

اثر نانوسیال‌های مختلف با خواص تابع دما بر راندمان گرمایی دریافت کننده خورشیدی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، s.karimi6485@yahoo.com
 استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، torabi@sku.ac.ir
 استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، ghasemi@eng.sku.ac.ir
 استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، raisi@sku.ac.ir

سمانه کریمی
امیر ترابی
بهزاد قاسمی*
افراسیاب ریسی

چکیده

دریافت کننده‌های حفره‌ای معمول‌ترین هندسه‌ها در متمرکزکننده‌های دیش خورشیدی به منظور دستیابی به عملکرد گرمایی بالا هستند. در پژوهش حاضر، به منظور طراحی بهینه دریافت کننده خورشیدی، جهت افزایش دمای سیال خروجی، متغیرهای قطر و گام نوع خاصی از دریافت کننده، سرعت و نوع سیال و رژیم جریان بررسی شده است. مناسبترین ابعاد دریافت کننده و رینولدز جریان، به ازای پارامترهایی است که منجر به بالاترین دمای خروجی سیال گردد. در این بررسی یک متمرکز کننده کروی با دریافت کننده حفره ای کروی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که مناسبترین قطر لوله دریافت کننده و گام مربوط به آن به ترتیب ۵ میلی‌متر و ۱۷ حلقه است. بیشترین دمای سیال خروجی در رینولدز ۲۰۰ و رژیم جریان لایه ای بدست می‌آید. در این بررسی همچنین دمای سیال خروجی با سیال کار روغن و نانوسیال روغن با نانو ذره در روزهای مختلف سال با یکدیگر مقایسه شده است. از روغن ترمینول با خواص تابع دما استفاده شده است. نانوذرات مس، اکسید مس و آلومینا در درصد های حجمی صفر تا ۵ درصد به روغن اضافه و دمای خروجی نانو سیال محاسبه شده است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که با افزودن نانوذره به روغن، دمای سیال خروجی افزایش خواهد یافت. مناسبترین نانوذره، مس با غلظت ۵ درصد است که باعث افزایش ۱۱۸ کلوین دمای سیال خروجی می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: انرژی خورشیدی، متمرکز کننده کروی، دریافت کننده حفره ای، دریافت کننده کروی، جریان لایه ای، نانوسیال.

The effect of different nanofluids with temperature dependent properties on the thermal efficiency of the solar receiver

S. Karimi
A. Torabi
B. Ghasemi
A. Reisi

faculty of engineering, Shahrekord university, Shahrekord, Iran
 faculty of engineering, Shahrekord university, Shahrekord, Iran
 faculty of engineering, Shahrekord university, Shahrekord, Iran
 faculty of engineering, Shahrekord university, Shahrekord, Iran

Abstract

Cavity receivers are the most common design in solar dish concentrators in order to achieve high thermal performance. In the current research, in order to design the solar receiver optimally to increase the output fluid temperature, the variables of diameter and pitch of a specific type of receiver, fluid type and velocity and the flow regime have been investigated. The most suitable dimensions of the receiver and flow Reynolds are according to the parameters that lead to the highest fluid outlet temperature. In this study, a spherical concentrator with a spherical cavity receiver is considered. The results show, the most suitable diameter of the receiver tube and its corresponding pitch is 5 mm and 17 rings, the maximum temperature of the outlet fluid is obtained at Reynolds 200 and slow flow regime. Also, the temperature of the outlet fluid with the working fluid of oil and nanofluid oil with nanoparticles have been compared with each other on different days of the year. Therminol with temperature function properties has been used. Nanoparticles of copper, copper oxide and alumina in volume percentages of 0 to 5 % have been added to the oil and the temperature of the nanofluid outlet has been calculated. The results of this comparison show that by adding nanoparticles to the oil, the temperature of the output fluid will increase. The most suitable nanoparticle is copper with a concentration of 5%, which leads to an increase in the temperature of the output fluid by 118 Kelvin degrees.

Keywords: Solar energy, spherical concentrator, cavity receiver, spherical receiver, laminar flow, nanofluid.

کاهش عواقب مضر است که معمولاً با تولید انرژی مبتنی بر سوخت فسیلی همراه است. خورشید قابل توجه ترین منبع انرژی در جهان است.

زمین ۱۷۰ تریلیون کیلووات انرژی خورشیدی دریافت می‌کند. حدود ۳۰٪ از این انرژی به فضا منعکس شده و کمتر از نیمی از آن به انرژی گرمایی با دمای پایین تبدیل می‌شود. بخشی از آن برای چرخه

۱- مقدمه

تقاضای جهانی برای انرژی در حال افزایش است و پیامدهای زیانبار افزایش انتشار گازهای گلخانه ای، گرمایش جهانی و تخریب محیط زیست چالش های بزرگی را در این زمینه ایجاد می‌کند. انرژی خورشیدی یک منبع انرژی تجدیدپذیر پاک و قابل دوام با پتانسیل

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: ghasemi@sku.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۹

تبخیر / بارندگی در زیست کره و کمتر از ۰/۵٪ در انرژی جنبشی باد، امواج و فتوسنتز گیاهان استفاده می‌شود [۱]. انرژی خورشیدی پتانسیل بسیار بالایی برای قرار گرفتن در سید انرژی کشور ایران دارد، چرا که شدت تابش در ایران در سطح نسبی بالایی قرار دارد. یکی از مهمترین چالش‌ها مدیریت صحیح منابع و امکان سنجی استفاده از این انرژی ارزشمند است [۲]. دو مشکل اساسی مرتبط با سیستم های تبدیل انرژی گرمایی خورشیدی معمولی وجود دارد. اولین مشکل رفتار دریافت کننده ها در ارتباط با جذب حداکثری انرژی تابشی خورشید و دومین چالش رسانایی گرمایی پایین سیالات انتقال گرما است. از این رو، علاوه بر نیاز ضروری جهت بهبود ابعاد و موقعیت دریافت کننده جهت جذب حداکثری انرژی تابشی خورشیدی، بهبود خواص گرمایی سیال ناقل گرما نیز ضروری است. از آنجایی که نانوسیالات در مقایسه با سیالات کاری معمول، خواص جذب گرما و انتقال گرما بسیار بیشتری دارند، انتظار می‌رود دریافت کننده های داخلی با هندسه و ابعاد بهبود یافته با ترکیب نانوسیال، فرصتی برای دستیابی به بهبودهای قابل توجه در عملکرد گرمایی را فراهم کنند. سیستم‌های متمرکزکننده خورشیدی از امیدوار کننده ترین فن‌آوری‌های خورشیدی هستند. متمرکز کننده بشقابی، یک متمرکزکننده نقطه‌ای است که اشعه تابش خورشید را در نقطه کانونی خود متمرکز می‌کند. این گردآورنده دارای دو محور برای دنبال کردن خورشید است. انرژی خورشیدی در یک دریافت کننده که در نقطه کانونی بشقاب قرار گرفته است، متمرکز می‌شود [۳]. دریافت کننده‌های خورشیدی نوع خاصی از مبادله کن های گرمایی هستند که انرژی تابش خورشیدی را به انرژی گرمایی تبدیل می‌نمایند. از این رو می توان مهمترین بخش سامانه‌های خورشیدی را، دریافت کننده در نظر گرفت. دریافت کننده انرژی خورشیدی را جذب نموده و آن را به صورت انرژی گرمایی به یک سیال در حال گردش انتقال می دهد. انرژی گرمایی حاصل می تواند به یک موتور گرمایی مانند موتور استرلینگ داده شود و با کمک ژنراتور تولید انرژی الکتریکی نماید و یا از انرژی گرمایی آن در مصارف گرمایی دیگر استفاده نمود. دریافت کننده ها بر اساس نوع طراحی، به دو دسته دریافت کننده‌های خارجی و دریافت کننده‌های حفره ای تقسیم بندی می‌شوند. در دریافت کننده های حفره ای، عناصر جذب کننده گرما داخل یک محفظه واقع می‌شود. دهانه این محفظه در نقطه کانونی واقع شده و نور وارد دریافت کننده می‌شود. پس از ورود نور به داخل محفظه، بخشی از آن در مرحله اول جذب سطوح جذب کننده شده و بخشی دیگر که بازتاب می‌شود به خاطر ساختار محفظه، نور تقریباً اجازه خروج از آن را نخواهد داشت و نور پس از بازتاب های چند باره بالاخره جذب سطوح جاذب خواهد شد. در واقع دریافت کننده های حفره‌ای همانند یک جسم سیاه عمل خواهند کرد. این گیرنده‌ها معمولاً در قسمت جلویی پوشش ندارند و سعی می‌کنند با گرفتن پرتوهای خورشیدی در حفره، به بازده نوری بالایی دست پیدا کنند [۴]. داشتن یک ساختار مناسب برای گیرنده های حفره ای موجب می‌گردد این نوع گیرنده ها از بازتاب‌های ثانویه داخل حفره استفاده کنند تا جذب موثر گیرنده افزایش یابد. گرد آورنده بشقابی، یک متمرکزکننده خورشیدی است که تابش خورشید را در نقطه کانونی گردآورنده متمرکز کرده و انرژی متمرکز شده خورشید وارد دریافت کننده می‌شود. این سیستم به دلیل اینکه دائماً خورشید را دنبال می

