



Effect of Different Single Nanoparticles on the Performance of a Parabolic Trough Solar Receiver Equipped with Twisted-Tape Inserts

Donya Sabaghchi¹ , Mohammad Sadegh Abedinejad^{2*} , Ali Reza Teymoori³

¹ Master's Degree, Alzahra University, Tehran, Iran. donyasabbaghchi12@gmail.com

² Assistant Professor, Alzahra University, Tehran, Iran. (*Correspondence: m.abedinejad@alzahra.ac.ir)

³ Master's Degree, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. a_teymoori@alumni.iust.ac.ir

HIGHLIGHTS

- Silicon carbide and aluminum oxide nanoparticles enhance the thermal performance of twisted-tape solar collectors
- Nanoparticles lead to a reduction in pressure drop within solar collectors
- The concentration and type of nanoparticles significantly influence the performance of twisted-tape solar collectors

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 11 April 2026

Received in revised form: 06 June 2026

Accepted: 18 June 2026

Available online: 1 July 2026

*Correspondence:

m.abedinejad@alzahra.ac.ir

Keywords:

Thermal Enhancement Factor

Nanofluids

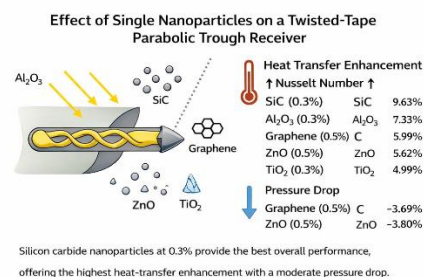
Temperature

Parabolic Trough Receiver

Twisted Tape

Solar Collector

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

In this study, the thermal-hydraulic performance of a parabolic solar receiver equipped with twisted tapes inside the absorber tube is numerically investigated using various nanofluids. The studied nanofluids consist of aluminum oxide (Al₂O₃), graphene, silicon carbide (SiC), zinc oxide (ZnO), and titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles dispersed in Syltherm 800 as the base fluid at volume concentrations of 1.0%, 3.0%, and 5.0%. Numerical simulations are performed using ANSYS Fluent with the realizable k-ε turbulence model over a Reynolds number range of 9200 to 115000. The results indicate that the addition of nanoparticles generally enhances the Nusselt number and improves heat transfer performance; however, the magnitude of enhancement strongly depends on the nanoparticle type and its volume concentration. Among the investigated nanofluids, aluminum oxide and silicon carbide at a concentration of 3.0% provide the best compromise between heat transfer enhancement and pressure drop. In contrast, graphene exhibits the highest thermal enhancement at a concentration of 5.0%. Overall, the findings demonstrate the significant potential of nanofluids for improving the performance of parabolic solar collectors.

Cite this article: Sabaghchi D[®], Abedinejad M S[®], Teymoori A R[®]. Effect of Different Single Nanoparticles on the Performance of a Parabolic Trough Solar Receiver Equipped with Twisted-Tape Inserts. Journal of Aerospace Mechanics. 2025; 22 (2): 25-42.

DOI: <https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1558>

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein Comprehensive University.



1. Introduction

One of the advanced technologies for increasing solar power generation is the utilization of parabolic troughs with a twisted tape in the absorber tube. This technology enhances efficiency by improving heat transfer and reducing the cost of generated energy. Key achievements of optimizing heat transfer include reducing the weight and dimensions of the absorber tube, lowering equipment temperature, and minimizing the temperature difference between fluids. Several researchers have suggested adding nanoparticles to the working fluid as a means to enhance heat transfer in thermal systems. Furthermore, the thermal performance analysis of a parabolic solar collector using a combination of nanofluids and twisted tape inserts has shown that this approach can significantly improve the collector's heat transfer performance.

The novelty of this research lies in the simultaneous examination of the nanoparticle type, the presence of a twisted tape insert, and non-uniform heat flux boundary conditions, all integrated within a unified numerical model specifically tailored for application to a thermal solar collector — an approach that has been scarcely addressed in the existing literature in such a comprehensive manner.

Accordingly, the present study focuses on examining the influence of nanoparticle addition on the Nusselt number, thermal enhancement factor, and friction factor to evaluate system performance. Subsequently, the comparative analysis of the performance parameters corresponding to each nanofluid is conducted to determine the optimal configuration.

2. Methodology

In this research, the heat transfer performance of a parabolic trough with twisted tapes inside the absorber tube, using five nanoparticles (Aluminum Oxide (Al_2O_3), Graphene, Silicon Carbide (SiC), Zinc Oxide (ZnO), and Titanium Dioxide (TiO_2)) at volume fractions of 0.1%, 0.3%, and 0.5%, is investigated.

For the simulation, the ANSYS Fluent software package was employed, utilizing the finite volume method and the realizable k - ε turbulence model. The flow within the absorber tube was considered turbulent and fully developed, with Reynolds numbers in the range of $9200 < \text{Re} \leq 115000$ at a temperature of 400 K. The inlet boundary condition was set as constant temperature and velocity, while the wall boundary condition is constant heat flux. The internal walls of the absorber tube are treated as no-slip and impermeable. In this study, nanofluids comprising Aluminum Oxide (Al_2O_3), Graphene, Silicon Carbide (SiC), Zinc Oxide (ZnO), and Titanium Dioxide (TiO_2) were utilized as heat transfer fluids at volume concentrations of 0.1%, 0.3%, and 0.5%. Due to the negligible volume fraction and to save computational time and cost, their simulations were also performed using a single-phase approach.

3. Results

3.1. Validation

Initially, the numerical results are examined in the absence of nanoparticles and are compared with the data from the research by Mwesigye et al. [25] for validation. Subsequently, the impact of the presence of different nanoparticles at varying percentages on the performance of the solar receiver is analyzed. A comparison of the friction factor distribution, Nusselt number distribution, and thermal enhancement factor, serving as an initial tool to assess heat transfer enhancement techniques across different Reynolds numbers against the data from Mwesigye et al., indicates that the differences between the results are less than 5%, 3%, and 10%, respectively.

3.2. Effects of different nanoparticles with various volume fraction

The addition of Aluminum Oxide nanoparticles to the base fluid has led to an increase in the Nusselt number at all concentrations compared to the nanoparticle-free state. At a volume fraction of 0.3%, this improvement is at its maximum (7.33%) relative to the other two percentages, reaching up to 33.98% at medium Reynolds numbers and exhibiting the highest peak Nusselt number in the mid-Reynolds number range. Across all combinations (0.1% to 0.5% Aluminum Oxide nanoparticles), the friction factor decreases with an increase in the Reynolds number, indicating the transition of the flow from laminar to turbulent regimes. The curve for the 0.5% concentration is slightly lower than the other curves at all Reynolds numbers, meaning this concentration has the most significant effect on friction reduction, decreasing the friction factor by approximately 3.8% compared to the nanoparticle-free state. The distinction between the curves is more evident at lower Reynolds numbers. As the Reynolds number increases, the thermal enhancement factor rises for all nanoparticle concentrations, signifying better performance of

nanoparticles in higher-speed flows. Increasing the concentration of Aluminum Oxide nanoparticles from 0.1% to 0.3% results in thermal enhancement factor improvements of 3.64% and 8.83%, respectively, demonstrating the positive impact of increased nanoparticle concentration on heat transfer. This improvement reaches its peak at a 0.3% concentration.

The addition of Graphene nanoparticles to the base fluid results in a significant increase in the Nusselt number compared to the nanoparticle-free state. Graphene achieves the highest Nusselt number increase at a 0.5% concentration (5.99%), indicating the optimal effect of this concentration in improving thermal performance. With an increase in the percentage of Graphene nanoparticles from 0.1% to 0.5%, the decreasing trend of the friction factor is slightly intensified across all Reynolds number ranges. Graphene nanoparticles even increase the thermal enhancement factor at a low concentration of 0.1% (4.23%). This improvement peaks at a 0.5% concentration (7.44%).

The addition of Silicon Carbide nanoparticles to the base fluid leads to a noticeable increase in the Nusselt number compared to the nanoparticle-free state. A 0.3% concentration of Silicon Carbide causes a very significant increase in the Nusselt number across the entire range of Reynolds numbers (9.23%). As the percentage of Silicon Carbide nanoparticles increases from 0.1% to 0.5%, the friction factor value decreases further across all Reynolds number ranges. Compared to the base state (without nanoparticles), adding 0.1% nanoparticles causes a 4.26% increase in thermal performance. At a 0.3% concentration, the maximum improvement compared to the base state is observed (10.19%), especially around a Reynolds number of 60,000 where the greatest improvement in thermal enhancement factor is seen (17.50%).

The addition of Titanium Dioxide nanoparticles leads to a moderate improvement in heat transfer. This increase in heat transfer reaches its minimum at 0.5% Titanium Dioxide (1.05%). The addition of Titanium Dioxide nanoparticles causes a reduction in the friction factor compared to the base fluid (without nanoparticles).

At a 0.3% concentration, similar to Aluminum Oxide and Silicon Carbide nanoparticles, the largest increase in the thermal enhancement factor is observed (6.39%).

The addition of Zinc Oxide nanoparticles improves heat transfer and reduces the friction factor compared to the base fluid. However, due to its moderate thermal conductivity, its performance is weaker than nanoparticles like Graphene. 0.5% creates the highest friction factor, particularly in turbulent flows. Zinc Oxide exhibits better performance than Titanium Dioxide across all concentrations.

4. Conclusion

The results indicated that the addition of nanoparticles generally improves heat transfer, but the extent of this improvement is dependent on the type of nanoparticle, volumetric concentration, and flow regime. Among the investigated nanoparticles, Aluminum Oxide and Silicon Carbide at a 0.3% concentration exhibited a balanced performance in terms of increasing the Nusselt number and thermal enhancement factor. Notably, Silicon Carbide at this concentration achieved the highest average increase in the Nusselt number and reached peak thermal performance at intermediate Reynolds numbers. Graphene, owing to its layered structure, low weight, and high stability, demonstrated the greatest increase in the Nusselt number and thermal enhancement factor even at a 0.5% concentration without particle aggregation, showing a significant advantage over other nanoparticles in this regard. Conversely, titanium dioxide showed favorable performance only at low to intermediate concentrations and was not a desirable option at a 0.5% concentration due to increased viscosity and a decline in thermal performance.



تأثیر حضور نانوذرات تک نوع مختلف بر عملکرد یک گیرنده سهموی خورشیدی با نوارهای پیچشی در لوله جاذب

دنیا صباغی^۱، محمدصادق عابدی نژاد^۲، علیرضا تیموری^۳

^۱ کارشناسی ارشد، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران. donyasabbaghchi12@gmail.com

^۲ استادیار، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران. (نویسنده مسئول: m.abedinejad@alzahra.ac.ir)

^۳ کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. a_teymoori@alumni.iust.ac.ir

برجسته‌ها

- نانوذرات سیلیکون کاربید و آلومینیوم اکسید سبب بهبود عملکرد حرارتی کلکتور خورشیدی با نوار پیچشی می‌شوند.
- نانوذرات سبب کاهش افت فشار در کلکتورهای خورشیدی می‌شوند.
- غلظت و نوع نانوذره بر عملکرد کلکتور خورشیدی با نوار پیچشی مؤثر است.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

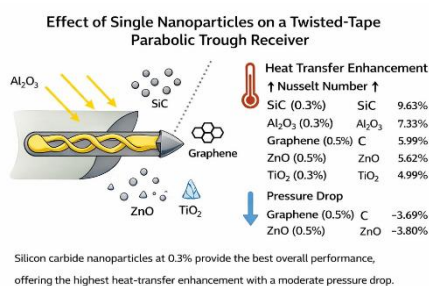
نوع مقاله: علمی پژوهشی
دریافت: ۲۲ فروردین ۱۴۰۵
بازنگری: ۱۶ خرداد ۱۴۰۵
پذیرش: ۲۸ خرداد ۱۴۰۵
ارائه آنلاین: ۱۰ تیر ۱۴۰۵
نویسنده مسئول:

m.abedinejad@alzahra.ac.ir

کلید واژه‌ها:

فاکتور ازدیاد حرارت
نانوسیالات
دما
گیرنده سهموی
نوار پیچشی
کلکتور خورشیدی

چکیده گرافیکی



چکیده

در این پژوهش، عملکرد حرارتی - هیدرولیکی یک گیرنده خورشیدی سهموی مجهز به نوار پیچشی داخل لوله جاذب با استفاده از نانوسیالات مختلف به صورت عددی بررسی شده است. نانوسیالات مورد مطالعه شامل نانوذرات آلومینیوم اکسید (Al_2O_3)، گرافن (Graphene)، سیلیکون کاربید (SiC)، اکسید روی (ZnO) و دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) پراکنده شده در سیال پایه Syltherm 800 در کسرهای حجمی 0/1، 0/3 و 0/5 درصد هستند. شبیه سازی های عددی با استفاده از نرم افزار ANSYS Fluent و مدل آشفتگی k-ε realizable در بازه عدد رینولدز 9200 تا 115000 انجام شده است. نتایج نشان می دهد که افزودن نانوذرات به طور کلی موجب افزایش عدد ناسلت و بهبود انتقال حرارت می شود، اما میزان این بهبود به نوع و غلظت نانوذره وابستگی زیادی دارد. در میان نانوسیالات بررسی شده، آلومینیوم اکسید و سیلیکون کاربید در غلظت 0/3 درصد بهترین تعادل بین افزایش انتقال حرارت و افت فشار را ارائه می دهند. در مقابل، گرافن در غلظت 0/5 درصد بیشترین بهبود حرارتی را نشان می دهد. در مجموع، نتایج بیانگر پتانسیل قابل توجه نانوسیالات در بهبود عملکرد کلکتورهای خورشیدی سهموی است.

