



Simulation and Experimental Evaluation of Linear Parabolic Concentrator Equipped with Photovoltaic-Thermal System

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Khodatars S.¹ BSc,
Mosavi Seyedi S.R.*¹ PhD,
Motevali A.¹ PhD,
Montazeri M.² MSc

How to cite this article

Khodatars S, Mosavi Seyedi S.R, Motevali A, Montazeri M. Simulation and Experimental Evaluation of Linear Parabolic Concentrator Equipped with Photovoltaic-Thermal System. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(5):1387-1398.

¹Biosystem Engineering Department, Agricultural Engineering Faculty, Sari Agricultural Sciences & Natural Resources University, Sari, Iran

²Biosystem Engineering Department, Agriculture Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Agricultural Engineering Faculty, Sari Agricultural Sciences & Natural Resources University, Sari, Iran

Phone: -

Fax: -

mousavi22@gmail.com

Article History

Received: August 31, 2019

Accepted: October 12, 2019

ePublished: May 09, 2020

ABSTRACT

Photovoltaic cells equipped with a thermal collector can convert solar energy into electrical, thermal and a combination of the two energy. In this research, a linear parabolic concentrator system equipped with photovoltaic cells was simulated with optical in Optic Ray Tracing software for optical simulation and Solidworks software was used for thermal simulation and its results were compared with experimental results. Simulation of the thermal collector was done by the thermal-photovoltaic system with two longitudinal and transverse arrangement of pipe in 4 diameter levels (8, 10, 12 and 14 mm) and three flow rate levels (1, 2 and 3 l/min). Simulation results of two longitudinal and transverse arrangement of the pipe showed that the thermal efficiency in the longitudinal arrangement was better than the transverse arrangement. Also, the results showed that with increasing pipe diameter from 8 to 12 mm the thermal efficiency changes process was increasing, and from 12 to 14 mm diameter there was no significant change in thermal efficiency. Increasing the flow rate from 1 to 3 l/min increased the thermal efficiency due to the decrease in thermal losses and electrical efficiency due to the lower surface temperature of the photovoltaic cell. According to the simulation results, the system was fabricated with a 10 mm diameter and field experiments were carried out at a 3 l/min flow rate. The comparison of simulation results and experimental evaluation showed that maximum thermal and electrical efficiency were 61.18% and 12.58% for simulation data and 58.14% and 12.03% for field data, respectively.

Keywords parabolictrough collector; Simulation; Photovoltaic cell

CITATION LINKS

[1] Design, simulation and optimization of a compound parabolic ... [2] Overview of concentrated photovoltaic (CPV) ... [3] Energetic evaluation of thermal energy storage options for high efficiency solar cooling ... [4] A PVT collector concept with variable film insulation and low-emissivity ... [5] Numerical analysis of using photovoltaic-thermal combined solar water heater in ... [6] Performance evaluation of sheet-and-tube hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collectors connected in ... [7] Experimental and numerical study of a parabolic trough linear CPVT ... [8] Parabolic trough collector testing in the frame of the REACT ... [9] Concentrating photovoltaic thermal (CPVT) collectors and systems: Theory, performance assessment and ... [10] Heat transfer enhancement and performance of solar thermal absorber tubes with circumferentially non-uniform heat ... [11] Performance analysis of parabolic through solar equipped with solar cell and TEG ... [12] A finite-volume model of a parabolic trough photovoltaic/thermal collector: Energetic and exergetic ... [13] Dynamic simulation and exergetic optimization of a concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) ... [14] A detailed thermal model of a parabolic trough collector ... [15] Investigation of a nanofluid-based concentrating thermal photovoltaic with a parabolic ... [16] Performance evaluation of concentrating solar photovoltaic and photovoltaic/thermal ... [17] Simulation studies of thermal and electrical performance of solar linear parabolic trough concentrating photovoltaic ... [18] Design and experimental evaluation of a parabolic-trough concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) system with high-efficiency ... [19] Optimization and parametric analysis of a nanofluid based photovoltaic thermal system: 3D numerical model with experimental ... [20] Manufacturing a trough parabolic solar collector and predicting its theoretical ... [21] Parabolic trough photovoltaic/thermal collectors: design and simulation ... [22] Multi-criteria evaluation of parabolic trough collector with internally finned ... [23] Investigating the effect of different variables on the performance of a photovoltaic/thermal system water bed ... [24] Experimental and numerical investigation of a linear fresnel solar collector with flat plate ... [25] Design and simulation of a solar dish concentrator with spiral-coil smooth thermal ...

شبیه‌سازی و ارزیابی تجربی عملکرد متمرکزکننده سهموی خطی مجهز به سامانه فتوولتاییک-حرارتی

سعید خداترس BSc

گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

سیدرضا موسوی سیدی* PhD

گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

علی متولی PhD

گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

مهدی منتظری MSc

گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

سلول‌های فتوولتاییک مجهز به جمع‌کننده حرارتی می‌توانند انرژی خورشیدی را به صورت‌های الکتریکی، حرارتی و ترکیبی از این انرژی تبدیل نماید. در این پژوهش یک سامانه متمرکزکننده سهموی خطی مجهز به سلول‌های فتوولتاییک در نرم‌افزار Optic Ray Tracing شبیه‌سازی نوری و در نرم‌افزار Solidworks شبیه‌سازی حرارتی صورت گرفت و نتایج آن با ارزیابی تجربی مقایسه شد. شبیه‌سازی جمع‌کننده حرارتی در سامانه ترکیبی فتوولتاییک-حرارتی با دو آرایش طولی و عرضی و در ۴ سطح قطر داخلی لوله‌ها (۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ میلی‌متر) و در سه سطح دبی (۲، ۳ و ۴ لیتر بر دقیقه) انجام شد. نتایج شبیه‌سازی دو آرایش طولی و عرضی لوله‌ها نشان داد که بازده حرارتی در چینش طولی بهتر از چینش عرضی بود. همچنین نتایج به‌دست آمده نشان داد که با افزایش قطر لوله‌ها از ۸ تا ۱۲ میلی‌متر روند تغییرات بازده حرارتی افزایشی و از قطر ۱۲ تا ۱۴ میلی‌متر تغییرات چندانی در بازده حرارتی مشاهده نشد. افزایش دبی سیال از ۱ به ۳ لیتر بر دقیقه راندمان حرارتی به دلیل کاهش تلفات حرارتی و راندمان الکتریکی به دلیل کاهش دمای سطح سلول فتوولتاییک افزایش یافت. با توجه به نتایج شبیه‌سازی سامانه مورد نظر با قطر لوله ۱۰ میلی‌متر ساخته شد و آزمایش‌های میدانی با سرعت جریان دبی سیال ۳ لیتر بر دقیقه انجام شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی تجربی نشان داد که بیشینه راندمان حرارتی و الکتریکی برای داده‌های شبیه‌سازی به ترتیب ۶۱/۱۸٪ و ۱۲/۵۸٪ و برای داده‌های میدانی ۵۸/۱۴٪ و ۱۲/۰۳٪ به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: متمرکزکننده سهموی، شبیه‌سازی، سلول فتوولتاییک

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۶/۰۹

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۷/۲۰

نویسنده مسئول: mousavi22@gmail.com

۱- مقدمه

امروزه در اکثر کشورها با افزایش هزینه‌های سوخت‌های فسیلی و هزینه‌های تولید برق که با ایجاد مشکلات زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای همراه است، دولت‌ها را بر آن داشت تا علاقه‌مندی‌های خود را به سمت انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر سوق

دهند[1]. انرژی خورشیدی یکی از امیدبخش‌ترین فناوری‌های تجدیدپذیر است زیرا این منبع انرژی رایگان می‌تواند در برنامه‌های کاربردی بسیار متعددی مورد استفاده قرار گیرد[2]. از مهم‌ترین کاربردهای قابل استفاده از انرژی خورشیدی: انرژی گرمایی، سرمایگی و الکتریکی و یا ترکیبی از آنها می‌باشد[3]. مرسوم‌ترین روش به‌منظور تولید انرژی الکتریکی از خورشید، استفاده از سامانه‌های فتوولتاییک بوده که این سامانه‌ها معمولاً بازدهی بین ۱۰ تا ۲۰٪ را داشته و بخش زیادی از این انرژی خورشیدی در این سامانه به گرما تبدیل می‌شود[4]. نتایج بررسی‌ها نشان داد که افزایش دمای صفحات خورشیدی نسبت به دمای استاندارد، کاهش افت توان خروجی را در این سامانه‌ها به همراه خواهد داشت[5]. یکی از راهکارهای غلبه بر این مشکل، جذب حرارت از این صفحات و کاهش دمای آن به دمای استاندارد است که علاوه بر افزایش تولید الکتریسیته، می‌تواند حرارتی نیز تولید نمود، که به این سامانه مرکب از سلول‌های فتوولتاییک (PV) و جمع‌کننده‌های حرارتی، سامانه فتوولتاییک حرارتی (PV-T) اطلاق می‌شود[4]. در این سیستم با عبور جریان سیال از پشت صفحات فتوولتاییک، انرژی حرارتی سیستم را جذب و علاوه بر تولید انرژی حرارتی، راندمان این سلول‌ها افزایش می‌یابد[6]. بررسی‌های دلکول و همکاران[7] نشان داد که سامانه‌های ترکیبی فتوولتاییک-حرارتی صفحه تخت فقط پاسخگو کاربردهایی با دماهای پایین مانند استخرهای شنا و آب گرم خانگی در ماه‌های تابستان هستند و معمولاً برای فصول سرد چندان جذابیتهی ندارند. به‌منظور مرتفع ساختن این مشکل، سیستم‌های متمرکزکننده سهموی خطی (PTC) که دارای راندمان بالا و قابلیت تولید دمای بالا (۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) بوده با سامانه‌های فتوولتاییک-حرارتی ترکیب می‌شود[8]. از مزیت‌های این سیستم توانایی تولید حرارت و برق با راندمان بالا (بازده این سیستم‌ها در جهان بالای ۶۵٪ بوده) و قابلیت استفاده در فصول سرد به‌منظور افزایش دمای آب مصرفی است[9]. در سال‌های اخیر پژوهش‌های فراوانی برای تعیین پتانسیل این نوع سیستم‌ها جهت تولید الکتریسیته و حرارت صورت گرفته است. اکثر مطالعات حرارتی سیستم‌های فتوولتاییک به صورت تحلیل یک بعدی انتقال حرارت انجام شده است[10]. محسن‌زاده و شفیع‌ی[11]، مدل جدیدی از یک جمع‌کننده خورشیدی سهموی خطی پیشنهاد کردند که در آن از سلول‌های فتوولتاییک و ژنراتور ترموالکتریک استفاده شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که عملکرد مدل پیشنهادی نسبت به کلکتورهای سهموی خطی قابل‌قبول بوده و دارای راندمان کل (مجموعه راندمان الکتریکی و حرارتی) ۱۲٪ بود. دانش‌آزریان و همکاران[9] به نظریه، ارزیابی عملکرد و کاربردهای یک سامانه متمرکزکننده سهموی خطی فتوولتاییک-حرارتی پرداختند. در این تحقیق تجزیه و تحلیل عملکرد حرارتی و الکتریکی بر پایه آب و هوا به عنوان سیال پایه به صورت عددی و شبیه‌سازی و داده‌های میدانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سامانه‌های