کند، می‌تواند دارای بازده گرمایی بالایی باشد. متمرکزکننده و دریافت کننده می‌توانند به صورت مستقل یا جزئی از یک سیستم تولید توان بزرگتر باشند. با قرار دادن موتور استرلینگ در محل دریافت کننده امکان تولید توان در ظرفیت های مختلف (معمولاً ظرفیت های پایین) وجود دارد [۵]. همچنین امکان تلفیق این سیستم با سیکل های هیدرو لیکی نیز وجود دارد [۶]. بلوس و همکاران [۷] در یک پژوهش به منظور انتخاب بهترین هندسه دریافت کننده راندمان گرمایی اشکال استوانه‌ای، مستطیلی، کروی، مخروطی و استوانه‌ای مخروطی را محاسبه و با یکدیگر مقایسه کردند، نتایج این تحقیق نشان داد که بهترین هندسه دریافت کننده در شرایط مورد بررسی هندسه استوانه‌ای مخروطی و نامناسب‌ترین هندسه از نظر راندمان گرمایی مربوط به هندسه مستطیلی است. در پژوهش دیگر لونی و همکاران [۸] جهت انتخاب بهترین هندسه دریافت کننده، عملکرد گرمایی حفره های مکعبی، استوانه ای و نیم کره را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که موثرترین حفره ها در برابر دریافت انرژی خورشیدی به ترتیب دریافت کننده های مکعبی، نیم کره ای و در نهایت استوانه-ای است. کوپالاکریشناسوامی و ناتاراجان [۹] با مقایسه عملکرد هندسه های مخروطی و استوانه ای دریافت کننده به این نتیجه رسیدند که دریافت کننده با هندسه مخروطی در مقایسه با دریافت کننده با هندسه استوانه ای عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. نتایج بررسی های پیشین بیانگر این واقعیت است که بهترین هندسه دریافت کننده ها از نظر میزان جذب تابش در شرایط مختلف، متفاوت است. ماهیان و همکاران [۱۰] به ارزیابی گزارشی از کاربرد این مواد در سیستم‌های مهندسی گرمایی خورشیدی و مروری بر اثرات نانوسیالات بر عملکرد گردآورنده‌های خورشیدی و آبرگرمکن های خورشیدی از دیدگاه ملاحظات کارایی، اقتصادی و زیست محیطی پرداختند. یاگی و همکاران [۱۱] تغییرات مربوط به کارایی گردآورنده را به عنوان تابعی از کسر حجمی ذرات (از ۰/۱٪ تا ۵٪) محاسبه کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با افزودن نانوذرات به سیال عامل، برای مقادیر کم کسر حجمی نانوذرات راندمان به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. برای کسرهای حجمی بالاتر از ۲ درصد، بازده تقریباً ثابت می ماند، بنابراین افزودن نانوذرات بیشتر سودمند نیست. اوتانیکار و همکاران [۱۲] اثرات نانوسیال‌های مختلف (نانولوله‌های کربنی، گرافیت و نقره) را به صورت تجربی و عددی بر عملکرد گردآورنده خورشیدی جذب مستقیم در مقیاس کوچک بررسی کردند. راندمان گردآورنده در درصدهای حجمی نانوذرات بین ۰/۱ تا ۰/۵ افزایش می‌یابد ولی بین درصدهای ۰/۶ تا ۱ روند افزایش راندمان گردآورنده بسیار کند است. تیلور و همکاران [۱۳] یک سیستم گرمایی خورشیدی متمرکز مبتنی بر نانوسیال را با یک سیستم معمولی مقایسه کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که استفاده از یک نانوسیال در دریافت کننده می‌تواند کارایی را تا ۱۰ درصد بهبود بخشد. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که برای نیروگاه‌های ۱۰-۱۰۰ مگاواتی، استفاده از نانوسیال گرافیت/ترمیمول با کسر حجمی تقریباً ۰/۱٪ و کمتر می‌تواند مفید باشد. نویسندگان تخمین زدند که ترکیب یک نانوسیال در یک برج انرژی گرمایی خورشیدی با ظرفیت ۱۰۰ مگاوات که در شهرهای توسان و آریزونا کار می‌کند، می‌تواند سالانه ۳/۵ میلیون دلار صرفه اقتصادی در پی داشته باشد. لی و همکاران [۱۴] اثر سه نانوسیال مختلف، آلومینا - آب، اکسید روی -

