ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2024;24(06):385-397.

Energy and Exergy Analysis of a Direct Absorption Parabolic Solar Collector Enhanced with Multi-Walled Carbon Nanotubes and Titanium Dioxide Nanoparticles

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Edalatpour A.H.[1],
Shahdad I.[2],
Hosseinalipour S.M.[1*],
Moghimi M.[2],

How to cite this article
Edalatpour AH, Shahdad I, Hosseinalipour SM, Moghimi M, Energy and Exergy Analysis of a Direct Absorption Parabolic Solar Collector Enhanced with Multi-Walled Carbon Nanotubes and Titanium Dioxide Nanoparticles. Modares Mechanical Engineering; *2024;24(06):385-397*.

ABSTRACT

This study investigates the comparative effects of carboxyl-functionalized multi-walled carbon nanotube (MWCNT)/water nanofluids and titanium dioxide (TiO_2) /water nanofluids in direct absorption parabolic solar collectors. To achieve this, a standard testing apparatus was constructed, and the thermal and exergy efficiencies of the collector were calculated using nanofluids at various concentrations. UV/Vis analysis was used to analyze the radiative properties of the nanofluids, and their thermal conductivity was also measured. Experiments were conducted under laminar flow conditions with flow rates of 20, 60, and 100 liters per hour and inlet temperatures of 20, 30, and 40 °C under real conditions with direct solar irradiation. The highest thermal efficiency recorded for the carbon-based nanofluid was 44.96%, while the titanium-based nanofluid achieved a thermal efficiency of 34.98%. Given the substantial improvement in efficiency compared to the base fluid (distilled water), the combined effect of using both nanofluids was also examined, resulting in a maximum thermal efficiency of 48.77%. The exergy efficiency at the highest flow rate and inlet temperature for the base fluid, TiO_2 nanofluid, MWCNT nanofluid, and the hybrid nanofluid were 2.61%, 4.98%, 6.68%, and 7.26%, respectively. The pressure drop of all nanofluids in the absorber tube ranged from 5 to 39.6 Pascals. The studied nanofluids enhance the thermal performance of the system and create low pressure drop, indicating their high efficiency in direct absorption solar collectors.

Keywords Solar Collector, Direct Absorption, Nanofluid, Multi-Wall Carbon Nanotubes, Titanium Dioxide, Exergy

[1] Energy, Water and Environment Research Lab, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
[2]Department of Energy Conversion, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Correspondence
Address: Water and Environment Research Lab, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

alipour@iust.ac.ir

Article History
Received: July 8, 2024
Accepted: September 10, 2024
ePublished: September 25, 2024

CITATION LINKS

1- Recent developments in optical and thermal .... 2- A comprehensive review on the application of .... 3- Improvement in the performance of .... 4- Performance analysis of direct .... 5- Exergy analysis of solar thermal .... 6- Broadband absorbing mono, blended and .... 7- Performance of a “black” liquid flat-plate solar collector. 8- Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid-based .... 9- Nanofluid-based direct absorption solar collector. 10- Performance improvement of a nanofluid solar collector based on .... 11- Photothermal properties of graphene nanoplatelets nanofluid for .... 12- Experimental investigation of graphene nanoplatelets .... 13- Energy and exergy analysis of direct .... 14- Field study of a direct absorption .... 15- Experimental comparison of optical properties of nanofluid and .... 16- Thermal efficiency enhancement of direct absorption parabolic trough .... 17- Performance assessment of a .... 18- Experimental analysis of thermal performance of .... 19- Recent advances and developments of .... 20- Application of Fe_3O_4/Silica hybrid nanofluid as ... 21- Energy and exergy analysis of ... 22- Modeling of a direct absorption parabolic trough .... 23- Hybrid nanofluid in a direct absorption .... 24- Corrosion analysis and performance investigation of .... 25- Numerical modeling and multi-objective optimization of .... 26- Application of large-scale prepared MWCNTs nanofluids in .... 27- MWCNT and COOH–MWCNT aqueous nanofluids: .... 28- A review on .... 29- Solar Energy Engineering. 30- Parabolic trough solar collectors .... 31- Design and performance characteristics of a .... 32- On the effect of different placement schemes of .... 33- Improving environmental performance of .... 34- Heat transfer analysis and .... 35- Performance evaluation and nanofluid using .... 36- Methods of testing to .... 37- Photo-thermal conversion performance of .... 38- Solar Energy Engineering: Processes and Systems. 39- Experimental investigation on the thermal behavior of .... 40- Using uncertainty analysis in the planning of .... 41- Experimental research on the performance of .... 42- An experimental study on energetic performance evaluation of a .... 43- Exergy, Economic and Environmental Analysis of a .... 44- Enhanced optical properties and ....

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

تحلیل انرژی و اگزرژی کلکتور خورشیدی جذب مستقیم سهموی با اصلاح سیال عامل توسط نانولوله‌های کربنی چند دیواره و نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید

امیرحسین عدالت‌پور[۱]، ایمان شهداد[۲]، سیدمصطفی حسینعلی‌پور[۱*]، مهدی مقیمی[۲]

[۱] آزمایشگاه انرژی، آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

[۲] گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

چکیده

تمرکز این پژوهش بر روی مقایسه‌ی اثر استفاده از دو نانوسیال نانولوله‌کربنی چند دیواره عامل‌دار کربوکسیل-آب و تیتانیوم دی‌اکسید-آب در کلکتورهای خورشیدی سهموی جذب مستقیم است. بدین منظور با ساخت دستگاه استاندارد تست عملکرد کلکتور خورشیدی و استفاده از نانوسیالات در غلظت‌های مختلف، بازده حرارتی و بازده اگزرژی کلکتور در هر حالت محاسبه شده است. برای تحلیل خواص تشعشعی نانوسیالات از آنالیز uv/vis استفاده شده است و ضریب هدایت حرارتی آن‌ها نیز اندازه‌گیری شده است. تست‌ها در جریان آرام با دبی‌های ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ لیتر بر ساعت و دماهای ورودی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سانتیگراد در شرایط واقعی با تابش مستقیم خورشید انجام شده‌اند. بیشترین مقدار بازدهی حرارتی برای نانوسیال کربنی ٤٤/٩٦ درصد و برای نانوسیال تیتانیومی ۳٤/۹۸ درصد گزارش شده است. با توجه به افزایش قابل توجه بازده نسبت به سیال پایه (آب مقطر)، اثر ترکیبی استفاده از نانوسیالات نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. بازده حرارتی نانوسیال ترکیبی تا حداکثر ٤٨/٧٧ درصد حاصل شده است. بازده اگزرژی در بیشترین دبی و دمای ورودی برای سیال پایه، نانوسیال حاوی تیتانیوم دی‌اکسید، نانوسیال نانولوله کربنی چند دیواره و نانوسیال ترکیبی برابر با ۲/٦۱، ٤/۹۸، ٦/٦٨ و ۷/۲٦ درصد حاصل شده است. مقدار افت فشار تمام نانوسیالات در لوله جاذب بین ۵ تا ۳۹/۶ پاسکال است. نانوسیالات مورد بررسی، عملکرد گرمایی سیستم را بهبود داده و افت فشار پایینی در سیستم ایجاد می‌کنند که نشان‌دهنده‌ی کارایی بسیار مناسب آن‌ها در کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم است.

کلیدواژه‌ها: کلکتور خورشیدی، جذب مستقیم، نانوسیال، نانولوله کربنی چند دیواره، تیتانیوم دی‌اکسید، اگزرژی

تاریخ دریافت: ۱٤۰۳/۰٤/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۰

*نویسنده مسئول: alipour@iust.ac.ir

۱- مقدمه

با توجه به دسترسی همیشگی به خورشید و هزینه عملیاتی پایین استفاده از انرژی خورشیدی، این انرژی یکی از بهترین جایگزین‌ها برای انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی است[1]. کلکتورهای خورشیدی، از اجزای مهم سیستم‌های انرژی خورشیدی هستند که شامل انواع مختلفی هستند که از میان مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به کلکتورهای صفحه تخت، لوله خلاء، سهموی و دیش اشاره کرد. کلکتورهای سهموی خاصیت متمرکزکننده دارند که باعث می‌شود با بازتاب تابش خورشید، لوله جاذب به خوبی گرم شود[2]. در دو دهه‌ی اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای برای بهبود عملکرد این دسته از کلکتورها انجام شده‌اند. یکی از جذاب‌ترین ایده‌ها در این حوزه، استفاده از مکانیزم جذب مستقیم است؛ بدین گونه که به جای لوله‌ی مسی از لوله‌ی شیشه‌ای استفاده می‌شود که نرخ عبور نور بالایی دارد. بدین ترتیب، جذب در تمام مقاطع لوله اتفاق می‌افتد در صورتیکه در لوله مسی، دیواره لوله داغ می‌شود و تابش به سیال نمی‌رسد[3]. با توجه به اینکه سیالات عادی مانند آب دارای نرخ عبور نور بالایی هستند، اصلاح آن با اضافه کردن نانوذرات، منجر به دمای خروجی بالاتر و متعاقبا بازدهی حرارتی و بازده اگزرژی بیشتر خواهد شد[4]. اهمیت بررسی بازده اگزرژی این است که این بازده به کیفیت و امکان تبدیل انرژی به کار مفید نیز توجه می‌کند و در شناسایی منابع هدررفت انرژی و طراحی بهینه‌تر سیستم‌های انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد[5].

