



Numerical Simulation of the Effect of Conventional and Hybrid Nanofluids on the Cooling Performance of Automobile Radiator

Reza Babaei^{*1}, Mohammad Mahdi Touiserkani², Milad Khanchoupan³, Alireza Afradi⁴

1. PhD, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2 PhD Student, College of Engineering, Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

3. BSc, faculty of engineering, university of urmia, urmia, Iran.

4. PhD, Faculty of Mining and Geology Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran.

Abstract

In this paper, the effect of conventional nanofluids including Al₂O₃, CNC and TiO₂ and hybrid nanofluids including Al₂O₃/CNC and Al₂O₃/TiO₂ on the cooling rate of an automobile radiator was investigated. Hydrodynamic-Thermal simulation was performed using ANSYS Fluent software. The flow rate of the nanofluid solution was in the range of 10 to 100 g/s and the volume concentration of the nanofluid was between 0.1 and 0.9%. The flow temperature of the hot fluid was 45 °C and the temperature of the radiator cooling air was 30 °C. The results showed that hybrid nanofluids, despite increasing the heat transfer coefficient (CHTC), also increased the pressure drop of the system. At 0.9%, The thermal performance efficiency (TPE) parameter analysis showed that hybrid nanofluids including Al₂O₃/CNC and Al₂O₃/TiO₂ (values 1.5 and 1.42) had better performance than conventional nanofluids including Al₂O₃, CNC and TiO₂ (values 1.30, 1.32 and 1.09). It was also observed that TiO₂ nanofluid had a low effect on increasing the thermal performance of the radiator.

Keywords

Nanofluids
Hybrid
Car radiator
TPE
Heat transfer enhancement

Received: 02.02.2025

Revised: 03.29.2025

Accepted: 04.05.2025

*Corresponding Author

Reza Babaei

Email

r.babaei@modares.ac.ir

1- Introduction

Engine cooling is the biggest technical challenge in the manufacturing, electrical, and automotive industries. Water pump failure and radiator wear, along with inefficient coolant, are the main causes of overheating in automobile engines. Overheating can cause damage to various parts of the vehicle, including warping of the cylinder head, distortion of the radiator hose, and even vehicle failure [1]. Engine operating temperatures must be controlled to prevent mechanical problems in materials caused by high operating temperatures, which allows for

optimal fuel consumption while preventing overcooling. Many industrial cooling systems, automotive parts, air conditioning, power generation, and chemical processes use common coolants such as water, motor oils, mineral oil, and ethylene glycol as the base fluid [2]. Increasing the heat transfer rate of the base fluid is one of the primary issues for current science and technology [3]. Improving cooling performance includes three methods: passive cooling, active cooling, and a combination of the two [4]. Active methods mostly



require the use of external forces to improve the cooling capabilities, such as installing a cooling fan to remove excess heat or using antifreeze (water and antifreeze) [5]. However, this solution has limitations in order to maintain the same system size, area or input power. Adding nanoparticles to the base fluid has great potential to increase the effectiveness of the cooling technique [6] [7]. Fluids in this category, known as nanofluids, are in which a colloidal suspension of solid nanoparticles (100 nm in size) is added to the base fluid. Therefore, researchers have focused on comparing the heat transfer characteristics of solid particles with base fluids to enhance the thermal performance of automotive cooling systems. Various studies have shown that the use of nanofluids in automotive cooling systems can help minimize the size and weight of the radiator, while increasing system efficiency and reducing fuel consumption [8]. In most works, a mixture of water and ethylene glycol (in various proportions) is used in automotive cooling systems [9].

It is observed that most studies conducted on automobile radiators focus on the effect of conventional nanofluids and in the laboratory, and the use of hybrid nanofluids for radiators, especially their numerical simulation, is very limited. In the present work, a radiator is simulated in real dimensions and then the effect of different simple and hybrid nanofluids on the performance of the radiator cooling system is investigated. The innovation of the present work is the simultaneous use of conventional and hybrid nanofluids and the comparison between them.

2- Research Methods

In the present work, the effect of various hybrid nanofluids on the cooling performance of an automobile radiator is numerically investigated. First, the work of Singh et al. [10] is used to verify the numerical results. Figure 1 shows the geometry of a finned radiator. The number of tubes is 39 and the number of fins is 10. The temperature of the hot water entering the tubes is 45 degrees Celsius and the air temperature is 30 Celsius and the velocity is

3 m/s. The flow rate of the hot water entering the radiator is variable and ranges from 10 g/s to 100 g/s. In the present work, the hot water base fluid is used as the inlet fluid to the automobile radiator and the air base fluid is used as the cooling fluid of the automobile radiator. In the present work, in order to increase the heat transfer, nanofluids (simple and hybrid) are added to the water fluid to investigate its effect on the cooling performance of the radiator.

3- Results

Figure 8 shows the values of pressure drop increase for different nanofluid solutions. It is observed that the pressure drop with respect to the fluid flow rate is approximately a quadratic function and its values increase with increasing fluid flow rate. It is also observed that the Al_2O_3/CNC nanofluid solution produces the highest pressure drop and the TiO_2 nanofluid produces the lowest pressure drop in the radiator tube assembly.

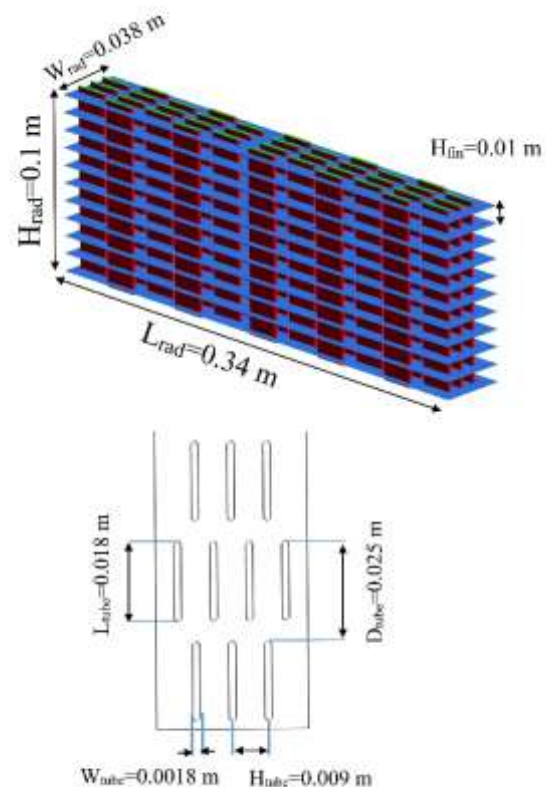


Figure 1: Schematic of the geometry of an automobile radiator

This is a contradictory behavior with the values of heat transfer increase, because in the heat transfer

section it was shown that the best performance was related to Al₂O₃/CNC and the worst performance was related to TiO₂. For this reason, the thermal performance coefficient (TPE) parameter, which indicates the power of heat transfer coefficient increase with respect to the increase in pressure drop, is investigated. The number one for this parameter indicates the equality of the heat transfer increase and the increase in pressure drop, and therefore, in order to justify the type and amount of nanofluid, this value should be greater than one. Figures 9 and 10 show the thermal performance coefficient (TPE) at volume fractions of 0.1 and 0.9 percent. It is observed that the value of the thermal performance coefficient is higher at low flow rates and decreases with increasing base fluid flow rate. The reason for this is that at high flow rates, the contribution of fluid convection heat transfer becomes superior to the performance of nanofluid properties and practically the effect of nanofluid in improving the heat transfer rate is reduced. It is observed that the hybrid nanofluids Al₂O₃/CNC and Al₂O₃/TiO₂ had better performance than simple nanofluids, so that at a volume fraction of 0.1 percent and a flow rate of 10 g/s, the TPE parameter for these two hybrid nanofluids is 1.16 and 1.12, respectively. While for simple nanofluids Al₂O₃ and CNC, this value is approximately 1.07. For TiO₂ nanofluid, the TPE value even reached below 1, which indicates the inappropriateness of using this nanofluid in automotive radiator cooling applications at low volume fractions. The TPE parameter at 0.9% volume fraction and 10 g/s flow rate for Al₂O₃/CNC and Al₂O₃/TiO₂ hybrid nanofluids is 1.5 and 1.42, respectively, while for simple Al₂O₃, CNC and TiO₂ nanofluids it is 1.30, 1.32 and 1.09, respectively.

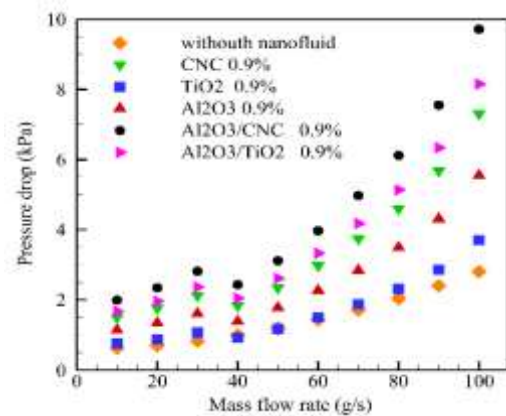


Figure 2: Pressure drop increase value for different nanofluids

These values are the highest TPE values. For TiO₂ nanofluid, at mass flow rates higher than 10 g/s, the TPE value approaches one even at a volume fraction of 0.9%, indicating the low effectiveness of this nanoparticle.

