



## Experimental investigation of the effect of pH on the stability and thermal conductivity of metal oxide nanofluids

Behrouz Raei\*

Department of Chemical Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran

**ABSTRACT:** The pH level of nanofluids plays an important role in stability and thermal conductivity. However limited studies have been done in this field. In this research, the effect of pH on the stability and thermal conductivity of ZnO-EG nanofluid at concentrations of 0.05 and 0.75% volumetric fraction and MgO-W at concentrations of 0.05 and 0.5% volumetric fraction were investigated. Experimental measurements of the thermal conductivity were performed by a thermal properties analyzer device at a constant temperature of 25 °C. The results showed that the pH strongly affected the stability of nanofluids so that at the pH of the isoelectric point (IEP), complete aggregation and sedimentation were observed. The thermal conductivity of nanofluids has the lowest value at the pH of the isoelectric point, but as the pH moves away from the isoelectric point, the thermal conductivity increases. The highest enhancement in the thermal conductivity of ZnO-EG nanofluid was 63%, which was obtained at a volume fraction of 0.75% and pH = 12. However, the highest enhancement in the thermal conductivity of MgO-W nanofluid was 49%, which was obtained at a volume fraction of 0.5% and pH = 12. Finally, using the experimental results and with the help of curve fitting, equations with good quality were presented to predict the effective thermal conductivity of metal oxide nanofluids.

### Review History:

Received: Feb. 22, 2023

Revised: Jun. 30, 2023

Accepted: Sep. 30, 2023

Available Online: Oct. 22, 2023

### Keywords:

Nanofluid

stability

thermal conductivity

experimental

### 1- Introduction

Conventional base fluids such as water, glycols, and oils are used as working fluids in heat transfer devices in a wide range of engineering applications. The thermal efficiency of such devices can be increased by the rising of thermal conductivity of base fluids. This can be achieved when small particles with high thermal conductivity are dispersed in base fluids. However, the dispersion of micro-sized solid particles in the base fluid is not acceptable due to issues related to sedimentation, erosion, fouling, and increased pressure drop. The concept of dispersion of nano-sized solid particles in base fluids, which was developed by Choi et al.[1], has become a popular topic known as nanofluids. To be able to research about nanofluids, preparing these types of fluids in a stable form is a very important factor in starting the work because the stability of nanofluids strongly affects their thermophysical properties [2, 3]. In total, there are three methods for dispersing nanoparticles in base fluids. The first dispersion method is to change the pH value of the fluid, the stability of the nanofluid is directly affected by the zeta potential, which is related to the pH value of the base fluid. The second method is to modify the surface of nanoparticles by using a surfactant. The third method is dispersing by ultrasonic waves, which can produce bubble oscillations and end up with dispersing effects [2].

A review of previous studies shows that the pH level of nanofluids plays an important role in stability and thermophysical properties such as thermal conductivity. However, limited research has been done on the effect of pH on the thermal conductivity of nanofluids. On the other hand, as far as it has been investigated, no general theoretical and experimental correlation has been presented in the field of predicting the thermal conductivity of nanofluids with variable pH. Therefore, the present study aims to experimentally investigate the effect of pH level on the stability and thermal conductivity of metal oxide nanofluids including ZnO-EG and MgO-W. Presenting correlations for predicting the thermal conductivity of metal oxide nanofluids with concentration and pH variables using curve fitting is one of the other goals of this research.

### 2- Methodology

In this experimental study, zinc oxide and magnesium oxide nanoparticles were used. Nanoparticles are suspended in ethylene glycol and water-based fluids, respectively. Nanofluids have been prepared by two-step method. The transmission electron microscope (TEM) of the used nanoparticles is shown in Fig 1.

\*Corresponding author's email: behrouz.raei@iau.ac.ir



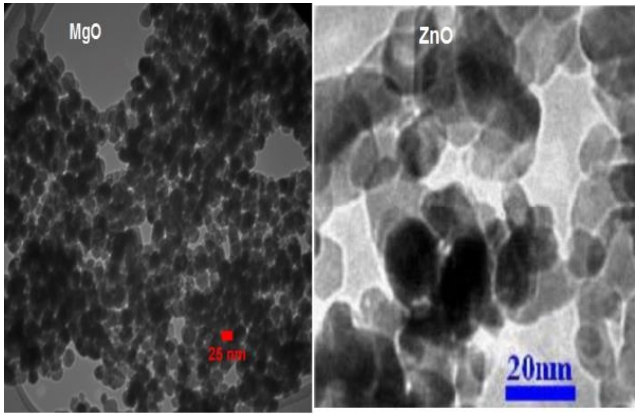


Fig. 1. TEM of nanoparticles

The method of work is as follows: First, appropriate mass amounts of nanoparticles are suspended in 100 cc of base fluid using a digital balance with an accuracy of 4 decimal places. In the next step, the suspension was placed in a magnetic stirrer with medium speed for one hour. Then, using appropriate acid and base, pH adjustment was done for nanofluids. The selection of the pH range has been done so that the pH of the isoelectric point of nanofluids exists in the studied range. In order to eliminate experimental error and check repeatability, each measurement was repeated 3 times under the same conditions. The average measurements were presented as the final results. Uncertainty in the measurement of the thermal conductivity was estimated based on the accuracy of the tools used. Uncertainty in the thermal conductivity of nanofluids was calculated using equation (1) [4]:

$$U_{knf} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta k_{nf}}{k_{nf}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta w}{w}\right)^2} \quad (1)$$

That  $U$  represents the uncertainty in measurement;  $w$  indicates the weight of nanoparticles and  $\Delta$  indicates the measurement error. The maximum uncertainty in the measured thermal conductivity was calculated as 3.1%.

### 3- Results and Discussion

Monitoring the stability of ZnO-EG and MgO-W nanofluids at different times and pH levels was done using a continuous visualization method with a high-resolution camera. The results showed that immediately after preparation of nanofluid in different pH, they have good stability. But with the passage of time, the aggregation and sedimentation of nanoparticles in the samples is gradually revealed. The highest amount of sedimentation was observed for ZnO-EG nanofluid at pH=9.5 and for MgO-W nanofluid at pH=10.5. The reason for this is that the mentioned pHs are

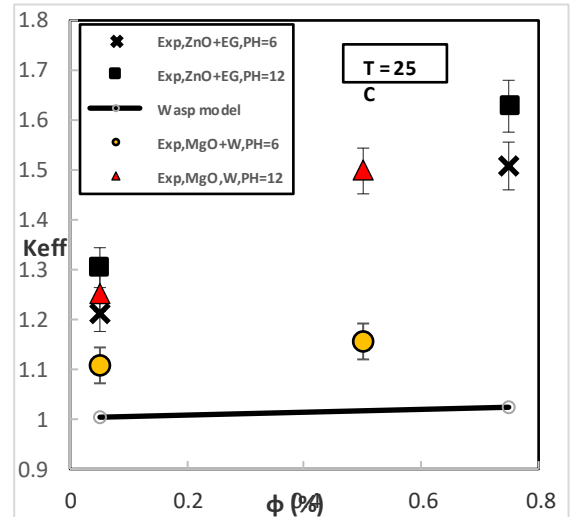


Fig. 2. Comparing the experimental results with the predicted values of the classical model for the thermal conductivity of ZnO-EG and MgO-W nanofluids

actually the pH of the isoelectric point of nanofluids [5]. At this pH level, the repulsive forces between the particles are zero and as a result, the particles stick together. Therefore, when the pH is close to or equal to the pH of the isoelectric point, the suspension is unstable. However, with the increase of the pH difference relative to this point, the hydration force between the particles increases, the value of the zeta potential of the nanoparticle surface is increased, as a result of which the movement of the nanoparticles in the suspension increases and causes more stability of the nanoparticles[6].

The experimental effective thermal conductivity values obtained from ZnO-EG and MgO-W nanofluids were compared with the effective thermal conductivity predicted by classical models, including the Wasp model [7]. Figure 2 shows this comparison. It is evident from the mentioned figure that the classic Wasp model is unable to predict the thermal conductivity of nanofluid.

Therefore, the existing classic models do not provide an accurate prediction of the thermal conductivity of nanofluids. On the other hand, no equation has been provided to predict the effective thermal conductivity of nanofluids with concentration and pH variables. Therefore, using the obtained experimental results and with the aid of the curve fitting method, new correlations were presented. Curve fitting evaluation parameters are presented in Table 2. The parameters include  $R^2$  (regression coefficient), AARD (average absolute relative deviation) and MSE (mean square error). In Table 2,  $R^2$  for the prediction of  $k_{eff}$  are very close to 1, and the values of AARD and MSE are very low. Therefore, it can be said that the proposed equations have good predictability.

### 4- Conclusions

The main results of the research are summarized in the following cases:

**Table 2. Regression parameters**

Nanofluid Parameter	MgO-W	ZnO-EG
R <sup>2</sup>	0.98	0.94
MSE	3.025×10 <sup>-3</sup>	0.0121
AARD%	0.52	0.53
Max Dev %	-3.12	7.6

-The pH level strongly affected the stability of both nanofluids, so that for both nanofluids at the pH of the isoelectric point, complete sedimentation was observed.

- The highest enhancement in the thermal conductivity of ZnO-EG nanofluid was 63%, which was obtained at a volume fraction of 0.75% and pH = 12. However, the highest enhancement in the thermal conductivity of MgO-W nanofluid was 49%, which was obtained at a volume fraction of 0.5% and pH = 12.

## References

- [1] S.U.S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in: Proceedings of the 1995 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New York, USA, 1995, pp. 99-105.
- [2] X.-j. Wang, D.-s. Zhu, S. yang, Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in nanofluids, Chem. Phys. Lett., 470(1-3) (2009) 107-111.
- [3] D. Zhu, X. Li, N. Wang, X. Wang, J. Gao, H. Li, Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluids, Current Applied Physics, 9(1) (2009) 131-139.
- [4] T.-P. Teng, Y.-H. Hung, T.-C. Teng, H.-E. Mo, H.-G. Hsu, The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity, Appl. Therm. Eng., 30(14-15) (2010) 2213-2218.
- [5] M.O. Fatehah, H.A. Aziz, S. Stoll, Stability of ZnO nanoparticles in solution. Influence of pH, dissolution, aggregation and disaggregation effects, Journal of Colloid Science and Biotechnology, 3(1) (2014) 75-84.
- [6] K.V. Wong, M.J. Castillo, Heat Transfer Mechanisms and Clustering in Nanofluids, Advances in Mechanical Engineering, (2010).
- [7] E.J. Wasp, J.P. Kenny, R.L. Gandhi, Solid-liquid flow: slurry pipeline transportation. [Pumps, valves, mechanical equipment, economics], Ser. Bulk Mater. Handl.;(United States), 1(4) (1977).

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Behrouz Raei, *Experimental investigation of the effect of pH on the stability and thermal conductivity of metal oxide nanofluids*, Amirkabir J. Mech Eng., 55(7) (2023) 179-182.

