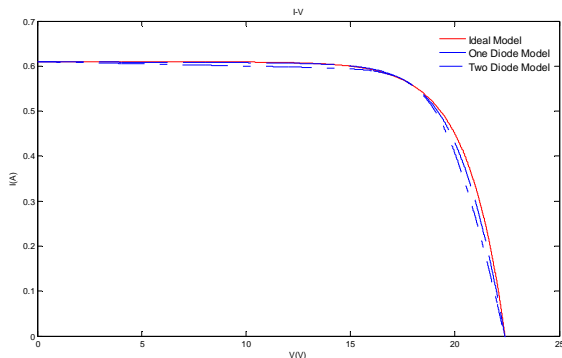
جدول ۱- پارامترهای محاسبه شده در مدل سازی سلول خورشیدی در شرایط استاندارد

مقادیر ارائه شده در شرایط STC	پارامترهای پنل خورشیدی
۰.۶۱ A	جریان اتصال کوتاه (I_{SC})
۲۲.۴۱ V	ولتاژ مدار باز (V_{OC})
۰.۵۶ A	جریان در توان ماکزیمم (I_{mp})
۱۷.۹ V	ولتاژ در توان ماکزیمم (V_{mp})
۰.۰۱ %/°C	ضریب دمایی جریان اتصال کوتاه
-۰.۳۸ %/°C	ضریب دمایی ولتاژ مدار باز

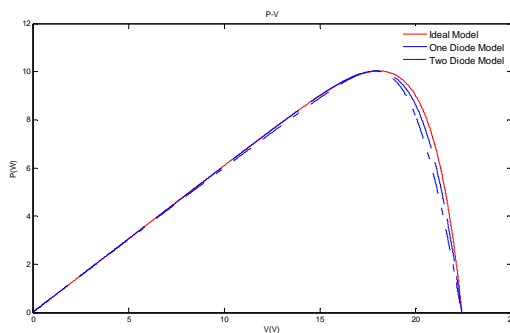
جدول ۲- پارامترهای محاسبه شده در مدل سازی سلول خورشیدی در شرایط استاندارد

مدل ها	ایده آل	تک دیود	دو دیود
I_{PH}	۰.۶۱	۰.۶۱۰۱۸	۰.۶۱۲۰۶
I_{O1}	۲.۴۳۹۷۹×10^{-6}	۹.۶۲۳۶۹×10^{-8}	۱.۸۳۱۹۴×10^{-11}
A_1	۱.۹۴۹۳۲۵	۱.۵۵	۱
I_{O2}	-	-	۱.۲
A_2	-	-	۱.۸۳۱۹۴×10^{-11}
R_S	-	۱.۴۵۹	۳.۰۵
R_{SH}	-	۴۹۶۶	۹۰۲.۶۹

با محاسبه پارامترهای مدل ها می توان نمودار جریان و توان بر حسب ولتاژ را برای پنل خورشیدی رسم کرد، (شکل های ۴ و ۵).



شکل ۴- نمودار جریان-ولتاژ پنل خورشیدی به دست آمده از سه مدل تحت شرایط استاندارد



شکل ۵- نمودار توان-ولتاژ پنل خورشیدی به دست آمده از سه مدل تحت شرایط استاندارد

n_2 را برابر دو می گیرند که در این صورت تعداد مجهولات به پنج کاهش می یابد. برای مجهولات باقیمانده سه معادله را می توان در سه نقطه اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و نقطه توان بیشینه نوشت. معادله چهارم مشتق در نقطه بیشینه توان است که مشتق توان نسبت به ولتاژ در این نقطه برابر صفر است. برای معادله آخر می توان از مشتق در یکی از نقاط جریان اتصال کوتاه و یا ولتاژ مدار باز استفاده کرد. برای حل این دستگاه معادلات غیر خطی می توان از روش نیوتن-رافسون و یا روش های دیگر استفاده کرد.

روش کار حاضر برای محاسبه پارامترهای این مدل همانند مدل تک دیود است. در این روش مقدار I_{O1} و I_{O2} برابر در نظر گرفته شده و طبق معادله ۱۵ محاسبه می شوند. طبق نتایج به دست آمده برای این مدل مقدار n_1 برابر با یک و مقدار n_2 بزرگتر و مساوی ۱/۲ است.

$$I_{O1} = I_{O2} = \frac{(I_{sc,STC} + K_1 \Delta T)}{\exp[(V_{oc,STC} + K_v \Delta T)/V_{th}] - 1} \quad (15)$$

پارامترهای R_p و R_s از روش تکرار محاسبه شده اند. برای این کار ابتدا مقادیر اولیه ای برای این دو پارامتر در نظر گرفته و سپس با داشتن تمامی مجهولات مقادیر جریان-ولتاژ محاسبه و توان بیشینه پیدا می شود؛ سپس مقدار این توان با توان بیشینه پنل که در برگه مشخصات آن موجود می باشد مقایسه می شود، در صورت اختلاف ناچیز محاسبات متوقف و مقادیر مفروض به عنوان پاسخ پذیرفته می شود. در غیر این صورت در هر مرحله به میزان گام مورد نظر به مقدار مقاومت سری افزوده شده و مقاومت موازی محاسبه شده و مقادیر جریان-ولتاژ جدید به دست می آید. این کار تا زمانی که اختلاف توان های بیشینه به مقدار مورد نظر برسد ادامه می یابد. مقدار مقاومت موازی از رابطه (۱۶) به دست می آید [۱۱]:

$$R_p = \frac{V_{mp,STC} + I_{mp,STC} R_s}{(I_{PV} - I_{O1} [\exp(\frac{V_{mp,STC} + I_{mp,STC} R_s}{n_1 V_{th}}) - 1]) - \frac{P_{max,E}}{V_{mp,STC}}} \quad (16)$$