استناد: اسماعیلی، آرزو، شاملی، محرم[©]، خندانی کوزه کنان، سید توحید، هاشمی، غلامرضا. بررسی دینامیک کیوبست در داخل پی پاد با در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر آن. مکانیک هوا/فضا. (۱۴۰۵)؛ ۲۲ (۲): ۴۲-۲۵.

<https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1558>

© نویسنده (گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می دارند.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).



1- مقدمه

یکی از فناوری‌های پیشرفته برای افزایش تولید توان خورشیدی استفاده از گیرنده‌های سهموی با نوار پیچشی در لوله جاذب است. این فناوری با استفاده از بهبود انتقال حرارت و کاهش هزینه انرژی تولید شده افزایش بازدهی را ایجاد می‌کند. کاهش وزن و ابعاد لوله جاذب، کاهش دمای تجهیزات و کاهش اختلاف دمای بین سیالات از مهم‌ترین دستاوردهای بهینه‌سازی انتقال حرارت است. تعدادی از محققان جهت بهبود انتقال حرارت در سامانه‌های حرارتی، استفاده از نانوذرات را در سیال عامل پیشنهاد کرده‌اند [1-4]. هندسه حاوی جریان، نوع نانوذره، مقدار آن و سیال عامل از جمله عوامل مؤثر بر تأثیرگذاری حضور نانوذرات بر عملکرد یک سامانه حرارتی است. عملکرد کلکتور خورشیدی صفحه تخت را با انواع مختلف نانوسیالات حاوی نانوذرات آلومینیوم اکسید، اکسید مس، اکسید سیلیکون و تیتانیوم دی‌اکسید پراکنده در آب تجزیه و تحلیل کردند. نتایج آنها نشان داد استفاده از نانوسیال اکسید مس منجر به کاهش 34/4 درصدی در تولید آنتروپی و بهبود 15/22 درصدی در ضریب انتقال حرارت در مقایسه با آب شده است [5]. پتانسیل استفاده از یک نوع کلکتور خورشیدی جدید به نام کلکتور خورشیدی جذب مستقیم با استفاده از نانوسیال متشکل از نانوذرات آلومینیوم معلق در آب نوع دیگری از سیالات به کارگیری شده است. نتایج نشان می‌دهد در شرایط کاری مشابه، کلکتور جدید با نانوسیال راندمان را تا 10 درصد نسبت به یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت معمولی بهبود می‌دهد [6]. محققان برای اعتبارسنجی مدل عددی توسعه یافته، کلکتور خورشیدی جذب مستقیم با استفاده از نانوسیال‌ها میکرو کلکتور ساخته و عملکرد آن را با نانوسیال‌ها مختلف حاوی گرافیت، نانولوله‌های کربنی و نانوذرات نقره آزمایش کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها پیش‌بینی‌های مدل عددی را تأیید کرد و افزایش 5 درصدی راندمان کلکتور جذب مستقیم با نانوسیال‌ها را در مقایسه با کلکتورهای معمولی نشان داد [7]. در پژوهشی دیگر راندمان حرارتی و بازده انرژی یک کلکتور خورشیدی معمولی با یک کلکتور مبتنی بر نانوسیال مقایسه شده است. یافته‌ها نشان داد کلکتور مبتنی بر نانوسیال راندمان حرارتی بالاتری از خود نشان می‌دهد و به انرژی کمتری برای تولید نیاز دارد و استفاده از نانوذرات کوچک‌تر می‌تواند کارایی کلکتور را افزایش دهد [8]. استفاده از مدل تحلیلی برای طراحی کلکتورهای خورشیدی حجمی و تفاوت آن با کلکتورهای صفحه تخت سنتی نتایج ارزشمندی را نشان می‌دهد. محققان با استفاده از نانوسیال متشکل از نانوذرات گرافیت پراکنده در سیال پایه VP-1 و در یک کانال با عمق 1 cm راندمان کلکتور خورشیدی حجمی را تحلیل کردند. نتایج نشان داد راندمان حدود 35 درصد بهبود یافته است [9]. ارزیابی عملکرد کلکتور خورشیدی جذب مستقیم با استفاده از نانوسیالات آلومینیوم اکسید با چهار کسر

حجمی مختلف از نانوذرات آلومینیوم اکسید با اندازه 20 nm نتایج قابل توجهی از راندمان را نشان می‌دهد. استفاده از نانوسیالات به عنوان سیال عامل، خواص تابشی و ترموفیزیکی کلکتور را بهبود می‌بخشد و منجر به افزایش راندمان آن می‌شود [10]. در کانال‌های موج‌دار از یک مدل ترکیبی برای تجزیه و تحلیل اثرات عدد رینولدز، کسر حجمی نانوذرات و دامنه دیوار موج‌دار بر انتقال حرارت استفاده می‌شود. افزایش انتقال حرارت نانوسیالات اکسید گرافن - آب نشان داد افزایش کسر حجمی و عدد رینولدز باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود. این مسئله نشان‌دهنده افزایش انتقال حرارت است. نانوسیالات اکسید گرافن - آب و سطوح موج‌دار می‌توانند به طور مؤثر برای بهبود انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی مبتنی بر کانال استفاده شوند [11]. بررسی عملکرد حرارتی یک کلکتور خورشیدی سهموی با استفاده از نانوسیال‌ها و صفحات پیچشی با میخ روش دیگر ارزیابی کارایی نانوسیال‌ها است. محققان از کسرهای حجمی مختلف نانوسیال آلومینیوم اکسید آب (0/1 و 0/3 درصد) و دو نسبت پیچش مختلف برای صفحات پیچشی استفاده می‌کنند. یافته‌ها نشان داد استفاده ترکیبی از نانوسیالات و صفحات پیچشی به طور قابل توجهی عملکرد انتقال حرارت کلکتور را افزایش می‌دهد. باین حال، ضریب اصطکاک نیز با غلظت ذرات بالاتر به دلیل افزایش لزجت نانوسیال افزایش می‌یابد. استفاده از نانوسیال‌ها و صفحات پیچشی با میخ یک روش امیدوارکننده برای بهبود راندمان کلکتورهای خورشیدی سهموی است [12]. در یک مطالعه عددی، رفتار انتقال حرارت و تولید آنتروپی سیال فروفلوئید غیرنیوتنی (نوعی نانوسیال مغناطیسی) تحت تأثیر عوامل داخلی و خارجی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میدان مغناطیسی خارجی و خواص رئولوژیکی سیال نقش مهمی در بهبود انتقال حرارت و کنترل تولید آنتروپی دارند [3]. در یک مطالعه تجربی، اثر پارامترهای مؤثر مانند دما، غلظت و ترکیب نانوذرات بر رسانش حرارتی نانوسیال هیبریدی پنج جزئی بررسی شد. نتایج نشان دادند که با افزایش دما و غلظت، رسانش حرارتی به طور قابل توجهی افزایش یافته و ترکیبات حاوی آلومینا و مس بیشترین بهبود را نشان دادند [13].

بر اساس تحقیقات انجام شده و مرور منابع، تابه حال از نانوذرات آلومینیوم اکسید (Al_2O_3)، گرافن (Graphene)، سیلیکون کاربید (SiC)، روی اکسید (ZnO) و دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) در جاذب‌های خورشیدی دارای نوار پیچشی و سیال پایه Syltherm 800 استفاده نشده است. تمایز این پژوهش با مطالعات پیشین در بررسی هم‌زمان تأثیر نوع نانوسیال، حضور نوار پیچشی و شرایط مرزی غیریکنواخت شار حرارتی در قالب یک مدل عددی واحد و در زمینه کاربردی کلکتور خورشیدی حرارتی است؛ رویکردی که در ادبیات موجود کمتر به صورت یکپارچه مورد توجه قرار گرفته

۳- معادلات حاکم

باتوجه به کسر پایین انتخابی نانوذرات، این امکان فراهم است که معادلات حاکم به صورت تکفاز حل گردند [18-21]. معادلات حاکم بر جریان درون جاذب کلکتور خورشیدی شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم، و انرژی هستند که به ترتیب به شرح زیر آمده‌اند.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{u_i}{x_i} \delta_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C_p T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{\sigma_{h,t}} \frac{\partial (C_p T)}{\partial x_j} \right) + u_j \frac{\partial P}{\partial x_j} \quad (3)$$

که p ، T ، u ، ρ و v به ترتیب نشان‌دهنده فشار، دما، سرعت، چگالی و ویسکوزیته سینماتیک هستند. باتوجه به اینکه شبیه‌سازی کنونی در جریان سیال آشفتنه‌ای با حداقل رینولدز 9200 انجام شده است و هندسه دارای نوارپیچشی است، نیاز به مدلی برای آشفتگی است که بازگردش، انحنای، چرخش مجدد و جدایش را ثبت کند. باتوجه به پژوهش‌های پیشین [22-24]، مدل $k-\varepsilon$ می‌تواند چنین جریان سیالی را با خطای ناچیز پیش‌بینی کند. این مدل از طریق دو معادله k و ε ، اصطلاحات رینولدز متوسط را حل می‌کند.

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، میانگین عدد ناسلت روی دیوار و عدد رینولدز به ترتیب از معادلات 4 الی 6 حاصل می‌گردند.

$$h = \frac{q''}{T_{ri} - T_{bulk}} \quad (4)$$

$$T_{bulk} = \frac{\int_A \rho u T dA}{\int_A \rho u dA} \quad (4-1)$$

$$Nu = h \frac{d_{fi}}{\lambda} \quad (5)$$

$$Re = \frac{u_m \cdot d_{fi}}{\nu} \quad (6)$$

که در آن h ، q و T به ترتیب نشان‌دهنده ضریب انتقال حرارت همرفتی، شار حرارتی روی دیوار، و دما هستند. دو پارامتر مهم دیگر برای کمک به ارزیابی هیدرولیکی، ضریب اصطکاک (f) و فاکتور ازدیاد حرارت (x) هستند که به شرح زیر بیان شده‌اند [25]:

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho u_{in}^2 \frac{L}{d_{fi}}} \quad (7)$$

$$X = \frac{(Nu/Nu_p)^{(1.3)}}{(f/f_p)} \quad (8)$$

ΔP بیانگر افت فشار است.

است؛ بنابراین در پژوهش حاضر برای بررسی عملکرد سیستم به بررسی اثر افزودن نانوذرات بر عدد ناسلت، ضریب ازدیاد حرارت و ضریب اصطکاک پرداخته شده است. سپس مطالعات با مقایسه‌ی پارامترهای عملکردی هر یک از نانوسیال‌ها به‌دست‌آمده ادامه خواهد یافت.

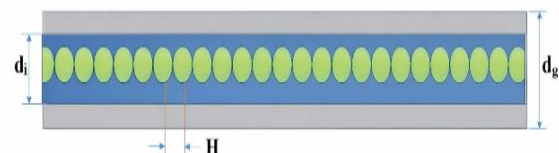
۲- مدل فیزیکی

ابعاد گیرنده همانند گیرنده‌های تجاری موجود است. لوله جاذب دارای قطر داخلی $d_{ri} = 6/6 \text{ cm}$ ، قطر خارجی $d_{ro} = 7/0 \text{ cm}$ است درحالی‌که پوشش شیشه‌ای گیرنده دارای قطر داخلی $d_{gi} = 11/5 \text{ cm}$ است. اطلاعات هندسی و سایر پارامترهای شبیه‌سازی مورد استفاده در این مطالعه در جدول 1 نشان‌داده شده است [14].

