

مدل سازی عملکرد حرارتی و الکتریکی سلول خورشیدی در حضور متمرکزکننده و بدون آن، تحت شرایط مختلف محیطی

زهرا اشرفی پیمان^۱ حسن غفوری فرد^۲ حمیدرضا حبیبیان^۳ امید شکوفا^۴ امیر جعفرقلی^۵

۱- کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

۳- استادیار- دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

habibiyan@aut.ac.ir

۴- استادیار- پژوهشکده سامانه‌های ماهواره- پژوهشگاه فضایی ایران- تهران- ایران

۵- استادیار- دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

چکیده: مدل سازی و شبیه سازی، نقش بسیار مهمی در طراحی، توسعه و پیش بینی عملکرد سیستم های فتوولتائیک دارد. هدف این مقاله، توسعه یک رهیافت جدید برای شبیه سازی عملکرد الکتریکی و حرارتی سلول خورشیدی در شرایط مختلف محیطی است. مدل سازی حرارت و دما در یک سلول خورشیدی سیلیکونی تجاری، با محاسبه تلفات گرمایی و با روش انتقال حرارت انجام شده است. همچنین اثرات شرایط محیطی مانند تغییرات شدت تابش نور خورشید به دلیل استفاده از متمرکزکننده، دمای محیط و سرعت باد بر توزیع دما و عملکرد الکتریکی سلول خورشیدی، بررسی شده است. افزایش شدت تابش نور خورشید با استفاده از متمرکزکننده نسبت به حالت بدون تمرکز در سلول خورشیدی، موجب افزایش توان خروجی خواهد شد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که در شرایط آزمایشی استاندارد (STC)، میزان توان خروجی سلول خورشیدی مدل شده بدون متمرکزکننده برابر 14.3 mW/cm^2 است، در حالی که میزان توان خروجی همان سلول در حضور سیستم متمرکزکننده با نسبت تمرکز دو، به مقدار 25.7 mW/cm^2 خواهد رسید. از طرفی با افزایش دما، میزان بازدهی و توان خروجی سلول خورشیدی مدل شده در هر دو حالت استفاده از متمرکزکننده و بدون آن، به اندازه $0.5\% - 0.4\%$ کاهش می یابد. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده، با افزایش سرعت باد اختلاف دمای سلول خورشیدی و محیط کم می شود.

واژه های کلیدی: عملکرد الکتریکی سلول خورشیدی، توزیع دمای سلول خورشیدی، مدل سازی انتقال حرارت، شبیه سازی.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.2.129

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۲

نام نویسنده ی مسئول: حمیدرضا حبیبیان

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران- تهران- میدان ولیعصر- خیابان حافظ- پلاک ۳۵۰- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک

۱- مقدمه

شرایط آزمایشی استاندارد (Standard Test Condition: STC) یعنی در دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد، تحت تابش نور خورشید 1000 W/m^2 و سرعت باد 1 m/s ، دمای یک سلول خورشیدی سیلیکونی به طور تجربی و نظری به حدود ۵۴ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. لازم به ذکر است که برای اعتبارسنجی بخشی از نتایج شبیه‌سازی خود از این مرجع استفاده کرده‌ایم.

مطالعات نشان می‌دهند که تاثیر دما بر روی بازده سلول خورشیدی به نوع آن بستگی دارد [۹]، به عنوان مثال میزان کاهش بازدهی و توان خروجی، برای سلول خورشیدی کریستالی (مانند سیلیکون و گالیوم‌آرسناید)، لایه نازک و چندپوندی به ترتیب برابر با ۰/۶۵٪، ۰/۴٪ و ۰/۲۴۸٪ به ازای افزایش یک درجه سانتی‌گراد دما است. طبق مرجع [۸] میزان کاهش توان خروجی سلول خورشیدی کریستالی ۰/۴-۰/۵٪ به ازای هر درجه سانتی‌گراد افزایش دما، گزارش شده است.

مقالات به چاپ رسیده قبلی مانند مراجع [۷،۶] و [۱۱،۱۰] با استفاده از مدار معادل سلول خورشیدی، به ارزیابی مشخصه‌های الکتریکی سلول خورشیدی پرداخته‌اند. از معایب این مدل‌سازی آن است که تنها اگر مشخصات اولیه پنل فتوولتائیک مانند جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدارباز، جریان و ولتاژ در توان بیشینه، شدت تابش نور خورشید و دمای کاری سلول، توسط سازندگان پنل مشخص باشد، می‌توانیم عملکرد الکتریکی آن را بررسی کنیم. به‌عنوان مثال در مرجع [۱۲] با استفاده از مدل تک‌دیود مدار معادل سلول خورشیدی، با وارد کردن مشخصات اولیه پنل فتوولتائیک در ورودی برنامه MATLAB، به شبیه‌سازی عملکرد پنل خورشیدی سیلیکونی پرداخته شده است. در مقاله مذکور درصد خطای توان خروجی بدست آمده از شبیه‌سازی و مقادیر تجربی بین ۴ الی ۱۰ درصد بیان شده، که علت اصلی این میزان خطا بین مقادیر شبیه‌سازی و مقادیر تجربی، دما است. هر چه میزان دما بیشتر شود، درصد خطا نیز بیشتر خواهد شد. به همین دلیل، هدف اصلی در مقاله حاضر، شبیه‌سازی دمای کاری سلول و توسعه رهیافتی جدید برای شبیه‌سازی عملکرد حرارتی و الکتریکی سلول خورشیدی در شرایط مختلف است. به این صورت که ابتدا با محاسبه تلفات گرمایی سلول و روش‌های انتقال حرارت، به شبیه‌سازی دمای کاری سلول خورشیدی سیلیکونی تجاری می‌پردازیم و سپس عملکرد الکتریکی آن را بدست می‌آوریم. راه حل ارائه شده در این مقاله، ما را از دانستن مشخصات اولیه پنل فتوولتائیک، به خصوص دمای کاری سلول بی‌نیاز می‌کند.

در این پژوهش، تمامی طراحی و شبیه‌سازی سلول خورشیدی و تولید گراف‌های متعدد حرارتی و الکتریکی با استفاده از بسته نرم‌افزاری COMSOL، با روش المان محدود^۱ (FEM) و با استفاده از ماژول‌های انتقال حرارت و نیمه‌هادی موجود در نرم‌افزار COMSOL صورت گرفته است.