DOI: 10.22060/mej.2023.22193.7578







## بررسی تجربی اثر pH بر پایداری و ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات اکسید فلزی

بهروز راعی\*

گروه مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۲  
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۰۹  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۷/۳۰

### کلمات کلیدی:

نانوسیال  
پایداری  
ضریب هدایت حرارتی  
تجربی

**خلاصه:** سطح pH نانوسیالات نقش مهمی را در پایداری و ضریب هدایت حرارتی ایفا می‌نماید. اما مطالعات محدودی در این زمینه صورت گرفته است. در این پژوهش، بررسی تجربی اثر pH بر پایداری و ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات اکسید روی - اتیلن گلاکول در غلظتهای ۰/۰۵ و ۰/۷۵ درصد حجمی و اکسید منیزیم - آب در غلظتهای ۰/۰۵ و ۰/۵ درصد حجمی انجام شد. اندازه‌گیری‌های تجربی ضریب هدایت حرارتی توسط دستگاه تحلیگر خواص حرارتی در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتیگراد انجام گرفت. نتایج نشان داد که میزان pH بر پایداری نانوسیالات به شدت تاثیر گذاشته بطوریکه در pH نقطه ایزوالکتریک، ته‌نشینی و رسوب کامل مشاهده گردید. ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات در pH نقطه ایزوالکتریک کمترین مقدار را داشته اما با فاصله گرفتن pH از نقطه ایزوالکتریک، ضریب هدایت حرارتی افزایش یافته است. بیشترین درصد افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید روی - اتیلن گلاکول برابر با ۶۳٪ بوده که در غلظت ۰/۷۵ درصد حجمی و pH=۱۲ بدست آمد. اما بیشترین درصد افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید منیزیم - آب برابر با ۴۹٪ در غلظت ۰/۵ درصد حجمی و pH=۱۲ حاصل شد. در نهایت با استفاده از نتایج تجربی و با کمک برازش منحنی، معادلاتی با کیفیت مطلوب برای پیش بینی ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیالات اکسید فلزی ارائه گردید.

### ۱- مقدمه

آفرین در تهیه نانوسیالات تجمع<sup>۱</sup> و رسوب‌گذاری می‌باشند که با استفاده از نانوذرات کوچکتر و همزمان جلوگیری از تجمع نانوذرات کوچک (پراکندگی بهتر) قابل حل است [۴]. در کل سه روش برای پراکندگی نانوذرات در سیالات پایه وجود دارد. اولین روش پراکندگی، تغییر دادن مقدار pH سیال است، پایداری نانوسیال به طور مستقیم به وسیله پتانسیل زتا<sup>۲</sup> تحت تاثیر قرار می‌گیرد که به مقدار pH سیال پایه مرتبط است. دومین روش، اصلاح کردن سطح نانوذرات به وسیله استفاده از ماده فعال سطحی است. سومین روش پراکندگی به وسیله امواج فراصوت است که می‌تواند نوسان‌های جابجایی تولید کرده و به اثرات پراکندگی ختم شود [۲].

مقدار جذب و دفع بین ذرات توسط پتانسیل زتا مشخص می‌شود. پایداری نانوسیال به طور مستقیم به وسیله پتانسیل زتا تحت تاثیر قرار می‌گیرد که به مقدار pH سیال پایه مرتبط است [۵]. وقتی نانوذرات در آب پخش می‌شوند، رفتار کلی برهم کنش آب - ذره به خواص سطحی

سیالات پایه مرسوم مانند آب، گلیکول‌ها و روغن‌ها به‌عنوان محیط‌های کاری در دستگاه‌های انتقال حرارت در طیف گسترده‌ای از کاربردهای مهندسی استفاده می‌شوند. راندمان حرارتی چنین دستگاه‌هایی را می‌توان با افزایش ضریب هدایت حرارتی سیالات پایه افزایش داد. این زمانی قابل دستیابی است که ذرات کوچک با ضریب هدایتی حرارتی بالا در سیالات پایه پراکنده شوند. با این حال، پراکندگی ذرات جامد با اندازه میکرو در سیال پایه به دلیل مسائل مربوط به رسوب، فرسایش، رسوب گرفتگی و افزایش افت فشار قابل قبول نیست. مفهوم پراکندگی ذرات جامد در اندازه نانو در سیالات پایه که توسط چوی و همکاران [۱] توسعه یافته است، به موضوع محبوبی تبدیل شده است که به عنوان نانوسیال شناخته می‌شود. برای اینکه بتوان درباره نانوسیالات تحقیق کرد تهیه این نوع سیالات به صورت پایدار عامل بسیار مهمی در شروع کار است چون پایداری نانوسیال به شدت بر خواص ترموفیزیکی آن تاثیر می‌گذارد [۲، ۳]. می‌توان گفت دو پدیده‌ی مشکل

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: behrouz.raei@iaua.ac.ir

- 1 Aggregation
- 2 Zeta potential

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



به ترتیب ۱٪ و ۰/۱٪ بدست آوردند. ژو و همکاران [۳] رفتار پایداری و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیوم - آب را مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش‌ها در محدوده pH ۲ تا ۱۲ انجام شد. نتایج آنها نشان داد که پایداری و ضریب هدایت حرارتی به شدت به مقدار pH نانوسیال بستگی دارد. در مقدار pH حدود ۸، مقدار مطلق پتانسیل زتا بیش‌ترین مقدار را داشت که به این مفهوم است که نیروی دافعه الکترواستاتیک بین ذرات در قوی‌ترین حالت ممکن خود قرار گرفته‌اند. وامکن و همکاران [۱۰] دو نانوسیال شامل اکسید زیرکونیوم و اکسید تیتانیوم بر پایه آب را در غلظت ۳ درصد وزنی به طور جداگانه مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که pH بر پتانسیل زتا، توزیع اندازه ذرات، ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات تاثیر می‌گذارد. تقریباً ۲۰٪ افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی در نزدیکی نقطه ایزوالکتریک ثبت شد. همچنین pH نقطه ایزوالکتریک، حدود ۶/۱ برای نانو سیال اکسید زیرکونیوم و حدود ۴ برای نانو سیال اکسید تیتانیوم گزارش گردید.

مینتسا و همکاران [۱۱] گزارش کردند که افزایش ضریب هدایت حرارتی در نانوسیال‌های اکسید آلومینیوم (۳۶ نانومتر) و اکسید مس (۴۷ نانومتر) وابسته به غلظت و دما است. مطالعات صمد و همکاران [۱۲] نشان داده است که ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید تیتانیوم - آب با افزایش غلظت و دما افزایش می‌یابد. آنها مشاهده کردند که افزایش ضریب هدایت حرارتی ۳۷/۳۵٪ با کسر حجمی ۰/۴۷ درصد در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد بود، در حالی که این افزایش در ۲۰ درجه سانتیگراد ۲۴/۱۱٪ است. عمر و همکاران [۱۳] به منظور افزایش پایداری نانوسیال‌های اکسید آلومینیوم و اکسید مس از هیدروکسید آمونیوم، هیدروکسید سدیم و اسید استیک به عنوان اصلاح کننده بار سطحی استفاده نمودند. پایش پایداری نانوذرات معلق با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۵</sup> و میکروسکوپ الکترونی عبوری<sup>۶</sup> انجام شد. نتایج نشان داد که نانوسیال اکسید آلومینیوم در منطقه اسیدی و در pH برابر ۴/۹ پایدار گردید. در حالیکه نانوسیال اکسید مس پایداری ضعیفی از خود نشان داد. جی و همکاران [۱۴] رفتار پراکندگی و پایداری نانوذرات گاما آلومینا در سیال پایه آب یون زدایی شده را در انواع سورفکتانت و مقادیر مختلف pH مورد بررسی قرار داده‌اند. سه سورفکتانت شامل<sup>۷</sup> تیون ۶۰ غیر یونی، ستیل تری متیل آمونیوم برامید<sup>۸</sup> کاتیونی و

ذره بر می‌گردد. در مورد هر ذره یک pH معین تحت عنوان pH نقطه ایزوالکتریک<sup>۱</sup> (مقدار pH که در آن سطح ذره بار الکتریکی ندارد) وجود دارد. در این مقدار pH نیروهای دافعه بین ذرات صفر بوده و در نتیجه ذرات به هم می‌چسبند. بنابراین وقتی pH نزدیک یا مساوی pH نقطه ایزوالکتریک باشد، سوسپانسیون ناپایدار است. با افزایش اختلاف pH نسبت به این نقطه نیروهای آب پوشی بین ذرات افزایش می‌یابند، مقدار پتانسیل زتا سطح نانوذرات زیاد شده در نتیجه تحرک نانوذرات در سوسپانسیون افزایش یافته و موجب پایداری بیشتر نانوذرات می‌شود [۶]. همچنین پایداری نانوذره معلق در سیال پایه به خواص الکتروکینتیکی<sup>۲</sup> آن ربط دارد. سوسپانسیون خوب پخش شده می‌تواند با چگالی بار سطحی زیاد برای تولید نیروهای دفع قوی، به دست آید. بنابراین، مطالعه رفتار الکتروفوریتیک<sup>۳</sup> (حرکات ذرات پخش شده در یک سیال در پاسخ به میدان الکتریکی) از طریق اندازه‌گیری پتانسیل زتا برای درک رفتار پراکندگی نانوذرات در محیط مایع از اهمیت بالایی برخوردار است.

تحقیقات گسترده‌ای برای بررسی پایداری و ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات مختلف انجام شده است. لی و همکاران [۷] با مطالعه تجربی بر روی نانوسیال مس - آب نشان دادند که ضریب هدایت حرارتی نانو سیال به طور گسترده‌ای با تغییر pH تغییر می‌نماید. ضریب هدایت حرارتی این نانوسیال با افزایش pH از مقدار ۲ افزایش یافته و به مقدار بیشینه خود در pH حدود ۹ می‌رسد، سپس کاهش یافته تا مقدار pH به مقدار ۱۲ رسید. بنابراین، مقدار بهینه‌ای از pH وجود دارد که بیشترین ضریب هدایت حرارتی را تضمین می‌نماید. وانگ و همکاران [۲] با استفاده از سدیم دودسیل بنزن سولفونات<sup>۴</sup> به عنوان پراکنده ساز، نانوذرات اکسید مس و اکسید آلومینیوم را در سیال پایه آب با اندازه ذرات مختلف مورد بررسی قرار داده‌اند. مطالعات آنها نشان داد که pH نانوسیال تحت تاثیر اندازه ذرات قرار دارد. نتایج آنها نشان داد که در pH بهینه، نانو سیالات بهترین رفتار پایداری را داشته و در آن حالت ضریب هدایت حرارتی نانو سیال بیش‌ترین مقدار خود را خواهد داشت. ایستمن و همکاران [۸] افزایش ۴۰ درصدی در ضریب هدایت حرارتی نانوسیال مس - اتیلن گلیکول را با ۰/۳ درصد غلظت حجمی گزارش نموده‌اند. دینگ و همکاران [۹] ۱۱/۳٪ و ۰/۱۸٪ افزایش در مقادیر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نانو لوله کربنی - آب با غلظت‌های

5 SEM  
6 TEM  
7 Tween 60  
8 Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB)

1 Isoelectric point  
2 Electrokinetic  
3 Electrophoretic  
4 Sodium Dodecyl Benzene Sulphonate (SDBS)

بوده است. نتایج آنها نشان داد که بیشینه خطای مدل شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال مذکور برابر ۲/۵ درصد بوده که نشان از دقت بسیار مطلوب مدل ارائه شده می‌باشد. این در حالیست که مدل‌های تئوری کلاسیک امکان پیش بینی دقیق ضریب هدایت حرارتی را با دقت مناسب نداشته‌اند. مهرعلی زاده و همکاران [۱۸] ضریب انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیالات شامل اکسید تیتانیوم و دی اکسید سیلیسیوم در غلظت‌های مختلف را در یک سطح مسی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. اثرات اصلاح سطح و غلظت‌های مختلف نانوذرات در سیال‌های پایه مختلف شامل آب و مخلوط آب-اتیلن گلاکول بررسی شد. نتایج آنها نشان داد که ضریب انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال هیبریدی اکسید تیتانیوم + دی اکسید سیلیسیوم - آب بیشتر از نانوسیال تنها شامل اکسید تیتانیوم - آب و دی اکسید سیلیسیوم - آب بوده است. همچنین آنها با استفاده از دو روش هوشمند شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار<sup>۶</sup> مدل‌هایی برای پیش بینی ضریب انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیالات ارائه نموده‌اند. اشگرف و همکاران [۱۹] ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال اکسید آهن-آب را در غلظت و دماهای مختلف مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. سپس با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مدل‌هایی برای پیش بینی خواص ترموفیزیکی مذکور ارائه شد. نتایج از دقت بالای مدل‌های پیشنهادی در پیش بینی خواص ترموفیزیکی نانوسیال حکایت داشت بطوریکه حاشیه خطا<sup>۷</sup> برای پیش بینی ضریب هدایت حرارت و ویسکوزیته نانوسیال اکسید آهن - آب به ترتیب برابر ۰/۴۲ و ۰/۰۶ درصد بدست آمد.

