



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



## Research Article

# Thermal Behavior of TiO<sub>2</sub> (85%) / MWCNT (15%) - (CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub> (50%) / H<sub>2</sub>O (50%) Hybrid Nanofluid under the Influence of Temperature and Volume Fraction Factors with Laboratory and Response Surface Methods

Mohammad Hemmat Esfe <sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Associate Professor, Faculty of Engineering and Technology, Imam Hossein University, Tehran, Iran

## PAPER INFO

### Paper history:

Received: 22 May 2022

Revised: 09 September 2023

Accepted: 27 November 2023

### Keywords:

Hybrid nanofluid,  
Thermal conductivity,  
Brownian motion,  
Response surface  
method,  
Laboratory method,  
Correlation.

## ABSTRACT

In this study, for the first time, the thermal behavior of TiO<sub>2</sub> (85%) / MWCNT (15%) - (CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub> (50%) / H<sub>2</sub>O (50%) hybrid nanofluid thermal behavior is investigated. The thermal conductivity of the nanofluid is determined by KD2 PRO at fractional volumes of  $\phi = 0.03\%$  - 0.6% and temperatures of  $T = 28^\circ\text{C}$  - 50<sup>o</sup> C. Nanoscale and nanoparticle structure validation are performed using transmission electron microscopy (TEM) and scanning (SEM) and X-ray diffraction (XRD) analysis tools. Experimental results of laboratory analyzes have shown that with increasing temperature and volume fraction, relative thermal conductivity (RTC) is increasing and the amount of this increase is more severe for volume fraction than temperature. The statistical results of experimental analysis showed that the minimum and maximum increase in thermal conductivity of nanofluid compared to the base fluid are 1.6% and 17.9%, respectively. The modeling of the response surface for the relative thermal conductivity of nanofluid showed that the values of R<sup>2</sup> and Adj R<sup>2</sup> were equal to 0.9882 and 0.9860, respectively, and the MOD value was between -1 and +1.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.26846.2253>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

\* Corresponding Author.

E-mail address: [m.hemmatesfeh@gmail.com](mailto:m.hemmatesfeh@gmail.com)

How to cite this article:

Hemmat Esfe, M. (2024). Thermal behavior of TiO<sub>2</sub> (85%) / MWCNT (15%) - (CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub> (50%) / H<sub>2</sub>O (50%) hybrid nanofluid under the influence of temperature and volume fraction factors with laboratory and response surface methods. Journal of Modeling in Engineering, 22(77), 25-36. doi: 10.22075/jme.2023.26846.2253

## رفتار حرارتی نانوسیال هیبریدی TiO<sub>2</sub>(85%)-MWCNT(15%)/(CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub>(50%)-H<sub>2</sub>O(50%) تحت تاثیر عوامل دما و کسر حجمی با رویکرد روش آزمایشگاهی و سطح پاسخ

محمد همت اسفه<sup>\*۱</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۱	
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۶	
<b>واژگان کلیدی:</b>	
نانوسیال هیبریدی،	در این مطالعه برای نخستین بار به بررسی تجربی و آماری رفتار حرارتی نانو سیال هیبریدی TiO <sub>2</sub> (85%)/MWCNT(15%)-(CH <sub>2</sub> OH) <sub>2</sub> (50%)/H <sub>2</sub> O(50%) پرداخته شد. هدایت حرارتی نانو سیال توسط دستگاه KD <sub>2</sub> PRO در کسر حجمی‌های ۰/۰۳ - ۰/۰۶ و دماهای T = ۲۸ - ۵۰°C اندازه‌گیری شد. تایید نانو مقیاس و ساختار نانو ذرات با استفاده از ابزارهای عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) و روشی (SEM) و آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) صورت گرفت. نتایج تجربی تحلیل‌های آزمایشگاهی ثابت کرده که با افزایش دما و کسر حجمی، هدایت حرارتی نسبی افزایشی است و میزان این افزایش برای کسر حجمی نسبت به دما شدیدتر است. نتایج آماری تحلیل تجربی نشان داده که کمینه و بیشینه هدایت حرارتی نانو سیال نسبت به سیال پایه به ترتیب برابر با ۱۷/۹٪ و ۱۱/۶٪ ثابت شده است. مدل‌سازی سطح پاسخ برای هدایت حرارتی نسبی نانو سیال نشان می‌دهد که مقادیر R <sup>2</sup> و Adj R <sup>2</sup> به ترتیب برابر با ۰/۹۸۸۲ و ۰/۹۸۶۰ و مقدار MOD بین ۱- و ۱+ است.
حرکت براونی،	
روش سطح پاسخ،	
روش آزمایشگاهی،	
رابطه همبستگی.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.26846.2253>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱-مقدمه<sup>۱</sup>

فرسایش لوله‌ها می‌شود. این مشکلات توسط چوی [۲] با پراکندگی جامدات با اندازه نانو در یک سیال پایه به بررسی پرداخت. سوسپانسیون‌هایی با خواص حرارتی افزایش یافته را می‌توان با پراکنده کردن نانو ذرات جامد که دارای رسانایی حرارتی ذاتی بالایی هستند در سیالات پایه مانند آب [۳-۵]، اتیلن گلیکول [۶-۸] و روغن‌ها [۹-۱۱] که هدایت حرارتی کمتری دارند ساخته شوند. به عبارت دیگر، نانو سیال‌ها سوسپانسیون‌هایی از نانو ذرات در سیالات پایه معمولی مانند آب، روغن‌ها یا اتیلن گلیکول‌ها هستند. افزایش رسانایی حرارتی در نانو سیالات به همرفت موضعی

یکی از بزرگترین مشکلات ناشی از پیشرفت های تکنولوژی، تولید گرمای اضافی بیشتر به ازای حجم تجهیزات است. یکی از بهترین راه حل‌ها برای افزایش گرما، استفاده از خنک کننده‌هایی با خواص حرارتی بهبود یافته مانند نانو سیالات است. تولد نانو سیال به ایده ماکسول نسبت داده می‌شود که ذراتی در محدوده اندازه میکرومتر و میلی‌متر به سیال پایه اضافه کرده بود تا رسانایی حرارتی سیالات را افزایش دهد [۱]. این محدوده اندازه ذرات جامد باعث ایجاد چالش‌های جدی مانند گرفتگی، افزایش افت فشار و

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.hemmatesfeh@gmail.com

۱. دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

استناد به این مقاله:

به افزایش رسانایی حرارتی می‌شود. حداکثر افزایش هدایت حرارتی در شرایط آزمایشگاهی با غلظت ۳٪ و دمای ۷۰°C برابر با ۲۲/۱٪ گزارش کردند. در مطالعه دیگر [۲۵]، نانو سیال TiO<sub>2</sub>/ آب در شرایط مختلف آزمایشگاهی برای بررسی تاثیر عوامل فرآیند بر روی عملکرد هدایت حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. آنها بر اساس مشاهدات تجربی نشان دادند که در دمای بالاتر، افزایش رسانایی حرارتی نانو سیال با افزایش کسر حجمی جامد بیشتر است در حالی که در کسر حجمی پایین، اثر افزایش دما بر هدایت حرارتی کمتر مشاهده شد. بیشترین افزایش درصد هدایت حرارتی با غلظت ۳ درصد حجمی در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد اتفاق افتاد که مقدار برابر با ۱۵/۶۹٪ تعیین شد. در سال ۲۰۲۰ [۲۶] مقاله‌ای با هدف بررسی تجربی اثرات دما و کسر حجمی بر روی افزایش هدایت حرارتی و عملکرد انتقال حرارت نانو سیال‌های Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و TiO<sub>2</sub> مبتنی بر آب ارائه شد. نتایج تجربی این مقاله نشان داد که نانو سیال حاوی Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بالاترین افزایش هدایت حرارتی به میزان حداکثر ۴۴ درصد را نسبت به نانو سیال حاوی TiO<sub>2</sub> داشته است. در جدول ۱ مروری بر مطالعات تجربی هدایت حرارتی انواع نانو سیالات هیبریدی که توسط محققان در شرایط مختلف آزمایشگاهی بررسی گردید، گزارش شده است.

جدول ۱. برخی از مطالعات مروری در زمینه انتقال حرارت انواع نانو سیالات

مرجع	نانوسیال	شرایط	حداکثر افزایش هدایت حرارتی
[۲۷]	Cu-TiO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O-EG	°C ۶۰ < T < ۳۰ % ۲ < φ < ۰/۱	% ۴۳+
[۲۸]	TiO <sub>2</sub> - H <sub>2</sub> O/EG	°C ۸۰ < T < ۳۰ % ۱/۵ < φ < ۰/۱۵	% ۱۵/۳۵+
[۲۹]	TiO <sub>2</sub> - EG	°C ۲۵ T = % ۷ < φ < ۰	% ۱۹/۵۲+
[۳۰]	TiO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	°C ۷۰ < T < ۳۰ % ۱ < φ < ۰/۱۵	% ۹+~
[۳۱]	TiO <sub>2</sub> /MWCNTs-EG- H <sub>2</sub> O	°C ۶۰ < T < ۲۰ % ۱ < φ < ۰/۱۶۲۵	% ۳۴/۳۱+

محققان برای صرفه جویی در هزینه و زمان انجام آزمایش و نیز افزایش سرعت در حصول نتایج، از روش‌های آماری و عددی سطح پاسخ<sup>۲</sup> و شبکه عصبی مصنوعی<sup>۳</sup> جایگزین

ناشی از حرکت براونی نانو ذرات نسبت داده شده است [۱۲]. نانو ذرات مورد استفاده در نانو سیال‌ها معمولاً از فلزات، اکسیدها، کاربیدها یا نانو لوله‌های کربنی ساخته می‌شوند. اولین موادی که برای نانو سیالات آزمایش شد، ذرات اکسید بودند، در درجه اول به این دلیل که تولید آنها آسان است و اینکه از نظر شیمیایی در محلول پایدار هستند [۱۳]. پس از آن، از نانو لوله‌های کربنی برای تولید نانو سیال‌ها استفاده شد و افزایش رسانایی حرارتی بیشتری برای نانو سیال‌های CNT در مقایسه با نانو سیال‌های اکسیدی مشاهده شد [۱۴، ۱۵]. اخیراً نانو سیال هیبریدی به دلیل افزایش خواص حرارتی در مقایسه با نانو سیال منفرد مورد توجه محققین قرار گرفته است [۱۶-۱۸]. نانو سیال هیبریدی را می‌توان به عنوان ترکیبی از دو یا چند نوع مختلف نانو ذرات پراکنده در یک سیال پایه تعریف کرد. نانو سیالات دارای خواص جدیدی هستند که آنها را به طور بالقوه در بسیاری از کاربردها در انتقال حرارت، از جمله میکروالکترونیک، سلول‌های سوختی، فرآیندهای دارویی، موتورهای هیبریدی، خنک‌کننده موتور/مدیریت حرارتی خودرو، یخچال خانگی، چیلرها، مبدل حرارتی، خنک‌کننده راکتور هسته‌ای مفید می‌سازد [۱۹-۲۱]. تاثیر عوامل متعددی مانند غلظت حجمی، نوع و اندازه نانو ذرات، دما، نوع سیال پایه، سورفکتانت‌ها، pH و فرآیند ساخت بر روی رسانایی حرارتی نانو سیال مورد بررسی قرار گرفت [۱۷، ۲۲]. در مطالعه‌ای [۲۳] مشابه با پژوهش حاضر، اثرات عوامل مختلف دما و کسر حجمی بر روی هدایت حرارتی نانو سیال هیبریدی (Water(50%)-TiO<sub>2</sub>(50%)-MWCNT(50%)/EG(50%) در کسر حجمی های مختلف ۱٪-۵٪ و ۰/۰۵ و محدوده دمایی ۵۰-°C ۲۵ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی آنها نشان داد که افزایش دما و کسر حجمی باعث افزایش رسانایی حرارتی نانو سیال می‌شود. همچنین تاثیر کسر حجمی نسبت به دما بر روی هدایت حرارتی برجسته‌تر بود. نتایج نشان داد که هدایت حرارتی نانو سیال می‌تواند حداکثر تا ۳۸/۷٪ افزایش یابد. در مطالعه‌ای [۲۴] به منظور درک بهتر در مورد خواص و رفتار حرارتی نانو سیال TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>/(EG)-water، اثرات عوامل مؤثر دما و کسر حجمی در شرایط مختلف آزمایشگاهی بر هدایت حرارتی مورد بررسی قرار گرفته شد. نتایج تجربی آنها اثبات میکند که افزایش غلظت و دما منجر

روش‌های پرهزینه و زمان بر آزمایش‌های تجربی کردند. در جدول ۲ برخی از مدل‌های عددی که ارتباط بین متغیرهای سیالات تعیین نموده است، گزارش شده است.