جدول 1: پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
قطر داخلی لوله جاذب (cm)	6/6
ضخامت لوله جاذب (cm)	0/2
ضریب انتقال پوشش شیشه‌ای (τ_g)	0/97
ضریب جذب لوله جاذب (α_r)	0/96
چگالی (ρ , kgm^{-3})	0/96
تابش نرمال مستقیم (I_b , Wm^{-2})	1000
عدد رینولدز (Re)	9200-115000
دمای ورودی (K)	400

اطراف لوله جاذب یک پوشش شیشه‌ای قرار دارد. درون لوله جاذب، یک نوارپیچشی جدا از دیوار قرار داده شده است که در شکل 1 قابل مشاهده است. در مدل فیزیکی، نوارپیچشی معمولاً با استفاده از اتصالات تفلونی متناسب با ضخامت و عرض نوار، از دیواره لوله فاصله گرفته و ثابت می‌شوند [15]. مقدار دبی و فشار هوا در فضای حلقوی بین لوله جاذب و پوشش شیشه‌ای بسیار کم است و تنها انتقال حرارت تشعشع در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور حل دقیق‌تر جریان داخل لوله جاذب، کل لوله جاذب شبیه‌سازی می‌گردد.



شکل 1: مدل فیزیکی از لوله جاذب با نوارپیچشی جدا از دیوار

سیال انتقال حرارت مورد استفاده Syltherm 800 است [16]. فولاد ضدزنگ به‌عنوان جنس لوله جاذب استفاده شده است [17].

4- روش‌های عددی

در این پژوهش، به بررسی عملکرد انتقال حرارت در یک گیرنده سهموی با نوارهای پیچشی درون لوله جاذب و استفاده از پنج نانوذره در کسر حجمی (0/1، 0/3، 0/5) پرداخته شده است. برای شبیه‌سازی، از بسته نرم‌افزار ANSYS Fluent استفاده از روش حجم محدود و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ realizable استفاده شد. جریان درون لوله‌ی جاذب به صورت آشفتگی و کاملاً توسعه‌یافته در نظر گرفته شد و اعداد رینولدز در محدوده‌ی $9200 < Re_p \leq 115000$ در دمای 400 K بررسی شدند.

شرط مرزی ورودی به صورت دما و سرعت ثابت بوده و شرط مرزی دیواره شار ثابت است. دیواره‌های لوله جاذب داخلی بدون لغزش و بدون نفوذ در نظر گرفته می‌شوند. در خروجی دامنه محاسباتی، شرط مرزی فشار خروج با فشار نسبی صفر (فشار اتمسفریک) اعمال شده است. معیار همگرایی برای معادلات مومنتوم، انرژی جنبشی اغتشاش (k)، نرخ اتلاف آشفتگی (ϵ) و انرژی، رسیدن باقی‌مانده‌ها به مقادیری کمتر از 10^{-7} تعیین شده است. برای معادله پیوستگی، معیار همگرایی کمتر از 10^{-5} در نظر گرفته شده است.

در این مطالعه، نانوسیال‌ها متشکل از آلومینیوم اکسید (Al_2O_3)، گرافن (Graphene)، سیلیکون کاربید (SiC)، روی اکسید (ZnO) و دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) در غلظت‌های 0/1، 0/3، 0/5 به عنوان سیال انتقال حرارت استفاده شد و به علت کسر حجمی ناچیز و صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌ی محاسبات، شبیه‌سازی آنها به صورت تک‌فاز نیز انجام گردید [26]. این مدل فرض می‌کند ذرات کاملاً با سیال پایه همگن و بدون حرکت نسبی هستند، درحالی‌که در واقعیت ذرات ممکن است حرکت مستقل داشته باشند. همچنین در این مدل رفتار ته‌نشینی و خوشه‌بندی ذرات در میدان جریان مدل نمی‌شود که می‌تواند اثرات موضعی انتقال حرارت را تغییر دهد.

ویژگی‌های نانوذرات مورد استفاده در جدول 2 آمده است [11]، [27]، [28]، [29]، [30].

جدول 2: خواص نانوذرات مورد بررسی

نوع نانوذره	چگالی (kg/m^3)	ظرفیت گرمایی ویژه ($J/kg \cdot K$)	هدایت حرارتی ($W/m \cdot K$)
Al_2O_3	3970	765	36
Graphene	2250	710	3000
TiO_2	4250	686	8.9
SiC	3215	526	180
ZnO	5600	544	19

خواص ترموفیزیکی نوع نانوسیال را می‌توان با روابط زیر محاسبه کرد [26]:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \quad (10)$$

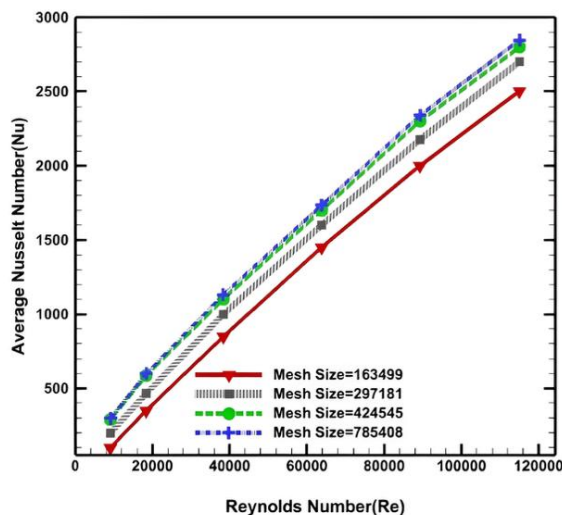
$$C_{p,nf} = \frac{(1 - \varphi)\rho_f C_{p,f} + \varphi\rho_p C_{p,p}}{\rho_{nf}} \quad (11)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2\varphi(\lambda_p - \lambda_f)}{k_p + 2k_f - \varphi(\lambda_p - \lambda_f)} \quad (12)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + 2.5\varphi + K\varphi^2 \quad (13)$$

که K ضریب تجربی است و برای تمرکز حجمی در درصد‌های خیلی کوچک، 6/2 در نظر گرفته می‌شود. f ، n و p به ترتیب بیانگر سیال، نانوسیال و نانوذره هستند.

شکل 2 تأثیر تعداد سلول‌های محاسباتی (از 163499 تا 785408) بر تغییرات عدد ناسلت را نشان می‌دهد. مطالعات نشان می‌دهد که شبکه سوم با تعداد سلول محاسباتی 424545 از دقت و هزینه محاسباتی نسبت به دیگر شبکه‌ها ارجحیت دارد.



شکل 2: بررسی استقلال نتایج از تعداد سلول محاسباتی

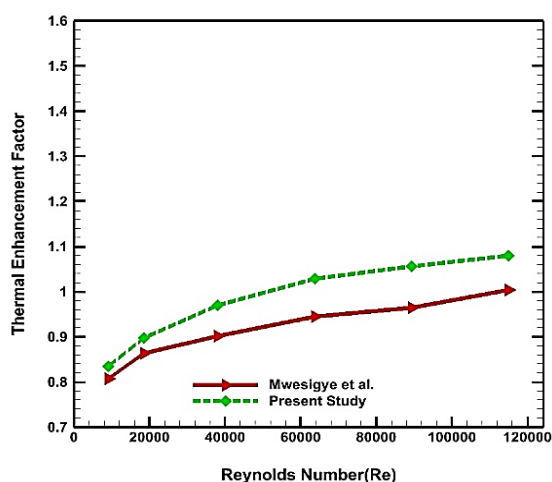
5- نتایج

در ابتدا نتایج عددی در حالت بدون حضور نانوذرات بررسی و جهت اعتبارسنجی با داده‌های پژوهشی وسگی و همکاران [25] مورد مقایسه قرار می‌گیرند. سپس تأثیر حضور نانوذرات مختلف با درصد‌های متفاوت بر عملکرد گیرنده خورشیدی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

5-1 اعتبارسنجی

شکل 3 به مقایسه توزیع ضریب اصطکاک بر حسب اعداد رینولدز مختلف با داده‌های پژوهشی وسگی و همکاران می‌پردازد [25]. مشاهده می‌شود اختلاف بین نتایج کمتر از 5 درصد است. اکثر فن‌های افزایش انتقال حرارت، عملکرد انتقال حرارت را بهبود می‌بخشند، اما با یک اصطکاک سیال اضافی همراه است. برای این

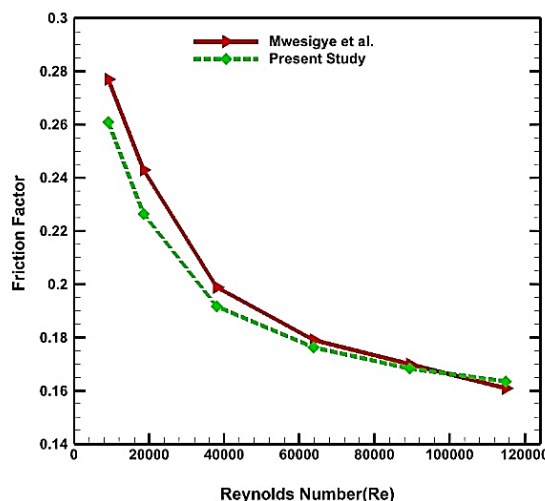
فاکتور ازدیاد حرارت به عنوان یک ابزار اولیه برای مقایسه فن‌های افزایش انتقال حرارت در توان پمپاژ ثابت استفاده می‌شود. هنگامی که قدرت پمپاژ یک نگرانی است، فن‌های تقویت با فاکتورهای بالاتر از یک، به عنوان روش مؤثر افزایش انتقال حرارت در نظر گرفته می‌شوند. شکل ۵ به مقایسه توزیع فاکتور ازدیاد حرارت بر حسب اعداد رینولدز مختلف با داده‌های پژوهشی وسگی می‌پردازد. مشاهده می‌شود اختلاف بین نتایج کمتر از ۱۰٪ است. این اختلاف در اعداد رینولدز بالاتر بیشتر است. دلیل این موضوع می‌تواند ناشی از تأثیرپذیری این ضریب به صورت هم‌زمان از توزیع سرعت و توزیع دما درون لوله جاذب باشد. با مقایسه شکل ۳ و ۵ مشاهده می‌شود که فاکتور ازدیاد حرارت از عدد رینولدز تأثیرپذیری بیشتری نسبت به ضریب اصطکاک دارد. شکل ۶ توزیع عدد ناسلت در سطح داخلی لوله‌ای با نوارهای پیچشی در ناحیه جریان توسعه‌یافته و در محدوده ۸/۹ تا ۶۰۱۲ نمایش می‌دهد. در ناحیه جریان توسعه‌یافته، پروفیل سرعت و دما به حالت پایدار رسیده‌اند، اما وجود نوارهای پیچشی باعث حفظ آشفتگی و افزایش اختلاط حرارتی در نزدیکی دیواره شده است. این امر موجب افزایش گرادیان دمایی در لایه مرزی حرارتی و در نتیجه افزایش عدد ناسلت می‌شود. الگوی پیچشی نوارها همچنین باعث ایجاد نوسانات موضعی در توزیع ناسلت که در کانورها به صورت نوارهای موج‌دار و متناوب مشاهده می‌گردد، شده است.



شکل ۵: مقایسه فاکتور ازدیاد حرارت مطالعه حاضر با داده پژوهشی وسگی و همکاران [25]

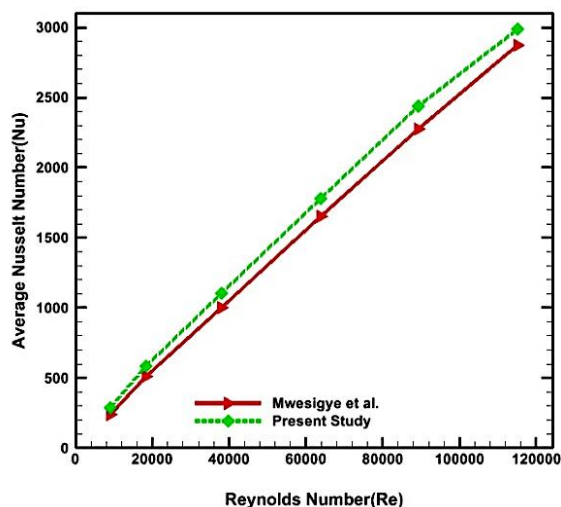
شکل ۷ توزیع تنش برشی در محدوده ۱ Pa تا ۳۲۹ Pa بر سطح داخلی لوله و در قسمت جریان توسعه‌یافته برای شش عدد رینولدز ۹۲۰۰، ۱۸۵۰۰، ۳۸۰۰۰، ۶۳۷۵۰، ۸۹۲۵۰ و ۱۱۵۰۰۰ به ترتیب از چپ به راست نمایش می‌دهد. مقیاس رنگی از آبی (مقادیر پایین) تا قرمز (مقادیر بالا)، گرادیان‌های تنش برشی را برجسته می‌کند. با افزایش عدد رینولدز، شدت تنش برشی در نزدیکی دیواره لوله به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در رینولدزهای

مطالعه، تغییر اصطکاک سیال با اعداد رینولدز نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود ضریب اصطکاک با کاهش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. افزایش اصطکاک سیال به دلیل افزایش مقاومت جریان در نتیجه جریان چرخشی، برخورد به لوله جاذب و همچنین انسداد جریان توسط نوار پیچشی است.



