



## Experimental Investigation on Convective Heat Transfer in Car Radiator Using Nanofluids

S. A. H. Zamzamian<sup>1\*</sup>, A. Shafiefarhood<sup>2</sup>, O. Tavakoli<sup>3</sup>

1- Associate Professor of Chemical Engineering, Materials and Energy Research Center (MERC)

2- M. Sc. in Chemical Engineering, University of Tehran

3- Associate Professor of Chemical Engineering, University of Tehran

Email: [azamzamian@merc.ac.ir](mailto:azamzamian@merc.ac.ir)

### Abstract

*In This study, an experimental study has been carried out to investigate the effect of adding Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al, and Cu nanoparticles to the base fluid (water) on enhancement of heat transfer and heat transfer coefficients in a car radiator. The experiments have been done for distilled water and 3 types of nanofluids with different concentrations (0.5, 1 and 2 vol. %) and in various operational conditions (temperature, flow rate, etc.). Thermal Conductivities of these fluids have been measured experimentally and other thermo-physical properties like density and viscosity are calculated using related models. Results depicted that addition of nanoparticles to the base fluid increases its thermal conductivity, density and viscosity, and decreases its specific heat capacity. The performance evaluation of nanofluids in a radiator system showed that will dramatically enhances the heat transfer and decreases the heat transfer area required, so it is highly recommended to use them in such systems.*

Received: 9 May 2023

Accepted: 11 July 2024

Page Number: 8-30

### Keywords:

Car Radiator,  
Nanofluid,  
Heat Transfer,  
Heat Conduction

### Please Cite this Article Using:

Zamzamian, S. A. H., Shafiefarhood, A., & Tavakoli, O. (2025). Experimental Investigation on Convective Heat Transfer in Car Radiator Using Nanofluids. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(139), 8-30, [In Persian].



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).



## بررسی تجربی انتقال حرارت جابه‌جایی در سامانه رادیاتور خودرو به وسیله نانو سیالات

سید امیرحسین زمزمیان<sup>۱\*</sup>، آریا شفیع فرهود<sup>۲</sup>، امید توکلی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار مهندسی شیمی، پژوهشگاه مواد و انرژی

۲- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

۳- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

پیام نگار: [azamzajian@merc.ac.ir](mailto:azamzajian@merc.ac.ir)

### چکیده

در این پژوهش، اثرات ناشی از معلق‌سازی نانوذراتی شامل آلومینیوم و مس پایه‌فلزی و آلومینای نوع گاما در آب مقطر به‌عنوان سیال عامل رادیاتور خودرو و در میزان بهبود شار انتقال حرارت به‌صورت تجربی ارزیابی شده‌است. بدین ترتیب آزمایش‌ها برای سیال پایه‌آب‌مقطر و هم‌چنین ۳ نوع نانو سیال با غلظت‌های مختلف ۰/۵، ۱ و ۲ درصد حجمی و در شرایط عملیاتی متفاوت عوامل تغییر-مشمول بر درجه حرارت، شدت جریان و سرعت پره‌های فن رادیاتور خودرو-انجام شده‌است. در این شرایط، ضریب هدایت حرارتی سیال پایه‌خالص و نانو سیالات به‌صورت تجربی اندازه‌گیری شده و سایر خواص فیزیکی شامل چگالی و گرانروی با استفاده از مدل‌های ارائه‌شده، حساب شده‌است. نتایج نشان داده که افزودن نانوذرات ضریب هدایت حرارتی، چگالی و گرانروی نانو سیالات را افزایش و گرمای ویژه آن‌ها را کاهش می‌دهد. لذا؛ نانو سیالات در رادیاتور خودرو به‌طور چشم‌گیر باعث افزایش انتقال حرارت و کاهش سطح انتقال حرارت مورد نیاز شده‌است. در نتیجه، کاربرد این نوع سیالات در رادیاتور توصیه می‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۱

شماره صفحات: ۸ تا ۳۰

### کلیدواژه‌ها:

رادیاتور خودرو،

نانو سیال،

انتقال حرارت،

هدایت حرارتی

\* کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده انرژی، گروه پژوهشی انرژی خورشیدی

استناد به مقاله:

زمزمیان، سید امیرحسین، شفیع فرهود، آریا، و توکلی، امید. (۱۴۰۴). بررسی تجربی انتقال حرارت جابه‌جایی در سامانه رادیاتور خودرو به‌وسیله نانو سیالات، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۴ (۱۳۹)، ۳۰-۸.

## ۱. مقدمه

بررسی میزان بهبود در شار حرارتی و یا توانایی تبادل گرما یکی از ملاحظات اساسی در صنایع تلقی می‌شود. بدین منظور، با بهبود بازده مبدل‌های حرارتی هم‌چنین تلفات انرژی کاهش می‌یابد؛ لذا میزان مصرف حامل‌های انرژی نیز کمتر خواهد شد. یکی از نظرهای قابل توجه در مطالعات علمی ده‌های اخیر، تولید و کاربرد سیال عامل انتقال حرارت با توانایی افزایش در ظرفیت‌های حرارتی آن است. نظر به این‌که ضریب هدایت حرارتی به‌عنوان شاخص اولیه در شناسایی شدت تبادل گرمایی در مواد مختلف است، از طرفی چون ضریب انتقال حرارت جامدات و به‌خصوص فلزات بسیار بیشتر از سیالات معمول و متداول انتقال حرارت است؛ بنابراین مایعات صنعتی حاوی ذرات جامد کاملاً معلق، شاخص ضریب هدایت حرارتی بالاتری نسبت به سیالات خالص از خود نشان می‌دهد. جدول (۱) ضریب هدایت حرارتی تعدادی از مایعات و جامدات مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱. ضریب هدایت حرارتی تعدادی از جامدات و مایعات [۴].

Table 1. Thermal conductivity coefficient of solids and liquids [4].

Physical State	Material	Thermal Conductivity Coefficient (W/m. K)
Metallic Solids	Copper	401
	Silver	429
	Aluminum	237
Non-Metallic Solids	Diamond	3300
	Carbon Nanotubes	3000
	Silicon	148
	Alumina	40
Metallic Liquids	Mercury	8.3
Non-Metallic Liquids	Water	0.613
	Ethylene Glycol	0.253
	Engine Oil	0.145

عملکرد تبادلگر حرارتی در صورت افزایش جمله  $\frac{UA}{L}$  که در آن  $U$  ضریب کلی انتقال حرارت،  $A$  سطح انتقال حرارت و  $L$  طول مبدل است، افزایش می‌یابد. این امر برای دستیابی به یکی از سه هدف پیش رو ممکن می‌شود:

## ۱. کاهش سایز مبدل

۲. افزایش حاصل ضرب ضریب کلی انتقال حرارت در سطح انتقال حرارت (U.A)

۳. کاهش قدرت مورد نیاز پمپاژ برای انتقال حرارت ثابت

یک نوع از این افزودنی‌ها شامل معلق‌سازی ذرات ریز جامد در داخل سیال پایه است که در واقع در تحقیقات چنددهه گذشته، استفاده از نانوذرات جامد به‌عنوان افزودنی مایعات به‌منظور افزایش انتقال حرارت بسیار محل توجه بوده است.

پراکنده‌سازی ذرات معلق، فرایندی است که طی آن ذرات در یک فاز کاملاً پیوسته پراکنده می‌شود. مواد فعال‌کننده سطحی یا سورفکتانت‌ها تا حد زیادی باعث بهبود پایداری سوسپانسیون‌های حاوی ذرات ریز جامد می‌شوند که با توجه به این موضوع، برخی از این مواد فعال‌کننده سطح عبارت است از: تیول‌ها [۱] و اسید اولئیک [۳-۲]. در مطالعات پاک و چو [۴]، ژوان و لی [۵]، بهبود قابل ملاحظه در ضریب هدایت حرارتی به دلیل پراکنده‌گری کاملاً یک‌نواخت نانوذرات اعلام شده است. البته پژوهش‌های دیگری نیز به اهمیت اندازه ذرات پرداخته است [۶]. در مطالعات کامل‌تری سازوکار بالقوه در بهبود ضریب هدایت حرارتی، انتقال انرژی ناشی از برخورد ذرات در درجه حرارت‌های بالاتر با ذرات در دمای پایین‌تر گزارش شده است [۷-۸]. متداول‌ترین روش اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات روش سیم داغ انتقالی<sup>۱</sup> است [۹]. با توجه به این‌که بیشتر نانوسیالات، هادی جریان الکتریسیته هستند، کاربرد روش سیم داغ انتقالی تا حدی مشکل‌ساز خواهد شد. برای رفع این مشکل ناگاساکا و ناگاشیما [۱۰] روش بهبود یافته سیم داغ انتقالی را ارائه کردند. روش دمای نوسانی<sup>۲</sup> و روش حالت پایدار<sup>۳</sup> از دیگر روش‌های اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات هستند.

اولین اندازه‌گیری‌های تجربی با نانوسیالات بر پایه نانوذرات اکسیدی انجام گرفته است [۱۱-۱۲]. اما مطالعات نانوسیالات حاوی نانوذرات مس پایه‌فلزی را نخستین بار ایستمن و همکاران [۱۳] انجام دادند که قابلیت بیشتری نسبت به نانوذرات اکسیدی دارد. البته آزمایش‌های تجربی نشان داده که تغییرات ضریب هدایت حرارتی با غلظت کاملاً

1. Surfactant  
2. Transient Hot Wire  
3. Oscillating Temperature  
4. Steady-State

همکاران [۲۴] گزارش شده که همگی نشان داده‌اند که با گذشت زمان اثرات افزایش قطر و اندازه نانوذرات و پدیده کلوخه‌ای شدن ذرات باعث کاهش ضریب هدایت حرارتی شده‌است. لی و پترسون [۲۵]، تعدادی آزمایش تجربی برای بررسی اثر تغییر دما و کسر حجمی بر روی هدایت حرارتی مؤثر در سوسپانسیون‌های شامل CuO با ابعاد ۲۹ نانومتری و  $Al_2O_3$  با اندازه ذرات ۳۶ نانومتری در آب انجام دادند. نتایج نشان داد که جنس نانوذره، قطر، کسر حجمی و دمای بالک، اثر مهمی در هدایت حرارت نانوسیال دارند. به‌عنوان مثال، در سوسپانسیون آب  $-Al_2O_3$ ، افزایش دمای متوسط از ۲۷ به ۳۴/۷ درجه سلسیوس، باعث افزایش تقریباً سه‌برابری ضریب هدایت حرارتی می‌شود. البته مطالعات دیگری نیز بهبود حدود ۶۰ درصد در میزان شاخص هدایت حرارتی سیال پایه‌آب حاوی نانوذرات اکسید مس به غلظت ۵٪ حجمی اعلام شده‌است [۲۶]. خلاصه نتایج آزمایشگاهی تعدادی از پژوهش‌ها و مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده مختلف در جدول (۲) ارائه شده‌است.

غیرخطی است [۱۴] و مطالعات دیگری نیز همین رفتار غیرخطی را در نانوسیالات مختلف مانند اکسید تیتانیوم بر پایه آب نشان داده‌است [۱۵-۱۶]. در بررسی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات مختلف میزان بهبود در ضریب هدایت حرارتی متناسب با غلظت نانوذرات گزارش شده، لیکن وابستگی چندان زیادی به سیال پایه نداشته‌است [۱۷]. این در حالی است که شکل و اندازه نانوذرات نیز تأثیر قابل توجهی در میزان بهبود در انتقال حرارت داشته‌است. البته موضوع وابستگی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات بر پایه آلومینا و اکسید مس به درجه حرارت نیز تاکنون اعلام شده‌است [۱۸]. به‌طوری که این تابعیت به درجه حرارت و اندازه نانوذرات به‌وسیله چوی و همکاران [۱۹] مشاهده شده و یا در مطالعات ایوانز و همکاران [۲۰] با روش مونت کارلو میزان به‌هم‌چسبیدن نانوذرات و اثرات ناشی از مقاومت حرارتی بین سطحی ارزیابی شده‌است. اثرات کلوخه‌شدن نانوذرات بر روی ضریب هدایت حرارتی در پژوهش‌های کارتیکیان و همکاران [۲۱] و مطالعات دیگری نیز همانند چوپکار و همکاران [۲۲] و میرمعصومی و بهزادمهر [۲۳] یا ماسودا و

#### جدول ۲. نتایج مطالعات تجربی بر روی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات.

Table 2. The results of experimental studies on the thermal conductivity coefficient of nanofluids.

Reference	Nano- Material	Size (nm)	Concentration (vol.%)	Thermal Results
Hwang et al. [27]	$Al_2O_3$ /Water	30	0.01-0.3	k increased with $\phi$ (up to 1.44%)
Kole and Dey [38]	$Al_2O_3$ /Engine coolant	<50	0.1-3.5	k increased with $\phi$ (up to 10%) k increased with T (9-12%)
Sunder et al. [28]	$\gamma-Al_2O_3$ /Water	47	0.2-0.8	k increased with $\phi$ (up to 6.5%)
Chandrasekar and Bose [36]	$Al_2O_3$ /Water	43	0.33-5	k increased with $\phi$ (up to 8%)
Sommers and Yerkes [39]	$Al_2O_3$ /Water	10	0.5-3 wt%	k increased with $\phi$ (up to 10%)
Beck et al.[40]	$Al_2O_3$ /EG	20	0.92-3.99	Same enhancement behavior for NF with BF k increased with $\phi$ (up to 13%)
Wong and Kurma [41]	$Al_2O_3$ /Water	36	3-8.5	k increased with $\phi$ (up to 22%) k increased with T
Timofeeva et al. [30]	$Al_2O_3$ /Water/EG		0-8.5	k increased with $\phi$ (up to 30%, cylinder>bricks>blades=platelets) k decreased with pH
Teng et al. [42]	$Al_2O_3$ /Water	20, 50, 100	0.5-2 wt%	k decreased with particle size (more in higher T) k increased with T (more in higher particle size)
Xie et al. [17]	$Al_2O_3$ /Water/EG	12.2-302		k increased with difference between pH and isoelectric point k enhancement with base fluid k k increased with $\phi$ almost linearly(up to 30%)
Patel et al. [37]	$Al_2O_3$ CuO Al	11-45-150 31 80	0-3	k increased with T (more in smaller nanoparticles, nonlinear) k increased with $\phi$ (more linear in low $\phi$ )