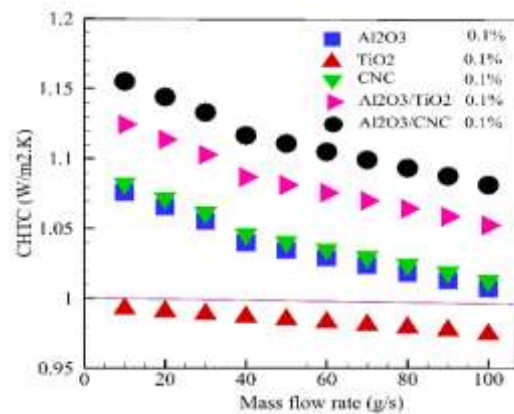


Figure 3: Thermal performance coefficient for 0.1% volume fraction

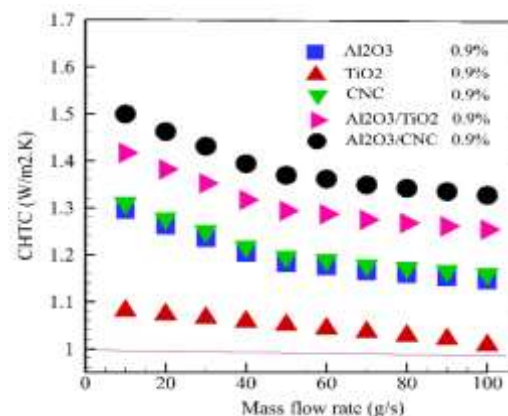


Figure 4: Thermal performance coefficient for 0.9% volume fraction

4- Conclusion

In the present work, a performance comparison was made on simple and hybrid nanofluids in increasing the cooling rate of an automobile radiator. Simple nanofluids include Al₂O₃, CNC, and TiO₂, and hybrid nanofluids include Al₂O₃/CNC and Al₂O₃/TiO₂. The flow rate of hot water entering the radiator is in the range of 10 to 100 g/s, its temperature is 45 Celsius, and the temperature of the radiator cooling air is 30 Celsius. The hydrodynamic-thermal simulation of the radiator was performed using ANSYS Fluent software. The results showed that hybrid nanofluids, despite increasing the heat transfer coefficient (CHTC) compared to simple nanofluids, also increase the pressure drop rate of the system. By examining the thermal performance coefficient (TPE) parameter, it was observed that hybrid nanofluids including Al₂O₃/CNC and Al₂O₃/TiO₂ had better performance than simple nanofluids including Al₂O₃, CNC and TiO₂, so that the highest thermal performance coefficient (TPE) for hybrid nanofluids Al₂O₃/CNC and Al₂O₃/TiO₂ was 1.5 and 1.42, respectively, while for simple nanofluids Al₂O₃, CNC and TiO₂ it was 1.30, 1.32 and 1.09, respectively. The results showed that TiO₂ nanofluid has a low effect on increasing the thermal performance of the radiator.

5- References

- [1] H. W. Xian, N. A. C. Sidik, and R. Saidur, "Hybrid nanocoolant for enhanced heat transfer performance in vehicle cooling system," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 133, p. 105922, Apr. 2022. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105922](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105922)
- [2] R. Cong, Y. Ozaki, B. S. Machado, and P. K. Das, "Constructal Design of a Rectangular Fin in a Mixed Convective Confined Environment," *Inventions*, vol. 3, no. 2, Jun. 2018. [Online]. Available: doi : [10.3390/inventions3020027](https://doi.org/10.3390/inventions3020027)
- [3] K. Ting, A. K. Mozumder, and P. K. Das, "Effect of surface roughness on heat transfer and entropy generation of mixed convection in nanofluid," *Phys. Fluids*, vol. 31, no. 9, 2019. [Online]. Available: doi: [10.1063/1.5111104](https://doi.org/10.1063/1.5111104)
- [4] J. Philip, P. D. Shima, and B. Raj, "Evidence for enhanced thermal conduction through percolating structures in nanofluids," *Nanotechnology*, vol. 19, no. 30, p. 305706, Jul. 2008. [Online]. Available: doi: [10.1088/0957-4484/19/30/305706](https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/30/305706)
- [5] M. Afrand, D. Toghraie, and B. Ruhani, "Effects of temperature and nanoparticles concentration on rheological behavior of Fe₃O₄-Ag/EG hybrid nanofluid: An experimental study," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 77, pp. 38–44, Oct. 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.expthermflusci.2016.04.007](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.04.007)
- [6] M. Bahrami, M. Akbari, A. Karimipour, and M. Afrand, "An experimental study on rheological behavior of hybrid nanofluids made of iron and copper oxide in a binary mixture of water and ethylene glycol: Non-Newtonian behavior," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 79, pp. 231–237, Dec. 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.expthermflusci.2016.07.015](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.07.015)
- [7] N. Ahammed, L. G. Asirvatham, and S. Wongwises, "Entropy generation analysis of graphene–alumina hybrid nanofluid in multiport minichannel heat exchanger coupled with thermoelectric cooler," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 103, pp. 1084–1097, Dec. 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.070](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.070)
- [8] H. W. Xian, N. A. C. Sidik, and G. Najafi, "Recent state of nanofluid in automobile cooling systems," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 135, no. 2, pp. 981–1008, Jan. 2019. [Online]. Available: doi: [10.1007/s10973-018-7477-3](https://doi.org/10.1007/s10973-018-7477-3)
- [9] M. U. Sajid and H. M. Ali, "Recent advances in application of nanofluids in heat transfer devices: A critical review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 103, pp. 556–592, Apr. 2019. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.rser.2018.12.057](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.057)



شبیه‌سازی عددی اثر نانوسیال ساده و هیبریدی بر عملکرد خنک‌کاری رادیاتور اتومبیل

رضا بابایی^{۱*}، محمد مهدی توپسرکانی^۲، میلاد خان‌چوپان^۳، علیرضا افرادی^۴

۱- دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران، تهران، ایران.

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده‌گان فنی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳- کارشناسی، گروه فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۴- دکتری، گروه مهندسی معدن و زمین‌شناسی، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران.

چکیده

کلمات کلیدی

نانوسیال

هیبرید

رادیاتور اتومبیل

TPE

افزایش انتقال حرارت.

در مقاله حاضر اثر نانوسیال‌های ساده شامل Al_2O_3 ، CNC و TiO_2 و نانوسیال‌های هیبریدی شامل Al_2O_3/CNC و Al_2O_3/TiO_2 بر روی نرخ افزایش خنک‌کاری رادیاتور اتومبیل بررسی شد. شبکه‌بندی توسط نرم‌افزار گمبیت و شبیه‌سازی هیدرودینامیک-حرارتی توسط نرم‌افزار انسیس فلونت انجام شد. دبی محلول نانوسیال در بازه 10 g/s تا 100 g/s ، درصد حجمی نانوسیال بین $0/1$ و $0/9$ درصد، دمای دبی سیال داغ 45 سلسیوس و دمای هوای خنک‌کن رادیاتور 30 سلسیوس می‌باشد. نتایج نشان داد که نانوسیال‌های هیبریدی با وجود افزایش میزان ضریب انتقال حرارت (CHTC) سبب افزایش افت فشار سیستم نیز می‌شوند. در $0/9$ درصد از نانوسیال، مقادیر ضریب عملکرد حرارتی (TPE) برای نانوسیال‌های هیبریدی شامل Al_2O_3/CNC و Al_2O_3/TiO_2 (به ترتیب $1/5$ و $1/42$) بوده که نشان دهنده عملکرد بهتر نسبت به نانوسیال‌های ساده شامل Al_2O_3 ، CNC و TiO_2 (به ترتیب $1/30$ ، $1/32$ و $1/09$) است. همچنین مشاهده شد که نانوسیال TiO_2 اثرگذاری پایینی در افزایش عملکرد حرارتی رادیاتور در درصدهای مختلف نانوسیال ($0/1$ و $0/9$) دارد.

