



## بررسی آزمایشگاهی و ارائه یک مدل جدید برای تعیین ضریب هدایت گرمایی نسبی نانوسیال ترکیبی نانولوله کربنی چندجداره/اکسید مس - آب

مسعود زاده خواست<sup>۱\*</sup>، دکتر داود طغرابی<sup>۲</sup>، دکتر آرش کریمی پور<sup>۳</sup>

\* نویسنده مسئول: masoudzadhast@gmail.com

### واژه‌های کلیدی

نانوسیال - کسر حجمی - دما - ضریب هدایت  
گرمایی - نانولوله‌های کربنی

### چکیده

در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای کسر حجمی و دما بر ضریب هدایت گرمایی، نانولوله‌های کربنی و نانوسیال جدید و پر کاربرد اکسید مس - آب دیونیزه پرداخته می‌شود. نانوسیال با کسرهای حجمی ۰/۰۵ و ۰/۲ درصد حجمی برای بررسی تأثیر کسر حجمی بر ضریب هدایت گرمایی آماده شد. همچنین برای بررسی اثر دما، دما را به محدوده‌های ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس محدود کردیم. برای اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی از روش سیم داغ گذرا با استفاده از دستگاه KD2-Pro و پراب KS1 عمل کردیم. با افزایش دما و افزایش کسر حجمی ضریب هدایت گرمایی نانوسیال در مقایسه با سیال پایه افزایش چشمگیری دارد. در کسرهای حجمی پایین افزایش ضریب هدایت گرمایی چشمگیرتر است.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۲- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان و عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

۳- استادیار، دانشکده مکانیک، عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

## ۱- مقدمه (قلم بی زر با اندازه ۱۲)

با توجه به رشد روزافزون کاربرد نانوسیالات در سیستم‌های حرارتی، صنایع میکروالکترونیک، روغن موتورها، روان کننده ها، وسایر فناوریها، این دسته از سیالات امروزه به شدت در کانون توجه محققان قرار گرفته اند. بررسی ها نشان می دهد نانوسیالات دارای ضریب انتقال حرارت و پایداری سوسپانسیونی بالاتری نسبت به سایر سیالات متداول و سوسپانسیونهای با ابعاد بزرگتر هستند. [۱-۸]

افزایش راندمان سیستمهای حرارتی [۹] مورد توجه قرار گرفته اند. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه خواص این سیالات در شرایط مختلف به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام گرفته که بسیاری از آنها نمایانگر افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه است.

لی و همکاران [۱۰] هدایت حرارتی نانوسیال آلومینا و اکسید مس در سیال پایه آب و اتیلن گلیکول را اندازه گیری نمودند. نتایج آنها نمایانگر افزایش قابل ملاحظه هدایت حرارتی نانوسیال در مقایسه با سیال پایه است. نتایج تحقیقاتی متعددی نشان داده است که در کسر حجمی های پایین (نانوذرات ۵-۱٪ درصد حجمی) نیز هدایت گرمایی می‌تواند تا بیشتر از ۲۰٪ نیز افزایش یابد. [۱۱-۱۲-۱۳]

