



## بررسی پارامتری یک سیستم فتوولتائیک حرارتی بر پایه نانوسیال با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

محمد حسین زاده<sup>1</sup>، علی سالاری<sup>2</sup>، محمد سردارآبادی<sup>3</sup>، محمد پسندیده فرد<sup>4\*</sup>

- 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
  - 4- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
- \* مشهد، صندوق پستی 1111-91775، mpfard@um.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 24 تیر 1396  
پذیرش: 30 مرداد 1396  
ارائه در سایت: 17 شهریور 1396  
کلید واژگان:  
سیستم فتوولتائیک حرارتی  
نانوسیال  
دینامیک سیالات محاسباتی  
تحلیل ترمودینامیکی

در این مطالعه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، اثر استفاده از سیال کاری آب خالص و نانوسیال اکسید روی-آب بر عملکرد یک سیستم فتوولتائیک حرارتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین، اثر پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم بر بازده الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی بر پایه نانوسیال اکسید روی-آب بررسی می‌شود. پارامترهای بررسی شده در این مطالعه، میزان تشعشع جذب شده توسط سلول‌های فتوولتائیک، سرعت باد، دمای محیط، دمای سیال خنک‌کننده ورودی به کلکتور حرارتی، دبی جرمی سیال خنک‌کننده و درصد جرمی نانوذرات در نانوسیال اکسید روی-آب می‌باشند. در این پژوهش با ساخت بستر کامل آزمایشگاهی، نتایج مدل عددی سه‌بعدی با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی می‌شود. آزمایش‌ها در دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیایی 36 درجه و طول جغرافیایی 59 درجه و در یک روز معین در مرداد ماه انجام می‌شود. نتایج بررسی عددی نشان می‌دهد، بازده حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری نانوسیال با افزایش تشعشع جذب شده توسط سلول‌های فتوولتائیک، دمای محیط، دبی جرمی سیال خنک‌کننده و درصد جرمی نانوذرات در نانوسیال اکسید روی-آب زیاد می‌شود. در حالی که افزایش سرعت باد و دمای سیال خنک‌کننده ورودی به کلکتور حرارتی سبب کاهش بازده حرارتی سیستم می‌شوند. همچنین، تغییرات پارامترهای بررسی شده در این مطالعه اثر اندکی بر بازده الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی دارد. افزایش نسبی بازده الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری نانوسیال اکسید روی-آب با درصد جرمی 12 درصد نسبت به آب خالص به ترتیب 0.28 و 12.58 درصد است.

## Parametric Analysis of a Nanofluid Based Photovoltaic Thermal System, Using Computational Fluid Dynamic

Mohammad Hosseinzadeh, Ali Salari, Mohammad Sardarabadi, Mohammad Passandideh-Fard\*

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 15 July 2017  
Accepted 21 August 2017  
Available Online 08 September 2017

### Keywords:

Photovoltaic Thermal System  
Nanofluid  
Computational Fluid Dynamic  
Thermodynamic Analysis

### ABSTRACT

In this study, the effects of using pure water and Zinc oxide/water nanofluid as working fluids on the performance of a photovoltaic thermal system are evaluated using computational fluid dynamic approach. Moreover, effects of the parameters that are independent of the system design on the electrical and thermal efficiencies of the photovoltaic thermal system with Zinc oxide/water nanofluid are investigated. The studied parameters are: absorbed solar irradiation, wind speed, ambient temperature, coolant inlet temperature, coolant mass flow rate, and nanoparticles mass fraction in the Zinc oxide/water nanofluid. In this study, using the designed setup, the three-dimensional numerical model is validated by comparing the simulation results with those of the experiments. The experiments are performed on a selected day in August at the Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (Latitude: 36° and Longitude: 59°). Based on the numerical results, the thermal efficiency of the photovoltaic thermal system with Zinc oxide/water nanofluid is enhanced by increasing the absorbed solar irradiation, ambient temperature, coolant mass flow rate, and nanoparticles mass fraction. However, increasing the wind speed and coolant inlet temperature decreases the thermal efficiency of the system. Moreover, the considered parameters in this study have slight effects on the electrical efficiency of the photovoltaic thermal system. The relative increase of the electrical and thermal efficiencies of the photovoltaic thermal system with Zinc oxide/water nanofluid with 12 % by weight compared to that of pure water is 0.28 % and 12.58 %, respectively.

### 1- مقدمه

مستقیم انرژی تابشی خورشید به انرژی الکتریکی است. با توجه به بازده پایین این سیستم (4-17 درصد)، بخش قابل توجهی از انرژی تابشی ورودی تبدیل به حرارت می‌شود که دمای سلول‌های فتوولتائیک را افزایش می‌دهد

سیستم فتوولتائیک<sup>1</sup> یکی از انواع سیستم‌های خورشیدی به منظور تبدیل

<sup>1</sup> Photovoltaic

Please cite this article using:

M. Hosseinzadeh, A. Salari, M. Sardarabadi, M. Passandideh-Fard, Parametric Analysis of a Nanofluid Based Photovoltaic Thermal System, Using Computational Fluid Dynamic, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 195-204, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

و آزمایشگاهی، اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد یک سیستم فتولتاییک حرارتی با سیال کاری آب را مورد مطالعه قرار دادند. پارامترهای بررسی شده در مطالعه آن‌ها پوشش شیشه‌ای، بازه سلول فتولتاییک، ضریب پوشش، نسبت جرم آب به سطح کلکتور، تابش خورشید، سرعت باد و دمای محیط بود. آن‌ها نتیجه گرفتند، افزایش بازه سلول، ضریب پوشش، نسبت جرم آب به سطح کلکتور و سرعت باد، پارامترهای مطلوب برای سیستم بدون پوشش شیشه‌ای هستند. در حالی که افزایش تابش خورشید و دمای محیط، پارامترهای مطلوب برای سیستم با پوشش شیشه‌ای می‌باشند.

پراکندگی<sup>3</sup> نانوذرات فلزی در یک سیال، ضریب انتقال حرارت هدایتی و جابجایی سیال را افزایش می‌دهد [12]. بنابراین، استفاده از نانوسیال به عنوان سیال کاری در یک سیستم فتولتاییک حرارتی می‌تواند یک روش مؤثر به منظور افزایش بازه سیستم باشد. شایان ذکر است، استفاده از نانوسیال در یک سیستم فتولتاییک حرارتی با محدودیت‌هایی شامل هزینه بالای نانوذرات، ناپایداری نانوسیال و افزایش افت فشار همراه است [13, 14]. تاکنون مطالعاتی به منظور بررسی اثر استفاده از نانوسیال‌های مختلف بر عملکرد سیستم‌های فتولتاییک حرارتی صورت گرفته است. الشمانی و همکاران [15] به صورت آزمایشگاهی، اثر نانوسیالات اکسید سیلیسیم (SiO<sub>2</sub>)-آب، اکسید تیتانیوم (TiO<sub>2</sub>)-آب، کاربید سیلیسیم (SiC)-آب را بر روی عملکرد یک سیستم فتولتاییک حرارتی مطالعه کردند. آن‌ها مشاهده کردند، سیستم با سیال کاری نانوسیال کاربید سیلیسیم بیشترین بازه در مقایسه با سایر نانوسیالات بررسی شده دارد. آن‌ها همچنین مشاهده کردند، بازه الکتریکی و کلی سیستم با سیال کاری نانوسیال کاربید سیلیسیم به ترتیب 13.52 درصد و 81.73 درصد است. المیر و همکاران [16] در یک مطالعه عددی، عملکرد یک سیستم فتولتاییک حرارتی با سیال کاری نانوسیال اکسید آلومینیوم (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)-آب را بررسی کردند. آن‌ها همچنین اثر درصد حجمی نانوذرات و رینولدز جریان را بر روی عملکرد سیستم مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند، تغییرات عدد ناسلت<sup>4</sup> میانگین، نسبت به درصد حجمی نانوذرات تقریباً خطی است. آن‌ها همچنین مشاهده کردند، در رینولدز جریان پایین، افزایش درصد حجمی نانوذرات از 0 درصد تا 10 درصد، نرخ انتقال حرارت را حدود 27 درصد افزایش می‌دهد. رجب و همکاران [17] در یک بررسی عددی، اثر استفاده از نانوذرات اکسید آلومینیوم، و مس (Cu) با درصدهای جرمی 0.1 درصد، 0.2 درصد و 0.4 درصد را بر روی بازه سیستم فتولتاییک حرارتی بررسی کردند. سیال پایه نانوسیالات در مطالعه آن‌ها آب و اتیلن گلیکول<sup>5</sup> بود. بررسی آن‌ها نشان داد، استفاده از آب به عنوان سیال پایه سبب افزایش بازه سیستم در مقایسه با اتیلن گلیکول می‌شود. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند، سیستم با سیال کاری نانوسیال مس-آب با درصد جرمی 0.4 درصد، بیشترین بازه الکتریکی و حرارتی را در مقایسه با سایر نانوسیالات بررسی شده دارد. سردارآبادی و همکاران [18] به صورت عددی و آزمایشگاهی، عملکرد یک سیستم فتولتاییک حرارتی با نانوسیالات اکسید آلومینیوم-آب، اکسید تیتانیوم-آب و اکسید روی (ZnO)-آب با درصد جرمی 0.2 درصد را مطالعه کردند. بررسی آن‌ها نشان داد، سیستم‌های با نانوسیالات اکسید تیتانیوم-آب و اکسید روی-آب بیشترین بازه الکتریکی را دارند. آن‌ها همچنین مشاهده کردند، سیستم با نانوسیال اکسید روی-آب بیشترین بازه حرارتی را دارد.

