



Investigation of the Effects of Hybrid Nanofluids Containing Graphene on the Hydrothermal Performance of a Solar Linear Parabolic Collector

Mahtab Ahmadi^{1*}

¹B.Sc. Student, Department of Engineering Sciences, Faculty of Technology and Engineering, Guilan, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:
Original Research

Received: 11.05.2023
Revised: 03.17.2024
Accepted: 05.12.2024

Keyword:
Graphene
Energy Efficiency
Nusselt Number
Convection Heat Transfer
Coefficient
Hydrothermal Performance

***Corresponding Author:**
Mahtab Ahmadi
Email:
Ahmadi.Lpr04@gmail.com

ABSTRACT

The In this research, theoretically and using MATLAB software, the hydrothermal performance of a linear parabolic collector with the use of hybrid nanofluids containing graphene was investigated and compared with mono nanofluids and base fluid. In this study, the fluid flow was assumed to be turbulent, steady and incompressible. Syltherm 800 oil with a volume fraction of 2% and a ratio of 50:50 was selected as the base fluid. To obtain more accurate results, its thermophysical properties were considered dependent on temperature. The results of this study showed that at a temperature of 300 K, the use of mono nanofluids and hybrid nanofluids containing graphene improves energy efficiency on average by respectively 2.2% and 2.92% compared to the base fluid. The improvement percentage of the Nusselt number and convection heat transfer coefficient were 41.30% and 49.95% for mono nanofluids and 109.13% and 121.89% for hybrid nanofluids containing graphene, respectively. The highest and lowest improvement on parameters of energy efficiency, Nusselt number and convection heat transfer coefficient among hybrid nanofluids containing graphene were obtained respectively for graphene -copper-Syltherm 800 and graphene-silver-Syltherm 800. In addition, the average value of hydrothermal performance for mono nanofluids and hybrid nanofluids containing graphene was respectively 1.24 and 1.75. These values indicate the usefulness and improvement of heat transfer using hybrid nanofluids containing graphene in the base fluid.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The global climate situation, the global warming phenomenon, and the limitation of fossil resources have caused the use of clean energy to become more important than the consumption of fossil fuels. These cases have led to a significant increase in the use of renewable energy and as a replacement for fossil fuels in recent years because it is both inexhaustible and much cleaner than energy from fossil fuels. Among all renewable energies in the world, solar energy has the greatest potential. This abundantly available energy source can be converted into electrical energy or thermal energy. To convert solar energy into thermal energy in the medium to high-temperature range, concentrating collectors are used. Currently, the most common and commercial type of concentrator collectors in thermal solar power plants is linear parallel collectors. Today, one of the most promising ways to improve the efficiency of these collectors is the use of nanofluids instead of the base fluid. The high energy content of nanofluids can increase the energy efficiency of these collectors and hybrid nanofluids are also a new generation of nanofluids, which was used in the present study to evaluate the effect of using graphene and combining it with three metal nanoparticles such as silver, zinc, and copper. Production of hybrid nanofluids containing graphene on the hydrothermal performance of a linear parabolic collector was investigated.

Methodology

In the present research, theoretically and using MATLAB software, the hydrothermal performance of a linear parabolic collector model LS-2 was investigated. The effect of using hybrid nanofluids containing graphene and its comparison with mono nanofluids and base fluid was discussed. The scheme of this collector, which was designed in SolidWorks software, can be seen in Figure 1. In addition, the dimensional specifications and optical properties of this collector are presented in Table 1, and the environmental conditions and solar radiation are also presented in Table 2.

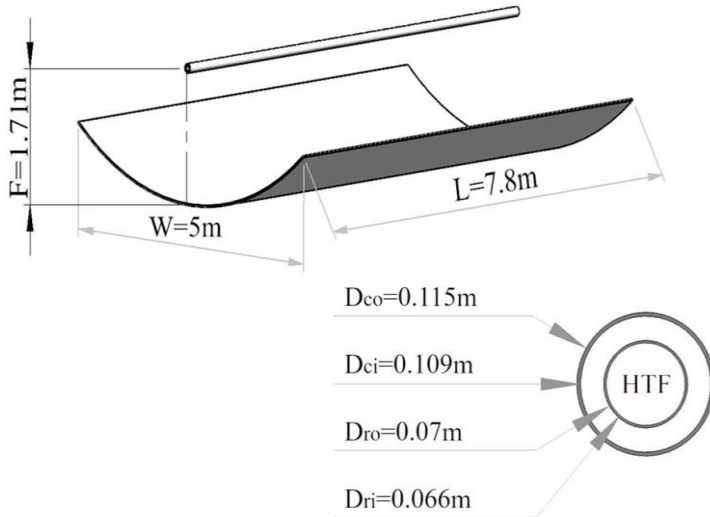


Figure 1. Schematic of the LS-2 model linear collector case studied.

Table 1. Dimensional specifications and optical properties of the studied collector [16].

Parameter	Value
Absorber inner diameter, D_{ri}	0.066
Absorber outer diameter, D_{ro}	0.07
Glass inner diameter, D_{ci}	0.109
Glass outer diameter, D_{co}	0.115
Length of the PTC, L	7.8
Absorber absorbance, α	0.96
Glass cover transmittance, τ	0.95
Emittance of glass cover, ε_c	0.9
Concentrator reflectance, ρ_m	0.83
Max optical efficiency, η_{opt}	%74.5
Incident angle, θ	0
Aperture width of the PTC, W	5
Aperture area, A_a	39
Focal length, F	1.71
Intercept factor, γ	0.99
Concentration ratio, C	22.74

Table 2. Environmental conditions and solar radiation in the present study.

Parameter	Value
Surrounding convection, h_{out} (W/m^2K)	10
Radiation beam intensity, G_a (W/m^2)	1000
Wind Speed, V_{wind} (m/s)	1
Nanoparticle volume fraction, ϕ	2%
Ambient temperature, T_{amb} (K)	300
Sun temperature, T_{sun} (K)	5770
Inlet temperature, T_{in} (K)	300-500
Volume flow rate, V_{flow} (L/min)	150

Results and discussion

In this study, the effect of using graphene and combining it with three metal nanoparticles of silver, zinc, and copper to produce hybrid nanofluids containing graphene on the hydrothermal performance of a linear parabolic collector was investigated theoretically using MATLAB software. In this study, Syltherm 800 oil with a volume fraction of 2% and a ratio of 50:50 was used as the base fluid and to obtain more accurate results, the thermophysical properties of this base fluid were considered dependent on temperature. The obtained results showed that the energy efficiency will decrease with the increase of inlet temperature and the energy efficiency will increase with the increase of the Reynolds number. Furthermore, with the increase in inlet temperature, the Nusselt number and heat transfer coefficient will increase. The most efficient collector fluid among the mono nanofluids copper Syltherm 800 and the hybrid nanofluids containing graphene was graphene-copper- Syltherm 800. The result of using graphene in this study demonstrated that graphene has a lower performance compared to metal nanoparticles, but the combination of graphene with metal nanoparticles improves energy efficiency, Nusselt number, and heat transfer coefficient. Hydrothermal performance was used compared to mononanofluids.

Table 3. Effect of mono nanofluids and hybrid nanofluids containing graphene in improving energy efficiency, Nusselt number and heat transfer coefficient at 300K temperature.

Nanofluids	Energy Efficiency Enhancement (%)	Nusselt Number Enhancement (%)	Heat Transfer Coefficient Enhancement (%)
Graphen-Syltherm 800	0.11	40.39	48.99
Ag- Syltherm 800	1	41.22	49.85
Zn- Syltherm 800	1.32	41.51	50.15
Cu- Syltherm 800	1.98	42.11	50.81
Graphen- Ag-Syltherm 800	2.55	108.35	121.09
Graphen- Zn -Syltherm 800	2.83	108.94	121.66
Graphen- Cu-Syltherm 800	3.38	110.01	122.94

Table 4. Effect of mono nanofluids and hybrid nanofluids containing graphene on hydrothermal performance and friction Factor at 300 K.