نانوذرات مختلفی شامل انواع کربنی، نیتریدی، کاربیدی، فلزی، فلز اکسیدی و ... وجود دارند که در ترکیب با سیالاتی پایه مانند آب، اتیلن گلیکول، روغن و ... نانوسیالات را به وجود می‌آورند[6]. پژوهش‌های متعددی در زمینه استفاده از انواع نانوسیالات منفرد در کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم وجود دارد. دسته وسیعی از این پژوهش‌ها مربوط به کلکتور جذب مستقیم صفحه تخت می‌باشند. میناردی و چوانگ[7] برای اولین بار از یک مایع سیاه شامل جوهر هندی، آب و اتیلن گلیکول استفاده کردند و تا ۷۹/۶ درصد بازده را مشاهده کردند در حالیکه بدون مایع سیاه نهایتا ۴۳/۲ درصد بازدهی مشاهده شد. تیاگی[8] با استفاده از نانوسیال آلومینیوم-آب جذب ۹ برابر تشعشع خورشید نسبت به سیال پایه را نتیجه گرفت. اتانیکار و همکاران[9] با استفاده نانولوله کربن، گرافیت، نقره و سیال پایه‌ی آب، مزیت مهم اتلاف حرارت کمتر کلکتورهای جذب مستقیم را نشان دادند و افزایش ۵ درصدی بازده را مشاهده کردند. لو و همکاران[10] با استفاده از نانوذرات تیتانیوم اکسید، آلومینیوم اکسید، نقره، مس و سیلیکن اکسید در سیال پایه‌ی روغن تگزاترم (Texatherm Oil)، ۳۰ تا ۱۰۰ درجه‌ی کلوین افزایش دمای خروجی و ۲ تا ۲۵ درصد افزایش بازده را نسبت به حالتی که تنها روغن تگزاترم استفاده شود، مشاهده کردند. وکیلی و همکاران[11] خواص تابشی و ترموفیزیکی محلول نانوصفحات گرافن در آب را به صورت تجربی اندازه‌گیری کردند. در بررسی آن‌ها مشخص شد جذب این ماده در غلظت‌های وزنی ۰/۰۰۰۲۵ تا ۰/۰۰۵ به خصوص در طول موج ۲۵۰ تا ۳۰۰ نانومتر بسیار بالاست و ضریب هدایت حرارتی تا ۱۳/۵ درصد افزایش پیدا می‌کند. در ادامه در تست این نانوسیال در کلکتور خورشیدی جذب مستقیم صفحه تخت، افزایش بازده حرارتی تا ۹۳/۲۴ درصد برای غلیظ‌ترین ترکیب مشاهده شد که نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب این نانوذره کربنی در جذب تابش خورشید است[12]. بزرگی و همکاران[13] نانوسیال حاوی ذرات نقره را در کلکتور خورشیدی جذب مستقیم صفحه تخت مورد مطالعه قرار دادند که تا ۹۲ درصد بازدهی برای آن مشاهده کردند. استراچالین و همکاران[14] از نانوسیال تولید

شده از قهوه فوری در کلکتور جذب مستقیم استفاده کردند. بیشترین بازدهی در دبی‌های بالای ۷/۵ لیتر در دقیقه و ضریب جذب بین ۲۹۰ تا ۳۷۰ 1/m ثبت شد و در طول آزمایشات، بازدهی کلکتور بین ۵۷/۷ تا ۸۶/۱ متغیر بود.

پژوهش‌های کمتری در کلکتورهای جذب مستقیم نوع سهموی انجام شده‌اند. ولیزاده و همکاران[15] خواص جذب نانوسیالات مس‌اکسید-آب و سیلیکون کاربید-آب را به وسیله‌ی طیف‌سنجی در غلظت‌های حجمی ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ بررسی کردند. در این پژوهش برتری مس‌اکسید در جذب نسبت به سیلیکون‌کاربید مشخص گردید به‌طوری‌که عبور نور در غلظت ۰/۱ مس‌اکسید به صفر می‌رسد. به دنبال این نتیجه، از نانوسیال مس‌اکسید در کلکتور خورشیدی جذب مستقیم سهموی استفاده شد و تا ۳/۸۲ برابر بازده نسبت به سیال پایه برای غلیظ‌ترین ترکیب در این کار گزارش شد[16]. این در حالیست که برای کلکتور خورشیدی جذب غیر مستقیمی که در آن از همین نانوسیال استفاده شده است، افزایش بازده نهایتا ۶۹/۰۷ درصد بوده است[17] که این نتایج نشان‌دهنده‌ی برتری کلکتور خورشیدی جذب مستقیم هنگام استفاده از نانوسیال است. رضا و همکاران[18] در مطالعه‌ای تجربی، مقایسه‌ای بین نانوسیال‌های مبتنی بر آب و اکسید آلومینیوم و نانولوله‌های کربنی چند دیواره در غلظت‌های جرمی مختلف (۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد) در دبی‌های جرمی ثابت ۰/۰۱۲ و ۰/۰۲٤ کیلوگرم بر ثانیه انجام داده‌اند تا تأثیر آن‌ها بر عملکرد کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم سهموی بررسی شود. بهترین بازده‌های حرارتی برای آب مقطر، نانوسیال آلومینیوم اکسید و نانوسیال کربن چند دیواره به ترتیب به میزان ٤۰، ٥٦ و ٥٨ درصد حاصل شده‌اند.

در سالیان اخیر استفاده از نانوسیالات ترکیبی مورد توجه قرار گرفته است زیرا می‌توان از ویژگی‌های مثبت دو یا چند نانوذره استفاده کرد تا به هدایت حرارتی، جذب و در نهایت راندمان بالاتری در سیستم رسید[19]. با این وجود پژوهش‌های اندکی وجود دارند که در آن‌ها اثر استفاده از نانوسیال ترکیبی در کلکتور خورشیدی جذب مستقیم به صورت تجربی بررسی شده باشد. کرمی و همکاران[20] از نانوسیال ترکیبی اکسید آهن- سیلیس بر پایه آب دیونیزه در کلکتور خورشیدی جذب مستقیم صفحه تخت استفاده کردند و تا ۲۰ درصد بازدهی بیشتر نسبت به سیال پایه را مشاهده کردند. بیشترین میزان بازدهی اگزرژی نیز برابر با ۲/۲ درصد در غلظت ppm ۵۰۰ نانوسیال ذکر شده حاصل گردید. جوزف و همکاران[21] از نانوسیال ترکیبی سیلیکن دی‌اکساید، نقره و مس‌اکسید در کلکتور جذب مستقیم سهموی استفاده کردند و تا ۴۸/۱۹ درصد افزایش بازدهی نسبت به آب را مشاهده کردند. بازده اگزرژی نانوسیال در دبی ٦۰ لیتر در ساعت به میزان ۹/٤ درصد در مقایسه با آب افزایش یافت. سرای و هیهات[22] با مدل‌سازی کلکتور خورشیدی جذب مستقیم سهموی که شامل نانوسیال ترکیبی نانولوله کربنی چنددیواره و مس‌اکسید بود، بیشترین مقدار بازدهی اگزرژی و انرژی را به ترتیب ۳۶/۶۳ و ۶۵/۴۷ درصد گزارش کردند که بیشترین بازدهی اگزرژی در بالاترین اختلاف دمای ورودی کلکتور با محیط بود. استراچالین و همکاران[23] از نانوسیال ترکیبی نانولوله کربنی چند دیواره و اکسید آهن در کلکتور خورشیدی جذب مستقیم استفاده کردند و میزان بازدهی حرارتی را از ۵۲/۳ تا ۶۹/۴ درصد گزارش کردند. سریکومار و همکاران[24] از نانوسیال ترکیبی شامل کربن کوانتوم‌دات (C-dot) و مکسین (MXene) در کلکتور جذب مستقیم سهموی استفاده کردند و تا حداکثر ۴۷/۵ درصد بازدهی حرارتی را مشاهده کردند.

تمام پژوهش‌های فوق به نقش مثبت نانوسیالات در افزایش بازدهی حرارتی و بازدهی اگزرژی کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم اشاره دارند. با این وجود، همچنان ترکیبات متعددی وجود دارند که در آزمون عملکرد کلکتور خورشیدی جذب مستقیم سهموی مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. بسیاری از پژوهش‌ها صرفا در فضای آزمایشگاهی با منبع تابش مصنوعی انجام شده‌اند. هر نانوسیال خواص تشعشعی و ترموفیزیکی منحصر به فردی دارد؛ در نتیجه می‌توان همواره سیال عامل نوآورانه‌ای برای کلکتور انتخاب کرد که در این پژوهش، نانوسیال تیتانیوم دی‌اکسید-آب و نانوسیال ترکیبی شامل تیتانیوم دی‌اکسید و نانولوله کربنی چند دیواره عامل‌دار برای نخستین بار در کلکتور خورشیدی جذب مستقیم سهموی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ضمن اینکه پایداری، هدایت حرارتی و جذب تشعشع نانوسیالات نیز به صورت تجربی اندازه‌گیری شده‌اند. یک سیستم تست کلکتور استاندارد توسط محققین ساخته شده است تا افزایش دمای سیال، بازده حرارتی و بازده اگزرژی به دقیق‌ترین شکل ممکن مورد ارزیابی قرار گیرند.

۲- آماده‌سازی نانوسیال

نانولوله‌های کربنی چند دیواره و نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید از شرکت نانومواد کربن ویرا بوشهر تهیه شده‌اند. نانولوله‌های کربنی چند دیواره جذب تشعشع و هدایت حرارتی بالایی دارند؛ از طرفی نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید پایداری بهتری ایجاد می‌کنند که می‌توانند در کنار نانولوله‌های کربنی، نانوسیال ترکیبی مناسبی را به وجود آورند که این نانوسیال، قابلیت بهبود بیشتر بازده حرارتی در سیستم را داشته باشد[25]. نانولوله کربنی چند دیواره از نوع عامل‌دار شده با عامل کربوکسیل انتخاب شده است تا پایداری بهتری در سیال پایه داشته باشد[26,27]. از آب مقطر به عنوان سیال پایه استفاده شده است. با توجه به غیر قطبی بودن پیوند بین نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید، حتما باید از پایدارکننده استفاده شود که بدین منظور از صمغ عربی برای تهیه نانوسیال تیتانیوم دی‌اکسید استفاده شده است. عدم استفاده از پایدارکننده منجر به ته‌نشینی نانوسیال در سیستم و کاهش چشم‌گیر بازده حرارتی در کلکتور خورشیدی خواهد شد[28].

