



## Development of a New Empirical Model for Predicting Thermal Conductivity of ZnO-Ethylene Glycol Nanofluid Based on Temperature, Particle Size, and Concentration

Mehrdad Safikhani<sup>1</sup> , Ashkan Ghafouri<sup>\*2</sup> , Ali Moarrefzadeh<sup>3</sup>

1.M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Mahs.C., Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

2. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

3. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Mahs.C., Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

### Abstract

Base fluids generally have low thermal conductivity, but adding solid nanoparticles improves this property. In this research, spherical zinc oxide (ZnO) nanoparticles with diameters of 10-30, 35-45 and 80-100 nm were stabilized in ethylene glycol using a two-step method. CTAB surfactant and ultrasonic agitation were used to prevent particle aggregation. Nanofluids were prepared with volume fractions of 0.2 to 1% at temperatures of 20 to 60°C. Thermal conductivity was measured using the transient hot-wire method with a KD2-Pro device. Results showed that decreasing nanoparticle size, increasing temperature and increasing volume fraction significantly improved thermal conductivity, with the maximum increase (about 18%) observed at the highest temperature, smallest particle size and highest volume fraction. The effect of volume fraction was more remarkable at lower concentrations. Temperature increases facilitated heat transfer by weakening molecular bonds. Comparison of experimental data with analytical models showed that the difference between results increases with higher temperatures and volume fractions. Finally, a multivariate empirical model was developed and validated to predict the thermal conductivity of ZnO/EG nanofluid, which effectively describes the dependence of thermal conductivity on temperature, particle size and concentration.

### Keywords

Nanofluid  
Volume Fraction  
Nanoparticle Diameter  
Thermal Conductivity  
Empirical Correlation

Received: 08.08.2025

Revised: 26.09.2025

Accepted: 21.10.2025

### \*Corresponding Author

Ashkan Ghafouri

Email

[ashkan.ghafouri@iau.ac.ir](mailto:ashkan.ghafouri@iau.ac.ir)

## 1- Introduction

The utilization of solid particles in fluids to enhance heat transfer has been extensively studied for many years. While microparticles presented challenges such as sedimentation, corrosion, and pressure drop, a significant breakthrough occurred in 1995 when Choi [1] introduced nanoparticles, revolutionizing this field. Nanoparticles have emerged as an ideal solution due to their superior stability, increased surface area, and ability to mitigate issues like corrosion and pressure drop. Two key characteristics of nanofluids are their enhanced

stability and significantly improved thermal conductivity. Although numerous studies have investigated zinc oxide nanofluids, the influence of nanoparticle diameter has received comparatively less attention. Most existing research has focused on examining variations in thermal conductivity based on volume fraction, temperature, and base fluid type.

Several notable studies have contributed to our understanding of nanofluids. Lee et al. [2]

How to Cite this Article:

[1] M. Safikhani, A. Ghafouri, and A. Moarrefzadeh, "Development of a new empirical model for predicting thermal conductivity of ZnO-ethylene glycol nanofluid based on temperature, particle size, and concentration," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 175–189, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.540032.1155> (in Persian)



investigated nanofluids containing aluminum oxide and copper oxide nanoparticles in water and ethylene glycol, finding that the maximum thermal conductivity enhancement (20%) occurred in ethylene glycol with 4 vol% copper oxide nanoparticles having an average diameter of 35 nm. Masuda et al. [3] demonstrated that 13 nm aluminum oxide nanoparticles at 3.4 vol% could increase water's thermal conductivity by up to 30%, while larger particles (40 nm) only provided a 10% improvement. Jang et al. [4] proposed two primary mechanisms for enhanced heat transfer in nanofluids: (1) increased energy transfer due to nanoparticle motion and (2) improved thermal conductivity. Keblinski et al. [5] identified four influential factors: Brownian motion of particles, the interfacial layer between particles and fluid, heat transfer within nanoparticles, and heat transfer within nanoparticle clusters. Wang et al. [6] further confirmed the role of interfacial layers between fluid molecules and nanoparticles in facilitating heat transfer.

Recent advancements have addressed various aspects of nanofluid performance. Choi et al. [7] highlighted limitations in theoretical models predicting nanofluid thermal conductivity, noting that experimental values often exceed theoretical predictions. Lee et al. [8] examined the effects of pH and surfactants on the thermal conductivity of water/aluminum oxide nanofluids, finding these parameters significantly influence thermal performance. Das et al. [9] reported a 15% increase in thermal conductivity for water/aluminum oxide nanofluids at 4 vol% with a temperature change of 30°C. In a comprehensive study, Esfe et al. [10] optimized zinc oxide/ethylene glycol nanofluids using a combination of genetic algorithms and response surface methodology. Their multi-objective optimization approach achieved optimal thermal efficiency at 0.5 vol% with a minimum cost of \$360 per liter, while maintaining thermal performance and reducing production costs by 10%.

This study presents an experimental investigation of the thermal conductivity of zinc oxide/ethylene glycol nanofluids, specifically examining the simultaneous effects of nanoparticle volume

fraction, fluid temperature, and particle size. To date, no comprehensive study has been reported on the influence of zinc oxide nanoparticle diameter on the thermal conductivity of this specific system. Furthermore, existing models have been unable to accurately predict the thermal behavior of this nanofluid while accounting for all three key parameters. By developing a new empirical model that describes the dependence of thermal conductivity on volume fraction, temperature, and particle size, this research provides a valuable reference for industrial applications and future studies. The results offer a scientific foundation for designing high-efficiency heat transfer systems with optimized costs.

## 2- Research Methods

This study measured nanofluid thermal conductivity using the hot-wire method with a KD2-Pro thermal conductivity analyzer (Decagon Devices, USA). Precise temperature control was maintained by circulating temperature-regulated water through an external bath surrounding the sample beaker. The instrument was calibrated using glycerin prior to measurements. Zinc oxide/ethylene glycol nanofluids were prepared through a two-step method, with nanoparticles (10-30 nm, 35-45 nm, and 80-100 nm diameters, 99%+ purity) dispersed using ultrasonic homogenization for 3-5 hours to achieve stability. The nanofluids were tested at volume fractions ranging from 0.2% to 1%. Particle morphology and size distribution were verified using transmission electron microscopy, confirming near-spherical shapes and uniform dispersion. Specific surface area measurements showed significant variation across particle sizes (20-65 m<sup>2</sup>/g), influencing thermal performance. All measurements adhered to strict repeatability and reproducibility protocols.

## 3- Results

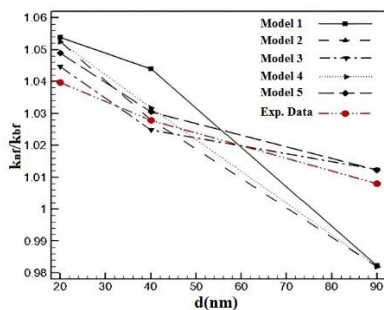
This research thoroughly examined the effects of particle diameter and volume fraction at constant temperature on thermal conductivity, the influence of diameter and temperature at fixed volume

fraction on thermal conductivity, and the impact of volume fraction and temperature at constant particle size on thermal conductivity, with detailed analysis accompanied by variation graphs. The main achievement of this study was developing a coherent multivariate correlation through regression analysis. The primary objective was to predict thermal conductivity based on three independent variables: nanoparticle volume fraction ( $\phi$ ), particle diameter ( $d_{np}$ ), and nanofluid temperature ( $T$ ). The model, derived through multiple linear regression, estimates nanofluid thermal conductivity as a function of volume fraction while accounting for the significant effects of temperature and particle diameter. The regression analysis employed simultaneous data entry. Five different models with varying relational patterns were comprehensively evaluated, with their results presented in Table 1.

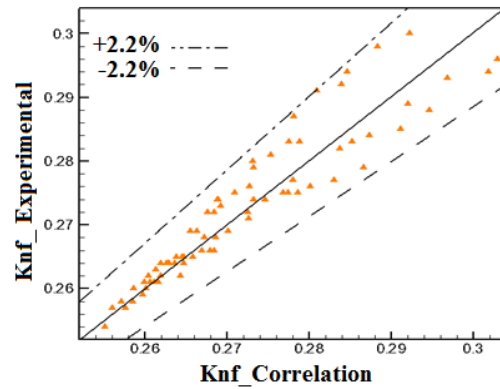
**Table 1: Error and deviation of the proposed models compared to experimental results**

Model	R Square	Error %	$\sigma^2$	$\sigma$
7	1.09	1.19	1.56	0.895
8	0.87	0.76	1.14	0.878
9	1.19	1.42	1.44	0.885
10	0.83	0.69	1.10	0.887
11	0.98	0.97	1.08	0.937

A comparison graph of the models with experimental results is shown in Figure 1. Ultimately, the fifth model (presented below) emerged as the most accurate with the highest precision ( $R^2=0.94$ ).