[1]. این امر سبب افت ولتاژ مدار باز<sup>1</sup> و در نتیجه کاهش بازه سیستم می‌شود [2]. همچنین، افزایش دمای سلول‌های فتولتاییک به ساختمان سیستم آسیب زده و عمر مفید آن را کاهش می‌دهد. با افزودن کلکتورهای حرارتی به سیستم فتولتاییک و خنک‌سازی سیستم، می‌توان مشکلات ناشی از افزایش دمای سلول را تا حدی کاهش داد. این سیستم‌ها نیز سیستم‌های فتولتاییک حرارتی نامیده می‌شوند. پارامترهای زیادی عملکرد یک سیستم فتولتاییک حرارتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در یک دسته‌بندی، این پارامترها را می‌توان به پارامترهای وابسته به ساختمان سیستم و پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم تقسیم‌بندی نمود. مهم‌ترین پارامترهای وابسته به ساختمان سیستم شامل نوع سلول فتولتاییک [3]، نوع کلکتور حرارتی [4] و نوع سیال خنک‌کننده [5] می‌باشند. در حالی که میزان تشعشع جذب شده توسط سلول‌های فتولتاییک، سرعت باد، 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. تاکنون پژوهش‌های عددی، آزمایشگاهی و تحلیلی زیادی به منظور بررسی عملکرد سیستم‌های فتولتاییک حرارتی صورت گرفته است.

دقیق و همکاران [5] در یک مقاله مروری، عملکرد سیستم‌های فتولتاییک حرارتی با سیال کاری آب، ترکیب آب و هوا، و مبرد را مورد بررسی قرار دادند. شهسوار و همکاران [6] به صورت عددی و آزمایشگاهی، اثر استفاده از پوشش شیشه‌ای بر عملکرد یک سیستم فتولتاییک حرارتی با سیال کاری هوا را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که استفاده از پوشش شیشه‌ای در سیستم فتولتاییک حرارتی، بازه الکتریکی سیستم را کاهش و بازه حرارتی آن را افزایش می‌دهد. جوشی و تیواری [7] به صورت عددی، عملکرد یک سیستم فتولتاییک حرارتی با سیال کاری هوا را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که بازه الکتریکی و کلی (مجموع الکتریکی و حرارتی) سیستم به ترتیب 14-15 درصد و 55-65 درصد است. بهاتارای و همکاران [8] به صورت عددی و آزمایشگاهی، عملکرد یک سیستم فتولتاییک حرارتی با سیال کاری آب را ارزیابی کردند. آن‌ها همچنین عملکرد سیستم فتولتاییک حرارتی را با یک کلکتور خورشیدی مقایسه کردند. آن‌ها مشاهده کردند، بازه حرارتی سیستم فتولتاییک حرارتی و کلکتور خورشیدی به ترتیب 58.70 درصد و 71.50 درصد است. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند، بازه الکتریکی سیستم فتولتاییک حرارتی 13.69 درصد است. حمزی و همکاران [9] در یک مطالعه عددی و آزمایشگاهی، عملکرد سیستم‌های فتولتاییک حرارتی ترموسیفون و پمپی، و با سیال کاری آب را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند، بیشینه بازه الکتریکی و حرارتی سیستم فتولتاییک حرارتی پمپی، به ترتیب 15 و 50 درصد است. آن‌ها همچنین مشاهده کردند، بازه سالانه حرارتی سیستم پمپی 5 درصد از سیستم ترموسیفون بیشتر است. یزدانی فرد و همکاران [10] به صورت عددی، اثر آرام و آشفته بودن جریان در یک سیستم فتولتاییک حرارتی با سیال کاری آب را بررسی کردند. آن‌ها همچنین اثر تابش خورشید، رینولدز جریان، ضریب پوشش<sup>2</sup>، طول کلکتور، قطر لوله‌های کلکتور و تعداد لوله‌های کلکتور را بر عملکرد سیستم فتولتاییک حرارتی مورد مطالعه قرار دادند. بررسی آن‌ها نشان داد، بازه سیستم در جریان آشفته بیشتر از آرام است. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند، افزایش تابش خورشید و ضریب پوشش سبب افزایش بازه سیستم در دو جریان آرام و آشفته می‌شود. چو و همکاران [11] در یک مطالعه عددی

<sup>3</sup> Dispersion<sup>4</sup> Nusselt number<sup>5</sup> Ethylene glycol<sup>1</sup> Open circuit voltage<sup>2</sup> Packing factor

ذکر است، خروجی این ترموکوپل‌ها توسط یک دیتالاگر<sup>5</sup> چهار کاناله ذخیره می‌شود. همچنین، دمای محیط توسط دماسنج جیوه‌ای نصب شده در نزدیک سیستم‌ها اندازه‌گیری می‌شود. جهت اندازه‌گیری جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز، از مولتی‌متر دیجیتال با قابلیت ذخیره‌سازی داده‌ها استفاده می‌شود. همچنین، مقدار تابش کلی خورشید به کمک یک پیرانومتر<sup>6</sup> که به صورت موازی با سطح سیستم فتولتاییک نصب شده است، اندازه‌گیری می‌شود. سیال کاری در نظر گرفته شده در این بررسی، نانوسیال اکسید روی-آب با درصد جرمی 0.2 درصد است. قطر و خواص ترمودینامیکی نانوذرات اکسید روی در جدول 2 بیان شده است. ساختار نانوذرات استفاده شده در این مطالعه به صورت کروی است. اطلاعات بیشتر در مورد ساختار نانوذرات، در مطالعات پیشین بیان شده است [22]. در نانوسیال موردنظر، نانوذرات به کمک یک همزن با سرعت بالا و با استفاده از سورفکتانت آمونیوم سیترات<sup>7</sup>، درون سیال پایه (آب) پراکنده می‌شوند. سپس، مخلوط با استفاده از یک دستگاه ارتعاش کننده فراصوت در دمای ثابت 60 درجه سانتی‌گراد پایدار می‌شود. شایان ذکر است، فرایند پایدارسازی در 6 زمان 20 دقیقه‌ای صورت گرفته است. به منظور بررسی پایداری نانوسیال، چگالی آن در طول آزمایش مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمایش‌ها در دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیایی 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.

### 3- مدل سازی و شبیه‌سازی عددی

#### 3-1- مدل هندسی

در این مطالعه به منظور بررسی عددی سیستم فتولتاییک حرارتی، مدل هندسی براساس هندسه واقعی سیستم که در "شکل 1" مشاهده می‌شود، توسط نرم‌افزار سالیدورکس<sup>8</sup> طراحی شده است. شماتیک و یک نما از مدل هندسی سیستم در "شکل 2" بیان شده است. همان‌گونه که در "شکل 2"

جدول 1 مشخصات واحد فتولتاییک [22]

واحد فتولتاییک (تحت شرایط آزمایش استاندارد)	
نوع	تک کریستاله سیلیکونی
جریان اتصال کوتاه (A)	2.57
ولتاژ مدار باز (V)	21.6
ضریب انبساطی <sup>9</sup>	0.726
بازده سلول فتولتاییک (%)	16
بازده واحد فتولتاییک (%)	15
توان نامی (W)	40
ضریب پوشش کلکتور	1

جدول 2 قطر و خواص ترمودینامیکی نانوذرات اکسید روی [18]

قطر نانوذرات (nm)	چگالی (kgm <sup>-3</sup> )	ضریب هدایت حرارتی (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	ظرفیت گرمای ویژه (kgm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )
40	5600	13	495