در جدول ۱ برخی از مطالعات تجربی بر روی ضریب هدایت حرارتی نانوذرات اکسید روی و اکسید منیزیم بر اساس فاکتورهای دما و غلظت در سیالات پایه مختلف گزارش شده است.

مروری بر مطالعات پیشین نشان می‌دهد که سطح pH نانوسیالات نقش مهمی را در پایداری و خواص ترموفیزیکی مانند ضریب هدایت حرارتی ایفا می‌نماید. اما تحقیقات محدودی در زمینه اثر pH بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات انجام شده است. از طرفی هم تا جایی که بررسی شد هیچ رابطه تئوری و تجربی کلی در زمینه پیش بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات با متغیر pH ارائه نگردیده است. بنابراین هدف از مطالعه حاضر، بررسی تجربی اثر pH بر پایداری و ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات اکسید فلزی شامل اکسید روی - اتیلن گلاکول و اکسید منیزیم - آب

سدیم دودسیل بنزن سولفونات آنیونی (به عنوان عوامل افزودنی برای بهبود کیفیت پایداری نانوسیال انتخاب شدند. نتایج نشان داد که پراکندگی و پایداری نانوسیال گاما آلومینا به شدت به نوع و مقدار سورفکتانت و مقدار مطلق پتانسیل زتا بستگی دارد. همچنین رفتار پایداری نانوسیال مذکور با سورفکتانت‌های مختلف در pH های گوناگون توسط روش اندازه‌گیری پتانسیل زتا بررسی گردید. نتایج نشان داد که که وقتی مقدار pH کم‌تر از نقطه بار صفر<sup>۱</sup> باشد، نانوذرات گاما آلومینا دارای بار مثبت بوده و نیروی دافعه الکترواستاتیک بین ذرات برای جلوگیری از جذب و برخورد بین ذرات کافی است، همچنین در این حالت نانوسیال دارای مقدار پتانسیل زتای بالایی است. اثر pH بر پایداری، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوذرات اکسید مس و اکسید گرافن و هیبرید آنها در نسبت‌های مختلف (سیال پایه آب) توسط کانتی و همکاران [۱۵] بررسی شد. همچنین اثر دو سورفکتانت مختلف بر پایداری نانوسیالات در pH های مختلف هم مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از دو روش جدید بر پایه یادگیری ماشینی<sup>۲</sup> شامل روش ماشین بردار پشتیبانی بهینه بیزین<sup>۳</sup> و روش درختان رگرسیون تقویت شده بهینه شده بیزین<sup>۴</sup> مدل‌هایی برای پیش بینی ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیالات مذکور پیشنهاد گردید. نتایج نشان داد که برای هم ضریب هدایت حرارتی و هم ویسکوزیته، روش اولی دقت بالاتری نسبت به روش دوم در پیش بینی دارد. ژانگ و همکاران [۱۶] اثر pH (در دامنه ۲ تا ۱۲) را بر پایداری و خواص ترموفیزیکی شامل ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال اکسید تیتانیوم-آب مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. بعد از اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی مذکور در دما و غلظت‌های مختلف، ضریب عملکرد نانوسیال محاسبه شد. نتایج نشان داد با فاصله گرفتن از نقطه ایزوالکتریک ( $\text{pH} = 6/5$ ) پایداری نانوسیال بیشتر می‌گردد. همچنین ویسکوزیته نانوسیال به شدت به پایداری نانوسیال وابسته بوده بطوریکه افزایش پایداری متناسب با میزان کاهش ویسکوزیته است. بیشترین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در pH ۲ و ۱۰ بدست آمد.

اصفه و همکاران [۱۷] ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید تیتانیوم - آب را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی<sup>۵</sup> مورد بررسی و مدلسازی قرار دادند. مدل ارائه شده آنها بر اساس ورودی (متغیرها) دما و غلظت حجمی

- 1 Point of zero charge (PZC)
- 2 machine learning
- 3 Bayesian optimized support vector machine (BoA-SVM)
- 4 Bayesian optimized boosted regression trees (BoA-BRT)
- 5 Artificial neural network

6 Adaptive neuro-fuzzy inference system

7 margin of deviation

جدول ۱. مروری بر مطالعات پیشین در زمینه ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات اکسید روی و اکسید منیزیم

**Table 1. A review of previous studies in the field of thermal conductivity of zinc oxide and magnesium oxide nanofluids**

مرجع	نانوذره	سیال پایه	محدوده دما	بیشینه غلظت (درصد حجمی)	بیشینه افزایش
یو و همکاران [۲۰]	اکسید روی	اتیلن گلیکول	۶۰-۱۰ درجه سانتیگراد	۵	٪ ۲۶/۵
ریکار و همکاران [۲۱]	اکسید روی	آب	۲۸۳-۳۲۳ درجه کلون	۰/۵	٪ ۲
گالگو و همکاران [۲۲]	اکسید روی	اتیلن گلیکول	۲۸۳/۱۵-۳۴۳/۱۵ درجه کلون	۶/۲	٪ ۴۵
سینگ و همکاران [۲۳]	اکسید روی	آب	۵۰-۱۰ درجه سانتیگراد	۰/۵	٪ ۱۰
اصفه و همکاران [۲۴]	اکسید منیزیم	آب + اتیلن گلیکول	۵۰-۲۰ درجه سانتیگراد	۲	٪ ۳۴/۵
علوی و همکاران [۲۵]	اکسید روی	آب	۳۲۵-۳۰ درجه کلون	۵	٪ ۲۰
ژنگ و همکاران [۲۶]	اکسید روی	آب	-	۵	٪ ۱۸
ژی و همکاران [۲۷]	اکسید منیزیم	اتیلن گلیکول	۶۰-۱۰ درجه سانتیگراد	۵	٪ ۴۰
لیو و همکاران [۲۸]	اکسید روی	اتیلن گلیکول	۹۰-۲۰ درجه سانتیگراد	۵/۵	٪ ۲۳
لی و همکاران [۲۹]	اکسید روی	اتیلن گلیکول	۵۵-۱۰ درجه سانتیگراد	۱۰/۵ (درصد جرمی)	٪ ۱۲
انیش و همکاران [۳۰]	اکسید منیزیم	روغن ترمینول ۵۵	۶۰-۳۰ درجه سانتیگراد	۰/۳	٪ ۱۷
کیم و همکاران [۳۱]	اکسید روی	آب	-	۳	٪ ۱۴
		اتیلن گلیکول			٪ ۲۱

آب معلق شده‌اند. نانوسیالات به روش دو مرحله ای تهیه گردیده اند. اهمیت بررسی نانوسیالات با غلظت های کم سبب شد که غلظت های ۰/۰۵ و ۰/۷۵ درصد حجمی برای نانوسیال اکسید روی - اتیلن گلیکول و غلظت های ۰/۰۵ و ۰/۵ درصد حجمی برای نانوسیال اکسید منیزیم - آب برای این مطالعه در نظر گرفته شود. مشخصات ظاهری و فیزیکی نانوذرات در جدول ۲ گزارش شده است. همچنین تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری مربوط به نانوذرات استفاده شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

می‌باشد. ارائه معادلاتی برای پیش بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات اکسید فلزی با متغیر های غلظت و pH با استفاده از برازش منحنی از دیگر اهداف پژوهش حاضر است.

## ۲- قسمت تجربی و روش انجام کار

### ۲-۱- تهیه نانوسیالات

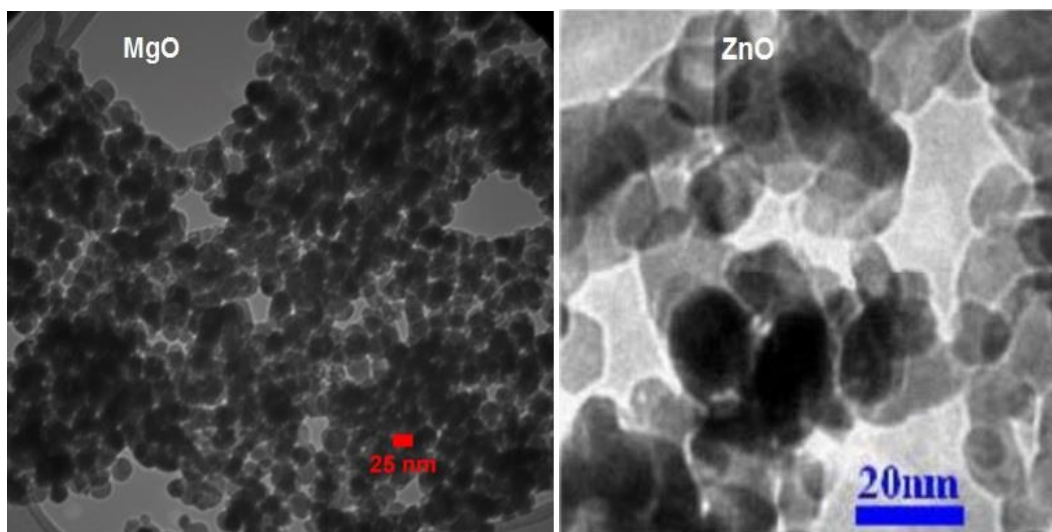
در مطالعه تجربی حاضر از نانوذرات اکسید روی و اکسید منیزیم استفاده شد. نانوذرات به ترتیب در سیالات مبتنی بر اتیلن گلیکول و



جدول ۲. مشخصات فیزیکی نانوذرات

Table 2. Physical properties of nanoparticles

نانوذرات	متوسط قطر (nm)	خلوص	دانسیته واقعی (kg/m <sup>3</sup> )	رنگ	مورفولوژی	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
اکسید منیزیم	۲۰	>۹۸٪	۳۵۸۰	سفید	چند وجهی	>۶۰	۸۸۰	۴۵
اکسید روی	۱۰-۳۰	>۹۹٪	۵۶۰۶	سفید شیری	تقریباً کروی	۲۰-۶۰	۵۱۴	۲۹

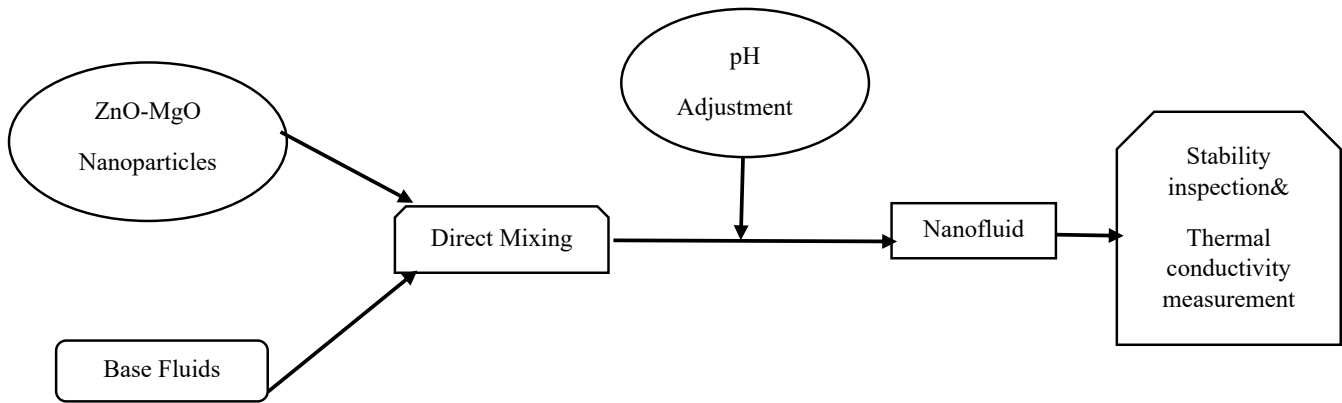


شکل ۱. نمونه TEM نانوذرات

Fig. 1. TEM of nanoparticles

اکسید منیزیم-آب ۶/۱۰ و ۱۲ انتخاب شده است. انتخاب بازه pH طوری انجام شده است که pH نقطه ایزوالکتریک نانوسیالات در بازه مورد مطالعه وجود داشته باشد. نمودار جریانی مراحل تهیه نانوسیالات در شکل ۲ نشان داده شده است. جدول ۳ نیز خواص ترموفیزیکی سیالات پایه شامل آب و اتیلن گلیکول را نشان می‌دهد.

