

## Research Paper

# Investigation of Thermophysical Properties and Thermal Performance and Pressure Drop of Nanofluid including Functionalized Graphene with Polyvinyl Alcohol

Mehdi Azizi<sup>1\*</sup>

1. Assistant prof. of Chemical Engineering, Department of chemical engineering, Islamic Azad University, Marvdasht branch, Fars, Iran.

Received: 2022/05/05

Revised: 2022/06/30

Accepted: 2022/07/13

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/jnm.2022.30395.1959](https://doi.org/10.30495/jnm.2022.30395.1959)

### Keywords:

Nanofluid, Graphene Nanoplatelets, Functionalization, Heat transfer, Thermophysical Properties

### Abstract

**Introduction:** The lack of an appropriate dispersibility of Graphene Nanoplatelets (GNP) in different hydrophilic and hydrophobic media and their poor interaction to form bundles is one of the most important problems of this material. To solve above-mentioned problem, covalent functionalization of GNP is of effective approaches

**Methods:** in the present study, in order to perform covalent functionalization of GNP as well as increase the dispersibility in aqueous media, firstly it is created carboxylated with oxidation method on the GNP (Gr). Then, polyvinyl alcohol (PVA) with the long chain can be a good candidate to functionalize on the surface of Gr for decorating divalent cations as a linkage and/or bridge and to solve the problem of lack of dispersibility. Also, it can provide good colloidal stability in aqueous media. So, after performing a reaction between PVA and Gr structure, structure and morphology of functionalized PVA-Gr to covalently were investigated by Raman spectroscopy and transmission electron microscopy (TEM), respectively. After that, covalently-functionalized nanofluids (PVA-Gr/water), with different weight concentrations of 0.025%, 0.05% and 0.1% were prepared.

**Findings:** The stability and thermophysical properties such as thermal conductivity, viscosity and density of the above nanofluids have been studied. Then, the convective heat transfer coefficient, pressure drop, performance index and pumping power of the prepared nanofluids for different weight concentrations under turbulent flow regime (0.03-0.12 lit/s) were studied

**Conclusion:** The results show that as the flow rate and weight concentration of PVA-Gr in nanofluids increase, the convective heat transfer coefficient enhances, which PVA-Gr/water nanofluids illustrate the maximum enhancement in the heat transfer coefficient for all weight concentrations in comparison with pure water.

**Citation:** Mehdi Azizi, Investigation of Thermophysical Properties and Thermal Performance and Pressure Drop of Nanofluid including Functionalized Graphene with Polyvinyl Alcohol, Quarterly Journal of New Materials. 2022; 12 (46): 19-32.

\*Corresponding author: Mehdi Azizi

**Address:** Department of chemical engineering, Islamic Azad University, Marvdasht branch, Fars, Iran.

**Tell:** +989173133626

**Email:** [Mehdi.Azizi@miau.ac.ir](mailto:Mehdi.Azizi@miau.ac.ir)

## Extended Abstract

### Introduction

Optimization of energy is a critical issue in various fields such as petrochemical industrials, gas and oil sectors, infrastructure, defence and so on. During the last century, different types of heating and cooling equipment with different designs have been utilized to fully realize energy optimization. There are a couple of ways to improve the heat transfer rate (thermal efficiency) of different thermal equipment such as using phase change materials with low thermal conductivity (PCMs) or loading conductive nano/micro structures into the operating fluids. Obviously, enhancement of convection heat transfer rate, which is in direct connection with thermal conductivity, is always classified in the most imperative factors for saving energy, in particular for most of liquid-based thermal devices which use different type of poor conductive base fluids like different types of oils, ethylene glycol, and water. The majority of conventional base fluids are suffered due to the poor thermal conductivity. So, adding conductive micro or nanoparticles e.g., different types of metals or metal oxides, and various carbon allotropes e.g., carbon nanotubes (CNT), graphene, fullerene into the base fluids was demonstrated as a proper solution for improving conventional heat transfer of base fluids.

The first and most important problem with graphene sheets (Gr) is their tendency to aggregate in different solvents, which resulted in a significant decrease in the thermal application. In the dispersion study, being homogenous and stability of additives play key roles in the thermal performance of the synthesized nanofluids in different heat transfer-based equipment. To solve the poor dispersibility of Gr in aqueous media as well as polar solvents, non-covalent and covalent functionalization procedures are two main appropriate techniques. Nevertheless, non-covalent groups such as surfactants and/or polymers make some problems in circulation systems such as mass production of foam, contamination of the heat transfer area, reduction in the

effective area and increasing the viscosity. So, covalent modification as another solution can be a good alternative method to solve all the above-mentioned problems.

### Materials and methods

To produce PVA-GO, graphite was first oxidized to GO according to the famous Hummers method. Then, a direct esterification proposed by Teng et al. was used for attachment of PVA on carboxylic groups-decorated on the GO sheets. To this end, parent graphite (3.0 g),  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (70 mL, 98% purity) were mixed on stirring in the presence. Synthesis of highly stable nanofluids including polyvinyl alcohol-treated graphene oxide of an ice bath, followed by adding  $\text{KMnO}_4$  (9.0 g) at temperature of less than  $20^\circ\text{C}$ . With transferring obtained mixture into a  $40^\circ\text{C}$  oil-bath and stirring for 30 min, we gave enough reaction time and condition for oxidation. Formerly, pure water (150 mL) was poured into the resulting suspension and was subsequently mixed on a stirrer for 15 min at temperature of  $95^\circ\text{C}$ . With adding water (500 mL) and 15 mL of  $\text{H}_2\text{O}_2$  (30%), we observed a change in the color of solution from dark brown to yellow. The expanded graphite oxide sheets were obtained by centrifuging at 20,000 rpm, washing with diluted HCl and pure water, dried into a vacuum oven. To reach GO sheets, expanded graphite oxide sheets were poured into water (1800 mL) again, followed by sonication for about 60 min. To make GO more hydrophilic, we used PVA to functionalize the obtained GO sheets. Thus, the dried GO were ball-milled with  $\text{ZrCl}_4$  at 400 rpm and the resulting powder were poured into a beaker including 200 mL of Tetrahydrofuran. After sonication of the mixture for 6 h, toluene (5 mL) was added. Esterification reaction finished after 6 h and PVA-GO as the main product were obtained after centrifuging, washing, and drying in an oven.

### Findings and Discussion

in the present study, in order to perform covalent functionalization of GNP as well as increase the dispersibility in aqueous

media, firstly it is created carboxylated with oxidation method on the GNP (Gr). Then, polyvinyl alcohol (PVA) with the long chain can be a good candidate to functionalize on the surface of Gr for decorating divalent cations as a linkage and/or bridge and to solve the problem of lack of dispersibility. Also, it can provide good colloidal stability in aqueous media. So, after performing a reaction between PVA and Gr structure, structure and morphology of functionalized PVA-Gr to covalently were investigated by Raman spectroscopy and transmission electron microscopy (TEM), respectively. After that, covalently-functionalized nanofluids (PVA-Gr/water), with different weight concentrations of 0.025%, 0.05% and 0.1% were prepared. Then, the convective heat transfer coefficient, pressure drop, performance index and pumping power of the prepared nanofluids for different weight concentrations under turbulent flow regime (0.03-0.12 lit/s) were studied.

## Conclusion

In the present study, a simple and cost-effective method was initially introduced for mass production of polyvinyl alcohol-functionalized few-layer graphene. The exfoliation and functionalization procedure were confirmed by elemental and morphological analyses such as Raman spectroscopy and TEM. Thermophysical analyses, e.g., thermal conductivity, viscosity and density of water-based PVA-Gr nanofluids, were experimentally determined at the temperature range of 20–50 °C. The results demonstrated significant enhancement in thermal conductivity of waterbased PVA-Gr nanofluids with concentration as well as temperature, which is the main criteria for improving overall heat transfer coefficient of thermal equipment. Noteworthy, the rates of penalty for viscosity and density after loading PVA-GR were insignificant as compared to the pure water. The results illustrated that the water/ PVA-GO nanofluids increased the rate of heat transfer in heat

exchangers significantly. After loading 0.1 mass% of PVA-GO in basefluid, h and Nu number increased almost 142% and 80%, respectively. It should be mentioned that the variation in pressure drop was insignificant. As an indicator, performance index in the presence of all the prepared samples were higher than 1, indicating superior enhancement in the heat transfer rate.

## Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

In the present study, all activities are done voluntarily and with my full consent.

## Funding

No funding.

## Authors' contributions

Design experiments and perform, Results and Data analysis ,Supervision and final writing : Mehdi Azizi

## Conflicts of interest

The author declared no conflict of interest.