به‌دست آمده نشان داد که حداکثر توان مجموع خروجی حرارتی و الکتریکی ۲۵۹۲/۴۲ وات با راندمان حرارتی ۷۸/۲٪ است [17]. کارتاناسیس و همکاران به بررسی عملکرد یک متمرکزکننده سهموی خطی مجهز به پنل‌های فتولتاییک/حرارتی (CPVT) پرداختند. در این پژوهش سه نوع دریافت‌کننده متفاوت با طرح‌های مختلف خنک‌کننده مورد بررسی قرار گرفت و سیستم CPVT برای رسیدن به یک بازده کل تقریباً برابر با ۵۰٪ (۴۴٪ حرارتی و ۶٪ بازده الکتریکی) بهینه‌سازی شد. نتایج نشان داد که علی‌رغم تاثیرگذاری دمای عملیاتی بر راندمان کل سامانه، شاخص راندمان کل به کیفیت نوری محدود می‌شود [18].

بررسی‌های منابع مختلف نشان داد که وجود سامانه فتولتاییک در خط محوری کانون متمرکزکننده سهموی خطی سبب ایجاد سایه‌اندازی بر بخش قایل توجهی از سطح بازتاب‌دهنده می‌شود و این عامل دارای اثرات منفی بر میزان نور بازتابی خواهد شد. از طرف دیگر به‌منظور رفع این مشکل می‌توان با بزرگ کردن صفحه متمرکزکننده اثر سایه‌اندازی را تا حدودی از بین برد ولی در عین حال باید توجه داشت که این عامل سبب افزایش نسبت تمرکز در سامانه شده که این عامل می‌تواند سبب آسیب به صفحات فتولتاییک گردد. از این رو با توجه به این مسایل، در این پژوهش سعی شد تا با اعمال تغییراتی در جایگاه قرارگیری صفحه فتولتاییک، الگوی مناسبی برای سامانه متمرکزکننده فتولتاییک-حرارتی استخراج شود و بر اساس آن شاخص‌های حرارتی و الکتریکی سامانه جدید مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش سامانه CPVT برای تامین انرژی مورد نیاز یک گلخانه در نرم‌افزارهای Optic ray tracing و Solidworks طراحی و شبیه‌سازی شد تا با تولید انرژی الکتریکی و حرارتی بالا، آسیبی به صفحه فتولتاییک وارد نشود. در ادامه سامانه براساس شرایط بهینه شبیه‌سازی ساخته شد و با انجام آزمایش‌های میدانی، داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های واقعی مقایسه شد.

۲- مواد و روش‌ها

سامانه طراحی شده دارای دو بخش متمرکزکننده و جمع‌کننده فتولتاییک-حرارتی است. برای طراحی هندسه نوری متمرکزکننده از نرم‌افزار Optic ray tacing استفاده شد و به‌منظور انجام عملیات شبیه‌سازی ترمودینامیکی، سامانه در بخش Part در نرم‌افزار Solidworks مدل‌سازی و در بخش Flow simulation شبیه‌سازی شد. نمایی از سامانه‌های شبیه‌سازی شده در شکل ۱ و اجزا و اندازه سامانه در جدول ۱ ذکر شده است.

اولین و مهم‌ترین قدم در این شبیه‌سازی ایجاد شرایط فیزیکی از قبیل شرایط مرزی، نوع مواد و خواص آنها و شرایط تابش خورشید است. نوع مواد و خواص مواد تشکیل‌دهنده پنل فتولتاییک به طور دقیق در قسمت اجزای سازنده در نرم‌افزار تعریف شد که در جدول ۲ ذکر شده است [19]. نور ورودی توسط آینه متمرکزکننده بر روی صفحات فتولتاییک متمرکز می‌شود، انرژی ورودی توسط

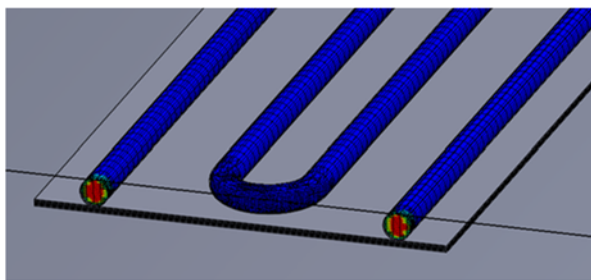
متمرکزکننده فتولتاییک-حرارتی دستگاه‌های امیدوارکننده‌ای هستند و پتانسیل خوبی برای رقابت با سایر روش‌ها در آینده دارند. کالیس و همکاران [12] به تحلیل انرژی و اکسرژی یک متمرکزکننده سهموی خطی با استفاده از روش المان محدود پرداختند. سامانه مورد بررسی از یک متمرکزکننده سهموی خطی و یک گیرنده فتولتاییک مثلثی تشکیل شده بود. نتایج نشان داد که روند پارامترهای ترمودینامیکی و الکتریکی در امتداد محور طولی سامانه CPVT افزایش می‌یابد. همچنین لازم به ذکر است که سیستم مورد بررسی در این مطالعه به دلیل استفاده از سلول‌های فتولتاییک سه‌جانبه بسیار گران‌قیمت و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نبود. کارتاناسیس و همکاران [13] به شبیه‌سازی دینامیکی و بهینه‌سازی اکسرژی یک سامانه سهموی خطی فتولتاییک-حرارتی پرداختند. در این پژوهش ابتدا عملکرد روزانه سیستم برای مقادیر مختلف جریان و دمای مایع خنک‌کننده در شرایط مختلف محیطی پیش‌بینی شد و در مرحله بعد، تحلیل اکسرژی به‌منظور تعیین تاثیر ویژگی‌های زیرمجموعه سامانه اصلی بر راندمان و خروجی اکسرژی سامانه CPVT مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عملکرد سامانه کاملاً تحت تاثیر کیفیت نوری سیستم است. در پژوهشی دیگر مدل حرارتی دقیق از یک متمرکزکننده سهموی خطی با استفاده از نرم‌افزار معادلات مهندسی (EES) مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش تجزیه و تحلیل حرارتی گیرنده جمع‌کننده در تمام حالت‌های انتقال حرارت انتقال به داخل گیرنده از جمله در ناحیه بین گیرنده و پوشش شیشه‌ای، از پوشش شیشه‌ای به هوای محیط، انتقال از طریق لوله گیرنده فلزی و دیوارهای شیشه‌ای و تشعشعات از لوله گیرنده فلزی و سطوح پوشش شیشه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این مدل قابلیت خوبی در تعیین انتقال حرارت در سامانه‌های خورشیدی را دارد [14]. بلوس و تزیونندیس به شبیه‌سازی یک سامانه سهموی خطی فتولتاییک-حرارتی در نرم‌افزار Solid Works پرداختند و تاثیر نوع سیال را از نظر انرژی و اکسرژی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ دبی بازده حرارتی، الکتریکی و کل افزایش می‌یابد. همچنین با تغییر سیال آب به نانو سیال راندمان‌های حرارتی، الکتریکی، کل و اکسرژی به ترتیب، ۱/۶۶٪، ۱۷/۵٪، ۰۸/۲٪ و ۰۵/۳٪ افزایش می‌یابد [15]. چابانه و همکاران به ارزیابی عملکرد یک متمرکزکننده سهموی خطی مجهز به سلول‌های فتولتاییک-حرارتی پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که به‌دلیل کاهش دمای سلول خورشیدی در اثر انتقال حرارت به سیال در سامانه فتولتاییک-حرارتی، عملکرد الکتریکی سیستم بهبود یافت و تولید انرژی آن قابل قبول شد [16]. سرنیو/ستاوا و ردی در پژوهشی دیگر به بررسی شبیه‌سازی عملکرد حرارتی یک سامانه سهموی خطی فتولتاییک-حرارتی پرداختند. در این پژوهش از درصد حجمی ۱٪ تا ۶٪ نانو سیال با دبی ۱ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفتند و در نرم‌افزار ANSYS شبیه‌سازی حرارتی این سامانه انجام شد. نتایج

