

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۴

مطالعه عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی یک کلکتور خورشیدی سهموی خطی با استفاده از نانوسیال هیبریدی نانولوله‌های کربنی چنددیواره/اکسید آهن- ترمینول وی پی ۱

فرهاد وحیدی‌نیا^۱، حسین خراسانی‌زاده^{۲*}، علیرضا آقایی^۳

^۱ دانشجوی دکتری گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

F.Vahidinia@gmail.com

^۲ استاد گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

khorasan@kashanu.ac.ir

^۳ استادیار گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

a.aghaei@kashanu.ac.ir

چکیده: در مطالعه حاضر به صورت تئوری بر مبنای یک مدل حرارتی به بررسی عملکرد یک کلکتور سهموی خطی با استفاده از نانوسیال هیبریدی و مقایسه آن با مونو نانوسیال و سیال پایه پرداخته شده است. از ترمینول وی پی ۱ به عنوان سیال پایه و از نانوذرات اکسید آهن برای تولید مونو نانوسیال و از نانوکامپوزیت نانولوله‌های کربنی چنددیواره- اکسید آهن به عنوان ذرات نانو برای تولید نانوسیال هیبریدی استفاده شده است. جریان سیال داخل لوله جاذب کلکتور به صورت مغشوش فرض شده است. نتایج نشان داد که وقتی از نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال استفاده می‌شود، راندمان‌های انرژی و آگرژی کلکتور نسبت به شرایط استفاده از سیال پایه بیشتر هستند، ولی مقدار آن‌ها با استفاده از نانوسیال هیبریدی اندکی کمتر از شرایطی است که سیال عامل مونو نانوسیال باشد. بیشترین افزایش راندمان انرژی کلکتور برای نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال نسبت به سیال پایه به ترتیب برابر با ۲/۱۷٪ و ۲/۲۲٪ و بیشترین میزان افزایش راندمان آگرژی به ترتیب برابر ۱/۴۹٪ و ۱/۵۸٪ به دست آمد. با وجود این ضریب اصطکاک مونو نانوسیال نسبت به نانوسیال هیبریدی به طور متوسط حدود ۷٪ بیشتر به دست آمد. نتایج نشان داد که معیار ارزیابی عملکرد کلکتور (بازده حرارتی- هیدرودینامیکی) وقتی از نانوسیال هیبریدی استفاده شود، بیشتر از شرایطی است که از مونو نانوسیال استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: کلکتور سهموی خطی، نانولوله‌های کربنی چنددیواره، اکسید آهن، راندمان انرژی، نانوسیال هیبریدی، مونو نانوسیال، راندمان آگرژی.

۱. مقدمه

از مهم‌ترین دغدغه‌های بشر در قرن‌های آینده این موضوع است که اگر روزی سوخت‌های فسیلی تمام شود یا به هر دلیلی او نتواند از آن‌ها استفاده کند، انرژی مورد نیاز خود را به چه صورت و از چه منبعی تأمین کند. چندین دهه است که دانشمندان مطالعات گسترده‌ای در این راستا انجام داده و منابع انرژی بی‌پایان همانند باد و خورشید را که از آن‌ها به‌عنوان انرژی پاک یاد می‌شود، جایگزینی شایسته برای سوخت‌های فسیلی معرفی کرده‌اند. انرژی خورشید به‌عنوان فراوان‌ترین منبع انرژی مشخص شده [۱] و تخمین زده شده است که میزان ورود انرژی خورشید به زمین برای مدت یک ساعت بیشتر از انرژی مصرفی سالیانه جوامع جهانی است [۲]. امروزه انرژی خورشید به دو صورت انرژی الکتریکی از طریق سیستم‌های فتوولتائیک و انرژی حرارتی با استفاده از کلکتورهای خورشیدی، بخشی از انرژی مورد نیاز جوامع آینده‌نگر را تأمین می‌کند. کلکتورهای خورشیدی سهموی خطی به‌عنوان بالغ‌ترین، رایج‌ترین و پرکاربردترین نوع کلکتورها هستند که حرارت مورد نیاز بشر را در دماهای متوسط و بالا برای کاربردهای مختلف فراهم می‌کنند. با توجه به پرکاربرد بودن این نوع کلکتورها، روش‌های مختلفی برای بهبود راندمان آن‌ها پیشنهاد شده است. این روش‌ها هم به ساختار و هم به نوع سیال عامل آن‌ها مرتبط است. استفاده از نانوسیال به‌جای سیال پایه در این کلکتورها یکی از امیدوارکننده‌ترین روش‌های بهبود راندمان آن‌هاست [۳]. محتوای انرژی بالای نانوسیال‌ها باعث افزایش راندمان انرژی کلکتور می‌شود [۴]. بر این اساس مطالعات گسترده‌ای در ارتباط با کاربرد نانوسیال‌های مختلف در کلکتورهای سهموی خطی انجام شده است [۵]. ویژگی و هان [۶] با استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم-سیلترم ۸۰۰، عملکرد حرارتی و ترمودینامیکی یک کلکتور سهموی خطی را به‌صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که وقتی کسر حجمی تا ۸٪ افزایش یابد، عملکرد انتقال حرارت تا ۷۶٪ افزایش می‌یابد. کسانیان و همکاران [۷] با استفاده از دو نانوذره نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNTs^۱) و نانو سیلیکا و سیال پایه اتیلن گلیکول، عملکرد حرارتی یک کلکتور سهموی خطی جذب مستقیم را به‌صورت تجربی مطالعه کردند. کسر حجمی ذرات نانو در بازه ۰/۱ تا ۰/۳٪ در نظر گرفته شد. آن‌ها دریافتند که نانوسیال MWCNTs- اتیلن گلیکول عملکرد بهتری نسبت به نانوسیال

نانوسیلیکا- اتیلن گلیکول دارد. همچنین بهبود راندمان انرژی کلکتور برای دو نانوسیال MWCNTs- اتیلن گلیکول و نانوسیلیکا- اتیلن گلیکول نسبت به سیال پایه در کسر حجمی ۰/۳٪ به ترتیب برابر با ۳۰/۴٪ و ۱۴٪ است. کسانیان و همکاران [۸] با استفاده از نانوسیال MWCNTs- روغن معدنی، عملکرد یک کلکتور سهموی خطی را با دریافت‌کننده‌هایی از جنس‌های متفاوت مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که بهترین عملکرد کلکتور با استفاده از دریافت‌کننده نوع مسی با حالت خلأ است و در کسر حجمی ۰/۳٪ افزایش راندمان انرژی حداکثر تا ۷٪ خواهد بود.

نانوسیال‌های هیبریدی نسل جدید نانوسیال هستند که از ترکیب دو یا چند نانوذره مختلف در سیال پایه شکل گرفته‌اند. نانوسیال هیبریدی به دو روش تولید می‌شود. روش اول سوسپانسیون چند نانوذره غیرمشابه در سیال پایه و روش دوم سوسپانسیون یک نانوذره کامپوزیت در سیال پایه است [۹]. تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیال‌های هیبریدی به‌جای مونو نانوسیال باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود [۱۰]. سیام ساندر و همکاران [۱۱] در یک لوله دایره‌ای شکل تحت شار حرارتی یکنواخت بر روی دیواره به‌طور تجربی به بررسی انتقال حرارت جریان مغشوش و توان پمپاژ نانوسیال هیبریدی MWCNTs/ اکسید آهن در سیال پایه آب پرداختند. آن‌ها گزارش دادند که بیشترین مقدار افزایش عدد ناسلت نانوسیال هیبریدی نسبت به سیال پایه برابر ۳۱/۱٪ است. کاربرد نانوسیال‌های هیبریدی در سیستم‌های خورشیدی با توجه به بهبود خواص ترموفیزیکی‌شان نسبت به مونو نانوسیال‌ها و سیال‌های پایه می‌تواند عملکرد این سیستم‌ها را بهبود ببخشد. تأثیر دو نانوسیال هیبریدی MWCNTs/ اکسید مس و MWCNTs/ اکسید منیزیم و سیال پایه آب بر عملکرد یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت توسط ورما و همکاران [۱۲] به‌طور تجربی مطالعه شد. نتایج نشان داد که راندمان انرژی کلکتور با استفاده از نانوسیال‌های هیبریدی بیشتر از مونو نانوسیال‌های اکسید مس- آب و اکسید منیزیم- آب است. همچنین بیشترین راندمان انرژی کلکتور با استفاده از نانوسیال MWCNTs- آب گزارش شد.