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۰۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶

*نویسنده مسئول

رضا بابایی

ایمیل

r.babaei@modares.ac.ir

۱- مقدمه

استفاده می‌کنند [۲]. افزایش نرخ انتقال حرارت سیال پایه یکی از مسائل اولیه برای علم و فناوری فعلی است [۳]. بهبود عملکرد خنک‌کاری شامل سه روش خنک‌کننده غیرفعال، خنک‌کننده فعال و ترکیبی از این دو می‌باشند [۴]. روش‌های فعال بیشتر مستلزم استفاده از نیروی خارجی برای بهبود توانایی‌های خنک‌کننده مانند نصب یک فن خنک‌کننده برای از بین بردن گرمای اضافی یا استفاده از ضد یخ (آب و ضد یخ) می‌باشد [۵]. با این حال، جهت حفظ اندازه سیستم، مساحت یا قدرت ورودی یکسان، این راه‌حل دارای محدودیت‌هایی هستند. افزودن نانوذرات به سیال پایه، پتانسیل بالایی برای افزایش اثربخشی تکنیک خنک‌سازی دارد [۶] [۷]. سیالات این دسته که به‌عنوان نانوسیال شناخته می‌شوند که در آن سوسپانسیون کلوتیدی با نانوذرات جامد (اندازه 100 نانومتر) به سیال پایه می‌شوند. بنابراین

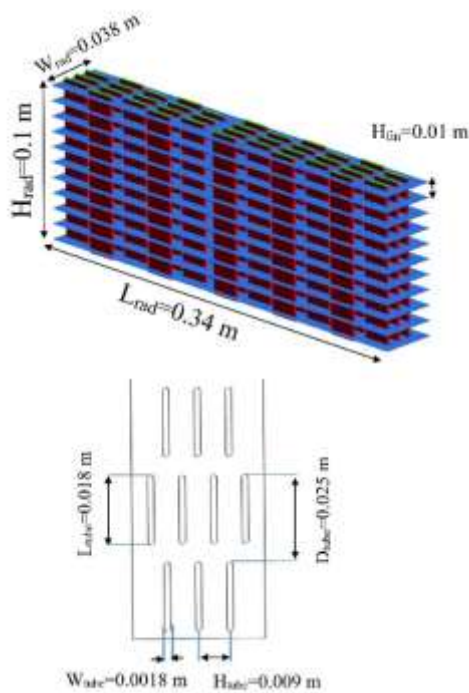
خنک‌کاری موتور بزرگترین چالش فنی در صنایع تولیدی، برقی و خودروسازی است. خراب شدن پمپ آب و فرسوده شدن رادیاتور به همراه سیال خنک‌کننده ناکارآمد از عوامل اصلی گرم شدن بیش‌ازحد موتور اتومبیل هستند. گرمای بیش‌ازحد می‌تواند باعث آسیب به بخش‌های مختلف خودرو، از جمله تاب برداشتن سرسیلندر، اعوجاج شیلنگ رادیاتور، و همچنین خرابی خودرو شود [۱]. دمای کارکرد موتور باید تحت کنترل باشد تا از مشکلات مکانیکی در مواد ناشی از دمای کار بالا جلوگیری شود که باعث می‌شود مصرف سوخت بهینه و درعین حال از سرد شدن بیش‌ازحد جلوگیری شود. بسیاری از سیستم‌های خنک‌کننده صنعتی، بخش‌های خودرو، تهویه مطبوع، تولید برق و فرآیندهای شیمیایی از خنک‌کننده‌های معمولی مانند آب، روغن‌های موتور، روغن معدنی و اتیلن گلیکول به‌عنوان سیال پایه



نانوسیال‌های هیبریدی MWCNT-CuO/ آب برای توسعه روش جدیدی برای تعیین هدایت حرارتی استفاده کرد. مشاهده شد که در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد و درصد حجمی نانوذرات ۰/۶٪، هدایت حرارتی نانوسیال ۳۰/۳۸٪ افزایش یافت. جمشد و همکاران [۱۶] ویژگی‌های انتقال حرارتی نانوسیال‌های ترکیبی شامل نانوذرات مس و دی‌اکسید زیرکونیوم مشتق‌شده از روغن موتور (EO) را بررسی کردند. تجزیه و تحلیل عددی نشان داد که در مقایسه با نانوسیالات Cu-EO، نانوسیالات هیبریدی ZrO₂Cu/EO نرخ انتقال حرارت بالاتری دارند. در مقایسه با خنک‌کننده‌های نانوسیال معمولی، دمای نانوسیال مبتنی بر نانوذرات هیبریدی سریعتر افزایش می‌یابد. کومار و همکاران [۱۷] دو نوع مختلف از نانوسیال ترکیبی را بر روی یک رادیاتور خنک‌کننده هوا مورد بررسی قرار دادند که شامل آلومینا-گرافن (GNP) و آلومینا-نانولوله کربنی (CNT) بودند. نتایج نشان داد GNP که به میزان ۲/۹۴ درصد بهتر از خنک‌کننده نانولوله کربنی (CNT) است. از استفاده از نانوسیال هیبریدی در کاربردهای مختلف می‌توان به جدول ۱ اشاره نمود. شبانی و همکاران [۲۷] به بررسی تجربی و عددی انتقال حرارت در رادیاتور اتومبیل پرآید پرداختند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که اختلاف دمای ورودی و خروجی در موتور در شرایط جابه‌جایی آزاد ۱۳ سلسیوس و در شرایط اجباری ۱/۵ سلسیوس است. رحمتی‌نژاد و همکاران [۲۸] با بررسی عملکرد حرارتی یک رادیاتور نشان دادند که راندمان رادیاتور با کاهش ۲۵ درصدی طول و افزایش تعداد فین‌ها از ۳۸۵ به ۴۳۷ ثابت خواهد ماند. فواصل فین‌ها به وسیله الگوریتم ژنتیک بهینه شد. رحمتی‌نژاد و همکاران [۲۹] به بررسی اثر استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم بر روی مبدل گرمایی موتور پرداختند. نتایج نشان داد افزایش نانوسیال تا دبی ۲۱ لیتر بر دقیقه سبب افزایش ضریب انتقال حرارت شده و پس از آن کاهش ضریب انتقال حرارت را در پی خواهد داشت. در نانوذرات ۲٪ و دور تند فن میزان افزایش ضریب انتقال حرارت برای شارهای ۱۰، ۲۱ و ۳۲ لیتر بر دقیقه، شاهد افزایش تقریبی ۳٪، ۲۰٪ و ۱۶٪ بوده است. عملکرد حرارتی موتور M13NI با استفاده از نانوسیال AL₂O₃+H₂O در سیال پایه آب و اتیلن گلیکول توسط مرجع [۳۰] بررسی شد. نتایج نشان داد افزایش کسر حجمی سبب افزایش انتقال حرارت و افزایش افت فشار و همچنین کاهش پارامتر مریت (نسبت انتقال حرارت به قدرت پمپ) شد. رحمتی‌نژاد و همکاران [۳۱] به بررسی عملکرد رادیاتور تراکتور MF 285 با استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم در سیال

محققان جهت تقویت عملکرد حرارتی و سیستم‌های خنک‌کننده خودرو بر آن شدند تا بر مقایسه ویژگی‌های انتقال حرارت ذرات جامد با سیالات پایه تمرکز کنند. مطالعات مختلف نشان داده است که استفاده از نانوسیال‌ها در سیستم‌های خنک‌کننده خودرو می‌تواند به، به‌حداقل رساندن اندازه و وزن رادیاتور کمک کند و درعین حال راندمان سیستم را افزایش و مصرف سوخت را نیز کاهش دهد [۸]. در بیشتر کارها از ترکیبی از آب و اتیلن گلیکول (در نسبت‌های مختلف) در سیستم‌های خنک‌کننده خودرو استفاده می‌شود [۹]. گالهان و همکاران [۱۰] از نانوسیال آلومینا در خنک‌کاری رادیاتور اتومبیل و در شرایط جابه‌جایی اجباری (فن) استفاده نمودند. غلظت نانوسیال، سرعت جریان و دما به ترتیب ۰/۱ تا ۰/۴ درصد، ۲ تا ۵ لیتر بر دقیقه و دمای بین ۵۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد است. نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت در غلظت ۰/۴ درصد نانوذره اکسید آلومینیوم ۴۵/۸۷ درصد افزایش داشت. آرونکومار و همکاران [۱۱] عملکرد رادیاتورهای خودرو را با استفاده از EG و آب پر شده با نانوذرات مختل (Al₂O₃, MgO, TiO₂) به‌عنوان خنک‌کننده مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک حالت بهینه از نانوذرات (۰/۱۲٪ و ۰/۴٪) به نسبت ۸۰:۲۰ (EG/W) تعیین نمودند. ناوین و همکاران [۱۲] با تنظیم نرخ جریان در محدوده ۲-۸ لیتر بر دقیقه میزان انتقال حرارت رادیاتور (OHTC¹) را با استفاده از نانوسیال گرافن در سیال پایه (70 W:30 EG) به‌عنوان یک سیال خنک‌کننده مورد مطالعه قرار دادند و حدود ۶۵ درصد افزایش در نرخ انتقال حرارت را گزارش نمودند. با افزایش نرخ جریان، عدد ناسلت ۵۳/۴٪ افزایش می‌یابد. تیجانی و همکاران [۱۳] عملکرد حرارتی یک رادیاتور را با استفاده از نانوذرات CuO و Al₂O₃ در سیال پایه (50 W:50 EG) در ۰/۵، ۰/۱۵ و ۰/۳ درصد بررسی کردند. نتایج نشان داد که نانوسیال CuO در دبی ۶ لیتر بر دقیقه حداکثر انتقال حرارت را نشان می‌دهد. پالانیپان و همکاران [۱۴] ترکیبی از خاکستر از بسیاری از اجزاء (آلومینا، اکسید آهن، تیتانیا، منیزیم، سیلیس و اکسید کلسیم، اکسید سدیم، تری اکسید گوگرد و اکسید پتاسیم) به‌عنوان نانوسیال هیبریدی در مخلوطی از آب دی‌نویزه و اتیلن گلیکول (DI/EG) ترکیب کردند. یک موتور ۶ سیلندر IC و یک رادیاتور جریان متقاطع بخشی از چیدمان آن‌ها بود. در کار آن‌ها غلظت بهینه (۲ درصد حجمی) نانوسیال هیبریدی می‌تواند OHTC خنک‌کننده پایه را با توجه به محاسبات انرژی و انرژی افزایش دهد. زادخواست [۱۵] از