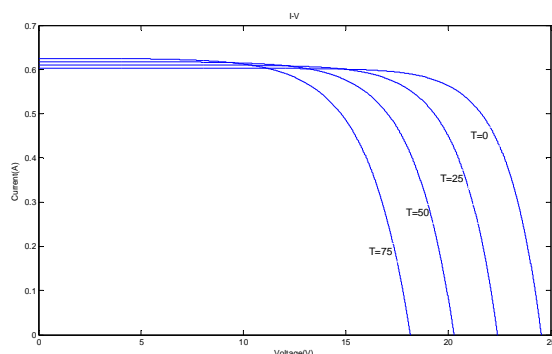
مقادیر اولیه برای هر کدام از مقاومت ها در زیر آمده است.

$$R_{S0} = 0; \quad R_{P0} = \frac{V_{mp,STC}}{I_{sc,STC} - I_{mp,STC}} - \frac{V_{oc,STC} - V_{mp,STC}}{I_{mp,STC}} \quad (17)$$

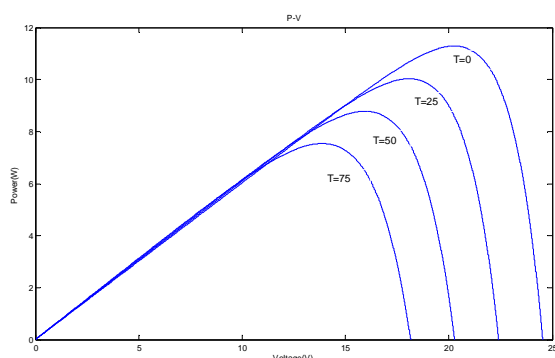
برای محاسبه پارامترها در شرایط استاندارد می توان مقدار I_{PH} را برابر با I_{sc} در نظر گرفت و یا در هر مرحله مقدار آن را با توجه به پارامترهای مقاومت طبق رابطه (۱۸) محاسبه کرد.

$$I_{PH} = I_{sc} * \frac{(R_p + R_s)}{R_p} \quad (18)$$

در ادامه پارامترهای حاصل از مدل ها ارائه شده است. با استفاده از مشخصات پنل خورشیدی ۱۰ وات مونوکریستال سیلیکون ساخت شرکت سانتک چین که در جدول ۱ آورده شده است و روابط بیان شده در قسمت های ۱-۲ تا ۳-۲ با استفاده از نرم افزار MATLAB برنامه ای نوشته شد. مقادیر محاسبه شده توسط این مدل ها برای پارامترهای مؤثر در مدل سازی در جدول ۲ آمده است.



شکل ۶- نمودار جریان-ولتاژ پنل خورشیدی-تأثیر دما بر عملکرد پنل خورشیدی



شکل ۷- نمودار توان-ولتاژ پنل خورشیدی-تأثیر دما بر عملکرد پنل

۳-۲- تأثیر شدت تابش

زمین با خورشید حدود ۱۵۱ میلیون کیلومتر فاصله دارد. شدت متوسط تابش خورشید در بیرون جو زمین (قبل از عبور از اتمسفر) برابر ۱۳۶۱ وات بر متر مربع است که تحت عنوان هوا-جرم صفر (AMZ) نامیده می‌شود. شدت این تابش پس از عبور از اتمسفر به دلیل انعکاس توسط ذراتی مانند دی اکسید کربن و بخار آب و ازن کاهش می‌یابد و مقدار آن تقریباً به ۱۰۰۰ وات بر متر مربع می‌رسد. این مقادیر در ظهر خورشیدی محاسبه شده‌اند. اگر هوا ابری و یا آلوده باشد ذرات معلق در هوا بیشتر شده و مقدار تابش کاهش می‌یابد یعنی مقدار بیشتری توسط ذرات معلق در هوا و بخار آب منعکس می‌شود، در نتیجه مقدار الکتریسیته تولید شده نیز کاهش می‌یابد.

ماژول‌ها می‌توانند حتی هنگامی که تابش مستقیم خورشید وجود ندارد الکتریسیته تولید کنند. تابش آسمان ابری حدود ۵۰ درصد بیشینه تابش خورشید خواهد بود (بیشینه تابش خورشید، ماکزیمم تابش خورشید در طول روز).

سایه نیز عامل بسیار مهمی در پایین آمدن راندمان سیستم می‌باشد. آرایه‌ها نباید در جایی که سایه درختان و یا ساختمان‌ها وجود دارد، نصب شوند. باید توجه داشت که حتی اگر یک سلول از یک ماژول در سایه قرار گیرد، خروجی کل ماژول تحت تأثیر قرار می‌گیرد و به میزان چشم‌گیری کاهش می‌یابد. تنها راه حل این است که از تک ماژول‌ها (سیلیکون آمورف و کادمیم تولراید) استفاده شود که وجود

۳- تأثیر دما و شدت تابش بر عملکرد پنل

خورشیدی

مقادیر ولتاژ و جریان سلول خورشیدی وابسته به شدت تابش روی سطح سلول و دمای کاری سلول است. روابط زیر تأثیر این دو پارامتر را روی مقادیر جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز نشان می‌دهند [۱۲].

$$I_{SC} = I_{SC,STC}(1 + k_I(T - T_{STC})) \quad (19)$$

$$V_{OC} = V_{OC,STC}(1 + k_V(T - T_{STC})) \quad (20)$$

$$I_{SC} = I_{SC,STC}(G/G_{STC}) \quad (21)$$

$$V_{OC} = V_{OC,STC} + N_S V_T \log(G/G_{STC}) \quad (22)$$

در روابط فوق T و T_{STC} به ترتیب دمای کاری سلول و دمای استاندارد (معمولاً ۲۵ درجه سلسیوس)، G و G_{STC} به ترتیب شدت تابش روی سطح سلول و شدت تابش استاندارد، ثابت‌های k_I و k_V ضرایب دمایی جریان و ولتاژ (موجود در مشخصات پنل خورشیدی) و N_S تعداد سلول‌های سری متصل به هم می‌باشند.

