

## طراحی مزرعه فتوولتائیک یک مگاوات و بررسی تاثیر سرعت باد بر عملکرد آن در شرایط اقلیمی استان یزد

عرفان رجائیان<sup>۱</sup>، سعید هاشمی نژاد<sup>۲\*</sup>، عدنان رجائیان<sup>۳</sup>

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی برق، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

(۲) استادیار، مهندسی برق، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی برق، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

\* کرمان، صندوق پستی: ۱۱۷ - ۷۶۳۱۵، پست الکترونیکی نویسنده مسئول: S.Hasheminejad@kgut.ac.ir

چکیده:

با توجه به افزایش استفاده از منابع فتوولتائیک در شبکه های قدرت و پایین بودن راندمان آن‌ها، مطالعه بر روی افزایش بازده این منابع اهمیت روزافزونی یافته است. در این میان تأثیر عواملی مثل سرعت باد و کاهش دمای پنل فتوولتائیک توسط این پارامتر کمتر در نظر گرفته شده است. در این مقاله، ابتدا معادلات انتقال حرارت در سلول‌های خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفته و سپس تأثیر سرعت باد در این روابط اعمال شده است. سپس راه حلی برای کاهش دمای پنل‌های فتوولتائیک و در نتیجه افزایش بازدهی آن‌ها ارائه شده است. لذا با استفاده از اطلاعات هواشناسی و نرم‌افزارهای Matlab، System Advisor Model و Meteonorm، مزرعه فتوولتائیک یک مگاوات در شرایط اقلیم استان یزد شبیه سازی شده و تأثیر تغییر سرعت باد بر بازدهی مزرعه فتوولتائیک بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش سرعت باد ۱۷ متر بر ثانیه توان خروجی مزرعه به صورت مطلوبی افزایش می‌یابد. در سرعت باد بالاتر از ۱۷ متر بر ثانیه افزایش توان ناچیز خواهد بود.

کلیدواژگان: استان یزد، افزایش بازده، سرعت باد، مزرعه فتوولتائیک، معادلات انتقال حرارت

## Designing a 1 MW photovoltaic farm and studying the effect of wind speed on its performance in the climatic conditions of Yazd province

Erfan Rajaeian<sup>1</sup>, Saeed Hasheminejad<sup>2\*</sup>, Adnan Rajaeian<sup>3</sup>

1-M.Sc. Student, Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

2- Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

3- M.Sc. Student, Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

\* P.B.O 9999999999 Kerman, Iran, S.hasheminejad@kgut.ac.ir

### Abstract:

The increasing use of the photovoltaic sources and their low efficiency, makes it very important to study on different ways of enhancing their efficiency. In this paper, after designing a photovoltaic farm, the heat transfer equations in solar cells are investigated. Considering the effect of the wind speed on these equations, a solution is provided to decrease the temperature and then increase the efficiency of the photovoltaic panels. Therefore, by means of the meteorological data and three softwares (System advisor model, Matlab and Meteonorm), the 1 MW photovoltaic farm in climate condition of Yazd province is simulated. Then, the effect of wind speed on the efficiency of the photovoltaic farm is investigated. Results shows that with the increase of the wind speed up to 17 m/s, the output power of the farm is considerably increased. For the wind speed upper than 17 m/s, the output power increase is negligible.

**Keywords:** Yazd province, power increase, wind speed, photovoltaic field.

سلول های خورشیدی نوعی مبدل انرژی هستند که انرژی تابشی را از خورشید دریافت کرده و به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند. بنابراین، این سلول ها، مانند هر ماشین گرمایی دیگری توسط بازدهی کارنو محدود می شوند [۲۰]. سه عامل تأثیرگذار بر بازدهی این سلول ها عبارتند از جنس سلول، شدت تابش خورشید، دمای عملیاتی ماژول. پژوهشگران مشاهده کردند به طور میانگین با افزایش دمای عملیاتی پنل به ازای هر درجه سانتیگراد بیش از ۲۵ درجه سلسیوس، بازده پنل بین ۰/۳ تا ۰/۵ درصد کاهش می یابد [۲]. با توجه به اینکه دمای عملیاتی پنل در فصول گرم به بیش از ۶۵ درجه میرسد، کاهش ۱۴ تا ۲۲ درصدی راندمان ناگزیر به نظر می رسد [۳]. به طور کلی در سلول های خورشیدی که برای تولید برق مورد استفاده قرار می گیرند، حدود ۸۰ درصد انرژی خورشیدی جذب شده، صرف تولید گرما می شود و در بهترین حالت، فقط می توانند ۲۰ درصد انرژی جذب شده را به برق تبدیل کنند. بنابراین در مناطقی که دمای سطح سلول های خورشیدی در آفتاب تابستان به بیش از ۶۰ درجه سانتیگراد می رسد، ۲۰ درصد انرژی خورشیدی جذب شده که قرار بود به برق تبدیل شود، افت بسیار زیادی پیدا می کند و عملاً مقدار قابل توجهی از انرژی خورشیدی به صورت گرما هدر می رود. این مشاهدات ساده و همچنین این حقیقت که بازدهی سیستم فتوولتائیک توسط دمای کاری تحت تأثیر قرار می گیرد بیان گر این است که در شرایط میدانی، توان خروجی پنل فتوولتائیک به شدت تغییر می کند و دیگر این که پنل ها نسبت به آن چه در طراحی محاسبه شده بازدهی متفاوتی دارند. در نتیجه تحقیقات فراوانی با هدف پیش بینی دمای عملیاتی سیستم فتوولتائیک برای پیش بینی میزان تولید انرژی و کاهش دمای عملیاتی برای افزایش بازدهی تولید انجام شده است. برای هدف اول، مطالعات فراوانی به منظور تعیین دمای سلول یا ماژول [۲]، یا محاسبه مستقیم توان تولیدی سیستم، در شرایط واقعی انجام شده است [۴ و ۵]. اساس این محاسبات مدل سازی رفتار گرمایی و الکتریکی ماژول در محدوده کارکرد است. یک مدل مطلوب مدلی است که در حین سادگی همپوشانی مطلوبی با داده های تجربی داشته باشد. برای هدف دوم و به منظور کاهش دمای کاری سیستم فتوولتائیک، پژوهشگران روش هایی را برای تخلیه گرمای تولیدی بررسی کرده اند [۶ و ۷]. برای کاهش گرما از سطح سلول خورشیدی از سیستم های خنک کننده متفاوتی استفاده می شود که هر کدام مزایا و معایب خود را دارند. در یک تقسیم بندی کلی سیستم های خنک کننده را می توان از لحاظ مصرف انرژی یا عدم مصرف انرژی به ترتیب به سیستم های فعال و غیرفعال تقسیم کرد. در خنک کننده های فعال سیال خنک کننده می تواند آب یا هوا باشد. خنک سازی پنل خورشیدی توسط جریان هوا یک روش فراگیر و پیش نهاد شده است که علاوه بر ارزان بودن، قابلیت به کارگیری هوای گرم در ساختمان را نیز دارد [۸].