جدول ۲. برخی از مدل‌های تجربی هدایت حرارتی نانو سیالات

مرجع	روابط
[۳۲]	$TCR = (0.83411.1\phi^{+0.243}T^{-0.289})$
[۳۳]	$TCR = [0.907\exp(0.36\phi^{0.5111} + 0.000956T)]$
[۳۴]	$TCR = (1.085e^{0.0013517+0.13\phi^2} + 0.0288\ln(\phi))$
[۳۵]	$TCR = 1 + 4.4Re_p^{0.4} Pr_o^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.03} \phi_v^{0.66}$
[۳۶]	$k_{nf} = (1.017 + 1.029T * 0.072 * \phi^{+0.243}T^{-0.289})0.5642e^{0.002748T}$
[۳۳]	$k_{nf} = 0:006(\phi^{1.099})T^{1.051} + 1.014$

## ۲- فرآیند تجربی

### ۲-۱- تهیه نمونه

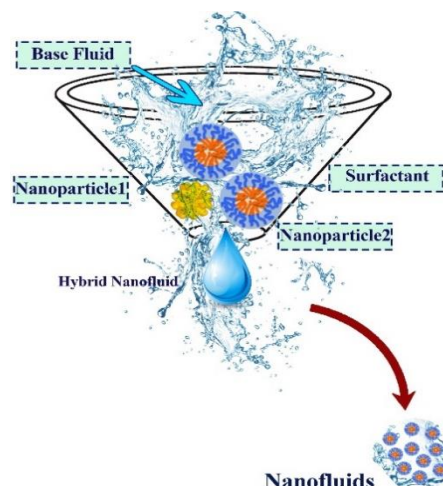
در این پژوهش از روش دو مرحله‌ای برای ساخت نانو سیال هیبریدی  $\text{TiO}_2(85\%)/\text{MWCNT}(15\%)\text{-EG}(50\%)\text{-water}(50\%)$  استفاده گردید. تیتانیا و نانو لوله کربنی با نسبت ترکیب‌های ۸۵ به ۱۵ درصد در نانو سیال پراکنده شدند. مشخصات ظاهری و خواص ترموفیزیکی نانو سیال در جدول ۳ گزارش شده است. در شکل (۱) شماتیکی از تهیه نانو سیال نشان داده شده است.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی نانو سیالات

نانوذرات	درصد خلوط	AP S	SSA	رنگ	دانشی ته واقعی
MWCNTs	> 95 wt %	5-15 nm	233 m <sup>2</sup> /g	Black	~2.1 g/cm <sup>3</sup>
TiO <sub>2</sub>	99 %	20 nm	10-45 m <sup>2</sup> /g	white	4.23 g/cm <sup>3</sup>

برای مطالعه خواص سطحی، مورفولوژی (اندازه و شکل) و

در این پژوهش برای نخستین بار رفتار حرارتی نانو سیال هیبریدی  $\text{TiO}_2(85\%)\text{MWCNT}(15\%)/\text{EG}(50\%)/\text{water}$  تحت تاثیر عوامل دما و کسر حجمی در شرایط مختلف آزمایشگاهی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. هدف در این مطالعه، بررسی روند تغییرات خواص حرارتی نسبت به هریک از متغیرهای مؤثر دما و کسر حجمی، مدلسازی ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته از طریق روش آماری  $\text{RSM}^4$  و نیز بررسی میزان اثرگذاری فاکتور کسر حجمی بر رفتار هدایت حرارتی با استفاده از آنالیز حساسیت است.



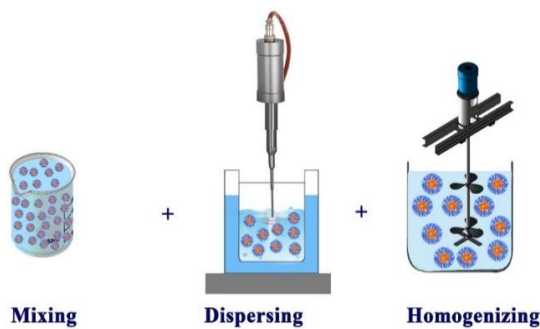
شکل ۱. شماتیک تهیه نانوسیال

<sup>4</sup> Response surface method

$$\varphi = \frac{0.15 \frac{w}{\rho} |_{MWCNT} + 0.85 \frac{w}{\rho} |_{TiO_2}}{0.15 \frac{w}{\rho} |_{MWCNT} + 0.85 \frac{w}{\rho} |_{TiO_2} + 0.50 \frac{w}{\rho} |_{Water} + 0.50 \frac{w}{\rho} |_{EG}} \times 100$$

(۱)

برای همگن سازی اولیه و سپس شکستن خوشه های نانوذرات و رسوب زدایی و عدم نشینی نانوسیال تهیه شده از روش های پایدارسازی مانند استفاده از همزن مغناطیسی و ارتعاش اولتراسونیک بکار گرفته شد. افزایش پایداری و کیفیت نانومحلول، باعث بهینه سازی نتایج و دقت در تحلیل رفتار خواص ترموفیزیکی میشود و رکن اساسی در موضوعات نانوسیالاتی محسوب میشود. شکل (۵) شماتیکی از فرآیند پایدارسازی نانوسیال را نشان می دهد.

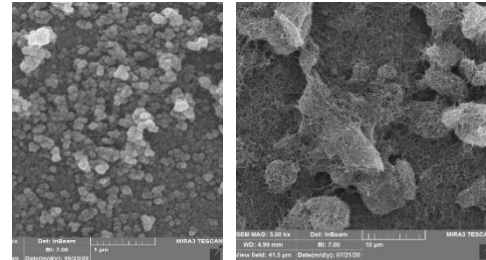


شکل ۵. شماتیکی از فرآیند پایدارسازی نانوسیال به صورت مرحله به مرحله

### ۲-۲- اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی

برای تحلیل خواص حرارتی لازم است تا مقادیر هدایت حرارتی نانو سیال در شرایط مختلف آزمایشگاهی بررسی شود. برای این منظور از دستگاه<sup>۵</sup> KD2 pro استفاده گردید. شکل (۶) شماتیکی از دستگاه حرارت سنج را نشان می دهد. اندازه گیری بر اساس مکانیزم سیم داغ گذرا و از ابزار فولاد ضد زنگ سوزنی KS-1 برای اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی این نانو سیال ترکیبی در محدوده دمایی ۲۸ تا ۵۰ درجه سانتیگراد استفاده شد. این ابزار قادر است که هدایت حرارتی را در محدوده  $0.2-0.2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  اندازه گیری کند. به منظور افزایش دقت داده های تجربی، سوزن حسگر به طور کامل در سیال قرار گرفته است و اندازه گیری در حمام آب (برای حفظ دمای نانو سیال) بدون هیچگونه نوسان و در شرایط کاملا آرام صورت گرفت. دقت دمای

