

## بررسی تجربی عملکرد حرارتی یک نمونه ی آبگرمکن خورشیدی لوله خلاء اصلاح شده به کمک نانوسیالات

مجتبی شفیعی<sup>۱</sup>  
استادپار

امروزه انرژی نقش مهمی در رشد اقتصادی جوامع بشری بازی می کند. در میان انواع انرژی های مصرفی توسط بشر، انرژی خورشید را می توان فراوان ترین دانست. از اینرو طی سال های گذشته انواع سیستم های آبگرمکن خورشیدی ساخته و مورد استفاده قرار گرفته اند. با توجه به قابلیت های چشمگیر نانوسیالات در بهبود فرایندهای انتقال حرارت و افزایش بازدهی حرارتی سیستم های گرمایی، بررسی استفاده از نانوذرات به عنوان جایگزین سیالات متداول در سیستم های مختلف حرارتی به ویژه سیستم های انرژی خورشیدی و همچنین اثر انواع نانوسیال پرکاربرد بر افزایش بازدهی حرارتی کلکتور لوله خلاء خورشیدی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، مهمترین جزء، یعنی راندمان آبگرمکن های خورشیدی و همچنین روند انتقال حرارت با استفاده از سه نوع نانوسیال (با درصد جرمی ۱٪)، مورد بررسی قرار گرفته است. تمامی آزمایشات با رعایت استانداردهای مربوطه (ISO-9806)، و در روزهای آفتابی انجام گرفته اند. بیشترین میزان افزایش انتقال حرارت نانوسیالات و همچنین راندمان حرارتی سیستم مربوط به ساعات ظهر (ظهر شرعی) است که در این میان، بالاترین راندمان مربوط به نانوسیال اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$  nanofluid)، با ۳/۴۶٪ افزایش نسبت به سیال پایه (سیال روغن) می باشد. راندمان حرارتی سیستم با نانوسیال اکسید تیتانیوم ( $TiO_2$  nanofluid) و نانوسیال اکسید کربن ( $C$  nanofluid) و همچنین سیال پایه (Oil fluid) به ترتیب ۲/۵۴٪ و ۲/۱۲٪ و ۱/۶٪ را نشان می دهند. با توجه به شدت افزایش ظرفیت حرارتی نانوسیال های مورد استفاده قرار گرفته، می توان ظرفیت حرارتی را عاملی مهم در افزایش راندمان آبگرمکن های خورشیدی لوله خلاء دانست.

امیر فریه<sup>۲</sup>  
کارشناسی ارشد

واژه های راهنما: انرژی خورشیدی، کلکتورهای لوله خلاء خورشیدی، راندمان حرارتی آبگرمکن، نانوسیالات

### ۱- مقدمه

از بحران های اساسی پیش روی بشر امروز می توان به آلودگی محیط زیست و کاهش منابع انرژی فسیلی اشاره کرد. متخصصین بر این باورند که استفاده از انرژی های نو و به طور همزمان می تواند هردوی این بحران ها را مهار نماید [۲،۱].

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران shafiee@jsu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران amir\_farbeh67@yahoo.com

بی‌شک انرژی خورشید در بین انرژی‌های نو و تجدیدپذیر به‌علت در دسترس بودن، همخوانی با سیستم‌های انرژی کنونی و نامحدود بودن میزان انرژی نسبت به سایر دیگر منابع از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. به دو روش می‌توان از انرژی خورشیدی استفاده کرد: بهره‌گیری از نور آن [۳،۷] و استفاده از حرارت آن [۸، ۹]. در بین روش‌های استفاده از انرژی خورشید، استفاده از گرمایش خورشید در تأمین انرژی لازم برای آب گرم مصرفی از کاربردی‌ترین این روش‌هاست. اصلی‌ترین بخش آبگرمکن‌های خورشیدی کلکتور آن است، که معمولاً به دو صورت صفحه تخت [۱۰] و لوله خلاء [۱۱] موجود می‌باشد. در این بین کلکتورهای لوله خلاء به‌علت راندمان بالاتر، استفاده بیشتری دارد. این کلکتورها به دلیل ساختار لوله‌ای شکل خود این قابلیت را دارند که در طول روز به شکل غیر فعال مسیر خورشید را دنبال کنند [۱۲]. جیمز و همکاران [۱۳]، کارایی کلکتورهای مختلف را تحت شرایط پایا بررسی کردند. آن‌ها آزمایش‌های مختلفی در این زمینه انجام دادند و داده‌های مفیدی جهت رده‌بندی کلکتورها بدست آوردند. آن‌ها برای دسته‌ای از سیالات مانند هوا و آب عملکرد حرارتی را با اندازه‌گیری انرژی ورودی و خروجی سیال بررسی کردند. به‌عنوان مثال در اواخر سال ۲۰۱۲ میزان آبگرمکن‌های مورد استفاده در کشور چین حدود ۲۵۷ میلیون متر مربع گزارش شده که حدود ۹۰ درصد آن‌ها آبگرمکن لوله خلاء بوده‌اند [۱۴]. ژانگ و همکاران [۱۵] عملکرد بیش از ۱۰۰۰ آبگرمکن خورشیدی لوله خلاء را بر طبق استانداردهای کشور چین ارزیابی کردند. آن‌ها دریافتند که عملکرد حرارتی کلکتور متأثر از تلفات حرارتی تانک و ظرفیت کلکتور می‌باشد. آن‌ها نسبت بهینه‌ی حجم مخزن به سطح کلکتور را بین ۷۲-۵۷ لیتر بر متر مربع گزارش دادند، که در این صورت راندمان کلکتور حدود ۴۹-۵۷ درصد است. در میان کاربردهای متفاوت نانو سیالات، استفاده آن‌ها در انرژی‌های تجدیدپذیر به‌خصوص در انرژی خورشیدی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. نانو سیالات عموماً ظرفیت حرارتی پایین‌تری نسبت به سیالات متداول دارند، بنابراین، استفاده از نانو سیالات در آبگرمکن‌های خورشیدی به‌عنوان اصلی‌ترین جزء آبگرمکن، موجب بالا رفتن دمای سیال انتقال حرارت می‌شود که همین امر یعنی دمای بالاتر خروجی سیال برای بسیاری از کاربردها به ویژه سیستم‌های گرمایشی ساختمان‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. نانو سیالات، سوسپانسیونی از نانوذرات جامد هستند که از مخلوط کردن نانوذرات در مایعات مختلفی مانند آب، روغن‌های حرارتی و یا اتیلن گلیکول ساخته می‌شوند و در عین پایداری بیشتر و افزایش کمتر افت فشار در مقایسه با سوسپانسیون‌های معمولی، خواص انتقال حرارت بهتری دارند. چوی [۱۶]، در سال ۱۹۹۵ برای نخستین بار ایده استفاده از نانو سیالات در سیستم‌های انتقال حرارت را مطرح کرد. یکی از مهمترین موضوعات در بحث نانو سیالات، پایداری مخلوط ایجاد شده است زیرا از یک سو به دلیل اختلاف دانسیته، نانوذرات تمایل به ته‌نشینی دارند و از سوی دیگر به دلیل وجود نیروی جاذبه واندروالس بین ذرات، تمایل ذرات برای بهم پیوستن و در نتیجه، تشکیل توده ذرات نیز زیاد است. این پدیده‌ها هر یک به نوبه خود موجب عدم پایداری سوسپانسیون خواهند شد. این موضوع در طی سالیان اخیر به‌عنوان یکی از مهمترین موضوعات مورد بحث در زمینه نانو سیالات مطرح شده است که خواص و کاربرد نانو سیالات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌عنوان مثال، پدیده تشکیل توده نانوذرات با ایجاد نواحی خالی از ذرات نانو در سیال پایه و در نتیجه با کاهش سطح موثر انتقال حرارت، موجب کاهش خواص انتقال حرارتی نانو سیال می‌شود. بنابراین در این مسیر، مطالعه و تحلیل عوامل موثر بر پایداری نانو سیالات امری

<sup>2</sup> Steady state

الزامی است. در دهه‌ی گذشته، بسیاری از محققان به ارزیابی تاثیرات نانوسیالات بر بهبود انتقال حرارت در سیستم‌های گرمایی مختلف پرداخته‌اند [۱۷]. نانوسیال‌سازی یکی دیگر از تکنیک‌های غیر فعال افزایش انتقال حرارت می‌باشد که توجه بسیاری از محققان را در دو دهه‌ی اخیر به خود جلب کرده است. نانوسیال شامل یک مخلوط پراکنده‌ی جامد-مایع پایدار از ذرات نانو (کوچک تر از ۱۰۰ نانومتر) در یک سیال پایه مرسوم هم چون آب، اتیلن گلیکول، روغن و غیره می‌باشد. با معلق کردن ذرات نانو، عملکرد حرارتی سیال به‌طور محسوسی بدون اینکه در سیستم افت فشار قابل ملاحظه‌ای ایجاد شود، افزایش می‌یابد. دلایل اصلی این بهبود عبارتند از [۱۸]:

- ۱- با توجه به نقش سطوح نانوذرات در انتقال حرارت، سطح جانبی نسبی بسیار بزرگ نانوذرات باعث افزایش شدید انتقال حرارت توسط این ذرات داخل سیال می‌شود.
- ۲- نانو ذرات معلق شده، هدایت حرارتی مؤثر سیال را افزایش می‌دهند.
- ۳- برهم‌کنش و برخورد بین ذرات نانو، سیال و سطح جامد بیش تر می‌شود.
- ۴- نوسان و تلاطم سیال با حضور ذرات نانو تشدید می‌شود.
- ۵- پراکندگی ذرات نانو باعث پخش شدن گرادیان دما در تمام سیال می‌شود. در نتیجه ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی کاهش و طول توسعه یافتگی افزایش می‌یابد.