## مقاله پژوهشی

## بررسی خواص ترموفیزیکی و عملکرد حرارتی و افت فشار نانوسیال محتوی گرافن عامل دار شده با پلی وینیل الکل

مهدي عزيزي<sup>۱\*</sup>

۱. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، فارس، ایران

## چکیده

**مقدمه:** عدم پراکندگی مناسب و ناپایدار بودن سوسپانسیون‌های نانو صفحات گرافنی در محیط‌های آبی و آبی و همچنین عدم برهمکنش بین آنها و مواد دیگر از مشکلات اصلی استفاده از این مواد می‌باشد. عامل‌دار کردن نانو صفحات گرافنی به صورت کووالانسی راه‌حل مناسبی برای رفع این مشکل محسوب می‌گردد.

**روش:** از این رو در پژوهش حاضر، جهت پراکندگی مناسب نانو صفحات گرافنی در محیط‌های آبی، به منظور عامل‌دار کردن نانو صفحات گرافنی به صورت کووالانسی، ابتدا گروه‌های اکسیدی بر روی نانو صفحات گرافنی به وجود آمده است. سپس، با ایجاد پیوند آبدوست پلی وینیل الکل با طول بلندتر به گروه‌های اکسیدی، مشکل پایداری حل شده است. بنابراین، بعد از اتصال پلی وینیل الکل را به گروه‌های اکسیدی موجود بر روی نانو صفحات گرافنی، ساختار و مورفولوژی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده به صورت کووالانسی به ترتیب توسط دستگاه‌های رامان (Raman) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مورد تأیید قرار گرفته است. پس از آن، نانوسیال آب/ نانو صفحات گرافنی-پلی وینیل الکل در غلظت‌های وزنی ۰/۰۲۵، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱ درصد تهیه شده است.

**یافته‌ها:** پایداری و خواص ترموفیزیکی از قبیل هدایت حرارتی، ویسکوزیته و دانسیته نانو سیالات فوق الذکر مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، افت فشار، ضریب عملکرد و توان پمپاژ نانوسیالات تهیه شده در غلظت‌های وزنی مختلف در دستگاه آزمایشگاهی تحت شدت جریان درهم (۰/۰۳ تا ۰/۱۲ لیتر بر ثانیه) مورد بررسی قرار گرفته است.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان داده است که با افزایش غلظت وزنی و شدت جریان ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بهبود یافته است. اما این بهبود برای نانوسیال آب/ نانو صفحات گرافنی-پلی وینیل الکل در همه غلظت‌ها نسبت به آب خالص بیشتر بوده است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۵

تاریخ داوری: ۱۴۰۱/۰۴/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۲

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/jnm.2022.30395.1959](https://doi.org/10.30495/jnm.2022.30395.1959)

## واژه‌های کلیدی:

نانوسیال، نانو صفحات گرافنی، عامل‌دار کردن، انتقال حرارت، خواص ترموفیزیکی

\* نویسنده مسئول: مهدي عزيزي

نشانی: گروه مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، فارس، ایران.

تلفن: ۰۹۱۷۳۱۳۳۶۲۶

پست الکترونیکی: [Mehdi.Azizi@miau.ac.ir](mailto:Mehdi.Azizi@miau.ac.ir)

## مقدمه

یکی از مهم‌ترین چالش‌های علمی در مراکز صنعتی بحث خنک‌کننده‌ها است که شامل بسیاری از تولیدات متنوع می‌شود. پیشرفت‌های فناورانه مانند دستگاه‌های میکرو الکترونیک عملیاتی در سرعت بالا، موتورهای با قدرت بالا منجر به افزایش بار حرارتی می‌شوند که نیاز به پیشرفت در خنک‌کننده‌ها را بیش از پیش متذکر می‌شوند. روش‌های متداول برای افزایش انتقال حرارت با افزایش سطح برای تبادل حرارتی بیشتر روبرو هستند. این امر افزایش نامطلوب در اندازه سیستم‌های مدیریت حرارتی را ایجاد می‌کند. بنابراین نیاز فوری به ماده خنک‌کننده‌ای جدید که باعث بهبود عملکرد حرارتی سیستم‌های انتقال حرارت گردند، احساس می‌شود. از این رو، ترم نانوسیال با توصیف تعلق ذرات در اندازه نانو. (کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر) اعم از فلزی، اکسید فلزی، گرافن و نانولوله در سیالات پایه انتقال حرارت از قبیل آب، اتیلن گلایکول و غیره معرفی می‌شود. خصیصه اصلی نانوسیالات، بهبود هدایت حرارتی و عملکرد انتقال حرارت جابجایی نسبت به سیال پایه‌اش است. بنابراین، کارهای بسیاری در زمینه نانوسیال با کاربردهای بالقوه آن در صنایع حساسی از قبیل میکرو الکترونیک، دفاع، هسته‌ای، هوا و فضا و ... انجام شده است.

بسیاری از مطالعات بر روی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری تحت شرایط اکسید فلزی صورت گرفته است. با این وجود، محققان بهبود ضریب انتقال حرارت را یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های خود می‌دانستند. Kulkarni [۱] بهبود انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات دی‌اکسید سیلیکون در مخلوط آب و اتیلن گلایکول را به وسیله اندازه‌گیری مقدار ویسکوزیته مورد بررسی قرار داد. وی علاوه بر افزایش در ضریب انتقال حرارت، افزایش افت فشار در رینولدز ثابت را نیز گزارش کرد. Payghambarzade و همکاران [۲] عملکرد خنک‌سازی تابشگر اتومبیل با استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که با به کار بردن نانوسیال در یک غلظت حجمی کم می‌توان بازده انتقال حرارت را بالاتر از ۴۵ درصد در مقایسه با آب خالص بهبود بخشید. در مطالعاتی جداگانه، آن‌ها با استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم-اتیلن گلایکول نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند [۳].

Zeinali Heris و همکاران [۴] نانوسیالات شامل اکسید مس و اکسید آلومینیوم در آب را در غلظت‌های مختلف تولید و ضریب انتقال حرارت جریان آرام از طریق یک لوله مدور در شرایط مرزی دما ثابت را به دست آوردند. نتایج آزمایش‌ها برای هر دو نانوسیال نشان داد که ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت نانوسیال نسبت به عدد پکلت بهبود یافته است. اما این بهبود برای نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب به مراتب بیشتر از نانوسیال اکسید مس-آب گزارش گردید. بهبود ضریب انتقال حرارت ۱۰ تا ۳۰ درصدی برای محدوده پکلت ۲۵۰۰ تا ۶۸۰۰ در غلظت ۲٪ حجمی برای نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب اتفاق افتاد. Ding و همکاران [۵] برای تعلق آبی شامل ۰/۵٪ وزنی نانولوله کربنی نشان دادند که ضریب انتقال حرارت به بهبود ۳۵۰ درصدی در رینولدز ۸۰۰ می‌رسد که نمی‌توان صرفاً به افزایش هدایت حرارتی نسبت داد بلکه عواملی دیگر همچون شرایط جریان در رینولدزهای مختلف، غلظت نانولوله‌های کربنی و pH می‌توانند تأثیرگذار باشند. در گزارشی دیگر توسط Ding و همکاران [۶]، تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری با استفاده از نانوسیال دی‌اکسید تیتانیوم-اتیلن گلایکول، نانولوله کربنی-آب و نانو الماس-آب را انجام دادند. آن‌ها در این کار نشان دادند که بهبود هدایت حرارتی نانوسیالات نمی‌تواند تضمینی بر بهبود انتقال حرارت جابه‌جایی باشد. آن‌ها علت خود را این‌گونه

بیان کردند که نمی‌توان علت دقیقی را به صورت روشن در این مورد پیشنهاد داد ولی مهاجرت ذرات می‌تواند یکی از عامل‌های اصلی باشند. با این حال، عدم پراکندگی نانولوله‌های کربنی در حلال‌های قطبی محققان را به فکر استفاده از عوامل کووالانسی و غیر کووالانسی جهت پایداری نانولوله‌های کربنی کرده است. Arvand و همکاران [۷] به همین منظور عامل کووالانسی هیدروکسیل را بر روی نانولوله‌های کربنی قرار دادند و نانوسیال را در غلظت‌های ۰/۰۵٪ و ۰/۰۳٪ سنتز کردند. آن‌ها بهبود ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت حجمی و عدد رینولدز را گزارش کردند. ضریب انتقال حرارت نانوسیال اکسید نانولوله کربنی-آب و اکسید نانولوله کربنی-اتیلن گلایکول در نرخ جریان ۱۸۱ میلی‌لیتر بر ثانیه در غلظت ۰/۰۵٪ به ترتیب ۴۸۵ و ۴۸۵ W/m<sup>2</sup>K و ۳۲۰ و ۴۸۵ W/m<sup>2</sup>K به دست آمده است. آن‌ها همچنین افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش نرخ جریان از ۵۶ تا ۱۸۱ را به ترتیب ۴۱۵ و ۵۸۵ W/m<sup>2</sup>K برای نانوسیال اکسید نانولوله کربنی-اتیلن گلایکول و ۳۲۰ و ۴۸۵ W/m<sup>2</sup>K برای نانوسیال اکسید نانولوله کربنی-آب در غلظت ۰/۰۵٪ گزارش کردند.

