ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

محمد حسينزاده1، على سالارى2، محمد سردار آبادى3، محمد پسنديده فرد4\*، عليرضا اكبرزاده5

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 پستى mpfard@um.ac.ir ،1111-91775

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این مطالعه عملکرد یک سیستم فتوولتاییک حرارتی به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شده است. در بررسی عددی، با استفاده از روش	مقاله پژوهشی کامل
تاگوچی، بهینهترین محیط و زمان کارکرد سیستم و همچنین مناسبترین پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم به منظور افزایش بازده آن در	دریافت: 09 اردیبهشت 1396
یک محیط و زمان مشخص، تعیین شده است. سپس با استفاده از پارامترهای بهینه تعیین شده در تحلیل تاگوچی، عملکرد سیستم به صورت	پذیرش: 11 تیر 1396
-	ارائه در سایت: 17 مرداد 1396
آزمایشگاهی و از دو دیدگاه انرژی و اگزرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. در بررسی آزمایشگاهی با ساخت بستر کامل آزمایشگاهی، عملکرد	<i>کلید واژگان:</i>
یک واحد فتوولتاییک معمولی و یک سیستم فتوولتاییک حرارتی با سیال کاری آب، با یکدیگر مقایسه شده است. آزمایشها در دانشگاه فردوسی	سیستم فتوولتاییک حرارتی
مشهد با عرض جغرافیایی 36 درجه و طول جغرافیایی 59 درجه و در یک روز معین در مرداد ماه انجام شده است. تایج بررسی عددی سیستم	روش تاگوچی
فتوولتاییک حرارتی نشان میدهد، مؤثرترین پارامتر بر عملکرد سیستم، دمای سیال خنککننده ورودی به کلکتور میباشد و بهینهترین مقدار آن	تحلیل انرژی
برای بهمود عملکرد سستم فتوهلتاییک حرارتی (20 حرافت و در یک روز معین در مرداد ماه انجام شده است. آزمایش از دانشگاه فردوسی مشهد با	تحلیل اگزرژی
6.27 درصد می باشد. نتایج بررسی آزمایشگاهی بیان میکند، میانگین انرژی الکتریکی خروجی از سیستم فتوولتاییک حرارتی حدود 6.27 درصد بیشتر از واحد فتوولتاییک معمولی می باشد. همچنین میانگین بازدههای انرژی و اگزرژی حرارتی در طول آزمایش برای سیستم فتوولتاییک حرارتی به ترتیب 34.12 و 0.27 درصد می باشد.	

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

## Mohammad Hosseinzadeh, Ali Salari, Mohammad Sardarabadi, Mohammad Passandideh-Fard<sup>\*</sup>, Alireza Akbarzadeh

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

ABSTRACT

#### 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 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 60.02 %. 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.

خورشیدی دریافت میکند [2]. واحد فتوولتاییک<sup>۱</sup> (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- 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

[ Downloaded from mme.1



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Photovoltaic unit

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

[5,4]. بنابراین بخش قابل توجهی از تابش ورودی به حرارت تبدیل میشود و در نتیجه دمای سطح سلولهای فتوولتاییک افزایش می یابد؛ این امر سبب کاهش بازده الکتریکی سیستم شده و به ساختمان آن آسیب می زند [6,4]. لازم به ذکر است، بازده الکتریکی واحدهای فتوولتاییک تک کریستاله<sup>۱</sup> و چند کریستاله<sup>۲</sup> سیلیکونی با افزایش هر یک درجه دمای سلول، به میزان 0.45 درصد کاهش می یابد [7]. بنابراین خنککاری سلولهای فتوولتاییک امری ضروری است. با افزودن کلکتور<sup>۲</sup> حرارتی به یک واحد فتوولتاییک، انرژی سبب کاهش دمای سلولهای فتوولتاییک و در نتیجه افزایش طول عمر سیستم و نیز افزایش بازده سیستم می شود. این سیستمها به عنوان سیستمهای فتوولتاییک حرارتی (PVT)

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 تقسیم بندی کرد. مهم ترین عوامل وابسته به ساختمان سیستم شامل نوع سلول فتوولتاییک [8]، نوع و ساختار کلکتور حرارتی [9] و نوع سیال خنککننده [01] می باشند. 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 مهم ترین عوامل مستقل از ساختمان سیستم نام برد. بررسی عوامل مستقل از ساختمان سیستم فتوولتاییک حرارتی به منظور تعیین بهینه ترین مکان و به منظور تعیین بهینه ترین عملکرد سیستم در یک محیط مشخص، به گونهای که سیستم بیشترین بازده را داشته باشد، لازم می باشد.