## ۲- طراحی مزرعه فتوولتائیک

### ۲-۱ محاسبه میزان انرژی روزانه مورد نیاز از آرایه های فتوولتائیک

ذکر این نکته ضروری است که بخاطر بازده مبدل و تلفات، میزان انرژی روزانه دریافتی از آرایه فتوولتائیک باید بیش از میانگین بار روزانه باشد. معمولاً مبدل ها بازده بین ۹۰ تا ۹۶ درصد دارند. پیشنهاد می شود که بازده مبدل ۹۲ درصد در نظر گرفته شود، این مقدار با لحاظ کردن بازده تجهیز MPPT به منظور حداکثر کردن توان تحویلی در کنار مبدل استفاده می شود، پیشنهاد

شده است. به طور مثال اگر میزان مصرف انرژی روزانه برابر N kwh باشد در نظر گرفتن تأثیر تلفات که بیش ترین مقدار برای آن ۵ درصد در نظر گرفته می شود و لحاظ کردن بازده مبدل (که ۹۲ درصد فرض می شود)، میزان انرژی روزانه مورد نیاز با معادله (۱) محاسبه می شود.

$$N(kwh) = \text{انرژی روزانه مورد نیاز (kwh)} \div 0.92 \div 0.95 \quad (1)$$

فرض کنید منطقه مورد نظر بطور متوسط، دارای میزان متوسط تابش روزانه خورشید (PSH)، ۵ ساعت باشد، در این صورت بیشترین انرژی مورد نیاز از آرایه فتوولتائیک با معادله (۲) بیان می شود.

$$\text{PSH} \div 5 = \text{انرژی روزانه مورد نیاز (kwh)} = \text{پیک توان مورد نیاز (kw)} \quad (2)$$

عوامل دیگری نیز بر توان خروجی پنل خورشیدی تأثیر گذارند که این عوامل عبارتند از:

۱- خطای خروجی سازنده ( $f_{\text{man}}$ ): توان خروجی ماژول های فتوولتائیک برحسب وات با خطایی تقریباً برابر ۵٪ بیان می شود که بر اساس دمای ۲۵ درجه سانتیگراد برای سلول ها است.

۲- اثر آلودگی ها و گرد و خاک ( $f_{\text{dirt}}$ ): میزان توان خروجی یک ماژول فتوولتائیک ممکن است به دلیل آلودگی های موجود بر سطح ماژول، کاهش یابد و این کاهش با فاکتور کاهش در اثر آلودگی هوا محاسبه می شود. میزان کاهش در توان ماژول ها در اثر آلودگی، بستگی به اقلیم محل نصب آرایه ها دارد که در بعضی از مکان ها، به دلیل آلودگی هوا (مانند کلان شهرها)، زیاد است.

۳- اثر دما: بر اساس استاندارد AS4059.2 میانگین دمای سلول داخل ماژول فتوولتائیک را می توان بر اساس معادله (۳) تخمین زد:

$$T_{\text{cell,eff}} = T_{a,\text{day}} + 25 \quad (3)$$

که در آن  $T_{\text{cell,eff}}$ ، میانگین دمای روزانه مؤثر سلول به درجه سانتیگراد و  $T_{a,\text{eff}}$ ، میانگین دما در طول روز (در ماه مورد نظر) به درجه سانتیگراد است. بنابراین کاهش میزان خروجی آرایه فتوولتائیک در اثر دما به جنس ماژول بکار رفته در آرایه و مقدار متوسط بیشترین دمای محیط در محل نصب سیستم فتوولتائیک بستگی دارد. میزان کاهش توان بر اثر دما را می توان با استفاده از معادله (۴) محاسبه کرد.

$$f_{\text{temp}} = 1 - (\gamma \times (T_{\text{cell,eff}} - T_{\text{stc}})) \quad (4)$$

که در آن  $f_{\text{temp}}$ ، ضریب کاهش توان بر اثر دما،  $\gamma$  مقدار مطلق ضریب دمای انرژی به ازای هر درجه افزایش از ۲۵ درجه سانتیگراد و  $T_{\text{stc}}$ ، دمای سلول در شرایط استاندارد آزمون (STC) به درجه سانتیگراد است.

### ۲-۲ محاسبه کمترین تعداد ماژول در آرایه های فتوولتائیک

تعداد ماژول های مورد نیاز در آرایه فتوولتائیک از تقسیم پیک توان مورد نیاز بر میزان توان تولیدی هر ماژول بدست می آید.

### ۲-۳ تعیین آرایش نهایی آرایه های فتوولتائیک



$$N_{\max-per-string} = V_{inv-max} / V_{oc-max} \quad (8)$$

که در آن  $V_{inv-max}$ ، بیشترین ولتاژ ورودی مبدل و  $V_{oc-max}$ ، بیشترین ولتاژ اتصال کوتاه است.

### ۲-۵ طراحی مبدل

انتخاب مبدل به موارد متعددی بستگی دارد که از جمله آن ها می توان به میزان انرژی خروجی از آرایه، پتانسیل افزایش ابعاد آرایه در آینده، تطابق محدوده مجاز کاری مبدل با آرایه، استفاده از یک مبدل مرکزی یا چند مبدل اشاره کرد. در صورت استفاده از چند مبدل، هنگام از کار افتادن یکی از آن ها، بقیه مبدل ها می توانند به کار خود ادامه دهند و مزیت دیگر این است که ماژولار بودن سیستم افزایش می یابد و امکان گسترش آن فراهم می شود. البته باید در نظر داشت که استفاده از چند مبدل با توان کمتر در مقایسه با یک مبدل با توان بیشتر، مستلزم صرف هزینه بیشتر است. پس از آن که ابعاد آرایه فتوولتائیک بر اساس معیارهای طراحی تعیین شد، بیشترین توان آرایه فتوولتائیک از رابطه (۹) محاسبه می شود.