Reference	Nano- Material	Size (nm)	Concentration (vol.%)	Thermal Results
	Cu	80		k decrease with nanoparticle size (more in smaller sizes) k enhancement decrease with increase in $\phi$ bigger k enhancement with metallic nanoparticles
Duangthongsuk and Wongwises [43]	TiO <sub>2</sub> /Water	21 nm	0.2-2	k increase with T & $\phi$ (up to 6%)
Choi et al. [7]	CNT/Poly Alpha Olefin Oil	25*5e4	0-1	k increased with $\phi$ (up to 150%)
Li et al. [44]	Cu/Water	25	0-0.1	k-pH curve had a maximum (unique pH) k increased with addition of small amount of SDBS
Eastman et al. [7]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /water	33	5	k increased with $\phi$ (up to 29%)
	CuO/water	36	5	k increased with $\phi$ (up to 60%)
	Cu/oil	35	0.052	k increased with $\phi$ (up to 44%)
Lee et al. [11]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /EG	38	4	k increased with $\phi$ (up to 18%)
	CuO/EG	23.6	5	k increased with $\phi$ (up to 22%)
Wang et al. [17]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /water	28	3	k increased with $\phi$ (up to 12%)
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /EG		5	k increased with $\phi$ (up to 26%)
Xuan and Li [29]	Cu/water	100	5	k increased with $\phi$ (up to 54%)
Eastman et al. [11]	Cu/EG	<10	0.3	k increased with $\phi$ (up to 40%)
	CuO/EG	35	4	k increased with $\phi$ (up to 22%) greater k enhancement with thioglycolic acid
Wang et al. [44]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /EG	29	4	k increased with $\phi$ (up to 18%)
	TiO <sub>2</sub> /EG	40	5	k increased with $\phi$ (up to 13%)
Wang et al. [44]	CuO/DIW	50	0.4	k increased with $\phi$ (up to 17%)
Xuan and Li [5]	Cu/water	10	3	k increased with $\phi$ (up to 70%)
Patel et al. [37]	Au/toluene	10-20	0.008	k increased with $\phi$ (up to 5.5%)
Kumar et al. [37]	Au/water	4	0.00013	k increased with $\phi$ (up to 20%)
Murshed et al. [15]	TiO <sub>2</sub> /DIW	15	5	k increased with $\phi$ (up to 30%)
	TiO <sub>2</sub> /DIW	10-40	5	k increased with $\phi$ (up to 33%)
Hong et al. [12]	Fe/EG	10	0.55	k increased with $\phi$ (up to 18%)
Kwak and Kim[45]	CuO/EG	12	1	k increased with $\phi$ (up to 6%)
Li and Peterson[25]	CuO/water	29	6	k increased with $\phi$ (up to 52%)
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /water	36	10	k increased with $\phi$ (up to 30%)
Zhu et al. [46]	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /water	10	4	k increased with $\phi$ (up to 38%)
Hwang et al. [27]	CuO/EG	35.4	1	k increased with $\phi$ (up to 9%)
Xuan et al. [29]	Cu/water	35.4	2	k increased with $\phi$ (up to 24%)
Murshed et al. [15]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /DIW	80	5	k increased with $\phi$ (up to 24%)
Liu et al. [47]	CuO/EG	29	5	k increased with $\phi$ (up to 23%)
Krishnamurthy et al. [48]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /water	20	1	k increased with $\phi$ (up to 16%)
Wen and Ding [49]	TiO <sub>2</sub> /water	34	0.66	k increased with $\phi$ (up to 6%)
Putnam et al. [50]	Au/ethanol	4	0.018	k increased with $\phi$ (up to 1.3± 0.8%)
Kang et al. [51]	Diamond/EG	30-40	1.32	k increased with $\phi$ (up to 75%)
	Ag/water	8-15	0.4	k increased with $\phi$ (up to 11%)
Murshed et al. [15]	TiO <sub>2</sub> (15)/EG	15	5	k increased with $\phi$ (up to 18%)
	Al (80)/EG	80	5	k increased with $\phi$ (up to 45%)

هم‌چنین مهم‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های بیان‌شده، به‌همراه تعدادی دیگر از مدل‌های تأییدشده در جدول (۳) خلاصه شده‌است.

جدول ۳. مدل‌های ارائه‌شده برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات.

Table 3. Presented models for thermal conductivity coefficient of nanofluids.

Model	Equation	Remarks
Pak and Cho [4]	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = (1 + 7.47\phi)$	
Maxwell [31]	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_s + 2k_{bf} + 2\phi(\Delta k)}{k_s + 2k_{bf} - \phi(\Delta k)}$ $\Delta k = k_s - k_{bf}$	For solid-liquid suspensions
Maxwell-Garnett [32]	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + \frac{(1 + 2\alpha) + 2\phi(1 - \alpha)}{(1 + 2\alpha) - \phi(1 - \alpha)}$ $\alpha = 2R_b k_{bf} / d$	
Hamilton-Crosser [33]	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + \frac{3\phi(k_p - k_{bf})}{k_p + 2k_{bf} - \phi(k_p - k_{bf})}$ $\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_p + (n - 1)k_{bf} + (n - 1)(k_p - k_{bf})\phi}{k_p + (n - 1)k_{bf} - (k_p - k_{bf})\phi}$	Sphere: n=3 Cylinder: n=6
Bruggman [34]	$k_{eff} = \frac{k_b}{4} [(3\phi - 1)k_p + (2 - 3\phi)k_b] + \frac{k_b}{4} \sqrt{\Delta}$ $\Delta = \left[ (3\phi - 1)^2 \left(\frac{k_p}{k_b}\right)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2) \left(\frac{k_p}{k_b}\right) \right]$	
Webber [35]	$k = 3.59 \times 10^{-9} C_p \rho \left(\frac{\rho}{M}\right)^{1/3}$	For liquids
Jeffrey A. Eastman [13]	$k_{eff} = k_b \left[ 1 + 3\beta\phi + \left( 3\beta^2 + \frac{3\beta^2}{4} + \frac{9\beta^2}{16} \frac{\alpha + 2}{2\alpha + 3} + \dots \right) \phi^2 \right]$	
Chandrasekar [36]	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \left(\frac{C_{p,nf}}{C_p}\right)^a \left(\frac{\rho_{nf}}{\rho}\right)^b \left(\frac{M}{M_{nf}}\right)^c$	
Yu and Choi [14]	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_{pe} + 2k_{bf} + 2(k_{pe} - k_{bf})(1 + \beta)^3 \phi}{k_{pe} + 2k_{bf} - (k_{pe} - k_{bf})(1 + \beta)^3 \phi}$ $\frac{k_{pe}}{k_p} = \frac{[2(1 - \gamma) + (1 + \beta)^3(1 + 2\gamma)]\gamma}{-(1 - \gamma) + (1 + \beta)^3(1 + 2\gamma)}$	Based on Maxwell Eq. and ordered layer theory $\beta = \frac{\text{ordered layer thickness}}{\text{nanoparticle radius}}$ $\gamma = \frac{k_{\text{ordered layer}}}{k_{\text{nanoparticle}}}$
Kumar et al. [37]	$\frac{k_{nf} - k_{bf}}{k_{bf}} = C \cdot u_p \frac{r\phi}{k_{bf} r_p (1 - \phi)}$ $u_p = \frac{8\kappa_b T}{\pi \eta r_p^2}$	Considering Brownian motion $r$ = radius of base fluid molecules $r_p$ = radius of nanoparticles
Prasher [20]	$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = (1 + \text{Ar} \text{e}^{\text{mPr}^{0.003}} \phi) \left[ \frac{(1 + 2\alpha) + 2\phi(1 - \alpha)}{(1 + 2\alpha) - \phi(1 - \alpha)} \right]$ $\alpha = \frac{2R_b k_{bf}}{d_N}$	
Li and Peterson [25]	$\frac{k_{nf} - k_{bf}}{k_{bf}} = 0.764481464\phi + 0.018688867(T - 273.15) - 0.462147175$	
Koo and Kleinstreuer [8]	$k_{nf} = k_{bf} \frac{k_s + 2k_{bf} + 2\phi(\Delta k)}{k_s + 2k_{bf} - \phi(\Delta k)} + 5 \times 10^4 \beta \phi \rho_{bf} C_{p,bf} \sqrt{\frac{\kappa T}{\rho_p d_p}} f(T, \phi)$ $f(T, \phi) = (2.8217 \times 10^{-2} \phi + 3.917 \times 10^{-3}) \frac{T}{T_0} + (-3.0669 \times 10^{-2} \phi - 3.91123 \times 10^{-3})$	

تجربی انجام گرفته‌است [۵۲]. هم‌چنین در تحقیق سجادی و توکلی [۵۳] تعداد یازده مدل برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات در سامانه حاوی آب و نانوذرات اکسید تیتانیوم و مقایسه

برای ملاحظه اثرات نانوسیالات روی شار حرارتی در جریان‌هایی با هندسه‌های مختلف مانند ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال در مبدل‌های حرارتی دولوله‌ای و صفحه‌ای نیز بررسی‌های

## ۲. مواد و روش‌ها

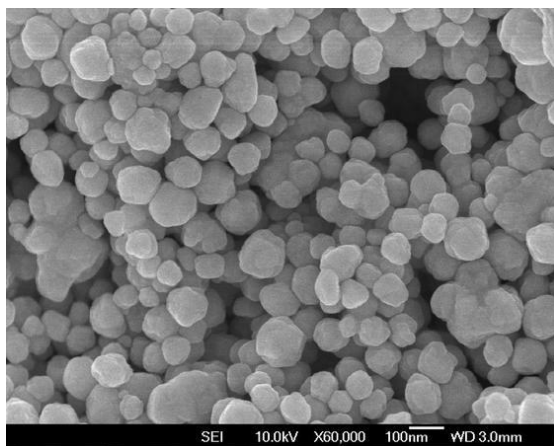
نانوسیالات مورد نظر از شرکت پیام‌آوران نانوفناوری فردانگر<sup>۱</sup> خریداری شد. خواص فیزیکی نانوذرات مورد استفاده به‌طور خلاصه در جدول (۴) ارائه شده‌است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانوذرات مس و اکسید آلومینیوم نیز به‌عنوان نمونه در شکل (۱) آمده‌است. علاوه‌بر نانوسیالات ذکر شده در بالا از آب مقطر نیز برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد تا مقدار افزایش انتقال حرارت در اثر افزودن نانوذرات قابل اندازه‌گیری باشد. برای بررسی عملکرد انتقال حرارتی رادیاتور با استفاده از نانوسیالات، یک سامانه آزمایشی مطابق طرحواره شکل (۲-ا) طراحی و ساخته شده‌است. برای ارزیابی کردن نتایج، ابتدا آزمایش‌ها برای جریان آب مقطر و سپس برای نانوسیالات انجام گرفت. تصویر دستگاه‌ها و اجزای مختلف مجموعه آزمایشگاهی در شکل (۲-ب) نشان داده شده‌است. سامانه آزمایشی متشکل از یک مدار برای جریان سیال پایه و نانوسیالات مربوطه است که از بخش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری دما و دبی جریان و تنظیم دبی و دمای ورودی به رادیاتور تشکیل شده‌است.

نتایج محاسبات با نتایج آزمایشگاهی موجود در مقالات پرداخته شده‌است. نقش نانوسیالات به‌عنوان عامل خنک‌کننده در رادیاتور و سامانه روغن موتور و مشکلات احتمالی کاربرد آن بحث و بررسی شده‌است [۵۴]. بررسی تئوری‌های مختلف در مورد نانوسیالات، نشان داده که ضریب هدایت حرارتی با کاهش اندازه ذرات، افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، اثرات سازوکارهای حرکت نانوذرات و سوسپانسیون‌های رقیق مانند حرکت براونی، ترموفورز و اسموفورز به‌صورت تئوری روی ضریب هدایت حرارتی به‌دست علی‌اصغر حمیدی و همکاران [۵۵] بررسی شده‌است. بدین ترتیب، در این مطالعه اثرات ناشی از کاربرد نانوسیالات فلزی و نیز اکسید فلزی بر پایه آب در بهبود عملکرد رادیاتور خودرو ملاحظه و بررسی شده‌است. در این تحقیق از نانوذرات مس و آلومینیوم به‌عنوان فلز و از نانوذره اکسید آلومینیوم به‌عنوان اکسید فلز برای تولید نانوسیال استفاده شده‌است. بر این اساس، برای افزایش ضریب انتقال حرارت استفاده از نانوسیالات مختلف مطالعه شده‌است.

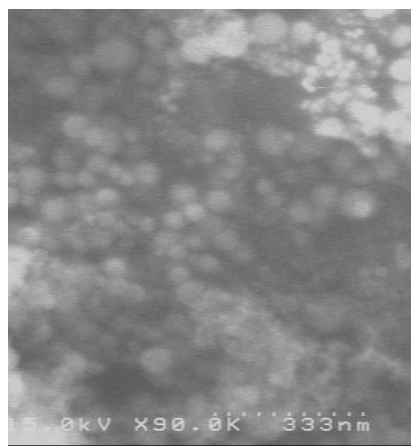
## جدول ۴. خواص فیزیکی نانوذرات مورد استفاده.

Table 4. Nanoparticles Physical Properties.

Nanomaterial	Real Density (g/cm <sup>3</sup> )	Bulk Density (g/cm <sup>3</sup> )	Morphology	Specific Surface Area (m <sup>2</sup> /g)	Average particle size (nm)	Purity (%)	Color
Copper	8.954	0.23	Spherical	10-20	50-80	99+	Dark Brown
Aluminum	2.707	0.6	Spherical	6-10	70	99.9	Gray
Alumina	3.6	-	Spherical	200 ≤	60	99+	White



(a)

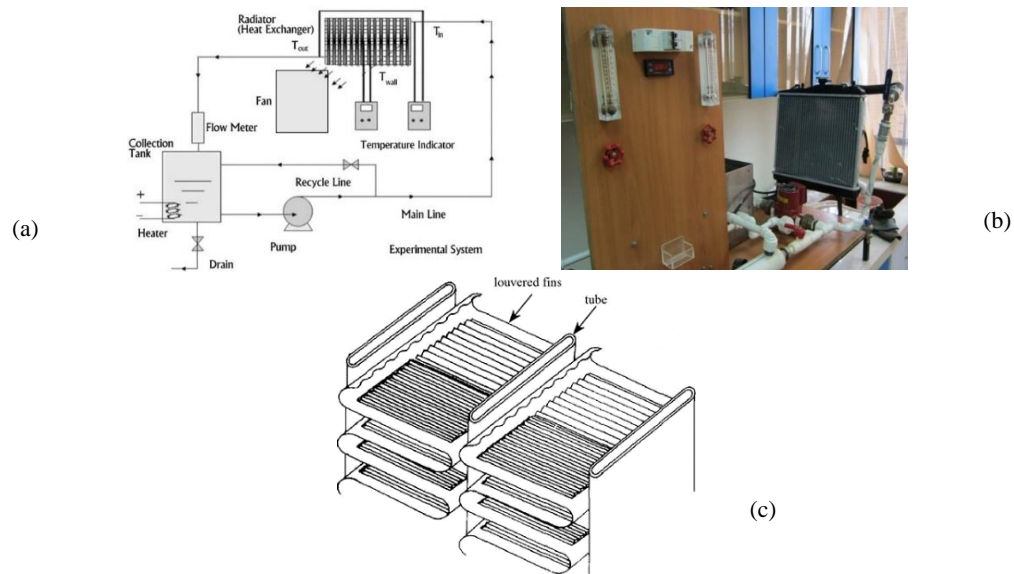


(b)

شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی (a) نانوذرات مس، (b) نانوذرات اکسید آلومینیوم.