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد، تاکنون مدل‌های عددی یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی مختلفی به منظور بررسی عملکرد یک سیستم فتولتاییک حرارتی در دسترس است [19,20]. اگرچه تاکنون یک مدل عددی سه‌بعدی با دقت بالا که در آن لایه‌های مختلف یک سیستم فتولتاییک (شامل اتیلن-وینیل استات<sup>1</sup>، سلول‌های فتولتاییک و تدار پلی‌وینیل فلوراید<sup>2</sup>) مدل‌سازی شده باشد، ارائه نشده است. همچنین، تاکنون پژوهش جامعی در زمینه بررسی اثر پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم بر بازده الکتریکی و حرارتی یک سیستم فتولتاییک حرارتی بر پایه نانوسیال، صورت نپذیرفته است. شایان ذکر است، در مطالعات پیشین برخی از پارامترهای بیان شده، مورد بررسی قرار گرفته است که سیال کاری استفاده شده در مطالعه آن‌ها آب خالص بوده است [10,11]. در این مطالعه با در نظر گرفتن لایه‌های مختلف یک سیستم فتولتاییک تک کریستاله<sup>3</sup> سیلیکونی (شامل اتیلن-وینیل استات، سلول‌های فتولتاییک و تدار پلی‌وینیل فلوراید) عملکرد یک سیستم فتولتاییک حرارتی بر پایه نانوسیال به صورت عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، اثر استفاده از سیال کاری آب خالص و نانوسیال اکسید روی-آب بر عملکرد سیستم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این پژوهش همچنین اثر پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم بر بازده الکتریکی و حرارتی یک سیستم فتولتاییک حرارتی بر پایه نانوسیال اکسید روی-آب مورد مطالعه قرار می‌گیرد. پارامترهای بررسی شده در این مطالعه، میزان تشعشع جذب شده توسط سلول‌های فتولتاییک، سرعت باد، دمای محیط، دمای سیال خنک‌کننده ورودی به کلکتور حرارتی، دبی جرمی سیال خنک‌کننده و درصد جرمی نانوذرات در نانوسیال اکسید روی-آب بوده که مهم‌ترین پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم می‌باشند. شایان ذکر است، در پژوهش حاضر، نتایج مدل عددی سه‌بعدی موردنظر با نتایج آزمایش‌های صورت گرفته، اعتبارسنجی می‌شود.

#### 2- بستر آزمایشگاهی

در این مطالعه، بستر آزمایشگاهی شامل یک سیستم فتولتاییک حرارتی است. این سیستم خود شامل یک واحد فتولتاییک تک کریستاله سیلیکونی با 36 سلول خورشیدی است که اطلاعات کامل واحد فتولتاییک در جدول 1 بیان شده است. در سیستم فتولتاییک حرارتی، واحد فتولتاییک با استفاده از چسب سیلیکونی به بالای صفحه نازک مسی که در زیر آن لوله‌های مسی مارپیچ قرار دارد، متصل شده است. سیستم رو به جنوب و با زاویه 30 درجه نسبت به افق قرار می‌گیرد. نمایی از بستر آزمایشگاهی در "شکل 1" نشان داده شده است. سیال کاری در یک مخزن 5 لیتری ذخیره شده و به کمک یک پمپ، با دبی جرمی ثابت 30 کیلوگرم بر ساعت در داخل سیستم جریان می‌یابد. به منظور خنک‌سازی سیال از یک سیستم مدار بسته که شامل یک مبدل حرارتی دو لوله با جریان مخالف است، استفاده شده است. سیالی که در مبدل حرارتی برای خنک کاری استفاده می‌شود، آب شهر با دبی جرمی 40 کیلوگرم بر ساعت است. شایان ذکر است، دلیل انتخاب دبی‌های جرمی ذکر شده، در مطالعات پیشین بیان شده است [21]. در آزمایش‌های صورت گرفته، دبی‌های جرمی توسط روماتر کالیبره شده با استوانه مدرج اندازه‌گیری می‌شود. دمای سیال ورودی و خروجی کلکتور و همچنین دمای سلول‌های فتولتاییک، توسط ترموکوپل‌های از نوع کی<sup>4</sup> اندازه‌گیری می‌شوند. شایان

<sup>5</sup> Data logger

<sup>6</sup> Pyranometer

<sup>7</sup> Ammonium citrate surfactant

<sup>8</sup> SolidWorks

<sup>9</sup> Filled factor

<sup>1</sup> Ethylene-vinyl acetate

<sup>2</sup> Tedlar polyvinyl fluoride

<sup>3</sup> Monocrystalline

<sup>4</sup> K

جدول 4 خواص ترمودینامیکی اجزای مختلف مدل عددی [24,23]

اجزا	چگالی (kgm <sup>-3</sup> )	ضریب هدایت حرارتی (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	ظرفیت گرمای ویژه (kgm <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )
اتیلن-وینیل استات	960	0.35	2090
سلول‌های فتوولتائیک	2330	148	700
تدلار	1200	0.2	1250
مس	8920	398	385

### 2-3- مشخصات جریان سیال و فرضیات شبیه‌سازی

در این مطالعه، سیال‌های کاری در نظر گرفته شده، آب خالص و نانوسیال اکسید روی- آب هستند. چگالی و ظرفیت گرمای ویژه نانوسیال به ترتیب توسط رابطه‌های (1) و (2) تعیین می‌شوند [25]:

$$\rho_{nf} = \phi \cdot \rho_n + (1 - \phi) \cdot \rho_{bf} \quad (1)$$

$$C_{p,nf} = \frac{\phi \cdot (\rho_n C_{p,n}) + (1 - \phi) \cdot (\rho_{bf} C_{p,bf})}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

در رابطه‌های (1) و (2)،  $\rho$  چگالی سیال و  $C_p$  ظرفیت گرمای ویژه سیال است. همچنین، زیروندهای n و bf به ترتیب نشان‌دهنده نانوذره، سیال پایه و نانوسیال می‌باشند.  $\phi$  کسر حجمی نانوذرات در نانوسیال است که توسط رابطه (3) محاسبه می‌شود [21]:

$$\phi = \frac{\frac{m_n}{\rho_n}}{\frac{m_n}{\rho_n} + \frac{m_{bf}}{\rho_{bf}}} \quad (3)$$

در مطالعه حاضر، ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیال با استفاده از رابطه ژان و همکاران [26] محاسبه می‌شود:

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_n + 2k_{bf} - 2\phi(k_{bf} - k_n)}{k_n + 2k_{bf} + \phi(k_{bf} - k_n)} + \frac{\rho_n \phi C_{p,bf}}{2k_{bf}} \cdot \sqrt{\frac{2K_B T}{3\pi d_n \mu_{bf}}} \quad (4)$$

در رابطه (4)،  $T$  دمای سیال،  $k$  ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال،  $\mu$  لزجت دینامیکی<sup>1</sup> سیال،  $d_n$  قطر نانوذرات و  $K_B$  ثابت بولتزمن<sup>2</sup> هستند. شایان ذکر است، مدل ژان و همکاران، شکل اصلاح شده مدل ماکسول<sup>3</sup> است که اثرات حرکت براونی<sup>4</sup> و تجمع<sup>5</sup> نانوذرات را در نظر می‌گیرد. لزجت دینامیکی نانوسیال توسط رابطه (5) تعیین می‌شود [27]:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{bf}}{1 - 34.87 \left(\frac{d_n}{d_{bf}}\right)^{-0.3} \phi^{1.03}} \quad (5)$$

عدد رینولدز جریان سیال در داخل کلکتور به ازای دبی جرمی 40 کیلوگرم بر ساعت، 2290 بوده که به مقدار بحرانی 2300 نزدیک است. بنابراین به ازای دبی جرمی کمتر از 40 کیلوگرم بر ساعت، جریان سیال آرام<sup>6</sup> در نظر گرفته می‌شود. شایان ذکر است، به ازای دبی جرمی 30 کیلوگرم بر ساعت، عدد رینولدز جریان سیال برابر 1718 بوده که نشان‌دهنده آرام بودن جریان سیال است. همچنین، جریان سیال در داخل کلکتور به صورت پایا، غیرقابل تراکم، یکنواخت و توسعه یافته است. شایان ذکر است، به منظور ساده‌سازی بررسی عددی سیستم فتوولتائیک حرارتی، فرضیاتی لحاظ شده است که در ادامه بیان می‌شود:

- خواص ترمودینامیکی اجزای مختلف سیستم فتوولتائیک حرارتی ثابت فرض شده است [17].