برای جریان اشباع دیود که با دما تغییر می‌کند رابطه (۲۳) به کار می‌رود [۱۳-۱۵].

$$I_0 = I_{0,STC} \left(\frac{T_{STC}}{T} \right)^{3/A} \exp \left[\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (23)$$

که E_g انرژی پهنای باند نیمه رسانا و $I_{0,STC}$ جریان اشباع دیود در شرایط تست استاندارد می‌باشد. معادله دیگری که می‌توان برای جریان اشباع با در نظر گرفتن تغییرات دمایی به کار برد به صورت زیر می‌باشد [۱۶ و ۱۷]:

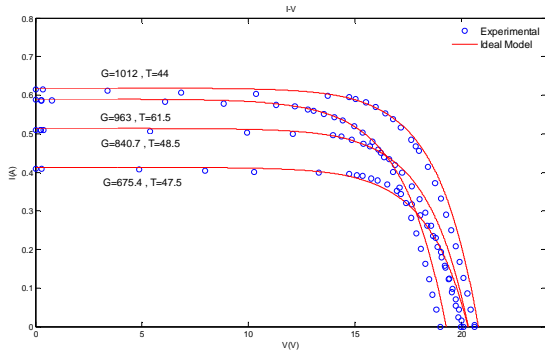
$$I_0 = \frac{(I_{SC,STC} + K_I \Delta T)}{\exp[(V_{OC,STC} + K_V \Delta T)/AV_T] - 1} \quad (24)$$

۳-۱- تأثیر دما

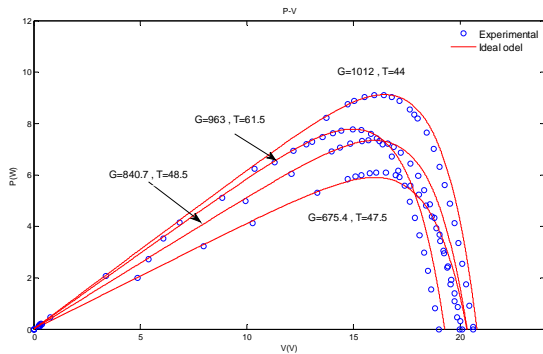
افزایش دما باعث افزایش مقاومت و کاهش ولتاژ در سلول‌های سیلیکونی و در نتیجه کاهش راندمان می‌شود. آب و هواهای گرم نسبت به آب و هوای سرد به ماژول‌های فتوولتاییک با ولتاژ ماکزیمم بالاتری نیاز دارند. در آب و هوای سرد مقاومت کاهش یافته و ولتاژ افزایش می‌یابد. تأثیر دما بر عملکرد یک پنل ۱۰ وات در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است که این نمودارها به ترتیب نمودارهای جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ پنل خورشیدی می‌باشند.

همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، تغییر ولتاژ مدار باز پنل نسبت به تغییرات دما بیشتر بوده است در حالی که شدت تابش اتصال کوتاه پنل تغییرات کمی داشته است.

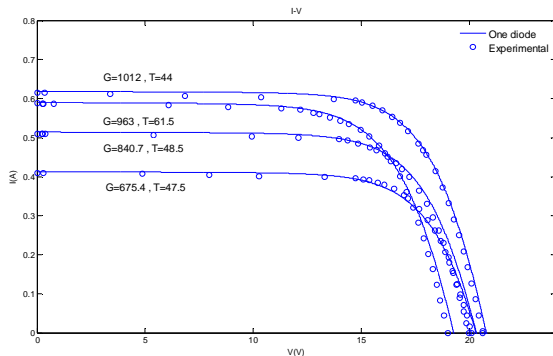
به طور کلی افزایش دما موجب کاهش در مقدار ولتاژ مدار باز پنل و افزایش مقدار جریان اتصال کوتاه پنل می‌شود که به دلیل ناچیز بودن افزایش جریان اتصال کوتاه، در کل توان پنل خورشیدی با افزایش دما در شدت تابش ثابت، کاهش می‌یابد.



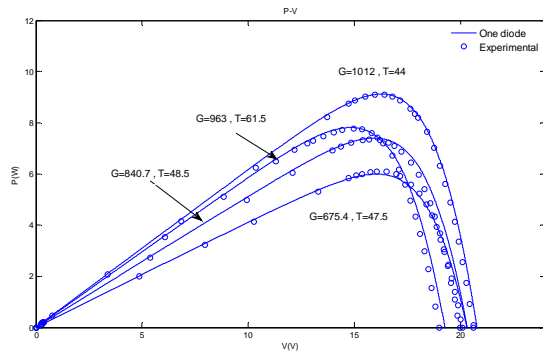
شکل ۱۰- نمودار جریان-ولتاژ پنل خورشیدی، مقادیر تجربی و مدل ایده آل