Figure 1. Transmission Electron Microscope image (TEM) (a) Copper Nanoparticles, (b) Aluminum Oxide Nanoparticles.

1. www.pnf-co.com (PNF)



شکل ۲. (a) طرحواره کلی، (b) تصویر اجزای مجموعه دستگاه‌های اندازه‌گیری در سامانه آزمایش  
 (c) هندسه کل رادیاتور و مجرای جریان.

Figure 2. (a) General schematic design, (b) Picture of the components of the set of measuring devices in the experimental system,  
 (c) The overall geometry of the radiator and the flow channel.

شده‌است. برای ثبت اطلاعات درجه حرارت سطح رادیاتور نیز از یک دستگاه ترمومتر دیجیتال یا دیتالاگر<sup>۱</sup> کاناله مدل پرووا<sup>۳</sup> ۸۰۰ که شامل ۸ خروجی به‌همراه ۸ ترموکوپل نوع K است، استفاده شده‌است. پروانه یا فن مورد استفاده برای به‌جریان‌انداختن هوا بر روی سطح رادیاتور نیز پروانه استاندارد خودروی سواری (پراید) است و سرعت آن با یک آداپتور در دو سرعت قابل تنظیم است. سرعت هوا در دو سرعت فن به‌ترتیب برابر ۰/۸۲ و ۱/۶۶ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که جهت چرخش پره‌های فن به‌گونه‌ای تنظیم شد که در یک طرف رادیاتور مکش ایجاد کند. برای اندازه‌گیری تجربی شاخص ضریب هدایت حرارتی سیالات و نانو سیالات از دستگاه<sup>۴</sup> KD2 Pro استفاده شد که تصویر آن نیز در شکل (۲-۲) نشان داده شده‌است. به‌منظور تثبیت درجه حرارت نمونه‌ها در اندازه‌گیری‌های مختلف، از یک حمام آب و نیز یک گرمکن الکتریکی - که تصاویر آن‌ها نیز در شکل (۲-۲) مشاهده می‌شود - استفاده شده‌است. لازم به ذکر است که خطای آزمایشی دستگاه<sup>۴</sup> KD2 Pro کمتر از حدود ۵ صدم درصد در هر اندازه‌گیری دستگاه تعیین می‌شود که در محاسبات لحاظ شده‌است.

یک ظرف فولادی به حجم تقریبی ۵ لیتر به‌عنوان مخزن برای نگهداری سیال به‌کار رفت و برای گرم کردن سیال از یک المنت الکتریکی - که در داخل مخزن نصب شده‌بود - استفاده شد. درب این مخزن در طول انجام آزمایش‌ها بسته نگه داشته می‌شد تا از تبخیر آب و در نتیجه تغییر غلظت جلوگیری به‌عمل آید. در ادامه، از یک پمپ گردشی برای به‌جریان‌انداختن سیال درون سیکل آزمایش استفاده شد که در سه سرعت قابل تنظیم است. در طی مراحل آزمایش سرعت پمپ در بیشینه حالت قرار داده شد و دبی مورد نیاز با استفاده از شیرهایی که در مسیر جریان قرار داشت، تنظیم می‌شد. برای اندازه‌گیری دبی از یک روماتر استفاده شد که به‌وسیله شرکت آزمون‌متمم کالیبره شد. رادیاتور مورد استفاده در این سامانه آزمایشی رادیاتور استاندارد خودرو پراید است که شامل ۳۴ لوله تخت با طول ۳۶ سانتی‌متر و سطح مقطع ۲۴×۲ میلی‌متر است. این تبادله حرارتی از نوع Louvered Fin است که طرحواره هندسه کل رادیاتور و مجرای عبور جریان در شکل (۲-۲) نشان داده شده‌است. برای اندازه‌گیری دمای سیال در ورودی و خروجی رادیاتور از دو ترموکوپل نوع K استفاده شد که در درون لوله قبل و بعد از رادیاتور ثابت شدند. برای ثبت این دماها از یک دستگاه ثبت داده‌ها<sup>۱</sup> با دو خروجی ترمومتر دوکاناله مدل لوترون<sup>۲</sup> استفاده

3. Prova 800  
 4. Decagon Devices Model

1. Data Logger  
 2. Lutron tm-925

### ۳. تجزیه و تحلیل نتایج

برای اندازه‌گیری خواص شیمی- فیزیکی و ترمودینامیکی نانوسیالات چنان‌که پیشتر بیان شد از مدل‌ها و روابط موجود استفاده شده؛ لیکن برای شاخص ضریب هدایت حرارتی به دلیل ضعف مدل‌های موجود، از روی داده‌های تجربی تعیین شده‌است.

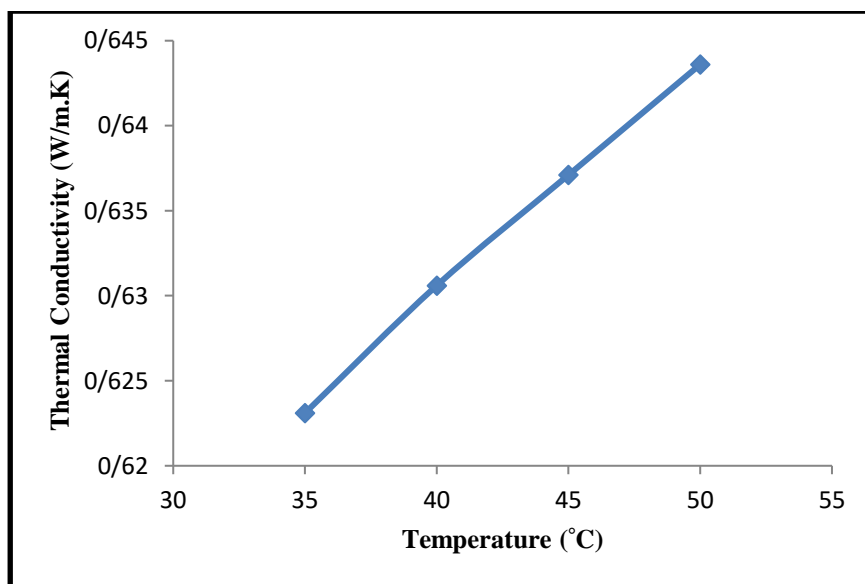
#### ۳-۱ اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی

تغییرات ضریب هدایت حرارتی سیال پایه‌آب با درجه حرارت در شکل (۳) نشان داده شده‌است. از این داده‌ها برای اطمینان از کالیبره‌بودن دستگاه‌ها نیز استفاده شده‌است. چنان‌که پیدا است این داده‌ها تطابق خوبی با مقادیر گزارش شده در کتاب‌های مرجع انتقال حرارت دارد.

نتایج مربوط به ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات مورد استفاده نیز در نمودارهای شکل (۴) ارائه شده‌است. دقت در شکل (۴-a,b) و قسمت (۴-c) مشخص می‌کند که با افزایش شاخص درجه حرارت، ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات افزایش بیشتری پیدا می‌کند. از طرف دیگر، مقایسه نتایج هر سه نانوسیال کنار هم و در درجه حرارت  $50^{\circ}\text{C}$  در شکل (۴-d) نیز نشان داده شده‌است.

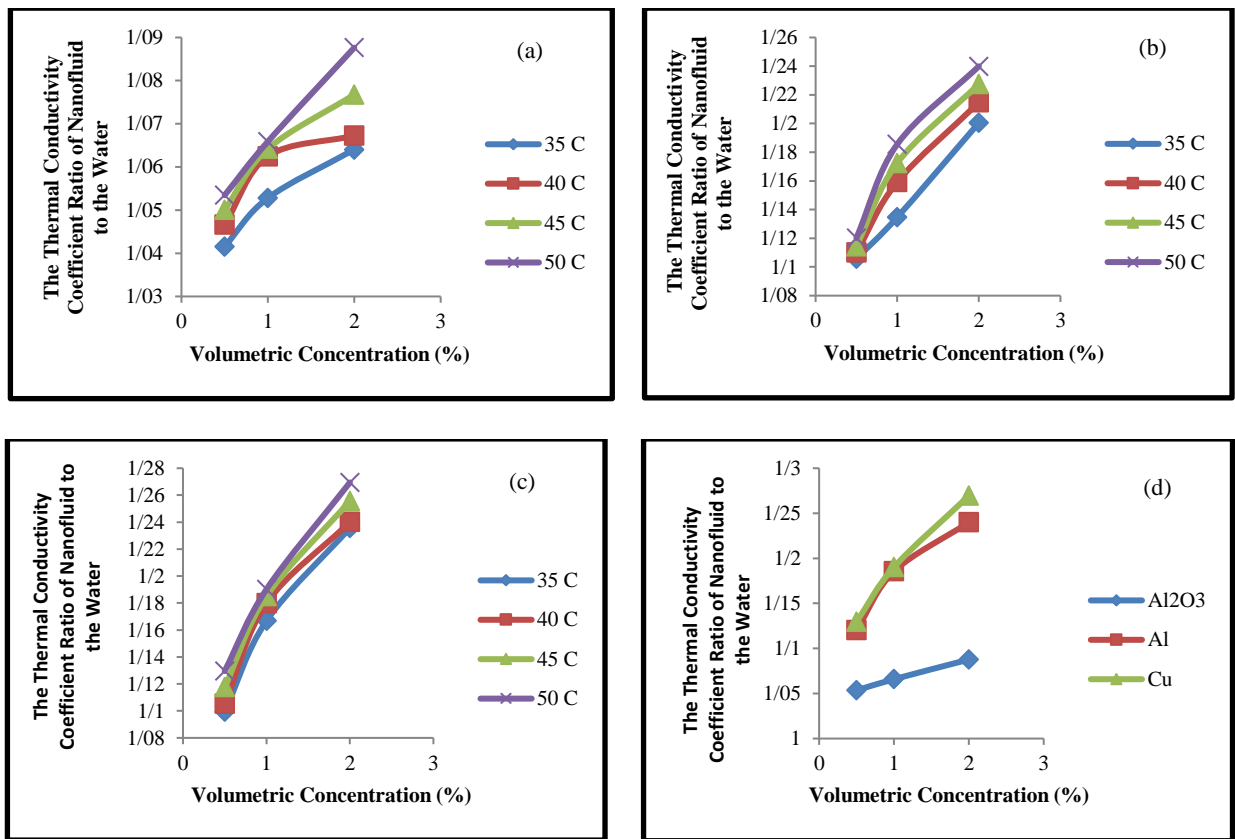
#### ۳-۲ اندازه‌گیری عملکرد رادیاتور

برای اندازه‌گیری عملکرد خنک‌کنندگی رادیاتور سیال در  $5^{\circ}\text{C}$  دبی،  $4^{\circ}\text{C}$  دما و  $2$  سرعت فن مختلف در سامانه آزمایش به جریان انداخته شد. لازم به ذکر است که تغییرات سرعت فن بر خلاف تغییرات دما و دبی تأثیر مستقیمی بر روی افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی درون لوله نخواهد داشت، ولی همان‌گونه که در ادامه خاطر نشان خواهد شد، این ضریب در سرعت‌های فن مختلف اندکی تغییر خواهد کرد که ممکن است به دلیل وابستگی خواص ترموفیزیکی سیال به دما باشد؛ هر چند تغییرات دما در بسیاری موارد در طول رادیاتور بسیار اندک است. نتایج اختلاف دمای ورودی و خروجی آب مقطر نسبت به دبی ورودی در دو سرعت فن مورد آزمایش، در شکل (۵-a,b) نشان داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی رادیاتور با افزایش دمای ورودی و کاهش دبی عبوری از رادیاتور افزایش پیدا می‌کند که کاملاً قابل پیش‌بینی بود و نشان از عملکرد صحیح سامانه مورد استفاده دارد. پس از جمع‌آوری داده‌های دمای مربوط به سیال پایه، همین داده‌ها برای سه نانوسیال مورد استفاده در سه غلظت اندازه‌گیری شد که به دلیل تعداد زیاد آن‌ها از آوردن همه آن‌ها در اینجا خودداری می‌کنیم.



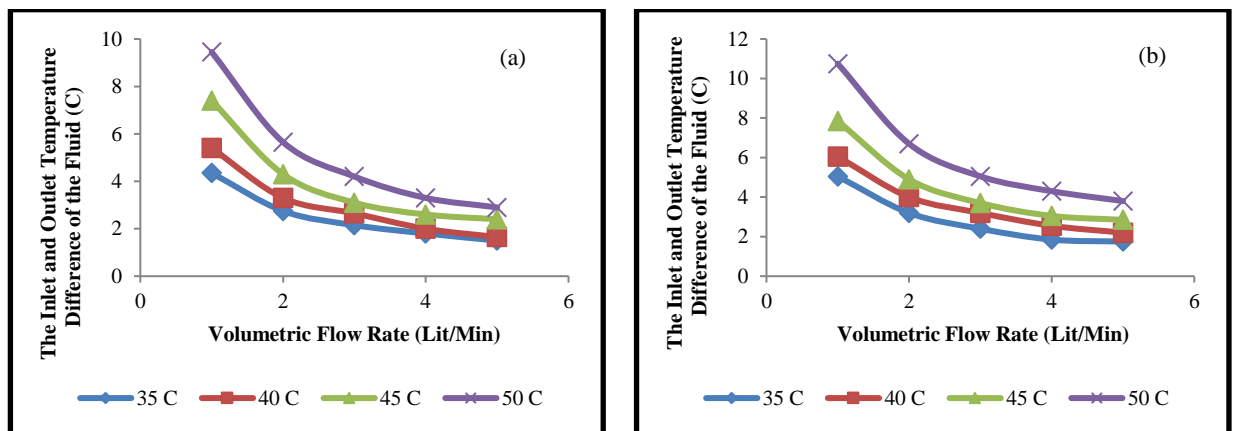
شکل ۳. نمودار تغییرات ضرایب هدایت حرارتی آب نسبت به دما.

Figure 3. Variations of the water thermal conductivity coefficients versus the temperature.