مقایسه‌های انجام شده میان نانوسیالات، با دیگر ابعاد ذرات معلق در سیال پایه، مانند ابعاد میکرونی و میلیمتری نشان از این دارد که نانوسیالات دارای پایداری و هدایت حرارتی بسیار بیشتری هستند [۱۹]. در سالهای اخیر، تحقیقات بسیاری بر تاثیر نانوسیال، بر افزایش میزان انتقال گرما در تجهیزات گرمایی، اعم از تئوری و آزمایشگاهی انجام گردیده است. محققان روش‌های متنوع و مختلفی را برای محاسبه‌ی مشخصات ترموفیزیکی نانوسیال مانند بالا بردن هدایت گرمایی، لزجت، چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و دیگر مشخصات بکار برده‌اند [۲۰]. نکته‌ی مهم دیگری که باید در استفاده از نانوسیالات به آن توجه نمود، هزینه‌ی نسبتاً بالای نانوذرات می‌باشد. بنابراین، کمترین غلظت نانوذرات ممکن در نانوسیال که نسبتاً بالاترین میزان هدایت حرارتی را ایجاد نماید، باید برای ترکیب نمودن در نانوسیال مورد استفاده قرار گیرد تا نانوسیالی با هدایت حرارتی بالا و ضریب هدایت حرارتی مناسبی ایجاد شود [۲۱]. این نکته به این دلیل حایز اهمیت است که نانوسیالات با غلظت نانوذرات کمتر دارای پایداری بالاتر نیز می‌باشند. با توجه به اینکه تمامی تحقیقات و مطالعات انجام شده بر اساس آبگرمکن‌های خورشیدی صفحه تخت و یا مخزن ترموسیفون تحت خلاء مطابق شکل (۱)، بوده است و منابع قابل توجهی برای کمک به این تحقیق وجود نداشت، از این رو، این پژوهش برای اولین بار با ساختار جدید یک آبگرمکن خورشیدی لوله خلاء در جهت بهبود این سیستم و بالا بردن راندمان و همچنین استفاده از نانوسیالات در این سیستم انجام گرفته است. یکی از علل طراحی و ساخت این دستگاه بدان جهت حائز اهمیت می‌باشد که با توجه به کیفیت آب مصرفی هر منطقه و استفاده مداوم از آب گرم شده توسط کلکتور لوله خلاء در آب‌گرم‌کن‌های ساخته شده، به تدریج جداره‌ی داخلی این نوع کلکتور که وظیفه‌ی جذب انرژی خورشید را بر عهده دارد دچار پدیده‌ی شوره زدگی شده و این امر باعث کاهش شدید جذب نور خورشید توسط جاذب کلکتور می‌شود که عملاً کارایی آن پس از مدتی از بین خواهد برد. با تغییرات اساسی و طراحی جدید، هیچ‌گونه سیالی در محفظه‌ی داخلی کلکتور لوله خلاء جریان پیدا نمی‌کند و مشکل ذکر شده به‌طور

کامل برطرف می‌شود. بنابراین نوآوری این طرح در استفاده از نانو سیالات و نانو ذرات برای بهبود هرچه بهتر عملکرد سیستم با استفاده از کلکتورهای لوله خلاء می باشد.

## ۲- معرفی و شرح سیستم

سیستم آزمایشی مورد مطالعه، همانطور که در شکل (۱)، طراحی شده است، به منظور بررسی تجربی روند انتقال حرارت در سیال واسط (نانوسیال) و مخزن دستگاہ و در نهایت محاسبه‌ی راندمان کلی سیستم آبگرمکن خورشیدی لوله خلاء به کمک نانوسیالات، ساخته شده است (شکل ۳). این دستگاہ برای اولین بار در کشور طراحی، ساخته و راه اندازی شده است و نمونه‌ی داخلی مشابهی ندارد. دستگاہ به صورت یک سیستم بسته است که شامل قسمت‌های زیر می‌باشد:

- مخزن ذخیره‌ی سیال عامل (آب).
- پمپ، جهت به گردش در آوردن سیال انتقال حرارت در سیستم.
- این پمپ از نوع "چرخ دنده /یی" می باشد که برای سیال روغن با دمای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد، و همچنین مورد استفاده در صنایع خودرو سازی نیز می‌باشد. در این سیستم از یک الکتروموتور AC به صورت کوپل با پمپ، به عنوان محرک این سیستم استفاده شده است.
- مبدل حرارتی و لوله‌های ارتباطی، جهت انتقال حرارت جذب شده از کلکتورها.
- کلکتورهای لوله خلاء، برای جذب بهتر انرژی خورشید نسبت به کلکتورهای صفحه تخت و تبدیل به حرارت در جهت گرم کردن لوله‌های ارتباطی و در نهایت مبدل حرارتی (شکل ۲)،  $D_1=48$  و  $D_2=56$  و  $L=180$  میلی‌متر.

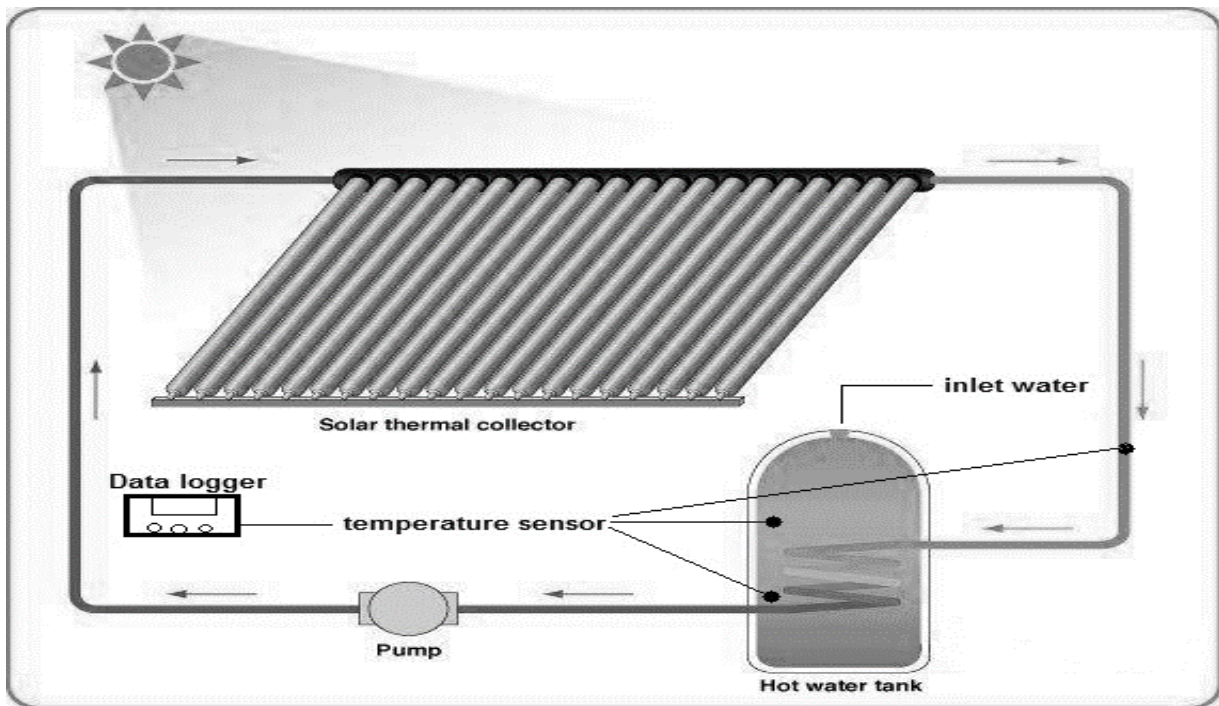
عایق بندی، جهت به حداقل رساندن اتلاف حرارتی. حجم مخزن در حدود ۳۰ لیتر می‌باشد و با توجه به مطالعات قبلی و با تکیه بر آزمایش‌ها و تحقیقات قبلی انتخاب شده است. در اکثر اقدامات قبلی به ازای هر لوله خلاء حجمی حدود ۷ لیتر به عنوان مخزن در نظر گرفته شده است [۲۲]. بنابراین، در این آزمایش نیز که با ۴ لوله انجام می‌پذیرد از مخزن ۳۰ لیتری استفاده شده است. دستگاہ بر روی یک سازه‌ی فلزی با زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به افق و در راستای جنوب نصب شده است. سنسورهایی که در مخزن و سطح لوله‌های ارتباطی سیال انتقال حرارت نصب شده اند، میانگین دمای مخزن و همچنین سیال را اندازه‌گیری می‌کنند.