¹ Overall heat transfer coefficient



شکل ۱: شماتیک هندسه رادیاتور اتومبیل

جدول ۱: استفاده از نانوسیال هیبریدی در منابع مختلف

نتایج	کاربرد	کسر حجمی (%)	نانوسیال هیبریدی
افزایش ۱۵ درصدی عدد ناسلت	دستگاه الکترونیکی	۰/۳	Graphene nanoparticles/Al ₂ O ₃ /W [۱۸]
۸۰ درصد جذب انرژی خورشیدی	انرژی خورشیدی	۱/۰۲۵	Al ₂ O ₃ /Co ₃ O ₄ /W [۱۹]
۵۴ درصد افزایش انتقال حرارت	هیت پایپ	۱/۳۵	Fe ₃ O ₄ /CNTs/W [۲۰]
افزایش ۴۴ درصدی انتقال حرارت	هیت سینک مینی کانال	۰/۰۱	Al ₂ O ₃ /MWCNTs/W [۲۱]
جذب کامل انرژی خورشیدی	انرژی خورشیدی	۰/۰۳	MWCNTs/CopperOxide/W [۲۲]
افزایش ۲۶ درصدی انتقال حرارت	هیت سینک مینی فین	۱	Al ₂ O ₃ /Copper/W [۲۳]
افزایش ۱۵ درصدی انتقال حرارت	مبدل حرارتی	۰/۰۱	MWCNT/Al ₂ O ₃ /W [۲۴]
افزایش ۹۷ درصدی راندمان حرارتی	کلکتور خورشیدی	۰/۱	Silicon Carbide/MWCNT/EG [۲۵]
افزایش ۳۵ درصدی انتقال حرارت	مبدل حرارتی دابل پایپ	۴	Aluminum/Nitride/W [۲۶]

پایه آب-اتیلن گلیکول پرداختند. دمای سیال ورودی ۸۵ درجه سانتی گراد و دبی حجمی سیال خنک‌کننده ۳/۱۸ تا ۱۵/۰۸ لیتر بر دقیقه و سرعت فن ۳/۲ تا ۶/۴ متر بر ثانیه است. آن‌ها نشان دادند که در نانوسیال ۴ درصد میزان نرخ انتقال حرارت ۳۷ درصد و ضریب انتقال حرارت ۲۸ درصد افزایش می‌یابد.

مشاهده می‌گردد که در اکثر مطالعات انجام شده بر روی رادیاتور اتومبیل تمرکز بر روی اثر نانوسیال معمولی و به صورت آزمایشگاهی بوده و همچنین استفاده از نانوسیال هیبریدی برای رادیاتور به خصوص شبیه‌سازی عددی آن بسیار محدود است. در کار حاضر یک رادیاتور در ابعاد واقعی شبیه‌سازی شده و در ادامه اثر نانوسیال‌های ساده و هیبریدی مختلف بر روی عملکرد سیستم خنک‌کاری رادیاتور بررسی می‌شود. نوآوری کار حاضر استفاده همزمان نانوسیال معمولی و هیبریدی و مقایسه بین آن‌ها است.

۲- روش‌شناسی

۲-۱- تشریح سیستم

در کار حاضر اثر انواع نانوسیال هیبریدی بر روی عملکرد خنک‌کاری رادیاتور اتومبیل به صورت عددی بررسی می‌شود. ابتدا جهت صحت‌سنجی نتایج عددی از کار سینگ و همکاران [۳۲] استفاده می‌گردد. شکل ۱ هندسه رادیاتور فین‌دار را نشان می‌دهد. تعداد لوله‌ها ۳۹ عدد و تعداد فین‌ها ۱۰ عدد می‌باشد. دمای آب گرم ورودی به لوله‌ها ۴۵ درجه سلسیوس و دمای هوا ۳۰ سلسیوس و با سرعت ۳m/s است. دبی آب گرم ورودی به رادیاتور متغیر است و در بازه ۱۰g/s تا ۱۰۰g/s می‌باشد.

در کار حاضر سیال پایه آب داغ به‌عنوان سیال ورودی به رادیاتور اتومبیل و سیال پایه هوا به‌عنوان سیال خنک‌کننده رادیاتور اتومبیل است. در کار حاضر جهت افزایش انتقال حرارت به سیال آب نانوسیال (ساده و هیبریدی) اضافه شده تا میزان اثر آن بر روی عملکرد خنک‌کاری رادیاتور بررسی شود.

۲-۲- معادلات حاکم بر تئوری مسأله

در کار حاضر از نانوذرات ساده و هیبریدی شامل Al_2O_3 ، TiO_2 ، CNC ، $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ و $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CNC}$ در درصدهای حجمی ۰/۱ و ۰/۹ درصد استفاده می‌گردد (جدول ۲). خواص سیال پایه و نانوذرات (هیبریدی و ساده) شامل چگالی، لزجت، هدایت حرارتی و گرمای ویژه تابعی از دما می‌باشد. روابط (۱)، (۲)، (۳) و (۴) به ترتیب برای محاسبه دانسیته، گرمای ویژه، لزجت و هدایت حرارتی محلول نانوسیال ارائه می‌گردد [۹] [۱۶].

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

$$C_{p,nf} = \frac{\phi \rho_p C_{p,p} + (1 - \phi) \rho_f C_{p,f}}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f (123\phi^2 + 73\phi + 1) \quad (3)$$

$$K_{nf} = 0.25 \left[(3\phi - 1) K_p + (2 - 3\phi) + \sqrt{\Delta} \right] \quad (4)$$

$$\Delta = \left[(3\phi - 1) K_p + (2 - 3\phi) K_f \right]^2 + 8\lambda_p \cdot \lambda_b \quad (5)$$

در روابط بالا اندیس‌های f ، p و nf به ترتیب به سیال پایه، نانوذره و محلول نانوسیال اشاره دارد. مرجع [۳۳] خواص مربوط به محلول نانوسیال را در دمای ۴۵ سلسیوس ارائه نموده که در جدول ۲ آمده است. با محاسبه خواص محلول نانوسیال می‌توان معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی را بیان نمود:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_{nf} u_i) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{nf} u_i) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_{nf} u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_{nf} + \mu_t) \bar{S}_{ij} \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_{p,nf} T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho c_{p,nf} u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[K_{nf} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (8)$$

لزجت آشفتگی است و توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

مقادیر انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ اتلاف انرژی (ε) با توجه به مدل توربولانسی $k-\varepsilon$ Standard محاسبه می‌گردد. در روابط مذکور u_i سرعت، p فشار استاتیکی، T دمای استاتیکی و نرخ کرنش سیال است. مقدار ضریب انتقال حرارت (h) توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۳۴]:

$$h = \frac{\dot{m} C_p (T_{in} - T_{out})}{T_s - T_b} \quad (10)$$

$$T_b = \frac{(T_{in} + T_{out})}{2} \quad (11)$$

دمای متوسط سطح رادیاتور و دمای متوسط ورودی و خروجی آب داغ است. میزان عدد رینولدز ورودی (Re) و ضریب اصطکاک (f) توسط روابط زیر محاسبه می‌گردد [۳۴]:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (12)$$

$$f = \frac{2}{L/D} \frac{P}{\rho U^2} \quad (13)$$

جدول ۲: خواص محلول نانوسیال مورد استفاده در کار حاضر [۳۳]