مورد آزمایش قرار دادند. این آزمایش شامل گردآورنده خورشیدی صفحه تخت با سیال واسطه نانوسیال آب-آهن بوده و ماده خشک شونده، سبزی نعنا و زمان آزمایش نیز تابستان و پاییز ۱۴۰۰ در دانشگاه پیام نور در آغاچاری در جنوب ایران بوده است. این بررسی ها نشان داده که متوسط بازدهی گردآورنده مورد استفاده ۴۴/۳٪ و متوسط بازده گرمایی خشک کن ۲۶/۱٪ است. همچنین با ارزیابی شرایط آب هوایی شامل دما، رطوبت و تابش خورشید مشخص شد که تأثیر رطوبت و سرعت باد به دلیل عدم تغییرات زیاد و ضریب همبستگی پیرسون نزدیک به ۰/۳، اندک بوده است. ولی در خصوص دمای هوا و تابش خورشیدی با افزایش دما و تابش مراحل خشک شدن در زمان کمتری اتفاق می‌افتد. همزات و همکاران [۲۲] در پژوهشی به بررسی اثر نوع سیال و همچنین پارامترهای مختلف نانوسیالات مانند اندازه نانوذرات، غلظت، شکل و نرخ جریان نانوسیال برای بهره‌برداری کارآمد از انرژی خورشیدی ارائه می‌کند. نتایج این بررسی نشان داد که نوع سیال عامل مورد استفاده در گردآورنده ها به طور قابل توجهی بر عملکرد آن تأثیر می‌گذارد و نانوسیال در مقایسه با سیال معمولی عملکرد بسیار بهتری دارد. عظیمی و همکاران [۲۳] به بررسی ترکیب نانوسیالات هیبریدی خاکستر-مس/آب و تحلیل عملکرد گرمایی گردآورنده خورشیدی با طراحی لوله به شکل زیگزاگ در مقایسه با لوله مستقیم پرداختند. ایشان تأثیر پارامترهای تغییرات دبی جرمی، دمای ورودی سیال، کسر حجمی نانوذرات بر راندمان گرمایی، عدد ناسلت، افت فشار، عدد ریلی و نرخ ضریب انتقال گرما را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که به دلیل افزایش سطح انتقال گرما در مواردی که مسیر سیال زیگزاگی است، راندمان گرمایی نسبت به لوله مستقیم بهبود یافته است. علاوه بر این، با افزایش سرعت جریان جرمی، دما و تابش، میانگین عدد ناسلت افزایش می‌یابد. ضریب انتقال گرما با افزایش غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد. اسفنده و همکاران [۲۴] با استفاده از نانوذرات در دستگاه‌های خورشیدی، تأثیر آنها بر کیفیت عملکرد این دستگاه‌ها را بررسی کردند. نتایج بررسی ایشان شامل بهبود ۲۰٪ تا ۲۸۰٪ در عملکرد ایستگاه‌های خورشیدی و بهبود ۶٪ تا ۳۰٪ در رسانایی گرمایی بود. همچنین جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و پایداری نانوذرات و همچنین در این مطالعه، قابلیت استفاده مجدد از نانوذرات در چرخه تبخیر در دستگاه‌های خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس مطالعات انجام شده، نانوذرات Al_2O_3 به عنوان نانوذرات ارزان قیمت با کمترین آسیب به محیط زیست معرفی شد. همچنین مطالعه اقتصادی دیگری توسط این پژوهشگران در مورد هزینه تولید آب شیرین با استفاده از نانوذرات مختلف انجام شد. بر اساس نتایج، نانوذرات MgO را می‌توان به عنوان نانوذرات برای تولید ارزان ترین آب شیرین نام برد. ابراهیم و شیخ الاسلامی [۲۵] در پژوهشی عملکرد گرمایی نانوسیال با بکارگیری نوار تابیده در گردآورنده خورشیدی سهموی مورد بررسی قرار دادند. برای این بررسی نانوسیال سیلترم-۸۰۰ و آلومینیوم اکسید با کسر حجمی ۴ درصد در بازه عدد رینولدز ۵۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ بررسی گردید. ایشان با بررسی تأثیر دو پارامتر هندسی تعداد دور و زاویه بال بر ضریب اصطکاک، عدد ناسلت و ضریب کارایی گرمایی به این نتیجه رسیدند که کاهش زاویه بال موجب افزایش ضریب اصطکاک، عدد ناسلت و ضریب کارایی گرمایی می‌شود و همچنین افزایش تعداد دور موجب

آب، و اکسید منیزیم - آب را بر عملکرد یک گردآورنده خورشیدی لوله ای مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بررسی آنها نشان داد که نانوسیال اکسید روی - آب با غلظت حجمی ۰/۲ درصد بهترین انتخاب برای گردآورنده است. در پژوهشی دیگر لی و همکاران [۱۵] از نانوذرات پلاسمونیک معلق در آب استفاده کردند و در یک بررسی عددی مبتنی بر الگوریتم مونت کارلو و تحلیل اجزای محدود نشان دادند که استفاده از نانوسیال‌های پلاسمونیک می‌تواند به طور قابل توجهی کارایی گردآورنده خورشیدی را با غلظت ذرات بسیار کم (به عنوان مثال، تقریباً ۷۰ درصد برای کسر حجمی ذرات ۰/۰۵ درصد) افزایش دهد. تیلور و همکاران [۱۶] خصوصیات نوری نانوذرات گرافیت، نقره، مس، طلا و آلومینیوم در سیالات پایه آب را برای تعیین پتانسیل آنها برای استفاده در گردآورنده‌های خورشیدی جذب مستقیم، بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که بیش از ۹۵ درصد از نور خورشید ورودی را می‌توان (در ضخامت نانوسیال بزرگتر از ۱۰ سانتی‌متر) با کسر حجمی نانوذرات بسیار کم (کمتر از ۱۰ ppm) جذب کرد. همچنین افزودن نانوذرات گرافیت به سیال پایه نتایج مطلوبتری نسبت به افزودن نانوذرات فلزی از خود نشان می‌دهد. قلندری و همکاران [۱۷] به بررسی اثر نانو لوله های کربنی (CNTs) بر خواص نوری و گرمایی سیالات پرداختند. در این مقاله مروری، ابتدا نتایج بدست آمده در مورد رسانایی گرمایی نانوسیالات با نانولوله های کربنی ارائه شده است. در مرحله بعد، تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از نانوسیالات مذکور در سیستم های خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نانوسیال‌های دارای نانولوله های کربنی عملکرد سیستم‌های خورشیدی را از نظر انرژی و انرژی بهبود می‌بخشد. خیطی و همکاران [۱۸] به بررسی اثر استفاده از نانوسیال هیبریدی $DWCNTs-TiO_2/water$ در یک هندسه خاص، بر انرژی و بازده انرژی گردآورنده خورشیدی صفحه تخت (FPSC) با استفاده از یک مدل ترکیبی دو فازی پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که با افزایش رینولدز و همچنین افزایش درصد نانوذرات تا $\phi=3\%$ ، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. گودرزی و همکاران [۱۹] از نانوسیال آب - اکسید مس به عنوان سیال کار برای یک گردآورنده خورشیدی استوانه ای با گیرنده لوله مارپیچ استفاده کردند و عملکرد آن را به دست آوردند. آنها نشان دادند که راندمان گرمایی گردآورنده خورشیدی استوانه ای زمانی که از نانوسیال آب - اکسید مس به عنوان سیال عامل در مقایسه با آب استفاده می‌کنند، نزدیک به ۲۶ درصد افزایش می‌یابد. آنها همچنین افزایش راندمان گرمایی را نزدیک به ۲۵ درصد با استفاده از سورفکتانت در مقایسه با نانوسیال بدون سورفکتانت پیش بینی کردند. قاسمی و همکاران [۲۰] از نانوسیال Cu/H_2O به عنوان سیال عامل برای به دست آوردن عملکرد گردآورنده سهموی استفاده کردند. آنها به صورت عددی و تجربی ویژگی هایی مانند راندمان، ضریب انتقال گرما، رسانایی گرمایی را برای هر دو گردآورنده خورشیدی صفحه تخت و سهموی بررسی کردند. آنها دریافتند که با افزودن نانوذرات به سیال پایه، عملکرد به دلیل افزایش رسانایی گرمایی افزایش می‌یابد. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که با افزایش تابش جذب شده، راندمان گرمایی نیز برای هر دو گردآورنده افزایش می‌یابد. مروج و همکاران [۲۱] یک خشک کن خورشیدی جریان غیرمستقیم سبزیجات با گرمادهی غیر مستقیم توسط نانوسیال به صورت تجربی

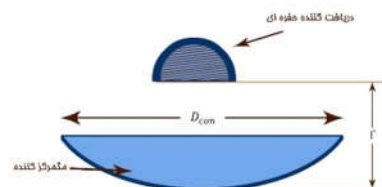
افزایش آشفتنگی جریان شده و به تبع انتقال گرما و عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد.

