



Experimental Study on Enhancement of Heat Transfer in Peugeot 206 Radiator Using Oxide Nanofluids

Ahmad Yaghoubi¹, Hamoon Pourmirzaagha*²

1. M.Sc, Department of Mechanical Engineering, Lan.C., Islamic Azad University, Langroud, Iran

2 Assistant professor, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Ram.C., Islamic Azad University, Ramsar, Iran

Abstract

Enhancing heat transfer in automobile radiators is one of the key aspects of the automotive industry. In recent years, increased emphasis has been placed on the use of nanofluids to enhance heat transfer in various types of heat exchangers; however, only a limited number of studies have focused specifically on radiators. In this study, water and two nanofluids (aluminum oxide (Al_2O_3) and copper oxide (CuO)) were experimentally tested in a Peugeot 206 radiator to investigate and compare their heat transfer performance. The nanofluids were prepared at three different weight concentrations: 0.1%, 0.3%, and 1.0%. The experiments were conducted at two fan speeds (medium and high) and four different engine speeds. The results showed that, under high fan speed, the maximum enhancement in heat transfer compared to water was achieved with the Al_2O_3 nanofluid at 1.0 wt% and an engine speed of 1152 rpm, reaching a 29.52% increase. For the CuO nanofluid under the same conditions, the highest enhancement occurred at 1.0 wt% and 1152 rpm, with a 39.52% increase over water. At medium fan speed, the greatest heat transfer improvement for both nanofluids was also observed at 1.0 wt% and 1152 rpm, with the Al_2O_3 and CuO nanofluids showing 27.80% and 35.30% increases, respectively.

Keywords

Heat Transfer
Radiator
Nanofluid
Aluminum Oxide
Copper Oxide

Received: 05.04.2025

Revised: 21.05.2025

Accepted: 25.05.2025

*Corresponding Author

Hamoon Pourmirzaagha

Email

Hamoon.pourmirzaagha@iaau.ac.ir

1- Introduction

In the transportation sector, effective cooling is crucial due to the increasing power output of internal combustion engines and the advancement of hybrid vehicles, which necessitate larger radiators and consequently increase the vehicle's frontal area. This enlargement results in higher aerodynamic drag and increased fuel consumption [1]. With rapid technological progress, considerable advancements have been achieved in the design and manufacture of more compact industrial equipment. Within this context, thermal management and efficient heat dissipation have emerged as significant challenges. Over the past five decades,

the evolution of micro- and nanoscale technologies has driven a fundamental transformation in cooling system design [2].

A primary limitation in the miniaturization and optimization of heat transfer devices is the restricted thermal performance of conventional fluids such as water and ethylene glycol. In both conduction and convection heat transfer processes, the thermal conductivity of the working fluid plays a pivotal role, as higher conductivity directly translates to enhanced heat transfer rates. Given that the thermal conductivity of solid materials is generally around

How to Cite this Article:

[1] A. Yaghoubi and H. Pourmirzaagha, "Experimental study on enhancement of heat transfer in Peugeot 206 radiator using oxide nanofluids," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 107–123, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.515147.1117> (in Persian)



two orders of magnitude greater than that of conventional fluids, the suspension of finely dispersed solid nanoparticles within base fluids has been proposed as a novel and effective strategy to significantly improve the thermal performance of heat transfer media [2,3]. Improving energy efficiency and reducing energy consumption have always been among the primary concerns of researchers [4–9]. The same applies to heat transfer improvement in heating and cooling systems, prompting extensive investigations into the use of alternative fluids with better thermal properties than conventional coolants such as water and ethylene glycol. Notably, the significantly higher thermal conductivity of metals like copper and aluminum compared to liquids inspired Maxwell [10] to propose the idea of dispersing metal particles in fluids. In recent years, nanofluids have gained attention in various engineering fields including solar systems, electronic cooling, medical applications, fuel cells, nuclear reactors, and thermal efficiency enhancement. However, it was Choi and Eastman [11], and Masuda et al. [12], who were among the first to introduce nanofluids in their modern form. Modern nanofluids are typically defined as fluids in which ultrafine nanoparticles (1–100 nm) are stably suspended in base fluids such as water or ethylene glycol [13].

In this study, the thermal performance of the cooling system of a Peugeot 206 vehicle was experimentally investigated using water-based nanofluids containing aluminum oxide (Al_2O_3) and copper oxide (CuO) nanoparticles at three different weight concentrations (0.1%, 0.3%, and 1.0%). The key novelties of this research are as follows:

- A systematic combination of two nanoparticle types with three concentration levels in a unified experimental framework, which has not been simultaneously investigated under identical conditions before;
- A comprehensive thermal performance analysis using an actual automotive radiator, rather than simulated or lab-scale systems, providing results of practical and industrial relevance;

The nanofluids were first prepared using magnetic stirring, followed by ultrasonic agitation for an optimized duration to prevent nanoparticle agglomeration and to maintain a stable and uniform suspension. Throughout the testing procedure, parameters such as engine speed, coolant flow rate, and fan speed were systematically varied, and all relevant data were meticulously recorded. Once thermal equilibrium was achieved, measurements were taken to assess the influence of nanofluid usage on heat transfer enhancement and radiator efficiency. This practical, real-world experimental setup provides robust evidence for the potential of nanofluids in significantly improving the thermal performance of automotive cooling systems.

- Presentation of comparative performance indices between base fluid and various nanofluids, serving as a basis for optimal nanofluid selection in light-duty vehicle thermal applications.

2- Research Methods

In this experimental investigation, the thermal performance of aluminum oxide (Al_2O_3) and copper oxide (CuO) nanofluids as radiator coolants for a Peugeot 206 Type 2 engine was comprehensively examined. The experiments were carried out on a fully operational laboratory test bench incorporating the actual engine, its complete cooling system, and associated instrumentation. To ensure precise and reliable data acquisition, advanced measurement tools—including a linear rotameter for accurate coolant flow rate monitoring and high-precision PT-type temperature sensors for recording the inlet, outlet, and radiator surface temperatures—were utilized.



Figure 1: Overview of the experimental setup and associated equipment

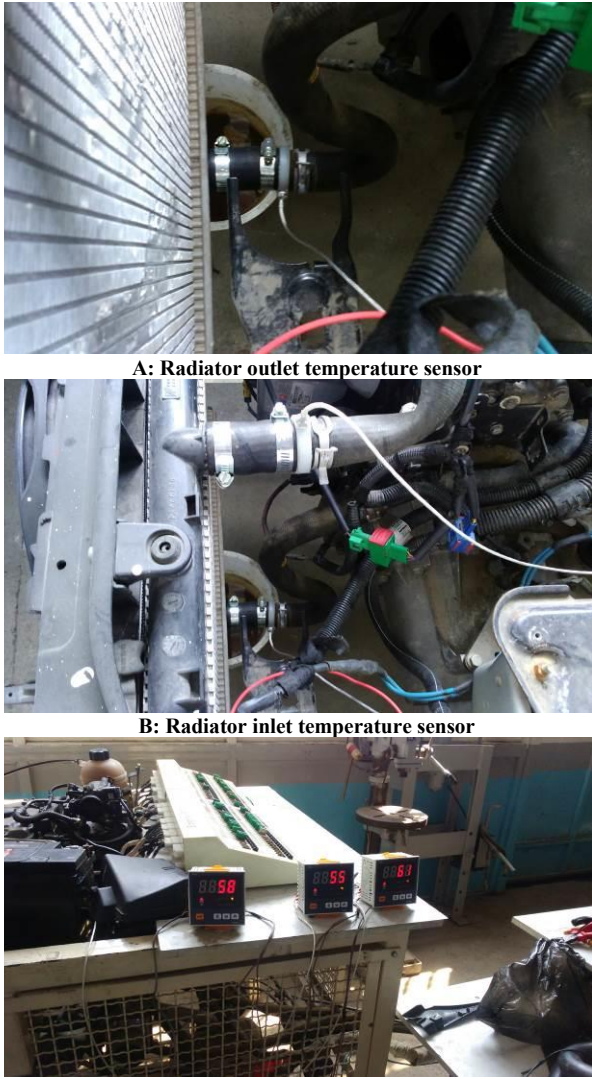


Figure 2: Placement of sensors and rotameter in the cooling system

3- Results

In this study, it was demonstrated that the use of aluminum oxide nanofluid significantly enhances heat transfer from the radiator. Temperature measurements at various points in the system, along with related calculations, confirmed this improvement. Figure 3 presents the variation of heat dissipation as a function of engine speed for different weight concentrations of the aluminum oxide nanofluid. The results are shown for two fan speeds: high and medium. As observed in Figure 3, the heat dissipation from the radiator increases with the Reynolds number of the flow, which corresponds to the increase in engine speed. Moreover, heat dissipation at the high fan speed is greater than at the medium fan speed. For any given

engine speed, the heat dissipation using aluminum oxide nanofluid is higher than that of pure water, and it increases significantly with higher nanofluid weight concentrations. In other words, the heat dissipation from the radiator improves with increasing nanofluid concentration.

The application of copper oxide nanofluid also resulted in an increase in heat transfer within the radiator. Figure 4 illustrates the variation of heat dissipation as a function of engine speed for different weight concentrations of the copper oxide nanofluid. This figure presents data for two fan speeds: high and medium. As observed, heat transfer increases with the Reynolds number of the flow, which corresponds to the increase in engine speed. Additionally, heat dissipation is higher at the high fan speed compared to the medium fan speed.