از حسگرهای نوع (One-wire DS-18B20) که ضد آب هستند استفاده شده است. این حسگرها بر اساس مقدار دمایی که احساس می‌کنند، یک پالس دیجیتال به دستگاہ مرکزی ارسال می‌کنند. دستگاہ مرکزی، این پالسها را به عدد که همان دما است تبدیل می‌کند و بر صفحه نمایشگر نشان می‌دهد. دیگر اطلاعات مربوط به حسگرها در جدول (۱) ذکر شده اند. خاطر نشان می‌شود که دمای سنسورهای دما توسط دیتالاگر<sup>۱</sup> مطابق شکل (۴)، در طول یک روز و در طول یک ساعت و در هر ۵ دقیقه ثبت می‌شود. همچنین برداشت اطلاعات در تیر ماه و در شهر اهواز با طول جغرافیایی  $48^\circ$  و عرض جغرافیایی  $31/31^\circ$  صورت گرفته است. جهت تعیین میزان تابش دریافتی لوله‌های خلاء از یک وسیله‌ی اندازه‌گیری تابش خورشید مطابق شکل (۵)، استفاده شده است. به عنوان نمونه نتایج اندازه‌گیری تابش برای ساعات ۱۱:۰۰ تا ۱۳:۰۰ مطابق شکل (۶) می‌باشد.

<sup>1</sup> Data logger

جدول ۱- مشخصات حسگرهای دمایی مورد استفاده

One-wire DS-18B20	نوع
۳	تعداد
-۵۰	حداقل دمای اندازه گیری (°C)
+۱۵۰	حداکثر دمای اندازه گیری (°C)
۰/۰۱	دقت اندازه گیری (°C)



شکل ۱- شماتیک و طرح اولیه سیستم آبگرمکن خورشیدی با کلکتور لوله خلاء

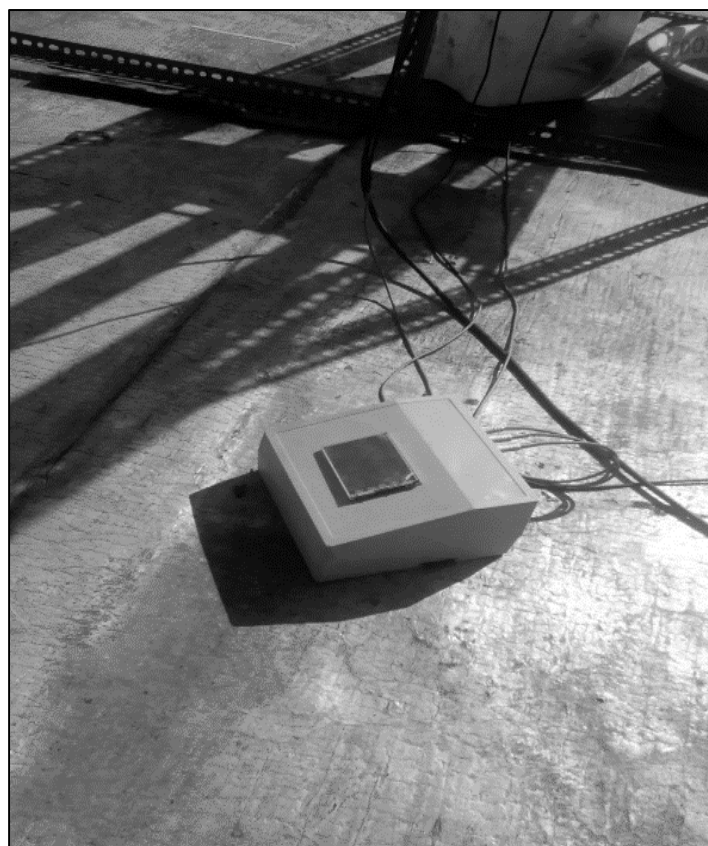


شکل ۲- تصویر کلکتور خورشیدی از نوع لوله خلاء<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> U pipe



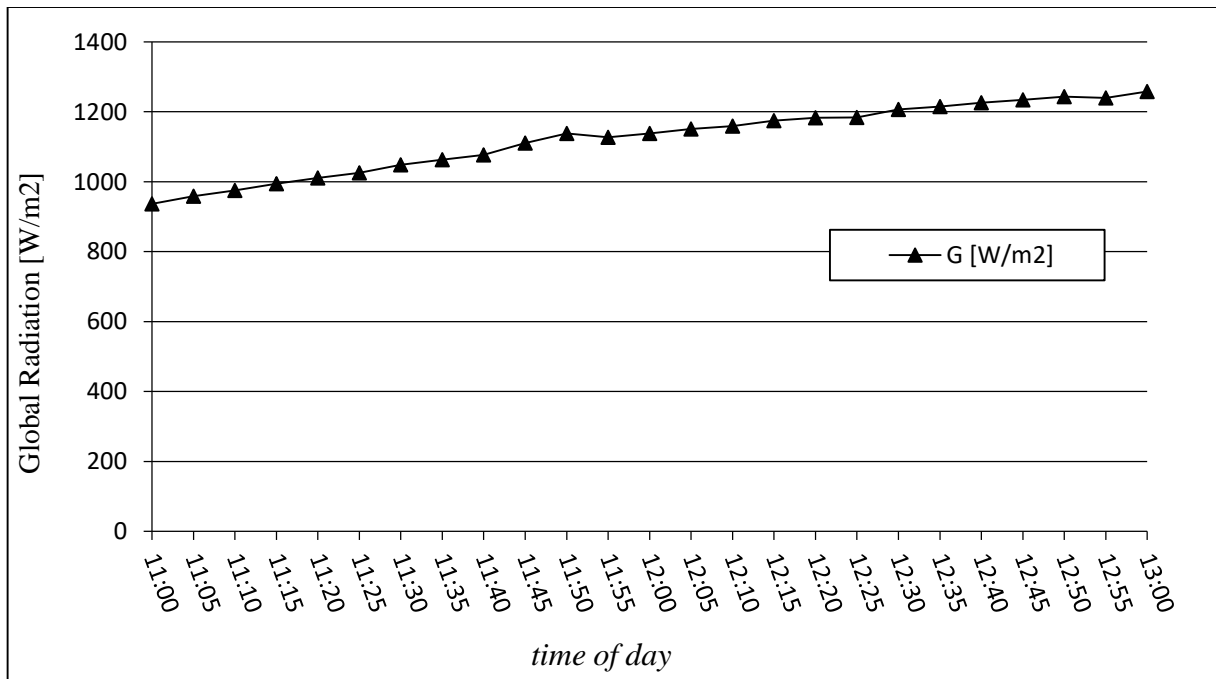
شکل ۳- تصویر دستگاه ساخته شده



شکل ۴- تصویر Data logger



شکل ۵- تصویر تابش سنج<sup>۱</sup>



شکل ۶- میزان تشعشع در تیر ماه (ژوئن ۲۰۲۰)، برای نقاط داده برداری شده در بازه ی زمانی ۲ ساعت (مدت زمان آزمایش)

<sup>1</sup> Measuring instruments

### ۳- روش انجام آزمایش

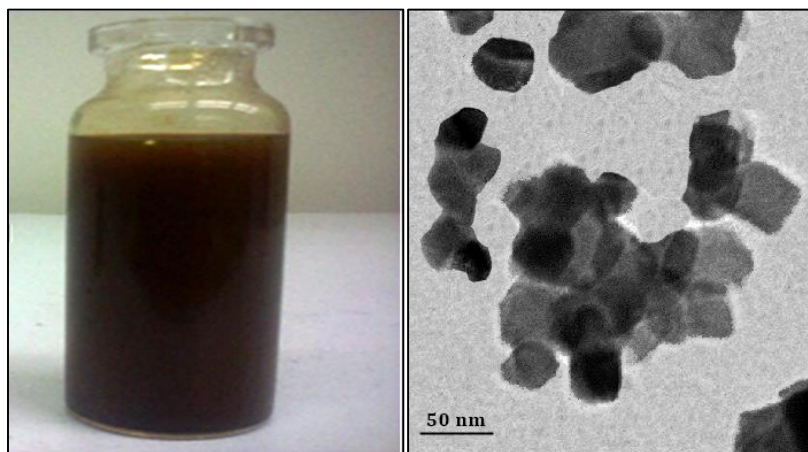
#### ۳-۱- انتخاب نانومواد

این مواد که در زبان انگلیسی، بنام نانوسیال (nanofluid) شناخته می‌شوند، به نوع جدیدی از سیال انتقال حرارت که شامل مقدار کمی از نانوذرات فلزی یا غیرفلزی است، اطلاق شد. این ذرات به صورت همگن و پایدار در فاز پیوسته‌ای پراکنده می‌شوند. انواع نانومواد: نانوذرات مورد استفاده در نانوسیالات از مواد مختلفی ساخته می‌شوند، مانند: اکسیدهای سرامیکی ( $\text{CuO}$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )، اکسیدهای نیتربیدی ( $\text{SiN}$  و  $\text{AlN}$ )، سرامیک‌های کاربیدی ( $\text{TiC}$  و  $\text{SiC}$ )، فلزات ( $\text{Cu}$ ،  $\text{Ag}$ ،  $\text{Au}$ )، نیمه رساناها ( $\text{TiO}_2$  و  $\text{SiC}$ )، ترکیبات کربنی (نانولوله‌های کربنی، الماس و گرافیت) و مواد کامپوزیتی مثل نانوذرات آلیاژی  $\text{Al}_{70}\text{Cu}_{30}$ .