همانطور که از بررسی سوابق پژوهشی مرتبط، مشخص است، تا کنون تاثیر پارامترهای هندسی و جریان بر عملکرد گرمایی دریافت کننده حفره ای کروی مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین در این بررسی ابتدا با در نظر گرفتن دریافت کننده با هندسه کروی، اثر پارامترهای قطر و گام دریافت کننده، عدد رینولدز و رژیم جریان بر افزایش دمای خروجی سیال بررسی، سپس با افزودن نانوذرات مختلف با درصدهای حجمی متفاوت، تاثیر نانوذرات بر میزان افزایش دمای سیال کار در ساعت های مختلف روز و روزهای مختلف سال مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- بیان مسئله و معادلات

۲-۱- بیان مسئله

در مرحله اول میزان بازتابش انرژی خورشیدی از متمرکز کننده کروی به قطر ۴ متر در شهر شهرکرد در روزهای مختلف سال به کمک نرم افزار Trace Pro محاسبه شد. با این انتخاب مساحت سطح متمرکز کننده در حدود ۱۰ متر مربع می‌شود که به عنوان یک شاخص برای تعیین کل میزان انرژی خورشیدی دریافت شده اختیار شده است. هندسه کروی جهت متمرکز کننده با توجه به ملاحظات ساخت در نظر گرفته شده است. هندسه مربوط به متمرکز کننده و دریافت کننده بترتیب در شکل های ۱ و ۲ و پارامترهای مشخصه مربوط به آن در جدول ۱ آمده است.



شکل ۱ - هندسه متمرکز کننده کروی



شکل ۲ - هندسه دریافت کننده

جدول ۱- داده های متمرکز کننده و حفره دریافت کننده حاضر

مقدار	علامت	پارامتر
$5 * 10^7 \text{mm}^2$	A_a	مساحت متمرکز کننده
$4 * 10^3 \text{mm}$	D_{con}	قطر متمرکز کننده
$5 * 10 \text{mm}$	R	شعاع دریافت کننده
$2 * 10^3 \text{mm}$	f	فاصله کانونی
$3 * 10^{-3} \text{mm}$	d	ضخامت دریافت کننده
21°C	T_{amb}	دمای محیط

۲-۲- داده های تابش

داده های تابش بهترین منبع اطلاعات برای تخمین تابش متوسط برخوردی با سطح هستند. این داده‌ها از اطلاعات ایستگاه هواشناسی شهرکرد استخراج و مقدار بازتابش از متمرکز کننده کروی مذکور توسط نرم افزار Trace Pro محاسبه و نتایج مربوط به آن در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- میزان انرژی بازتابش از متمرکز کننده کروی بر حسب وات با ضریب بازتابش ۰/۹۸ برای شهر شهرکرد

میزان بازتابش (وات)	ماه	میزان بازتابش (وات)	ماه
۳۳۷۸/۹	مهر	۱۰۹۳/۸	فروردین
۲۶۲۲/۸	آبان	۱۰۶۳/۹	اردیبهشت
۱۴۲۰/۷	آذر	۱۰۳۸/۳	خرداد
۱۰۰۹/۴	دی	۱۰۳۸/۳	تیر
۹۲۸/۹	بهمن	۳۳۷۸/۹	مرداد
۱۳۶۶/۰	اسفند	۳۶۶۱/۱	شهریور

هندسه دریافت کننده در محیط Solidworks ایجاد و از نرم افزار Ansys Fluent جهت تجزیه و تحلیل استفاده می‌شود. فرضیات و شرایط مرزی مهم به شرح زیر در نظر گرفته شده‌اند.

- زاویه برخورد خورشیدی صفر است زیرا متمرکز کننده خورشیدی در دو جهت خورشید را دنبال می‌کند.
- ضریب بازتابش متمرکز کننده ۰/۹۸ انتخاب شده است.
- میزان جذب حفره ۹۹ درصد انتخاب شده است.
- دیواره بیرونی دریافت کننده عایق در نظر گرفته شده است.
- دیواره داخلی دریافت کننده سیال کار روغن گرمایی ترمویل است.
- جنس عایق پشم شیشه می‌باشد.
- لوله های جاذب از مس ساخته شده اند.
- حفره جاذب از فولاد ساخته شده است.
- بازتابنده یک ماده آینه ای مناسب است.
- همچنین در نرم افزار فلونت برای حل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی از روش حجم محدود استفاده شده است. حل بر پایه فشار ثابت انتخاب شده و برای مدل از فرمول بندی ضمنی استفاده شده است. جریان به صورت پایا حل شده و معادلات حاکم نیز به صورت مجزا از یکدیگر حل می‌گردد.

۲-۳- معادلات

با توجه به مشخصات فیزیکی و گرمایی مناسب روغن ترمویل، این سیال به عنوان سیال کار انتخاب شده است. ترمویل سیال انتقال گرمای مصنوعی است که دارای ثبات و پایداری گرمایی بالا و لزجت نسبتا پایین در بازه ی دمایی از ۱۲ درجه تا ۴۰۰ درجه سلسیوس است. خواص این سیال شامل ظرفیت گرمایی ویژه، رسانایی گرمایی، چگالی و لزجت تابعی از دما (کلوین) در نظر گرفته شده است. این خواص از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۲۶]:

$$C_p = 2.82 T + 716 \quad (1)$$

جدول ۳ خواص فیزیکی نانوذرات مختلف [۲۷]

	ρ (kg m ⁻³)	C_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	K (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	$\beta \times 10^{-5}$ (K ⁻¹)
CuO	۶۳۲۰	۵۳۵/۶	۷۶/۵	۱/۸
Al ₂ O ₃	۳۹۷۰	۷۶۵	۴۰	۰/۸۵
Cu	۸۹۳۳	۳۸۵	۴۰۱	۱/۶۷

معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی نانوسیال برای جریان لایه ای را می توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (20)$$

$$\rho_{nf} \frac{dV}{dt} = \rho_{nf} g - \nabla p + \mu_{nf} \nabla^2 V \quad (21)$$

$$\rho_{nf} c_{nf} \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (k_{nf} \nabla T) \quad (22)$$