روش کار بدین صورت است که ابتدا مقادیر جرمی مناسب از نانوذرات با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۴ رقم اعشار توزین شده در ۱۰۰ سی سی سیال پایه تعلیق می‌شود. در مرحله بعد سوسپانسیون در یک همزن مغناطیسی با دور متوسط به مدت یک ساعت قرار داده شد. سپس با استفاده از اسید و باز مناسب، تنظیم pH برای نانوسیالات انجام گردید. مقادیر pH برای نانوسیال اکسید روی-اتیلن گلیکول ۶/۹ و ۱۲ و برای نانوسیال



شکل ۲. مراحل تهیه نانوسیالات

Fig. 2. Preparation steps of nanofluids

جدول ۳. مشخصات ترموفیزیکی آب و اتیلن گلیکول

Table 3. Thermophysical properties of EG and W

نقطه جوش	نقطه ذوب	دانسیته (در ۲۰ °C)	سیال
۱۹۷/۶ °C	-۱۳ °C	۱/۱۱۵ - ۱/۱۱۱ g/mL	اتیلن گلیکول
۱۰۰ °C	۰ °C	۰/۹۹۸۲ g/mL	آب

### ۲-۳- تحلیل عدم قطعیت

به منظور حذف خطای تجربی و بررسی تکرارپذیری، هر اندازه گیری ۳ بار در شرایط یکسان تکرار شد. میانگین اندازه گیری ها به عنوان نتایج نهایی ارائه گردید. عدم قطعیت در اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی بر اساس صحت<sup>۲</sup> ابزارهای استفاده شده (جدول ۴) تخمین زده شد. عدم قطعیت در ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شدند [۳۲]:

$$U_{knf} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta k_{nf}}{k_{nf}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta w}{w}\right)^2} \quad (1)$$

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

اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات در شرایط مختلف آزمایشگاهی با استفاده از دستگاه تحلیلگر خواص حرارتی<sup>۱</sup> انجام شده است (شکل ۳). اندازه گیری در محدوده ۲-۰/۰۲ وات بر متر کلونین عمل می کند. این دستگاه مجهز به حسگر سوزنی است که به طور عمودی و مرکزی در ظرف نانوسیال قرار می گیرد. مکانیسم اندازه گیری بر اساس روش سیم داغ گذرا است. برای کنترل دمای نمونه در طول اندازه گیری از حمام آب استفاده شده است. فاصله زمانی ۳۰ دقیقه بین اندازه گیری های بعدی در نظر گرفته شده است تا اثر افزایش دما در مجاورت کاوشگر به دلیل گرمای گذرا از بین برود. بنابراین نتایج به دست آمده ثابت و قابل تکرار هستند. میانگین سه اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی برای هر نمونه در نظر گرفته شده است تا از دقت و سازگاری نتایج اطمینان حاصل شود.

2 Accuracy

1 KD2 Pro, Decagon Devices, Inc. USA



شکل ۳. دستگاه تحلیلگر خواص حرارتی

Fig. 3. Thermal properties analyser device

جدول ۴. میزان صحت تجهیزات استفاده شده

Table 4. The accuracy of the used equipment

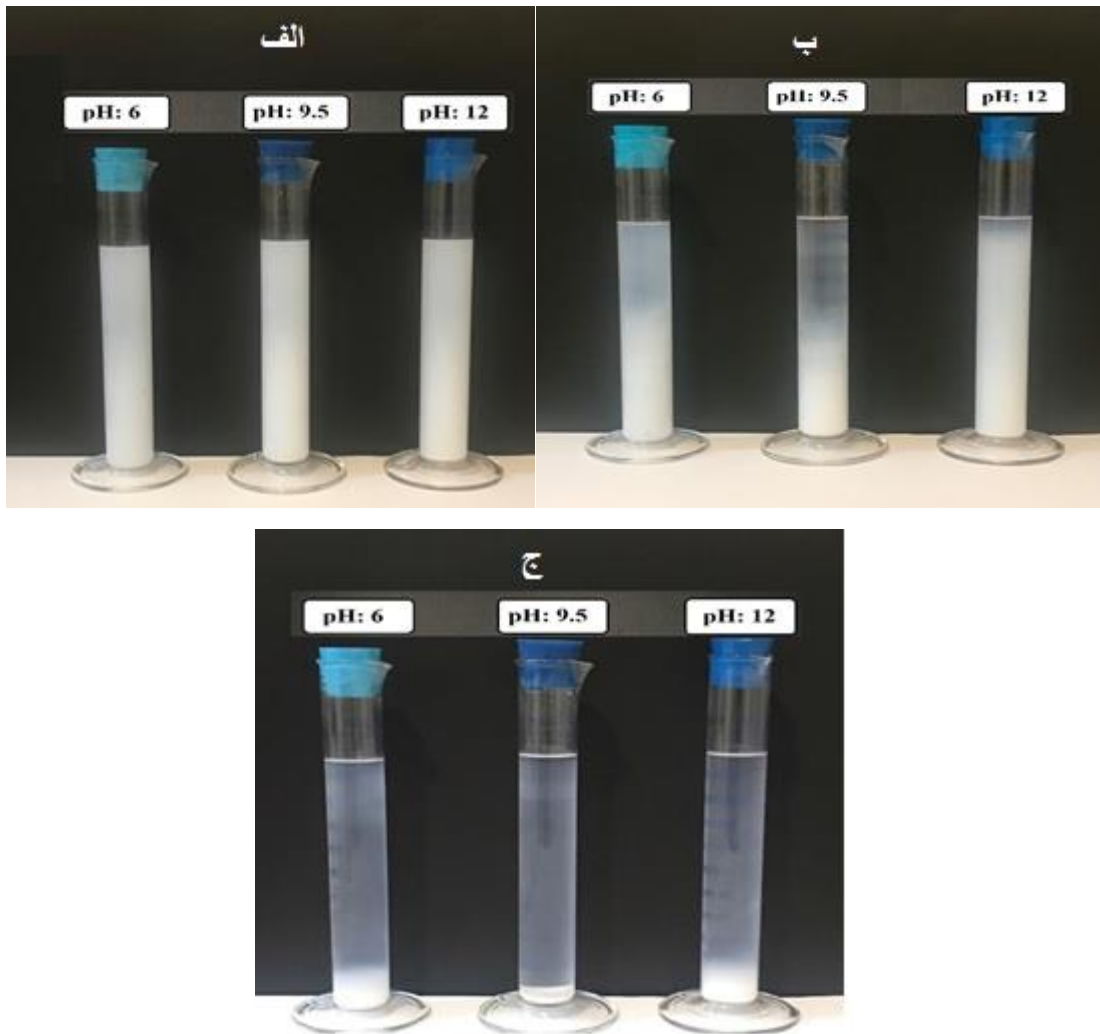
صحت	ابزار
$\pm 0.0001$	ترازو
$\pm 0.01 \text{ W/m.K}$	دستگاه ضریب هدایت حرارتی
$\pm 0.1^\circ\text{C}$	حمام آب گرم

های ۶، ۹/۵ و ۱۲ در زمانهای بلافاصله بعد از تهیه نانوسیال، بعد از ۳ ساعت و بعد از ۱۵ ساعت حالت سکون ارائه می‌دهد. نتایج نشان داد که بلافاصله بعد از تهیه نانوسیال در pH مختلف از پایداری خوبی برخوردار می‌باشند. اما با گذشت زمان، رسوب نانوذرات در نمونه‌ها کم کم آشکار می‌گردد. به عنوان نمونه، ۳ ساعت بعد از محلول‌سازی، رسوب و ته‌نشینی نانوذرات دیده می‌شود ولی میزان شدت آنها در pH مختلف یکسان نیست. بیشترین میزان رسوب و ته‌نشینی در pH=۹/۵ مشاهده شده است. علت این امر آن است که pH مذکور در واقع pH نقطه ایزوالکتریک نانوسیال اکسید روی می‌باشد [۳۳]. در این سطح pH نیروهای دافعه بین ذرات صفر بوده و در نتیجه ذرات به هم می‌چسبند. بنابراین وقتی pH نزدیک یا مساوی pH

که  $U$  نشان‌دهنده‌ی عدم قطعیت در اندازه‌گیری است؛  $W$  نشان‌دهنده‌ی وزن نانوذرات و  $\Delta$  خطا در اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. حداکثر میزان عدم قطعیت در ضریب هدایت حرارتی اندازه‌گیری شده برابر با  $3/1\%$  محاسبه شد.

### ۳- نتایج و بحث

۳-۱ اثر pH بر پایداری نانوسیال اکسید روی-اتیلن گلیکول  
 رصد پایداری نانوسیالات در زمانها و pH مختلف با استفاده از روش عکسبرداری مداوم با دوربین با وضوح بالا انجام شد. شکل ۴ رصد پایداری نانوسیال اکسید روی-اتیلن گلیکول در غلظت ۰/۰۵ درصد حجمی در pH



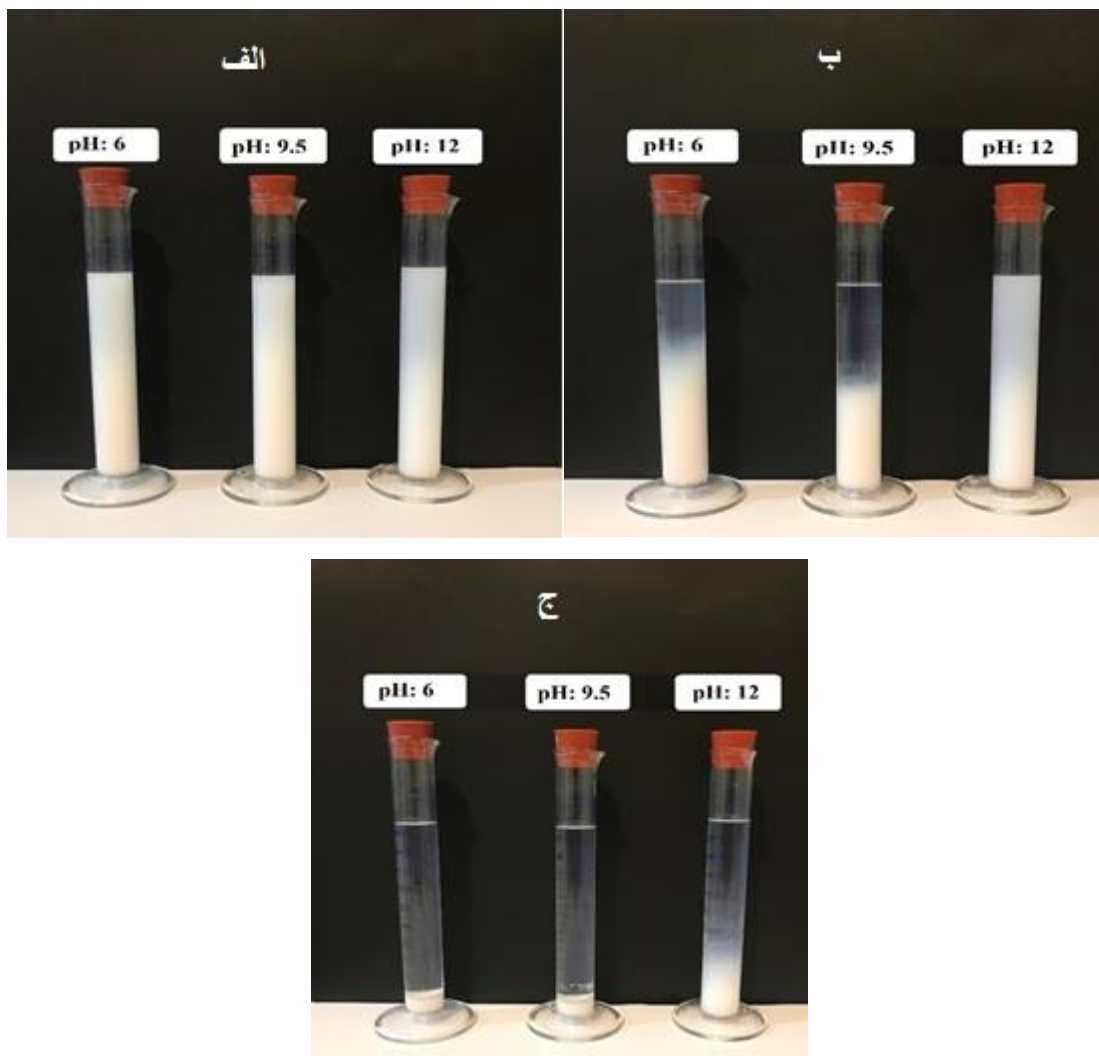
شکل ۴. رصد پایداری نانوسیال اکسید روی-اتیلن گلیکول در غلظت ۰/۰۵ درصد حجمی در pH های مختلف در دمای ثابت (الف) بلافاصله (ب) بعد از ۳ ساعت (ج) بعد از ۱۵ ساعت