Nanofluids	PEC	Friction Factor
Graphen- Syltherm 800	1.242	0.035
Ag- Syltherm 800	1.244	0.035
Zn- Syltherm 800	1.252	0.035
Cu- Syltherm 800	1.254	0.035
Graphen- Ag- Syltherm 800	1.748	0.034
Graphen- Zn - Syltherm 800	1.750	0.034
Graphen- Cu- Syltherm 800	1.760	0.034

Conclusion

In this article, the hydrothermal performance of a linear parabolic collector due to the addition of hybrid nanofluids containing graphene to the base fluid, as theory and assuming that the fluid flow is turbulent, steady and incompressible and also dependent on the thermophysical properties of the fluid The basis of the temperature was investigated and it was observed that the temperature at the inlet increases the Nusselt number and the heat transfer coefficient and decreases the energy efficiency. will be It was also observed that although graphene has a lower performance than metal nanoparticles of copper, silver and zinc, but the composition graphene with metal nanoparticles improves energy efficiency, Nusselt number and heat transfer coefficient and hydrothermal performance. compared to mono nanofluids will be used.



بررسی اثر نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن بر عملکرد هیدروترمال یک کلکتور خورشیدی سهموی خطی

مهتاب احمدی^{۱*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی، گروه علوم مهندسی، دانشکده فنی و مهندسی، گیلان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

در تحقیق حاضر، به صورت تئوری و با استفاده از نرم افزار متلب به بررسی عملکرد هیدروترمال یک کلکتور سهموی خطی در اثر استفاده از نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن و مقایسه آن با مونو نانوسیالات و سیال پایه پرداخته شده است. در این مطالعه، جریان سیال به صورت متلاطم، پایا و تراکم ناپذیر فرض شده و روغن سیلترم ۸۰۰ با کسر حجمی ۲٪ و با نسبت ۵۰:۵۰ به عنوان سیال پایه، انتخاب و به منظور حصول نتایج دقیق تر، خواص ترموفیزیکی آن وابسته به دما در نظر گرفته شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که در دمای ۳۰۰ کلوین، استفاده از مونو نانوسیالات و نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن به ترتیب و به طور میانگین به میزان ۲/۲٪ و ۲/۹۲٪ نسبت به سیال پایه موجب بهبودی راندمان انرژی می‌شود. درصد بهبودی عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی برای مونو نانوسیالات به ترتیب ۴۱/۳۰٪ و ۴۹/۹۵٪ و برای نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن به ترتیب ۱۰۹/۱۳٪ و ۱۲۱/۸۹٪ می‌باشد. بیشترین و کمترین اثر بهبودی بر پارامترهای راندمان انرژی، عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی در میان نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن به ترتیب برای گرافن- مس- سیلترم ۸۰۰ و گرافن- نقره- سیلترم ۸۰۰ بدست آمد. همچنین میانگین مقدار عملکرد هیدروترمال برای مونو نانوسیالات و نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن به ترتیب ۱/۲۴ و ۱/۷۵ بدست آمده که این مقدار، نشان دهنده سودمندی و بهبود انتقال حرارت با استفاده از نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن در سیال پایه است.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳

کلید واژگان:

گرافن
راندمان انرژی
عدد ناسلت
ضریب انتقال حرارت جابجایی
عملکرد هیدروترمال

*نویسنده مسئول: مهتاب احمدی

پست الکترونیکی:

Ahmadi.Lpr04@gmail.com



مقدمه

وضعیت آب و هوای جهانی، پدیده گرمایش زمین و محدودیت منابع فسیلی در سراسر جهان، موجب شده تا استفاده از انرژی‌های پاک به جای مصرف سوخت‌های فسیلی اهمیت پیدا کند [۱؛ ۲]. این موارد سبب شده تا در سال‌های اخیر، شاهد افزایش چشمگیری در استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و جایگزینی آن به جای سوخت‌های فسیلی باشیم زیرا هم پایان ناپذیر و هم بسیار پاک‌تر از انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی می‌باشد. در میان همه انرژی‌های تجدیدپذیر موجود در جهان، انرژی خورشیدی بیشترین پتانسیل را دارد [۹-۳]. این منبع انرژی را که به وفور در دسترس است می‌توان به انرژی الکتریکی و یا به انرژی گرمایی تبدیل کرد [۱۰؛ ۱۱]. به منظور تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی گرمایی در بازه دمایی متوسط به بالا از کلکتورهای متمرکز کننده استفاده می‌شود. در حال حاضر، رایج‌ترین و تجاری‌ترین نوع کلکتورهای متمرکز کننده در نیروگاه‌های خورشیدی حرارتی، کلکتورهای سهموی خطی هستند. امروزه یکی از امیدوارکننده‌ترین روش‌های بهبود راندمان در این کلکتورها، استفاده از نانوسیال‌ها به جای سیال پایه است [۱۲]. محتوای انرژی بالای نانوسیال‌ها می‌تواند موجب افزایش راندمان انرژی در این کلکتورها شود [۱۳]. نانوسیال‌های هیبریدی که نسل جدید نانوسیال هستند، از ترکیب دو یا چند نانو ذره مختلف در سیال پایه شکل گرفته‌اند. نانوسیال‌های هیبریدی به دو روش تولید می‌شوند. روش اول، سوسپانسیون چند نانو ذره غیرمشابه در سیال پایه است و روش دوم، سوسپانسیون یک نانو ذره کامپوزیت در سیال پایه است [۱۴]. تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیال‌های هیبریدی به جای مونو نانوسیال‌ها باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود [۱۵]. 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. آل اران^۱ و همکاران [۱۶] با استفاده از نانوذرات اکسید آلومینیوم، اکسید سربیم و اکسید مس و سیال پایه سیلترم ۸۰۰ به مطالعه‌ی اثر نانوسیال هیبریدی و مونو نانوسیال بر عملکرد انرژی و انرژی یک کلکتور سهموی خطی پرداختند. مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد که بیشترین افزایش راندمان انرژی و انرژی نانوسیال نسبت به سیال پایه با استفاده از نانوسیال هیبریدی اکسید آلومینیوم- اکسید سربیم و سیال پایه سیلترم ۸۰۰ به دست می‌آید و به ترتیب برابر با ۱/۰۹٪ و ۱/۰۳٪ است. آن‌ها همچنین افزایش عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت این نانوسیال هیبریدی را نسبت به سیال پایه به ترتیب برابر ۱۶۷/۸٪ و ۲۰۰/۷٪ اعلام کردند. مینا و ال-مگلانی^۲ [۱۷] جریان آرام نانوسیال هیبریدی را در یک کلکتور سهموی خطی به صورت عددی مطالعه کردند. آن‌ها از نانو سیال‌های هیبریدی مختلفی شامل Cu/MgO، Cu/Al₂O₃ و Co₃O₄/GO و سیالات پایه‌ی آب و مخلوط آب و اتیلن گلیکول استفاده کردند. آن‌ها گزارش دادند که بیشترین افزایش برای عدد ناسلت متوسط با استفاده از نانوسیال هیبریدی Cu/MgO - آب در کسر حجمی ۲٪ رخ می‌دهد و مقدار این افزایش نسبت به عدد ناسلت سیال پایه برابر ۱۴٪ است. در یک مطالعه‌ی عددی، عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی یک کلکتور سهموی خطی با استفاده از نانوسیال هیبریدی، توسط اکیسلر^۳ و همکاران [۱۸] انجام شده است. آن‌ها از نانوسیال‌های هیبریدی ZnO/Ag - سیلترم ۸۰۰، TiO₂/Ag - سیلترم ۸۰۰ و MgO/Ag - سیلترم ۸۰۰ و ۴ کسر حجمی ۱، ۲، ۳ و ۴٪ استفاده کردند و جریان سیال داخل کلکتور را به صورت مغشوش در نظر گرفتند که نتایج آن‌ها نشان داده است، 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/اکسیدمنیزیم - سیلترم ۸۰۰ با کسر حجمی