با توجه به ناآگاهی کافی در مورد خواص ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی و همچنین اندک بودن داده‌های تجربی در مورد خواص ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی با سیال‌های پایه‌ای چون

روغن‌ها، مطالعات مربوط به عملکرد کلکتورهای سهموی خطی با استفاده از نانوسیال‌های هیبریدی محدود است. در ادامه به چند نمونه از کارهایی که در این زمینه انجام شده است، اشاره می‌شود. تجزیه و تحلیل یک کلکتور سهموی خطی با استفاده از مونو نانوسیال و نانوسیال هیبریدی توسط بلوس و تیزیوانیدیس [۱۳] به صورت تئوری انجام شد. بدین منظور آن‌ها از دو نانوذره اکسید آلومینیوم و دی اکسید تیتانیوم و سیال پایه سیلترم ۸۰۰ استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که راندمان حرارتی کلکتور هنگام استفاده از نانوسیال هیبریدی نسبت به مونو نانوسیال‌ها بیشتر است. در مطالعه آن‌ها افزایش عدد ناسلت با استفاده از نانوسیال هیبریدی نسبت به سیال پایه برابر با $1.21/7$ ، دی اکسید تیتانیوم - آب برابر با $2.23/8$ و اکسید آلومینیوم - آب برابر با $2.23/4$ به دست آمد. همچنین افزایش راندمان انرژی کلکتور با استفاده از نانوسیال هیبریدی در مقایسه با سیال پایه تا $1/8$ و با استفاده از مونو نانوسیال حداکثر تا $0/7$ گزارش شد. آل اران و همکاران [۱۴] با استفاده از نانوذرات اکسید آلومینیوم، اکسید سریم و اکسید مس و سیال پایه سیلترم ۸۰۰ به مطالعه اثر نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال بر عملکرد انرژی و انرژی یک کلکتور سهموی خطی پرداختند. مطالعه آن‌ها نشان داد که بیشترین افزایش راندمان انرژی و انرژی نانوسیال نسبت به سیال پایه با استفاده از نانوسیال هیبریدی اکسید آلومینیوم - اکسید سریم و سیال پایه سیلترم ۸۰۰ به دست می‌آید و به ترتیب برابر با $1/09$ و $1/03$ است. آن‌ها همچنین افزایش عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت این نانوسیال هیبریدی را نسبت به سیال پایه به ترتیب برابر با $1.67/8$ و $2.0/7$ اعلام کردند. منبری و همکاران [۱۵] با استفاده از نانوسیال هیبریدی، عملکرد حرارتی یک کلکتور خورشیدی سهموی خطی جذب مستقیم را به طور تجربی مطالعه کردند. نانوسیال مورد آزمایش از ترکیب دو نانوذره اکسید مس و اکسید آلومینیوم با کسر حجمی‌های مختلف در سیال پایه آب و آب - اتیلن گلیکول ساخته شده بود. آن‌ها مشاهده کردند که راندمان انرژی کلکتور خورشیدی با استفاده از نانوسیال هیبریدی بیشتر از مونو نانوسیال است. مینا و مگلانی [۱۶] جریان آرام نانوسیال هیبریدی را در یک کلکتور سهموی خطی به صورت عددی مطالعه کردند. آن‌ها از نانوسیال‌های هیبریدی مختلفی شامل، Cu/MgO ، Cu/Al_2O_3 و Co_3O_4/GO و سیالات پایه آب و مخلوط آب و اتیلن گلیکول استفاده کردند. آن‌ها گزارش دادند که بیشترین افزایش برای عدد ناسلت متوسط با استفاده از نانوسیال هیبریدی

مس / اکسید منیزیم - آب در کسر حجمی ۲٪ رخ می‌دهد و مقدار این افزایش نسبت به عدد ناسلت سیال پایه برابر ۱۴٪ است. اخیراً در یک مطالعه عددی، عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی یک کلکتور سهموی خطی با استفاده از نانوسیال هیبریدی توسط اکیسلر و همکاران [۱۷] انجام شده است. آن‌ها از نانوسیال‌های هیبریدی ZnO/Ag - سیلترم ۸۰۰، TiO_2/Ag - سیلترم ۸۰۰ و MgO/Ag - سیلترم ۸۰۰ و کسر حجمی ۱، ۲، ۳ و ۴٪ استفاده کرده‌اند. جریان سیال داخل کلکتور به صورت مغشوش در نظر گرفته شده است. نتایج آن‌ها نشان داده است که راندمان انرژی کلکتور با افزایش عدد رینولدز، کاهش و با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که کاراترین سیال عامل کلکتور، نانوسیال هیبریدی نقره/اکسید منیزیم - سیلترم ۸۰۰ با کسر حجمی ۴٪ است.

بر اساس مطالعات گذشته و با مرور منابع و متون علمی مشاهده می‌شود که مطالعه و بررسی عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی سیستم‌های خورشیدی با استفاده از نانوسیال هیبریدی کم است و بیشتر در مورد خواص ترموفیزیکی این نوع نانوسیال بحث شده است [۹ و ۱۸]. تعداد مطالعات مربوط به عملکرد نانوسیال هیبریدی در کلکتورهای سهموی خطی نیز اندک است. در جدول (۱) اهم این مطالعات آورده شده است. از طرفی دیگر نانولوله‌های کربنی چنددیواره نسبت به دیگر نانوذرات، به علت داشتن محتوای انرژی بالا، بیشترین تأثیر را بر نرخ انتقال حرارت دارند [۴]. مطالعات نشان داده است که بیشترین مقدار راندمان انرژی کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت هنگامی حاصل می‌شود که نانوذرات از نوع نانولوله‌های کربنی چنددیواره مورد استفاده قرار گرفته باشد [۱۹ و ۲۰]. این موضوع در کلکتور خورشیدی لوله U شکل نیز نتیجه شده است [۲۱].

بر اساس دانش نویسندگان، تاکنون مطالعه عملکرد کلکتور سهموی خطی با استفاده از نانوسیال هیبریدی $MWCNTs/Fe_3O_4$ - ترمینول وی پی ۱ صورت نگرفته است. مطالعات گذشته نشان داده است که هر چه رسانایی حرارتی نانوذره بیشتر باشد، میزان راندمان انرژی بزرگ‌تری برای کلکتور خورشیدی حاصل می‌شود [۳]. با توجه به قابلیت هدایت حرارتی بسیار بالای نانوذرات نانولوله‌های کربنی چنددیواره از یک طرف و دارا بودن محتوای انرژی زیاد آن‌ها از طرف دیگر، مطالعه عملکرد کلکتور خورشیدی سهموی خطی با استفاده از این نانوذره و ترکیب آن با یک نانوذره اکسید فلزی موضوع مهمی برای تحقیق است. به همین دلیل در مطالعه حاضر اثر

نانوسیال هیبریدی $MWCNTs/Fe_3O_4$ - ترمینول وی پی ۱ و حرارتی و هیدرودینامیکی کلکتور سهموی خطی به صورت تئوری همچنین مونو نانوسیال اکسید آهن- ترمینول وی پی ۱ بر عملکرد مورد نظر قرار گرفته است.

جدول (۱): مطالعات گذشته کلکتور سهموی خطی با استفاده از نانوسیال هیبریدی در رژیم جریان مغشوش

ردیف	محققان	نانوسیال هیبریدی	روابط مورد استفاده برای خواص ترموفیزیکی	افزایش راندمان انرژی %	روش مطالعه
۱	بلوس و تیزوانیدیس [۱۳]	اکسید آلومینیم/ دی اکسید تیتانیم- سیلترم ۸۰۰	ماکسول [۲۲]، برینکمن [۲۳]	۱/۸	مدل سازی (تئوری)
۲	آل اران و همکاران [۱۴]	اکسید آلومینیم/ اکسید سریم- سیلترم ۸۰۰	ماکسول [۲۲]، برینکمن [۲۳]	۱/۰۹	مدل سازی (تئوری)
		اکسید آلومینیم/ اکسید مس- سیلترم ۸۰۰		۱/۰۸	
۳	اکسیلر و همکاران [۱۷]	نقره/ اکسید روی- سیلترم ۸۰۰	ماکسول [۲۲]، برینکمن [۲۳]	۱۲/۴	شبه سازی (عددی)
		نقره/ دی اکسید تیتانیم- سیلترم ۸۰۰		۱۳/۲	
		نقره/ اکسید منیزیم- سیلترم ۸۰۰		۱۴/۲	

جدول (۲): مشخصات ابعادی و خواص نوری کلکتور مورد مطالعه

[۱۳]

مقدار	پارامتر
۰/۰۶۶	قطر داخلی لوله جاذب، D_{fi} (m)
۰/۰۷۰	قطر خارجی لوله جاذب، D_{fo} (m)
۰/۱۰۹	قطر داخلی پوشش شیشه‌ای، D_{ci} (m)
۰/۱۱۵	قطر داخلی پوشش شیشه‌ای، D_{co} (m)
۷/۸	طول کلکتور و لوله جاذب، L (m)
۵	عرض کلکتور، W (m)
۰/۹۶	ضریب جذب لوله جاذب، α
۰/۹۵	ضریب عبور پوشش شیشه‌ای، τ
۰/۸۶	ضریب صدور پوشش شیشه‌ای، ε_c
۱	ضریب دریافت، γ
۰/۸۲۷	ضریب انعکاس منعکس کننده، ρ_m
۰	زاویه برخورد تابش، θ

شایان ذکر است که در محاسبه ضریب انعکاس منعکس کننده، پارامترها و خطاهای مختلفی منظور شده است. بر این اساس اثر سایه، خطای چرخش، خطاهای هندسی، تمیزی منعکس کننده و تمیزی پوشش شیشه‌ای در هنگام محاسبه این پارامتر در نظر گرفته شده است [۲۴].

جدول (۳): پارامترهای مورد استفاده در کار حاضر [۱۳]

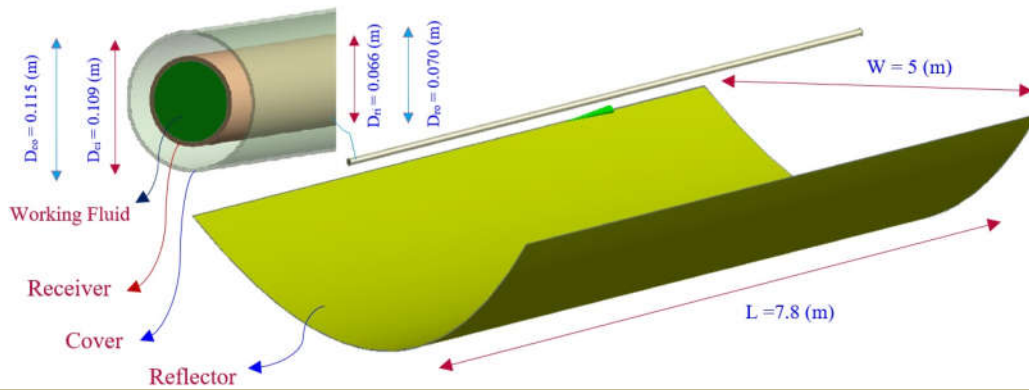
مقدار	پارامتر
۱۰۰۰	تشدید مستقیم برخوردی به کلکتور، G_b (W/m^2)
۳۰۰	دمای محیط، T_{amb} (K)
۱	سرعت باد، V_{wind} (m/s)
۲۹۸	دمای مرجع، T_0 (K)

۲. مواد و روش‌ها

کلکتور در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر یک کلکتور سهموی خطی مدل LS- 2 است. این کلکتور در مطالعات قبلی نانوسیال‌های هیبریدی نیز به کار گرفته شده است [۱۳ و ۱۴]. طرح‌واره این کلکتور به همراه ابعاد بخش‌های مختلف آن در شکل (۱) ترسیم شده است. در جدول (۲) نیز علاوه بر ابعاد اجزای مختلف کلکتور، دیگر مشخصات مورد نیاز از جمله خواص نوری آن آورده شده است. در تحلیل حاضر سیال به صورت نیوتنی و غیرقابل تراکم و رژیم جریان سیال، مغشوش فرض شده است. همچنین از تولید حرارت و نیروهای خارجی صرف نظر شده است. شرایط محیطی و تابش خورشید در جدول (۳) منعکس شده است [۱۳]. در ادامه، مدل سازی ریاضی و روابط و خواص نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال بیان شده است.