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 55-55 درصد و 15-12 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

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. تريپاناگنستپولس و همكاران [18] به صورت آزمايشگاهی، اثر پوشش شیشهای و بازتابنده تابش پخش<sup>4</sup> 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 می یابد 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 تک کریستاله 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<sup>6</sup> 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<sup>ع</sup>، 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

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

و بازده اگزرژی کلی سیستم را کاهش میدهد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Monocrystalline

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Polycrystalline

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Collector

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Diffuse reflector <sup>5</sup> Thermosyphon

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Packing factor

روش تاگوچی، بهینهترین محیط و زمان کارکرد سیستم و همچنین مناسب ترین پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم به منظور افزایش بازده سیستم در یک محیط و زمان مشخص، تعیین می شوند 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 خنک کننده 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 می گیرد. 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 فتوولتاييک معمولی) میباشد. در سيستم فتوولتاييک 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 می گیرند. 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 می اشد (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 کالیبره شده با استوانه مدرج اندازه گیری می شود. دمای سیال ورودی و خروجی کلکتور و همچنین دمای سلولهای فتوولتاييک، توسط ترموکوپلهای<sup>۲</sup> از نوع کی<sup>۳</sup> اندازه گیری میشوند که به منظور بالا بردن دقت اندازه گیری دما، این ترمو کوپل ها در داخل لوله نصب میشوند. لازم به ذکر است، خروجی این ترموکوپل،ها توسط یک دیتالاگر ٔ چهار کاناله (Testo-177-T4,UK) ذخیره می شود. دمای محیط توسط دماسنج جیوهای نصب شده در نزدیک سیستمها اندازه گیری می شود. جهت اندازه گیری جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز، از مولتی متر<sup>6</sup> دیجیتال با قابلیت ذخیرهسازی دادهها استفاده شده است. در این دستگاه مقدار تابش کلی خورشید به کمک یک پیرانومتر<sup>۶</sup> که به صورت موازی با سطح سیستم فتوولتاییک نصب شده است، اندازه گیری می شود. آزمایش ها در دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیای 36 درجه و طول جغرافیایی 59 درجه انجام

Table 1 Properties of photovoltai	Table 1 Properties of photovoltaic unit.			
ایط آزمایش استاندارد)	واحد فتوولتاييک (تحت شر			
تک کریستاله سیلیکونی	نوع			
$630 \times 540 \times 28$	ابعاد واحد فتوولتاييک (mm)			
2.57	جريان اتصال كوتاه (A)			
21.6	ولتاژ مدار باز (V)			
0.726	ضریب انباشتگی <sup>۷</sup>			
16	بازده سلول فتوولتاييک (%)			
15	بازده واحد فتوولتاييک (%)			
40	توان نامی (W)			
1	ضريب پوشش كلكتور			

محمد حسینزادہ و ھمکاران



Fig. 1 A side view of the experimental set up **شکل 1** نمایی جانبی از بستر آزمایشگاهی.

شده است. دادههای آزمایش در یک روز معین در مرداد ماه از ساعت 9:30 تا 15:30، در فاصله زمانی 30 دقیقه جمع آوری شده است.

#### 3- مدل هندسي

**شكل 2** مدل هندسى .

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<sup>۸</sup> طراحی شده است. مدل هندسی موردنظر شامل پوشش شیشهای (1)، یک لایه اتیلن-وینیل استات<sup>۹</sup> (2)، سلولهای فتوولتاييك (3)، يك لايه اتيلن-وينيل استات (4)، يك لايه تدلار پلىوينيل فلورايد (5)، صفحه جاذب مسى (6)، كلكتور مارپيچ (7) و پلي يورتان (عایق حرارتی) (8) میباشد که در شکل 2 مشاهده می شود. لازم به ذکر است، ابعاد و خواص ترموديناميكي اجزاى مختلف سيستم فتوولتاييك حرارتی موردنظر، به ترتیب در جدولهای 2 و 3 بیان شده است



Fig. 2 Geometric Model.