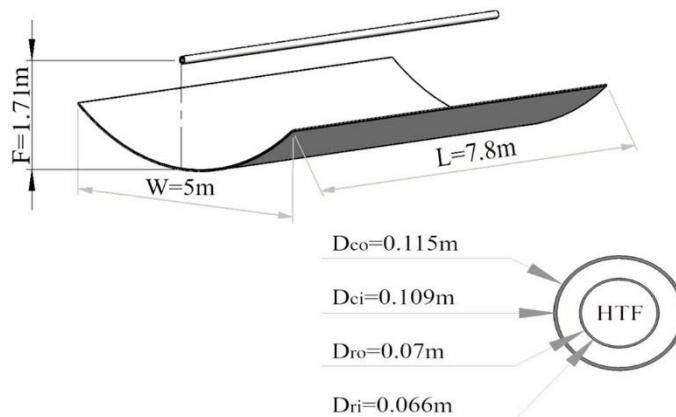
¹ Al-Oran² Minea & El-Maghlany³ Ekiciler

۴٪ است. در یکی از مطالعات نیز تجزیه و تحلیل یک کلکتور سهموی خطی با استفاده از مونی نانوسیال و نانوسیال هیبریدی توسط بلوس و تیزیوانیدیس^۱ [۱۲] 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 مونی نانوسیال‌ها بیشتر است. در مطالعه‌ی آن‌ها افزایش عدد ناسلت با استفاده از نانوسیال هیبریدی نسبت به سیال پایه برابر با، ۱۲۱/۷٪ دی اکسید تیتانیوم- آب برابر با ۲۳/۸٪ و اکسید آلومینیوم- آب برابر با ۲۳/۴٪ به دست آمد. همچنین افزایش راندمان انرژی کلکتور با استفاده از نانوسیال هیبریدی در مقایسه با سیال پایه تا ۱/۸٪ و با استفاده از مونی نانوسیال حداکثر تا ۰/۷٪ گزارش شد. با نظر به مطالعات انجام شده توسط پژوهشگران، مشاهده می‌شود که میزان مطالعات در خصوص عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی سیستم‌های خورشیدی با استفاده از نانوسیال‌های هیبریدی کم است همچنین کمتر پژوهشی را می‌توان یافت که در آن تاثیر گرافن به عنوان یک نانو ذره در یک سیال پایه از نوع روغن حرارتی مورد مطالعه قرار گرفته باشد. مطالعات پیشین نشان داده که هر چه رسانایی حرارتی نانو ذره بیشتر باشد، میزان راندمان انرژی بزرگتری برای کلکتور خورشیدی حاصل می‌شود [۱۲] لذا با توجه به اینکه گرافن از رسانندگی حرارتی بالایی برخوردار است سعی شده تا در این مطالعه تاثیر استفاده از گرافن و ترکیب آن با سه نانوذره فلزی مانند نقره، روی و مس به منظور تولید نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن بر عملکرد هیدروترمال یک کلکتور سهموی خطی مورد بررسی قرار گیرد.

روش شناسی

بیان مسئله

در تحقیق حاضر، به صورت تئوری و با استفاده از نرم افزار متلب به بررسی عملکرد هیدروترمال یک کلکتور سهموی خطی مدل LS-2 در اثر استفاده از نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن و مقایسه آن با مونی نانوسیالات و سیال پایه پرداخته شده است. طرحواره این کلکتور که در نرم‌افزار SolidWorks طراحی شده است در شکل (۱) مشاهده می‌شود. همچنین مشخصات ابعادی و خواص نوری این کلکتور در جدول (۱) و شرایط محیطی و تابش خورشید نیز در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۱. طرحواره کلکتور سهموی خطی مدل LS-2 مورد مطالعه.

¹ Bellos & Tzivanidis

جدول ۱. مشخصات ابعادی و خواص نوری کلکتور مورد مطالعه [۱۶].

مقدار	پارامتر
۰/۰۶۶	Dri (m) قطر داخلی لوله جاذب،
۰/۰۷	Dro (m) قطر خارجی لوله جاذب،
۰/۱۰۹	Dci (m) قطر داخلی پوشش شیشه‌ای،
۰/۱۱۵	Dco(m) قطر داخلی پوشش شیشه‌ای،
۷/۸	L(m) طول کلکتور و لوله جاذب،
۰/۹۶	α ضریب جذب لوله جاذب،
۰/۹۵	τ ضریب عبور پوشش شیشه‌ای،
۰/۹	ϵ_c ضریب صدور پوشش شیشه‌ای،
۰/۸۳	ρ_m ضریب انعکاس منعکس کننده،
۷۴/۵	hop(%) حداکثر راندمان نوری کلکتور،
۰	θ زاویه برخورد تابش،
۵	W (m) عرض کلکتور،
۳۹	A_a (m ²) مساحت کلکتور،
۱/۷۱	F(m) فاصله کانونی،
۰/۹۹	γ ضریب دریافت،
۲۲/۷۴	C، نسبت غلظت،

جدول ۲. شرایط محیطی و تابش خورشید در مطالعه حاضر.

مقدار	پارامتر
۱۰	ضریب انتقال حرارت جابجایی بین پوشش شیشه‌ای و محیط اطراف، $h_{out} K(w/m^2k)$
۱۰۰۰	شدت تابش خورشید، G_a (w/m ²)
۱	سرعت باد، V_{wind} (m/s)
۲	کسر حجمی نانو ذره، ϕ (%)
۳۰۰	دمای محیط، T_{amb} (k)
۵۷۷۰	دمای خورشید، T_{sun} (k)
۳۰۰-۵۰۰	دمای ورودی، T_{in} (k)
۱۵۰	دبی حجمی، V_{flow} (L/min)

خواص سیال پایه و نانوذرات مورد مطالعه

در تحلیل حاضر جریان سیال به صورت متلاطم، پایا و تراکم ناپذیر فرض شده و از روغن سیلترم ۸۰۰ به عنوان سیال پایه استفاده شده است. خواص ترموفیزیکی این سیال پایه که شامل چگالی ρ_{bf} بر حسب (kg/m³)، گرمای ویژه cp_{bf} بر حسب (J/kg.K)، قابلیت هدایت حرارتی k_{bf} بر حسب (w/m.k) و لزجت دینامیکی μ_{bf} که بر حسب (kg/m.s) به دما وابسته بوده و برای محاسبه این خواص از روابطی که قبلاً توسعه داده شده [۱۹] و در روابط ۱ تا ۴ آورده شده، استفاده می‌شود. همچنین در جدول (۳) خواص ترموفیزیکی مربوط به نانو ذرات مورد مطالعه نیز ارائه شده است.

$$\rho_{bf} = -0.0005T^2 - 0.5429T + 1136 \quad (1)$$

$$cp_{bf} = 1.7076T + 1108 \quad (2)$$

$$K_{bf} = 0.0001881T + 0.1901 \quad (3)$$

$$\mu_{bf} = 9.176 \times 10^{10} T^{-5.242} \quad (4)$$

جدول ۳. خواص ترموفیزیکی نانو ذرات مورد مطالعه.