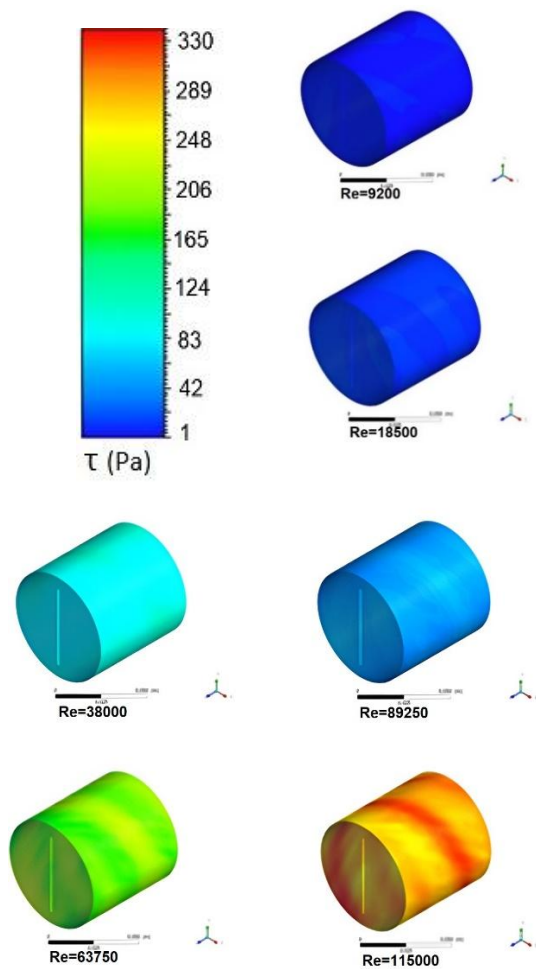
شکل ۳: مقایسه ضریب اصطکاک مطالعه حاضر با داده پژوهشی وسگی و همکاران [25]

شکل ۴ به مقایسه توزیع عدد ناسلت بر حسب اعداد رینولدز مختلف با داده‌های پژوهشی وسگی می‌پردازد که بیانگر این است که اختلاف بین نتایج کمتر از ۳٪ است. این اختلاف تقریباً با افزایش عدد رینولدز با یک شیب کم‌رشد می‌کند. دلیل این موضوع می‌تواند ناشی از تأثیرپذیری عدد ناسلت از عدد رینولدز و ضریب اصطکاک به صورت هم‌زمان باشد که اثرات خطای محاسباتی عدد رینولدز و ضریب اصطکاک بر عدد ناسلت در نهایت به صورت یک ضریب ثابت درآمده است.



شکل ۴: مقایسه عدد ناسلت مطالعه حاضر با داده پژوهشی وسگی و همکاران [25]

در سه کسر حجمی متفاوت شامل 0/1٪، 0/3٪ و 0/5٪ به سیال پایه اضافه شده‌اند.



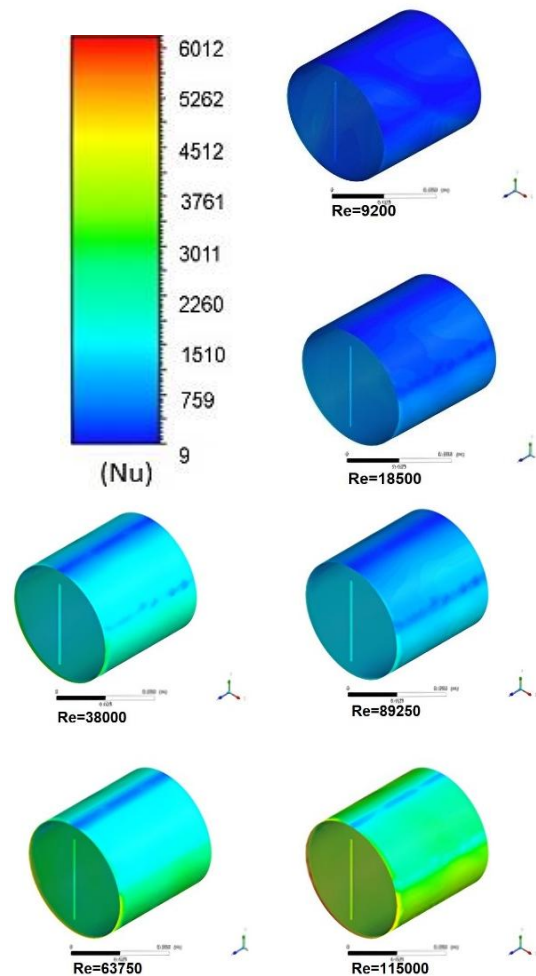
شکل 7: توزیع تنش برشی روی سطح داخلی لوله برای اعداد رینولدز مختلف

در شکل 8-الف) با افزایش عدد رینولدز مقدار عدد ناسلت برای تمامی حالات (چه در غیاب نانوذرات و چه در حضور آن‌ها) افزایش می‌یابد که این روند بیانگر بهبود انتقال حرارت در جریان‌های متلاطم با سرعت‌های بالاتر است. چرا که در این شرایط، اختلاط سیال افزایش یافته و گردابه‌های کوچک موجب تقویت مکانیسم‌های همرفت می‌شوند. در حالت بدون نانوذرات (خط قرمز)، عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز به صورت تقریباً خطی از نزدیک به صفر (در رینولدز نزدیک به 9200) به حدود 280 در رینولدز 115000 افزایش می‌یابد که این رفتار ناشی از افزایش سرعت جریان و انتقال حرارت همرفتی در رژیم‌های آرام تا آشسته است.

افزودن نانوذرات آلومینیوم اکسید به سیال پایه، در تمامی غلظت‌ها موجب افزایش عدد ناسلت نسبت به حالت بدون نانوذره شده است. این بهبود عملکرد حرارتی می‌تواند ناشی از افزایش هدایت حرارتی نانو سیال، بهبود خواص ترموفیزیکی، و تعاملات مؤثر بین ذرات و مولکول‌های سیال باشد. با افزودن 0/1٪ نانوذرات اکسید آلومینیوم (خط آبی نقطه‌چین)، عدد ناسلت به

پایین‌تر (9200 و 18500)، توزیع تنش برشی نسبتاً یکنواخت‌تر و با مقادیر پایین‌تر است که نشان‌دهنده جریان آرام‌تر و لایه مرزی ضخیم‌تر است.

در رینولدزهای بالاتر (خصوصاً 89250 و 115000)، نواحی قرمز رنگ در کانتورها گسترش یافته‌اند که بیانگر افزایش تنش برشی در نزدیکی دیواره و نازک شدن لایه مرزی است. مکان‌هایی که در مجاورت نوارهای پیچشی هستند تنش برشی بیشتری را نسبت به سایر مناطق از خود نشان می‌دهند.



شکل 6: توزیع ناسلت در مقاطع عرضی لوله برای اعداد رینولدز مختلف

5-2- بررسی اثر افزودن نانوذرات

شکل 8 به بررسی اثر افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم در سه درصد حجمی مختلف به سیال پایه (syltherm 800) بر پارامترهای عملکردی (عدد ناسلت متوسط، ضریب اصطکاک و فاکتور ازدیاد حرارت) در محدوده رینولدز 9200 تا 115000 می‌پردازد. این نمودارها مقایسه‌ی چهار حالت را بررسی می‌کند: حالتی که سیال پایه بدون نانوذرات در نظر گرفته شده است و حالتی که نانوذرات

جاذب، موجب افزایش ضریب اصطکاک می‌شود. اما با گذار جریان از آرام به آشفته، در محدوده رینولدز 20000 تا 115000، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. این پدیده می‌تواند ناشی از برهم‌کنش هم‌زمان اثرات نانوسیال و اغتشاش ایجادشده توسط نوارپیچشی باشد. چنین رفتاری در برخی مطالعات عددی و تجربی پیشین نیز گزارش شده است [31-32].

منحنی مربوط به غلظت 0/5٪ در تمامی اعداد رینولدز به طور جزئی پایین‌تر از سایر منحنی‌ها قرار دارد؛ به این معنا که این غلظت بیشترین تأثیر را در کاهش اصطکاک دارد و ضریب اصطکاک را حدود 3/8٪ نسبت به حالت بدون نانوذره کاهش می‌دهد.

فاصله بین منحنی‌ها در رینولدزهای پایین مشهودتر است. در مقادیر کم عدد رینولدز، تغییرات ضریب اصطکاک با افزودن نانوذرات محسوس‌تر است، اما در رینولدزهای بالا، منحنی‌ها به یکدیگر نزدیک می‌شوند که می‌تواند ناشی از غالب شدن رفتار آشفته جریان باشد. در رینولدزهای پایین (جریان آرام)، افزودن 0/1٪ نانوذرات (خط سبز) نسبت به سایر غلظت‌ها افزایش بیشتری در ضریب اصطکاک ایجاد می‌کند. در این شرایط، جریان هنوز آرام بوده و نیروهای لزجی نقش اصلی را در رفتار جریان ایفا می‌کنند.

در شکل 8-ج، با افزایش عدد رینولدز، فاکتور ازدیاد حرارتی برای تمامی غلظت‌های نانوذرات افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده عملکرد بهتر نانوذرات در جریان‌های با سرعت بالاتر است. با افزایش غلظت نانوذرات آلومینیوم اکسید از 0/1٪ به 0/3٪، فاکتور ازدیاد حرارتی به ترتیب 3/64٪ و 8/83٪ بهبود می‌یابد که بیانگر تأثیر مثبت افزایش غلظت نانوذرات بر انتقال حرارت است. این بهبود در غلظت 0/3٪ به حداکثر مقدار خود می‌رسد. نتایج نشان می‌دهند که فاکتور ازدیاد حرارتی با افزایش عدد رینولدز ابتدا روند افزایشی دارد و سپس در برخی ترکیب‌ها به مقدار نسبتاً پایدار نزدیک می‌شود. درحالی‌که حالت بدون نانوذره روندی افزایشی اما یکنواخت را نشان می‌دهد، در غلظت 0/3٪ نانوذره، یک اوج مشخص به مقدار 37/22٪ در حدود عدد رینولدز 60000 مشاهده می‌شود. این اوج نشان می‌دهد که در این نقطه، نرخ انتقال حرارت در مقایسه با حالت پایه به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

دلایل این اوج می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

در غلظت 0/3٪، به نظر می‌رسد نسبت بهینه‌ای از ذرات به سیال وجود دارد؛ به‌طوری‌که هم پراکندگی ذرات مطلوب است، هم اختلالات مناسبی در ساختار لایه‌مرزی ایجاد می‌شود و هم هدایت حرارتی مؤثر سیال افزایش می‌یابد.

اما در غلظت‌های بالاتر (مانند 0/5٪)، افزایش غلظت نانوذرات می‌تواند موجب افزایش ویسکوزیته سیال و تجمع ذرات شود که این امر انتقال حرارت را محدود کرده و از کارایی آن می‌کاهد. در این غلظت، اگرچه فاکتور ازدیاد حرارتی همچنان نسبت به سیال

طور میانگین در تمام محدوده رینولدز بهبود تقریبی 2/69٪ را نشان می‌دهد که این مقدار در محدوده رینولدز میانی به اوج خود یعنی 10/54٪ می‌رسد.

در کسر حجمی 0/3٪ (خط سبز نقطه‌چین) این بهبود در بیشترین مقدار خود (7/33٪) نسبت به دو درصد دیگر قرار دارد و در رینولدزهای متوسط تا 33/98٪ نیز می‌رسد و بیشترین اوج عدد ناسلت را در محدوده رینولدز میانی نشان می‌دهد. این رفتار را می‌توان با توجه به سه عامل اصلی تحلیل کرد:

1- در رینولدزهای پایین، جریان آرام است و انتقال حرارت عمدتاً از طریق هدایت صورت می‌گیرد؛ ولی در رینولدزهای میانی، جریان از آرام به تلاطم می‌رود و گردابه‌های کوچک، موجب افزایش اختلاط و در نتیجه، بهبود انتقال حرارت می‌شوند.