۱.۲. مدل سازی ریاضی

تابش خورشید پس از برخورد به منعکس کننده به طرف لوله جاذب بازتابیده می شود. مقدار جذب تشعشع توسط سیال عامل به مقدار تشعشع و خواص نوری منعکس کننده، پوشش شیشه‌ای و لوله جاذب بستگی دارد و همه تابش منعکس شده جذب نمی شود و بخشی از آن تلف می شود. بنابراین با در نظر گرفتن اتلافات، موازنه انرژی در حالت پایدار نوشته می شود. در بیرون از پوشش شیشه‌ای اتلافات شامل تلفات جابه جایی ناشی از اثر باد و تلفات تشعشع بین پوشش و آسمان است. با در نظر گرفتن خلأ بین لوله جاذب و پوشش، از اتلافات جابه جایی صرف نظر می شود و فقط تلفات تشعشع بین لوله جاذب و پوشش شیشه‌ای منظور می شود.



شکل (۱): طرح کلکتور مورد مطالعه به همراه ابعاد دریافت کننده و پوشش شیشه‌ای

می‌شود [۲۶]:

$$Q_u = Q_{abs} - Q_{loss} \quad (۶)$$

اتلافات حرارتی بین لوله جاذب و پوشش شیشه‌ای از رابطه

زیر حاصل می‌شود [۲۶]:

$$Q_{loss} = 2\pi k_{eff} L \frac{T_r - T_c}{\ln\left(\frac{D_{ci}}{D_{ro}}\right)} + \pi D_{ro} L \sigma \frac{T_r^4 - T_c^4}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{1 - \epsilon_c}{\epsilon_c} \left(\frac{D_{ro}}{D_{ci}}\right)} \quad (۷)$$

که در آن T_r دمای متوسط لوله جاذب (K) و T_c دمای متوسط پوشش شیشه‌ای (K) است. با در نظر گرفتن خلأ بین لوله جاذب و پوشش شیشه‌ای، اتلافات حرارتی در این قسمت فقط شامل اتلافات تشعشعی است که بر اساس رابطه زیر بیان می‌شود [۲۶]:

$$Q_{loss} = \pi D_{ro} L \sigma \frac{T_r^4 - T_c^4}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{1 - \epsilon_c}{\epsilon_c} \left(\frac{D_{ro}}{D_{ci}}\right)} \quad (۸)$$

اتلافات حرارتی بین پوشش شیشه‌ای و محیط شامل اتلافات جابه‌جایی با هوای محیط و اتلافات تشعشعی با آسمان است که بر اساس رابطه زیر به دست می‌آید [۲۶]:

$$Q_{loss} = \pi D_{co} L \sigma \epsilon_c (T_c^4 - T_{sky}^4) + \pi D_{co} L h_{out} (T_c - T_{amb}) \quad (۹)$$

که در آن T_{sky} دمای آسمان (K) است و بر اساس رابطه (۱۰) حاصل می‌شود [۲۸]:

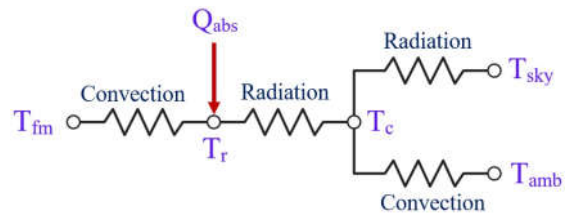
$$T_{sky} = 0.0553 T_{amb}^{1.5} \quad (۱۰)$$

در رابطه (۹)، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین پوشش شیشه‌ای و محیط اطراف (W/m^2K) است و بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۹]:

$$h_{out} = 4V_{wind}^{0.58} D_{co}^{-0.42} \quad (۱۱)$$

ضریب صدور دریاقت‌کننده با پوشش سرمت^۲ از رابطه زیر به

چگونگی انتقال حرارت در دریافت‌کننده کلکتور بین سیال عامل و محیط در شکل (۲) ترسیم شده است.



شکل (۲): مدار معادل حرارتی بین سیال عامل و محیط اطراف

برای حل معادلات حاکم بر مسئله حاضر از نرم‌افزار حلگر معادلات مهندسی (EES) استفاده شده است [۲۵].

مساحت دهانه کلکتور با در نظر گرفتن اثر سایه لوله دریافت‌کننده بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$A_a = (W - D_{co}) L \quad (۱)$$

مقدار تشعشع قابل دسترس در دهانه کلکتور عبارت است از [۱۳]:

$$Q_s = A_a G_b \quad (۲)$$

مقدار انرژی جذب‌شده توسط دریافت‌کننده مطابق با رابطه (۳) به دست می‌آید [۱۳]:

$$Q_{abs} = \eta_{op} Q_s \quad (۳)$$

که در آن، η_{op} نشان‌دهنده راندمان نوری کلکتور است. راندمان نوری کلکتور با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است [۳]:

$$\eta_{op} = \rho_m \gamma \tau \alpha K_0 \quad (۴)$$

که در آن، k_0 بیانگر بهینه‌ساز زاویه برخوردی است و برای کلکتور LS-2 با استفاده از رابطه زیر حاصل می‌شود [۲۷]:

$$K_0 = \frac{1}{\cos \theta} (\cos \theta + 0.0008840 - 0.000053690 \theta^2) \quad (۵)$$

انرژی مفید به دست آمده، اختلاف انرژی جذب‌شده توسط دریافت‌کننده و اتلافات حرارتی است که به صورت زیر بیان

دست می‌آید [۳۰]:

$$\varepsilon_r = 0.05599 + 1.039 \times 10^{-4} T_r + 2.249 \times 10^{-7} T_r^2 \quad (12)$$

انرژی مفید خروجی از دریافت‌کننده به سیال انتقال حرارت می‌رسد که به صورت زیر بیان می‌شود [۲۶]:

$$Q_u = \pi D_n L h (T_r - T_{fm}) \quad (13)$$

که در آن h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال (W/m^2K) و T_{fm} دمای میانگین سیال (K) است. محاسبه دمای میانگین سیال عامل به صورت زیر است [۳۱]:

$$T_{fm} = \frac{T_{out} - T_{in}}{\ln \left(\frac{T_{out}}{T_{in}} \right)} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، T_{out} و T_{in} به ترتیب دمای ورودی و خروجی سیال عامل (K) هستند. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۲]:

$$h = \frac{Nu \cdot k_{bf}}{D_n} \quad (15)$$

که در آن k_{bf} قابلیت هدایت حرارتی سیال پایه (W/mK) و Nu بیانگر عدد ناسلت است و برای محاسبه آن برای سیال پایه از رابطه دیتوس-بولتر استفاده می‌شود [۳۳]:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (16)$$

که در آن Re عدد رینولدز و Pr عدد پرانتل است که به ترتیب با استفاده از روابط (۱۷) و (۱۸) تعریف می‌شوند [۳۳].

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D_n \mu} \quad (17)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (18)$$

در روابط (۱۷) و (۱۸) \dot{m} دبی جرمی کلکتور برحسب (kg/s)، μ و c_p به ترتیب لزجت دینامیکی (Pas)، گرمای ویژه (J/kgK) و قابلیت هدایت حرارتی (W/mK) سیال عامل کلکتور هستند.

سیام ساندر و همکاران [۳۴] بر اساس داده‌های تجربی، رابطه‌ای برای عدد ناسلت مونو نانوسیال اکسید آهن-آب ارائه کردند. این رابطه همانند اکثر روابط ارائه‌شده برحسب متغیرهای وابسته‌ای همانند عدد رینولدز، عدد پرانتل و کسر حجمی نانوذر است و به صورت رابطه (۱۹) بیان شده است [۳۴].

$$Nu = 0.02172 Re^{0.8} Pr^{0.5} (1 + \phi)^{0.5181} \quad (19)$$

که در آن ϕ کسر حجمی ذرات نانو است که در بازه ۰ تا ۰/۰۶٪ تعریف می‌شود. همچنین عدد رینولدز در بازه ۳۰۰۰ تا ۲۲۰۰۰ و عدد پرانتل در بازه ۳/۷۲ تا ۶/۵۰ تعریف شده است.

عدد ناسلت نانوسیال هیبریدی MWCNTs/اکسید آهن-آب از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$Nu = 0.02155 Re^{0.8} Pr^{0.5} (1 + \phi)^{0.78} \quad (20)$$

برای استفاده از رابطه (۲۰) کسر حجمی باید بین ۰ تا ۰/۳، عدد رینولدز بین ۳۰۰۰ تا ۲۲۰۰۰ و عدد پرانتل بین ۴/۵۰ تا ۶/۱۳ باشد [۱۱].