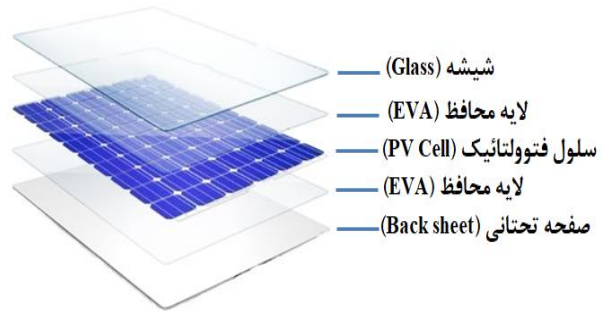
امروزه با توجه به رشد روز افزون مصرف انرژی در جهان، انرژی‌های تجدیدپذیر و به خصوص انرژی خورشید و سیستم‌های خورشیدی مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. فناوری فتوولتائیک^۱ روش مستقیم تبدیل انرژی خورشیدی به برق است [۱-۴] که از جمله مهمترین پارامترهای موثر بر نحوه عملکرد الکتریکی سلول‌های فتوولتائیک، تغییرات دما و شدت تابش می‌باشد. برای مثال تغییرات آب و هوا در طول سال و همچنین ساعات مختلف شبانه‌روز باعث تغییر در دما و شدت تابش می‌شود. همچنین در سلول‌های خورشیدی، متمرکزکننده^۲ متمرکزکننده^۲ موجب افزایش شدت نور ورودی و دمای کاری سلول می‌شود. بنابراین شبیه‌سازی و مدل‌سازی عملکرد الکتریکی و حرارتی سلول خورشیدی تحت شرایط مختلف محیطی از جمله دما، شدت تابش با استفاده از متمرکزکننده و میزان سرعت باد محیط برای طراحی، بررسی و پیش‌بینی عملکرد الکتریکی سیستم‌های فتوولتائیک مورد نیاز است.

استفاده از متمرکزکننده در سلول خورشیدی باعث افزایش شدت نور ورودی شده و نتیجه آن افزایش توان خروجی و کارایی سیستم می‌شود. در بین سیستم‌های متمرکزکننده، سیستم‌های تمرکز پایین به دلیل استفاده از سلول‌های خورشیدی سیلیکونی (به علت طول عمر بالاتر و بازده بیشتر، بخش عمده بازار فتوولتائیک جهان را در دست دارند) و عدم نیاز به سیستم‌های خنک‌کننده پیچیده، اهمیت زیادی دارند. برای سیستم‌هایی با نسبت تمرکز^۳ (CR) کمتر از ۲/۵ می‌توان از سیستم‌های تمرکز ثابت و بدون ردیاب خورشیدی استفاده نمود. نسبت تمرکز، نسبت شدت نور تابشی به سلول در حضور متمرکزکننده به حالت استاندارد است که متمرکزکننده وجود ندارد. سیستم‌های با تمرکز پایین (نسبت تمرکز ۲) مانند سیستم‌های متمرکزکننده خطی و شکل و سهموی مرکب، گزینه مناسبی برای کاهش قیمت انرژی برق فتوولتائیک و افزایش بازدهی و توان خروجی می‌باشند. قیمت این سیستم‌ها به دلیل سادگی طراحی و ساخت، پایین است [۵].

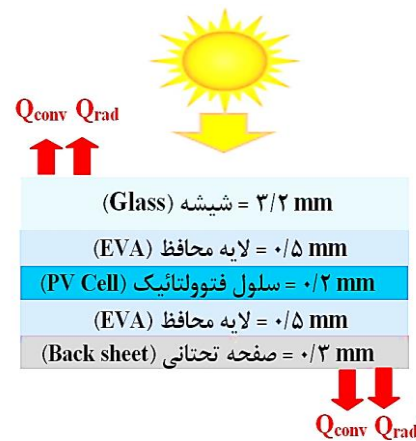
مرجع [۶] نشان داده است که تغییرات شدت تابش در دمای ثابت، رابطه مستقیمی با جریان اتصال کوتاه سلول خورشیدی دارد. در واقع افزایش شدت تابش موجب افزایش جریان اتصال کوتاه و افزایش توان خروجی پنل فتوولتائیک می‌شود. همچنین مطابق مرجع [۷] تغییرات دما در شدت تابش ثابت، رابطه معکوسی با ولتاژ مدارباز دارد. به عبارت دیگر افزایش دما موجب کاهش ولتاژ مدارباز و همچنین کاهش توان خروجی پنل فتوولتائیک می‌شود. از طرفی، هنگامی که پنل‌های خورشیدی در محیط با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و تحت نور خورشید استاندارد 1000 W/m^2 الکتریسیته تولید می‌کنند، دمای سلول در حین کار به علت تلفات گرمایی، ثابت و برابر با ۲۵ درجه سانتی‌گراد نمانده و تغییر می‌کند. مقالات اخیر این تغییر را برای سلول خورشیدی سیلیکونی تجاری نشان داده‌اند. مطابق مرجع [۸] در

۲- مدل محاسباتی سلول خورشیدی

پنل خورشیدی از اجزای مختلفی مانند شیشه (Glass)، لایه محافظ (EVA)، سلول فتوولتائیک (PV) و صفحه تحتانی (Back sheet) تشکیل شده است که EVA یک لایه پلیمر بسیار شفاف و مخفف "اتیلن وینیل استات"^۵ است. صفحه تحتانی نیز به طور معمول، از جنس پلیمر یا شیشه است.



(الف)



(ب)

شکل (۱): (الف) طرح سه بعدی و (ب) طرح دو بعدی اجزای مختلف المان خورشیدی مدل شده به همراه ضخامت لایه‌ها

در این مقاله، عملکرد حرارتی و الکتریکی ساختار شکل (۱) مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. مشخصات اجزای مختلف ساختار و مواد استفاده شده در مدل سازی مطابق مرجع [۸] بوده و در جدول (۱) آورده شده است که این مشخصات در نرم افزار کامسول به راحتی قابل تعریف هستند. همانطور که قبلاً گفته شد برای اعتبارسنجی بخشی از نتایج شبیه سازی خود از این مرجع استفاده کرده ایم. لازم به ذکر است که مشخصات این ساختار مدل شده مشابه پنل‌های سیلیکونی تجاری داخل کشور است.