Fig. 4. Observing the stability of ZnO-EG nanofluid at concentration of 0.05% by volume at different pH a) immediately b) after 3 hours c) after 15 hours

۰/۷۵ درصد حجمی در pH های ۶، ۹/۵ و ۱۲ در زمانهای بلافاصله بعد از تهیه نانوسیال، بعد از ۳ ساعت و بعد از ۹ ساعت حالت سکون ارائه می‌دهد. مشابه نتایج رصد پایداری در غلظت ۰/۰۵٪ همانطور که در شکل ۵ پیداست بعد از ۳ ساعت، در  $pH=6$  و  $pH=12$  نانوسیال اکسید روی بدلیل دور بودن از  $pH$  ایزوالکتریک پایداری بهتری را نشان می‌دهد در حالیکه در  $pH=9.5$  بدلیل رسیدن به نقطه ایزوالکتریک رسوب و ناپایداری مشهودتر است. همچنین در شکل ۵ مشاهده می‌شود که ۹ ساعت بعد از محلول سازی نانوذرات اکسید روی در تمامی  $pH$  ها کاملاً ته نشین شده‌اند.

نقطه ایزوالکتریک باشد، سوسپانسیون ناپایدار است. اما با افزایش اختلاف  $pH$  نسبت به این نقطه نیروهای آب پوشی بین ذرات افزایش می‌یابند، مقدار پتانسیل زتا سطح نانوذرات زیاد شده در نتیجه تحرک نانوذرات در سوسپانسیون افزایش یافته و موجب پایداری بیشتر نانوذرات می‌شود [۶]. همانطوریکه در pH های ۶ و ۱۲ مشاهده می‌گردد. نتایج بدست آمده در تطابق با یافته‌های [۳، ۱۴-۱۶] است. تصویر نانوسیال بعد از ۱۵ ساعت، به وضوح رسوب و ته نشینی کامل را نشان می‌دهد.

شکل ۵. رصد پایداری نانوسیال اکسید روی- اتیلن گلیکول در غلظت

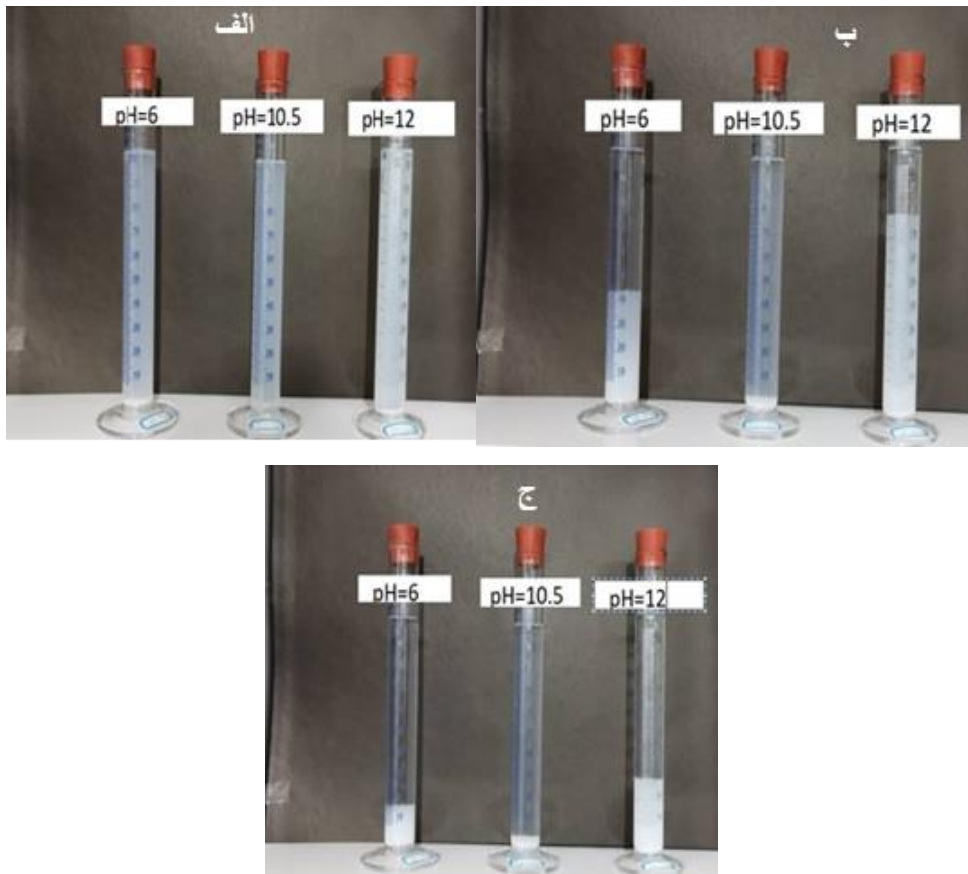


شکل ۵. رصد پایداری نانوسیال اکسید روی-اتیلن گلیکول در غلظت ۰/۷۵ درصد حجمی در pH های مختلف در دمای ثابت (الف) بلافاصله (ب) بعد از ۳ ساعت (ج) بعد از ۹ ساعت

**Fig. 5. Observing the stability of ZnO-EG nanofluid at concentration of 0.75% by volume at different pH**  
**a) immediately b) after 3 hours c) after 9 hours**

همانطور که از شکل ۶ پیداست ۶ ساعت بعد از محلول سازی، نانوسیال در  $\text{pH} = 12$  (محیطی قلیایی) از پایداری نسبتاً بهتری نسبت به  $\text{pH} = 6$  (محیطی اسیدی) برخوردار است. دلیل این امر را احتمالاً بتوان به این موضوع نسبت داد که فلزات خاکی مانند منیزیم ذاتاً در آب محیط را قلیایی نموده بنابراین با کاهش  $\text{pH}$  میزان یون هیدروکسید تولیدی در آب کاهش یافته و منجر به ته نشین شدن بیشتری نانوذرات اکسید منیزیم در آب می‌گردد. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که ۱۲ ساعت بعد از محلول سازی نانوذرات در تمامی  $\text{pH}$  ها کاملاً رسوب نموده اند.

۳-۲ اثر  $\text{pH}$  بر پایداری نانوسیال اکسید منیزیم - آب  
 شکل ۶ رصد پایداری نانوسیال اکسید منیزیم - آب در غلظت ۰/۰۵ درصد حجمی در  $\text{pH}$  های ۶، ۱۰/۵ و ۱۲ را در زمانهای بلافاصله بعد از تهیه نانوسیال، بعد از ۶ ساعت و بعد از ۱۲ ساعت حالت سکون ارائه می‌دهد. نتایج بعد از ۶ ساعت نشان می‌دهد که نانوسیال در  $\text{pH} = 10/5$  بیشترین رسوب را دارد. علت آن است که  $\text{pH}$  مذکور  $\text{pH}$  نقطه ایزوالکتریک نانوسیال اکسید منیزیم بوده [۳۴] که در آن هیچگونه نیروی دافعه الکترواستاتیکی بین ذرات وجود ندارد و به همین دلیل نمونه در این  $\text{pH}$  از همان لحظات ابتدایی شروع به رسوب گذاری نموده است. همچنین



شکل ۶. رصد پایداری نانوسیال اکسید منیزیم-آب در غلظت ۰/۰۵ درصد حجمی در pH های مختلف در دمای ثابت (الف) بلافاصله (ب) بعد از ۶ ساعت (ج) بعد از ۱۲ ساعت

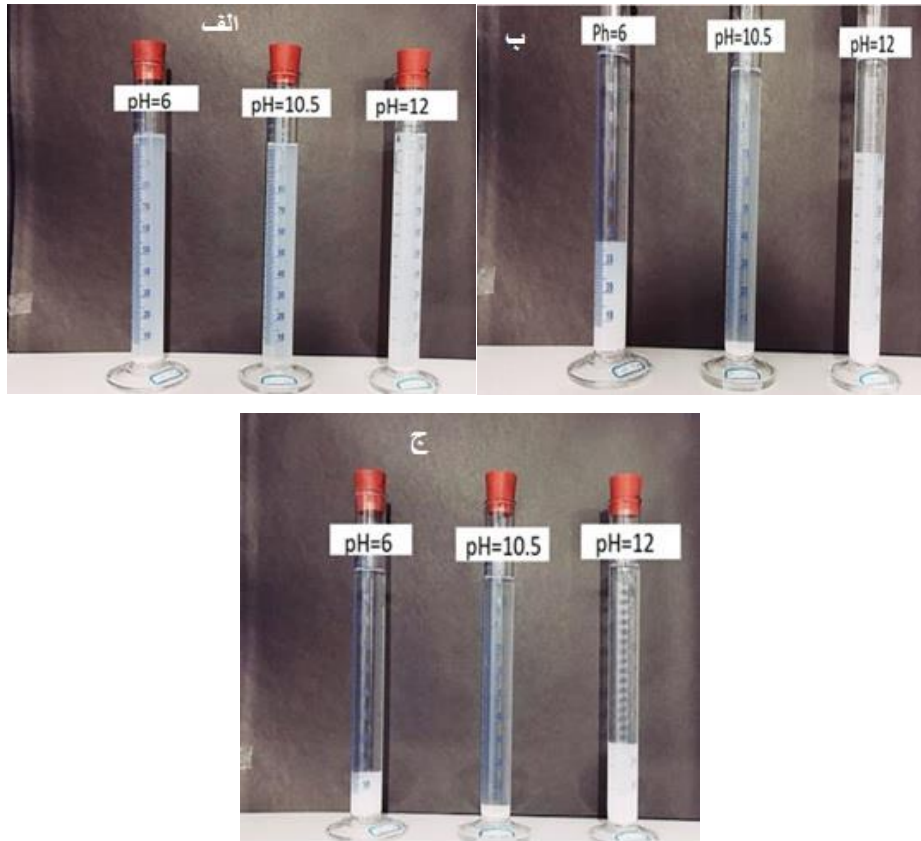
**Fig. 6. Observing the stability of MgO-W nanofluid at concentration of 0.05% by volume at different pH a) immediately b) after 6 hours c) after 12 hours**