انرژی مفید به دست آمده، صرف افزایش دمای سیال عامل می‌شود. دمای سیال عامل خروجی از کلکتور سهموی خطی از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود [۲۶].

$$Q_u = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (21)$$

راندمان انرژی کلکتور، نسبت انرژی مفید به دست آمده به مقدار انرژی جذب شده است که به صورت زیر بیان می‌شود [۲۶]:

$$\eta_{en} = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (22)$$

برای محاسبه ضریب اصطکاک سیال پایه از رابطه بلازیوس [۳۴]، مونو نانوسیال Fe_3O_4 از رابطه ساندر و همکاران [۳۴] و نانوسیال هیبریدی MWCNT/ Fe_3O_4 از رابطه ساندر و همکاران [۱۱] استفاده می‌شود که به ترتیب توسط روابط (۲۳) تا (۲۵) بیان می‌شوند.

$$f = \frac{4 \times 0.0791}{Re^{0.25}} \quad (23)$$

$$f = 0.3491 Re^{-0.25} (1 + \phi)^{0.1517} \quad (24)$$

$$f = 0.3108 Re^{-0.245} (1 + \phi)^{0.42} \quad (25)$$

در رابطه (۲۳) عدد رینولدز بین 10^5 تا 10^6 و در روابط (۲۴) و (۲۵) بین ۳۰۰۰ تا ۲۲۰۰۰ است. عدد پرانتل در رابطه (۲۴) بین ۳/۷۲ تا ۶/۵۰ و در رابطه (۲۵) بین ۳/۷۲ تا ۶/۳۷ است. کسر حجمی نیز برای روابط (۲۴) و (۲۵) بین ۰ تا ۰/۶ تعریف شده است.

اگر انرژی مفید جریان برحسب رابطه زیر بیان می‌شود [۱۳]:

$$E_u = Q_u - \dot{m} c_p T_0 \ln \left(\frac{T_{out}}{T_{in}} \right) \quad (26)$$

که در آن T_0 دمای مرجع برحسب (K) است.

با توجه به اینکه در کلکتورهای خورشیدی سهموی خطی فقط از تشعشع مستقیم استفاده می‌شود، برای محاسبه انرژی خورشیدی قانون پتلا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۵].

$$E_s = Q_s \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}} \right)^4 \right] \quad (27)$$

که در آن T_{sun} دمای خورشید است و برابر با (K) ۵۷۷۰ در نظر گرفته شده است [۱۳].

راندمان انرژی کلکتور بر اساس رابطه زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$\eta_{ex} = \frac{E_u}{E_s} \quad (28)$$

۲.۲. روابط و خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوسیال

سیال پایه در مطالعه حاضر ترمینول وی پی ۱ در نظر گرفته شده است. ترمینول وی پی ۱ قبلاً نیز در مطالعه کلکتور پارابولیک به کارگیری شده است [۳۶ و ۳۷]. خواص ترموفیزیکی سیال پایه وابسته به دما در نظر گرفته شده است و از روابطی که قبلاً توسعه داده شده، استفاده می‌شود. در روابط (۲۹) تا (۳۲)، خواص ترموفیزیکی سیال پایه شامل چگالی ρ_{bf} برحسب (kg/m^3) ، گرمای ویژه cp_{bf} برحسب (J/kgK) ، قابلیت هدایت حرارتی k_{bf} برحسب (W/mK) و لزجت دینامیکی μ_{bf} برحسب $(mPas)$ آورده شده است [۳۶].

$$\rho_{bf} = 1.4386 \times 10^3 - 1.8711 \times T + 2.737 \times 10^{-3} T^2 - 2.3793 \times 10^{-6} T^3 \quad (29)$$

$$Cp_{bf} = 2.125 \times 10^3 - 11.017 \times T + 0.049862 T^2 - 7.7663 \times 10^{-5} T^3 + 4.394 \times 10^{-8} T^4 \quad (30)$$

$$k_{bf} = 0.14644 + 2.0353 \times 10^{-5} T - 1.9367 \times 10^{-7} T^2 + 1.0614 \times 10^{-11} T^3 \quad (31)$$

$$\mu_{bf} = 23.165 - 0.1476 T + 3.61710^{-4} T^2 - 3.9844 \times 10^{-7} T^3 + 1.6543 \times 10^{-10} T^4 \quad (32)$$

در رابطه (۳۲) لزجت دینامیکی برای بازه دمایی بین ۳۷۳/۱۵ تا ۶۹۸/۱۵ و برحسب $(mPas)$ است.

خواص ترموفیزیکی نانوذرات مورد استفاده در مطالعه حاضر

در جدول (۴) آورده شده است. با در نظر گرفتن MWCNTs به عنوان نانوذره ۱ و Fe_3O_4 به عنوان نانوذره ۲ برای محاسبه کسر حجمی و خواص ترموفیزیکی نانوکامپوزیت MWCNTs/ Fe_3O_4 از روابط (۳۳) تا (۳۶) به شرح زیر استفاده می‌شود [۱۷]:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (33)$$

$$\rho_{np} = \frac{\phi_1 \rho_{np1} + \phi_2 \rho_{np2}}{\phi} \quad (34)$$

$$c_{p,np} = \frac{\phi_1 c_{p,np1} + \phi_2 c_{p,np2}}{\phi} \quad (35)$$

$$k_{np} = \frac{\phi_1 k_{np1} + \phi_2 k_{np2}}{\phi} \quad (36)$$

خواص ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال مطابق به شرح زیر از روابط (۳۷) تا (۴۰) محاسبه می‌شوند [۱۷]:

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np} \quad (37)$$

$$c_{p,nf} = \frac{(1-\phi)\rho_{bf}c_{p,bf} + \phi\rho_{np}c_{p,np}}{\rho_{nf}} \quad (38)$$

$$k_{nf} = k_{bf} \left(\frac{k_{np} + 2k_{bf} + 2(k_{np} - k_{bf})\phi}{k_{np} + 2k_{bf} - (k_{np} - k_{bf})\phi} \right) \quad [22] \quad (39)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{bf}}{(1-\phi)^{2.5}} \quad [23] \quad (40)$$

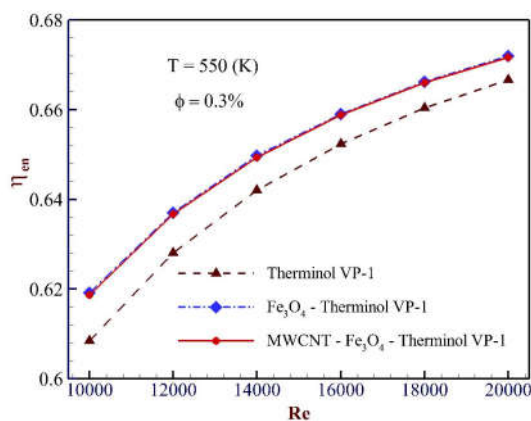
در شکل (۳) مراحل حل مدل حرارتی نشان داده شده است. شایان ذکر است که شبیه‌سازی‌ها همه با استفاده از نرم‌افزار (EES) صورت گرفته‌اند.

محاسبات جریان	محاسبات انرژی و آگزری	داده‌های ورودی
$Re = 4\dot{m} / \pi D_{ii} \mu$ $Pr = \mu c_p / k$ $Nu_{bf} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$ $Nu_{mono,nf} = 0.02172 Re^{0.8} Pr^{0.5} (1+\phi)^{0.5181}$ $Nu_{hyb,nf} = 0.02155 Re^{0.8} Pr^{0.5} (1+\phi)^{0.78}$ $f_{bf} = 0.3164 / Re^{0.25}$ $f_{mono,nf} = 0.3491 Re^{-0.25} (1+\phi)^{0.1517}$ $f_{hyb,nf} = 0.3108 Re^{-0.245} (1+\phi)^{0.42}$ $h = Nu_{k_{bf}} / D_{ii}$	$Q_s = A_s G_b$ $Q_{abs} = Q_s \eta_{opt}$ $Q_{abs} = Q_u + Q_{loss}$ $Q_u = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})$ $\eta_{en} = Q_u / Q_s$ $Q_{loss} = [A_{ro} \sigma (T_r^4 - T_c^4)] / [(1/\epsilon_r) + ((1-\epsilon_c) / \epsilon_c) (A_{ro} / A_{ci})]$ $Q_{loss} = A_{co} h_{out} (T_c - T_{amb}) + A_{co} \sigma \epsilon_c (T_c^4 - T_{sky}^4)$ $Q_u = h A_{ci} (T_r - T_{fm})$ $E_u = Q_u - \dot{m} c_p T_0 \ln(T_{out} / T_{in})$ $E_s = Q_s [1 - (4/3)(T_0 / T_{sun}) + (1/3)(T_0 / T_{sun})^4]$ $PEC = (Nu_{nf} / Nu_{bf}) / (f_{nf} / f_{bf})^{1/3}$ $\eta_{ex} = E_u / E_s$	<p>سیال عامل</p> \dot{m} T_{in} <p>پارامترهای شبیه سازی</p> $G_b = 1000 (W/m^2)$ $T_{atm} = 300 (K)$ $T_{sun} = 5770 (K)$ $T_0 = 298 (K)$ <p>داده‌های کلکتور</p> $L = 7.8 (m)$ $W = 5 (m)$ $D_{ri} = 0.066 (m)$ $D_{ro} = 0.070 (m)$ $D_{ci} = 0.109 (m)$ $D_{co} = 0.115 (m)$ $\epsilon_c = 0.86$ $\alpha = 0.96$ $\tau = 0.95$ $\gamma = 1$ $\rho_m = 0.827$ $\theta = 0$
نتایج خروجی	محاسبات خواص نانوسیال	
<p>راندمان انرژی، η_{en}</p> <p>راندمان آگزری، η_{ex}</p> <p>دمای خروجی، T_{out}</p> <p>ضریب انتقال حرارت، h</p> <p>ضریب اصطکاک، f</p> <p>بازده حرارتی - هیدروپنوماتیک، PEC</p>	$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np}$ $c_{p,nf} = [(1-\phi)\rho_{bf}c_{p,bf} + \phi\rho_{np}c_{p,np}] / \rho_{nf}$ $k_{nf} = k_{bf} [(k_{np} + 2k_{bf} + 2(k_{np} - k_{bf})\phi) / (k_{np} + 2k_{bf} - (k_{np} - k_{bf})\phi)]$ $\mu_{nf} = \mu_{bf} (1-\phi)^{2.5}$	

شکل (۳): روش حل مدل حرارتی توسعه داده شده در حلگر معادلات مهندسی

کسر حجمی ۰/۳٪ انجام شده، به طوری که در نانوسیال هیبریدی نسبت کسر حجمی MWCNTs به Fe_3O_4 مطابق با [۱۱] برابر با ۲۶ به ۷۴ در نظر گرفته شده است. دمای محاسباتی در بازه ۵۰۰ تا ۶۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. در واقع در مطالعه حاضر عدد پراتنل در بازه ۴/۵۰ تا ۶/۱۳ و عدد رینولدز در بازه 10^4 تا 2×10^4 به عنوان قیدهای مسئله در نظر گرفته شده‌اند.

