مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دوره 17، شماره 8، ص‌ص 75-86

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی و تجربی بهینه‌سازی سیستم فتوولتاییک حرارتی با استفاده از روش تاگوچی

محمد حسین‌زاده[1]، علی سالاری[2]، محمد سردارآبادی[3]، محمد پسندیده فرد[4*]، علیرضا اکبرزاده[5]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

5,4- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* مشهد، صندوق پستی 1111-91775، mpfard@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 اردیبهشت 1396

پذیرش: 11 تیر 1396

ارائه در سایت: 17 مرداد 1396

کلید واژگان:

سیستم فتوولتاییک حرارتی

روش تاگوچی

تحلیل انرژی

تحلیل اگزرژی

چکیده

در این مطالعه عملکرد یک سیستم فتوولتاییک حرارتی به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شده است. در بررسی عددی، با استفاده از روش تاگوچی، بهینه‌ترین محیط و زمان کارکرد سیستم و هم‌چنین مناسب‌ترین پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم به منظور افزایش بازده آن در یک محیط و زمان مشخص، تعیین شده است. سپس با استفاده از پارامترهای بهینه تعیین شده در تحلیل تاگوچی، عملکرد سیستم به صورت آزمایشگاهی و از دو دیدگاه انرژی و اگزرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. در بررسی آزمایشگاهی با ساخت بستر کامل آزمایشگاهی، عملکرد یک واحد فتوولتاییک معمولی و یک سیستم فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری آب، با یکدیگر مقایسه شده است. آزمایش‌ها در دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیایی 36 درجه و طول جغرافیایی 59 درجه و در یک روز معین در مرداد ماه انجام شده است. نتایج بررسی عددی سیستم فتوولتاییک حرارتی نشان می‌دهد، مؤثرترین پارامتر بر عملکرد سیستم، دمای سیال خنک‌کننده ورودی به کلکتور می‌باشد و بهینه‌ترین مقدار آن برای بهبود عملکرد سیستم فتوولتاییک حرارتی 20 درجه سانتی‌گراد است. هم‌چنین بازده انرژی کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی در حالت بهینه 69.02 درصد می‌باشد. نتایج بررسی آزمایشگاهی بیان می‌کند، میانگین انرژی الکتریکی خروجی از سیستم فتوولتاییک حرارتی حدود 6.27 درصد بیشتر از واحد فتوولتاییک معمولی می‌باشد. هم‌چنین میانگین بازده‌های انرژی و اگزرژی حرارتی در طول آزمایش برای سیستم فتوولتاییک حرارتی به ترتیب 34.12 و 0.72 درصد می‌باشد.

Numerical and experimental investigation of optimization of photovoltaic thermal system, using taguchi method

Mohammad Hosseinzadeh, Ali Salari, Mohammad Sardarabadi, Mohammad Passandideh-Fard*, Alireza Akbarzadeh

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
* P.O.B 1111-91775, Mashhad, Iran, mpfard@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 29 April 2017
Accepted 02 July 2017
Available Online 08 August 2017

Keywords:
Photovoltaic Thermal System
Taguchi Method
Energy Analysis
Exergy Analysis

ABSTRACT

In this study, the performance of a photovoltaic thermal system (PVT) is investigated in a numerical and experimental study. In the numerical part, the Taguchi method is applied to determine the optimum place and time of the PVT system. Moreover, the optimum parameters that are independent of the design of the PVT system are obtained to improve the performance of the system in a specific place and time. Using the specified optimum parameters, the performance of the system is investigated from the energy and exergy viewpoints, experimentally. In the experimental study, using the designed setup, the performance of a water based PVT system is compared with that of a conventional photovoltaic unit (PV). The experiments are performed on a selected day in August at the Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (Latitude: 36° and Longitude: 59°). The numerical results indicate that the most effective parameter on the performance of the PVT system is the coolant inlet temperature and its optimal value is 20 °C. Moreover, the total energy efficiency of the PVT system in the optimum working condition is 69.02 %. The experimental results reveal that the average output electrical energy of the PVT system is 6.27 % more than that of the PV unit. In addition, the average thermal energy and exergy efficiencies of the PVT system are 34.12 % and 0.72 %, respectively.

1- مقدمه

امروزه به دلیل نگرانی نسبت به منابع و قیمت سوخت‌های فسیلی و مشکلات زیست محیطی که این سوخت‌ها در پی دارند، گرایش به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش یافته است [1]. بزرگ‌ترین منبع انرژی‌های تجدیدپذیر خورشید است به‌گونه‌ای که زمین سالانه 3.85 میلیون اگزا ژول انرژی خورشیدی دریافت می‌کند [2]. واحد فتوولتاییک[1] (PV) فناوری تبدیل مستقیم انرژی تابشی خورشید به انرژی الکتریکی می‌باشد. واحدهای فتوولتاییک رایج، معمولاً حدود 90 درصد از تابش ورودی را جذب می‌کنند [3]، در حالی که بازده الکتریکی این سیستم‌ها در حدود 4-17 درصد می‌باشد

[1] Photovoltaic unit

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Hosseinzadeh, A. Salari, M. Sardarabadi, M. Passandideh-Fard, A. Akbarzadeh, Numerical and experimental investigation of optimization of photovoltaic thermal system, using taguchi method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 75-86, 2017 (in Persian)

[5,4]. بنابراین بخش قابل توجهی از تابش ورودی به حرارت تبدیل می‌شود و در نتیجه دمای سطح سلول‌های فتوولتاییک افزایش می‌یابد؛ این امر سبب کاهش بازده الکتریکی سیستم شده و به ساختمان آن آسیب می‌زند [6,4]. لازم به ذکر است، بازده الکتریکی واحدهای فتوولتاییک تک کریستاله[1] و چند کریستاله[2] سیلیکونی با افزایش هر یک درجه دمای سلول، به میزان 0.45 درصد کاهش می‌یابد [7]. بنابراین خنک‌کاری سلول‌های فتوولتاییک امری ضروری است. با افزودن کلکتور[3] حرارتی به یک واحد فتوولتاییک، انرژی الکتریکی و حرارتی به صورت همزمان از سیستم دریافت می‌شود که این امر سبب کاهش دمای سلول‌های فتوولتاییک و در نتیجه افزایش طول عمر سیستم و نیز افزایش بازده سیستم می‌شود. این سیستم‌ها به عنوان سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی (PVT) شناخته می‌شوند.

عوامل مختلفی می‌توانند عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی را تحت تأثیر خود قرار دهند که می‌توان آن‌ها را به دو دسته عوامل وابسته به ساختمان سیستم و عوامل مستقل از ساختمان سیستم تقسیم‌بندی کرد. مهم‌ترین عوامل وابسته به ساختمان سیستم شامل نوع سلول فتوولتاییک [8]، نوع و ساختار کلکتور حرارتی [9] و نوع سیال خنک‌کننده [10] می‌باشند. در حالی که میزان تشعشع جذب شده توسط سلول‌های فتوولتاییک، سرعت باد در محیط، دمای محیط، دمای سیال خنک‌کننده ورودی به کلکتور حرارتی و دبی جرمی سیال خنک‌کننده را می‌توان به عنوان مهم‌ترین عوامل مستقل از ساختمان سیستم نام برد. بررسی عوامل مستقل از ساختمان سیستم فتوولتاییک حرارتی به منظور تعیین بهینه‌ترین مکان و زمان برای استفاده از سیستم ضروری است. هم‌چنین بررسی عوامل ذکر شده به منظور تعیین بهینه‌ترین عملکرد سیستم در یک محیط مشخص، به گونه‌ای که سیستم بیشترین بازده را داشته باشد، لازم می‌باشد.

عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی می‌تواند از دو دیدگاه انرژی و اگزرژی مورد مطالعه قرار گیرد. تحلیل اگزرژی به منظور تعیین عملکرد واقعی سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی موردنیاز می‌باشد [11,1]. تاکنون پژوهش‌های عددی، آزمایشگاهی و تحلیلی زیادی به منظور بررسی عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی صورت گرفته است. دقیق و همکاران [10] در یک مقاله مروری، عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری آب، ترکیب آب و هوا، و مبرد را بررسی کردند. شهسوار و همکاران [12] به صورت عددی و آزمایشگاهی، اثر استفاده از پوشش شیشه‌ای بر عملکرد سیستم فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری هوا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از پوشش شیشه‌ای در سیستم فتوولتاییک حرارتی بازده انرژی الکتریکی را کاهش و بازده انرژی حرارتی سیستم را افزایش می‌دهد. جوشی و تیواری [13] به صورت عددی، بازده انرژی و اگزرژی یک سیستم فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری هوا را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که بازده انرژی و اگزرژی سیستم مورد نظر به ترتیب 55-65 درصد و 12-15 درصد می‌باشد. تیواری و همکاران [14] به صورت عددی، به مطالعه عملکرد یک سیستم فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری آب و تحت دبی جرمی ثابت پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که بازده حرارتی این سیستم‌ها با افزایش دبی جرمی سیال افزایش می‌یابد. آن‌ها هم‌چنین یک دبی جرمی بهینه معرفی کردند که در آن بازده اگزرژی کلی سیستم، بیشینه می‌باشد. یزدانی‌فرد و همکاران [15] به صورت عددی، اثر آرام و آشفته بودن جریان سیال کاری آب در یک سیستم فتوولتاییک حرارتی را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که بازده انرژی کلی جریان آشفته بیشتر از آرام است در حالی که بازده اگزرژی کلی جریان آرام بیشتر می‌باشد. آن‌ها هم‌چنین یک دبی جرمی بهینه معرفی کردند که در آن، بازده اگزرژی کلی سیستم، بیشینه می‌باشد. میشرا و تیواری [16] به صورت عددی، عملکرد دو سیستم فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری آب را از دو دیدگاه انرژی و اگزرژی مقایسه کردند. در سیستم اول، کلکتور قسمتی از سطح واحد فتوولتاییک و در سیستم دوم کل سطح آن را پوشانده بود. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از سیستم دوم، اگزرژی کلی دریافتی سالانه را به میزان 39.16 درصد افزایش می‌دهد. فوجیساوا و تانی [17] به صورت آزمایشگاهی، عملکرد سه سیستم کلکتور خورشیدی با سیال کاری آب، واحد فتوولتاییک و سیستم فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری آب را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، سیستم فتوولتاییک حرارتی، بیشترین انرژی و اگزرژی دریافتی کلی را نسبت به سایر سیستم‌های بررسی شده دارد. تریپاناگنستپولس و همکاران [18] به صورت آزمایشگاهی، اثر پوشش شیشه‌ای و بازتابنده تابش پخش[4] را بر عملکرد دو سیستم فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری هوا و آب مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزودن پوشش شیشه‌ای به سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی بازده انرژی حرارتی سیستم را تا 30 درصد افزایش می‌دهد ولی بازده انرژی الکتریکی سیستم، حدود 16 درصد کاهش می‌یابد که با افزودن بازتابنده تابش پخش به سیستم، می‌توان کاهش بازده الکتریکی را جبران کرد. دابی و تای [19] به صورت آزمایشگاهی، عملکرد دو نوع متفاوت از سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری آب را مورد ارزیابی قرار دادند. مدل اول شامل یک سیستم فتوولتاییک با سلول‌های تک‌کریستاله سیلیکونی و کلکتور صفحه-لوله بود در حالی که مدل دوم از سلول‌های چندکریستاله سیلیکونی و کلکتور حرارتی با صفحه‌های موازی بهره‌مند بود. آزمایش‌ها در دبی‌های جرمی متفاوت و تحت شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب انجام شد. میانگین بازده‌های انرژی حرارتی و الکتریکی سیستم به ترتیب برای نوع اول 40.7 و 11.8 درصد و برای نوع دوم 39.4 و 11.5 درصد گزارش شد. حزمی و همکاران [20] به صورت عددی و آزمایشگاهی، عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی ترموسیفون[5] و پمپی، و با سیال کاری آب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشینه بازده انرژی الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتاییک حرارتی پمپی، به ترتیب 15 و 5 درصد می‌باشد. آن‌ها هم‌چنین مشاهده کردند که بازده انرژی الکتریکی و بازده اگزرژی الکتریکی سیستم پمپی به ترتیب 3 و 2.5 درصد از سیستم ترموسیفون بیشتر می‌باشد. چو و همکاران [21] به صورت عددی و آزمایشگاهی اثر پارامترهای مختلف بر بازده انرژی و اگزرژی سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری آب را مورد مطالعه قرار دادند. پارامترهای بررسی شده در مطالعه آن‌ها بازده سلول فتوولتاییک، ضریب پوشش[6]، دبی جرمی سیال آب، تابش خورشید، سرعت باد و دمای محیط بود. آن‌ها هم‌چنین مشاهده کردند که افزودن پوشش شیشه‌ای به سیستم فتوولتاییک حرارتی، بازده انرژی کلی سیستم را افزایش و بازده اگزرژی کلی سیستم را کاهش می‌دهد.