Amiri و همکاران [۸-۱۱] در کارهای متوالی گرافن‌های عامل دار شده و نانولوله‌های کربنی عامل دار شده را برای افزایش عملکرد دستگاه‌های مختلف به خدمت گرفتند. آنها توانستند بازده انواع مبدل‌های حرارتی، ترموسیفون‌ها، ترانزیستورها، ترانسفررها، توربین‌های گازی، و رادیاتور ماشین را با استفاده از سیالات فوق‌الذکر به شدت ارتقا دهند. در پژوهش حاضر، جهت پراکندگی مناسب نانو صفحات گرافنی در محیط‌های آبی، ابتدا گروه‌های اکسیدی بر روی نانو صفحات گرافنی به وجود خواهد آمد. اکسیدگرافن (GO) که مستقیماً از طریق اکسیداسیون شیمیایی با پراکندگی و لایه برداری متعاقب آن از گرافیت تولید می‌شود، به عنوان یکی از پرکاربردترین مشتقات گرافن می‌باشد. یکی از مزایای اکسید گرافن، حل شدن آسان آن در آب و سایر حلال‌های آلی می‌باشد. [12] سپس، با ایجاد پیوند آبدوست پلی وینیل الکل با طول بلندتر به گروه‌های اکسیدی، مشکل پایداری تا حدود زیادی رفع خواهد شد. بنابراین، بعد از اتصال پلی وینیل الکل را به گروه‌های اکسیدی موجود بر روی نانو صفحات گرافنی، ساختار و مورفولوژی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده به صورت کووالانسی به ترتیب توسط دستگاه‌های رامان (Raman) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مورد تأیید قرار خواهد گرفت. پس از آن، نانوسیال آب/ نانو صفحات گرافنی-پلی وینیل الکل در غلظت‌های وزنی ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد تهیه و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، افت فشار و ضریب اصطکاک، ضریب عملکرد، معیار ارزیابی عملکرد و توان پمپاژ نانوسیالات فوق در دستگاه آزمایشگاهی تحت شدت‌جریان درم (۰/۰۳ تا ۰/۱۲ لیتر بر ثانیه) مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## مواد و روش‌ها

### سیستم آزمایشگاهی و روابط حاکم

در اینجا، به منظور بهبود راندمان سیستم‌های حرارتی، استفاده از نانوسیال نانو صفحات گرافن عامل‌دار شده به صورت کووالانسی در دستور کار قرار گرفته است. به همین منظور سیستم آزمایشگاهی برای بررسی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری و افت فشار نانوسیالات محتوی نانو صفحات گرافن عامل‌دار شده طراحی و ساخته شده است. سیستم آزمایشگاهی به‌طور کلی شامل مسیر بسته‌ای از جریان می‌باشد که در آن آب خالص و نمونه‌های نانوسیال محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با گروه‌های کووالانسی به وسیله پمپ به جریان در می‌آیند و پس از عبور از بخش حرارتی توسط یک تبادل‌گر حرارتی مارپیچی تا دمایی نزدیک به دمای

$$h(x) = \frac{q''}{T_s(x) - T_m(x)} \quad (1)$$

که در این رابطه  $q''$  و  $T_s(x)$  و  $T_m(x)$  به ترتیب شار حرارتی وارد شده به سیال، دمای دیواره در فاصله محوری  $x$  از ورودی و دمای متوسط سیال هستند. شار حرارتی به کمک انرژی الکتریکی ورودی (رابطه ۲) و مساحت سطح داخلی لوله (رابطه ۳) تعیین می‌شود.

$$Q = VI \quad (2)$$

$$A_s = \pi DL \quad (3)$$

در تمامی آزمایش‌ها  $V$  و  $I$  به ترتیب در ۱۷۰ ولت و ۳/۵۳۱ آمپر ثابت نگه داشته می‌شوند که نتیجه آن شار حرارتی ثابت ۱۵/۹۲۳ kW/m<sup>2</sup> است. همچنین، با نوشتن موازنه انرژی اطراف یک لوله دمای متوسط سیال از طریق رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$T_m(x) = T_{in} + \frac{q'' \pi D}{\dot{m} C_p} x \quad (4)$$

که در این رابطه  $T_{in}$ ،  $D$ ،  $\dot{m}$  و  $C_p$  به ترتیب دمای سیال در ورودی بخش آزمایش، قطر لوله، دبی جرمی سیال و ظرفیت گرمایی ویژه هستند. بنابراین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی به کمک روابط ۱ و ۴ به دست می‌آید.

خواص فیزیکی سیال پایه (آب خالص) توسط روابط ۵ تا ۸ که بر اساس درون‌یابی بر روی داده‌های تجربی برحسب دما است محاسبه می‌گردد [14].

$$\rho = 999.7968 + 0.0683T - 0.01074T^2 + 0.0008214T^{2.5} - 2.30309 \times 10^{-5}T^3 \quad (5)$$

$$C_p = 4.2174 - 0.005618T + 0.001299T^{1.5} - 0.0001153T^2 + 4.14964 \times 10^{-6}T^{2.5} \quad (6)$$

$$\mu = \frac{1}{557.8248 + 19.408T + 0.136T^2 - 3.116 \times 10^{-4}T^3} \quad (7)$$

$$k = 0.56502 + 0.002636T - 0.0001251T^{1.5} - 1.51549 \times 10^{-6}T^2 - 0.00094129T^{0.5} \quad (8)$$

در روابط فوق دما برحسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

ظرفیت گرمایی ویژه به کمک رابطه Pak and Cho محاسبه می‌شوند [15].

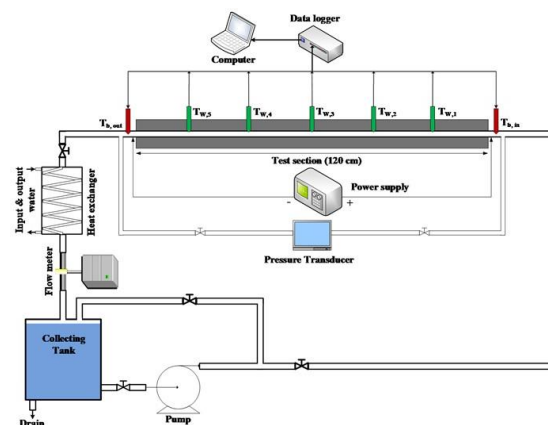
$$C_{P_{nf}} = \phi C_{P_p} + (1 - \phi) C_{P_f} \quad (9)$$

افت فشار تئوری نانوسیال نیز به کمک رابطه زیر به دست می‌آید [16]:

$$\Delta P = \frac{32\mu_{nf}Lu}{D^2} \quad (10)$$

که در آن  $\mu_{nf}$ ،  $L$ ،  $u$  و  $\Delta P$  به ترتیب ویسکوزیته نانوسیال، طول لوله، سرعت جریان و افت فشار خط لوله هستند.

محیط سرد می‌شوند و مجدداً به مخزن ذخیره سیال باز می‌گردند و این چرخه به صورت پیوسته ادامه می‌یابد. شکل ۱ به صورت شماتیک سیستم آزمایشگاهی ساخته شده به منظور بررسی افت فشار و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیالات در حال جریان درون لوله مدور افقی، تحت شرایط مرزی شار حرارتی دیواره ثابت، در رژیم جریان درهم را نشان می‌دهد.



شکل ۱- شماتیک سیستم آزمایشگاهی

این دستگاه شامل یک بخش آزمایش، یک پمپ، یک مخزن جمع‌آوری سیال، یک منبع تغذیه، یک مبدل حرارتی مارپیچ و بخش اندازه‌گیری افت فشار است. بخش آزمایش از یک لوله مسی صاف به طول ۱۲۰ سانتی‌متر و قطر ۱۰ میلی‌متر ساخته شده است. به منظور حداقل کردن افت حرارت از لوله به محیط، تمامی بخش آزمایش به وسیله عایق پشم شیشه پوشیده شده است. در این پژوهش شرط مرزی شار حرارتی ثابت در سطح لوله مستقیم به وسیله دو المنت میله‌ای در دور لوله تأمین می‌شود. توان اعمالی در تمامی آزمایش‌ها بر روی ۶۰۰ وات تنظیم می‌شود. همچنین به منظور اندازه‌گیری دماهای دیواره خارجی لوله آزمایش، پنج حسگر دمایی از نوع K type کالیبره شده به فاصله مساوی از یکدیگر و در مکان‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری طول لوله نصب شده است. دماهای ورودی و خروجی سیال به بخش آزمایش نیز به کمک دو ترموکوپل RTD غوطه‌ور درون جریان اندازه‌گیری می‌شود. ترموکوپل‌ها دارای دقت ۰/۱ °C هستند و به نمایشگری با همان دقت متصل می‌باشند.