(۹) توان نامی ماژول انتخابی  $\times$  تعداد ماژول ها در آرایه = بیشترین توان آرایه فتوولتائیک بنابراین کمترین ظرفیت برای مبدل انتخابی برابر با توان فوق خواهد بود. البته می توان تاثیرات کاهش توان در اثر تفرانس سازنده، آلودگی و دما که در قسمت قبل توضیح داده شد را نیز در نظر گرفت که در این صورت ظرفیت کمتری برای مبدل مورد نیاز خواهد بود.

### ۲-۶ تحلیل حرارتی و معادلات انتقال حرارت برای پنل فتوولتائیک

در این قسمت مدل انتقال حرارت ماژول فتوولتائیک مجاور هوا به عنوان سیال خنک کننده مدلسازی می شود. همانطور که بیان شد فقط قسمت کمی از نور خورشید دریافتی توسط ماژول فتوولتائیک به انرژی الکتریکی تبدیل می شود و مابقی آن باعث ایجاد حرارت در ماژول می شود که بازده ماژول را کاهش داده و سبب می شود که ماژول نتواند از آن قسمت کوچک نیز بهره مناسب را ببرد. در روی صفحه ماژول، تلفات گرمایی از طریق هدایت، انتقال و تابش صورت می گیرد و در پشت صفحه ماژول انتقال گرما از سلول های خورشیدی به تدار از طریق هدایت جریان می یابد. میزان انرژی خورشیدی موجود در ماژول فتوولتائیک برابر با مجموع تلفات تابشی، همرفتی و هدایت گرما در سطح فوقانی ماژول، انتقال حرارت از سطح تحتانی ماژول به سطح تدار و انرژی الکتریکی تولید شده می باشد. معادله (۱۰) تعادل انرژی را برای ماژول نشان می دهد [۹].

$$(10)$$

$$\tau_g [\alpha_c \beta_c G + \alpha_T (1 - \beta_c) G] A_{PV} = U_t (T_{cell} - T_{amb}) A_{PV} + \epsilon_g \sigma A_{PV} (T_{cell}^4 - T_{sky}^4) + U_T (T_{cell} - T_{bs}) A_{PV} + \tau_g \beta_c \eta_{el} G A_{PV}$$

که در آن  $T_{cell}$ ، دمای سلول،  $T_{amb}$ ، دمای محیط،  $T_{bs}$ ، دمای سطح زیرین تدار،  $T_{sky}$ ، دمای آسمان،  $\tau_g$ ، نسبت گذردهی شیشه،  $G$ ، شدت تشعشع خورشید،  $A_{PV}$ ، مساحت ماژول،  $\alpha_c$ ، ضریب جذب سلول خورشیدی،  $\alpha_T$ ، ضریب

آرایه باید با محدوده مجاز ولتاژ مبدل تطابق داشته باشد و بنابراین، آرایه نهایی آرایه به مبدل انتخابی و محدوده مجاز ولتاژ عملکرد آن بستگی دارد.

### ۲-۴ تطبیق دادن آرایه با محدوده ولتاژ مبدل

بسیاری از مبدل های موجود دارای محدوده مجاز ولتاژ کاری هستند. اگر ولتاژ آرایه فتوولتائیک خارج از این محدوده مجاز باشد، مبدل کار نخواهد کرد و در شرایطی که ولتاژ آرایه بیش از مقدار مشخص شده باشد، ممکن است مبدل آسیب ببیند. بیشترین و کمترین ولتاژ ورودی توسط سازنده مشخص می شوند. لازم است که ولتاژ خروجی آرایه های خورشیدی با ولتاژ کاری مبدل تطابق داشته باشد و هرگز به بیشترین ولتاژ مبدل نرسند. برای اطمینان از این که ولتاژ خروجی آرایه، خارج از محدوده ولتاژ داخلی dc مبدل نیست، بیشترین و کمترین دمای شبانه روز برای مکان مورد نظر مورد نیاز است. وقتی که دما حداکثر است، بیشترین ولتاژ خروجی آرایه نباید هرگز کمتر از کمترین ولتاژ کاری مبدل باشد. لازم به ذکر است که ولتاژ واقعی در ورودی مبدل فقط  $V_{mp}$  آرایه نیست بلکه افت ولتاژ در کابل dc نیز باید در نظر گرفته شود. کاهش ولتاژ در اثر درجه حرارت از معادله (۵) محاسبه می شود.

$$V_{mp,cell,eff} = V_{mp,STC} - [\gamma_V \times (T_{cell,eff} - T_{STC})] \quad (5)$$

که در آن  $V_{mp,cell,eff}$ ، بیشترین ولتاژ خروجی در دمای مؤثر سلول (ولت)،  $V_{mp,STC}$ ، بیشترین ولتاژ خروجی در شرایط (STC) برحسب ولت،  $\gamma_V$  ضریب دمایی ولتاژ برحسب ولت به درجه سانتیگراد است. با توجه به دمای مؤثر سلول فتوولتائیک، لازم است که ولتاژ آرایه هرگز کمتر از کمترین مقدار مشخص مبدل نباشد. تعداد ماژول ها در هر رشته باید به گونه ای انتخاب شوند که بیشترین ولتاژ خروجی در صورتی حاصل شود که حداکثر دمای قابل تصور رخ دهد. کمترین تعداد ماژول های رشته را می توان با معادله (۶) تعیین کرد.

$$N_{\min-per-string} = V_{inv-min} / V_{inv-mpp-inv} \quad (6)$$

که در آن  $V_{inv-min}$ ، حداقل ولتاژ ورودی مبدل و  $V_{inv-mpp-inv}$ ، حداقل ولتاژ MPPT مؤثر یک ماژول در مبدل به ازای بیشترین دمای مؤثر سلول است. برای محاسبه تعداد ماژول ها پیشنهاد می شود که ۱۰ درصد حاشیه اطمینان در کمترین مقدار مجاز اعمال گردد. در سردترین دمای ممکن، ولتاژ مدار باز آرایه نباید هرگز بیش از، بی شترین ولتاژ مجاز ورودی مبدل باشد. در اینجا از ولتاژ مدار باز استفاده می شود چون این ولتاژ از ولتاژ MPPT بیشتر است. از کمترین دمای ساعات روز برای تعیین بیشترین  $V_{oc}$  باید استفاده کرد که با معادله (۷) محاسبه می شود.