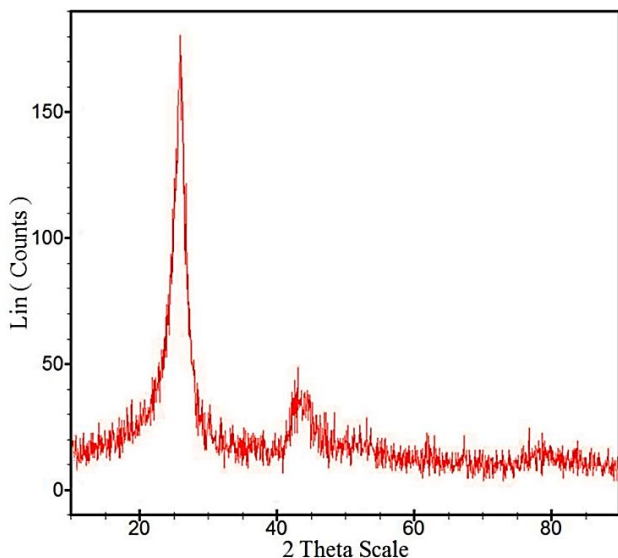
ذرات معلق فوق ریز، خواص انتقالی و عملکرد انتقال حرارت نانو سیال ها را تغییر می‌دهد، به طوریکه پتانسیل بالایی در بهبود انتقال حرارت نشان می‌دهند. [۱۴] مهمترین کاربرد نانو سیالها به عنوان خنک کننده است. سه فاکتوری که باعث میشود تا نانو سیالها خنک کننده های مناسبی باشند عبارتند از: بالا بودن هدایت حرارتی، بالا بودن انتقال حرارت در یک فاز و بالا بودن شار حرارتی بحرانی. [۱۵]

ژاوان و لی [۱۶] هدایت حرارتی نانوسیال آب/اکسید مس و روغن/اکسید مس در غلظتهای حجمی ۱/۲۴ تا ۱۱/۷۸ بصورت آزمایشگاهی و تحلیلی مورد بررسی قرار داده اند، نتایج آنها افزایش ۲/۵ تا ۷/۵ درصدی در ضریب هدایت حرارتی نانوسیال را نشان داده است. یافته‌های زینالی و همکاران [۱۷] نیز از افزایش انتقال حرارت جابجایی را در برابر افزایش غلظت حجمی نانوسیال در محدوده جریان آرام در لوله دایروی افقی با دمای دیواره ثابت حکایت می کند. کیم و

همکاران [۱۸] انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آلومینا و کربنی در رژیمهای جریان آشفته و آرام درون یک لوله تحت شار حرارتی ثابت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نیز افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت جابجایی نسبت به سیال پایه را نشان می‌دهد. آنها همچنین نشان دادند که افزایش انتقال حرارت جابجایی نانوسیال بسیار بیشتر از درصد افزایش هدایت حرارتی این سیالات است. هیهات و همکاران [۱۹، ۲۰] تحقیقی را بر روی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب-آلومینا در لوله خالی با شار ثابت در محدوده جریان آرام و آشفته انجام دادند که نتایج آنها نیز از افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت جابجایی در اثر استفاده از نانوسیال حکایت می‌کند. تنگ و همکاران [۲۱] در تحقیقی اثر دما، اندازه‌ی ذرات و کسر حجمی را بر ضریب انتقال حرارت هدایت بررسی کرده‌اند و گزارش کرده‌اند که کاهش اندازه‌ی نانوذرات باعث افزایش ضریب هدایت گرمایی می‌شود و در کسرهای حجمی بالاتر اثر دما بر ضریب هدایت گرمایی چشمگیرتر است. آنچه مسلم است این است که هر چه سطح مشترک جامد با سیال بیشتر باشد، ضریب هدایت گرمایی هم بیشتر می‌شود [۲۲]. اندازه‌ی نانوذرات می‌تواند تحت تاثیر عوامل مختلفی تغییر نماید. از جمله این موارد می‌توان به کاربرد سورفکتانتها، استفاده از همزن الکترومغناطیسی و مرتعش کننده‌ی آلتراسونیک اشاره نمود. سورفکتانت‌های مختلفی بسته به نوع سطح فعال نانوذره استفاده می‌شود [۲۳]. که عدم دقت در انتخاب نوع سورفکتانت ممکن است باعث کلوخه شدن بیشتر نانوذرات بشود.