2- در این محدوده، نانوذرات به طور یکنواخت پراکنده شده و پدیده‌هایی نظیر ته‌نشینی یا تجمع مشاهده نمی‌شود، این یکنواختی موجب افزایش کارایی حرارتی نانوسیال می‌شود؛ بنابراین انتقال حرارت بهبود می‌یابد.

3- ضخامت لایه‌مرزی حرارتی در رینولدز میانی به حداقل رسیده و نانوذرات گرما را مؤثرتر منتقل می‌کنند. در رینولدز بالا، اگرچه تلاطم زیاد است، اما ممکن است لایه‌مرزی کاملاً تخریب شود و نانوذرات نتوانند به طور مؤثر گرما را منتقل کنند.

در غلظت 0/5٪ (خط قهوه‌ای نقطه‌چین) کمترین مقدار بهبود عدد ناسلت را در میان سه غلظت بررسی‌شده نشان می‌دهد (1/57٪).

همچنین برخلاف دو درصد دیگر که در محدوده رینولدزهای میانی یک اوج موقت ایجاد می‌کردند، در غلظت 0/5٪ کاهش 1/87٪ عدد ناسلت نسبت به حالت سیال پایه مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از افزایش لزجت، رسوب (ته‌نشینی نانوذرات) یا افت فشار باشد. از آن‌ها که نانوذرات آلومینیوم اکسید دارای هدایت حرارتی نسبتاً پایین‌تر و جرم مخصوص بالاتری هستند، در غلظت‌های بالا (در این مطالعه 0/5٪) عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهند؛ بنابراین، این نانوذره در غلظت‌های پایین‌تر عملکرد مؤثرتری دارد.

در شکل 8-ب در تمامی ترکیب‌ها (0/1٪ تا 0/5٪ نانوذرات آلومینیوم اکسید)، با افزایش عدد رینولدز، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد که بیانگر گذار جریان از رژیم آرام به رژیم آشفته است.

در حالت بدون نانوذرات (خط قرمز)، ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز به‌صورت تقریباً خطی از حدود 0/26 در اعداد رینولدز کمتر از 20000 به حدود 0/16 در عدد رینولدز 115000 کاهش می‌یابد. این رفتار ناشی از گذار جریان از حالت آرام به آشفته و کاهش مقاومت جریان است. در مقایسه با سیال پایه (بدون نانوذره)، افزودن نانوذرات در رینولدزهای پایین (کمتر از 20000) در ابتدا به دلیل افزایش مقاومت جریان ناشی از حضور نانوذرات و همچنین اختلاط اضافی ایجادشده توسط نوارهای پیچشی در لوله

شکل 9 به بررسی اثر افزودن نانوذرات گرافن در سه درصد حجمی مختلف به سیال پایه (syltherm 800) بر پارامترهای عملکردی (عدد ناسلت متوسط، ضریب اصطکاک و فاکتور ازدیاد حرارت) در محدوده رینولدز 9200 تا 115000 می‌پردازد.

در شکل 9-الف افزودن نانوذرات گرافن به سیال پایه منجر به افزایش قابل توجه ناسلت در مقایسه با حالت بدون نانوذرات می‌شود که ناشی از هدایت حرارتی بسیار بالای گرافن ($\sim 2000 \text{ W/mK}$) است. غلظت 0/1٪ گرافن موجب بهبود متوسط عدد ناسلت نسبت به حالت پایه می‌شود (89/2٪) و غلظت 0/3٪ گرافن افزایش محسوس‌تری در انتقال حرارت ایجاد می‌کند. (56/3٪). اما برخلاف نانوذرات آلومینیوم اکسید، گرافن در غلظت 0/5٪ بیشترین میزان افزایش عدد ناسلت را به خود اختصاص می‌دهد (99/5٪) که نشان‌دهنده اثر بهینه این غلظت در بهبود عملکرد حرارتی است.

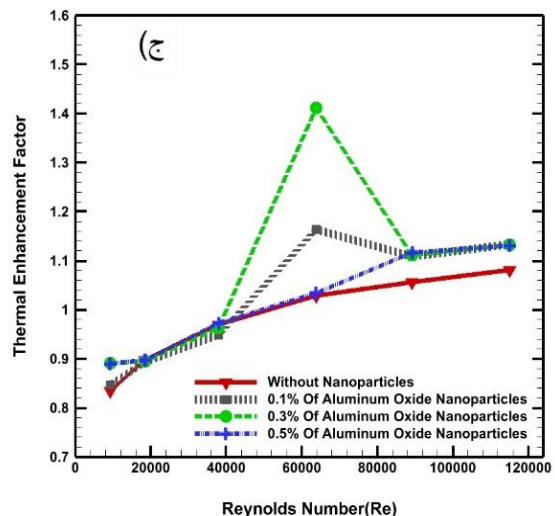
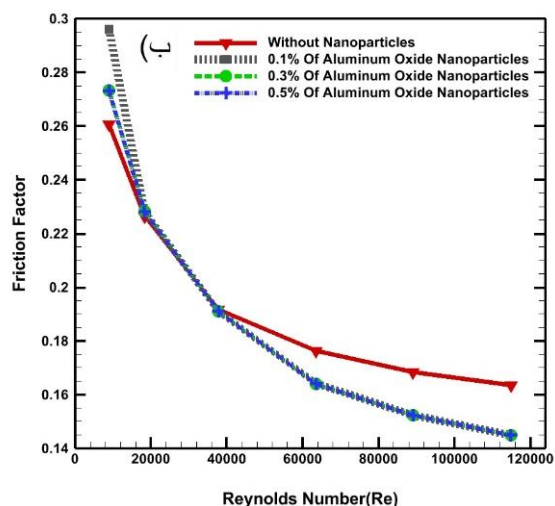
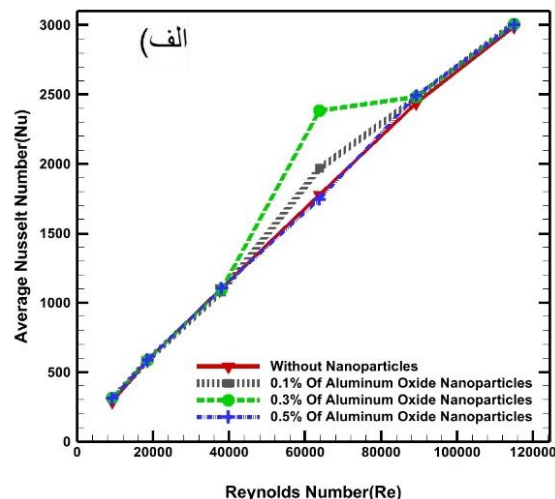
در عدد رینولدزهای میانی، اختلاف عدد ناسلت بین 0/5٪ گرافن و حالت پایه بسیار چشمگیر است. این نقطه اوج ناسلت را می‌توان به پدیده‌هایی نظیر تشکیل گردابه‌های ثانویه، نازک شدن لایه مرزی حرارتی و افزایش شدت اختلاط سیال نسبت داد که در جریان‌های آشفته و به‌ویژه در حضور نوارپیچشی ایجاد شده‌اند. بروز چنین نقاط اوجی در مطالعات عددی و تجربی پیشین نیز مشاهده و گزارش شده است [33-34]. برخلاف نانوذرات آلومینیوم اکسید، گرافن حتی در غلظت 0/5٪ نیز به دلیل ساختار لایه‌ای، وزن کمتر و پایداری بالاتر، دچار تجمع ذرات نمی‌شود و در نتیجه انتقال حرارت را به مقدار بیشینه می‌رساند.

در شکل 9-ب با افزایش درصد نانوذرات گرافن از 0/1٪ تا 0/5٪، روند کاهشی ضریب اصطکاک در تمامی محدوده‌های عدد رینولدز به طور جزئی تشدید می‌شود؛ به‌طوری که میزان کاهش ضریب اصطکاک از 3/58٪ به 3/68٪ و 3/69٪ افزایش می‌یابد.

حالت 0/5٪ گرافن بیشترین کاهش ضریب اصطکاک را نشان می‌دهد که احتمالاً به دلیل خواص ساختاری منحصر به فرد گرافن مانند سطح ویژه بالا و هدایت حرارتی بسیار زیاد است که باعث تغییر رفتار لایه مرزی می‌شود. فاصله بین منحنی‌های حاوی نانوذره در اعداد رینولدز پایین‌تر مشهودتر است، به این معنا که افزودن حتی مقادیر کم گرافن در جریان‌های آرام تأثیر بیشتری دارد. بیشترین کاهشی که در کل نمودار اتفاق افتاده است مربوط به نانوذرات گرافن با غلظت 0/3٪ و در رینولدز 115000 است (45/11٪).

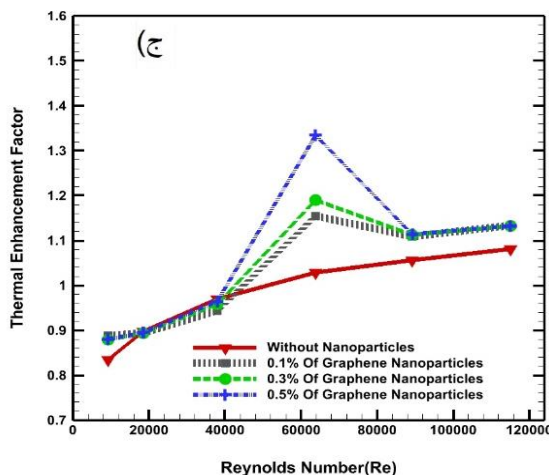
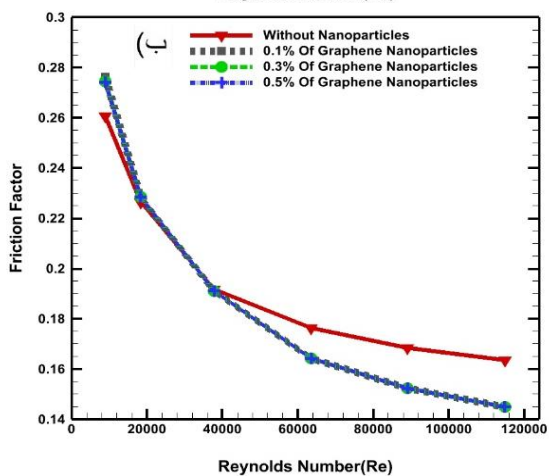
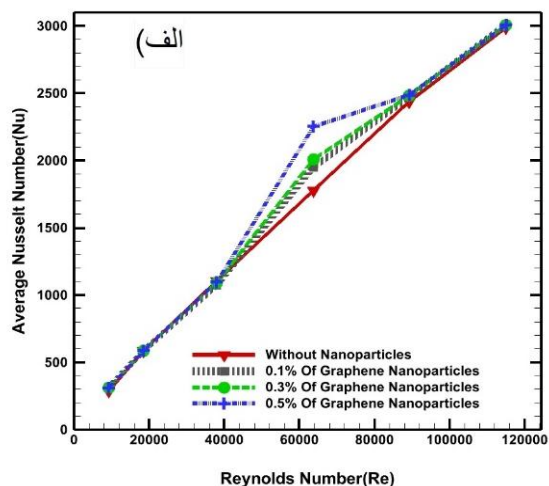
شکل 9-ج این نمودار نشان می‌دهد که آیا افزودن نانوذرات گرافن با غلظت‌های مختلف، در جهت بهینه‌سازی عملکرد حرارتی سیال پایه (syltherm 800) در برابر تغییرات عدد رینولدز مؤثر بوده است یا خیر. محور افقی محدوده عدد رینولدز را نمایش می‌دهد (از 9200 تا 115000) و محور عمودی محدوده فاکتور ازدیاد حرارتی را نشان می‌دهد (از 0/7 تا 1/6). نانوذرات گرافن حتی در غلظت پایین 0/1٪ نیز فاکتور ازدیاد حرارتی را افزایش می‌دهند (23/4٪). این بهبود در غلظت 0/5٪ به اوج خود می‌رسد (44/7٪)

پایه بهبود می‌یابد، اما این افزایش کمتر از دو غلظت دیگر و در حدود 2/94٪ است. از سوی دیگر، در غلظت‌های پایین‌تر مانند 0/1٪، مقدار نانوذرات برای ایجاد تأثیر حداکثری کافی نیست؛ بنابراین، غلظت 0/3٪ به‌عنوان بهینه‌ترین حالت شناخته می‌شود.