پس از عبور جریان از بخش حرارتی به منظور اندازه‌گیری دبی جریان از یک فلومتر استفاده شده است. به این منظور با استفاده از شیرهای نصب شده، جریان به سمت فلومتر منحرف می‌شود و شیر خروجی به سمت مبدل حرارتی بسته می‌شود. سپس با تنظیم فلومتر، دبی جریان اندازه‌گیری و مسیر جریان به حالت اول باز می‌گردد.

به منظور خنک کردن جریان خروجی از بخش حرارتی از یک تبادل گر حرارتی لوله مارپیچی و پوسته استفاده می‌گردد. سیال خنک کننده در قسمت پوسته آب شهری است که از پایین مبدل وارد شده و پس از گردش در فضای میان لوله و پوسته از بالای آن خارج می‌گردد. جریان سیال نیز پس از خروج از بخش حرارتی وارد مبدل می‌شود و پس از آن که دمايش تا دمایی نزدیک به دمای محیط سرد گردید وارد مخزن ذخیره می‌شود.

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت و افت فشار نانوسیالات نسبت به آب خالص از روابط موجود در منابع مختلف استفاده می‌شود. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی،  $h(x)$ ، نانوسیال در فاصله محوری  $x$  از ورودی لوله به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود [13].

ضریب اصطکاک به کمک رابطه داری محاسبه می‌شود [14]:

$$f = \frac{\Delta P \cdot D}{L \cdot \rho_{nf} \cdot u^2} \quad (11)$$

در این رابطه  $f$  ضریب اصطکاک،  $u$  سرعت متوسط سیال و  $\Delta P$  افت فشار مسیر است.

بر اساس نتایج گذشته، استفاده از نانوذرات در سیال پایه می‌تواند منجر به افزایش افت فشار (به عنوان اثر منفی) و افزایش انتقال حرارت (به عنوان اثر مثبت) شود. به همین منظور، ضریب عملکرد می‌تواند پارامتر مناسبی برای بیان شرایط کارکردی بهینه دستگاه در محدوده دمایی و جریانی برای سیالات خنک کننده باشد. رابطه زیر ضریب عملکرد برای نانوسیالات نسبت به سیالات پایه را نشان می‌دهد [17]:

(12)

$$\varepsilon = \frac{h_{nf} / h_{bf}}{\Delta P_{nf} / \Delta P_{bf}} = \frac{R_h}{R_{\Delta P}}$$

$R_h$  نسبت بهبود انتقال حرارت در نانوسیالات به سیال پایه و  $R_{\Delta P}$

نسبت افت فشار نانوسیال به سیال پایه می‌باشد. در رژیم جریان درهم، توان پمپاژ را می‌توان از رابطه ۱۳ به منظور صرفه‌جویی انرژی به صورت زیر تعریف کرد [17].

(13)

$$\frac{W_{nf}}{W_{bf}} = \left( \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} \right)^{0.25} \left( \frac{\rho_{bf}}{\rho_{nf}} \right)^2$$

که  $\mu$  و  $\rho$  به ترتیب توان پمپاژ، دانسیته و ویسکوزیته و زیرنویس

$nf$  و  $bf$  به ترتیب مربوط به نانوسیال و سیال پایه می‌باشد.

## روش تهیه نانوسیال محتوی نانو صفحات گرافنی به صورت کووالانسی

به منظور تولید گرافن عامل دار شده با گروه‌های پلی وینیل الکل، ابتدا گرافیت به عنوان ماده خام اولیه به روش لایه لایه کردن در محیط مایع به گرافن تبدیل گردید. برای رسیدن به هدف فوق‌الذکر روش هامر ابتدا به خدمت گرفته شد.

ابتدا اکسید گرافیت توسط اکسیداسیون گرافیت طبیعی که از شرکت سیگما آلدريج (sigma Aldrich, Dimensions < 20  $\mu\text{m}$  with product number 282863) خریداری شده بود سنتز گردید. برای

رسیدن به این هدف، ۳ گرم پودر گرافیت به ظرفی محتوی ۷۰ میلی لیتر اسید سولفوریک ۹۶٪ اضافه گردید. ظرف محتوی اسید سولفوریک مورد نظر به روی همزن منتقل کرده و آن را در حمام آب یخ قرار می‌دهیم. سپس ۹ گرم پرمنگنات پتاسیم به صورت بسیار آرام و جزئی به محلول بر روی همزن اضافه می‌گردد. از آنجایی که واکنش پرمنگنات پتاسیم و اسید سولفوریک بسیار گرمازا می‌باشد و گازهای فراوانی را ایجاد می‌کند، حمام آب یخ حتما باید استفاده گردد و دمای مخلوط همواره کمتر از ۲۰ درجه سانتیگراد نگاه داشته شود. بعد از اضافه کردن پرمنگنات پتاسیم، مخلوط را در حمام روغن در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد قرار داده و به مدت نیم ساعت مخلوط می‌کنیم.

سپس ۱۵۰ میلی لیتر آب به ظرف محتوی مخلوط آزمایشگاهی اضافه کرده و مخلوط را به دمای ۸۵ درجه سانتیگراد رسانده و اجازه می‌دهیم تا ۱۵ دقیقه در همین حالت مخلوط گردد. سپس، ۵۰۰ میلی لیتر آب مجدداً به مخلوط حاصله اضافه می‌گردد و سپس ۱۵ میلی لیتر پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد. بعد از اضافه کردن پراکسید هیدروژن، مخلوط از رنگ قهوه ای تیره به زرد تغییر رنگ می‌دهد.

سپس مخلوط با سرعت ۲۰۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ می‌شود و برای اینکه تمام یون های فلزی و ناخالصی‌ها حذف گردد، جامد ژله ای حاصل شده از مرحله سانتریفیوژ به دقت با HCl شسته شد (حدوداً ۲۵۰ میلی لیتر).

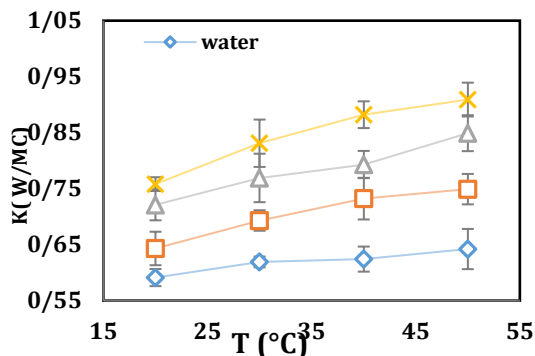
پس از خشک کردن جامد بدست آمده از مرحله قبل، آن را در ۱٫۲ لیتر آب ریخته و کاملاً سونیک می‌کنیم. این عمل باعث لایه لایه شدن گرافیت باز شده می‌شود. بعد از سانتریفیوژ مجدد با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و حذف گرافیت های لایه لایه نشده، نمونه اولیه برای تولید گرافن عامل دار شده مهیا گردیده است. این ماده اکسید گرافن می‌باشد. در این مرحله برای افزایش آب دوستی این صفحات گرافنی (کربنی) و کاهش میزان ته نشینی این ذرات در محیط های آبی، گروه فوق العاده آب دوست پلی وینیل الکل به ساختار گرافن اضافه می‌گردد. در ادامه ابتدا نمونه بدست آمده با ۰٫۲ درصد مولی کلرید زیرکونیوم و پلی وینیل کلراید با هم مخلوط شده و در ظرفی که محتوی ۲۰۰ میلی لیتر تترا هیدرو فوران ریخته شد. سپس ظرف مورد نظر به مدت ۶ ساعت سونیک گردید. در حین فرایند سونیک، ۵ میلی لیتر تولوئن به مجموعه اضافه گردید. بعد از اتمام زمان واکنش، ماده حاصله سانتریفیوژ گردید و بیش از ۳ بار با اتانول، متانول و آب شسته شد. سپس یک حاصله بر روی فیلتر در آون قرار داده شد تا کاملاً خشک گردد. سپس، نانوسیالات محتوی نانو صفحات گرافن عامل دار شده با پلی وینیل الکل در غلظت‌های وزنی ۰٫۰۲۵، ۰٫۰۵ و ۰٫۱ درصد در سیال پایه آب تهیه گردید.