نتایج تجربی نشان داد که هدایت حرارتی نانو سیالها بیشتر از هدایت حرارتی سیال پایه است. [۲۴] مغربی و همکاران [۲۵] نیز به بررسی عددی تأثیر نانوسیال بر انتقال حرارت جابجایی اجباری درون لوله متخلخل پرداخته‌اند. همچنین حاجی پور و مولائی [۲۶] انتقال حرارت نانوسیال آب-آلومینا در لوله‌ی متخلخل عمودی، تحت شار ثابت را به دو صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار داده‌اند. حداکثر افزایش ۲۰ درصدی انتقال حرارت نانوسیال با غلظت حجمی ۰/۳٪ نسبت به سیال پایه در لوله متخلخل توسط این محققان گزارش شده است. با توجه به تأثیر تخلخل بر انتقال حرارت، این محققان پیشنهاد کاربردهایی همچون مبدل‌های متخلخل و سیستم های خورشیدی را مطرح می‌کنند.

آماده سازی نانو سیال



شکل (۲) عکس XRD از نانولوله-های کربنی چند جداره

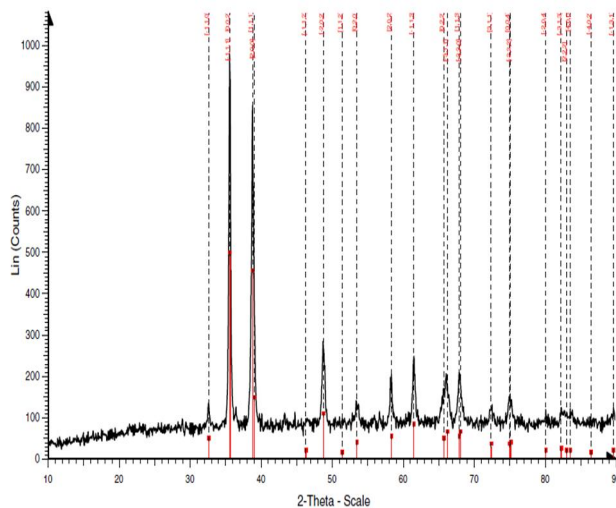
روش و دستگاه آزمایش ضریب هدایت گرمایی

در این مقاله به دلیل دقت زیاد و سرعت بالای روش سیم داغ گذرا، از این روش استفاده می‌گردد. نانوسیال در کسرهای حجمی مختلف، با استفاده از سنسور KS-1 و دستگاه آنالیزور حرارتی مورد آزمایش قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که شرایط دمایی این تحقیق، به دقت و با استفاده از یک کنترلر دما و سنسور PT-100 تامین شده است.

#### تحلیل و بررسی نتایج

نانوسیال ترکیبی نانولوله کربنی/اکسیدمس-آب در کسرهای حجمی ۰/۰۵ و ۰/۲ درصد و در بازه دمایی بین ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس مورد آزمایش قرار گرفت و ضریب هدایت گرمایی آن به دقت اندازه گیری و ثبت گردید. نتایج حاصل از آزمایش این نانوسیال در شکل ۳ و ۴ آمده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در کسرهای حجمی کمتر از ۰/۲، اختلاف دما، تاثیر اساسی و محسوسی بر روی نسبت ضریب هدایت گرمایی ندارد و اختلاف‌ها اندک است اما با افزایش کسر حجمی، تاثیر دما بر روی ضریب هدایت گرمایی افزایش یافته و در کسر حجمی بالا به اوج خود می‌رسد. علت این موضوع را می‌توان در افزایش برخوردهای میان ملکولهای سیال و ذرات معلق با افزایش دما، دانست. با افزایش کسر حجمی تعداد ذرات موجود در