Nanoparticle	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$C_p(\text{J/kg.k})$	$k(\text{w/m.k})$
Graphen	۲۲۶۷	۷۰۰	۲۲۰۰
Ag	۱۰۵۰۰	۲۳۵	۴۲۹
Cu	۸۹۳۳	۳۸۵	۴۰۰
Zn	۷۱۴۰	۳۸۹	۱۱۶

با استفاده از معادلات ۵ تا ۸ می توان خواص ترموفیزیکی مونو نانوسیالات را که شامل چگالی، گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و لزجت دینامیکی است بدست آورد [۱۲]:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi \rho_{np} \quad (5)$$

$$C_{p,nf} = \frac{\rho_{bf}C_{p,bf}(1 - \phi) + \phi \rho_{np}C_{p,np}}{\rho_{nf}} \quad (6)$$

$$K_{nf} = k_{bf} \frac{k_{np} + 2k_{bf} + 2(k_{np} - k_{bf})\phi}{k_{np} + 2k_{bf} - (k_{np} - k_{bf})\phi} \quad (7)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{bf}}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (8)$$

همچنین با استفاده از معادلات ۹ تا ۱۶ می توان خواص ترموفیزیکی نانوسیالات هیبریدی را که شامل چگالی، گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و لزجت دینامیکی است بدست آورد [۱۹]:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (9)$$

$$\rho_{np} = \frac{\phi_1 \rho_{np-1} + \phi_2 \rho_{np-2}}{\phi} \quad (10)$$

$$\rho_{hnf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi \rho_{np} \quad (11)$$

$$C_{p,np} = \frac{\phi_1 \rho_{np-1} C_{p,np-1} + \phi_2 \rho_{np-2} C_{p,np-2}}{\phi \rho_{np}} \quad (12)$$

$$C_{p,hnf} = \frac{\rho_{bf} C_{p,bf} (1-\phi) + \rho_{np} C_{p,np} \phi}{\rho_{hnf}} \quad (13)$$

$$K_{np} = \frac{\phi_1 k_{np-1} + \phi_2 k_{np-2}}{\phi} \quad (14)$$

$$K_{hnf} = k_{bf} \frac{k_{np} + 2k_{bf} + 2(k_{np} - k_{bf})\phi}{k_{np} + 2k_{bf} - (k_{np} - k_{bf})\phi} \quad (15)$$

$$\mu_{hnf} = \frac{\mu_{bf}}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (16)$$

در معادلات فوق ϕ کسر حجمی نانوذرات می‌باشد و ϕ_1 و ϕ_2 به ترتیب کسر حجمی نانوذرات ۱ و ۲ می‌باشند.

معادلات حاکم

برای حل معادلات حاکم بر مسئله، از نرم افزار متلب استفاده شده است و در ادامه در این بخش، مهمترین معادلات حاکم بر مسئله ارائه می‌شوند.

یکی از این معادلات، معادله‌ی انرژی مفید کلکتور است، این انرژی که صرف افزایش دمای سیال عامل می‌شود را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (۱۷) محاسبه کرد [۲۰]:

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \quad (17)$$

در این رابطه، \dot{m} دبی جرمی سیال عامل، C_p گرمای ویژه سیال، T_i و T_o به ترتیب دمای ورودی و خروجی سیال عامل می‌باشند. برای تبدیل دبی جرمی جریان به دبی جرمی می‌توان از رابطه (۱۸) استفاده کرد [۱۲]:

$$V_{flow} [L / min] = 60 \times 10^3 \cdot \dot{m} [kg / s] \quad (18)$$

با استفاده از رابطه (۱۹) می‌توان مقدار انرژی جذب شده توسط صفحه جاذب را بدست آورد [۲۰]:

$$Q_s = A_a G_a \quad (19)$$

راندمان انرژی کلکتور، نسبت انرژی مفید به دست آمده به مقدار انرژی جذب شده است که از رابطه (۲۰) قابل محاسبه می‌باشد [۲۰]:

$$\eta_{en} = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (20)$$

با استفاده از رابطه (۲۱) می‌توان مقدار انرژی جذب شده توسط دریافت کننده را بدست آورد [۱۲]:

$$Q_{\text{abs}} = \eta_{\text{opt}} Q_s \quad (21)$$

در رابطه فوق، h_{op} نشان دهنده راندمان نوری کلکتور است. راندمان نوری کلکتور با استفاده از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه می‌باشد [۲۱]:

$$k_{\theta} = \frac{1}{\cos \theta} (\cos \theta + 0.000884\theta - 0.00005369\theta^2) \quad (22)$$

یکی دیگر از راه‌های بدست آوردن انرژی مفید کلکتور، رابطه (۲۳) می‌باشد [۲۰]:

$$Q_u = Q_{\text{abs}} - Q_{\text{loss}} \quad (23)$$

در رابطه فوق، Q_{loss} اتلافات حرارتی بین پوشش شیشه‌ای و محیط است که شامل اتلافات جابجایی با هوای محیط و اتلافات تشعشعی با آسمان می‌باشد و بر اساس رابطه‌ی زیر بدست خواهد آمد [۲۰]:

$$Q_{\text{loss}} = D_{\text{co}} L_c (T_c^4 - T_{\text{sky}}^4) + D_{\text{co}} L h_{\text{out}} (T_c - T_{\text{amb}}) \quad (24)$$

T_c دمای متوسط پوشش شیشه‌ای است و T_{sky} دمای آسمان است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$T_{\text{sky}} = 0.0552 T_a^{1.5} \quad (25)$$

h_{out} که ضریب انتقال حرارت جابجایی بین پوشش شیشه‌ای و محیط اطراف است از رابطه (۲۶) بدست می‌آید [۲۳]:

$$h_{\text{out}} = 4V_{\text{wind}}^{0.58} - D_{\text{co}}^{-0.42} \quad (26)$$

برای $Re > 2300$ می‌توان عدد ناسلت مربوط به سیال پایه را از رابطه (۲۷) و عدد ناسلت مونو نانوسیالات را از رابطه (۲۸) بدست آورد [۱۲]:

$$Nu_{\text{bf}} = 0.023 Re_{\text{bf}}^{0.8} Pr_{\text{bf}}^{0.4} \quad (27)$$

$$Nu_{\text{nf}} = 0.021 Re_{\text{nf}}^{0.8} Pr_{\text{nf}}^{0.5} \quad (28)$$

در روابط فوق، Re و Pr به ترتیب عدد رینولدز و عدد پرانتل هستند که از روابط ۳۰-۲۹ محاسبه می‌شوند [۱۲]:

$$Re = \frac{4 \cdot m}{\pi D_{\text{ri}} \mu} \quad (29)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot cp}{K} \quad (30)$$

برای کسر حجمی‌های بین ۳٪ تا ۴٪ می‌توان عدد ناسلت نانوسیالات هیبریدی را از رابطه (۳۱) و به صورت زیر بدست آورد [۱۹]:

$$Nu_{hnf} = 0.0074 Re_{hnf}^{0.9} Pr_{hnf}^{0.67} (100\phi)^{0.063} \quad (31)$$

ضریب انتقال حرارت جابه جایی مربوط به سیال عامل را با استفاده از رابطه (۳۲) می‌توان محاسبه کرد [۱۲]:

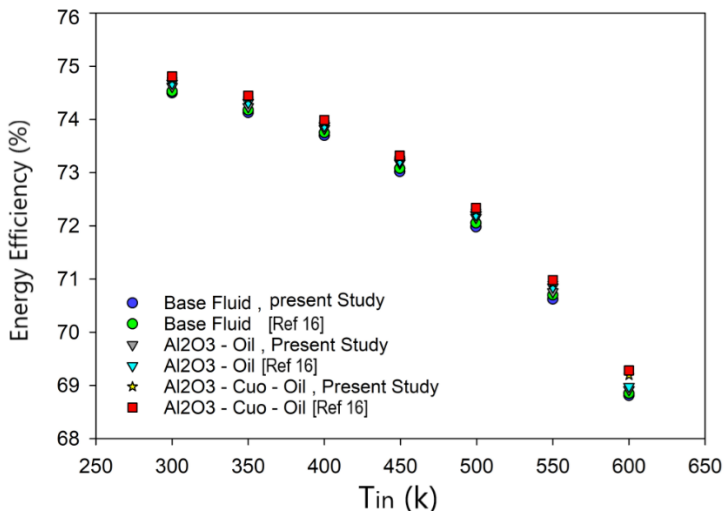
$$Nu = \frac{h \cdot D_{ri}}{K} \quad (32)$$

همچنین با استفاده از رابطه (۳۳) می‌توان ضریب اصطکاک سیال عامل داخل کلکتور را بدست آورد [۱۶]:

$$f = \frac{0.079}{(Re)^{0.25}} \quad (33)$$

اعتبار سنجی

به منظور حصول اطمینان از صحت نتایج، نتایج بدست آمده در این مطالعه، با مطالعه انجام شده توسط آل اران و همکاران [۱۶] مقایسه شده و نتیجه‌ی این مقایسه در شکل (۲) ارائه شده است. در این شکل، راندمان انرژی مربوط به مونو نانوسیال اکسید آلومینیوم- سیلترم ۸۰۰ با کسر حجمی ۴٪ و نانوسیال هیبریدی اکسید آلومینیوم- اکسید مس- سیلترم ۸۰۰ با کسر حجمی ۴٪ و با نسبت، ۵۰:۵۰ در دماهای مختلف با نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر مقایسه و ارائه شده است.