**Figure 1: Comparison chart of thermal enhancement ratio predicted by various models versus experimental results for different particle diameters**



**Figure 2: Comparison of thermal conductivity between experimental results and Model 5 predictions according to Equation (11)**

Figure 2 demonstrates the comparison between experimental laboratory data and the model's predictions.

The developed model provides a reliable predictive tool for determining nanofluid thermal conductivity while simultaneously considering the interactive effects of these three crucial parameters. This comprehensive approach offers significant insights for thermal system design and optimization in nanofluid applications.

#### 4- Conclusion

This experimental study investigated the thermal conductivity of ZnO/ethylene glycol nanofluids, examining temperature, particle diameter, and volume fraction effects. The two-step preparation method with ultrasonic homogenization ensured stable nanofluid dispersion, while thermal conductivity measurements employed the transient hot-wire method (KD2-Pro). Multivariate empirical models were developed to predict thermal conductivity, showing: (1) consistent thermal conductivity enhancement with increasing volume fraction across all temperatures; (2) temperature elevation improved conductivity due to weakened molecular bonds and intensified Brownian motion, though stability limits this effect; (3) higher volume fractions increased conductivity through greater solid particle density, with maximum 18% improvement observed at peak temperature (50°C), highest concentration (1 vol%), and smallest particle size (10-30nm); (4) comparative analysis

revealed growing discrepancies between experimental and semi-empirical results at elevated temperatures and concentrations, though the proposed model ( $R^2=0.94$ ) effectively captured these parametric relationships. The findings demonstrate synergistic effects between the studied parameters, providing critical insights for thermal system optimization using nanofluids.

## 5- References

- [1] S. U. S. Choi and J. A. Eastman, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles," ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, San Francisco, Nov. 12–17, 1995, Argonne, IL: Argonne National Laboratory, 1995.
- [2] S. Lee, S. U. S. Choi, S. Li, and J. A. Eastman, "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles," *J. Heat Transfer*, Vol. 121, No. 2, pp. 280–288, May 1999, doi: [10.1115/1.2825978](https://doi.org/10.1115/1.2825978)
- [3] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, and N. Hishinuma, "Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles," *Netsu Bussei*, Vol. 7, No. 4, pp. 227–233, 1993, doi: [10.2963/jjtp.7.227](https://doi.org/10.2963/jjtp.7.227)
- [4] Y. Xuan and Q. Li, "Heat transfer enhancement of nanofluids," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 21, pp. 58–64, Feb. 2000, doi: [10.1016/S0142-727X\(99\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00067-3)
- [5] P. Keblinski, S. R. Phillpot, S. U. S. Choi, and J. A. Eastman, "Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 855–863, Feb. 2002, doi: [10.1016/S0017-9310\(01\)00175-2](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00175-2)
- [6] X. Wang, X. Xu, and S. U. S. Choi, "Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture," *J. Thermophys. Heat Transfer*, Vol. 13, No. 4, pp. 474–480, Oct. 1999, doi: [10.2514/2.6486](https://doi.org/10.2514/2.6486)
- [7] S. U. S. Choi, Z. G. Zhang, W. Yu, F. E. Lockwood, and E. A. Grulke, "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspension," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, pp. 2252–2254, 2001, doi: [10.1063/1.1408272](https://doi.org/10.1063/1.1408272)
- [8] X. F. Li, D. S. Zhu, X. J. Wang, N. Wang, J. W. Gao, and H. Li, "Thermal conductivity enhancement dependent pH and chemical surfactant for Cu-H<sub>2</sub>O nanofluids," *Thermochimica Acta*, Vol. 469, pp. 98–103, Mar. 2008, doi: [10.1016/j.tca.2008.01.008](https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.01.008)
- [9] S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel, "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids," *J. Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 567–574, Jul. 2003, doi: [10.1115/1.1571080](https://doi.org/10.1115/1.1571080)
- [10] M. H. Esfe, H. Hajmohammad, S. M. Motallebi, and D. Toghraie, "Cost and efficiency optimizations of ZnO/EG nanofluids using non-dominated sorting genetic algorithm coupled with a statistical method," *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 41, No. 1, pp. 175–186, 2024, doi: [10.1007/s11814-023-00003-2](https://doi.org/10.1007/s11814-023-00003-2) (in Persian)
- [11] M. Hemmat Esfe and S. Saedodin, "Experimental investigation and proposed correlations for temperature-dependent thermal conductivity enhancement of ethylene glycol based nanofluid containing ZnO nanoparticles," *J. Heat Mass Transf. Res.*, Vol. 1, No. 1, pp. 47–54, 2014, doi: [10.22075/jhmtr.2014.153](https://doi.org/10.22075/jhmtr.2014.153) (in Persian)

## ارائه یک مدل تجربی جدید برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید روی-اتیلن گلیکول بر اساس دما، اندازه و غلظت نانوذرات

مهرداد صفی‌خانی<sup>۱</sup>، اشکان غفوری<sup>۲\*</sup>، علی معرف‌زاده<sup>۳</sup>

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

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران

### کلمات کلیدی

نانوسیال  
کسر حجمی  
قطر نانوذرات  
ضریب هدایت حرارتی  
مدل تجربی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۷

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹

\*نویسنده مسئول

اشکان غفوری

ایمیل

[ashkan.ghafouri@iau.ac.ir](mailto:ashkan.ghafouri@iau.ac.ir)

### چکیده

سیالات معمولاً ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند، اما افزودن نانوذرات جامد این ویژگی را بهبود می‌بخشد. در این پژوهش، نانوذرات کروی اکسید روی (ZnO) با قطرهای ۱۰-۳۰، ۳۵-۴۵، ۸۰-۱۰۰ نانومتر به روش دو مرحله‌ای در اتیلن‌گلیکول پایدار شده‌اند. برای جلوگیری از تجمع ذرات، از سورفکتانت CTAB و همزن فراصوت استفاده شد. نانوسیالات با کسرهای حجمی ۰/۲ تا ۱٪ و در دمای ۲۰ تا ۶۰°C تهیه شدند. ضریب هدایت حرارتی با روش سیم داغ گذرا به کمک دستگاه KD2-Pro اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که کاهش قطر نانوذرات، افزایش دما و افزایش کسر حجمی، هدایت حرارتی را به‌طور معناداری بهبود می‌دهند؛ به‌طوری‌که بیشترین افزایش (حدود ۱۸٪) در بالاترین دما، کمترین اندازه ذرات و بیشترین کسر حجمی مشاهده شد. همچنین، تأثیر کسر حجمی در مقادیر پایین چشمگیرتر بود. افزایش دما با تضعیف پیوندهای مولکولی، انتقال حرارت را تسهیل کرد. مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های تحلیلی نشان داد که اختلاف نتایج با افزایش دما و کسر حجمی بیشتر می‌شود. در نهایت، یک مدل تجربی چندمتغیره برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ZnO/EG ارائه و اعتبارسنجی شد. این مدل وابستگی هدایت حرارتی به دما، اندازه و غلظت نانوذرات را با  $R^2=0/94$  به خوبی توصیف می‌کند.

### ۱- مقدمه

مطالعات موجود، تغییرات ضریب هدایت حرارتی را بر اساس کسر حجمی، دما و نوع سیال پایه بررسی کرده‌اند.

لی و همکاران [۲] در تحقیقات خود روی نانوسیالات حاوی نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید مس در آب و اتیلن گلیکول دریافتند که بیشترین افزایش هدایت حرارتی (۲۰٪) مربوط به اتیلن گلیکول حاوی ۴٪ حجمی نانوذرات اکسید مس با قطر متوسط ۳۵ نانومتر بوده است. ماسودا و همکاران [۳] نشان دادند که نانوذرات اکسید آلومینیوم با قطر ۱۳ نانومتر در کسر حجمی ۳/۴٪ می‌توانند هدایت حرارتی آب را تا ۳۰٪ افزایش دهند، در حالی که ذرات بزرگ‌تر

استفاده از ذرات جامد در سیالات به‌منظور بهبود انتقال حرارت، سال‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. ذرات میکرو مشکلاتی مانند رسوب‌گذاری، خوردگی و افت فشار ایجاد می‌کردند تا اینکه در سال ۱۹۹۵، چوی [۱] با معرفی نانوذرات، انقلابی در این زمینه ایجاد کرد. نانوذرات به دلیل پایداری بالا، سطح تماس بیشتر و کاهش مشکلاتی مانند خوردگی و افت فشار، گزینه‌ای ایده‌آل هستند. دو ویژگی کلیدی نانوسیالات، پایداری بالا و ضریب هدایت حرارتی بسیار بهبودیافته است. تحقیقات متعددی بر روی نانوسیالات اکسید روی انجام شده، اما تأثیر قطر نانوذرات کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بیشتر

### How to Cite this Article:

[1] M. Safikhani, A. Ghafouri, and A. Moarrefzadeh, "Development of a new empirical model for predicting thermal conductivity of ZnO-ethylene glycol nanofluid based on temperature, particle size, and concentration," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 175-189, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.540032.1155> (in Persian)



سورفکتانت، افزایش هدایت حرارتی بسیار بیشتری ایجاد می‌کنند. همچنین پایداری بالاتر این نانوسیالات توسط پتانسیل زتا در یک بازه دو ماهه تأیید گردید. پژوهشگران در این مقاله، یک معادله ریاضی جامع برای پیش‌بینی هدایت حرارتی بر اساس دما، غلظت و نسبت پایه سیال ارائه کردند که با داده‌های تجربی تطابق خوبی داشت. رحمتی‌نژاد و عظیم‌پور [۱۳] روش‌های افزایش پایداری نانوسیالات را بررسی کردند.

