



شبیه سازی و ارزیابی حرارتی سامانه فتوولتائیک-حرارتی در محیط گلخانه

میلاد تیموری عمران^۱، علی متولی^{۲*}، سید رضا موسوی سیدی^۳، مهدی منتظری^۴

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری؛ miladtomran@yahoo.com

^۲استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری؛ motevali62@gmail.com

^۳دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری؛ Mousavi22@yahoo.com

^۴دانشجوی دکتری مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس تهران؛ montazeri1112@gmail.com

چکیده

ایجاد مدل شبیه سازی برای پیش بینی تاثیر ایجاد تغییرات در سیستم های موجود و هم برای پیش بینی عملکرد سیستم های جدید در شرایط مختلف کاربرد دارد. با تکنیک شبیه سازی، بررسی روابط متقابل هر سیستم و زیر سیستم پیچیده آن امکان پذیر می گردد و دستیابی به داده های شبیه سازی بسیار کم هزینه تر از فراهم کردن داده های مربوط به سیستم های واقعی است. در پژوهش حاضر مدل سه بعدی از انتقال حرارت در یک سیستم فتوولتائیک-حرارتی جهت شبیه سازی عملکرد این سیستم در محیط گلخانه ارائه گردید. طرح اولیه مدل، در نرم افزار سالیدورک ایجاد شد و در نرم افزار فلونت، با توجه به شرایط محیطی گلخانه مورد تحلیل قرار گرفت. به منظور بررسی اعتبار مدل ایجاد شده، یک سیستم فتوولتائیک-حرارتی در گلخانه برای مدت ۲ روز در ماه اردیبهشت مورد بررسی قرار گرفت و داده های آن با خروجی مدل مقایسه شد. نتایج نشان داد که تطابق خوبی بین داده های تجربی و خروجی مدل وجود دارد. بیشترین بازده حرارتی سیستم برای مدل شبیه سازی ۳۴/۱۵ درصد و برای حالت واقعی ۳۴/۱ درصد به دست آمد که مربوط به ساعات اولیه آزمایش ها بود. همچنین بیشترین مقدار دمای خروجی از سیستم در شرایط سیکل بسته جریان برای مدل شبیه سازی ۵۶/۱۲ درجه سانتی گراد و برای حالت واقعی ۵۶ درجه سانتی گراد به دست آمد.

کلمات کلیدی: شبیه سازی، فلونت، بازده حرارتی، فتوولتائیک-حرارتی

Simulation and Thermal Evaluation of a Photovoltaic-Thermal System in a Greenhouse Environment

Milad Teymori Omran¹, Ali Motevali^{2*}, Seyed Reza Mosavi Seyedi³, Mehdi Montazeri⁴

- 1- MSc Student of Biosystem Eng. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. miladtomran@yahoo.com
- 2- Assistant Professor of Biosystem Eng. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. motevali62@gmail.com
- 3- Associate Professor of Biosystem Eng. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Mousavi22@yahoo.com
- 4- PhD Student of Biosystem Eng. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. montazeri1112@gmail.com

ABSTRACT

Creating a simulation model is used to predict the impact of changes in existing systems and to predict the performance of new systems in different situations. With the simulation technique can be checked the interaction between each system and its sub-system, and access to simulation data is much less costly than providing real-time data. In the present study, a three-dimensional model of heat transfer in a photovoltaic-thermal system was presented to simulate the performance of this system in a greenhouse environment. The initial design of the model was created in the SolidWork software and analyzed in Fluent software with considering the environmental conditions of the greenhouse. In order to verify the validity of the model, a photovoltaic-thermal system in the greenhouse was investigated for 2 days in May and its data compared with

* مسئول مقاله: علی متولی - دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری؛ motevali62@gmail.com



the output of the model. The results showed that there is a good agreement between the experimental data and the output of the model. The highest thermal efficiency of the system for the simulation model was 34.15% and for the real condition it was 34.1%, which was related to the first hours of the experiment. Also, the maximum outlet temperature of the system in the closed-loop flow conditions was obtained for the simulation model at 56.16 °C and for the real mode 56.0°C.