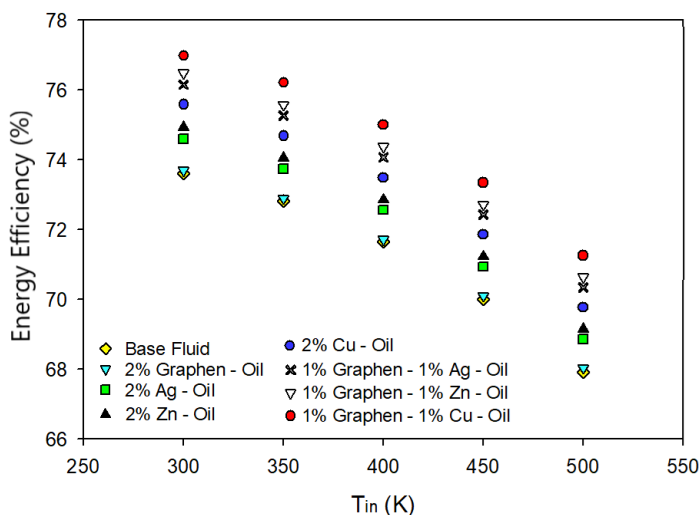


شکل ۲. نتیجه مقایسه‌ی راندمان انرژی مطالعه حاضر با مطالعه آل اران و همکاران [۱۶].

همان گونه که در شکل فوق مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده از نرم افزار در مطالعه حاضر، تطابق خوبی با مطالعه انجام شده توسط آل اران و همکاران در مرجع [۱۶] دارد.

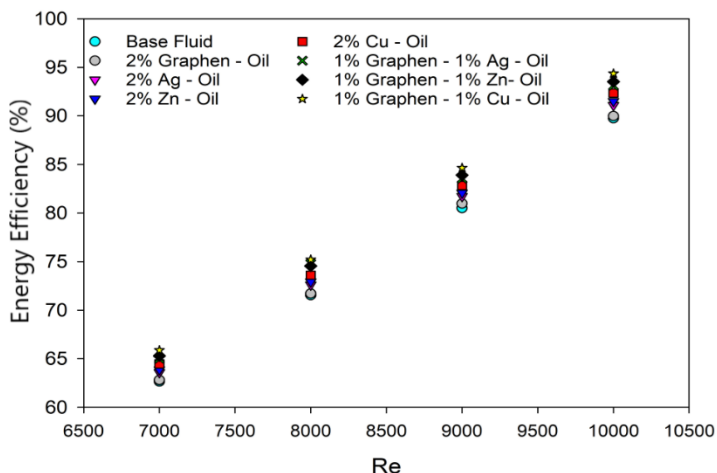
نتایج و بحث

در این بخش نتایج مربوط به تاثیر استفاده از مونو نانوسیالات و نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن بر عملکرد هیدروترمال این کلکتورسهموی خطی ارائه می‌شود. در این بررسی از نانوذرات گرافن، نقره، روی و مس در روغن سیلترم ۸۰۰ برای تولید مونو نانوسیالات با کسر حجمی ۲٪ و از ترکیب گرافن با نانوذرات فلزی نقره، روی و مس در روغن سیلترم ۸۰۰ با کسر حجمی ۲٪ و با نسبت ۵۰:۵۰ جهت تولید نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن استفاده شده است. یکی از پارامترهای مهم در مطالعه‌ی کلکتورهای خورشیدی، بحث راندمان انرژی آنهاست که در شکل (۳) راندمان انرژی مربوط به این کلکتور ارائه شده است. نمودار شکل (۳) نشان می‌دهد که افزایش دمای ورودی موجب کاهش راندمان انرژی می‌شود و علت این کاهش را می‌توان افزایش تلفات ناشی از افزایش دمای لوله جاذب دانست. میزان کاهش راندمان انرژی برای نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن، مونو نانوسیالات و سیال پایه به ترتیب برابر با مقدار ۵/۸٪، ۵/۷٪ و ۵/۶٪ بدست آمده است.



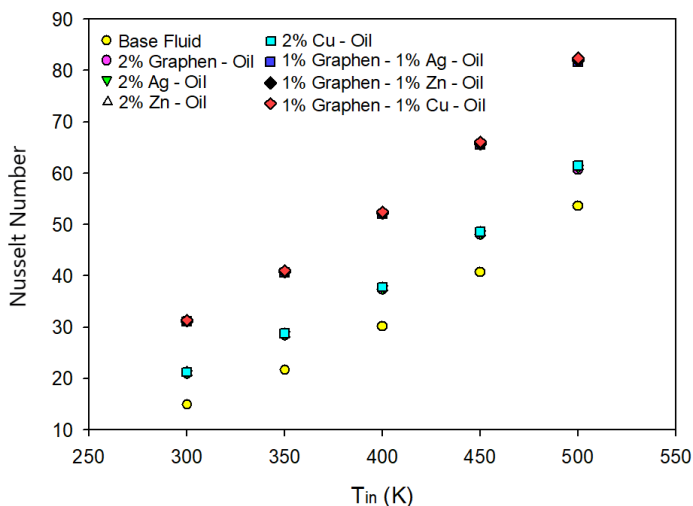
شکل ۳. تاثیر افزایش دمای ورودی بر راندمان انرژی کلکتور سهموی خطی.

نمودار شکل (۴) تاثیر افزایش عدد رینولدز بر راندمان انرژی کلکتور را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، با افزایش عدد رینولدز شاهد افزایش راندمان انرژی کلکتور خواهیم بود زیرا افزایش عدد رینولدز موجب افزایش عدد ناسلت و به دنبال آن موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی خواهد شد. میزان افزایش راندمان انرژی برای نانوسیالات هیبریدی، مونو نانوسیالات و سیال پایه به ترتیب برابر با مقدار ۲۸/۲۵٪، ۲۷/۵۵٪ و ۲۷/۱٪ بدست آمده است. با توجه به نمودار شکل‌های (۳) و (۴) بیشترین میزان راندمان انرژی در میان نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن به گرافن-مس-سیلترم ۸۰۰ و در میان مونو نانوسیالات به مس-سیلترم ۸۰۰ تعلق دارد.

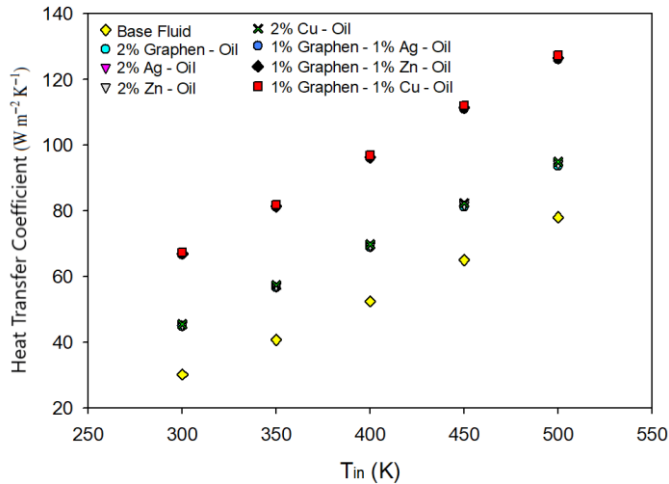


شکل ۴. تاثیر افزایش عدد رینولدز بر راندمان انرژی کلکتور سهموی خطی.