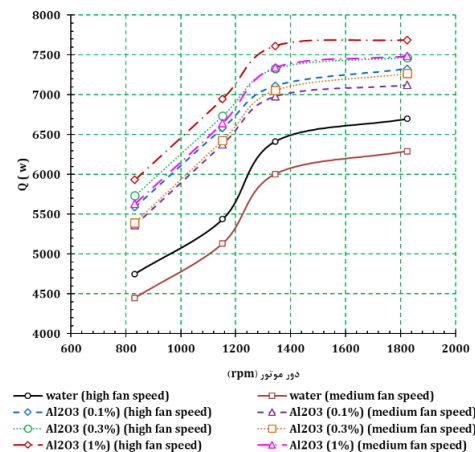


Figure 3: Heat dissipation versus engine speed for water and aluminum oxide nanofluids at various weight concentrations and fan speeds (high and medium).

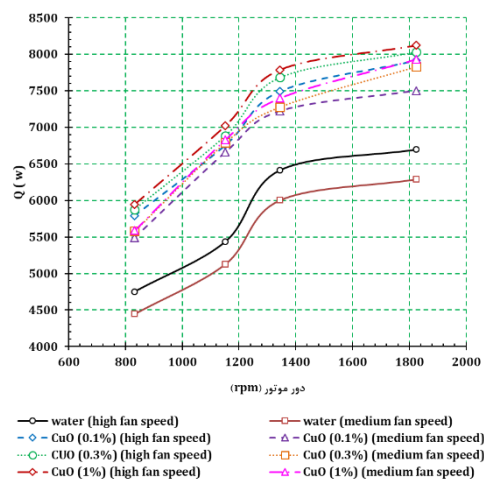


Figure 4: Heat dissipation versus engine speed for water and copper oxide nanofluids at various weight concentrations and fan speeds (high and medium).

4- Conclusion

This study confirmed that using Al_2O_3 and CuO nanofluids as automotive radiator coolants significantly enhances heat transfer, especially at 1% concentration and 1152 rpm. CuO nanofluid showed superior performance due to higher thermal conductivity, intensified turbulence, and nanoparticle dynamics. Despite increased viscosity, thermal conductivity remained the dominant factor. Overall, nanofluids improve cooling efficiency, reduce system size and weight, and offer promising potential for modern vehicle thermal management

5- References

- [1] S. Kakaç, A. E. Bergles, F. Mayinger, and H. Yüncü, Eds., *Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers*. Springer, 2013.
- [2] S. K. Das, S. U. Choi, W. Yu, and T. Pradeep, *Nanofluids: Science and Technology*. Wiley, 2007.
- [3] A. Ghadimi, R. Saidur, and H. S. Metselaar, "A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 54, no. 17–18, pp. 4051–4068, 2011, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014).
- [4] M. Yadegari and A. Bak Khoshnevis, "Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 136, p. 71, 2021, doi: [10.1140/epjp/s13360-021-01071-1](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01071-1).
- [5] M. Yadegari and A. B. Khoshnevis, "Entropy generation analysis of turbulent boundary layer flow in different curved diffusers in air-conditioning systems," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 135, no. 6, p. 534, 2020, doi: [10.1140/epjp/s13360-020-00545-y](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00545-y).
- [6] M. Yadegari, "An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 136, no. 10, p. 1019, 2021, doi: [10.1140/epjp/s13360-021-01999-4](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01999-4).
- [7] M. Yadegari and A. Bak Khoshnevis, "Numerical study of the effects of adverse pressure gradient parameter, turning angle and curvature ratio on turbulent flow in 3D turning curved rectangular diffusers using entropy generation analysis," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 135, no. 7, pp. 1–21, 2020, doi: [10.1140/epjp/s13360-020-00561-y](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00561-y).
- [8] H. Haghghatjoo, M. Yadegari, and A. Bak Khoshnevis, "Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 137, no. 9, p. 1042, 2022, doi: [10.1140/epjp/s13360-022-03260-y](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03260-y).
- [9] M. Yadegari and A. Bak Khoshnevis, "A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines," *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 42, p. 383, 2020, doi: [10.1007/s40430-020-02495-z](https://doi.org/10.1007/s40430-020-02495-z).
- [10] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Clarendon Press, 1873.
- [11] S. U. Choi, "Nanofluid technology: current status and future research," Argonne National Laboratory, IL, USA, Tech. Rep., Oct. 1998.
- [12] H. Masuda, A. Ebata, and K. Teramae, "Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles," *Jpn. J. Thermophys. Prop.*, vol. 7, no. 3, pp. 227–233, 1993, doi: [10.2963/jjtp.7.227](https://doi.org/10.2963/jjtp.7.227).
- [13] O. Mahian, S. Mahmud, and S. Zeinali Heris, "Effect of uncertainties in physical properties on entropy generation between two rotating cylinders with nanofluids," *J. Heat Transf.*, vol. 134, no. 8, p. 082401, 2012, doi: [10.1115/1.4006662](https://doi.org/10.1115/1.4006662).



مطالعه تجربی بهبود انتقال حرارت در رادیاتور خودرو ۲۰۶ با استفاده از نانوسیالات اکسیدی

احمد یعقوبی^۱، هامون پورمیرزاآقا^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، واحد لنگرود، دانشگاه آزاد اسلامی، لنگرود، ایران

۲- استادیار، گروه مکانیک و هوافضا، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر، ایران

چکیده

کلمات کلیدی

انتقال حرارت

رادیاتور

نانوسیال

اکسید آلومینیوم

اکسید مس

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴

*نویسنده مسئول

هامون پورمیرزاآقا

ایمیل

Hamoon.pourmirzaagha@iau.ac.ir

افزایش انتقال حرارت در رادیاتور خودرو یکی از جنبه‌های مهم صنعت خودروسازی می‌باشد. در سال‌های اخیر تأکید بیشتری بر روی انتقال حرارت نانوسیال در انواع مختلف مبدل‌های حرارتی صورت گرفته است اما مطالعات انگشت‌شماری روی رادیاتور انجام شده است. در این مقاله، سیالات خنک‌کننده آب و نانوسیالات اکسید آلومینیوم و اکسید مس در سه درصد وزنی ۰/۱، ۰/۳ و ۱ به صورت آزمایشگاهی در رادیاتور خودرو ۲۰۶ برای بررسی انتقال حرارت استفاده و با هم مقایسه شده‌اند. تست‌ها برای دو حالت دور تند و متوسط فن و در چهار دور موتور مختلف صورت پذیرفته است. نتایج نشان داد که در دور تند فن، بیشترین میزان افزایش انتقال حرارت نسبت به آب برای نانوسیال اکسید آلومینیوم در درصد وزنی ۱٪ و دور موتور ۱۱۵۲rpm حاصل شد که ۲۹/۵۲ درصد بیشتر می‌باشد. برای نانوسیال اکسید مس و دور تند فن نیز بیشترین افزایش انتقال حرارت در درصد حجمی ۱٪ و دور موتور ۱۱۵۲rpm حاصل شد که ۳۹/۵۲ درصد بیشتر از آب معمولی است. در دور متوسط فن نیز بیشترین افزایش انتقال حرارت برای هر دو نانوسیال نسبت به آب در دور موتور ۱۱۵۲ rpm و درصد وزنی ۱٪ اتفاق می‌افتد که برای نانوسیال اکسید آلومینیوم و اکسید مس به ترتیب ۲۷/۸۰ و ۳۵/۳۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

یکی از موانع اصلی در فشرده‌سازی و بهینه‌سازی دستگاه‌های انتقال حرارت، محدودیت‌های موجود در خواص انتقال حرارت سیالات متداولی نظیر آب و اتیلن گلیکول است. در فرآیندهای انتقال حرارت از نوع هدایت و جابجایی، ضریب هدایت حرارتی سیال نقشی کلیدی ایفا می‌کند و هر چه این ضریب بالاتر باشد، نرخ انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد. از آنجاکه هدایت حرارتی مواد جامد به‌طور میانگین صد برابر بیشتر از سیالات رایج است، تهیه سوسپانسیونی از ذرات ریز جامد درون سیالات پایه به‌عنوان راهکاری نوین برای بهبود عملکرد حرارتی سیالات حامل انرژی مطرح شده است [۲ و ۳].

افزایش راندمان و بهبود مصرف انرژی در صنایع همواره مورد توجه محققان بوده است [۴-۹]. بهبود انتقال حرارت در سیستم‌های

در صنعت حمل‌ونقل، خنک‌کننده از اهمیت حیاتی برخوردار است؛ چرا که روند روبه رشد توان موتورهای احتراقی و توسعه خودروهای هیبریدی، مستلزم استفاده از رادیاتورهای بزرگ‌تر و در نتیجه افزایش سطح پیشانی وسیله نقلیه است. این مسئله منجر به افزایش نیروی پسا و در نهایت مصرف سوخت بیشتر می‌شود [۱].

با پیشرفت روزافزون فناوری، تحقیقات در زمینه طراحی و ساخت تجهیزات صنعتی با ابعاد کوچک‌تر گسترش قابل توجهی یافته است. در این راستا، مدیریت حرارتی و دفع مؤثر گرما از سطوح مختلف به یکی از چالش‌های اساسی بدل شده است. توسعه تجهیزات در مقیاس‌های میکرو و نانو طی پنج دهه اخیر، زمینه را برای تحول بنیادی در سامانه‌های خنک‌کاری فراهم ساخته است [۲].