Keywords: Simulation, Fluent, Thermal efficiency, Photovoltaic-Thermal

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر مشکلاتی مانند تغییر اقلیم و نابودی محیط زیست که ناشی از فعالیت‌های انسانی، شهری‌سازی، بیابان‌زایی، جنگل‌زدایی، شوری منابع آبی و... می‌باشند، موجب شده تا مسئله بهره‌وری انرژی در کشاورزی و امنیت غذایی از اهمیت بیشتری برخوردار شود. در این میان روش کشت گلخانه‌ای در کشاورزی با توجه به حفظ منابع آب، استفاده اقتصادی بهتر از زمین و بازدهی بهتر از لحاظ محصول حتی در شرایط بد جغرافیایی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (Wang et al., 2017). در شرایط کشت گلخانه‌ای، امواج با طول موج کوتاه که توسط خورشید تابیده می‌شوند قادر به عبور از سقف گلخانه بوده و توسط اشیاء در محیط گلخانه جذب می‌گردند. بازتاب این امواج توسط اشیاء گرم شده در داخل گلخانه، به دلیل طول موج بلندتر قادر به عبور از سقف گلخانه نبوده و به این ترتیب فضای مناسب برای رشد گیاه در محیطی کنترل شده، ایجاد می‌شود (Taki et al., 2018). سطح زیر کشت گلخانه‌ای در ایران در سال‌های اخیر گسترش چشمگیری داشته است به طوری که در سال ۱۳۹۴، از کل سطح باغ‌های کشور حدود ۸ هزار هکتار به محصولات گلخانه‌ای اختصاص داده شده است که در برنامه‌های چشم انداز بایستی به ۴۸ هزار هکتار برسد. اما بخش عمده‌ای از این گلخانه‌ها در مناطق سرد و معتدل با زمستان‌های سرد قرار گرفته اند، که برای تولید محصول در پاییز و زمستان نیازمند تامین گرما با استفاده از سوخت فسیلی و مصرف انرژی بسیار بالایی می‌باشند. از طرف دیگر به دلیل استفاده اکثر گلخانه‌ها از سوخت‌های فسیلی به عنوان منبع انرژی، اثرات منفی برای کشت گلخانه‌ای به دنبال خواهد داشت (Asadi et al., 2016). مصرف بی‌رویه انرژی در اکثر گلخانه‌های ایران سبب افزایش قیمت تمام شده محصول، آلودگی محیط زیست و هدر رفت منابع با ارزش فسیلی طی دهه‌های گذشته شده است. همچنین مشکلاتی مانند محدودیت برق رسانی و تامین سوخت برای مناطق و روستاهای دور افتاده نیز وجود دارد، که لازمه برطرف کردن این مشکلات استفاده از انرژی‌های پاک و تجدید پذیر است (Bagheri et al., 2014). از میان انرژی‌های تجدیدپذیر، خورشید دسترس‌پذیرترین و بزرگترین منبع انرژی است. کشور ایران نیز با توجه به قرار گرفتن اکثر مناطق آن در نزدیکی کمربند خورشیدی و داشتن میانگین شدت تابش مناسب خورشید (بین ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ وات بر متر مربع) و همچنین بالا بودن تعداد روزهای آفتابی در سال از پتانسیل بالایی در زمینه تولید انرژی خورشیدی برخوردار است (Kazemifard et al., 2015). با توجه به نیاز گلخانه‌های کشور به دو انرژی الکتریسیته و حرارتی، به نظر لازم است تا این دو نوع انرژی از انرژی خورشیدی تامین گردد. در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی برای افزایش بازدهی الکتریکی سیستم‌های فتوولتائیک صورت گرفته است. اما با این حال سیستم فتوولتائیک رایج تنها قادر به تبدیل ۱۰ تا ۱۵ درصد از انرژی خورشیدی را به الکتریسیته هستند. باقیمانده تابش خورشید به محیط باز تابانده می‌شود یا به صورت گرما در صفحات فتوولتائیک ذخیره می‌شود. ذخیره گرما در صفحات فتوولتائیک سبب بالا رفتن دمای سلول خورشیدی شده که بازدهی الکتریکی آن را کاهش می‌دهد. از اینرو در سیستم‌های فتوولتائیک - حرارتی با تکنولوژی حرارتی که به صفحات فتوولتائیک اضافه می‌گردد، با استخراج گرما از سیستم فتوولتائیک علاوه بر افزایش بازدهی الکتریکی، از حرارت استخراج شده آن می‌توان برای گرم کردن فضای گلخانه در فصول سرد استفاده نمود (dimry et al., 2017). سیستم‌های فتوولتائیک - حرارتی (PVT) ترکیبی از صفحات فتوولتائیک و تکنولوژی حرارتی خورشیدی هستند که قادر به تولید همزمان الکتریسیته و حرارت هستند. داشتن عملکرد بهتر و استفاده بهتر از فضا از مزایای این سیستم‌های خورشیدی می‌باشند. استفاده از نرم‌افزار در سیستم‌های خورشیدی امری رایج است، یکی از نرم‌افزارهای مهم در زمینه دینامیک سیالات نرم‌افزار فلونت است که برای مدل‌سازی سیستم‌های خورشیدی از آن استفاده شده میشود. تحقیقات گسترده‌ای در استفاده از این نرم‌افزارهای شبیه‌سازی در سیستم‌های خورشیدی صورت گرفته است. در پژوهشی به بررسی عملکرد حرارتی یک جمع‌کننده فتوولتائیک - حرارتی مجهز به لوله‌هایی با مقطع مثلثی شکل را در محیط نرم‌افزار انسیس فلونت پرداخته شد. نتایج نشان داد که استفاده از لوله‌های مثلثی به دلیل تماس بیشتر با صفحه جذب دمای خروجی بالاتری برای سیال فراهم می‌سازد (Basavanna et al., 2013). در پژوهش دیگری انتقال حرارت از جمع‌کننده فتوولتائیک - حرارتی با بکارگیری روش دینامیک سیالات محاسباتی در محیط نرم‌افزار فلونت شبیه‌سازی گردید. سیال عامل هوا و نرخ جرمی ورودی بین ۰,۰۱ تا ۰,۰۵ تا کیلوگرم بر ثانیه انتخاب گردید. نتایج نشان داد که در بازه‌ها نظر گرفته شده برای دبی هوا، افزایش دبی سبب افزایش بازدهی کل گردید (Amanlou et al., 2014). در پژوهشی دیگر، انتقال حرارت از یک صفحه خورشیدی با بکارگیری نانو سیال ترکیبی (روی اکسید و آب) و آب در نرم‌افزار فلونت مقایسه شدند. نتایج نشان داد که استفاده از نانو سیال سبب بهبود انتقال حرارت از صفحه خورشیدی می‌گردد (Hosseinzadeh et al., 2018). همچنین مدل سه‌بعدی انتقال حرارت از یک سیستم فتوولتائیک به منظور پیش‌بینی دمای خروجی جمع‌کننده