11 Polyurethane

Rotameter <sup>2</sup> Thermocouple

K

Data logger

<sup>5</sup> Multimeter

<sup>6</sup> Pyranometer

<sup>7</sup> Filled factor

SolidWorks

<sup>9</sup> Ethylene-vinyl acetate

Tedlar polyvinyl fluoride

جدول 2 ابعاد اجزاى مختلف سيستم فتوولتاييک حرارتى. Table 2 Dimensions of different components of the photovoltaic thermal system.

nerma system.	
ابعاد (mm)	اجزا
$630 \times 540 \times 3$	پوشش شیشهای
$630 \times 540 \times 0.5$	اتيلن-وينيل استات
$62.5\times125\times0.3$	سلول فتوولتاييك
$630 \times 540 \times 0.1$	تدلار پلىوينيل فلورايد
$630 \times 540 \times 0.4$	صفحه جاذب مسى
10	قطر داخلى كلكتور
12	قطر خارجي كلكتور
30	ضخامت عايق حرارتي

جدول 3 خواص ترموديناميكي اجزاى مختلف سيستم فتوولتاييك حرارتي [22]. **Table 3** Thermodynamic properties of different components of the photovoltaic thermal system [22].

8	α	τ	$c_p$	k	ρ	اجزا
0.90	0.05	0.9	480	1.1	2200	پوشش شیشهای
0.85	0	100	2090	0.35	960	اتيلن-وينيل استات
0.96	0.85	0	700	148	2330	سلول فتوولتاييك
0.9	0.5	0	1250	0.2	1200	تدلار پلىوينيل فلورايد
0.1	0.9	0	385	398	8920	مس

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 حاكم

#### 4-1- بررسی عددی

همان گونه که بیان می شود، جریان سیال در داخل کلکتور به صورت آرام، پایا و غیرقابل تراکم می باشد. در این بررسی، معادلات حاکم بر حوزه حل نیز معادلات سه بعدی پیوستگی، مومنتم و انرژی می باشند که به ترتیب توسط رابطه های (1-3) بیان می شوند:

$$\nabla(\rho \vec{V}) = 0 \tag{1}$$
$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{V}) \tag{2}$$

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

در رابطههای (1-3)،  $\rho$  چگالی سیال،  $\vec{V}$  سرعت سیال، P فشار سیال،  $\mu$  لزجت دینامیکی<sup>۱</sup> سیال،  $c_p$  ظرفیت گرمایی ویژه سیال، T دمای سیال و k ضریب هدایت حرارتی<sup>۲</sup> سیال می،اشند. در بررسی عددی صورت گرفته، به منظور تعیین انتقال حرارت اتلافی ناشی از حضور باد، ضریب انتقال حرارت جابجایی توسط رابطه (4) تعیین می شود [23]:

$$h_{\rm w} = 5.7 + 3.8 \cdot V_{\rm w} \tag{4}$$

در رابطه (4)، h<sub>w</sub> 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]:

(5)

مى باشند.

## 4-2- تحليل ترموديناميكي

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.

در رابطه (5)،  $T_{\rm sky}$  دمای آسمان به عنوان یک جسم سیاه و  $T_{\rm sky}$  دمای محیط

#### 4–2–1– تحليل انرژى

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

میباشند. ضریب انباشتگی بیانگر حداکثر بازده سیستم فتوولتاییک بوده و توسط رابطه (10) محاسبه می شود [25]:

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$
(10)  
 $c_{c}$  (10),  $P_{\max}$  بیشترین توان خروجی از سیستم فتوولتاییک میباشد  
 $P_{\max} = V_{\max} \cdot I_{\max}$ (11)  
(11)

در رابطه (11)، *W*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* تا *z* می میشد که در رابطه (12) بیان شده است. بنابراین بازده انرژی کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی می تواند به صورت تابعی از بازدههای انرژی الکتریکی و گرمایی سیستم نوشته شود [21].