نانوذره	درصد حجمی	دانسیته	گرمای ویژه	لزجت	هدایت حرارتی
	%	Kg/m ³	KJ/Kg.K	Pa.s	W/m.K
Al ₂ O ₃	۰/۱	۱۰۴۴	۳۸۴۴	۰/۰۰۴۰۶	۰/۵۳۵
	۰/۵	۱۰۴۸	۳۷۹۴	۰/۰۰۴۶۶	۰/۵۴۵
	۰/۹	۱۰۵۲	۳۷۳۸	۰/۰۰۵۱۱	۰/۵۴۹
TiO ₂	۰/۱	۱۰۸۲	۳۶۵۵	۰/۰۰۱۳۹	۰/۴۹۴
	۰/۵	۱۰۸۴	۳۵۴۴	۰/۰۰۱۷۶	۰/۵۰۶
	۰/۹	۱۰۸۸	۳۴۳۱	۰/۰۰۲۲۰	۰/۵۱۶
CNC	۰/۱	۱۰۲۷	۳۹۹۵	۰/۰۰۲۶۵	۰/۵۲۶
	۰/۵	۱۰۳۴	۳۹۲۹	۰/۰۰۳۰۴	۰/۵۲۹
	۰/۹	۱۰۳۸	۳۸۸۲	۰/۰۰۳۶۶	۰/۵۳۹
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	۰/۱	۱۰۵۶	۳۶۷۵	۰/۰۰۵۶۶	۰/۵۵۶
	۰/۵	۱۰۵۹	۳۶۴۷	۰/۰۰۵۹۸	۰/۵۶۰
	۰/۹	۱۰۶۳	۳۶۳۴	۰/۰۰۶۳۱	۰/۵۶۳
Al ₂ O ₃ /CNC	۰/۱	۱۰۶۶	۳۳۵۶	۰/۰۰۶۷۷	۰/۵۷۰
	۰/۵	۱۰۶۹	۳۳۰۰	۰/۰۰۷۷۷	۰/۵۸۰
	۰/۹	۱۰۷۲	۳۲۶۵	۰/۰۰۸۳۰	۰/۵۸۵

میزان عدد ناسلت توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$Nu = \frac{hD}{K_{nf}} \quad (14)$$

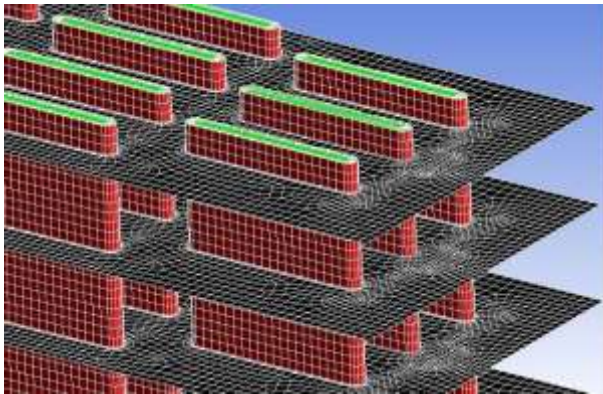
نانوسیال با وجود افزایش ضریب انتقال حرارت، سبب افزایش افت اصطکاک می‌شود. جهت بررسی اثربخشی نانوسیال در سیستم رادیاتور از پارامتری به نام ضریب عملکرد حرارتی (TPE¹) استفاده می‌گردد که توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۴].

$$TPE = \frac{Nu}{Nu_0} \frac{1}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (15)$$

اندیس 0 مربوط به معنای زمانی است که فقط سیال پایه وجود داشته و نانوسیال نداریم. مقدار ضریب عملکرد بیش از یک به معنای برتری میزان افزایش انتقال حرارت نسبت به افزایش افت فشار بوده و استفاده از نانوسیال را تایید می‌کند.

در مقاله حاضر هندسه رادیاتور اتومبیل سپس توسط نرم‌افزار گمبیت ۲۴.۳.۲ ترسیم و شبکه‌بندی می‌گردد. در ادامه جهت شبیه‌سازی هیدرودینامیکی-حرارتی از نرم‌افزار انسیس فلونت ۳

استفاده می‌شود. از الگوریتم سیمپل جهت تصحیح سرعت-فشار و جهت گسسته‌سازی معادلات از روش کوپیک^۴ استفاده می‌گردد. مقدار باقیمانده^۵ برای معادلات ۱۰^{-۶} و گام زمانی^۶ ۰/۰۵ ثانیه می‌باشد. در کار حاضر سعی شده است جهت شبکه‌بندی از شبکه ساختاریافته مربعی استفاده گردد تا دقت و سرعت حل افزایش یابد (شکل ۲). در کنار مرز دیواره‌ها نیز از روش لایه مرزی استفاده شده است که با استفاده از آن گرادیان‌های کمیت‌های مختلف (سرعت، دما و ...) به راحتی تسخیر^۷ و محاسبه شود. محلول نانوسیال با دبی جرمی مشخص (در بازه ۱۰ g/s تا ۱۰۰ g/s) و دمای ۴۵ سلسیوس وارد لوله‌های رادیاتور می‌شود. هوا نیز با سرعت ۳ m/s و دمای ۳۰ سلسیوس بر روی رادیاتور جریان داشته و با شرط فشار ثابت خارج می‌گردد.



شکل ۲: شبکه‌بندی هندسه رادیاتور اتومبیل

۳- استقلال از شبکه و اعتبارسنجی و صحت‌سنجی

جهت بررسی استقلال از شبکه از تعداد چهار شبکه به اندازه‌های حدود ۳۰۰/۰۰۰، ۷۰۰/۰۰۰، ۱/۱۰۰/۰۰ و ۱/۳۰۰/۰۰۰ سلول استفاده می‌گردد. با توجه به اینکه مورد مربوط به دبی جرمی ۱۰۰ g/s بیشترین دبی موجود در کار حاضر است، از این دبی در بررسی استقلال از شبکه استفاده شده و پارامتر ضریب انتقال حرارت (CHTC^۸) در آن مقایسه می‌گردد. شکل ۳ نشان می‌دهد که تغییرات ضریب انتقال حرارت در بازه ۱/۱۰۰/۰۰۰ و ۱/۳۰۰/۰۰۰ سلول اندک و زیر ۲ درصد بوده و بدین ترتیب تعداد شبکه ۱/۱۰۰/۰۰۰ سلول به‌عنوان تعداد شبکه نهایی جهت شبیه‌سازی استفاده می‌گردد.

⁶ Time step

⁷ Capture

⁸ convective heat transfer coefficient

¹ Thermal performance coefficient

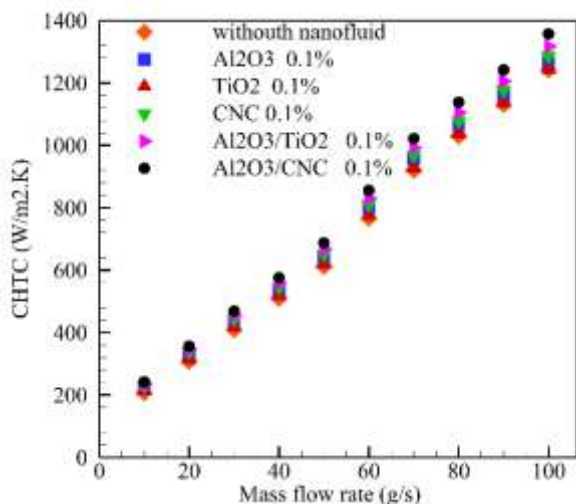
² Gambit 4.3.2

³ Ansys fluent 15

⁴ QUICK

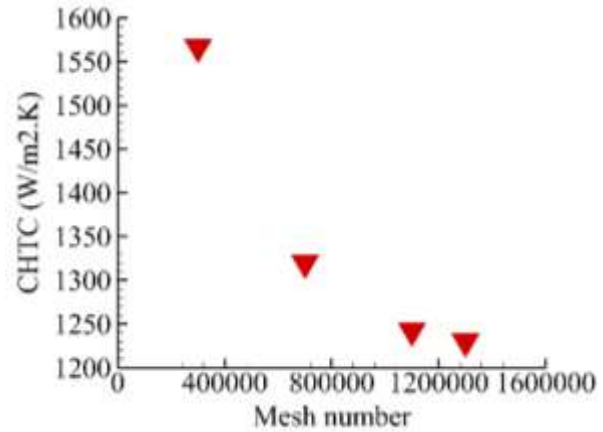
⁵ Residual

هدف کار حاضر بررسی اثر نانو سیال (هیبریدی و ساده) بر روی میزان افزایش انتقال حرارت و عملکرد دمایی آن است. ابتدا میزان ضریب انتقال حرارت برای انواع نانوسیال ساده و هیبریدی و در کسرهای حجمی مختلف بررسی می‌شود. شکل ۵ و شکل ۶ میزان ضریب انتقال حرارت را به ترتیب در کسر حجمی ۰/۱ درصد و ۰/۹ درصد برای انواع نانوذرات نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که در یک عدد رینولدز ثابت در همه نانوسیال‌ها میزان ضریب انتقال حرارت با افزایش نانوذرات افزایش یافته است. همچنین میزان افزایش ضریب انتقال حرارت برای کسر حجمی ۰/۹ نسبت به ۰/۱ قابل ملاحظه‌تر است. نانوسیال‌های هیبریدی Al_2O_3/CNC و Al_2O_3/TiO_2 نسبت به نانوذرات‌های ساده دیگر افزایش بیشتری در انتقال حرارت نشان می‌دهند. برای مقایسه دقیق‌تر مقدار نسبت ضریب انتقال حرارت که بیانگر میزان نسبت ضریب انتقال حرارت برای هر نانوسیال نسبت به ضریب انتقال حرارت در حالت پایه است، در شکل ۷ آمده است. به‌عنوان اولین نتیجه مشاهده می‌گردد که اثر نانوسیال در دبی‌های جرمی پایین بیشتر بوده و با افزایش دبی سیال از مقدار آن کاسته می‌شود. دلیل آن نیز این است که با افزایش دبی و افزایش سرعت سیال سهم سرعت سیال در افزایش ضریب انتقال حرارت به سهم افزایشی نانوسیال غلبه می‌کند. برای مثال میزان افزایش ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال هیبریدی Al_2O_3/CNC در دبی 10 g/s به میزان ۵۵٪ بوده، اما برای دبی 100 g/s به میزان ۳۶٪ می‌باشد. این مقادیر برای Al_2O_3/TiO_2 به ترتیب ۴۳٪ و ۲۷٪ است. این مقادیر بیشترین میزان افزایش ضریب انتقال حرارت می‌باشد.