نمودار مربوط به تغییرات عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش دمای ورودی به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده است این دو نمودار نشان می‌دهند که افزایش دمای ورودی موجب افزایش عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی خواهد شد. تغییرات عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی، برای نانوسیالات هیبریدی به ترتیب به مقدار $50/78$ و $59/56$ (W/m^2K) برای مونو نانوسیالات به مقدار $40/03$ و $49/09$ (W/m^2K) و برای سیال پایه به مقدار $38/71$ و $47/83$ (W/m^2K) افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که نانو سیالات هیبریدی نسبت به مونو نانوسیالات و سیال پایه دارای عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی بزرگتری می‌باشند که علت این امر بیشتر بودن ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن نسبت به مونو نانوسیالات و سیال پایه است.

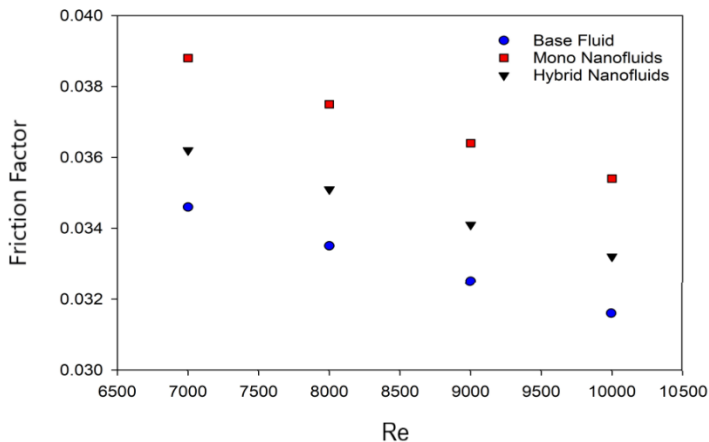


شکل ۵. تغییرات عدد ناسلت در اثر افزایش دمای ورودی در کلکتور سهموی خطی.



شکل ۶. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی در اثر افزایش دمای ورودی در کلکتور سه‌موی خطی.

در نمودار شکل (۷) تغییرات ضریب اصطکاک برای نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن، مونو نانوسیالات و سیال پایه در اعداد رینولدز مختلف و کسر حجمی ۰.۲٪ ارائه شده است، این نمودار نشان می‌دهد که در صورت افزایش عدد رینولدز، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. علت ارائه این نمودار نقش مهمی است که ضریب اصطکاک در میزان افت فشار و توان پمپاژ دارد.



شکل ۷. تاثیر افزایش عدد رینولدز بر ضریب اصطکاک در کلکتور سه‌موی خطی در دمای ۵۵۰ کلوین.

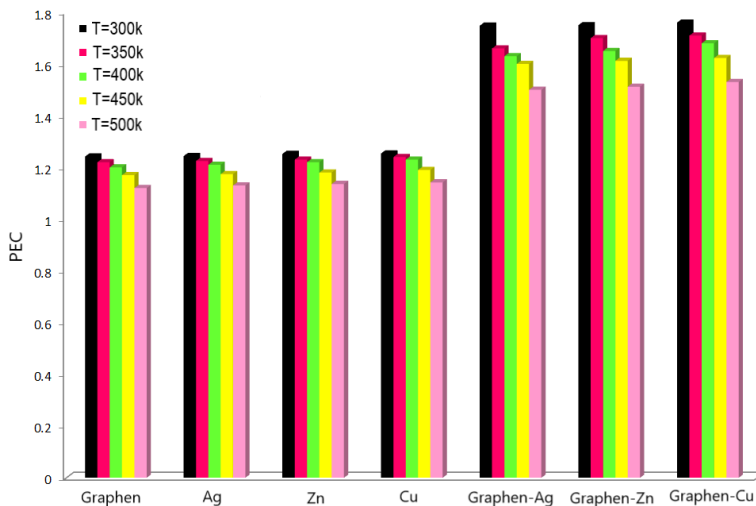
در بررسی میزان کارایی و بهبود عملکرد حرارتی یک کلکتور خورشیدی PEC پارامتر مهمی به شمار می‌رود، در واقع PEC^۱ یک عدد بی بعد است که نسبت تغییر عملکرد حرارتی به تغییر عملکرد هیدرودینامیکی را نشان می‌دهد

^۱ Performance Evaluation Criterion

این پارامتر بازده حرارتی- هیدرودینامیکی و یا عملکرد هیدروترمال نیز نامیده می‌شود که رابطه آن به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۴]:

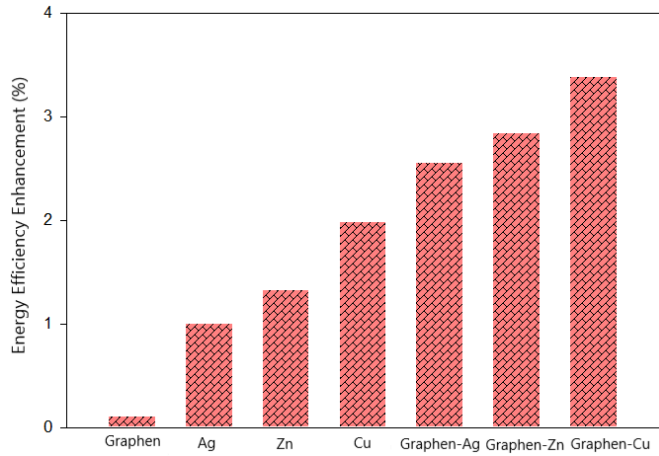
$$PEC = \frac{Nu_{nf}/Nu_{bf}}{(f_{nf}/f_{bf})^{1/3}} \quad (34)$$

هنگامی که از نانوسیال به جای سیال پایه استفاده می‌شود، باید مقدار PEC بزرگتر از عدد یک شود تا نشان دهنده سودمندی و بهبود انتقال حرارت با استفاده از نانوسیال باشد. و اگر مقدار PEC کمتر از عدد یک شود نباید از نانوسیال به جای سیال پایه استفاده شود. در شکل (۸) نمودار مربوط به بازده حرارتی- هیدرودینامیکی، کلکتور مورد مطالعه ارائه شده است. این نمودار نشان دهنده بهبود انتقال حرارت با استفاده از نانوسیالات هیبریدی و مونو نانوسیالات می‌باشد. به طور میانگین مقدار PEC برای مونو نانوسیالات برابر با ۱/۲۴ و برای نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن برابر ۱/۷۵ می‌باشد.

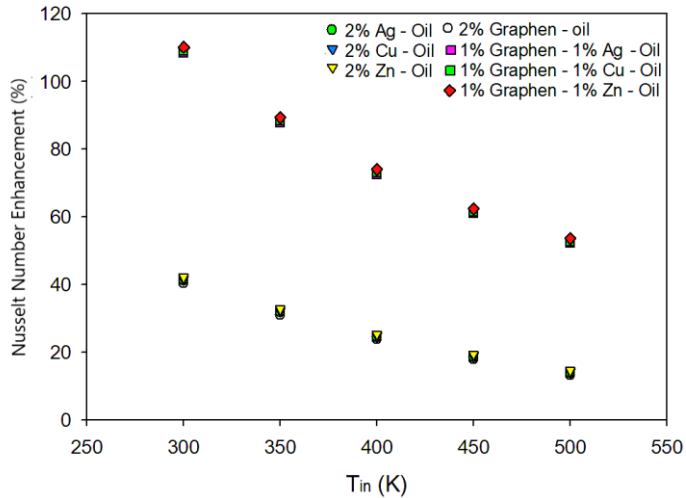


شکل ۸. تغییرات بازده حرارتی- هیدرودینامیکی کلکتور سهموی خطی بر حسب دمای ورودی برای مونو نانوسیالات و نانوسیالات هیبریدی در روغن سیلترم ۸۰۰ و با کسر حجمی ۲٪ و با نسبت ۵۰:۵۰.