۳- اعتبارسنجی

تجزیه و تحلیل صورت گرفته در این پژوهش در مرحله اول به کمک نرم افزار Trace Pro صورت گرفته است. بدین منظور ابتدا متمرکزکننده و دریافت کننده شبیه سازی می شود. سپس منبع انرژی خورشیدی با شدت متغیر بدست آمده و نتایج شار گرمایی دریافتی از سطح دریافت کننده ی مورد نظر استخراج می گردد. در مرحله بعد جهت بررسی اثر قطر و گام دریافت کننده بر عملکرد سیستم، با تغییر این پارامترها دمای خروجی سیال را محاسبه شده و در گام بعدی تاثیر رینولدز و رژیم جریان بر دمای خروجی سیال مورد بررسی قرار می گیرد. در پایان با افزودن درصدهای حجمی مختلف از نانوذرات مس، اکسید مس و آلومینا، تاثیر نانوذرات بر عملکرد سیستم بررسی می شود. به منظور اعتبارسنجی پژوهش حاضر، مقایسه ای با سیستم معرفی شده توسط لونی و همکاران [۳۱] انجام گرفته است. در این تحقیق متمرکز کننده سهموی به قطر ۱/۸ متر و دریافت کننده استوانه ای با جریان نانوسیال روغن گرمایی / آلومینا در درصدهای حجمی مختلف و دبی ۰/۰۲ بررسی شده است. جدول ۴ دمای نانوسیال خروجی از دریافت کننده بدست آمده در این تحقیق و آرایه شده در این مرجع را مقایسه کرده است.

جدول ۴- دمای سیال خروجی دریافت کننده استوانه ای در

درصدهای مختلف نانوسیال روغن گرمایی / آلومینا با نتایج مرجع [۳۱]

ϕ	نتایج مرجع [۳۰]	نتایج پژوهش حاضر	درصد اختلاف
۰	۳۶۱/۲۲	۳۸۵/۱۵	٪ ۶/۶۲
۰/۰۱	۳۶۱/۳۹	۳۸۷/۰۷	٪ ۷/۱۰
۰/۰۲	۳۶۱/۵۷	۳۸۹/۹۴	٪ ۷/۷۶
۰/۰۳	۳۶۱/۷۵	۳۹۰/۴۵	٪ ۷/۹۳
۰/۰۴	۳۶۱/۹۳	۳۹۳/۸۹	٪ ۸/۸۳
۰/۰۵	۳۶۲/۱۱	۳۹۶/۵۵	٪ ۹/۵۱

اختلاف کمتر از ده درصد بین نتایج دو بررسی در این جدول بیانگر مناسب بودن روند حل مسئله است.

$$k = 1.73 \times 10^{-7} T^2 + 7.62 \times 10^{-6} T + 0.14 \quad (2)$$

$$\rho = (-7.61 \times 10^{-4} T^2 - 2.24 \times 10^{-1} T + 0.14)^{-1} \quad (3)$$

$$\mu = (-2.3 \times 10^{-5} T^3 + 5.61 \times 10^{-3} T^2 - 19.89 T + 1822)^{-1} \quad (4)$$

جهت بررسی اثر نانوسیال بر عملکرد سیستم، با افزودن نانوذرات مختلف دمای خروجی سیال محاسبه می گردد. لازم به یادآوری است که در این پژوهش نانوسیال، یک سیال تک فازی فرض شده که ذرات جامد در تعادل هیدرودینامیکی و گرمایی با سیال پایه هستند. عدد رینولدز، چگالی موثر، ضریب انتشار گرمایی، ظرفیت گرمایی و ضریب انبساط گرمایی نانوسیال به صورت زیر بدست می آید [۲۷]:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_s \quad (5)$$

$$\alpha_{nf} = k_{eff} / (\rho C_p)_{nf} \quad (6)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi) (\rho C_p)_f + \phi (\rho C_p)_s \quad (7)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = (1 - \phi) (\rho \beta)_f + \phi (\rho \beta)_s \quad (8)$$

عدد رینولدز به صورت زیر تعریف می شود:

$$Re = \frac{\rho_{nf} V D}{\mu_{nf}} = \frac{4 \rho_{nf} Q}{\pi D \mu_{nf}} \quad (9)$$

در معادلات فوق ϕ نسبت حجمی نانوذرات بوده، زیرنویس های f ، s ، nf و eff به ترتیب مربوط به سیال پایه، نانوذرات، نانوسیال و پارامترهای موثر است. در معادلات حاکم، μ_{eff} لزجت دینامیکی موثر و k_{eff} رسانایی گرمایی موثر نانوسیال است. فرض بر این است که μ_{eff} و k_{eff} از یک بخش استاتیک معمولی و همچنین یک بخش دینامیکی تشکیل شده اند که از حرکت براونی نانوذرات سرچشمه می گیرد [۲۸]:

$$\mu_{eff} = \mu_{static} + \mu_{Brownian} \quad (10)$$

$$k_{eff} = k_{static} + k_{Brownian} \quad (11)$$

$$\mu_{static} = \mu_f (1 - \phi)^{-2.5} \quad (12)$$

$$k_{static} = k_f \left[\frac{(k_s + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_s)}{(k_s + 2k_f) + \phi(k_f - k_s)} \right] \quad (13)$$

$$\mu_{Brownian} = 5 \times 10^{\lambda} \phi \rho_f \sqrt{\frac{kT}{2\rho_s R_s}} \zeta(T, \phi) \quad (14)$$

$$k_{Brownian} = 5 \times 10^{\lambda} \phi \rho_f C_p \sqrt{\frac{kT}{2\rho_s R_s}} \zeta(T, \phi) \quad (15)$$

که در آن ρ_s و R_s به ترتیب چگالی و شعاع نانوذرات هستند ($R_s = 38.9 \text{ nm}$) و κ ثابت بولتزمن است. برای نانوسیال دو تابع مدل سازی λ و ζ از روابط زیر محاسبه می شوند [۳۰، ۲۹]:

$$\kappa = 1.3807 \times 10^{-23} / K \quad (16)$$

$$\lambda = 0.0137 (100 \phi)^{-0.8829} \quad \text{for } \phi \leq 1\% \quad (17)$$

$$\lambda = 0.0011 (100 \phi)^{-0.7272} \quad \text{for } \phi > 1\% \quad (18)$$

و

$$\zeta(T, \phi) = (-6.4 \phi + 0.485) T + (1722.3 \phi - 134.63) \quad \text{for } 1\% \leq \phi \leq 4\% \quad (19)$$

خواص فیزیکی نانوذرات در جدول ۳ آمده است.

۴- نتایج

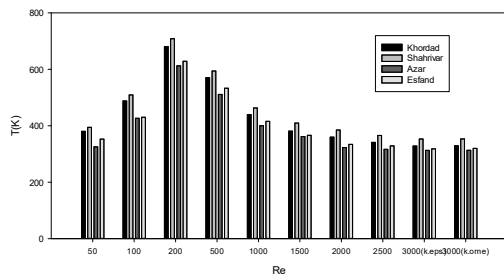
۴-۱- بررسی اثر عدد رینولدز

سیال کار در خروج از کویل دریافت کننده در مصارف گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد، بنابراین بالاتر بودن دمای سیال کار خروجی به معنی بهبود عملکرد سیستم در نظر گرفته شده است. دیواره بیرونی دریافت کننده، با شرط مرزی عایق و دیواره داخلی، هماهنگ با توزیع گرمای جدول ۲، برای ماه شهریور در نظر گرفته شد. نتایج این بررسی برای روغن خالص در جدول ۵ آمده است. این نتایج به منظور یافتن بهترین شرایط تاثیر قطر و گام لوله در یک رینولدز ثابت برای جریان لایه ای بررسی شده است. با توجه به معادله ۹، عدد رینولدز براساس قطر لوله و دبی نانو سیال تعریف می‌شود.

