ارزیابی تجربی عملکرد حرارتی کلکتور صفحه تخت خورشیدی با جاذب دوطرفه و بررسی تاثیر استفاده از نانوسیال در آن

مجتبی مروج

دانشیار مهندسی مکانیک دانشگاه پیام نور تهران ایران

Moravej60@pnu.ac.ir

چکیده

در تحقیق حاضر، یک کلکتور صفحه تخت خورشیدی که توسط مولف طراحی و ساخته شده، مورد آزمایش و بررسی تجربی واقع شده است. در کلکتور فوق آرایش لوله‌ها در صفحه جاذب دوطرفه شامل لوله‌های رایزر در جلو و لوله مارپیچی در پشت بوده است. آزمایش تحت شرایط استاندارد ASHRAE و در شهر بهبهان انجام گرفته است. نتایج بررسی نشان داد اگرچه لوله‌گذاری رایزر در جلوی کلکتور بیشتر در معرض تایش قراردارد، بازده بیشتری دارد اما استفاده از لوله‌گذاری پشت جاذب می‌تواند باعث افزایش کارایی مجموعه کلکتور به بیشتر از ۲۰٪ نیز گردد. همچنین حداکثر بازدهی برای کلکتور فوق در بهترین شرایط بیش از ۶۴٫۱ ٪ به دست آمد. به منظور ارزیابی جامع تر از نانوسیال آب- نقره نیز در سه غلظت ppm ۲۰۰۰و۱۵۰۰و ۱۰۰۰ مورد آزمایش واقع شد که همزمان با افزایش غلظت میزان کارایی نیز افزایش یافته است. در حین آزمایش عوامل و پارامترهای محیطی نیز سنجش و تحلیل شد و حداکثر میزان عدم قطعیت به مقدار ۳٫۰۸ ٪ گزارش گردید.

کلمات کلیدی: کلکتور صفحه تخت خورشیدی، نانوسیال، جاذب دوطرفه، کارایی، ارزیابی تجربی.

ویراستاری نشده

Experimental evaluation of the thermal performance of a flat plate solar collector with a double-sided absorber by using nanofluid

Mojtaba Moravej

Associate Professor of Mechanical Engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran

Moravej60@pnu.ac.ir

Abstract

In the present study, a flat plate solar collector designed and manufactured by the author was tested and investigated experimentally. In the above collector, the arrangement of tubes in the two-sided absorber plate included riser tubes in front and spiral tubes in the back. The test was conducted under ASHRAE standard conditions and in Behbahn city. The results of the study showed that although the riser piping, which is more exposed to bending in the front, has a higher efficiency, the use of piping behind the absorber can increase the efficiency of the collector assembly by more than 20%. Furthermore, a maximum efficiency of over 64.1% was achieved for the aforementioned collector under optimal conditions. To provide a more comprehensive evaluation, a water-silver nanofluid was also tested at three concentrations 1000, 1500, and 2000 ppm revealing that efficiency increased alongside the concentration. Environmental factors and parameters were monitored and analyzed during the experiments, and the maximum uncertainty was reported to be 3.08%.

Keywords: Flat plate solar collector, nanofluid, double-sided absorber, efficiency, experimental evaluation.

ویرایش نشده

۱-مقدمه

کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت امروزه به عنوان یکی از پرکاربردترین سیستم‌های حرارتی خورشیدی شناخته می‌شوند، زیرا علاوه بر سادگی در ساخت، نسبت به سایر سیستم‌ها ارزان‌تر نیز هستند [۱،۲]. علاوه بر این، کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت نصب ساده‌تری دارند و به دلیل اندازه و وزنشان به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مسائل مهم در کلکتورهای صفحه تخت خورشیدی، مسئله افزایش کارایی این کلکتورها است [۳،۴]. به دلیل کاربرد گسترده آنها، روش‌های متعددی برای این منظور مورد مطالعه قرار گرفته است. این تحقیقات محدود به یک روش خاص نیستند و در همه زمینه‌ها از فیزیک گرفته تا شیمی و مهندسی به کار رفته‌اند. برخی از این مطالعات در زیر ارائه شده است.

سانی و همکاران. [۵] ارزیابی تجربی آبگرمکن‌های خورشیدی با یک سیستم کمکی فتوولتائیک را مورد مطالعه قرار دادند. آنها اظهار داشتند که این سیستم کمکی برای افزایش بازده آب گرم تولید شده در طول شب استفاده می‌شود. بازده گزارش شده برای سیستم فتوولتائیک حدود ۱۲٪ و برای سیستم آبگرمکن بیش از ۸۱٪ بود، که در مجموع نزدیک به ۹۲٪ برای کل سیستم در شب بود. الخندافی و الگوری[۶] تحقیقاتی در مورد بازده تولید انرژی خورشیدی در سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی انجام دادند. برای این منظور، آنها از یک سیستم ردیابی انرژی خورشیدی برای آبگرمکن خود استفاده کردند و نشان دادند که نتایج نهایی سیستم گرمایش حدود ۱۳٪ بهبود یافته است.

عبدالبشیر و همکاران [۷] یک کلکتور مارپیچی را برای بهبود انتقال حرارت و افزایش دریافت انرژی تابشی خورشیدی در یک آبگرمکن در عراق آزمایش کردند. در مطالعه ایشان، پارامترهای مختلفی از جمله تلفات تابشی و حرارتی، علاوه بر پارامترهای محیطی، آزمایش شدند و بازدهی نزدیک به ۶۶٪ گزارش شد. نور هلال و همکاران [۸] بازده کلکتورهای خورشیدی با سیستم‌های روکش آلومینیوم و روکش روی را بررسی کردند. روش آزمایش، روش سیستم باز بود. نتایج آنها نشان داد که میانگین بازده برای سیستم‌های آهن با روکش آلومینیوم حدود ۴۱٪ و میانگین برای سیستم‌های روکش روی ۳۳.۹۴٪ بود. آنها همچنین پیشنهاد کردند که جاذب‌های آلومینیومی موجدار جاذب برتر هستند. المطیری و همکاران [۹] یک کلکتور صفحه تخت با دمای پایین در عربستان سعودی ساختند که با توجه به فصول مختلف سال قابل تنظیم بود. همچنین، آنها از یک پوشش شیشه‌ای دوجداره برای آن استفاده کردند. بازده اعلام شده برای کلکتور ساخته شده آنها حدود ۳۳٪ بود. بسیم فاریق [۱۰] بهبود عملکرد کلکتور صفحه تخت خورشیدی را در حالت‌های مختلف برای لوله‌کشی کلکتور به صورت نظری و تجربی بررسی کرد. انواع لوله‌های مورد مطالعه شامل مدل‌های مارپیچی صاف و موزی بودند که با نرخ جریان ثابت و محدودیت‌های یکسان بررسی شدند. نتایج نشان داد که لوله صاف داخل لوله معمولی عملکرد را بیش از ۱۲٪ بهبود می‌بخشد و تفاوت بین نتایج عددی و تجربی حدود ۷٪ گزارش شده است. الخفاجی و همکاران [۱۱] در مورد افزایش بازده یک سیستم کلکتور صفحه خورشیدی با استفاده از بهینه‌سازی جاذب که شامل یک مدل منحنی تیغه سوزنی و تیغه عمودی بود، مطالعه کردند. آنها شبیه‌سازی‌ها را با استفاده از نرم‌افزار انسیس انجام دادند و همزمان آزمایش‌های تجربی را برای اعتبارسنجی آبگرمکن خورشیدی صفحه تخت معمولی انجام دادند. نتایج نشان داد که استفاده از یک سیستم عمودی چهار پره با افزایش بازده حدود ۱۶٪ بهترین نتایج را به همراه دارد. استفاده از نانوسیال‌ها همچنین عملکرد کلکتورهای صفحه تخت را به وضوح افزایش می‌دهد. استفاده از نانوسیال‌ها در کلکتورهای صفحه تخت خورشیدی به دلیل قابلیت‌های منحصر به فردشان در افزایش انتقال حرارت، کاهش هزینه‌های عملیاتی و پایداری، توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده

ویراستاری نشده

است. مروج [۱۲] نیز در یک مطالعه تجربی، تغییرات هندسه در یک کلکتور صفحه تخت را بررسی کرد. او از یک کلکتور معمولی با هندسه مثلثی استفاده کرد که در آن از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم استفاده کرد. نتایج این مطالعه شامل بازده ۶۸٫۳٪ برای غلظت ۳٪ نانوسیال و افت فشار ۰٫۱ بار بود.