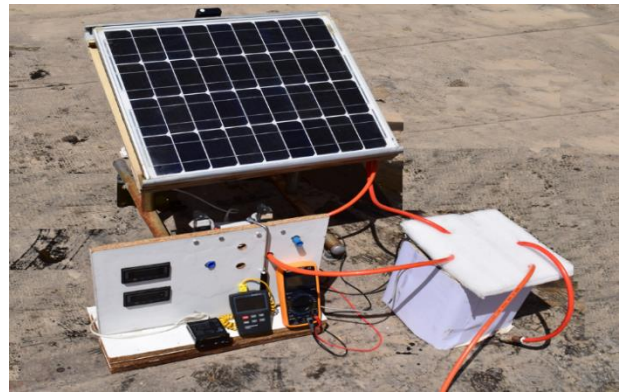
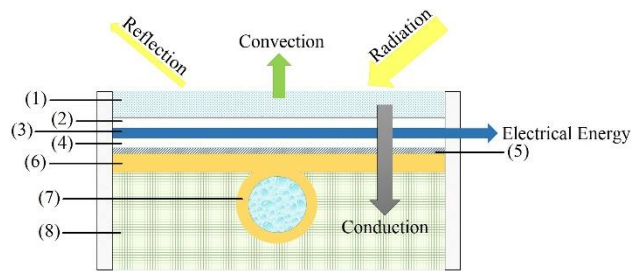


Fig. 1 A view of the experimental setup

شکل 1 نمایی از بستر آزمایشگاه

مشاهده می‌شود، مدل عددی شامل پوشش شیشه‌ای (1)، یک لایه اتیلن-وینیل استات (2)، سلول‌های فتوولتائیک (3)، یک لایه اتیلن-وینیل استات (4)، یک لایه تدلار پلی‌وینیل فلوراید (تدلار) (5)، صفحه جاذب مسی (6)، کلکتور ماریپچ (7) و پلی‌یورتان (عایق حرارتی) (8) است. شایان ذکر است، اثرات پوشش شیشه‌ای و پلی‌یورتان به صورت غیرمستقیم توسط شرایط مرزی اعمال می‌شود. ابعاد و خواص ترموفیزیکی اجزای مختلف مدل عددی به ترتیب در جدول‌های 3 و 4 بیان شده است.



(a) Schematic diagram



(b) A view of the geometric model

Fig. 2 (a) Schematic diagram and (b) a view of the geometric model of the photovoltaic thermal system

شکل 2 (الف) شماتیک و (ب) یک نما از مدل هندسی سیستم فتوولتائیک حرارتی

جدول 3 ابعاد اجزای مختلف مدل عددی

اجزا	ابعاد (mm)
اتیلن-وینیل استات	630 × 540 × 0.5
سلول‌های فتوولتائیک	62.5 × 125 × 0.3
تدلار	630 × 540 × 0.1
صفحه جاذب مسی	630 × 540 × 0.4
قطر داخلی کلکتور	10
قطر خارجی کلکتور	12

<sup>1</sup> Dynamic viscosity

<sup>2</sup> Boltzmann

<sup>3</sup> Maxwell

<sup>4</sup> Brownian motion

<sup>5</sup> Aggregation

<sup>6</sup> Laminar

با در نظر گرفتن سیستم فتولتاییک حرارتی به عنوان یک حجم کنترل واحد و با فرض شرایط پایا، قانون اول ترمودینامیک در رابطه (11) بیان شده است:

$$\dot{E}_{sun} + E_{mass,in} = \dot{E}_{el} + \dot{E}_{mass,out} + \dot{E}_{loss} \quad (11)$$

در رابطه (11)،  $\dot{E}_{loss}$  نرخ انرژی اتلافی است. همچنین  $\dot{E}_{sun}$  نشان دهنده نرخ انرژی تابشی جذب شده توسط سلول‌های فتولتاییک است که توسط رابطه (12) تعیین می‌شود:

$$\dot{E}_{sun} = \dot{G} \cdot A_c \cdot \tau_g \cdot \alpha_{cell} \quad (12)$$

در رابطه (12)،  $A_c$  مساحت کلکتور،  $\tau_g$  قابلیت عبور تابش خورشید از پوشش شیشه‌ای،  $\alpha_{cell}$  قابلیت جذب تابش خورشید توسط سلول‌های فتولتاییک و  $\dot{G}$  نرخ انرژی تابشی دریافتی بر واحد سطح کلکتور هستند. نرخ تغییر انرژی جرم عبوری از کلکتور توسط رابطه (13) قابل تعیین است:

$$\dot{E}_{mass,out} - \dot{E}_{mass,in} = \dot{E}_{th} = \dot{m}_f \cdot c_{p,f} \cdot (T_{f,out} - T_{f,in}) \quad (13)$$

در رابطه (13)،  $\dot{m}_f$  دبی جرمی سیال عبوری از کلکتور،  $T_{f,out}$  و  $T_{f,in}$  به ترتیب دمای متوسط سیال در ورودی و خروجی کلکتور هستند. بازده حرارتی سیستم فتولتاییک حرارتی توسط رابطه (14) محاسبه می‌شود:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{E}_{th}}{\dot{E}_{sun}} = \frac{\dot{m}_f \cdot c_{p,f} \cdot (T_{f,out} - T_{f,in})}{\dot{G} \cdot A_c \cdot \tau_g \cdot \alpha_{cell}} \quad (14)$$

بازده الکتریکی سیستم فتولتاییک حرارتی با استفاده از رابطه تجربی ارائه شده توسط ایوان و همکاران [30] محاسبه می‌شود:

$$\eta_{el} = \eta_f \cdot [1 - 0.0045 \cdot (T_{cell} - 298.15)] \quad (15)$$

در رابطه (15)،  $T_{cell}$  دمای سلول‌های فتولتاییک و  $\eta_f$  بازده الکتریکی سیستم فتولتاییک در شرایط استاندارد هستند.

### 3-5- شبکه‌بندی حوزه حل

در این مطالعه به منظور شبکه‌بندی حوزه حل از نرم‌افزار آنسیس ورکبنچ<sup>11</sup> استفاده شده است. شایان ذکر است، با توجه به کم بودن ضخامت اجزای اتیلن-وینیل استات، سلول‌های فتولتاییک، تدار و صفحه جاذب مسی (مراجعه به جدول 2)، در شبکه‌بندی آن‌ها از یک سلول در ضخامت استفاده شده است. بنابراین، مدل‌سازی آن‌ها به صورت دوبعدی صورت گرفته است. سایر اجزای سیستم فتولتاییک حرارتی به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شده 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 فتولتاییک و سیال خنک‌کننده بیان شده است.

به منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی حوزه حل، میانگین دما و سرعت سیال در خروجی کلکتور به ازای شبکه‌هایی با 1، 2، 2.9، 3.8، 4.7 و 5.6 میلیون سلول با یکدیگر مقایسه شده‌اند. 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 فتولتاییک حرارتی مناسب است. شایان ذکر است، بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی حوزه حل، برای سیال کاری آب خالص صورت گرفته است. هم‌چنین در این بررسی، 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.

<sup>11</sup> ANSYS Workbench

- قابلیت عبور تابش<sup>1</sup> از لایه اتیلن-وینیل استات تقریباً 100 درصد فرض شده است [28,7].

- تلفات اهمی<sup>2</sup> سیستم صرف‌نظر شده است.

- آسمان به عنوان یک جسم سیاه<sup>3</sup> با دمای  $T_{sky}$  در نظر گرفته شده است.

### 3-3- معادلات حاکم و روش عددی

همان‌گونه که بیان گردید، جریان سیال در داخل کلکتور به صورت پایا و غیرقابل تراکم است. با در نظر گرفتن سیستم فتولتاییک حرارتی به عنوان یک حجم کنترل، معادلات حاکم بر حوزه حل نیز معادلات سه‌بعدی پیوستگی، مومنتم و انرژی هستند که به ترتیب توسط رابطه‌های (6)، (7) و (8) بیان می‌شوند:

$$\nabla(\rho\vec{V}) = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (\rho\vec{V}\vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu\nabla\vec{V}) \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (\rho\vec{V}c_p T) = \nabla \cdot (k\nabla T) \quad (8)$$

در رابطه‌های (6)، (7) و (8)،  $\vec{V}$  سرعت سیال و  $P$  فشار سیال هستند.

در این مطالعه، عملکرد سیستم فتولتاییک حرارتی، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی<sup>4</sup> و به کمک نرم‌افزار آنسیس فلونت<sup>5</sup> 16.2 مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بررسی‌های صورت گرفته از حل‌کننده بر پایه فشار<sup>6</sup> استفاده شده است. هم‌چنین، سرعت و فشار با استفاده از طرح سیمپل<sup>7</sup> به یکدیگر وابسته شده‌اند. به منظور همگرایی بهتر حل عددی، تفاضلی کردن ترم‌های جابجایی و پخش براساس طرح مرتبه دوم آپویند<sup>8</sup> صورت گرفته است. 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 شده است.