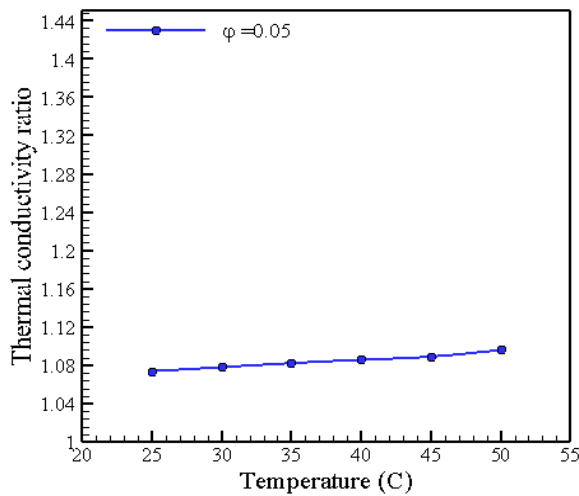
آماده سازی نانو سیالات اولین قدم در افزایش انتقال حرارت نانوسیالات محسوب می‌شود. دو روش برای تولید نانوسیالات بکار گرفته می‌شود، روش تک مرحله‌ای و روش دو مرحله‌ای، در روش دو مرحله‌ای نانوپودر تهیه شده با روش آلتراسونیک در سیال پایه پایدار می‌شود. ایستمن و همکاران [۲۷] ولی و همکاران [۲۸] از جمله کسانی بودند که از روش دو مرحله‌ای برای تولید نانوسیال آب-آلومینا استفاده کردند. نانوذرات دیگری همچون طلا، نقره، نانولوله‌های کربنی و سیلیکا با این روش تولید و در سیال پایه پایدار شده‌اند. در این مقاله از روش دو مرحله‌ای برای تهیه نانوسیال استفاده شده است، بدین ترتیب که نانوپودر نانولوله‌های کربنی و نانوذرات اکسیدمس با اندازه متوسط ۲۰ نانومتری آماده شده است که توسط همزن مغناطیسی در مدت ۲/۵ ساعت مخلوط می‌شوند و سپس با دستگاه آلتراسونیک با قدرت ۴۰۰ وات و ۴۰ کیلوهرتز در سیال پایه (آب مقطر) در مدت ۲/۵ ساعت پایدار می‌شود. در این ارزیابی آزمایشگاهی، نانوسیال در کسرهای حجمی ۰/۰۵ و ۰/۲ تولید و مورد آزمایش قرار گرفت. به منظور اطمینان از اندازه ذرات، تصویر پراش پرتو ایکس مربوط به نانوذرات و همچنین تصویر پراش نانولوله-های کربنی چند جداره در آزمایشگاه تهیه شده و مورد استفاده قرار گرفته است که در شکل (۱) و شکل (۲) نمایش داده شده است.



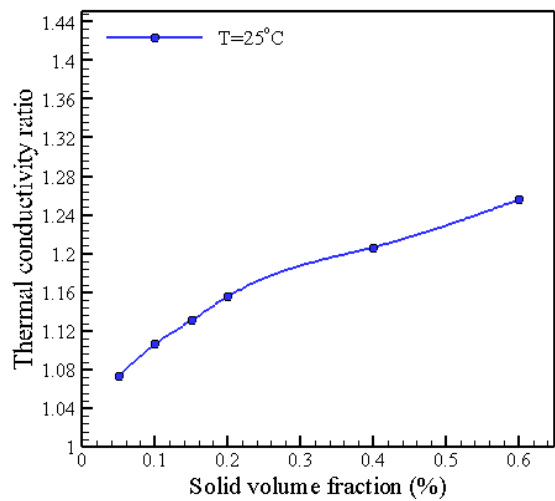
شکل (۱) عکس XRD از نانوذره اکسید مس

های بالا معمولاً بدیهی بوده و کاهش ضریب هدایت گرمایی را به دنبال دارد.

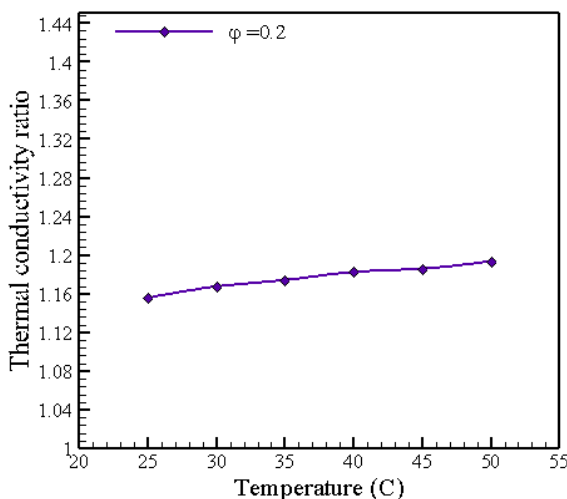
سیال پایه افزایش یافته و بالا بودن دما نیز سرعت برخورد ملکولها و حرکت براونی را افزایش می دهد.