شکل ۵: ضریب انتقال حرارت در کسر حجمی ۰/۱ درصد

نانوذرات ساده Al_2O_3 و CNC رفتاری شبیه به هم دارند به طوری که مقادیر افزایشی در دبی کمینه و بیشینه برای Al_2O_3 به ترتیب ۳۳٪ و ۱۸٪ و برای CNC به ترتیب ۳۶٪ و ۲۰٪ است. نانوسیال TiO_2 از میان نانوسیال‌های ساده بدترین عملکرد را داشته به طوری که در مقدار حجمی ۹ درصد



شکل ۳: بررسی استقلال از شبکه

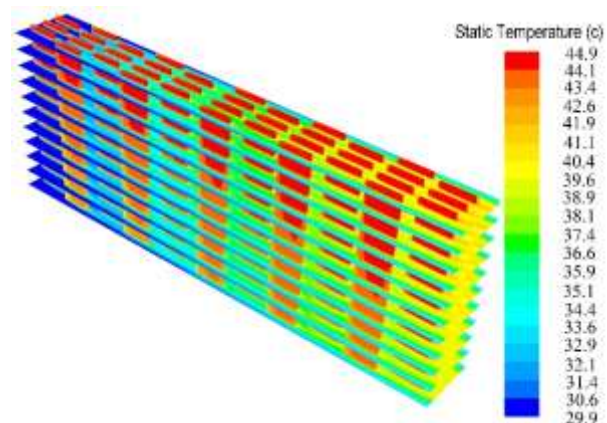
در ادامه اعتبارسنجی نتایج در بازه 10 g/s تا 100 g/s و با مقایسه پارامتر ضریب انتقال حرارت در مرجع [۳۲] می‌پذیرد. جدول ۳ نشان می‌دهد که بیشترین میزان خطا در کار حاضر ۹ درصد بوده و بنابراین می‌توان به نتایج شبیه‌سازی اعتماد نمود.

جدول ۳: اعتبارسنجی نتایج

خطا (%)	h (W/m ² .K) (کار حاضر)	h (W/m ² .K) [۳۲]	(g/s)m
۸	۱۲۴۳/۱۳	۱۳۵۰	۱۰
۹	۶۱۲/۴۴	۶۷۰	۵۰
۳/۵	۲۰۷/۱۵	۲۰۰	۱۰۰

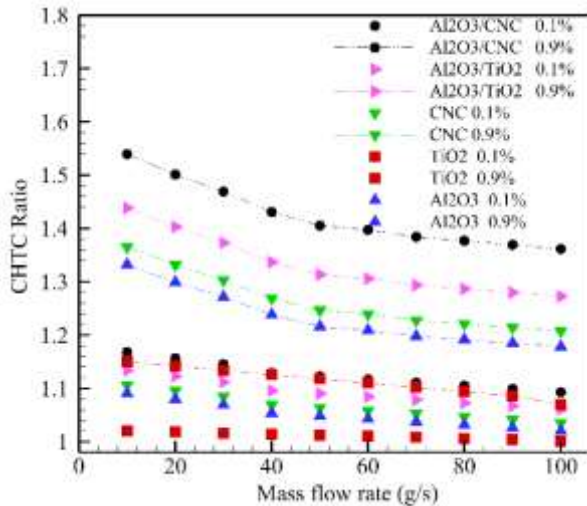
۴- نتایج و بحث

شکل ۴ کانتور دما را برای هندسه رادیاتور نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که سیال خنک‌کننده (هوا) با دمای حدود 30°C سلسیوس به تیوب و فین‌های رادیاتور برخورد کرده و با دریافت حرارت رادیاتور خارج می‌گردد. دمای آب داغ ورودی به تیوب نیز 45°C درجه بوده که مقداری از این حرارت به سیال هوا داده می‌شود.

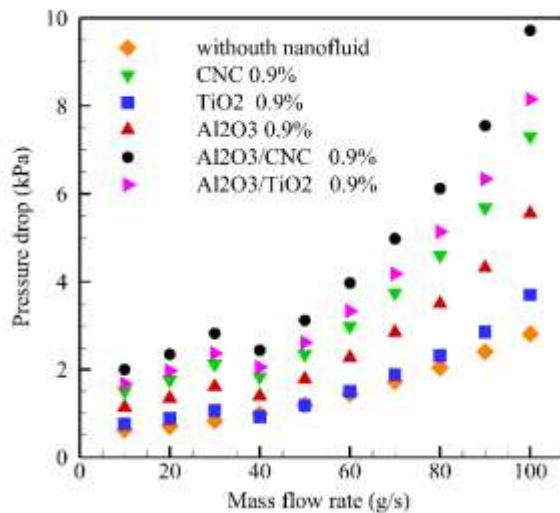


شکل ۴: کانتور دما در هندسه رادیاتور

برای نانوسیال TiO_2 مقدار TPE حتی به زیر مقدار ۱ رسیده که آن نشان دهنده نامناسب بودن استفاده از این نانوسیال در کاربرد خنک‌کاری رادیاتور اتومبیل در درصدهای حجمی پایین است. میزان پارامتر TPE در کسر حجمی ۰/۹ درصد و دبی ۱۰ g/s برای نانوسیال-های هیبریدی Al_2O_3/CNC و Al_2O_3/TiO_2 به ترتیب ۱.۵ و ۱.۴۲ می‌باشد، درحالی‌که برای نانوسیال‌های ساده Al_2O_3 ، CNC و TiO_2 به ترتیب ۱/۳۰، ۱/۳۲ و ۱/۰۹ است