شکل ۴. نمودار نسبت ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به سیال پایه برحسب غلظت حجمی نانوسیال در شرایطی که: (a) نانوسیال آب-آلومینا در دماهای مختلف، (b) نانوسیال آب-آلومینوم در دماهای مختلف، (c) نانوسیال آب-مس در دماهای مختلف، (d) نانوسیالات (هر سه) در دمای  $50^{\circ}\text{C}$ .

Figure 4. The ratio of Thermal conductivity coefficients of nanofluids to the base fluid versus the volume concentration in conditions that include: (a) Water-alumina nanofluid at different temperatures, (b) water-aluminum nanofluid at different temperatures, (c) Water-Copper nanofluid at different temperatures, (d) Nanofluids (all three) at  $50^{\circ}\text{C}$ .

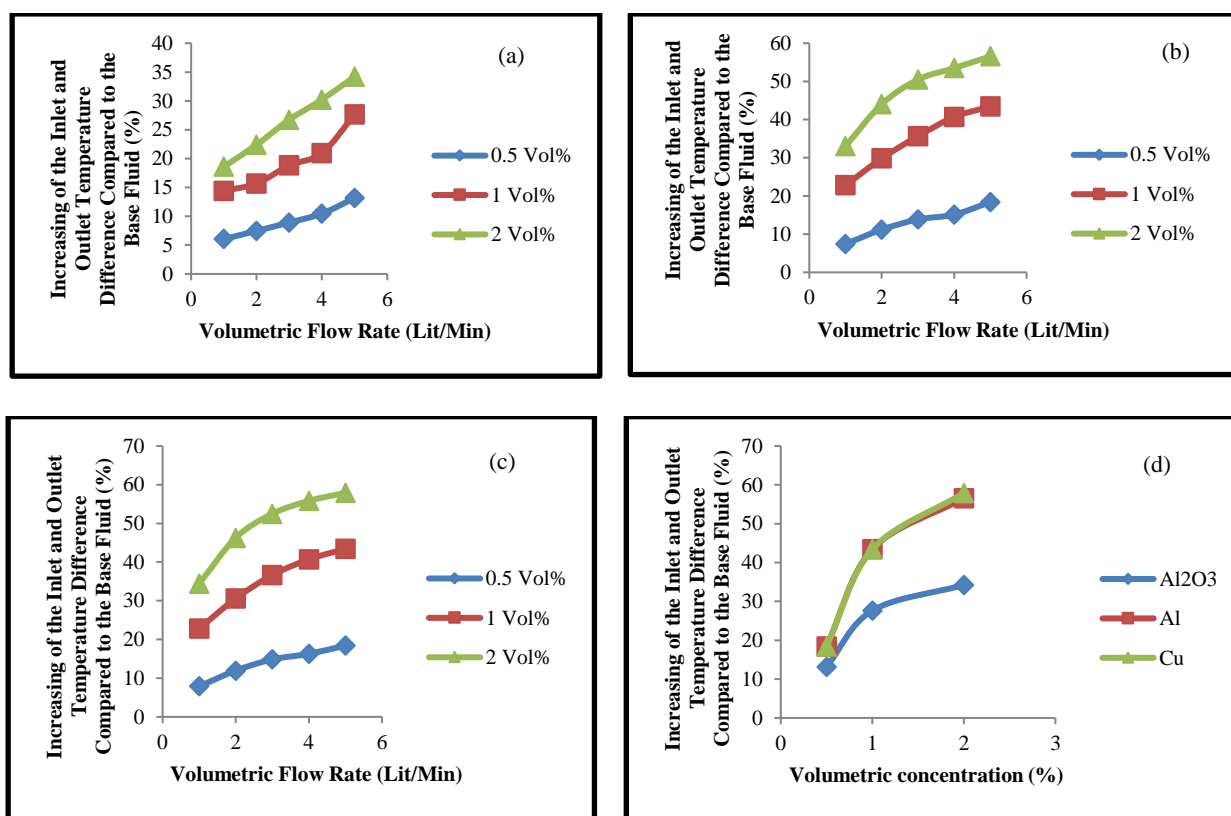


شکل ۵. نمودار اختلاف دمای ورودی و خروجی رادیاتور نسبت به دبی در دماهای ورودی مختلف برای آب مقطر برای سرعت فن دو حالت: (a) حداقلی و (b) حداکثری.

Figure 5. The inlet and outlet radiator temperatures difference versus the flow rate at different inlet temperatures for distilled water at two fan velocities: a- minimum and b- maximum.

علت این پدیده را می‌توان در افزایش بسیار بیشتر اختلاف دما در مورد نانوسیالات فلزی دانست که در غلظت‌های پایین‌تری به حد نهایی خود نزدیک می‌شوند. در مورد سایر دماها و سرعت‌های فن مورد آزمایش نیز روند مشابهی مشاهده شد و این نتایج به دلیل اختلاف بیشتر گزارش شده‌است. این در شرایطی است که در شکل (۶-d) نیز تأثیر افزایش غلظت نانوذرات بر افزایش اختلاف درجه حرارت نشان داده شده‌است. چنان‌که در شکل پیدا است، افزودن نانوذرات فلزی تأثیر بسیار بیشتری بر عملکرد خنک‌کنندگی رادیاتور دارد و این نشان می‌دهد که افزایش ضریب هدایت حرارتی یکی از سازوکارهای مهم در انتقال حرارت در رادیاتور خودرو است.

شکل (۶) قسمت‌های (a,b,c) افزایش اختلاف درجه حرارت نانوسیالات ورودی و خروجی رادیاتور را نسبت به دبی در غلظت‌های مختلف نانوسیالات آب بر پایه آلومینا، آلومینیوم فلزی و مس فلزی و در دمای ورودی ۵۰ درجه سلسیوس و در شرایطی که پروانه یا فن رادیاتور را که با سرعت بیشینه یا حداکثری تنظیم شده، نشان می‌دهد. چنان‌که پیدا است، در مورد هر سه نانوسیالات با افزایش دبی درصد افزایش اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی افزایش می‌یابد؛ با این تفاوت که در مورد نانوسیالات فلزی در غلظت‌های بالا این روند کندشونده است و شیب نمودار با افزایش دبی کاهش پیدا می‌کند، در حالی که در مورد نانوسیالات اکسید آلومینیوم، روند تندشونده است.

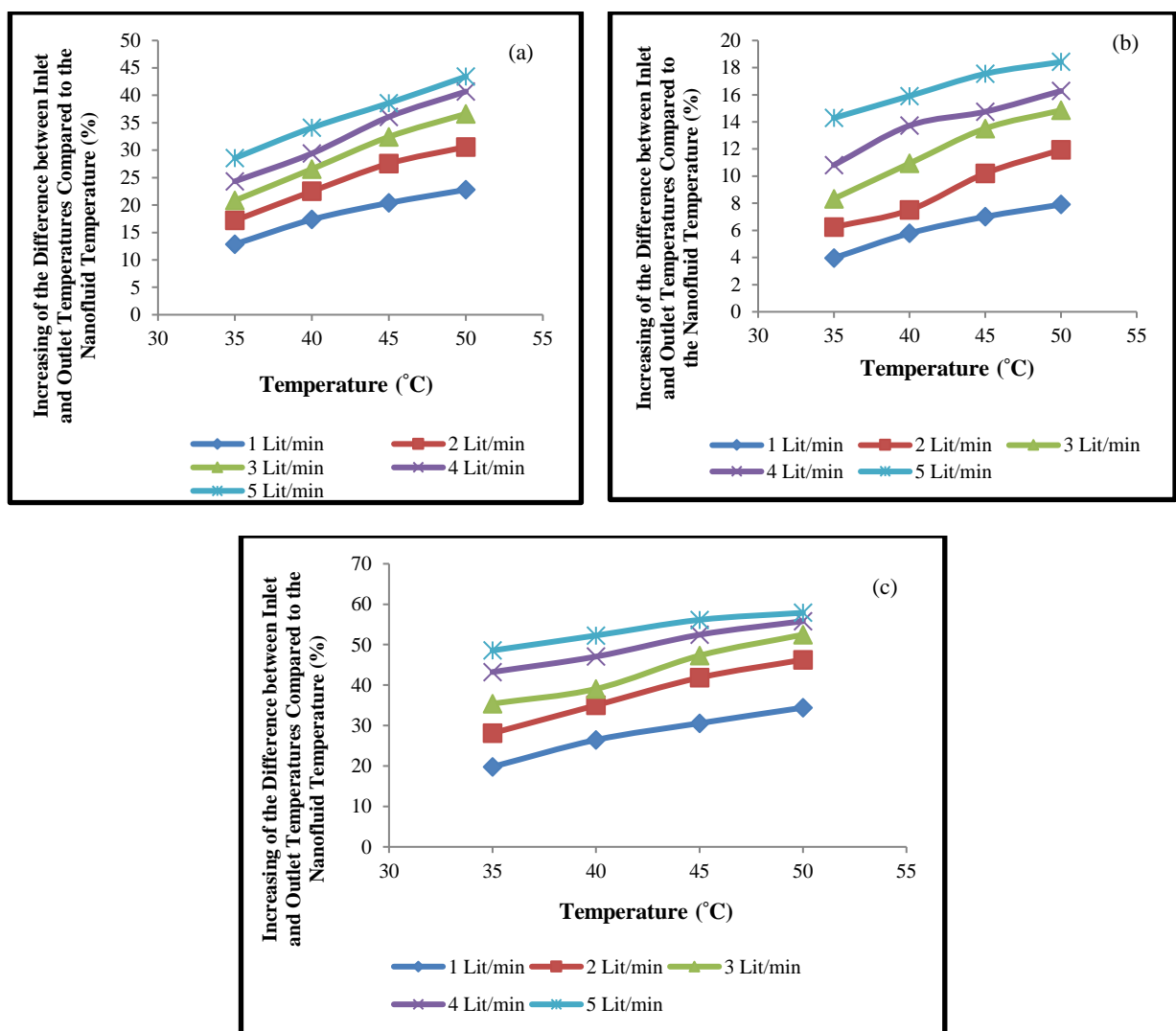


شکل ۶. نمودار افزایش اختلاف دمای ورودی و خروجی رادیاتور برحسب دبی نانوسیالات در شرایطی که: (a) نانوسیالات آب-آلومینا در دمای ۵۰°C و سرعت فن بیشینه، (b) نانوسیالات آب-آلومینیوم در دمای ۵۰°C و سرعت فن بیشینه، (c) نانوسیالات آب-مس در دمای ۵۰°C و سرعت فن بیشینه، (d) نانوسیالات (هر سه) در دمای ۵۰°C.

Figure 6. The inlet and outlet radiator temperatures difference versus the flow rate of nanofluids in conditions that include: (a) Water-Alumina nanofluid at 50°C and maximum fan velocity, (b) Water-Aluminum nanofluid at 50°C and maximum fan velocity, (c) Water-Copper nanofluid at 50°C and maximum fan velocity, (d) Nanofluids (all three) at a temperature of 50°C.

حرارتی، گران‌روی نیز بیشتر می‌شود و در نتیجه، آشفتگی در جریان سیال کم می‌شود. این دو پدیده (افزایش ضریب هدایت حرارتی و افزایش گران‌روی) تأثیر وارونه بر روی میزان انتقال حرارت دارند که باعث می‌شود افزایش انتقال حرارت کم شود. به همین دلیل، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در نزدیکی غلظت ۱ درصد حجمی تأثیر افزایش گران‌روی تا حدودی غالب می‌شود. تغییرات اختلاف دمای سیال نسبت به دما برای نانوسیال آب-مس در نمودارهای شکل (۷) نشان داده شده‌است.

هم‌چنین مشاهده می‌شود که کاهش دمای خروجی در مورد مس و آلومینیوم اختلاف چشم‌گیری ندارد. این پدیده نیز باتوجه به این‌که ضریب هدایت حرارتی این دو نانوسیال اختلاف خیلی زیادی ندارند و عوامل دیگری غیر از افزایش ضریب هدایت حرارتی در افزایش انتقال حرارت نانوسیالات مؤثر هستند، قابل توجیه است. نکته قابل توجه در این شکل آن است که انتقال حرارت در غلظت‌های پایین با سرعت بسیار بالاتری افزایش پیدا می‌کند و با افزایش غلظت نرخ افزایش انتقال حرارت کم می‌شود. در توجیه این پدیده می‌توان گفت که با افزایش غلظت علاوه بر افزایش ضریب هدایت



شکل ۷. نمودار درصد اختلاف دمای ورودی و خروجی رادیاتور نسبت به درجه حرارت نانوسیال آب-مس در دبی‌های مختلف و سرعت فن حداکثر با غلظت‌های: (a) ۰/۵ درصد حجمی، (b) ۱ درصد حجمی، (c) ۲ درصد حجمی.

Figure 7. The inlet and outlet radiator temperatures difference versus the temperature of the water-copper nanofluid and at different flow rates and maximum fan velocity by nanofluids volume concentration that include: (a) 0.5 percent, (b) 1 percent, (c) 2 percent.

با دقت در شکل‌ها مشخص می‌شود که در تمام غلظت‌ها با افزایش درجه حرارت، در واقع اختلاف دمای ورودی و خروجی رادیاتور افزایش می‌یابد. قابل توجه است که با افزایش غلظت نرخ افزایش اختلاف دما کم می‌شود که این پدیده نیز باتوجه به تأثیر افزایش گرانروی در کاهش انتقال حرارت- که پیش‌تر گفته شد- تا حدودی قابل توجیه است. در مورد سایر نانوسیالات نیز روند تغییرات تا حدودی مشابه است.

### ۳-۳ محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و بررسی تغییرات آن نسبت به دبی، غلظت و دما یکی از اصلی‌ترین اهداف این تحقیق است که در این بخش به آن پرداخته خواهد شد. برای محاسبه این ضریب فرضیاتی به شرح زیر وجود داشته‌است:

✓ دمای دیواره رادیاتور در تمام قسمت‌ها ثابت فرض شده‌است. چنان‌که گفته شد دمای سطح رادیاتور با استفاده از ۹ ترموکوپل اندازه‌گیری شده‌است و درجه حرارت میانگین این ۹ نقطه به عنوان دمای دیواره در تمامی طول رادیاتور انتخاب شده‌است. در این اندازه‌گیری‌ها مقاومت تماسی ترموکوپل‌ها در نظر گرفته نشده‌است.

✓ باتوجه به ضخامت بسیار کم دیواره رادیاتور، دمای داخل آن برابر با دمای اندازه‌گیری شده در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که با این فرض از مقاومت رسانشی دیواره رادیاتور و مقاومت رسوب صرف نظر شده‌است که مورد اول قابل اغماض است، ولی در مورد مقاومت رسوب باید بیشتر تحقیق شود.