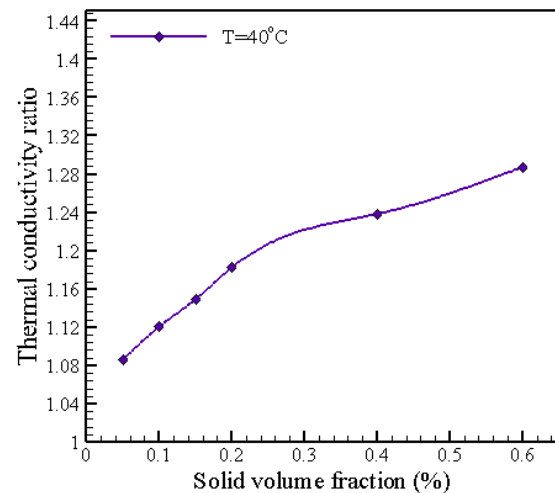
شکل (۵) ضریب هدایت گرمایی نسبی در دماهای مختلف و در کسر حجمی ۰/۰۵ درصد



شکل (۳) ضریب هدایت گرمایی نسبی بر حسب کسر حجمی در دمای ۲۵°C



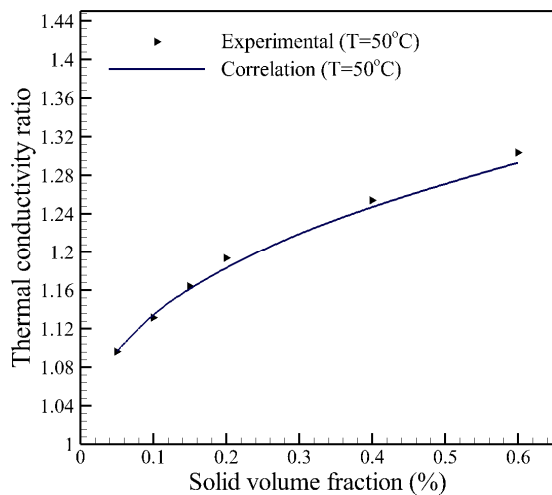
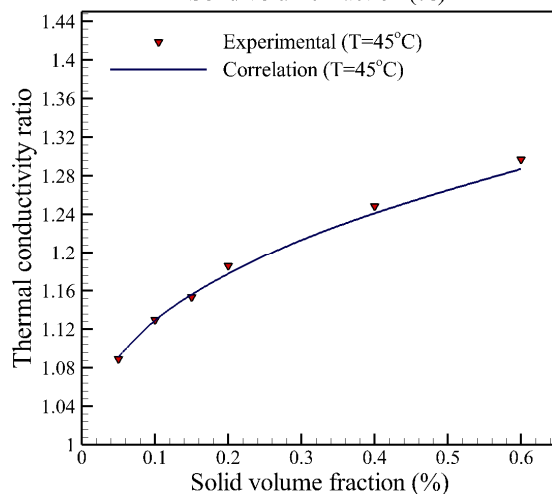
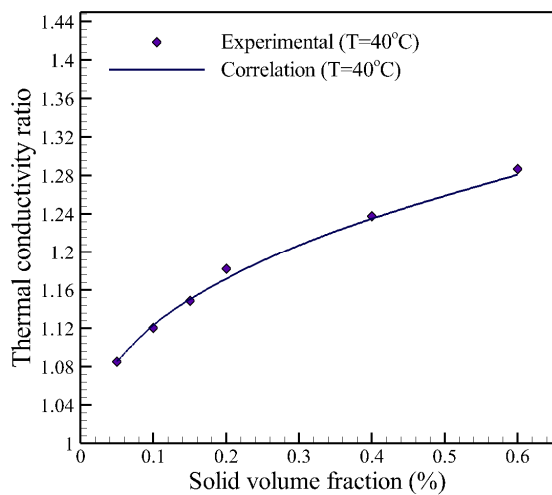
شکل (۶) ضریب هدایت گرمایی نسبی در دماهای مختلف و در کسر حجمی ۰/۲ درصد