یکی از پارامترهای مهم مورد نظر در مطالعه کلکتورهای خورشیدی بحث راندمان انرژی آن‌هاست. اغلب مطالعات انجام شده با استفاده از نانوسیال‌ها در کلکتورهای سهموی خطی، افزایش راندمان انرژی کلکتور را گزارش کرده‌اند [۳]. در شکل (۵) راندمان انرژی کلکتور خورشیدی با استفاده از سیال‌های عامل مختلف شامل سیال پایه ترمینول وی پی ۱، مونو نانوسیال اکسید آهن- ترمینول وی پی ۱ و نانوسیال هیبریدی MWCNT/ اکسید آهن- ترمینول وی پی ۱ در اعداد رینولدز مختلف و دمای ۵۵۰ کلوین و کسر حجمی ۰/۳٪ نشان داده شده است.



شکل (۵): تغییرات راندمان انرژی کلکتور سهموی خطی بر حسب عدد رینولدز با استفاده از سیال‌های کاری مختلف در دمای (K) ۵۵۰ و کسر حجمی ۰/۳٪

شکل (۵) نشان می‌دهد که برای هر سه سیال عامل، با افزایش عدد رینولدز راندمان انرژی کلکتور افزایش می‌یابد. افزایش عدد رینولدز باعث افزایش عدد ناسلت شده و متعاقب آن افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را به همراه دارد. در نتیجه، مقدار انرژی مفید کلکتور افزایش یافته، باعث افزایش راندمان انرژی می‌شود. با مشاهده شکل (۵) نتیجه گرفته می‌شود که راندمان انرژی کلکتور خورشیدی با استفاده از مونو نانوسیال نسبت به استفاده از سیال پایه بیشتر است.

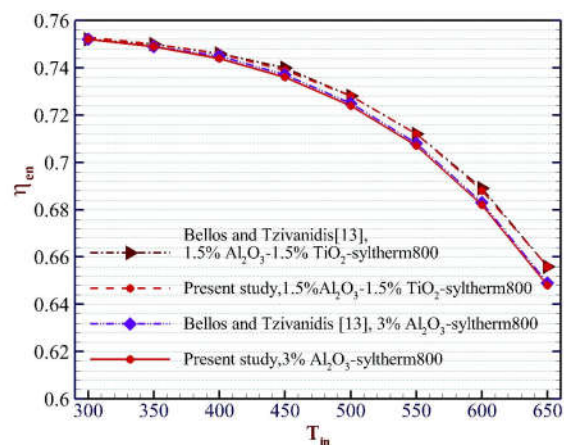
همچنین از شکل (۵) مشاهده می‌شود که راندمان انرژی کلکتور هنگام استفاده از نانوسیال هیبریدی نسبت به مونو نانوسیال

جدول (۴): خواص ترموفیزیکی نانوذرات مورد مطالعه [۵ و ۳۴]

نانوذره	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kgK)	k (W/mK)
MWCNTs	۱۶۰۰	۷۹۶	۳۰۰۰
Fe_3O_4	۵۱۸۰	۶۷۰	۸۰/۴

۳. بررسی صحت نتایج روش مطالعه حاضر با کارهای گذشته مرتبط با نانوسیال هیبریدی

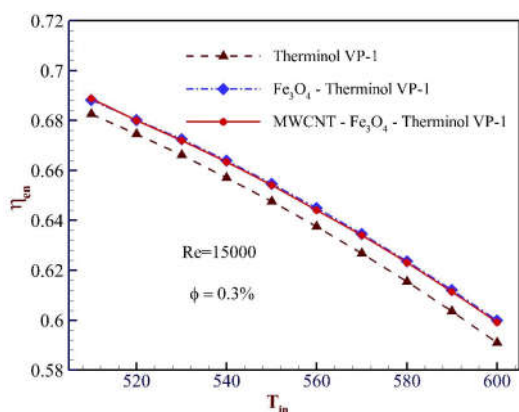
به منظور اعتبارسنجی مدل حرارتی توسعه داده شده در مطالعه حاضر، از کارهای گذشته مرتبط با نانوسیال هیبریدی استفاده شده است. بدین منظور مدل‌سازی برای نانوسیال‌ها و شرایط مطالعه بلوس و تزیوانیدیس [۱۳] انجام شده است. در شکل (۴) راندمان انرژی کلکتور خورشیدی سهموی خطی به دست آمده برای مونو نانوسیال اکسید آلومینیوم- سیلترم ۸۰۰ در کسر حجمی ۰/۳٪ و نانوسیال هیبریدی اکسید آلومینیوم/دی اکسید تیتانیوم- سیلترم ۸۰۰ در کسر حجمی ۰/۳٪ و با نسبت ۵۰:۵۰، در دماهای مختلف با نتایج به دست آمده توسط بلوس و تزیوانیدیس [۱۳] مقایسه شده است. با مشاهده نتایج در شکل (۴) استنباط می‌شود که روش حل مطالعه حاضر از دقت بالایی برخوردار است.



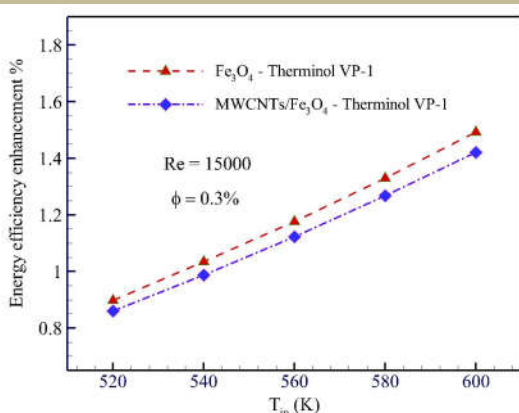
شکل (۴): مقایسه راندمان انرژی روش حل مطالعه حاضر با مرجع [۱۳] با استفاده از مونو نانوسیال اکسید آلومینیوم- سیلترم ۸۰۰ و نانوسیال هیبریدی اکسید آلومینیوم- دی اکسید تیتانیوم- سیلترم ۸۰۰

۴. نتایج و بحث‌ها

به منظور بررسی عملکرد کلکتور سهموی خطی با استفاده از نانوسیال هیبریدی و مقایسه آن با مونو نانوسیال و سیال پایه از دو نانوذره نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNTs) و اکسید آهن مگنتیت (Fe_3O_4) و سیال پایه روغن ترمینول وی پی ۱ (Therminol VP-1) استفاده شده است. محاسبات نانوسیال در

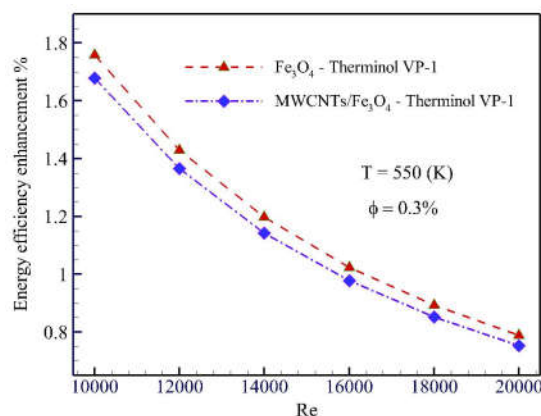


شکل (۷): تغییر راندمان انرژی کلکتور سهموی خطی با تغییر دمای ورودی با استفاده از سیال‌های کاری مختلف در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ و کسر حجمی ۰/۳٪



شکل (۸): تغییر میزان افزایش راندمان انرژی کلکتور هنگام استفاده از نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال نسبت به سیال پایه در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ و کسر حجمی ۰/۳٪ در دماهای ورودی مختلف

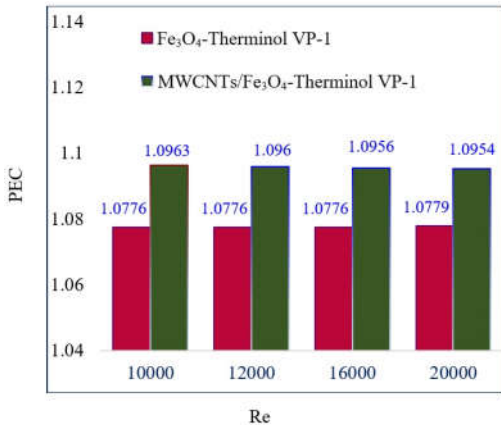
اندکی کاهش دارد. علت بیشتر بودن راندمان انرژی کلکتور با استفاده از مونو نانوسیال نسبت به دو سیال عامل دیگر، بیشتر بودن عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آن است. از طرف دیگر با افزایش عدد رینولدز میزان افزایش راندمان انرژی کلکتور با استفاده از نانوسیال‌ها نسبت به سیال پایه یک روند کاهشی را نشان می‌دهد (شکل (۶)). این موضوع ناشی از کم بودن میزان اتلافات در اعداد رینولدز بالاست. در اعداد رینولدز بالا، میزان آشفته‌گی جریان افزایش می‌یابد که متعاقب آن ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش و در نتیجه دمای صفحه جاذب کاهش می‌یابد. با کاهش دمای صفحه جاذب، میزان اتلافات کمتر می‌شود.