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

در رابطه (12)،  $\eta_{\rm et}$  و  $\eta_{\rm pvt}$  به ترتیب بازده انرژی الکتریکی، گرمایی و  $\dot{E}_{
m th}^{\prime\prime}$ ،  $\eta_{
m el}$ ، (12) سیستم فتوولتاییک حرارتی،  $A_{
m pv}$  مساحت سلولهای فتوولتاییک

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Dynamic viscosity

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Thermal conductivity

نرخ انرژی گرمایی خروجی بر واحد سطح کلکتور،  $\ddot{F}_{el}^{'i}$  نرخ انرژی الکتریکی خروجی بر واحد سطح سلولهای فتوولتاییک و  $\ddot{F}_{sur}^{''}$  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 ( $A_{pv}/A_c$ ) 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:

$$\eta_{\rm el} = \frac{E_{\rm el}}{\dot{E}_{\rm sun}} = \frac{V_{\rm oc} \cdot I_{\rm sc} \cdot FF}{\dot{G} \cdot A_{\rm c} \cdot \tau_{\rm gl} \cdot \alpha_{\rm cell}}$$
(13)  
$$\eta_{\rm th} = \frac{\dot{E}_{\rm th}}{\dot{E}_{\rm curr}} = \frac{\dot{E}_{\rm mass,out} - \dot{E}_{\rm mass,in}}{\dot{E}_{\rm curr}}$$

$$=\frac{\ddot{m}_{f}\cdot c_{p,f}\cdot (T_{f,\text{out}}-T_{f,\text{in}})}{\dot{G}\cdot A_{c}\cdot \tau_{gl}\cdot \alpha_{cell}}$$
(14)

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

 $\eta_{\rm el} = \eta_{\rm r} \cdot [1 - 0.0045 \cdot (T_{\rm cell} - 298.15)]$  (15) در رابطه (15)،  $T_{\rm cell}$  دمای سلولهای فتوولتاییک و  $\eta_{\rm r}$  بازده انرژی الکتریکی

در شرایط استاندارد میباشند.

## 4–2–2– تحليل اگزرژی

(19)

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:  $Ex_{sun} + Ex_{mass,in} = Ex_{el} + Ex_{mass,out} + Ex_{loss}$  (16) در رابطه (16)،  $Ex_{sus}$  نرخ اگزرژی اتلافی میباشد. همچنین  $Ex_{sun}$ نشاندهنده اگزرژی خورشید است که توسط رابطه (17) تعیین میشود [27]:

$$\dot{Ex}_{sun} = \dot{G} \cdot A_{c} \cdot \left(1 - \frac{T_{a}}{T_{sun}}\right)$$
(17)

در رابطه (17)، T<sub>sun</sub> دمای معادل خورشید به عنوان یک جسم سیاه است که تقریباً برابر 5800 درجه کلوین می اشد. همچنین نرخ تغییر اگزرژی جرم عبوری از کلکتور توسط رابطه (18) قابل تعیین است [27]:

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

در رابطه (18)،  $h_{out} = h_{out}$  به ترتیب آنتالپی جریان جرم در ورودی و خروجی کلکتور و همچنین  $h_{out}$  و  $h_{out}$  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]:

$$x_{\rm el} = \dot{E}_{\rm el}$$

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]:

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

در رابطه (20)، e<sub>th</sub> ،e<sub>el</sub> و <sub>PPV</sub> به ترتیب بازده اگزرژی الکتریکی، گرمایی و کلی سیستم فتوولتاییک حرارتی، *Ėx*"th نرخ اگزرژی گرمایی خروجی بر واحد سطح کلکتور، *Ėx*"el نرخ اگزرژی الکتریکی خروجی بر واحد سطح

سلولهای فتوولتاییک و Ēx"sun اگزرژی خورشید بر واحد سطح کلکتور می-باشد. با توجه به روابط بیان شده بازدههای اگزرژی الکتریکی و گرمایی سیستم فتوولتاییک حرارتی به ترتیب توسط رابطههای (21) و (22) تعیین میشوند:

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

$$\varepsilon_{\rm th} = \frac{Jx_{\rm th}}{\dot{E}x_{\rm sun}} = \frac{Jx_{\rm mass,out}}{\dot{E}x_{\rm sun}} \frac{Jx_{\rm mass,in}}{\dot{E}x_{\rm sun}} = \frac{\dot{m}_{\rm f} \cdot c_{p,\rm f} \left[ \left( T_{\rm f,out} - T_{\rm f,in} \right) - T_{\rm a} \ln\left(\frac{T_{\rm f,out}}{T_{\rm f,in}}\right) \right]}{\dot{G} \cdot A_{\rm c} \cdot \left(1 - \frac{T_{\rm a}}{T_{\rm sun}}\right)}$$
(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) باید پارامترهای مؤثر بر مسئله موردنظر و حالتهای مختلف آنها (سطحها) حداقل تعداد آزمایشهای موردنیاز برای مسئله موردنظر تعیین میشود [30]. سپس آرایه متعامد مناسب برای مسئله موردنظر تعیین و آزمایشهای موردنیاز مشخص میشوند.

 $NE = 1 + NV \cdot (NL - 1)$  (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 (42) بدست میآید [31].

$$S/N = -10 \cdot \log(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{y_i^2})$$
(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<sup>۱</sup> استفاده شده است. عدد رینولدز جریان سیال در داخل

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.31.5

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 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<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است. در بررسیهای صورت گرفته از حل *ک*ننده بر پایه فشار<sup>۲</sup> استفاده شده است. همچنین سرعت و فشار با استفاده از طرح سیمپل<sup>۳</sup> به یکدیگر وابسته شدهاند. به منظور همگرایی بهتر حل عددی، تفاضلی کردن ترمهای جابجایی و پخش بر اساس طرح مرتبه دوم آپویند<sup>۴</sup> 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<sup>۵</sup> استفاده شده است. همچنین برای دیوارههای کلکتور نیز از شرط مرزی بدون لغزش<sup>9</sup> 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 5-10، 6-10، 10-8 انتخاب انتخاب شده است. درسیستمهای فتوولتاییک حرارتی، با توجه به کم بودن سرعت سیال در داخل کلکتور، نیروی شناوری<sup>۷</sup> 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<sup>^</sup> سیستم صفر فرض شده است. - آسمان به عنوان یک جسم سیاه<sup>و</sup> با دمای T<sub>sky</sub> میباشد.

#### 6-2- استقلال نتایج از شبکهبندی حوزه حل

در این مطالعه به منظور شبکهبندی حوزه حل از نرمافزار انسیس ورکبنچ<sup>۱۰</sup> استفاده شده است. لازم به ذكر است، به منظور تحليل دقيقتر نتايج، 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 نتايج از شبكهبندى حوزه حل، شبكههايى با 1، 2، 2.9، 3.8، 4.7 و 5.6 ميليون سلول مطالعه شده است. در این بررسی، میانگین دما و سرعت سیال در خروجی کلکتور به ازای شبکهبندیهای مختلف حوزه حل بررسی شده است. همان گونه که در شکل 4 مشاهده می شود، با افزایش تعداد سلول ها، اختلاف نتايج كاهش مىيابد به گونهاى كه با افزايش 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 سانتی گراد و دبی جرمی سیال خنک کننده 30 کیلوگرم بر ساعت لحاظ شده است.



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.



**شكل 4** بررسی استقلال از شبكەبندی.

#### 7- نتايج

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

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.31.5

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Laminar <sup>2</sup> Pressure based solver

<sup>3</sup> Simple

Second order upwind

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Out flow <sup>6</sup> No slip

Buoyancy force

Ohmic losses

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Black body <sup>10</sup> ANSYS Workbench



3

800

5

30

30

50

40

30

4

1000

7

35

35

60

Table 4 Parameters and their levels.

56 Experimental 52 Numerical 48 2  $T_{out} (^{\circ}C)$ 2 44 40 36 32 12:00 12:30 11:00 11:30 13:00 14:30 10:30 13:30 14:00 15:00 09:30 10:00 Time

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

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

•

15:30



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 زماني 30 دقيقه جمع آوري شده است. بررسي شكل 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.

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

در این مطالعه به کمک نرمافزار مینی تب 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، ميزان تشعشع جذب شده توسط سلول فتوولتاييک، 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 می شوند. 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 بهينه سيستم فتوولتاييک حرارتي موردنظر، 16 آزمايش ميباشد. 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.