برای تهیه نانوسیال تیتانیوم دی‌اکسید، ابتدا مقدار لازم از نانوذره مربوطه با ترازوی دیجیتال با دقت ۴ رقم اعشار وزن می‌شود. به همین میزان، پایدارکننده‌ی صمغ عربی (نسبت ۱:۱) نیز وزن می‌شود. ابتدا پایدارکننده به مقدار ۳۰۰ میلی‌لیتر از سیال پایه اضافه می‌شود و در همزن مغناطیسی به مدت ۱۵ دقیقه هم می‌خورد. سپس نانوذرات تیتانیوم‌اکسید به این ترکیب اضافه می‌شوند و ۲۰ دقیقه با ترکیب سیال پایه و پایدارکننده هم می‌خورند. سپس، محلول حاصل‌شده ۹۰ دقیقه در دستگاه پراب اولتراسونیک UP400S, Hielscher GmbH ساخت آلمان با توان ۴۰۰ وات و فرکانس ۲۴ کیلوهرتز قرار می‌گیرد تا نانوسیال پایدار نهایی شکل بگیرد. این نانوسیال به ۳ قسمت تقسیم می‌شود و با رقیق کردن با آب مقطر و استفاده از همزن مکانیکی، ۳ غلظت حجمی ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ درصد تهیه می‌گردند تا در آزمون عملکرد کلکتور خورشیدی سهموی جذب مستقیم استفاده شوند.

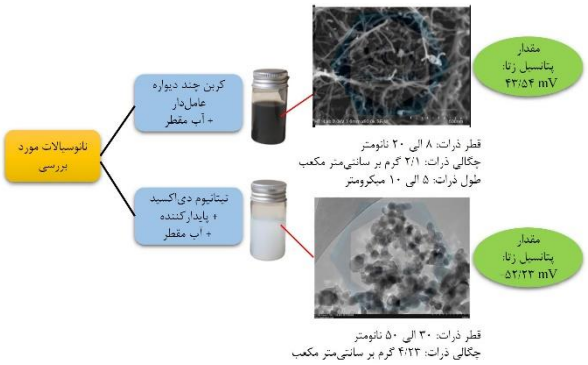
برای تهیه نانوسیال نانولوله کربنی چند دیواره نیز همین مراحل طی می‌شود با این تفاوت که از پایدارکننده برای پایداری آن استفاده نمی‌شود. در شکل ۱، نوع و تصویر نانوسیالات (غلظت ۰/۰۵ درصد) مورد استفاده در پژوهش نشان داده شده است. عکس میکروسکوپ الکترونی نوری (TEM) هر کدام از نانوذرات به همراه ابعاد آن‌ها نیز نشان داده شده است. آنالیز پایداری برای هر نانوسیال توسط آزمون پتانسیل زتا انجام شده است که میزان پایداری آن‌ها نیز در شکل مورد نظر ذکر شده است. هر چقدر این میزان قدر مطلق بیشتری داشته باشد، نانوسیال پایدارتر است و با توجه به مقدار حاصل شده، هر دو نانوسیال دارای پایداری عالی هستند.

در تهیه نانوسیال ترکیبی، ابتدا نانوسیال تیتانیوم دی‌اکسید مطابق روش ذکر شده در بخش قبلی تهیه می‌شود. سپس، نانولوله‌های کربنی چند دیواره اضافه می‌شوند. بعد از هم‌زدن نانوسیال به مدت ۲۰ دقیقه، مجددا از پراب اولتراسونیک به مدت ۹۰ دقیقه استفاده می‌شود تا ذرات به خوبی پراکنده شوند. مجددا ۳ غلظت حجمی ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ درصد آماده می‌شوند. لازم به ذکر است در غلظت‌های فوق، نسبت ۵۰ درصد نانولوله کربنی چنددیواره و ۵۰ درصد تیتانیوم دی‌اکسید اعمال شده است. مقدار پتانسیل زتا برای نانوسیال ترکیبی برابر با ۵۶/۸۲ mV- حاصل شد که نشان‌دهنده‌ی پایداری بسیار مناسب این نانوسیال است.

۳- دستگاه تست آزمایشگاهی

۳-۱- مشخصات کلکتور خورشیدی سهموی ساخته شده

مکانیزم عملکرد کلکتور خورشیدی سهموی بدین گونه است که اشعه‌های خورشیدی پس از برخورد به ورق بازتابنده، به صورت متمرکز در فاصله‌ی کانونی به لوله جاذب تابیده می‌شوند[29] که شماتیک آن در شکل ۲ نمایش داده شده است. فرایند ساخت کلکتور باید به گونه‌ای باشد که خطاهای هندسی شامل خطای

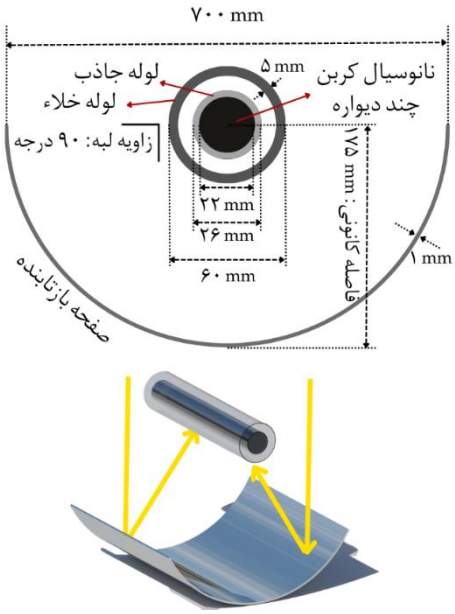


شکل ۱) مشخصات نانوسیال‌های مورد بررسی (عکس‌های TEM توسط شرکت نانومواد کربن ویرا تهیه شده‌اند)

مربوط به ساخت ورق و خطای فاصله‌ی کانونی به حداقل ممکن برسد تا بازدهی کلکتور دچار افت نشود[30]. به منظور مطالعه تجربی اثر نانوسیالات در سیستم‌های خورشیدی، کلکتور خورشیدی سهموی در ابعاد ۱۵۰ در ۷۰ سانتی‌متر با این مکانیزم در دانشگاه علم و صنعت ایران ساخته شد. فاصله‌ی کانونی برابر با ۱۷/۵ سانتی‌متر، زاویه‌ی لبه (Rim Angle) برابر با ۹۰ درجه، سطح بازتابنده ۰/۹۸ متر مربع و ضخامت بازتابنده ۱ میلی‌متر می‌باشد. طول لوله‌ی جاذب شیشه‌ای و لوله‌ی خلاء شیشه‌ای برابر با ۱۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. قطرهای داخلی و خارجی لوله‌ی جاذب ۲۲ و ۲۶ میلی‌متر و قطرهای داخلی و خارجی لوله خلاء ۵۰ و ۶۰ میلی‌متر می‌باشند. ابعاد کلکتور به گونه‌ای انتخاب شده که شار حرارتی یکنواخت‌تر و عملکرد مناسب‌تری داشته باشد[31] و امکان اعتبارسنجی نتایج سیال پایه با سایر پژوهش‌ها فراهم باشد[32,33]. این کلکتور در جهت شمال_جنوب قرار گرفته تا جهت‌یابی آن از سمت شرق به غرب باشد. به همین منظور مکانیزمی طراحی شده تا جهت قرارگیری کلکتور را دائما به وسیله‌ی آن بتوان تغییر داد تا در هر ساعتی در بازه‌ی تست (ساعت ۱۱ تا ۱۵)، ماکزیمم بازدهی حاصل شود. به منظور به حداقل رساندن اتلافات جابه‌جایی، لوله‌ی شیشه‌ای محافظ بر روی لوله‌ی جاذب قرار داده می‌شود[34] و در فضای بین این دو شیشه خلاء ایجاد می‌شود. خلاء موجود، اثرات محیطی را تا حد بالایی حذف می‌کند و بازدهی کلکتور را افزایش می‌دهد[35]. در شکل ۲، مشخصات هندسی اجزای کلکتور نشان داده شده‌اند.

۳-۲- تجهیزات اندازه‌گیری و روند تست‌ها

در آزمون کلکتور، سیکل هیدرولیکی در محیط خارجی انتخاب شده است تا عملکرد واقعی کلکتور خورشیدی ساخته شده در جریان آرام مورد ارزیابی قرار بگیرد. این تست مطابق با استاندارد ۲۰۱۰- ASHRAE۹۳ در حالت پایا برای سیال پایه‌ی آب مقطر و نانوسیالات مورد بررسی در این پژوهش انجام خواهد شد[36]. برای سیرکوله کردن آب در سیکل تست، از پمپ سیرکولاسیون Vito

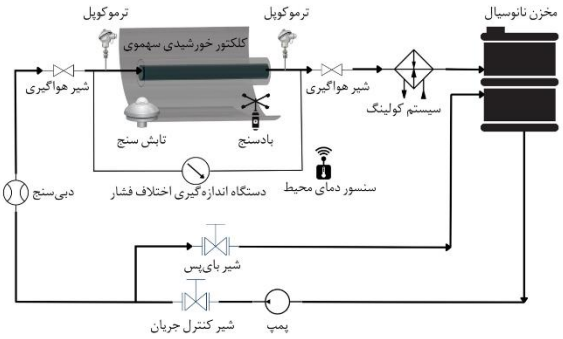


شکل ۲) شماتیک کلکتور خورشیدی سهموی به همراه ابعاد اجزای آن

مدل VNC 25-8/180 ساخت ایران استفاده شده است تا محدوده دبی مورد نیاز برای آزمایش که از ۲۰ تا ۱۰۰ لیتر بر ساعت است، فراهم شود. دو شیر برای تنظیم دبی در سیستم قرار داده شده‌اند. به منظور اندازه‌گیری دبی از دبی‌سنج اولتراسونیک مدل SONIC-PRO NX-SERIES شرکت آکام‌مدار ساخت ایران استفاده شده است. دو ترموکوپل PT100 در نزدیکی ابتدا و انتهای لوله‌ی جاذب قرار گرفته‌اند تا دمای ورودی و خروجی را اندازه‌گیری کنند. برای اندازه‌گیری دمای محیط نیز از یک سنسور دما استفاده می‌شود. اختلاف فشار دو سر لوله توسط دستگاه سنجش اختلاف فشار Endress Hauser اندازه‌گیری می‌شود که توانایی اندازه‌گیری این اختلاف را در بازه‌ی ۰ تا ۱۰۰ میلی‌بار دارد. تابش خورشید توسط دستگاه cem dt-1307 ساخت چین اندازه گرفته شده است و از بادسنج مدل benetech gm8908 ساخت چین برای اندازه‌گیری سرعت باد استفاده شده است. در جدول ۱، بازه‌ی اندازه‌گیری و میزان عدم قطعیت هر کدام از این تجهیزات نشان داده شده است. با توجه به استاندارد تست خورشیدی ذکر شده، دمای ورودی کلکتور باید ثابت بماند. بدین منظور از یک سیستم کولینگ مبتنی بر سیکل تبرید تراکمی استفاده شده است. سیال گرم شده در انتهای لوله‌ی جاذب وارد آیس‌بانک می‌شود تا پس از تبادل حرارتی با آب با دمای پایین، مجددا وارد لوله شود. دمای مخزن آیس‌یانک طوری تنظیم می‌گردد تا دمای ورودی مورد نظر در آزمایش تامین گردد. دماهای ورودی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سانتیگراد برای آزمایش در نظر گرفته شده‌اند. تست‌ها در ماه‌های شهریور و مهر در استان تهران انجام شده است. هر کدام از آزمایشات برای اطمینان حاصل کردن از پاسخ درست تکرار شده‌اند. در شکل ۳، شماتیک مدار تست و در شکل ۴ تصویری از مجموعه تست نمایش داده شده‌اند.