$$V_{max-oc} = V_{oc-STC} - [\gamma_V \times (T_{min} - T_{STC})] \quad (7)$$

که در آن  $V_{max-oc}$ ، ولتاژ مدار باز در کمترین دمای سلول برحسب ولت،  $V_{oc-STC}$ ، ولتاژ مدار باز در شرایط STC برحسب ولت،  $\gamma_V$ ، ضریب دمایی ولتاژ برحسب (V/°C) و  $T_{min}$ ، کمترین دمای روزانه مورد انتظار برحسب درجه سانتیگراد است. بدین ترتیب بیشترین تعداد ماژول ها در هر رشته با رابطه (۸) تعیین می شود.



جذب تدار و  $\beta_c$  ضریب تراکم سلول خورشیدی بوده که نسبت سطح صفحه جذب به سطح پوشش سلول خورشیدی تعریف نمود.

$U_T$  ضریب انتقال هدایت حرارتی از سلول خورشیدی به محیط توسط تدار و  $U_i$  ضریب انتقال حرارت کلی از سلول خورشیدی به محیط می باشد. همچنین  $\epsilon_g$  قدرت تابندگی ماژول فتوولتائیک،  $\sigma$  ثابت بولتزمن و  $\eta_{el}$  راندمان الکتریکی ماژول است. در سمت راست، اولین عبارت به تلفات حرارتی همرفتی و هادی از طریق سطح فوقانی ماژول اشاره دارد، عبارت دوم تلفات تابش و سومین عبارت انتقال حرارت هدایت شده از سلول به سطح تدار را نشان می دهد و در نهایت آخرین عبارت نشان دهنده بخشی از نور خورشید است که به برق تبدیل می شود.  $U_T$  از معادله (۱۱) محاسبه می شود.

(۱۱)

$$U_T = \left[ \frac{L_{si}}{K_{si}} + \frac{L_T}{K_T} \right]^{-1}$$

که در آن  $L_{si}$  ضخامت سلول خورشیدی،  $K_{si}$  رسانایی سلول خورشیدی،  $L_T$  ضخامت صفحه تدار،  $K_T$  ضریب هدایت تدار است.  $U_i$  که شامل تلفات رسانایی و همرفتی است از رابطه (۱۲) محاسبه می شود.

(۱۲)

$$U_i = \left[ \frac{L_g}{K_g} + \frac{1}{h_{conv,t}} \right]^{-1}$$

که در آن  $L_g$  ضخامت پوشش شیشه ای،  $K_g$  رسانایی پوشش شیشه ای،  $h_{conv,t}$  ضریب انتقال حرارت از بالای پنل فتوولتائیک است. دمای آسمان، دمایی است که آسمان به عنوان یک جسم سیاه تابش را توسط جو در درجه حرارت سطح زمین منتشر می کند. با نادیده گرفتن فشار بخار از جو، معادله (۱۳) را می توان برای تخمین دمای مؤثر آسمان ( $T_{sky}$ ) بیان نمود. در این رابطه  $T_a$  دمای جو است.

(۱۳)

$$T_{sky} = 0.0552 \times T_a^{1.5}$$

ضریب انتقال حرارت از بالای پنل فتوولتائیک،  $h_{conv,t}$  که با تعیین عدد ناسلت برای جریان های خارجی با توجه به اندازه پنل و سرعت باد محاسبه می شود، با معادله (۱۴) نشان داده شده است.

(۱۴)

$$h_{conv,t} = \frac{Nu \times K}{L}$$

که در آن  $k$  ضخامت پنل،  $L$  طول پنل و  $Nu$  عدد ناسلت است. عدد ناسلت ( $Nu$ ) از رابطه (۱۵) محاسبه می شود.

(۱۵)

$$Nu = 0.102 \times Re^{0.675} \times Pr^{\frac{1}{3}}$$

که در آن  $Re$  و  $Pr$  به ترتیب اعداد پراتل و رینولدز می باشد.  $Re$  از رابطه (۱۶) محاسبه می شود.

(۱۶)

$$Re = \frac{VL}{\nu}$$

که در آن  $V$  سرعت باد،  $L$  طول پنل و  $\nu$  چگالی هوا است. معادله تعادل انرژی برای سطح پشت دیواره ماژول را می توان به صورت رابطه (۱۷) بیان نمود.

$$U_T(T_{cell} - T_{bs})A_{PV} = h_a(T_{bs} - T_m)A_{PV} \quad (17)$$

که در آن، عبارت سمت راست، اشاره به گرمای تلف شده توسط انتقال بین دیواره ماژول و جریان هوا دارد.  $T_m$  متوسط دمای سیال در طول کانال و  $h_a$  مقدار ضریب انتقال حرارت بین دیواره تدار و جریان هوا است.

متوسط دمای سیال در طول کانال ( $T_m$ ) به صورت رابطه (۱۹) در نظر گرفته شده است. در این رابطه  $T_{in}$  و  $T_{out}$ ، به ترتیب دمای هوا قبل از در مجاورت ماژول قرار گرفتن و دمای هوا بعد از عبور از ماژول هستند.

$$T_m = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (18)$$

موازنه انرژی جریان هوا در کانال را می توان با رابطه (۲۰) بیان نمود.

$$mC_p(T_{out} - T_{in}) + U_b(T_m - T_{amb})A_{PV} = h_a(T_{bs} - T_m)A_{PV} \quad (19)$$

که در آن  $m$  تغییرات جرم هوا،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه هوا و  $U_b$  ضریب تلفات همرفت از جریان هوا در کانال به هوای محیط است که می توان آن را با معادله (۲۱) بیان نمود.

$$U_b = \left[ \frac{L_i}{K_i} + \frac{1}{h_a} \right]^{-1} \quad (20)$$

که در آن  $L_i$  و  $K_i$  به ترتیب معرف طول و ضخامت مجرای هوا هستند. حل دستگاه متشکل از سه معادله (۱۰، ۱۷ و ۲۰) و سه مجهول  $T_{cell}$ ،  $T_{bs}$  و  $T_{out}$  برای داده های هواشناسی در هر ساعت، دمای ماژول را در هر ساعت تعیین می کند.