How to Cite this Article:

[1] A. Yaghoobi and H. Pourmirzaagha, "Experimental study on enhancement of heat transfer in Peugeot 206 radiator using oxide nanofluids," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 107-123, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.515147.1117> (in Persian)



افزایش ۹ درصدی در ضریب کلی انتقال حرارت نسبت به آب خالص شدند. همچنین مشاهده شد که افزایش دمای ورودی نانوسیال‌ها، ضریب کلی انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. حسین و همکاران [۱۸] عملکرد حرارتی نانوسیالات اکسید تیتانیوم و اکسید سیلیسیم با پایه آب را در رادیاتور خودرو، تحت شرایط جریان ورقه‌ای بررسی کردند. در این پژوهش، غلظت حجمی نانوسیالات در بازه ۱ تا ۲ درصد و دمای ورودی سیال در محدوده ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. نتایج حاکی از آن بود که بیشترین افزایش نرخ انتقال حرارت نسبت به آب خالص، به ترتیب برابر با ۱۱ درصد برای نانوسیال اکسید تیتانیوم و ۲۲/۵ درصد برای نانوسیال اکسید سیلیسیم به دست آمد. الیاس و همکاران [۱۹] دستاوردهایی را در مورد رسانایی حرارتی، ویسکوزیته، گرمای ویژه و چگالی نانوسیال‌های اکسید آلومینیم در آب و اتیلن گلیکول که به عنوان خنک‌کننده در رادیاتور خودرو استفاده می‌شد، گزارش دادند. غلظت حجمی ۱٪ و دمای خنک کاری ۵۰ درجه سانتی‌گراد نگه‌داشته شد. نارکی و همکاران [۲۰] نتایج تجربی برای نانوسیال آب/اکسید مس، آزمایش شده تحت حالت جریان لایه‌ای در رادیاتور خودرو را گزارش کردند. غلظت حجمی از صفر تا ۰/۴٪ و دمای ورودی از ۵۰ تا ۸۰ درجه متغیر بود. یک افزایش ۸٪ در ضریب کلی انتقال حرارت در مقایسه با آب خالص برای کسر حجمی ۰/۴٪ نانوسیال گزارش شد. ناون و کیشرو [۲۱] به مطالعه عملکرد حرارتی رادیاتور با استفاده از نانوسیال گرافن مبتنی بر مخلوط آب و اتیلن گلیکول پرداختند. برای این منظور، نانوسیالات با غلظت‌های حجمی مختلف تهیه و به صورت تجربی تحت شرایط مختلف دمایی و دبی جریان آزمایش شد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که افزودن نانوذرات گرافن باعث بهبود نرخ انتقال حرارت و ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود. زبیر و همکاران [۲۲] عملکرد نانوسیال TiO_2 بر پایه آب و اتیلن گلیکول به عنوان سیال خنک‌کننده در رادیاتور را صورت تجربی بررسی نمودند. نانوسیال با غلظت حجمی کم نانوذرات در ترکیب ۷۵٪ آب و ۲۵٪ اتیلن گلیکول تهیه و در دبی‌های مختلف از طریق لوله‌های خمیده رادیاتور عبور داده شد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که افزایش دبی جریان باعث بهبود انتقال حرارت شده و بیشترین افزایش (۲۹/۵ درصد) در غلظت ۰/۳ درصد نانوذره به دست آمده است.

حسن [۲۳] به مطالعه نانوسیال هیبریدی بر پایه‌ی آبی به عنوان جایگزینی برای سیال معمولی در رادیاتور خودروی هوندا ۲۰۰۵ پرداخت. آزمایش‌ها در دماها و دبی‌های مختلف نشان دادند که این نانوسیال باعث بهبود ضریب انتقال حرارت جابجایی تا ۲۸/۵ درصد،

گرمایشی و سرمایشی نیز از این قاعده مستثنی نیست، از این رو تحقیقات گسترده‌ای برای استفاده از سیالات جایگزین به جای سیالات متداول (نظیر آب و اتیلن گلیکول) که بتواند خواص حرارتی مناسب‌تری را بروز دهد انجام شده است. از سوی دیگر خواص چند برابری هدایت حرارتی فلزاتی نظیر مس و آلومینیوم در مقایسه با مایعات متداول باعث شده است تا ایده پخش کردن ذرات فلزی در مایعات توسط ماکسول [۱۰] مطرح شود. نانوسیالات در سال‌های گذشته در بسیاری از عرصه‌های مهندسی مانند سیستم‌های خورشیدی، خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، کاربردهای پزشکی، پیل‌های سوختی، راکتورهای هسته‌ای و افزایش راندمان سیستم‌های حرارتی مورد توجه قرار گرفته‌اند. اما می‌توان گفت چوی و ایستمن [۱۱] و ماسودا و همکاران [۱۲] اولین محققانی بودند که نانوسیالات در معنای امروزی را مورد استفاده قرار دادند. نانوسیالات در معنای امروزی را می‌توان سیالاتی دانست که ذرات بسیار ریز در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر در داخل سیال پایه مانند آب و یا اتیلن گلیکول پایدار شده‌اند [۱۳].

داس و همکاران [۱۴] نشان دادند که رسانایی حرارتی نانوسیالات با افزایش دما به طور مستقیم افزایش می‌یابد و مقادیر به دست آمده با پیش‌بینی مدل‌های کلاسیک رسانایی حرارتی مؤثر همخوانی ندارند. آن‌ها پیشنهاد کردند که افزایش تعداد نانوذرات، به دلیل افزایش سطح تماس مؤثر برای انتقال حرارت، می‌تواند به بهبود قابل توجه رسانایی حرارتی نانوسیال منجر شود. بهزاد مهر و همکاران [۱۵] نیز یک مدل ترکیبی دوفازی را برای مطالعه انتقال حرارت نانوسوسپانسیون آب-مس با کسر حجمی ۱ درصد، در جریان مغشوش درون لوله‌ای با شار حرارتی ثابت به کار بردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، عدد رینولدز و عدد ناسلت افزایش یافته و ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. پیغمبرزاده و همکاران [۱۶] عملکرد رادیاتور خودرو را با استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم با سیال پایه آب بررسی کردند. در این پژوهش، غلظت حجمی نانوذرات در بازه ۰/۱ تا ۱ درصد متغیر بود و بیشترین افزایش نرخ انتقال حرارت معادل ۴۵ درصد در غلظت ۱ درصد گزارش شد. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، پیغمبرزاده و همکاران [۱۷] رادیاتور خودرو را با نانوسیالات اکسید مس و اکسید آهن، هر دو با پایه آب، در سه غلظت حجمی ۰/۱۵ درصد، ۰/۴ درصد و ۰/۶۵ درصد مورد آزمایش قرار دادند. عدد رینولدز در بازه ۵۰ تا ۱۰۰۰ و دمای ورودی خنک‌کننده در محدوده ۵۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. نتایج نشان داد که هر دو نوع نانوسیال باعث

نانوسیال‌های هیبریدی مانند Al_2O_3/TiO_2 و گرافن/آلومینا با افزایش ۶/۳ تا ۱۲۴ درصدی در انتقال حرارت، عملکرد بهتری ارائه می‌دهند. به علاوه، افزایش غلظت و دبی نانوسیال‌ها باعث ارتقای ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت شده و بهترین عملکرد در غلظت ۰/۰۵ تا ۲ درصد به دست آمده است.

الیبول و همکاران [۳۰] در یک مطالعه تجربی روی رادیاتور واقعی خودروی سنگین، از نانوسیال آب دی‌یونیزه شده و نانوذرات TiO_2 در غلظت‌های مختلف استفاده نمودند. نتایج نشان داد در دمای ورودی ۸۰ درجه، دبی ۱۱ لیتر بر دقیقه و غلظت ۰/۰۵ درصد، بیشترین نرخ انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت به دست می‌آید. همچنین در این شرایط، نسبت به آب خالص، انتقال حرارت ۲۲ درصد و عدد ناسلت تا ۴۸/۱ درصد افزایش می‌یابد.

در این پژوهش، عملکرد حرارتی سیستم خنک‌کننده خودروی پژو ۲۰۶ با استفاده از نانوسیالات پایه‌ی آب شامل نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید مس در سه غلظت وزنی مختلف (۰/۱٪، ۰/۳٪ و ۰/۱٪) به صورت تجربی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. وجه تمایز و نوآوری این تحقیق در چند بُعد قابل بیان است:

- ترکیب سیستماتیک دو نوع نانوذره با سه سطح غلظت در قالب یک مطالعه تجربی منسجم که پیش‌ازاین به صورت هم‌زمان و تحت شرایط یکسان بررسی نشده است؛
- تحلیل جامع عملکرد حرارتی واقعی در رادیاتور خودرو به جای سیستم‌های مدل‌سازی شده یا مقیاس آزمایشگاهی که نتایج آن از دیدگاه کاربرد صنعتی و عملیاتی حائز اهمیت است؛
- ارائه‌ی شاخص‌های مقایسه‌ای عملکرد میان سیال پایه و نانوسیالات مختلف که می‌تواند مبنای طراحی و انتخاب نانوسیال بهینه در کاربردهای حرارتی خودروهای سبک قرار گیرد.