جدول (۲) برخی خواص ترموفیزیکی نانومواد انتخاب شده را نشان می‌دهد. برای بدست آوردن هریک از نقاط داده، دمای آب مخزن را تنظیم کرده و با استفاده از سنسورهای دما که در مخزن کار گذاشته شده است، باید از یکنواختی و ثابت بودن دمای آب کل مخزن اطمینان حاصل نمود. سپس با استفاده از نانوسیال اکسید کربن ( $C$  nanofluid)، نانوسیال اکسید تیتانیم ( $\text{TiO}_2$  nanofluid)، نانوسیال اکسید آلومینیوم ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluid) و اضافه کردن آنها به روغن موتور با ویسکوزیته پایین (با حجم ۲ لیتر) و در هر مرحله و با استفاده از روش های ارائه شده [۲۶]، محلول سیال انتقال حرارت را وارد مدار دستگاه کرد و پس از هوا گیری دستگاه، سیستم آماده به کار خواهد بود. شکل (۷) محلول نانوسیال تهیه شده و شکل (۸) نانوذرات آلومینیوم را به عنوان نمونه و نشان می‌دهد.

#### جدول ۲- برخی خواص ترموفیزیکی نانومواد

نانوماده	C	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$
هدایت حرارتی [۲۳] ( $\text{w/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ )	۸/۵۱۷	۲۲/۵	۲۰۴
نقطه ذوب [۲۴] ( $^\circ\text{C}$ )	۳۵۲۷	۱۶۶۸	۶۶۰/۳
چگالی [۲۵] ( $\text{kg/m}^3$ )	۲/۲۶۷	۴/۵۰۶	۲/۷۰۷
گرمای نهان ذوب [۲۴] ( $\text{kJ/kg}$ )	۷۱۵	۴۲۵	۲۹۳



شکل ۸- نانوذرات آلومینیوم  $\text{Al}_2\text{O}_3$  شکل ۷- نمونه محلول نانوسیال (کربن) تهیه شده



آنچه که در تغییرات دمای آب مخزن مهم است این نکته است که با توجه به زمان محدود حضور خورشید در آسمان، تا حد امکان بتوان آب مخزن را در دماهای متفاوتی قرار داد تا به این ترتیب نقاط مورد نیاز به دست آیند. همچنین با توجه به اتلاف حرارت از بدنه مخزن در دماهای بالا، امکان گرمایش آب بیش از ۸۰ درجه سلسیوس عملاً غیر ممکن بوده است. شایان ذکر است، تمامی آزمایشات در تیر ماه و در بازه زمانی ۲ ساعته بین ۱۱:۰۰ تا ۱۳:۰۰ در روز کاملاً آفتابی با رعایت استانداردهای ذکر شده انجام شده است. در صورتی که دمای آب مخزن را برای نقطه اول در حد مینیمم ممکن (در این تحقیق ۲۵ درجه سلسیوس) قرار داده باشیم، با روند افزایش دمای کلکتور لوله خلاء، سیال انتقال حرارت که از خاصیت نانو بهره می گیرد، آب مخزن گرم شده و می توان به نقطه بعدی دمایی رسید.

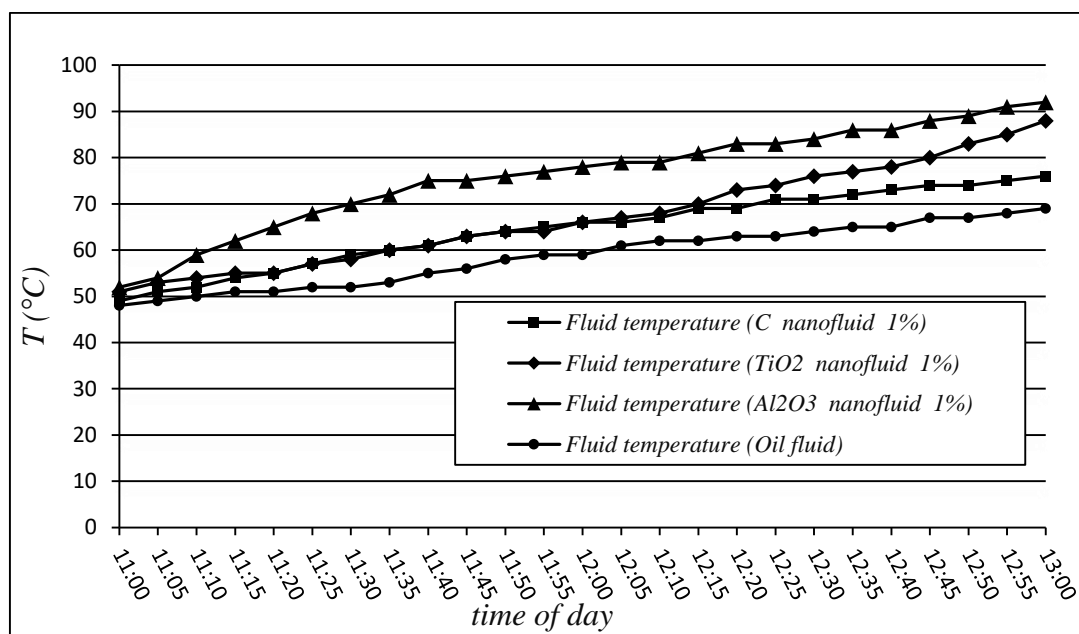
#### ۴- بحث و نتایج

##### ۴-۱- بررسی اثر پارامترهای نانوسیالات

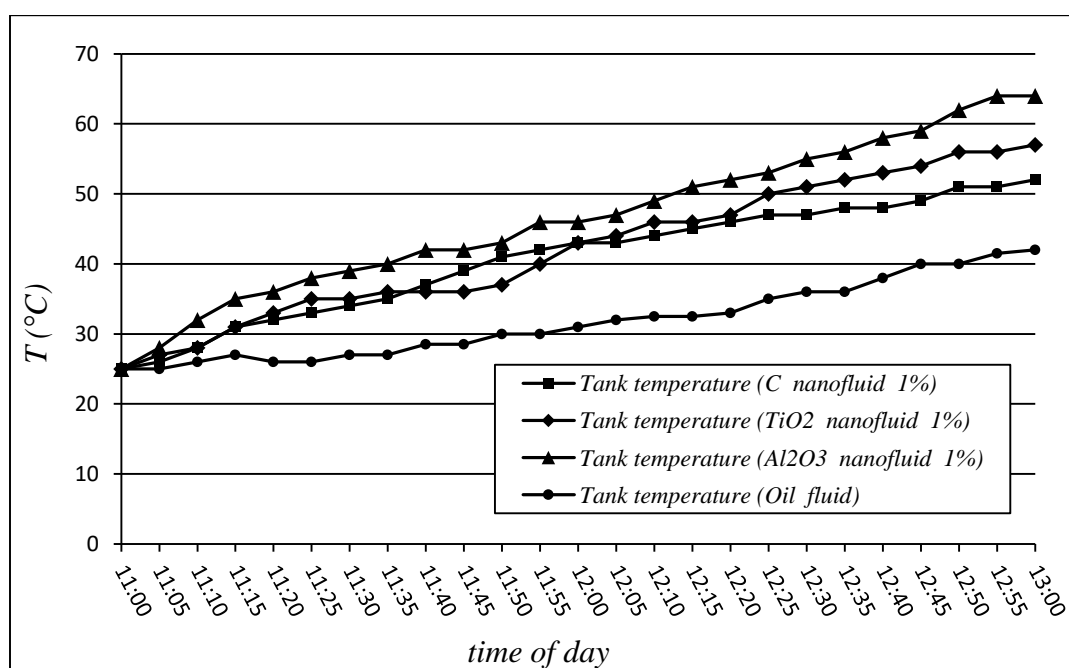
در طول این آزمایش دمای آب مخزن در هر مرحله حدود ۱ الی ۳ درجه تغییر داشته است تا به تعدادی نقطه داده برای رسم نمودار بازده دست پیدا کنیم. تغییرات دمای متوسط سیال انتقال حرارت، تحت تابش خورشید برای هر نوع نانوسیال، در مدت ۲ ساعت ثبت و در شکل (۹) نشان داده شده است. همان طور که از نمودارها پیداست در ازای دریافت تابش یکسان برای هر لوله، دمای متوسط سیال انتقال حرارت با نرخ بیشتری افزایش می یابد. با توجه به زمان تست انجام شده و بررسی دمای سیال انتقال حرارت توسط سنسور حرارتی، و همچنین با توجه به شکل (۶) بررسی افزایش میزان تشعشع مقدار انرژی دریافتی از خورشید بیشتر شده و مقدار افزایش می یابد. با مقایسه مقادیر حاصل از چهار نمودار ارائه شده در این بخش می توان دریافت که در حالتی که از نانوسیال اکسید کربن (*C nanofluid*)، مطابق شکل (۹) استفاده شود، کمترین مقدار انرژی جذب شده و دمای سیال انتقال حرارت کاهش می یابد. این نتیجه گیری، با نتایج تحقیقاتی که اخیراً در زمینه ی پتانسیل حرارتی نانوذرات اکسید کربن منتشر شده است، کاملاً در تطابق است [۲۷، ۲۸]. در مقالات مذکور، نشان داده شده است که استفاده از نانوذرات اکسید کربن در آب، تاثیر قابل توجهی بر افزایش ضریب انتقال حرارت آن ندارد. همان طور که مشاهده می شود با استفاده از دو نوع نانوسیال دیگر، روند افزایش دمای سیال انتقال حرارت افزایش می یابد. البته در این حالت، افزایش حرارت تقریباً یکسان بنظر می رسد که در شکل (۹) مقایسه ی نشان داده شده این تفاوت را بخوبی نشان می دهد.