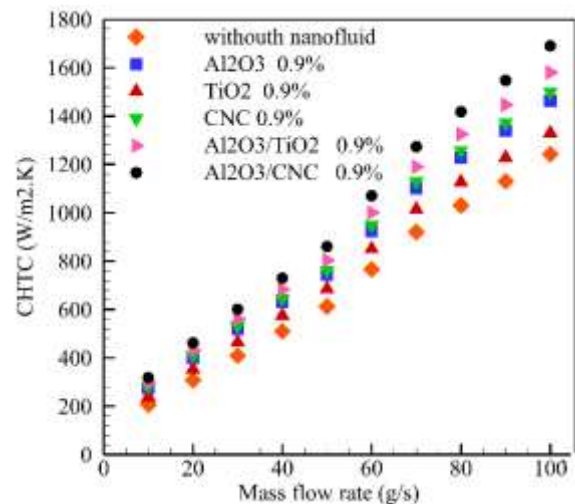


شکل ۷: نسبت ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال مختلف



شکل ۸: مقدار افزایش افت فشار برای نانوسیال مختلف

میزان افزایش آن در دبی کمینه و بیشینه به ترتیب ۱۵٪ و ۷٪ می‌باشد. اضافه کردن نانوسیال به سیال پایه سبب افزایش لزجت محلول نانوسیال می‌شود که آن سبب افزایش افت فشار آن می‌شود. شکل ۸ مقادیر افزایش افت فشار را برای محلول نانوسیال‌های مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افت فشار نسبت به دبی سیال تقریباً یک تابع درجه ۲ است و مقادیر آن با افزایش دبی سیال افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌گردد که محلول نانوسیال Al_2O_3/CNC بیشترین افت فشار و نانوسیال TiO_2 کمترین افت فشار را در مجموعه تیوب‌های رادیاتور تولید می‌کند. این یک رفتار متناقض با مقادیر افزایش انتقال حرارت است، زیرا در مبحث انتقال حرارت نشان داده شد که بهترین عملکرد مربوط به Al_2O_3/CNC و بدترین عملکرد مربوط به TiO_2 بوده است. بنابراین جهت بررسی میزان تاثیر نانوسیال نیاز به بررسی پارامتر عملکرد حرارتی (رابطه (۱۵)) داریم. به همین دلیل پارامتر ضریب عملکرد حرارتی (TPE) که بیانگر قدرت افزایش ضریب انتقال حرارت نسبت به میزان افزایش افت فشار است، بررسی می‌شود. عدد یک برای این پارامتر نشان دهنده برابری میزان افزایش انتقال حرارت و افزایش افت فشار بوده و بنابراین جهت توجیه پذیری نوع و میزان نانوسیال این مقدار باید بزرگتر از یک باشد. شکل ۹ و شکل ۱۰ ضریب عملکرد حرارتی (TPE) را در درصدهای حجمی ۰/۱ و ۰/۹ درصد نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که مقدار ضریب عملکرد حرارتی در دبی‌های پایین بیشتر بوده و با افزایش دبی سیال پایه کاهش می‌یابد. دلیل آن نیز این است که در دبی‌های بالا سهم انتقال حرارت جابه‌جایی سیال نسبت به عملکرد خواص نانوسیال برتری پیدا کرده و عملاً اثر نانوسیال در بهبود افزایش نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد. مشاهده می‌گردد که نانوسیال‌های هیبریدی Al_2O_3/CNC و Al_2O_3/TiO_2 عملکرد بهتری نسبت به نانوسیال‌های ساده داشتند به طوری که در کسر حجمی ۰/۱ درصد و دبی ۱۰ g/s میزان پارامتر TPE برای این دو نانوسیال هیبریدی به ترتیب ۱/۱۶ و ۱/۱۲ است. در حالی‌که برای نانوسیال‌های ساده Al_2O_3 و CNC این مقدار تقریباً ۱/۰۷ می‌باشد.



شکل ۶: ضریب انتقال حرارت در کسر حجمی ۰/۹ درصد

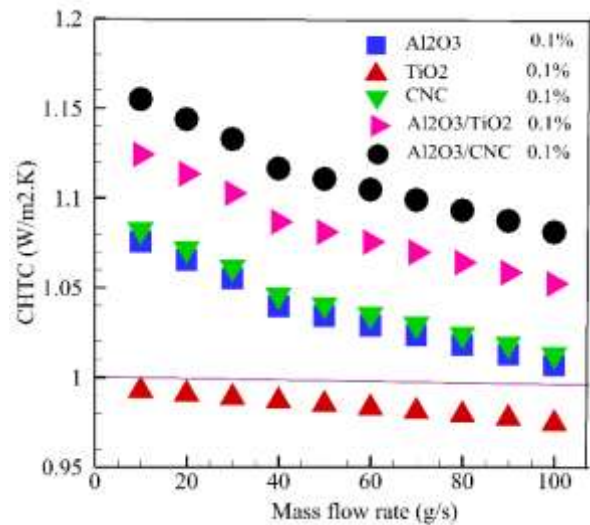
سلسیوس و میزان دمای هوای خنک‌کن رادیاتور ۳۰ سلسیوس است. شبیه‌سازی هیدرودینامیکی-حرارتی رادیاتور توسط نرم‌افزار انسیس فلونت انجام شده است. نتایج نشان داد که نانوسیال‌های هیبریدی علی‌رغم افزایش میزان ضریب انتقال حرارت (CHTC) نسبت به نانوسیال‌های ساده، سبب افزایش نرخ افت فشار سیستم نیز می‌گردند. با بررسی پارامتر ضریب عملکرد حرارتی (TPE) مشاهده شد که نانوسیال‌های هیبریدی شامل Al_2O_3/CNC و Al_2O_3/TiO_2 عملکرد بهتری نسبت به نانوسیال‌های ساده شامل Al_2O_3 ، CNC و TiO_2 داشتند، به طوریکه بیشترین میزان ضریب عملکرد حرارتی (TPE) برای نانوسیال‌های هیبریدی Al_2O_3/CNC و Al_2O_3/TiO_2 به ترتیب ۱/۵ و ۱/۴۲ و درحالی‌که برای نانوسیال‌های ساده Al_2O_3 ، CNC و TiO_2 به ترتیب ۱/۳۰، ۱/۳۲ و ۱/۰۹ بوده است. نتایج نشان داد که برای نانوسیال TiO_2 اثرگذاری پایینی در افزایش عملکرد حرارتی رادیاتور دارد.

۶- فهرست علائم

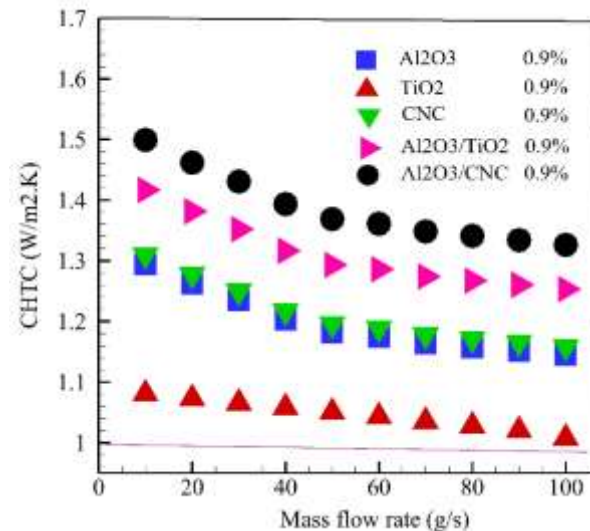
علائم انگلیسی	
TPE	ضریب عملکرد حرارتی
C_p	حرارت مخصوص ($kJ/kg.K$)
k	هدایت حرارتی ($kJ/m^2.K$)
\dot{m}	نرخ جریان جرمی (kg/s)
T	دما (K)
u	سرعت (m/s)
k	انرژی جنبشی اغتشاشی ($kJ/kg.K$)
علائم یونانی	
ρ	دانسیتته سیال (kg/m^3)
μ	لزجت ($Pa.s$)
ε	انرژی استهلاک اغتشاشی ($kJ/kg.K$)
زیرنویس‌ها	
f	سیال پایه
p	نانوذره
nf	محللول نانوسیال
in	ورودی
out	خروجی
t	اغتشاش

۷- منابع

[1] H. W. Xian, N. A. C. Sidik, and R. Saidur, "Hybrid nanocoolant for enhanced heat transfer performance in vehicle cooling system," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 133, p. 105922, Apr. 2022. [Online]. Available: doi : [10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105922](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105922)



شکل ۹: ضریب عملکرد حرارتی برای درصد حجمی ۰/۱ درصد



شکل ۱۰: ضریب عملکرد حرارتی برای درصد حجمی ۰/۹ درصد

این مقادیر بیشترین مقادیر TPE می‌باشند. برای نانوسیال TiO_2 در مقادیر دبی جرمی بالاتر از $10 g/s$ مقدار TPE حتی در کسر حجمی ۰/۹ درصد به مقدار یک نزدیک شده که نشان دهنده اثرگذاری پایین این نانوذره است.

۵- نتیجه‌گیری

در کار حاضر یک مقایسه عملکردی بر روی نانوسیال‌های ساده و هیبریدی در افزایش نرخ خنک‌کاری رادیاتور اتومبیل انجام شد. نانوسیال‌های ساده شامل Al_2O_3 ، CNC و TiO_2 و نانوسیال‌های هیبریدی شامل Al_2O_3/CNC و Al_2O_3/TiO_2 هستند. دبی آب داغ ورودی به رادیاتور در محدوده $10 g/s$ تا $100 g/s$ و دمای آن 45

103, pp. 556–592, Apr. 2019. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.rser.2018.12.057](https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.057)

[10] S. P. C. Amit Gulhane, "Experimental investigation of convective heat transfer coefficient of Al₂O₃/water nanofluid at lower concentrations in a car radiator," *Heat Transf.*, vol. 46, pp. 1119–1129, Apr. 2017. [Online]. Available: doi: [10.1002/htj.21264](https://doi.org/10.1002/htj.21264)

S. S. Hojjat, A. Sarlak, and A. A. Ranjbar, "Performance evaluation of a car radiator using Al₂O₃ nanofluid and comparison with numerical methods," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 31, pp. 163–170, Jan. 2017, doi: [10.1007/s12206-016-1206-y](https://doi.org/10.1007/s12206-016-1206-y).

[12] M. N. Esfahani, B. Ghasemi, and M. Afrand, "A new hybrid nanofluid based on Ag–MgO/water: Synthesis, thermophysical properties and heat transfer performance evaluation," *J. Mol. Liq.*, vol. 253, pp. 217–228, Mar. 2018, doi: [10.1016/j.molliq.2017.11.063](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.11.063).

[13] K. A. Hamid, W. H. Azmi, M. F. Nabil, R. Mamat, and K. V. Sharma, "Experimental investigation of thermal conductivity and dynamic viscosity on nanoparticle mixture ratios of TiO₂–SiO₂ nanofluids," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 76, pp. 110–120, Jan. 2016, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.002](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.002).