در این مطالعه عملکرد یک سیستم فتوولتاییک حرارتی به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بررسی عددی، با استفاده از

[1] Monocrystalline
[2] Polycrystalline
[3] Collector
[4] Diffuse reflector
[5] Thermosyphon
[6] Packing factor

روش تاگوچی، بهینه‌ترین محیط و زمان کارکرد سیستم و هم‌چنین مناسب‌ترین پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم به منظور افزایش بازده سیستم در یک محیط و زمان مشخص، تعیین می‌شوند که تاکنون پژوهشی در این زمینه صورت نگرفته است. پارامترهای بررسی شده در این مطالعه، میزان تشعشع جذب شده توسط سلول فتوولتاییک، سرعت باد در محیط، دمای محیط، دمای سیال خنک‌کننده ورودی به کلکتور حرارتی و دبی جرمی سیال خنک‌کننده بوده که مهم‌ترین پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم می‌باشند. سپس با استفاده از پارامترهای بهینه تعیین شده در تحلیل تاگوچی، عملکرد سیستم به صورت آزمایشگاهی و از دو دیدگاه انرژی و اگزرژی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است، در آزمایش‌های صورت گرفته، سیال خنک‌کننده موردنظر، آب بوده که در یک سیستم مدار بسته و با دبی جرمی ثابت، عمل خنک‌کاری سلول‌های فتوولتاییک را انجام می‌دهد.

2- بستر آزمایشگاهی

در این مطالعه، بستر آزمایشگاهی شامل دو واحد فتوولتاییک تک کریستاله سیلیکونی با 36 سلول خورشیدی می‌باشد که اطلاعات کامل هر واحد فتوولتاییک در جدول 1 بیان شده است. یکی از این واحدها دارای کلکتور بازیافت حرارت مسی (سیستم فتوولتاییک حرارتی) و دیگری بدون کلکتور (واحد فتوولتاییک معمولی) می‌باشد. در سیستم فتوولتاییک حرارتی، واحد فتوولتاییک با استفاده از چسب سیلیکونی به بالای صفحه نازک مسی که در زیر آن لوله‌های مسی مارپیچ قرار دارد، متصل شده است. سیستم‌ها رو به جنوب و با زاویه 30 درجه نسبت به افق و تحت شرایط یکسان مورد آزمایش قرار می‌گیرند. نمای جانبی بستر آزمایشگاهی در شکل 1 نشان داده شده است. سیال کاری در یک مخزن 2.5 لیتری ذخیره شده که به کمک یک پمپ (AC-220V-13W) با دبی جرمی ثابت، در داخل سیستم جریان می‌یابد. برای خنک کردن سیال از یک سیستم مدار بسته که شامل یک مبدل حرارتی دو لوله با جریان مخالف می‌باشد، استفاده شده است. سیال کاری در نظر گرفته شده در این مطالعه آب با دبی جرمی ثابت 30 کیلوگرم بر ساعت می‌باشد (دلیل انتخاب دبی موردنظر، در قسمت 6-1-1 بیان شده است). سیالی که در مبدل حرارتی برای خنک کاری استفاده می‌شود، آب شهر با دبی جرمی 40 کیلوگرم بر ساعت می‌باشد. لازم به ذکر است، در این آزمایش دبی‌های جرمی توسط روتامتر[1] کالیبره شده با استوانه مدرج اندازه‌گیری می شود. دمای سیال ورودی و خروجی کلکتور و هم‌چنین دمای سلول‌های فتوولتاییک، توسط ترموکوپل‌های[2] از نوع کی[3] اندازه‌گیری می‌شوند که به منظور بالا بردن دقت اندازه‌گیری دما، این ترموکوپل‌ها در داخل لوله نصب می‌شوند. لازم به ذکر است، خروجی این ترموکوپل‌ها توسط یک دیتالاگر[4] چهار کاناله (Testo-177-T4,UK) ذخیره می‌شود. دمای محیط توسط دماسنج جیوه‌ای نصب شده در نزدیک سیستم‌ها اندازه‌گیری می‌شود. جهت اندازه‌گیری جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز، از مولتی‌متر[5] دیجیتال با قابلیت ذخیره‌سازی داده‌ها استفاده شده است. در این دستگاه مقدار تابش کلی خورشید به کمک یک پیرانومتر[6] که به صورت موازی با سطح سیستم فتوولتاییک نصب شده است، اندازه‌گیری می‌شود. آزمایش‌ها در دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیای 36 درجه و طول جغرافیایی 59 درجه انجام شده است. داده‌های آزمایش در یک روز معین در مرداد ماه از ساعت 9:30 تا 15:30، در فاصله زمانی 30 دقیقه جمع‌آوری شده است.

[1] Rotameter
[2] Thermocouple
[3] K
[4] Data logger
[5] Multimeter
[6] Pyranometer

جدول 1 مشخصات واحد فتوولتاییک.

Table 1 Properties of photovoltaic unit.

واحد فتوولتاییک (تحت شرایط آزمایش استاندارد)	
نوع	تک کریستاله سیلیکونی
ابعاد واحد فتوولتاییک (mm)	630 × 540 × 28
جریان اتصال کوتاه (A)	2.57
ولتاژ مدار باز (V)	21.6
ضریب انباشتگی[7]	0.726
بازده سلول فتوولتاییک (%)	16
بازده واحد فتوولتاییک (%)	15
توان نامی (W)	40
ضریب پوشش کلکتور	1

Fig. 1 A side view of the experimental set up.

شکل 1 نمایی جانبی از بستر آزمایشگاهی.

3- مدل هندسی

در این مطالعه به منظور بررسی عددی سیستم فتوولتاییک حرارتی، مدل هندسی براساس هندسه واقعی سیستم که در شکل 1 مشاهده می‌شود، توسط نرم‌افزار سالید ورکس[8] طراحی شده است. مدل هندسی موردنظر شامل پوشش شیشه‌ای (1)، یک لایه اتیلن-وینیل استات[9] (2)، سلول‌های فتوولتاییک (3)، یک لایه اتیلن-وینیل استات (4)، یک لایه تدلار پلی‌وینیل فلوراید[10] (5)، صفحه جاذب مسی (6)، کلکتور مارپیچ (7) و پلی‌یورتان[11] (عایق حرارتی) (8) می‌باشد که در شکل 2 مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است، ابعاد و خواص ترمودینامیکی اجزای مختلف سیستم فتوولتاییک حرارتی موردنظر، به ترتیب در جدول‌های 2 و 3 بیان شده است

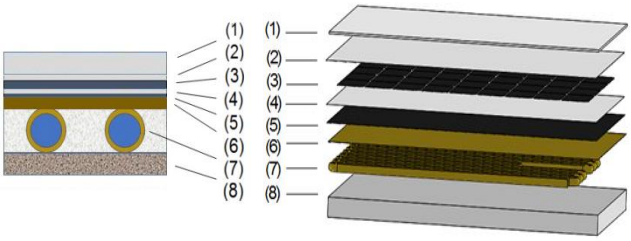


Fig. 2 Geometric Model.

شکل 2 مدل هندسی .

[7] Filled factor
[8] SolidWorks
[9] Ethylene-vinyl acetate
[10] Tedlar polyvinyl fluoride
[11] Polyurethane

جدول 2 ابعاد اجزای مختلف سیستم فتوولتاییک حرارتی.

Table 2 Dimensions of different components of the photovoltaic thermal system.

اجزا	ابعاد (mm)
پوشش شیشه‌ای	$630 \times 540 \times 3$
اتیلن-وینیل استات	$630 \times 540 \times 0.5$
سلول فتوولتاییک	$62.5 \times 125 \times 0.3$
تدلار پلی‌وینیل فلوراید	$630 \times 540 \times 0.1$
صفحه جاذب مسی	$630 \times 540 \times 0.4$
قطر داخلی کلکتور	10
قطر خارجی کلکتور	12
ضخامت عایق حرارتی	30

جدول 3 خواص ترمودینامیکی اجزای مختلف سیستم فتوولتاییک حرارتی [22].

Table 3 Thermodynamic properties of different components of the photovoltaic thermal system [22].

اجزا	ρ	k	c_p	τ	α	ε
پوشش شیشه‌ای	2200	1.1	480	0.9	0.05	0.90
اتیلن-وینیل استات	960	0.35	2090	100	0	0.85
سلول فتوولتاییک	2330	148	700	0	0.85	0.96
تدلار پلی‌وینیل فلوراید	1200	0.2	1250	0	0.5	0.9
مس	8920	398	385	0	0.9	0.1

با توجه به کم بودن ضخامت اجزای اتیلن-وینیل استات، سلول‌های فتوولتاییک، تدلار پلی‌وینیل فلوراید و صفحه جاذب مسی، مدل‌سازی آن‌ها به صورت دوبعدی صورت گرفته است. سایر اجزای سیستم فتوولتاییک حرارتی به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شده است.