در غلظت های ۰/۰۵ و ۰/۷۵ درصد حجمی نسبت به تغییرات pH در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتیگراد در شکل ۸ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید روی-اتیلن گلیکول در غلظت ۰/۰۵ درصد حجمی با افزایش pH از ۶ تا ۹/۵، بدلیل رسیدن به pH نقطه ایزوالکتریک (pH=۹/۵) و کاهش دافعه الکترواستاتیکی که منجر به ته نشینی نانوذرات در نتیجه کاهش پایداری نانوسیال می‌گردد، کاهش یافته که این میزان کاهش برابر با ۷٪ است. اما با افزایش pH از ۹/۵ به ۱۲، که معادل با دور شدن pH از نقطه ایزوالکتریک و در نتیجه و بهبود پایداری است، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به میزان ۱۶٪ نسبت به pH ایزوالکتریک (pH=۹/۵) افزایش یافته است. در غلظت ۰/۷۵ درصد حجمی نیز روندی مشابه مشاهده می‌گردد بطوریکه با افزایش pH از ۶ تا ۹/۵ ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به مقدار ۱۵٪ نسبت به pH=۶ کاهش یافته است. در حالیکه با افزایش pH از ۹/۵ به ۱۲ ضریب هدایت حرارتی

شکل ۷ تصویر پایداری نانوسیال اکسید منیزیم - آب در غلظت ۰/۵ درصد حجمی در pH های ۶، ۱۰/۵ و ۱۲ را در زمانهای بلافاصله بعد از تهیه نانوسیال، بعد از ۶ ساعت و بعد از ۱۲ ساعت حالت سکون ارائه می‌دهد. مشابه نتایج غلظت ۰/۰۵٪. بعد از ۳ ساعت در pH=۱۲ نانوسیال اکسید روی بدلیل دور بودن از pH ایزوالکتریک پایداری بهتری را نشان می‌دهد در حالیکه در pH=۹/۵ بدلیل رسیدن به نقطه ایزوالکتریک به شدت رسوب گذاری کرده است. ۹ ساعت بعد از محلول سازی نانوذرات اکسید روی در هر سه pH کاملاً ته نشین شده است. ژانگ و همکاران [۱۶] نیز که اثر pH را بر پایداری و خواص ترموفیزیکی نانوسیال TiO<sub>2</sub>-آب مورد بررسی آزمایشگاهی قرار داده بودند گزارش کرده‌اند که با فاصله گرفتن از نقطه ایزوالکتریک ( ) =۶/۵ ( pH پایداری نانوسیال مذکور بیشتر می‌گردد.

۳-۳ اثر pH بر ضریب هدایت حرارتی

تغییرات ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید روی-اتیلن گلیکول



شکل ۷. رصد پایداری نانوسیال اکسید منیزیم-آب در غلظت ۰/۵ درصد حجمی در pH های مختلف در دمای ثابت الف) بلافاصله ب) بعد از ۶ ساعت ج) بعد از ۱۲ ساعت

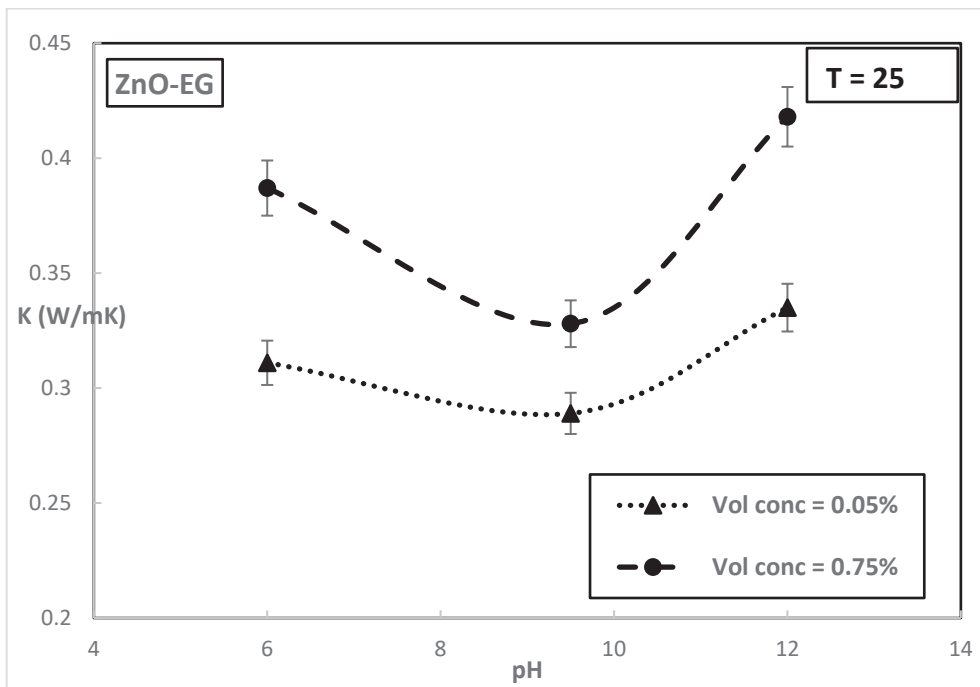
Fig. 7. Observing the stability of MgO-W nanofluid at concentration of 0.5% by volume at different pH a) immediately b) after 6 hours c) after 12 hours

حالت شبه همرفت<sup>۲</sup> در نواحی کوچک، بین نانوذرات و مولکول‌های سیال پایه، بوجود خواهد آمد که این خود باعث افزایش فرآیند انتقال حرارت می‌شود [۳۲].

تغییرات ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید منیزیم-آب در غلظتهای ۰/۰۵ و ۰/۵ درصد حجمی نسبت به تغییرات pH در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتیگراد در شکل ۹ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۹ پیداست ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید منیزیم ۰/۰۵ درصد حجمی با افزایش pH از ۶ تا ۱۰/۵، بدلیل رسیدن به نقطه ایزوالکتریک (pH = ۱۰/۵) و کاهش دافعه الکترواستاتیکی و در نتیجه کاهش پایداری، به مقدار ۹٪ نسبت به pH = ۶ کاهش یافته است. با دور شدن pH از نقطه ایزوالکتریک و رسیدن به pH = ۱۲ و در نتیجه افزایش پایداری، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به میزان ۲۴٪ نسبت به pH ایزوالکتریک افزایش یافته است. همین روند برای غلظت دوم هم قابل مشاهده است. بطوریکه ضریب هدایت

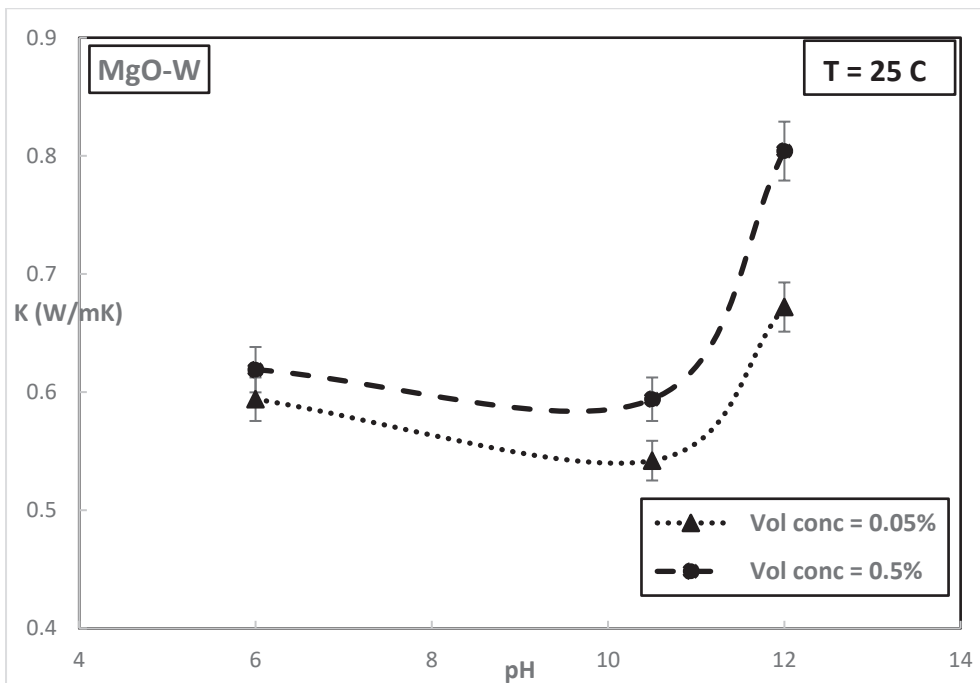
نانوسیال به میزان ۲۷٪ نسبت به pH = ۹/۵ افزایش نشان می‌دهد. نتایج حاضر در تطابق با نتایج لی و همکاران [۷] و ژو و همکاران [۳] است که به ترتیب با مطالعه تجربی بر روی نانوسیال مس-آب و اکسید آلومینیوم - آب نشان دادند که پایداری و ضریب هدایت حرارتی نانو سیال به طور گسترده‌ای با تغییر pH تغییر می‌نماید. نتایج مشابهی نیز در مراجع [۱۵، ۱۶، ۳۵، ۳۶] گزارش شده است.

همچنین شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نانوسیال اکسید روی - اتیلن گلیکول از ۰/۰۵ تا ۰/۷۵ درصد حجمی، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به طور متوسط (میانگین افزایش ضریب هدایت حرارتی در pH های مختلف)، ۲۱٪ افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است که در اثر افزایش غلظت، تعداد ذرات معلق بیش‌تر گردیده و در نتیجه خوشه‌ای<sup>۱</sup> شدن ذرات، ضریب هدایت حرارتی بهبود می‌یابد. از طرف دیگر تعداد برخوردها بین نانوذرات جامد و مولکول‌های مایع افزایش یافته که در نتیجه آن، یک



شکل ۸. تغییرات ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید روی - اتیلن گلیکول در غلظت و pH های مختلف

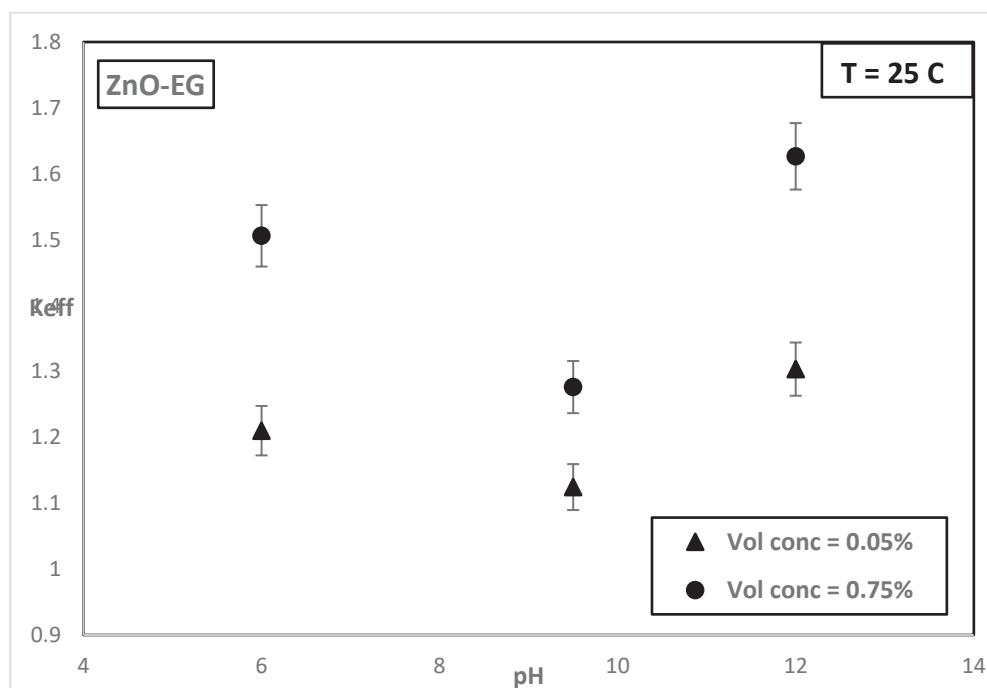
Fig. 8. Changes in thermal conductivity of ZnO-EG nanofluid in different concentration and pH