نتایج نشان داد ترکیب فراصوت و سورفکتانت‌ها مؤثرترین روش برای جلوگیری از تجمع ذرات و حفظ خواص حرارتی است. همچنین پراکندگی نور پویا (DLS) و طیف‌سنجی UV-Vi به‌عنوان روش‌های اصلی ارزیابی پایداری معرفی شدند. رشیدی و همکاران [۱۴] به مدل‌سازی و تحلیل حساسیت هدایت حرارتی نانوسیال آلومینا-اتیلن گلیکول/آب پرداختند. آن‌ها از روش هوشمند پرسپترون چندلایه و روش گروهی پردازش داده برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل MLP با تابع انتقال تابع پایه شعاعی (RBF) با مقادیر  $R^2$  بسیار نزدیک به یک (۰/۹۹۹۸)، بالاترین دقت را دارد. همچنین تحلیل حساسیت آن‌ها مشخص کرد که هدایت حرارتی سیال پایه بیشترین تأثیر را بر روی هدایت حرارتی نانوسیال دارد. در حوزه مدل‌سازی رفتار نانوسیالات و ارائه همبستگی‌های تجربی می‌توان به پژوهش‌های سالاری و همکاران [۱۵]، غفوری و همکاران [۱۶] و پورمحمود و همکاران [۱۷] نیز اشاره نمود. در خصوص کاربرد نانوسیالات، یعقوبی و پورمیرزاآقا [۱۸] عملکرد رادیاتور خودرو را با نانوسیالات اکسید آلومینیم و اکسید مس بررسی کردند. نتایج نشان داد استفاده از نانوسیال اکسید مس با غلظت ۱٪ در دور موتور ۱۱۵۲rpm، انتقال حرارت را تا ۵۲/۳۹ درصد نسبت به آب بهبود می‌بخشد که بیشترین افزایش مشاهده شده بود. نانوسیال اکسید آلومینیم نیز در همین شرایط ۵۲/۲۹ درصد بهبود عملکرد نشان داد. نوآوری اصلی این پژوهش، توسعه یک مدل تجربی جدید برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید روی/اتیلن گلیکول با در نظرگیری توأمان سه پارامتر کلیدی کسر حجمی، دمای سیال و اندازه ذرات است. این در حالی است که مطالعات پیشین نه‌تنها بررسی جامعی درباره تأثیر قطر نانوذرات بر روی این سامانه خاص ارائه نداده‌اند، بلکه فاقد مدلی هستند که بتواند اثر هم‌زمان این سه پارامتر را پیش‌بینی کند. مدل ارائه شده در این پژوهش که بر پایه داده‌های آزمایشگاهی گسترده استوار است، مرجع معتبری برای طراحی بهینه سیستم‌های انتقال حرارت با بازدهی بالا در کاربردهای صنعتی فراهم

(۴۰ نانومتر) تنها ۱۰٪ بهبود ایجاد می‌کنند. ژان و همکاران [۴] دو مکانیسم اصلی برای افزایش انتقال حرارت در نانوسیالات معرفی کردند: (۱) افزایش انتقال انرژی ناشی از حرکت نانوذرات و (۲) بهبود هدایت حرارتی. کبلینسکی و همکاران [۵] چهار عامل مؤثر را شناسایی کردند که شامل حرکت براونی ذرات، لایه مرزی بین ذره و سیال، انتقال حرارت درون نانوذرات و انتقال حرارت در خوشه‌های نانوذرات می‌شود. وانگ و همکاران [۶] نیز نقش لایه‌های مرزی بین مولکول‌های سیال و نانوذرات را در تسهیل انتقال حرارت تأیید کردند.

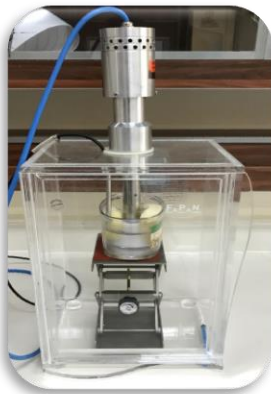
همچنین چوی و همکاران [۷] به محدودیت‌های موجود در مدل‌های تئوری پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات اشاره کرده‌اند و نشان دادند که مقادیر تجربی معمولاً بالاتر از پیش‌بینی‌های نظری هستند. لی و همکاران [۸] تأثیر pH و مواد فعال سطحی را بر هدایت حرارتی نانوسیالات آب/اکسید آلومینیوم بررسی کردند و دریافتند که این پارامترها تأثیر قابل توجهی بر بهبود هدایت حرارتی دارند. داس و همکاران [۹] نیز افزایش ۱۵٪ هدایت حرارتی را در نانوسیال آب/اکسید آلومینیوم با کسر حجمی ۴٪ و تغییر دمای ۳۰ درجه سلسیوس گزارش کردند. اسفه و همکاران [۱۰] بهینه‌سازی نانوسیالات اکسید روی/اتیلن گلیکول را با ترکیب الگوریتم ژنتیک و روش سطح پاسخ بررسی کردند. این مطالعه نشان داد با استفاده از عدد مورومتسف به‌عنوان شاخص کارایی و بهینه‌سازی چندهدفه، می‌توان به بازدهی حرارتی بهینه در کسر حجمی ۵/۰٪ با حداقل هزینه ۳۶۰ دلار بر لیتر دست یافت. نتایج حاکی از کاهش ۱۰٪ هزینه‌های تولید نانوسیال همراه با حفظ کارایی حرارتی بود. پژوهشگران با ارائه یک رابطه تجربی، الگوی بهینه‌ای برای تعادل بین هزینه و عملکرد حرارتی پیشنهاد دادند. یاشوانتا و ونوینود [۱۱] به بررسی رفتار رئولوژیکی و هدایت حرارتی نانوسیال گرافیت-اتیلن گلیکول پرداختند. آن‌ها نانوسیال را با غلظت‌های حجمی مختلف تهیه کرده و تأثیر دما و نرخ برش بر ویسکوزیته و همچنین تأثیر اندازه نانوذرات بر هدایت حرارتی را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که ویسکوزیته با افزایش غلظت، کمی افزایش ولی با افزایش دما کاهش چشمگیری (۵۸ درصد) می‌یابد. همچنین مشخص شد که هدایت حرارتی برای نانوذرات با اندازه کوچک‌تر (زیر ۵۰ نانومتر) در مقایسه با اندازه بزرگ‌تر (زیر ۱۰۰ نانومتر) به میزان ۱۶/۳ درصد بیشتر است. سوراکاسی و همکاران [۱۲] به بررسی پایداری و خواص ترموفیزیکی نانوسیالات حاوی نانولوله کربنی چنددیواره اکسیدشده در پایه اتیلن گلیکول/آب پرداختند. نتایج نشان داد که نانولوله‌های اکسیدشده در مقایسه با نانولوله‌های اصلاح‌شده با

یکی از پارامترهای بسیار مهم در تغییر ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات، دما است. از این رو کنترل صحیح و یکنواخت دمای محفظه حاوی نانوسیال از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به این منظور و باتوجه به نحوه عملکرد و ملاحظات سنسور TS1 دستگاه KD2-Pro برای انجام این پروژه، از یک حمام بروکفیلد به منظور گذر آب با دمایی خاص اطراف بشر حاوی نانوسیال استفاده شده است. با گذر آب با دمایی خاص از جداره خارجی ظرف، دمای سیال درون ظرف پس از مدتی کنترل شده و در محدوده معینی ثابت می‌شود.

می‌کند و مبنای علمی مستحکمی برای مطالعات آبی در این حوزه محسوب می‌شود.

## ۲- روش انجام پژوهش

در این پژوهش، به منظور اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، از روش سیم داغ<sup>۱</sup> و در قالب دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی KD2-Pro ساخت شرکت دکاگون امریکا، استفاده شده است. شکل ۱ (الف) شمایی کلی از دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی KD2-Pro را نشان می‌دهد.