روش‌های افزایش بازده آبگرمکن خورشیدی معمولی بسیار متنوع هستند. این روش‌ها می‌توانند از هندسه کلکتور و جاذب گرفته تا سیال عامل، نوع ماده و سایر پارامترها متغیر باشند. تحقیقات اخیر در این زمینه، بهینه‌سازی عملکرد، مواد جدید و تکنیک‌های طراحی جدید را بررسی کرده‌اند. کلاه کج و همکاران [۱۳] در مطالعه‌ای به دو عامل مؤثر بر بازده یک کلکتور صفحه تخت خورشیدی اشاره کردند. آنها در مطالعه خود ابتدا لوله‌های بالابر را به مقطع بیضوی تغییر دادند و سپس آن را با استفاده از نانوسیال آب-منیزیم آزمایش کردند. نتایج شگفت‌انگیز بود و در بهترین حالت حدود ۱۹٪ افزایش بازده حاصل شد. ساین و همکارانش [۱۴] مطالعه کاملی در مورد روش‌های مختلف کارایی و اثربخشی سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی انجام دادند و عوامل مختلفی را که بر بازده تأثیر می‌گذارند، تجزیه و تحلیل کردند. مهمترین نتایج آنها این بود که سیستم‌های پمپ‌دار در مقایسه با سیستم‌های ترموسیفون، بازده بهتری بین ۲۰ تا ۴۰ درصد دارند. همچنین، نوآوری‌های مختلف در سیستم‌های جاذب می‌تواند بازده را بیش از ۳۰٪ بهبود بخشد.

اریکسن و همکارانش [۱۵] از نانوسیال‌های پایه کربنی استفاده کردند که پیشرفت جدیدی در جذب گرما محسوب می‌شود. در مطالعه آنها، درصدهای مختلفی از غلظت نانوسیال استفاده شد و اعداد جالبی به دست آمد که ادعا می‌کردند بهترین غلظت مورد استفاده ۱٪ وزنی و افزایش بازده حدود ۴۲٪ در مقایسه با آب است. مهدی احمدی و همکارانش [۱۶] یک تحلیل مبتنی بر شبیه‌سازی از حالت‌های مختلف کلکتور خورشیدی را بررسی کردند. در شبیه‌سازی آنها، پارامترهای مختلفی، به ویژه دستگاه‌هایی که به افزایش تابش کمک می‌کنند، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آنها اظهار داشتند که مهمترین نتیجه این شبیه‌سازی، افزایش توانایی تولید انرژی حرارتی در طول شب بوده است. ونکاتش و همکارانش [۱۷] استفاده از نانوسیال‌های هیبریدی در کلکتور صفحه تخت خورشیدی را بررسی کردند که در آن از نانوذرات اکسید مس، اکسید سیلیکون و آمین استفاده شده بود. آنها در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که این نانوسیال هیبریدی عملکرد کلکتور را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. رفتار یک کلکتور صفحه تخت خورشیدی سنتی توسط یک نانوسیال هیبریدی جدید بهبود می‌یابد. آنها همچنین بهترین ترکیب هیبریدی را ترکیبی از اکسیدهای مس و آلومینیوم در نانوسیال معرفی کردند. تحقیقات کشاری [۱۸] نشان می‌دهد که بهینه‌سازی زوایای قرارگیری و طراحی زاویه بهینه چیدمان کلکتور برای دریافت بهینه تابش می‌تواند بازده تولید انرژی را افزایش دهد. این مطالعه شامل عرض جغرافیایی و روزهای سال است، یعنی مطالعه همزمان مکان و زمان نصب کلکتور تأثیر مستقیمی بر بازده کلکتور دارد. استفاده از مواد جدید مانند نانوساختارها و شیشه‌های هوشمند نیز سهم قابل توجهی در افزایش بازده کلکتورهای خورشیدی داشته است.

تحقیقات نشان می‌دهد که نانومواد می‌توانند به کاهش اتلاف گرما و افزایش جذب انرژی کمک کنند [۱۹]. علاوه بر این، استفاده از تکنیک‌های پیشرفته مانند سیستم‌های ردیابی خورشیدی و ترکیب آبگرمکن خورشیدی با سیستم‌های گرمایش و ذخیره‌سازی می‌تواند عملکرد این کلکتورهای خورشیدی را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. یکی دیگر از قابلیت‌های مهم بهبود بازده کلکتورهای صفحه تخت خورشیدی ، استفاده از سیستم‌های ردیابی خورشید است. این سیستم‌ها با تغییر زاویه کلکتور، تابش رسیده به سطح کلکتور را

افزایش می‌دهند و میزان انرژی دریافتی را در طول روز یا سال افزایش می‌دهند [۲۰]. نانوسیالات ترکیبی از مایعات و نانوذرات هستند که می‌توانند بازده حرارتی سیستم‌های خورشیدی را به طور قابل توجهی افزایش دهند. تحقیقات ابو شادات و همکاران. [۲۱، ۲۲] نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات به سیالات انتقال حرارت می‌تواند ضریب انتقال حرارت را به طور قابل توجهی افزایش دهد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که افزودن نانوذرات به آب، انتقال حرارت را تا درصد قابل توجهی بهبود می‌بخشد و نه تنها بازده را افزایش می‌دهد، بلکه هزینه پمپ‌ها و سایر تجهیزات را نیز کاهش می‌دهد. ایشاک و همکاران [۲۳] چندین پارامتر را در آزمایش بازده کلکتور خورشیدی بررسی کردند. از جمله این پارامترها، مطالعه میزان اگزرژی بود که در تابش‌های مختلف انجام شد. نتیجه مطالعه، اگزرژی حرارتی حدود ۱۰ وات را در تابش ۹۰۰ وات بر متر مربع و سرعت جریان ۱۰ گرم بر ثانیه نشان داد. آنها همچنین اظهار داشتند که هرچه تابش بیشتر باشد، عملکرد بازده بالاتر و مطلوب‌تر است که برخلاف نتایج اقتصادی حاصل از مطالعه آنها بود. علاوه بر این، پوشش‌های ضد انعکاس یکی دیگر از روش‌های مورد علاقه برای افزایش عملکرد کلکتورهای صفحه تخت خورشیدی است. تحقیقات چاندولا و همکاران [۲۴] نشان داده است که استفاده از نانوپوشش‌ها می‌تواند میزان جذب نور را تا ۲۱٪ افزایش داده و تلفات حرارتی را کاهش دهد. رویکرد جدید دیگر، ترکیب کلکتور صفحه تخت خورشیدی با سیستم‌های گرمایشی و ذخیره‌سازی حرارتی است. یک مطالعه عالی توسط کین و همکارانش [۲۵] نشان داد که این ترکیب می‌تواند به بهبود تداوم تأمین انرژی و افزایش عملکرد کلی سیستم کمک کند. در شرایط طراحی، بازده کلی سیستم تا ۷۲٪ گزارش شده است. در تحقیق حاضر، یک کلکتور صفحه تخت خورشیدی توسط مولف در دانشگاه پیام نور آغاجاری طراحی و ساخته شده و مورد آزمایش نیز واقع شده است. در کلکتور فوق آرایش لوله گذاری صفحه جاذب به صورت پشت و رو و دو طرفه بوده است. به عبارت دیگر دریک طرف و در روی جلوی جاذب لوله گذاری با آرایش رایزردار ساخته شده و در پشت آن آرایش مارپیچی برای لوله های حاوی سیال در نظر گرفته شده است.