4- معادلات حاکم

4-1- بررسی عددی

همان‌گونه که بیان می‌شود، جریان سیال در داخل کلکتور به صورت آرام، پایا و غیرقابل تراکم می‌باشد. در این بررسی، معادلات حاکم بر حوزه حل نیز معادلات سه‌بعدی پیوستگی، مومنتم و انرژی می‌باشند که به ترتیب توسط رابطه‌های (1-3) بیان می‌شوند:

$$\nabla(\rho\vec{V}) = 0 \tag{1}$$

$$\nabla\cdot(\rho\vec{V}\vec{V}) = -\nabla P + \nabla\cdot(\mu\nabla\vec{V}) \tag{2}$$

$$\nabla\cdot(\rho\vec{V}c_pT) = \nabla\cdot(k\nabla T) \tag{3}$$

در رابطه‌های (1-3)، ρ چگالی سیال، $\vec{V}$ سرعت سیال، P فشار سیال، μ لزجت دینامیکی[1] سیال، c_p ظرفیت گرمایی ویژه سیال، T دمای سیال و k ضریب هدایت حرارتی[2] سیال می‌باشند. در بررسی عددی صورت گرفته، به منظور تعیین انتقال حرارت اتلافی ناشی از حضور باد، ضریب انتقال حرارت جابجایی توسط رابطه (4) تعیین می‌شود [23]:

$$h_w = 5.7 + 3.8\cdot V_w \tag{4}$$

در رابطه (4)، h_w ضریب انتقال حرارت جابجایی ناشی از حضور باد و V_w سرعت باد می‌باشند.

همان‌گونه که در فرضیات بررسی عددی بیان می شود، به منظور تعیین انتقال حرارت اتلافی تشعشعی، آسمان به عنوان یک جسم سیاه فرض می‌شود که دمای آن توسط رابطه (5) قابل تعیین است [24]:

$$T_{sky} = 0.0552\cdot T_a^{1.5} \tag{5}$$

در رابطه (5)، T_{sky} دمای آسمان به عنوان یک جسم سیاه و T_a دمای محیط می‌باشند.

4-2- تحلیل ترمودینامیکی

بررسی ترمودینامیکی یک سیستم مکانیکی به دلیل ارائه کارایی سیستم در شرایط عملکردی مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است. همان‌گونه که بیان گردید، عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی می‌تواند از دو دیدگاه انرژی و اگزرژی مورد مطالعه قرار گیرد.

4-2-1- تحلیل انرژی

با در نظر گرفتن واحد فتوولتاییک و کلکتور حرارتی به عنوان یک حجم‌کنترل واحد و با فرض شرایط پایا، قانون اول ترمودینامیک در رابطه (6) بیان شده است:

$$\dot{E}_{sun} + \dot{E}_{mass,in} = \dot{E}_{el} + \dot{E}_{mass,out} + \dot{E}_{loss} \tag{6}$$

در رابطه (6)، $\dot{E}_{loss}$ نرخ انرژی اتلافی می‌باشد. هم‌چنین $\dot{E}_{sun}$ نشان‌دهنده نرخ انرژی مؤثر تابش خورشید است که توسط رابطه (7) تعیین می‌شود:

$$\dot{E}_{sun} = \dot{G}\cdot A_c\cdot\tau_{gl}\cdot\alpha_{cell} \tag{7}$$

در رابطه (7)، A_c مساحت کلکتور، τ_{gl} قابلیت عبور تابش خورشید از پوشش شیشه‌ای، α_{cell} قابلیت جذب تابش خورشید توسط سلول‌های فتوولتاییک و $\dot{G}$ نرخ تابش خورشید ورودی بر واحد سطح کلکتور می‌باشند. هم‌چنین نرخ تغییر انرژی جرم عبوری از کلکتور توسط رابطه (8) قابل تعیین است:

$$\dot{E}_{mass,out} - \dot{E}_{mass,in} = \dot{m}_f\cdot c_{p,f}\cdot(T_{f,out} - T_{f,in}) \tag{8}$$

در رابطه (8)، $\dot{m}_f$ دبی جرمی سیال عبوری از کلکتور، $T_{f,in}$ و $T_{f,out}$ به ترتیب دمای متوسط سیال در ورودی و خروجی کلکتور می‌باشند. هم‌چنین نرخ انرژی الکتریکی خروجی از سیستم ($\dot{E}_{el}$) نیز توسط رابطه (9) تعیین می‌شود:

$$\dot{E}_{el} = V_{oc}\cdot I_{sc}\cdot FF \tag{9}$$

در رابطه (9)، V_{oc} ولتاژ مدار باز، I_{sc} جریان اتصال کوتاه و FF ضریب انباشتگی می‌باشند. ضریب انباشتگی بیانگر حداکثر بازده سیستم فتوولتاییک بوده و توسط رابطه (10) محاسبه می‌شود [25]:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc}\cdot I_{sc}} \tag{10}$$

در رابطه (10)، P_{max} بیشترین توان خروجی از سیستم فتوولتاییک می‌باشد که توسط رابطه (11) قابل تعیین است:

$$P_{max} = V_{max}\cdot I_{max} \tag{11}$$

در رابطه (11)، V_{max} بیشترین ولتاژ خروجی و I_{max} بیشترین بیشترین جریان خروجی از واحد فتوولتاییک است که توسط کارخانه سازنده و در شرایط ایده‌آل آزمایشگاهی تعیین می‌شود. بازده انرژی کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی برابر نسبت مجموع انرژی‌های مفید الکتریکی و گرمایی خروجی به انرژی ورودی تابش خورشید در طول دوره زمانی t_1 تا t_2 می‌باشد که در رابطه (12) بیان شده است. بنابراین بازده انرژی کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی می‌تواند به صورت تابعی از بازده‌های انرژی الکتریکی و گرمایی سیستم نوشته شود [21]:

$$\eta_{pvt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2}(A_c\,\dot{E}''_{th} + A_{pv}\,\dot{E}''_{el})\,dt}{A_c\int_{t_1}^{t_2}(\dot{E}''_{sun})dt} = \eta_{th} + r\cdot\eta_{el} \tag{12}$$

در رابطه (12)، η_{el}، η_{th} و η_{pvt} به ترتیب بازده انرژی الکتریکی، گرمایی و کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی، A_{pv} مساحت سلول‌های فتوولتاییک، $\dot{E}''_{th}$

[1] Dynamic viscosity
[2] Thermal conductivity

نرخ انرژی گرمایی خروجی بر واحد سطح کلکتور، $\dot{E}''_{\mathrm{el}}$ نرخ انرژی الکتریکی خروجی بر واحد سطح سلول‌های فتوولتاییک و $\dot{E}''_{\mathrm{sun}}$ نرخ انرژی مؤثر تابش خورشید ورودی بر واحد سطح کلکتور است. هم‌چنین r ضریب پوشش بوده و به صورت نسبت مساحت سلول‌های فتوولتاییک به مساحت کلکتور ($A_{\mathrm{pv}}/A_{\mathrm{c}}$) تعریف می‌شود. با توجه به روابط بیان شده بازده انرژی الکتریکی و گرمایی سیستم فتوولتاییک حرارتی به ترتیب توسط رابطه‌های (13) و (14) تعیین می‌شوند:

$$\eta_{\mathrm{el}} = \frac{\dot{E}_{\mathrm{el}}}{\dot{E}_{\mathrm{sun}}} = \frac{V_{\mathrm{oc}} \cdot I_{\mathrm{sc}} \cdot \mathrm{FF}}{\dot{G} \cdot A_{\mathrm{c}} \cdot \tau_{\mathrm{gl}} \cdot \alpha_{\mathrm{cell}}} \tag{13}$$

$$\eta_{\mathrm{th}} = \frac{\dot{E}_{\mathrm{th}}}{\dot{E}_{\mathrm{sun}}} = \frac{\dot{E}_{\mathrm{mass,out}} - \dot{E}_{\mathrm{mass,in}}}{\dot{E}_{\mathrm{sun}}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{f}} \cdot c_{p,\mathrm{f}} \cdot (T_{\mathrm{f,out}} - T_{\mathrm{f,in}})}{\dot{G} \cdot A_{\mathrm{c}} \cdot \tau_{\mathrm{gl}} \cdot \alpha_{\mathrm{cell}}} \tag{14}$$

لازم به ذکر است، در بررسی عددی به منظور تعیین بازده انرژی الکتریکی از رابطه (15) استفاده می‌شود [26]:

$$\eta_{\mathrm{el}} = \eta_{\mathrm{r}} \cdot [1 - 0.0045 \cdot (T_{\mathrm{cell}} - 298.15)] \tag{15}$$

در رابطه (15)، T_{cell} دمای سلول‌های فتوولتاییک و η_{r} بازده انرژی الکتریکی در شرایط استاندارد می‌باشند.

4-2-2- تحلیل اگزرژی

مشابه با تحلیل انرژی، با در نظر گرفتن واحد فتوولتاییک و کلکتور حرارتی به عنوان یک حجم کنترل واحد، معادله اگزرژی در رابطه (16) بیان شده است:

$$\dot{E}x_{\mathrm{sun}} + \dot{E}x_{\mathrm{mass,in}} = \dot{E}x_{\mathrm{el}} + \dot{E}x_{\mathrm{mass,out}} + \dot{E}x_{\mathrm{loss}} \tag{16}$$

در رابطه (16)، $\dot{E}x_{\mathrm{loss}}$ نرخ اگزرژی اتلافی می‌باشد. هم‌چنین $\dot{E}x_{\mathrm{sun}}$ نشان‌دهنده اگزرژی خورشید است که توسط رابطه (17) تعیین می‌شود [27]:

$$\dot{E}x_{\mathrm{sun}} = \dot{G} \cdot A_{\mathrm{c}} \cdot \left(1 - \frac{T_{\mathrm{a}}}{T_{\mathrm{sun}}}\right) \tag{17}$$

در رابطه (17)، T_{sun} دمای معادل خورشید به عنوان یک جسم سیاه است که تقریباً برابر 5800 درجه کلوین می‌باشد. هم‌چنین نرخ تغییر اگزرژی جرم عبوری از کلکتور توسط رابطه (18) قابل تعیین است [27]:

$$\dot{E}x_{\mathrm{mass,out}} - \dot{E}x_{\mathrm{mass,in}} = \dot{m}_{\mathrm{f}}[(h_{\mathrm{out}} - h_{\mathrm{in}}) - T_{\mathrm{a}}(s_{\mathrm{out}} - s_{\mathrm{in}})] = \dot{m}_{\mathrm{f}} \cdot c_{p,\mathrm{f}}\left[\left(T_{\mathrm{f,out}} - T_{\mathrm{f,in}}\right) - T_{\mathrm{a}}\mathrm{Ln}\left(\frac{T_{\mathrm{f,out}}}{T_{\mathrm{f,in}}}\right)\right] \tag{18}$$