در شبیه‌سازی عددی، شرط مرزی در ورودی کلکتور، دبی جرمی ثابت و هم‌چنین دمای ثابت است. از آن‌جا که جریان سیال در کلکتور توسعه یافته است، در خروجی کلکتور از شرط مرزی جریان خروجی<sup>9</sup> استفاده شده است. شرط مرزی برای سطوح بیرونی صفحه جاذب مسی و هم‌چنین سطوح بیرونی کلکتور، دیوار عایق<sup>10</sup> است. در بررسی‌های عددی، به منظور تعیین انتقال حرارت اتلافی ناشی از حضور باد، ضریب انتقال حرارت جابجایی توسط رابطه (9) تعیین می‌شود [18]:

$$h_w = 5.7 + 3.8 \cdot V_w \quad (9)$$

در رابطه (9)،  $h_w$  ضریب انتقال حرارت جابجایی ناشی از باد و  $V_w$  سرعت باد هستند. همان‌گونه که در فرضیات بررسی عددی بیان گردید، به منظور تعیین انتقال حرارت اتلافی تشعشعی، آسمان به عنوان یک جسم سیاه فرض شده که دمای آن توسط رابطه (10) محاسبه می‌شود [29]:

$$T_{sky} = 0.0552 \cdot T_{amb}^{1.5} \quad (10)$$

در رابطه (10)،  $T_{sky}$  دمای آسمان به عنوان یک جسم سیاه و  $T_{amb}$  دمای محیط هستند.

### 3-4- تحلیل ترمودینامیکی

<sup>1</sup> Transmissivity

<sup>2</sup> Ohmic losses

<sup>3</sup> Black body

<sup>4</sup> Computational fluid dynamic

<sup>5</sup> Ansys fluent

<sup>6</sup> Pressure based solver

<sup>7</sup> Simple

<sup>8</sup> Second order upwind

<sup>9</sup> Out flow

<sup>10</sup> Adiabatic wall

توجه به داده‌های آزمایش، مقدار متوسط تابش دریافتی از خورشید و دمای محیط در طول آزمایش به ترتیب 917 وات بر مترمربع و 33.42 درجه سانتی‌گراد است. اطلاعات بیشتر در مورد آزمایش‌های صورت گرفته در قسمت 2 بیان شده است. بررسی "شکل 6" نشان می‌دهد، میانگین روزانه درصد اختلاف میان دمای سیال خروجی از کلکتور به دو روش عددی و آزمایشگاهی 3.67 درصد است. همچنین با توجه به "شکل 7"، میانگین روزانه درصد اختلاف میان دمای سلول‌های فتوولتاییک به دو روش عددی و آزمایشگاهی 6.93 درصد است. اختلاف میان نتایج عددی و آزمایشگاهی می‌تواند ناشی از فرضیات ساده‌سازی لحاظ شده در مدل عددی و همچنین عدم قطعیت تجهیزات آزمایشگاهی باشد. شایان ذکر است، در بررسی تجربی سیستم فتوولتاییک حرارتی، دمای سیال خنک‌کننده ورودی به کلکتور، دمای محیط و سرعت باد نیز ثابت نبوده و در طول روز متغیر است.

#### 4-2- تحلیل پارامتری

در این مطالعه، اثر پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم بر بازده الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتاییک حرارتی بر پایه نانوسیال اکسید روی-آب بررسی می‌شود. پارامترهای بررسی شده در این مطالعه، میزان تشعشع جذب شده توسط سلول‌های فتوولتاییک در بازه 200-1000 وات بر مترمربع، سرعت باد در بازه 1-9 متر بر ثانیه، دمای محیط در بازه 20-40 درجه سانتی‌گراد، دمای سیال خنک‌کننده ورودی به کلکتور در بازه 20-40 درجه سانتی‌گراد، دبی جرمی سیال خنک‌کننده در بازه 30-70 کیلوگرم بر ساعت و درصد جرمی نانوذرات در نانوسیال اکسید روی-آب در بازه 0-12 درصد می‌باشند.

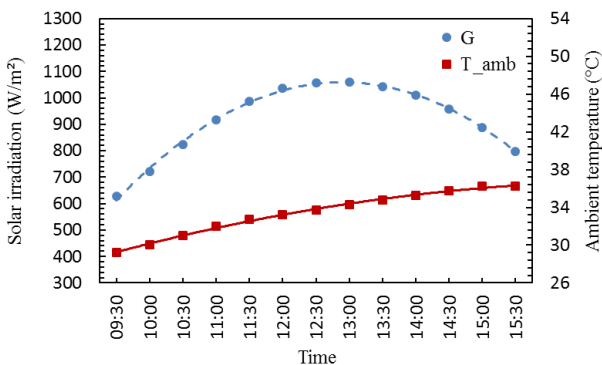


Fig. 5 Variation of solar irradiation and ambient temperature during the experiment

شکل 5 تغییرات تابش خورشید و دمای محیط در طول آزمایش

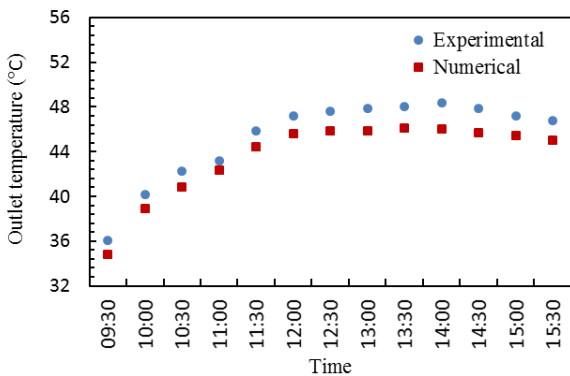
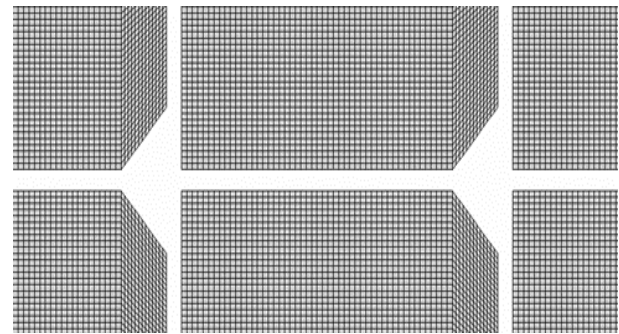
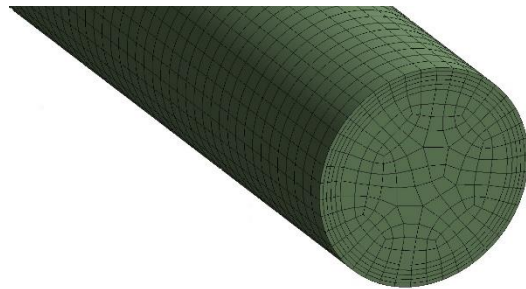


Fig. 6 Numerical and experimental results of the coolant outlet temperature

شکل 6 نتایج عددی و آزمایشگاهی دمای سیال خروجی از کلکتور



(a) Photovoltaic cells



(b) Coolant

Fig. 3 Grid distribution for (a) photovoltaic cells and (b) coolant.

شکل 3 شبکه‌بندی (الف) سلول‌های فتوولتاییک و (ب) سیال خنک‌کننده.

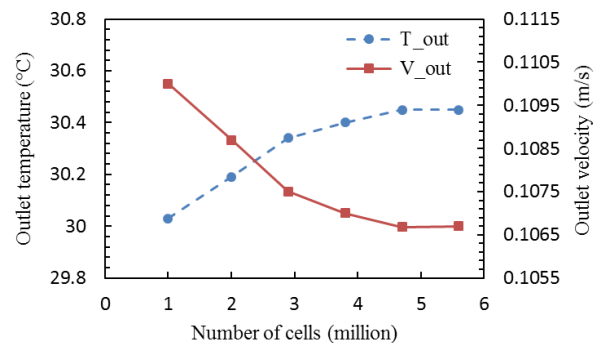


Fig. 4 Investigation of grid independency

شکل 4 بررسی استقلال از شبکه‌بندی

#### 4- نتایج

در این قسمت، ابتدا میزان دقت حل عددی سه‌بعدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ادامه، اثر پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم بر بازده الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتاییک حرارتی بر پایه نانوسیال اکسید روی-آب بررسی می‌شود. همچنین، تغییرات دمای سلول‌های فتوولتاییک و جریان سیال در داخل کلکتور مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

#### 4-1- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی بررسی عددی، دمای سیال خروجی از کلکتور و دمای سلول‌های فتوولتاییک با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان‌گونه که بیان گردید، سیال کاری در نظر گرفته شده در این بررسی، نانوسیال اکسید روی-آب با درصد جرمی 0.2 درصد است. آزمایش‌ها در دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیای 36 درجه و طول جغرافیایی 59 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. شدت تابش دریافتی و دمای محیط در طول آزمایش اندازه‌گیری شده که در "شکل 5" بیان شده است.