شکل ۹. تغییرات ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید منیزیم - آب در غلظت و pH های مختلف

Fig. 9. Changes in thermal conductivity of MgO-W nanofluid in different concentration and pH





شکل ۱۰. تغییرات ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیال اکسید روی - اتیلن گلیکول در غلظت و pH های مختلف

Fig. 10. Changes in effective thermal conductivity of ZnO-EG nanofluid in different concentration and pH

۳-۴- پیشنهادات معادلاتی برای پیش بینی ضریب هدایت حرارتی مقادیر ضریب هدایت حرارتی موثر تجربی بدست آمده از نانوسیالات اکسید روی - اتیلن گلیکول و اکسید منیزیم - آب با ضریب هدایت حرارتی موثر پیش بینی شده توسط مدل‌های کلاسیک از جمله مدل وسپ<sup>۲</sup> [۳۷] که فرم آن در معادله ۲ آمده است مقایسه شد. شکل ۱۲ این مقایسه را نشان می‌دهد. از شکل مذکور مشهود است که مدل کلاسیک وسپ در پیش بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات ناتوان است. ناسازگاری بین داده‌های تجربی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل‌های کلاسیک به این دلیل رخ می‌دهد که مدل‌های کلاسیک پدیده‌های مقیاس نانو را، مانند حرکت براونی<sup>۳</sup>، لایه‌بندی مایع<sup>۴</sup>، ریخت شناسی ذرات<sup>۵</sup>، و پدیده‌های سطحی<sup>۶</sup>، که تا حد زیادی بر هدایت حرارتی نانوسیالات تأثیر می‌گذارند در نظر نمی‌گیرند [۳۸].

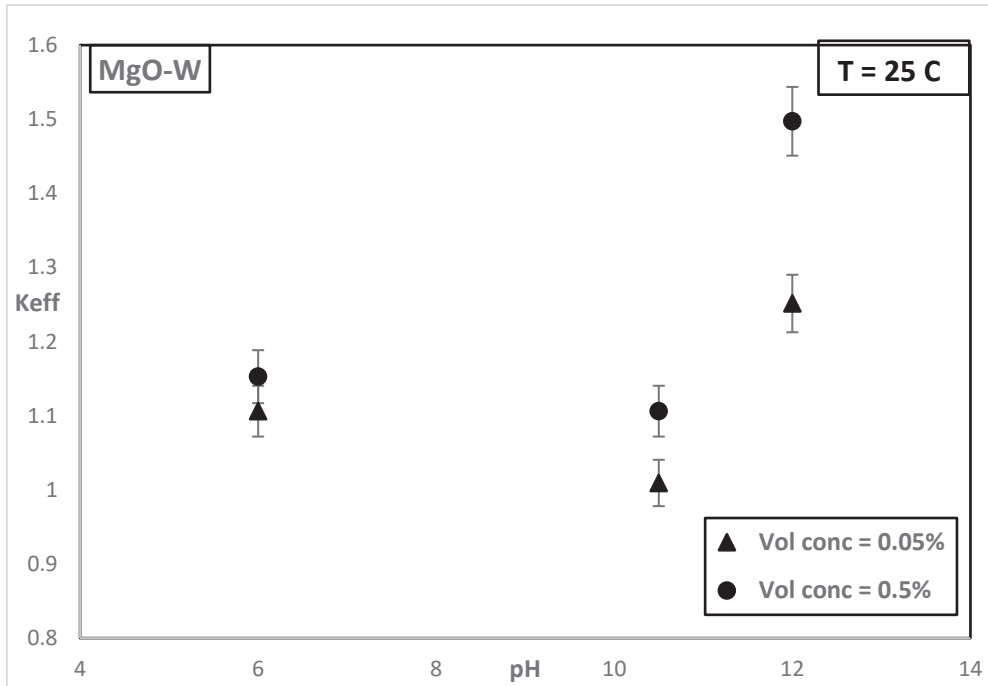
$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\Phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \Phi(k_f - k_p)} \quad (2)$$

- 2 Wasp
- 3 Brownian motion
- 4 liquid layering
- 5 particle morphology
- 6 interfacial phenomena

حرارتی نانوسیال اکسید منیزیم با غلظت ۰/۵ درصد حجمی با افزایش pH از ۶ تا ۱۰/۵ به مقدار ۴٪ نسبت به pH=۶ کاهش یافته است. با افزایش pH از ۱۰/۵ به ۱۲، همزمان به بهبود پایداری، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال هم به میزان ۳۵٪ افزایش داشت.

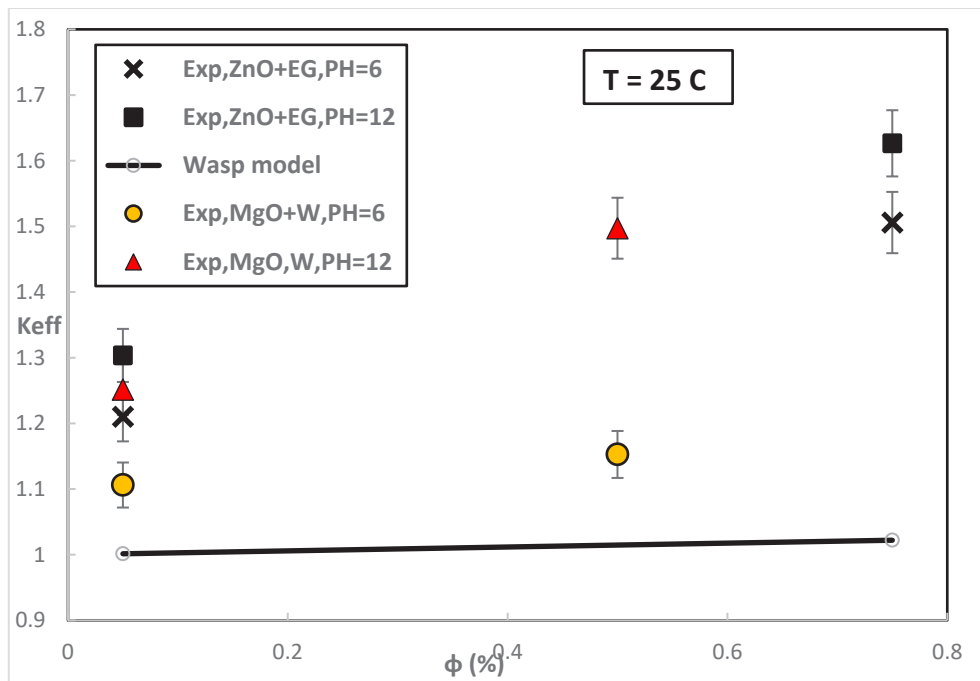
تغییرات ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیالات نسبت به تغییرات pH در غلظتهای مختلف در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. بیشینه درصد افزایش ضریب هدایت حرارتی موثر به ضریب هدایت حرارتی سیال پایه برای نانوسیال اکسید روی - اتیلن گلیکول برابر با ۶۳٪ بود که در غلظت ۰/۷۵ درصد حجمی و pH=۱۲ بدست آمد. این در حالیست که بیشینه درصد افزایش ضریب هدایت حرارتی موثر به ضریب هدایت حرارتی سیال پایه برای نانوسیال اکسید منیزیم - آب برابر با ۴۹٪ در غلظت ۰/۵ و pH = ۱۲ حاصل شد. با توجه به اینکه برای صنعتی و کاربردی نمودن نانوسیالات دو چالش عمده پایداری و قیمت بالا وجود دارد لذا اهمیت نتایج تحقیق حاضر در این است که بهبود مطلوبی که در ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیالات اکسید فلزی بدست آمده در غلظتهای بسیار کم بوده که می‌تواند در حل دو چالش مذکور در کاربردی کردن نانوسیالات راهگشا باشد.

$$1 \quad k_{eff} = k_{nf} / k_{bf}$$



شکل ۱۱. تغییرات ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیال اکسید منیزیم-آب در غلظت و pH های مختلف

Fig. 11. Changes in effective thermal conductivity of MgO-W nanofluid in different concentration and pH



شکل ۱۲. مقایسه نتایج تجربی با مقادیر پیش بینی شده مدل کلاسیک برای ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات اکسید روی-اتیلن گلیکول و اکسید منیزیم-آب

Fig. 12. Comparing the experimental results with the predicted values of the classical model for the thermal conductivity of ZnO-EG and MgO-W nanofluids

جدول ۵. پارامترهای همبستگی

Table 5. Regression parameters

پارامتر	اکسید روی- اتیلن گلايکول	اکسید منیزیم-آب
ضریب همبستگی	۰/۹۴	۰/۹۸
خطای میانگین مربعات (درصد)	۰/۰۱۲۱	۳/۰۲۵×۳-۱۰
خطای نسبی متوسط مطلق (درصد)	۰/۵۳	۰/۵۲
بیشینه خطا (درصد)	۷/۶	- ۳/۱۲

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (P_{iexp} - P_{ipred})^2}{\sum_i (\bar{p} - P_{iexp})^2} \quad (5)$$

$$AARD\% = \frac{100}{n} \sum_i \frac{|P_{iexp} - P_{ipred}|}{P_{iexp}} \quad (6)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_i (P_{iexp} - P_{ipred})^2 \quad (7)$$

که P نشان دهنده پارامتر اندازه‌گیری شده ( $k_{eff}$ )، n تعداد داده‌های تجربی و زیرنویس‌های exp و pred به ترتیب نشان دهنده داده‌های پیش‌بینی شده و تجربی می‌باشند. در جدول ۵، ضرایب همبستگی برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی موثر بسیار نزدیک به ۱ و مقادیر خطای نسبی متوسط مطلق و خطای میانگین مربعات بسیار پایین هستند. بنابراین می‌توان گفت که معادلات پیشنهادی از قابلیت پیش‌بینی خوبی برخوردار می‌باشند.

بنابراین مدل‌های کلاسیک موجود پیش‌بینی دقیقی از ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات ارائه نمی‌نمایند. از طرفی تاکنون معادله‌ای برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیالات با متغیرهای غلظت و pH ارائه نشده است. از این رو، با استفاده از نتایج تجربی بدست آمده و با کمک روش برازش منحنی، روابط جدیدی ارائه گردید. معادلات (۳) و (۴) به ترتیب برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی موثر اکسید روی- اتیلن گلايکول و اکسید منیزیم-آب و پیشنهاد می‌گردند:

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = -22.62716(\Phi)^2 - 0.11227(\Phi)(pH) + 0.01861(pH) + 19.25286(\Phi) + 0.18752 \quad (3)$$

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = 0.03783(pH)^2 + 0.06249(\Phi)(pH) - 0.65732(pH) - 0.30543(\Phi) + 3.69231 \quad (4)$$

پارامترهای ارزیابی برازش منحنی در جدول ۵ ارائه شده است. پارامترها شامل (ضریب همبستگی<sup>۱</sup>)، خطای نسبی متوسط مطلق<sup>۲</sup>، خطای میانگین مربعات<sup>۳</sup> [۳۹] توسط معادلات ذیل بدست می‌آیند:

- 1 regression coefficient ( $R^2$ )
- 2 Average absolute relative deviation
- 3 mean square error

## ۴- نتیجه‌گیری

برای بررسی تاثیر pH بر رفتار پایداری و ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات اکسید فلزی شامل اکسید روی-اتیلن گلايکول و اکسید منیزیم-آب از مطالعه تجربی استفاده گردیده است. هدف در این پژوهش شناخت رفتار پایداری نانوسیال در شرایط مختلف آزمایشگاهی و چگونگی تاثیر پذیری ضریب هدایت حرارتی نسبت به فاکتورهای غلظت و pH، همچنین ارائه معادلاتی برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات با کمک داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده، با استفاده از روش برازش منحنی بوده است. اهم نتایج پژوهش در موارد زیر خلاصه شده است:

- سطح pH بر پایداری هر دو نانوسیال به شدت تاثیر گذاشته بطوریکه برای هر دو نانوسیال در pH نقطه ایزوالکتریک، ته نشینی و رسوب کامل مشاهده گردید.