شکل ۱۱- نمودار توان-ولتاژ پنل خورشیدی، مقادیر تجربی و مدل ایده آل



شکل ۱۲- نمودار جریان-ولتاژ پنل خورشیدی، مقادیر تجربی و مدل تک دیود

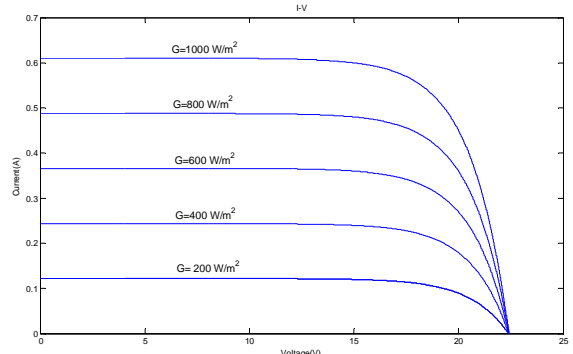


شکل ۱۳- نمودار توان-ولتاژ پنل خورشیدی، مقادیر تجربی و مدل تک دیود

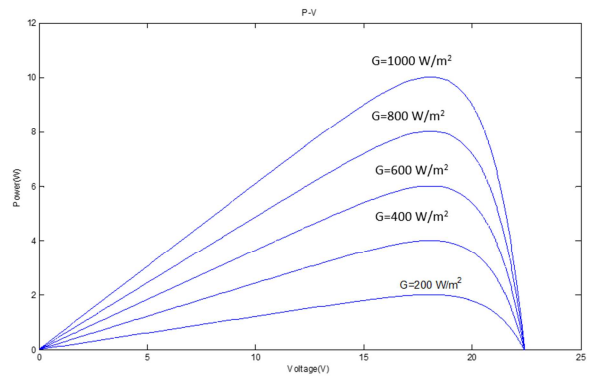
سایه در قسمتی از آن‌ها بر راندمان کل تأثیر زیادی ندارد. بهتر است تا حد امکان از قرار دادن سیستم در سایه اجتناب کرد.

تأثیر شدت تابش بر عملکرد پنل ۱۰ وات در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. برای بررسی تأثیر شدت تابش بر عملکرد پنل، دمای کاری پنل ثابت در نظر گرفته شده و شدت تابش بر سطح پنل از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ وات بر مترمربع تغییر داده شده است.

همانطور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، تغییرات شدت تابش بر سطح پنل بیشترین تأثیر را بر مقدار جریان اتصال کوتاه دارد و با افزایش شدت تابش مقدار جریان اتصال کوتاه نیز افزایش یافته است. در حالی که مقدار ولتاژ مدار باز پنل با تغییر در مقدار شدت تابش روی سطح پنل، تغییر چندانی نداشته است. در کل افزایش شدت تابش در دمای ثابت، موجب افزایش توان پنل خورشیدی می‌شود.



شکل ۸- نمودار جریان-ولتاژ پنل خورشیدی-تأثیر تابش بر عملکرد پنل

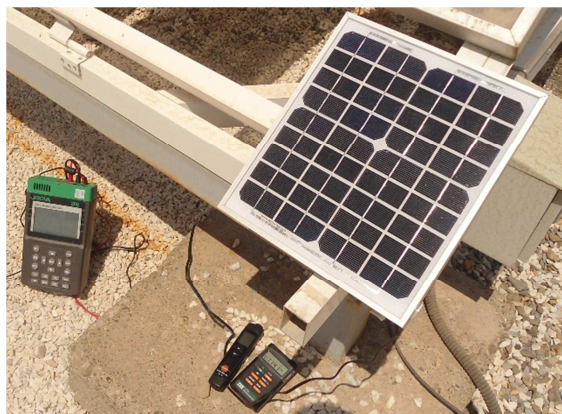


شکل ۹- نمودار توان-ولتاژ پنل خورشیدی-تأثیر تابش بر عملکرد پنل

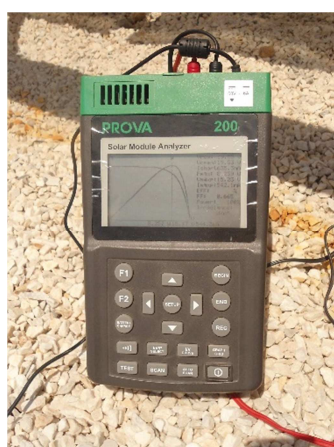
۴- مقایسه مدل‌ها با نتایج تجربی بدون استفاده از متمرکز کننده

در این قسمت نتایج حاصل از آزمایش پنل ۱۰ وات زیر نور خورشید با نتایج حاصل از مدل‌سازی مقایسه می‌شود.

همانطور که در شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ مشاهده می‌شود هر سه مدل در مقایسه با نتایج تجربی از دقت و تطابق خوبی برخوردارند. اما همانطور که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود، مدل دو دیود نسبت به دو مدل دیگر از دقت بالاتری برخوردار است.



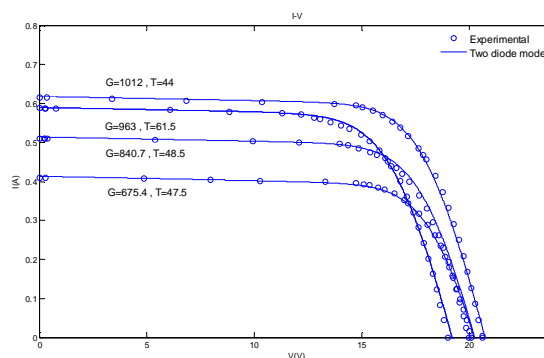
شکل ۱۶- پنل خورشیدی، تابش‌سنج، دماسنج و دستگاه تست پنل خورشیدی



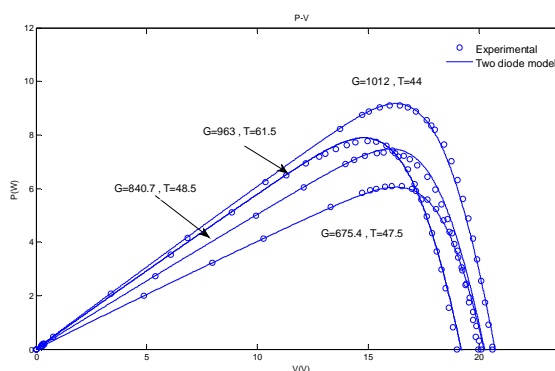
شکل ۱۷- دستگاه تست پنل خورشیدی PROVA200

همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود با افزایش شدت تابش، دمای پنل افزایش می‌یابد و با افزایش دما راندمان پنل خورشیدی از ۱۴٫۸۴ تا ۱۰٫۳۴ کاهش می‌یابد. چنانچه دمای سلول ثابت نگه داشته شود با افزایش شدت تابش می‌توان انتظار داشت که راندمان پنل بیشتر شود. بنابراین در صورت متمرکز کردن نور خورشید و برای پیشگیری از افت راندمان پنل لازم است که تدابیری برای خنک کردن پنل اندیشیده و به کار گرفته شود.