شکل (۶): تغییرات میزان افزایش راندمان انرژی کلکتور بر حسب عدد رینولدز با استفاده از نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال نسبت به سیال پایه در دمای ۵۵۰ (K) و کسر حجمی ۰/۳٪

مهم‌ترین پارامتری که در تحلیل هیدرودینامیکی مبدل‌های حرارتی با سیال عامل نانوسیال بررسی می‌شود، ضریب اصطکاک است. ضریب اصطکاک در کلکتورهای خورشیدی نقش مهمی در میزان افت فشار و توان پمپاژ دارد. به همین دلیل این پارامتر در مطالعه حاضر بررسی شده است. در شکل (۹) تغییرات ضریب اصطکاک برای سیال پایه، نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال در اعداد رینولدز مختلف و کسر حجمی ۰/۳٪ ترسیم شده است. کاهش ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز در مکانیک سیالات یک مطلب اثبات و در شکل (۹) نیز نشان داده شده است. از طرف دیگر، همان‌طور که از شکل (۹) مشاهده می‌شود، ضریب اصطکاک نانوسیال هیبریدی بیشتر از سیال پایه و کمتر از مونو نانوسیال است. به‌طور متوسط ضرایب اصطکاک نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال نسبت به ضریب اصطکاک سیال پایه به ترتیب ۰/۳٪ و ۰/۱۰٪ بیشتر هستند. همچنین به‌طور متوسط ضریب اصطکاک مونو نانوسیال

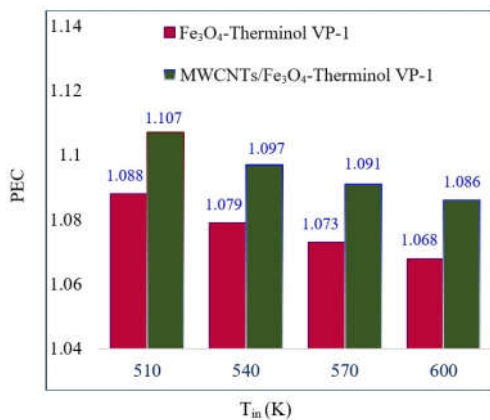
در شکل (۷) تغییرات راندمان انرژی کلکتور برای سه سیال عامل پیش‌گفته شده در دماهای مختلف ورودی نشان داده شده است. کاهش راندمان انرژی با افزایش دمای ورودی سیال در انواع کلکتورهای خورشیدی موضوعی شناخته شده است. افزایش دمای ورودی سیال عامل باعث افزایش دمای لوله جاذب می‌شود. متعاقب آن، تلفات حرارتی افزایش یافته است که این موضوع منجر به کاهش راندمان انرژی می‌شود. راندمان انرژی کلکتور سهموی خطی برای مونو نانوسیال اکسید آهن - ترمینول وی پی ۱ اندکی بیشتر از نانوسیال هیبریدی MWCNTs/ اکسید آهن - ترمینول وی پی ۱ است. این موضوع در شکل (۸) نیز مشخص شده است. همچنین از شکل (۸) مشاهده می‌شود که با افزایش دما، میزان بهبود راندمان انرژی کلکتور با استفاده از نانوسیال‌ها نسبت به سیال پایه بیشتر می‌شود. علت بیشتر بودن راندمان انرژی کلکتور وقتی که از نانوسیالات استفاده می‌شود، بالاتر بودن عدد ناسلت و متعاقب آن بیشتر بودن ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است.



شکل (۱۰): تغییرات بازده حرارتی- هیدرودینامیکی برحسب عدد رینولدز برای نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال در دمای (K) ۵۵۰ و کسر حجمی ۰/۳٪

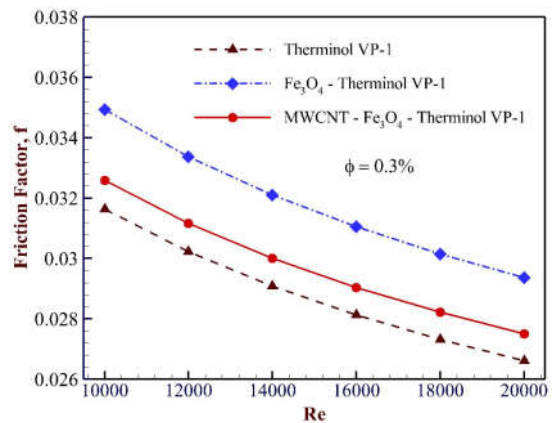
همچنین مطابق با شکل (۱۰) و شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که کلکتور خورشیدی سهموی خطی هنگام استفاده از نانوسیال هیبریدی عملکرد حرارتی بهتری نسبت به مونو نانوسیال دارد. برای مثال برای $Re=15000$ و $T_{in}=550$ (K) نسبت Nu_{nf}/Nu_{bf} و f_{nf}/f_{bf} برای نانوسیال هیبریدی به ترتیب برابر با $1/108$ و $1/103$ و برای مونو نانوسیال به ترتیب برابر $1/113$ و $1/104$ است. بر این اساس نسبت افزایش عدد ناسلت مونونانوسیال به نانوسیال هیبریدی حدود ۰/۵٪ است، درحالی‌که نسبت افزایش ضریب اصطکاک حدود ۰/۷٪ است و نقش بسیار زیادی در کمتر بودن PEC مونو نانوسیال نسبت به نانوسیال هیبریدی دارد.

با بررسی شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که در تمامی اعداد رینولدز، مقدار بازده حرارتی- هیدرودینامیکی نانوسیال هیبریدی بیشتر از مونو نانوسیال است. همچنین تغییرات آن برحسب عدد رینولدز نامحسوس است. در واقع افزایش عدد رینولدز باعث بیشتر شدن عملکرد حرارتی کلکتور نخواهد شد.



شکل (۱۱): تغییرات بازده حرارتی- هیدرودینامیکی برحسب دمای ورودی برای نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ و کسر حجمی ۰/۳٪

حدود ۰/۷٪ بیشتر از ضریب اصطکاک نانوسیال هیبریدی است.



شکل (۹): تغییر ضریب اصطکاک با عدد رینولدز با استفاده از سیال‌های عامل مختلف در دمای (K) ۵۵۰ و کسر حجمی ۰/۳٪

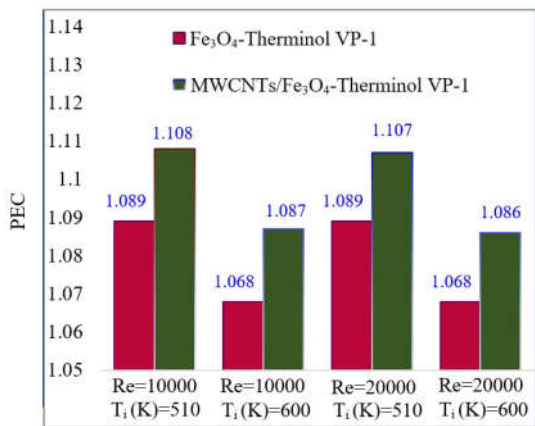
معیار ارزیابی عملکرد (PEC) یا بازده حرارتی- هیدرودینامیکی پارامتر مهمی در بررسی میزان کارایی و بهبود عملکرد حرارتی یک کلکتور خورشیدی است. این پارامتر، عملکرد هیدروترمال نیز نامیده می‌شود [۳۷]. PEC در واقع یک عدد بی‌بعد است که نسبت تغییر عملکرد حرارتی به تغییر عملکرد هیدرودینامیکی را نشان می‌دهد و رابطه آن به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۸]:

$$PEC = \frac{Nu_{nf}/Nu_{bf}}{(f_{nf}/f_{bf})^{\frac{1}{3}}} \quad (41)$$

هنگامی که از نانوسیال به جای سیال پایه استفاده می‌شود، مقدار PEC باید بزرگ‌تر از ۱ باشد که نشان‌دهنده سودمندی و بهبود انتقال حرارت با استفاده از نانوسیال است. با وجود این اگر مقدار PEC کمتر از ۱ باشد نباید از نانوسیال استفاده شود.

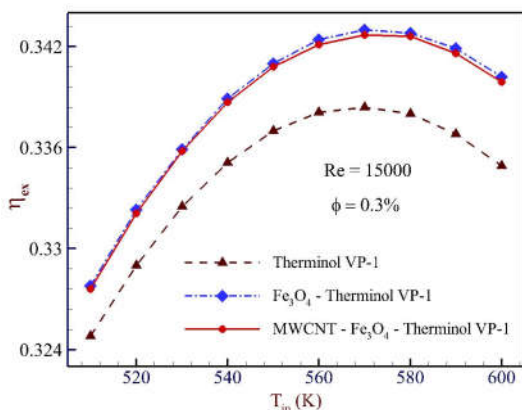
معیار ارزیابی عملکرد کلکتور سهموی خطی با استفاده از نانوسیال هیبریدی MWCNTs/اکسید آهن- سیلترم ۸۰۰ و مونو نانوسیال اکسید آهن- سیلترم ۸۰۰ برحسب عدد رینولدز در دمای (K) ۵۵۰ و کسر حجمی ۰/۳٪ در شکل (۱۰) و برحسب دمای ورودی در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ و کسر حجمی ۰/۳٪ در شکل (۱۱) ترسیم شده است. همان طور که از شکل (۱۰) و شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، بازده حرارتی- هیدرودینامیکی نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال بزرگ‌تر از ۱ است و در واقع نشان‌دهنده سودمندی نانوسیال هیبریدی MWCNTs/اکسید آهن- سیلترم ۸۰۰ و مونو نانوسیال اکسید آهن- سیلترم ۸۰۰ در کلکتور سهموی خطی مدل LS-2 در دما و اعداد رینولدز مورد مطالعه در کار حاضر است.