در رابطه (18)، h_{in} و h_{out} به ترتیب آنتالپی جریان جرم در ورودی و خروجی کلکتور و هم‌چنین s_{in} و s_{out} به ترتیب آنتروپی جریان جرم در ورودی و خروجی کلکتور می‌باشند. از آنجا که تمام انرژی الکتریکی معادل کار در دسترس می‌باشد، اگزرژی الکتریکی خروجی از واحد فتوولتاییک معادل انرژی الکتریکی خروجی می‌باشد که در رابطه (19) نشان داده شده است [21]:

$$\dot{E}x_{\mathrm{el}} = \dot{E}_{\mathrm{el}} \tag{19}$$

مشابه با تحلیل انرژی، بازده اگزرژی کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی می‌تواند به صورت تابعی از بازده‌های اگزرژی الکتریکی و گرمایی سیستم نوشته شود که در رابطه (20) بیان شده است [21]:

$$\varepsilon_{\mathrm{PVT}} = \frac{\dot{E}x_{\mathrm{th}} + \dot{E}x_{\mathrm{el}}}{\dot{E}x_{\mathrm{sun}}} = \frac{\int_{t1}^{t2}(A_{\mathrm{c}}\dot{E}x''_{\mathrm{th}} + A_{\mathrm{PV}}\dot{E}x''_{\mathrm{el}})dt}{A_{\mathrm{c}}\int_{t1}^{t2}(\dot{E}x''_{\mathrm{sun}})dt} = \varepsilon_{\mathrm{th}} + r.\varepsilon_{\mathrm{el}} \tag{20}$$

در رابطه (20)، $\varepsilon_{\mathrm{el}}$، $\varepsilon_{\mathrm{th}}$ و $\varepsilon_{\mathrm{PVT}}$ به ترتیب بازده اگزرژی الکتریکی، گرمایی و کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی، $\dot{E}x''_{\mathrm{th}}$ نرخ اگزرژی گرمایی خروجی بر واحد سطح کلکتور، $\dot{E}x''_{\mathrm{el}}$ نرخ اگزرژی الکتریکی خروجی بر واحد سطح سلول‌های فتوولتاییک و $\dot{E}x''_{\mathrm{sun}}$ اگزرژی خورشید بر واحد سطح کلکتور می‌باشد. با توجه به روابط بیان شده بازده‌های اگزرژی الکتریکی و گرمایی سیستم فتوولتاییک حرارتی به ترتیب توسط رابطه‌های (21) و (22) تعیین می‌شوند:

$$\varepsilon_{\mathrm{el}} = \frac{\dot{E}x_{\mathrm{el}}}{\dot{E}x_{\mathrm{sun}}} = \frac{\dot{E}x_{\mathrm{el}}}{\dot{E}x_{\mathrm{sun}}} = \frac{V_{\mathrm{oc}} \cdot I_{\mathrm{sc}} \cdot \mathrm{FF}}{\dot{G} \cdot A_{\mathrm{c}} \cdot (1 - \frac{T_{\mathrm{a}}}{T_{\mathrm{sun}}})} \tag{21}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{th}} = \frac{\dot{E}x_{\mathrm{th}}}{\dot{E}x_{\mathrm{sun}}} = \frac{\dot{E}x_{\mathrm{mass,out}} - \dot{E}x_{\mathrm{mass,in}}}{\dot{E}x_{\mathrm{sun}}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{f}} \cdot c_{p,\mathrm{f}}\left[\left(T_{\mathrm{f,out}} - T_{\mathrm{f,in}}\right) - T_{\mathrm{a}}\mathrm{Ln}(\frac{T_{\mathrm{f,out}}}{T_{\mathrm{f,in}}})\right]}{\dot{G} \cdot A_{\mathrm{c}} \cdot (1 - \frac{T_{\mathrm{a}}}{T_{\mathrm{sun}}})} \tag{22}$$

5- روش تاگوچی

روش تاگوچی یک روش بهینه‌سازی آزمایش‌ها می‌باشد که در صنعت و مهندسی کاربرد فراوان دارد. در این روش، آزمایش‌ها با استفاده از آرایه‌های متعامد طراحی می‌شوند و هدف از آن دریافت بیشترین اطلاعات از حداقل آزمایش‌ها است [28]. هم‌چنین با استفاده از روش تاگوچی بهترین مقدار هر پارامتر مسئله تعیین می‌شود [29]. به منظور استفاده از روش تاگوچی ابتدا باید پارامترهای مؤثر بر مسئله موردنظر و حالت‌های مختلف آن‌ها (سطح‌ها) تعیین شوند. پس از تعیین پارامترها و سطح‌ها، با استفاده از رابطه (23) حداقل تعداد آزمایش‌های موردنیاز برای مسئله موردنظر تعیین می‌شود [30]. سپس آرایه متعامد مناسب برای مسئله موردنظر تعیین و آزمایش‌های موردنیاز مشخص می‌شوند.

$$NE = 1 + NV \cdot (NL - 1) \tag{23}$$

در رابطه (23)، NE حداقل تعداد آزمایش‌های مورد نیاز برای مسئله موردنظر، NV تعداد پارامترهای مسئله موردنظر و NL تعداد سطح‌های هر پارامتر می‌باشند. لازم به ذکر است، معادله (23) برای مسائلی کاربرد دارد که تعداد سطح‌های تمام پارامترهای مسئله برابر باشد.

پس از انجام آزمایش‌ها، نتایج به منظور تعیین سطح مناسب هر پارامتر برای رسیدن به هدف مسئله، با یکدیگر مقایسه می‌شوند. یکی از ابزارهای موجود به منظور تحلیل نتایج آزمایش‌ها، نسبت سیگنال به نویز می‌باشد. به منظور تعیین نسبت سیگنال به نویز، با توجه به هدف مسئله می‌توان از سه مشخصه عملکردی ((مقدار کوچکتر بهترین است))، ((مقدار بزرگتر بهترین است)) یا ((مقدار اسمی بهترین است))، استفاده کرده و به کمک روابط آن‌ها نسبت سیگنال به نویز را تعیین نمود. در صورتی که مشخصه عملکردی مسئله، ((مقدار بزرگتر بهترین است))، باشد نسبت سیگنال به نویز از رابطه (24) بدست می‌آید [31]:

$$S/N = -10 \cdot \log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \tag{24}$$

در رابطه (24)، S/N نسبت سیگنال به نویز، n تعداد تکرار هر آزمایش و y_i خروجی موردنظر می‌باشند. لازم به ذکر است، به منظور تعیین مقدار بهینه هر پارامتر، سطحی که نسبت سیگنال به نویز آن بیشتر است، به هدف مسئله نزدیک‌تر بوده و سطح بهینه مسئله می‌باشد.

6- بررسی عددی

6-1- مدل عددی

در این مطالعه به منظور بررسی عددی سیستم فتوولتاییک حرارتی از نرم‌افزار انسیس فلوئنت[1] استفاده شده است. عدد رینولدز جریان سیال در داخل

[1] Ansys fluent

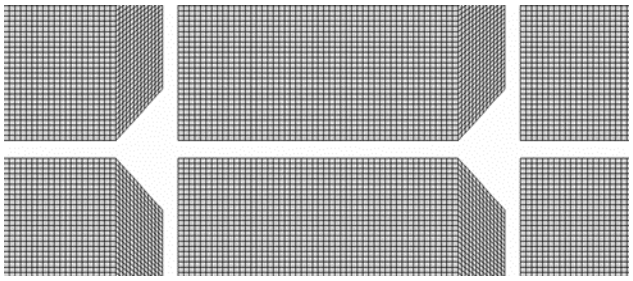
کلکتور به ازای دبی جرمی 30 کیلوگرم بر ساعت، 1716 بوده که از مقدار بحرانی 2300 کمتر می‌باشد. بنابراین با توجه به دبی جرمی سیال خنک‌کننده در داخل کلکتور و همچنین طول زیاد مسیر جریان در داخل کلکتور، جریان سیال آرام[1] در نظر گرفته شده است. در بررسی‌های صورت گرفته از حل‌کننده بر پایه فشار[2] استفاده شده است. هم‌چنین سرعت و فشار با استفاده از طرح سیمپل[3] به یکدیگر وابسته شده‌اند. به منظور همگرایی بهتر حل عددی، تفاضلی کردن ترم‌های جابجایی و پخش بر اساس طرح مرتبه دوم آپویند[4] صورت گرفته است. لازم به ذکر است که شرط مرزی در ورودی کلکتور، دبی جرمی ثابت و هم‌چنین دمای ثابت می‌باشد. در خروجی کلکتور فرض شده است که جریان توسعه یافته است و از شرط مرزی جریان خروجی[5] استفاده شده است. هم‌چنین برای دیواره‌های کلکتور نیز از شرط مرزی بدون لغزش[6] استفاده شده است. در این مطالعه به منظور بررسی همگرایی حل، مقادیر باقیمانده برای معادله پیوستگی، سرعت‌ها در سه جهت محور مختصات و معادله انرژی به ترتیب 10^{-5}، 10^{-6}، 10^{-8} انتخاب انتخاب شده است. درسیستم‌های فتوولتاییک حرارتی، با توجه به کم بودن سرعت سیال در داخل کلکتور، نیروی شناوری[7] از اهمیت بالایی برخوردار است [32]. بنابراین در بررسی عددی، درنظر گرفتن شتاب جاذبه ضروری می‌باشد. لازم به ذکر است، در بررسی‌های عددی صورت گرفته، فرضیات زیر لحاظ شده است:

- جریان سیال به صورت پایا می‌باشد.
- تابش خورشید به صورت عمود بر سطح است.
- تلفات اهمی[8] سیستم صفر فرض شده است.
- آسمان به عنوان یک جسم سیاه[9] با دمای T_{sky} می‌باشد.

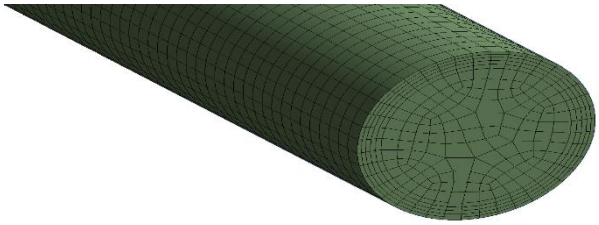
6-2- استقلال نتایج از شبکه‌بندی حوزه حل

در این مطالعه به منظور شبکه‌بندی حوزه حل از نرم‌افزار انسیس ورکبنچ[10] استفاده شده است. لازم به ذکر است، به منظور تحلیل دقیق‌تر نتایج، در نزدیکی خم‌ها و دیواره کلکتور که تغییرات شدیدتر است، تراکم مش افزایش یافته است. در شکل 3 برای نمونه، شبکه‌بندی حوزه حل برای سلول‌های فتوولتاییک و جریان داخل کلکتور بیان شده است. به منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی حوزه حل، شبکه‌هایی با 1، 2، 2.9، 3.8، 4.7 و 5.6 میلیون سلول مطالعه شده است. در این بررسی، میانگین دما و سرعت سیال در خروجی کلکتور به ازای شبکه‌بندی‌های مختلف حوزه حل بررسی شده است. همان‌گونه که در شکل 4 مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد سلول‌ها، اختلاف نتایج کاهش می‌یابد به گونه‌ای که با افزایش تعداد سلول‌ها از 4.7 به 5.6 میلیون سلول، نتایج تغییرات به شدت اندکی دارند. بنابراین شبکه با 4.7 میلیون سلول به منظور بررسی عددی سیستم فتوولتاییک حرارتی مناسب می‌باشد. لازم به ذکر است در بررسی صورت گرفته مقدار تشعشع جذب شده برابر 800 وات بر مترمربع، سرعت باد در محیط برابر 1 متر بر ثانیه، دمای محیط و دمای سیال خنک‌کننده ورودی به کلکتور 25 درجه سانتی‌گراد و دبی جرمی سیال خنک‌کننده 30 کیلوگرم بر ساعت لحاظ شده است.