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۱: (الف): دستگاه KD2-Pro. (ب): دستگاه حمام بروکفیلد و (پ): دستگاه همزن اولتراسونیک

وسيله پراکنده کردن نانوذرات در سیال پایه از دستگاه مخصوص همزن اولتراسونیک استفاده شده است. در شکل ۱ (پ) دستگاه همزن اولتراسونیک به نمایش در آمده است. کسر حجمی نانوذرات در این تحقیق ۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۱۶، ۰/۰۱۸ و ۰/۱ در قطرهای ۱۰ تا ۳۰، ۳۵ تا ۴۵ و ۸۰ تا ۱۰۰ نانومتر می باشد. لازم به ذکر است که نانوذرات مورد استفاده، از محصولات شرکت نانوسنی کورپوریشن<sup>۲</sup> تهیه شده است. مشخصات نانو ذرات در جدول ۱ به نمایش در آمده است.

جدول ۱: مشخصات نانو ذرات

ZnO	فرمول شیمیایی
۸۱/۳۷	وزن مولکولی
۱۹۷۵° C	نقطه ذوب
۲۳۶۰° C	نقطه جوش
۵۶۰۶ kg/m <sup>3</sup>	چگالی
۷۹/۹۲۴۰۶۱ Da	جرم تک‌ایزوتوپی
۷۹/۹۲۴۱ g/mol	جرم دقیق

به منظور کنترل دمای دقیق نانوسیال درون ظرف داخلی از حسگرهای اندازه‌گیری دقیق استفاده گردید. در شکل ۱ (ب) حمام بروکفیلد متصل به دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی KD2-Pro به نمایش در آمده است. به منظور اطمینان از صحت عملکرد دستگاه تحلیل حرارتی KD2-Pro می‌توان از اندازه‌گیری ضریب هدایت سیالات پایه‌ای مانند آب و یا مایع کالیبراسیون این دستگاه، استفاده نمود. با استفاده از مایع کالیبراسیون موجود در دستگاه، می‌توان ضمن اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی به صحت و دقت عملکرد دستگاه پی‌برد. بدین منظور پیش از انجام آزمایشات در ابتدا با استفاده از پاراب TS1، ضریب هدایت حرارتی گلیسرین موجود در کیف دستگاه اندازه‌گیری شد و از کالیبره بودن دستگاه اطمینان حاصل گردید. اولین گام در انجام بررسی تجربی حاضر، آماده‌سازی نانوسیال و پراکنده‌گی نانوذرات درون سیال پایه می‌باشد. در این تحقیق برای آماده سازی نانوسیال اکسید روی/اتیلن گلیکول از روش دومرحله‌ای استفاده شده است. به منظور آماده سازی نانوسیال به

<sup>2</sup> Nanosany Corporation

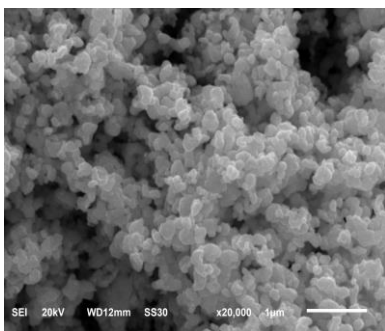
<sup>1</sup> Hot Wire

موضوع مهمی که در جدول مشخصه‌ها حائز اهمیت است، تفاوت آشکار سطح ویژه (SSA) در قطرهای مختلف است. سطح ویژه نانوذرات با کوچک‌تر شدن قطر به میزان بسیار زیادی افزایش می‌یابد که این نشان‌دهنده افزایش سطح مؤثر نسبت به حجم نانوذرات در یک درصد وزنی یا حجمی خاص است. این افزایش قابل توجه، عملکرد حرارتی نانوسیال را تحت تأثیر قرار می‌دهد و انتظار می‌رود با افزایش و یا کاهش قطر نانوذرات، برخی کارکردها و خواص حرارتی نانوسیال نیز دستخوش تغییر شود. نانوسیال با کسرهای حجمی فوق‌الذکر با پایداری مقادیر مشخصی از نانوذرات اکسید روی در قطرهای مختلف در سیال پایه اتیلن گلیکول و ترکیب آن به وسیله دستگاه اولتراسونیک به دست می‌آید. از دستگاه اولتراسونیک پروبی به مدت ۳ تا ۵ ساعت برای هم‌زدن سیال و شکستن توده‌های ذرات برای دستیابی به نانوسیال پایدار استفاده شد.

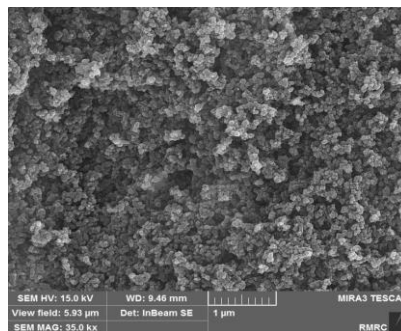
مشخصه‌های نانوذرات اکسید روی خریداری شده در جدول ۲ به ترتیب برای نانوذرات با قطر ۱۰ تا ۳۰، ۳۵ تا ۴۵ و ۸۰ تا ۱۰۰ نانومتر آمده است.

جدول ۲: مشخصه‌های نانوذرات اکسید روی

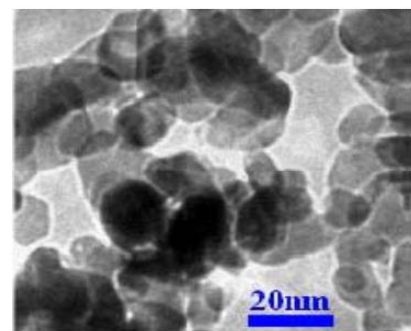
مشخصات	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳
قطر ذرات (نانومتر)	۱۰۰-۸۰	۴۵-۳۵	۳۰-۱۰
درجه خلوص (%)	+۹۹٪	+۹۹٪	+۹۹٪
رنگ	شیری	شیری	شیری
فاز بلوری	تک‌بلور	تک‌بلور	تک‌بلور
ظاهرشناسی بلور	شبه کروی	شبه کروی	شبه کروی
چگالی حقیقی (g/cm <sup>3</sup> )	۵/۶۰۶	۵/۶۰۶	۵/۶۰۶
سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)	۶۰-۲۰	۶۵	۶۰-۲۰



(پ)

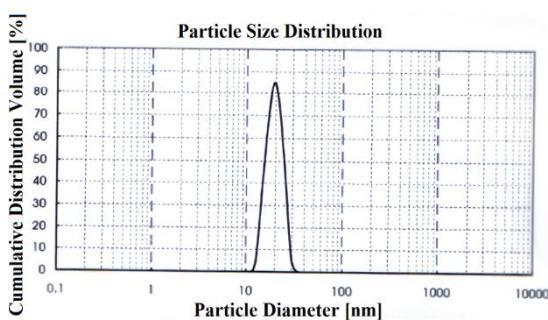


(ب)



(الف)

شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری مربوط به نانوذرات اکسید روی (الف) در قطرهای ۱۰ تا ۳۰ (ب) در قطرهای ۳۵ تا ۴۵ (پ) در قطرهای ۸۰ تا ۱۰۰



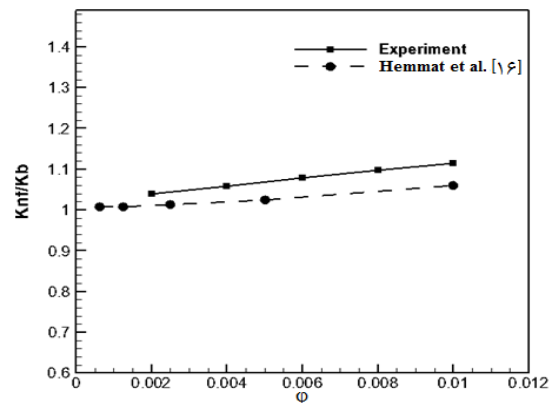
شکل ۳: نمودار توزیع قطر و فراوانی نانو اکسید روی تهیه شده در قطر ۳۰-۱۰ نانومتر

همچنین در این تحقیق از تصاویر میکروسکوپ عبوری الکترونی (TEM) به منظور درک خواص ساختاری نانوذرات اکسید روی در قطرهای مختلف استفاده شده است. این روش پیشتر در محدوده وسیعی از مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۲ تصاویر TEM مربوط به سه قطر مختلف مورد استفاده در این تحقیق را به صورت مجزا نمایش می‌دهد. شکل ۳ نیز نمودار توزیع و فراوانی نانوذره تهیه شده در یکی از قطر ها را نمایش می‌دهد. در جدول ۳ خطای دستگاه‌ها و وسایل مورد استفاده در آزمایشگاه نانوسیالات مورد استفاده برای این تحقیق آورده شده است.

جدول ۳: دقت دستگاه‌ها و وسایل مورد استفاده در آزمایشگاه

نام وسیله آزمایشگاهی	دقت دستگاه
ترازو	۰/۰۰۰۱g
پیت ژوزه	۰/۱ml
دستگاه KD2-Pro	۰/۰۵ W/m.K
حمام پروکفیلد	۰/۱°C

همچنین در این تحقیق به چند نکته و اصل اندازه‌گیری در آزمایشگاه توجه شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به تکرارپذیری<sup>۱</sup> و تجدیدپذیری<sup>۲</sup> اشاره نمود. پیش از ارائه نتایج پژوهش، به منظور اعتبارسنجی و اطمینان از نتایج مدل به دست آمده در این بخش، داده‌های پژوهش‌های پیشین [۱۱] با نتایج کار حاضر مقایسه شده که در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج این پژوهش با نتایج تجربی همت و همکاران [۱۹] تا حد زیادی همخوانی دارد.