تغییرات بازده الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی نسبت به تغییرات سرعت باد و دمای محیط به ترتیب در "شکل‌های 9 و 10" بیان شده است. با توجه به رابطه (9)، با افزایش سرعت باد، انتقال حرارت جابجایی اتلافی از سیستم افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به نتایج بررسی عددی، دمای سلول‌های فتوولتائیک از 36.67 تا 36.54 درجه سانتی‌گراد کم می‌شود. همچنین، دمای سیال خروجی از کلکتور از 31.82 تا 31.76 درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، اثر تغییرات سرعت باد بر دمای سلول‌های فتوولتائیک و همچنین دمای سیال خروجی از کلکتور اندک است. در نتیجه، با توجه به "شکل 9"، بازده حرارتی سیستم حدود 1.74 درصد کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به رابطه (15)، بازده الکتریکی سیستم به میزان اندکی افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که می‌توان از اثر افزایش سرعت باد بر بازده الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی صرف نظر کرد. بررسی عددی نشان می‌دهد، با افزایش دمای محیط از 20 تا 40 درجه سانتی‌گراد، دمای سیال خروجی از کلکتور از 31.72 تا 31.88 درجه سانتی‌گراد زیاد می‌شود. بنابراین همان‌گونه که در "شکل 10" مشاهده می‌شود، بازده حرارتی سیستم از 49.02 تا 53.46 درصد افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به اثر اندک افزایش دمای محیط بر دمای سلول‌های فتوولتائیک، بازده الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی به میزان اندکی کاهش می‌یابد.

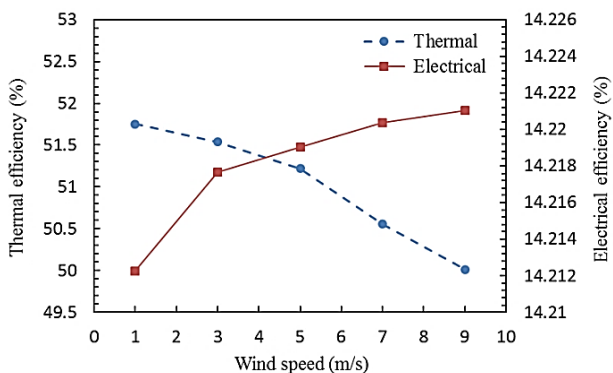


Fig. 9 Variation of the electrical and thermal efficiencies of the photovoltaic thermal system versus the wind speed

شکل 9 تغییرات بازده الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی نسبت به سرعت باد

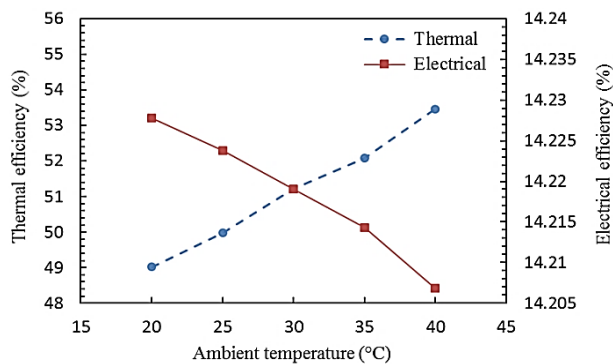


Fig. 10 Variation of the electrical and thermal efficiencies of the photovoltaic thermal system versus the ambient temperature

شکل 10 تغییرات بازده الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی نسبت به دمای محیط

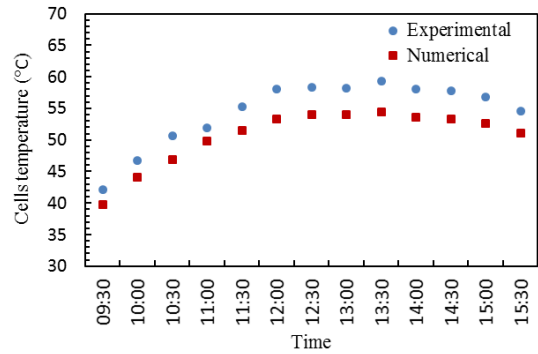


Fig. 7 Numerical and experimental results of the photovoltaic cells temperature

شکل 7 نتایج عددی و آزمایشگاهی دمای سلول‌های فتوولتائیک هم‌چنین، شرایط عملکردی سیستم مرجع در نظر گرفته شده به منظور انجام بررسی‌های پارامتری به صورت مقدار تشعشع جذب شده برابر 600 وات بر مترمربع، سرعت باد برابر 5 متر بر ثانیه، دمای محیط و دمای سیال خنک‌کننده ورودی به کلکتور 30 درجه سانتی‌گراد، دبی جرمی سیال خنک‌کننده 50 کیلوگرم بر ساعت و درصد جرمی نانوذرات در نانوسیال اکسید روی-آب 6 درصد است. شایان ذکر است، شرایط عملکردی سیستم مرجع از میانگین‌گیری بین تغییرات در نظر گرفته شده برای هر پارامتر حاصل شده است.

اثر تشعشع جذب شده توسط سلول‌های فتوولتائیک بر بازده الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی بر پایه نانوسیال اکسید روی-آب، در "شکل 8" بیان شده است. همان‌گونه که در "شکل 8" مشاهده می‌شود، در دمای ثابت سیال ورودی به کلکتور (30 درجه سانتی‌گراد) و دبی جرمی ثابت (50 کیلوگرم بر ساعت) با افزایش تشعشع خورشیدی جذب شده، دمای سیال خروجی از کلکتور و در نتیجه بازده حرارتی سیستم افزایش می‌یابد. بررسی عددی نشان می‌دهد، با افزایش تشعشع جذب شده از 200 تا 1000 وات بر مترمربع، دمای سیال خروجی از کلکتور از 30.54 تا 33.30 درجه سانتی‌گراد زیاد می‌شود. همچنین، بازده حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی از 45.66 تا 56.36 درصد بهبود می‌یابد. نتایج بررسی عددی نشان می‌دهد، افزایش تشعشع جذب شده، دمای سلول‌های فتوولتائیک حرارتی را حدود 9.25 درجه سانتی‌گراد افزایش می‌دهد که با توجه به رابطه (15)، بازده الکتریکی سیستم حدود 0.62 درصد کاهش می‌یابد.

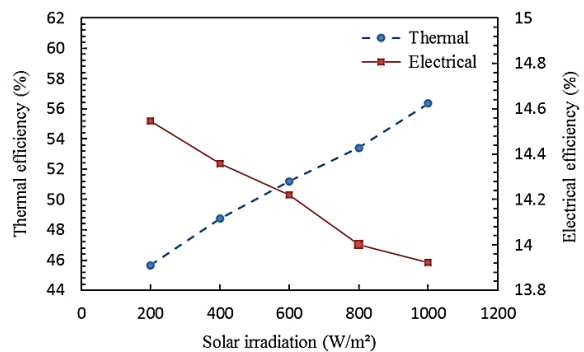


Fig. 8 Variation of the electrical and thermal efficiencies of the photovoltaic thermal system versus the absorbed solar irradiation

شکل 8 تغییرات بازده الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی نسبت به تشعشع خورشیدی جذب شده

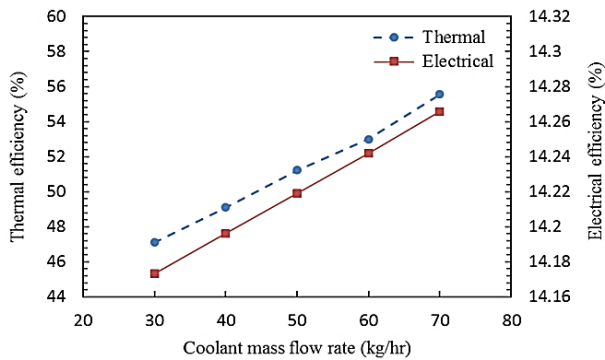


Fig. 12 Variation of the electrical and thermal efficiencies of the photovoltaic thermal system versus the coolant mass flow rate

شکل 12 تغییرات بازده الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی نسبت به دبی جرمی سیال خنک کننده

که در "شکل 13" مشاهده می شود، استفاده از نانوسیال اکسید روی-آب در مقایسه با آب خالص، بازده حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی را افزایش می دهد. افزایش نسبی بازده حرارتی سیستم با سیال کاری نانوسیال برای درصد جرمی های 3، 6، 9 و 12 درصد در مقایسه با آب خالص به ترتیب 1.97، 6.07، 8.57 و 12.58 درصد است. همچنین، افزایش نسبی بازده الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری نانوسیال اکسید روی-آب با درصد جرمی 12 درصد نسبت به آب خالص حدود 0.28 درصد است. بنابراین، استفاده از نانوسیال اکسید روی-آب در سیستم فتوولتائیک حرارتی اثر قابل توجهی بر بهبود بازده الکتریکی سیستم ندارد.