فتوولتاییک- حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش اثر دبی‌های مختلف، دمای محیط و عایق‌بندی بر دمای خروجی بررسی گردید. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی دمای خروجی دارد (Gudeta et al., 2017). در پژوهش دیگری عملکرد یک سیستم فتوولتاییک-حرارتی در فصل زمستان مدل سازی و با انجام آزمایش‌های میدانی نتایج بدست آمده با هم مقایسه گردید. نتایج این مقایسه نشان داد که تطابق بسیار خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایش‌های میدانی وجود دارد (Sakellariou et al., 2017). همچنین در پژوهشی دیگر عملکرد حرارتی یک جمع‌کننده فتوولتاییک-حرارتی در سطوح تابش بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ (وات بر متر مربع) و با دسته لوله‌ای به شکل شبکه‌ای، لوله صاف جریان مستقیم و لوله‌های مارپیچی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دسته لوله به شکل مارپیچ و سطح تابش ۸۰۰ (وات بر مترمربع) و در دبی ۰/۰۴۱ بیشترین بازده را دارا می‌باشد. همچنین (بازده حرارتی ۵۴/۶ درصد و بازده الکتریکی ۱۳/۸ درصد) بدست آمد (Fudholi et al., 2014). بررسی منابع مختلف نشان داد که پژوهش‌های صورت گرفته اکثراً در فضای آزاد انجام گردید و تحقیقات کمی به مدل‌سازی یک سیستم خورشیدی زیر پوشش‌های خاص مانند شیشه انجام شده است. در محیط گلخانه نصب سیستم‌های خورشیدی بر روی سقف مشکل سایه‌اندازی را به وجود آورده و موجب اختلال در رسیدن اشعه خورشیدی به سطح صفحات خورشیدی در محیط گلخانه می‌شود. از طرفی نصب سیستم خورشیدی خارج از محیط گلخانه نیازمند اشغال فضا از زمین‌های مفید زراعی شده که با توجه به رشد جمعیت و کمبود زمین‌های زراعی با کیفیت بالا این امر را دچار مشکل می‌سازد. از طرف دیگر مشکلاتی که در انتقال انرژی الکتریسیته برای رساندن به مزارع دور از شبکه برق وجود دارد از مشکلات بسیار مهم در این بخش می‌باشد. بنابراین با توجه به پتانسیل‌های موجود در محیط گلخانه، سامانه خورشیدی مورد استفاده در این پژوهش در قسمت داخلی سقف گلخانه نصب گردید. از اینرو در پژوهش حاضر سعی شد تا با ارایه یک مدل سه بعدی از انتقال حرارت یک سیستم فتوولتاییک - حرارتی، در محیط گلخانه، عملکرد حرارتی این سیستم تحت شرایط محیطی گلخانه بررسی شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- بررسی شرایط محیطی گلخانه

در این پژوهش به مدل‌سازی یک سیستم فتوولتاییک حرارتی در محیط گلخانه پرداخته شد. به منظور هر چه بهتر شدن مدل ارایه شده، شرایط محیطی گلخانه‌ای با پوشش شیشه‌ای در دانشگاه علوم کشاورزی ساری (با عرض جغرافیایی "15° 36' و طول جغرافیایی "03° 53) به مدت دو روز در ۱۶ و ۱۷ اردیبهشت ماه به صورت تجربی بررسی شد تا نتایج بررسی در فرایند شبیه‌سازی وارد گردد. در طی این دو روز داده‌های مربوط به دمای محیطی گلخانه در شرایط بدون تهویه و شدت تابش در خارج و داخل فضایی گلخانه (زیر پوشش شیشه‌ای) جمع‌آوری شد. همچنین داده‌های مربوط به شدت تابش در محیط بیرون و داخل گلخانه در طی دو روز از ساعت ۱۰ صبح تا ۴ بعد از ظهر اندازه‌گیری شد که در شکل (۱) آورده شده است. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شد، شدت تابش زیر پوشش گلخانه به طور میانگین ۱۸۰ واحد کمتر از فضای آزاد بیرون است.

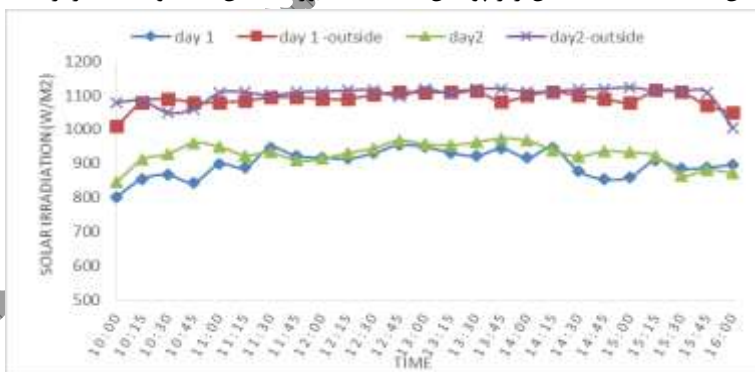


Figure 1. The intensity of the solar radiation inside and outside the greenhouse during two different days

شکل ۱- شدت تابش خورشید در داخل و خارج محیط گلخانه در طول دو روز مختلف

۲-۲- هندسه مدل

هندسه مدل پیشنهادی مطابق با یک سیستم فتوولتاییک - حرارتی که از سلول خورشیدی سیلیکونی کریستالی بهره‌مند است، استفاده گردید. طراحی مدل با ایجاد قسمت‌های مختلف این سیستم شامل: پوشش شیشه روی صفحه خورشیدی، سلول PV از نوع سیلیکونی، دو لایه مجزا از اتیلن وینیل استات، تدار، صفحه جاذب آلومینیومی و لوله‌های مسی در محیط نرم افزار Solid Work صورت گرفت و اثر قسمت‌های دیگر مانند صفحه آلومینیومی کناری و پوشش پشم شیشه در زیر لوله‌های مسی به صورت غیر مستقیم در مدل‌سازی در نظر گرفته شد. شکل (۲) طرحواره قسمت‌های مختلف طرح ایجاد شده را نشان می‌دهد. طرح خروجی در نرم‌افزار Gambit که یک نرم‌افزار رایج در طراحی مسایل مربوط به سیالات است مورد مش‌بندی قرار گرفت. مش‌بندی به صورت ترکیبی از نوع تترا هدرال و هگزا هدرال صورت گرفت. شکل (۳) جزئیات مربوط به مش ایجاد



شده را با بزرگنمایی بر روی شکل مشخص می‌کند.

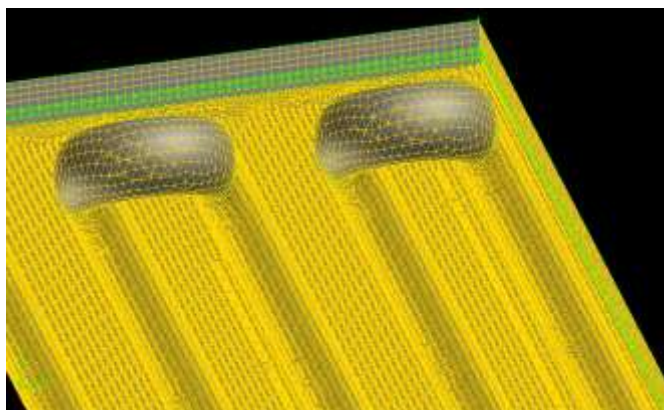


Figure3. Grid distribution of photovoltaic system in Gambit software.