## نتایج

### تعیین مشخصات

بهترین روش جهت بررسی ساختار نانو صفحات گرافنی و نوع هیبریداسیون کربن‌های موجود طیف‌سنجی رامان می‌باشد. کاربرد اصلی رامان در بحث عامل‌دار کردن نانو صفحات گرافنی تعیین کردن نسبت گروه‌های بی‌نظم به گروه‌های مماسی می‌باشد. هیبریداسیون کربن موجود در نانو صفحات گرافنی اولیه (دارای خلوص بالا)  $sp^2$  می‌باشد و اضافه شدن گروه‌های عاملی به ساختار اصلی آنها موجب تغییر هیبریداسیون کربن و تبدیل آن به  $sp^3$  می‌شود. گروه های بی نظم (D باندها) در نانوصفحات گرافنی دارای هیبریداسیون  $sp^3$  و گروه های مماسی (G باندها) شامل هیبریداسیون  $sp^2$  می‌باشد. افزایش نسبت ID/IG به معنای تغییر تعدادی از هیبریدهای  $sp^2$  به  $sp^3$  می‌باشد که این پدیده در نتیجه اضافه شدن گروه های عاملی به ساختار اصلی رخ می‌دهد. به بیان دیگر هنگامیکه  $\pi$  الکترون های موجود در ساختار نانوصفحات گرافنی تخریب می‌شوند نقاط فعالی جهت واکنش با سایر مواد ایجاد می‌گردد و این نقاط به راحتی با گروه های عاملی عاملی وارد واکنش می‌شوند و این واکنش منجر به تغییر هیبریداسیون می‌گردد. نتایج طیف‌سنجی رامان جهت تعیین ساختار شیمیایی نانو صفحات گرافنی اولیه و عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل در شکل ۲ مشاهده می‌گردد. طیف‌های مربوط به نانو صفحات گرافنی اولیه و عامل‌دار شده دو نوار (قله) را در فرکانس‌های  $1578 \text{ cm}^{-1}$  و  $2705 \text{ cm}^{-1}$  نشان می‌دهند. نسبت ID/IG نشان دهنده نسبت کربن‌های با هیبریداسیون  $sp^3$  به کربن‌های با

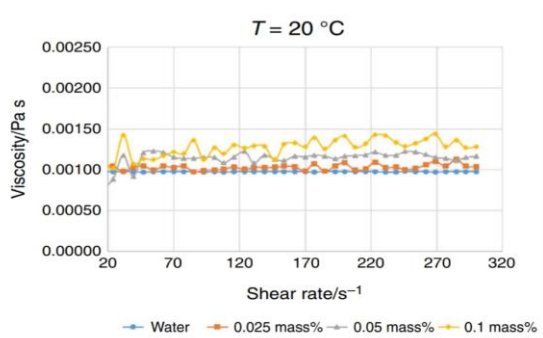
بوده است که می‌توان به وجود پیوندهای کووالانسی نسبت داد. به‌طور مثال، هدایت حرارتی در دمای  $50^{\circ}\text{C}$  برای نانوسیال آب/نانو صفحات گرافنی-پلی وینیل الکل (PVA-Gr) در غلظت‌های ۰/۰۲۵٪، ۰/۰۵٪ و ۰/۱٪ وزنی به ترتیب ۳۲/۲٪، ۱۶/۶٪ و ۴۱/۵٪ نسبت به آب خالص بهبود یافته است. در عین حال، در همه دماها، نانوسیالات محتوی گروه‌های پلی وینیل الکل نسبت به آب خالص هدایت حرارتی بیشتری داشته‌اند.



شکل ۴- هدایت حرارتی نانوسیالات محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل در دماها و غلظت‌های وزنی مختلف (W/m.c)

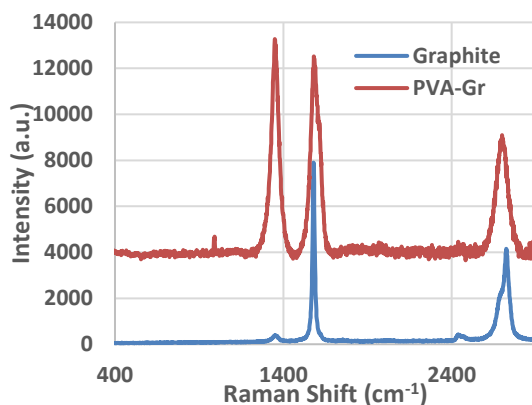
#### ویسکوزیته

در اینجا، تغییرات ویسکوزیته نانوسیالات محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل در دماهای مختلف بررسی شده است. نتایج نشان دهنده کاهش ویسکوزیته و تنش برشی در نرخ برش ثابت با افزایش دما است. از طرف دیگر، ویسکوزیته با افزایش غلظت وزنی افزایش یافته است. در این بین، نانوسیال محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل در کلیه دماها و غلظت‌ها دارای بیشترین ویسکوزیته می‌باشد این در حالی است که آب خالص در کلیه دماها و غلظت‌ها روندی تقریباً مشابه را طی کرده‌اند (با افزایش دما و غلظت به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد). به عنوان مثال، ویسکوزیته نانوسیال محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل در غلظت ۰/۱٪ وزنی در نرخ برش  $300 \text{ 1/s}$  در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  و  $50^{\circ}\text{C}$  به ترتیب  $1/28 \text{ mPa.s}$  و  $0/717 \text{ mPa.s}$  است در حالی که این مقدار برای آب خالص،  $0/98$  و  $0/54 \text{ mPa.s}$  است.



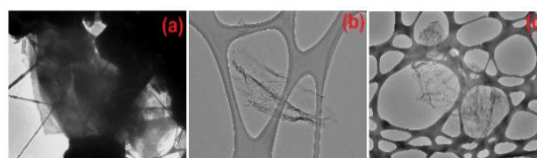
شکل ۵-۱: ویسکوزیته نانوسیالات محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل در دمای 20c و غلظت‌های مختلف (mPa.s)

هیبریداسیون  $\text{sp}^2$  می‌باشد. این شکل نشان دهنده نسبت بالاتر ID/IG نمونه عامل‌دار شده به نمونه اولیه است که این امر خود نشان دهنده عامل‌های موجود بر نانو صفحات گرافنی است که به عنوان گروه هدف بر روی نانو صفحات گرافنی آذین شده است. از طرف دیگر، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ترکیب نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل تمایل بیشتری به انحلال‌پذیری در آب دارد.



شکل ۲- طیف رامان گرافیت و نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل

شکل ۳ عکس‌های به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مرتبط با نانو صفحات گرافنی اولیه و عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل را نشان می‌دهد. شکل ۳ (a) تصاویر TEM از نانو صفحات گرافنی اولیه که شامل صفحات بسیار ضخیم با لایه‌های متعدد است را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، شکل (b) و (c) نشان دهنده تصاویر TEM نمونه عامل‌دار شده است که متشکل از صفحات چند لایه با سطح شفاف است. این امر لایه برداری موفق از گرافیت به گرافن را تایید می‌کند.



شکل ۳ - تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، (a)، گرافیت، (b) و (c) گرافن عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل

#### خواص ترموفیزیکی

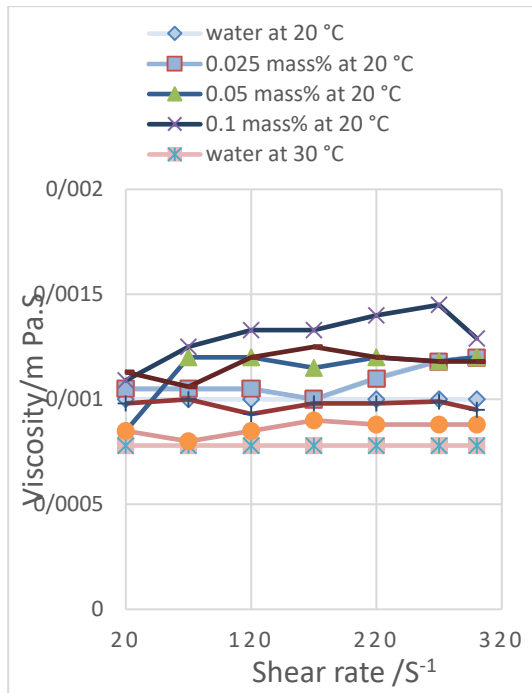
##### هدایت حرارتی

هدایت حرارتی یکی از اصلی‌ترین پارامترهای کلیدی در نانوسیالات است که تا حدود زیادی نشان دهنده افزایش یا کاهش در انتقال حرارت است. در اینجا، هدایت حرارتی نانوسیالات محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل به دلیل اهمیت دمایی، در بازه  $10^{\circ}\text{C}$  و از دمای  $20^{\circ}\text{C}$  تا  $50^{\circ}\text{C}$  به صورت آزمایشگاهی به دست آمده است (شکل 4). نتایج نشان می‌دهد که هدایت حرارتی نانوسیالات در مقایسه با آب خالص با افزایش غلظت و دما بهبود می‌یابند. با این حال، این بهبود با افزایش غلظت وزنی نانوسیالات بیشتر هم شده است. این بهبود برای نانوسیال آب/نانو صفحات گرافنی-پلی وینیل الکل (PVA-Gr) بیشتر از نانوسیال آب خالص