#### 3-4- توزیع دما در سیستم فتوولتائیک حرارتی

در این قسمت توزیع دمای سلول های فتوولتائیک و سیال خنک کننده برای سیستم مرجع که ویژگی های آن در قسمت 2-4 بیان شد، مورد ارزیابی قرار می گیرد. همان گونه که در "شکل 14" مشاهده می شود، با ورود سیال به کلکتور، دمای سلول های پایینی سیستم فتوولتائیک حرارتی کاهش می یابد ولی با عبور سیال از داخل کلکتور و دریافت حرارت از سیستم، به تدریج دمای سیال افزایش یافته و توان خنک سازی آن کم می شود. در نتیجه دمای سلول های بالایی سیستم فتوولتائیک حرارتی اندکی افزایش می یابد. شایان ذکر است، به دلیل وجود جعبه اتصالات سیستم فتوولتائیک (مراجعه به شکل 2)، امکان قرارگیری کلکتور در قسمت مستطیلی مشخص شده در "شکل 14" وجود ندارد که این امر سبب افزایش دمای سلول های فتوولتائیک در

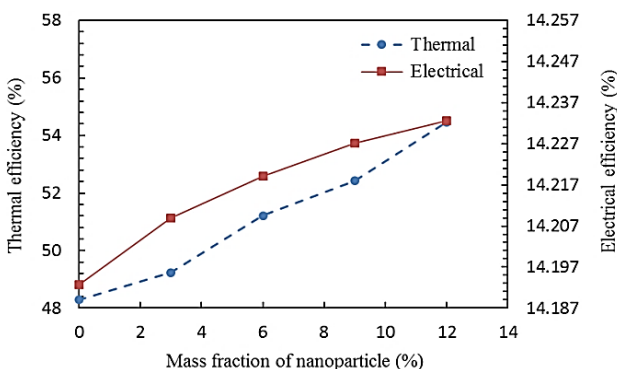


Fig. 13 Variation of the electrical and thermal efficiencies of the photovoltaic thermal system versus the nanoparticles mass fraction

شکل 13 تغییرات بازده الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی نسبت به درصد جرمی نانوذرات

در دماهای پایین سیال ورودی به کلکتور، اختلاف دما بین سیال خنک کننده و دیواره کلکتور و در نتیجه دریافت حرارت از سیستم فتوولتائیک حرارتی بیشتر است. بنابراین، اختلاف دما بین سیال ورودی و خروجی کلکتور افزایش می یابد. بررسی عددی نشان می دهد، اختلاف دمای سیال به ازای دمای ورودی 20، 25، 30، 35 و 40 درجه سانتی گراد به ترتیب 1.80، 1.92، 2.10، 1.63 و 1.52 درجه سانتی گراد است. بنابراین همان گونه که در "شکل 11" مشاهده می شود، با افزایش دمای سیال ورودی به کلکتور، بازده حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی حدود 16.21 درصد کاهش می یابد. هم چنین با توجه به نتایج بررسی عددی، افزایش دمای سیال ورودی به کلکتور سبب افزایش دمای سلول های فتوولتائیک از 31.35 تا 41.79 درجه سانتی گراد می شود. در نتیجه با استفاده از رابطه (15)، بازده الکتریکی سیستم حدود 0.71 درصد کاهش می یابد.

با توجه به رابطه (14)، بازده حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی وابسته به دبی جرمی سیال خنک کننده و اختلاف دمای سیال در ورودی و خروجی کلکتور است. بررسی عددی نشان می دهد، با افزایش دبی جرمی سیال از 30 تا 70 کیلوگرم بر ساعت، در دمای ورودی ثابت 30 درجه سانتی گراد، دمای سیال خروجی از کلکتور از 32.76 تا 31.40 درجه سانتی گراد کاهش می یابد. بنابراین، افزایش دبی جرمی سیال به صورت غیرمستقیم بر روی بازده حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی تأثیر منفی می گذارد. از آن جا که اثر مستقیم افزایش دبی جرمی بر بازده حرارتی (رابطه (14)) از اثر منفی آن (کاهش دمای خروجی) بیشتر است، در نتیجه با افزایش دبی جرمی سیال از 30 تا 70 کیلوگرم بر ساعت، بازده حرارتی سیستم حدود 8.46 درصد بهبود می یابد. هم چنین نتایج بررسی عددی نشان می دهد، به دلیل افزایش دریافت حرارت از سیستم، دمای سلول های فتوولتائیک حدود 1.37 درجه سانتی گراد کاهش می یابد. بنابراین همان گونه که در "شکل 12" مشاهده می شود، با افزایش دبی جرمی سیال خنک کننده، بازده الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی به میزان اندکی افزایش می یابد. شایان ذکر است، دقیق و همکاران [3] هم چنین افزایش اندکی در بازده الکتریکی یک سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری آب خالص به ازای افزایش دبی جرمی سیال خنک کننده در بازه لحاظ شده در مطالعه حاضر مشاهده کردند.

اثر درصد جرمی نانوذرات در نانوسیال اکسید روی-آب بر بازده الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی در "شکل 13" بیان شده است. همان گونه که بیان گردید، پراکندگی نانوذرات فلزی در یک سیال، ضریب انتقال حرارت هدایتی و جابجایی سیال را افزایش می دهد. بنابراین همان گونه

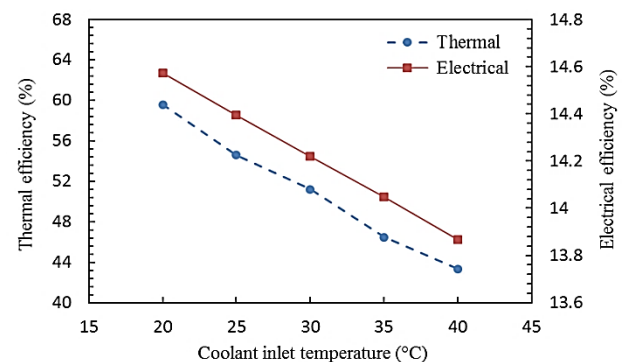


Fig. 11 Variation of the electrical and thermal efficiencies of the photovoltaic thermal system versus the coolant inlet temperature

شکل 11 تغییرات بازده الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی نسبت به دمای سیال خنک کننده ورودی به کلکتور



کلکتور سبب کاهش بازده حرارتی سیستم می‌شوند.

- با افزایش دمای سیال ورودی به کلکتور از 20 تا 40 درجه سانتی‌گراد، بازده حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی بر پایه نانوسیال اکسید روی-آب حدود 16.21 درصد کاهش می‌یابد.

- افزایش نسبی بازده حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری نانوسیال برای درصد جرمی‌های 3، 6، 9 و 12 درصد در مقایسه با آب خالص به ترتیب 1.97، 6.07، 8.57 و 12.58 درصد است.

- تغییرات پارامترهای بررسی شده در این مطالعه مانند میزان تشعشع جذب شده توسط سلول‌های فتوولتائیک، سرعت باد، دمای محیط و غیره، اثر اندکی بر بازده الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی بر پایه نانوسیال اکسید روی-آب دارد.

- افزایش نسبی بازده الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری نانوسیال اکسید روی-آب با 12 درصد جرمی 12 درصد نسبت به آب خالص حدود 0.28 درصد است.