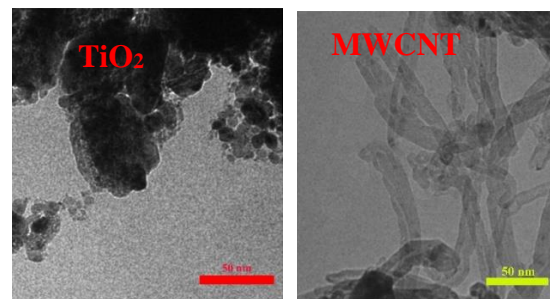
شناسایی ساختار نانو ذرات از آنالیزهای TEM، SEM و XRD استفاده گردید. تصاویر مربوط به هریک از نمونه های نانو ذرات برای آنالیزهای مختلف در اشکال (۲)، (۳) و (۴) مشاهده می شود.



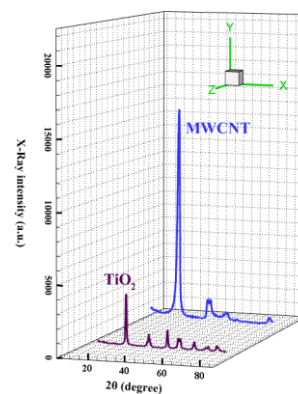
TiO<sub>2</sub>

MWCNT

شکل ۲. نمونه SEM نانو ذرات



شکل ۳. نمونه TEM نانو ذرات



شکل ۴. آنالیز اشعه پراش ایکس برای نمونه های نانوذرات MWCNT و TiO<sub>2</sub>

برای محاسبه جرم مورد نیاز نانوذرات در کسر حجمی های مختلف ۰/۰۳٪، ۰/۰۶٪، ۰/۱۰٪، ۰/۲۰٪، ۰/۳۰٪، ۰/۴۰٪، ۰/۵٪ و ۰/۶۰٪ از رابطه ۱ استفاده گردید. همچنین برای توزین نانوذرات از ترازوی دیجیتالی بادقت ۰/۱ mgr بکار گرفته شد.

<sup>5</sup> Decagon device, Inc., USA

جدول ۴. برخی از اندازه‌گیری‌های ضریب هدایت حرارتی  $\text{TiO}_2(85\%)\text{-MWCNT}(15\%)\text{-EG}(50\%)\text{-water}(50\%)$

نسبت هدایت حرارتی	دما (°C)	کسر حجمی (%)
۱/۰۲۰	۲۸	۰/۰۳
۱/۰۴۰	۳۳	۰/۰۶
۱/۰۶۰	۳۸	۰/۱۰
۱/۰۹۰	۴۶	۰/۲۰
۱/۱۱۰	۵۰	۰/۳۰
۱/۰۹۰	۲۸	۰/۴۰
۱/۱۱۰	۳۳	۰/۵۰
۱/۱۸۰	۵۰	۰/۶۰

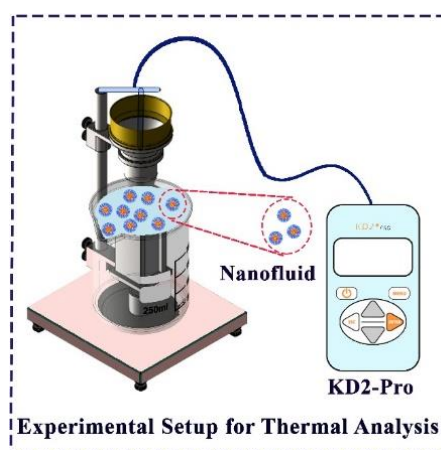
### ۳-۱- بررسی داده‌های آزمایشگاهی

در این بخش به بررسی و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده از نانوسیال  $\text{TiO}_2(85\%)\text{-MWCNT}(15\%)\text{-}(\text{CH}_2\text{OH})_2(50\%)\text{-H}_2\text{O}(50\%)$  پرداخته می‌شود.

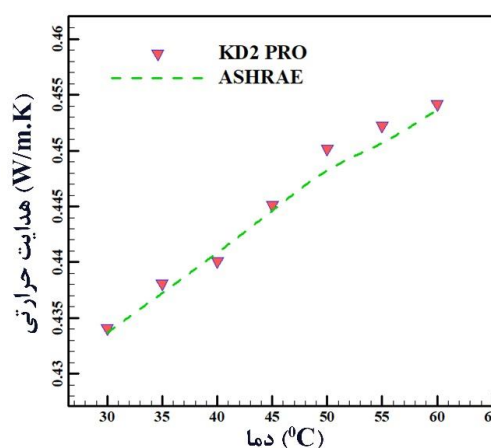
### ۳-۱-۱- تاثیر دما و کسر حجمی نانو ذرات بر نسبت هدایت حرارتی

به منظور ارزیابی دقیق‌تر افزایش هدایت حرارتی، تغییر  $\text{RTC}^6$  نانو سیال هیبریدی در مقابل کسر حجمی و دما در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در دماهای بالاتر، تغییرات  $\text{RTC}$  نسبت به کسر حجمی بیشتر از آن در دماهای پایین‌تر است. علاوه بر این، بررسی نسبت هدایت حرارتی روشن می‌کند که تأثیر دما بر نسبت هدایت حرارتی در کسرهای حجمی جامد بالاتر قابل توجه است. این امر به این دلیل است که در حضور مقادیر زیاد ذرات، تأثیر دما بر حرکت ذرات محسوس‌تر است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش  $\phi$ ،  $\text{RTC}$  نانو سیال در همه دماها افزایشی است. بر اساس این نمودار در دمای  $T = 50^\circ\text{C}$ ، با افزایش کسر حجمی از ۰/۰۳٪ تا ۰/۶۰٪،  $\text{RTC}$  از ۱/۰۴۰ تا ۱/۱۷۹ تغییر می‌کند که بیشترین درصد افزایش هدایت حرارتی در شرایط آزمایشگاهی  $T = 50^\circ\text{C}$  و  $\phi = 0/60$  رخ داده که مقدار آن ۱۷/۹٪ بیشتر از سیال پایه بوده است.