[1] Laminar
[2] Pressure based solver
[3] Simple
[4] Second order upwind
[5] Out flow
[6] No slip
[7] Buoyancy force
[8] Ohmic losses
[9] Black body
[10] ANSYS Workbench



a. Photovoltaic cells



b. The collector flow

Fig. 3 Mesh distribution for a. photovoltaic cells and b. the collector flow.

شکل 3 شبکه‌بندی a. سلول‌های فتوولتاییک و b. جریان داخل کلکتور.

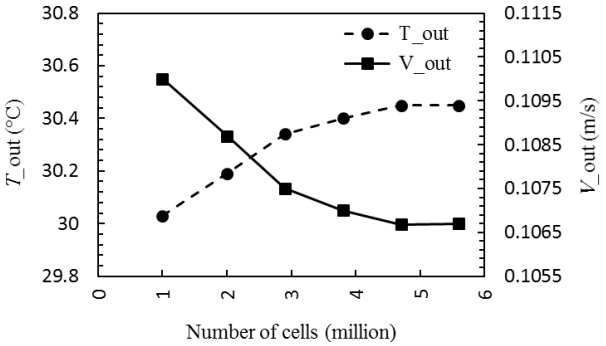


Fig. 4 Investigation of grid independency.

شکل 4 بررسی استقلال از شبکه‌بندی.

7- نتایج

در این مطالعه به صورت عددی و آزمایشگاهی عملکرد یک سیستم فتوولتاییک حرارتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بررسی عددی، عملکرد بهینه سیستم فتوولتاییک حرارتی ارزیابی می‌شود و در بررسی آزمایشگاهی با استفاده از پارامترهای بهینه تعیین شده در بررسی عددی، عملکرد سیستم از دو دیدگاه انرژی و اگزرژی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

7-1- بررسی عددی

در ابتدا میزان دقت حل عددی مورد ارزیابی قرار گرفته و در ادامه، عملکرد بهینه سیستم فتوولتاییک حرارتی تعیین می‌شود. هم‌چنین تغییرات دمای سلول‌های فتوولتاییک و جریان سیال در داخل کلکتور در حالت بهینه بررسی می‌شوند.

7-1-1- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی بررسی عددی، دمای سیال خروجی از کلکتور و دمای سطح سلول‌های فتوولتاییک با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است که به ترتیب در شکل‌های 5 و 6 مشاهده می‌شوند. لازم به ذکر است آزمایش‌ها در دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیای 36 درجه و طول جغرافیایی 59

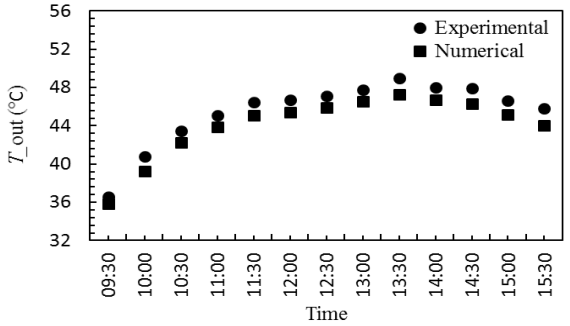


Fig. 5 Numerical and experimental results of the collector outlet temperature.

شکل 5 نتایج عددی و آزمایشگاهی دمای سیال خروجی از کلکتور.

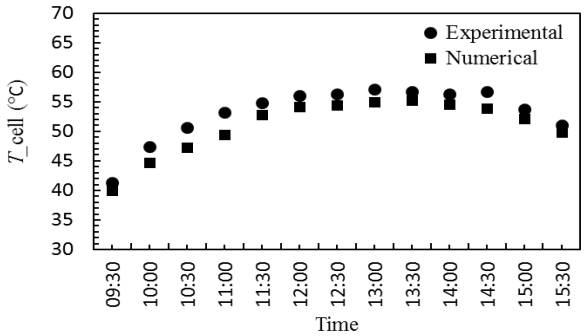


Fig. 6 Numerical and experimental results of the photovoltaic cells surface temperature.

شکل 6 نتایج عددی و آزمایشگاهی دمای سطح سلول‌های فتوولتاییک.

درجه انجام شده و داده‌های آزمایش در یک روز معین در مرداد ماه از ساعت 9:30 تا 15:30، در فاصله زمانی 30 دقیقه جمع‌آوری شده است. بررسی شکل 5 نشان می‌دهد، میانگین درصد اختلاف‌ها میان دمای سیال خروجی از کلکتور به دو روش عددی و آزمایشگاهی 2.97 درصد می‌باشد. هم‌چنین با توجه به شکل 6، میانگین اختلاف‌ها میان دمای سطح سلول‌های فتوولتاییک به دو روش عددی و آزمایشگاهی 4.04 درصد است.

7-1-2- تعیین عملکرد بهینه سیستم به کمک روش تاگوچی

در این مطالعه به کمک نرم‌افزار مینی‌تب 17 و با استفاده از روش تاگوچی، عوامل مستقل از ساختمان سیستم فتوولتاییک حرارتی، به منظور تعیین بهینه‌ترین محیط و زمان کارکرد سیستم و هم‌چنین تعیین بهینه‌ترین عملکرد سیستم در یک محیط و زمان مشخص، به گونه‌ای که سیستم بیشترین بازده انرژی کلی را داشته باشد، بررسی می‌شوند. پارامترهای بررسی شده در این مطالعه، میزان تشعشع جذب شده توسط سلول فتوولتاییک، سرعت باد در محیط، دمای محیط، دمای سیال خنک‌کننده ورودی به کلکتور حرارتی و دبی جرمی سیال خنک‌کننده بوده که مهم‌ترین پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم می‌باشند. به منظور استفاده از روش تاگوچی برای هر پارامتر، 4 سطح در نظر گرفته شده است که در جدول 4 مشاهده می‌شوند. بنابراین با توجه به تعداد پارامترها (5) و تعداد سطح‌های هر پارامتر (4) و با استفاده از رابطه (23) حداقل تعداد آزمایش‌های موردنیاز برای تعیین عملکرد بهینه سیستم فتوولتاییک حرارتی موردنظر، 16 آزمایش می‌باشد. با توجه به تعداد پارامترها و سطح‌ها و هم‌چنین حداقل تعداد آزمایش‌های موردنیاز، آرایه متعامد مناسب برای تعیین طرح آزمایش‌ها نیز $L_{16}(4^5)$ بوده که طرح آزمایش‌های موردنیاز برای روش تاگوچی در جدول 5 بیان شده است.

جدول 4 پارامترها و سطح‌های آن‌ها.

Table 4 Parameters and their levels.

عنوان‌ها	پارامترها	سطح			
		1	2	3	4
A	تابش خورشید ($\frac{W}{m^2}$)	400	600	800	1000
B	سرعت باد ($\frac{m}{s}$)	1	3	5	7
C	دمای محیط (°C)	20	25	30	35
D	دمای ورودی سیال (°C)	20	25	30	35
E	دبی جرمی سیال ($\frac{kg}{hr}$)	30	40	50	60

جدول 5 طرح آزمایش‌ها.

Table 5 Experimental plan.

شماره آزمایش	پارامتر				
	A	B	C	D	E
1	400	1	20	20	30
2	400	3	25	25	40
3	400	5	30	30	50
4	400	7	35	35	60
5	600	1	25	30	60
6	600	3	20	35	50
7	600	5	35	20	40
8	600	7	30	25	30
9	800	1	30	35	40
10	800	3	35	30	30
11	800	5	20	25	60
12	800	7	25	20	50
13	1000	1	35	25	50
14	1000	3	30	20	60
15	1000	5	25	35	30
16	1000	7	20	30	40

پس از بررسی عددی 16 آزمایش مربوطه، بازده انرژی کلی سیستم و نسبت سیگنال به نویز به ترتیب با استفاده از رابطه‌های (12) و (24) تعیین و در جدول 6 بیان شده‌اند. لازم به ذکر است، با توجه به اینکه بیشینه شدن بازده انرژی کلی سیستم مدنظر می‌باشد، در تعیین نسبت سیگنال به نویز از مشخصه عملکردی ((مقدار بزرگتر بهترین است)) استفاده شده است.

در ادامه با استفاده از مقادیر نسبت سیگنال به نویز برای هر آزمایش، مقادیر سیگنال به نویز برای سطح‌های پارامترها تعیین که در جدول 7 بیان شده است. لازم به ذکر است، در هر پارامتر، سطحی که بیشترین نسبت سیگنال به نویز را داشته باشد، سطح بهینه برای پارامتر موردنظر می‌باشد. بنابراین، با توجه به جدول 7، سطح بهینه پارامترهای مختلف مسئله در

جدول 6 مقادیر خروجی و نسبت سیگنال به نویز برای هر آزمایش.

Table 6 Response and signal to noise ratio values for each trial.

شماره آزمایش	بازده انرژی کلی (%)	نسبت سیگنال به نویز (dB)
1	52.69	34.43
2	43.92	32.85
3	35.60	31.03
4	26.91	28.60
5	36.04	31.14
6	20.03	26.03
7	61.62	35.80
8	44.87	33.04
9	33.43	30.48
10	40.39	32.13
11	37.71	31.53
12	48.23	33.67
13	46.25	33.30
14	50.71	34.10
15	28.96	29.23
16	29.27	29.33

جدول 8 بیان شده است. نتایج نشان می‌دهد، دبی بهینه سیستم فتوولتاییک حرارتی 30 کیلوگرم بر ساعت می‌باشد که مطابق نتایج بررسی تجربی انجام شده در مطالعات پیشین می‌باشد [33]. در سیستم فتوولتاییک حرارتی، مقدار بازده انرژی حرارتی سیستم نسبت به بازده انرژی الکتریکی بیشتر می‌باشد [15]. با توجه به اینکه اثر تغییر پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم بر بازده انرژی حرارتی به مراتب بیشتر از بازده انرژی الکتریکی می‌باشد [34]، با افزایش تابش خورشید و دمای محیط و همچنین کاهش سرعت باد و دمای سیال ورودی به کلکتور، بازده انرژی حرارتی سیستم و در نتیجه بازده انرژی کلی سیستم افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به اثر متقابل پارامترها در بررسی تاگوچی، حالت بهینه سیستم فتوولتاییک حرارتی مطابق جدول 8 می‌باشد. با بررسی عددی حالت بهینه بیان شده در جدول 8 و با استفاده از رابطه (12)، بازده انرژی کلی بهینه سیستم فتوولتاییک حرارتی 69.02 درصد می‌باشد. هم‌چنین پارامتری که اختلاف مقادیر سیگنال به نویز برای سطح‌های مختلف آن بیشتر باشد، تأثیر بیشتری بر بازده انرژی کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی دارد. بنابراین با توجه به جدول 7، مؤثرترین پارامتر بر عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی، دمای ورودی سیال به کلکتور بوده و بهینه‌ترین مقدار آن به منظور بهبود عملکرد سیستم 20 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بنابراین، کاهش دمای سیال ورودی به کلکتور سبب افزایش بازده سیستم می‌شود. لازم به ذکر است، با توجه به رابطه (14)، دمای سیال خنک‌کننده ورودی به کلکتور بر روی بازده حرارتی سیستم تأثیرگذار می‌باشد. بنابراین، میزان خنک‌سازی سلول‌های فتوولتاییک و در نتیجه بازده الکتریکی سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به منظور بررسی دقیق‌تر مؤثرترین پارامترها بر عملکرد سیستم فتوولتاییک حرارتی و هم‌چنین سطح بهینه هر پارامتر، مقادیر نسبت سیگنال به نویز برای سطح‌های مختلف هر پارامتر که در جدول 7 بیان شده است، در شکل 7 نشان داده می‌شوند.