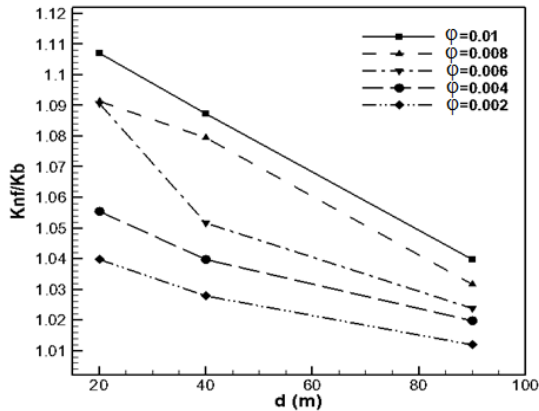


شکل ۴: نمایش ضریب هدایت حرارتی بدست آمده از رابطه (۱۱) بر حسب مقادیر بدست آمده از مطالعات پیشین

### ۳- نتایج و یافته‌های پژوهش

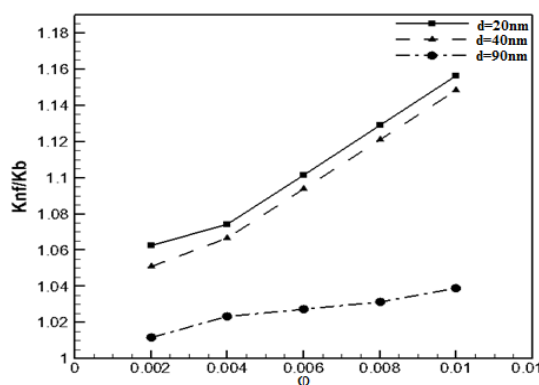
۳-۱- تأثیر قطر و کسر حجمی در دمای ثابت بر ضریب هدایت  
مقادیر تجربی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در قطرهای مختلف نانوذرات و کسرهای حجمی گوناگون در شکل ۵ و شکل ۶ آمده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود کاهش قطر منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌گردد که این افزایش در کسرهای حجمی بالاتر محسوس‌تر می‌باشد. در کسر حجمی ۱٪ و دمای ۲۰ درجه سانتیگراد تغییرات نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی نانوسیال با قطر ۱۰ تا ۳۰ نانومتر نسبت به سیال پایه حدود ۱۱٪ است در حالی که نانوسیال با قطر ذرات ۳۵ تا ۴۵ نانومتر نسبت به سیال پایه

۹٪+ ضریب بهبود هدایت حرارتی افزایش داشته است. طبق مقادیر حاصله، تغییر نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی برای قطر ۸۰ تا ۱۰۰ نیز در حدود ۴/۵٪+ نسبت به سیال پایه افزایش داشته است.



شکل ۵: تأثیر قطر بر ضریب هدایت نانوسیال در کسر حجمی ثابت

علت مشهود بودن بهبود هدایت حرارتی در کسرهای حجمی بالاتر با کاهش قطر، به هم‌افزایی دو مکانیزم برمی‌گردد: کاهش قطر هم باعث افزایش سطح تماس (انتقال حرارت بهتر در فصل مشترک) و هم تشدید حرکت براونی (انتقال انرژی جنبشی) می‌شود. در غلظت‌های بالا، تراکم ذرات ریز این دو اثر را تقویت کرده و سینرژی ایجاد می‌کند که منجر به بهبود کارایی قابل توجه انتقال حرارت می‌شود. در شکل ۶ تأثیر کسر حجمی در قطر ثابت آورده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص می‌باشد با افزایش کسر حجمی در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می‌یابد.



شکل ۶: تأثیر کسر حجمی بر ضریب هدایت نانوسیال در قطر ثابت

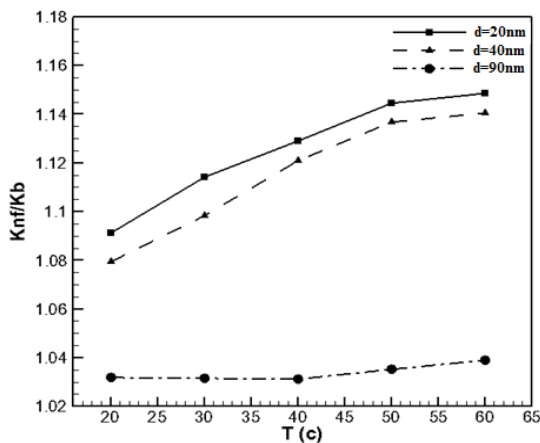
در قطر ۱۰ تا ۳۰ نانومتر که با نماد قطر ۲۰ به نمایش در آمده است، میزان افزایش ضریب بهبود حرارتی در کسر حجمی یک درصد نسبت به سیال پایه ۱۶٪+ می‌باشد و در قطر ۸۰ تا ۱۰۰ نانومتر که با

<sup>2</sup> Reproducibility

<sup>1</sup> Repeatability

این میزان افزایش نشان‌دهنده سهم قابل‌توجه دما در افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال است. از سوی دیگر می‌توان نتیجه گرفت در نظر گرفتن پارامترهای اثرگذار و مهمی مانند دما یا قطر نانوذرات در روابط و مدل‌های تخمین ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات می‌تواند باعث عدم کارایی و کاهش نتیجه‌بخشی آن‌ها شود. همچنین بسیاری از مدل‌هایی که تاکنون به صورت تحلیلی و یا تجربی ارائه گردیده‌اند، میزان اثرگذاری این پارامترها را ناچیز فرض کرده و یا اثر این پارامترها را به صورت مستقیم لحاظ نکرده‌اند؛ بنابراین در ادامه ضمن قیاس داده‌های تجربی موجود با مدل‌های کلاسیک، به ارائه یک مدل وابسته به دما و قطر نانوذرات پرداخته خواهد شد.

در شکل ۸ تأثیر دما در قطر ثابت آورده شده است. همانطور که از شکل مشخص می‌باشد با افزایش دما در کسر حجمی ۰/۸ درصد نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می‌یابد. در قطر ۱۰ تا ۳۰ نانومتر که با نماد قطر ۲۰ به نمایش در آمده است، میزان افزایش ضریب بهبود حرارتی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به سیال پایه در همان دما در حدود ۰/۱۵٪ می‌باشد و در قطر ۸۰ تا ۱۰۰ نانومتر که با نماد قطر ۹۰ به نمایش در آمده است، میزان افزایش ضریب بهبود حرارتی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به سیال پایه همان دما در حدود ۰/۴٪ می‌باشد.



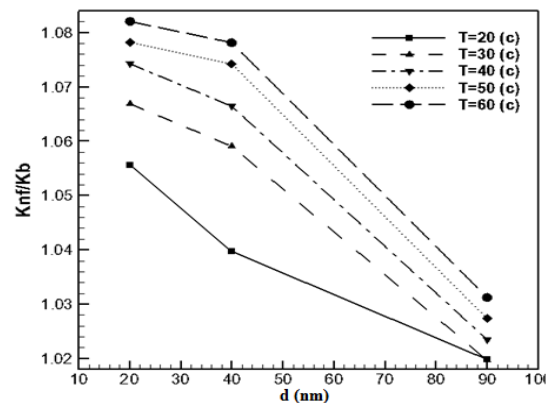
شکل ۸: تأثیر دما بر ضریب هدایت نانو سیال در قطر ثابت

این نتایج مجدداً بر نقش کلیدی اندازه ذرات تأکید دارد، به طوری که افزایش دما تأثیر تشدیدکننده حرکت براونی را دارد. ذرات کوچک‌تر به دلیل سطح ویژه بسیار بالاتر و حرکت براونی شدیدتر ناشی از دما، بهبود حرارتی چشمگیری نشان می‌دهند، در حالی که ذرات درشت‌تر به دلیل سطح تماس کمتر و تحرک محدودتر، بهبود کمتری را تجربه می‌کنند.