شکل 8: تأثیر حضور نانوذرات آلومینیوم اکسید در درصدهای مختلف درون سیال پایه بر الف عدد ناسلت متوسط، ب ضریب اصطکاک و ج فاکتور ازدیاد حرارت

0/1 به 0/5، مقدار ضریب اصطکاک در تمامی محدوده رینولدز کاهش بیشتری پیدا می‌کند (به ترتیب 2/79، 3/48 و 3/50). این موضوع نشان می‌دهد که افزودن این نانوذرات باعث بهبود ویژگی‌های هیدرودینامیکی سیال شده و جریان را روان‌تر می‌کند. منحنی مربوط به 0/5 نانوذره در پایین‌ترین موقعیت قرار دارد که به معنای بیشترین تأثیر در کاهش اصطکاک است. دلیل این امر می‌تواند خواص فیزیکی - شیمیایی سیلیکون کاربید مانند سختی بالا و رسانایی حرارتی مناسب آن باشد.



شکل 9: تأثیر حضور نانوذرات گرافن در درصدی مختلف درون سیال پایه

که نشانگر عملکرد استثنایی گرافن در جریان‌های متلاطم است. نانوذرات گرافن در غلظت 0/5 و در رینولدز میانی 63750 به طور محسوسی تا 29/73 فاکتور ازدیاد حرارتی را افزایش می‌دهند. در این نقطه، تعادلی بین افزایش هدایت حرارتی و افزایش ویسکوزیته برقرار می‌شود. ولی با عبور از این نقطه، افزایش سرعت جریان و انرژی جنبشی بیشتر، موجب می‌شود که آثار مثبت گرافن در حضور آشفته‌گی زیاد کمی تضعیف شود، و لذا کمی از کارایی حرارتی کاهش می‌یابد. در درصدهای پایین‌تر (0/1 و 0/3) اگرچه افزایش ضریب حرارتی مشاهده می‌شود، اما به علت کمبود مقدار گرافن، شرایط برای ایجاد نقطه بهینه حرارتی فراهم نمی‌شود و منحنی‌ها به صورت یکنواخت اما با شیب ملایم افزایش می‌یابند.

نانوذرات گرافن شاید نسبت به نانوذرات آلومینیوم اکسید افزایش کلی کمتری را نشان دهند، اما نانوذرات گرافن پایداری بهتری را در کل محدوده رینولدزها و غلظت‌ها از خود نشان می‌دهند که بسیار حائز اهمیت است.

شکل 10 به بررسی اثر افزودن نانوذرات سیلیکون کاربید در سه درصد حجمی مختلف به سیال پایه (Syltherm 800) بر پارامترهای عملکردی می‌پردازد.

در شکل 10-الف، افزودن نانوذرات سیلیکون کاربید به سیال پایه منجر به افزایش محسوس عدد ناسلت در مقایسه با حالت بدون نانوذرات می‌شود که ناشی از هدایت حرارتی نسبتاً بالای سیلیکون کاربید حدود (180 W/mK) است.

غلظت 0/1 سیلیکون کاربید موجب بهبود متوسط در انتقال حرارت نسبت به حالت پایه می‌شود (3/17)، در حالی که غلظت 0/3 سیلیکون کاربید باعث افزایش بسیار قابل توجه عدد ناسلت در کل محدوده رینولدزها می‌گردد (9/23).

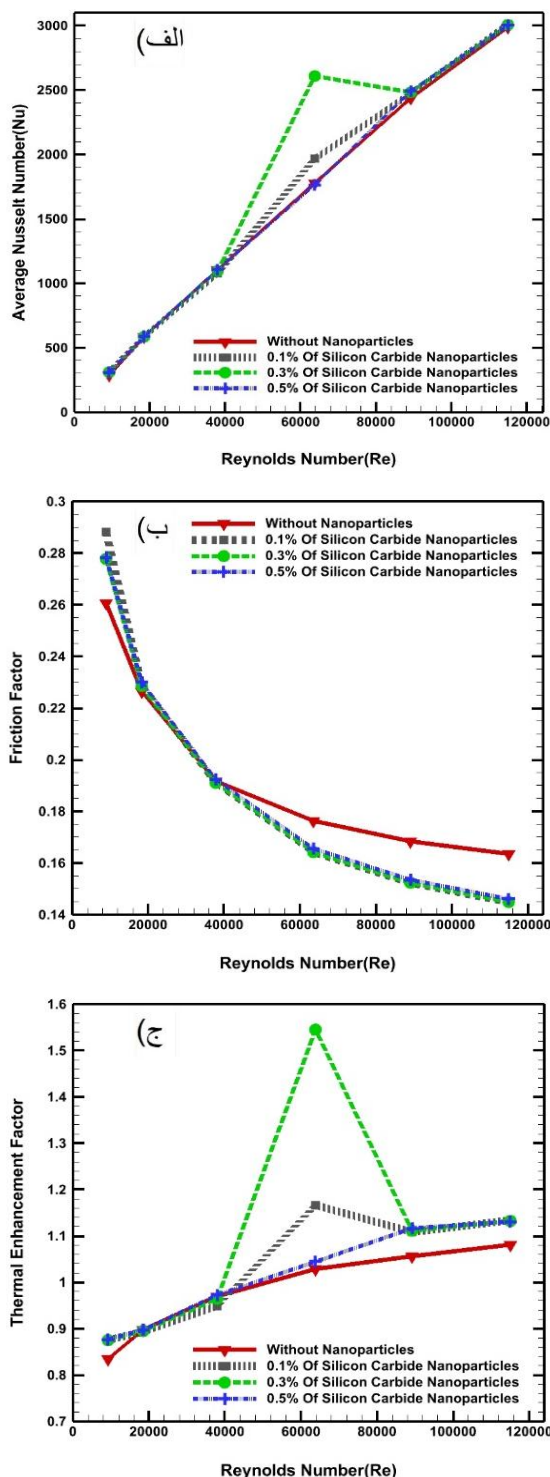
افزودن نانوذرات سیلیکون کاربید در غلظت 0/3 در رینولدزهای میانی باعث یک اوج موقتی بسیار بالا و حتی بالاتر از نانوذرات آلومینیوم اکسید و گرافن می‌شود (46/64) و سپس در رینولدزهای بالاتر به پایداری بیشتری می‌رسد.

0/5 سیلیکون کاربید بهبود جزئی در کل محدوده رینولدزها را نشان می‌دهد (1/57)، ولی در رینولدزهای میانی نسبت به سیال پایه و سایر درصدها افت جزئی دارد. این پدیده می‌تواند ناشی از چند عامل کلیدی باشد.

در غلظت‌های بالا، تلاطم ناشی از نانوذرات سیلیکون کاربید ممکن است ساختار لایه مرزی حرارتی را مختل کند و اثربخشی را کاهش دهد. اگر نانوذرات سیلیکون کاربید در این غلظت بزرگ‌تر یا نامتعادل‌تر پراکنده شوند، تماس کمتری با سیال خواهند داشت. برخلاف گرافن، سیلیکون کاربید در غلظت 0/5 ممکن است از نقطه بهینه خود فراتر رفته باشد، بنابراین تفاوت چشمگیری با حالت پایه نشان نمی‌دهد.

در شکل 10-ب با افزایش درصد نانوذرات سیلیکون کاربید از

انتقال حرارت در 0/5٪ تیتانیوم دی اکسید به کمترین میزان خود (1/05٪) می رسد.



شکل 10: تأثیر حضور نانوذرات سیلیکون کاربید در درصدی مختلف درون سیال پایه بر الف عدد ناسلت متوسط، ب ضریب اصطکاک و ج فاکتور ازدیاد حرارت

در شکل 11-ب افزودن نانوذرات تیتانیوم دی اکسید باعث کاهش ضریب اصطکاک نسبت به سیال پایه (بدون نانوذره) می شود. این کاهش در کل بازه رینولدز مشاهده شده و در غلظت 0/3٪ به اوج خود

بر الف عدد ناسلت متوسط، ب ضریب اصطکاک و ج فاکتور ازدیاد حرارت

در رینولدزهای پایین، اضافه کردن نانوذرات تا حدود 10/54٪ (برای 0/1٪ نانوذرات) ضریب اصطکاک را افزایش می دهد. در این شرایط، اضافه کردن نانوذراتی مانند سیلیکون کاربید به سیال پایه، ویسکوزیته مؤثر نانوسیال را افزایش می دهد. در غلظت های پایین مانند 0/1٪، ذرات به طور یکنواخت در سیال پایه پخش می شوند و ویسکوزیته مؤثر را به طور قابل توجهی افزایش می دهند که این امر منجر به تنش برشی بیشتر و در نتیجه افزایش ضریب اصطکاک (تا حدود 10/54٪) می شود.

در غلظت های بالاتر (مانند 0/3٪ یا 0/5٪)، تجمع ذرات باعث تشکیل خوشه های بزرگ تر می شود که توزیع یکنواخت را مختل کرده، ویسکوزیته مؤثر را کمتر افزایش می دهد یا حتی اثرات منفی بر جریان ایجاد می کند؛ بنابراین افزایش ضریب اصطکاک کمتر از غلظت پایین تر است (حدود 6/46٪).

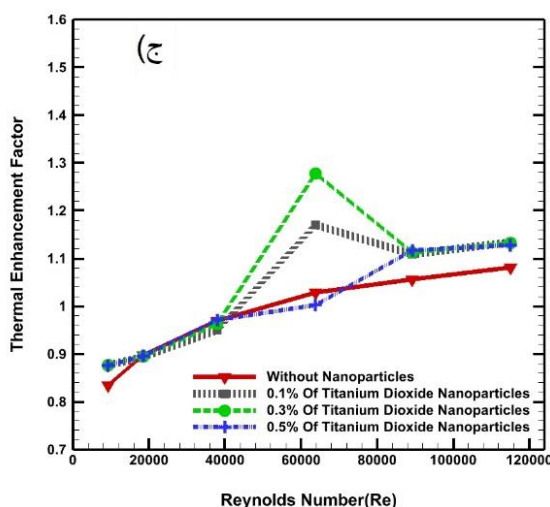
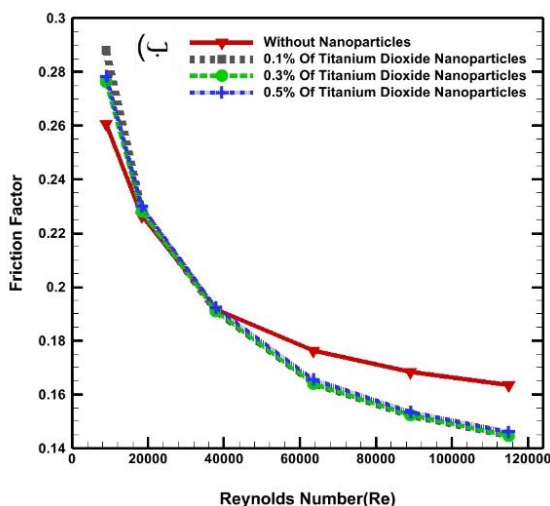
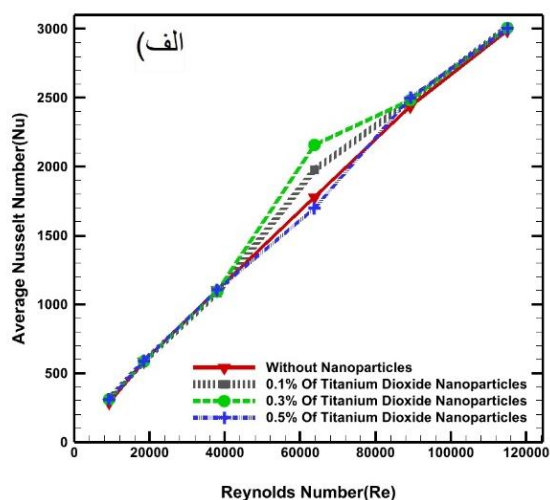
در شکل 10-ج، در مقایسه باحالت پایه (بدون نانوذره)، اضافه کردن 0/1٪ نانوذره باعث افزایش 4/26٪ در عملکرد حرارتی شده است. در غلظت 0/3٪، حداکثر بهبود نسبت به حالت پایه مشاهده می شود (10/69٪)، به ویژه در حوالی عدد رینولدز 60000 که بیشترین بهبود فاکتور ازدیاد حرارت دیده می شود (50/17٪). اما در غلظت 0/5٪، باوجوداینکه هنوز عملکرد بهتری نسبت به حالت پایه دارد، نسبت به 0/1٪ و 0/3٪ کاهش در فاکتور ازدیاد حرارت مشاهده می شود (2/85٪ بهبود نسبت به حالت پایه). این موضوع می تواند ناشی از افزایش ویسکوزیته و مقاومت بیشتر در برابر جریان باشد.