7-1-3- بررسی تغییرات دمای سلول‌های فتوولتاییک و سیال کلکتور

در این مطالعه تغییرات دمای سلول‌های فتوولتاییک و سیال کلکتور در عملکرد بهینه سیستم که ویژگی‌های آن در جدول 8 بیان شد، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به منظور بررسی اثر افزودن کلکتور حرارتی بر خنک‌کاری سلول‌های فتوولتاییک، تغییرات دمای سلول‌های فتوولتاییک در سیستم فتوولتاییک حرارتی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همان‌گونه که در شکل 8 مشاهده می‌شود، با ورود سیال به کلکتور، دمای سلول‌های پایینی سیستم فتوولتاییک حراتی کاهش می‌یابد ولی با عبور سیال از داخل کلکتور به تدریج دمای سیال افزایش یافته و توان خنک‌سازی آن کاهش می‌یابد، در نتیجه دمای سلول‌های بالایی سیستم فتوولتاییک حرارتی اندکی افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است، به دلیل وجود جعبه اتصالات سیستم فتوولتاییک، امکان

جدول 7 مقادیر نسبت سیگنال به نویز برای سطح‌های هر پارامتر.

Table 7 Signal to noise ratio values for levels of each parameter.

سطح	پارامتر				
	A	B	C	D	E
1	31.73	32.34	30.33	34.5	32.21
2	31.5	31.28	31.72	32.68	32.11
3	31.95	31.90	32.16	30.90	31.01
4	31.49	31.16	32.46	28.59	31.34

جدول 8 سطح بهینه هر پارامتر.

Table 8 Optimum level of each parameter.

A	B	C	D	E
800	1	35	20	30

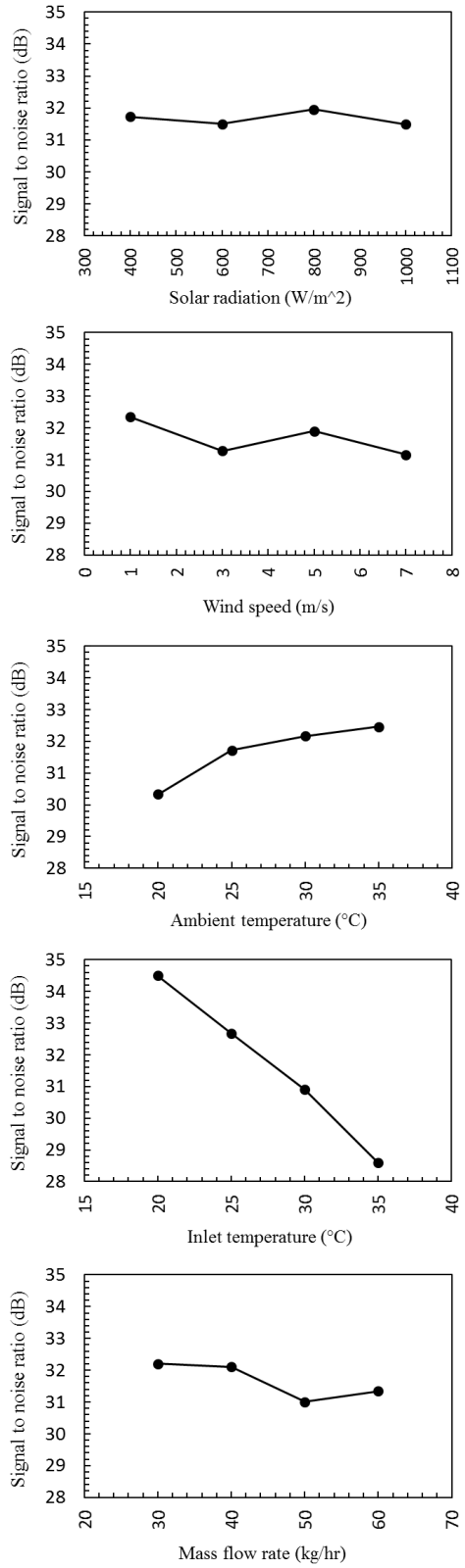


Fig. 7 Signal to noise ratio values for different levels of each parameter.

شکل 7 مقادیر نسبت سیگنال به نویز برای سطح‌های مختلف هر پارامتر.

قرارگیری کلکتور در قسمت مستطیلی مشخص شده در شکل 8، وجود ندارد که این امر سبب افزایش دمای سلول‌های فتوولتاییک در محل موردنظر می‌شود. بنابراین همان‌گونه که مشخص است، بیشترین دمای سلول‌ها در قسمت مستطیلی موردنظر رخ می‌دهد. تغییرات دمای سیال در داخل کلکتور

در شکل 9 بیان شده است. همان‌گونه که در شکل 9 مشاهده می‌شود، سیال ورودی به کلکتور در ابتدا دمای آن پایین بوده ولی به تدریج با جریان در داخل کلکتور و دریافت حرارت از سلول‌های فتوولتاییک، دمای سیال افزایش می‌یابد.

7-2- بررسی آزمایشگاهی

در این مطالعه با ساخت بستر کامل آزمایشگاهی، عملکرد یک واحد فتوولتاییک و یک سیستم فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری آب، از دو دیدگاه انرژی و اگزرژی با یکدیگر مقایسه شده است. دبی جرمی سیال عبوری از کلکتور در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر 30 کیلوگرم بر ساعت می‌باشد. لازم به ذکر است، با استفاده از نتایج تحلیل تاگوچی، دبی جرمی 30 کیلوگرم بر ساعت به عنوان دبی جرمی بهینه برای سیستم فتوولتاییک حرارتی تعیین شد (مراجعه به جدول 8). آزمایش‌ها در دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیای 36 درجه و طول جغرافیایی 59 درجه انجام شده است. داده‌های آزمایش در یک روز معین در مرداد ماه از ساعت 9:30 تا 15:30، در فاصله زمانی 30 دقیقه جمع‌آوری شده است. شدت تابش دریافتی خورشید و دمای محیط در طول آزمایش اندازه‌گیری شده که در شکل 10 گزارش شده است. با توجه به داده‌های آزمایش، مقدار متوسط دمای محیط و مقدار متوسط تابش دریافتی از خورشید در طول آزمایش به ترتیب 33.42 درجه سانتی‌گراد و 917.40 وات بر مترمربع می‌باشد. لازم به ذکر است، سایر

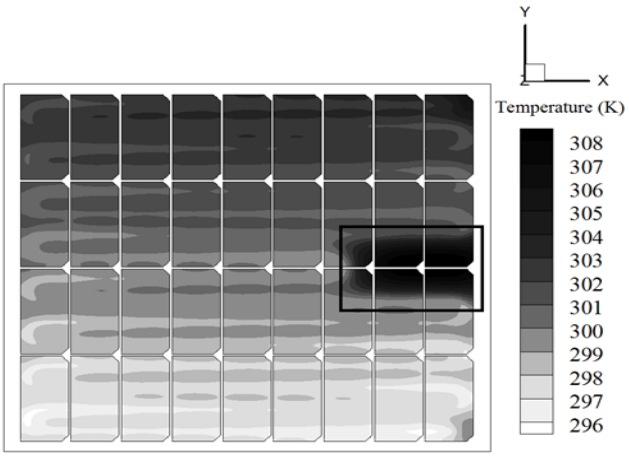


Fig. 8 Temperature variations of the photovoltaic cells.

شکل 8 تغییرات دمای سلول‌های فتوولتاییک.

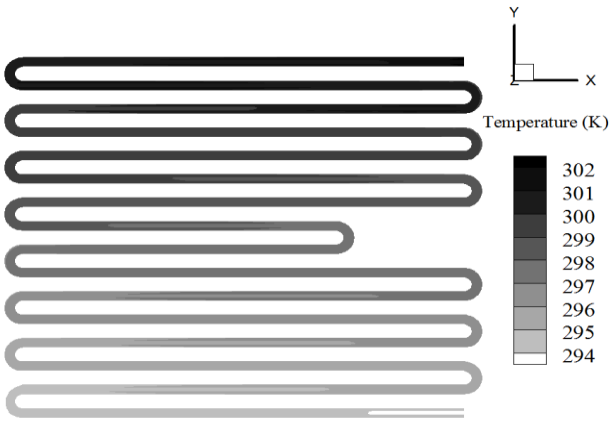


Fig. 9 Temperature variations of the fluid in the collector.

شکل 9 تغییرات دمای سیال داخل کلکتور.

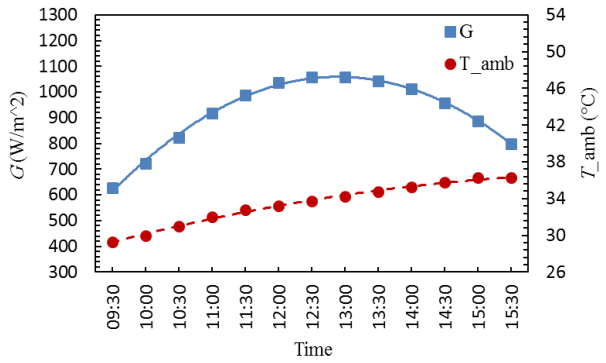


Fig. 10 Variation of solar radiation and ambient temperature during the test period.

شکل 10 تغییرات تابش خورشید و دمای محیط در طول آزمایش.