✓ باتوجه به اختلاف دمای نسبتاً کم بین ورودی و خروجی سیال، مقادیر خواص فیزیکی از جمله گرمای ویژه و چگالی نانوسیال در دمای میانگین ورودی و خروجی جای‌گزین شده‌است.

✓ دمای سیال در محاسبات میانگین دمای ورودی و خروجی در نظر گرفته شده‌است.

محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، باتوجه به قانون انتقال حرارت نیوتن و به صورت رابطه (۱) است:

$$Q = \bar{h}A\Delta T = \bar{h}A(T_b - T_w) \quad (1)$$

که در رابطه فوق  $T_b$  و  $T_w$  به ترتیب نشان‌دهنده دمای بالک سیال و دمای دیواره رادیاتور هستند و  $A$  مساحت سطح جانبی لوله‌های تخت رادیاتور است. هم‌چنین نرخ انتقال حرارت در جریان سیال از رابطه (۲) حساب می‌شود.

$$Q = \dot{m}C_p\Delta T = \dot{m}C_p(T_{in} - T_{out}) \quad (2)$$

که در رابطه فوق  $\dot{m}$  دبی جرمی سیال و  $C_p$  گرمای ویژه سیال است. با برابر قراردادن طرفین رابطه‌های فوق و مرتب کردن آن‌ها برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی خواهیم داشت:

$$\bar{h} = \frac{\dot{m}C_p(T_{in}-T_{out})}{A(T_b-T_w)} \quad (3)$$

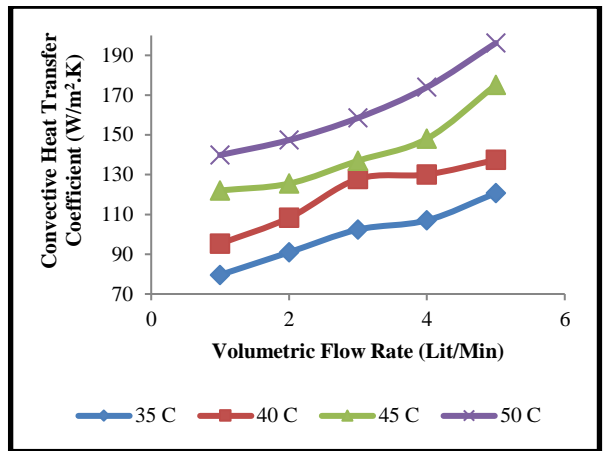
در رابطه فوق  $\bar{h}$  ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط در کل رادیاتور است. عدد بدون بعد ناسلت نیز از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$Nu = \frac{\bar{h}d_{hy}}{k} \quad (4)$$

که در رابطه بالا  $d_{hy}$  قطر هیدرولیکی لوله‌ها و  $k$  ضریب هدایت حرارتی سیال است. مقادیر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی حساب شده با روش بالا در دو سرعت مختلف فن، اندکی متفاوت است که احتمالاً به دلیل تغییر خواص فیزیکی با دما و خطای فرضیات در نظر گرفته شده ایجاد می‌شود، ولی اختلاف مقادیر در بیشتر موارد کمتر از ۷٪ است. از همین رو، مقادیر ارائه شده در این قسمت میانگین مقادیر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در دو سرعت فن است. شکل (۸) تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال درون رادیاتور را نسبت به دبی برای سیال پایه استفاده شده، نشان می‌دهد.

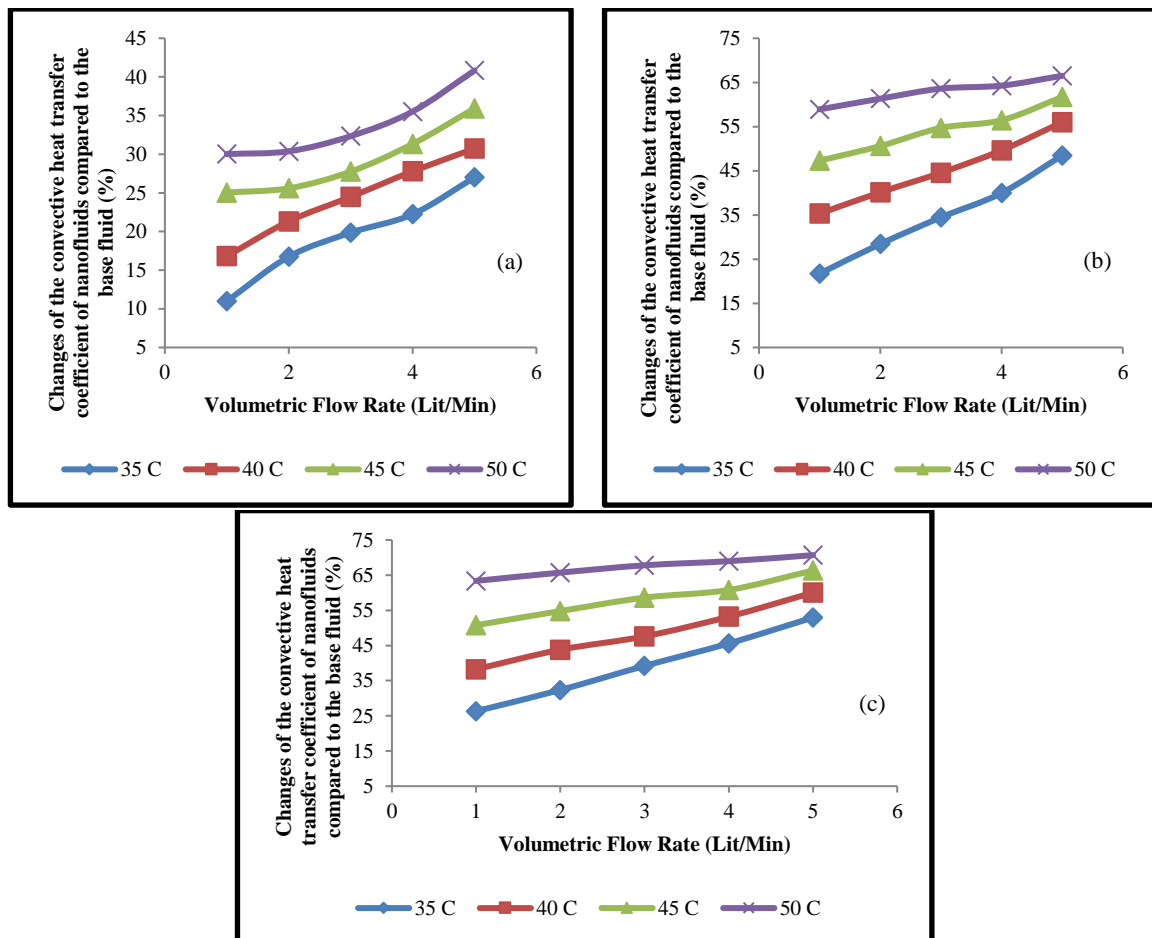
به طور کلی، نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با افزایش غلظت نانوذرات، دبی و دما بیشتر می‌شود که در ادامه نتایج مربوط به آن‌ها ارائه شده‌است. شکل‌های (۹) الی (۱۱) تأثیر افزایش دبی را در دماهای مختلف و در غلظت پیشینه برای هر سه نوع

نانوسیال نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات با افزایش دبی در دماهای بالاتر کمتر می‌شود، به‌خصوص در مورد نانوسیالات فلزی. چنان‌که در شکل (۱۲) آمده، در مورد نانوسیال آب-آلومینا در دمای ۳۵ درجه سلسیوس میزان افزایش از ۱۱ درصد به ۲۷ درصد رشد کرده، در حالی‌که در دمای ۵۰ درجه سلسیوس از ۳۰ درصد به نزدیکی ۴۰ درصد رسیده‌است. این پدیده در مورد نانوسیالات فلزی مشهودتر است. برای مثال؛ در مورد نانوسیال آب-مس مقادیر گفته‌شده در ۳۵ درجه به‌ترتیب برابر ۲۶ و ۵۳ درصد و در ۵۰ درجه، برابر ۶۳ و ۷۰ درصد است. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش انتقال حرارت در مورد نانوسیالات فلزی در دماهای پایین‌تری به حد نهایی خود می‌رسد و تأثیر افزایش دما بر روی افزایش انتقال حرارت، بیشتر از تأثیر افزایش دبی است.



شکل ۸. نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آب مقطر.

Figure 8. Changes in the convection heat transfer coefficient of distilled water.

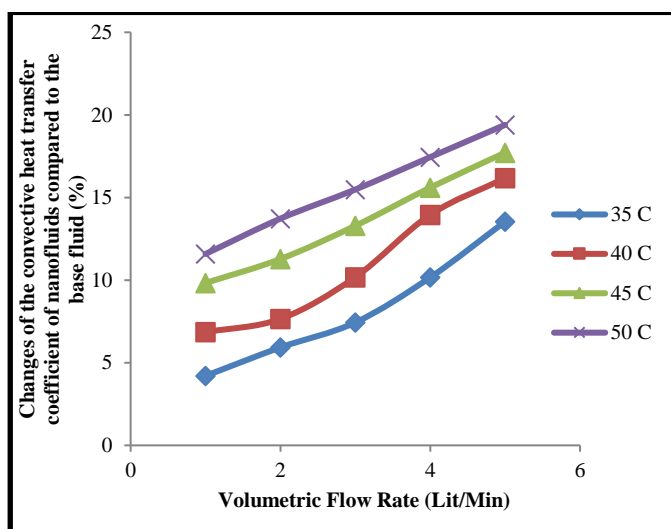


شکل ۹. نمودار درصد تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات نسبت به سیال پایه در درجه حرارت‌های مختلف و غلظت ۲ درصد حجمی برای (a) نانوسیال آب-آلومینا، (b) نانوسیال آب-آلومینیوم، (c) نانوسیال آب-مس.

Figure 9. The percentage of changes in the convection heat transfer coefficient of nanofluids compared to the base fluid at different temperatures and a volume concentration of 2% for: (a) Water-Alumina nanofluid, (b) Water-Aluminum nanofluid, (c) Water-Copper nanofluid.

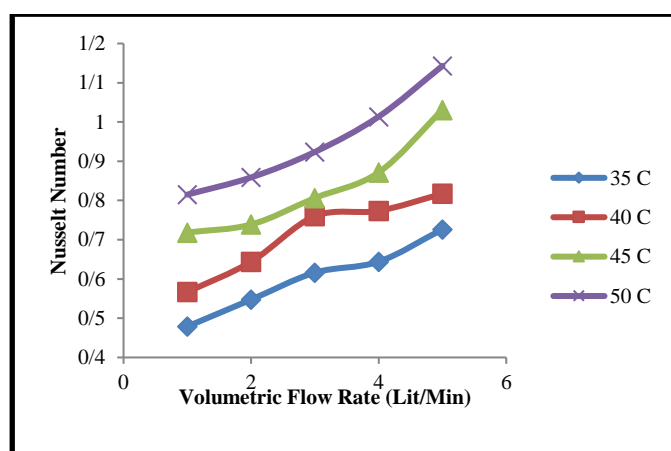
درحالی‌که در سامانه‌های با سرعت سیال بالاتر، استفاده از نانوسیالات اکسیدی با غلظت‌های بالا یا نانوسیالات فلزی در غلظت‌های پایین می‌تواند نتایج بهتری ایجاد کند. یکی دیگر از مشخصه‌های مهم در تحقیقات انتقال حرارت، عدد بدون بعد ناسلت است که در واقع تعیین‌کننده سازوکار غالب در انتقال حرارت است. شکل (۱۱) مقدار این عدد را برای جریان آب خالص در سامانه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در این مورد نیز برای محاسبه عدد ناسلت از ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط که برای دو سرعت فن متوسط‌گیری شده، استفاده شده است.

باتوجه به روند تغییرات در نمودارهای مختلف می‌توان نتیجه گرفت که سازوکار غالب انتقال حرارت در این حالت، هدایت حرارتی است و افزایش آشفستگی تأثیر کمی بر روی افزایش ضریب انتقال حرارت دارد. شکل (۱۰) نیز درصد تغییرات ضریب انتقال حرارت نانوسیال آب-مس را در غلظت ۰/۵ درصد حجمی نشان می‌دهد. باتوجه به نتایج این شکل، می‌توان نتیجه گرفت که در مورد نانوسیالات فلزی در غلظت‌های کم، افزایش دبی تأثیر بیشتری در افزایش انتقال حرارت دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نانوسیالات فلزی در غلظت‌های بالا در مورد سامانه‌هایی که جریان سیال در آن‌ها با سرعت‌های کمتری انجام می‌گیرد به صرفه‌تر خواهد بود؛



شکل ۱۰. نمودار درصد تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال آب-مس نسبت به سیال پایه در غلظت ۰/۵ درصد حجمی.

Figure 10. The percentage of changes in the convection heat transfer coefficient of water-copper nanofluid compared to the base fluid at the volume concentration of 0.5%.

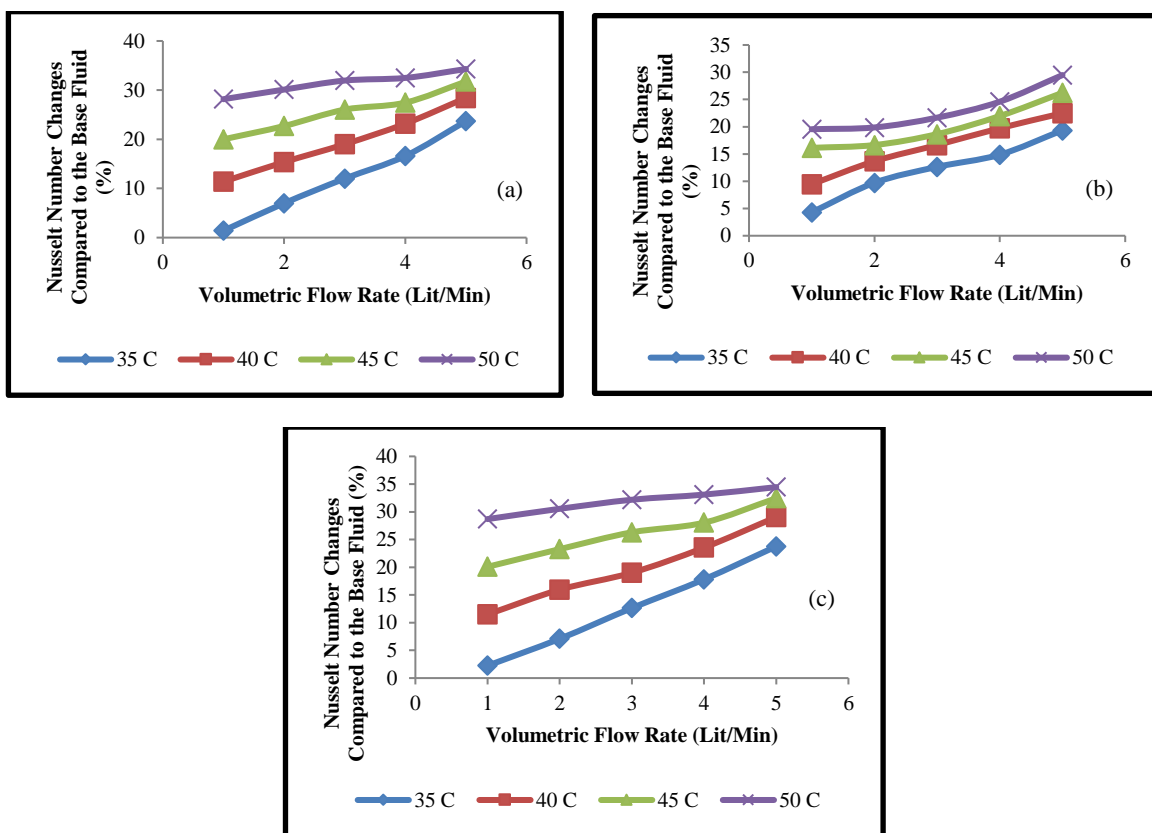


شکل ۱۱. نمودار تغییرات عدد ناسلت نسبت به دبی برای سیال آب مقطر.