شکل (۴) ضریب هدایت گرمایی نسبی بر حسب کسر حجمی در دمای ۲۵°C

با توجه به عدم وجود رابطه ای ثابت و مشخص به منظور تخمین و پیش بینی ضریب هدایت گرمایی نانوسیالات، در این تحقیق رابطه ای به منظور تخمین این خاصیت اساسی، برای دماها و کسر حجمی های مختلف ارائه گردیده است. طبق بررسی های صورت گرفته و اطلاعات نویسندگان، تا کنون رابطه قابل قبول و جامعی برای پیش بینی رفتار این نانوسیال خاص در تحقیقات داخلی و خارجی ارائه نشده است. هدف از ارائه رابطه برای هر دمای خاص، افزایش دقت و حساسیت تخمین ضریب هدایت گرمایی نانوسیال می باشد. نمودار مقایسه ای میان

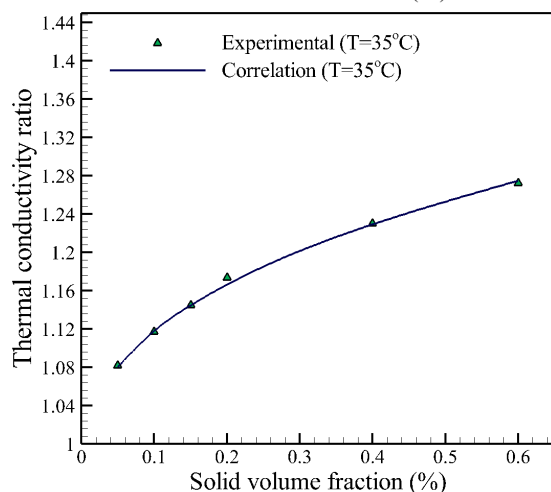
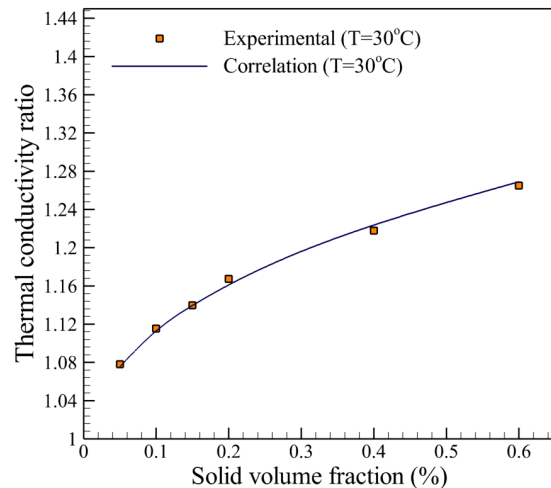
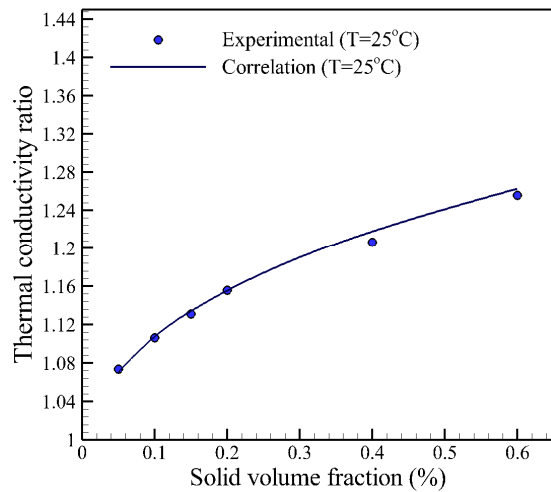
به طور کلی تغییرات ضریب هدایت گرمایی با دو پارامتر اساسی کسر حجمی و دمای نانوسیال، در شکل ۵ و ۶ ارائه گردیده است. افزایش ضریب هدایت گرمایی نانوسیال در حالت های گوناگون بر حسب درصد، مشخص و نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود بالاترین کسر حجمی، و در بیشترین دمای، افزایش بیش از ۳۷/۸ درصد، در ضریب هدایت گرمایی نانوسیال بوجود آمده است. تشکیل رسوب و خارج شدن ذرات از حالت پایدار در کسر حجمی -



مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی مربوط به تخمین ضریب هدایت گرمایی نانوسیال نانولوله کربنی/اکسید مس-آب ذیل آمده است. نهایت تلاش نویسندگان مقاله در ارائه این مدل، بر سادگی روابط و در عین حال کارآمدی آن، تمرکز یافته است. با مشاهده این رابطه و استفاده از آن، می توان دریافت که این رابطه در عین سادگی، بسیار کار آمد بوده و رفتار ضریب هدایت گرمایی نانوسیال در کسر حجمی و

مدلهای پیشنهادی و یافته های تجربی آورده شده است. همانگونه که در تصاویر مشخص است، این روابط محدوده انحراف بسیار اندکی داشته و ضریب هدایت گرمایی این نانوسیال را با تقریب بالا در یک دمای معین و مشخص، پیش بینی می کنند.



- [6] P.C. Hiemenz, M. Dekker, Principles of colloid and surface chemistry, Seconded., Dekker, New York, 1986.
- [7] H. Xie, H. Lee, W. Youn, M. Choi, J. Appl. Phys., 94 (8), 4967-4971(2003).
- [8] D. Wu, H. Zhu, L. Wang, L. Liua, Curr. Nanosci., 5, 103-112(2009).
- [9] G. Colangelo, E. Favale, A. de Risi, D. Laforgia, Results of experimental investigations on the heat conductivity of nanofluids based on diathermic oil for high temperature applications, Applied Energy, Vol. 97, No. 0, pp. 828-833, 9//, 2012.
- [10] S. Lee, S. U. Choi, S. Li, and, J. Eastman, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, Journal of Heat Transfer, Vol. 121, No. 2, 1999.
- [11] Y. Xuan, Q. Li, Heat Transfer Enhancement of Nanofluids, Int. J. Heat Fluid Flow, Vol. 21, 2000, pp. 158-64.
- [12] S. Lee, S.U.-S. Choi, S. Li, J.A. Eastman, Measuring Thermal Conductivity of Fluids. Containing Oxide Nanoparticles, J. of Heat Transfer, Vol. 121, 1999, pp. 280- 289.
- [13] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma, Alternation of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles (dispersion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> ultra-fine particles), Netsu Bussei, Vol. 4, 1993, pp. 227- 233.
- [14] Yimin Xuan, Wilfried Roetzel, Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, 2000, pp. 3701,3707.
- [15] A. K. Singh, Thermal Conductivity of Nanofluids, Defence Science Journal, Vol. 58, 2008. ,pp. 600-607
- [16] Y. Xuan, Q. Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 21, No. 1, pp. 58-64, 2//, 2000.
- [17] S. Zeinali Heris, M. Nasr Esfahany, S. G. Etemad, Experimental investigation of convective heat transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid in circular tube, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 28, No. 2, pp. 203-210, 4//, 2007.
- [18] D. Kim, Y. Kwon, Y. Cho, C. Li, S. Cheong, Y. Hwang, J. Lee, D. Hong, S. Moon, Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions, Current Applied

دماهای مختلف را به خوبی پیش بینی می کند و محدوده انحراف این رابطه کمتر از یک درصد است.