شکل ۳- شبکه بندی سیستم فتوولتائیک در نرم افزار گمبیت

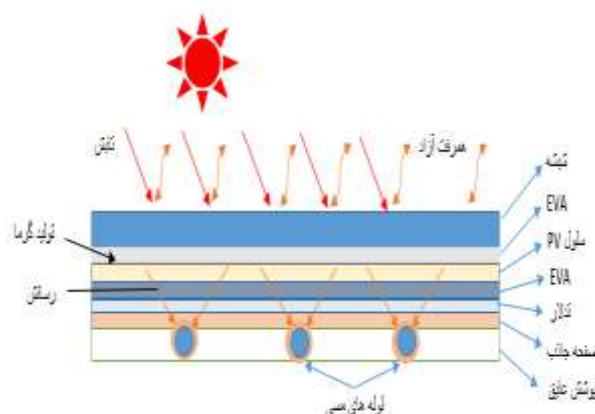


Figure2. Schema model Designed in software

شکل ۲- طرحواره مدل طراحی شده در نرم افزار

۲-۲- ابعاد و خواص قسمت های مختلف PV-T

از آنجاییکه سیستم ایجاد شده بایستی در محیط گلخانه نصب شود، با توجه به مشکل سایه اندازی بر روی گیاهان داخل محیط گلخانه، از پنل‌های فتوولتائیک با عرض کم در راستای طولی گلخانه استفاده شد تا حداقل میزان سایه اندازی در طول روز بر روی گیاهان صورت گیرد و همچنین فضای کمتری را در محیط گلخانه تحت تاثیر خود قرار دهد (شکل ۴). سیستم فتوولتائیک از نوع سلول خورشیدی سیلیکونی رایج در بازار بود که با لوله‌های مسی ترکیب گردید. جدول ۱ و ۲ خواص ترموفیزیکی، ابعاد و قسمت‌های مختلف سیستم PVT مد نظر را که در مدل‌سازی لحاظ شده است را نشان می‌دهد. (Hosseinzadeh et al, 2018; Pierrick et al, 2015; Michael et al, 2016; Yazdani-fard et al; 2016)

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی اجزای مختلف سیستم PVT

Table 1. Thermophysical Properties of Different Components of a PVT

Component	Density ($kg\ m^{-3}$)	Specific heat capacity ($jk\ g^{-1}k^{-1}$)	Thermal conductivity ($w\ m^{-1}k^{-1}$)
EVA	960	2090	0.35
Photovoltaic cells	2330	700	148
Tedlar	1200	1250	0.2
Copper	8960	385	401
Glass cover	2450	500	2

جدول ۲- ابعاد و سایر پارامترهای لازم جهت شبیه‌سازی

Table 2: Dimensions and other required parameters for simulation

Component	Variable	Value	Unit
Glass cover	Dimensions	1600*150*4	mm
Glass cover	Transmitivity	0.9	-
Tedlar	Dimensions	1600*150*3	mm
Photovoltaic cells	Dimensions	1600*150*3	mm
Photovoltaic cells	Absorption coefficient	0.9	-
Photovoltaic cells	Cell efficiency	15	%
EVA	Dimensions	1600*150*0.5	mm
Copper absorber plate	Dimensions	1600*150*0.5	mm
Collector tube	Inner diameter of collector pipes	10	mm
Collector tube	Outer diameter of collector pipes	12	mm
Collector tube	length of the pipe	4500	mm



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



۲-۴- شرایط کاری و خواص سیال

در این مطالعه از آب به عنوان سیال کاری استفاده گردید که نرخ دبی حجمی در این تحقیق به میزان ۰/۵ لیتر بر دقیقه انتخاب گردید. خواص ترموفیزیکی آب در دماهای مختلف مطابق رابطه‌های ۱ تا ۵ تغییر می‌کند (16-19). (Khanjari et al, 2017; Mahian et al, 2014; Ebrahimnia-Bajestan et al, 2016)

$$\rho_w = (-0.00448).T^2 + 999.9 \quad (۱)$$

$$k_w = 0.6067. \left(-1.26523 + 3.704. \left(\frac{T}{298.15} \right) - 1.43955. \left(\frac{T}{298.15} \right)^2 \right) \quad (۲)$$

$$C_{p,w} = (-0.0000463).T^3 + (0.0552).T^2 - (20.86)T + 6719.637 \quad (۳)$$

$$\mu_w = 0.00002414. \left(10^{\left(\frac{247.8}{T-140} \right)} \right) \quad (۴)$$

$$Re = \frac{\rho_w V_w D_t}{\mu_w} \quad (۵)$$

در معادلات بالا ρ_w چگالی (kg/m^3)، k_w رسانایی گرمایی ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)، $C_{p,w}$ ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)، μ_w ویسکوزیته دینامیکی ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)، V_w سرعت جریان (m s^{-1})، Re عدد رینولدز، D_t قطر موثر لوله را نشان می‌دهد. با توجه دمای آب ورودی، قطر لوله و نرخ های حجمی پیشنهادی عدد رینولدز بدست آمده مطابق با معادله (۵) در اکثر مواقع در محدوده جریان آرام (عدد رینولدز کمتر از ۲۳۰۰) قرار داشت. لذا می‌توان جریان آب داخل لوله‌های کلکتور را جریانی آرام در نظر گرفت.

۲-۵- شبیه سازی

فرضیات شبیه سازی

برای سهولت در شبیه‌سازی و نادیده گرفتن اثر برخی متغیرها تعدادی فرضیه در نظر گرفته شده که به شرح زیر است:

- خواص ترموفیزیکی قسمت‌های مختلف *PVT* در شرایط متفاوت کاری ثابت در نظر گرفته شده است.
- بازدهی الکتریکی سلول فتوولتاییک مطابق با بازدهی آن در شرایط تست استاندارد در نظر گرفته شده است.
- اثر سرعت باد بر ضریب انتقال حرارت همرفتی در نظر گرفته نشده است (سرعت باد در گلخانه صفر فرض شد).
- تماس کامل بین تمام قسمت‌های مختلف پنل فتوولتاییک برقرار است و وجود لایه‌های هوا یا خلأ در برخی قسمت‌ها در نظر گرفته نشده است.
- شدت تابش در تمام سطح پنل برابر با شدت تابش اندازه گیری شده در چند نقطه باشد.