در شکل‌های ۱۶ تا ۲۵ نمودارهای جریان و توان بر حسب ولتاژ در شدت تابش و دمای مشخص سلول توسط مدل تک‌دیود رسم شده و مقادیر حاصل از آزمایش تجربی نیز آورده شده است. همان طور که در شکل‌های ۱۶ تا ۲۵ مشاهده می‌شود، اختلاف مقادیر نظری با مقادیر حاصل از آزمایش در نقاط نزدیک به توان بیشینه بیشتر است که این به دلیل افزایش مقاومت سری با افزایش دما می‌باشد. این در حالی است که در مدل‌سازی مقاومت‌ها ثابت در نظر گرفته شده که این مقادیر برابر مقادیر مقاومت‌های سری و موازی پنل خورشیدی در شرایط استاندارد است. پس هر چه شرایط آزمایش به شرایط استاندارد نزدیکتر باشد، اختلاف بین مقادیر حاصل از مدل‌سازی و نتایج تجربی کمتر است که این امر را می‌توان در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ که نزدیکترین شرایط را به شرایط استاندارد دارند، مشاهده کرد.



شکل ۱۴- نمودار جریان-ولتاژ پنل خورشیدی، مقادیر تجربی و مدل دو دیود



شکل ۱۵- نمودار توان-ولتاژ پنل خورشیدی، مقادیر تجربی و مدل دو دیود

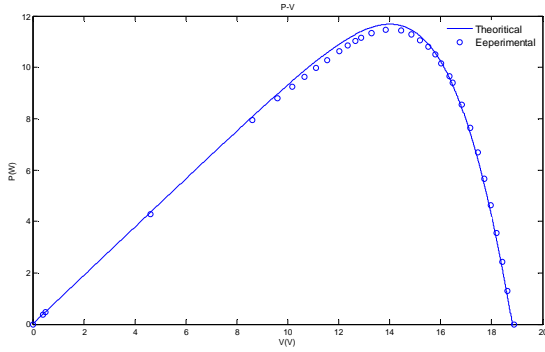
۵- سیستم متمرکزکننده و نتایج حاصل با استفاده از آن

برای آزمایش پنل خورشیدی تحت تمرکز نور خورشید، یک سیستم متمرکزکننده طراحی و با استفاده از آینه‌های شیشه‌ای تخت متداول ساخته شد. این متمرکزکننده شامل ۴ آینه است که نور خورشید را به طور یکنواخت روی پنل خورشیدی متمرکز می‌کنند. پنل خورشیدی دارای ۳۶ عدد سلول مونوکریستال سیلیکون به ابعاد $۲٫۷ \times ۶٫۲۵$ سانتی‌متر و راندمان تقریبی ۱۶٫۵ درصد است که به طور سری به یکدیگر متصل شده‌اند.

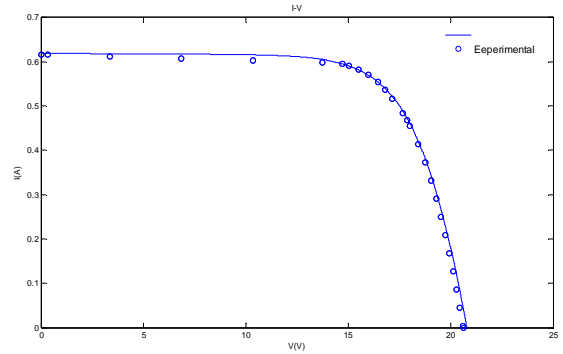
از تابش‌سنج به منظور اندازه‌گیری شدت تابش و برای اندازه‌گیری دمای پنل خورشیدی از دماسنج غیرتماسی استفاده شده است. به منظور اندازه‌گیری مقادیر جریان و ولتاژ از دستگاه تست پنل خورشیدی PROVA200 استفاده شده که محدوده عملکرد آن برای جریان ۶ آمپر و ولتاژ ۶۰ ولت می‌باشد.

سیستم متمرکزکننده در شدت تابش‌های مختلف خورشید مورد استفاده قرار گرفت. نتایج برای شدت تابش‌های مختلف در جدول ۳ و نمودارهای جریان و توان بر حسب ولتاژ برای چند آزمایش در ادامه آورده شده است. طبق نتایج موجود ولتاژ سلول با افزایش دما کاهش می‌یابد. ضریب پری سلول نیز با افزایش دما از ۷۱٫۸۷ درصد تا ۵۷٫۱۸ درصد کاهش می‌یابد که این امر می‌تواند به خاطر افزایش اتلافات اهمی به دلیل بالا بودن مقاومت سری پنل باشد. توان خروجی پنل با افزایش شدت تابش از ۹٫۱ تا ۱۹٫۰۹ وات افزایش می‌یابد.

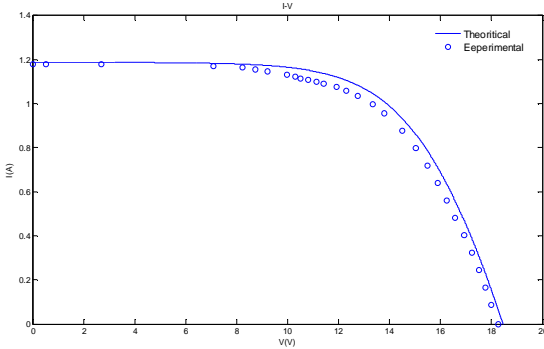
در مجموع نتایج تجربی اعتبار مدل را تأیید می‌کند. همچنین از این مدل می‌توان در شرایط متفاوت شدت تابش و دمای سلول استفاده نمود.