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 0.907 \exp(0.36\phi^{0.3111} + 0.000956T)$$

نتیجه گیری

در این تحقیق آزمایشگاهی، ضریب هدایت گرمایی نانوسیال نانولوله کربنی / اکسید مس-آب در دماهای بین ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس و کسرهای حجمی ۰/۰۵ و ۰/۲ درصد مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور تهیه نانوسیال از روش دو مرحله‌ای و به منظور بررسی ضریب هدایت گرمایی از روش سیم داغ گذرا استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که هر دو پارامتر کسر حجمی نانوذرات و دمای نانوسیال تاثیر بسیار زیادی بر روی ضریب هدایت گرمایی نانوسیال دارند. از سوی دیگر بر مبنای یافته‌های آزمایشگاهی، مدل جدید و مفیدی به منظور تخمین ضریب هدایت گرمایی نانوسیال ارائه گردید. این مدل قابلیت تخمین ضریب هدایت گرمایی نانوسیال را با محدوده انحراف بسیار کم داراست.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله بر خود می‌دانم که از زحمات بی دریغ اساتید گرانقدر جناب آقای دکتر داود طفرایی و جناب آقای دکتر آرش کریمی‌پور که مرا یاری نمودن در پیش برد این مقاله کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

مراجع

- [1] A. Ghadimi, R. Saidur, H.S.C. Metselaar, International Journal of Heat and Mass Transfer, 54, 4051-4068 (2011).
- [2] X.F. Li, D.S. Zhu, X.J. Wang, N. Wang, J.W. Gao, H. Li, ThermochimicaActa 469, 98-103(2008).
- [3] H. Chang, C. Jwo P. Fan, S. Pai, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 34, 300-306 (2007).
- [4] Y. Hwang, J. Lee, J. Lee, Y. Jeong, S. Cheong, Y. ChullAhn, S. Kim, Technology, 186, 145-153.(2008).
- [5] H. Chang, Y.C. Wu, X.Q. Chen, M.J. Kao, Fabrication of Cu Based Nanofluid with Superior Dispersion, 2006.

- [23] A. Ghadimi and I. H. Metselaar, "The influence of surfactant and ultrasonic processing on improvement of stability, thermal conductivity and viscosity of titania nanofluid," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 51, pp. 1–9, Nov. 2013.
- [24] Xiang-Qi Wang, Arun S. Mujumdar, *Heat Transfer Characteristics of Nanofluids: a review*, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46, 2007, pp. 1-19.
- [25] M. J. Maghrebi, M. Nazari, T. Armaghani, *Forced Convection Heat Transfer of Nanofluids in a Porous Channel*, *Transport in porous media*, Vol. 93, No. 3, pp. 401-413, 2012.
- [26] M. Hajipour, A. Molaei Dehkordi, *Mixed-convection flow of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluid in a channel partially filled with porous metal foam: Experimental and numerical study*, *Experimental Thermal and Fluid Science*, NO,0
- Physics, Vol. 9, No. 2, Supplement, pp. e119-e123, 3//, 2009.
- [19] M. M. Heyhat, F. Kowsary, A. M. Rashidi, M. H. Momenpour, A. Amrollahi, *Experimental investigation of laminar convective heat transfer and pressure drop of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano□luids in fully developed flow regime*, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, No. 0, pp. 483- 489, 1//, 2013.
- [20] M. M. Heyhat, F. Kowsary, A. M. Rashidi, S. Alem Varzane Esfehiani, A. Amrollahi, *Experimental investigation of turbulent flow and convective heat transfer characteristics of alumina water nanofluids in fully developed flow regime*, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 8, pp. 1272-1278, 10//, 2012.
- [21] T.-P. Teng, Y.-H. Hung, T.-C. Teng, H.-E. Mo, and H.G. Hsu, "The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, no. 14–15, pp. 2213–2218, Oct. 2010.
- [22] E. E. (Stathis) Michaelides, *Nanofluidics Thermodynamic and Transport Properties*. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London, 2014.