در این مطالعه یک سیستم فتوولتاییک-حرارتی با در نظر گرفتن شرایط کاری در محیط گلخانه، با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی از لحاظ حرارتی شبیه سازی شد. طبق نتایج بدست آمده، جریان از نوع جریان آرام، ثابت و تراکم ناپذیر انتخاب شد. با در نظر گرفتن سیستم *PVT* به صورت یک حجم کنترل، معادلات پیوستگی، ممنوم و انرژی توسط نرم افزار *Fluent* گسسته‌سازی و با استفاده از حل گر پر پایه فشار در این نرم افزار حل شد. مقدار همگرایی نهایی برای اتمام در حل معادلات پیوستگی، ممنوم و انرژی به ترتیب 10^{-5} ، 10^{-5} و 10^{-7} انتخاب شد و کانتورهای دما در قسمت خروجی استخراج گردید.

معادلات حاکم بر شبیه سازی عددی

معادله پیوستگی (۶)، ممنوم (۷)، انرژی برای جریان سیال (۸) و انرژی در قسمت‌های جامد (۹) با در نظر گرفتن سیستم *PVT* به صورت حجم کنترل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\nabla \cdot (\rho_f \vec{V}_f) = 0 \quad (۶)$$

$$\nabla \cdot (\rho_f \vec{V}_f \vec{V}_f) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_f \nabla \vec{V}_f) \quad (۷)$$

$$\nabla \cdot (\vec{V}_f \rho_f C_f T_f) = \nabla \cdot (K_f \nabla T_f) \quad (۸)$$



$$k_s \nabla^2(T_s) = 0$$

(۹)

اعمال شرایط مرزی

شرایط مرزی با توجه نرخ شدت تابش خورشید زیر پوشش گلخانه و دمای محیط گلخانه اعمال شد. شرط مرزی برای قسمت ورودی سیال به شکل سرعت ورودی و برای قسمت خروجی جریان شرط مرزی خروج جریان در نظر گرفته شد. در قسمت بالای سلول شرط مرزی تولید گرما با توجه به میزان انرژی دریافتی از خورشید و با در نظر گرفتن سهم انرژی الکتریکی اعمال شد. در قسمت بالای شیشه و دیواره‌های جانبی شرط مرزی انتقال حرارت همرفتی به محیط با ضریبی متناسب با شرایط سرعت باد صفر (داخل محیط گلخانه سرعت باد صفر در نظر گرفته شد) اعمال شد. در قسمت زیرین لوله‌ها شرط مرزی دیواره آدیاباتیکی با نرخ انتقال حرارت صفر اعمال گردید. معادله مربوط به ضریب همرفت حرارتی در بالای شیشه به صورت رابطه (۱۰) است. (۱۳ و ۹)

$$h_{pv-a} = 3v_w + 2.8$$

(۱۰)

۶-۲- جریان انرژی

انرژی به صورت انتقال حرارت تابشی از خورشید به سلول خورشیدی انتقال یافته و اثر آن به صورت تولید گرما و انرژی الکتریکی قابل مشاهده است. بخش انرژی الکتریکی که به صورت اتصال مستقیم به شبکه یا ذخیره در باتری از سلول خارج می‌گردد (در این مدل بخش الکتریکی مدل نشده است). بخش دیگر که انرژی حرارتی است از طریق انتقال حرارت رسانشی از سلول تا صفحه جاذب و از همرفتی از دیواره لوله‌های کلکتور به سیال جاری درون کلکتور خارج می‌گردد. البته باید در نظر داشت که وجود فضاهای خالی بین قسمت‌های مختلف سیستم PVT که در شرایط واقعی وجود دارد و انتقال حرارت از نوع همرفتی را به وجود می‌آورد، در این مدل در نظر گرفته نشده است.

$$E_r = \tau_g \alpha_{ac} P_{sc} G A$$

(10)

$$E_t = m C_p (T_{out} - T_{in})$$

(11)

$$E_e = \eta_{sc} \rho_{sc} \tau_g \alpha_{sc} G A [1 - \mu_{sc} (T_{sc} - T_{ref})]$$

(12)

$$\eta_e = \frac{E_e}{E_r} \quad \eta_o = \frac{E_e + E_t}{E_r}, \quad \eta_t = \frac{E_t}{E_r}$$

(13)

در معادلات بالا E_e, E_t, E_r به ترتیب انرژی دریافتی، انرژی حرارتی، و انرژی الکتریکی (W) هستند و η_e, η_o, η_t به ترتیب بازده حرارتی، بازده الکتریکی و بازده کل را نشان می‌دهد. τ_g نماد ضریب عبور شیشه، α_{ac} ضریب جذب شیشه، η_{sc} بازدهی سلول فتوولتاییک در شرایط مرجع، P_{sc} فاکتور پکینگ، G شدت تابش بر حسب وات بر متر مربع، A مساحت سلول، C_p ظرفیت گرمایی ویژه بر حسب ژول بر کیلوگرم درجه کلوین، μ_{sc} ضریب وابستگی عملکرد سلول فتوولتاییک به دما، T_{sc} دمای سلول در هر لحظه، T_{ref} دمای استاندارد در شرایط مرجع سلول فتوولتاییک ($25^\circ C$).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- دمای محیط گلخانه

دمای محیط یکی از مهمترین عوامل در بازدهی یک سیستم فتوولتاییک-حرارتی است. دمای محیط روی دمای ورودی و خروجی سیال، بازدهی حرارتی و همچنین بازدهی الکتریکی سیستم تاثیر گذاری مستقیم دارد. دمای محیط گلخانه به خاطر محبوس کردن امواج تابشی خورشیدی در طول روز، همواره بیشتر از محیط آزاد است. شکل (۴) دمای محیط گلخانه در ساعات مختلف روز در تاریخ ۱۷ اردیبهشت را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، دمای محیط گلخانه با افزایش شدت تابش روند افزایشی دارد. همچنین مقادیر شدت تابش که در خارج از محیط گلخانه اندازه گیری شده بود از $802.55 \frac{W}{m^2}$ تا $954.75 \frac{W}{m^2}$ متغیر بود. همانطور که در شکل (۴) مشخص است کمترین دما در محیط گلخانه مربوط به شروع کار داده برداری است. ساعت ۱۰ صبح که دمای محیط گلخانه در این زمان $303.75^\circ K$ یا $30.6^\circ C$ ثبت شد و بیشترین میزان دما داخل محیط گلخانه به $313.65^\circ K$ یا $40.15^\circ C$ رسید که زمان ثبت ساعت ۱۳ و ۳۰ دقیقه بود.