تنظیم در حمام آب به ۰/۰۱ درجه سانتیگراد می‌رسد. به منظور دستیابی به دقت قابل قبول در فرآیند اندازه‌گیری، داده‌های آزمایشگاهی برای هر شرایط در سه نوبت با فاصله ۱۰ دقیقه‌ای اندازه‌گیری شدند و سپس میانگین داده‌ها ثبت شد. در جدول ۴ برخی از داده‌های تجربی در شرایط مختلف گزارش شد. رسانایی حرارتی سیال پایه نانو سیال در شرایط مختلف با بانک مرجع ASHRAE برای تأیید نتایج مقایسه شد [۳۷]. شکل (۷) نشان می‌دهد که مقادیر اندازه‌گیری شده تجربی انطباق خوبی با مرجع ASHRAE داشته است.



شکل ۶. شماتیک دستگاه KD2 pro (Decagon device, Inc., USA)



شکل ۷. اعتبارسنجی نتایج KD2-pro (دستگاه اندازه‌گیری هدایت حرارتی) با نتایج ASHRAE

### ۳- بحث و نتیجه‌گیری

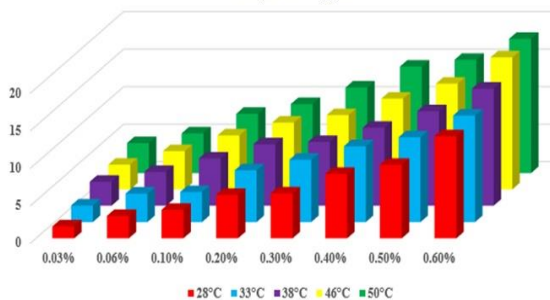
مطالب این بخش به طور کلی در دو قسمت ارائه می‌شوند که در ابتدا به بررسی داده‌های آزمایشگاهی و سپس به نتایج مدل‌سازی هدایت حرارتی نانو سیال پرداخته می‌شود.

<sup>6</sup> Relative thermal conductivity

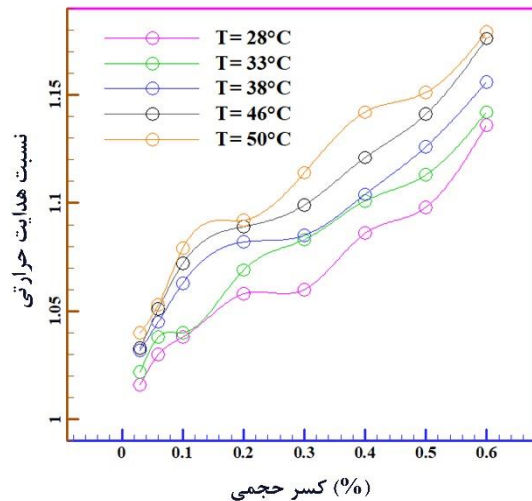
$$TCE = \frac{K_{nf} - K_{bf}}{K_{bf}} \times 100 \quad (2)$$

در شکل (۹) مقدار افزایش هدایت حرارتی نانو سیال در شرایط مختلف آزمایشگاهی نسبت به سیال پایه رسم شده است. میتوان نتیجه گرفت که با افزودن مقدار ناچیز از نانو ذره در سیال پایه، هدایت حرارتی افزایش می‌باشد به گونه ای که با توجه به جدول ۵ مقدار کمینه و بیشینه افزایش به ترتیب برابر با ۱/۶٪ و ۱۷/۹٪ گزارش شده است.

آنالیز حساسیت



شکل ۹. کمینه و بیشینه افزایش ضریب هدایت حرارتی



شکل ۸. نسبت هدایت حرارتی به کسر حجمی در دماهای مختلف نانو ذرات

### ۳-۱-۲- افزایش هدایت حرارتی

برای درک بهتر اثربخشی نانو ذرات بر  $K_{nf}$  و سهولت مقایسه،  $TCE^7$  از معادله ۲ محاسبه شده است. این پارامتر درصد افزایش  $K_{nf}$  را نسبت به سیال پایه نشان می‌دهد.

جدول ۵. مقادیر درصد افزایش ضریب هدایت حرارتی در شرایط مختلف آزمایشگاهی-  $TiO_2(85\%)/MWCNT(15\%)$   $(CH_2OH)_2(50\%)/H_2O(50\%)$

کسر حجمی (%)	افزایش هدایت حرارتی (%)							
	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۱۰	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۴۰	۰/۵	۰/۶۰
T=۲۸	۱/۶	۳	۳/۸	۵/۸	۶	۸/۶	۹/۸	۱۳/۶
T=۳۳	۲/۲	۳/۸	۴	۶/۹	۸/۳	۱۰/۱	۱۱/۳	۱۴/۲
T=۳۸	۳/۲	۴/۵	۶/۳	۸/۲	۸/۵	۱۰/۴	۱۲/۶	۱۵/۶
T=۴۶	۳/۳	۵/۱	۷/۲	۸/۹	۹/۹	۱۲/۱	۱۴/۱	۱۷/۶
T=۵۰	۴	۵/۳	۷/۹	۹/۲	۱۱/۴	۱۴/۲	۱۵/۱	۱۷/۹

شکل (۱۱)، نتایج تجربی به دست آمده از کار حاضر و [۲۳] با نتایج مدل‌های تئوری ریاضی معروف همیلتون-کراسر [۳۸] و ماکسول [۳۹] ترسیم شده است. با توجه به شکل (۱۰) اثرات دیگر پارامترها مانند دما، اندازه، شکل و ... توسط مدل‌های تئوری در نظر گرفته نشده است.

### ۳-۱-۳- نتایج بین کارهای حاضر و کارهای پیشین

در این بخش مطالعه‌ای مقایسه‌ای بر روی مدل‌های تئوری و تجربی با پژوهش حاضر شده است. داده‌های مدل‌های تئوری و نیز تجربی در دمای مشترک  $T = 50^\circ C$  و کسر حجمی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ در جدول ۶ گزارش شده است. در

<sup>7</sup> Thermal conductivity enhancement

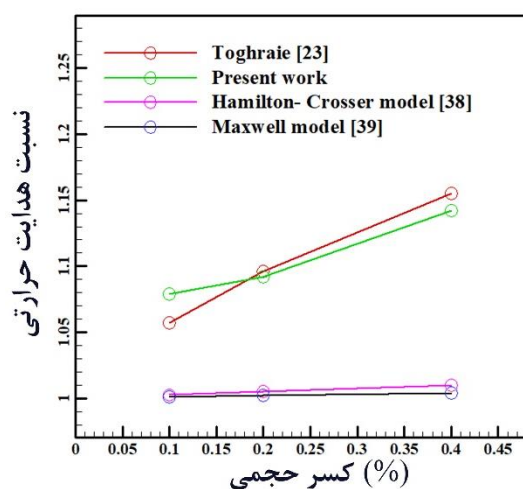
روش RSM از جمله روش‌های پرکاربرد در طراحی آزمایش و بهینه‌سازی می‌باشد و در واقع مجموعه‌ای از روش‌ها و تکنیک‌های آماری برای ساخت مدل‌های تجربی است. در روش سطح پاسخ، یک متغیر به عنوان پاسخ و متغیر هدف در نظر گرفته می‌شود و پارامترهای تاثیرگذار بر آن به عنوان متغیر مستقل یا ورودی لحاظ می‌شوند. در روش سطح پاسخ اثرات متقابل بین متغیرها بررسی می‌شود و نتایج به صورت اعداد کمی بیان می‌گردد. روش‌هایی مانند RSM که مدلسازی داده‌های تجربی و عددی را انجام می‌دهند باعث صرفه‌جویی در وقت و هزینه می‌شود.