۱-۲- اعمال شرایط مرزی شبیه‌سازی

- صفحه متمرکزکننده در فضای شبیه‌سازی Solidworks به‌عنوان Wall symmetry انتخاب شد.
- صفحه فتولتایک به‌عنوان Absorbent wall تعریف شد.
- چینش لوله به دو صورت عرضی و طولی با صفحات فتولتایک تعریف شد.
- تابش خورشید با ۳۵ درجه زاویه با راستای عمود بر سامانه تعریف شد.
- جنس لوله‌های جمع‌کننده حرارتی و صفحه جاذب مس تعریف شد.
- جنس صفحه دریافت‌کننده نور در متمرکزکننده سهموی خطی ورق استیل تعریف شد.
- خواص مواد تشکیل‌دهنده فتولتایک بنا به جدول ۲ تعریف شد.
- دمای ورودی سیال برای تمامی لوله‌های شبیه‌سازی ۲۰ درجه سانتی‌گراد فرض شد.
- شدت تابش در تمامی مراحل شبیه‌سازی $\frac{w}{m^2} 1000$ و دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد.

۲-۲- ساختار مش‌بندی (شبکه‌بندی)

شبیه‌سازی جریان، مدل واقعی ایجاد شده در Solidworks را به‌طور خودکار یک مش محاسباتی مستطیلی در دامنه محاسباتی جامد و مایع ایجاد می‌کند. مش‌بندی در Solidworks را می‌توان برای تجزیه و تحلیل دو بعدی و سه بعدی بکار برد که در این تحقیق از مش‌بندی سه‌بعدی استفاده شده است. شکل ۲ مش‌بندی داخل لوله‌های جمع‌کننده حرارتی را نشان می‌دهد.



شکل ۲) سایزبندی لوله‌های جمع‌کننده حرارتی

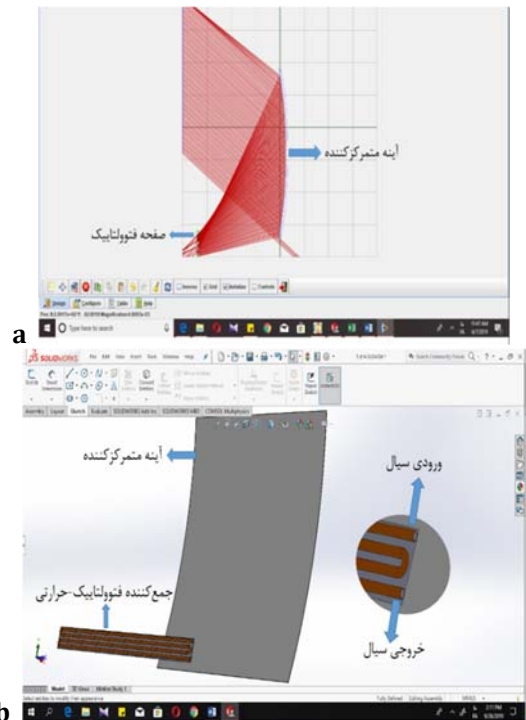
۳-۲- تحلیل ردیابی نوری

در این پژوهش ابتدا پارامترهای هندسه نوری که بر بازده سیستم تاثیرگذار بودند در نرم‌افزار تحلیل نوری در دو حالت عادی و خارج از فاصله کانونی ارزیابی شده تا همزمان با تولید بیشینه انرژی حرارتی بیشینه تولید برق نیز به‌دست آید. فاصله کانونی متمرکزکننده از رابطه ۱ محاسبه شد [20].

$$y = \frac{x^2}{4f} \quad (1)$$

که x عرض سهموی m ، y ارتفاع سهموی m و f فاصله کانونی m است. نسبت تمرکز سامانه فتولتایک-حرارتی مجهز به متمرکزکننده سهموی خطی به عنوان نسبت سطح فتولتایک به

سیال آب درون لوله‌های مسی نصب شده در پشت صفحات فتولتایک جذب شده و درون یک مخزن آب با ظرفیت ۶۰ لیتر ذخیره می‌شود. از یک پمپ از نوع سیرکولاتور مدل WG-90 ساخته شده توسط شرکت Drop چین با توان مصرفی ۹۰ وات برای به گردش درآوردن سیال درون لوله‌های جمع‌کننده پشت صفحات خورشیدی استفاده شد.



شکل ۱) طرحواره یک سامانه متمرکزکننده با فتولتایک حرارتی در (a) نرم‌افزار Solidworks (b) نرم‌افزار Optic ray tracing

جدول ۱) اجزای سازنده سامانه

اجزا	اندازه (mm)
اتیلن ونیل استات	۰/۵×۱۰۰×۱۰۰
سلول فتولتایک	۰/۳×۰/۰۲×۰/۰۳×۱۲۰
تدلار	۰/۱×۱۰۰×۱۰۰
صفحه جاذب	۰/۴×۱۰۰×۱۰۰
قطر لوله	۱۲
جمع‌کننده	۱۰۰×۱۰۰

جدول ۲) خواص ترمودینامیکی اجزای سازنده

اجزاء	ضریب ظرفیت گرمایی $(j kg^{-1} k^{-1})$	رسانش گرمایی $(w m^{-1} k^{-1})$	چگالی $(kg m^{-3})$
اتیلن ونیل استات	۲۰۹۰	۰/۳۵	۹۶۰
سلول فتولتایک	۷۰۰	۱۴۹	۲۳۳۰
تدلار	۱۲۵۰	۰/۲۸	۱۲۰۰
صفحه جاذب مسی	۳۸۵	۴۰۱	۸۹۶۰

به متمرکزکننده سهموی برابر است با [15]:

$$\eta_{th} = \eta_0 - 0.0755 \times \left(\frac{T_i - T_{amb}}{T_i} \right) - 3.4173 \times \left(\frac{T_i - T_{amb}}{T_i} \right)^2 \quad (7)$$

η_0 بازده بیشینه سیستم و T_{amb} دمای محیط $^{\circ}C$ است.

در اثر افزایش دمای سطح سلول در اثر بسته بودن سیکل جریان سیال، میزان کاهش توان الکتریکی بر حسب دما با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شد [15]:

$$\eta_{PV} = \eta_r \times [1 - 0.0045 \times (T_{cell} - 25)] \quad (8)$$

η_{PV} توان الکتریکی در دمای کارکردی، η_r بازده سلول در شرایط مرجع، است.

راندمان الکتریکی برابر است با [17]:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{G \times A_{pvt}} \quad (9)$$

P_{el} توان الکتریکی است و G شدت تابش ورودی بر روی سطح پنل است که برابر است با [18]:

$$G = I \times C_{pvt} \quad (10)$$

۵-۲- تحلیل جریان سیال

به‌منظور بررسی و تعیین بهترین شرایط خنک‌کنندگی سیال در پشت صفحات فتوولتاییک، چینش لوله‌ها به دو صورت طولی و عرضی مورد بررسی قرار گرفته شده است. در هر دو حالت چینش طولی و عرضی، اختلاف فشار در دو سر ورودی و خروجی لوله‌ها با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه شد [23]:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \rho g (l \sin \theta + h_1) \quad (11)$$

ΔP اختلاف فشار بین خروجی و ورودی Pa ، $l \sin \theta$ فاصله عمودی بین ورودی و خروجی m ، ρ چگالی آب $\frac{kg}{m^3}$ و h_1 افت هد کل است.

مجموع افت اصطکاکی و هد موضعی برابر است با [23]:

$$h_1 = \frac{4 m^2}{\rho^2 g A_i} \left(f \frac{L}{D_i} + k_1 + k_2 \right) \quad (12)$$

K ضریب افت فرعی، A_i مساحت داخلی لوله m^2 ، g شتاب گرانش $\frac{m}{s^2}$ ، D_i قطر داخلی لوله m ، L طول لوله m است.

f اصطکاک موضعی برابر است با [23]:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (13)$$

Re عدد رینولدز است.

توان مصرفی پمپ آب به‌منظور پمپاژ سیال به درون لوله‌ها در دبی‌های مختلف با استفاده از رابطه ۱۴ محاسبه شد [23]:

$$P_{Pump} = \frac{\dot{m} \times \Delta P}{\rho \times \eta_{Pump}} \quad (14)$$

η_{Pump} مقدار راندمان پمپ بین ۰/۸ تا ۰/۹ در نظر گرفته شد.

۶-۲- ساخت سامانه و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی

به‌منظور ساخت سامانه، نتایج حاصل از شبیه‌سازی سامانه سهموی خطی مجهز به سلول فتوولتاییک در نرم‌افزار مورد بررسی قرار گرفت و بر آن اساس بهترین نوع آرایش لوله‌ها (چینش طولی و عرضی) انتخاب شد. به‌منظور تعیین بهترین قطر لوله‌ها، عملیات شبیه‌سازی در لوله‌ها با قطرهای داخلی از ۸ تا ۱۴ میلی‌متر انجام شد. بعد از عملیات شبیه‌سازی، میزان انرژی

سطح متمرکز کننده تعریف و از رابطه ۲ محاسبه شد [21]:

$$C_{pvt} = \frac{A_c}{A_{pvt}} \quad (2)$$

که A_c مساحت سطح متمرکزکننده m^2 و A_{pvt} مساحت سطح فتوولتاییک m^2 است.