سطح		المترها	عنمانها
2	1	پارستر ت	0.9-
600	400	تابش خورشيد ( <del>3 (</del>	А
3	1	سرعت باد ( <del>()</del>	В
25	20	دمای محیط (℃)	С
25	20	دمای ورودی سیال (℃)	D

دبی جرمی سیال (<sup>kg</sup>/<sub>hr</sub>)

**جدول 5** طرح آزمایشها.

Е

جدول 4 پارامترها و سطحهای آنها.

Table 5 Experimental plan.

		پارامتر			شماره
Е	D	С	В	А	آزمايش
30	20	20	1	400	1
40	25	25	3	400	2
50	30	30	5	400	3
60	35	35	7	400	4
60	30	25	1	600	5
50	35	20	3	600	6
40	20	35	5	600	7
30	25	30	7	600	8
40	35	30	1	800	9
30	30	35	3	800	10
60	25	20	5	800	11
50	20	25	7	800	12
50	25	35	1	1000	13
60	20	30	3	1000	14
30	35	25	5	1000	15
40	30	20	7	1000	16

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

81

جدول 8 بيان شده است. نتايج نشان مىدهد، دبى بهينه سيستم فتوولتاييک حرارتی 30 کیلوگرم بر ساعت میباشد که مطابق نتایج بررسی تجربی انجام شده در مطالعات پیشین می باشد [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 مىباشد. همچنين پارامترى كه اختلاف مقادير سيگنال به نويز 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 سانتی گراد میباشد. بنابراین، کاهش دمای سیال ورودی به کلکتور سبب افزایش بازده سیستم می شود. لازم به ذکر است، با توجه به رابطه (14)، دمای سیال خنککننده ورودی به کلکتور بر روی بازده حرارتی سیستم تأثیرگذار می باشد. بنابراین، میزان خنکسازی سلول های 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 می شوند.

#### 7-1-7- 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.

				3	
سطح			پارامتر		
C	А	В	С	D	Е
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

بارامتر.	هر ۽	بهينه	ہ سطح	ل 8	جدوا
----------	------	-------	-------	-----	------

Table 8 Opti	mum level of e	ach parameter.		
E	D	С	В	А
30	20	35	1	800



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

مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دورہ 17 شمارہ 8

در شکل 9 بیان شده است. همان گونه که در شکل 9 مشاهده می شود، 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 می یابد.

## 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 30:9 تا دورشید و دمای محیط در طول آزمایش اندازه گیری 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



تفکل 8 تغییرات دمای سلولهای فتوولتاییک.



Fig. 9 Temperature variations of the fluid in the collector. شكل 9 تغييرات دماى سيال داخل كلكتور.



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– تحليل انرژى

همان گونه 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. همان گونه که مشاهده میشود، با نزدیک شدن به ظهر خورشیدی به دلیل افزایش انرژی تابشی ورودی به سیستم، انرژی الکتریکی خروجی از آزمایش برای واحد فتوولتاییک و سیستم فتوولتاییک حرارتی به ترتیب آزمایش برای واحد فتوولتاییک و سیستم فتوولتاییک حرارتی به ترتیب الکتریکی خروجی از سیستم فتوولتاییک حرارتی حدود ۲.5 درصد بیشتر از واحد فتوولتاییک معمولی میباشد. بنابراین، با افزودن کلکتور حرارتی به واحد فتوولتاییک، انرژی الکتریکی خروجی از سیستم افزایش قابل ملاحظهای ندارد فتوولتاییک، انرژی الکتریکی خروجی از سیستم 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

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.

فتوولتاييک و سيستم فتوولتاييک حرارتي با استفاده از رابطه (13) تعيين و در شکل 12 بیان شده است. همانگونه که مشاهده می شود، با نزدیک شدن به ظهر خورشیدی، به دلیل افزایش دمای سلولهای فتوولتاییک و عملکرد پايين سلولهای فتوولتاييک، نرخ افزايش انرژی الکتريکی 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 مىباشند كه نشان دهنده اين است كه 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 سلول های 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 ذكر است، بيشترين بازده انرژى كلى سيستم 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 الكتريكي 4-13 درصد و براي بازده حرارتي 25-75 درصد مي باشد.