۲- نانوسیال

نانوسیالات به‌عنوان نسل نوینی از سیالات انتقال حرارت، به‌واسطه‌ی خواص حرارتی برتر خود، کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف صنعتی یافته‌اند. این سیالات با افزودن نانوذرات فلزی یا غیرفلزی به سیال پایه، تحت فرآیندهای ویژه‌ای تولید می‌شوند و در مقایسه با سیالات معمولی، عملکرد انتقال حرارت به‌مراتب کارآمدتری ارائه می‌دهند. حضور نانوذرات معلق در سیال موجب افزایش ضریب هدایت حرارتی و بهبود مکانیزم‌های جابه‌جایی حرارت می‌گردد. افزون بر این، پایداری بالای نانوذرات در سوسپانسیون، مشکلاتی نظیر سایش

عدد ناسلت تقریباً ۲۳ درصد و بازده عملکرد تا حدود ۲۲ درصد نسبت به آب مقطر می‌شود.

پیغمبرزاده و همکاران [۲۴] به‌صورت تجربی تأثیر نانوذرات اکسید آلومینیوم را در ترکیب با آب و اتیلن گلیکول، با کسر حجمی ۰/۱ تا ۱ درصد بررسی کردند. نرخ جریان خنک‌کاری در محدوده ۲ تا ۶ لیتر بر دقیقه تنظیم شد. برای نانوسیال با پایه آب و همچنین با پایه اتیلن گلیکول، دماهای ورودی به‌ترتیب در بازه‌های ۳۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد و ۴۵ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کرد. عدد رینولدز نیز در محدوده ۱۲۰۰ تا ۲۵۰۰ برای نانوسیال پایه آب و ۹۰۰۰ تا ۲۳۰۰۰ برای نانوسیال پایه اتیلن گلیکول در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که با افزایش ۱ درصد حجمی نانوذرات به سیال پایه، عدد ناسلت تا ۴۰ درصد نسبت به سیال خالص افزایش یافت.

یاو و همکاران [۲۵] در تحقیقی به کارایی نانوسیال هیبریدی حاوی نانوصفحات گرافن و نانوکریستال‌های سلولزی در بهبود انتقال حرارت رادیاتور خودرو پرداختند. نتایج نشان داد این نانوسیال موجب افزایش تقریبی ۵۱ درصدی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، ۴۶ درصدی ضریب انتقال حرارت کلی و کاهش ۳۴ درصدی افت فشار نسبت به آب مقطر می‌شود که امکان کاهش اندازه لوله‌ی رادیاتور و افزایش ظرفیت خنک‌کاری را فراهم می‌نماید.

دهاریاسامی و همکاران [۲۶] در یک تحقیق تجربی و آماری، نانوسیال حاوی نقره با اندازه ذرات ۲۰ نانومتر در پایه‌ای از اتیلن گلیکول و آب مقطر را برای بهبود انتقال حرارت رادیاتور خودرو بررسی نمودند. نتایج نشان داد نانوذرات کوچک‌تر خواص گرمایی بهتری دارند و موجب افزایش انتقال حرارت و کاهش اندازه رادیاتور می‌شوند. کومار و همکاران [۲۷] به بررسی تجربی نانوسیال‌های مبتنی بر آب دی‌یونیزه و کربن فعال با غلظت‌های حجمی مختلف پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که با افزودن ۰/۴ درصد حجمی از این نانوذرات، رسانایی گرمایی و عدد ناسلت به ترتیب حدود ۹ درصد و ۳۲ درصد افزایش می‌یابد، هرچند افزایش غلظت باعث کاهش ظرفیت گرمایی ویژه شد.

بابایی و همکاران [۲۸] به شبیه‌سازی عددی اثر نانوسیال ساده و هیبریدی بر عملکرد خنک‌کاری رادیاتور اتومبیل پرداختند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد نانوسیال‌های هیبریدی با افزایش ضریب انتقال حرارت، موجب افزایش افت فشار می‌شوند. همچنین نانوسیال تیتانیوم‌دی‌اکسید در بهبود عملکرد حرارتی رادیاتور تأثیر کمتری داشت. بارگال و همکاران [۲۹] در مطالعات خود نشان دادند که

حاضر، از روابط زیر برای محاسبه چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیالات استفاده شده است. توضیح اینکه در این روابط، ϕ کسر حجمی نانوذرات است که به سیال پایه اضافه شده است. زیر نویس های ρ_{nf} و ρ_{bf} به ترتیب بیانگر خصوصیات مربوط به سیال پایه، نانوسیال و نانوذرات می باشد.

۱-۳- چگالی

بر اساس فیزیک حاکم بر مخلوط دو ماده خواهیم داشت:

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

۲-۳- ظرفیت گرمایی ویژه

برای تعیین ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال از روش ارائه شده توسط پک و چو [۳۲] استفاده شده است:

$$C_p = (1 - \phi)C_{p,bf} + \phi C_{p,p} \quad (2)$$

۳-۳- لزجت دینامیکی

روابط مختلفی برای محاسبه لزجت دینامیکی نانوسیال ارائه شده است که در مقاله حاضر از رابطه زیر استفاده می نمایم [۳۳]:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\phi) \quad (3)$$

۴-۳- ضریب هدایت حرارتی

برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، رابطه همیلتون- کروسر به صورت زیر ارائه شده است [۳۴]:

$$\frac{K_{nf}}{K_{bf}} = \frac{K_p + 2K_{bf} - 2\phi(K_{bf} - K_p)}{K_p + 2K_{bf} + \phi(K_{bf} - K_p)} \quad (4)$$

۴- تشریح سیستم آزمایشگاهی

سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه شامل موتور ۲۰۶ تیپ دو به همراه تمامی تجهیزات و سیستم خنک کاری کامل آن است که بر روی استند ثابت قرار گرفته است. در این سیستم، ترموستات سیستم خنک کاری موتور حذف شده است و به محض روشن شدن موتور، مایع خنک کننده موتور شروع به گردش در سیستم خنک کاری می کند. موتور و تجهیزات مرتبط در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که حجم کل سیال موجود در سیستم خنک کاری برابر با ۶ لیتر می باشد. رادیاتور مورد بررسی شامل ۵۹ لوله عمودی به ارتفاع ۳۹/۹ سانتی متر با سطح مقطع بیضی به قطرهای ۱۶/۵ میلی متر و ۱/۷۵ میلی متر است. اطلاعات کامل تر در خصوص هندسه این رادیاتور در جدول ۱ ارائه شده است.

تجهیزات و رسوب گذاری را به حداقل می رساند. برای سنتز نانوسیالات، دو روش اصلی وجود دارد: روش دومرحله ای و روش یک مرحله ای که هر کدام مزایا و چالش های خاص خود را دارند [۳۱].

۱-۲- روش دومرحله ای

در این روش، ابتدا نانوذرات به صورت پودر خشک از طریق فرآیندهایی مانند رسوب بخار شیمیایی (CVD) یا میعان در حضور گاز بی اثر سنتز می شوند. استفاده از گاز بی اثر از اکسید شدن نانوذرات جلوگیری می کند، در حالی که برای تولید نانوذرات اکسیدی، از اکسیژن استفاده می شود. سپس، این نانوذرات درون سیال پایه پراکنده می شوند که برای بهبود یکنواختی سوسپانسیون، از امواج مافوق صوت، مواد فعال کننده سطح و تغییر pH استفاده می شود. اگرچه این روش برای تولید انبوه مناسب است، اما نیروی واندروالسی بین نانوذرات ممکن است منجر به تجمع آن ها و در نتیجه کاهش ضریب هدایت حرارتی شود. با این حال، در مواردی مانند تولید نانوسیالات اکسیدی در آب دیونیزه شده، روش دومرحله ای عملکرد مطلوبی دارد و به دلیل در دسترس بودن نانوپودرها در مقیاس صنعتی، از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه است.

۲-۲- روش یک مرحله ای

این روش با هدف رفع محدودیت های روش دومرحله ای توسعه یافته است و در آن، نانوذرات مستقیماً درون سیال پایه تولید می شوند. یکی از رایج ترین تکنیک های این روش، تبخیر مستقیم است که طی آن، منبع فلزی تحت شرایط خلأ تبخیر شده و سپس در محیط سیال میعان می یابد. این فرآیند منجر به کاهش قابل توجه تجمع نانوذرات و افزایش پایداری سوسپانسیون حاصل می گردد. با این حال، فشار بخار پایین برخی سیالات می تواند چالشی در اجرای موفق این روش ایجاد کند. افزون بر تبخیر مستقیم، روش های شیمیایی تک مرحله ای مانند احیای نمک های فلزی و تهیه مستقیم سوسپانسیون آن ها نیز در تولید نانوسیالات کاربرد دارند. مزیت اصلی روش یک مرحله ای، امکان کنترل دقیق تر بر اندازه، توزیع و یکنواختی نانوذرات است که نقش تعیین کننده ای در بهبود خواص حرارتی نانوسیال ایفا می کند.

۳- تعیین خواص نانوسیال

با فرض توزیع یکنواخت نانوذرات در سیال پایه، می توان غلظت ذرات را در سراسر سیستم همگن در نظر گرفت. در این شرایط، خواص ترموفیزیکی نانوسیالات در دماها و غلظت های مختلف، با استفاده از روابط کلاسیک جریان های دوفازی، قابل ارزیابی هستند. در مطالعه

شکل ۳ جانمایی سنسورها و نحوه نصب آن‌ها روی سیستم رادیاتور را نشان می‌دهد.