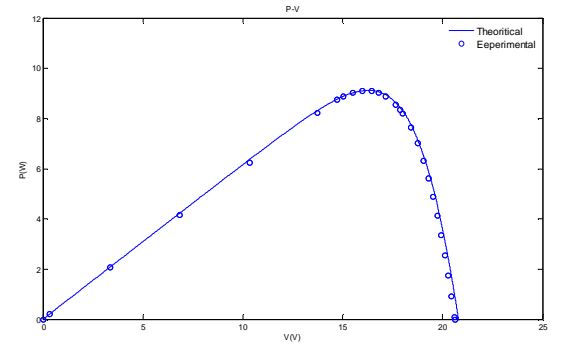
شکل ۲۱- نمودار توان-ولتاژ پنل خورشیدی در شدت تابش W/m^2 ۱۵۳۹ و دمای $59^{\circ}C$



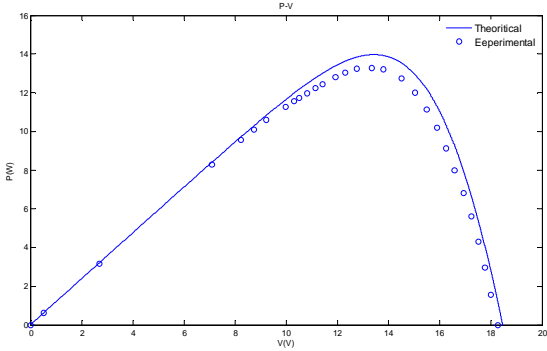
شکل ۱۸- نمودار جریان-ولتاژ پنل خورشیدی در شدت تابش W/m^2 ۱۰۱۲ و دمای $44^{\circ}C$



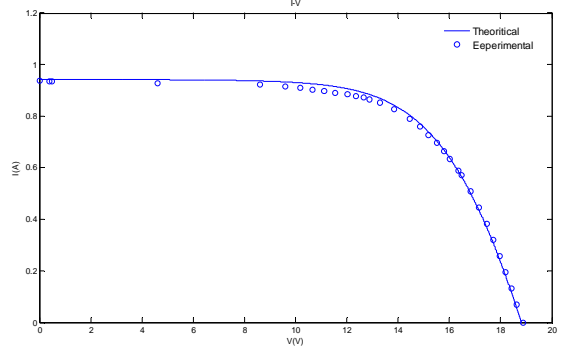
شکل ۲۲- نمودار جریان-ولتاژ پنل خورشیدی در شدت تابش W/m^2 ۱۹۳۸ و دمای $75^{\circ}C$



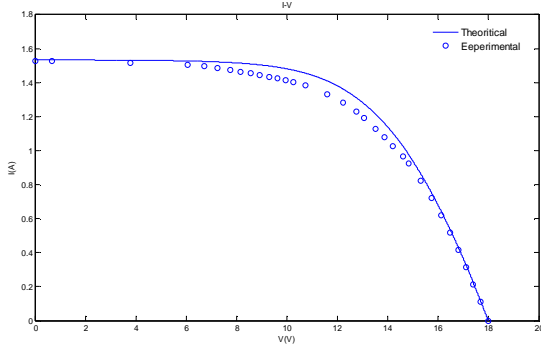
شکل ۱۹- نمودار توان-ولتاژ پنل خورشیدی در شدت تابش W/m^2 ۱۰۱۲ و دمای $44^{\circ}C$



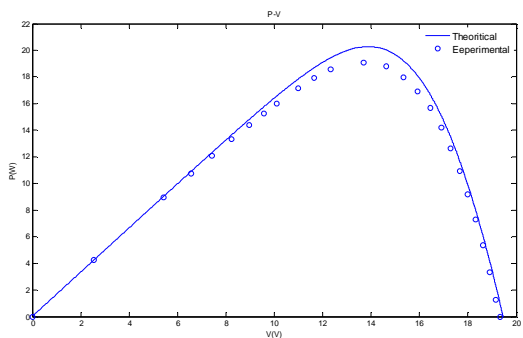
شکل ۲۳- نمودار توان-ولتاژ پنل خورشیدی در شدت تابش W/m^2 ۱۹۳۸ و دمای $75^{\circ}C$



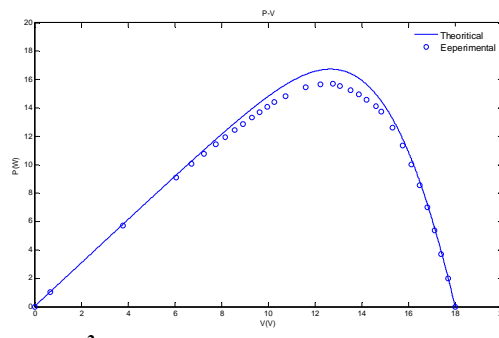
شکل ۲۰- نمودار جریان-ولتاژ پنل خورشیدی در شدت تابش W/m^2 ۱۵۳۹ و دمای $59^{\circ}C$



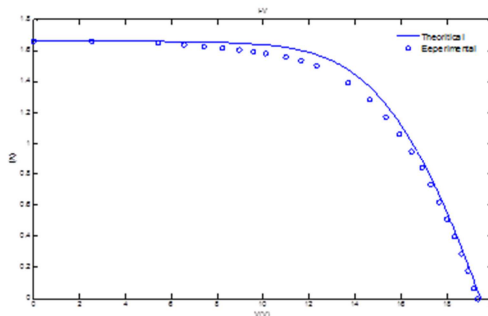
شکل ۲۴- نمودار جریان-ولتاژ پنل خورشیدی در شدت تابش W/m^2 ۲۵۰۰ و دمای $82^{\circ}C$