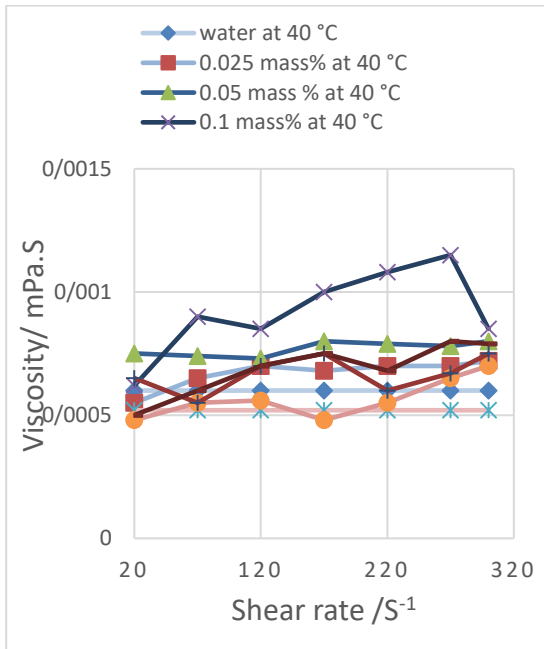


ادغام نمودارهای ویسکوزیته در دماهای مختلف

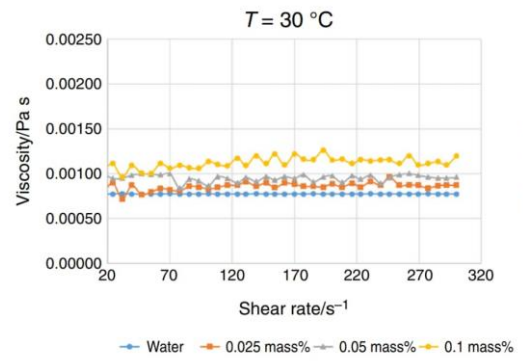
برای بررسی بهتر تأثیرات ویسکوزیته در دماهای مختلف شکل های ۵-۵ و ۵-۶ آورده شده است.



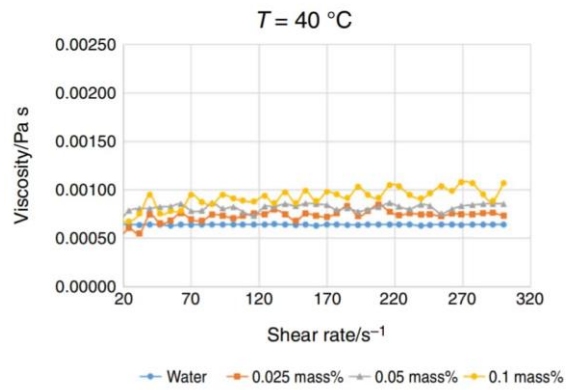
شکل ۵-۵: ویسکوزیته نانوسیالات محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل در دماهای 200c و 300c در غلظت‌های مختلف (mPa.s)



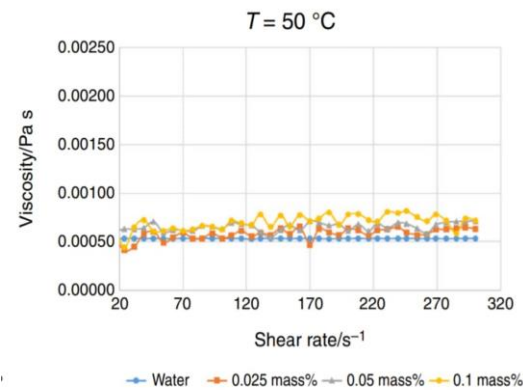
شکل ۵-۶: ویسکوزیته نانوسیالات محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل در دماهای 400c و 500c در غلظت‌های مختلف (mPa.s)



شکل ۵-۲: ویسکوزیته نانوسیالات محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل در دمای 300c و غلظت‌های مختلف (mPa.s)



شکل ۵-۳: ویسکوزیته نانوسیالات محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل در دمای 400c و غلظت‌های مختلف (mPa.s)



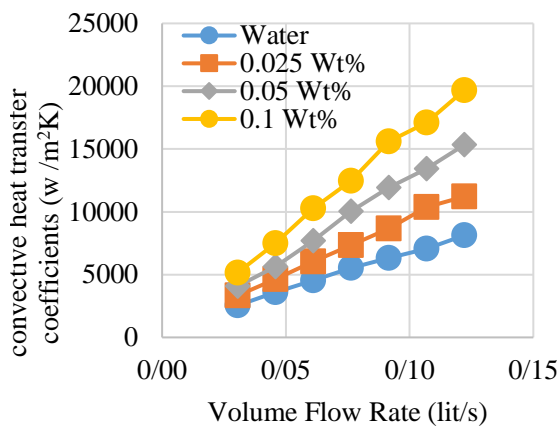
شکل ۵-۴: ویسکوزیته نانوسیالات محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل در دمای 500c و غلظت‌های مختلف (mPa.s)

در یک شدت جریان ثابت، با افزایش غلظت نانو صفحات گرافنی عامل دار شده به صورت کووالانسی با پلی وینیل الکل، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد.

در یک غلظت وزنی ثابت، با افزایش شدت جریان و یا به عبارت دیگر افزایش عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد.

با افزایش غلظت وزنی، شیب تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط افزایش می‌یابد.

به‌طور کلی نرخ انتقال حرارت با افزایش شدت جریان روند صعودی از خود نشان می‌دهد. دلیل اصلی این پدیده تشدید فرایند تبادل انرژی در سیال به دلیل حرکات براونی و تصادفی نانوذرات می‌باشد. همچنین در دی‌های بالا (اعداد رینولدز بالاتر) اثرات پراکندگی و حرکات نامنظم و توزیع نانوذرات در سیال تشدید می‌شود که این امر می‌تواند باعث برهم زدن لایه مرزی حرارتی تشکیل یافته و نازک کردن آن شود که منجر به گرادیان دمایی بالاتر در مجاورت دیواره و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت می‌گردد.



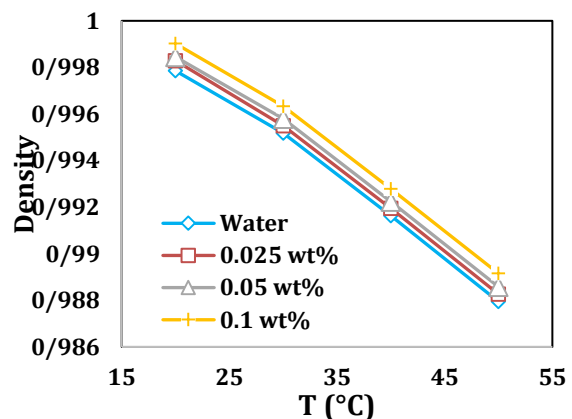
شکل ۷: ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانو سیال آب/نانو صفحات گرافنی-پلی وینیل الکل در غلظت‌های وزنی مختلف

#### افت فشار نانو سیالات

به منظور استفاده از نانو سیالات در واحدهای صنعتی، اندازه‌گیری افت فشار علاوه بر بررسی عملکرد انتقال حرارت ضروری به نظر می‌رسد. افت فشار برای آب خالص و غلظت‌های وزنی ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد نانو سیال آب/نانو صفحات گرافنی-پلی وینیل الکل در شکل ۸ برحسب شدت جریان‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، در شدت جریان‌های مورد مطالعه در این پژوهش افزایش در افت فشار مشاهده می‌شود. علاوه بر این، با افزایش غلظت‌های وزنی نانو سیال نیز این روند قابل مشاهده است. با این حال، می‌توان نتیجه گرفت که حضور نانو صفحات گرافنی-پلی وینیل الکل درون سیال پایه، در درصد‌های وزنی و شدت جریان‌های پایین اثر محسوسی در افت فشار ندارد و نمی‌تواند باعث ایجاد توان مصرفی اضافی پمپاژ شود.

#### دانسیته

داده‌های دانسیته به دست آمده از نانو سیالات محتوی نانو صفحات گرافنی عامل دار شده با پلی وینیل الکل در دماهای مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دما، دانسیته همه نمونه‌ها کاهش یافته است. از آن‌جا که دانسیته ذرات بیشتر از مایعات است، می‌توان انتظار داشت که دانسیته نانو سیالات نیز با افزودن نانو صفحات عامل دار شده به آب خالص افزایش یابد. طبیعتاً این افزایش دانسیته با افزایش غلظت ذرات افزایش می‌یابد. در اینجا نیز، این امر اتفاق می‌افتد. در شرایط دمایی ۲۰°C، دانسیته نانو سیال نسبت به آب، ۰/۱۱ درصد بهبود داشته است این در حالی است که این بهبود نسبت به آب خالص در شرایط دمایی ۵۰°C، ۰/۱۴ درصد بوده است. اگرچه این بهبود ناچیز به نظر می‌رسد اما این بهبود می‌تواند ناشی از وجود پیوند کووالانسی بین نانو صفحات و پلی وینیل الکل باشد. با این حال، همه نانو سیالات در تمامی شرایط دمایی دانسیته بالاتری نسبت به آب خالص داشته‌اند.