در مورد روند تغییرات آب درون مخزن با شدت تابش های مختلف در بازه زمانی آزمایش (۲ ساعته) اینگونه میتوان بیان کرد که با بالا رفتن شدت تابش، دمای سیال انتقال حرارت بالا رفته و این حرارت به آب درون مخزن انتقال پیدا کرده و افزایش می یابد. در این تحلیل تغییرات دمای آب درون مخزن مورد بررسی قرار گرفته است، آنچه که به وضوح از شکل (۱۰) پیداست، حاکی از این است که تغییرات دمای آب درون مخزن با استفاده از سیال انتقال حرارت نانوالومینیوم بیشتر از نانوسیال های مورد آزمایش بوده است. همچنین از شکل (۱۰) می توان نتیجه گرفت که، با توجه به این که با افزایش انرژی دریافتی یک کلکتور در طی مدت زمان آزمایش بر میزان انتقال حرارت سیال واسطه تاثیر گذار خواهد بود لذا میزان اتلاف حرارتی از مخزن در

طی این فرایند اجتناب پذیر است. روند افزایش دمای مخزن با توجه به داده‌ای تجربی نشان دهنده تاثیر مستقیم نانوسیال بر افزایش و روند انتقال حرارت مخزن خواهد بود. بنابراین با افزایش میزان انرژی دریافتی توسط کلکتور خورشیدی، دمای سیال انتقال حرارت بالا رفته و این امر موجب بالا رفتن دمای مخزن می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۰)، نمایش داده شده‌است، روند افزایش دمای مخزن با محلول نانوسیال مورد آزمایش تغییر کرده و به مرور زمان انجام آزمایش افزایش می‌یابد.



شکل ۹- مقایسه نمودارهای روند تغییرات حرارتی در نانوسیال انتقال حرارت



شکل ۱۰- مقایسه نمودارهای روند تغییرات حرارتی در مخزن به کمک نانوسیالات

#### ۴-۱- محاسبه ی راندمان

دو روش متفاوت برای محاسبه ی راندمان در آبگرمکن های خورشیدی لوله خلا وجود دارد: روش حالت پایا و شبه مکانیکی [۲۹]. در روش نخست دمای محیط، تابش خورشید، و خواص فیزیکی آب ثابت فرض می شوند [۱۲]. در استانداردهای مربوط به کلکتورهای خورشیدی (ISO- 9806) [۳۰]، شرط تعیین راندمان، پایداری و اندازه گیری دمای ورودی و خروجی در بازه های زمانی حداقل ۱۵ دقیقه ای می باشد. بطور کلی، عملکرد گرمایی یک آبگرمکن خورشیدی لوله خلاء از رابطه زیر محاسبه می گردد [۱۸]، [۳۱]:

$$\eta_{(theo)} \% = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{A_c G} \quad (1)$$

در این رابطه،  $\dot{m}$  نرخ جریان جرمی آبگرمکن درون مخزن (از طریق ورودی و خروجی مخزن)،  $C_p$  ظرفیت حرارتی سیال عامل.

$\Delta T$ ؛ میانگین افزایش دمای سیال مخزن.

$A_c$ ؛ سطح جاذب لوله ای و  $G$ ؛ برابر متوسط تابش روزانه خورشید برای شهر اهواز است.

اما برای سیستم های بسته  $\dot{m} = 0$  است، پس در این حالت از  $m$  (tank) (جرم سیال درون مخزن) به جای  $\dot{m}$  استفاده می شود:

$$\eta_{(exp)} \% = \frac{m_{tank} \times C_p \times \Delta T}{time \times A_c \times \bar{G}} \quad (2)$$

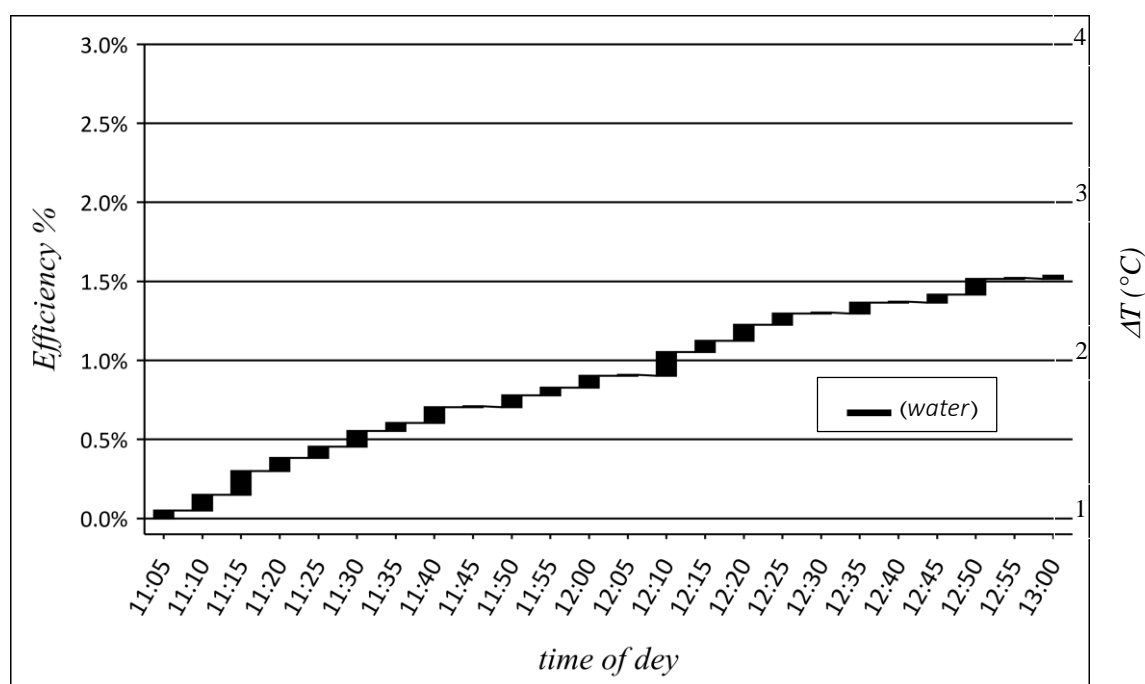
در این رابطه  $\Delta T$  بیانگر میزان افزایش دمای متوسط سیال درون مخزن،  $\bar{G}$  بیانگر میزان متوسط تابش روزانه (دقیقه ای) خورشید به ازای هر لوله و  $time$  بیانگر زمان انجام آزمایش است. راندمان سیستم با شدت تشعشع در بازه های زمانی ۵ دقیقه ای طبق نمودار شکل (۶) محاسبه شده است. به منظور اطمینان از شرایط یکنواختی انتقال حرارت در داخل سیستم، از روغن و نانو سیال به عنوان سیال انتقال حرارت در آبگرمکن خورشیدی به صورت تجربی استفاده شد. هنگامی که محلول روغن و نانوسیال اکسید کربن ( $C_{nanofluid}$ )، به عنوان سیال انتقال حرارت در آبگرمکن خورشیدی استفاده شد، بازده آب گرم کن با کاهش همراه بود و هنگامی که از نانوسیال اکسید آلومینیوم ( $AL_2O_3 \text{ nanofluid}$ ) استفاده شد راندمان حرارتی سیستم افزایش یافته ولی در ادامه آزمایش روند کاهشی نسبت به نانوسیال اکسید تیتانیوم ( $TiO_2 \text{ nanofluid}$ ) پدیدار شد. نتایج در شکل های (۱۱) الی (۱۴) قابل مشاهده می باشد.