شکل ۲۷- نمودار توان-ولتاژ پنل خورشیدی در شدت تابش 2716 W/m^2 و دمای 65°C



شکل ۱- نمودار توان-ولتاژ پنل خورشیدی در شدت تابش 2500 W/m^2 و دمای 82°C



شکل ۲۶- نمودار جریان-ولتاژ پنل خورشیدی در شدت تابش 2716 W/m^2 و دمای 65°C

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمایش و مدل‌سازی

راندمان %	ضریب پری %	توان ماکزیمم W	ولتاژ مدار باز V	جریان اتصال کوتاه mA	دمای سلول $^\circ \text{C}$	مدل	شدت تابش W/m^2
۱۴,۸۴	۷۰,۹۵	۹,۱۲۶	۲۰,۸	۶۱۸,۵	۴۴	مدل	۱۰۱۲
۱۴,۸۴	۷۱,۸۷	۹,۱۲۱	۲۰,۶۲	۶۱۵,۳	۴۴	آزمایش	
۱۴,۶۹	۷۰,۵۱	۹,۸۱۶	۲۰,۷۰	۶۷۲,۴	۴۵,۵	مدل	۱۱۰۰
۱۴,۶	۷۱,۲۴	۹,۷۶	۲۰,۵۷	۶۶۶	۴۵,۵	آزمایش	
۱۳,۵	۶۸,۳۶	۹,۹۴۷	۱۹,۶۰	۷۴۲,۴	۵۹	مدل	۱۲۱۳
۱۳,۳۵	۶۸,۵۱	۹,۸۳۹	۱۹,۴۵	۷۳۸,۴	۵۹	آزمایش	
۱۲,۹۲	۶۷,۱۵	۱۰,۲۱	۱۹,۰۸	۷۹۶,۸	۶۵,۵	مدل	۱۳۰۱
۱۲,۵۴	۶۶,۹۶	۹,۹۰۹	۱۸,۷۸	۷۸۸	۶۵,۵	آزمایش	
۱۲,۵۲	۶۶,۰۰	۱۱,۳	۱۸,۸۰	۹۱۰,۵	۶۹,۵	مدل	۱۴۸۶
۱۲,۱۷	۶۵,۴۷	۱۰,۹۹	۱۸,۵۷	۹۰۴	۶۹,۵	آزمایش	
۱۲,۴۹	۶۵,۸۱	۱۱,۶۸	۱۸,۸۲	۹۴۳	۶۹,۵	مدل	۱۵۳۹
۱۲,۲۸	۶۴,۹۶	۱۱,۴۸	۱۸,۸۷	۹۳۶,۵	۶۹,۵	آزمایش	
۱۲,۵۹	۶۵,۸۲	۱۲,۲۵	۱۸,۹۶	۹۸۱,۴	۶۸	مدل	۱۶۰۲
۱۲,۲۷	۶۵,۱۴	۱۱,۹۴	۱۸,۸۲	۹۷۴	۶۸	آزمایش	
۱۲,۶۴	۶۵,۵۲	۱۳,۶۱	۱۹,۱۴	۱۰۸۵,۴	۶۶,۵	مدل	۱۷۷۲
۱۲,۳۴	۶۴,۳۲	۱۳,۲۸	۱۹,۱	۱۰۸۱	۶۶,۵	آزمایش	
۱۳,۴۲	۶۶,۸۰	۱۴,۷۲	۱۹,۹۵	۱۱۰۴,۶	۵۷	مدل	۱۸۰۵
۱۳,۳۴	۶۶,۰۹	۱۴,۵۲	۱۹,۹۹	۱۰۹۹	۵۷	آزمایش	
۱۱,۸۶	۶۳,۶۹	۱۳,۹۷	۱۸,۴۶	۱۱۸۸,۱	۷۵	مدل	۱۹۳۸
۱۱,۲۸	۶۱,۶۳	۱۳,۲۸	۱۸,۲۶	۱۱۸۰	۷۵	آزمایش	
۱۲,۰۲	۶۳,۳	۱۶,۱۷	۱۸,۸۲	۱۳۵۷,۴	۷۱,۵	مدل	۲۲۱۵
۱۱,۲۶	۶۰,۰۸	۱۵,۱۵	۱۸,۶۸	۱۳۵۰	۷۱,۵	آزمایش	
۱۲,۸۳	۶۴,۳۸	۱۸,۷۱	۱۹,۷۸	۱۴۶۹,۲	۶۰,۵	مدل	۲۴۰۰

۱۲,۱۹	۶۱,۱۵	۱۷,۷۸	۱۹,۸۶	۱۴۶۴	۶۰,۵	آزمایش	
۱۱,۰۲	۶۰,۶۶	۱۶,۷۴	۱۷,۹۹	۱۵۳۳,۷	۸۲	مدل	۲۵۰۰
۱۰,۳۴	۵۷,۱۸	۱۵,۷	۱۷,۹۸	۱۵۲۷	۸۲	آزمایش	
۱۱,۴۸	۶۱,۳۱	۱۸,۲۸	۱۸,۵۶	۱۶۰۶,۳	۷۵,۵	مدل	۲۶۲۰
۱۰,۷۱	۵۷,۱۶	۱۷,۰۵	۱۸,۶۳	۱۶۰۱	۷۵,۵	آزمایش	
۱۱,۸۵	۶۱,۸۴	۱۹,۴۸	۱۸,۹۹	۱۶۵۸,۲	۷۰,۵	مدل	۲۷۰۶
۱۰,۹۱	۵۷,۵۴	۱۷,۹۳	۱۸,۹۲	۱۶۴۷	۷۰,۵	آزمایش	
۱۲,۲۹	۶۲,۶۵	۲۰,۲۸	۱۹,۴۶	۱۶۶۳,۴	۶۵	مدل	۲۷۱۶
۱۱,۵۷	۵۹,۴۶	۱۹,۰۹	۱۹,۳۳	۱۶۶۱	۶۵	آزمایش	

۶- نتیجه گیری

به منظور مدل سازی عملکرد سلول های خورشیدی از سه مدل ایده آل، تک دیود و دو دیود استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل سازی ها و مقایسه آن ها با مقادیر تجربی در دما و شدت تابش متناظر نشان می دهد که هر سه مدل با تقریب خوبی مقادیر جریان، ولتاژ و توان را محاسبه می کنند و می توان از آن ها برای بررسی عملکرد پنل خورشیدی در شدت تابش و دمای متفاوت استفاده کرد. با این حال مدل دو دیود نسبت به دو مدل دیگر نتایج دقیق تری را به دست داده است.