با افزایش عدد رینولدز، تمامی منحنی ها روند افزایشی در فاکتور ازدیاد حرارت نشان می دهند تا رسیدن به یک نقطه اوج (حدود 60000)، سپس در برخی موارد کاهش خفیفی مشاهده می شود. استفاده از نانوذرات سیلیکون کاربید تا غلظت 0/3٪ می تواند کارایی حرارتی کلکتور خورشیدی را به شکل مؤثری افزایش دهد. بااین حال، افزایش بیشتر غلظت ممکن است منجر به اثر معکوس شود. غلظت 0/3٪ سیلیکون کاربید با ایجاد 9/23٪ بهبود حرارتی و افزایش معقول در لزجت، می تواند به عنوان نقطه بهینه برای بسیاری از کاربردهای صنعتی در نظر گرفته شود.

شکل 11 به بررسی اثر افزودن نانوذرات دی اکسید تیتانیوم در سه درصد حجمی مختلف به سیال پایه (syltherm 800) بر پارامترهای عملکردی می پردازد.

در شکل 11-الف، اضافه کردن نانوذرات تیتانیوم دی اکسید منجر به بهبود متوسط انتقال حرارت می شود، اما این بهبود به اندازه نانوذراتی با هدایت حرارتی بالاتر (مانند گرافن) چشمگیر نیست. 0/1٪ تیتانیوم دی اکسید سبب بهبود جزئی در انتقال حرارت می شود (3/27٪). 0/3٪ تیتانیوم دی اکسید سبب افزایش محسوس تر در عملکرد حرارتی می شود (4/99٪). این افزایش در

۱۱۵۰۰۰، جریان کاملاً آشفته بوده و اثر نوارهای پیچشی به صورت تقویت شده ظاهر می شود. با مقایسه توزیع عدد ناسلت برای عدد رینولدز ۱۱۵۰۰۰ در حالت با و بدون حضور نانوسیال (شکل ۶)، مشاهده می گردد که انتقال حرارت در برخی نواحی لوله در حالت حضور نانوسیال افزایش یافته است.



می رسد (3/61). این امر به دلیل ویژگی های نانوذرات تیتانیوم دی اکسید است که موجب بهبود ساختار جریان و لایه مرزی می شوند. در تیتانیوم دی اکسید نیز مانند سیلیکون کاربید، در رینولدزهای پایین (جریان آرام)، اضافه کردن نانوذرات تا حدود ۱۰/۳۹٪ (برای ۰/۱٪ نانوذرات) ضریب اصطکاک را افزایش می دهد.

در شکل ۱۱-ج، در غلظت ۰/۱٪ عملکرد حرارتی در مقایسه با سیال پایه (بدون نانوذره) حدود ۴/۳۶٪ بهبود یافته است. در غلظت ۰/۳٪، همانند نانوذرات آلومینیوم دی اکسید و سیلیکون کاربید، بیشترین افزایش در فاکتور ازدیاد حرارت مشاهده می شود (۶/۳۹٪)، به ویژه در بازه عدد رینولدز، ۶۰۰۰۰ این غلظت بیشینه کارایی را دارد و به افزایش ۲۴/۲۵٪ می رسد.

در غلظت ۰/۵٪، با وجود بهبود ۲/۰۸٪ نسبت به حالت پایه، عملکرد نسبت به ۰/۳٪ کاهش می یابد. تیتانیوم دی اکسید در غلظت ۰/۵٪ نیز عملکردی حتی ضعیف تر از سایر نانوذرات در غلظت های مشابه دارد که آن را به گزینه ای مناسب فقط برای کاربردهای کم مصرف تبدیل می کند.

شکل ۱۲ نشان می دهد افزودن نانوذرات اکسید روی موجب بهبود انتقال حرارت و کاهش ضریب اصطکاک نسبت به سیال پایه می شود، هرچند به دلیل هدایت حرارتی متوسط، عملکرد آن از نانوذراتی مانند گرافن ضعیف تر است. غلظت ۰/۱٪ بهترین تعادل را با افزایش ۳/۱۴٪ انتقال حرارت و پراکندگی یکنواخت ارائه می دهد. غلظت ۰/۳٪ به دلیل تجمع ذرات و افزایش ویسکوزیته، افت عملکردی در رینولدزهای میانی نشان می دهد. در مقابل، ۰/۵٪ بیشترین افزایش عدد ناسلت (۵/۶۲٪) و بیشترین کاهش ضریب اصطکاک را به ویژه در جریان های متلاطم ایجاد کرده و پتانسیل بالای اکسید روی در غلظت های بالاتر را نشان می دهد.

اکسید روی در تمام غلظت ها عملکردی بهتر از تیتانیوم دی اکسید دارد که آن را به گزینه مناسب تری برای کاربردهای با نیاز انتقال حرارت متوسط تبدیل می کند.

جدول ۳ یک مقایسه ی عددی برای پنج نوع نانوذره مورد بررسی بر اساس سه فاکتور درصد میانگین افزایش عدد ناسلت، میانگین تغییر ضریب اصطکاک و میانگین افزایش شاخص عملکرد حرارتی را نشان می دهد. به طور کلی می توان گفت که تفاوت در عملکرد نانوذرات مورد بررسی ریشه در تفاوت خواص ترموفیزیکی (مانند چگالی و هدایت حرارتی نانوذرات) و نحوه تعامل آن ها با سیال پایه و جریان آشفته دارد [35].

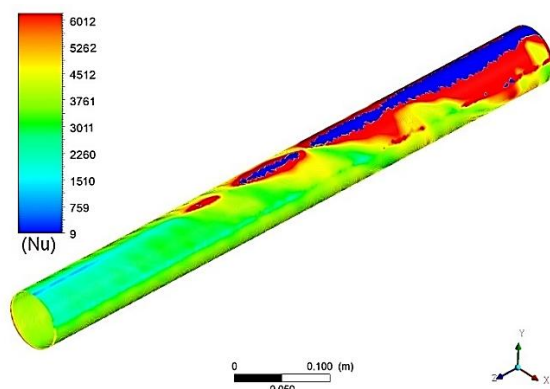
شکل ۱۳ توزیع عدد ناسلت در طول لوله ای با نوارهای پیچشی و حضور نانوسیال در عدد رینولدز ۱۱۵۰۰۰ نمایش داده شده است. بازه عدد ناسلت نیز مطابق با شکل ۷ از ۸/۹ تا ۶۰۱۲ در نظر گرفته شده است. در ناحیه ورودی، عدد ناسلت به طور طبیعی بالاتر است، زیرا گرادیان دمایی شدید و اختلاط اولیه سیال موجب افزایش نرخ انتقال حرارت می شود. در عدد رینولدز

در شکل 14، توزیع تنش برشی دیواره در طول لوله با بازه‌ای از 1 تا 329 Pa نشان داده شده است. مقادیر نسبتاً بالا، بیانگر افزایش نرخ انتقال مومنوم به دیواره هستند که ناشی از آشفتگی شدید و اختلاط مؤثر سیال در حضور نوارهای پیچشی است.

جدول 3: مقایسه عملکرد حرارتی و هیدرولیکی نانوسیالات مختلف

نسبت به سیال پایه

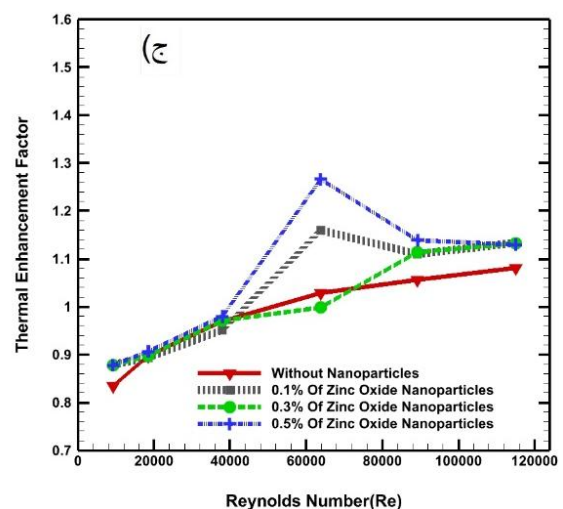
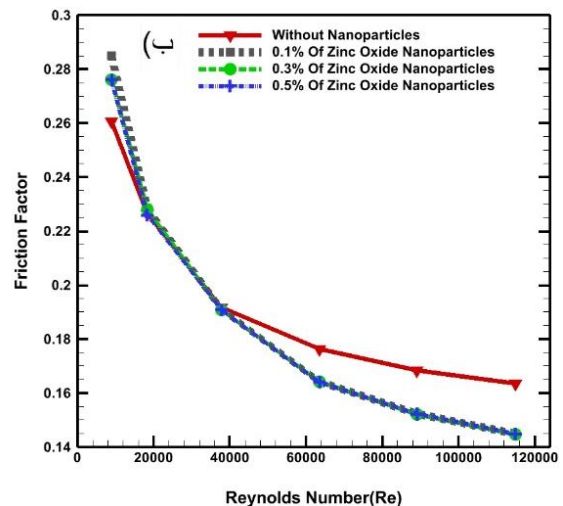
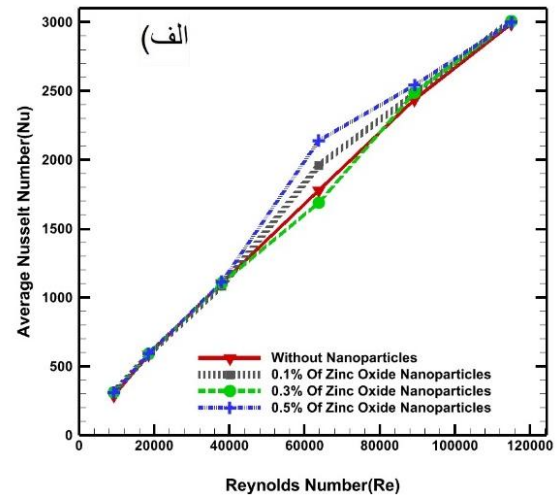
نوع نانوذره	کسر حجمی (φ)	میانگین افزایش عدد ناسلت (Nu) (%)	میانگین تغییر ضریب اصطكاك (f) (%)	میانگین افزایش شاخص عملکرد حرارتی (X) (%)
Al_2O_3	0/001	2/69	-2/30	3/64
	0/003	7/33	-3/76	8/83
	0/005	1/57	-3/80	2/94
Graphene	0/001	2/89	-3/58	4/23
	0/003	3/56	-3/68	4/95
	0/005	5/99	-3/69	7/44
TiO_2	0/001	3/27	-2/79	4/36
	0/003	4/99	-3/61	6/39
	0/005	1/05	-2/84	2/08
SiC	0/001	3/17	-2/79	4/26
	0/003	9/23	-3/48	10/69
	0/005	1/57	-3/50	2/85
ZnO	0/001	3/14	-2/99	4/28
	0/003	0/79	-3/64	2/09
	0/005	5/62	-3/80	7/10



شکل 13: توزیع عدد ناسلت در طول لوله (آلومینیوم اکسید 0/1٪، رینولدز 115000)

در ناحیه ورودی، گرادیان‌های شدید سرعت و دما موجب افزایش موضعی تنش برشی شده‌اند، اما با حرکت در امتداد لوله، جریان به حالت توسعه‌یافته نزدیک می‌شود. با این حال، هندسه پیچشی نوارها موجب حفظ آشفتگی در نزدیکی دیواره و جلوگیری از

شکل 11: تأثیر حضور نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در درصدهای مختلف درون سیال پایه بر الف عدد ناسلت متوسط، ب ضریب اصطكاك و ج فاکتور ازدیاد حرارت



شکل 12: تأثیر حضور نانوذرات اکسید روی در درصدهای مختلف درون سیال پایه بر الف عدد ناسلت متوسط، ب ضریب اصطكاك و ج فاکتور ازدیاد حرارت

نسبت به سایر نانوذرات داشت. در مقابل، دی اکسید تیتانیوم تنها در غلظت‌های پایین تا میانی عملکرد مناسبی از خود نشان داد و در غلظت ۰/۵٪ به دلیل افزایش ویسکوزیته و افت عملکرد حرارتی، گزینه مطلوبی نبود.

از نظر هیدرودینامیکی، افزودن نانوذرات در رینولدزهای پایین باعث افزایش ضریب اصطکاک شد، اما در رینولدزهای بالا، به‌ویژه در غلظت‌های بیشتر، کاهش ضریب اصطکاک مشاهده گردید که نشان‌دهنده بهبود رفتار جریان و کاهش مصرف انرژی است.