۲-مواد و روش‌شناسی

۲ -۱- چیدمان آزمایشگاهی

در مطالعات تجربی، اولین گام عملی، چیدمان آزمایشگاهی مناسب است. برای آزمایش کلکتور صفحه تخت مذکور[۱]، ابتدا چیدمان آزمایشگاهی راه‌اندازی شد و هر دستگاه در محل مورد نظر مطابق شکل ۱ قرار گرفت. بر این اساس، سیال عامل از مخزن به پمپ[۲] و سپس به ورودی کلکتور[۳] انتقال می‌یابد. سیال عامل در ورودی کلکتور به سه راهی می رسد که قابلیت عبور از آرایش لوله[۴] با رایزر (جلوی جاذب) یا از آرایش لوله مارپیچی (پشت جاذب) و یا تمامی شیرها باز و اجازه عبور از هر دو طرف داده شود. دو نوع آرایش لوله در شکل ۲ نمایش داده شده است. سپس سیال از کلکتور خارج شده[۵] و دوباره وارد مخزن می‌شود. در طول این عملیات، دمای هوا و دمای خروجی و ورودی[۶] به کلکتور بسته به نوع آزمایش و همچنین رطوبت محیط[۷] و سرعت باد، به طور همزمان همراه با تابش خورشید[۸] اندازه‌گیری می‌شوند. دبی جریان سیال نیز در ابتدای هر آزمایش اندازه‌گیری می‌شود. آزمایش‌ها در شهر بهبهان و روی پشت بام ساختمان انجام شد. جدول ۱

[۱] Flat plate solar collector
[۲] Pump
[۳] Cold water inlet
[۴] Absorber tubes
[۵] Hot water outlet
[۶] Data logger and thermometer
[۷] Air humidity meter
[۸] Solar meter

ویژگی‌های جغرافیایی و مکانی محل آزمایش و شکل ۳ عکس ولقعی از انجام آن را نشان می‌دهد.

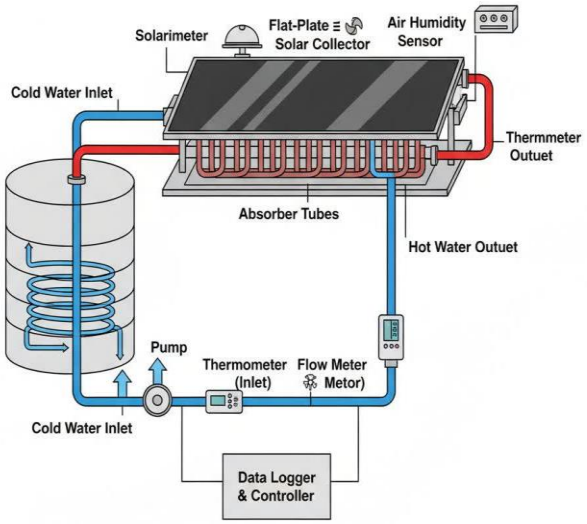


Figure 1. Schematic set up of collector test.

شکل ۱ شماتیک چیدمان آزمایشگاهی کلکتور.

جدول ۱. محل انجام آزمایش تجربی.

Table 1. Set up location.

Parameter	values
Location	300 35/ 45" N , 500 14/ 30" E
Height	328 m
Time	Spring and summer 2026

کلکتور توسط نویسنده طراحی و ساخته شده و دارای مشخصات ذکر شده در جدول ۲ است. برای به دست آوردن داده‌های دقیق، از دستگاه‌های اندازه‌گیری مختلفی برای هر داده استفاده شد. این دستگاه‌ها از قبل کالیبره و شناسایی شده و در کنار تجهیزات آزمایشگاهی نصب شده و داده‌ها را در زمان آزمایش ثبت می‌کردند. جدول ۳ این دستگاه‌های اندازه‌گیری را به همراه دقت و سازنده آنها ارائه می‌دهد. به منظور ارزیابی عملکرد حرارتی کلکتور ساخته شده علاوه بر موارد فوق از قوانین استاندارد مرسوم پیروی شده که جدول ۴ برخی از الزامات استاندارد مورد استفاده ASHRAE را نشان می‌دهد[۲۶]. در ابتدا آزمایش با دبی سیال (lit/min) ۱ انجام شد و در انتها برای دبی های متعدد نیز بررسی شد. نکته مهم این که برای هر داده برداری هم دستگاهها و هم ارقام به دقت و چندین بار کنترل شده و آزمایش‌ها نیز مکررا تکرار شده است.



Figure 2. Front and back views of the double-sided absorber.

شکل ۲. نمای پشت و روی جاذب دوطرفه.



Figure 3. Real photo of collector with double-sided absorbent during the test.

شکل ۳. عکس کلکتور با جاذب دوطرفه در حین آزمایش.

جدول ۳. دستگاههای اندازه گیری مورد استفاده.

Table 3. Measurement devices used.

Device	Model	Unit	Accuracy
Thermometer	KIMO-KTT-310	0 C	0.1
Humidity meter	HTC-2	%	1
Wind meter	LUTRON-LM81AM	m/s	o.1
Flow meter	Z-4001	Lit/min	o.5
Solar meter	VOLTCRAFT-SLX300	W/m2	1

جدول ۲. مشخصات کلکتور با جاذب دوطرفه.

Table 2. Specifications of collector with double-sided absorbent.

Specifications	Values	Unit
Dimensions of collector	1100@630@50	mm
Frame	Aluminum	-
Absorber dimension	930@550@1.25	mm
Absorber material	Black iron	-
Tube material	Copper	-
Riser diameter	12.6	mm
Spiral tube diameter	6.4	mm
Glassing	Flat glass, t=4	mm
Isolation	Polystyrene, t=10	mm
Collector mass	20.250	Kg

ویراستاری شده

جدول ۴. برخی کمیت‌های مهم اندازه گیری در استاندارد ASHRAE.

Table 4. Some important measurement quantities in the ASHRAE standard.

Parameter	Uint	Max variation
Sun radiation	W/m^2	±32
Ambient temperature	K	±1.5
Flow rate of fluids	gpm	±2% or ±0.005
Inlet temperature	K	±1% or 1

۲-۲-ثابت زمانی

برای بررسی حرارتی کلکتور، بررسی حالت پایدار یا شبه پایدار برای آن مهم است. به عنوان مثال، اگر کلکتور در معرض تابش قرار گیرد و ما بلافاصله جریان سیال عامل را از آن عبور دهیم، به دلیل حجم گرمای انباشته شده در داخل صفحه جاذب، دمای خروجی به صورت افزایشی افزایش می‌یابد که نشان دهنده بازده کلکتور نیست، بلکه به دلیل شرایط گذرا است. یکی از راه‌های اندازه‌گیری این موضوع، بدست آوردن ثابت زمانی کلکتور است. برای انجام این کار، باید محاسبه کنیم که چه مدت طول می‌کشد تا یک کلکتور عامل که بلافاصله غیرفعال شده و تابش خورشیدی حذف می‌شود، به دمای سیال خروجی ۶۳٪ از دمای نهایی سیال برسد. این موضوع در معادله (۱) [۱-۳] ذکر شده است:

$$\frac{e}{T_{O,i}-T_{inlet}}=\frac{1}{T_{O,\Gamma}-T_{inlet}} \qquad (1)$$

برای کلکتور فوق این زمان قریب ۵ دقیقه پس از آغاز آزمایش است.

۲-۳-معادلات حاکم

اساساً برای ارزیابی یک کلکتور صفحه تخت، باید عملکرد حرارتی آن اندازه‌گیری شود. برای این ارزیابی، لازم است میزان تغییرات دمایی که در سیال عبوری از کلکتور رخ می‌دهد، محاسبه شود. با این بررسی، می‌توان میزان توان مفید بدست‌آمده از کلکتور را محاسبه کرد. بنابراین، انرژی بدست‌آمده و مفید کلکتور از معادله (۲) بدست می‌آید[3]:

$$Q_u=\dot{m}C_P\left(T_{outlet}-T_{inlet}\right) \qquad (2)$$

از سوی دیگر، به دلیل عملکرد حرارتی متفاوت، هر کلکتور ویژگی‌های خاص خود را دارد که مربوط به ویژگی‌های اتلاف حرارت و جذب انرژی است. این ویژگی‌ها در معادله (۳) نوشته شده‌اند[3]:

$$Q_u=AF_RI_T\left(\tau\alpha\right)-AF_RU_L\left(T_{inlet}-T_{\alpha}\right) \qquad (3)$$

در معادله بالا U_L ضریب تلفات حرارتی کلکتور برحسب $(W/m^2\,K)$ و F_R بی بعد و مشخصه برداشت حرارت کلکتور و $\tau\alpha$ نیز اعدادی بی بعد و به ترتیب برابر ضریب عبور تابش از جدار شیشه‌ای و ضریب جذب صفحه جاذب است. با ترکیب معادلات (۲ و ۳) می‌توانیم به معادله (۴) برسیم که ضریب بازده کلکتور است و برای هر کلکتور عدد متفاوتی است[3].

$$F_R=\frac{\dot{m}C_P\left(T_{outlet}-T_{inlet}\right)}{A\left[I_T\left(\tau\alpha\right)-U_L\left(T_{inlet}-T_{air}\right)\right]} \qquad (4)$$