همچنین مساحت سطح متمرکزکننده برابر است با [19]:

$$A_c = C \times W \quad (3)$$

W عرض سهموی m و C طول سطح متمرکزکننده m است.

۴-۲- تحلیل حرارتی و الکتریکی

در این پژوهش، در قسمت شبیه‌سازی از سیال آب به‌عنوان سیال پایه و از سه نرخ جریان (۱، ۲ و ۳ لیتر بر دقیقه) برای شبیه‌سازی فرآیند خنک‌کردن صفحات فتوولتاییک استفاده شد. با توجه به تغییرات دمایی سیال در طول روز در سامانه فتوولتاییک حرارتی، سیکل سیستم بسته تعریف شد یعنی دمای ورودی سیال با بالا رفتن دمای حجم مخزن تغییر یافت. همچنین دو نوع چینش لوله‌های پشت صفحه فتوولتاییک (چینش طولی و عرضی) در نظر گرفته شد. در چینش عرضی لوله‌ها در عرض صفحه فتوولتاییک با عرض 10° سانتی‌متر (و در امتداد طول به طول یک متر) شبیه‌سازی شدند و در آرایش طولی لوله‌ها در طول یک متر (و در عرض صفحه فتوولتاییک با اندازه 10° سانتی‌متر) شبیه‌سازی شدند. پارامترهای متغیر در شبیه‌سازی دبی و قطر لوله جمع‌کننده در نظر گرفته شد که مشخصات آن در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳) پارامترهای متغیر در شبیه‌سازی

پارامترهای متغیر	۱	۲	۳	۴
قطر لوله (mm)	D8 = 8	D10 = 10	D12 = 12	D14 = 14
دبی ($\frac{L}{min}$)	V1 = 1	V2 = 2	V3 = 3	-

مقدار انرژی ورودی به سامانه با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد [22]:

$$E = I \times A_c \quad (4)$$

I شدت تابش خورشید $\frac{W}{m^2}$ و A_c مساحت سطح متمرکزکننده m^2 می‌باشد.

توان حرارتی مفید تولیدی در سامانه فتوولتاییک- حرارتی مجهز به سامانه متمرکزکننده می‌تواند با استفاده از رابطه (۵) محاسبه گردد [21]:

$$Q_C = \dot{m} C_p (T_0 - T_i) \quad (5)$$

در رابطه بالا \dot{m} نرخ دبی سیال $\frac{kg}{s}$ ، C_p ظرفیت گرمایی ویژه آب $\frac{s}{kg \cdot ^{\circ}C}$ ، T_0 دمای خروجی سیال $^{\circ}C$ ، T_i دمای ورودی سیال $^{\circ}C$ است.

بازده حرارتی سامانه فتوولتاییک- حرارتی مجهز به متمرکزکننده سهموی می‌تواند با استفاده از رابطه (۶) به‌دست آید [22]:

$$\eta_{th} = \frac{Q_C}{E} \quad (6)$$

همچنین بازده حرارتی لحظه‌ای سامانه فتوولتاییک حرارتی مجهز

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شبیه سازی ردیابی نور

در پژوهش حاضر به منظور شبیه سازی صفحات فتوولتاییک در سامانه فتوولتاییک- حرارتی از ابعاد و اندازه های سلول های موجود در بازار (دارای عرض حداقلی ۱۰ سانتی متر) استفاده شد. عملیات شبیه سازی هندسه نوری در نرم افزار Optic Ray Tracing انجام شد و نتایج میزان بازتاب نور بر صفحه فتوولتاییک در قرار گرفتن این صفحات در خط کانونی در شکل ۵- b و قرار گرفتن این صفحات در خارج از خط کانونی در شکل ۵- a نشان داده شده است. نتایج به دست آمده در حالت قرارگیری صفحه فتوولتاییک در خارج از خط کانونی (شکل ۵- a) نشان داد که تمام نور به سطح براق متمرکزکننده رسیده و با بازتاب نور به صفحه فتوولتاییک، بخش وسیعی از اشعه های نوری از سطح منعکس کننده بازتاب شده و به صفحه فتوولتاییک می رسد. در صورت قرار گرفتن صفحه فتوولتاییک بر خط کانونی متمرکزکننده، به علت پهنای عرضی صفحه فتوولتاییک و سایه اندازی این صفحه بر سطح متمرکزکننده، قسمتی از سطح منعکس کننده (سطح آیینه ای) متمرکزکننده از چرخه بازتاب نور خارج شده و نور به طور کامل بر صفحه فتوولتاییک بازتاب نخواهد داشت. این امر سبب می شود تا راندمان الکتریکی و حرارتی سامانه به شدت کاهش یابد، همچنین بیشتر نور بازتابی بر روی یک خط متمرکز شده و دمای سطح صفحه فتوولتاییک بالا رفته که باعث آسیب دیدن سلول های فتوولتاییک می شود. بر اساس یک سلول فتوولتاییک با عرض ۱۰ سانتی متر در نرم افزار Optic Ray Tracing در نظر گرفته شد و زوایای تابش خورشید بر سطح متمرکزکننده از ۰ تا ۴۵ درجه تغییر یافت. نتایج نشان داد که بهترین زاویه تابش ۳۵ درجه بود که تمام نور به صورت یکنواخت و کامل بر سطح جذب برخورد می کند.

۳-۲- شبیه سازی دمای خروجی سامانه

نتایج بررسی شبیه سازی دمای سیال هوای احاطه شده سطح صفحه خورشیدی در شکل ۶- a و دمای سیال آب درون سلول فتوولتاییک در شکل ۶- b آورده شده است.

نتایج شبیه سازی سامانه فتوولتاییک حرارتی مجهز به متمرکز کننده سهموی در اثرات تغییرات قطر لوله ها در دو حالت چینش به صورت عرضی (نمودار ۱- a) و طولی (نمودار ۱- b) نشان داد که اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال در هر دو چینش از قطر ۸ تا ۱۲ روند صعودی و از ۱۲ تا ۱۴ تغییری نداشته است. بررسی نتایج نشان داد که با تغییرات دبی سیال از ۱ به ۲ لیتر بر دقیقه در قطر لوله های یکسان دمای خروجی از لوله ها به طور چشم گیری تغییر یافته و با تغییر دبی سیال از ۲ به ۳ لیتر بر دقیقه میزان این تغییرات کاهش یافت. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود با افزایش قطر لوله ها، دمای سیال خروجی از لوله ها افزایش می یابد که دلیل آن افزایش سطح تماس بین صفحه جذب (صفحه پشت پنل فتوولتاییک) و لوله های جریان سیال در

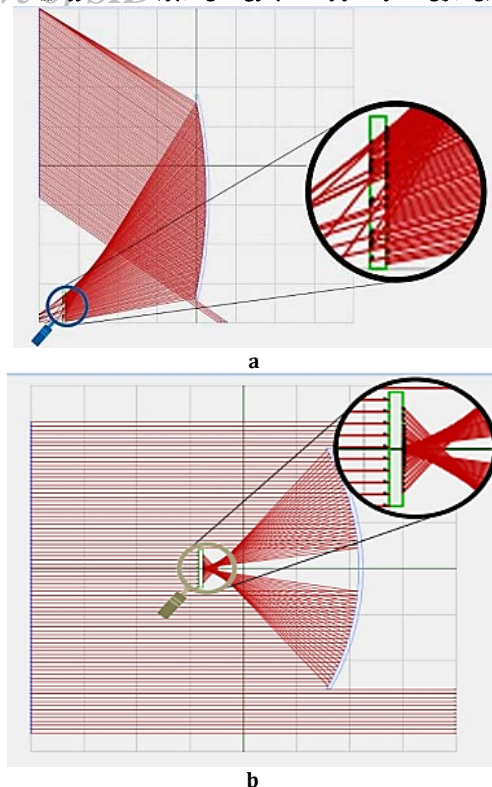
مصرفی توسط پمپ در قطره های مختلف لوله های سامانه فتوولتاییک- حرارتی (در چینش و قطره های مختلف لوله ها) به صورت تئوری مورد بررسی قرار گرفت و بهترین حالت بر اساس اختلاف مجموع انرژی حرارتی و الکتریکی (انرژی تولیدی) با انرژی مورد نیاز پمپ (انرژی مصرفی) تعیین شد. به منظور انعکاس دقیق بازتاب اشعه های نوری از یک سامانه ردیابی در محور شرق به غرب استفاده شد. به منظور اندازه گیری دماهای خروجی- ورودی، سطح سلول فتوولتاییک و دمای محیط از حسگرهای ترموکوپل مدل K با دقت ۰/۰۵ درجه سانتی گراد و خطای اندازه گیری ۰/۵ درجه سانتی گراد و با محدوده اندازه گیری ۲۰۰- تا ۱۵۰+ درجه سانتی گراد، متصل به یک داماسنج دیتالاگر ۸ کاناله، مدل PROVA 800 ساخته شده توسط شرکت LUTRON کشور تایوان استفاده شد، تصویر دستگاه اندازه گیری در شکل ۳- a نشان داده شده است. برای اندازه گیری شدت تابش وارد بر سطح پنل فتوولتاییک در راستای عمود، از یک تابش سنج مدل SPM- 1116SD ساخته شده توسط شرکت LUTRON کشور تایوان، با دقت ۰/۱ وات بر متر مربع در محدوده اندازه گیری ۰ تا ۲۰۰۰ وات بر متر مربع استفاده شد. شکل ۳- b دستگاه تابش سنج مورد استفاده در آزمایش را نشان می دهد. برای اندازه گیری توان تولیدی توسط پنل های فتوولتاییک از یک دستگاه تحلیل گر توان فتوولتاییک، مدل PROVA 200A ساخته شده توسط شرکت LUTRON کشور تایوان، با دقت تعیین ولتاژ ۱٪، در محدوده ۰ تا ۶۰ ولت و دقت تعیین جریان ۱٪ در محدوده ۰ تا ۶ آمپر استفاده شد. این دستگاه دارای دیتالاگر برای ثبت داده ها بوده و اطلاعات در حافظه دستگاه ذخیره شده و با اتصال به رایانه توسط کابل RS-232 و نصب نرم افزار مربوطه می توان اطلاعات را در فرمت فایل Exel برداشت نمود. تصویری از دستگاه تحلیل گر توان فتوولتاییک در شکل ۳- c نشان داده شده است. با توجه به داده های استخراج شده از دو نرم افزار شبیه سازی، سامانه ساخته شد. همچنین سامانه ساخته شده و استفاده شده برای انجام آزمایشات در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۳) دستگاه های اندازه گیری (a) داماسنج (b) شدت سنج (c) وات متر