عوامل محیطی مانند رطوبت و نسبی محیط، میزان تابش دریافتی توسط سیستم فتوولتاییک حرارتی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

7-2-1- تحلیل انرژی

همان‌گونه که بیان گردید، خنک‌کاری سلول‌های فتوولتاییک توسط سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی سبب کاهش دمای سلول‌ها و در نتیجه بهبود عملکرد سیستم می‌شود. برای بررسی این موضوع، تغییرات انرژی الکتریکی خروجی در طول آزمایش برای واحد فتوولتاییک (PV) و سیستم فتوولتاییک حرارتی (PVT) با استفاده از رابطه (9) تعیین و در شکل 11 بیان شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با نزدیک شدن به ظهر خورشیدی به دلیل افزایش انرژی تابشی ورودی به سیستم، انرژی الکتریکی خروجی از سیستم افزایش می‌یابد. هم‌چنین میانگین انرژی الکتریکی خروجی در طول آزمایش برای واحد فتوولتاییک و سیستم فتوولتاییک حرارتی به ترتیب 88.40 و 93.94 وات بر مترمربع می‌باشند که نشان‌دهنده این است که انرژی الکتریکی خروجی از سیستم فتوولتاییک حرارتی حدود 6.27 درصد بیشتر از واحد فتوولتاییک معمولی می‌باشد. بنابراین، با افزودن کلکتور حرارتی به واحد فتوولتاییک، انرژی الکتریکی خروجی از سیستم افزایش قابل ملاحظه‌ای ندارد که نتایج سایر پژوهش‌ها مانند پژوهش چندراسکار و همکاران [5] و همچنین جوی و همکاران [35] این موضوع را تأیید می‌کند.

به منظور بررسی اثر استفاده از کلکتور حرارتی بر عملکرد سیستم فتوولتاییک حرارتی، بازده انرژی الکتریکی در طول آزمایش برای واحد

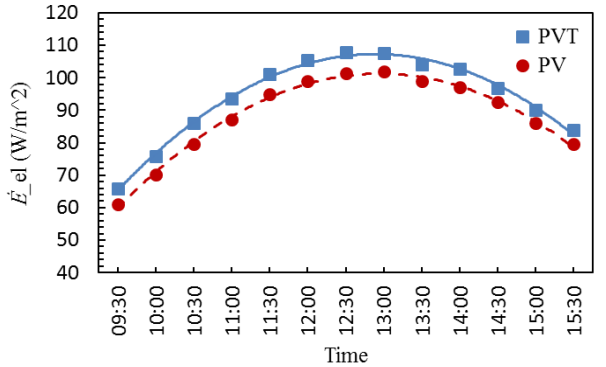


Fig. 11 Output electrical energy of the PV unit and PVT system during the test period.

شکل 11 مقادیر انرژی الکتریکی خروجی برای واحد فتوولتاییک و سیستم فتوولتاییک حرارتی در طول آزمایش.

فتوولتاییک و سیستم فتوولتاییک حرارتی با استفاده از رابطه (13) تعیین و در شکل 12 بیان شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، با نزدیک شدن به ظهر خورشیدی، به دلیل افزایش دمای سلول‌های فتوولتاییک و عملکرد پایین سلول‌های فتوولتاییک، نرخ افزایش انرژی الکتریکی خروجی به مراتب کمتر از انرژی تابشی ورودی به سیستم است. بنابراین کمترین بازده سیستم در ظهر خورشیدی رخ می‌دهد. همچنین میانگین بازده انرژی الکتریکی در طول آزمایش برای واحد فتوولتاییک و سیستم فتوولتاییک حرارتی به ترتیب 12.61 و 13.41 درصد می‌باشند که نشان‌دهنده این است که استفاده از سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی در مقایسه با واحد فتوولتاییک معمولی، بازده انرژی الکتریکی سیستم را افزایش می‌دهد.

در این مطالعه به منظور بررسی مقدار انرژی حرارتی دریافتی از سلول‌های فتوولتاییک توسط کلکتور حرارتی، میانگین انرژی حرارتی خروجی، بازده انرژی حرارتی و بازده انرژی کلی در طول آزمایش و برای سیستم فتوولتاییک حرارتی تعیین و در جدول 9 بیان شده است که می‌توان از این انرژی حرارتی بدست آمده از سیستم برای کاربری‌های دما پایین استفاده نمود. لازم به ذکر است، بیش‌ترین بازده انرژی کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی در طول آزمایش در حدود 60 درصد می‌باشد.

لازم به ذکر است، میانگین بازده‌های انرژی الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتاییک حرارتی در پژوهش حاضر تقریباً در محدوده بیان شده در پژوهش گنگ و همکاران [36] می‌باشد. محدوده گزارش شده در پژوهش آن‌ها، برای بازده الکتریکی 4-13 درصد و برای بازده حرارتی 25-75 درصد می‌باشد.

7-2-2- تحلیل اگزرژی

تحلیل اگزرژی سیستم‌های ترمودینامیکی به منظور تعیین عملکرد واقعی آن‌ها ضروری می‌باشد. بنابراین در این مطالعه، تحلیل‌های اگزرژی واحد فتوولتاییک و سیستم فتوولتاییک حرارتی صورت گرفته و با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به رابطه (19) اگزرژی الکتریکی خروجی از واحد

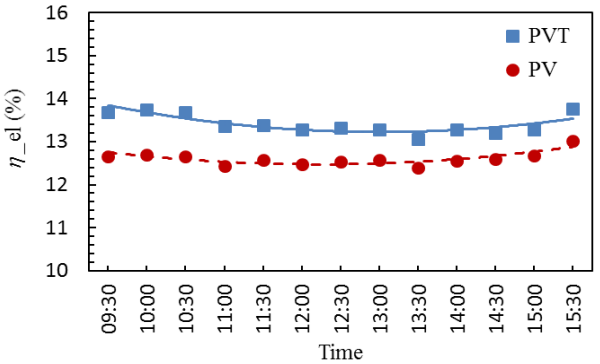


Fig. 12 Electrical energy efficiency of the PV unit and PVT system during the test period.

شکل 12 مقادیر بازده انرژی الکتریکی خروجی برای واحد فتوولتاییک و سیستم فتوولتاییک حرارتی در طول آزمایش.

جدول 9 میانگین انرژی حرارتی خروجی، بازده انرژی حرارتی و بازده انرژی کلی برای سیستم فتوولتاییک حرارتی در طول آزمایش.

Table 9 Average of output thermal energy, thermal energy efficiency and total energy efficiency of the PVT system during the test period.

انرژی حرارتی خروجی ($\frac{W}{m^2}$)	بازده انرژی حرارتی (%)	بازده انرژی کلی (%)
236.96	34.12	47.53

فتوولتاییک و سیستم فتوولتاییک حرارتی برابر انرژی الکتریکی خروجی از آن‌ها می‌باشد. بنابراین با توجه به مطالب بیان شده، میانگین اگزرژی الکتریکی خروجی سیستم فتوولتاییک حرارتی نسبت به واحد فتوولتاییک بیشتر می‌باشد. ولی باید توجه داشت که چون اگزرژی ورودی به سیستم‌ها با انرژی ورودی یکسان نمی‌باشد، بازده انرژی الکتریکی با بازده اگزرژی الکتریکی سیستم‌ها با یکدیگر متفاوت است. لازم به ذکر است، بازده اگزرژی الکتریکی واحد فتوولتاییک و سیستم فتوولتاییک حرارتی با استفاده از رابطه (21) تعیین و در شکل 13 نشان داده شده است. همان‌گونه در شکل 13 مشاهده می‌شود، مشابه بازده انرژی الکتریکی، با نزدیک شدن به ظهر خورشیدی بازده اگزرژی الکتریکی کاهش می‌یابد به گونه‌ای که کمترین مقدار بازده اگزرژی الکتریکی برای واحد فتولتاییک و سیستم فتوولتاییک حرارتی به ترتیب 10.03 و 10.57 درصد می‌باشد. همچنین میانگین بازده اگزرژی الکتریکی در طول آزمایش برای واحد فتوولتاییک و سیستم فتوولتاییک حرارتی به ترتیب 10.19 و 10.84 درصد می‌باشد.

همچنین به منظور بررسی اثر کلکتور حرارتی در سیستم فتوولتاییک حرارتی، میانگین اگزرژی حرارتی خروجی، بازده اگزرژی حرارتی و بازده اگزرژی کلی در طول آزمایش و برای سیستم فتوولتاییک حرارتی تعیین و در جدول 10 بیان شده است. همان‌گونه که در جدول 10 مشاهده می‌شود، مقدار اگزرژی حرارتی در سیستم فتوولتاییک حرارتی کوچک می‌باشد که نشان‌دهنده این است که کیفیت انرژی حرارتی در این سیستم پایین می‌باشد. لازم به ذکر است، این امر سبب کاهش بازده اگزرژی حرارتی در سیستم فتوولتاییک حرارتی می‌شود.

8- نتیجه‌گیری

در این مطالعه عملکرد یک سیستم فتوولتاییک حرارتی به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در بررسی عددی، با استفاده از روش تاگوچی، بهینه‌ترین محیط و زمان کارکرد سیستم و همچنین

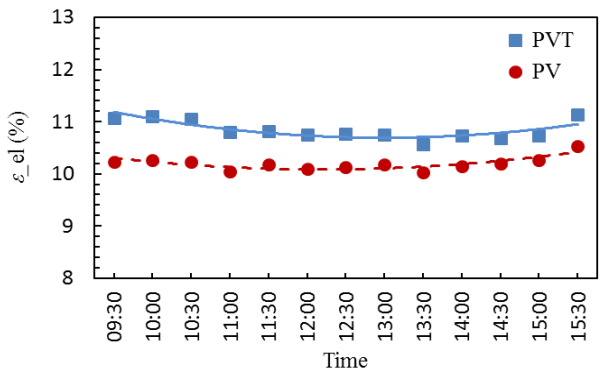


Fig. 13 Electrical exergy efficiency of the PV unit and PVT system during the test period.

شکل 13 مقادیر بازده اگزرژی الکتریکی خروجی برای واحد فتوولتاییک و سیستم فتوولتاییک حرارتی در طول آزمایش.

جدول 10 میانگین اگزرژی حرارتی خروجی، بازده اگزرژی حرارتی و بازده اگزرژی کلی برای سیستم فتوولتاییک حرارتی در طول آزمایش.

Table 10 Average of output thermal exergy, thermal exergy efficiency and total exergy efficiency of the PVT system during the test period.