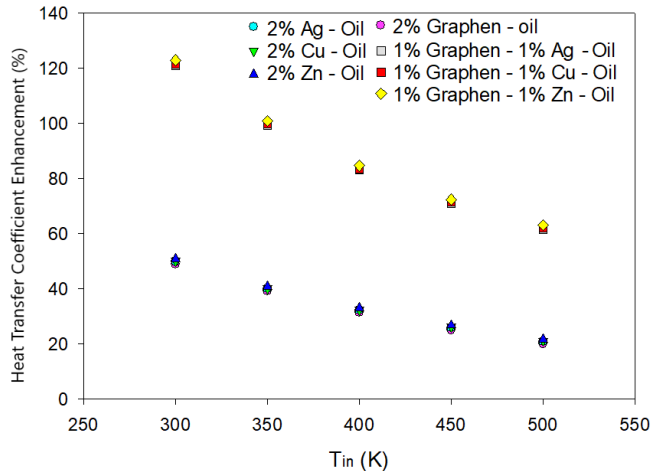
شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد که افزایش دما موجب کاهش درصد بهبودی عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود این کاهش درصد بهبودی در عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی برای مونو نانوسیالات به ترتیب ۲۷/۳۱٪ و ۲۹٪ و برای نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن به ترتیب ۵۶/۲۰٪ و ۵۹/۶۲٪ می‌باشد. همچنین همانگونه که از نمودارهای ۹ تا ۱۱ مشاهده می‌شود بیشترین و کمترین اثر بهبودی بر پارامترهای راندمان انرژی، عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی از میان مونو نانوسیالات به ترتیب برای مس- سیلترم ۸۰۰ و گرافن- سیلترم ۸۰۰ و نیز بیشترین و کمترین اثر بهبودی بر پارامترهای نامبرده از میان نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن به ترتیب برای گرافن- مس- سیلترم ۸۰۰ و گرافن- نقره- سیلترم ۸۰۰ بدست آمده است.



شکل ۹. اثر مونو نانوسیالات و نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن در بهبود راندمان انرژی در دمای ۳۰۰ کلوین.



شکل ۱۰. تاثیر افزایش دمای ورودی بر بهبود عدد ناسلت در کلکتور سهموی خطی.



شکل ۱۱. تاثیر افزایش دمای ورودی بر بهبود ضریب انتقال حرارت جابجایی در کلکتور سهموی خطی.

در جدول (۴) درصد بهبودی در راندمان انرژی، عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی و در جدول (۵) مقدار عملکرد هیدروترمال و ضریب اصطکاک مربوط به مونو نانوسیالات و نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن با کسر حجمی ۲٪ و با نسبت ۵۰:۵۰ در دمای ۳۰۰ کلوین ارائه شده است.

جدول ۴. اثر مونو نانوسیالات و نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن در بهبود راندمان انرژی، عدد ناسلت و ضریب انتقال

حرارت در دمای ۳۰۰ کلوین

نانوسیالات	درصد بهبود راندمان انرژی	درصد بهبود عدد ناسلت	درصد بهبود ضریب انتقال حرارت جابجایی
گرافن- سیلترم ۸۰۰	۰/۱۱	۴۰/۳۹	۴۸/۹۹
نقره - سیلترم ۸۰۰	۱	۴۱/۲۲	۴۹/۸۵
روی - سیلترم ۸۰۰	۱/۳۲	۴۱/۵۱	۵۰/۱۵
مس - سیلترم ۸۰۰	۱/۹۸	۴۲/۱۱	۵۰/۸۱
گرافن - نقره - سیلترم ۸۰۰	۲/۵۵	۱۰۸/۳۵	۱۲۱/۰۹
گرافن - روی - سیلترم ۸۰۰	۲/۸۳	۱۰۸/۹۴	۱۲۱/۶۶
گرافن - مس - سیلترم ۸۰۰	۳/۳۸	۱۱۰/۰۱	۱۲۲/۹۴

جدول ۵. اثر مونو نانوسیالات و نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن بر عملکرد هیدروترمال و ضریب اصطکاک در

دمای ۳۰۰ کلوین.

نانوسیالات	عملکرد هیدروترمال	ضریب اصطکاک
گرافن- سیلترم ۸۰۰	۱/۲۴۲	۰/۰۳۵
نقره - سیلترم ۸۰۰	۱/۲۴۴	۰/۰۳۵
روی - سیلترم ۸۰۰	۱/۲۵۲	۰/۰۳۵
مس - سیلترم ۸۰۰	۱/۲۵۴	۰/۰۳۵

ناتوسیالات	عملکرد هیدروترمال	ضریب اصطکاک
گرافن - نقره - سیلترم ۸۰۰	۱/۷۴۸	۰/۰۳۴
گرافن - روی - سیلترم ۸۰۰	۱/۷۵۰	۰/۰۳۴
گرافن - مس - سیلترم ۸۰۰	۱/۷۶۰	۰/۰۳۴

نتیجه گیری

در این مطالعه، تاثیر استفاده از گرافن و ترکیب آن با سه نانوذره فلزی نقره، روی و مس به منظور تولید نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن بر عملکرد هیدروترمال یک کلکتور سهموی خطی با استفاده از نرم افزار متلب به صورت تئوری مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی، جریان سیال به صورت متلاطم، پایا و تراکم ناپذیر فرض شده است و از روغن سیلترم ۸۰۰ با کسر حجمی ۲٪ و با نسبت ۵۰:۵۰ به عنوان سیال پایه استفاده شده و به منظور حصول نتایج دقیق تر، خواص ترموفیزیکی این سیال پایه وابسته به دما در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش دما در ورودی راندمان انرژی کاهش و با افزایش عدد رینولدز راندمان انرژی افزایش خواهد یافت. همچنین با افزایش دما در ورودی عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش خواهد یافت. کاراترین سیال عامل کلکتور، در میان مونو نانوسیالات مس-سیلترم ۸۰۰ و در میان نانوسیالات هیبریدی حاوی گرافن، گرافن-مس - سیلترم ۸۰۰ می‌باشد. نتیجه‌ی استفاده از گرافن در این مطالعه، نشان می‌دهد که گرافن نسبت به نانوذرات فلزی عملکرد پایین تری دارد اما ترکیب گرافن با نانوذرات فلزی موجب بهبود مقادیر راندمان انرژی، عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی و عملکرد هیدروترمال نسبت به مونو نانوسیالات استفاده شده می‌شود.