شکل ۴) سامانه سهموی خطی فتوولتاییک



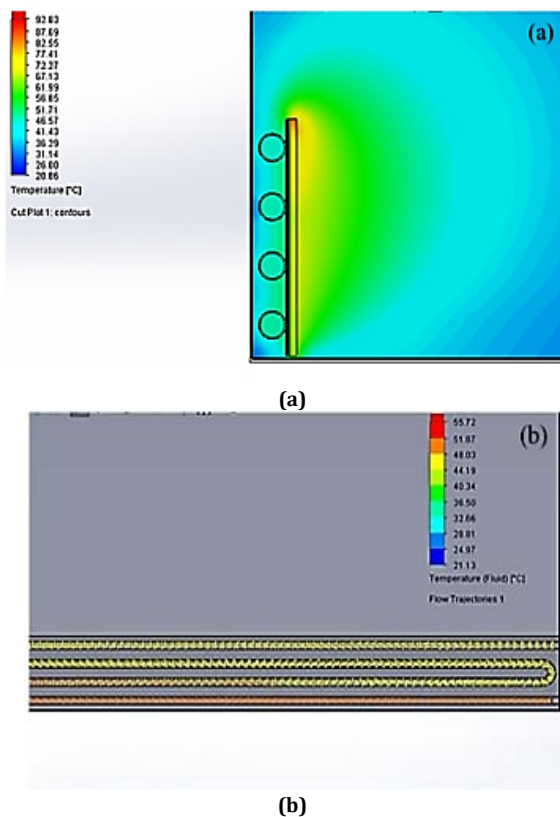
شکل ۵) تصویر شبیه‌سازی نوری (a) سلول فتوولتائیک خارج از مرکز (b) سلول فتوولتائیک در کانون

قطر بزرگتر بوده و به دنبال آن جذب حرارت بیشتری از سطح صفحه فتوولتائیک اتفاق می‌افتد و در نهایت بازده حرارتی (نمودار ۱) افزایش می‌یابد. از طرف دیگر باید توجه داشت که در دبی ثابت، با افزایش قطر لوله‌ها سرعت حرکت سیال درون لوله‌ها کاهش یافته و در نتیجه دمای خروجی افزایش می‌یابد. بررسی رابطه‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد که مقدار انرژی خروجی در راندمان حرارتی به دبی و دمای خروجی ارتباط دارد. در عین حال با افزایش قطر لوله‌ها از ۱۲ میلی‌متر به بالا تغییرات دمای خروجی کاهش پیدا کرده که دلیل این امر این است که با افزایش قطر لوله‌ها، حجم آب درون لوله‌ها افزایش یافته و از آنجا که انرژی ورودی به سطح پنل ثابت بوده، در نتیجه این میزان انرژی توانایی افزایش دمای چشم‌گیر این حجم آب را نداشته و تغییرات خروجی روند کاهشی پیدا کرده است (البته باید گفت که تغییرات چندانی با افزایش قطر لوله از ۱۲ به ۱۴ میلی‌متر در دمای خروجی و نهایتاً بازده وجود نداشت). نتایج شبیه‌سازی عملکرد حرارتی یک سامانه خورشیدی توسط بلوس و همکاران [24] نشان داد هر چه دبی سیال افزایش یابد، ضریب هدایت حرارتی افزایش یافته و به دنبال آن دمای سطح پنل کاهش یافته در نتیجه تلفات هدایتی و تابشی کاهش می‌یابد و این امر سبب می‌شود تا راندمان حرارتی افزایش یابد.

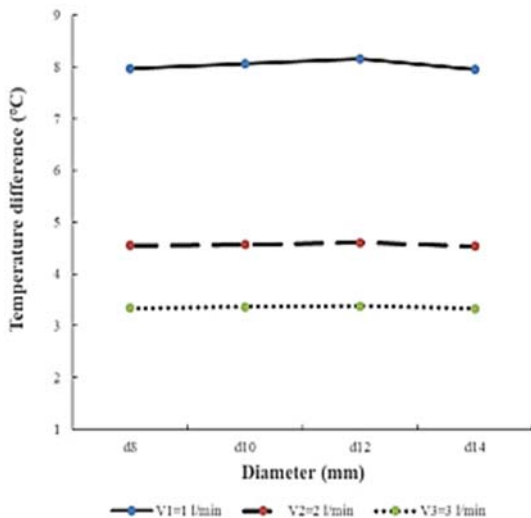
۳-۳- شبیه‌سازی بازده سامانه

بررسی نتایج بازده حرارتی در دو حالت چینش لوله‌های پشت صفحه فتوولتائیک نشان داد که چینش طولی دارای بازده حرارتی بالاتری نسبت به چینش عرضی بود. یکی از دلایل مهم بالا بودن راندمان حرارتی در چینش طولی نسبت به چینش عرضی این است که طول لوله‌ها در چینش طولی بزرگتر از چینش عرضی بوده و به دنبال آن سیال مسافت و زمان بیشتری را در چینش طولی طی کرده و دمای خروجی از لوله‌ها افزایش می‌یابد. همچنین نتایج به‌دست آمده در بررسی اثر تغییرات قطر داخلی لوله بر بازده حرارتی نشان داد که این شاخص از قطر ۸ تا ۱۲ میلی‌متر دارای روند صعودی و از ۱۲ تا ۱۴ میلی‌متر دارای روند نزولی بود. یکی از دلایل مهم افزایشی بودن بازده حرارتی تا قطر ۱۲ میلی‌متر آن است که بر اساس شرایط شبیه‌سازی، میزان انرژی ورودی بر سطح صفحه فتوولتائیک ثابت بوده (۱۰۰۰ وات بر متر مربع) و با افزایش قطر از ۸ تا ۱۴ میلی‌متر، حجم آب درون لوله‌ها افزایش یافته و به دنبال آن با افزایش قطر لوله‌ها تغییرات دمایی (اختلاف دمای خروجی و ورودی) کم می‌شود.

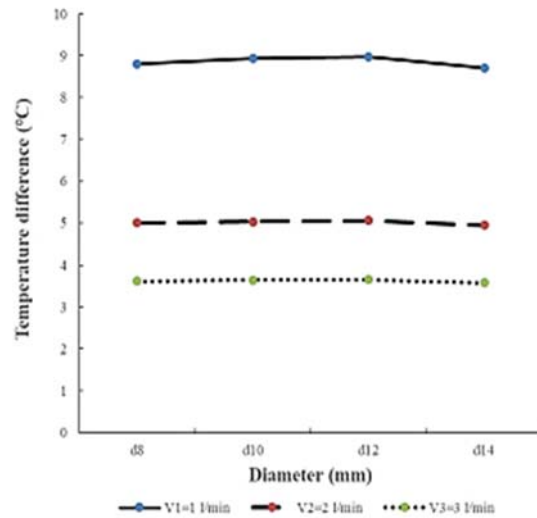
همچنین نتایج بررسی بازده حرارتی (نمودار ۲) در شبیه‌سازی سامانه فتوولتائیک حرارتی مجهز به متمرکزکننده سهموی در شرایط مختلف نشان داد بالاترین میزان این بازده به میزان ۶۲/۳۲ در چینش طولی، قطر لوله ۱۲ و دبی جریان ۳ لیتر بر دقیقه و پایین‌ترین میزان این شاخص به میزان ۴۵/۱۳ در چینش عرضی، قطر لوله ۱۴ و دبی جریان الیتر بر دقیقه به‌دست آمد.