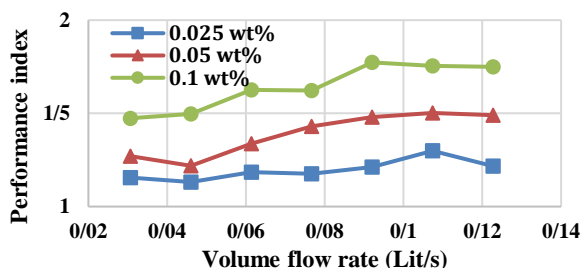
شکل ۶- دانسیته نانو سیالات محتوی نانو صفحات گرافنی عامل دار شده با پلی وینیل الکل در دماها و غلظت‌های وزنی مختلف (g/cm³)

#### ضریب انتقال حرارت نانو سیالات

به منظور بررسی اثر تغییر غلظت نانو صفحات گرافنی عامل دار شده با پلی وینیل الکل درون سیال پایه بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، شکل ۷ رسم شده است. این شکل مقادیر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آب خالص و نانو سیال محتوی نانو صفحات گرافنی عامل دار شده با پلی وینیل الکل (PVA-Gr) را در سه غلظت وزنی مختلف ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد و در شدت جریان‌های ۰/۰۳ و ۰/۱۲ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، تمامی نمونه‌های نانو سیال آب/نانو صفحات گرافنی-پلی وینیل الکل، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بالاتری در مقایسه با آب خالص از خود نشان می‌دهند. افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانو سیال نسبت به آب خالص برای کمترین غلظت وزنی نانوذرات (۰/۰۲۵٪) نیز مشاهده می‌شود که این مطلب نشان دهنده تأثیر مثبت افزودن مقدار بسیار کم نانو صفحات گرافنی بر خواص حرارتی آب می‌باشد. قابل توجه است که در شدت جریان ثابت، افزایش غلظت وزنی نانو صفحات گرافنی سبب افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانو سیال می‌گردد. به عنوان نمونه با افزایش غلظت وزنی نانوذرات از ۰/۰۲۵ به ۰/۱ درصد، در شدت جریان ثابت ۰/۱۲ لیتر بر ثانیه، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به ترتیب ۳۸ و ۱۴۲/۲ درصد افزایش پیدا می‌کند. به طور کلی این شکل بیانگر موارد زیر است:

مناسب هستند. این یافته در توافق با تعداد زیادی از مطالعات گزارش شده در منابع مختلف مانند He و همکاران [18]، Xuan و [19] Li و Nguyen و همکاران [20] است. با این حال، حداکثر شاخص عملکرد مربوط به غلظت ۰/۱ درصد وزنی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل موجود درون سیال پایه و در شدت جریان ۰/۰۹ لیتر بر ثانیه به مقدار ۱/۷۷ شده است.



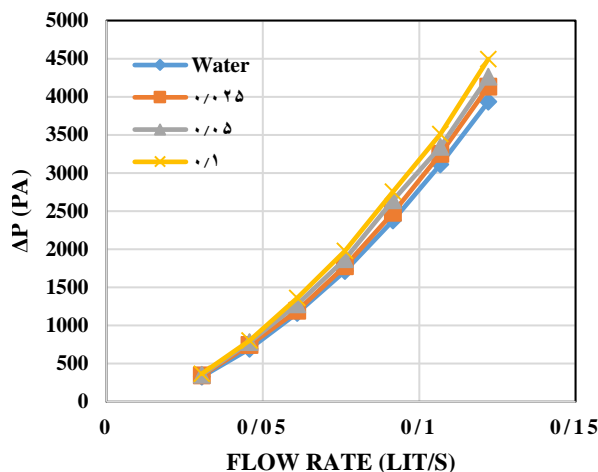
شکل ۹- شاخص عملکرد نانوسیال آب/نانو صفحات گرافنی- پلی وینیل الکل در غلظت‌های وزنی و شدت جریان‌های مختلف

#### توان پمپاژ نانوسیالات

بهینه‌سازی توان پمپاژ نقش کلیدی در تعیین صرفه‌جویی انرژی سیستم ایفا می‌کند که می‌تواند عملکرد سیستم رئولوژیکی و همچنین برخی از اطلاعات اولیه در مورد عملکرد سیال در تجهیزات انتقال حرارت را ارائه کند. بنابراین با در نظر گرفتن دو عامل ویسکوزیته و دانسیته رابطه‌ای به منظور تحلیل توان پمپاژ (رابطه ۱۳) تعریف شده است [17]. در صورتی که توان پمپاژ بزرگ‌تر از یک باشد، استفاده از نانوسیالات مورد نظر از بعد صرفه‌جویی توان پمپاژ مقرون به صرفه نیست. در غیر این صورت، تنها تحت شرایط خاص و برای کاربردهایی که هدف فقط انتقال حرارت بیشتر مد نظر است می‌توان از نانوسیالات استفاده کرد.

جدول ۱ نشان دهنده توان پمپاژ در دماهای مختلف برای نانوسیالات است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش غلظت منجر به افزایش توان پمپاژ شده است اما این افزایش با افزایش دما روند منطقی نداشته است. با این حال، نانوسیال محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل در تمامی غلظت‌ها دارای بیشترین مقدار در توان پمپاژ است که می‌تواند از معایب این نانوسیال باشد. توان پمپاژ برای نانوسیال آب/نانو صفحات گرافنی-پلی وینیل الکل در غلظت ۰/۱٪ تا ۱۳/۴٪ افزایش را از خود نشان می‌دهد. کمترین توان پمپاژ برای نانوسیال (۱/۰۱۱) در غلظت ۰/۰۲۵٪ اتفاق افتاده است. به طور کلی افزودن گرافن به سیال، ساختار جریان را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که علاوه بر افزایش هدایت حرارتی عواملی نظیر حرکات بی‌نظم و اتفاقی، پراکندگی نانوذرات معلق شده، آشفته‌گی نانوذرات، ترموفورسیس و دیفیوژیفورسیس منجر به افزایش نرخ تبادل انرژی و در نتیجه بالا رفتن نرخ انتقال حرارت بین سیال و دیواره لوله می‌گردد.

در شدت جریان‌های بالا (اعداد رینولدز بالا) حرکات اتفاقی و اثرات پراکندگی نانوذرات سبب تشدید آشفته‌گی‌های ناشی از اختلاط می‌گردد و پروفایل دما را مسطح‌تر می‌گرداند. در واقع پروفایل دمایی شبیه به پروفایل جریان درهم می‌شود و سبب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گردد. در شدت جریان‌های پایین (اعداد رینولدز پایین) احتمال انباشتگی و خوشه‌ای شدن نانوذرات در جریان نانوسیال زیاد می‌باشد. بنابراین، در شدت جریان‌های پایین افزایش کمتری در انتقال حرارت مشاهده می‌شود. افزایش



شکل ۸- افت فشار (Pa) نانوسیال آب/نانو صفحات گرافنی- پلی وینیل الکل در غلظت‌های وزنی و شدت جریان‌های مختلف

با این حال، خواص بسیار کمی وجود دارد که می‌تواند بر روی افت فشار سیال خنک کننده اثرگذار باشد. از جمله این خواص می‌توان دانسیته و ویسکوزیته را نام برد. با توجه به غلظت وزنی بسیار پایین نانو صفحات گرافنی مورد استفاده در این پژوهش، تغییر خاصی در دانسیته و ویسکوزیته سیال پایه ایجاد نمی‌شود و به همین علت افت فشار نانوسیال در شدت جریان‌های پایین تقریباً برابر سیال پایه است.

#### شاخص عملکرد نانوسیالات

همان‌طور که در بخش‌های قبل نشان داده شد استفاده از جریان نانوسیال به جای سیال پایه درون بخش آزمایش، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را بهبود می‌بخشد. با این حال، این عمل با افزایش افت فشار همراه است که می‌تواند استفاده از نانوسیال را در کاربردهای عملی محدود کند. بنابراین، به منظور یافتن شرایط کاری بهینه باید به صورت همزمان علاوه بر افزایش ضریب انتقال حرارت، افزایش افت فشار نیز بررسی شود. به عبارت دیگر، دلیل اصلی پیشنهاد شاخص عملکرد این واقعیت است که معلق کردن نانوذرات درون آب باعث افزایش همزمان هدایت حرارتی و ویسکوزیته سیال پایه می‌شود، و با افزایش کسر وزنی نانوذرات این میزان افزایش می‌یابد. افزایش هدایت حرارتی منجر به بهبود عملکرد در انتقال حرارت می‌شود، در حالی که افزایش ویسکوزیته نانوسیال منجر به کاهش نرخ انتقال حرارت و افزایش افت فشار می‌شود. به همین منظور از شاخص عملکرد (ε) استفاده می‌شود که در رابطه ۱۲ تعریف شد که در آن hnf و hbf به ترتیب ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط نانوسیال و سیال پایه و ΔPnf و ΔPbf نیز به ترتیب افت فشار نانوسیال و سیال پایه می‌باشند. هنگامی که شاخص عملکرد بزرگ‌تر از یک است، استفاده از نانوسیال بیشتر باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود تا افزایش افت فشار. بنابراین، در این حالت استفاده از نانوسیالات کاملاً مقرون به صرفه است.