### 6- فهرست علائم

$A$	مساحت ( $m^2$ )
$c_p$	ظرفیت گرمایی ویژه ( $Jkg^{-1}K^{-1}$ )
$d$	قطر (m)
$\dot{E}$	نرخ انرژی ( $W$ )
$\dot{G}$	نرخ انرژی تابشی دریافتی ( $Wm^{-2}$ )
$h$	ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )
$k$	ضریب هدایت حرارتی ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )
$\dot{m}$	دبی جرمی ( $kgs^{-1}$ )
$P$	فشار (Pa)
$T$	دما (K)
$t$	زمان (s)
$V$	سرعت ( $ms^{-1}$ )
	علائم یونانی
$\eta$	بازده (%)
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
$\mu$	لزجت دینامیکی سیال ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )
$\tau$	قابلیت عبور تابش خورشید
$\alpha$	قابلیت جذب تابش خورشید
$\emptyset$	کسر حجمی نانوذرات در نانوسیال
$\kappa_B$	ثابت بولتزمن
$\nabla$	گرادیان
	زیرنویس‌ها
amb	محیط
bf	سیال پایه
c	کلکتور
cell	سلول خورشیدی
el	الکتریکی
f	سیال
g	پوشش شیشه
in	ورودی
loss	اتلاف

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 15" بیان شده است. همان‌گونه که در "شکل 15" مشاهده می‌شود، سیال ورودی به کلکتور در ابتدا دمای آن پایین بوده ولی به تدریج با جریان در داخل کلکتور، دمای سیال افزایش یافته است.

### 5- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با در نظر گرفتن لایه‌های مختلف یک سیستم فتوولتائیک تک کریستاله سیلیکونی، اثر استفاده از سیال کاری آب خالص و نانوسیال اکسید روی-آب بر عملکرد یک سیستم فتوولتائیک حرارتی به صورت عددی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج مدل عددی سه‌بعدی با نتایج آزمایش‌های صورت گرفته، اعتبارسنجی می‌شود. در این پژوهش هم‌چنین اثر پارامترهای مستقل از ساختمان سیستم بر بازده الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی بر پایه نانوسیال اکسید روی-آب بررسی می‌شود. پارامترهای بررسی شده در این مطالعه، میزان تشعشع جذب شده توسط سلول‌های فتوولتائیک، سرعت باد، دمای محیط، دمای سیال خنک‌کننده ورودی به کلکتور حرارتی، دبی جرمی سیال خنک‌کننده و درصد جرمی نانوذرات در نانوسیال اکسید روی-آب می‌باشند. براساس بررسی‌های صورت گرفته مهم‌ترین نتایج در ادامه بیان می‌شود:

- بازده حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری نانوسیال با افزایش تشعشع جذب شده توسط سلول‌های فتوولتائیک، دمای محیط، دبی جرمی سیال خنک‌کننده و درصد جرمی نانوذرات در نانوسیال اکسید روی-آب زیاد می‌شود. در حالی که افزایش سرعت باد و دمای سیال خنک‌کننده ورودی به

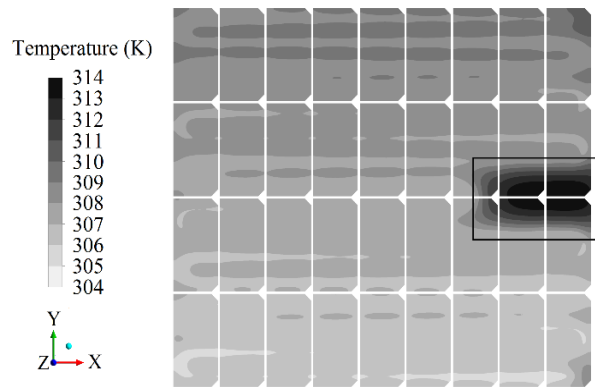


Fig. 14 Temperature distribution of the photovoltaic cells

شکل 14 توزیع دمای سلول‌های فتوولتائیک

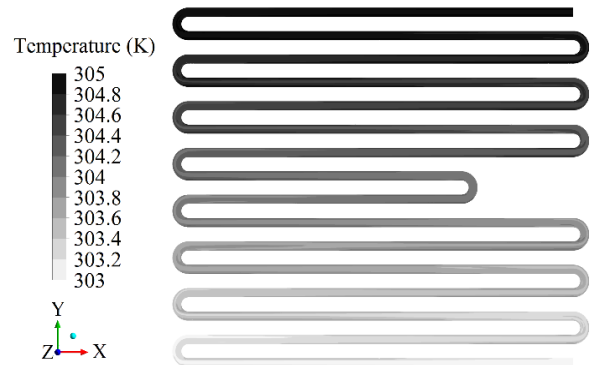


Fig. 15 Temperature distribution of the coolant

شکل 15 توزیع دمای سیال خنک‌کننده

- [13] W. S. Sarsam, S. Kazi, A. Badarudin, A review of studies on using nanofluids in flat-plate solar collectors, *Solar Energy*, Vol. 122, No. 12, pp. 1245-1265, 2015.
- [14] M. Alim, Z. Abidin, R. Saidur, A. Hepbasli, M. Khairul, N. Rahim, Analyses of entropy generation and pressure drop for a conventional flat plate solar collector using different types of metal oxide nanofluids, *Energy and Buildings*, Vol. 66, No. 11, pp. 289-296, 2013.
- [15] A. N. Al-Shamani, K. Sopian, S. Mat, H. A. Hasan, A. M. Abed, M. Ruslan, Experimental studies of rectangular tube absorber photovoltaic thermal collector with various types of nanofluids under the tropical climate conditions, *Energy Conversion and Management*, Vol. 124, No. 18, pp. 528-542, 2016.
- [16] M. Elmir, R. Mehdaoui, A. Mojtabi, Numerical simulation of cooling a solar cell by forced convection in the presence of a nanofluid, *Energy Procedia*, Vol. 18, No. 5, pp. 594-603, 2012.
- [17] O. Rejeb, M. Sardarabadi, C. Ménézo, M. Passandideh-Fard, M. H. Dhaou, A. Jenni, Numerical and model validation of uncovered nanofluid sheet and tube type photovoltaic thermal solar system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 110, No. 4, pp. 367-377, 2016.
- [18] 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.
- [19] Z. Xu, C. Kleinstreuer, Concentration photovoltaic-thermal energy co-generation system using nanofluids for cooling and heating, *Energy Conversion and Management*, Vol. 87, No. 11, pp. 504-512, 2014.
- [20] Y. Khanjari, A. Kasaeian, F. Pourfayaz, Evaluating the environmental parameters affecting the performance of photovoltaic thermal system using nanofluid, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 115, No. 6, pp. 178-187, 2017.
- [21] 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.
- [22] M. Sardarabadi, M. Hosseinzadeh, A. Kazemian, M. Passandideh-Fard, Experimental investigation of the effects of using metal-oxides/water nanofluids on a photovoltaic thermal system (PVT) from energy and exergy viewpoints, *Energy*, Vol. 138, No. 20, pp. 682-695, 2017.
- [23] 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.
- [24] J. J. Michael, I. Selvarasan, R. Goic, Fabrication, experimental study and testing of a novel photovoltaic module for photovoltaic thermal applications, *Renewable Energy*, Vol. 90, No. 6, pp. 95-104, 2016.
- [25] E. Ebrahimnia-Bajestan, M. C. Moghadam, H. Niazmand, W. Daungthongsuk, S. Wongwises, Experimental and numerical investigation of nanofluids heat transfer characteristics for application in solar heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 92, No. 1, pp. 1041-1052, 2016.
- [26] Y. Xuan, Q. Li, W. Hu, Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids, *AIChE Journal*, Vol. 49, No. 4, pp. 1038-1043, 2003.
- [27] M. Corcione, Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 1, pp. 789-793, 2011.
- [28] H. Bahaidarah, A. Subhan, P. Gandhidasan, S. Rehman, Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions, *Energy*, Vol. 59, No. 11, pp. 445-453, 2013.
- [29] W. C. Swinbank, Long-wave radiation from clear skies, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 89, No. 381, pp. 339-348, 1963.
- [30] D. Evans, Simplified method for predicting photovoltaic array output, *Solar energy*, Vol. 27, No. 6, pp. 555-560, 1981.

جرم	mass
نانوذره	n
نانوسیال	nf
خروجی	out
شرایط استاندارد	r
آسمان	sky
خورشید	sun
حرارتی	th
باد	w

## 7- مراجع

- [1] T. T. Chow, A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 2, pp. 365-379, 2010.
- [2] 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.
- [3] R. Daghighi, 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.
- [4] 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.
- [5] R. Daghighi, 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.
- [6] A. Shahsavari, 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)
- [7] 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.
- [8] S. Bhattarai, J. H. Oh, S. H. Euh, G. K. Kafle, D. H. Kim, Simulation and model validation of sheet and tube type photovoltaic thermal solar system and conventional solar collecting system in transient states, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 103, No. 8, pp. 184-193, 2012.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] S. K. Verma, A. K. Tiwari, Progress of nanofluid application in solar collectors: a review, *Energy Conversion and Management*, Vol. 100, No. 12, pp. 324-346, 2015.