#### ۵- آنالیز عدم قطعیت

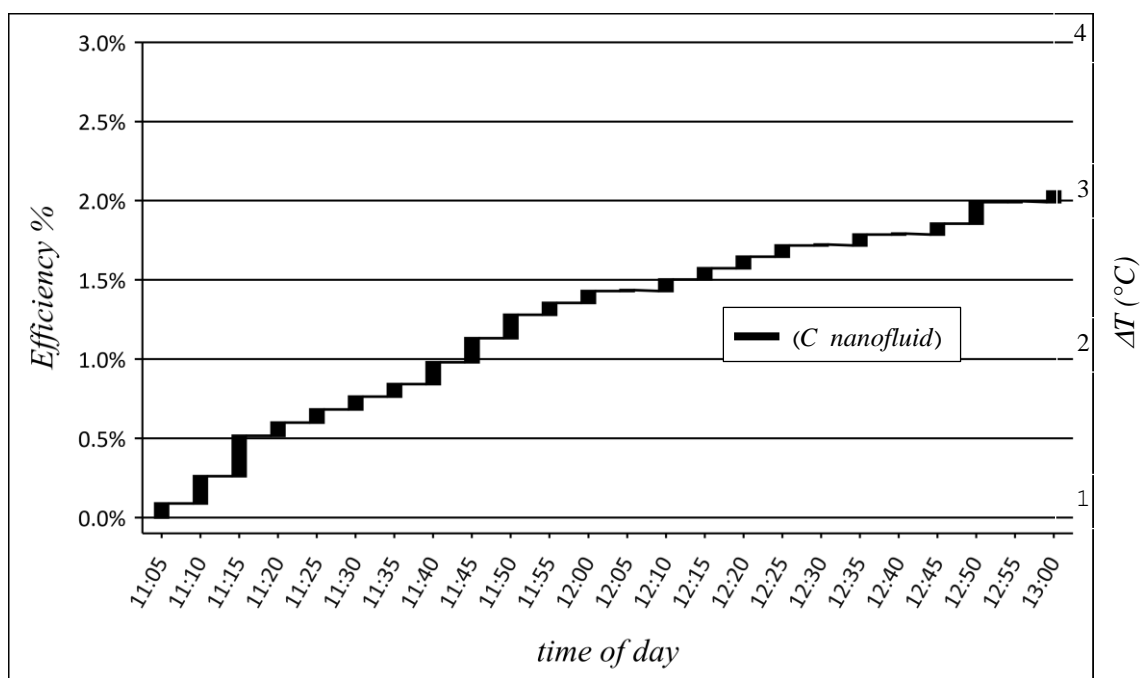
قبل از شروع انجام آزمایش، به منظور رفع خطاهای سیستمایک، کالیبراسیون دما و حسگرهای برقی، آنالیز عدم قطعیت انجام شده است [۳۲]. اگر  $R$ ، تابعی از پارامترهای خطی مستقل به عنوان  $R = R(\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_3)$  باشد، عدم قطعیت برای تابع  $R$ ، می تواند بدین شکل بیان شود [۳۳]:

$$\delta R = \sqrt{\left(\frac{\delta R}{\delta \nu_1} \delta \nu_1\right)^2 + \left(\frac{\delta R}{\delta \nu_2} \delta \nu_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta R}{\delta \nu_n} \delta \nu_n\right)^2} \quad (3)$$

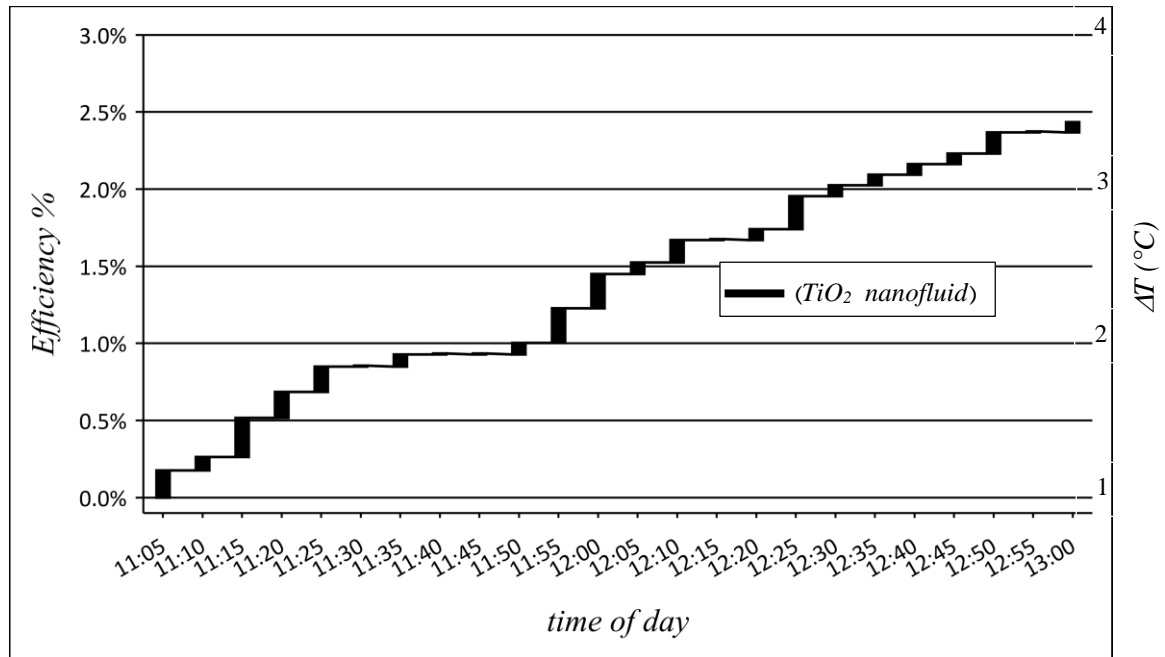
که در آن  $\delta R$ ، عدم قطعیت از تابع  $R$ ، و  $\delta v_i$  عدم قطعیت از پارامتر  $v_i$  و  $\frac{\delta R}{\delta v_i}$  مشتقات جزئی  $R$  با توجه به پارامتر  $v_i$  می‌باشد. بر این اساس، حداکثر مقدار برای عدم قطعیت پارامترها به کمتر ۴/۳٪ محاسبه شد. علاوه بر این، به منظور اثبات تکرارپذیری آزمایش‌ها، و برای اطمینان از تکرار آزمایشات، هر آمایش سه بار تکرار شد و نتایج در تطابق قابل قبول با یکدیگر بود که این مقدار برای آزمایش‌های مهندسی، مقداری قابل قبول محسوب می‌شود.



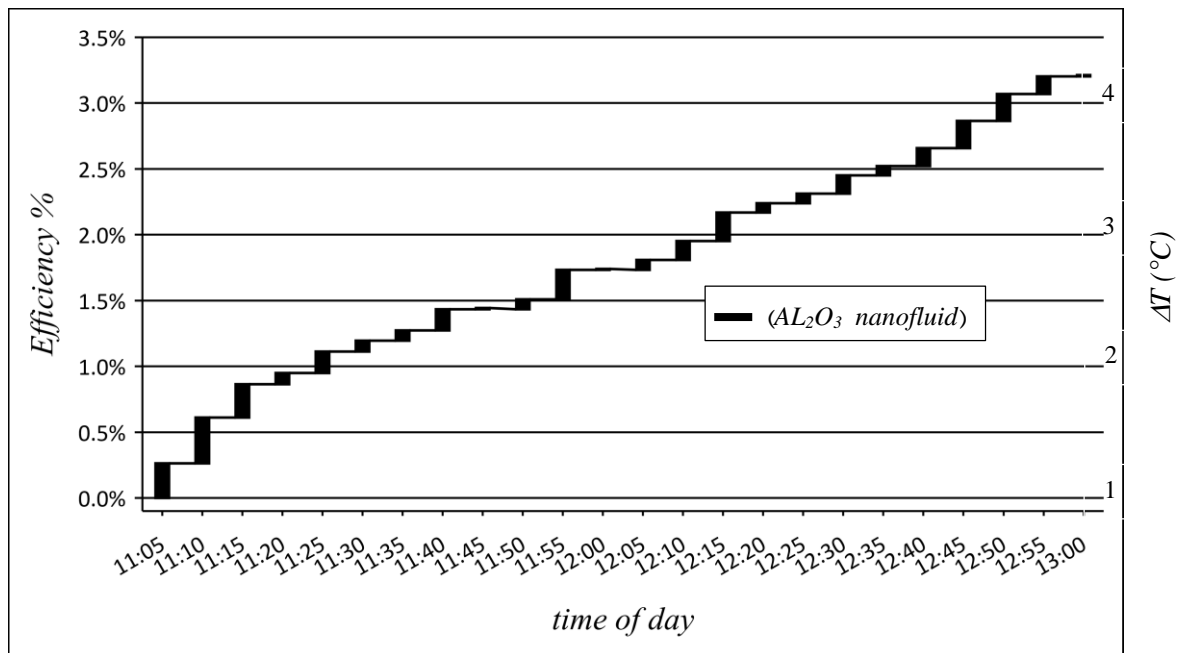
شکل ۱۱- نمودار روند اثر تغییرات حرارتی (سیال پایه، روغن) بر راندمان آبگرمکن خورشیدی لوله خلاء