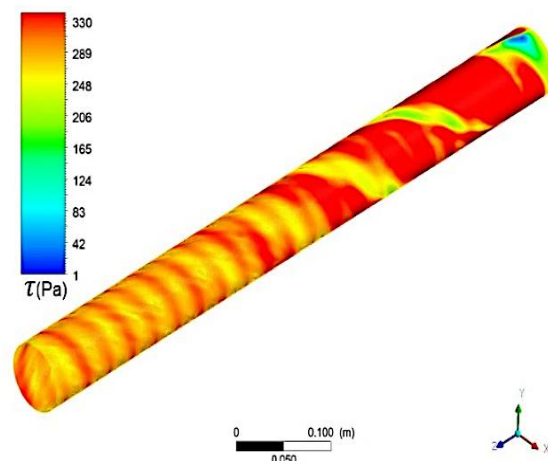
در مجموع، غلظت ۰/۳٪ برای اغلب نانوذرات، به‌ویژه سیلیکون کاربید و آلومینیوم اکسید، بهترین تعادل میان افزایش انتقال حرارت و افت فشار را فراهم می‌کند، درحالی‌که گرافن در غلظت ۰/۵٪ بیشترین پتانسیل را برای کاربردهای پیشرفته کلکتورهای خورشیدی نشان می‌دهد.

۷- فهرست علائم

A	مساحت	m^2
C_p	گرمای ویژه	$J/(kg \cdot K)$
D	قطر	m
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی	$W/(m^2 \cdot K)$
I	شدت تابش خورشیدی	W/m^2
k	ضریب هدایت حرارتی	$W/(m \cdot K)$
L	طول (لوله جاذب)	m
m	دبی جرمی	kg/s
Nu	عدد ناسلت	-
Q'	نرخ انتقال حرارت	W
T	دما	$K, ^\circ C$
t	زمان	s
U	ضریب کلی انتقال حرارت	$W/(m^2 \cdot K)$
V	سرعت	m/s
μ	ویسکوزیته دینامیکی	$Pa \cdot s$
ρ	چگالی	kg/m^3
Φ	کسر حجمی نانوذرات	-
η	بازده/راندمان حرارتی	-
T_{bulk}	دمای میانگین جرمی	$K, ^\circ C$
d_{ri}	قطر داخلی لوله جاذب	cm
d_{ro}	قطر خارجی لوله جاذب	cm
d_{gi}	قطر داخلی پوشش شیشه‌ای	cm
Re	عدد رینولدز	-
f	ضریب اصطکاک	-
x	فاکتور ازدیاد حرارت	-
u_m	سرعت متوسط سیال در مقطع	m/s
ν	ویسکوزیته سینماتیکی	m^2/s

یکنواخت شدن کامل پروفیل سرعت شده است (با نواحی قرمز/نارنجی غالب در نزدیکی نوارهای پیچشی به دلیل تنش برشی و جدایش) و آبی در هسته و نواحی جریان آرام که در نتیجه باعث باقی‌ماندن مقادیر قابل توجهی از تنش برشی دیواره در طول لوله می‌شود.

در انتهای لوله، توزیع فشار نشان‌دهنده افت فشار ناشی از مقاومت هیدرولیکی القاشده توسط نوارهای پیچشی و افزایش اصطکاک دیواره است. با مقایسه شکل ۷ به نظر می‌رسد به دلیل درصد پایین کسر جرمی نانوسیال، حضور آن‌ها تأثیر چندانی بر توزیع تنش برشی روی دیواره ندارند.



شکل ۱۴: توزیع تنش برشی در طول لوله (گرافن ۰/۳٪، رینولدز ۱۱۵۰۰)

۶- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، به‌منظور بهبود عملکرد یک کلکتور خورشیدی مجهز به نوار پیچشی در لوله جاذب، اثر افزودن نانوذرات آلومینیوم اکسید، گرافن، سیلیکون کاربید، اکسید روی و دی اکسید تیتانیوم در غلظت‌های ۰/۱٪، ۰/۳٪ و ۰/۵٪ حجمی بر عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و فاکتور ازدیاد حرارت به‌صورت عددی بررسی شد.

نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات به‌طور کلی موجب بهبود انتقال حرارت می‌شود، اما میزان این بهبود به نوع نانوذره، غلظت حجمی و رژیم جریان وابسته است.

در میان نانوذرات بررسی‌شده، آلومینیوم اکسید و سیلیکون کاربید در غلظت ۰/۳٪ عملکرد متعادلی از نظر افزایش عدد ناسلت و فاکتور ازدیاد حرارت ارائه دادند. به‌ویژه، سیلیکون کاربید در این غلظت بیشترین افزایش متوسط عدد ناسلت را ایجاد کرد و در رینولدزهای میانی به اوج عملکرد حرارتی رسید.

گرافن به دلیل ساختار لایه‌ای، وزن کم و پایداری بالا، حتی در غلظت ۰/۵٪ نیز بدون تجمع ذرات، بیشترین افزایش عدد ناسلت و فاکتور ازدیاد حرارت را نشان داد و از این نظر برتری محسوسی

[11] Elbadawy I, Fayed M. Reliability of Al_2O_3 nanofluid concentration on heat transfer augmentation and resizing for microchannels. *Alexandria Eng J.* 2020;59(3):1771–1785. doi:10.1016/j.aej.2020.04.046.

[12] Farshad SA, Sheikholeslami M. Nanofluid flow inside a solar collector utilizing twisted tape considering exergy and entropy analysis. *Renew Energy.* 2019;141:246–258. doi:10.1016/j.renene.2019.04.007.

[13] Esfe MH, Motallebi SM. Experimental study of effective parameters on thermal conductivity of a five-component hybrid nanofluid (in Persian). *Aerospace Mechanics Journal.* 1401;18(3):10–17. DOR:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1401.18.3.10.2

[14] Abedinejad MS, Teymoori A. Performance analysis of a parabolic solar receiver with twisted tape in an absorber tube. *Aerospace Mechanics.* 2025;21(3).

[15] Bas H, Ozceyhan V. Heat transfer enhancement in a tube with twisted tape inserts placed separately from the tube wall. *Exp Therm Fluid Sci.* 2012;41:51–58. doi:10.1016/j.expthermflusci.2012.03.008.

[16] Dow Chemical Company. Dow Syltherm™ 800 heat transfer fluid: Product technical data. Available from: https://www.dow.com/.

[17] Forristall R. Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in engineering equation solver. Golden (CO): NREL; 2003.

[18] Abugnah EK, Wan Salim WSI, Elfaghi AMA, Al-Alimi S, Saif Y, Zhou W. Numerical study of 3D single- and two-phase nanofluid flow through corrugated channels. *Processes.* 2024;12(5):870. doi:10.3390/pr12050870.

[19] Esfandiary M, Habibzadeh A, Sayehvand H. Numerical study of single-phase/two-phase nanofluid forced convection and pressure drop in turbulent pipe flow. *Trans Phenom Nano Micro Scales.* 2016;4(1):11–18. doi:10.7508/tpnms.2016.01.002.

[20] Bazdidi-Tehrani F, Sharifi-Sedeh E, Abedinejad MS. Influence of alumina nanoparticles on diesel fuel droplet evaporation in a gas turbine combustion chamber. *Fluid Mech Aerodyn.* 2021;9(2):101–111.

[21] Onyiriuka EJ, Obanor AI, Mahdavi M, Ewim DRE. Evaluation of single-phase, discrete, mixture and combined nanofluid flow models. *Adv Powder Technol.* 2018;29(8):1875–1888. doi:10.1016/j.appt.2018.07.018.

[22] Mohammadi M, Abedinejad MS. Analysis of NO formation and entropy generation in a reactive flow. *Aerospace.* 2022;9(11):666.

[23] Abedinejad MS, Bazdidi-Tehrani F, Sharifi-Sedeh E. Effects of inlet air and fuel conditions on reactive flow characteristics in a gas turbine combustion chamber. *Acta Mech.* 2025;236(9):5837–5857. doi:10.1007/s00707-024-04023-9.

λ	ضریب اصطکاک داریسی	–
τ	توزیع تنش برشی	Pa
P	فشار	Pa

8- مراجع

[1] Aksoy YT. Nanofluids for sustainable heat transfer enhancement: Beyond thermal conductivity. *Sustainability.* 2025;17(17):8006. doi:10.3390/su17178006.

[2] Nemati M, Sefid M. Numerical evaluation via lattice Boltzmann method of entropy generation in conjugate mixed convection heat transfer of non-Newtonian nanofluid under magnetic field (in Persian). *Aerospace Mechanics Journal.* 1402;19(2):9–16. DOR:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1402.19.2.9.6

[3] Nemati M, Sefid M, Karimipour A. Analysis of entropy and heat transfer of non-Newtonian ferrofluid under the effect of various external and internal factors (in Persian). *Aerospace Mechanics Journal.* 1403;20(1):1–10. DOR:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1403.20.1.1.3

[4] Rashid FL, et al. A comprehensive review on the use of nanofluids to increase the efficiency of pulsating heat pipe. *J Therm Anal Calorim.* 2025. doi:10.1007/s10973-025-14994-z.

[5] Alim MA, Abdin Z, Saidur R, Hepbasli A, Khairul MA, Rahim NA. Analyses of entropy generation and pressure drop for a conventional flat plate solar collector using different types of metal oxide nanofluids. *Energy Build.* 2013;66:289–296. doi:10.1016/j.enbuild.2013.07.027.

[6] Tyagi H, Phelan P, Prasher R. Predicted efficiency of a nanofluid-based direct absorption solar receiver. In: *Proc ES2007.* 2007. Available from: https://doi.org/10.1115/ES2007-36139.

[7] Otanicar TP, Phelan PE, Prasher RS, Rosengarten G, Taylor RA. Nanofluid-based direct absorption solar collector. *J Renew Sustain Energy.* 2010;2(3):033102. doi:10.1063/1.3429737.

[8] Otanicar TP, Golden JS. Comparative environmental and economic analysis of conventional and nanofluid solar hot water technologies. *Environ Sci Technol.* 2009;43(15):6082–6087. doi:10.1021/es900031j.

[9] Mu L, Zhu Q, Si L. Radiative properties of nanofluids and performance of a direct solar absorber using nanofluids. In: *Proc ASME Micro/Nanoscale Heat Mass Transfer.* 2009. Available from: https://doi.org/10.1115/MNHMT2009-18402.

[10] Gupta HK, Agrawal GD, Mathur J. Effect of Al_2O_3 – H_2O nanofluid flow rate on efficiency of a direct absorption solar collector. *Case Stud Therm Eng.* 2015;5:70–78. doi:10.1016/j.csite.2015.01.002.

- [31] P. Naphon, T. Khaembah, "Experimental study on the heat transfer and pressure drop characteristics of a heat exchanger with nanofluids under laminar flow conditions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 21–22, pp. 4997–5003, 2009.
- [32] H. Liu, J. Tian, "Numerical simulation of nanofluid flow and heat transfer in a pipe with twisted tape insert", *Applied Thermal Engineering*, vol. 41, pp. 115–123, 2012.
- [33] R. M. Manglik, A. E. Bergles, "Heat transfer and pressure drop correlations for twisted-tape inserts in isothermal tubes: Part I—Laminar flows", *Journal of Heat Transfer*, vol. 115, no. 4, pp. 881–889, 1993.
- [34] S. Eiamsa-ard, P. Promvonge, "Enhancement of heat transfer in a circular tube with twisted tape inserts", *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, no. 5–6, pp. 939–947, 2007.
- [35] W. Yu, H. Xie, "A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications", *Journal of Nanomaterials*, vol. 2012, Article ID 435873, 2012.
- [24] Abedinejad MS, Daliri S, Teymoori A. Numerical investigation of material, wall thickness and porosity effects in a thermo-photovoltaic combustion chamber. *Fluid Mech Aerodyn*. 2024;13(1):85–97.
- [25] Mwesigye A, Bello-Ochende T, Meyer JP. Heat transfer and entropy generation in a parabolic trough receiver with wall-detached twisted tape inserts. *Int J Therm Sci*. 2016;99:238–257. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2015.08.015.
- [26] Fattahi A. Rotary concentrated solar collector containing twisted ribs and MgO–Ag/water nanofluid. *J Taiwan Inst Chem Eng*. 2021;124:29–40. doi:10.1016/j.jtice.2021.05.013.
- [27] Patil SB, Basavarajappa PS. Recent progress in doped TiO₂ nanostructures for enhanced photocatalysis. *Int J Hydrogen Energy*. 2020.
- [28] Keklikcioglu O, Dagdevir T, Ozceyhan V. Numerical investigation on heat transfer enhancement of graphene oxide–water nanofluids in a corrugated channel. *Nat Eng Sci*. 2016.
- [29] Gu Y, et al. Analytical prediction of subsurface damage and surface quality in vibration-assisted polishing of SiC ceramics. *Materials*. 2019;12(10):1690. doi:10.3390/ma12101690.
- [30] Suresh Kumar VP, et al. Experimental investigation on thermal conductivity of nanofluids. *Int Res J Eng Technol*. 2018;5(3):1069–1073.