### مشخصات محل مورد بررسی در شبیه سازی

در حال حاضر ایران با داشتن حدود ۳۰۰ روز آفتابی در سال جزو بهترین کشورهای جهان در زمینه پتانسیل انرژی خورشیدی است که این میزان تابش و روز آفتابی در استان گرم بزد ۳۳۰ روز است. به همین دلیل این استان به عنوان یکی از مستعدترین نقطه های کشور در تولید این نوع انرژی محسوب می شود. در جدول (۱) مشخصات منطقه مورد بررسی بیان شده است.

جدول ۱ مشخصات و شرایط اقلیمی منطقه مورد بررسی

Location	Iran-Yazd Province
Elevation	۱۲۳۰ m
Latitude	۳۱.۹°
Longitude	۵۴.۴°
Average temperature	۲۰.۴°
Average wind speed	۲.۷ m/s
Global horizontal	۵۶۶ kwh/m <sup>2</sup> /day

### ۳- شبیه سازی مزرعه فتوولتائیک یک مگاوات



شکل ۲ منحنی مشخصه بازده اینورتر مورد استفاده در شبیه سازی

در مزرعه فتوولتائیک پنل ها رو به جنوب طراحی شده و با شیبی ثابت و برابر با عرض جغرافیایی منطقه مورد بررسی، قرار داده شده اند. به دلیل این که پنل ها ثابت بوده و در یک ردیف قرار دارند بر روی یک دیگتر اثر سایه نخواهند داشت پس نسبت پوشش زمین (GCR) را برابر با ۳ قرار می دهیم تا زمین کمتری برای احداث نیروگاه نیاز باشد. مساحت سطح کل پنل های نصب شده در نیروگاه برابر با ۶۴۸۶/۷ متر مربع است. زمین مورد استفاده برای احداث این نیروگاه ۰/۵ هکتار است که از رابطه (۲۱) محاسبه می شود.

$$Area(acres) = Total.Module.Area \div GCR \times 0.0002471 \quad (21)$$

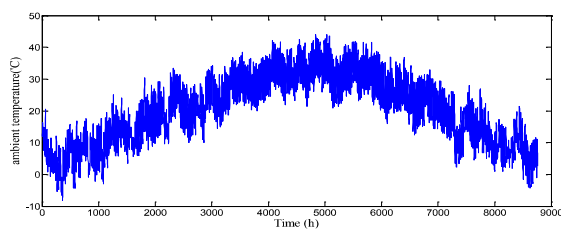
سایر اطلاعات مزرعه فتوولتائیک شبیه سازی شده در شکل شماره (۳) بیان شده است.

Modules		Inverters	
Nameplate capacity	998.674 kWdc	Total capacity	832.200 kWac
Number of modules	4,072	Total capacity	887.432 kWdc
Modules per string	8	Number of inverters	219
Strings in parallel	509	Maximum DC voltage	400.0 Vdc
Total module area	6,486.7 m <sup>2</sup>	Minimum MPPT voltage	100.0 Vdc
String Voc	296.0 V	Maximum MPPT voltage	400.0 Vdc
String Vmp	238.4 V	Battery maximum power	0.000 kWdc

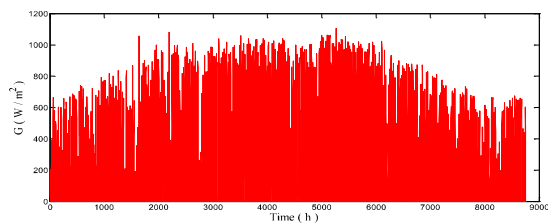
شکل ۳ مشخصات فنی مزرعه فتوولتائیک شبیه سازی شده

#### ۴- نتایج حاصل از شبیه سازی

در این پژوهش سعی شده است تا تاثیرات سرعت باد بر عملکرد مزارع فتوولتائیک بررسی شود. لذا با استفاده از اطلاعات هوا شناسی، شبیه سازی انجام شده و سرعت باد از صفر تا ۲۲ متر بر ثانیه تغییر یافته و تاثیرات آن را بر عملکرد بخش های مختلف مزرعه فتوولتائیک بررسی می شود. شکل های (۴\_الف) و (۴\_ب) به ترتیب نشان دهنده دما و تشعشع منطقه یزد برای مدت زمان یک سال هستند.



شکل ۴\_الف نمودار تغییرات دما برحسب زمان



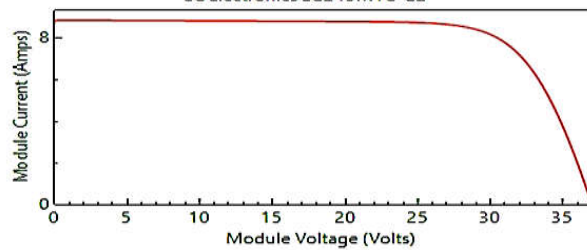
شکل ۴\_ب نمودار تغییرات تشعشع برحسب زمان برای منطقه یزد

شکل (۵) تاثیر سرعت باد را بر دمای سلول پنل در طول یک سال در شکل سمت چپ و برای یک روز خاص در شکل سمت راست نشان می دهد. اگر

با استفاده از نرم افزار System Advisor Model، یک مزرعه یک مگاوات در شرایط اقلیمی یزد شبیه سازی شده است. مشخصات پنل مورد استفاده در جدول (۲) و شکل (۱) آورده شده است.