### 7–2–2– تحليل اگزرژی

تحليل اگزرژی سيستمهای ترموديناميکی به منظور تعيين 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 1**2 مقادیر بازده انرژی الکتریکی خروجی برای واحد فتوولتاییک و سیستم فتوولتاييک حرارتي در طول آزمايش.

**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.

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

فتوولتاييک و سيستم فتوولتاييک حرارتي برابر انرژي الکتريکي خروجي از آنها میباشد. بنابراین با توجه به مطالب بیان شده، میانگین اگزرژی الكتريكي خروجي سيستم فتوولتاييك حرارتي نسبت به واحد فتوولتاييك بیشتر میباشد. ولی باید توجه داشت که چون اگزرژی ورودی به سیستمها با انرژی ورودی یکسان نمی باشد، بازده انرژی الکتریکی با بازده اگزرژی الكتريكي سيستمها با يكديگر متفاوت است. لازم به ذكر است، بازده اگزرژي الكتريكي واحد فتوولتاييك و سيستم فتوولتاييك حرارتي با استفاده از رابطه (21) تعیین و در شکل 13 نشان داده شده است. همان گونه در شکل 13 مشاهده می شود، مشابه بازده انرژی الکتریکی، با نزدیک شدن به ظهر خورشيدى بازده اگزرژى الكتريكى كاهش مىيابد به گونهاى كه كمترين 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 فتوولتاييک حرارتي به ترتيب 10.19 و 10.84 درصد ميباشد.

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. همان گونه که در جدول 10 مشاهده می شود، 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 سيستم فتوولتاييك حرارتي مي شود.

#### 8- نتيجه گيري

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.

شكل 13 مقادير بازده اگزرژی الكتريكی خروجی برای واحد فتوولتاييك و سيستم فتوولتاييک حرارتي در طول آزمايش.

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

مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دورہ 17 شمارہ 8

and total energy enner	enej of the f + f bjbtem e	anng me test perioa
بازدہ اگزرژی کلی	بازده اگزرژی حرارتی	اگزرژی حرارتی خروجی
(%)	(%)	$\left(\frac{W}{m^2}\right)$
11.57	0.72	6.33

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 می باشد.

- 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 علايم

- (m<sup>2</sup>) مساحت A
- (Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>) ظرفیت گرمایی ویژه  $c_p$ 
  - . Ė نرخ انرژی (W)
  - Ėx نرخ اگزرژی (W)
  - FF ضریب انباشتگی
  - (Wm<sup>-2</sup>) نرخ انرژی تابشی (Ö
    - (Jkg<sup>-1</sup>) آنتالپی (h
      - I جریان (A)
- (Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>) ضریب هدایت حراتی k
  - ش دبی جرمی (kgs<sup>-1</sup>)
  - n تعداد تکرار هر آزمایش
  - NE حداقل تعداد آزمایش
    - NL تعداد سطحها
    - NV تعداد پارامترها
  - (kW) توان الكتريكي خروجي P
    - S آنترویی (Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>)
      - T دما (K)
      - (--) ---
      - t زمان (s) V ملتا: (V)
      - V ولتاژ (V)
      - y خروجی

#### علائم يونانى

- (%) بازده انرژی  $\eta$
- <sup>ع</sup> بازده اگزرژی (%)
  - *ρ* چگالی (kgm<sup>-3</sup>)
- (kgm<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>) لزجت دینامیکی سیال  $\mu$ 
  - قابليت عبور تابش خورشيد au
  - - **7** گرادیان

## زيرنويسها

- a محيط
- c كلكتور
- cell سلول خورشیدی eff مۇث
  - eff مؤثر el الکتریکی
  - f سيال
  - ین g تولید شدہ
  - gl پوشش شیشه
  - i شمارنده
  - in <sub>ورودی</sub>
    - loss اتلاف
      - mass جرم
    - max يشينه
    - ۰۰۰ مدار باز OC مدار باز
    - وبر out خروجی
- pv سيستم فتوولتاييک
- pvt سيستم فتوولتاييک حرارتي
  - r شرایط استاندارد
    - ۔ SC اتصال کوتاہ
      - sky آسمان
      - sun خورشيد
      - th حرارتی
        - w باد

#### 10- مراجع

- 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
- 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

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.31.5

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
- [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.

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