لازم به ذکر است که اگر به جای آب از نانوسیال استفاده کنیم، گرمای ویژه در معادلات فوق از معادله (۵) محاسبه می‌شود که ترکیبی از مقادیر نانوذرات و سیال پایه است[3].

$$C_{pnf}=C_{pnp}\left(\varphi\right)+C_{pbf}\left(1-\varphi\right) \qquad (5)$$

حال اگر مقدار انرژی مفید به دست آمده از کلکتور را بر انرژی دریافتی توسط آن تقسیم کنیم، بدیهی است که به عدد بازده حرارتی می‌رسیم

ویراستاری نشانی

که برابر است با مقدار انرژی دریافتی نسبت به مقدار انرژی داده شده. این مقدار را می‌توان از معادله (۶) اندازه‌گیری کرد[3]:

$$\eta_i = \frac{Q_u}{AI_T} = \frac{\dot{m}C_P\left(T_{outlet} - T_{inlet}\right)}{AI_T} \quad (6)$$

حال با ترکیب معادلات (۳ و ۶) می‌توان یک رابطه خطی از متغیر تلفات حرارتی و مشخصه بازده کلکتور بدست آورد که در معادلات (۷ و ۸) ارائه شده است[3].

$$\eta_i = \frac{AF_R I_T\left(\tau\alpha\right) - AF_R U_L\left(T_{inlet} - T_{air}\right)}{AI_T} \quad (7)$$

$$\eta_i = F_R\left(\tau\alpha\right) - F_R U_L\left(\frac{T_{inlet} - T_{air}}{I_T}\right) \quad (8)$$

۲-۴- تحلیل عدم قطعیت

همیشه در اندازه‌گیری هر داده‌ای احتمال خطا وجود دارد. این خطاها ممکن است به روش‌های مختلفی خود را نشان دهند. عواملی مانند دقت فرد اندازه‌گیری‌کننده، نوع دستگاه‌های اندازه‌گیری، کالیبراسیون و شرایط محیطی همگی می‌توانند بر داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها تأثیر بگذارند. اگرچه تمام تلاش‌ها برای به حداقل رساندن خطا انجام می‌شود، اما در بسیاری از گزارش‌های علمی، تحلیل آن نیز ضروری است. برای ارزیابی عدم قطعیت در مطالعه حاضر، از روش RSSM که به معنای روش‌های جذر مجموع مربعات است، استفاده شد که در معادله (۹) [۸، ۹] نمایش داده شده است.

$$U = \sqrt[2]{\left(\frac{\Delta x_1}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_2}{x_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_3}{x_3}\right)^2 + \ldots} \quad (9)$$

با توجه به معادله بازدهی کلکتور برای تعیین عدم قطعیت می‌توان رابطه زیر رار نوشت:

$$U_\eta = \sqrt[2]{\left(\frac{\Delta DT}{DT}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \dot{m}}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_T}{I_T}\right)^2 + \ldots} \quad (10)$$

با توجه به اندازه‌گیری‌ها و محاسبات انجام‌شده، عدم قطعیت ارزیابی‌شده برای داده‌های مذکور برای دماف تابش و دبی به ترتیب ۰٫۱٪، ۰٫۳٪ و ۰٫۷ ٪ است. با اعمال این مقادیر به‌دست‌آمده در معادله (۹)، می‌توان ادعا کرد که عدم قطعیت برای آزمایش حاضر حدود ۳٫۰۸ ٪ است.

۲-۵- تهیه نانوسیال

یکی از مواردی که می‌توان با اطمینان در مورد کلکتورهای صفحه تخت پذیرفت، بحث افزایش بازده کلکتورها با استفاده از نانوسیال‌ها به جای آب معمولی در آن‌ها است. به گونه‌ای که هر مدل جدیدی از این کلکتورها معرفی می‌شود، بهتر آن است با نانوسیال‌ها اندازه‌گیری شود تا عملکرد آن نشان داده شود. در مطالعه حاضر، از نانوسیال‌ها نیز برای کلکتور معرفی شده استفاده شده است. برای این منظور، از نانوسیال آب نقره که توسط شرکت نانوصدرا در ایران تهیه شده و عکس TEM آن در شکل ۴ نشان داده شده است، استفاده شده است. این نانوسیال در سه غلظت ppm ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ استفاده شده است. شکل واقعی این غلظت‌ها در شکل ۵ و مشخصات کاربردی آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

ویرایشاری نشده

جدول ۵. مشخصات نانوسیال مورد استفاده.

Table 5. Characteristics of the nanofluid used.

Parameter	Value
Nanofluid hardness	127 ppm
Nanofluid PH	8.71
Water hardness	455 ppm
Water PH	6.88
Nano particle	5-8 nm
Concentrations	1000, 1500, 2000 ppm
Nano powder density	10.6 gr/cm^3
Nanofluid purity	99.99%
Nanofluid color	black

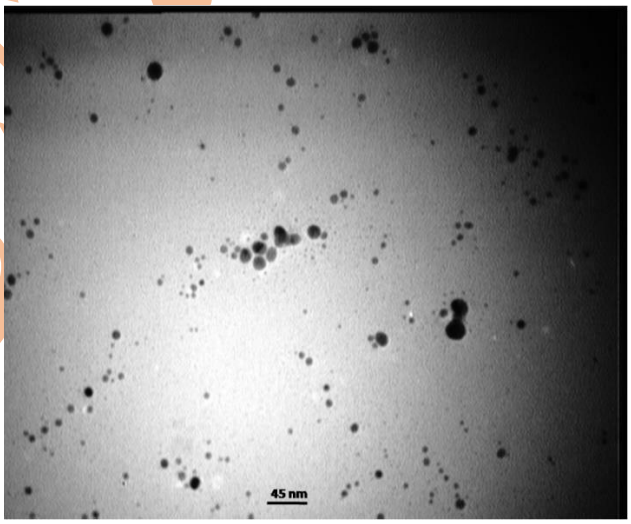


Figure 4. TEM image of the water-silver nanofluid reported by the manufacturer.

شکل ۴. عکس TEM از نانوسیال آب-نقره که توسط شرکت سازنده گزارش شده است.

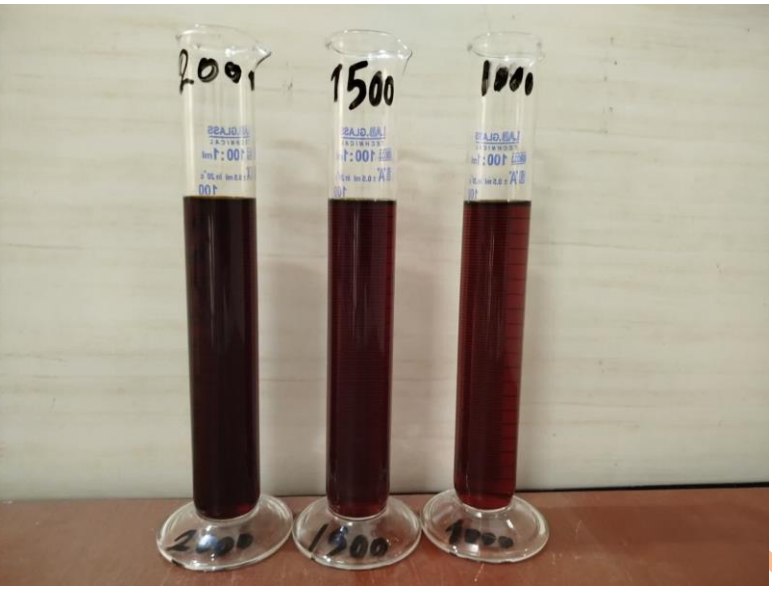


Figure 5. Actual photo of nanofluid before use.

شکل ۵. عکس واقعی از نانوسیال قبل از استفاده.