شکل ۱۲- نمودار روند اثر تغییرات حرارتی نانوسیال اکسید کربن (C nanofluid) بر راندمان آبگرمکن خورشیدی لوله خلاء



شکل ۱۳- نمودار روند اثر تغییرات حرارتی نانوسیال اکسید تیتانیم (TiO<sub>2</sub> nanofluid) بر راندمان آبگرمکن خورشیدی لوله خلاء



شکل ۱۴- نمودار روند اثر تغییرات حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیوم (AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid) بر راندمان آبگرمکن خورشیدی لوله خلاء

## ۶- نتیجه گیری

لازم به توضیح است که در این پژوهش سعی شد پارامترهایی که اثر محسوس تری بر روی راندمان و انرژی دریافتی کلکتور می گذارند بررسی شوند. مهمترین فعالیت های انجام گرفته و نتایج حاصل از آزمون را می توان به صورت زیر نام برد:

- ۱- با گذشت زمان به دلیل این که میزان جذب تشعشع توسط کلکتورها افزایش می‌یابد، دمای سیال مخزن نیز به تدریج افزایش یافته، در نتیجه انرژی کسب شده بیشتر خواهد بود و در ظهر خورشیدی که بیشترین مقدار تشعشع را داریم این مقدار به حداکثر خود خواهد رسید.
- ۲- برای دستیابی به حداکثر بازده ممکن برای یک آبگرمکن خورشیدی لوله خلاء، حتی الامکان باید دمای آب ورودی به مخزن به دمای هوای محیط نزدیک باشد، چرا که با افزایش دمای آب ورودی، بازده کاهش می‌یابد.
- ۳- با توجه به این که کلکتور لوله خلاء می‌تواند در حالت ۴۵ یا ۱۸۰ درجه بر روی سیستم نصب شود، در این بازه و در هر دو حالت انرژی حرارتی توسط کلکتور دریافت خواهد شد زیرا تابش همیشه بصورت عمود بر لوله خواهد بود.
- ۴- نتایج به دست آمده نشان از پتانسیل نانو سیالات در افزایش عملکرد سیال انتقال حرارت و افزایش راندمان آبگرمکن‌ها را دارند. همچنین با مقایسه سه نوع نانوسیال اکسید کربن (*C nanofluid*)، نانوسیال اکسید آلومینیوم (*AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid*) و نانوسیال اکسید تیتانیوم (*TiO<sub>2</sub> nanofluid*)، مشخص گردید که نانوسیال اکسید آلومینیوم (*AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid*) توانایی بهتری در بهبود عملکرد سیال انتقال حرارت و همچنین راندمان آبگرمکن خورشیدی لوله خلاء دارد اما پایدار نخواهد بود.
- ۵- از هر سه نوع نانو سیال یاد شده به عنوان سیال انتقال حرارت از کلکتور خورشیدی به مخزن بصورت تجربی استفاده شد. هنگامی که محلول نانوسیال اکسید آلومینیوم (*AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid*) در روغن موتور (۲ لیتر)، بعنوان سیال انتقال حرارت در آبگرمکن استفاده شد، روند انتقال حرارت در آبگرمکن افزایش یافت اما در ادامه‌ی آزمایش مشاهده گردید که روند افزایش انتقال حرارت کاهش یافته و نزدیک به تاثیر نانوسیال اکسید آلومینیوم (*TiO<sub>2</sub> nanofluid*) شده است. که این نشان از پایداری بیشتر نانوسیال اکسید تیتانیوم را دارد. همچنین این روند در هنگام استفاده از نانوسیال اکسید کربن (*C nanofluid*) با کاهش انتقال حرارت همراه بود، در نتیجه نوع نانوسیال انتقال حرارت بر روند دریافت انرژی حرارتی از خورشید موثر می‌باشد.
- ۶- نانوسیالات مورد استفاده در این سیستم برای بالا بردن راندمان، با روندی افزایشی اختلاف دما در طول روز و با نزدیک شدن به ظهر شرعی تاثیر گذارتر بوده اند. از این میان نانوسیال اکسید آلومینیوم (*AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid*) بیشترین تاثیر را در جهت بالا بردن راندمان داشته، و پس از آن نانوسیال اکسید تیتانیوم (*TiO<sub>2</sub> nanofluid*) تاثیر بالاتری نسبت به نانوسیال اکسید کربن (*C nanofluid*) می‌گذارد. به عبارتی هرچه روند اختلاف دما بیشتر شود راندمان سیستم بالاتر خواهد رفت.
- ۷- اگرچه نانوسیال اکسید کربن (*C nanofluid*) با توجه به ضریب هدایت حرارتی نسبتاً ضعیف، مورد توجه واقع نمی‌شود، اما می‌تواند بعنوان نانوسیالی برای افزایش راندمان کلکتورهای خورشیدی و همچنین آبگرمکن‌های خورشیدی در نظر گرفته شود.
- ۸- با توجه به شرایط ویژه کلکتورهای لوله خلاء برای این سیستم هیچ گونه محدودیتی وجود نداشته و میتوان آن را در هر شرایط آب و هوایی استفاده کرد.
- ۹- بیشترین و کمترین اختلاف دمایی در نانوسیال بکار برده شده با سیال روغن در بررسی انتقال حرارت در مخزن دستگاه به ترتیب، ۲۲ C° مربوط به نانوسیال اکسید آلومینیوم (*AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid*) و ۱۰ C° مربوط به نانوسیال اکسید کربن (*C nanofluid*) بوده است.
- ۱۰- بیشترین و کمترین اختلاف دمایی در نانوسیال بکار برده شده با سیال روغن در بررسی انتقال حرارت در نانوسیال دستگاه به ترتیب، ۲۳ C° مربوط به نانوسیال اکسید آلومینیوم (*AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid*) و ۷ C° مربوط به نانوسیال اکسید کربن (*C nanofluid*) بوده است.

## مراجع

- [1] Shiravi, A.H., and Firoozzadeh, M., "Environmental Impacts of Commissioning Eqlid 10MW Photovoltaic Power Plant in Fars Province, Iran", International Conference on Renewable Energy and Distributed Generation (ICREDG 2019), June 7-9, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, (2019).
- [2] Firoozzadeh, M., and Shiravi, A.H., "Environmental Effects of 61.2 MW Siahpoush Wind Farm in Qazvin Province, Iran", In: International Conference on Renewable Energy and Distributed Generation (ICREDG), June 7-9, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, (2019).
- [3] Saffarian, M.R., Moravej, M., and Doranehgard, M.H., "Heat Transfer Enhancement in a Flat Plate Solar Collector with Different Flow Path Shapes using Nanofluid", Journal of Renewable Energy, Vol. 146, pp. 2316-2329, (2020).
- [4] Firoozzadeh, M., Shiravi, A.H, and Shafiee, M., "An Experimental Study on Cooling the Photovoltaic Modules by Fins to Improve Power Generation: Economic Assessment", Iranian (Iranica) Journal of Energy and Environment, Vol. 10(2), pp. 80-84, (2019).
- [5] Soltani, S., Kasaeian, A., Sokhansefat, T., and Shafii, M.B., "Performance Investigation of a Hybrid Photovoltaic/Thermoelectric System Integrated with Parabolic trough Collector", Journal of Energy Conversion and Management, Vol. 159, pp. 371-380, (2018).
- [6] Firoozzadeh, M., Shiravi, A.H., and Shafiee, M., "Different Methods of using Phase Change Materials (PCMs) as Coolant of Photovoltaic Modules: A Review", Journal of Energy Management and Technology, Vol. 4(3), pp. 30-36, (2020).
- [7] Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H., and Behzadmehr, A., "Exergetic Optimization of a Solar Photovoltaic Thermal (PV/T) Air Collector", International Journal of Energy Research, Vol. 35(9), pp. 813-827, (2011).
- [8] Rashidi, S., Javadi, P., and Esfahani, J.A., "Second Law of Thermodynamics Analysis for Nanofluid Turbulent Flow Inside a Solar Heater with the Ribbed Absorber Plate", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 135(1), pp. 551-563, (2019).
- [9] Bazri, S., Badruddin, I.A., Naghavi, M.S., Seng, O.K., and Wongwises, S., "An Analytical and Comparative Study of the Charging and Discharging Processes in a Latent Heat Thermal Storage Tank for Solar Water Heater System", Journal of Solar Energy, Vol. 185, pp. 424-438, (2019).
- [10] Sakhaei, S.A., and Valipour, M.S., "Investigation on the Effect of Different Coated Absorber Plates on the Thermal Efficiency of the Flat-plate Solar Collector", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 140, pp. 1-14, (2019).
- [11] Gholipour, S., Afrand, M., and Kalbasi, R., "Improving the Efficiency of Vacuum Tube Collectors using New Absorbent Tubes Arrangement: Introducing Helical Coil and Spiral Tube Adsorbent Tubes", Journal of Renewable Energy, Vol. 151, pp. 772-781, (2020).