جدول ۱) تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده در آزمایش به همراه بازه‌ی اندازه‌گیری و عدم قطعیت هر تجهیز

تجهیز اندازه‌گیری	بازه اندازه‌گیری	عدم قطعیت
ترموکوپل‌ها	-۲۰۰-۸۰۰°C	±۰/۱°C
تابش‌سنج	۰-۱۹۹۹ W/m²	±۱۰W/m²
دبی‌سنج	۰-۳۰۰۰ L/hour	±۰/۰۰۱L/hour
سنسور دمای محیط	-۴۵-۸۰۰ °C	±۰/۱°C
دستگاه سنجش اختلاف فشار	۰-۱۰۰ mbar	۰/۰۱ mbar
بادسنج	۰-۳۰ m/s	±۰/۱ m/s



شکل ۳) شماتیک دستگاه تست کلکتور خورشیدی

شکل ۴) سیستم آزمون عملکرد کلکتور خورشیدی ساخته شده

۴- روابط حاکم

برای محاسبه میزان عبور نور از هر نمونه‌ی نانوسیال از رابطه‌ی ۱ استفاده می‌شود. در این رابطه، I شدت نور بعد از عبور از درون نمونه، I_0 شدت نور اولیه و l طول مسیری است که نور در ماده طی می‌کند که در این آزمایش برابر با ۱۰ میلی‌متر می‌باشد[37]. نسبت شدت نور عبوری به شدت نور اولیه با استفاده از آنالیز uv/vis حاصل می‌شود. این آنالیز توسط دستگاه UV-2100 Double Beam UV/VIS Spectrophotometer شرکت Rayleigh ساخت چین انجام شده است.

$$T = \left(\frac{I}{I_0}\right) \times 100 \qquad (۱)$$

میزان تابش طیفی هر نمونه نانوسیال با استفاده از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود. هر چقدر میزان تابش طیفی برای یک نمونه (I_n) بیشتر باشد، نشان‌دهنده‌ی عبور کمتر و طبیعتا جذب بیشتر آن نمونه است. در این رابطه، $I_{AM1.5}$ نشان‌دهنده‌ی میزان تابش طیفی استاندارد است[26].

$$I_n = (1 - T) I_{AM1.5} \quad (۲)$$

پارامتر هدف در این پژوهش بازده حرارتی کلکتور می‌باشد که برای سیال پایه و هر ۳ نانوسیال محاسبه می‌شود. این پارامتر حاصل تقسیم حرارت مفید ایجاد شده توسط سیال بر حرارت کل وارد بر سطح مقطع کلکتور می‌باشد که از رابطه‌ی ۳ قابل محاسبه است. T_{in} و T_{out} دماهایی هستند که دو ترموکوپل ورودی و خروجی نشان می‌دهند. در این رابطه، $\dot{m}$ دبی سیال، C_p ظرفیت حرارتی ویژه‌ی نانوسیال، G_T شدت تابش اندازه‌گیری شده توسط تابش‌سنج و A_C سطح بازتابنده می‌باشند [38].

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} C_P (T_{out} - T_{in})}{G_T A_C} \quad (۳)$$

ثابت زمانی پارامتری است که نشان می‌دهد اختلاف دما در چه زمانی به ۶۳/۲ درصد اختلاف دمای نهایی می‌رسد. زمان لازم برای داده‌برداری به کمک این پارامتر محاسبه می‌شود. این زمان در آزمایش مورد نظر برابر با ۷ دقیقه و ۴۰ ثانیه حاصل شده است. برای محاسبه‌ی ثابت زمانی از رابطه‌ی ۴ استفاده می‌شود[39]. در این رابطه، $T_{o,i}$ دمای خروجی در هر زمان، T_i دمای ورودی در هر لحظه و $T_{o,ss}$ دمای خروجی در حالت پایا است که در این حالت، این دما ثابت باقی می‌ماند.

$$(T_{o,i} - T_i) = 0.632 (T_{o,ss} - T_i) \quad (۴)$$

برای محاسبه‌ی عدم قطعیت از روش مفات (Moffat) استفاده می‌شود که مطابق آن هر پارامتر هدف، وابسته به پارامترهایی مستقل است که باعث انتشار خطا می‌شوند[40]. عدم قطعیت بازده و فاکتور اصطکاک (مرتبط با افت فشار) از رابطه‌ی ۵ و ۶ حاصل می‌شود[41,42]. مطابق این روابط، عدم قطعیت بازده وابسته به دبی، دما، شدت تابش و سطح کلکتور و عدم قطعیت فاکتور اصطکاک وابسته به دبی، افت فشار، طول لوله و قطر لوله می‌باشد. عدم قطعیت‌های مربوط به تجهیزات اندازه‌گیری در جدول ۱ نشان داده شده است. عدم قطعیت سطح کلکتور، طول و قطر لوله به ترتیب برابر با ۰/۰۰۱۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۰۰۱ متر می‌باشد. با در نظر گرفتن تمام این مقادیر و مقادیر اندازه‌گیری‌شده در آزمایش، عدم قطعیت بازده و فاکتور اصطکاک برابر با ۲/۲ و ۱/۸ درصد حاصل می‌شود. بیشترین عدم قطعیت ایجاد شده در بخش بازده مربوط به اختلاف دما و شدت تابش و بیشترین عدم قطعیت ایجاد شده در فاکتور اصطکاک مربوط به افت فشار می‌باشد.

$$U_{\eta_{th}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_{th}}{\partial \dot{m}} U_{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{th}}{\partial \Delta T} U_{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{th}}{\partial G_T} U_{G_T}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{th}}{\partial A_c} U_{A_c}\right)^2} \quad (۵)$$

$$U_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \dot{m}} U_{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial (\Delta P)} U_{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial L} U_L\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial d} U_d\right)^2} \quad (۶)$$

موازنه‌ی اگزرژی در سیستم مورد نظر در رابطه‌ی ۷ نشان داده شده است. در این رابطه، $\dot{E}x_{sun}$ اگزرژی تابش دریافتی خورشید، $\dot{E}x_{in}$ اگزرژی جریان ورودی، $\dot{E}x_{out}$ اگزرژی جریان خروجی، $\dot{E}x_{loss}$ اگزرژی اتلافات و $\dot{E}x_d$ اگزرژی نابود شده می‌باشند[43].

$$\dot{E}x_{sun} + \dot{E}x_{in} = \dot{E}x_{out} + \dot{E}x_{loss} + \dot{E}x_d \quad (۷)$$

اگزرژی تابش خورشید مطابق رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود[43].

$$\dot{E}x_{sun} = G_T A_C \left[1 - \frac{4}{3}\left(\frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right)^4\right] \quad (۸)$$

اختلاف اگزرژی جریان ورودی و خروجی برابر با اگزرژی مفید است که توسط رابطه‌ی ۹ حاصل می‌شود[44].

$$\dot{E}x_{useful} = \dot{E}x_{out} - \dot{E}x_{in} = \dot{m} C_P (T_{out} - T_{in}) - \dot{m} C_P T_{amb} \ln\left(\frac{T_{out}}{T_{in}}\right) \quad (۹)$$

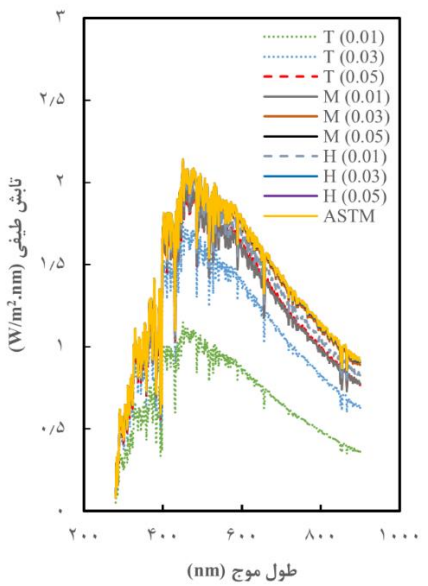
مطابق رابطه‌ی ۱۰ نسبت اگزرژی مفید به اگزرژی تابش دریافتی خورشید برابر با بازده اگزرژی است[22].

$$\eta_{Ex} = \frac{\dot{E}x_{useful}}{\dot{E}x_{sun}} \quad (۱۰)$$

۵- تحلیل نتایج

۵-۱- آزمایش طیف‌سنجی نمونه‌های نانوسیال

با توجه به اینکه در کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم سهموی، مکانیزم جذب اهمیت بالایی دارد، می‌بایست خواص نوری نانوسیالات بررسی شوند تا مشخص شود هر نانوسیال در هر طول موج تا چه میزان می‌تواند نور را جذب کند و عبور دهد[44]. در شکل ۵، نتایج حاصل از آنالیز طیف‌سنجی نشان داده شده است. نمادهای T، M و H به ترتیب نشان‌دهنده‌ی نانوسیالات تیتانیومی، کربنی و ترکیبی هستند که هر کدام در ۳ غلظت ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ مورد بررسی قرار گرفتند. برای مثال نماد T (0.01) در راهنمای نمودار به معنی نانوسیال تیتانیومی با غلظت ۰/۰۱ درصد است. کمترین میزان جذب (و بیشترین میزان عبور) برای این نانوسیال است زیرا بیشترین فاصله را با تابش طیفی استاندارد (ASTM) دارد که با رنگ زرد مشخص است. هر چقدر فاصله تابش طیفی یک نمونه نانوسیال با تابش طیفی استاندارد کمتر باشد، جذب تشعشع خورشید در آن نمونه قوی‌تر است. در نمونه‌های M (0.03)، M (0.05)، H (0.03) و H (0.05) میزان تابش طیفی بسیار نزدیک به تابش طیفی استاندارد است و در نمودار به صورت منطبق بر آن مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش



شکل ۵) میزان تابش طیفی بر حسب طول موج برای هر نمونه نانوسیال

غلظت در هر نوع نانوسیال، جذب بیشتری صورت می‌گیرد و مقادیر تابش طیفی افزایش می‌یابد. بدین ترتیب نانوسیالات ترکیبی دارای بیشترین جذب و نانوسیالات تیتانیومی دارای کمترین جذب هستند. جذب بالاتر نانوسیالات کربنی نسبت به نانوسیالات تیتانیومی به علت ساختار لوله‌ای و رنگ تیره آن می‌باشد. نانوسیالات تیتانیومی سفید رنگ هستند و بازتاب نور بالاتری دارند. به دلیل اندازه کوچکتر، سطح فعال کمتری برای جذب نور دارند و بخش قابل توجهی از نور به جای جذب، پراکنده می‌شود. در نانوسیال ترکیبی، با افزایش سطح تماس به دلیل اضافه شدن ذرات تیتانیوم با ساختار کریستالی به ساختار لوله‌ای کربن و از طرفی افزایش فعل و انفعال بین ذرات، جذب بیشتری اتفاق می‌افتد. در مجموع مشاهده می‌شود با استفاده از غلظت‌های پایین می‌توان به جذب بالایی دست یافت.

۵-۲- اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات

اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه، ضریب هدایت حرارتی آن را افزایش می‌دهد. برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی از دستگاه KD2 Pro شرکت Decagon کشور آمریکا استفاده شده است تا دقیق‌ترین مقدار برای این خاصیت ترموفیزیکی مهم حاصل شود. در جدول ۲، مقدار این ضریب برای سیال پایه و هر سه نوع نانوسیالات در بیشترین غلظت گزارش شده است. مطابق این جدول، هدایت حرارتی نانوسیالات نسبت به سیال پایه بیشتر است زیرا سطح تماس بیشتری در آن‌ها وجود دارد. ضریب هدایت حرارتی برای هر نانوسیال، با افزایش دما افزایش می‌یابد زیرا لزجت نانوسیال کاهش پیدا می‌کند در نتیجه چسبندگی ذرات کاهش و حرکت براونی آن‌ها افزایش پیدا می‌کند. حرکت ذرات به دلیل اثر ترموفورز (Thermophoretic Effect) می‌تواند باعث افزایش تماس حرارتی و اختلاط بهتر بین ذرات نانو و سیال عامل شود، که به نوبه

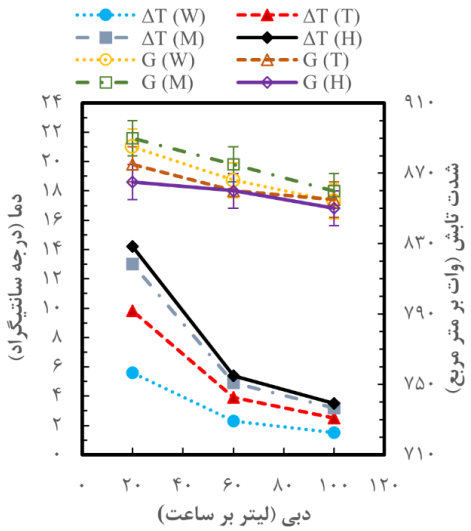
جدول ۲) ضریب هدایت حرارتی سیال پایه و نانوسیالات مورد بررسی با بیشترین غلظت در دماهای متفاوت

نانوسیال	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)			
	۲۰ °C	۳۰ °C	۴۰ °C	۵۰ °C
سیال پایه (آب مقطر)	۰/۵۴۸	۰/۵۵۵	۰/۵۶۱	۰/۵۶۹
نانولوله کربنی چند دیواره-آب	۰/۵۹۴	۰/۶۰۶	۰/۶۱۷	۰/۶۳۷
تیتانیوم دی‌اکسید-آب	۰/۵۶۶	۰/۵۸۴	۰/۶۰۱	۰/۶۲
ترکیبی	۰/۶۱۵	۰/۶۲۶	۰/۶۵۳	۰/۶۹

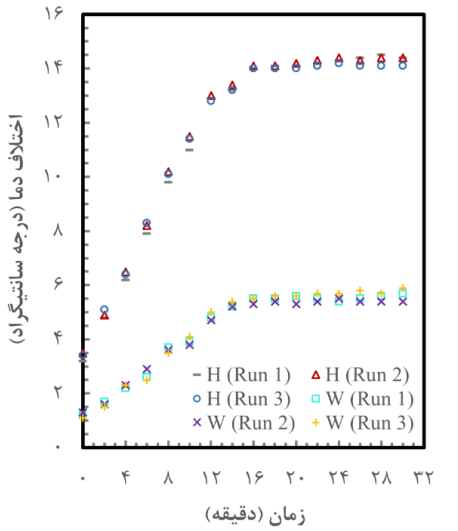
خود هدایت حرارتی نانوسیال را افزایش می‌دهد. میزان افزایش ضریب هدایت حرارتی برای نانوسیالات مورد بررسی نسبت به سیال پایه در بازه‌ی دمایی ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتیگراد برابر با ۳/۲۸ تا ۸/۹۶ درصد برای نانوسیال تیتانیوم دی‌اکسید/آب، ۸/۳۹ تا ۱۱/۹۵ درصد برای نانوسیال نانولوله کربنی چنددیواره/آب و ۱۲/۲۲ تا ۲۵/۱۳ درصد برای نانوسیال ترکیبی مشاهده شده است. همانطور که مشخص است، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نانولوله کربنی چند دیواره بیشتر از نانوسیال تیتانیوم دی‌اکسیدی است زیرا نسبت طول به قطر ذرات نانولوله کربنی چند دیواره بالاست و با توجه به تئوری نفوذ (percolation theory)، افزایش این ضریب در این ماده قابل اثبات است. با اضافه شدن تیتانیوم دی‌اکسید و صمغ عربی و افزایش سطح تماس، از انباشتگی نانوذرات در نانوسیال ترکیبی جلوگیری می‌شود که موجب افزایش پایداری نانوسیال ترکیبی شده و در نتیجه ضریب هدایت حرارتی آن نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین میزان ضریب هدایت حرارتی با افزایش غلظت نانوسیالات افزایش پیدا می‌کند، زیرا تعداد نانوذرات محلول‌های غلیظ‌تر بیشتر است و در نتیجه برخورد بین ذره‌ای نیز بیشتر می‌شود.

۵-۳- افزایش دمای مشاهده شده با استفاده از سیال پایه و نانوسیالات

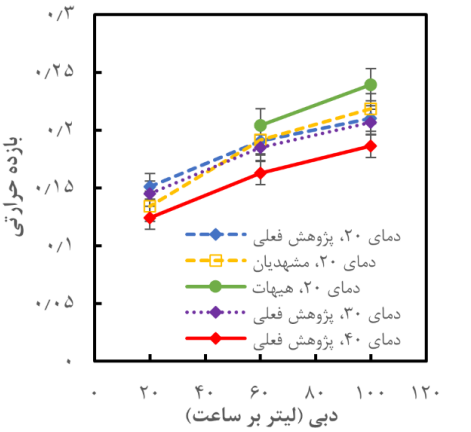
در شکل ۶، نمودار دما بر حسب دبی برای آب مقطر (W)، نانوسیال حاوی تیتانیوم دی‌اکسید (T)، نانوسیال حاوی نانولوله کربنی چند دیواره (M) و نانوسیال ترکیبی (H) در دمای ورودی ۲۰ نشان داده شده است. در تمام حالت‌ها، حداکثر غلظت نانوسیالات یعنی ۰/۰۵ درصد در نظر گرفته شده است تا مشخص شود حداکثر افزایش دما در سیستم چقدر بوده است. محور دوم عمودی نمودار مربوط به نرخ تابش در هر دبی است. موارد مربوط به تابش با حرف G مشخص شده‌اند. برای مثال G (W) شدت تابش در تست‌های مربوط به سیال پایه است. در شکل ۷، تکرارپذیری آزمایشات برای سیال پایه (W) و نانوسیال ترکیبی (H) در دبی ۲۰ لیتر بر ساعت نشان داده شده است.



شکل ۶) اختلاف دمای ایجاد شده در ورودی و خروجی لوله جاذب بر حسب دبی به همراه شدت تابش



شکل ۷) بررسی تکرارپذیری آزمایشات برای سیال پایه و نانوسیال ترکیبی در دبی ۲۰ لیتر بر ساعت و دمای ورودی ۲۰ درجه سانتیگراد



شکل ۸) بازده حرارتی کلکتور با استفاده از سیال پایه (آب مقطر) به همراه اعتبارسنجی

بیشترین اختلاف دما برای دو نانوسیال کربنی و تیتانیومی و سیال پایه به ترتیب برابر با ۱۳، ۹/۸ و ۵/۶ درجه سانتیگراد در دبی ۲۰ لیتر بر ساعت حاصل می‌گردد. برای نانوسیال نانولوله کربنی اختلاف دمای بیشتری مشاهده شده است زیرا جذب تشعشع و هدایت حرارتی بالاتری نسبت به نانوسیال تیتانیوم دی‌اکسید دارد. نسبت سطح به حجم نانولوله‌های کربنی بالاست در نتیجه تماس بین آن‌ها و سیال پایه افزایش یافته و باعث بهبود انتقال حرارت شده است. بیشترین اختلاف دما در سیستم برای حالتی است که از نانوسیال ترکیبی استفاده شود. در این حالت، ۱۴/۲ درجه اختلاف دما ایجاد می‌شود. در واقع دمای خروجی لوله حدود ۳۴/۲ درجه سانتیگراد در این حالت حاصل می‌شود. اختلاف دمای ایجاد شده برای ۴ سیال مورد بررسی در دبی ۶۰، به طور میانگین تا ۳۹/۱۵ درصد اختلاف دمای حاصل شده در دبی ۲۰ افت می‌کند. در دبی ۱۰۰، مقدار میانگین افت اختلاف دما تا ۲۵/۳۹ درصد می‌رسد.