۳- بحث و ارایه نتایج

برای دستیابی به آزمایش و ارزیابی دقیق کلکتور با جاذب دوطرفه، ابتدا یک سازه آهنی محکم ساخته شد و سپس کلکتور با زاویه ۴۵ درجه نسبت به افق و رو به جنوب قرار گرفت. پس از آن، مخزن حاوی سیال عامل مطابق شکل ۳ بالای آن قرار گرفت. لوله خروجی از مخزن به پمپ متصل شد و سپس دبی آن از طریق یک شیر کنترل و جریان‌سنج تنظیم شد و لوله سیال به ورودی کلکتور نصب شد. لوله خروجی از کلکتور نیز به ورودی مخزن متصل شد. در کنار این سیستم، دستگاه‌های اندازه‌گیری و جمع‌آوری داده برای اندازه‌گیری دما، رطوبت، تابش خورشیدی و سرعت باد نصب شدند. آزمایش‌ها به طور مکرر در بهار و تابستان انجام شد و بهترین آزمایشات با کمترین خطا در یک روز کاملاً آفتابی (۱۱تیر) خوانده و ارائه شدند.

شکل ۶ دو پارامتر از داده‌های محیطی، یعنی تابش رسیده به سطح کلکتور بر حسب وات بر متر مربع و دمای هوای اطراف را در طول آزمایش‌ها نشان می‌دهد. اندازه گیری انجام شده میزان I_T است که در معادلادت (۱-۸) به کار رفته است. این میزان تابش خورشیدی باید در مساحت کلکتور ضرب شود تا مقدار تابش دقیق رسیده به کلکتور تعیین شود. طبق این نمودار، تابش خورشیدی در ابتدا افزایش می‌یابد تا نزدیک ظهر به حداکثر خود می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. با این حال، رطوبت در جهت مخالف تابش عمل می‌کند. از سوی دیگر، هرچه رطوبت هوا کمتر باشد، تابش خورشیدی بیشتر است. شکل ۷ تغییرات میزان سرعت باد به همراه رطوبت نسبی هوای اطراف کلکتور را در محل نصب نشان می‌دهد. این اندازه‌گیری برای بالاترین سرعت باد در نزدیکی کلکتور است و مستقل از جهت باد می‌باشد. بدیهی است که طبق استاندارد ASHRAE، اگر سرعت باد زیاد باشد، در تعیین عملکرد کلکتور اختلال ایجاد می‌کند.

شکل ۸ تغییرات بازده کلکتور را در طول آزمایش نشان می‌دهد. در این نمودار بازده کلکتور به تفکیک بر اساس نوع آرایش لوله‌گذاری جداگانه ارایه شده است. طبق این نمودار، روند افزایش بازده در ابتدا افزایشی و سپس پس از رسیدن به نقطه حداکثر، کمی کاهش می‌یابد. عواملی مانند دمای محیط و حداکثر تابش نقش کلیدی در افزایش بازده دارند، همانطور که در این نمودار نشان داده شده است. نمودار شکل ۹ تغییرات بازده کلکتور را بر اساس تغییرات تابش خورشیدی و تغییرات دمای محیط نشان می‌دهد. از این نمودار مشخص است که با افزایش تابش، بازده افزایش می‌یابد که این به دلیل تأثیر انتقال حرارت از جاذب به سیال عامل است. همچنین، تغییر بازده بر اساس دمای محیط به این صورت است که در ابتدا با افزایش دما، بازده افزایش می‌یابد، اما در دماهای بالاتر، به دلیل افزایش تلفات حرارتی، این مقدار کمی کاهش می‌یابد.

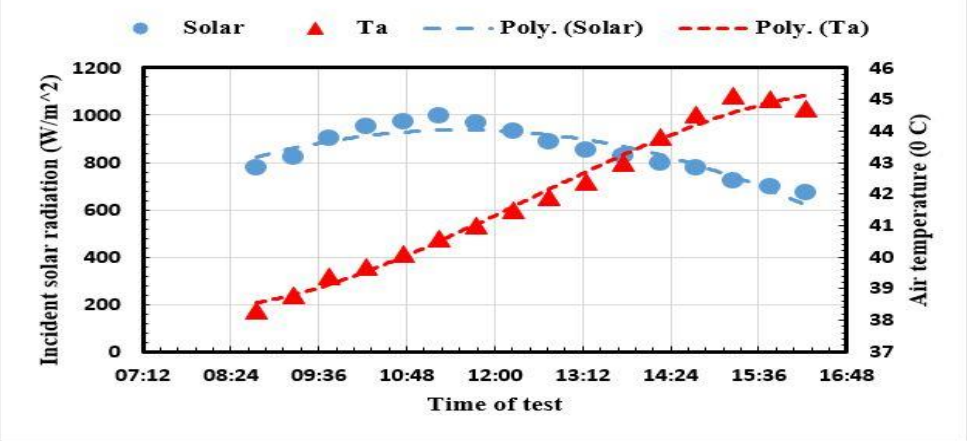


Figure 6. Solar radiation and ambient temperature during collector testing.

شکل ۶. تابش خورشیدی و دمای محیط در زمان آزمایش کلکتور.

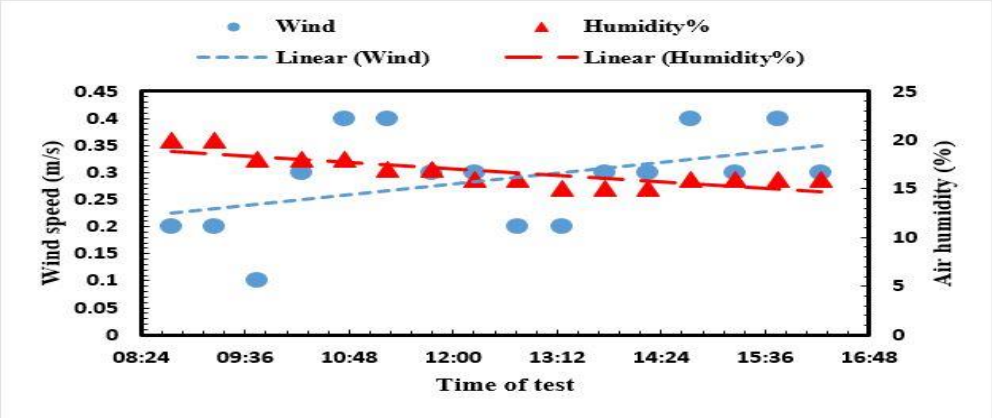


Figure 7. Wind speed and ambient air temperature and humidity during the test.

شکل ۷. سرعت باد و دمای رطوبت هوای محیط در زمان آزمایش.

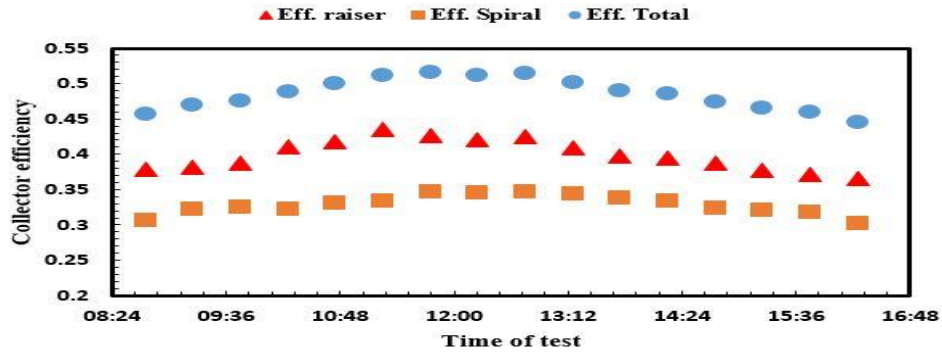


Figure 8. Collector efficiency based on tube arrangement type.

شکل ۸. کارایی کلکتور براساس نوع آرایش لوله.

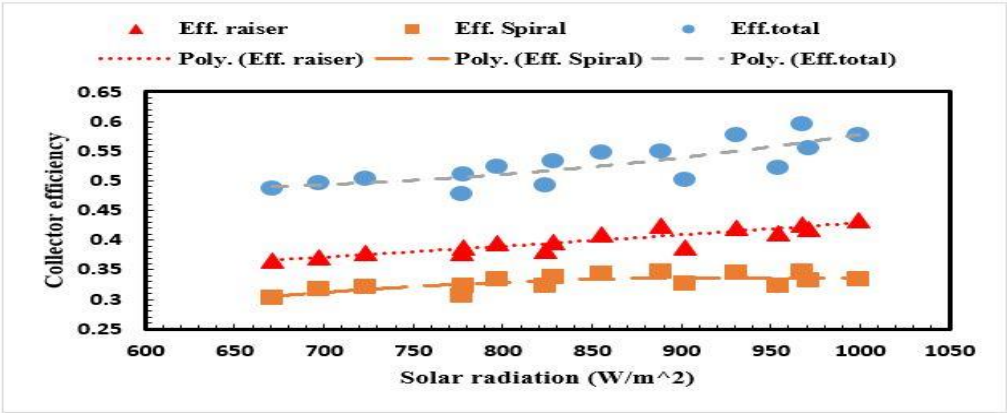


Figure 9. Changes in collector efficiency based on received solar radiation.