اگزرژی حرارتی خروجی ($\frac{W}{m^2}$)	بازده اگزرژی حرارتی (%)	بازده اگزرژی کلی (%)
6.33	0.72	11.57

مناسب‌ترین پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم به منظور افزایش بازده سیستم در یک محیط و زمان مشخص، تعیین شده است. سپس با استفاده از دبی جرمی بهینه تعیین شده در تحلیل تاگوچی، عملکرد سیستم به صورت آزمایشگاهی و از دو دیدگاه انرژی و اگزرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. در بررسی آزمایشگاهی با ساخت بستر کامل آزمایشگاهی عملکرد دو سیستم فتوولتاییک و فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری آب مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است، آزمایش‌ها در دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیای 36 درجه و طول جغرافیایی 59 درجه و در یک روز معین در مرداد ماه انجام شده است. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته مهم‌ترین نتایج در ادامه بیان می‌شود:

- مقادیر بهینه مهم‌ترین پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم فتوولتاییک حرارتی به صورت تشعشع جذب شده توسط سلول‌های فتوولتاییک 800 وات بر مترمربع، سرعت باد در محیط 1 متر بر ثانیه، دمای محیط 35 درجه سانتی‌گراد، دمای سیال خنک‌کننده ورودی به کلکتور 20 درجه سانتی‌گراد و دبی جرمی سیال خنک‌کننده 30 کیلوگرم بر ساعت می‌باشد.
- بازده انرژی کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی در حالت بهینه 69.02 درصد می‌باشد.
- مؤثرترین پارامتر بر عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی، دمای سیال خنک‌کننده ورودی به کلکتور می‌باشد.
- میانگین انرژی الکتریکی خروجی از سیستم فتوولتاییک حرارتی حدود 6.27 درصد بیشتر از واحد فتوولتاییک معمولی می‌باشد.
- میانگین بازده اگزرژی الکتریکی در طول آزمایش برای واحد فتوولتاییک و سیستم فتوولتاییک حرارتی به ترتیب 10.19 و 10.84 درصد می‌باشد.
- میانگین بازده‌های انرژی و اگزرژی حرارتی در طول آزمایش برای سیستم فتوولتاییک حرارتی به ترتیب 34.12 و 0.72 درصد می‌باشد.

9- فهرست علایم

A	مساحت (m^2)
c_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
$\dot{E}$	نرخ انرژی (W)
$\dot{E}x$	نرخ اگزرژی (W)
FF	ضریب انباشتگی
$\dot{G}$	نرخ انرژی تابشی (Wm^{-2})
h	آنتالپی (Jkg^{-1})
I	جریان (A)
k	ضریب هدایت حراتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)
$\dot{m}$	دبی جرمی (kgs^{-1})
n	تعداد تکرار هر آزمایش
NE	حداقل تعداد آزمایش
NL	تعداد سطح‌ها
NV	تعداد پارامترها
P	توان الکتریکی خروجی (kW)
S	آنتروپی ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
T	دما (K)
t	زمان (s)
V	ولتاژ (V)
y	خروجی

علائم یونانی

η	بازده انرژی (%)
ε	بازده اگزرژی (%)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	لزجت دینامیکی سیال ($kgm^{-1}s^{-1}$)
τ	قابلیت عبور تابش خورشید
α	قابلیت جذب تابش خورشید
∇	گرادیان

زیرنویس‌ها

a	محیط
c	کلکتور
cell	سلول خورشیدی
eff	مؤثر
el	الکتریکی
f	سیال
g	تولید شده
gl	پوشش شیشه
i	شمارنده
in	ورودی
loss	اتلاف
mass	جرم
max	بیشینه
oc	مدار باز
out	خروجی
pv	سیستم فتوولتاییک
pvt	سیستم فتوولتاییک حرارتی
r	شرایط استاندارد
sc	اتصال کوتاه
sky	آسمان
sun	خورشید
th	حرارتی
w	باد

10- مراجع

[1] J. Yazdanpanahi, F. Sarhaddi, M. M. Adeli, Experimental investigation of exergy efficiency of a solar photovoltaic thermal (PVT) water collector based on exergy losses, *Solar Energy*, Vol. 118, No. 8, pp. 197-208, 2015.
[2] A. N. Al-Shamani, M. H. Yazdi, M. Alghoul, A. M. Abed, M. H. Ruslan, S. Mat, K. Sopian, Nanofluids for improved efficiency in cooling solar collectors–a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 38, No. 10, pp. 348-367, 2014.
[3] P. Dupeyrat, C. Menezo, S. Fortuin, Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system, *Energy and Buildings*, Vol. 68, No. 3, pp. 751-755, 2014.
[4] T. T. Chow, A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 2, pp. 365-379, 2010.
[5] M. Chandrasekar, S. Suresh, T. Senthilkumar, Passive cooling of standalone flat PV module with cotton wick structures, *Energy Conversion and Management*, Vol. 71, No. 7, pp. 43-50, 2013.
[6] M. Browne, B. Norton, S. McCormack, Phase change materials for photovoltaic thermal management, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 47, No. 7, pp. 762-782, 2015.
[7] S. A. Kalogirou, Y. Tripanagnostopoulos, Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production, *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, No. 18, pp. 3368-3382, 2006.
[8] R. Daghigh, A. Ibrahim, G. L. Jin, M. H. Ruslan, K. Sopian, Predicting the performance of amorphous and crystalline silicon based photovoltaic solar

thermal collectors, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 3, pp. 1741-1747, 2011.
[9] A. Ibrahim, M. Y. Othman, M. H. Ruslan, M. Alghoul, M. Yahya, A. Zaharim, K. Sopian, Performance of photovoltaic thermal collector (PVT) with different absorbers design, *WSEAS Transactions on Environment and Development*, Vol. 5, No. 3, pp. 321-330, 2009.
[10] R. Daghigh, M. H. Ruslan, K. Sopian, Advances in liquid based photovoltaic/thermal (PV/T) collectors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 8, pp. 4156-4170, 2011.
[11] F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, Exergetic optimization of a solar photovoltaic array, *Journal of Thermodynamics*, Vol. 2009, No. 1, pp. 1-11, 2009.
[12] A. Shahsavar, M. Ameri, M. Mahmoudabadi, Simulation and test of pv/t air systems with natural air flow operation, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 43, No. 1, pp. 31-40, 2011. (in Persian فارسی)
[13] A. S. Joshi, A. Tiwari, Energy and exergy efficiencies of a hybrid photovoltaic–thermal (PV/T) air collector, *Renewable Energy*, Vol. 32, No. 13, pp. 2223-2241, 2007.
[14] A. Tiwari, S. Dubey, G. Sandhu, M. Sodha, S. Anwar, Exergy analysis of integrated photovoltaic thermal solar water heater under constant flow rate and constant collection temperature modes, *Applied Energy*, Vol. 86, No. 12, pp. 2592-2597, 2009.
[15] F. Yazdanifard, E. Ebrahimnia-Bajestan, M. Ameri, Investigating the performance of a water-based photovoltaic/thermal (PV/T) collector in laminar and turbulent flow regime, *Renewable Energy*, Vol. 99, No. 15, pp. 295-306, 2016.
[16] R. Mishra, G. Tiwari, Energy and exergy analysis of hybrid photovoltaic thermal water collector for constant collection temperature mode, *Solar Energy*, Vol. 90, No. 4, pp. 58-67, 2013.
[17] T. Fujisawa, T. Tani, Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 47, No. 1, pp. 135-148, 1997.
[18] Y. Tripanagnostopoulos, T. Nousia, M. Souliotis, P. Yianoulis, Hybrid photovoltaic/thermal solar systems, *Solar Energy*, Vol. 72, No. 3, pp. 217-234, 2002.
[19] S. Dubey, A. A. Tay, Testing of two different types of photovoltaic–thermal (PVT) modules with heat flow pattern under tropical climatic conditions, *Energy for Sustainable Development*, Vol. 17, No. 1, pp. 1-12, 2013.
[20] M. Hazami, A. Riahi, F. Mehdaoui, O. Nouicer, A. Farhat, Energetic and exergetic performances analysis of a PV/T (photovoltaic thermal) solar system tested and simulated under to Tunisian (North Africa) climatic conditions, *Energy*, Vol. 107, No. 14, pp. 78-94, 2016.
[21] T. T. Chow, G. Pei, K. Fong, Z. Lin, A. Chan, J. Ji, Energy and exergy analysis of photovoltaic–thermal collector with and without glass cover, *Applied Energy*, Vol. 86, No. 3, pp. 310-316, 2009.
[22] H. Pierrick, M. Christophe, G. Leon, D. Patrick, Dynamic numerical model of a high efficiency PV–T collector integrated into a domestic hot water system, *Solar Energy*, Vol. 111, No. 1, pp. 68-81, 2015.
[23] M. Sardarabadi, M. Passandideh-Fard, Experimental and numerical study of metal-oxides/water nanofluids as coolant in photovoltaic thermal systems (PVT), *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 157, No. 14, pp. 533-542, 2016.
[24] W. C. Swinbank, Long-wave radiation from clear skies, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 89, No. 381, pp. 339-348, 1963.
[25] C. Hue, R. White, *Solar Cells From Basic To Advanced Systems*, pp. 101-102, New York: McGraw-Hill, 1983.
[26] D. Evans, Simplified method for predicting photovoltaic array output, *Solar Energy*, Vol. 27, No. 6, pp. 555-560, 1981.
[27] S. Park, A. Pandey, V. Tyagi, S. Tyagi, Energy and exergy analysis of typical renewable energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 30, No. 2, pp. 105-123, 2014.
[28] C. F. J. Kuo, T. L. Su, P. R. Jhang, C. Y. Huang, C. H. Chiu, Using the Taguchi method and grey relational analysis to optimize the flat-plate collector process with multiple quality characteristics in solar energy collector manufacturing, *Energy*, Vol. 36, No. 5, pp. 3554-3562, 2011.
[29] T. Sivasakthivel, K. Murugesan, H. R. Thomas, Optimization of operating parameters of ground source heat pump system for space heating and cooling by Taguchi method and utility concept, *Applied Energy*, Vol. 116, No. 4, pp. 76-85, 2014.
[30] V. Verma, K. Murugesan, Optimization of solar assisted ground source heat pump system for space heating application by Taguchi method and utility concept, *Energy and Buildings*, Vol. 82, No. 15, pp. 296-309, 2014.
[31] I. Kotcioglu, A. Cansiz, M. N. Khalaji, Experimental investigation for optimization of design parameters in a rectangular duct with plate-fins heat exchanger by Taguchi method, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 50, No. 1, pp. 604-613, 2013.
[32] Y. Khanjari, F. Pourfayaz, A. Kasaeian, Numerical investigation on using of nanofluid in a water-cooled photovoltaic thermal system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 122, No. 16, pp. 263-278, 2016.
[33] M. Sardarabadi, M. Passandideh-Fard, S. Z. Heris, Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units), *Energy*, Vol. 66, No. 3, pp. 264-272, 2014.
[34] Z. Qiu, X. Zhao, P. Li, X. Zhang, S. Ali, J. Tan, Theoretical investigation of the energy performance of a novel MPCM (Microencapsulated Phase Change Material) slurry based PV/T module, *Energy*, Vol. 87, No. 9, pp. 686-698, 2015.
[35] B. Joy, J. Philip, R. Zachariah, Investigations on serpentine tube type solar photovoltaic/thermal collector with different heat transfer fluids: Experiment and numerical analysis, *Solar Energy*, Vol. 140, No. 18, pp. 12-20, 2016.
[36] P. Gang, F. Huide, Z. Tao, J. Jie, A numerical and experimental study on a heat pipe PV/T system, *Solar Energy*, Vol. 85, No. 5, pp. 911-921, 2011.