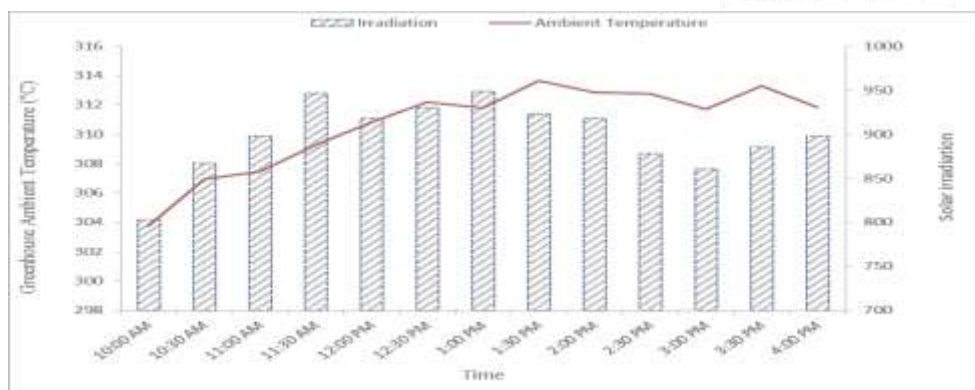


Figure 4. Changes in the temperature of the greenhouse environment and the rate of radiation intensity at different hours of the day

شکل ۴- نمودار تغییرات دمای محیط گلخانه و نرخ شدت تابش در ساعات مختلف روز دمای ورودی سیال

۳-۲- دمای ورودی سیال

دمای ورودی سیال، در این پژوهش به دلیل بسته بودن سیکل جریان همواره در حال افزایش است. اما وجود اتلاف حرارت در سیستم (قسمت منبع ذخیره و مسیر انتقال) و کاهش بازده حرارتی در بعضی ساعات روز موجب گردید تا روند افزایشی این پارامتر با شدت کمتری اتفاق افتد، به خصوص که در ساعات انتهایی داده‌برداری (۳ الی ۴ بعد از ظهر) دمای آب ورودی تقریباً به یک حالت ثابتی رسید. کمترین دمای آب ورودی به سیستم 29.2°C یا 302.35°K ثبت شد، که مربوط به ساعت ۱۰ صبح بود و بیشترین دمای ورودی به سیستم 328.61°K یا 55.46°C اندازه‌گیری شد. شکل (۵) دمای ورودی سیال به داخل سیستم فتوولتائیک - حرارتی در ساعات مختلف روز را نشان می‌دهد.

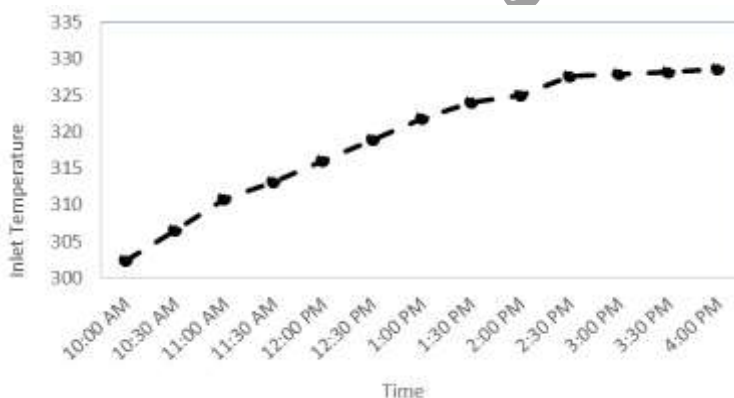


Figure 5. Changes in fluid inlet temperature to the system at different hours of the day

شکل ۵- تغییرات در دمای ورودی سیال به سیستم در ساعات مختلف روز

۳-۳- دمای خروجی سیال

عوامل مهمی که بر دمای خروجی سیال از یک سیستم فتوولتائیک - حرارتی، تاثیر گذارند شامل دمای در قسمت ورودی، نرخ شدت تابش، نوع سیال، دبی ورودی سیال، جنس مواد به کار رفته در سیستم، سرعت باد، دمای محیط و عوامل دیگری می‌باشد. با توجه به مطالب قبلی، در مدل ایجاد شده اثر دمای ورودی، ویژگی سیال ورودی و قسمت‌های جامد سیستم فتوولتائیک، دبی سیال، دمای محیط و نرخ شدت تابش به صورت پارامتر ورودی در آن به کار برده شده است. شکل (۶) دمای خروجی از سیستم در مدل ایجاد شده و همچنین در شرایط تجربی از سیستم نصب شده در گلخانه را نشان می‌دهد. همانطور که شکل نشان می‌دهد، نتایج به دست آمده از مدل، در تخمین دمای خروجی تطابق مناسبی با نتایج تجربی را نشان می‌دهد. همانند دمای ورودی در ساعات پایانی داده‌برداری، دمای آب خروجی با شیبی ملایم به بیشترین مقدار خود میرسد. بیشترین دمای خروجی آب از این سیستم 329.17°K یا 56.02°C به دست آمد. مطابق نتایج به دست آمده توان حرارتی سیستم در صورت عایق بندی مناسب در وضعیت خوبی قرار دارد و می‌توان از آن جهت مصارفی دیگر مانند تامین حرارت گلخانه در ساعات شب استفاده کرد. شکل (۷) وضعیت کانتور دما در قسمت خروجی لوله (آب خروجی) و همچنین در صفحه جاذب و لوله‌های مسی را نشان می‌دهد. در قسمت‌های ورودی و خروجی سیال به واسطه تماس با جریان آزاد هوا دمای سیال کمتر از سایر قسمت‌ها است و همچنین دما در نزدیکی دیواره‌های لوله مسی بیشتر است.