شکل ۲: محل و چگونگی نصب روتامتر در سیستم آزمایشگاهی



الف: سنسور دمای خروجی رادیاتور



ب: سنسور دمای ورودی رادیاتور



د: نشانگر دماهای وردی و خروجی

شکل ۳: سنسورهای دما و محل نصب آن‌ها



شکل ۱: موتور TU3 مورد مطالعه در کار حاضر

جدول ۱: مشخصات رادیاتور موتور مورد مطالعه

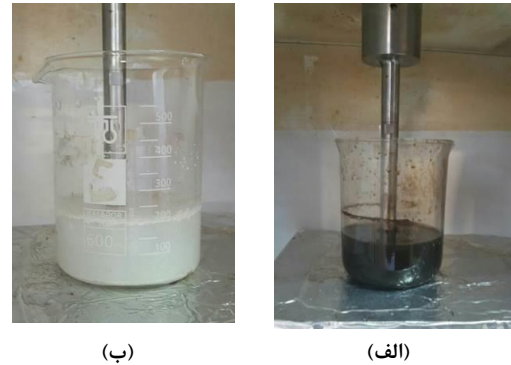
جنس فین و لوله	آلومینیوم
نوع فین	موج‌دار
ابعاد فین (mm)	۳۸۶/۵×۲۷×۷/۵۲
عرض×ارتفاع×طول	۶۰
تعداد فین	۱/۲ لیتر
حجم رادیاتور	

برای اندازه‌گیری دبی جریان از روتامتر استفاده شده است. روتامتر مورد استفاده در این سیستم آزمایشگاهی از نوع خطی می‌باشد. این روتامتر از نوع LZT-2520G با محدوده اندازه‌گیری ۲-۲۰ GPM و دقت اندازه‌گیری $\pm 4\%$ می‌باشد. همچنین، روتامتر به صورت مستقیم و عمود بر لوله آب (شکل ۲) نصب گردیده است.

برای اندازه‌گیری دقیق دما در این آزمایش، از ترمیستورهای نوع PT با دقت بالا استفاده گردیده است. این نوع سنسورها از جنس پلاتین بوده و دارای ویژگی مقاومتی مثبت هستند؛ بدین معنا که با افزایش دما، مقدار مقاومت الکتریکی آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. در این سیستم آزمایشگاهی، از سه عدد سنسور PT با مقاومت پایه ۱۰۰ اهم در دمای مرجع بهره گرفته شده است. به منظور ثبت داده‌ها، این سنسورها به سه عدد مولتی‌متر دیجیتال با قابلیت قرائت مقادیر مقاومت با دقت بالا متصل شده‌اند. دو سنسور PT به ترتیب در ورودی و خروجی رادیاتور نصب گردیده‌اند تا دمای نانوسیال در ابتدای ورود و پس از عبور از مبدل حرارتی رادیاتور به طور دقیق اندازه‌گیری شود. سنسور سوم بر روی سطح خارجی بدنه رادیاتور و در ناحیه میانی آن قرار گرفته است تا دمای لحظه‌ای بدنه رادیاتور به عنوان یک شاخص برای تبادل حرارت با محیط اندازه‌گیری شود. به منظور تسهیل در مشاهده مقادیر دما در حین آزمایش، خروجی این سنسورها به نمایشگر دیجیتال متصل شده است. همچنین برای ثبت هم‌زمان دمای خروجی موتور و دور موتور، از دستگاه دیاگ استفاده شده که امکان قرائت پارامترهای عملکردی موتور در زمان واقعی را فراهم می‌سازد.

۵- روش تهیه نانوسیالات

آماده‌سازی نانوسیال پایدار نقش مهمی در بهبود عملکرد آن در کاربردهای انتقال حرارت دارد. یکی از چالش‌های اصلی در این زمینه، جلوگیری از تجمع نانوذرات به دلیل نیروهای قوی وان‌دروالسی و ایجاد یک سوسپانسیون همگن است. در فرآیند آماده‌سازی، مقدار مشخصی از نانوذرات برای دستیابی به درصد وزنی موردنظر جدا شده و همراه با سیال پایه، ابتدا به مدت ۳۰ دقیقه با همزن مغناطیسی مخلوط می‌شود. سپس این مخلوط به مدت ۱۵ دقیقه به صورت پالس تحت امواج آلتراسونیک قرار می‌گیرد. زمان بهینه برای اعمال امواج آلتراسونیک بر اساس آزمایش‌های متعدد تعیین شده است. در این مطالعه، از دستگاه آلتراسونیک با توان ۵۰۰ وات و فرکانس ۵۰ کیلوهرتز استفاده شده است (شکل ۴). خواص نانوپودر اکسید آلومینیوم و اکسید مس در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۴: نمونه‌های نانوسیالات اکسید آلومینیوم و اکسید مس تحت امواج آلتراسونیک

جدول ۲: خواص نانوپودر اکسید آلومینیوم و اکسید مس

مشخصات	اکسید آلومینیوم	اکسید مس
شکل ظاهری خلوص	کروی	کروی
اندازه ذره (nm)	۲۰	۹۸ درصد
مساحت سطح ویژه ($\frac{m^2}{g}$)	۲۰۰	۶۰
چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	۳۸۹۰	۶۴۰۰
ظرفیت حرارتی ویژه ($\frac{J}{kg.K}$)	۸۸۰	۵۳۱
ضریب هدایت حرارتی ($\frac{W}{m.K}$)	۳۶	۷۶/۵

۶- روش تست و جمع آوری داده‌ها

ابتدا موتور و مخزن انبساط با استفاده از آب و نانوسیالات با غلظت مشخص پر شد. سپس موتور روشن شد تا دمای سیال خنک‌کننده بالا برود. در ابتدای آزمایش در دور آرام موتور (۸۳۲ RPM) دبی جریان سیال خنک‌کننده برابر با ۱۱ لیتر در دقیقه بود اندازه‌گیری شد. در هر مرحله از آزمایش با بالا بردن دور موتور از ۸۳۲ RPM تا ۱۸۲۴ RPM، دبی جریان سیال از ۱۱ تا ۳۰ لیتر در دقیقه تنظیم گردید. همچنین، دبی جریان برای دو دور تند و متوسط فن که با کلید مستقیم از باطری راه‌اندازی می‌شود، جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. دمای ورودی و خروجی رادیاتور توسط سنسورهای PT و نمایشگر و همچنین دمای سطح رادیاتور با استفاده از سنسور PT نصب‌شده روی رادیاتور و مولتی‌متر ثبت شدند. مدت‌زمان متوسطی که سیستم در طول آزمایش‌ها به تعادل می‌رسد، حدود ۸ دقیقه است که به جهت اطمینان از پایداری ثبت نتایج پس از ۱۵ دقیقه از شروع کارکرد سیکل موردنظر نتایج خوانده و ثبت شدند.

۷- نتایج

آزمایش‌های موردنظر برای آب معمولی و نانوسیالات مختلف شامل نانوسیال اکسید آلومینیوم با سه درصد وزنی ۰/۱، ۰/۳ و ۱ درصد و نانوسیال اکسید مس با سه درصد وزنی ۰/۱، ۰/۳ و ۱ درصد انجام شده است. در ادامه به ارائه نتایج مربوط به هریک از این سیالات خنک‌کننده و تفسیر آن‌ها خواهیم پرداخت.

۷-۱- اعتبارسنجی

به‌منظور انجام آزمایش‌ها، ابتدا لازم است که نتایج و قابلیت اطمینان تجهیزات آزمایشگاهی اعتبارسنجی شوند. در کار حاضر این مسئله با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تئوری عدد ناسلت برای آب خالص مورد بررسی قرار گرفته است.

عدد ناسلت تئوری از رابطه‌های تجربی دیتوس-بولتر یا گنیلینسکی قابل محاسبه است.

رابطه تجربی دیتوس-بولتر [۳۵]

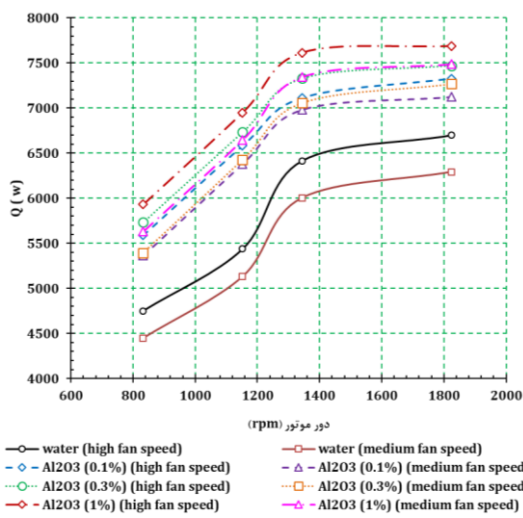
$$Nu = 0.0236 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (5)$$

رابطه تجربی گنیلینسکی [۳۶]

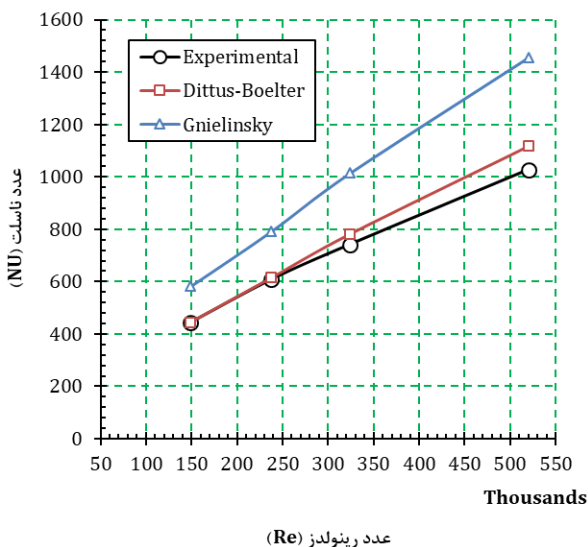
مقدار ناسلت آزمایشگاهی از مقدار ناسلت تئوری دورتر شده و خطا افزایش می‌یابد. حداکثر خطای حاصل از کار آزمایشگاهی نسبت به رابطه دیتوس-بولتر ۸/۰۷ درصد محاسبه شده است.