جدول ۵ - تاثیر قطر و تعداد حلقه های کویل بر دمای سیال خروجی

در $Re=1000$

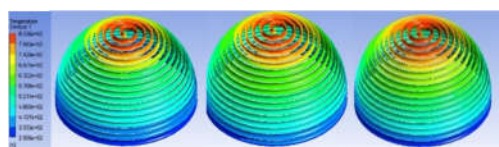
قطر لوله	تعداد حلقه	دمای سیال خروجی (K)
۲۵	۳	۳۱۶/۳۵
۲۵	۵	۳۲۷/۱۶
۲۵	۸	۳۳۱/۹۴
۲۰	۵	۳۵۱/۶۷
۲۰	۶	۳۷۶/۲۱
۱۶	۶	۳۶۶/۶۱
۱۶	۱۳	۳۹۵/۵۷
۱۲	۳	۳۳۷/۴۲
۱۲	۵	۳۷۸/۲۲
۱۲	۸	۴۲۳/۵۴
۱۰	۵	۳۸۰/۷۷
۱۰	۸	۴۰۳/۸۱
۱۰	۱۰	۴۴۰/۴۶
۱۰	۱۲	۴۸۷/۱۹
۸	۱۲	۳۹۰/۵۴
۸	۱۵	۴۳۸/۷۱
۵	۱۰	۴۶۴/۰۲
۵	۱۲	۴۷۲/۹۴
۵	۱۷	۵۷۶/۲۷



شکل ۲ - بررسی اثر عدد رینولدز در افزایش دمای سیال خروجی از دریافت کننده

نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد که بیشترین دمای خروجی سیال در رینولدز ۲۰۰ رخ می‌دهد. در حالت کلی برای رژیم لایه ای جریان، دمای سیال خروجی بالاتر از دمای سیال خروجی در رژیم آشفته جریان است. این رخداد نیز می‌تواند به دلیل افزایش زمان انتقال گرما سیال با حفره دریافت کننده باشد. گفتنی است که جهت بررسی تاثیر نوع مدل آشفتگی در رینولدز ۳۰۰۰، دمای سیال خروجی در دو مدل k-epsilon و k-omega با یکدیگر مقایسه شد و نتیجه این مقایسه نشان داد که نوع مدل آشفتگی تاثیر چندانی بر دمای خروجی سیال ندارد.

شکل ۳ توزیع دمای سیال در لوله های مبادله کن گرمایی دریافت کننده را نشان می‌دهد. این توزیع دما نشان می‌دهد که در سرعت های پایین تر (رینولدزهای پایین تر)، در طول لوله، سیال جذب گرمایی بیشتری از دیواره حفره دریافت کننده داشته و در نتیجه دارای دمای بالاتری است. همانطور که بیان شد دلیل این رخداد می‌تواند افزایش زمان جذب گرما سیال انتقال گرما باشد.



(الف) (ب) (ج)

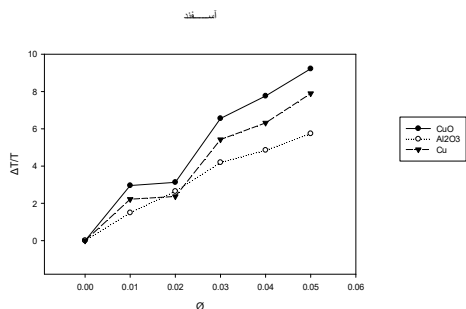
شکل ۳ - توزیع دما برای حفره کروی الف) $Re=200$ ب) $Re=100$ ج) $Re=1000$

۴-۲- اثر افزودن نانوسیال

انتظار بر این است که استفاده از نانوذرات با توجه به افزایش ضریب انتقال گرمایی رسانایی سیال کار باعث افزایش نرخ انتقال گرما و افزایش دمای سیال خروجی مبادله کن گرمایی دریافت کننده شود. نانوذرات بر مبنای نوع کاربرد سیال انتخاب می‌شوند. در این مطالعه نانو ذرات آلومینا، مس و اکسید مس به دلیل دارا بودن ضریب رسانایی گرمایی بالا و کاربرد وسیع استفاده شده است. دمای سیال خروجی بر اثر افزودن نانو ذره به سیال پایه، بسته به درصد نانو ذرات تغییر می‌کند. شکل های ۴ تا ۷ درصد افزایش دمای خروجی نانوسیال نسبت به سیال خالص را در ماه های خرداد، شهریور، آذر و اسفند را برای نانوسیال های روغن / مس ، روغن / اکسید مس و روغن / آلومینا در

نتایج فوق نشان می‌دهد که در قطر ثابت با افزایش تعداد حلقه ها، دمای خروجی افزایش می‌یابد. بیشترین دمای خروجی سیال کار در شرایط چیدمان لوله ، قطر ۵ میلیمتر با تعداد ۱۷ حلقه رخ می‌دهد. همچنین کاهش قطر دریافت کننده منجر به بهبود نتایج خروجی می‌گردد. قاعدتا افزایش تعداد حلقه های دریافت کننده منجر به افزایش طول لوله حامل جریان و افزایش زمان انتقال گرما خواهد شد، بنابراین سیال داخل لوله فرصت جذب گرما بیشتری خواهد داشت.

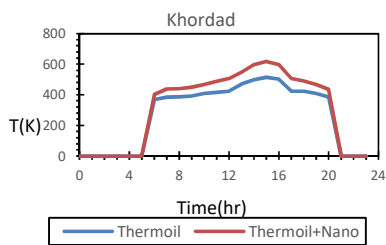
در گام بعدی پس از تعیین مناسبترین قطر و تعداد حلقه های مربوط به کویل دریافت کننده، به تعیین رژیم مناسب جریان و همچنین انتخاب مناسبترین رینولدز مربوط به جریان پرداخته شده است. بدین منظور سرعت جریان ورودی به داخل کویل و متناسب با آن رینولدز جریان را، در ماه های مختلف سال، تغییر داده و دمای سیال خروجی از آن را بدست می‌آوریم. نتایج این بررسی در شکل ۲ آورده شده است.



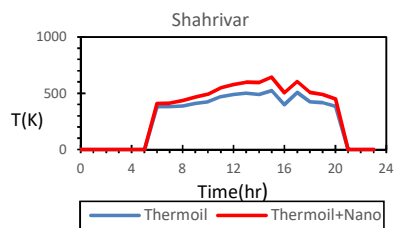
شکل ۷- تأثیر درصد حجمی نانوذرات مس، آلومینا و اکسید مس بر افزایش دمای خروجی سیستم در ماه اسفند

همانطور که در شکل‌های ۴ تا ۷ دیده می‌شود، بترتیب نانو ذرات مس، اکسید مس و آلومینا بهترین عملکرد را به همراه دارند. این نتیجه می‌تواند به علت افزایش رسانایی گرمایی نانوسیال با افزایش نانوذرات باشد و چون بین نانوذرات مورد مطالعه بیشترین رسانایی گرمایی متعلق به نانوذرات مس می‌باشد، بیشترین افزایش دما نیز در این نانوسیال مشاهده می‌گردد.