بررسی نتایج هدایت حرارتی نسبی نانوسیال  $TiO_2(85\%)/MWCNT(15\%)/EG(50\%)/water(50\%)$  با استفاده از روش سطح پاسخ منجر به ارائه خروجی‌هایی از جمله معادله ۳ و جدول ۷ می‌شود. معادله ۳ بیانگر مدل ارائه شده برای هدایت حرارتی نسبی نانو سیال است که شامل پارامترهای دما و کسر حجمی می‌باشد.

$$\begin{aligned} \log_{10}(RTC) = & -0.007281 \\ & + 0.102261 \varphi \\ & + 0.000388 T \\ & + 0.002346 \varphi T \\ & - 0.332903 \varphi^2 \\ & - 0.002735 \varphi^2 * T \\ & + 0.453264 \varphi^3 \end{aligned} \quad (3)$$

جدول ۶. هدایت حرارتی نسبی به دست آمده از نتایج تجربی و مدل‌های موجود

$T = 50^\circ C$				
مطالعه حاضر [۲۳]	مرجع [۲۳]	مدل ماکسول	مدل همیلتون-کراسر	کسر حجمی (%)
۱/۰۷۹	۱/۰۵۷	۰/۰۰۰۹۹۸	۰/۰۰۲۴۹۳	۰/۱
۱/۰۹۲	۱/۰۹۶	۱/۰۰۱۹۹۴	۱/۰۰۴۹۸۱	۰/۲
۱/۱۴۲	۱/۱۵۵	۱/۰۰۳۹۸	۱/۰۰۹۹۴۴	۰/۴



شکل ۱۰. مقایسه نتایج تجربی با مدل‌های نظری

### ۳-۲- نتایج مدلسازی

#### ۳-۲-۱- روش RSM

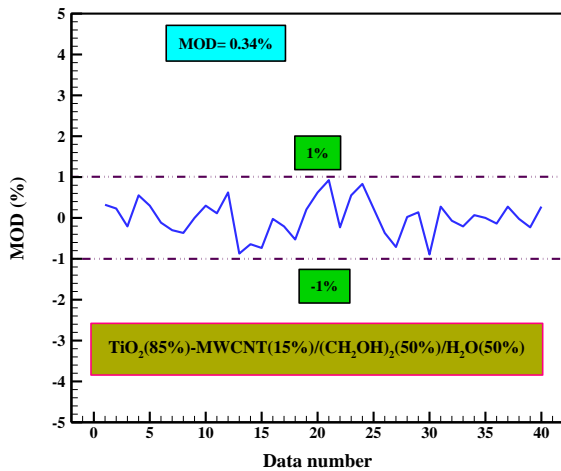
جدول ۷. تجزیه و تحلیل آماری مدل سطح پاسخ

	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	F Value	p-value Prob > F	
Model	۰/۰۱۱۹	۶	۰/۰۰۲۰	۴۵۹/۵۳	۰/۰۰۰۱ <	معنادار
A-Phi	۰/۰۰۰۴	۱	۰/۰۰۰۴	۱۰۳/۰۳	۰/۰۰۰۱ <	
B-T	۰/۰۰۰۷	۱	۰/۰۰۰۷	۱۵۸/۴۷	۰/۰۰۵۰	
AB	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۹/۰۷	۰/۳۰۹۸	
A <sup>3</sup>	۰۶E-۴/۵۸۸	۱	۰۶E-۴/۵۸۸	۱/۰۶	۰/۰۴۹۹	
A <sup>2</sup> B	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۴/۱۴	۰/۰۰۰۱ <	
A <sup>3</sup>	۰/۰۰۰۰۲	۱	۰/۰۰۰۰۲	۳۶/۰۸		
Residual	۰/۰۰۰۱	۳۳	۰۶E-۴/۳۱۲			



تعریف می‌شود و در واقع درصد تغییرات هدایت حرارتی نسبی در استفاده از مدل نسبت به نتایج آزمایشگاهی است. نتایج MOD<sup>10</sup> در شکل (۱۲) ارائه شده است که مقادیری بین ۱٪- و ۱٪+ بدست آمده است و مقدار میانگین نتایج برابر با ۰/۳۴٪ شده است که دقت خوب مدل ارائه شده را نشان می‌دهد.

$$MOD = \frac{RTC_{relpre} - RTC_{relexp}}{RTC_{relexp}} \times 100 \quad (۴)$$



شکل ۱۲. انحراف از معیار داده‌ها

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملکرد حرارتی نانو سیال هیبریدی TiO<sub>2</sub>(85%)/MWCNT(15%)-(CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub>(50%)/H<sub>2</sub>O(50%) در شرایط مختلف آزمایشگاهی مورد تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی و آماری قرار گرفته است. هدف در این مطالعه درک رفتار حرارتی نانو سیال بصورت آزمایشگاهی و بهینه‌سازی این رفتار با استفاده از روش RSM است. نتایج حاصل از تحلیل‌های آماری و آزمایشگاهی در موارد زیر خلاصه شده است:

مشاهدات نشان داده که تاثیر فاکتورهای دما و کسر حجمی رابطه مستقیمی بر رفتار حرارتی داشته است. یافته‌های آزمایشگاهی مشخص کرده که شدت افزایش هدایت حرارتی در کسر حجمی‌ها و دماهای بالا به دلیل اثر همزمان حرکت براونی و افزایش تعداد برخوردها و تشکیل نانوخوشه‌های بیشتر است.