۵-۴- بازده حرارتی کلکتور با استفاده از سیال پایه

در این قسمت، بازده حرارتی برای حالتی که سیال عامل آب مقطر است، گزارش شده است. تست‌ها در ۳ دمای ورودی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سانتیگراد و ۳ دبی ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ لیتر بر ساعت انجام می‌شوند. همانطور که در شکل ۸ مشخص است، نتایج برای هر ۳ دمای ورودی گزارش شده است، در عین حال به منظور مقایسه و اعتبارسنجی با کار سایر پژوهشگران، نتایج تست دو پژوهشگر[32,33] در کلکتوری با ابعاد مشابه برای دمای ورودی ۲۰ درجه سانتیگراد نیز ارائه شده است. هر دو پژوهشگر بر روی سیستمی یکسان تست‌ها را انجام داده‌اند و تا حدود ۲/۰۸ درصد اختلاف در نتایجشان وجود دارد. کالیبره بودن تجهیزات اندازه‌گیری، رعایت ثابت زمانی برای ثبت داده‌ها و تنظیم دقیق سیستم پایدارکننده‌ی دمای ورودی در این اختلاف نقش دارند.

برای تمام دماهای ورودی، بیشترین بازده حرارتی در دبی ۱۰۰ لیتر بر ساعت مشاهده می‌شود و با کاهش دبی تا ۲۰ لیتر بر ساعت، بازده به میزان ۵/۸۷ درصد کاهش پیدا می‌کند. در بین دماهای ورودی، کمترین بازده در دمای ورودی ۴۰ درجه سانتیگراد حاصل می‌شود زیرا اختلاف دما با محیط حدود ۵ درجه است. در واقع با افزایش دمای ورودی و ایجاد اختلاف بیشتر با دمای محیط، بازده کمتری حاصل می‌شود. بازده حرارتی از دمای ورودی ۲۰ درجه سانتیگراد تا دمای ورودی ۴۰ درجه سانتیگراد، به طور متوسط به میزان ۲/۶۱ درصد کاهش پیدا می‌کند. تنها ۰/۵ درصد اختلاف بازده برای دو دمای ورودی ۲۰ و ۳۰ درجه سانتیگراد دیده می‌شود زیرا اختلاف دما با محیط در تست‌های مربوط به این دو دما کم است.

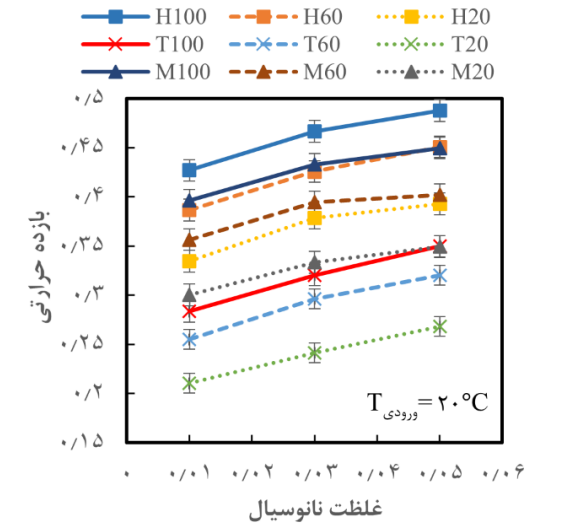
۵-۵- بازده حرارتی کلکتور با استفاده از نانوسیالات

در این بخش، بازده حرارتی در هنگام استفاده از هر نانوسیال در غلظت‌های مختلف گزارش شده است. در شکل ۹-الف نتایج برای دمای ورودی ۲۰، در شکل ۹-ب برای دمای ورودی ۳۰ و در شکل ۹-ج برای دمای ورودی ۴۰ ارائه شده‌اند. با توجه به اینکه ۳ نانوسیال تیتانیومی (T)، کربنی (M) و ترکیبی (H) در ۳ دبی مورد آزمایش قرار گرفتند، اعداد مقابل هر حرف به معنی دبی در تست مورد نظر است. به عنوان مثال، عبارت H100 به معنی استفاده از نانوسیال ترکیبی در دبی ۱۰۰ لیتر بر ساعت است.

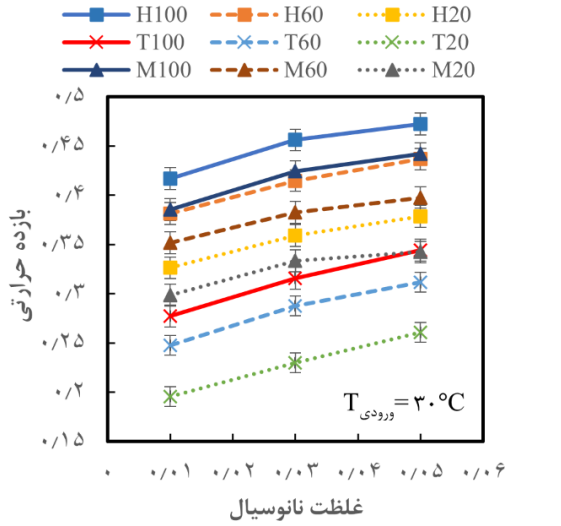
همانطور که در هر سه شکل مشاهده می‌شود، برای تمام نانوسیالات با افزایش غلظت، بازده حرارتی افزایش پیدا می‌کند. به طور کلی، بازده حرارتی برای نانوسیالات کربنی بیشتر از نانوسیالات تیتانیومی است. کمترین بازده حاصل شده برای نوع نانولوله‌کربنی برابر با ۲۷/۶ درصد است که در غلظت ۰/۰۱ درصد، دبی ۲۰ لیتر بر ساعت و دمای ورودی ۴۰ درجه سانتیگراد حاصل شده است. حداکثر بازده برای این نانوسیال در غلظت ۰/۰۵ درصد، دبی ۱۰۰ لیتر بر ساعت و دمای ورودی ۲۰ درجه سانتیگراد برابر با ۴۴/۹۶ درصد گزارش شده است. برای دو نانوسیال دیگر نیز این قاعده برقرار است و حداکثر بازدهی در بیشترین غلظت و دبی و کمترین دمای ورودی حاصل می‌شود. حداقل و حداکثر بازده برای نانوسیال تیتانیوم دی‌اکسید، به ترتیب برابر با ۱۷/۱۴ و ۳۵/۹۸ درصد می‌باشد. دلیل برتری بازده نانوسیال کربنی، جذب بیشتر تشعشع خورشید، پراکندگی کمتر تابش و ضریب هدایت حرارتی بیشتر آن نسبت به نانوسیال تیتانیومی است که در بخش‌های قبلی مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین با استفاده از ترکیب نانوذرات و ایجاد نانوسیال ترکیبی، حداکثر بازده حرارتی به میزان ۳/۸۱ درصد افزایش پیدا کرده است. ترکیب نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید، صمغ عربی و نانولوله‌های کربنی چند دیواره باعث به وجود آمدن نانوسیالی پایدارتر شده که جذب و هدایت حرارتی بهتری دارد در نتیجه بازده حرارتی سیستم را افزایش می‌دهد.

با افزایش دبی، بازده حرارتی کلکتور به طور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. زمانی که جریان سیال با سرعت بیشتری در سیستم در حال گردش باشد، اتلاف حرارتی کمتر خواهد بود و بازده سیستم افزایش پیدا خواهد کرد. همانطور که مشاهده می‌شود هنگام استفاده از نانوسیال کربنی با کمترین دبی (۲۰ لیتر بر ساعت)، بازده بالاتری نسبت به نانوسیال تیتانیومی با بیشترین دبی (۱۰۰ لیتر بر ساعت) مشاهده می‌شود. این مورد یکی دیگر از شواهدی است که برتری نانوسیال کربنی نسبت به نانوسیال تیتانیومی را ثابت می‌کند.

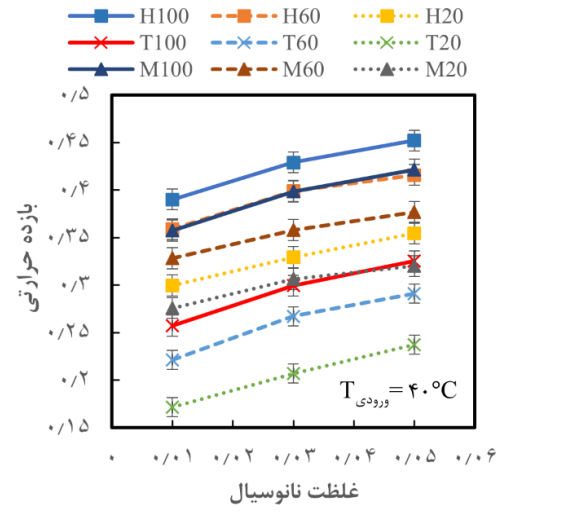
در شکل‌های ۹-ب و ۹-ج بازده‌های کمتری نسبت به شکل ۹-الف مشاهده می‌شود؛ زیرا افزایش دمای ورودی، اختلاف این دما را با محیط افزایش می‌دهد و همانند سیال پایه، بازدهی نانوسیالات نیز با افزایش دمای ورودی، کاهش پیدا می‌کند. تفاوت بازده بین



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹) بازده حرارتی با استفاده از نانوسیالات مختلف بر حسب غلظت در دماهای **الف)** ۲۰ درجه سانتیگراد **ب)** ۳۰ درجه سانتیگراد **ج)** ۴۰ درجه سانتیگراد

دماهای ورودی ۲۰ و ۳۰ درجه کمتر از یک درصد است. اما این تفاوت بین دمای ورودی ۲۰ و ۴۰ درجه به طور میانگین برابر با ۳/۲۴ درصد است.