- [12] Sabiha, M., Saidur, R., Mekhilef, S., and Mahian, O., "Progress and Latest Developments of Evacuated Tube Solar Collectors", *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 51, pp. 1038-1054, (2015).
- [13] Hill, J.E., and Streed, E.R., "A Method of Testing for Rating Solar Collectors Based on Thermal Performance", *Journal of Solar Energy*, Vol. 18(5), pp. 421-429, (1976).
- [14] Zhentao, L., Zhichen, H., and Guangming, X., "Development Report for Chinese Solar Thermal Industry", *Journal of Solar Energy*, Vol. 98(8), pp. 7-10, (2012).
- [15] Zhang, X., You, S., Xu, W., Wang, M., He, T., and Zheng, X., "Experimental Investigation of the Higher Coefficient of Thermal Performance for Water-in-glass Evacuated Tube Solar Water Heaters in China", *Journal of Energy Conversion and Management*, Vol. 78, pp. 386-392, (2014).
- [16] Choi, S.U., and Eastman, J.A., "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles", *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, November 12-17, San Francisco, CA., (1995).
- [17] Yousefi, T., Veysi, F., Shojaeizadeh, E., and Zinadini, S., "An Experimental Investigation on the Effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  Nanofluid on the Efficiency of Flat-plate Solar Collectors", *Journal of Renewable Energy*, Vol. 39(1), pp. 293-298, (2012).
- [18] Murshed, S.M.S., Leong, K.C., and Yang, C., "Enhanced Thermal Conductivity of  $\text{TiO}_2$ -water Based Nanofluids", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 44(4), pp. 367-373, (2005).
- [19] Li, Y., Tung, S., Schneider, E., and Xi, S., "A Review on Development of Nanofluid Preparation and Characterization", *Journal of Powder Technology*, Vol. 196(2), pp. 89-101, (2009).
- [20] Vajjha, R.S., and Das, D.K., "A Review and Analysis on Influence of Temperature and Concentration of Nanofluids on Thermophysical Properties, Heat Transfer and Pumping Power", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55(15-16), pp. 4063-4078, (2012).
- [21] Saidur, R., Leong, K., and Mohammad, H., "A Review on Applications and Challenges of Nanofluids", *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15(3), pp. 1646-1668, (2011).
- [22] Budihardjo, I., Morrison, G.L., and Behnia, M., "Natural Circulation Flow through Water-in-glass Evacuated Tube Solar Collectors", *Journal of Solar Energy*, Vol. 81(12), pp. 1460-1472, (2007).
- [23] Jwo, C.S., Teng, T.P., Chang, H., Tsung, T.T., Liao, C.Y., and Lin, C.H., "Preparation and UV Characterization of  $\text{TiO}_2$  Nanoparticles Synthesized by SANSS", *Journal of Reviews on Advanced Materials Science*, Vol. 10(3), pp. 283-288, (2005).



- [24] Kaye, G.W.C., and Laby, T.H., "*Tables of Physical and Chemical Constants and Some Mathematical Functions*", Fourth Edition, Longmans, Green and Co., 39 Paternoster Row, London, pp. 2, (1921).
- [25] Young, H.D., and Freedman, R.A., "*University Physics with Modern Physics*", Fourteenth Edition, Pearson Education Inc., Publishing as Pearson Addison-Wesley with Modern Physics, England, (2008).
- [26] Corcione, M., "Empirical Correlating Equations for Predicting the Effective Thermal Conductivity and Dynamic Viscosity of Nanofluids", *Journal of Energy Conversion and Management*, Vol. 52(1), pp. 789-793, (2011).
- [27] Firoozzadeh, M., Shiravi, A.H., and Shafiee, M., "Experimental Study on Photovoltaic Cooling System Integrated with Carbon Nano Fluid", *Journal of Solar Energy Research*, Vol. 3(4), pp. 287-292, (2018).
- [28] Shiravi, A.H., Firoozzadeh, M., Bostani, H., Shafiee, M., and Bozorgmehrian, M., "Experimental Study on Carbon Nanofluid Pressure Drop and Pumping Power", *Journal of Advances in Nanochemistry*, Vol. 2(1), pp. 27-31, (2020).
- [29] Xu, L., Wang, Z., Yuan, G., Li, X., and Ruan, Y., "A New Dynamic Test Method for Thermal Performance of All-glass Evacuated Solar Air Collectors", *Journal of Solar Energy*, Vol. 86(5), pp. 1222-1231, (2012).
- [30] Sallaberry, F., Pujol-Nadal, R., de Jalón, A.G., and Martínez-Moll, V., "Towards a Standard Testing Methodology for Medium-temperature Solar Collectors with Variable Geometry", *Journal of Energy Procedia*, Vol. 57, pp. 2904-2913, (2014).
- [31] Yekta, A., Veysi, F., and Shojaeizadeh, E., "The Effect of Tube Aspect Ratio on the Efficiency of Water in Glass Evacuated Tube Solar Water Heaters", *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, Vol. 4(8), pp. 26-39, (2015).
- [32] Moradi, R., Saffarian, M.R., and Behbahani-Nejad, M., "Experimental Study of an Air Humidity Absorption Cycle Based on the MHI", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 139, pp. 3613-3621, (2020).
- [33] Hosseinzadeh, M., Sardarabadi, M., and Passandideh-Fard, M., "Energy and Exergy Analysis of Nanofluid Based Photovoltaic Thermal System Integrated with Phase Change Material", *Journal of Energy*, Vol. 147, pp. 636-647, (2018).

### فهرست نمادهای انگلیسی

$A_c$	مساحت کلکتور ( $m^2$ )
$G$	تشعشع کلی خورشیدی روی سطح ( $W/m^2$ )
$\eta$	بازده حرارتی (%)

$C_p$	ظرفیت ویژه گرمایی ( $J/kg \text{ } ^\circ C$ )
$\dot{m}$	دبی جرمی - نرخ انتقال جرم ( $kg/s$ )
$D_1$	قطر داخلی کلکتور لوله خلاء ( $mm$ )
$D_2$	قطر خارجی کلکتور لوله خلاء ( $mm$ )
$L$	طول کلکتور لوله خلاء ( $mm$ )
$\Delta T$	تغییرات دما (درجه سلسیوس)
$G_{SC}$	ثابت خورشیدی ( $W/m^2$ )
$I$	تابش خارج از جو ( $W/m^2$ )

## Abstract

Today, energy plays an important role in the economic growth of human societies. Among the types of energy consumed by humans, solar energy can be considered the most abundant. Therefore, over the years, various types of solar water heating systems have been developed and used. Considering the remarkable capabilities of nanofluids in improving heat transfer processes and increasing the thermal efficiency of heating systems, the use of nanoparticles as a substitute for conventional fluids in various heating systems, especially solar energy systems, as well as the effect of widely used nanofluids So much attention has been paid to increasing the thermal efficiency of the solar vacuum tube collector. In this research, the most important component, namely the efficiency of solar water heaters and also the heat transfer process using three types of nanofluid (with mass percentage 1%), has been investigated. All tests were performed in accordance with the relevant standards (ISO-9806), on sunny days. The highest increase in heat transfer of nanofluids and also the thermal efficiency of the system is related to noon (religious noon), among which, the highest efficiency is related to aluminum oxide nanofluid ( $Al_2O_3$  nanofluid), with a 3.46% increase compared to the base fluid (Oil fluid) is. The thermal efficiency of the system with titanium oxide nanofluid ( $TiO_2$  nanofluid) and carbon oxide nanofluid (C nanofluid) as well as the base fluid (oil fluid) show 2.54%, 2.12% and 1.6%, respectively. Due to the increase in heat capacity of the nanofluids used, the heat capacity can be considered an important factor in increasing the efficiency of vacuum tube solar water heaters.