#### جدول ۲ مشخصات فنی پنل فتوولتائیک مورد استفاده در شبیه سازی

Company Name	LG Electronics
Module Name	LG 245 M1C-G2
Nominal efficiency	15.3957%
Maximum Power (P <sub>mp</sub> )	245.254 wdc
V <sub>mp</sub>	29.8 vdc
I <sub>mp</sub>	8.2 Adc
V <sub>oc</sub>	37 vdc
I <sub>sc</sub>	8.7 Adc
NOCT	45.5 °C
Temp coefficient of Pmax	-0.602 %/°C
Temp. coefficient of Voc	-0.432 %/°C
Temp. coefficient of Isc	0.042 %/°C
Module area	1.593 m <sup>2</sup>
Material	Mono-c-si
Number of cells	60



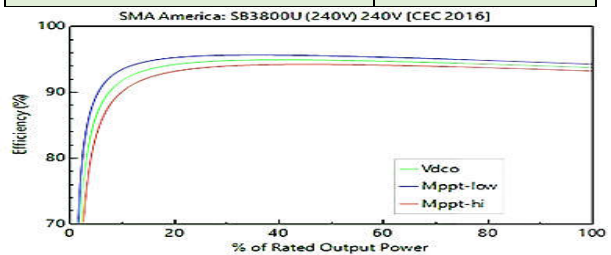
شکل ۱ منحنی مشخصه جریان بر حسب ولتاژ پنل مورد استفاده در شبیه سازی برای تبدیل ولتاژ DC به AC از اینورتر به مدل زیر استفاده شده است.

SMA America: SB3800U(240V) 240V[CEC 2016]

سایر مشخصات اینورتر در جدول (۳) و شکل (۲) بیان شده است.

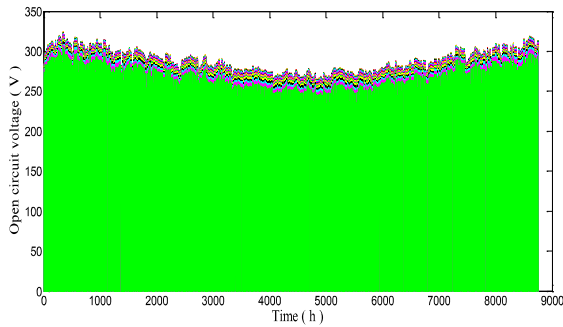
#### جدول ۳ مشخصات فنی اینورتر مورد استفاده در شبیه سازی

CEC Weighted efficiency	۹۴.۴۲۹ %
European Weighted efficiency	۹۴.۱۴۶ %
Maximum AC Power	۳۸۰۰ Wac
Maximum DC Power	۴۰۵۲.۳ Wdc
Power consumption during operation	۲۲.۸۰۴۲ Wdc
Power consumption at night	۰.۱۶۱ Wac
Nominal AC voltage	۲۴۰ Vac
Maximum DC current	۰.۰۰۹۵ Adc
Minimum MPPT DC voltage	۱۰۰ Vdc
Nominal DC Voltage	۲۵۰ Vdc
Maximum MPPT DC voltage	۴۰۰ Vdc
C0	-۸.۲۳۸۹□-۰۰۶
C1	۳.۷۸۴۶□-۰۰۵
C2	۰.۰۰۱۵۸۵۸۹
C3	-۲.۳۰۹۰۳□-۰۰۵

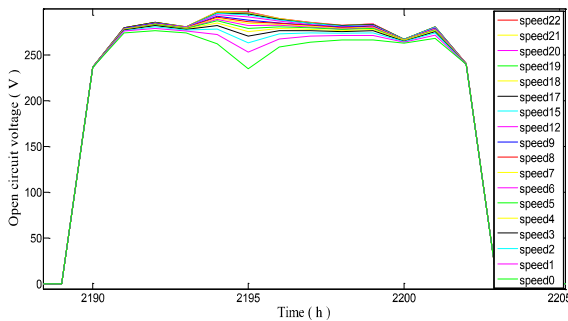


شکل ۶-ب) تاثیر سرعت باد بر جریان اتصال کوتاه پنل فتوولتائیک در یک روز خاص در منطقه یزد

شکل ۷) تاثیر سرعت باد بر ولتاژ مدار باز آرایه فتوولتائیک را نشان می دهد. همان طور که در شکل مشخص است، با افزایش سرعت باد، ولتاژ مدار باز آرایه افزایش می یابد. منحنی قرمز رنگ (بالترین منحنی)، ولتاژ مدار باز را در سرعت ۲۲ متر بر ثانیه و منحنی سبز رنگ (پایین ترین منحنی)، ولتاژ مدار باز را در سرعت باد صفر نشان می دهد.

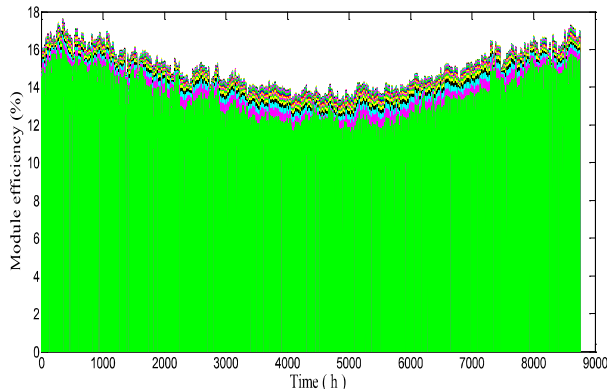


شکل ۷- الف) تاثیر سرعت باد بر ولتاژ مدار باز آرایه فتوولتائیک برای یک سال در منطقه یزد

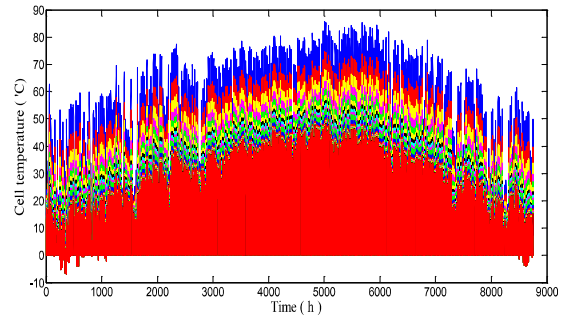


شکل ۷- ب) تاثیر سرعت باد بر ولتاژ مدار باز آرایه فتوولتائیک برای یک روز خاص در منطقه یزد

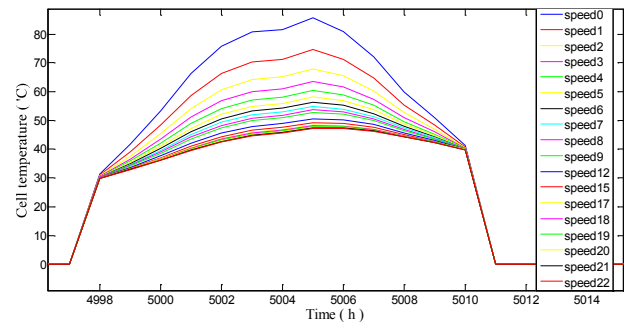
شکل ۸) تاثیر سرعت باد بر بازده پنل فتوولتائیک را نشان می دهد. از شکل مشخص است که با افزایش سرعت باد، بازده پنل و در نتیجه بازده نیروگاه افزایش می یابد. نمودار زرد رنگ (بالترین نمودار)، مربوط به سرعت باد ۲۲ متر بر ثانیه است و نمودار سبز رنگ (پایین ترین نمودار)، مربوط به سرعت باد صفر است.