همچنین سیستم متمرکزکننده با نسبت تمرکز پایین برای بررسی عملکرد پنل خورشیدی تحت تمرکز مورد استفاده قرار گرفته است. مدل تک دیود برای مدل سازی عملکرد پنل تحت تمرکز نور خورشید ارائه شد. نتایج حاصل نشان دهنده افزایش توان خروجی پنل خورشیدی با افزایش شدت تابش است به طوری که توان خروجی پنل تا ۱۹,۰۹ وات افزایش داشته است و این مقدار تقریباً ۱/۹ برابر توان خروجی پنل در شرایط استاندارد است. با افزایش نسبت تمرکز و شدت تابش، افزایش در دمای کاری پنل نیز بیشتر می شود که در نتیجه آن پنل نیاز به خنک کاری دارد. با افزایش دما، راندمان پنل خورشیدی کاهش می یابد. با افزایش شدت تابش راندمان سلول در صورتی افزایش می یابد که دمای کاری سلول چندان افزایش نیابد.

ولتاژ سلول و ضریب پری سلول با افزایش دما کاهش می یابد که این کاهش در ضریب پری، از ۷۱,۸۷ درصد تا ۵۷,۱۸ درصد، می تواند به خاطر افزایش اتلافات اهمی به دلیل بالا بودن مقاومت سری پنل باشد. استفاده از سیستم متمرکزکننده با نسبت تمرکز پایین موجب افزایش شدت تابش، بالا رفتن دما و افزایش توان پنل خورشیدی می شود. برای افزایش راندمان پنل می توان از سیستم خنک کاری استفاده کرد تا افزایش دما برای پنل ایجاد نشود.

۷- مراجع

- [1] Ishaque K., Salam Z., and Taheri H. Accurate MATLAB simulink PV system simulator based on a two-diode model, Journal of Power Electronics, Vol. 11, No. 2, pp. 179-187, 2011.
- [2] Goetzberger A., Hebling C., and Schock H. W., Photovoltaic materials, history, status and outlook", Materials Science and Engineering R 40, pp. 1-46, 2003.
- [3] Fraas L M., and Larry D. P., Solar cells and their applications, Vol. 236, John Wiley and Sons, 2010.
- [4] Michael J.J., Iniyan S. and Goic R., Flat plate solar photovoltaic-thermal (PV/T) systems: A reference guide. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 51, pp.62-88, 2015.
- [5] ALQahtani, Ayedh H., Muthanna S., Abuhamdeh, and Yazan M. Alsmadi, A simplified and comprehensive approach to characterize photovoltaic system performance, In Energytech, 2012 IEEE, pp. 1-6. IEEE, 2012.
- [6] Tripathi B., Yadav P., Lokhande M., & Kumar M., Feasibility Study of Commercial Silicon Solar PV Module based Low-Concentration Photovoltaic System. International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research, 2(3), 84-93, 2012.
- [7] Tian H., Mancilla-David F., Ellis K., Muljadi E., & Jenkins P., A cell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels. Solar Energy, 86(9), 2695-2706, 2012.
- [8] Hernanz J.R., Guede J.L., Belver I.Z., Lopez P.E., Zulueta E., Barambones, O. and Echavarri F.O., MODELLING OF A PHOTOVOLTAIC PANEL BASED ON THEIR ACTUAL MEASUREMENTS, 2014.
- [9] Pranahita B.S., Kumar A.S. and Babu A.P., A STUDY ON MODELLING AND SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC CELLS, 2014.
- [10] Chander S., Purohit A., Sharma A., Nehra S.P. and Dhaka M.S., Impact of temperature on performance of series and parallel connected mono-crystalline silicon solar cells. Energy Reports, 1, pp.175-180, 2015.
- [11] Ishaque K., Salam Z., and Taheri H., Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model, Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 19, No. 7, pp. 1613-1626, 2011.
- [12] Sera Dezso, Remus Teodorescu, and Pedro Rodriguez. "PV panel model based on datasheet values, In Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on, pp. 2392-2396. IEEE, 2007.
- [13] Rustemli S., and Dincer F., Modeling of photovoltaic panel and examining effects of temperature in Matlab/Simulink", Electronics and Electrical Engineering, Vol. 109, no. 3, pp. 35-40, 2011.
- [14] Rodrigues E. M. G., R., Melício V. M. F. Mendes and Catalão J. P. S., Simulation of a solar cell considering single-diode equivalent circuit model, In International conference on renewable energies and power quality, Spain, pp. 13-15, 2011.
- [15] Yadav P., Tripathi B., Pandey K. and Kumar M., Effect of varying concentration and temperature on steady and dynamic parameters of low concentration photovoltaic energy system. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 61, pp.101-110, 2014.
- [16] Salmi, T., Bouzguenda, M., Gastli, A., and Masmoudi A, Matlab/ Simulink Based Modeling of Solar Photovoltaic Cell, International Journal of Renewable Energy Research, Vol.2, No.2, 2012.
- [17] Villalva M. G., & Gazoli J. R., Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. Power Electronics, IEEE Transactions, 2009.