[14] R. Khedkar, N. Khedkar, R. Sonawane, M. Bhave, and S. Wagh, "Thermal performance of automobile radiator using CNT–water nanofluids," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 8, pp. 7701–7709, Sep. 2017, doi: [10.1016/j.matpr.2017.07.104](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.104).

[15] A. Kumar, A. Sharma, and S. Kumar, "Experimental analysis of CuO and Al₂O₃-based nanofluids in automotive radiator using Taguchi approach," *Mater. Today Proc.*, vol. 21, pp. 1680–1685, 2020, doi: [10.1016/j.matpr.2019.11.261](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.261).

[16] M. F. Nabil, W. H. Azmi, K. A. Hamid, R. Mamat, and M. Yusof, "Experimental study on the thermal conductivity and dynamic viscosity of TiO₂-SiO₂ nanofluids in water: Ethylene glycol mixture," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 124, pp. 1361–1376, Jan. 2018, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.105](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.105).

[17] M. Afrand, A. Toghraie, and M. Sina Nia, "Thermal conductivity of hybrid nanofluids: A

[2] R. Cong, Y. Ozaki, B. S. Machado, and P. K. Das, "Constructal Design of a Rectangular Fin in a Mixed Convective Confined Environment," *Inventions*, vol. 3, no. 2, Jun. 2018. [Online]. Available: doi: [10.3390/inventions3020027](https://doi.org/10.3390/inventions3020027)

[3] K. Ting, A. K. Mozumder, and P. K. Das, "Effect of surface roughness on heat transfer and entropy generation of mixed convection in nanofluid," *Phys. Fluids*, vol. 31, no. 9, 2019. [Online]. Available: doi: [org/10.1063/1.5111104](https://doi.org/10.1063/1.5111104)

[4] J. Philip, P. D. Shima, and B. Raj, "Evidence for enhanced thermal conduction through percolating structures in nanofluids," *Nanotechnology*, vol. 19, no. 30, p. 305706, Jul. 2008. [Online]. Available: doi: [10.1088/0957-4484/19/30/305706](https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/30/305706)

[5] M. Afrand, D. Toghraie, and B. Ruhani, "Effects of temperature and nanoparticles concentration on rheological behavior of Fe₃O₄–Ag/EG hybrid nanofluid: An experimental study," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 77, pp. 38–44, Oct. 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.expthermflusci.2016.04.007](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.04.007)

[6] M. Bahrami, M. Akbari, A. Karimipour, and M. Afrand, "An experimental study on rheological behavior of hybrid nanofluids made of iron and copper oxide in a binary mixture of water and ethylene glycol: Non-Newtonian behavior," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 79, pp. 231–237, Dec. 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.expthermflusci.2016.07.015](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.07.015)

[7] N. Ahammed, L. G. Asirvatham, and S. Wongwises, "Entropy generation analysis of graphene–alumina hybrid nanofluid in multiport minichannel heat exchanger coupled with thermoelectric cooler," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 103, pp. 1084–1097, Dec. 2016. [Online]. Available: doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.070](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.070)

[8] H. W. Xian, N. A. C. Sidik, and G. Najafi, "Recent state of nanofluid in automobile cooling systems," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 135, no. 2, pp. 981–1008, Jan. 2019. [Online]. Available: doi: [10.1007/s10973-018-7477-3](https://doi.org/10.1007/s10973-018-7477-3)

[9] M. U. Sajid and H. M. Ali, "Recent advances in application of nanofluids in heat transfer devices: A critical review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol.

- for the direct absorption solar collector (DASC) application," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 206, p. 110323, Mar. 2020, doi: [10.1016/j.solmat.2019.110323](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110323).
- [26] A. M. Hussein, "Thermal performance and thermal properties of hybrid nanofluid laminar flow in a double pipe heat exchanger," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 88, pp. 37–45, Nov. 2017, doi: [10.1016/j.expthermflusci.2017.05.015](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.05.015).
- [27] F. Shabani, A. Khosravi Farsani, and B. Asadi Boroujeni, "Experimental solution and numerical simulation of flow and heat transfer in car radiators in forced and natural flows," *Karafan Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 71–95, 2022, doi: [10.48301/kssa.2022.336734.2061](https://doi.org/10.48301/kssa.2022.336734.2061). (in Persian)
- [28] B. Rahmatinejad, M. Abbasgholipour, and B. Mohammadi Alasti, "Redesign of engine radiator based on number of optimal fans using a genetic algorithm," *Karafan Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 99–118, 2021, doi: [10.48301/kssa.2021.128398](https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128398). (in Persian)
- [29] B. Rahmatinejad, H. Rahimi Asiabaraki, F. Azimpour Shishevan, and M. A. Mohtadi Bonab, "Experimental analysis of the effect of using aluminum oxide nanofluid in improving the heat transfer of XU7 engine radiator," *The Journal of Engine Research*, vol. 70, no. 2, pp. 66–79, 2023, doi: [10.22034/er.2023.2011671.1015](https://doi.org/10.22034/er.2023.2011671.1015). (in Persian)
- [30] B. Rahmatinejad, H. Rahimi Asiabaraki, and F. Azimpour Shishevan, "Investigation of the effect of AL₂O₃ nanofluid in M13NI engine cooling system," *The Journal of Engine Research*, vol. 70, no. 1, pp. 47–65, 2023, doi: [10.22034/er.2023.1975318.0](https://doi.org/10.22034/er.2023.1975318.0). (in Persian)
- [31] B. Rahmatinejad, M. Abbasgholipour, and B. Mohammadi Alasti, "Experimental evaluation of heat transfer of MF 285 tractor radiator, using nanofluid AL₂O₃+Water," *J. Agric. Mach.*, vol. 12, no. 3, pp. 281–299, 2022, [https://doi: 10.22067/jam.2020.58870.0](https://doi.org/10.22067/jam.2020.58870.0). (in Persian)
- [32] D. G. Charyulu, G. Singh, and J. K. Sharma, "Performance evaluation of a radiator in a diesel engine—a case study," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 19, no. 6, pp. 625–639, Jun. 1999, doi: [10.1016/S1359-4311\(98\)00064-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(98)00064-7).
- review," *J. Mol. Liq.*, vol. 265, pp. 271–288, Jan. 2018, doi: [10.1016/j.molliq.2018.05.029](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.029).
- [18] A. A. Ranjbar, A. Sarlak, and S. S. Hojjat, "Numerical study of nanofluid effect on automotive radiator performance," *Iranian Journal of Mechanical Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 53–63, 2016. (in Persian)
- [19] A. Akbari, A. Ashjaee, and M. Hormozi, "Experimental investigation of the heat transfer performance of car radiator using ZnO/EG–water nanofluid," *Heat Mass Transf.*, vol. 53, pp. 1835–1842, May 2017, doi: [10.1007/s00231-017-1940-2](https://doi.org/10.1007/s00231-017-1940-2).
- [20] A. Zeinali Heris, S. Ghaffari, and M. M. Mahyari, "Experimental investigation of forced convective heat transfer of a hybrid nanofluid in a car radiator," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 57, pp. 40–47, Feb. 2014, doi: [10.1016/j.expthermflusci.2014.05.006](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.05.006).
- [21] V. Kumar and J. Sarkar, "Experimental hydrothermal behavior of hybrid nanofluid for various particle ratios and comparison with other fluids in minichannel heat sink," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 110, p. 104397, Jan. 2020, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104397](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104397).
- [22] J. Qu, R. Zhang, Z. Wang, and Q. Wang, "Photo-thermal conversion properties of hybrid CuO-MWCNT/H₂O nanofluids for direct solar thermal energy harvest," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 147, pp. 390–398, Jan. 2019, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2018.10.094](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.094).
- [23] T. Ambreen, A. Saleem, H. M. Ali, S. A. Shehzad, and C. W. Park, "Performance analysis of hybrid nanofluid in a heat sink equipped with sharp and streamlined micro pin-fins," *Powder Technol.*, vol. 355, pp. 552–563, Oct. 2019, doi: [10.1016/j.powtec.2019.07.087](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.087).
- [24] A. Bhattad, J. Sarkar, and P. Ghosh, "Experimentation on effect of particle ratio on hydrothermal performance of plate heat exchanger using hybrid nanofluid," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 162, p. 114309, Nov. 2019, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2019.114309](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114309).
- [25] X. Li, G. Zeng, and X. Lei, "The stability, optical properties and solar-thermal conversion performance of SiC-MWCNTs hybrid nanofluids

[34] A. A. Minea, "Pumping power and heat transfer efficiency evaluation on Al₂O₃, TiO₂ and SiO₂ single and hybrid water-based nanofluids for energy application," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 139, no. 2, pp. 1171–1181, Jan. 2020, doi: [10.1007/s10973-019-08510-3](https://doi.org/10.1007/s10973-019-08510-3).

[33] F. Benedict et al., "Thermal performance of hybrid-inspired coolant for radiator application," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 6, Jun. 2020, doi: [10.3390/nano10061100](https://doi.org/10.3390/nano10061100).