شکل ۶) دمای سیال احاطه شده سطح فتوولتائیک (a) دمای سیال درون جاذب فتوولتائیک (b)

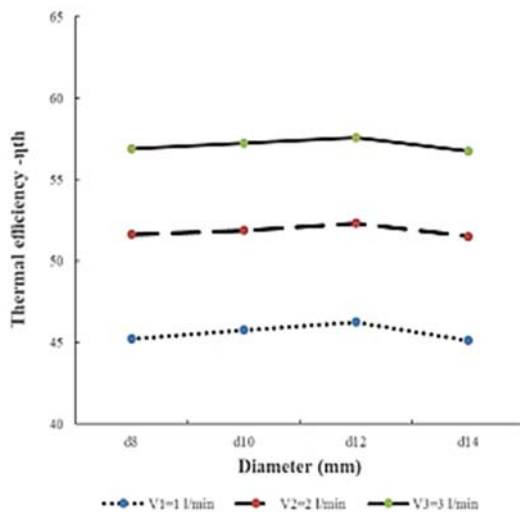


(a)

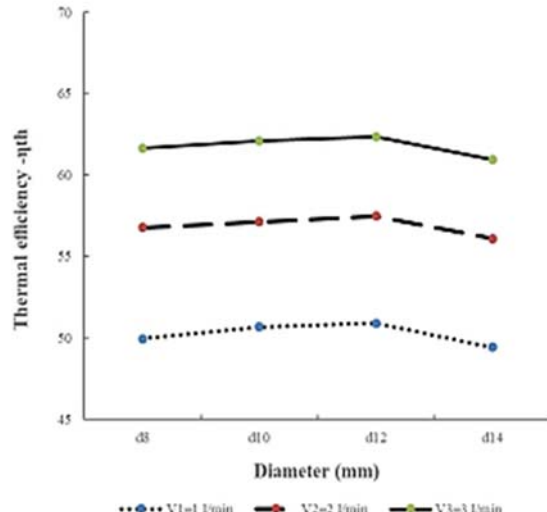


(b)

نمودار ۱) شبیه‌سازی اختلاف دمای (a) چپینش عرضی (b) چپینش طولی



(a)



(b)

نمودار ۲) شبیه‌سازی راندمان حرارتی (a) چپینش عرضی (b) چپینش طولی

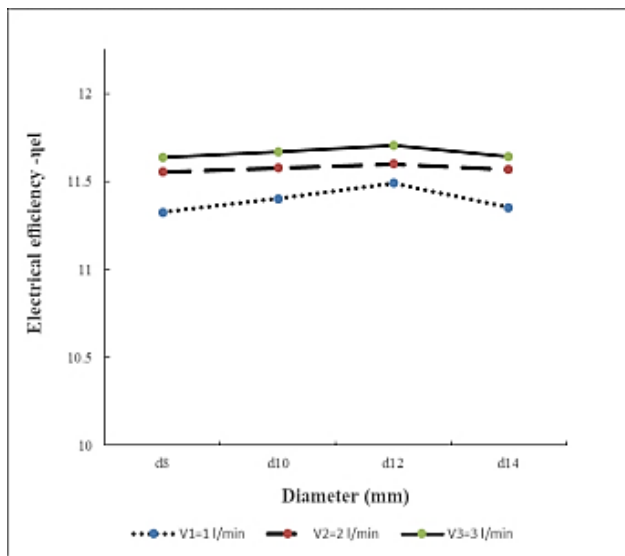
برای چپینش عرضی ۱۱/۷۰٪ برای قطر داخلی ۱۲ میلی‌متر در دبی ۳ لیتر بر دقیقه به‌دست آمد. نتایج بررسی نمودار ۴ نشان داد که در هر دو حالت چپینش طولی و عرضی با افزایش دبی سیال درون لوله‌ها، میزان بازده کل افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش قطر لوله‌ها در هر دو چپینش تا ۱۲ میلی‌متر روند تغییرات بازده کل صعودی بوده و با افزایش قطر لوله‌ها از ۱۲ میلی‌متر، میزان تغییرات بازده کل ناچیز بود. همچنین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در راندمان الکتریکی و حرارتی، بیشینه راندمان کل نیز برای لوله با قطر داخلی ۱۲ با چپینش آرایش طولی در دبی ۳ لیتر بر دقیقه به میزان ۷۵/۱۷٪ به‌دست‌آمد و کمینه این پارامتر نیز برای چپینش عرضی با قطر داخلی ۱۴ در دبی الیتر بر دقیقه به میزان ۵۶/۴۸٪ به‌دست‌آمد.

بررسی نتایج بازده الکتریکی در چپینش‌های مختلف لوله‌ها نشان داد که چپینش طولی دارای بازده الکتریکی بهتری نسبت به چپینش عرضی بود که یکی از دلایل مهم این نتیجه جذب حرارت بیشتر از صفحه فتوولتایک در چپینش طولی بوده و به دنبال آن دمای سطح صفحه خورشیدی کاهش یافته و بر اساس معادله ۸، بازده الکتریکی صفحه فتوولتایک افزایش می‌یابد. بررسی اثرات دبی جریان سیال نشان می‌دهد که نتایج به‌دست‌آمده در بخش الکتریکی نیز با نتایج به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی بئوس و تریزنو/اندیس [۱۵] همسو بود، که با افزایش دبی، دمای سیال کاهش یافته در نتیجه راندمان الکتریکی افزایش می‌یابد. بیشترین راندمان الکتریکی در چپینش طولی برای قطر داخلی ۱۲ میلی‌متر در دبی ۳ لیتر بر دقیقه ۱۲/۸۴٪ به‌دست‌آمد که این بیشینه مقدار

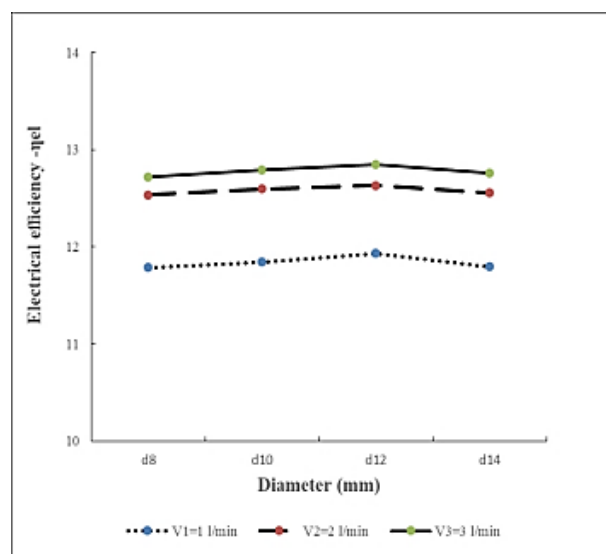
با توجه به رابطه ۱۱، لوله با قطر داخلی ۱۴ میلی‌متر با چینش طولی دارای کمترین میزان افت فشار بود. اختلاف فشار در چینش عرضی بدلیل وجود تعداد خم‌های زیاد بیشتر از طولی به‌دست آمد که بالاترین آن برای قطر داخلی ۸ میلی‌متر با مقدار ۱۶۲۶۳ پاسکال و برای آرایش طولی برای قطر داخلی ۸ میلی‌متر ۷۲۶۴ پاسکال بود. بررسی میزان انرژی مصرفی پمپ در اثر اختلاف فشارهای مختلف (نمودار ۶) نشان داد که در هر دو چینش طولی و عرضی با افزایش قطر لوله به دلیل کاهش اختلاف فشار ورودی و خروجی میزان انرژی مصرفی پمپ کاهش یافت.

۳-۴- بررسی تأثیرات افت فشار و انرژی مصرفی پمپ

یکی از معیارهای مهم در انتخاب بهترین چینش، مصرف انرژی توسط پمپ به‌منظور به‌گرددش درآوردن سیال در درون لوله‌های پشت صفحه فتولتاییک بود. با توجه به تغییرات دبی سیال، قطر لوله و چینش‌های مختلف، افت فشارهای متفاوتی در سیستم به وجود آمده و بر اساس آن میزان انرژی مورد نیاز برای پمپاژ سیال تغییر خواهد کرد. در این پژوهش معیار نهایی انرژی الکتریسیته از اختلاف دو پارامتر انرژی تولیدی صفحه فتولتاییک و انرژی مصرفی پمپ استخراج شد. اختلاف فشار در چینش، قطر لوله و دبی‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. بر این اساس

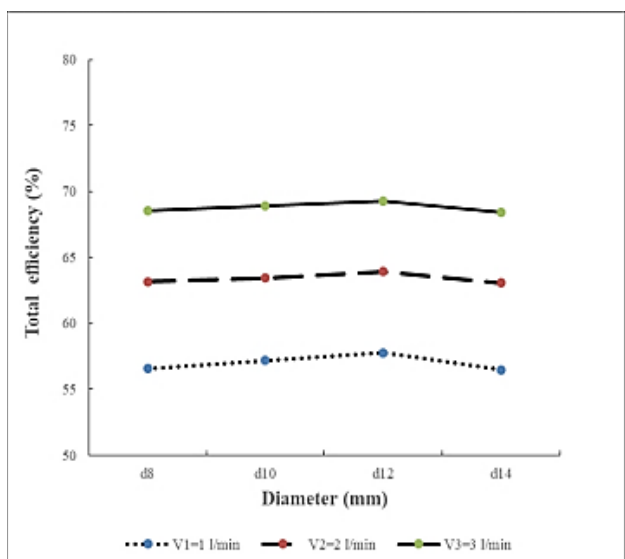


(a)

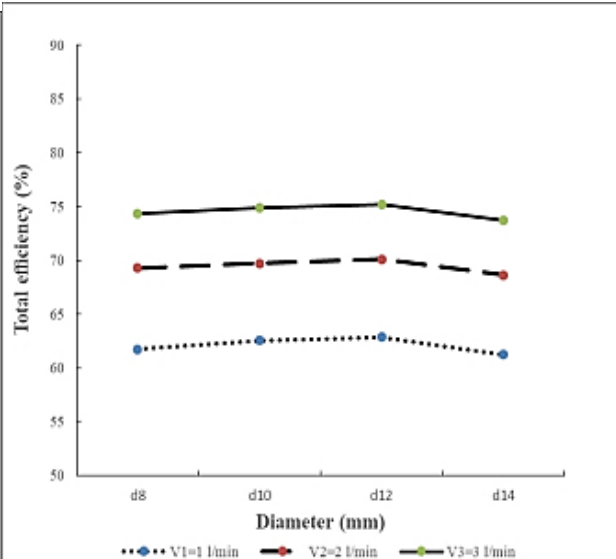


(b)