جدول (۱): مشخصات اجزای مختلف پنل خورشیدی [۸]

مشخصات مواد	واحد	شیشه	لایه محافظ EVA	صفحه تحتانی	سیلیکون
ضخامت	mm	۳/۲	۰/۵	۰/۳	۰/۲
چگالی	kg/m ³	۲۲۰۰	۹۳۵	۱۲۰۰	۲۳۲۹/۱
ضریب هدایت حرارتی	W/(m×K)	۱/۰۴	۰/۲۸	۰/۱۴	۱۶۳
مقاومت حرارتی	m ² ×K/W	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۳	*
ظرفیت حرارتی در فشار ثابت	J/(kg×K)	۷۵۰	۲۵۰۰	۱۲۵۰	۷۰۳
هدایت الکتریکی	S/m	۱e-۴	*	*	۱e-۱۲
گذردهی نسبی	-	۴/۲	*	*	۱۱/۷
ضریب شکست	-	۱/۵	*	*	۳/۴۵
گسیلندگی	-	*	*	*	۰/۸۴

مواردی که با علامت * در جدول (۱) مشخص شده‌اند، در شبیه سازی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

۲-۱- نرخ تولید - باز ترکیب و مشخصه های الکتریکی در سلول خورشیدی

نرخ تولید حامل‌ها $G(z)$ توسط نور در نیمه رسانای سلول خورشیدی، توسط معادله (۱) بدست می‌آید [۱]:

$$G(z) = \eta_0 \frac{R \lambda}{hc} \alpha e^{-\alpha z} \quad (1)$$

که در آن، η_0 بازده کوانتومی داخلی، R میزان انعکاس، λ طول موج، h ثابت پلانک، c سرعت نور، α ضریب جذب نیمه رسانا و z فاصله نسبی از سطح سلول است.

باز ترکیب، به معنای ترکیب و نابودی یک زوج حامل الکترون-حفره است، زمانی که الکترون از نوار هدایت به نوار ظرفیت باز می‌گردد. این واکنش با آزادسازی انرژی همراه است. انرژی اغلب به صورت گرما یا در صورت باز ترکیب مستقیم، به صورت یک فوتون آزاد می‌شود. باز ترکیب شکلی-رید-هال^۶ در مواد با شکاف باند غیرمستقیم، مانند سیلیکون، بسیار اهمیت دارد. معمولاً انرژی آزاد شده در چنین باز ترکیبی به صورت گرما تلف می‌شود. نرخ این باز ترکیب R_{SRH} در نیمه رسانا طبق معادله (۲) بیان می‌شود [۱۳]:

$$R_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p [n + n_i \exp(\frac{E_t - E_i}{kT})] + \tau_n [p + n_i \exp(-\frac{E_t - E_i}{kT})]} \quad (2)$$

که n و p غلظت ناخالصی‌ها، n_i غلظت ذاتی، τ_p و τ_n به ترتیب طول عمر الکترون‌ها و حفره‌ها هستند. همچنین E_t سطح انرژی تله، E_i سطح فرمی انرژی ذاتی، T دمای شبکه و k ثابت بولتزمن است. از طرفی، رابطه باز ترکیب اوزه^۷ برای یک نیمه رسانا به صورت معادله (۳) است [۱۳]:

$$Q_{conv} = hA(T_s - T_a) \quad (9)$$

که در آن A مساحت سطح فتوولتائیک، h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، T_s دمای سلول فتوولتائیک و T_a دمای محیط است [۸] و [۱۵]. انتقال حرارت به روش تابشی و همرفت در شکل (ب) روی مرز بالا و پایین پیکربندی پنل خورشیدی نشان داده شده است.

همواره مقداری از انرژی نور خورشید در سلول خورشیدی به صورت گرما تلف می‌شود. تلفات گرمایی (Q_{At})، در اثر بازترکیب حامل‌های بار و نیز در اثر تلفات اهمی (تلفات ژولی) در هنگام انتقال جریان در قطعه است [۱۶]. اگر انرژی فوتون کمتر از شکاف‌باند نیمه‌رسانا باشد، انرژی برخی از فوتون‌ها به الکترون‌های نوار ظرفیت یا هدایت ماده منتقل می‌شود که باعث افزایش انرژی این الکترون‌ها شده و به خودی خود در گرم شدن قطعه تاثیرگذار خواهد بود. افزایش انرژی الکترون‌های ماده نیمه‌رسانا، می‌تواند بازترکیب اوزه را نیز در قطعه بیشتر کند. علاوه بر این، اگر انرژی فوتون‌ها بیشتر از شکاف‌باند نیمه‌رسانا باشد، باعث انتقال الکترون به نوار هدایت می‌شود و مازاد انرژی این فوتون‌های پرنرژی باعث افزایش انرژی جنبشی الکترون‌های نوار هدایت شده و در نتیجه باعث گرم شدن قطعه می‌شود. به این ترتیب، مقادیر تلفات ژولی (تلفات اهمی) در پیوند p-n نیمه‌رسانا، برابر با حاصل ضرب میدان‌الکتریکی E و چگالی جریان‌الکتریکی J در قطعه است، که با استفاده از رابطه (۱۰) قابل بیان است:

$$Q = JE \quad (10)$$

بنابراین، تلفات گرمایی (Q_{At}) درون سلول خورشیدی با مجموع گرمایی ناشی از بازترکیب اوزه، بازترکیب شاکلی-رید-هال و گرمایی ژولی برابر است. در واقع (Q_{At}) نشان‌دهنده افزایش دمای پنل، به دلیل جذب نور خورشید است. در این مقاله با استفاده از افزایش دمای پنل به علت تلفات گرمایی و انتقال حرارت از طریق همرفت و تابشی به بررسی توزیع دمایی پنل و سلول خورشیدی پرداخته‌ایم. در این راستا چندین فرض ساده ذیل را در مورد شرایط جوی، پنل و سایر عامل‌ها که بر روی بررسی مدل حرارتی تاثیر دارد، در نظر گرفته‌ایم [۱۷، ۸].

(۱) بخشی از تابش خورشید که توسط سلول جذب می‌شود ولی برای تولید الکتریسیته استفاده نمی‌شود، به گرما تبدیل خواهد شد.