۵-۶- افت فشار نانوسیالات

با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری اختلاف فشار، افت فشار در لوله جاذب به صورت تجربی در جدول ۳ ثبت شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش دبی برای هر نانوسیال، افت فشار افزایش پیدا می‌کند در نتیجه بیشترین مقدار افت فشار در دبی ۱۰۰ لیتر بر ساعت حاصل شده است. میزان افزایش افت فشار نسبت به سیال پایه در این دبی برای نانوسیالات کربنی، تیتانیومی و ترکیبی به ترتیب برابر با ۱۱/۱۴، ۵/۵۷ و ۱۶/۱۳ درصد می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، نانوسیالات افت فشار کمی در سیستم ایجاد می‌کنند که باعث می‌شود استفاده از آن‌ها کاربردی باشد. نانوسیال تیتانیوم دی‌اکسید کمترین افت فشار را دارد. نانوسیال نانولوله کربنی به دلیل نسبت طول به قطر بالای نانوذرات و تجمع بیشتر آن‌ها، لزجت بیشتر و متعاقبا افت فشار بالاتری دارد. بیشترین افت فشار برای نانوسیال ترکیبی است زیرا با توجه به ترکیب نانولوله کربنی چندیواره، تیتانیوم دی‌اکسید و پایدارکننده‌ی صمغ عربی، نانوسیال حاصل شده ذرات بزرگ‌تر و در نتیجه لزجت بیشتری خواهد داشت.

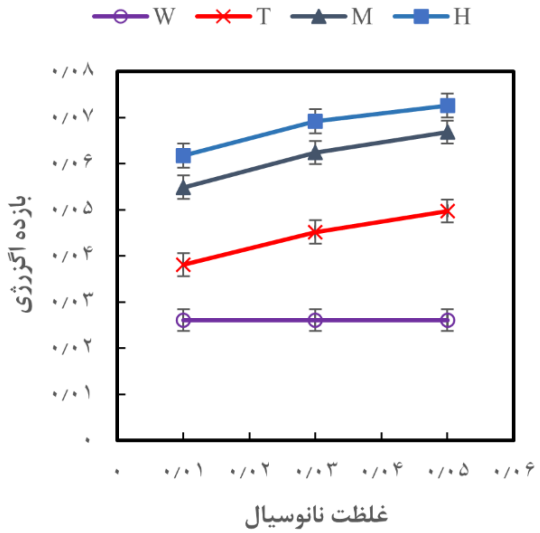
۵-۷- تحلیل اگزرژی سیستم با استفاده از سیال پایه و نانوسیالات

با استفاده از روابط ۸ تا ۱۰، اگزرژی تابش خورشید، اگزرژی مفید و بازده اگزرژی برای سیال پایه و هر نانوسیال در غلظت‌های مختلف محاسبه می‌گردد. در شکل ۱۰، نمودار بازده اگزرژی بر حسب غلظت‌های مختلف نانوسیالات نمایش داده شده است. نمادهای W، T، M و H به ترتیب نشان‌دهنده‌ی سیال پایه، نانوسیال تیتانیوم دی‌اکسید، نانوسیال نانولوله کربنی چندیواره و نانوسیال ترکیبی هستند. داده‌های نمودار مربوط به بیشترین دبی سیستم (۱۰۰ لیتر بر ساعت) و بیشترین دمای ورودی (۴۰ درجه سانتیگراد) می‌باشند. افزایش دمای ورودی با افزایش بازدهی اگزرژی همراه است، بنابراین بیشترین بازده اگزرژی در دمای ذکر شده حاصل می‌گردد. همانطور که در شکل ۱۰ مشهود است، در تمام نانوسیالات با افزایش غلظت آن‌ها، بازده اگزرژی افزایش پیدا می‌کند زیرا به دلیل اختلاف دمای حاصل شده‌ی بیشتر در نانوسیالات با غلظت‌های بیشتر، اگزرژی مفید بالاتری حاصل خواهد شد. استفاده از نانوسیالات باعث شده است تلفات حرارتی کاهش پیدا کند که متعاقبا تخریب اگزرژی نیز کاهش یافته و کار مفید بیشتری توسط سیستم تولید شده است.

در بین نانوسیالات، بیشترین بازده اگزرژی برای نانوسیال ترکیبی با غلظت ۰/۰۵ درصد برابر با ۷/۲۶ درصد و کمترین بازده اگزرژی

جدول ۳) افت فشار نانوسیالات در لوله جاذب در هر دبی هنگام استفاده از بیشترین غلظت

نانوسیال	افت فشار (Pa)		
	۲۰ Lph	۶۰ Lph	۱۰۰ Lph
سیال پایه (آب مقطر)	۵	۱۳/۹	۳۴/۱
نانولوله کربنی چند دیواره-آب	۵/۶	۱۵/۶	۳۷/۹
تیتانیوم دی‌اکسید-آب	۵/۳	۱۴/۸	۳۶
ترکیبی	۵/۸	۱۶/۳	۳۹/۶



شکل ۱۰) بازده اگزرژی با استفاده از سیال پایه و نانوسیالات مختلف بر حسب غلظت

برای نانوسیال تیتانیوم دی‌اکسید با غلظت ۰/۰۱ درصد برابر با ۳/۸۱ درصد حاصل شده است. بازده اگزرژی سیال پایه نیز برابر ۲/۶۱ درصد است و با توجه به مطرح نبودن بحث غلظت در سیال پایه، مقدار آن به طور ثابت در نمودار نشان داده شده است. به طور کلی در دماهای نزدیک به محیط، بازده اگزرژی مقدار پایینی دارد زیرا مقدار ترم دوم رابطه‌ی ۹ که اثر منفی در اگزرژی مفید دارد، افزایش می‌یابد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر استفاده از دو نانوسیال متفاوت نانولوله کربنی چند دیواره عامل‌دار-آب و تیتانیوم دی‌اکسید-آب بر روی بازده حرارتی و بازده اگزرژی کلکتور خورشیدی سهموی جذب مستقیم بررسی شده است. هر نانوسیال در ۳ غلظت ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ حجمی آماده شده است تا تاثیر افزایش غلظت نیز بررسی شود. با انجام آنالیزهای مختلف بر روی نانوسیالات و استفاده از آن‌ها در تست محیطی کلکتور خورشیدی جذب مستقیم نتایج ذیل حاصل گردید:

- نانوسیال کربنی به دلیل ساختار و رنگ تیره جذب بالاتری نسبت به نانوسیال تیتانیومی دارد به گونه‌ای که مقادیر تابش طیفی آن به تابش طیفی استاندارد نزدیک‌تر است. با استفاده از نانوسیال

ترکیبی، میزان جذب افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در غلظت‌های بالاتر، میزان عبور نور از نمونه‌ها در طول موج‌های مختلف به صفر می‌رسد.

- نانوسیال حاوی نانولوله کربنی چند دیواره دارای ضریب هدایت حرارتی بالاتری نسبت به نانوسیال حاوی تیتانیوم دی‌اکسید است به طوریکه در دماهای ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتیگراد که مقدار این ضریب برای هر نانوسیال به صورت تجربی اندازه‌گیری شد، تا ۱۱/۹۵ درصد افزایش نسبت به سیال پایه برای نانوسیال کربنی مشاهده گردید. این مقدار، برای نانوسیال تیتانیومی برابر با ۸/۹۶ درصد است. نانوسیال ترکیبی نیز پایداری بیشتر و ضریب هدایت حرارتی بالاتری نسبت به هر دو نانوسیال منفرد دارد و تا مقدار ۲۵/۱۳ درصد افزایش این ضریب نسبت به سیال پایه مشاهده می‌گردد.

- بیشترین اختلاف دمای حاصل شده در تست کلکتور خورشیدی در کمترین دبی (۲۰ لیتر بر ساعت) و دمای ورودی (۲۰ درجه سانتیگراد) حاصل شده است. با توجه به افزایش ضریب هدایت حرارتی و جذب تشعشع نانوسیالات، افزایش غلظت نیز در افزایش اختلاف دمای حاصل شده نقش دارد و بیشترین اختلاف دما در غلظت ۰/۰۵ درصد برای هر ۳ نانوسیال مشاهده می‌گردد. برای سیال پایه در دبی‌های ۲۰، ۶۰ و ۱۰۰ لیتر بر ثانیه، اختلاف دماهای ۱/۵، ۲/۳ و ۵/۶ درجه سانتیگراد ثبت شده است. برای نانوسیال‌های کربنی، تیتانیومی و ترکیبی اختلاف دما به صورت میانگین به میزان ۱۱۹/۵۱، ۷۰/۴۱ و ۱۴۰/۵۶ درصد افزایش پیدا کرده است.

- با افزایش دبی و غلظت نانوسیال و کاهش دمای ورودی کلکتور، بازدهی حرارتی کلکتور افزایش پیدا می‌کند. هر چند این تفاوت بین دمای ورودی ۲۰ و ۳۰ درجه سانتیگراد قابل ملاحظه نیست. در بین نانوسیال‌ها، نانوسیال ترکیبی بیشترین بازدهی و نانوسیال حاوی تیتانیوم دی‌اکسید، کمترین بازدهی را داشتند. در بهترین حالت، بازدهی کلکتور خورشیدی به ۴۸/۷۷ درصد رسید که مربوط به حالتی است که دمای ورودی کلکتور ۲۰ درجه سانتیگراد باشد (اختلاف دمای محیط با ورودی ۱ درجه باشد)، دبی ۱۰۰ لیتر بر ساعت باشد و از نانوسیال ترکیبی با غلظت ۰/۰۵ درصد استفاده شود. در این حالت، بازدهی ۲/۳۲ برابر بازدهی آب مقطر است که نسبت قابل توجهی است. بیشترین مقدار بازده برای نانوسیال کربنی و نانوسیال تیتانیومی به ترتیب برابر با ۴۴/۹۶ و ۳۴/۹۸ درصد حاصل شده است.

- افت فشار نانوسیالات در سیستم پایین است به طوریکه میزان افزایش افت فشار نسبت به سیال پایه در این دبی برای نانوسیالات کربنی، تیتانیومی و ترکیبی به ترتیب برابر با ۱۱/۱۴، ۵/۵۷ و ۱۶/۱۳ درصد حاصل شده است.