شکل ۹. تغییرات بازدهی کلکتور بر اساس تابش خورشیدی دریافتی.

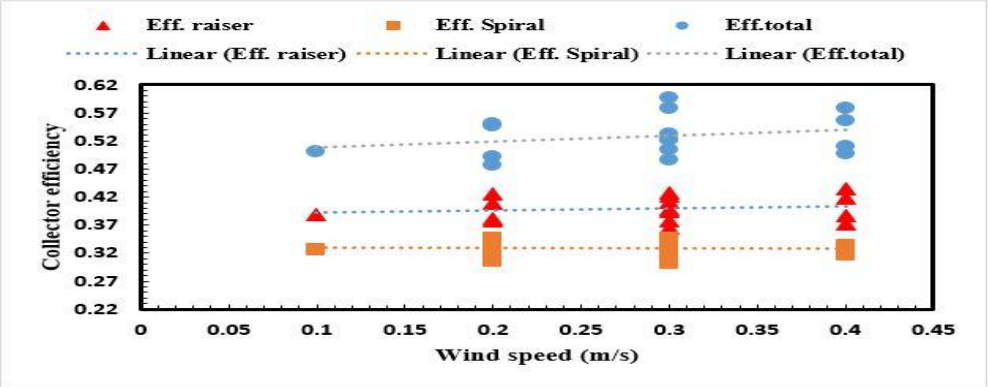


Figure 10. Changes in collector efficiency based on wind speed.

شکل ۱۰. تغییرات بازدهی کلکتور بر اساس سرعت باد.

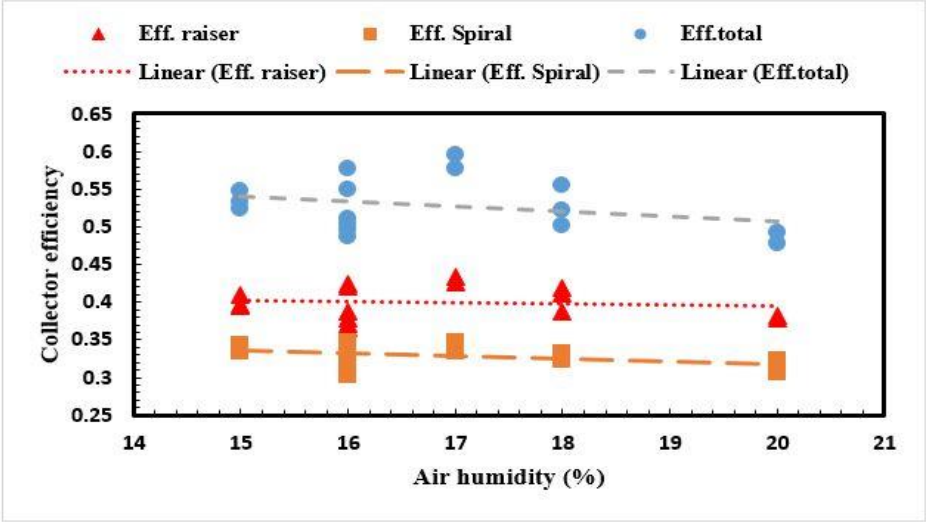


Figure 11. Changes in collector efficiency based on ambient humidity.

شکل ۱۱. تغییرات بازدهی کلکتور بر اساس رطوبت محیط.

در شکل‌های ۱۰و ۱۱ کارایی کلکتور در لوله‌گذاری مختلف بر حسب سرعت باد و رطوبت هوای موجود اطراف کلکتور به تفکیک ارایه گریده است. همان‌طور که در این شکل ۱۰ مشخص است در سرعت پایین باد تاثیر چندانی بر کلکتور مشاهده نمی‌شود اما وقتی کمی سرعت بالاتر می‌رود روند تغییرات کارایی کلکتور کمی محسوس‌تر شده و روندی افزاینده به خود می‌گیرد. دلیل این اتفاق را این‌گونه می‌توان توجیه کرد که با افزایش سرعت باد هم دمای هوای اطراف کلکتور می‌تواند کاهش یابد که نزدیک‌تر به دمای ورودی به کلکتور باشد هم با افزایش سرعت باد میزان رطوبت و گرد و غبار اطراف کلکتور کاهش یابد و به جذب بیشتر تابش خورشیدی منجر شود. در شکل ۱۱

برعکس نمودار شکل ۱۰ هرچند در مقادیر رطوبتی پایین میزان کارایی کلکتور تغییرات محسوس ندارد ولی با افزایش رطوبت روند تغییرات کارایی کلکتور کاهشی می‌شود. بدیهی است افزایش رطوبت موجود در هوا می‌تواند مانعی در رسیدن حداکثری تابش به کلکتور بوده و از طرف خنک سازی سیال عامل نیز کمی سخت‌تر می‌شود که دلایل این تغییرات می‌توانند باشند.

علاوه بر این برای یک کلکتور صفحه تخت طبق معادله ۷، می‌توان یک رگرسیون خطی بین بازده کلکتور و پارامترهای مؤثر بر بازده، یعنی متغیر اختلاف دما و حداکثر بازده کلکتور، در نظر گرفت. حال با این تفاسیر در داده‌های اندازه‌گیری، دمای ورودی و دمای محیط و حتی بازده محاسبه می‌شوند و بنابراین تعیین دو مقدار $F_R(\tau\alpha)$ مشخصه بازده کلکتور و ضریب تلافات انرژی $F_R U_L$را می‌توان بر اساس رگرسیون خطی محاسبه کرد که در نمودار شکل۱۲ تنظیم شده است. واضح است حداکثر بازده کلکتور برابر با $F_R(\tau\alpha)$ که مساوی محل تقاطع رگرسیون به دست آمده با محور عمودی و مقدار $F_R U_L$ برابر شیب خط رگرسیون می باشد. این مقادیر برای حالت‌های مختلف لوله‌گذاری که از نمودار شکل ۱۲ استحصال شده، در جدول ۶ ارایه گردیده است. براساس داده های جدول ۶ در آرایش لوله مارپیچی، رایزری و ترکیبی بیشینه بازده به دست آمده برابر ۳۳٫۸ ٪، ۴۱٫۱ ٪ و ۵۰٫۴ ٪ به ترتیب باشد. همچنین کمترین اتلافات حرارتی در آرایش مارپیچی مشاهده شده و بهترین جذب موثر نیز در حالت ترکیبی به دست آمده است.

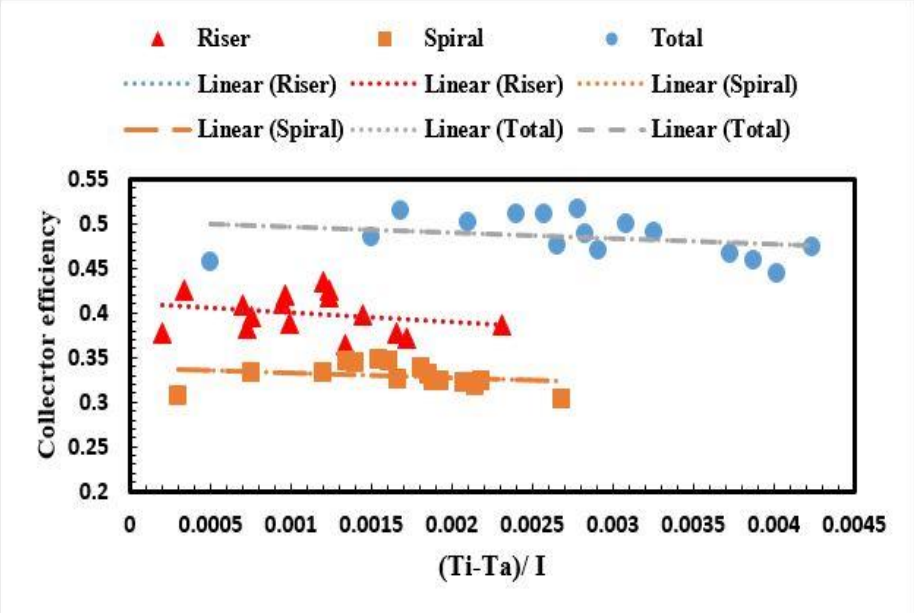


Figure 12. Variations in collector efficiency with different tube arrangements and based on the amount of temperature parameter.