۲-۷ سیال خنک‌کننده نانوسیال اکسید آلومینیوم

با به‌کارگیری نانوسیال اکسید آلومینیوم و اندازه‌گیری دمای نقاط مختلف در سیستم و همچنین انجام محاسبات مرتبط، مشخص شد که انتقال حرارت از رادیاتور به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. نمودار تغییرات انتقال حرارت به‌عنوان تابعی از دور موتور برای این نانوسیال در درصدهای وزنی مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. این نمودار برای دو حالت دور تند و دور متوسط فن ارائه شده است



شکل ۶: نمودار حرارت دفع‌شده برحسب دور موتور برای آب و نانوسیالات اکسید آلومینیوم با درصدهای وزنی مختلف و دورهای تند و متوسط فن



شکل ۷: نمودار تغییرات عدد ناسلت آزمایشگاهی و تئوری برحسب عدد رینولدز جریان برای دور متوسط فن

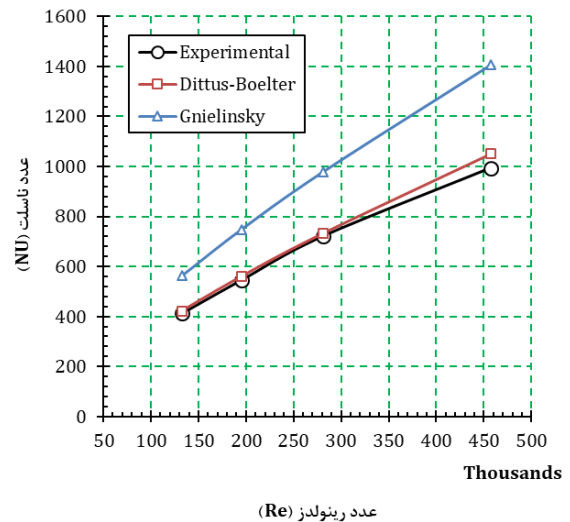
$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000) Pr}{1 + 12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0.11} \left[1 + \left(\frac{d}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \quad (6)$$

در رابطه بالا می‌توان از ترم تصحیح طول نسبی لوله برای جریان کاملاً توسعه‌یافته حرارتی و هیدرولیکی صرف‌نظر نمود. همچنین در این روابط Re ، عدد رینولدز جریان و Pr عدد پرانتل سیال خنک‌کننده می‌باشد. همچنین مقدار f در رابطه (۶) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f = (0.79 \ln(Re) - 1.69)^{-2} \quad (7)$$

رابطه دیتوس-بولتر برای $0.6 \leq Pr \leq 200$ و $Re \geq 10000$ معتبر است. همچنین رابطه گنیلینسکی برای $0.5 \leq Pr \leq 200$ و $3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6$ معتبر می‌باشد.

نمودار تغییرات عدد ناسلت برحسب عدد رینولدز جریان برای دور تند فن در شکل ۵ نشان داده شده است. نمودار متناظر با دور متوسط فن نیز در نمودار شکل ۶ ارائه گردیده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نحوه تغییرات عدد ناسلت آزمایشگاهی حاصل، مطابق با نحوه تغییرات ناسلت تئوری محاسبه‌شده با استفاده از روابط (۵) و (۶) می‌باشد. همچنین، مشخص است که این نتایج با مقادیر حاصل از رابطه دیتوس-بولتر مطابقت بسیار خوبی را نشان می‌دهد.



شکل ۵: نمودار تغییرات عدد ناسلت آزمایشگاهی و تئوری برحسب عدد رینولدز جریان برای دور تند فن

رابطه گنیلینسکی، مقادیر تئوری بیشتری را نسبت به رابطه دیتوس بولتر پیش‌بینی می‌نماید. همان‌طور که مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز جریان که متناظر با افزایش دور موتور می‌باشد،

همان‌طور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز جریان که متناظر با افزایش دور موتور است، میزان حرارت دفع شده از رادیاتور نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مقدار حرارت دفع شده در حالت دور تند فن بیشتر از حالت دور متوسط فن است. برای هر مقدار مشخص دور موتور، مقدار حرارت دفع شده از رادیاتور برای نانوسیال اکسید آلومینیوم بیشتر از آب معمولی بوده و این مقدار با افزایش درصد وزنی نانوسیال، به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، حرارت دفع شده از رادیاتور با افزایش درصد وزنی نانوسیال بیشتر خواهد بود.

جدول ۳: درصد تغییرات عدد ناسلت و حرارت دفع شده از رادیاتور برای نانوسیال اکسید آلومینیوم با درصد وزنی ۰/۱ درصد نسبت به آب خالص

دور موتور (rpm)	دور تند فن		دور متوسط فن	
	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)
۸۳۲	+۱۶/۶۷	+۲۰/۳۲	+۱۸/۱۹	+۱۷/۳۸
۱۱۵۲	+۱۶/۷۴	+۲۴/۳۵	+۱۰/۳۵	+۲۱/۰۴
۱۳۴۴	+۲۴/۰۱	+۱۶/۲۶	+۲۷/۷۷	+۱۰/۵۹
۱۸۲۴	+۲۳/۳۰	+۱۳/۲۲	+۱۵/۹۰	+۹/۱۱

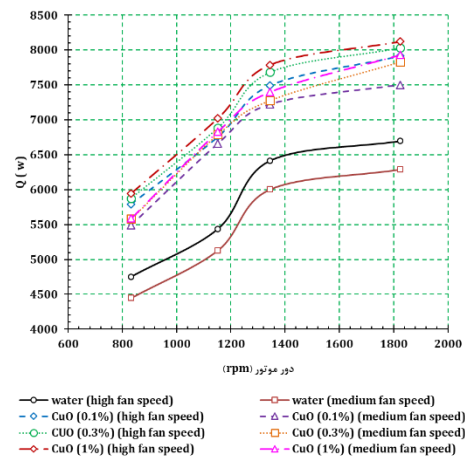
جدول ۴: درصد تغییرات عدد ناسلت و حرارت دفع شده از رادیاتور برای نانوسیال اکسید آلومینیوم با درصد وزنی ۰/۳ درصد نسبت به آب خالص

دور موتور (rpm)	دور تند فن		دور متوسط فن	
	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)
۸۳۲	+۱۹/۳۴	+۲۱/۲۸	+۱۹/۸۱	+۲۰/۶۵
۱۱۵۲	+۱۸/۲۳	+۲۵/۳۱	+۱۴/۲۵	+۲۳/۸۲
۱۳۴۴	+۲۸/۲۲	+۱۷/۵۷	+۲۹/۴۲	+۱۴/۲۱
۱۸۲۴	+۲۵/۰۱	+۱۵/۵۶	+۱۷/۴۷	+۱۱/۵۳

به‌کارگیری نانوسیال اکسید مس نیز موجب افزایش انتقال حرارت در رادیاتور گردید. نمودار تغییرات حرارت تبادل شده برحسب دور موتور در شکل ۸ ارائه شده است. این نمودار نیز برای دو حالت دور تند و دور متوسط فن ترسیم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز جریان که متناظر با افزایش دور موتور است، انتقال حرارت افزایش یافته است. همچنین مشخص است که انتقال حرارت برای دور تند فن بیشتر از دور متوسط فن است.

۳-۷- سیال خنک‌کننده نانوسیال اکسید مس

شکل ۸: نمودار حرارت دفع شده برحسب دور موتور برای آب و نانوسیالات اکسید مس با درصد‌های وزنی مختلف و دورهای تند و متوسط فن



شکل ۸: نمودار حرارت دفع شده برحسب دور موتور برای آب و نانوسیالات اکسید مس با درصد‌های وزنی مختلف و دورهای تند و متوسط فن

۸- بحث و نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از نانوسیالات در انتقال حرارت رادیاتور خودروی پژو ۲۰۶ (موتور TU3) انجام شده است. به همین منظور، موتور موردنظر و تجهیزات آزمایشگاهی مناسب فراهم شدند. در مرحله‌ی اول تست‌ها، آب خالص به‌عنوان سیال خنک‌کننده مورد استفاده قرار گرفت. پس‌از آن

جدول ۷: درصد تغییرات عدد ناسلت و حرارت دفع شده از رادیاتور برای نانوسیال اکسید مس با درصد وزنی ۰/۳ درصد نسبت به آب خالص

دور موتور (rpm)	دور تند فن		دور متوسط فن	
	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)
۸۳۲	+۱۹/۱۹	+۲۷/۲۵	+۱۱/۸۲	+۲۵/۴۶
۱۱۵۲	+۲۱/۳۵	+۳۴/۲۹	+۱۳/۸۲	+۲۸/۴۸
۱۳۴۴	+۲۸/۴۰	+۲۳/۰۱	+۲۹/۸۷	+۲۱/۴۹
۱۸۲۴	+۲۸/۹۸	+۲۶/۳۱	+۲۱/۲۲	+۲۱/۶۴