(۲) گرد و غبار یا عامل دیگری بر روی جذب نور توسط سلول تاثیر ندارد. همچنین دمای محیط اطراف پنل یکنواخت است.

(۳) از آنجا که فاصله بین سلول‌ها (حدود ۲ میلی متر) بسیار کمتر از مساحت سطح پنل است، بنابراین شکاف و فاصله بین سلول‌ها در پنل ناچیز است پس پنل به عنوان یک پیکربندی متشکل از پنج لایه یکنواخت در نظر گرفته می‌شود.

(۴) فقط مرز بالا و پایین نشان داده شده در شکل (ب) با محیط دارای انتقال حرارت Q_{rad} و Q_{conv} است و شرایط حرارتی در مرز اطراف ضخامت پنل به دلیل کوچک بودن ضخامت کل پنل نسبت به سطح پنل، ناچیز است.

$$R_{Au} = (nC_n + pC_p)(np - n_i^2) \quad (3)$$

که C_p و C_n ضرایب بازترکیب اوزه در نیمه‌رسانا هستند.

در محاسبات مدل الکتریکی مربوط به سلول خورشیدی علاوه بر معادلات مربوط به جریان، معادلات پیوستگی بار و معادله پواسون نیز بسیار حائز اهمیت هستند [۱۴]. پس از محاسبات معادلات حاکم بر نیمه‌رسانا، مهمترین مشخصه الکتریکی سلول خورشیدی یعنی بازده و توان بیشینه را به فرمی که در ادامه شرح داده می‌شود می‌توان استخراج کرد. بازده سلول خورشیدی با پارامتر η نشان داده می‌شود که نسبتی از نور تابشی است که به الکتریسیته تبدیل می‌شود. در واقع، بازده یک سلول خورشیدی به صورت نسبت توان بیشینه خروجی به توان ورودی است که از رابطه (۴) بدست می‌آید [۱۴]:

$$\eta = \frac{P_{mp}}{P_{in}} = \frac{I_{mp} V_{mp}}{P_{in}} = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \quad (4)$$

در این رابطه پارامتر P_{in} چگالی توان تابشی نور ورودی، P_{mp} چگالی توان بیشینه خروجی که با حاصل ضرب V_{mp} در I_{mp} برابر است، که I_{mp} و V_{mp} به ترتیب جریان سلول و ولتاژ سلول در توان بیشینه هستند. همچنین V_{oc} و I_{sc} به ترتیب ولتاژ مدارباز و جریان اتصال کوتاه سلول می‌باشند. ضریب پرشدگی نیز با نماد FF مشخص است.

۲-۲- مدل حرارتی

هدف از مدل‌سازی حرارتی، محاسبه توزیع دما در پنل خورشیدی است. سلول خورشیدی با جذب فوتون‌های نور خورشید، انرژی الکتریسیته را ضمن ایجاد انرژی گرمایی (Q_t)، تولید می‌کند. انرژی گرمایی جذب شده توسط پنل‌های خورشیدی را می‌توان با رابطه (۵) نشان داد [۸]:

$$Q_t = (1 - \eta_{pv}) Q_{sun} A_{pv} T \% \quad (5)$$

که در آن Q_t محصول انرژی تابشی خورشید روی سطح پنل (Q_{sun})، بازدهی سلول خورشیدی (η_{pv})، سطح پنل (A_{pv}) و کسری از نور رسیده به سطح پنل ($T\%$) است. $Q_{sun} A_{pv} T\%$ مقداری از تابش خورشید است که کاملاً توسط سلول جذب می‌شود. η_{pv} تابعی از بازدهی در شرایط مرجع (η_{ref})، دمای سطح پنل (T_{pv}) و ضریب حرارتی پنل (β_{ref}) است که توسط رابطه (۶) تعریف شده است:

$$\eta_{pv} = \eta_{ref} [1 - \beta_{ref} (T_{pv} - T_{ref})] \quad (6)$$

از طرف دیگر، انرژی گرمایی پنل فتوولتائیک (Q_t) را می‌توان به صورت رابطه (۷) نوشت [۸]:

$$Q_t = Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{\Delta T} \quad (7)$$

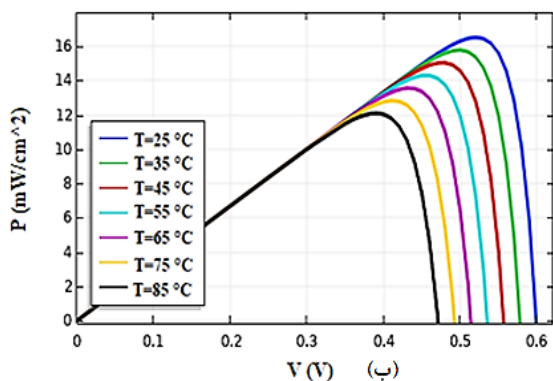
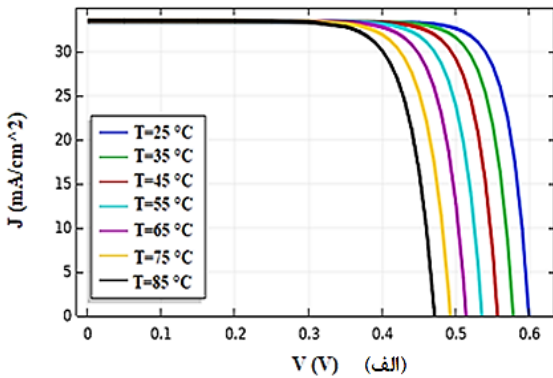
گرما از طریق تابش طول‌موج‌های بلند از ماژول خارج می‌شود. بنابراین انتقال حرارت به روش تابشی^۱ (Q_{rad}) از رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4) A \quad (8)$$

که در آن، ε گسیلندگی^۱ سطح سلول، σ ثابت بولتزمن، T_s دمای مطلق سلول، T_a دمای مطلق محیط و A مساحت سطح فتوولتائیک است. همچنین انتقال حرارت به روش جابه‌جایی یا همرفت^۱ (Q_{conv}) با رابطه (۹) بیان می‌شود:

۳-۱- عملکرد الکتریکی سلول خورشیدی در دماهای گوناگون

شکل (۴) منحنی های جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ سلول خورشیدی سیلیکونی را در شدت نور ثابت 1000 W/m^2 با دماهای متفاوت نشان می دهد.