فهرست علائم و نشانه‌ها

A_a	مساحت کلکتور، (m^2)	\dot{m}	دبی جرمی سیال عامل (kg/s)
C	نسبت غلظت	N_u	عدد ناسلت
Cp	گرمای ویژه سیال، $(J / kg.k)$	PEC	عملکرد هیدروترمال
D_{ri}	قطر داخلی لوله جاذب، (m)	Pr	عدد پرانتل
D_{ro}	قطر خارجی لوله جاذب، (m)	Q_{abs}	مقدار انرژی جذب شده توسط دریافت کننده، (W)
D_{ci}	قطر داخلی پوشش شیشه‌ای، (m)	Q_{loss}	اتلافات حرارتی بین پوشش شیشه‌ای و محیط، (W)
D_{co}	قطر داخلی پوشش شیشه‌ای، (m)	Q_s	انرژی جذب شده توسط صفحه جاذب، (W)
F	فاصله کانونی، (m)	Q_u	انرژی مفید کلکتور، (W)
f	ضریب اصطکاک	Re	عدد رینولدز
g	شتاب گرانش، (m / s^2)	T_a	دمای محیط، (K)
G_a	شدت تابش خورشید، (w/m^2)	T_c	دمای متوسط پوشش شیشه‌ای، (K)
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال عامل، $(K(w/m^2.k))$	T_{sky}	دمای آسمان، (K)
h_{out}	ضریب انتقال حرارت جابجایی بین پوشش شیشه‌ای و محیط اطراف، $(K(w/m^2.k))$	V_{flow}	دبی حجمی، (L/min)
K	ضریب هدایت حرارتی، $(W/m.k)$	V_{wind}	سرعت باد، (m/s)
K_{θ}	بهینه ساز زاویه برخوردی	W	عرض کلکتور، (m)
L	طول کلکتور و لوله جاذب، (m)		

علائم یونانی

α	ضریب جذب	ρ	چگالی (kg/m^3)
γ	ضریب دریافت	ρ_m	ضریب انعکاس منعکس کننده
ε	ضریب صدور	τ	ضریب عبور پوشش شیشه ای
η	راندمان	ϕ	کسر حجمی ذرات نانو
θ	زاویه برخورد، ($^\circ$)	ϕ_1	کسر حجمی ذرات نانو ۱
μ	لزجت دینامیکی، (kg/m.s)	ϕ_2	کسر حجمی ذرات نانو ۲

زیرنویس ها

a	دهانه	$np1$	نانوذره ۱
amb	محیط	$np2$	نانوذره ۲
bf	سیال پایه	opt	نوری
c	پوشش	out	خروجی
ci	پوشش داخلی	ri	دریافت کننده داخلی
co	پوشش خارجی	ro	دریافت کننده خارجی
en	انرژی	s	جذب شده
in	ورودی	sky	آسمان
loss	اتلافات حرارتی	sun	خورشید
nf	نانوسیال	u	مفید
np	نانوذره	$np1$	نانوذره ۱

References

- [1] Sansaniwal, S. K., Sharma, V., & Mathur, J. (2018). Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(4), 1576-1601. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.003>
- [2] Zahedi, R., Ahmadi, A., & Sadeh, M. (2021). Investigation of the load management and environmental impact of the hybrid cogeneration of the wind power plant and fuel cell. *Energy Reports*, 7(7), 2930-2939. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.05.008>
- [3] Li, Z. X., Shahsavari, A., Al-Rashed, A. A. A., Kalbasi, R., Afrand, M., & Talebizadehsardari, P. (2019). Multi-objective energy and exergy optimization of different configurations of hybrid earth-air heat exchanger and building integrated photovoltaic/thermal system. *Energy Conversion and Management*, 195(9), 1098-1110. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.074>
- [4] Parsa, S. M., Rahbar, A., Javadi Y, D., Koleini, M. H., Afrand, M., & Amidpour, M. (2020). Energy-matrices, exergy, economic, environmental, exergoeconomic, enviroeconomic, and heat transfer (6E/HT) analysis of two passive/active solar still water desalination nearly 4000m: Altitude concept. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121243>
- [5] Parsa, S. M., Rahbar, A., Koleini, M. H., Aberoumand, S., Afrand, M., & Amidpour, M. (2020). A renewable energy-driven thermoelectric-utilized solar still with external condenser loaded by silver/nanofluid for simultaneously water disinfection and desalination. *Desalination*, 480, 114354. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114354>

- [6] Afrand, M., Shahsavari, A., Sardari, P. T., Sopian, K., & Salehipour, H. (2019). Energy and exergy analysis of two novel hybrid solar photovoltaic geothermal energy systems incorporating a building integrated photovoltaic thermal system and an earth air heat exchanger system. *Solar Energy*, 188(8), 83-95. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.080>
- [7] Rostami, S., Afrand, M., Shahsavari, A., Sheikholeslami, M., Kalbasi, R., Aghakhani, S., Shadloo, M. S., & Oztop, H. F. (2020). A review of melting and freezing processes of PCM/nano-PCM and their application in energy storage. *Energy*, 211(5), 118698. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118698>
- [8] Shahsavari, A. (2021). Experimental evaluation of energy and exergy performance of a nanofluid-based photovoltaic/thermal system equipped with a sheet-and-sinusoidal serpentine tube collector. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125064. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125064>
- [9] Sohani, A., Shahverdian, M. H., Sayyaadi, H., Samiezadeh, S., Doranehgard, M. H., Nizetic, S., & Karimi, N. (2021). Selecting the best nanofluid type for A photovoltaic thermal (PV/T) system based on reliability, efficiency, energy, economic, and environmental criteria. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 124, 351-358. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.02.027>
- [10] Korres, D., & Tzivanidis, C. (2018). A new mini-CPC with a U-type evacuated tube under thermal and optical investigation. *Renewable energy*, 128, 529-540. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.054>
- [11] Subramani, J., Nagarajan, P. K., Mahian, O., & Sathyamurthy, R. (2018). Efficiency and heat transfer improvements in a parabolic trough solar collector using TiO₂ nanofluids under turbulent flow regime. *Renewable energy*, 119, 19-31. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.079>
- [12] Bellos, E., & Tzivanidis, C. (2019). Thermal efficiency enhancement of nanofluid-based parabolic trough collectors. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135(1), 597-608. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7056-7>
- [13] Ebrazeh, S., & Sheikholeslami, M. (2020). Applications of nanomaterial for parabolic trough collector. *Powder Technology*, 375(6), 472-492. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.005>
- [14] Ranga Babu, J. A., Kumar, K. K., & Srinivasa Rao, S. (2017). State-of-art review on hybrid nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 551-565. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.040>
- [15] Che Sidik, N. A., Mahmud Jamil, M., Aziz Japar, W. M. A., & Muhammad Adamu, I. (2017). A review on preparation methods, stability and applications of hybrid nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1112-1122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.221>
- [16] Al-Oran, O., Lezsovits, F., & Aljawabrah, A. (2020). Exergy and energy amelioration for parabolic trough collector using mono and hybrid nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 140(3), 1579-1596. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09371-x>
- [17] Minea, A. A., & El-Maghlany, W. M. (2018). Influence of hybrid nanofluids on the performance of parabolic trough collectors in solar thermal systems: Recent findings and numerical comparison. *Renewable energy*, 120, 350-364. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.093>
- [18] Ekiciler, R., Arslan, K., Turgut, O., & Kurşun, B. (2021). Effect of hybrid nanofluid on heat transfer performance of parabolic trough solar collector receiver. *Journal of Thermal*

- Analysis and Calorimetry*, 143(2), 1637-1654. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09717-5>
- [19] Ajar, W., Hernández, J. A., Parrales, A., & Torres, L. (2023). Thermal efficiency improvement of parabolic trough solar collector using different kinds of hybrid nanofluids. *Case Studies in Thermal Engineering*, 42, 102759. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102759>
- [20] Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind* (5 ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119540328>
- [21] Behar, O., Khellaf, A., & Mohammadi, K. (2015). A novel parabolic trough solar collector model – Validation with experimental data and comparison to Engineering Equation Solver (EES). *Energy Conversion and Management*, 106, 268-281. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.09.045>
- [22] Swinbank, W. C. (1963). Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89(381), 339-348. <https://doi.org/10.1002/qj.49708938105>
- [23] Qiu, Y., Li, M-J., He, Y-L., & Tao, W-Q. (2017). Thermal performance analysis of a parabolic trough solar collector using supercritical CO₂ as heat transfer fluid under non-uniform solar flux. *Applied Thermal Engineering*, 115, 1255-1265. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.044>
- [24] Okonkwo, E. C., Wole-Osho, I., Kavaz, D., & Abid, M. (2019). Comparison of experimental and theoretical methods of obtaining the thermal properties of alumina/iron mono and hybrid nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*, 292, 111377. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111377>