جدول ۵: درصد تغییرات عدد ناسلت و حرارت دفع شده از رادیاتور برای نانوسیال اکسید آلومینیوم با درصد وزنی ۱ درصد نسبت به آب خالص

دور موتور (rpm)	دور تند فن		دور متوسط فن	
	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)
۸۳۲	+۲۵/۹۹	+۲۶/۵۷	+۲۳/۳۷	+۲۴/۸۰
۱۱۵۲	+۲۴/۹۵	+۲۹/۵۲	+۱۸/۴۵	+۲۷/۸۰
۱۳۴۴	+۳۳/۳۲	+۲۲/۳۴	+۳۷/۸۹	+۱۸/۶۸
۱۸۲۴	+۳۱/۷۲	+۱۹/۰۲	+۲۳/۸۸	+۱۴/۷۷

جدول ۸: درصد تغییرات عدد ناسلت و حرارت دفع شده از رادیاتور برای نانوسیال اکسید مس با درصد وزنی ۱ درصد نسبت به آب خالص

دور موتور (rpm)	دور تند فن		دور متوسط فن	
	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)
۸۳۲	+۲۷/۴۹	+۳۱/۵۹	+۱۸/۸۹	+۳۱/۰۹
۱۱۵۲	+۲۶/۹۴	+۳۹/۵۲	+۱۵/۱۳	+۳۵/۳۰
۱۳۴۴	+۳۳/۰۲	+۲۹/۱۶	+۳۱/۶۰	+۲۷/۲۰
۱۸۲۴	+۳۲/۲۲	+۳۲/۱۳	+۲۴/۳۲	+۲۷/۰۷

جدول ۷ تا جدول ۸ درصدهای افزایش عدد ناسلت جریان و حرارت دفع شده از رادیاتور را برای دو حالت دور تند و متوسط فن به ترتیب برای نانوسیالات اکسید مس با درصدهای وزنی ۰/۱، ۰/۳ و ۱ درصد نشان می دهند. روند تغییرات افزایشی در عدد ناسلت و انتقال حرارت رادیاتور، کاملاً مشابه با حالت استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم می باشد؛ بنابراین توضیحاتی که برای نانوسیالات اکسید آلومینیوم و جدول های آن ذکر شد، برای نانوسیالات اکسید مس نیز صادق است. بیشترین میزان افزایش در انتقال حرارت برای هر دو سیال در درصد وزنی ۱ درصد و دور موتور ۱۱۵۲ دور در دقیقه مشاهده شد. همچنین، مشاهده گردید که میزان افزایش انتقال حرارت در حالت استفاده از نانوسیال اکسید مس بیشتر از حالت استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم می باشد.

جدول ۶: درصد تغییرات عدد ناسلت و حرارت دفع شده از رادیاتور برای نانوسیال اکسید مس با درصد وزنی ۰/۱ درصد نسبت به آب خالص

دور موتور (rpm)	دور تند فن		دور متوسط فن	
	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)	ناسلت (%)	انتقال حرارت (%)
۸۳۲	+۱۷/۵۷	+۲۴/۰۳	+۱۴/۹۶	+۲۲/۴۷
۱۱۵۲	+۱۶/۰۹	+۳۰/۴۶	+۱۱/۱۷	+۲۴/۸۷
۱۳۴۴	+۲۵/۳۶	+۲۰/۹۱	+۲۳/۴۱	+۱۷/۳۶
۱۸۲۴	+۲۱/۷۱	+۱۹/۸۸	+۱۸/۶۵	+۱۸/۷۳

نمودار تغییرات انتقال حرارت به عنوان تابعی از دور موتور برای دو نانوسیال در درصد وزنی ۱ درصد در شکل ۹ ارائه شده و با یکدیگر مقایسه گردیده است. در این درصد وزنی و سرعت دورانی ۱۱۵۲ دور در دقیقه که بیشترین افزایش انتقال حرارت برای هر دو نانوسیال مشاهده شد، انتقال حرارت نانوسیال اکسید مس نسبت به نانوسیال اکسید آلومینیوم به میزان ۷/۷۲ درصد افزایش یافته است. این نتایج نشان دهنده عملکرد بهتر نانوسیال اکسید مس در مقایسه با نانوسیال اکسید آلومینیوم در شرایط آزمایشی مورد بررسی می باشد.

دیگر صنایع حرارتی و حتی در فناوری‌های نوین انتقال حرارت قرار گیرد.

۸-۱- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از نانوسیالات اکسید آلومینیوم و اکسید مس به‌عنوان سیال خنک‌کننده در رادیاتور خودرو، تأثیر چشمگیری در بهبود نرخ انتقال حرارت دارد. بیشترین بهبود در انتقال حرارت در درصد وزنی ۱٪ و دور موتور ۱۱۵۲ دور در دقیقه مشاهده شد، که در این شرایط، نانوسیال اکسید مس عملکرد بهتری نسبت به نانوسیال اکسید آلومینیوم از خود نشان داد. این افزایش قابل توجه در انتقال حرارت به عواملی همچون بهبود هدایت حرارتی، افزایش آشفتگی جریان، و تأثیرات جنبشی نانوذرات مانند حرکت براونی و مهاجرت ذرات مربوط می‌شود.

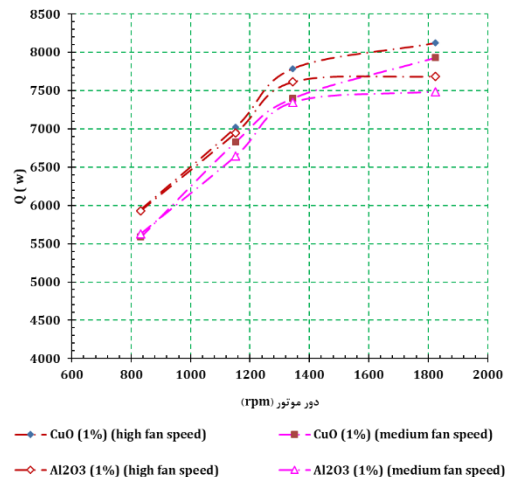
باوجود افزایش ویسکوزیته در نانوسیالات، تأثیر مثبت افزایش هدایت حرارتی بر عملکرد حرارتی رادیاتور بر سایر عوامل غالب بوده است. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از نانوسیالات می‌تواند به‌طور مؤثر در بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های خنک‌کننده خودرو، افزایش کارایی رادیاتور و کاهش مصرف انرژی کمک کند. علاوه بر این، استفاده از نانوسیالات در رادیاتورهای خودرو باعث کاهش ابعاد و وزن سیستم‌های خنک‌کننده می‌شود که این ویژگی برای طراحی خودروهای مدرن و بهبود عملکرد کلی خودروهای سبک‌تر و پرکارآمدتر بسیار حائز اهمیت است.

۹- فهرست علائم

ρ	چگالی (kg/m^3)
ϕ <td>کسر حجمی</td>	کسر حجمی
μ <td>لزجت دینامیکی (Pa.s)</td>	لزجت دینامیکی (Pa.s)
C_p <td>ظرفیت گرمایی ویژه ($J/kg.K$)</td>	ظرفیت گرمایی ویژه ($J/kg.K$)
K <td>ضریب هدایت حرارتی ($W/m.K$)</td>	ضریب هدایت حرارتی ($W/m.K$)
Nu <td>عدد ناسلت</td>	عدد ناسلت
Pr <td>عدد پرناندل</td>	عدد پرناندل
Q <td>حرارت (W)</td>	حرارت (W)
Re <td>عدد رینولدز</td>	عدد رینولدز

۱۰- منابع

[1] S. Kakaç, A. E. Bergles, F. Mayinger, and H. Yüncü, Eds., *Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers*. Springer, 2013.



شکل ۹: میزان انتقال حرارت برحسب دور موتور برای دور تند و متوسط فن برای نانوسیالات اکسید آلومینیوم و اکسید مس با درصد وزنی ۱

۸-۱- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از نانوسیالات اکسید آلومینیوم و اکسید مس به‌عنوان سیال خنک‌کننده در رادیاتور خودرو، تأثیر چشمگیری در بهبود نرخ انتقال حرارت دارد. بیشترین بهبود در انتقال حرارت در درصد وزنی ۱٪ و دور موتور ۱۱۵۲ دور در دقیقه مشاهده شد، که در این شرایط، نانوسیال اکسید مس عملکرد بهتری نسبت به نانوسیال اکسید آلومینیوم از خود نشان داد. این افزایش قابل توجه در انتقال حرارت به عواملی همچون بهبود هدایت حرارتی، افزایش آشفتگی جریان، و تأثیرات جنبشی نانوذرات مانند حرکت براونی و مهاجرت ذرات مربوط می‌شود.

باوجود افزایش ویسکوزیته در نانوسیالات، تأثیر مثبت افزایش هدایت حرارتی بر عملکرد حرارتی رادیاتور بر سایر عوامل غالب بوده است. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از نانوسیالات می‌تواند به‌طور مؤثر در بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های خنک‌کننده خودرو، افزایش کارایی رادیاتور و کاهش مصرف انرژی کمک کند. علاوه بر این، استفاده از نانوسیالات در رادیاتورهای خودرو باعث کاهش ابعاد و وزن سیستم‌های خنک‌کننده می‌شود که این ویژگی برای طراحی خودروهای مدرن و بهبود عملکرد کلی خودروهای سبک‌تر و پرکارآمدتر بسیار حائز اهمیت است.