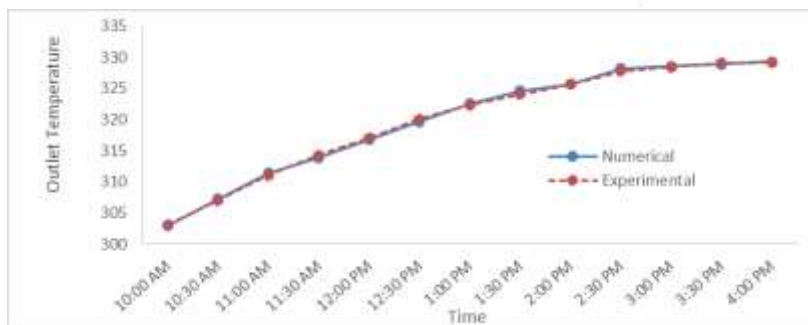
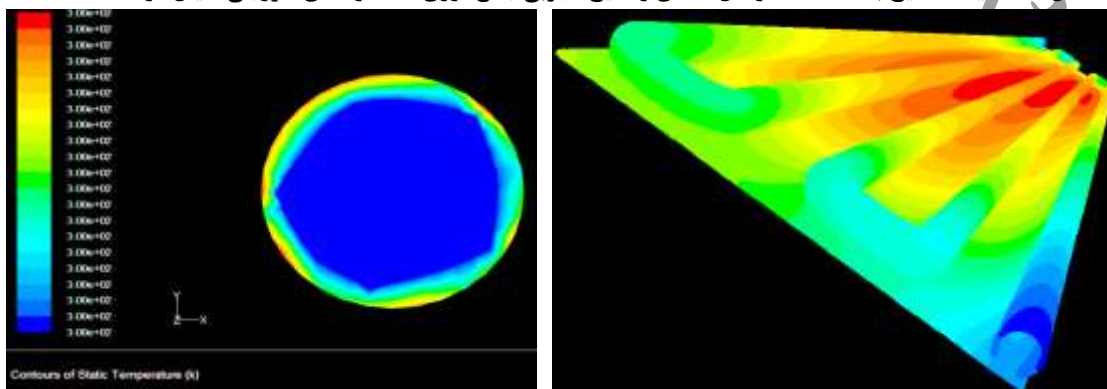


Figure 6. Comparison of the results obtained from the numerical solution and experimental results collected from the fluid outlet temperature at different hours of the day

شکل ۶- مقایسه نتایج بدست آمده از حل عددی و نتایج تجربی جمع آوری شده از دمای خروجی سیال در ساعات مختلف روز



a

b

Figure 7. (a) The temperature contour in the outlet side of the fluid. (b) The temperature contour in the absorbent plate and the copper tubes

شکل ۷- (الف) کانتور دما در قسمت خروجی سیال. (ب) کانتور دما در صفحه جاذب و لوله‌های مسی

۳-۴- بازدهی حرارتی

شکل (۸) بازدهی حرارتی سیستم در ساعات مختلف روز را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل دیده می‌شود بیشترین بازده مربوط به شروع کار در هنگام صبح و کمترین بازده حرارتی مربوط به ساعات پایانی جمع آوری داده‌ها است. بازدهی حرارتی این سیستم از ساعت ۱۰ تا ۱۶ از حدود ۳۲ تا ۳۴ درصد متغیر بوده است. بازده حرارتی سیستم تحت تاثیر عوامل دیگر مانند دمای آب ورودی، دمای محیط، بازدهی الکتریکی سیستم در آن دما، نرخ اتلاف حرارت و عواملی دیگر قرار دارد. در ساعات ابتدایی تست گیری پایین بودن دمای آب موجب شد تا بازده حرارتی سیستم با توجه به اختلاف دمای بوجود آمده بالا برود. هر چه زمان گذشت با گرمتر شدن دمای آب ورودی بازدهی روند نزولی داشت، اما زیادتر شدن شدت تابش در برخی ساعات موجب شد این روند با شیب کمتری پیش برود. شکل (۹) تغییرات در بازدهی حرارتی سیستم نسبت به دمای سیال ورودی به سیستم را نشان می‌دهد. در ساعات انتهایی انجام تست تغییرات دما در سیستم کاهش یافته و بازدهی حرارتی نیز کاهش می‌یابد.

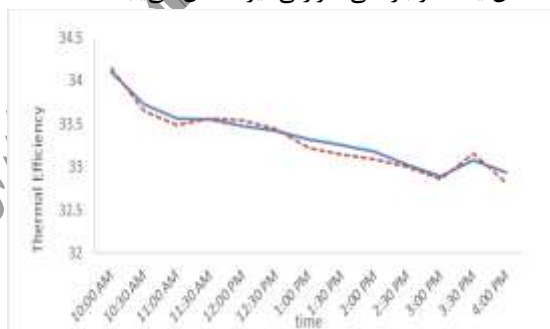


Figure 8. Comparison of the results of numerical solution and experimental results for thermal efficiency of the system at different hours of the day

شکل ۸- مقایسه نتایج بدست آمده از حل عددی و نتایج تجربی برای بازده حرارتی سیستم در ساعات مختلف روز

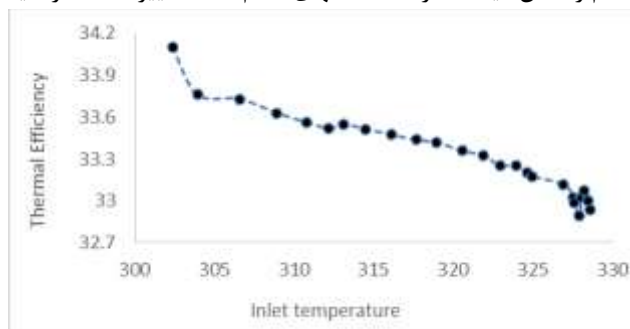


Figure 9. The effect of changes in the fluid inlet temperature at different times of day on the thermal efficiency of the system