نمودار ۳) شبیه‌سازی افت توان الکتریکی (a) چینش عرضی (b) چینش طولی

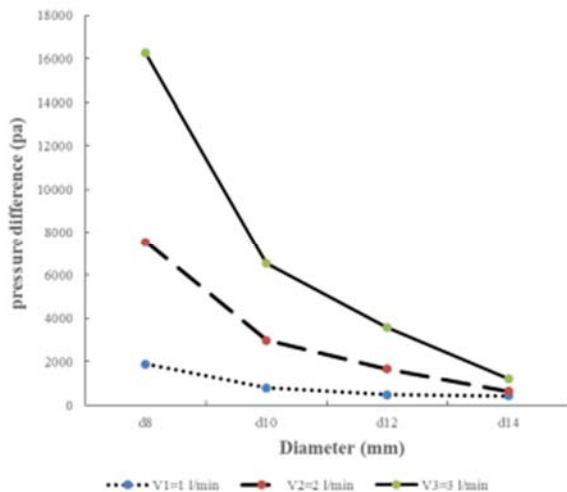


(a)

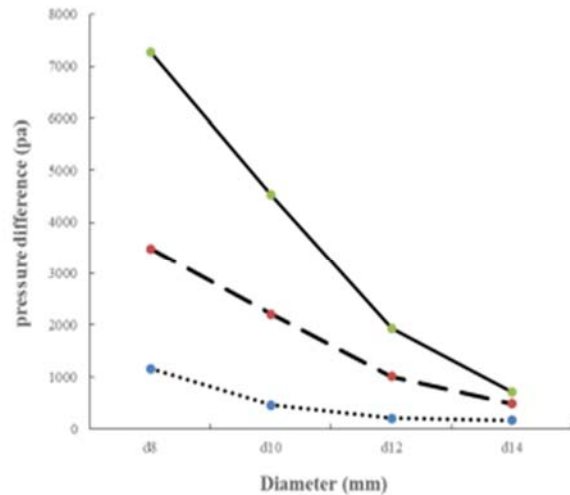


(b)

نمودار ۴) شبیه‌سازی راندمان کل (a) چینش عرضی (b) در چینش طولی

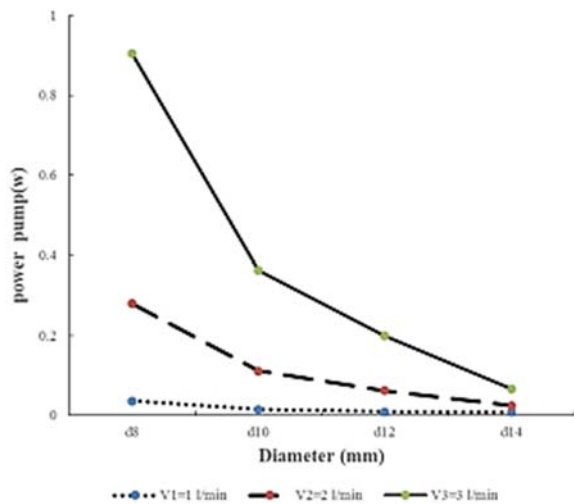


(a)

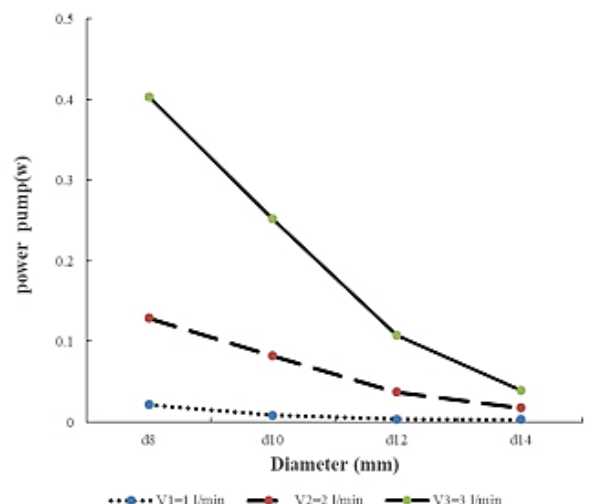


(b)

نمودار ۵) شبیه‌سازی اختلاف فشار (a) چینش عرضی (b) چینش طولی



(a)



(b)

نمودار ۶) شبیه‌سازی توان مصرفی پمپ (a) چینش عرضی (b) چینش طولی

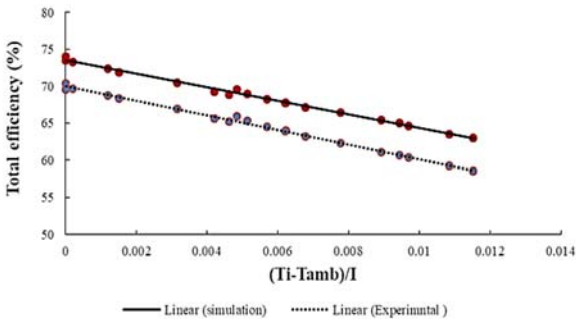
سامانه متمرکزکننده بر اساس چینش طولی، قطر لوله ۱۰ میلی‌متر ساخته شد و علت این انتخاب راندمان بهتر آن در بین قطرهای دیگر بود. به‌منظور مقایسه دقیق بین داده‌های تجربی و داده‌های شبیه‌سازی شده، نتایج به‌دست آمده در داده‌های میدانی در محیط نرم‌افزار وارد شد و دوباره نرم‌افزار پارامترهای بازده حرارتی و الکتریکی را شبیه‌سازی کرد و با نتایج میدانی مقایسه شد. نتایج به‌دست آمده در نمودار ۷ نشان داد که با افزایش نسبت $(T_i - T_{amb})/I$ که یک پارامتر معمول برای نشان دادن کارایی متمرکزکننده است، بازده لحظه‌ای حرارتی سیستم کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که بازده سیستم توسط دمای ورودی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد که بیشینه راندمان حرارتی برای شبیه‌سازی ۶۱/۱۸٪ و برای داده‌های میدانی ۵۸/۱۷٪ به‌دست‌آمد. از مهم‌ترین دلایل اختلاف بین نتیجه شبیه‌سازی و نتیجه

بررسی نمودار ۶ نشان داد که بالاترین میزان انرژی مصرفی در چینش عرضی، قطر لوله ۸ و دبی سیال ۳ لیتر بر دقیقه به میزان ۹٪ و پایین‌ترین میزان انرژی مصرفی در چینش طولی، قطر لوله ۱۴ و دبی سیال الیتر بر دقیقه به میزان ۰.۳٪ اتفاق افتاد. همچنین بررسی‌ها نشان داد که علی‌رغم مصرف انرژی پایین پمپ در قطر لوله ۱۴ میلی‌متر، قطر لوله ۱۲ میلی‌متر به دلیل بازده حرارتی مشابه و به دلیل قیمت پایین‌تر مورد انتخاب قرار گرفت اما به دلیل عدم موجود بودن در بازار، به دلیل اختلاف ناچیز نتایج با لوله با قطر ۱۰ میلی‌متر، این لوله انتخاب شد. جمع‌بندی کلی از دو بازده حرارتی و الکتریکی نشان داد که قطر لوله ۱۰ میلی‌متر بهترین شرایط برای ساخت سامانه فتوولتائیک-حرارتی را به دنبال داشت.

۵-۳ مقایسه نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی تجربی

بر اساس نتایج شبیه‌سازی، سامانه فتوولتائیک-حرارتی مجهز به

و شبه‌سازی با افزایش دما، راندمان کل کاهش می‌یابد. بیشینه مقدار راندمان کل برای نتایج شبه‌سازی ۷۴/۰۱٪ و برای نتایج داده‌های میدانی ۷۰/۴۵٪ به‌دست آمد. از مهم‌ترین دلایل این اختلاف، که از قبل اشاره شد می‌توان به دقت بازتاب نوری سامانه در اثر عدم دقت ساخت متمرکزکننده اشاره کرد.



نمودار ۹) بازده کل در دو حالت شبه‌سازی و تجربی

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی شبه‌سازی و ارزیابی تجربی یک سامانه فتوولتاییک- حرارتی مجهز به متمرکزکننده سهموی خطی پرداخته شد و نتایج زیر حاصل شد.

۱- بررسی سامانه از منظر تحلیل هندسه نوری نشان داد که برای متمرکز کردن نور حاصل از بازتاب یک متمرکزکننده سهموی خطی بر صفحه فتوولتاییک لازم است تا این صفحه خارج از مرکز قرار گیرد تا میزان سایه‌اندازی این صفحه بر سطح متمرکزکننده به کمترین میزان خود برسد.

۲- نتایج نشان داد که با افزایش دبی جریان سیال، راندمان حرارتی سامانه بدلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی افزایش می‌یابد.

۳- اختلاف فشار جریان سیال در ورودی و خروجی سامانه و همچنین توان مصرفی پمپ در چپش عرضی به دلیل اصطکاک در خم لوله‌ها حدود ۲ برابر بالاتر از چپش طولی بود.