شکل ۱۲. تغییرات بازدهی کلکتور با آرایش لوله مختلف و بر اساس کمیت کاهش دما.

جدول ۶. ضرایب اتلاف حرارتی و کارایی کلکتور با آرایش لوله متفاوت.

Table 6. Heat loss coefficients and collector efficiency with different tube arrangements.

Tube arrangement	$F_R(\tau\alpha)$	$F_R U_L$ W/(m^{2}K)
Spiral	0.338	5.550
Riser	0.411	10.368
Combine	0.504	6.799

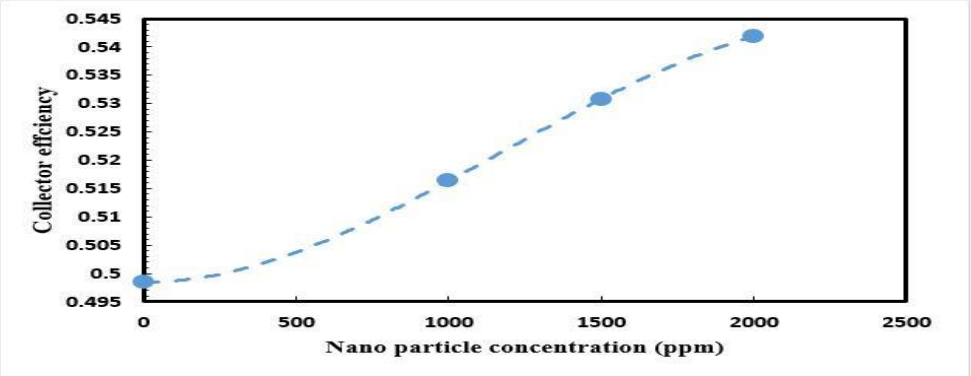


Figure 13. Effect of using nanofluids on collector efficiency based on concentration.

شکل ۱۳. تاثیر استفاده از نانوسیال بر کارایی کلکتور بر اساس غلظت.

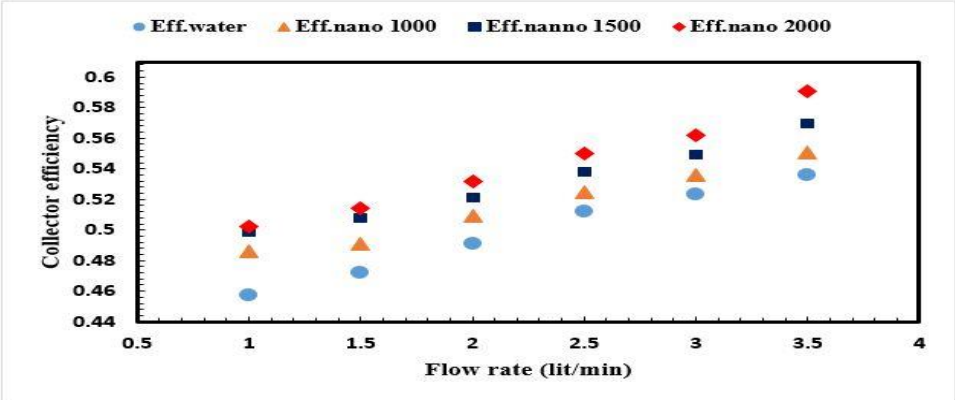


Figure 14. The effect of using different flow rates and different concentrations on collector efficiency.

شکل ۱۴. تاثیر استفاده از دبی‌های متفاوت و غلظت‌های مختلف بر کارایی کلکتور.

جدول ۷. مقایسه تحقیق حاضر با تحقیقات پیشین.

Table 7. Comparison of the present study with previous research.

References	Nanofluid	Concentrations	Efficiency
Venkatesh [17]	Al_2O_3/CuO hybrid -water	0.3%	64.1% max
Kolahkaj [13]	Mg-water	1%	19.6% up to water
Eriksen [15]	Carbon-water	0.01 % wt	42% up to water
Guerraiche [22]	Al2O3-water	6%	14% up to water
Godson [27]	Ag-water	3%	Variation 27%
Present study	Ag.water	0.1-0.2	13.3% up to water

نمودارهای ارایه شده فوق مربوط به بررسی کلکتور با سیال عامل آب بود اما طبق تحقیقات جدید، اکثر کلکتورهای صفحه تخت با نانوسیال‌های نورد شده نیز آزمایش می‌شوند. در این تحقیق، از نانوسیال‌های آب-نقره در سه غلظت ppm ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ استفاده شد. شکل ۱۳ تاثیر استفاده از غلظتهای مختلف این نانوسیال را بر کارایی نهایی کلکتور مورد بررسی نشان می‌دهد. طبق این شکل، هرچه غلظت نانوسیال بیشتر باشد، به ویژه در غلظت ۲۰۰۰، بازده به صورت نمایی افزایش می‌یابد که دلیل اصلی آن علاوه بر حرکت براونی نانوذرات، وجود حرکات مختلف نانوذرات به ویژه حرکات بروانی ناوذرات معلق می‌باشد که باعث افزایش نرخ انتقال حرارت و در نتیجه افزایش کارایی می‌شود. در شکل ۱۴ نیز تاثیر بکارگیری نانوسیال نقره-آب در غلظت‌های مختلف و در دبی‌های متفاوت در کلکتور مذکور نمایش می‌دهد. طبیعی است که با افزایش دبی و سرعت سیال عدد رینولدز بالا رفته و منجر به افزایش برخورد نانوذرات با جداره لوله ها گردیده و در نتیجه انتقال حرارت از لوله به سیال عامل افزایش می یابد. جدول ۷ همچنین مقایسه جالبی از تحقیقات گذشته بر اساس منابع رسمی در مقایسه با مطالعه حاضر ارائه می‌دهد.

۴-نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، یک کلکتور صفحه تخت با دو آرایش لوله‌گذاری رایزری و مارپیچی در صفحه جاذب که توسط نویسنده ساخته شده است، در شرایط آب و هوایی جنوب ایران با حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی شامل بررسی حرارتی هر دو نوع لوله-گذاری بوده و عملکرد کلکتور بر اساس محاسبه بازده کلکتور تحت پارامترهای مختلف بررسی شده است. در طول آزمایش، داده‌های محیطی مانند رطوبت، سرعت باد، دمای هوا و تابش خورشیدی به همراه دمای خروجی و ورودی اندازه‌گیری شدند و میزان تحلیل عدم قطعیت کمی بیش از ۳٪ گزارش شد. بررسی کلکتور با جاذب دوطرفه نشان می‌دهد که بازده آن با افزایش تابش افزایش می‌یابد وروند تغییرات بازدهی بر اساس افزایش سرعت باد و رطوبت هوا به ترتیب افزاینده و کاهشی است. همچنین برای بررسی بیشتر، از نانوسیال آب-نقره در سه غلظت ppm ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ استفاده شد و مشخص شد که استفاده از نانوسیال باعث افزایش بازده کلکتور شده است که این امر به دلیل حرکت براونی و جریان‌های مختلف در لوله‌ها

است. حداکثر بازده به‌دست‌آمده در بالاترین غلظت نانوسیال به بیش از ۶۴٫۱ ٪ رسید که قریب ۱۳ درصد بیشتر از میانگین آب خالص بود.

فهرست علایم

مساحت کلکتور	m^2	A
گرمای ویژه سیال	J / kgK	C_P
گرمای ویژه نانوسیال	J / kgK	C_{pnf}
گرمای ویژه نانوذره	J / kgK	C_{pnp}
گرمای ویژه سیال پایه	J / kgK	C_{pbf}
اختلاف دما	K	DT
ضریب حرارتی کلکتور	-	F_R
تابش رسیده به کلکتور	W / m^2	I_T
دبی سیال	Kg / s	$\dot{m}$
انرژی مفید	W	Q_u
دمای محیط	K	T_a
دمای سیال ورودی	K	T_{inlet}
دمای سیال خروجی	K	T_{outlet}
دمای اولیه ورودی کلکتور	K	$T_{o,i}$
دمای سیال خروجی از کلکتور بعد از زمان (t)	K	$T_{o,\tau}$
ضریب اتلافات کلکتور	W / m^2K	U_L
عدم قطعیت	%	U_η
ضریب جذب-صدور کلکتور برای تابش	-	$\tau\alpha$
کارایی کلکتور	-	η_i
ثابت زمانی کلکتور	-	τ
غلظت نانوذرات	-	φ

۵-منابع

1. Assari, M., Karimi, S., Parvar, M., & Sadeghian, N. (2021). 'Simulation of a Double Slope Solar Still with Rotating External Reflector', *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, 37.3(2), pp. 21–28.

http://doi: 10.24200/j40.2021.56805.1564

2. Moravej, M., 2024. Experimental Study of the Performance of Solar Evaporative Watercooler with Clay Tank. *Environmental Modeling and Assessment*, *29*(2), pp. 395-403.

https://doi.org/10.1007/s10666-023-09941-x

3. Duffie, J. A., Beckman, W. A. and Blair, N., 2020. Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind. John Wiley and Sons.