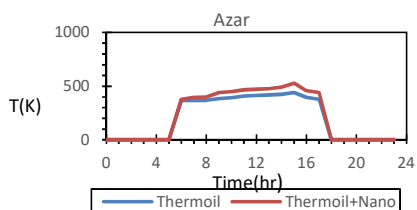
شکل ۸ توزیع دما در طول روز برای متوسط روزانه هریک از این چهار فصل سال با نانوذره مس ۵ درصد و نیز سیال کار خالص را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود به دلیل بالاتر بودن رسانایی گرمایی نانوسیال نسبت به سیال خالص، افزایش قابل ملاحظه‌ای در دمای خروجی سیال با کمک نانوسیال در کلیه ماه‌های فوق دیده می‌شود.



شهر خرداد (الف)



شهر شهریور (ب)

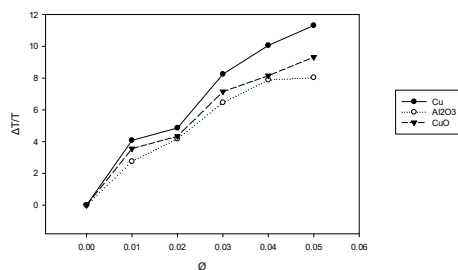


شهر آذر

درصد حجمی‌های مختلف نانوذرات نشان می‌دهد.

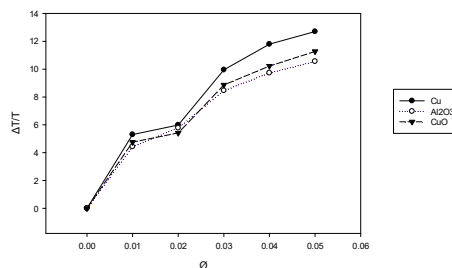
با توجه به شدت تابش متغیر خورشید در روزهای مختلف سال اثر افزایش دمای ناشی از افزودن نانوسیال در این روزها با هم متفاوت است. بیشترین افزایش دما در شهریورماه و کمترین آن در اسفند ماه رخ داده است. همان طور که در نتایج دیده می‌شود با افزودن تنها ۲ درصد از نانوذرات مس افزایش دمای حدود ۶ درصدی شهریور و حدود ۲ تا ۳ درصدی در اسفند بدست می‌آید. با افزایش درصد حجمی میزان افزایش دما بهبود پیدا می‌کند. با توجه به محدودیت‌های ناشی از ته نشین شدن و عدم پایداری درصد حجمی بیش از ۵ توصیه نمی‌شود. در این درصد حجمی افزایش دما تا حدود ۱۲ درصد برای ماه شهریور و بیش از ۸ درصد برای ماه اسفند رخ می‌دهد.

شهر خرداد



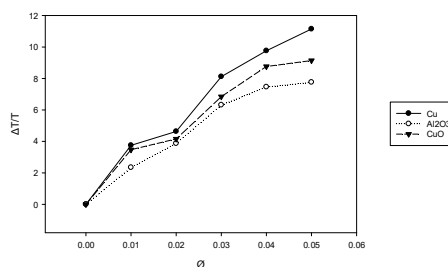
شکل ۴- تأثیر درصد حجمی نانوذرات مس، آلومینا و اکسید مس بر افزایش دمای خروجی سیستم در ماه خرداد

شهر شهریور



شکل ۵- تأثیر درصد حجمی نانوذرات مس، آلومینا و اکسید مس بر افزایش دمای خروجی سیستم در ماه شهریور

شهر آذر



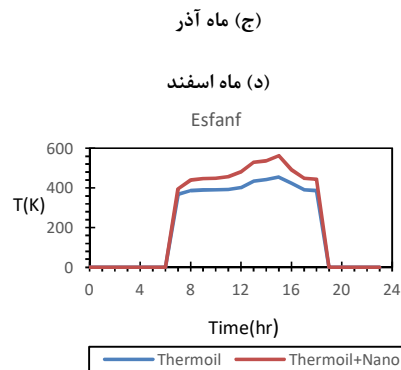
شکل ۶- تأثیر درصد حجمی نانوذرات مس، آلومینا و اکسید مس بر افزایش دمای خروجی سیستم در ماه آذر

۶- نمادها

A_a	مساحت دیافراگم (mm^2)
C_p	کرمای ویژه ($J kg^{-1}K^{-1}$)
d	ضخامت دریافت کننده (mm)
D	قطر لوله دریافت کننده (mm)
D_{con}	قطر متمرکز کننده (mm)
f	فاصله کانونی (mm)
g	شتاب گرانش ($m s^{-2}$)
k	رسانایی گرمایی ($W m^{-1}K^{-1}$)
\bar{h}_T	شاخص وضوح ماهیانه
K_T	شاخص وضوح روزانه
L	ارتفاع دریافت کننده (mm)
Q	دبی عبوری (m^3/s)
R	شعاع دریافت کننده (mm)
T_{amb}	دمای محیط (C)
ρ	چگالی ($kg m^{-3}$)
α	پخشندگی گرمایی (m^2s^{-1})
β	ضریب انبساط گرمایی (K^{-1})
θ	مکان زاویه ظهر خورشیدی (Rad)
Φ	عرض جغرافیایی (Rad)
μ	لزجت دینامیکی ($N s m^{-1}$)

۷- مراجع

- [1] Meinel A. B., Meinel M. P., Applied solar energy an introduction. *NASA STI/Recon Technical Report*, Vol. 77, 1977.
- [2] Balhas Shad., Roozbeh., Marjan Ghasemi., Selecting the best location for solar panels using spatial information system and decision making methods (AHP-TOPSIS). *Second International Eco Energy Conference*. Persian, 2019.
- [3] Kalogirou S. A., *Solar energy engineering. processes and systems*, Academic Press, 2013.
- [4] Wang W., Malmquist A., Laumert B., Comparison of potential control strategies for an impinging receiver based dish-Brayton system when the solar irradiation exceeds its design value. *Energy Convers Manage* Vol. 169, pp. 1-12, 2018.
- [5] Snidvongs S., The structure and foundation design for small solar thermal dish stirling 10 kW power plant for Thailand softland and poor isolation nature. *In International Solar Energy Conference*, Thailand, 2005.
- [6] Madadi V., Tavakoli T., Rahimi A., First and second thermodynamic law analyses applied to a solar dish collector., *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, Vol. 39, No. 4, pp. 183-197, 2019.
- [7] Bellos E., Bousi E., Tzivanidis C., Pavlovic S. Optical and thermal analysis of different cavity receiver designs for solar dish concentrators. *Energy Conversion and Management*: X, 2, 100013., 2019
- [8] Loni R., Asli-Areh E. A. Ghobadian, B. Kasaeian A. B. Gorjian, S. Najafi, G. Bellos E., Research and review study of solar dish concentrators with different nanofluids and different shapes of cavity receiver, Experimental tests. *Renewable Energy*, Vol. 145, pp. 783-804, 2020.
- [9] Kopalakrishnaswami A. S. Natarajan S. K. Comparative study of modified conical cavity receiver with other receivers for solar paraboloidal dish collector system. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(5), pp. 7548-7558, 2020.
- [10] Mahian O., Kianifar A., Kalogirou S. A., Pop I., Wongwises S., A review of the applications of nanofluids in