شکل (۴): منحنی های (الف) جریان-ولتاژ و (ب) توان-ولتاژ سلول خورشیدی در شدت نور ثابت $G=1000 \text{ W/m}^2$ با دماهای متفاوت

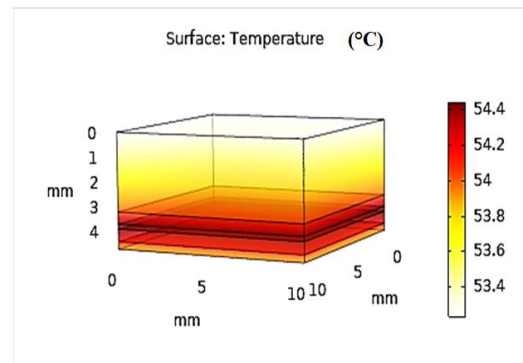
مطابق شکل (۴ الف)، با افزایش دما مقدار ولتاژ مدار باز کاهش می یابد. در واقع همان طور که در شکل مشاهده می شود، تغییرات دما بیشترین تاثیر را بر ولتاژ مدار باز دارد، در حالی که میزان جریان اتصال کوتاه، تغییر چندانی نداشته است (البته با بررسی داده های بدست آمده جهت رسم نمودار متوجه می شویم که با افزایش دما، جریان به میزان بسیار ناچیزی افزایش می یابد). بنابراین در شدت نور ثابت، تغییرات دما رابطه معکوس با ولتاژ مدار باز داشته و در نتیجه، مطابق شکل (۴ ب) افزایش دما موجب کاهش توان خروجی سلول خورشیدی می شود.

در شدت نور ثابت $G=1000 \text{ W/m}^2$ ، میزان بازدهی (برحسب /) و توان خروجی (برحسب mW/cm^2) با هم برابر است. شکل (۵) کاهش بازدهی و توان خروجی سلول خورشیدی سیلیکونی مدل شده را با افزایش دما در شدت نور ثابت $G=1000 \text{ W/m}^2$ نشان می دهد.

در این پژوهش، مدل سازی حرارت و دما در یک سلول خورشیدی سیلیکونی تجاری با ساختار شکل (۱) و با استفاده از محاسبه تلفات گرمایی مطرح شده و در ماژول انتقال حرارت نرم افزار کامسول انجام شده است. انتقال حرارت بین پنل خورشیدی و محیط به روش همرفت و تابشی است و گرما در داخل پنل و ساختار آن توسط رسانش منتقل می شود.

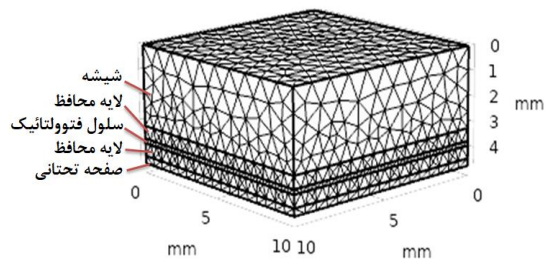
۳-۲- شبیه سازی دما و حرارت در سلول خورشیدی

ابتدا یک سلول خورشیدی سیلیکونی بدون استفاده از متمرکزکننده، با مشخصات جدول (۱) و با ابعاد سلول $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ را در شرایط آزمایشی استاندارد^{۱۳} (STC) یعنی در دمای محیط 25°C درجه سانتی گراد، تحت نور خورشید 1000 W/m^2 و سرعت باد 1 m/s ، مورد بررسی قرار می دهیم. با استفاده از روش های انتقال حرارت و تلفات بدست آمده در سلول خورشیدی، می توانیم دمای سلول خورشیدی را شبیه سازی کنیم. شکل (۲) پروفایل توزیع دمایی سلول خورشیدی را در شرایط STC نشان می دهد.



شکل (۲): پروفایل توزیع دمایی سلول خورشیدی در شرایط STC

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می شود، دمای سلول نسبت به دمای محیط، به دلیل تلفات گرمایی افزایش یافته و به دمای $54/4^\circ\text{C}$ درجه سانتی گراد می رسد. در این شبیه سازی نحوه مش بندی المان مورد نظر به صورت شکل (۳) است که اندازه مش ها در نرم افزار در اندازه خوب و متوسط به خوبی قابل تعریف است. همانطور که در بخش قبل بیان شد مرز بالا و پایین المان با محیط دارای انتقال حرارت Q_{rad} و Q_{conv} است و شرایط حرارتی در مرز اطراف ضخامت پنل به دلیل کوچک بودن ضخامت کل پنل نسبت به سطح پنل، ناچیز است.

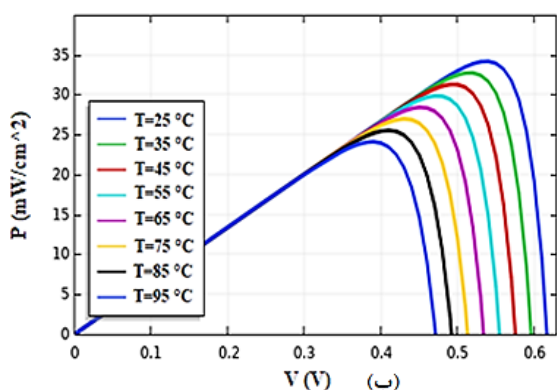
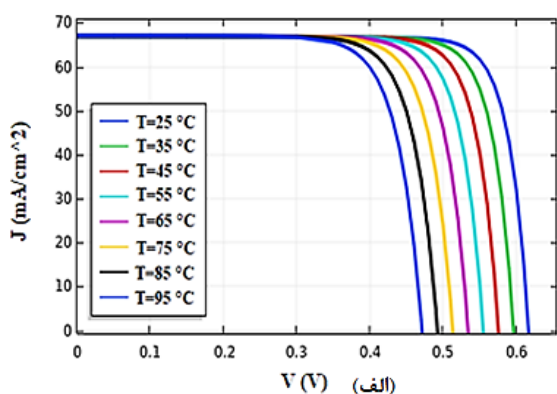