Figure 11. Variations of Nusselt number versus the flow rate for distilled water.

درصد تغییرات عدد ناسلت را برای غلظت ۲ درصد حجمی هر سه نوع نانوسیال نشان می‌دهند. چنان‌که مشاهده می‌شود، افزایش غلظت و دبی نانوسیال تأثیر زیادی بر روی تغییرات عدد ناسلت می‌گذارند. نکته قابل توجه در این شکل‌ها کم‌شدن عدد ناسلت در غلظت‌ها و دبی‌های پایین نانوسیالات است. در مورد نانوسیال آب-آلومینا این کاهش تنها در یک نقطه مشاهده می‌شود، ولی نانوسیالات فلزی در غلظت‌های کم در نیمی از حالات این کاهش را نشان می‌دهند. این پدیده نیز مهر تأییدی است بر این حقیقت که سازوکار کنترل‌کننده در این فرایند، انتقال حرارت هدایتی است و از آنجایی‌که در دبی‌های پایین نانوسیال انتقال حرارت جابه‌جایی نقش بسیار کمی دارد، افزایش انتقال حرارت رسانشی باعث کاهش عدد ناسلت می‌شود.

چنان‌که در شکل (۱۱) مشخص است، فقط در ۳ نقطه عدد ناسلت حساب‌شده بیشتر از ۱ است. این نشان می‌دهد که در بیشتر حالات انتقال حرارت هدایتی نقش بیشتری نسبت به انتقال حرارت جابه‌جایی دارد. لازم به ذکر است که اعداد ناسلت حساب‌شده با رابطه سیدر-تیت، که برای پیش‌بینی عدد ناسلت در لوله‌ها با جریان لایه‌ای ارائه شده‌است، مقادیری بین ۲/۵ تا ۴/۵ دارند. پایین بودن اعداد ناسلت حساب‌شده در این مطالعه را می‌توان ناشی از عرض کم لوله‌ها (۳ میلی متر) و قطر معادل کم آن‌ها (۳/۷۵ میلی متر) و سرعت کم جریان سیال در داخل آن‌ها دانست. عرض کم این لوله‌ها و رژیم آرام جریان باعث می‌شود که تقریباً در تمام قسمت‌های لوله جریان لایه‌ای وجود داشته‌باشد و در نتیجه، نقش انتقال حرارت هدایتی نسبت به جابه‌جایی بیشتر شود. نمودارهای شکل (۱۲)،



شکل ۱۲. درصد تغییرات عدد ناسلت نسبت به سیال پایه بر حسب دبی در دماهای مختلف و غلظت حجمی ۲٪ برای: (a) نانوسیال آب-آلومینا، (b) نانوسیال آب-آلومینوم، (c) نانوسیال آب-مس.

Figure 12. The percentage of changes in the Nusselt number compared to the base fluid in terms of the flow rate at different temperatures and volume concentration of 2% for nanofluids: (a) Water-Alumina nanofluid, (b) Water-Aluminum nanofluid, (c) Water-Copper nanofluid.

چوی، و مدل پراشر مقایسه شده‌است. بدین ترتیب، در شکل‌های (۱۳) نسبت ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات مورد استفاده به ضریب هدایت حرارتی سیال پایه در درجه حرارت ۵۰ درجه سلسیوس نشان داده شده‌است. چنان‌که پیدا است مدل ماکسول که تنها تأثیر غلظت ذرات را در نظر می‌گیرد، نتایج خوبی ارائه نمی‌کند. مدل یو و چوی نیز با وجود این‌که برای نانوسیالات با اندازه‌های زیر ۱۰ nm پیش‌بینی‌های خوبی دارند، در این موارد نتایج قابل قبولی به‌دست نمی‌دهند. مدل پراشر برخلاف دو مدل دیگر نتایج بسیار خوبی به‌دست می‌دهد. البته لازم به ذکر است که این مدل ۲ مشخصه قابل تنظیم دارد که باید باتوجه‌به داده‌های تجربی تعیین شوند. باتوجه‌به این‌که داده‌های تجربی ضریب هدایت حرارتی در ۴ دما، اندازه‌گیری شده بود، در این موارد ۲ درجه آزادی داشتیم.

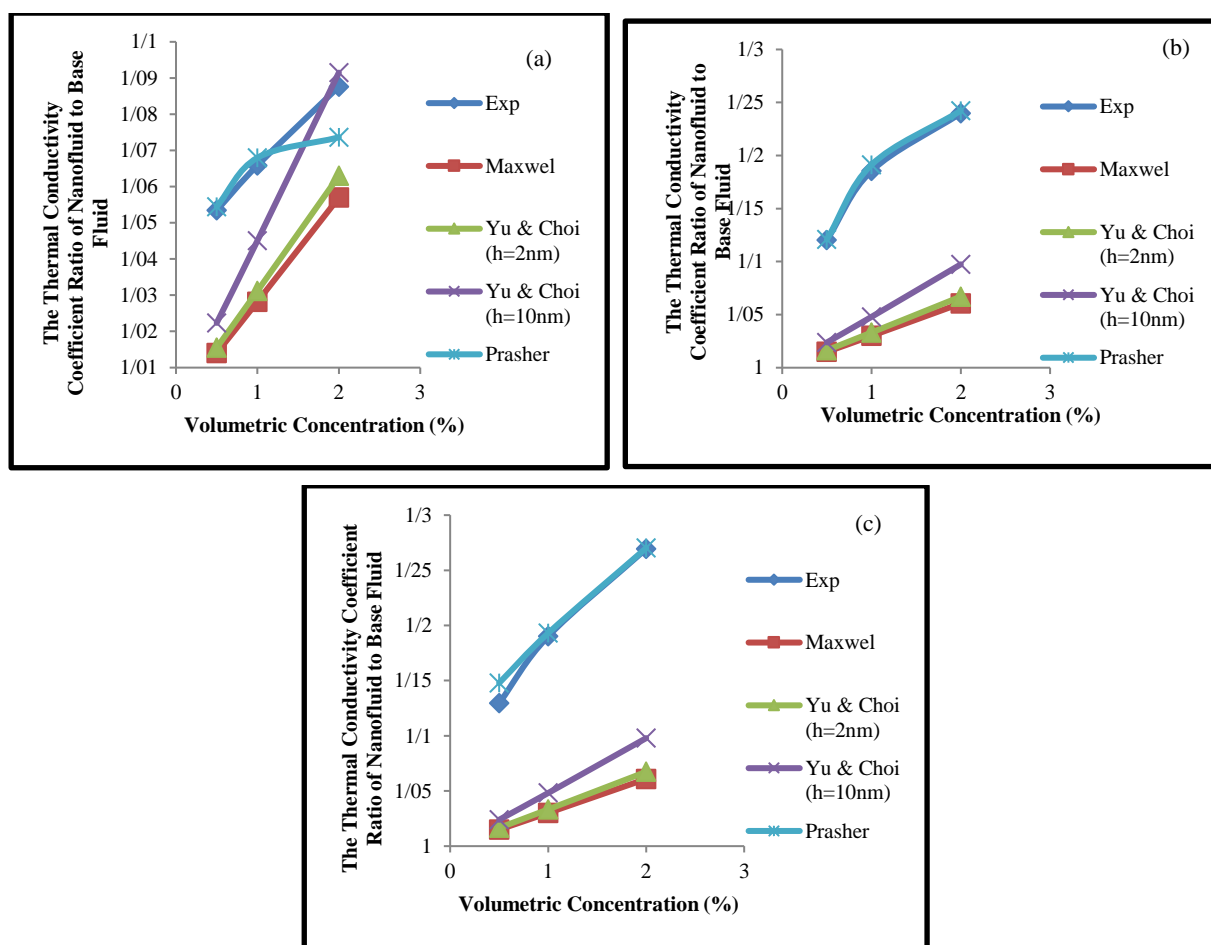
با افزایش دبی، آشفتگی و انتقال آنتالپی نیز افزایش می‌یابد و از جایی به بعد، افزایش ضریب هدایت حرارتی و رسانش را تحت تأثیر قرار می‌دهند و باعث افزایش عدد ناسلت می‌شوند. هم‌چنین، باز هم مشاهده می‌شود که در دماهای بالا درصد افزایش ناسلت با دبی کاهش پیدا می‌کند. این پدیده می‌تواند ناشی از این موضوع باشد که در دماهای بالاتر در اثر افزایش گرانروی، آشفتگی بیشتر و تأثیر افزایش دبی کمتر می‌شود.

### ۴-۳ مقایسه نتایج با مدل‌های ارائه‌شده

نتایج ضریب هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با مدل‌های ارائه‌شده برای آن‌ها به شرح ذیل مقایسه شده‌است:

### ۴-۳-۱ مقایسه نتایج ضریب هدایت حرارتی با مدل‌های ارائه‌شده

مقادیر ضریب هدایت حرارتی تجربی با سه مدل ماکسول، مدل یو و



شکل ۱۳. نمودار نسبت ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات به سیال پایه برحسب غلظت حجمی در دمای ۵۰ °C برای: (a) نانوسیال آب-آلومینا، (b) نانوسیال آب-آلومینوم، (c) نانوسیال آب-مس.

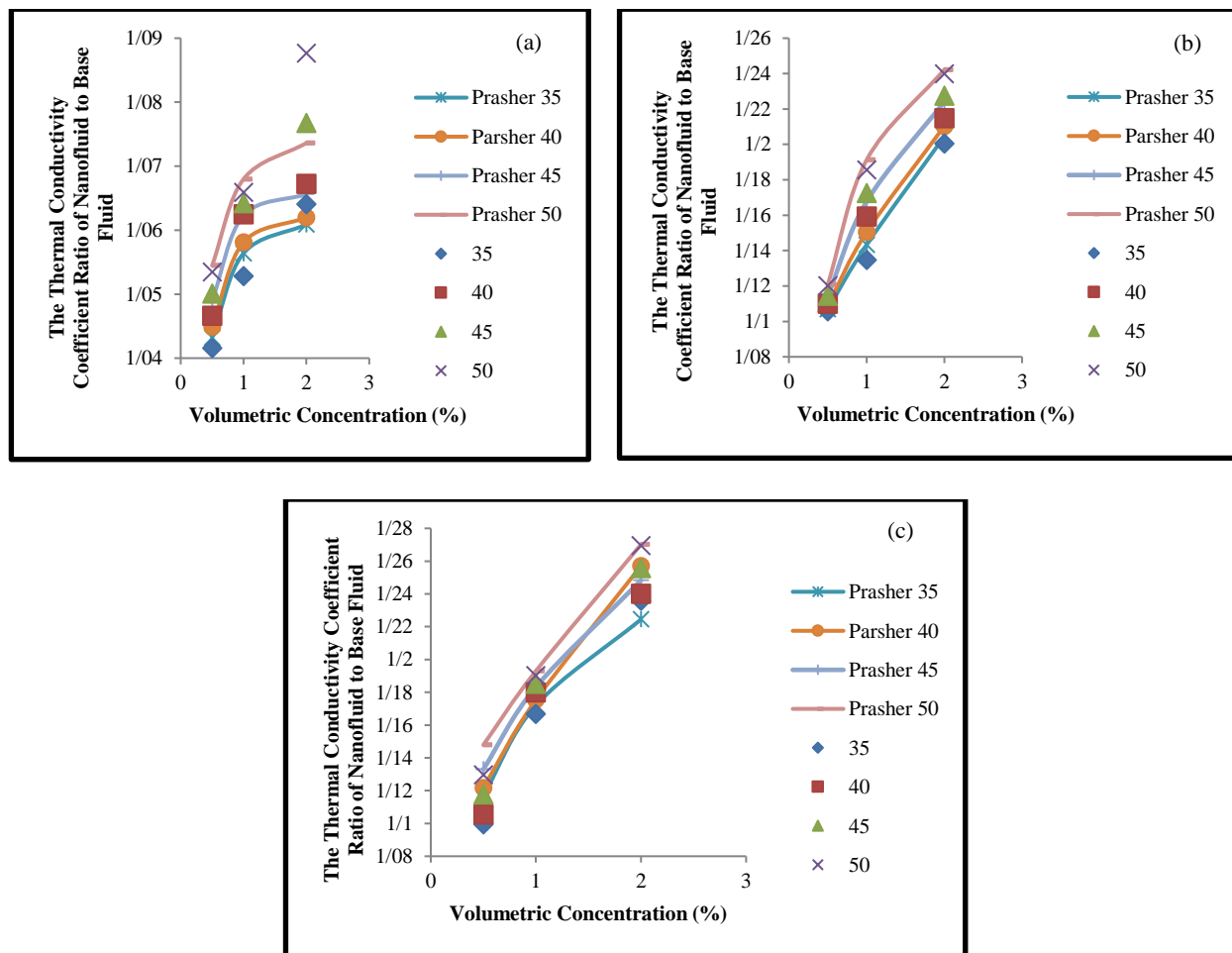
Figure 13. The ratio of the thermal conductivity coefficient of nanofluids to the base fluid in terms of the volume concentration and at temperature of 50°C by: (a) Water-Alumina nanofluid, (b) Water-Aluminum nanofluid, (c) Water-Copper nanofluid.