- بازده اگزرژی با افزایش غلظت نانوسیال و دمای ورودی، افزایش پیدا می‌کند. بازده اگزرژی در دمای ورودی ۴۰ درجه سانتیگراد و دبی ۱۰۰ لیتر بر ثانیه برای سیال پایه برابر با ۲/۶۱ و برای بیشترین غلظت نانوسیال‌های کربنی، تیتانیومی و ترکیبی (۰/۰۵ درصد) برابر با ۶/۶۸، ۴/۹۸ و ۷/۲۶ درصد حاصل شده است.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ مجله‌ای منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع مالی/ حمایت‌ها: تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

پیوست

نانولوله‌های کربنی چند دیواره عامل‌دار و نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید توسط شرکت نانو مواد کربنی ویرا (VCN Materials) واقع در استان بوشهر، شهر بوشهر، مرکز رشد علم و فناوری خلیج فارس تامین شده‌اند.

منابع

1- Hussain M, Shah SK, Sajjad U, Abbas N, Ali A. Recent developments in optical and thermal performance of direct absorption solar collectors. *Energies*. 2022 Sep 27;15(19):7101.

2- Xiong Q, Altnji S, Tayebi T, Izadi M, Hajjar A, Sundén B, Li LK. A comprehensive review on the application of hybrid nanofluids in solar energy collectors. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021 Oct1;47:101341.

3- Farhana K, Kadirgama K, Rahman MM, Ramasamy D, Noor MM, Najafi G, Samykano M, Mahamude AS. Improvement in the performance of solar collectors with nanofluids—A state-of-the-art review. *Nano-Structures & Nano-Objects*. 2019 Apr 1;18:100276.

4- Khalil A, Amjad M, Noor F, Hussain A, Nawaz S, Filho EP, Du X. Performance analysis of direct absorption-based parabolic trough solar collector using hybrid nanofluids. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020 Nov;42:1-0.

5- Kalogirou SA, Karellas S, Braimakis K, Stanciu C, Badescu V. Exergy analysis of solar thermal collectors and processes. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2016 Sep 1;56:106-37.

6- Sreekumar S, Shah N, Mondol JD, Hewitt N, Chakrabarti S. Broadband absorbing mono, blended and hybrid nanofluids for direct absorption solar collector: A comprehensive review. *Nano Futures*. 2022 May31;6(2):022002.

7- Minardi JE, Chuang HN. Performance of a "black" liquid flat-plate solar collector. *Solar Energy*. 1975 Jul 1;17(3):179-83.

8- Tyagi H, Phelan P, Prasher R. Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid-based direct absorption solarcollector.

9- Otanicar TP, Phelan PE, Prasher RS, Rosengarten G, Taylor RA. Nanofluid-based direct absorption solar collector. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2010May1;2(3).

10- Luo Z, Wang C, Wei W, Xiao G, Ni M. Performance improvement of a nanofluid solar collector based on direct absorption collection (DAC) concepts. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014 Aug1;75:262-71.
11- Vakili M, Hosseinalipour SM, Delfani S, Khosrojerdi SJ. Photothermal properties of graphene nanoplatelets nanofluid for low-temperature direct absorption solar collectors. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016 Aug1;152:187-91.
12- Vakili M, Hosseinalipour SM, Delfani S, Khosrojerdi S, Karami M. Experimental investigation of graphene nanoplatelets nanofluid-based volumetric solar collector for domestic hot water systems. *Solar Energy*. 2016Jun1;131:119-30.
13- Bozorgi M, Karami M, Delfani S. Energy and exergy analysis of direct absorption solar collector by using silver nanofluid. *Modares Mechanical Engineering*. 2018Nov10;18(7):41-9.
14- Struchalin PG, Zhao Y, Balakin BV. Field study of a direct absorption solar collector with eco-friendly nanofluid. *Applied Thermal Engineering*. 2024 Apr 15;243:122652.
15- Valizade M, Heyhat MM, Maerefat M. Experimental comparison of optical properties of nanofluid and metal foam for using in direct absorption solar collectors. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2019 Jun15;195:71-80.
16- Heyhat MM, Valizade M, Abdolahzade S, Maerefat M. Thermal efficiency enhancement of direct absorption parabolic trough solar collector (DAPTSC) by using nanofluid and metal foam. *Energy*. 2020 Feb 1;192:116662.
17- Ram S, Ganesan H, Saini V, Kumar A. Performance assessment of a parabolic trough solar collector using nanofluid and water based on direct absorption. *Renewable Energy*. 2023 Sep 1;214:11-22.
18- Raza SH, Qamar A, Noor F, Riaz F, Usman M, Farooq M, Sultan M, Rehman AU, Shahzadi A, Andresen JM. Experimental analysis of thermal performance of direct absorption parabolic trough collector integrating water based nanofluids for sustainable environment applications. *Case Studies in Thermal Engineering*.2023Sep1;49:103366.
19- Rashid FL, Aljibori HS, Mohammed HI, Ameen A, Ahmad S, Hamida MB, Al-Rubaye AH. Recent advances and developments of the application of hybrid nanofluids in parabolic solar collector energy systems and guidelines for future prospects. *Journal of Engineering Research*. 2024 May 4.
20- Karami M, Pakdel SMH, Delfani S, Akhavan-Behabadi MA, Karami M, Hosseini Pakdel M, et al. Application of Fe3O4/Silica hybrid nanofluid as working fluid of direct absorption solar collector. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(02):37–44.
21- Joseph A, Sreekumar S, Thomas S. Energy and exergy analysis of SiO2/Ag-CuO plasmonic nanofluid on direct absorption parabolic solar collector. *Renewable Energy*. 2020 Dec 1;162:1655-64.
22- Saray JA, Heyhat MM. Modeling of a direct absorption parabolic trough collector based on using nanofluid: 4E assessment and water-energy nexus analysis. *Energy*. 2022 Apr 1;244:123170.
23- Struchalin PG, Kuzmenkov DM, Yunin VS, Wang X, He Y, Balakin BV. Hybrid nanofluid in a direct absorption solar collector: magnetite vs. carbon nanotubes compete for thermal performance. *Energies*. 2022Feb22;15(5):1604.
24- Sreekumar S, Shaji J, Cherian G, Thomas S, Mondol JD, Shah N. Corrosion analysis and performance investigation of hybrid MXene/C-dot nanofluid-based direct absorption solar collector. *Solar Energy*. 2024 Feb1;269:112317.
25- Hachicha AA, Said Z. Numerical modeling and multi-objective optimization of direct absorption solar collectors using mono and hybrid nanofluids. *Journal of Cleaner Production*. 2023 Aug 15;414:137740.
26- Chen W, Zou C, Li X. Application of large-scale prepared MWCNTs nanofluids in solar energy system as volumetric solar absorber. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2019 Sep 15;200:109931.
27- Freitas SS, Silveira V, Jabardo JM, Arce AC. MWCNT and COOH–MWCNT aqueous nanofluids: Thermophysical and rheological characterization. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020 Aug;42:1-22.
28- Wang J, Yang X, Klemeš JJ, Tian K, Ma T, Sunden B. A review on nanofluid stability: preparation and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.2023Dec1;188:113854.
29- Kalogirou S. *Solar Energy Engineering* [Internet]. 2nd ed. Elsevier; 2014 [cited 2023 Nov 4]. p. 142–148.
30- Tagle-Salazar PD, Nigam KD, Rivera-Solorio CI. Parabolic trough solar collectors: A general overview of technology, industrial applications, energy market, modeling, and standards. *Green Processing and Synthesis*.2020Nov23;9(1):595-649.
31- Kalogirou SA, Lloyd S, Ward J, Eleftheriou P. Design and performance characteristics of a parabolic-trough solar-collector system. *Applied Energy*. 1994 Jan 1;47(4):341-54.
32- Heyhat MM, Khattar MZ. On the effect of different placement schemes of metal foam as volumetric absorber on the thermal performance of a direct absorption parabolic trough solar collector. *Energy*. 2023Mar1;266:126428.
33- Mashhadian A, Heyhat MM, Mahian O. Improving environmental performance of a direct absorption parabolic trough collector by using hybrid nanofluids. *Energy Conversion and Management*. 2021 Sep 15;244:114450.
34- Forristall R. Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in engineering equation solver. *National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States)*; 2003 Oct1.
35- Kasaeian A, Daviran S, Tsuji M, Rasoulinejad F, Mahian O, Wongwises S. Performance investigation of parabolic trough solar collector by using nanofluids: An experimental study. *Renewable Energy*. 2016 Nov 1;96:461-70.
36- Zhang H, He Y, Wang P, Xu Y. A comprehensive study on the performance improvement of direct absorption parabolic trough collectors by nanofluids.

Renewable Energy. 2021 Mar 1;164:1117-29.
37- Ali HM, Hussain S, Bashir MA. Recent advancements in hybrid nanofluids for solar collectors: Current status and future research. *Journal of Cleaner Production*.2022Feb20;332:129854.
38- Mashhadian A, Rashidi S, Heyhat MM. Enhancing the thermal performance of direct absorption parabolic trough solar collectors by application of nanofluids and porous medium. *Solar Energy*. 2021 Aug15;224:1324-41.
39- Sulaiman MH, Hussain AN. An assessment on the application of nanofluids on the various designs of solar collectors for improved thermal performance. *International Journal of Energy Research*. 2020 Dec 10;44(12):9924-52.
40- Nematollahi O, Heidarinejad G, Maerefat M. Simulation of a parabolic trough solar collector for direct absorption using nanofluids. *Applied Thermal Engineering*.2022Jun1;208:118153.
41- Bozorgi M, Pakdel SM, Mohammadbeigi F. Comparative energy and exergy analysis of direct absorption solar collectors utilizing different types of nanofluids. *Energy Reports*. 2022 Sep 1;8:7364-78.
42- Bhagat S, Panwar NL, Rathore N. Application of hybrid nanofluid in solar energy system: A review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021 Mar;143:3055-77.
43- Sharafeldin MA, Groenhout N, Hassan N. Experimental investigation of the thermal performance of a parabolic trough receiver with nanofluid as a heat transfer fluid. *Energy Reports*. 2022 Aug1;8:4847-58.
44- Struchalin PG, Yunin VS, Balakin BV. Using eco-friendly nanofluids in direct absorption parabolic trough collectors for thermal energy systems. *Renewable Energy*. 2024 Jan 1;205:857-65.