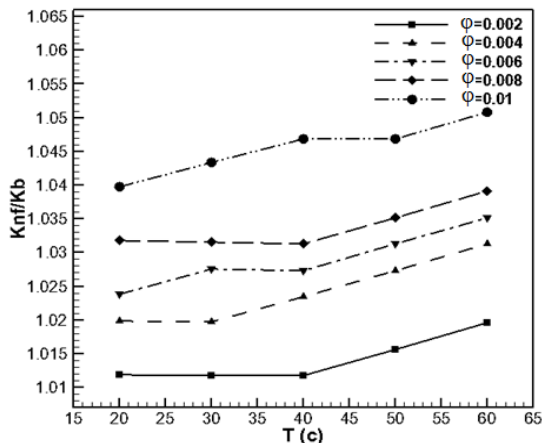
نماد قطر ۹۰ به نمایش در آمده است، میزان افزایش ضریب بهبود حرارتی در کسر حجمی یک درصد نسبت به سیال پایه ۰/۴٪ می‌باشد. این روند نشان می‌دهد که با افزایش قطر میزان تغییر ضریب بهبود حرارتی کاهش می‌یابد. این روند کاهش کاملاً منطبق بر انتظارات تئوریک است؛ زیرا با افزایش قطر نانوذرات، سطح ویژه آن‌ها به طور قابل توجهی کاهش یافته و شدت حرکت براونی نیز تضعیف می‌گردد. در نتیجه، هر دو مکانیزم اصلی انتقال حرارت (انتقال از طریق فصل مشترک و انتقال انرژی جنبشی) کارایی خود را از دست داده و سهم نانوذرات در بهبود هدایت حرارتی کل نانوسیال کاهش می‌یابد.

### ۳-۲- تأثیر قطر و دما در کسر حجمی ثابت بر ضریب هدایت

مقادیر تجربی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در قطرهای مختلف نانوذرات و دماهای مختلف در شکل ۷ و شکل ۸ آمده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود کاهش قطر منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌گردد، زیرا از یک سو نسبت سطح به حجم نانوذرات را افزایش داده و سطح تماس برای انتقال حرارت را گسترش می‌دهد، و از سوی دیگر حرکت براونی را تشدید می‌کند که این امر مکانیسم انتقال حرارت از طریق ریزهمرفت را تقویت می‌نماید. این افزایش در دماهای بالاتر محسوس‌تر می‌باشد. در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و کسر حجمی ۰/۲ درصد تغییرات نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی نانوسیال با قطر ۱۰ تا ۳۰ نانومتر نسبت به سیال پایه برابر ۰/۸/۲٪ است و در حالی که ذرات با قطر برابر ۳۵ تا ۴۵ نانومتر برابر ۰/۷/۸٪ می‌باشد. طبق مقادیر حاصله نیز تغییر نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی برای قطر ۸۰ تا ۱۰۰ نانومتر، در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۰/۳/۴٪ می‌باشد. این افزایش در ضریب هدایت حرارتی با توجه به دما را می‌توان به افزایش انرژی جنبشی ملکول‌های نانوسیال و بهبود سطح انرژی آن‌ها با افزایش دما مرتبط دانست.



شکل ۷: تأثیر قطر بر ضریب هدایت نانو سیال در دمای ثابت



شکل ۱۰: تأثیر دما بر ضریب هدایت نانو سیال در کسر حجمی ثابت

این افزایش ناشی از تشدید حرکت براونی نانوذرات با افزایش دماست که انتقال حرارت را تسهیل می‌کند. میزان بهبود کمتر در کسر حجمی بالاتر (۰.۱) می‌تواند به دلیل تجمع نسبی ذرات و محدودیت در تحرک آزادانه آن‌ها در مقایسه با سیال رقیق‌تر (۰.۲) باشد که ذرات در آن پراکندگی و تحرک بهتری دارند.

#### ۴- ارائه یک رابطه هم‌بستگی چندمتغیره منسجم به روش

##### رگرسیون

در این مطالعه هدف پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی بر حسب سه متغیر کسر حجمی نانوذرات ( $\phi$ )، قطر نانوذرات ( $d_{np}$ ) و دمای نانو سیال ( $T$ ) که هرچه متغیرهای مستقلی هستند، این مدل که برای تخمین ضریب هدایت حرارتی نانو سیال به شکل تابع عواملی مانند کسر حجمی نانوذرات و تأثیر عوامل بسیار مهم و تأثیرگذاری مانند دما و قطر نانوذرات است، از روش رگرسیون خطی چندمتغیره، به‌دست‌آمده است. ورود داده‌ها در فرایند تحلیل رگرسیونی به روش هم‌زمان صورت‌گرفته است. در روش تحلیل رگرسیونی چندین رابطه پایه وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها به شرح زیر هستند:

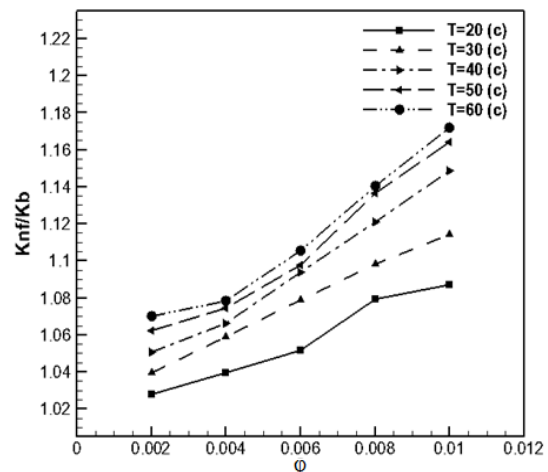
$$\frac{k_1}{k_2} = 1 + AX^1 + BX^2 + CX^3 + DY^1 + EY^2 + FY^3 + GZ^1 + HZ^2 + IZ^3 \quad (1)$$

$$\frac{k_1}{k_2} = A\left(1 + \frac{X_1}{X_2}\right)^a \left(1 + \frac{Y_1}{Y_2}\right)^b \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right)^c \quad (2)$$

$$\frac{k_1}{k_2} = 1 + AX^a \left(\frac{Y_1}{Y_2}\right)^b \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^c \quad (3)$$

#### ۳-۳- تأثیر کسر حجمی و دما در قطر ثابت بر ضریب هدایت

مقادیر تجربی ضریب هدایت حرارتی نانو سیال در کسر حجمی مختلف و دماهای مختلف در شکل ۹ و شکل ۱۰ آمده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش کسر حجمی منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌گردد که این افزایش در دماهای بالاتر محسوس‌تر می‌باشد. در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و با قطر ۴۰ نانومتر تغییرات نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی نانو سیال با کسر حجمی یک درصد نسبت به سیال پایه برابر ۱۷٪+ است. در حالی که در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، تغییرات نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی نانو سیال با کسر حجمی یک درصد نسبت به سیال پایه در دما را برابر ۹٪+ است. این کاهش در ضریب هدایت حرارتی با توجه به دما را می‌توان به کاهش انرژی جنبشی ملکول‌های نانو سیال و کاهش سطح انرژی آن‌ها با کاهش دما مرتبط دانست.



شکل ۹: تأثیر کسر حجمی بر ضریب هدایت نانو سیال در دمای ثابت

در شکل ۱۰ تأثیر دما در کسر حجمی ثابت آورده شده است. همانطور که از شکل مشخص می‌باشد با افزایش دما در قطر ثابت ۹۰ نانومتر نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی نانو سیال افزایش می‌یابد. در کسر حجمی ثابت یک درصد میزان افزایش ضریب بهبود حرارتی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به سیال پایه در همان دما در حدود ۱۵٪+ می‌باشد و در کسر حجمی ثابت ۰.۲ درصد میزان افزایش ضریب بهبود حرارتی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به سیال پایه در همان دما در حدود ۲٪+ می‌باشد.

نزدیک‌تر باشد، رابطه رگرسیون بهتری ارائه می‌دهد. بنابراین رابطه (۱۱) به دلیل ارائه بهتر همبستگی داده‌ها و همچنین خطاهای کمتر که در جدول ۴ قابل مشاهده هستند، در پژوهش حاضر به‌عنوان رابطه پایه انتخاب گردید.

جدول ۴: خطا و انحراف مدل‌های پیشنهادی نسبت به نتایج آزمایشگاهی

شماره مدل	R Square	میانگین خطای نسبی %	σ <sup>2</sup> واریانس	σ انحراف معیار
(۷)	۰/۸۹۵	۱/۵۶	۱/۱۹	۱/۰۹
(۸)	۰/۸۷۸	۱/۱۴	۰/۷۶	۰/۸۷
(۹)	۰/۸۸۵	۱/۴۴	۱/۴۲	۱/۱۹
(۱۰)	۰/۸۸۷	۱/۱۰	۰/۶۹	۰/۸۳
(۱۱)	۰/۹۳۷	۱/۰۸	۰/۹۷	۰/۹۸

خطای نسبی

$$\text{Error} = \frac{\text{Model Value} - \text{True Value}}{\text{True Value}} \times 100 \quad (12)$$

واریانس

$$\sigma^2 = \frac{\sum (xi - \bar{x})^2}{n} \quad (13)$$

انحراف معیار

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (xi - \bar{x})^2}{n}} \quad (14)$$

همچنین در جدول ۴ خطای مدل‌های پیشنهادی نسبت به نتایج آزمایشگاهی با استفاده از روش‌های مختلف محاسبه خطا و انحراف معیار مطابق روابط (۱۲) تا (۱۴) آورده شده است [۲۰].