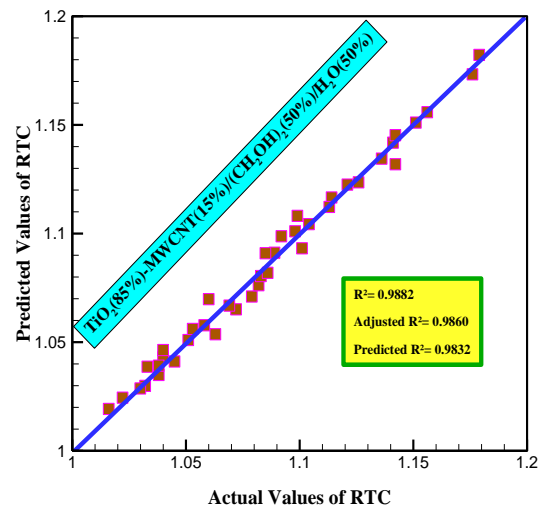
افزودن مقدار ناچیزی از نانو ذرات در شرایط مختلف دمایی، هدایت حرارتی نانو سیال را افزایش داده است. کمینه و بیشینه افزایش هدایت حرارتی به ترتیب برابر با

جدول ۷، معروف به جدول ANOVA<sup>8</sup> است و در آن پارامترهای موثر بر هدایت حرارتی نسبی به همراه مقادیر آماری مدل‌سازی آورده شده است. همان‌طور که مشخص است مدل‌سازی، معنادار 9 است. در جدول ۸ اطلاعات مربوط به دقت مدل‌سازی ارائه شده است و پارامترهای R<sup>2</sup> و Adj R<sup>2</sup> به ترتیب برابر با ۰/۹۸۸۲ و ۰/۹۸۶۰ بدست آمدند و با توجه به نزدیکی خوب این مقادیر به عدد ۱، بیانگر دقت خوب مدل‌سازی است.

جدول ۸. پارامترهای دقت مدل‌سازی

انحراف استاندارد	۰/۰۰۲۱	R-Squared	۰/۹۸۸۲
میانگین	۰/۰۳۵۶	Adj R-Squared	۰/۹۸۶۰
C.V. %	۵/۸۳	Pred R-Squared	۰/۹۸۳۲
Adeq Precision	۷۴/۱۴۵۴		

شکل (۱۱) میزان تطابق داده‌های واقعی و حاصل از آزمایش را با نتایج خروجی از مدل‌سازی ارائه می‌دهد و نزدیکی بیش‌تر داده‌ها به خط ۴۵ درجه بیانگر دقت بیش‌تر مدل‌سازی است. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشخص است داده‌ها به میزان خوبی به خط نیمساز نزدیک هستند و دقت مدل‌سازی مناسب است.



شکل ۱۱. تطابق داده‌های تجربی و مدل‌سازی

#### ۳-۲-۲- حاشیه انحراف

پارامتر حاشیه انحراف که از جمله پارامترهای بیانگر دقت می‌باشد به صورت معادله ۴ برای هدایت حرارتی نسبی

<sup>10</sup> Margin of deviation

<sup>8</sup> Analysis of variance

<sup>9</sup> Significant

$1\% < MOD < 1\%$  بدست آمد که دقت خوب مدل هدایت حرارتی نسبی نانوسیال را نشان می‌دهد.

۱/۶٪ و ۱۷/۹٪ ثبت شده است. نتایج حاصل از مدلسازی RSM نشان داد که مقادیر  $R_2$  و  $Adj R_2$  به ترتیب برابر با ۰/۹۸۸۲ و ۰/۹۸۶۰ هستند و همچنین

## مراجع

- [1] J.C. Maxwell. "A treatise on electricity and magnetism." *Clarendon Press google schola* 2 (1873): 3408-3425.
- [2] S.U. Choi, and J.A. Eastman. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. No. ANL/MSD/CP-84938; CONF-951135-29. Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States), 1995.
- [3] A.B. Colak. "Experimental study for thermal conductivity of water-based zirconium oxide nanofluid: developing optimal artificial neural network and proposing new correlation." *International Journal of Energy Research* 45, no. 2 (2021): 2912-2930.
- [4] S. Rostami, D. Toghraie, B. Shabani, N. Sina, P. Barnoon . "Measurement of the Thermal Conductivity of Mwent-Cuo/Water Hybrid Nanofluid Using Artificial Neural Networks (Anns)." *Journal of Thermal Analysis Barnoon and Calorimetry*. 143, no. 2 (2021): 1097-105.
- [5] R. Pourrajab, A. Noghrehabadi, M. Behbahani, and E. Hajidavalloo. "An efficient enhancement in thermal conductivity of water-based hybrid nanofluid containing MWCNTs-COOH and Ag nanoparticles: experimental study." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 143 (2021): 3331-3343.
- [6] S.R. Yan, R. Kalbasi, Q. Nguyen, and A. Karimipour. "Rheological behavior of hybrid MWCNTs-TiO2/EG nanofluid: a comprehensive modeling and experimental study." *Journal of Molecular Liquids* 308 (2020): 113058.
- [7] T.J. Choi, M.S. Park, S.H. Kim, S.P. Jang. "Experimental Study on the Effect of Nanoparticle Migration on the Convective Heat Transfer Coefficient of Eg/Water-Based Al2o3 Nanofluids." *International Journal of Heat, and Mass Transfer*. 169 (2021): 120903.
- [8] T. Wen, G. Zhu, and L. Lu. "Experimental and artificial neural network based study on the heat transfer and flow performance of ZnO-EG/water nanofluid in a mini-channel with serrated fins." *International Journal of Thermal Sciences* 170 (2021): 107149.
- [9] H. Jiang, H. Li, C. Zan, F. Wang, Q. Yang, and L. Shi. "Temperature dependence of the stability and thermal conductivity of an oil-based nanofluid." *Thermochimica Acta* 579 (2014): 27-30.
- [10] M.S. Liu, M.C.C. Lin, I.T. Huang, W. Chi-Chuan . "Enhancement of Thermal Conductivity with Carbon Nanotube for Nanofluids." *International communications in heat and mass transfer*. 32, no. 9 (2005): 1202-10.
- [11] M.H. Esfe, S. Alidoust, E. Mohammadnejad Ardeshiri, and D. Toghraie. "The effect of different parameters on ability of the proposed correlations for the rheological behavior of SiO2-MWCNT (90: 10)/SAE40 oil-based hybrid nano-lubricant and presenting five new correlations." *ISA transactions* 128 (2022): 488-497.
- [12] M. Parsaiemehr, F. Pourfattah, O. Ali Akbari, D. Toghraie, and G. Sheikhzadeh. "Turbulent flow and heat transfer of Water/Al2O3 nanofluid inside a rectangular ribbed channel." *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures* 96 (2018): 73-84.
- [13] S. Lee, S.S. Choi, S.A. Li, and J.A. Eastman. "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles." (1999): 280-289.
- [14] J.A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu, and L.J. Thompson. "Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles." *Applied physics letters* 78, no. 6 (2001): 718-720.
- [15] S.U.S Choi, Z. George Zhang, W. Yu, F.E. Lockwood, and E.A. Grulke. "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions." *Applied physics letters* 79, no. 14 (2001): 2252-2254.
- [16] Ç. Yıldız, M. Arıcı, and H. Karabay. "Comparison of a theoretical and experimental thermal conductivity model on the heat transfer performance of Al2O3-SiO2/water hybrid-nanofluid." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 140 (2019): 598-605.