شکل (۳): نحوه مش بندی المان خورشیدی طراحی شده

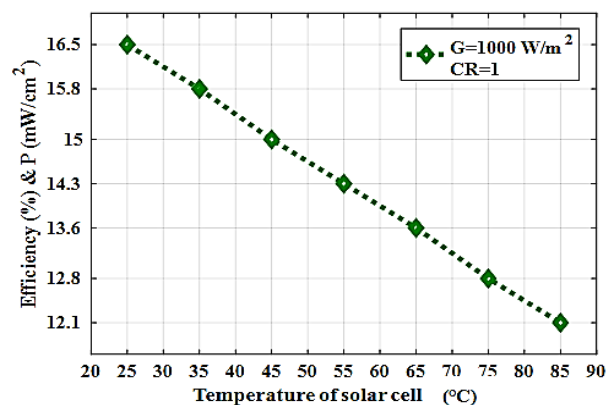
همانطور که در شکل (۶) دیده می‌شود، دمای سلول نسبت به محیط، به دلیل افزایش شدت نور توسط متمرکزکننده و تلفات گرمایی، افزایش یافته و به مقدار $82/7$ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. چون شدت تابش نور دو برابر شده، پس می‌توان انتظار داشت که تلفات گرمایی دو برابر حالت بدون متمرکزکننده باشد. نتایج نشان می‌دهد که دمای سلول خورشیدی تحت شدت نور تابشی ۲ برابر در شکل (۶)، بیشتر از حالت بدون تمرکز نور در شکل (۲) است.

۴-۱- عملکرد الکتریکی سلول خورشیدی تحت شدت نور تابشی ۲ برابر در دماهای گوناگون

شکل (۷) منحنی‌های جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ سلول خورشیدی سیلیکونی مدل شده را تحت شدت نور تابشی ۲ برابر با دماهای گوناگون نشان می‌دهد. مطابق این نمودارها افزایش دما موجب کاهش ولتاژ مدارباز و توان خروجی سلول خورشیدی تحت شدت نور تابشی ۲ برابر می‌شود.



شکل (۷): منحنی‌های (الف) جریان-ولتاژ و (ب) توان-ولتاژ سلول خورشیدی در شدت نور ثابت $G=2000 \text{ W/m}^2$ با دماهای گوناگون

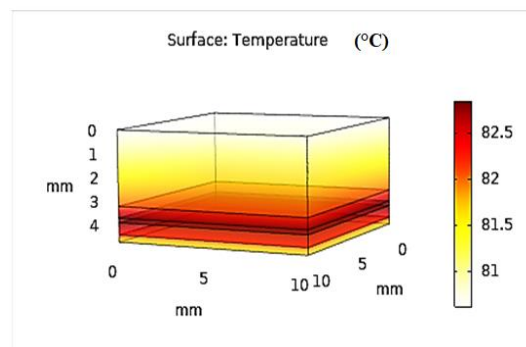


شکل (۵): نمودار بازدهی و توان خروجی سلول خورشیدی بر حسب دما در شدت نور ثابت $G=1000 \text{ W/m}^2$ ($CR=1$)

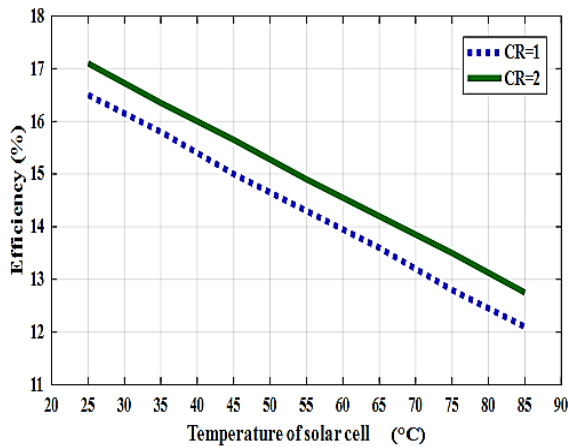
همانطور که مشاهده می‌شود زمانی که دمای سلول به $54/4$ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، میزان توان خروجی برابر $14/3 \text{ mW/cm}^2$ و بازدهی برابر $14/3$ درصد خواهد بود. همچنین به ازای افزایش یک درجه سانتی‌گراد دما، میزان کاهش بازدهی و توان خروجی سلول به اندازه $0/5\% - 0/4\%$ است.

۴-۲- شبیه‌سازی دما و حرارت در سلول خورشیدی تحت شدت نور تابشی ۲ برابر

در این بخش، سلول خورشیدی سیلیکونی را در حضور متمرکزکننده با نسبت تمرکز دو ($CR=2$) یا شدت نور تابشی (2000 W/m^2) در دمای محیط 25 درجه سانتی‌گراد و سرعت باد 1 m/s ، مورد بررسی قرار می‌دهیم. سیستم‌های متمرکزکننده خطی وی‌شکل و سهموی مرکب، گزینه مناسبی برای سیستم‌های تمرکز پایین (نسبت تمرکز ۲) می‌باشند. در ادامه مدل‌سازی، با فرض استفاده از اینگونه متمرکزکننده‌ها از طیف نور خورشید دو برابر شده روی سلول خورشیدی استفاده می‌شود. شکل (۶) پروفایل توزیع دمایی سلول خورشیدی در حضور متمرکزکننده با نسبت تمرکز ۲ در محیط با دمای 25 درجه سانتی‌گراد و سرعت باد 1 m/s را نشان می‌دهد.



شکل (۶): پروفایل توزیع دمایی سلول خورشیدی تحت شدت نور تابشی ۲ برابر



شکل (۹): مقایسه بازدهی بر حسب دمای سلول در حضور متمرکزکننده با نسبت تمرکز دو (CR=۲) و بدون حضور آن (CR=۱)