بعد ناسلت ارائه می‌شوند، از این‌رو در اینجا مقایسه‌ای بین نتایج تجربی ناسلت و مدل‌های ارائه‌شده آمده‌است. نمودارهای شکل (۱۵) مقایسه داده‌های تجربی و مدل‌های ارائه‌شده برای عدد ناسلت را نشان می‌دهند. مدل‌هایی که در این قسمت استفاده شده‌اند عبارت‌اند از: سیدر- تیت، پاک و چو، و زوان و لی؛ که مورد اول از مدل‌های کلاسیک برای جریان آرام است و دو مدل دیگر از مدل‌های ارائه‌شده برای نانوسیالات هستند. لازم به ذکر است که مقادیر ارائه‌شده در اینجا، میانگین مقادیر اعداد ناسلت در دماهای آزمایش شده هستند. مشاهده می‌شود که مقادیر تجربی در همه موارد بسیار کمتر از مقادیر پیش‌بینی‌شده با مدل‌ها هستند. در تمام موارد، نتایج تجربی اعدادی نزدیک به ۱ هستند که چنان‌که پیش‌تر گفته شد به معنی برابر بودن تقریبی تأثیر رسانش و جابه‌جایی در

باتوجه به تطابق خوب داده‌های تجربی با نتایج مدل پراشر، نتایج این مدل در دماهای مختلف نیز در شکل‌های (۱۴) ارائه شده‌است. مشاهده می‌شود که در مورد نانوسیالات فلزی، تطابق داده‌های آزمایشگاهی با نتایج مدل پراشر بسیار بهتر از نانوسیال آلومینا است. در مورد این نانوسیال در غلظت‌های بالا، مقادیر تجربی بسیار بیشتر از مقادیر پیش‌بینی‌شده است. البته لازم به ذکر است که ممکن است این عدم تطابق به دلیل خطای آزمایش باشد؛ بنابراین، استفاده از این مدل برای نانوسیالات فلزی توصیه می‌شود.

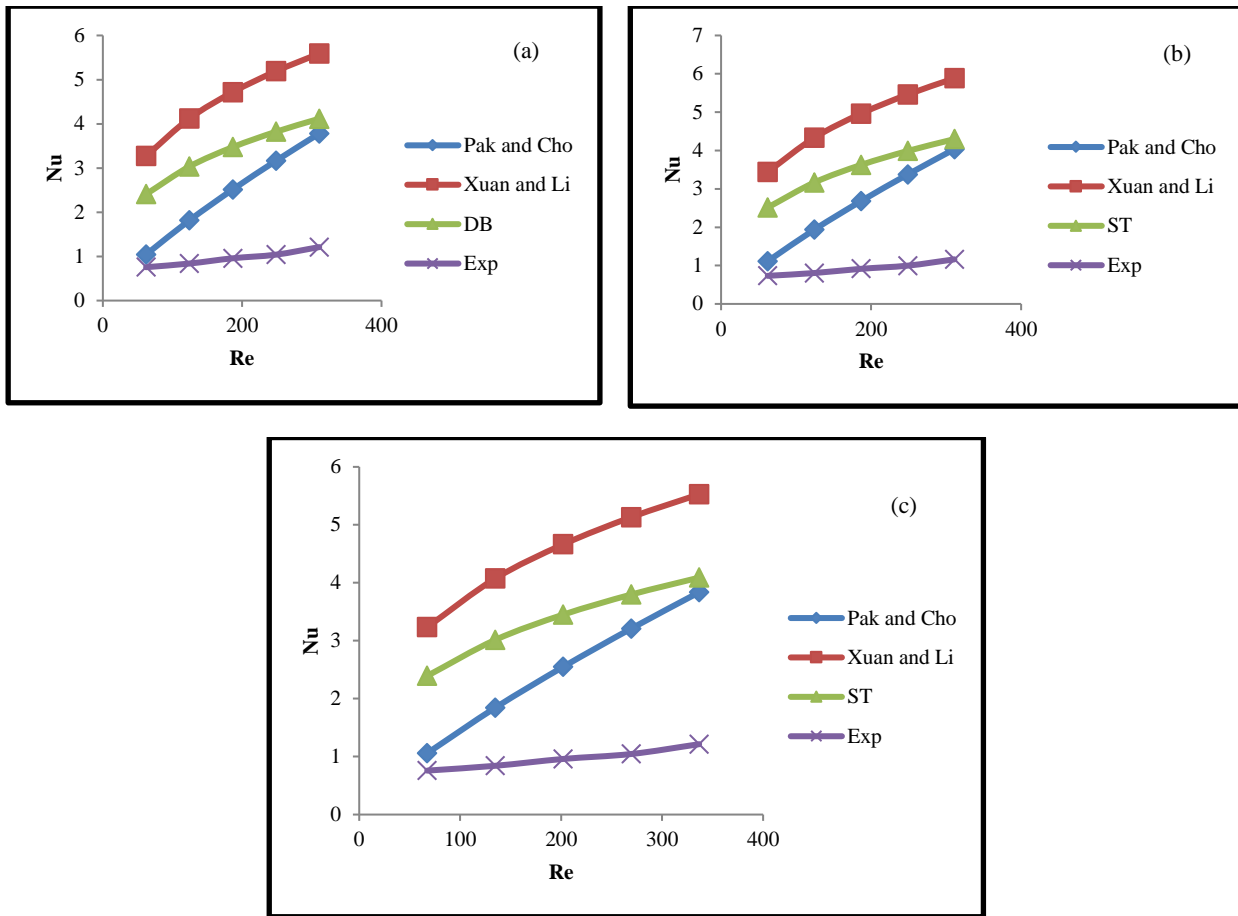
۳-۴-۲ مقایسه نتایج ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با مدل‌های ارائه‌شده

مدل‌های ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی معمولاً به صورت عدد بدون



شکل ۱۴. نمودار نسبت ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات به سیال پایه بر حسب غلظت در دماهای مختلف برای: (a) نانوسیال آب-آلومینا، (b) نانوسیال آب-آلومینوم، (c) نانوسیال آب-مس.

Figure 14. The ratio of thermal conductivity coefficient of nanofluids to base fluid in terms of the volume concentration at different temperatures in: (a) water-alumina nanofluid, (b) water-aluminum nanofluid, (c) Copper-water nanofluid.



شکل ۱۵. مقایسه داده‌های تجربی و مدل‌های ناسلت برحسب عدد رینولدز در غلظت حجمی ۰/۰۲ برای: (a) نانوسیال آب-آلومینا، (b) نانوسیال آب-آلومینیوم، (c) نانوسیال آب-مس

Figure 15. Comparison of experimental data and Nusselt models in terms of Reynolds-Numbers in volume concentration of 0.02 by: (a) Water-Alumina nanofluid, (b) Water-Aluminum nanofluid, (c) Copper-Water nanofluid.

مدل‌های معمول برای پیش‌بینی ناسلت معمولاً به فرم  $Nu = ARe^m Pr^n$  است که برای به‌دست‌آوردن مشخصه‌های این مدل از تمام داده‌های مربوطه هر یک از نانوسیالات استفاده شده‌است. برای هر نانوسیال در شرایط مختلف دما، غلظت و دبی ۶۰ مقدار موجود بود. از روش حداقل مربعات مانده‌ها برای محاسبه این مشخصه‌ها استفاده شد. نتایج این مشخصه‌ها در جدول (۵) ارائه شده‌است.

چنان‌که مشاهده می‌شود، ضریب و توان رینولدز مقادیری مشابه مقادیر مدل‌های پیش‌بینی قبلی ناسلت دارند؛ ولی توان پراوتل برخلاف تمامی مدل‌های پیشین مقدار منفی به‌خود می‌گیرد. با دقت در معادلات ارائه‌شده برای پیش‌بینی عدد ناسلت مشاهده می‌شود که توان کلی ضریب هدایت حرارتی و گرانروی در آن‌ها منفی است و این باعث می‌شود که با افزایش ضریب هدایت حرارتی (k) و

فرایند انتقال حرارت است. در سایر غلظت‌ها نیز نمودارهایی با روند مشابه ایجاد شدند، با این تفاوت که مقادیر ناسلت تجربی اندکی کمتر از مقادیر نمایش داده‌شده، بودند؛ درحالی‌که نتایج مدل‌ها تفاوت چشم‌گیری نداشتند. این نتیجه برخلاف نتایج محققان پیشین است. بسیاری از محققان گزارش کرده‌اند که مدل‌های کلاسیک مقادیری کمتر از مقادیر تجربی پیش‌بینی می‌کنند؛ درحالی‌که، نتایج این پژوهش کمتر از مقادیر مدل‌های کلاسیک و جدید است. این تناقض ممکن است ناشی از ابعاد بسیار کوچک لوله‌های تخت مورد استفاده در رادیاتور و انحراف زیاد از حالت لوله‌های معمول باشد. به‌همین دلیل، بر پایه مدل‌های کلاسیک ارائه‌شده که ناسلت را تابعی از رینولدز و پراوتل بیان می‌کنند، مدل برای پیش‌بینی ناسلت در سامانه‌های با شکل و ابعاد لوله‌های مشابه ارائه می‌شود.

جدول ۵. مشخصه‌های رابطه پیشنهادی برای محاسبه ناسلت.

Table 5. Parameters of the proposed relationship for Nusselt Number.

Nanoparticle	A	m	N
Alumina	0.608	0.289	-0.84
Aluminum	0.747	0.274	-0.99
Copper	0.628	0.28	-0.93

گران‌روی ناسلت کاهش پیدا کند؛ درحالی‌که داده‌ها نشان می‌دهند که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش نیز داشته‌است که این نتایج با نتایج مطالعات هوانگ و همکاران [۲۷] و ساندر و همکاران [۲۸] تطابق دارد. منفی شدن توان پرانتل در این مورد نیز به همین دلیل است. شاید بتوان از این پدیده نتیجه گرفت که مدل‌های کلاسیک در مورد نانوسیالات در سامانه‌های مشابه این پژوهش کارایی خود را از دست می‌دهند و احتیاج به ارائه مدل‌هایی با شکل‌های کاملاً متفاوت و افزودن مشخصه‌های جدید نظیر اندازه و شکل ذرات برای پیش‌بینی ضرایب انتقال حرارت بیش‌از پیش احساس می‌شود.

#### ۴. نتیجه‌گیری نهایی

در این مطالعه ضریب انتقال حرارت رادیاتور خودرو و تغییرات ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات مورد استفاده با غلظت و درجه حرارت بررسی و نتایج آن‌ها به تفصیل بیان شد. شاخص‌های اصلی مورد نیاز برای تعیین ضریب انتقال حرارت و اعداد بدون بعد مانند ناسلت، رینولدز و پرانتل به‌صورت تجربی یا تئوری اندازه‌گیری و حساب شد. به‌غیر از ضریب هدایت حرارتی - که مدل کاملاً قابل اعتمادی برای محاسبه آن ارائه نشده - سایر خواص فیزیکی مانند گرمای ویژه و چگالی با استفاده از مدل‌های قبلی تعیین شد. ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات به‌صورت تجربی، اندازه‌گیری و مشاهده شد که با افزایش غلظت نانوذرات و دما، این ضریب افزایش می‌یابد. این افزایش برای سه نانوسیال آلومینا، آلومینیوم و مس بر پایه آب در دمای ۵۰ درجه سلسیوس به ترتیب به ۸/۷۶، ۲۳/۹۹ و ۲۶/۹۴ درصد می‌رسد. مدل پراشر که تأثیر غلظت، اندازه ذرات و درجه حرارت را در محاسبات لحاظ می‌کند، پیش‌بینی بسیار خوبی

به‌خصوص در مورد نانوسیالات پایه‌فلزی داشته‌است. برای تعیین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در شرایط آزمایشگاهی، ابتدا درجه حرارت خروجی رادیاتور با استفاده از سیال پایه و سه نوع نانوسیال در غلظت، درجه حرارت، دبی و سرعت فن‌های مختلف اندازه‌گیری و تعیین و سپس مشخص شد که افزایش اختلاف درجه حرارت ورودی و خروجی نانوسیال با افزایش شدت جریان، درجه حرارت ورودی، غلظت و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بیشتر می‌شود. این افزایش در بهترین حالت برای نانوسیال آب-مس پایه‌فلزی به ۵۷ درصد، برای نانوسیال آب-آلومینیوم پایه‌فلزی به ۵۶ درصد و برای نانوسیال آب-آلومینا به ۳۴ درصد می‌رسد. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی درون لوله‌های تخت رادیاتور با استفاده از روابط ارائه‌شده، حساب شد. نتایج نشان داد که این ضریب با افزایش دما، دبی، غلظت و ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات افزایش می‌یابد. افزایش این ضریب در مورد نانوسیالات آلومینا، آلومینیوم و مس به ترتیب به بیش از ۴۰، ۶۶ و ۷۰ درصد رسیده‌است. نتایج کامل‌تر در جدول (۶) ارائه شده‌است. این نتایج نشان می‌دهد که برای رسیدن به یک مقدار ثابت شدت انتقال حرارت و درجه حرارت خروجی، سطح انتقال حرارت رادیاتور می‌تواند در این شرایط آزمایش تا نزدیکی ۴۰ درصد کاهش پیدا کند. هم‌چنین، نشان داده‌شد که تأثیر افزایش دبی در افزایش این ضریب در دماهای بالا کمتر می‌شود و افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در دبی‌های پایین‌تر به مقدار حدی افزایش خود نزدیک می‌شود.

جدول ۶. درصد بهبود میانگین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات نسبت به سیال پایه در غلظت حجمی ۲٪ و دبی ۵ لیتر بر دقیقه.

Table 6. The Improvement percentage in the average convection heat transfer coefficient of nanofluids compared to the base fluid at the volume concentration of 2% and flow rate of 5 liters per minute.