شکل ۸: تغییر دمای سیال خروجی از دریافت کننده بر اثر استفاده از نانوسیال در طول روز برای روزهای مختلف سال

همانطور که در شکل ۸ مشخص است با استفاده از نانوسیال افزایش دمایی تا بیش از ۱۰۰ کلوین در ساعاتی از روز مشاهده می‌شود.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به منظور طراحی بهینه دریافت کننده خورشیدی جهت افزایش دمای سیال خروجی، متغیرهای قطر و گام دریافت کننده کروی، سرعت و نوع سیال و رژیم جریان بررسی شد. بدین منظور هندسه دریافت کننده در محیط Solidworks ایجاد و از نرم افزار Ansys Fluent جهت حل معادلات حاکم استفاده گردید. با توجه به اینکه افزایش دمای خروجی سیال به معنای بهبود عملکرد سیستم است، با تغییر پارامترهای هندسی سیستم و با اندازه گیری دمای سیال خروجی، این نتیجه حاصل شد که قطر ۵ میلی‌متر و تعداد ۱۷ حلقه دریافت کننده، بیشترین دمای سیال خروجی را به همراه دارد. بررسی اثر رژیم جریان بر عملکرد سیستم نشان داد که جریان لایه ای سیال نتیجه قابل قبول تری نسبت به رژیم آشفته جریان دارد. بیشترین دمای سیال خروجی در رینولدز ۲۰۰ بدست می‌آید. افزودن نانو ذرات به سیال کار موجب بهبود قابل توجه عملکرد سیستم می‌گردد. بطوریکه اضافه کردن نانو ذرات مختلف، متناسب با شدت تابش موجب افزایش دمای خروجی سیال می‌گردد. بیشترین افزایش دمای سیال خروجی در حدود ۱۱۸ کلوین مربوط به افزودن ۵ درصد از نانو ذره مس است. به ترتیب افزون مس، اکسید مس و آلومینا موجب نتایج بهتری می‌گردد.

- [29] Koo J., & Kleinstreuer C. A new thermal conductivity model for nanofluids. *Journal of Nanoparticle research*, Vol. 6, No. 6, pp. 577-588, 2004.
- [30] Koo J., Kleinstreuer C., Laminar nanofluid flow in microheat-sinks. *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 48, No. 13, pp. 2652-2661, 2005.
- [31] Loni R. A., Asli-Ardeh E. A., Ghobadian B., Kasaeian A. B., Gorjian S., Thermodynamic analysis of a solar dish receiver using different nanofluids. *Energy*, Vol. 133, pp. 749-760, 2017.
- solar energy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 57, No. 2, pp. 582-594, 2013.
- [11] Tyagi H., Phelan P., Prasher R., Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid – based direct absorption solar collector., *Solar Energy Eng.* Vol. 131, 2009.
- [12] Otanicar T. P., Phelan P. E., Prasher R. S., Rosengarten G., Taylor R. A., Nanofluidbased direct absorption solar collector, *Renew Sustain Energy 2*, 2010.
- [13] Taylor R. A., Phelan P. E., Otanicar T. P., Walker C. A., Nguyen M., Trimble S., Prasher R., Applicability of nanofluids in high flux solar collectors, *Renew. Sustain Energy 3*, 2011.
- [14] Li Y., Xie H., Yu W., Li J., Investigation on heat transfer performances of nanofluids in solar collector, *Mater Sci Forum*, Vol. 694, pp. 33–36, 2011.
- [15] Lee B. J., Park K., Walsh T., Xu L., Radiative heat transfer analysis in plasmonic nanofluids for direct solar thermal absorption, *Sol Energy Eng.*, Vol. 134, No. 2, 2012.
- [16] Taylor R. A., Phelan P. E., Otanicar T. P., Adrian R., Prasher R.P., Nanofluid optical property characterization: towards efficient direct absorption solar collectors, *Nanoscale Res. Lett.* Vol. 6, 2011.
- [17] Ghalandari M., Maleki A., Haghighi A., Shadloo M. S., Nazari M. A., Tlili I., Applications of nanofluids containing carbon nanotubes in solar energy systems: A review. *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 313, 2020.
- [18] Khetib Y., Alzaed A., Tahmasebi A., Sharifpur M., Cheraghian G. Influence of using innovative turbulators on the exergy and energy efficacy of flat plate solar collector with DWCNTs-TiO₂/water nanofluid. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 51, pp. 101-106, 2022.
- [19] Goudarzi K., Shojaeizadeh E., Nejadi F., An experimental investigation on the simultaneous effect of CuO–H₂O nanofluid and receiver helical pipe on the thermal efficiency of a cylindrical solar collector, *Appl. Therm. Eng.* Vol. 73, pp. 1236–1243, 2014.
- [20] Ghasemi S. E., Mehdizadeh Ahangar G.R., Numerical analysis of performance of solar parabolic trough collector with Cu-water nanofluid, *Int. J. Nano Dimens* Vol. 5, pp. 233–240, 2014.
- [۲۱] مروج م. و ابراهیم پور ف. و ابراهیمی ز.، بررسی تجربی عملکرد خشک کن خورشیدی سبزیجات با گرمادهی غیرمستقیم نانوسیال، مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۵۲، ش. ۴، ص ۲۵۵-۲۶۲، ۱۴۰۱.
- [22] Hamzat A. K., Omisanya M. I., Sahin A. Z., Oyetunji O. R., Olaitan N. A. Application of nanofluid in solar energy harvesting devices: A comprehensive review. *Energy Conversion and Management*, Vol. 266, pp. 115-120, 2022.
- [23] Azimy N., Saffarian M. R., Noghrehabadi A. Thermal performance analysis of a flat-plate solar heater with zigzag-shaped pipe using fly ash-Cu hybrid nanofluid: CFD approach. *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 1-19, 2022.
- [24] Esfandeh S., Esfè M. H., Kamyab M. H. Applications of nanofluids in solar energy collectors focusing on solar stills. *In Advances in Nanofluid Heat Transfer*, Elsevier, pp. 341-373, 2022.
- [۲۵] ابراز ش. و شیخ الاسلامی کندلوسی م.، بررسی عددی عملکرد گرمایی گردآورنده خورشیدی سهموی با بکار گیری نانوسیال و مغشوش کننده، مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د. ۵۲، ش. ۱، ص ۲۳۸-۲۴۶، ۱۴۰۱.
- [26] Benoit H., Spreafico L., Gauthier D., Flamant G. Review of heat transfer fluids in tube-receivers used in concentrating solar thermal systems: Properties and heat transfer coefficients. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 55, pp. 298-315, 2016.
- [27] Aminossadati S. M., Ghasemi B. Natural convection cooling of a localised heat source at the bottom of a nanofluid-filled enclosure. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, Vol. 28, No. 5, pp. 630-640, 2009.
- [28] Maxwell J. C., A Treatise on Electricity and Magnetism, *Oxford University Press*, vol. 2, pp. 54-60, 1873.