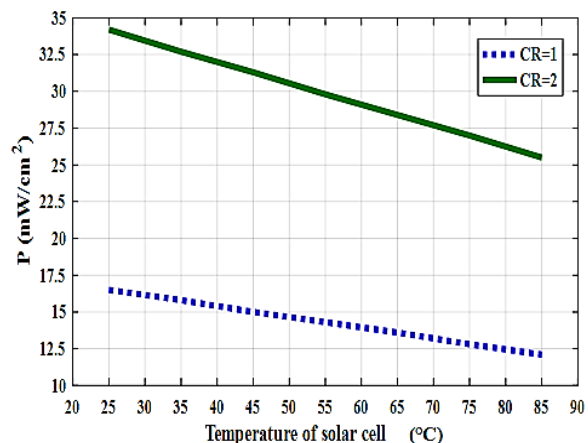
تفاوت بسیار اندک شیب دو منحنی در شکل (۸) به دلیل آن است که محاسبات مطرح شده در مدل حرارتی و الکتریکی در دماهای مختلف متفاوت است. همانطور که از نتایج مشخص است، افزایش شدت تابش از یک طرف باعث افزایش تعداد الکترون-حفره (جریان) و از طرف دیگر باعث افزایش دما می‌شود، اما در نسبت‌های تمرکز پایین (نسبت تمرکز ۲)، تاثیر شدت تابش بر افزایش تعداد الکترون-حفره و جریان خروجی نسبت به دما غالب است. لازم به ذکر است که اگر نسبت تمرکز نور بیشتر شود، آنگاه دما به شدت افزایش می‌یابد و تاثیر آن نسبت به افزایش تعداد الکترون-حفره غالب می‌شود و در نتیجه برای سیستم‌های تمرکز بالا حتماً از خنک‌کننده پنل خورشیدی استفاده می‌کنند تا با کاهش دما، توان و بازدهی سلول افزایش یابد. به بیان دیگر، از آنجا که بهترین معیار برای سنجش عملکرد سلول، توان خروجی است، پس سلول خورشیدی با متمرکزکننده دارای نسبت تمرکز پایین، بدون نیاز به داشتن سیستم خنک‌کننده پیچیده و ردیاب خورشیدی، نسبت به سلول خورشیدی بدون متمرکزکننده، توان خروجی بالا و کارایی بهتری دارد، حتی زمانی که دمای سلول با استفاده از متمرکزکننده نسبت به حالت بدون متمرکزکننده افزایش یافته است.

۵- تاثیر سرعت باد در عملکرد سلول خورشیدی

یکی از عوامل کاهش دما در سلول خورشیدی، افزایش سرعت باد در محیط می‌باشد. در واقع افزایش سرعت باد موجب انتقال حرارت بهتر از طریق جابه‌جایی (همرفت) خواهد شد. در ادامه، تاثیر سرعت باد بر عملکرد ساختار تجاری نشان داده شده در شکل (۱) بررسی شده است. سرعت باد در کلیه مناطق محیط باز در شرایط استاندارد (STC) و به صورت طبیعی، به اندازه ۱ متر بر ثانیه ذکر می‌شود که مطابق با شرایط آب و هوایی و جغرافیایی، سرعت باد می‌تواند بیشتر شود. برای مثال در تمامی مناطق جغرافیایی، سرعت باد به صورت نسیم ملایم و متوسط به میزان ۲-۸ متر بر ثانیه ذکر می‌شود و بادهای نیمه قوی و

۴-۲- مقایسه عملکرد الکتریکی سلول خورشیدی بر حسب دما در حضور متمرکزکننده و بدون آن

استفاده از متمرکزکننده نسبت به حالت بدون تمرکز در سلول خورشیدی، موجب افزایش بازدهی و توان خروجی خواهد شد. در واقع با فرض ثابت نگه‌داشتن دمای سلول، اگر نور خورشید با ضریب x متمرکز گردد، یعنی سلول خورشیدی را تحت تابش x برابر شدت تابش اولیه خورشید ($G=1000 \times W/m^2$) قرار دهیم، جریان اتصال کوتاه نیز x برابر می‌شود ($I_{sc2}=xI_{sc1}$). ولی این افزایش تاثیر بسیار زیادی بر بازده ($\eta=P_{mp}/P_{in}$) ندارد، چون توان خروجی P_{mp} و توان ورودی P_{in} هر دو به صورت خطی افزایش می‌یابند. برای مثال با فرض ثابت نگه‌داشتن دمای سلول، اگر نسبت تمرکز نور فرودی دو برابر باشد توان خروجی P_{mp} و توان ورودی P_{in} هر دو نسبت به حالت بدون تمرکز نور، تقریباً دو برابر شده است آنگاه می‌توان گفت که بازدهی در هر دو حالت متمرکزکننده و بدون تمرکز نور با هم برابر است در صورتی که توان خروجی در حالت متمرکزکننده بیشتر از حالت بدون تمرکز آن خواهد بود. پس بهترین معیار برای سنجش عملکرد سلول خورشیدی، توان خروجی ماکزیمم P_{mp} است. مقایسه توان خروجی و بازدهی در حضور متمرکزکننده CR=۲ (تحت نور تابشی $G=2000 W/m^2$) و CR=۱ (تحت نور تابشی $G=1000 W/m^2$) در شکل‌های (۸) و (۹) نمایش داده شده است. بر اساس منحنی‌های مشخصات سلول خورشیدی تحت شدت نور تابشی ۲ برابر در دماهای مختلف، نتیجه می‌گیریم زمانی که دمای سلول به $82/7$ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، توان خروجی برابر $25/7 mW/cm^2$ و بازدهی برابر با $12/8$ درصد خواهد بود. همچنین، کاهش میزان بازدهی و توان خروجی به اندازه $0/4-0/5\%$ به ازای هر درجه سانتی‌گراد افزایش دما است.

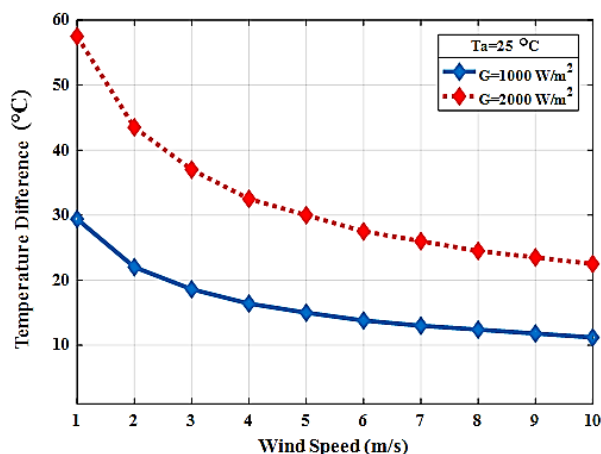


شکل (۸): مقایسه توان خروجی بر حسب دمای سلول در حضور متمرکزکننده با نسبت تمرکز دو (CR=۲) و بدون حضور آن (CR=۱)