۴- راندمان حرارتی چپش طولی از راندمان حرارتی عرضی به دلیل طی کردن آب در مسیر بیشتر پیچ و خم لوله در چپش عرضی بیشتر است.

۵- راندمان الکتریکی در چپش طولی به دلیل خنک کار بودن این نوع چپش نسبت به حالت عرضی بالاتر بود.

۶- راندمان الکتریکی سیستم متمرکزکننده فتوولتاییک در حدود دو برابر سامانه‌های معمولی فتوولتاییک- حرارتی بود

۷- نتایج تحقیق نشان داد که راندمان کل و راندمان الکتریکی و راندمان تحت تاثیر دمای ورودی بودند.

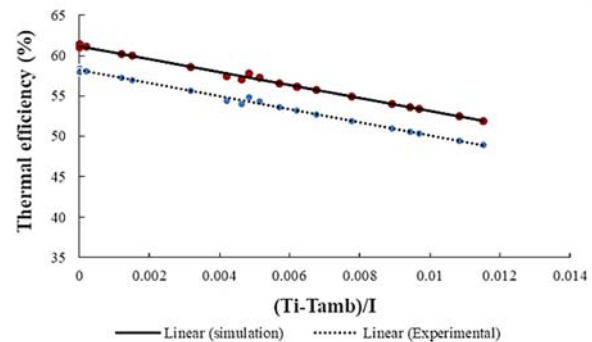
تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تأییدیه اخلاقی: در استخراج منابع این مطالعه اصول اخلاقی رعایت شده است.

تعارض منافع: هیچ گونه تعارضی در منافع این مقاله وجود ندارد.

سهم نویسندگان: سعید خداترس (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۳۰٪)؛ سیدرضا موسوی‌سیدی (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی (۳۰٪)؛

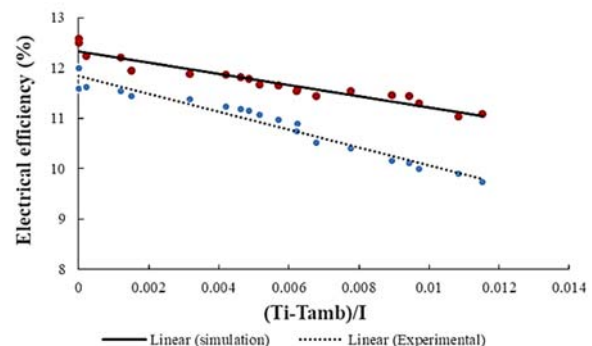
داده‌های میدانی را می‌توان به دقت ساخت سامانه، دقت اندازه‌گیری حسگرها، فاصله میان لوله‌ها و صفحات جاذب، عایق نبودن کامل سامانه و خطاهای مربوط به ردیابی سامانه اشاره کرد. نتایج به‌دست آمده با نتایج پژوهش پاولیک و همکاران [25] مطابقت داشت.



نمودار ۷) تغییرات بازده حرارتی سامانه در دو حالت شبه‌سازی و واقعی

نتایج به‌دست آمده از شبه‌سازی بازده الکتریکی و تغییرات مقادیر تجربی این پارامتر (نمودار ۸) نشان داد که در هر دو حالت تجربی و شبه‌سازی با افزایش دما، راندمان سلول فتوولتاییک به شدت کاهش می‌یابد. بیشینه مقدار راندمان الکتریکی برای نتایج شبه‌سازی ۱۲/۵۸٪ و برای نتایج داده‌های میدانی ۱۲/۰۳٪ به‌دست آمد.

از مهم‌ترین دلایل این اختلاف، می‌توان به دقت بازتاب نوری سامانه در اثر عدم دقت ساخت متمرکزکننده اشاره کرد. همچنین دقت قرارگیری صفحات فتوولتاییک در خط بهینه‌شده نیز بر این راندمان تاثیرگذار می‌باشد. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد توان الکتریکی تولیدی این سامانه در حدود ۲ برابر حالت نرمال سلول‌های فتوولتاییک بوده که ظرفیت خوب این سیستم را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده در نمودار ۸ با نتایج به‌دست آمده از پژوهش چابانه و همکاران [16] مطابقت داشت.



نمودار ۸) تغییرات بازده الکتریکی در دو حالت شبه‌سازی و تجربی

نتایج به‌دست آمده از شبه‌سازی بازده کل و تغییرات مقادیر تجربی این پارامتر (نمودار ۹) نشان داد که در هر دو حالت تجربی

13- Karathanassis IK, Papanicolaou E, Belessiotis V, Bergeles GC. Dynamic simulation and exergetic optimization of a concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) system. *Renewable Energy*. 2019;135:1035-47.

14- Kalogirou SA. A detailed thermal model of a parabolic trough collector receiver. *Energy*. 2012;48(1):298-306.

15- Bellos E, Tzivanidis C. Investigation of a nanofluid-based concentrating thermal photovoltaic with a parabolic reflector. *Energy Conversion and Management*. 2019;180:171-182.

16- Chaabane M, Charfi W, Mhiri H, Bournot P. Performance evaluation of concentrating solar photovoltaic and photovoltaic/thermal systems. *Solar Energy*. 2013;98:315-321.

17- Srivastava S, Reddy KS. Simulation studies of thermal and electrical performance of solar linear parabolic trough concentrating photovoltaic system. *Solar Energy*. 2017;149:195-213.

18- Karathanassis IK, Papanicolaou E, Belessiotis V, Bergeles GC. Design and experimental evaluation of a parabolic-trough concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) system with high-efficiency cooling. *Renewable Energy*. 2017;101:467-483.

19- Hosseinzadeh M, Salari A, Sardarabadi M, Passandideh-Fard M. Optimization and parametric analysis of a nanofluid based photovoltaic thermal system: 3D numerical model with experimental validation. *Energy Conversion and Management*. 2018;160:93-108.

20- Taji M. Manufacturing a trough parabolic solar collector and predicting its theoretical performance. *Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*. 2017;10(1):747-758. [Persian]

21- Calise F, Vanoli L. Parabolic trough photovoltaic/thermal collectors: design and simulation model. *Energies*. 2012;5(10):4186-4208.

22- Bellos E, Tzivanidis C, Tsimpoukis D. Multi-criteria evaluation of parabolic trough collector with internally finned absorbers. *Applied Energy*. 2017;205:540-561.

23- Yazdanifard F, Ameri M, Ebrahiminia Bajestan E. Investigating the effect of different variables on the performance of a photovoltaic/thermal system water bed plate. *Journal of Engineering and Energy Management*. 2017;6(2):59-46. [Persian]

24- Bellos E, Mathioulakis E, Tzivanidis C, Belessiotis V, Antonopoulos KA. Experimental and numerical investigation of a linear fresnel solar collector with flat plate receiver. *Energy Conversion and Management*. 2016;130:44-59.

25- Pavlović SR, Stefanović VP, Bellos E. Design and simulation of a solar dish concentrator with spiral-coil smooth thermal absorber. *Thermal Science*. 2016;20(4):1-11.

علی متولی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۳۰٪): مهدی منتظری (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی (۵٪)
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

1- Bellos E, Korres D, Tzivanidis C, Antonopoulos KA. Design, simulation and optimization of a compound parabolic collector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2016;16:53-63.

2- Chukwuka C, Folly KA. Overview of concentrated photovoltaic (CPV) cells. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014;2(11):1-8.

3- Pintaldi S, Sethuven katraman S, White S, Rosengarten G. Energetic evaluation of thermal energy storage options for high efficiency solar cooling systems. *Applied Energy*. 2017;188:160-177.

4- Lämmle M, Thoma C, Hermann M. A PVT collector concept with variable film insulation and low-emissivity coating. *Energy Procedia*. 2016;91:72-77.

5- Mohammadi Sardouei M, Morteza pour H, Jafari Naeimi K. Numerical analysis of using photovoltaic-thermal combined solar water heater in Iran. *Journal of Agricultural Machinery*. 2017;7(1):221-233. [Persian]

6- Liang R, Zhou C, Pan Q, Zhang J. Performance evaluation of sheet-and-tube hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collectors connected in series. *Procedia Engineering*. 2017;205:461-468.

7- Del Col D, Bortolato M, Padovan A, Quaggia M. Experimental and numerical study of a parabolic trough linear CPVT system. *Energy Procedia*. 2014;57:255-264.

8- Krüger D, Pandian Y, Hennecke K, Schmitz M. Parabolic trough collector testing in the frame of the REACT project. *Desalination*. 2008;220(1-3):612-618.

9- Daneshazarian R, Cuce E, Cuce PM, Sher F. Concentrating photovoltaic thermal (CPVT) collectors and systems: Theory, performance assessment and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;81:473-492.

10- Chang C, Xu C, Wu ZY, Li X, Zhang QQ, Wang ZF. Heat transfer enhancement and performance of solar thermal absorber tubes with circumferentially non-uniform heat flux. *Energy Procedia*. 2015;69:320-327.

11- Mohsenzadeh M, Shafii MB. Performance analysis of parabolic through solar equipped with solar cell and TEG module. 2nd International Conference and Exhibition on Solar Energy (ICESE), 2015 August 30-31, Tehran, Iran. Tehran: Civilica; 2015.

12- Calise F, Palombo A, Vanoli L. A finite-volume model of a parabolic trough photovoltaic/thermal collector: Energetic and exergetic analyses. *Energy*. 2012;46(1):283-294.