در نهایت، نتایج این مطالعه بیانگر پتانسیل بالا و کاربرد وسیع نانوسیالات در صنایع خودروسازی است که می‌تواند نقش قابل توجهی در بهبود سیستم‌های خنک‌کننده و کاهش مصرف انرژی ایفا کند. این پژوهش می‌تواند مبنای تحقیقات آینده برای استفاده از نانوسیالات در

- [10] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Clarendon Press, 1873.
- [11] S. U. Choi, "Nanofluid technology: current status and future research," Argonne National Laboratory, IL, USA, Tech. Rep., Oct. 1998.
- [12] H. Masuda, A. Ebata, and K. Teramae, "Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles," *Jpn. J. Thermophys. Prop.*, vol. 7, no. 3, pp. 227–233, 1993, doi: [10.2963/jjtp.7.227](https://doi.org/10.2963/jjtp.7.227).
- [13] O. Mahian, S. Mahmud, and S. Zeinali Heris, "Effect of uncertainties in physical properties on entropy generation between two rotating cylinders with nanofluids," *J. Heat Transf.*, vol. 134, no. 8, p. 082401, 2012, doi: [10.1115/1.4006662](https://doi.org/10.1115/1.4006662).
- [14] S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel, "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids," *J. Heat Transf.*, vol. 125, no. 4, pp. 567–574, 2003, doi: [10.1115/1.1571080](https://doi.org/10.1115/1.1571080).
- [15] A. Behzadmehr, M. Saffar-Avval, and N. Galanis, "Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two-phase approach," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 28, no. 2, pp. 211–219, 2007, doi: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.04.006](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.04.006).
- [16] S. M. Peyghambarzadeh, S. H. Hashemabadi, M. S. Jamnani, and S. M. Hoseini, "Improving the cooling performance of automobile radiator with Al₂O₃/water nanofluid," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 10, pp. 1833–1838, 2011, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2011.02.029](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.02.029).
- [17] S. M. Peyghambarzadeh, S. H. Hashemabadi, M. Naraki, and A. Vermahmoudi, "Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 52, no. 1, pp. 8–16, 2013, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2012.11.013](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.11.013).
- [18] A. M. Hussein, R. A. Bakar, K. Kadirgama, and K. V. Sharma, "Heat transfer enhancement using nanofluids in an automotive cooling system," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 53, pp. 195–202, 2014, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.003](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.003).
- [2] S. K. Das, S. U. Choi, W. Yu, and T. Pradeep, *Nanofluids: Science and Technology*. Wiley, 2007.
- [3] A. Ghadimi, R. Saidur, and H. S. Metselaar, "A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 54, no. 17–18, pp. 4051–4068, 2011, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014).
- [4] M. Yadegari and A. Bak Khoshnevis, "Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 136, p. 71, 2021, doi: [10.1140/epjp/s13360-021-01071-1](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01071-1).
- [5] M. Yadegari and A. B. Khoshnevis, "Entropy generation analysis of turbulent boundary layer flow in different curved diffusers in air-conditioning systems," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 135, no. 6, p. 534, 2020, doi: [10.1140/epjp/s13360-020-00545-y](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00545-y).
- [6] M. Yadegari, "An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 136, no. 10, p. 1019, 2021, doi: [10.1140/epjp/s13360-021-01999-4](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01999-4).
- [7] M. Yadegari and A. Bak Khoshnevis, "Numerical study of the effects of adverse pressure gradient parameter, turning angle and curvature ratio on turbulent flow in 3D turning curved rectangular diffusers using entropy generation analysis," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 135, no. 7, pp. 1–21, 2020, doi: [10.1140/epjp/s13360-020-00561-y](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00561-y).
- [8] H. Haghightajoo, M. Yadegari, and A. Bak Khoshnevis, "Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 137, no. 9, p. 1042, 2022, doi: [10.1140/epjp/s13360-022-03260-y](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03260-y).
- [9] M. Yadegari and A. Bak Khoshnevis, "A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines," *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 42, p. 383, 2020, doi: [10.1007/s40430-020-02495-z](https://doi.org/10.1007/s40430-020-02495-z).

- properties of Ag nanofluid in a radiator—an experimental investigation," *Inorg. Nano-Met. Chem.*, vol. 53, no. 1, pp. 78–92, 2023, doi: [10.1080/24701556.2021.1980041](https://doi.org/10.1080/24701556.2021.1980041).
- [27] P. G. Kumar, V. S. Vigneswaran, V. Sivalingam, R. Velraj, S. C. Kim, and V. Ramkumar, "Enhancing heat transfer performance of automotive radiator with H₂O/activated carbon nanofluids," *J. Mol. Liq.*, vol. 371, p. 121153, 2023, doi: [10.1016/j.molliq.2022.121153](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.121153).
- [28] R. Babaei, M. M. Touiserkani, M. Khanchoupan, and A. Afradi, "Numerical simulation of the effect of conventional and hybrid nanofluids on the cooling performance of automobile radiator," *Sci. Technol. Mech. Eng.*, vol. 3, no. 2, 2025, doi: [10.22034/stme.2025.504084.1103](https://doi.org/10.22034/stme.2025.504084.1103) (in Persian).
- [29] M. H. Bargal, A. N. Allam, A. M. Zaki, M. E. Zayed, L. M. Alhems, and H. M. Ali, "Thermohydraulic performance augmentation and heat transfer enhancement of automotive radiators using nano-coolants: a critical review," *J. Therm. Anal. Calorim.*, pp. 1–53, 2025, doi: [10.1007/s10973-025-14101-2](https://doi.org/10.1007/s10973-025-14101-2).
- [30] E. A. Elibol, O. Turgut, F. Aktas, H. Senol, and A. F. Celik, "Experimental investigation on heat transfer and flow characteristics of TiO₂-water nanofluid in a heavy vehicle radiator," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 148, no. 3, pp. 977–994, 2023, doi: [10.1007/s10973-022-11817-3](https://doi.org/10.1007/s10973-022-11817-3).
- [31] E. V. Timofeeva, A. N. Gavrilov, J. M. McCloskey, Y. V. Tolmachev, S. Sprunt, L. M. Lopatina, and J. V. Selinger, "Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory," *Phys. Rev. E*, vol. 76, no. 6, p. 061203, 2007, doi: [10.1103/PhysRevE.76.061203](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.76.061203).
- [32] B. C. Pak and Y. I. Cho, "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles," *Exp. Heat Transf.*, vol. 11, no. 2, pp. 151–170, 1998.
- [33] A. Einstein, *Investigations on the Theory of the Brownian Movement*. Courier Corporation, 1956.
- [34] X. Q. Wang and A. S. Mujumdar, "A review on nanofluids—Part I: theoretical and numerical
- [19] M. M. Elias, I. M. Mahbulbul, R. Saidur, M. R. Sohel, I. M. Shahrul, S. S. Khaleduzzaman, and S. Sadeghipour, "Experimental investigation on the thermo-physical properties of Al₂O₃ nanoparticles suspended in car radiator coolant," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 54, pp. 48–53, 2014, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.03.005](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.03.005).
- [20] M. Naraki, S. M. Peyghambarzadeh, S. H. Hashemabadi, and Y. Vermahmoudi, "Parametric study of overall heat transfer coefficient of CuO/water nanofluids in a car radiator," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 66, pp. 82–90, 2013, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.07.001](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.07.001).
- [21] N. S. Naveen and P. S. Kishore, "Experimental investigation on heat transfer parameters of an automotive car radiator using graphene/water-ethylene glycol coolant," *J. Dispersion Sci. Technol.*, vol. 43, no. 3, pp. 1–3, 2022, doi: [10.1080/01932691.2020.1840999](https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1840999).
- [22] M. M. Zubair, M. Seraj, M. Faizan, M. Anas, and S. M. Yahya, "Experimental study on heat transfer of an engine radiator with TiO₂/EG-water nano-coolant," *SN Appl. Sci.*, vol. 3, p. 333, 2021, doi: [10.1007/s42452-021-04441-7](https://doi.org/10.1007/s42452-021-04441-7).
- [23] A. M. Hassaan, "An experimental investigation examining the usage of a hybrid nanofluid in an automobile radiator," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 27597, 2024, doi: [10.1038/s41598-024-78631-9](https://doi.org/10.1038/s41598-024-78631-9).
- [24] S. M. Peyghambarzadeh, S. H. Hashemabadi, S. M. Hoseini, and M. S. Jamnani, "Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 38, no. 9, pp. 1283–1290, 2011, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.07.001](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.07.001).
- [25] C. T. Yaw, S. P. Koh, M. Sandhya, K. Kadirgama, S. K. Tiong, D. Ramasamy, M. Sudhakar, M. Samykano, F. Benedict, and C. H. Tan, "Heat transfer enhancement by hybrid nano additives—graphene nanoplatelets/cellulose nanocrystal for the automobile cooling system (radiator)," *Nanomaterials*, vol. 13, no. 5, p. 808, 2023, doi: [10.3390/nano13050808](https://doi.org/10.3390/nano13050808).
- [26] R. Dhairiyasamy, B. Saleh, M. Govindasamy, A. A. Aly, A. Afzal, and Y. Abdelrhman, "Effect of particle size on thermophysical and heat transfer

[36] V. Gnielinski, "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow," *Int. Chem. Eng.*, vol. 16, no. 2, pp. 359–367, 1976.

investigations," *Braz. J. Chem. Eng.*, vol. 25, no. 4, pp. 613–630, 2008.

[35] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D. P. DeWitt, *Introduction to Heat Transfer*. Wiley, 2011.