1. Performance evaluation criterion



شکل (۱۳): بیشترین و کمترین میزان بازده حرارتی - هیدرودینامیکی برای نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال

برای سیال پایه و نانوسیال‌ها، راندمان آگرژری یک مقدار بیشینه در دمای (K) ۵۷۰ دارد که این مقدار بیشینه آگرژری برای سیال پایه برابر با ۳۳/۸۴٪ و برای نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال به ترتیب برابر با ۳۴/۲۷٪ و ۳۴/۳٪ است. افزایش دمای ورودی منجر به افزایش فاکتور آگرژری ($I-T_0/T_{fm}$) می‌شود، ولی به‌طور همزمان باعث کاهش راندمان انرژی می‌شود (شکل (۷)). در واقع حرارت در دماهای بالا دارای کیفیت بالاتر و مقدار کمتر است [۴۶]. بر این اساس، وجود یک مقدار بیشینه در شکل (۱۴) در اثر این دو عامل است. شایان ذکر است که منظور از مقدار حرارت در واقع همان حرارت مفید (Q_u) است که در دماهای بالا بر اثر زیاد شدن اتلافات حرارتی مقدار آن کمتر می‌شود.



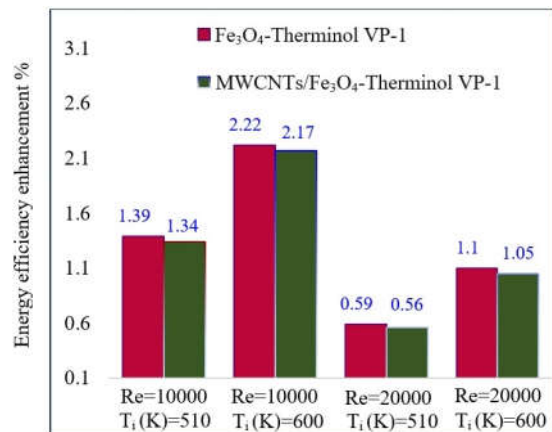
شکل (۱۴): راندمان آگرژری کلکتور در دماهای مختلف مورد بررسی برای سیال‌های عامل مختلف

از طرفی دیگر، شکل (۱۴) نشان می‌دهد که راندمان آگرژری کلکتور خورشیدی با استفاده از نانوسیال بیشتر از سیال پایه است. همچنین از شکل (۱۵) دیده می‌شود که با افزایش دمای ورودی میزان افزایش راندمان آگرژری نانوسیال‌ها نسبت به سیال پایه نیز بیشتر می‌شود.

از طرفی دیگر، با توجه به شکل (۱۱) در تمام دماهای مورد بررسی، عملکرد کلکتور با استفاده از نانوسیال هیبریدی بهتر از مونو نانوسیال است. همچنین با افزایش دما بازده حرارتی - هیدرودینامیکی کاهش می‌یابد که علت آن کاهش نسبت عدد ناسلت با افزایش دماست. در واقع کلکتور در دماهای کمتر (در بازه دمایی مورد بررسی) عملکرد حرارتی بهتری دارد.

به‌منظور مشخص کردن بیشترین و کمترین مقدار افزایش راندمان انرژی کلکتور و همچنین بازده حرارتی - هیدرودینامیکی که در شرایط مسئله حاضر رخ می‌دهد، شکل‌های شکل (۱۲) و شکل (۱۳) تهیه و ارائه شده‌اند. همان‌طور که از شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، بیشترین میزان افزایش راندمان انرژی کلکتور در کمترین عدد رینولدز و بیشترین دمای حاکم بر مسئله رخ می‌دهد. بیشترین مقدار بهبودی راندمان انرژی کلکتور برای نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال به ترتیب برابر با ۲/۱۷٪ و ۲/۲۲٪ است. از طرفی دیگر مطابق با شکل (۱۳)، بیشترین PEC در کمترین دما رخ داده است، حال آنکه تغییرات عدد رینولدز تأثیری بر بازده نداشته است. بر این اساس بیشترین مقدار بازده حرارتی - هیدرودینامیکی کلکتور برای نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال به ترتیب برابر با ۱/۰۸ و ۱/۰۸۹ است.

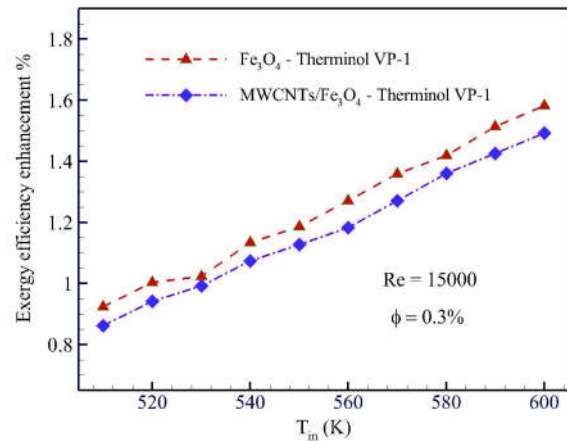
راندمان آگرژری کلکتور خورشیدی سهموی خطی با استفاده از سیال‌های عامل مختلف در شکل (۱۴) ترسیم شده است. با بررسی شکل (۱۴) مشاهده می‌شود که روند تغییرات هر سه نمودار مشابه است.



شکل (۱۲): بیشترین و کمترین میزان افزایش راندمان انرژی کلکتور با استفاده از نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال نسبت به سیال پایه

۱/۰۸۹ است. بنابراین در شرایط مطالعه حاضر نانوسیال هیبریدی نسبت به مونو نانوسیال عملکرد حرارتی بهتری دارد.

- نمودارهای راندمان آگرزژی کلکتور برحسب دمای ورودی برای شرایط استفاده از مونو نانوسیال، نانوسیال هیبریدی و سیال پایه دارای مقداری بیشینه است. همچنین راندمان آگرزژی کلکتور وقتی از نانوسیالها استفاده شود، نسبت به شرایط استفاده از سیال پایه بیشتر است. بیشترین مقدار افزایش راندمان آگرزژی نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال نسبت به سیال پایه به ترتیب برابر با ترتیب برابر با ۱/۴۹٪ و ۱/۵۸٪ است. بر این اساس راندمان آگرزژی کلکتور با استفاده از مونو نانوسیال اندکی بیشتر از نانوسیال هیبریدی است.



شکل (۱۵): میزان افزایش راندمان آگرزژی کلکتور با استفاده از نانوسیال نسبت به سیال پایه در دماهای ورودی مختلف

میزان افزایش راندمان آگرزژی برای نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال در دمای (K) ۵۱۰ به ترتیب برابر با ۰/۸۶٪ و ۰/۹۳٪ و در دمای (K) ۶۰۰ به ترتیب برابر با ۱/۴۹٪ و ۱/۵۸٪ است. بنابراین راندمان آگرزژی کلکتور با استفاده از مونو نانوسیال اندکی بیشتر از نانوسیال هیبریدی است.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی یک کلکتور سهموی خطی با استفاده از نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال به صورت تئوری مطالعه شده است. نانوسیال هیبریدی شامل نانوکامپوزیت MWCNTs-اکسید آهن با نسبت ۲۶ به ۷۴ و مونو نانوسیال اکسید آهن و سیال پایه روغن معدنی ترمینول وی پی ۱ هستند. عدد رینولدز در بازه ۱۰^۴ تا ۲×۱۰^۴ و دمای ورودی نیز در بازه ۵۰۰ تا ۶۰۰ کلوین در نظر گرفته شده‌اند. پس از تجزیه و تحلیل داده‌های خروجی، نتایج مهم زیر استخراج شد.

- راندمان انرژی کلکتور سهموی خطی هنگام استفاده از نانوسیال هیبریدی اندکی کمتر از مونو نانوسیال است. میزان افزایش راندمان انرژی کلکتور با افزایش عدد رینولدز کاهش و با افزایش دمای ورودی افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار افزایش راندمان برای نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال نسبت به سیال پایه به ترتیب برابر ۲/۱۷ و ۲/۲۲٪ هستند که در بیشترین دما و کمترین عدد رینولدز نتیجه شده‌اند.

- بازده حرارتی- هیدرودینامیکی کلکتور در تمامی اعداد رینولدز و دماهای مورد بررسی با استفاده از نانوسیال هیبریدی بیشتر از هنگامی است که سیال عامل مونو نانوسیال باشد. بیشترین مقدار بازده حرارتی- هیدرودینامیکی کلکتور برای نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال به ترتیب برابر با ۱/۱۰۸ و

فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
c_p	ظرفیت حرارتی ویژه در فشار ثابت (J/kgK)
D	قطر (m)
E	جریان آگرزژی (W)
f	ضریب اصطکاک
G_b	تشعشع مستقیم خورشیدی (W/m^2)
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (W/m^2K)
h_{out}	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین پوشش شیشه‌ای و محیط اطراف (W/m^2K)
k	قابلیت هدایت حرارتی (W/mK)
K	بهینه‌ساز زاویه برخوردی
L	طول لوله (m)
\dot{m}	دبی جرمی (kg/s)
Nu	عدد ناسلت
Pr	عدد پرانتل
Q	شار حرارتی (W)
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
V_{wind}	سرعت باد (m/s)
W	عرض (m)

علائم یونانی

α	ضریب جذب
γ	ضریب دریافت
ε	ضریب صدور
η	راندمان
θ	زاویه برخورد ($^\circ$)

میانگین سیال	fm	لزجت دینامیکی ($Pa \cdot s$)	μ
ورودی	in	چگالی (kg/m^3)	ρ
اتلافات حرارتی	$loss$	ضریب انعکاس منعکس کننده	ρ_m
نانوسیال	nf	ثابت استفان-بولتزمن ($5/67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$)	σ
نانوذره	np	ضریب عبور	τ
نانوذره نانولوله‌های کربنی چنددیواره	$np1$	کسر حجمی ذرات نانو	ϕ
نانوذره اکسید آهن	$np2$	کسر حجمی نانولوله‌های کربنی چنددیواره	ϕ_1
نوری	opt	کسر حجمی اکسید آهن	ϕ_2
خروجی	out		
دریافت کننده	r		زیر نویس‌ها
دریافت کننده داخلی	ri	دهانه	a
دریافت کننده خارجی	ro	محیط	amb
جذب شده	s	سیال پایه	bf
آسمان	sky	پوشش	c
خورشید	sun	پوشش داخلی	ci
مفید	u	پوشش خارجی	co
شرایط مرجع	0	انرژی	en
		اگرزری	ex