سرعت باد صفر باشد، (منحنی آبی رنگ)، سلول بیش ترین دما را داراست. با افزایش سرعت باد از دمای سلول کاسته شده و در سرعت ۲۲ متر بر ثانیه (منحنی قرمز رنگ آخر)، سلول کمترین دما را دارا است.

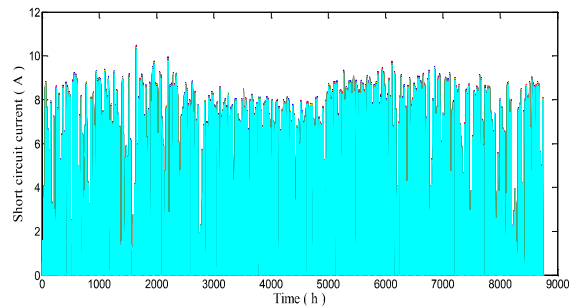


شکل ۵- الف) تاثیر سرعت باد بر دمای سلول پنل فتوولتائیک در طول یک سال در منطقه یزد

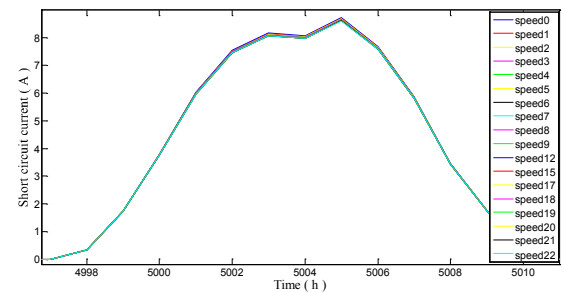


شکل ۵- ب) تاثیر سرعت باد بر دمای سلول پنل فتوولتائیک برای یک روز خاص در منطقه یزد

شکل ۶) تاثیر سرعت باد را بر جریان اتصال کوتاه پنل فتوولتائیک نشان می دهد. همانطور که از شکل مشخص است، تاثیر سرعت باد و در نتیجه دما بر روی جریان اتصال کوتاه بسیار ناچیز است.

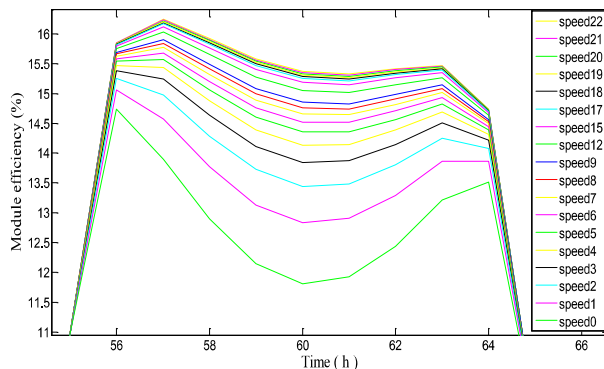


شکل ۶- الف) تاثیر سرعت باد بر جریان اتصال کوتاه پنل فتوولتائیک برای یک سال در منطقه یزد



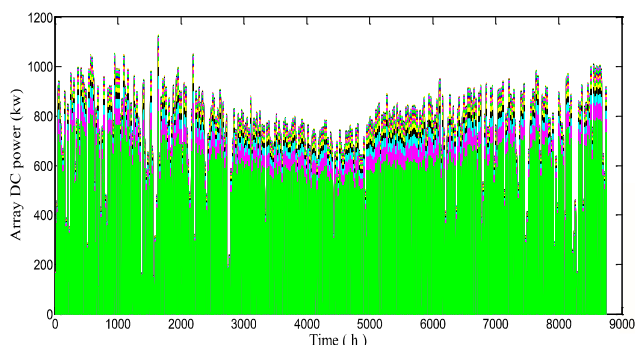


شکل ۸- الف) تاثیر سرعت باد بر بازده پنل فتوولتائیک برای یک سال در منطقه یزد

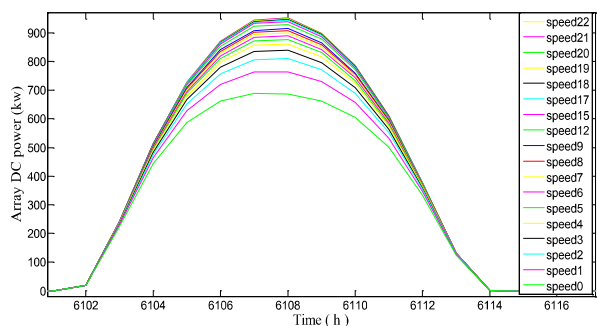


شکل ۸- ب) تاثیر سرعت باد بر بازده پنل فتوولتائیک برای یک روز خاص در منطقه یزد

شکل (۹) تاثیر سرعت باد را بر توان dc خروجی یک آرایه فتوولتائیک را نشان می دهد. نمودار سبز رنگ (پایین ترین نمودار) توان خروجی آرایه فتوولتائیک را در سرعت باد صفر و نمودار زرد رنگ (بالا ترین نمودار)، توان خروجی یک آرایه را در سرعت باد ۲۲ متر بر ثانیه نشان می دهد.