- مطالعه آزمایشگاهی نشان داده که با افزایش نانوذرات در سیال پایه، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می‌یابد.

- ضریب هدایت حرارتی هر دو نانوسیال در pH نقطه ایزوالکتریک کمترین مقدار را دارد. با فاصله گرفتن pH از نقطه ایزوالکتریک، مقادیر ضریب هدایت حرارتی بیشتر می‌شود.

- بیشترین درصد افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید روی - اتیلن گلايکول نسبت به سیال پایه برابر با ۶۳٪ است که در غلظت ۷۵٪/درصد حجمی و pH=۱۲ بدست آمد. اما بیشترین درصد افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال اکسید منیزیم-آب نسبت به سیال پایه برابر با ۴۹٪ در غلظت ۵٪/درصد حجمی و pH = ۱۲ حاصل شد.

- با استفاده از نتایج تجربی بدست آمده و با کمک برازش منحنی، روابط تجربی همبستگی متغیرها از نوع دو متغیره دارای اعتبار و کیفیت قابل قبول برای پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیالات اکسید فلزی ارائه شد.

در این مطالعه به بررسی تاثیر غلظت و pH بر پایداری و ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات اکسید فلزی شامل اکسید روی-اتیلن گلايکول و اکسید منیزیم-آب به صورت آزمایشگاهی پرداخته شد. بررسی مواردی مانند قابلیت به کارگیری در صنعت، آسیب‌های ناشی از خوردگی و رسوب در مقیاس‌های بزرگ و محاسبات اقتصادی ناشی از قیمت به عنوان موضوعات جالب برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌گردد. اگر چه اهمیت نتایج تحقیق حاضر مبنی بر بهبود مطلوب در ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیالات اکسید فلزی در غلظت‌های بسیار کم، می‌تواند در حل چالش‌های مذکور راهگشا و امیدبخش باشد.

## ۵- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

اتیلن گلايکول	EG
دما، سلسیوس	T
آب	W

### علائم یونانی

خطای اندازه‌گیری	$\Delta$
کسر حجمی	$\phi$

### زیرنویس

سیال پایه	bf
نانوسیال	nf

## منابع

- [1]. S.U.S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in: Proceedings of the 1995 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New York, USA, 1995, pp. 99-105.
- [2]. X.-j. Wang, D.-s. Zhu, S. yang, Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in nanofluids, Chem. Phys. Lett., 470(1-3) (2009) 107-111.
- [3]. D. Zhu, X. Li, N. Wang, X. Wang, J. Gao, H. Li, Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluids, Current Applied Physics, 9(1) (2009) 131-139.
- [4]. D.M. Sabatini, leading edge nanotechnology research developments, nova science publishers, 2007.
- [5]. M. Venkataraman, The effect of colloidal stability on the heat transfer characteristics of nanosilica dispersed fluids, (2005), Electronic Theses and Dissertations. 630. <https://stars.library.ucf.edu/etd/630>
- [6]. K.V. Wong, M.J. Castillo, Heat Transfer Mechanisms and Clustering in Nanofluids, Advances in Mechanical Engineering, 2 (2010) 795478.
- [7]. X. Li, D. Zhu, X. Wang, N. Wang, J. Gao, H. Li, Thermal conductivity enhancement dependent pH and chemical

- [17]. M.H. Esfe, S. Esfandeh, D. Toghraie, Investigation of different training function efficiency in modeling thermal conductivity of TiO<sub>2</sub>/Water nanofluid using artificial neural network, *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Aspects*, 653 (2022) 129811.
- [18]. A. Mehralizadeh, S.R. Shabaniyan, G. Bakeri, Experimental and modeling study of heat transfer enhancement of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> hybrid nanofluids on modified surfaces in pool boiling process, *The European Physical Journal Plus*, 135(10) (2020) 796.
- [19]. H. Eshgarf, A.A. Nadooshan, A. Raisi, M. Afrand, Experimental examination of the properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/water nanofluid, and an estimation of a correlation using an artificial neural network, *J. Mol. Liq.*, (2023) 121150.
- [20]. W. Yu, H. Xie, L. Chen, Y. Li, Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid, *Thermochim. Acta*, 491(1-2) (2009) 92-96.
- [21]. V.S. Raykar, A.K. Singh, Thermal and rheological behavior of acetylacetone stabilized ZnO nanofluids, *Thermochim. Acta*, 502(1-2) (2010) 60-65.
- [22]. M. Pastoriza-Gallego, L. Lugo, D. Cabaleiro, J. Legido, M. Piñeiro, Thermophysical profile of ethylene glycol-based ZnO nanofluids, *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 73 (2014) 23-30.
- [23]. A. Singh, Synthesis, characterization, electrical and sensing properties of ZnO nanoparticles, *Adv. Powder Technol.*, 21(6) (2010) 609-613.
- [24]. M.H. Esfe, M. Afrand, A. Karimipour, W.-M. Yan, N. Sina, An experimental study on thermal conductivity of MgO nanoparticles suspended in a binary mixture of water and ethylene glycol, *Int Commun Heat Mass*, 67 (2015) 173-175.
- [25]. O.A. Alawi, N.A.C. Sidik, H.W. Xian, T.H. Kean, S.N. Kazi, Thermal conductivity and viscosity models of metallic oxides nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 116 (2018) 1314-1325.
- [26]. J. Jeong, C. Li, Y. Kwon, J. Lee, S.H. Kim, R. Yun, Particle shape effect on the viscosity and thermal conductivity of ZnO nanofluids, *International journal of surfactant for Cu-H<sub>2</sub>O nanofluids*, *Thermochimica Acta*, 469(1-2) (2008) 98-103.
- [8]. J.A. Eastman, S. Choi, S. Li, W. Yu, L. Thompson, Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *Appl. Phys. Lett.*, 78(6) (2001) 718-720.
- [9]. Y. Ding, H. Alias, D. Wen, R.A. Williams, Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids), *Int. J. Heat Mass Transfer*, 49(1) (2006) 240-250.
- [10]. C.T. Wamkam, M.K. Opoku, H. Hong, P. Smith, Effects of pH on heat transfer nanofluids containing ZrO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> nanoparticles, *Journal of Applied Physics*, 109(2) (2011) 024305.
- [11]. H.A. Mintsas, G. Roy, C.T. Nguyen, D. Doucet, New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids, *Int J Therm Sci*, 48(2) (2009) 363-371.
- [12]. S.M. Abdel-Samad, A.A. Fahmy, A.A. Massoud, A.M. Elbedwehy, Experimental investigation of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids thermal conductivity synthesized by Sol-gel technique, *Current Nanoscience*, 13(6) (2017) 586-594.
- [13]. S. Umar, F. Sulaiman, N. Abdullah, S.N. Mohamad, Investigation of the effect of pH adjustment on the stability of nanofluid, in: *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, 2018, pp. 020031.
- [14]. J. Ji, X. Yao, J. Gao, W. Lu, W. Wang, D. Chu, Effect of surfactants and pH values on stability of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids, *Chemical Physics Letters*, 781 (2021) 138996.
- [15]. P.K. Kanti, P. Sharma, K. Sharma, M. Maiya, The effect of pH on stability and thermal performance of graphene oxide and copper oxide hybrid nanofluids for heat transfer applications: Application of novel machine learning technique, *Journal of Energy Chemistry*, 82 (2023) 359-374.
- [16]. H. Zhang, S. Qing, Y. Zhai, X. Zhang, A. Zhang, The changes induced by pH in TiO<sub>2</sub>/water nanofluids: Stability, thermophysical properties and thermal performance, *Powder Technol.*, 377 (2021) 748-759.

- [33]. M.O. Fatehah, H.A. Aziz, S. Stoll, Stability of ZnO nanoparticles in solution. Influence of pH, dissolution, aggregation and disaggregation effects, *Journal of Colloid Science and Biotechnology*, 3(1) (2014) 75-84.
- [34]. B. Wang, X. Xiong, H. Ren, Z. Huang, Preparation of MgO nanocrystals and catalytic mechanism on phenol ozonation, *Rsc Advances*, 7(69) (2017) 43464-43473.
- [35]. T. Yousefi, E. Shojaeizadeh, F. Veysi, S. Zinadini, An experimental investigation on the effect of pH variation of MWCNT-H<sub>2</sub>O nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector, *Solar Energy*, 86(2) (2012) 771-779.
- [36]. K. Goudarzi, F. Nejati, E. Shojaeizadeh, S.A. Yousefi-Abad, Experimental study on the effect of pH variation of nanofluids on the thermal efficiency of a solar collector with helical tube, *Exp. Therm Fluid Sci.*, 60 (2015) 20-27.
- [37]. E.J. Wasp, J.P. Kenny, R.L. Gandhi, Solid-liquid flow: slurry pipeline transportation. [Pumps, valves, mechanical equipment, economics], *Ser. Bulk Mater. Handl.*; (United States), 1(4) (1977).
- [38]. S. Mukherjee, P.C. Mishra, P. Chaudhuri, Thermo-economic performance analysis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids—an experimental investigation, *J. Mol. Liq.*, 299 (2020) 112200.
- [39]. S. Mukherjee, S.R. Panda, P.C. Mishra, P. Chaudhuri, Enhancing thermophysical characteristics and heat transfer potential of TiO<sub>2</sub>/water nanofluid, *Int. J. Thermophys.*, 41(12) (2020) 1-33.
- refrigeration, 36(8) (2013) 2233-2241.
- [27]. H. Xie, W. Yu, W. Chen, MgO nanofluids: higher thermal conductivity and lower viscosity among ethylene glycol-based nanofluids containing oxide nanoparticles, *J. Exp. Nanosci.* 5(5) (2010) 463-472.
- [28]. G.-J. Lee, C.K. Kim, M.K. Lee, C.K. Rhee, S. Kim, C. Kim, Thermal conductivity enhancement of ZnO nanofluid using a one-step physical method, *Thermochim. Acta*, 542 (2012) 24-27.
- [29]. H. Li, L. Wang, Y. He, Y. Hu, J. Zhu, B. Jiang, Experimental investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluids, *Appl. Therm. Eng.*, 88 (2015) 363-368.
- [30]. M. Anish, T. Arunkumar, B. Kanimozhi, J. Jayaprabakar, N. Beemkumar, V. Jayaprakash, Experimental exploration and theoretical certainty of thermal conductivity and viscosity of MgO-therminol 55 nanofluid, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(4) (2019) 451-467.
- [31]. S.H. Kim, S.R. Choi, D. Kim, Thermal conductivity of metal-oxide nanofluids: particle size dependence and effect of laser irradiation, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 129(3) (2007) 298-307.
- [32]. T.-P. Teng, Y.-H. Hung, T.-C. Teng, H.-E. Mo, H.-G. Hsu, The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity, *Appl. Therm. Eng.*, 30 (14-15) (2010) 2213-2218.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. R. Zandaf, Gh. Heidarinejad, *Numerical simulation of two consecutive human sneezing and examining the dispersion of the resulting droplets in the surroundings*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(7) (2023) 857-874.

DOI: [10.22060/mej.2023.22193.7578](https://doi.org/10.22060/mej.2023.22193.7578)