مراجع

- [1] Mwesigye, A., Bello-Ochende, T., Meyer, J. P., "Numerical investigation of entropy generation in a parabolic trough receiver at different concentration ratios", Energy, Vol. 53, pp. 114-127, 2013.
- [2] Dupont, E., Koppelaar, R., and Jeanmart H., "Global available solar energy under physical and energy return on investment constraints", Applied Energy, Vol. 257, p. 113968, 2020.
- [3] Bellos, E., and Tzivanidis, C., "Thermal efficiency enhancement of nanofluid-based parabolic trough collectors", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 7, 2018.
- [4] Ebraze, Sh., Sheikholeslami, M., "Applications of nanomaterial for parabolic trough collector", Powder Technology, 2020.
- [5] Abed, N., Afgan, I., "An extensive review of various technologies for enhancing the thermal and optical performances of parabolic trough collectors", International Journal of Energy Research, Vol. 44, No. 7, pp. 5117-5164, 2020.
- [6] Mwesigye, A., Huan, Z., "Thermal and Thermodynamic Performance of a Parabolic Trough Receiver with Syltherm800- Al_2O_3 Nanofluid as the Heat Transfer Fluid", Energy Procedia, Vol. 75, pp. 394-402, 2015.
- [7] Kasaeian, A., Daneshzarian, R., Rezaei, R., Pourfayaz, F. Kasaeian, G., "Experimental investigation on the thermal behavior of nanofluid direct absorption in a trough collector", Journal of Cleaner Production, Vol. 158, pp. 276-284, 2017.
- [8] Kasaeian, A., Daviran, S., Azarian, R.D., Rashidi, A., "Performance evaluation and nanofluid using capability study of a solar parabolic trough collector", Energy conversion and management, Vol. 89, pp. 368-375, 2015.
- [9] Babu, J. R., Kumar, K. K., Rao, S. S., "State-of-art review on hybrid nanofluids State-of-art review on hybrid nano fluids", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 77, pp. 551-565, 2017.
- [10] Sidik, N.A.C., Jamil, M.M., Japar, W.M.A.A., Adamu, I.M., "A review on preparation methods, stability and applications of hybrid nanofluids", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 80, pp. 1112-1122, 2017.
- [11] Sundar, L.S., Singh, M.K., Sousa, A.C., "Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT- Fe_3O_4 /water hybrid nanofluids", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 52, pp. 73-83, 2014.
- [12] Verma, S.K., Tiwari, A.K., Tiwari, S., Chauhan, D.S., "Performance analysis of hybrid nanofluids in flat plate solar collector as an advanced working fluid", Solar Energy, Vol. 167, pp. 231-241, 2018.
- [13] Bellos, E., Tzivanidis, C., "Thermal analysis of parabolic trough collector operating with mono and hybrid nano fluids", Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 26, pp. 105-115, 2018.
- [14] Al-Oran, O., Lezsovits, F. Aljawabrah, A., "Exergy and energy amelioration for parabolic trough collector using mono and hybrid nanofluids", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 140, pp. 1579-1596, 2020.
- [15] Menbari, A., Alemrajabi, A. A., Rezaei, A., "Experimental investigation of thermal performance for direct absorption solar parabolic trough collector (DASPTC) based on binary nanofluids", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 80, pp. 218-227, 2017.
- [16] Minea, A. A., El-Maghlany, W.M., "Influence of

- hybrid nanofluids on the performance of parabolic trough collectors in solar thermal systems: Recent findings and numerical comparison", *Renewable Energy*, Vol. 120, pp. 350–364, 2018.
- [17] Ekiciler, R., Arslan, K., Turgut, O. and Kurşun, B., "Effect of hybrid nanofluid on heat transfer performance of parabolic trough solar collector receiver", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, pp.1-18, 2020.
- [18] Salman, S., Talib, A. A., Saadon, S., Sultan, M. H., "Hybrid nanofluid flow and heat transfer over backward and forward steps: A review", *Powder Technology*, Vol. 363, pp. 448–472, 2020.
- [19] Verma, S. K., Tiwari, A. K., Chauhan, D. S., "Experimental evaluation of flat plate solar collector using nanofluids", *Energy Conversion and Management*, Vol. 134, pp. 103–115, 2017.
- [20] Verma, S. K., Tiwari, A. K., Tiwari, S., Chauhan, D. S., "Performance analysis of hybrid nano fluids in flat plate solar collector as an advanced working fluid", *Solar Energy*, Vol. 167, pp. 231–241, 2018.
- [21] Kim, H., Ham, J., Park, C. Cho, H., "Theoretical investigation of the efficiency of a U-tube solar collector using various nanofluids", *Energy*, Vol. 94, pp. 497–507, 2016.
- [22] Maxwell J. C., *A treatise on electricity and magnetism*, vol. 1. Oxford: Clarendon Press, 1873.
- [23] Brinkman H. C., "The viscosity of concentrated suspensions and solutions", *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, No. 4, p. 571, 1952.
- [24] Bellos, E., and Tzivanidis, C., "A detailed exergetic analysis of parabolic trough collectors", *Energy Conversion and Management*, Vol. 149, pp. 275-292, 2017.
- [25] F-Chart Software, Engineering Equation Solver (EES) Professional V10.090-3D (6/15/16), <http://www.2016.fchartsoftware.com/ees/>.
- [26] Duffie, J.A., Beckman, W.A. and Blair, N., *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. John Wiley & Sons, 2020.
- [27] Behar, O., Khellaf, A., Mohammadi, K., "A novel parabolic trough solar collector model – Validation with experimental data and comparison to Engineering Equation Solver (EES)", *Energy Conversion and Management*, Vol. 106, pp. 268–281, 2015
- [28] Swinbank W. C., "Long wave radiation from clear skies", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 89, No. 381, pp. 339–348, 1963.
- [29] Mullick S. C., Nanda S. K., "An improved technique for computing the heat loss factor of a tubular absorber", *Solar Energy*, Vol. 42, No. 1, pp. 1–7, 1989.
- [30] Forristall R., "Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver", 2003.
- [31] Mahian, O., Kianifar, A., Sahin, A.Z. and Wongwises, S., "Entropy generation during Al_2O_3 /water nanofluid flow in a solar collector: Effects of tube roughness, nanoparticle size, and different thermophysical models", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 78, pp. 64–75, 2014.
- [32] Aghaei, A., Sheikhzadeh, G. A., Dastmalchi, M., Forozande, H., "Numerical investigation of turbulent forced-convective heat transfer of Al_2O_3 -water nanofluid with variable properties in tube", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 6, No. 2, pp. 577–585, 2015.
- [33] Bergman, T.L., Lavine, A.S., *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons New York, 2017.
- [34] Sundar, L. S., Naik, M. T., Sharma, K. V., Singh, M. K., Reddy, T. C. S., "Experimental investigation of forced convection heat transfer and friction factor in a tube with Fe_3O_4 magnetic nanofluid", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 37, pp. 65–71, 2012.
- [35] Petela, R., "Exergy of undiluted thermal radiation", *Solar Energy*, Vol. 74, No. 6, pp. 469–488, 2003.
- [36] Mwesigye, A., Yilmaz, İ. H., Meyer, J. P., "Numerical analysis of the thermal and thermodynamic performance of a parabolic trough solar collector using SWCNTs-Therminol®VP-1 nanofluid", *Renewable Energy*, Vol. 119, pp. 844–862, 2018.
- [37] Allouhi, A., A., M.B., Saidur, R., Kousksou, T., Jamil, A., 2018. "Energy and exergy analyses of a parabolic trough collector operated with nanofluids for medium and high temperature applications", *Energy Conversion and Management*, Vol. 155, pp.201-217.
- [38] Okonkwo, E. C., Wole-Osho, I., Kavaz, D., Abid, M., "Comparison of experimental and theoretical methods of obtaining the thermal properties of alumina / iron mono and hybrid nano fluids", *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 292, p. 111377, 2019.
- [39] Sundar, L. S., Singh, M. K., Sousa, A. C., "Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe_3O_4 nanofluid for heat transfer applications", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 7–14, 2013.
- [40] Edalatpour M., Solano J. P., "Thermal-hydraulic characteristics and exergy performance in tube-on-sheet flat plate solar collectors: Effects of nanofluids and mixed convection", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 118, pp. 397–409, 2017.
- [41] <https://www.loikitsdistribution.com/files/syltherm-800-technical-data-sheet.pdf>.
- [42] Minea A. A., "Hybrid nanofluids based on Al_2O_3 , TiO_2 and SiO_2 Numerical evaluation of different approaches", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 104, pp. 852–860, 2017.
- [43] Pak, B. C., Cho, Y.I., "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles", *Experimental Heat Transfer an International Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 151-170, 1998.
- [44] Alsarraf, J., Shahsavari, A., Mahani, R. B., Talebizadehsardari, P., "Turbulent forced convection and entropy production of a nanofluid in a solar collector considering various shapes for nanoparticles", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 117, p. 104804, 2020.
- [۴۵] شیخزاده، قنبرعلی، نظیفی فرد، محمد، مداحیان، رضا، کاظمی، حدیجه، «بررسی تغییرات هیدرودینامیکی - حرارتی یک نانوسیال در یک لوله مجهز به نوار پیچشی»، مهندسی و مدیریت انرژی، شماره ۸، جلد ۴، صفحات ۹۹۸۶، ۱۳۹۷.
- [46] Bellos, E., Tzivanidis, C., and Tsimpanogiannis, D., "Thermal, hydraulic and exergetic evaluation of a parabolic trough collector operating with thermal oil and molten salt based nanofluids", *Energy Conversion and Management*, Vol. 156, pp. 388-402, 2018.