شکل ۹- الف) تاثیر سرعت باد بر توان dc خروجی یک آرایه فتوولتائیک برای یک سال در منطقه یزد



شکل ۹- ب) تاثیر سرعت باد بر توان dc خروجی یک آرایه فتوولتائیک برای یک روز خاص در منطقه یزد

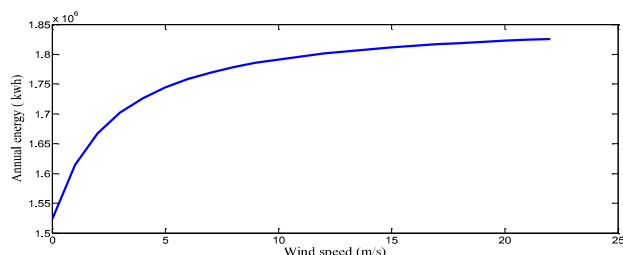
همانطور که در شکل (۹) پیداست، با افزایش سرعت باد توان خروجی آرایه فتوولتائیک افزایش می یابد ولی این افزایش توان به صورت خطی نیست. در سرعت های اولیه افزایش توان به ازای هر یک متربرثانیه افزایش سرعت باد، افزایش چشم گیری خواهد داشت ولی به مرور که سرعت باد افزایش می یابد و به حدود ۷ متربرثانیه می رسد افزایش توان به ازای افزایش سرعت باد زیاد

نخواهد بود. از سرعت باد ۱۷ تا ۲۲ متر بر ثانیه افزایش توان بسیار ناچیز خواهد بود.

جدول (۴)، انرژی سالانه خروجی نیروگاه و ضریب ظرفیت نیروگاه را برای سال اول بهره برداری از نیروگاه، در سرعت باد های مختلف نشان می دهد. شکل (۱۰) نشان می دهد که تأثیر باد با سرعت بیشتر از ۱۷ متر بر ثانیه بر توان انتقالی مزرعه فتوولتائیک به شبکه قابل ملاحظه نیست.

جدول ۴ بهره برداری از نیروگاه و ضریب ظرفیت آن برای سال اول

Capacity factor (%) (year 1)	Annual energy (kwh) (year 1)	Wind speed (m/s)	Capacity factor (%) (year 1)	Annual energy (kwh) (year 1)	Wind speed (m/s)
۲۰/۴	۱۷۸۵۵۴۹	۹	۱۷/۴	۱۵۲۴۳۵۶	۰
۲۰/۶	۱۸۰۱۳۰۸	۱۲	۱۸/۵	۱۶۱۴۱۹۹	۱
۲۰/۷	۱۸۱۱۶۰۶	۱۵	۱۹/۱	۱۶۶۷۴۷۴	۲
۲۰/۸	۱۸۱۶۶۸۸	۱۷	۱۹/۵	۱۷۰۲۲۸۱	۳
۲۰/۸	۱۸۱۸۸۵۳	۱۸	۱۹/۷	۱۷۲۶۷۱۸	۴
۲۰/۸	۱۸۲۰۸۱۴	۱۹	۱۹/۹	۱۷۴۴۷۰۱	۵
۲۰/۸	۱۸۲۲۵۹۳	۲۰	۲۰/۱	۱۷۵۸۴۸۹	۶
۲۰/۹	۱۸۲۴۲۱۹	۲۱	۲۰/۲	۱۷۶۹۴۱۱	۷
۲۰/۹	۱۸۲۵۷۱۰	۲۲	۲۰/۳	۱۷۷۸۲۵۲	۸



شکل ۱۰ نمودار تغییرات انرژی سالانه بر حسب سرعت باد

#### ۴- نتیجه گیری

عوامل متعددی بر بازده مزارع فتوولتائیک تاثیر گزارند. از جمله این عوامل می توان به میزان تشعشع، رطوبت هوا، دمای محیط، سرعت باد، ارتفاع از سطح دریا، موقعیت جغرافیایی و ... اشاره نمود. در این مقاله با استفاده از نرم افزارهای System Advisor Model، Matlab و Meteonorm، یک نیروگاه یک مگاوات با در نظر گرفتن عوامل تاثیر گذار بر عمل کرد آن نظیر ارتفاع از سطح دریا، چگالی هوا، تشعشع، دمای هوا، سرعت باد و ... در منطقه یزد طراحی شد و تاثیر سرعت باد بر عملکرد مزرعه فتوولتائیک بررسی شد. نتایج نشان می دهند که با افزایش سرعت باد، توان خروجی مزرعه به صورت غیر خطی افزایش می یابد. توان خروجی، در سرعت های ابتدایی با بالا رفتن سرعت باد، افزایش چشم گیری داشته ولی در سرعت های میانی که حدود ۷ متر بر ثانیه

است، با افزایش سرعت باد، توان خروجی به مقدار کمی افزایش می یابد. در سرعت های بین ۱۷ تا ۲۲ متر برثانیه افزایش توان خروجی بسیار ناچیز است. موارد بیان شده برای کاهش دمای سلول نیز، صادق است. یعنی افزایش سرعت باد از ۱۷ متر بر ثانیه به بعد تاثیر چندانی بر کاهش دمای سلول نخواهد گذاشت.

## ۵- مراجع

- [1] M. Green, "Third generation photovoltaics: Ultra-high conversion efficiency at low cost," *Prog. Photovoltaics Res.*, 2001.
- [2] P. Landsberg and V. Badescu, "Carnot factor in solar cell efficiencies," *Phys. D Appl. Phys.*, 2000.
- [3] E. Skoplaki and J. Palyvos, "Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations," *Renew. energy*, 2009.
- [4] E. Skoplaki and J. A. Palyvos, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations," *Sol. Energy*, vol. 83, no. 5, pp. 614-624, ۲۰۰۹.
- [5] S. Kurtz, J. Wohlgemuth, P. Hacke, and N. Bosco, "The Challenge to Move from 'One Size Fits All' to PV Modules the Customer Needs," *۲۶۰۰ ۰۰۰. ۰۰۰۰۰۰۰۰۰. ۰۰۰.*, ۲۰۱۱.
- [6] A. Shukla, K. Kant, A. Sharma, and P. H. Biwole, "Cooling methodologies of photovoltaic module for enhancing electrical efficiency: A review," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 160, pp. 275-۲۸۶, ۲۰۱۷.
- [7] S. Jakhar, M. S. Soni, and N. Gakkhar, "Historical and recent development of concentrating photovoltaic cooling technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 41-59, 2016.
- [8] S. Chatterjee, *Building Applied Photovoltaic Arrays: Side-by-Side Array Comparison With and Without Fan Cooling*, 2011.
- [9] B. Lee, J. Liu, B. Sun, and C. Shen, "Thermally conductive and electrically insulating EVA composite encapsulants for solar photovoltaic (PV) cell," *EXPRESS Polym.*, 2008.