Temperature (°C)	Copper (%)	Aluminum (%)	Alumina (%)
35	52.94	48.48	26.99
40	60.04	55.99	30.72
45	66.32	61.71	35.92
50	70.68	66.51	40.83

- Evaluation. *Journal of Food Engineering*, 89(2), 204–209. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.04.018>
- [4] Pak, B. C., & Cho, Y. (1998). Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles. *Journal of Experimental heat transfer*, 11(2), 151-170. <https://doi.org/10.1080/08916159808946559>
- [5] Xuan, Y., & Li, Q. (2000). Heat Transfer Enhancement of Nanofluids. *International journal of Heat and Fluid Flow*, 21(91), 58–64. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(99\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00067-3)
- [6] Buongiorno, J. (2006). Convective Transport in Nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 128(3), 240-250. <https://doi.org/10.1115/1.2150834>
- [7] Koblinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. S., & Eastman, J. A. (2002). Mechanisms of Heat Flow In Suspensions of Nano-Sized Particles (Nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(4), 855–863. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00175-2](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00175-2)
- [8] Koo, J., & Kleinstreuer, C. (2005). Impact Analysis of Nanoparticle Motion Mechanisms on the Thermal Conductivity of Nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32(9), 1111–1118. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.05.014>
- [9] Kestin, J., & Wakeham, W. A. (1978). A Contribution to The Theory of The Transient Hot-Wire Technique For Thermal Conductivity Measurements. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 92(1-2), 102–116. [https://doi.org/10.1016/0378-4371\(78\)90023-7](https://doi.org/10.1016/0378-4371(78)90023-7)
- [10] Nagasaka, Y., & Nagashima, A. (1981). Absolute Measurement Of The Thermal Conductivity of Electrically Conducting Liquids By The Transient Hot-Wire Method. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 14(12), 1435–1440. <http://iopscience.iop.org/0022-3735/14/12/020>
- [11] Lee, S., Choi, S. U. S., & Eastman, J. A. (1999). Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles. *Journal of Heat Transfer*, 121(2), 280-289. <https://doi.org/10.1115/1.2825978>
- [12] Hong, T. K., Yang, H. S., & Choi, C. J. (2005). Study of The Enhanced Thermal Conductivity of Fe Nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 97(6), 1-4. <https://doi.org/10.1063/1.1861145>
- [13] Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W., & Thomson, L. J. (2001). Anomalous Increased Effective Thermal Conductivity of Ethylene Glycol Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles. *Applied Physics Letter*, 78(6), 718-720. <https://doi.org/10.1063/1.1341218>

با در نظر گرفتن نتایج بالا و این نکته که افزایش گرانروی در مورد نانوسیال آب-آلومینیوم کمتر از سایر موارد است (به دلیل چگالی کمتر) به نظر می‌رسد که استفاده از نانوسیالات در رادیاتور خودرو گزینه مناسبی برای کاهش مصرف انرژی و افزایش راندمان دستگاه باشد و نانوسیال آلومینیوم در بین موارد بالا بهترین نتایج را داشته باشد. لازم به ذکر است که استفاده از نانوسیالات با این که باعث کاهش سطح مورد نیاز می‌شود، مشکلاتی نظیر افزایش چگالی و گرانروی سیال و به تبع آن افزایش نیروی پمپاژ مورد نیاز، افزایش احتمالی ساییدگی و خوردگی بلندمدت تجهیزات و غیره را نیز به همراه دارد و تحقیقات بیشتری در این زمینه نیاز است تا اقتصادی بودن آن تأیید شود. شایان یادآوری است که روتبورت و همکاران [۳۰] با استفاده از نانوسیال آب-سیلیکون کربید هیچ‌گونه خوردگی یا ساییدگی در آلومینیوم مشاهده نکردند. عدد بدون بعد ناسلت در لوله‌های تخت رادیاتور حساب شد. نتایج نشان داد که این عدد برای نانوسیالات در محدوده ۰/۴۸ تا ۱/۴۸ تغییر می‌کند و با افزایش دما، دبی، غلظت و ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات افزایش می‌یابد. این مقادیر ناسلت نشان می‌دهد که در رادیاتور مورد مطالعه، انتقال حرارت هدایتی و جابه‌جایی تأثیر نسبتاً یکسانی در کل انتقال حرارت انجام شده دارد و با افزایش غلظت، دبی و دمای انتقال حرارت جابه‌جایی و مقدار عدد ناسلت افزایش می‌یابد. در تعدادی از غلظت، دبی و دماهای پایین، مقادیر این عدد کاهش کمی پیدا می‌کند. این کاهش نشان می‌دهد که در این حالات افزایش انتقال حرارت هدایتی بیش از افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی است و به همین دلیل، مقادیر ناسلت نسبت به سیال پایه کاهش می‌یابد.

## مراجع

- [1] Bhat, S., & Maitra, U. (2008). Facially Amphiphilic thiol Capped Gold and Silver Nanoparticles. *Journal of Chemical Sciences*, 120(6), 507–13. <https://doi.org/10.1007/s12039-008-0079-z>
- [2] Frimpong, R. A., & Hilt, J. Z. (2008). Poly (N-Isopropylacrylamide)-Based Hydrogel Coating on Magnetite Nanoparticles Via Atom Transfer Radical Polymerization. *Nanotechnology*, 19(17), 1-7. [10.1088/0957-4484/19/17/175101](https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/17/175101)
- [3] Jean, N. C., Tan, C. P., Yaakob, C. M. B., & Misni M. (2008). a-Tocopherolnanodispersions: Preparation, Characterization and Stability

- [14] Choi, S. U. S., Zhang, Z. G., Yu, W., & Lockwood, F. E., Grulk, E. A. (2001). Anomalous Thermal Conductivity Enhancement In Nanotube Suspensions. *Applied Physics Letter*, 79(14), 2252-2254. <https://doi.org/10.1063/1.1408272>
- [15] Murshed, S. M. S., Leong, K. C., & Yang, C. (2005). Enhanced Thermal Conductivity of TiO<sub>2</sub> Water Based Nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 44(4), 367-373. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2004.12.005>
- [16] Chopkar, M., Das, P. K., & Manna, I. (2006). Synthesis And Characterization of Nanofluids For Advanced Heat Transfer Application. *Scripta Materialia*, 55(6), 549-552. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.05.030>
- [17] Xie, H., Wang, J., Xi, T., & Liu, Y. (2002). Thermal Conductivity of Suspensions Containing SiC Particles. *International journal of Thermo physics*, 23(2), 571-580. <https://doi.org/10.1023/A:1015121805842>
- [18] Das, S. K., Putra, N., Thiesen, P., & Roetzel, W. (2003). Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 125(4), 567-574. <https://doi.org/10.1115/1.1571080>
- [19] Chon, C. H., Kihm, K. D., Lee, S. P., & Choi, S. U. S. (2005). Empirical Correlation Finding The Role of Temperature And Particle Size For Nanofluid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Thermal Conductivity Enhancement. *Applied Physics Letter*, 87(15), 1-4. <https://doi.org/10.1063/1.2093936>
- [20] Evans, W., Prasher, R., Fish, J., Meakin, P., Phelan, P., & Keblinski, P. (2008). Effect of Aggregation and Interfacial Thermal Resistance on Thermal Conductivity of Nanocomposites and Colloidal Nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(5-6), 1431-1438. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.10.017>
- [21] Karthikeyan, N. R., Philip, J., & Raj, B. (2008). Effect of Clustering on the Thermal Conductivity of Nanofluids. *Materials Chemistry and Physics*, 109(1), 50-55. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.10.029>
- [22] Chopkar, M., Sudarshan, S., Das, P. K., & Manna, I. (2008). Effect of Particle Size on Thermal Conductivity of Nanofluid. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39, 1535-1542. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-007-9444-7>
- [23] Mirmasoumi, S., & Behzadmehr, A. (2008). Effect of Nanoparticles Mean Diameter on Mixed Convection Heat Transfer of a Nanofluid in Horizontal Tube. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(2), 557-566. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.11.007>
- [24] Masuda, H., Ebata, A., Teramea, K., & Hishinuma, N. (1993). Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles (Dispersions of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> Ultra-Fine Particles. *Netsu Bussei (Japan)*, 7(4), 227-233. <http://dx.doi.org/10.2963/jjtp.7.227>
- [25] Li, C. H., & Peterson, G. P. (2006). Experimental Investigation of Temperature and Volume Fraction Variations on the Effective Thermal Conductivity of Nanoparticle Suspensions (Nanofluids). *Journal of Applied Physics*, 99(8), 084314-1-8. <https://doi.org/10.1063/1.2191571>
- [26] Eastman, J. A., Choi, U. S., Li, S., Thompson, L. J., & Lee, S. (1997). Enhanced Thermal Conductivity through the Development of Nanofluids. *MRS Online Proceedings Library*, 457, 3-11. <https://doi.org/10.1557/PROC-457-3>
- [27] Hwang, K. S., Jang, S. P., & Choi, S. U. S. (2009). Flow and Convective Heat Transfer Characteristics of Water-Based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluids In Fully Developed Laminar Flow Regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(1-2), 193-199. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.06.032>
- [28] Sunder, L. S., Sharma, K. V., & Ramanathan, S. (2007). Experimental Investigation of Heat Transfer Enhancements With Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluid and Twisted Tape Insert in a Circular Tube. *International Journal of Nanotechnology and Applications*, 1(2), 21-28. <http://www.ripublication.com/ijna.htm>
- [29] Xuan, Y. M., & Rotzel, W. (2000). Conceptions For Heat Transfer Correlation of Nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(19), 3701-3707. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00369-5](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00369-5)
- [30] Routbort, J., Singh, D., Timofeeva, E., Yu, W., & Smith, R. K. (2010). Erosion of Radiator materials by nanofluids. *Vehicle Technologies, Annual Review, Argonne National Laboratory*.
- [31] Maxwell, J. C. (1873). *Electricity and Magnetism*. Clarendon Press, Oxford, UK.
- [32] T. C. Choy, "Effective Medium Theory," Oxford University Press, UK, (1999).
- [33] Hamilton, R. L., & Crosser, O. K. (1962). Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *I & EC Fundamentals*, 1, 187-191.
- [34] Bruggeman, D. A. G. (1936). Calculation of various physical constants of heterogenous substances I. Dielectricity constants and conductivity of non-regular multi crystal systems. *Annual Physics*, 416 (7), 636-664. <https://doi.org/10.1002/andp.19354160705>
- [35] Riazi, H., Murphy, T., Webber, G. B., Atkin, R., Tehrani, S. S. M. & Taylor, R. A. (2016). Specific heat control of nanofluids: A critical review.

- International Journal of Thermal Sciences*, 107, 25-38. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.024>
- [36] Chandrasekar, M., Suresh, S., & Bose, A. C. (2010). Experimental Investigations And Theoretical Determination of Thermal Conductivity And Viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Water Nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(2), 210-216. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2009.10.022>
- [37] Kumar, D. H., Patel, H. E., Kumar, V. R. R., Sundararajan, T., Pradeep T., & Das, S. K. (2004). Model for Heat Conduction in Nanofluids. *Physical Review Letters*, 93(14), 144301. doi:10.1103/PhysRevLett.93.144301
- [38] Kole, M., & Dey, T. K. (2010). Thermal Conductivity and Viscosity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluid Based on Car Engine Coolant. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(31), 315501, 1-10. doi:10.1088/0022-3727/43/31/315501
- [39] Sommers, A. D., & Yerkes, K. L. (2010). Experimental Investigation in to the Convective Heat Transfer and System-Level Effects of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Propanol Nanofluid. *Journal of Nanoparticle Research*, 12(3), 1003-1014. <https://doi.org/10.1007/s11051-009-9657-3>
- [40] Beck, M. P., Sun, T., & Teja, A. S. (2007). The Thermal Conductivity of Alumina Nanoparticles Dispersed in Ethylene Glycol. *Fluid Phase Equilibria*, 260(2), 275-278. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2007.07.034>
- [41] Wong, K. V., & Kurma, T. (2008). Transport Properties of Alumina Nanofluids. *Nanotechnology*, 19, 345702, 1-8. doi:10.1088/0957-4484/19/34/345702
- [42] Teng, T. P., Hung, Y. H., Teng, T. C., Mo, H. E., & Hsu, H. G. (2010). The Effect of Alumina-Water Nanofluid Particle Size on Thermal Conductivity. *Applied Thermal Engineering*, 30(14-15), 2213-2218. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.05.036>
- [43] Duangthongsuk, W., & Wongwises, S. (2010). An Experimental Study on the Heat Transfer Performance and Pressure Drop of TiO<sub>2</sub>-Water Nanofluids Flowing Under a Turbulent Flow Regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1-3), 334-344. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.024>
- [44] Li, X. F., Zhu, D. S., Wang, X. J., Wang, N., Gao, J. W., & Li, H. (2008). Thermal Conductivity Enhancement Dependent pH and Chemical Surfactant for Cu-H<sub>2</sub>O Nanofluids. *Thermochimica Acta*, 469(1-2), 98-103. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.01.008>
- [45] Kwak, K., & Kim, C. (2005). Viscosity and Thermal Conductivity of Copper Oxide Nanofluid Dispersed in Ethylene Glycol. *Korea-Australia Rheology Journal*, 17(2), 35-40. <https://sid.ir/paper/620145/en>
- [46] Zhu, H., Zhang, C., Liu, S., Tang, Y., & Yin, Y. (2006). Effects of Nanoparticles Clustering and Alignment on Thermal Conductivities of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Aqueous Nanofluids. *Applied Physics Letters*, 89(2), 023123-1-3. <https://doi.org/10.1063/1.2221905>
- [47] Liu, M. S., Lin, M. C. C., Huang, I. T., & Wang, C. C. (2006). Enhanced Thermal Conductivity with CuO for Nanofluids. *Chemical Engineering and Technology*, 29(1), 72-77. <https://doi.org/10.1002/ceat.200500184>
- [48] Krishnamurthy, S., Bhattacharya, P., Phelan, P. E., & Prasher, R. S. (2006). Enhanced Mass Transport in Nanofluids. *Nano Letters*, 6(3), 419-423. <https://doi.org/10.1021/nl0522532>
- [49] Wen, D., & Ding, Y. (2006). Natural Convective Heat Transfer of Suspensions of Titanium Dioxide Nanoparticles (Nanofluids). *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 5(3), 220-227. doi:10.1109/TNANO.2006.874045
- [50] Putnam, S. A., Cahill, D. G., Braun, P. V., Ge, Z., & Shimmin, R. G. (2006). Thermal Conductivity of Nanoparticle Suspensions. *Journal of Applied Physics*, 99(8), 084308. <https://doi.org/10.1063/1.2189933>
- [51] Kang, H. U., Kim, S. H., & Oh, J. M. (2006). Estimation of Thermal Conductivity of Nanofluid Using Experimental Effective Particle Volume. *Experimental Heat Transfer*, 19(3), 181-191. <https://doi.org/10.1080/08916150600619281>
- [52] Zamzamin, S. A. H., Pazuki, M., & Tajik, M. (2015). Experimental investigation of the forced convective heat transfer coefficient of nanofluid in double tube and plate heat exchangers. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 14 (80), 6-13. doi: 20.1001.1.17355400.1394.14.80.1.2
- [53] Sajjadi, S. M., & Tavakoli, A. (2019). Calculation of the Thermal Conductivity Coefficient of Water and TiO<sub>2</sub> Nanofluid with Different Models. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 18 (104), 22-30. doi:20.1001.1.17355400.1398.18.104.2.9
- [54] Zinali-Harris, S. (2009). Studying the effect of nanofluids in improving the performance of vehicle systems. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 7 (37), 12-28. doi: 20.1001.1.17355400.1387.7.37.2.8
- [55] Hamidi, A. A., Amrollahi, A., Rashidi, A., Moghadasi, A. R., & Hosseini, S. M. (2009). Theoretical investigation of the mathematical models presented to calculate the thermal conductivity coefficient of nanofluids. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 8 (40), 3-11. doi: 20.1001.1.17355400.1388.8.40.1.0