#### ۴-۱- تحلیل مدل ضریب هدایت حرارتی

به‌منظور تحلیل و بررسی مدل ضریب هدایت حرارتی ارائه شده، در شکل ۱۱ نتایج کار حاضر با نتایج مدل ارائه شده طبق رابطه (۱۱) مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداکثر اختلاف مقادیر بدست آمده از مدل پیشنهادی و مقادیر تجربی پژوهش‌های پیشین ۲/۲ درصد است که مقدار رضایت‌بخشی است و اعتبار مدل بدست آمده را صحت‌گذاری می‌کند.

$$\frac{k_1}{k_2} = \exp \left[ A + B \frac{X_1}{X_2} + B \frac{Y_1}{Y_2} + C \frac{Z_1}{Z_2} \right] \quad (4)$$

$$\frac{k_1}{k_2} = \exp \left[ A \left( 1 + \frac{X_1}{X_2} \right)^a \left( 1 + \frac{Y_1}{Y_2} \right)^b \left( 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right)^c \right] \quad (5)$$

همبستگی داده‌ها توسط هر پنج رابطه بررسی گردید. مقدار R<sup>2</sup> که میزان پراکندگی رگرسیون به پراکندگی کل داده‌ها را نشان می‌دهد و از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد [۲۰].

$$R^2 = \frac{\left( n \sum XYZ - (\sum X) - (\sum Y) - (\sum Z) \right)^2}{\left( \sqrt{n(\sum X^2) - (\sum X)^2} \sqrt{n(\sum Y^2) - (\sum Y)^2} \sqrt{n(\sum Z^2) - (\sum Z)^2} \right)} \quad (6)$$

در رابطه فوق n تعداد داده‌ها و x، y و z متغیرهای مستقل است.

$$\begin{aligned} \frac{K_{nf}}{K_{bf}} &= 1.022 + (-2.799\varphi) + (1871.465\varphi^2) \\ &+ (-89754.879\varphi^3) + (0.002T) + \\ &(-4.948 \times 10^{-6}T^2) + (-6.991 \times 10^{-8}T^3) \\ &+ (-0.000309d) + (-6.934 \times 10^{-8}d^3) \end{aligned} \quad (7)$$

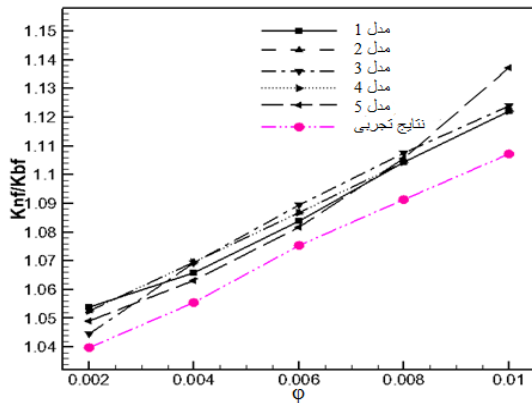
$$\begin{aligned} \frac{K_{nf}}{K_{bf}} &= 1.039920 \left( 1 + \frac{\varphi}{100} \right)^{8.066} \\ &\times \left( 1 + \frac{T}{60} \right)^{0.084} \left( 1 + \frac{d}{90} \right)^{-0.141} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{K_{nf}}{K_{bf}} = 1 + \left[ 1.059253 \times \varphi^{0.635} \left( \frac{T}{70} \right)^{0.467} \left( \frac{d}{100} \right)^{-0.848} \right] \quad (9)$$

$$\frac{K_{nf}}{K_{bf}} = \exp \left[ 0.038 + 0.059 \frac{T}{70} + 8.018\varphi - 0.099 \frac{d}{100} \right] \quad (10)$$

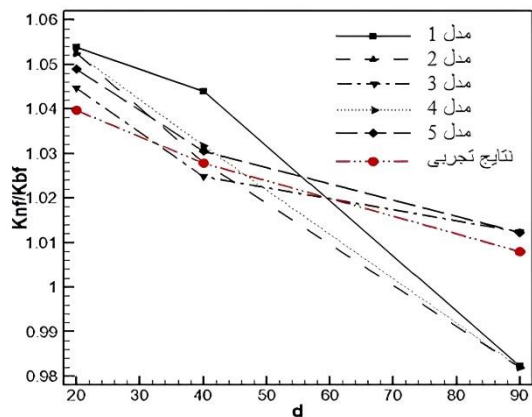
$$\begin{aligned} \frac{K_{nf}}{K_{bf}} &= \exp(0.04365) \left( 1 + \frac{\varphi}{100} \right)^{124.478} \\ &\times \left( 1 + \frac{T}{70} \right)^{1.341} \left( 1 + \frac{d}{100} \right)^{-2.781} \end{aligned} \quad (11)$$

از تحلیل داده‌ها R<sup>2</sup> روابط (۷) تا (۱۱) به ترتیب ۰/۸۹۵ و ۰/۸۷۸ و ۰/۸۸۵ و ۰/۸۸۷ و ۰/۹۳۷ حاصل شد. هر چه میزان R<sup>2</sup> به ۱



شکل ۱۳: نمودار مقایسه ضریب بهبود حرارتی ارائه شده توسط مدل‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی در کسرهای حجمی مختلف

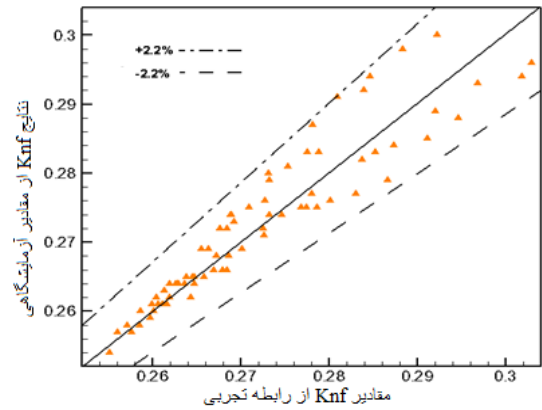
مدل‌های ارائه‌شده برای ضریب بهبود حرارتی در قطرهای مختلف برای نانوذره ZnO در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و کسر حجمی ۰/۲ درصد با هم مقایسه شده و نتایج در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با افزایش قطر مدل شماره ۱، ۲ و ۴ انحراف زیادی پیدا می‌کنند و نتایج آن‌ها تا حدودی غیرواقعی می‌گردد و نشان می‌دهد که نتایج ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از سیال پایه کمتر شده است. همچنین مدل شماره ۵ نتایج متناسب و همخوانی بیشتری با داده‌های تجربی دارد.



شکل ۱۴: نمودار مقایسه ضریب بهبود حرارتی ارائه شده توسط مدل‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی در قطرهای مختلف

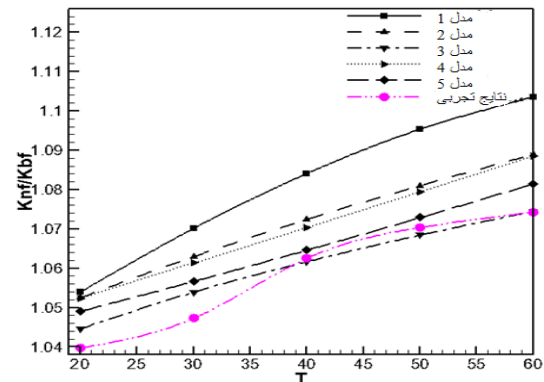
باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل نمودارها، مدل (۱۱) به‌عنوان مدل نهایی و پیشنهادی این پژوهش انتخاب و مجدد به شکل زیر بازنویسی می‌گردد.

$$\frac{K_{nf}}{K_{bf}} = \exp(0.04365 \left(1 + \frac{\varphi}{100}\right)^{124.478} \times \left(1 + \frac{T}{70}\right)^{1.341} \left(1 + \frac{d}{100}\right)^{-2.781}) \quad (11)$$



شکل ۱۱: نمایش ضریب هدایت حرارتی نتایج کار حاضر با نتایج مدل (۱۱)

همچنین در این بخش به مقایسه مدل‌های به‌دست‌آمده از نتایج تجربی و نتایج آزمایشگاهی پرداخته شده است. مدل‌های ارائه شده برای ضریب بهبود حرارتی در دماهای مختلف برای نانوذره ZnO در کسر حجمی ۰/۲ درصد و قطر ذرات ۲۰ نانومتر با هم مقایسه شده و نتایج در شکل ۱۲ نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که روابط به‌دست‌آمده از تطابق رضایت‌بخشی برخوردار هستند، ولی مدل شماره ۵ و شماره ۳ در این بخش نتایج مناسب‌تری دارند. البته روابط با افزایش دما انحراف بیشتری پیدا می‌کنند. بیشترین انحراف مربوط به مدل اول با حدود ۲ درصد و کمترین انحراف مربوط به مدل سوم با حدود ۰/۲۵ درصد نسبت به نتایج تجربی است.