- [17] M.R. Safaei, A. Hajizadeh, M. Afrand, C. Qi, H. Yarmand, and N. Wahidah Binti Mohd Zulkifli. "Evaluating the effect of temperature and concentration on the thermal conductivity of ZnO-TiO<sub>2</sub>/EG hybrid nanofluid using artificial neural network and curve fitting on experimental data." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 519 (2019): 209-216.
- [18] V. Kumar, and R. Rekha Sahoo. "Viscosity and thermal conductivity comparative study for hybrid nanofluid in binary base fluids." *Heat Transfer—Asian Research* 48, no. 7 (2019): 3144-3161.
- [19] R. Taherialekouhi, S. Rasouli, and A. Khosravi. "An experimental study on stability and thermal conductivity of water-graphene oxide/aluminum oxide nanoparticles as a cooling hybrid nanofluid." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 145 (2019): 118751.
- [20] H. Shojaie Chahregh, and S. Dinarvand. "TiO<sub>2</sub>-Ag/blood hybrid nanofluid flow through an artery with applications of drug delivery and blood circulation in the respiratory system." *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow* 30, no. 11 (2020): 4775-4796.
- [21] F. Abbas, H. Muhammad Ali, T. Raza Shah, H. Babar, M.M. Janjua, U. Sajjad, and M. Amer. "Nanofluid: Potential evaluation in automotive radiator." *Journal of molecular liquids* 297 (2020): 112014.
- [22] Y. Li, R. Kalbasi, Q. Nguyen, and M. Afrand. "Effects of Sonication Duration and Nanoparticles Concentration on Thermal Conductivity of Silica-Ethylene Glycol Nanofluid under Different Temperatures: An Experimental Study." *Powder Technology*. 367 (2020): 464-73.
- [23] A. Akhgar, and D. Toghraie. "An experimental study on the stability and thermal conductivity of water-ethylene glycol/TiO<sub>2</sub>-MWCNTs hybrid nanofluid: developing a new correlation." *Powder Technology* 338 (2018): 806-818.
- [24] K.A. Hamid, , W.H. Azmi, M.F. Nabil, and R Mamat. "Improved Thermal Conductivity of Tio<sub>2</sub>–Sio<sub>2</sub> Hybrid Nanofluid in Ethylene Glycol and Water Mixture." *Paper presented at the IOP Conference series: materials science and engineering*, 2017.
- [25] R.P. Singh, K. Sharma, and A.K. Tiwari. "An experimental investigation of thermal conductivity of TiO<sub>2</sub> nanofluid: proposing a new correlation." (2019).
- [26] S. Mukherjee, , S. Chakrabarty, P. Chandra Mishra, and P. Chaudhuri. "Transient heat transfer characteristics and process intensification with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water and TiO<sub>2</sub>-water nanofluids: An experimental investigation." *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification* 150 (2020): 107887.
- [27] M.H. Esfe, S. Wongwises, A. Naderi, A. Asadi, M.R. Safaei, H. Rostamian, M. Dahari, and A. Karimipour. "Thermal conductivity of Cu/TiO<sub>2</sub>–water/EG hybrid nanofluid: Experimental data and modeling using artificial neural network and correlation." *International communications in heat and mass transfer* 66 (2015): 100-104.
- [28] K. Abdul Hamid, W.H. Azmi, R Mamat, and N.A. Usri. "Thermal conductivity enhancement of TiO<sub>2</sub> nanofluid in water and ethylene glycol (EG) mixture." (2016).
- [29] R.S. Khedkar, N. Shrivastava, S.S. Sonawane, and K.L. Wasewar. "Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of TiO<sub>2</sub>–ethylene glycol nanofluid." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 73 (2016): 54-61.
- [30] M.H. Esfe, S.M. Motallebi, and M. Bahiraei. "Employing response surface methodology and neural network to accurately model thermal conductivity of TiO<sub>2</sub>–water nanofluid using experimental data." *Chinese Journal of Physics* 70 (2021): 14-25.
- [31] A. Moradi, M. Zareh, M. Afrand, and M. Khayat. "Effects of temperature and volume concentration on thermal conductivity of TiO<sub>2</sub>-MWCNTs (70-30)/EG-water hybrid nano-fluid." *Powder Technology* 362 (2020): 578-585.
- [32] M. Afrand,. "Experimental study on thermal conductivity of ethylene glycol containing hybrid nano-additives and development of a new correlation." *Applied Thermal Engineering* 110 (2017): 1111-1119.
- [33] M. Zadkhast, D. Toghraie, and A. Karimipour. "Developing a new correlation to estimate the thermal conductivity of MWCNT-CuO/water hybrid nanofluid via an experimental investigation." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 129 (2017): 859-867.

- [34] M.H. Esfe, W.M. Yan, M. Akbari, A. Karimipour, and M. Hassani. "Experimental study on thermal conductivity of DWCNT-ZnO/water-EG nanofluids." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 68 (2015): 248-251.
- [35] M. Corcione,. "Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids." *Energy conversion and management* 52, no. 1 (2011): 789-793.
- [36] I. Panahi Moghadam, M. Afrand, S.M. Hamad, A.A. Barzinjy, and P. Talebizadehsardari. "Curve-fitting on experimental data for predicting the thermal-conductivity of a new generated hybrid nanofluid of graphene oxide-titanium oxide/water." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 548 (2020): 122140.
- [37] M. Vaughn. "ASHRAE Research Report: 2017-2018." *ASHRAE Journal* 60, no. 10 (2018): 73-84.
- [38] R. Lee Hamilton, and O.K. Crosser. "Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems." *Industrial & Engineering chemistry fundamentals* 1, no. 3 (1962): 187-191.
- [39] J.C. Maxwell. A treatise on electricity and magnetism: Pt. III. Magnetism. pt. IV. Electromagnetism. Vol. 2. Clarendon press, 1881.