4. Asvad, M., Gorji, M., & Mahdavi, A. 2023. 'Design And Comparison Of Combined, Parabolic, And Flat Plate Reflectors On The Performance Of A Solar Module', *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, 39(2), pp. 13–24.

http://doi: 10.24200/j40.2022.60438.1642

5. Saini, D. K., Muniyappa, C. and Yadav, A., 2025. Solar photovoltaic water heater with integrated thermal storage: an experimental evaluation. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *150*(16), pp. 12619-12642.

https://doi.org/10.1007/s10973-025-14490-4

6. Elkhoundafi, O. and Elgouri, R., 2024. Study of the performance of an individual solar water heater. *Interactions*, *245*(1), pp. 320.

https://doi.org/10.1007/s10751-024-02168-6

7. Abdulsitar, A., Hasan, N., Basem, A., Daabo, A., Yaseen, A. and Hamzah, H., 2024. Experimental study of the thermal performance of spiral flow solar water heating system. *MRS Energy and Sustainability*, *11*(2), pp. 554-564.

https://doi.org/10.1557/s43581-024-00101-6

8. Nurhilal, O., Farizan, N.M., Rahman, F. and Setianto, S., 2024. Enhancing water heater

Analysis and Calorimetry, *150*(14), pp. 10681-10724.

https://doi.org/10.1007/s10973-025-14431-1

15. Eriksen, A. B., Kosinski, P., Balakin, B. V. and Kosinska, A., 2024. Experimental study of a direct absorption solar collector with stationary nanofluid. *Energy Conversion and Management: X*, *23*, pp. 100683.

https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100683

16. Jirdehi, M. A., Shaterabadi, M. and Iqbal, A., 2025. Enhancement of the solar water heater thermodynamic performance by utilizing solar panels under diverse scenarios: Comprehensive outlook. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *163*, pp. 108734.

http://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108734

17. Venkatesh, R., Hossain, I., Mohanavel, V., Soudagar, M. E. M., Alharbi, S. A. and Al Obaid, S., 2024. Flat plate solar collector activated with alumina-silicon dioxide-copper oxide hybrid nanofluid: Thermal performance study. *Applied Thermal Engineering*, *257*, pp. 124496.

http://doi.org/ 10.1016/j.applthermaleng.2024.124496

18. Keshari, S., 2025. Estimation of Solar Energy Incident on Solar Flat-Plate Collectors and Determination of the Optimum Tilt Angle at Bharatpur, Northern-West Region (NWR) of India. *Next Research*, pp. 100655.

http://doi.org/ 10.1016/j.nexres.2025.100655

19. Anwar, N., Ahmed, M., Irfan, S., Adnan, M., Lee, S. L., Pham, P. V. and Rout, C. S., 2026. Future directions and emerging trends of sustainable energy harvesting: innovations in photovoltaic and thermoelectric systems. *RSC Advances*, *16*(20), pp. 17725-17744.

http://doi.org/ 10.1039/d6ra01556e

20. Essa, M. E. S. M., Hassan, A. A., El-Kholy, E. E. and Ahmed, M. M. R. 2025. Innovations and advancements in solar tracker systems: A comprehensive review. *Journal of* efficiency with aluminum and zinc-coated steel systems for energy solutions. *Heliyon*, *10*(16), e35682.

http:// doi.org/ 10.1016/j.heliyon.2024.e35682

9. Almutairi, A., Almarul, A., Alnafessah, R., Atya, A.H.A., Khan, S. and Maricar, N., 2024. Design and fabrication of low temperature flat plate collector for domestic water heating. *Materials Research Proceedings*, *43*, pp 254-260.

https://doi.org/10.21741/9781644903216-33

10. Freegah, B., 2023. Numerical and experimental analysis of the flat plate solar water heater systems thermal performance. *Heat Transfer*, *52*(2), pp.1118-1141.
https://doi.org/10.1002/htj.22732Digital Object Identifier (DOI)

11. Alkhafaji, M.H., Alhamdo, M.H., Freegah, B. and Saleh, Q., 2025. Enhancing Thermal Performance of Solar Water Heater System Through Collector Area Optimization. *Heat Transfer*, *54*(5), pp.3392-3404.

https://doi.org/10.1002/htj.23364

12. Moravej, M. 2020. Efficiency enhancement in a triangular solar flat plate collector by using Al2O3-water nanofluids: An experimental study. *Challenges in Nano and Micro Scale Science and Technology*, *8*(2), pp. 99-108.

http://doi.org/10.22111/tpnms.2020.35575.1197

13. Kolahkaj, S., Moravej, M. and Ghafouri, A., 2024. Thermal performance of a flat-plate solar collector using elliptical riser tubes and magnesium oxide nanofluid. *International Journal of Ambient Energy*, *45*(1), 2323642 .

https://doi.org/10.1080/01430750.2024.2323642

14. Singh, V., Ahirwar, B. K., Paraye, P., Kushwah, S., Patel, A. K., Nigam, P.,Tiwari, R. and Tinnaluri, V. N., 2025. A categorical review of advancements, efficiency, and sustainability in solar water heating systems. *Journal of Thermal*

Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology, *16*(1), pp. 1-14.

http://doi.org/ 10.55981/j.mev.2025.1004

21. Mahamude, A.S.F., Kamarulzaman, M.K., Harun, W.S.W., Kadirgama, K., Ramasamy, D., Farhana, K., Bakar, R.A., Yusaf, T., Subramanion, S. and Yousif, B., 2022. A Comprehensive Review on Efficiency Enhancement of Solar Collectors Using Hybrid Nanofluids. *Energies*, *15*, pp. 1391.

https://doi.org/10.3390/en15041391

22. Guerraiche, D., Guerraiche, K., Driss, Z., Chibani, A., Merouani, S. and Bougriou, C., 2022. Heat transfer enhancement in a receiver tube of solar collector using various materials and nanofluids. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, *12*(5), pp. 9282-9294.

https://doi.org/10.48084/etasr.5214

23. Ishak, M. A. A. B., Ibrahim, A., Sopian, K., Fauzan, M. F., Rahmat, A. A. and Yusaidi, N. J., 2023. Performance and economic analysis of a reversed circular flow jet impingement bifacial PVT solar collector. *International Journal of Renewable Energy Development*, *12*(4), pp. 780.

https://doi.org/10.14710/ijred.2023.54348

24. Chandola, M., Jain, A., Dhonde, M., Sakthivel, P., Sahu, K. and Shirage, P. M., 2026. Materials and process engineering of antireflection coatings for enhancement of efficiency in silicon solar cells. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, *15*(1), pp. 9.

https://doi.org/10.1007/s40243-025-00351-5

25. Qin, Y., Liu, T., Li, P., Zhao, K., Jiao, F., Pei, G. and Liu, Q., 2024. New hybrid CHP system integrating solar energy and exhaust heat thermochemical synergistic conversion with dual-source energy storage. *Journal of Thermal Science*, *33*(3), pp. 970-984.

https://doi.org/10.1007/s11630-024-1906-3

26. ASHRAE, Standard 93-2010– Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors (ANSI Approved), ANSI/ASHRAE Standard 93-2010 (R2014). ASHRAE Inc., Atlanta, USA, www.ASHRAE.org.

27. Godson, L., Raja, B., Lal, D. M. and Wongwises, S. J. E. H. T., 2010. Experimental investigation on the thermal conductivity and viscosity of silver-deionized water nanofluid. *Experimental Heat Transfer*, *23*(4), pp. 317-332.

https://doi.org/10.1080/08916150903564796

کتابخانه مرکزی شده