شکل ۹- اثر تغییرات دمای ورودی سیال در ساعات مختلف روز در بازدهی حرارتی سیستم



۴- نتایج

در پژوهش حاضر به بررسی عملکرد حرارتی یک سامانه ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی (PVT) و شبیه‌سازی آن در محیط گلخانه با استفاده از نرم افزار فلونتت پرداخته شد. بررسی اولیه نشان داد که شدت تابش در زیر سقف گلخانه در حالتی که از شیشه به عنوان پوشش گلخانه استفاده شود، تقریباً ۱۸۰ واحد کمتر از شدت تابش در فضای بیرون می‌باشد. دمای داخل محیط گلخانه در ساعات بعد از ظهر به اوج خود می‌رسد که در دمای ورودی و خروجی سیال و بازدهی حرارتی سیستم اثر مستقیم دارد. با افزایش دمای آب ورودی بازدهی حرارتی کاهش یافت. بیشترین دمای آب ورودی از این سیستم در شرایط بیان شده به ۵۶/۰۲ درجه سانتیگراد رسیده است که قابلیت استفاده از آن به عنوان یک منبع حرارت در ساعات سرد شب را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با دقت بالایی نتایج واقعی را دنبال می‌کند.

۵- منابع

- 1 - Wang, T., Wu, G., Chen, J., Cui, P., Chen, Y., Yan, Y., Zhang, Y., Li, Y., Niu, D., Li, B., Chen, H. (2017). Integration of solar technology to modern greenhouse in China: Current status, challenges and prospect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70 (11), 78-88
- 2 - Taki, M., Rohani, A. Rahmati, M. (2018). Solar thermal simulation and applications in Greenhouse. *INFORMATION PROCESSING IN AGRICULTURE* 5(8)3-11
- 3 - Asadi, M., Emami razlighi, A. () Estimated thermal optimal capacity required by the coldest year of the year Calculation of heat dissipation, to select a greenhouse heating system. Fourth Scientific Congress on the Development and Promotion of Agricultural Sciences, Natural Resources and Environment of Iran. (Persian)
- 4 - Bagheri, S., Mofidi shemirani, M. (2014). Comparison between photovoltaic (PV) cells and photovoltaic-thermal cells (pvt), the third international conference on energy conservation. . (Persian)
- 5 - Kazemifard, SH., Naji, L., Afshar Tarmmi, F., Fakharan, Z. (2015). A Review of Different Types of Solar Cells and their Performance Mechanism, *Renewable Energy Sector Chapter2*, 63-71. (Persian)
- 6 - Dimri, N., Tiwari, A., Tiwari, G.N. (2017). Thermal modelling of semitransparent photovoltaic thermal (PVT) with thermoelectric cooler (TEC) collector. *Energy Conversion and Management* 146, 68-77
- 7 - Basavanna, S., Shashishekar, K. (2013). CFD Analysis of triangular absorber tube of a solar flat plate collector. *int J mesh eng robot res* 1, 19-24.
- 8- Amanlo, Y., Tavakoli- Hashjin, T., Ghobadian, B., Najafi, GH. (2015). Photovoltaic-Thermal Solar Collector Simulation Using Computational Fluid Dynamics, First Conference and International Solar Energy Exhibition. (Persian)
- 9- Hosseinzadeh, M., Salari, A., Sardarabadi, M., Passandideh-Fard, M. (2018). Optimization and parametric analysis of a nanofluid based photovoltaic thermal system: 3D numerical model with experimental validation. *Energy Conversion and Management* 160, 93-108
- 10- Gudeta Gunjo, D., pinakeswar Mahanta, p. (2017). CFD and experimental investigation of flat plate solar water heating system under steady state condition. *Renewable Energy* 106, 24-36.
- 11- Sakellariou, E., Axaopoulos, P. (2017). Simulation and experimental performance analysis of a modified PV panel to a PVT collector, *Solar Energy* 155 (7), 15-26
- 12- Fudholi, A., sopian, K., Yazdi, M., Ruslan, M., Ibrahim, A., kazem, H. (2014). Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors, *Energy Conversion and Management* 78(6), 41-51.
- 13- Nasrin, R., Rahim, N. A., Fayaz, H., Hasanuzzaman, M. (2018). Water/MWCNT nanofluid based cooling system of PVT: Experimental and numerical research. *Renewable Energy* 121, 286-300
- 14- Pierrick, H., Christophe, M., Leon, G., Patrick, D. (2015). Dynamic numerical model of a high efficiency PV-T collector integrated into a domestic hot water system. *Sol Energy* 111, 68-81.
- 15 -Michael, J.J., Selvarasan, I., Goic, R. (2016). Fabrication, experimental study and testing of a Novel photovoltaic module for photovoltaic thermal applications. *Renew Energy*. 90, 95-104.
- 16- Khanjari, Y., Kasaeian, A., Pourfayaz, F. (2017). Evaluating the environmental parameters affecting the performance of photovoltaic thermal system using nanofluid. *Appl Therm Eng.* 115, 178-187.
- 17- Mahian, O., Kianifar, A., Sahin, AZ., Wongwises, S. (2014) Entropy generation during Al₂O₃/water nanofluid flow in a solar collector: effects of tube roughness, nanoparticle size, and different thermophysical models. *Int J Heat Mass Transf.* 78, 64-75.
- 18- Ebrahimnia-Bajestan, E., Moghadam, MC., Niazmand, H., Daungthongsuk, W., Wongwises, S. (2016) Experimental and numerical investigation of nanofluids heat transfer characteristics for application in solar heat exchangers. *Int J Heat Mass Transf* 92(10), 41-52.
- 19 - Yazdani-fard, F., Ameri, M., Ebrahimnia-bejestan, A. (2016) Investigating the effect of different variables on the performance of a photovoltaic / thermal flat plate system. *Journal of Engineering and Energy Management.* 2, 46-59. (Persian)
- 20- Nasrin, R., Hasanuzzaman, M., Rahim, N.A. (2017). Effect of high irradiation on Photovoltaic power and energy, *Int. J. Energy Res.* <https://doi.org/10.1002/er.3907>.