مراجع

- [1] سبحان عباسیان، رضا صباغی ندوشن، "طراحی سلول خورشیدی دو پیوندی GaAs/InGaP بدون لایه ARC با بازده بالا"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره شانزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۸.
- [2] مهندس عباس خان احمدی، دکتر رضا غفاریپور، "طراحی بهینه و پیاده سازی عملی سیستم های انرژی تجدید پذیر ترکیبی در مناطق دور افتاده: مطالعه موردی"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره هجدهم، شماره دوم، بهار ۱۴۰۰.
- [3] Fraas, L. M., and Larry D. P., Solar cells and their applications, Vol. 236, John Wiley and Sons, 2010.
- [4] Luque, A., Hegedus, S., Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons, London, p. 12, 2003.
- [5] Parupudi, R.V., Singh, H., and Kolokotroni, M., "Low Concentrating Photovoltaics (LCPV) for buildings and their performance analyses", Applied Energy, 279, 115839, 2020.
- [6] Y. Chaibi, A. Allouhi, M. Malvoni, M. Salhi, R. Saadani, "Solar irradiance and temperature influence on the photovoltaic cell equivalent-circuit models", Solar Energy, Volume 188, 2019.
- [7] Ahmad Al-Subhi, Ibrahim El-Amin, Mohamed I. Mosaad, "Efficient predictive models for characterization of photovoltaic module performance", Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 38, 2020.
- [8] Du, Ying et al. "Heat transfer modeling and temperature experiments of crystalline silicon photovoltaic modules", Solar Energy, 146, 2017.
- [9] Siyabi, I. A., et al., "Experimental and Numerical Thermal Analysis of Multi-Layered Microchannel Heat Sink for Concentrating Photovoltaic Application", Energies, 12, 2018.
- [10] Sharma A, Sharma A, Averbukh M, Jately V, Azzopardi B., "An Effective Method for Parameter Estimation of a Solar Cell", Electronics, 2021.
- [11] Omid Shekoofa, Mohsen Taherbaneh, "Modelling of silicon solar panel by MATLAB/Simulink and evaluating the importance of its parameters in a space application", 3rd International Conference on Recent Advances in Space Technologies, IEEE, 719-724, 2007.
- [12] Malik P, Chandel SS., "A new integrated single-diode solar cell model for photovoltaic power prediction with experimental validation under real outdoor conditions", Int J Energy Res, 2020.
- [13] Schroder, D.K., Semiconductor Material and Device Characterization, John Wiley & Sons, 2006.
- [14] Nelson, J., the Physics of Solar Cells, Imperial College Press, London, pp. 2-15, 2003.
- [15] Piero Bevilacqua, Stefania Perrella, Roberto Bruno, Natale Arcuri, "An accurate thermal model for the PV electric generation prediction: long-term validation in different climatic conditions", Renewable Energy, Volume 163, Pages 1092-1112, 2021.
- [16] Peter, N., Kabu, O.E., Stephen, K., Anthony, D., "3D finite element method modeling and simulation of the temperature of crystalline photovoltaic module", Int. J. Res. Eng. Technol. 04, 378-384, 2015.
- [17] Jones, A.D., Underwood, C.P., "A thermal model for photovoltaic systems", Solar Energy, 70, 349-359, 2001.

قوی سرعت بیشتر از ۸ متر بر ثانیه را دارند که در این مقاله، نتایج برای وزش باد به میزان سرعت ۱۰-۱ متر بر ثانیه بررسی شده است. شکل (۱۰) اختلاف دمای سلول خورشیدی مدل شده، نسبت به دمای محیط (دمای محیط ۲۵ درجه سانتی گراد) بر حسب سرعت باد تحت نور متمرکز ($G=2000 \text{ W/m}^2$) و بدون تمرکز ($G=1000 \text{ W/m}^2$) را نشان می دهد. طبق نتایج، با افزایش سرعت باد اختلاف دمای سلول خورشیدی نسبت به محیط کاهش می یابد که به نوبه خود باعث افزایش توان خروجی و کارایی سیستم خواهد شد.



شکل (۱۰): اختلاف دمای سلول خورشیدی نسبت به دمای محیط بر حسب سرعت باد تحت نور متمرکز شده ($G=2000 \text{ W/m}^2$) و بدون تمرکز ($G=1000 \text{ W/m}^2$)

۶- نتیجه گیری

در راستای کاهش قیمت برق خورشیدی تولیدی، استفاده از سلول های خورشیدی در حضور متمرکزکننده ها می تواند موثر باشد. مدل سازی و شبیه سازی، نقش بسیار مهمی در طراحی، توسعه و پیش بینی عملکرد سیستم های فتوولتائیک دارد. در این پژوهش، رهیافتی جدید برای شبیه سازی عملکرد الکتریکی و حرارتی سلول خورشیدی در شرایط مختلف محیطی مانند تغییرات شدت تابش نور خورشید در اثر به کارگیری متمرکزکننده، دمای محیط و سرعت باد ارائه شده است. مدل سازی حرارت و توزیع دما در یک سلول خورشیدی سیلیکونی با محاسبه تلفات گرمایی و با روش انتقال حرارت انجام شده است. نتایج نشان می دهد که از مهمترین عوامل موثر بر افزایش توان خروجی و بازده سلول خورشیدی، استفاده از متمرکزکننده (افزایش شدت تابش نور خورشید) و کاهش دما (استفاده از سلول خورشیدی در آب و هوای خنک با دمای کمتر) می باشد. میزان بازدهی و توان خروجی به اندازه ۰/۵ - ۰/۴٪ به ازای افزایش یک درجه سانتی گراد دما، کاهش می یابد که با افزایش سرعت باد، اختلاف دمای سلول خورشیدی و محیط، کم خواهد شد.

زیر نویس ها

- ¹ Photovoltaic (PV)
- ² Concentrator
- ³ Concentration Ratio (CR)
- ⁴ Finite Element Method (FEM)
- ⁵ Ethylene Vinyl Acetate (EVA)
- ⁶ Shockley–Read–Hall (SRH)
- ⁷ Auger Recombination
- ⁸ Radiation
- ⁹ Emissivity
- ¹⁰ Convection
- ¹¹ Ambient Temperature
- ¹² Standard Test Condition (STC)