شکل ۱۲: نمودار مقایسه ضریب هدایت حرارتی ارائه شده توسط مدل‌های مختلف با نتایج آزمایشگاهی در دماهای مختلف

مدل‌های ارائه شده برای ضریب بهبود حرارتی در کسر حجمی مختلف برای نانوذره ZnO در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و قطر ذرات ۲۰ نانومتر با هم مقایسه شده و نتایج در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

۴. از مقایسه روابط موجود جهت تخمین ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات و نتایج حاصل شده از آزمایش مشخص گردید که اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و نیمه تجربی با افزایش دما و افزایش کسر حجمی بیشتر می شود. همچنین روابط موجود رفتار ضریب هدایت حرارتی را به خوبی می توانند مدل کنند.

#### ۶- منابع

- [1] S.U.S. Choi and J.A. Eastman, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles," in ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, San Francisco, CA, Nov. 12–17, 1995.
- [2] S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li, and J.A. Eastman, "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles," *J. Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 280–288, 1999, doi: [10.1115/1.2825978](https://doi.org/10.1115/1.2825978)
- [3] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, and N. Hishinuma, "Altration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles," *Netsu Bussei*, Vol. 4, 1993.
- [4] Y. Xuan and Q. Li, "Heat transfer enhancement of nanofluids," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 21, pp. 58–64, 2000, doi: [10.1016/S0142-727X\(99\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00067-3)
- [5] P. Keblinski, S.R. Phillpot, S.U.S. Choi, and J.A. Eastman, "Mechanics of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluid)," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 855–863, 2002, doi: [10.1016/S0017-9310\(01\)00175-2](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00175-2)
- [6] X. Wang, X. Xu, and S.U.S. Choi, "Thermal Conductivity of Nanoparticle–Fluid Mixture," *J. Thermophys. Heat Transfer*, Vol. 13, No. 4, pp. 474–480, Oct. 1999, doi: [10.2514/2.6486](https://doi.org/10.2514/2.6486)
- [7] S.U.S. Choi, Z.G. Zhang, W. Yu, F.E. Lockwood, and E.A. Grulke, "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspension," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, pp. 2252–2254, 2001, doi: [10.1063/1.1408272](https://doi.org/10.1063/1.1408272)
- [8] X.F. Li, D.S. Zhu, X.J. Wang, N. Wang, J.W. Gao, and H. Li, "Thermal conductivity enhancement dependent PH and chemical surfactant

این مدل برای پیش بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید روی/اتیلن گلیکول در محدوده های  $100 \text{ nm} < d < 10 \text{ nm}$  و  $60^\circ\text{C} < T < 200^\circ\text{C}$  و  $\phi < 0.02$  ارائه شده است.

#### ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به مطالعه آزمایشگاهی ضریب هدایت گرمایی نانوسیال اکسید روی/اتیلن گلیکول پرداخته شد و پارامترهای دما، قطر ذرات و کسر حجمی لحاظ شده است. در این تحقیق برای آماده سازی نانوسیال اتیلن گلیکول/اکسید روی از روش دومرحله ای استفاده شد و به منظور آماده سازی نانوسیال به وسیله پراکنده کردن نانوذرات در سیال پایه، از دستگاه مخصوص همزن اولتراسونیک استفاده می شود. از روش سیم داغ گذرا (THW)، و به کارگیری پاراب KS1 دستگاه KD2-Pro، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بررسی می گردد. سپس با استفاده از نتایج و مقادیر تجربی به دست آمده، مدل های تجربی چندمتغیره، به منظور تخمین ضریب هدایت حرارتی با لحاظ کردن پارامترهای مورد بررسی در این آزمایش ارائه شد و در انتها حاشیه انحراف مدل پیشنهادی با داده های تجربی موجود مورد سنجش قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد.

۱. در تمام دماها با افزایش کسر حجمی افزایش در ضریب هدایت گرمایی مشاهده شد.

۲. افزایش دما در کسرهای حجمی مختلف از نانوذرات، افزایش در ضریب هدایت گرمایی را به دنبال دارد که می توان دلیل آن را سست شدن پیوندهای بین مولکولی و افزایش حرکت براونی و همچنین تداخل بیشتر نانولایه های ایجاد شده در اطراف ذرات دانست. با افزایش دما سیال قابلیت حرارتی بیشتری پیدا می کند. البته این افزایش دما تا زمانی باعث افزایش ضریب هدایت گرمایی می شود که ذرات از حالت پایدار خارج نشده و پیوندهای ایجاد شده بین ذرات و سیال از بین نروند.

۳. افزایش کسر حجمی به دلیل تراکم بیشتر ذرات معلق جامد در حجم معین باعث افزایش ضریب هدایت گرمایی می شود. زیرا این ذرات نسبت به سیال پایه ضریب هدایت گرمایی بالاتری دارند. بیشترین افزایش در ضریب هدایت گرمایی مربوط به بیشترین دما و بیشترین کسر حجمی و کمترین قطر حدود ۱۸ درصد گزارش می شود.

Experimental Techniques, Vol. 47, No. 1, pp. 83–90, 2023, doi: [10.1007/s40799-022-00567-4](https://doi.org/10.1007/s40799-022-00567-4)

[15] M. Salari, M.R. Assari, A. Ghafouri, and N. Pourmahmoud, "Empirical correlations for thermal conductivity and dynamic viscosity of MgO-EG," Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 43, art. 111, 2021, doi: [10.1007/s40430-020-02773-w](https://doi.org/10.1007/s40430-020-02773-w)

[16] A. Ghafouri, M. Salari, and A. Falavand Jozaei, "Effect of variable thermal conductivity models on the combined convection heat transfer in a square enclosure filled with a water–alumina nanofluid," Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Vol. 58, No. 1, pp. 103–115, 2017, doi: [10.1134/S0021894417010126](https://doi.org/10.1134/S0021894417010126)

[17] N. Pourmahmoud, A. Ghafouri, and I. Mirzaee, "Thermal performance analysis of nanofluid thermal conductivity models in a cooling chamber," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 31, No. 1, pp. 28–38, 2017, doi: [10.2514/1.T4658](https://doi.org/10.2514/1.T4658)

[18] A. Yaghoubi and H. Pourmirzaagha, "Experimental study of heat transfer enhancement in Peugeot 206 automobile radiator using oxide nanofluids," Science and Technology in Mechanical Engineering, Vol. 4, No. 1, pp. 1–17, 2025. (in Persian)

[19] M.H. Esfe and S. Saedodin, "Experimental investigation and proposed correlations for temperature-dependent thermal conductivity enhancement of ethylene glycol based nanofluid containing ZnO nanoparticles," Journal of Heat and Mass Transfer Research, Vol. 1, No. 1, pp. 47–54, 2014, doi: [10.22075/JHMTR.2014.153](https://doi.org/10.22075/JHMTR.2014.153)

[20] J. Topping, Errors of Observation and Their Treatment, Springer, Dordrecht, 2012, doi: [10.1007/978-94-011-6928-8](https://doi.org/10.1007/978-94-011-6928-8)

for Cu-H<sub>2</sub>O nanofluids," Thermochimica Acta, Vol. 469, pp. 98–103, 2008, doi: [10.1016/j.tca.2008.01.008](https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.01.008)

[9] S.K. Das, N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel, "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids," J. Heat Transfer, Vol. 125, pp. 567–574, 2003, doi: [10.1115/1.1571080](https://doi.org/10.1115/1.1571080)

[10] M.H. Esfe, H. Hajmohammad, S.M. Motallebi, and D. Toghraie, "Cost and efficiency optimizations of ZnO/EG nanofluids using non-dominated sorting genetic algorithm coupled with a statistical method," Korean Journal of Chemical Engineering, Vol. 41, No. 1, pp. 175–186, 2024, doi: [10.1007/s11814-023-00003-2](https://doi.org/10.1007/s11814-023-00003-2)

[11] K.M. Yashawantha and A. Venu-Vinod, "ANFIS modelling of effective thermal conductivity of ethylene glycol and water nanofluids for low temperature heat transfer application," Thermal Science and Engineering Progress, Vol. 24, art. 100936, 2021, doi: [10.1016/j.tsep.2021.100936](https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100936)

[12] R. Surakasi, J. Sagari, K.B. Vinjamuri, B. Sanduru, and S. Vadapalli, "Stability and Thermo-Physical Properties of Ethylene Glycol Based Nanofluids for Solar Thermal Applications," International Journal of Heat & Technology, Vol. 39, No. 1, pp. 137–144, 2021, doi: [10.18280/ijht.390114](https://doi.org/10.18280/ijht.390114)

[13] B. Rahmati-Nejad and F. Azimpour-Shishvan, "Enhancement of nanofluid stability and its estimation methods," Science and Technology in Mechanical Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 7–19, 2023, doi: [10.22034/stme.2023.162633](https://doi.org/10.22034/stme.2023.162633) (in Persian)

[14] M.M. Rashidi, M. Alhuyi Nazari, I. Mahariq, and N. Ali, "Modeling and sensitivity analysis of thermal conductivity of ethylene glycol-water based nanofluids with alumina nanoparticles,"