تغییرات شاخص عملکرد برحسب شدت جریان متوسط برای غلظت‌های وزنی ۰/۰۲۵، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد نانوسیال آب/نانو صفحات گرافنی-پلی وینیل الکل در شکل ۹ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که شاخص عملکرد نانوسیال آب/نانو صفحات گرافنی-پلی وینیل الکل برای تمامی نمونه‌ها بزرگ‌تر از یک است. بنابراین، استفاده از این نانوسیال بیشتر از این‌که باعث افزایش افت فشار شود موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌گردد و تمامی نمونه‌ها برای استفاده در واحدهای صنعتی

نانوسیال آب/نانو صفحات گرافنی-پلی وینیل الکل در شرایط غلظتی (۰/۱ درصد) و شدت جریانی (۰/۱۲ لیتر بر ثانیه) ذکر شده ۱۴۲/۲ درصد افزایش نسبت به ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آب خالص در شرایط یکسان داشت.

- افت فشار نانوسیالات مورد استفاده در این پژوهش با افزایش شدت جریان و غلظت وزنی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل افزایش یافت.

- حداکثر افت فشار برای نانوسیال آب/نانو صفحات گرافنی- پلی وینیل الکل، به ترتیب ۴۱۳۲، ۴۲۶۲ و ۴۴۹۵ پاسکال در غلظت وزنی ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲۵ درصد و بیشترین شدت جریان (۰/۱۲ لیتر بر ثانیه) مشاهده شد.

- شاخص عملکرد نانوسیالات محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل برای تمامی نمونه‌ها بزرگ‌تر از یک بود. این امر نشان دهنده مناسب بودن این نانوسیالات برای استفاده در کاربردهای عملی است.

- توان پمپاژ نانوسیالات در تمامی غلظت‌های وزنی بزرگ‌تر از یک شد که می‌تواند از معایب این نانوسیال باشد.

#### فهرست علائم

A سطح مقطع ( $m^2$ )

$C_p$  ظرفیت گرمایی ( $kJkg^{-1}K^{-1}$ )

D قطر لوله (m)

h ضریب انتقال حرارت ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )

k ضریب انتقال حرارت هدایتی ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )

L طول لوله (m)

I آمپر (A)

m دبی جرمی ( $kg s^{-1}$ )

$\Delta P$  افت فشار ( $kgm^{-1}s^{-2}$ )

Q توان (W)

"q" بار حرارتی ( $Wm^{-2}$ )

T دما (K)

U سرعت ( $ms^{-1}$ )

V ولتاژ (V)

#### علائم یونانی

$\mu$  لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )

$\rho$  دانسیته ( $kgm^{-3}$ )

#### زیر نویس‌ها

in ورودی

m مقدار متوسط

nf نانو سیال

s دیواره

غلظت حجمی نانوذرات برهمکنش و برخورد میان نانوذرات را افزایش می‌دهد. همچنین حرکت نسبی و نفوذ نانوذرات نزدیک دیواره منجر به انتقال حرارت سریع‌تر از دیواره به نانوسیال می‌شود. به عبارت دیگر، افزایش غلظت وزنی، برهم‌کنش و برخورد میان نانو صفحات گرافن عامل‌دار شده را افزایش می‌دهد و حرکت نسبی و نفوذ نانو صفحات نزدیک دیواره منجر به انتقال حرارت سریع‌تر از دیواره به نانوسیال می‌شود. با این حال، افزایش غلظت وزنی نانو صفحات گرافنی مکانیسم‌های مرتبط با افزایش انتقال حرارت را تشدید می‌نماید. همچنین می‌توان این احتمال را داد که افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده به صورت کووالانسی با پلی وینیل الکل به دلیل هدایت حرارتی بالاتر گروه‌های آذین شده بر روی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده نسبت به آب خالص است.

#### جدول ۱- توان پمپاژ نانوسیال محتوی نانو صفحات

گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل (بر حسب وات) در دماها و غلظت‌های وزنی مختلف

	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
0.025 wt%	1.0116	1.0308	1.0327	1.0400
0.05 wt%	1.0431	1.0551	1.0740	1.0704
0.1 wt%	1.0665	1.1147	1.1341	1.0708

#### نتیجه گیری

به طور کلی نتایج حاصل از مطالعه حاضر را می‌توان به صورت زیر بیان

نمود:

- افزایش دما منجر به افزایش هدایت حرارتی و کاهش ویسکوزیته و دانسیته نانوسیالات نسبت به آب خالص شد.
- افزایش غلظت وزنی نانوسیالات منجر به افزایش هدایت حرارتی، ویسکوزیته و دانسیته شد.
- هدایت حرارتی نانوسیالات محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل در همه غلظت‌های وزنی نسبت به آب خالص هدایت حرارتی بیشتری داشت.
- نانوسیالات محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل در کلیه دماها و غلظت‌ها دارای بیشترین ویسکوزیته بودند.

- با افزودن مقادیر بسیار کمی از نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل به آب خالص، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به میزان قابل توجهی افزایش یافت.

با افزایش شدت جریان که بیانگر افزایش عدد رینولدز می‌باشد، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات محتوی نانو صفحات گرافنی عامل‌دار شده با پلی وینیل الکل نسبت به آب خالص افزایش یافت.

- حداکثر بهبود ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای

## ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

در پژوهش حاضر تمامی فعالیت‌ها به صورت داوطلبانه و با رضایت کامل اینجانب انجام شده است.

## حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسنده مقاله تامین شده است.

## مشارکت نویسندگان

انجام آزمایشها: مهدی عزیزی؛

تحلیل داده‌ها و نتایج: مهدی عزیزی .

نگارش نهایی: مهدی عزیزی .

## تعارض منافع

بنابر اظهار نویسنده، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

## References

- [1]D. P. Kulkarni, P. K. Namburu, H. Ed Bargar, D. K. Das, Convective heat transfer and fluid dynamic characteristics of SiO<sub>2</sub> ethylene glycol/water nanofluid, Heat Transfer Engineering, Vol. 29, No. 12, pp. 1027-1035, 2008.
- [2]S. Peyghambarzadeh, S. Hashemabadi, M. S. Jamnani, S. Hoseini, Improving the cooling performance of automobile radiator with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid, Applied Thermal Engineering, Vol. 31, No. 10, pp. 1833-1838, 2011.
- [3]S. Peyghambarzadeh, S. Hashemabadi, S. Hoseini, M. Seifi Jamnani, Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 38, No. 9, pp. 1283-1290, 2011.
- [4]S. Zeinali Heris, S. G. Etemad, M. Nasr Esfahany, Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 33, No. 4, pp. 529-535, 2006.
- [5]Y. Ding, H. Alias, D. Wen, R. A. Williams, Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids), International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, No. 1, pp. 240-250, 2006.
- [6]Y. Ding, H. Chen, Y. He, A. Lapkin, M. Yeganeh, L. Siller, Y. V. Butenko, Forced convective heat transfer of nanofluids, Advanced Powder Technology, Vol. 18, No. 6, pp. 813-824, 2007.
- [7]S. J. Aravind, P. Baskar, T. T. Baby, R. K. Sabareesh, S. Das, S. Ramaprabhu, Investigation of structural stability, dispersion, viscosity, and conductive heat transfer properties of functionalized carbon nanotube based nanofluids, The Journal of Physical Chemistry C, Vol. 115, No. 34, pp. 16737-16744, 2011.
- [8]A. Amiri, S. N. Kazi, M. Shanbedi, M. N. Mohd Zubir, H. Yarmand, B. T. Chew, Transformer oil based multi-walled carbon nanotube-hexylamine coolant with optimized electrical, thermal and rheological enhancements, RSC Advances, Vol. 5, No. 130, pp. 107222-107236, 2015.

- [9]A. Amiri, R. Sadri, G. Ahmadi, B. T. Chew, S. N. Kazi, M. Shanbedi, M. Sadat Alehashem, Synthesis of polyethylene glycol-functionalized multi-walled carbon nanotubes with a microwave-assisted approach for improved heat dissipation, RSC Advances, Vol. 5, No. 45, pp. 35425-35434, 2015.
- [10]A. Amiri, M. Shanbedi, G. Ahmadi, S. Rozali, Transformer oils-based graphene quantum dots nanofluid as a new generation of highly conductive and stable coolant, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 83, pp. 40-47, 2017.
- [11]A. Amiri, M. Shanbedi, M. J. AliAkbarzade, The Specific Heat Capacity, Effective Thermal Conductivity, Density, and Viscosity of Coolants Containing Carboxylic Acid Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes, Journal of Dispersion Science and Technology, Vol. 37, No. 7, pp. 949-955, 2016/07/02, 2016.
- [۱۲] لاله قلندری، پریسا تاج بخش، "خواص مکانیکی و خوردگی نانو کامپوزیت مس-اکسید گرافن حاوی ۲٪ اکسیدگرافن تولید شده به روش فرآیند اتصال نورد تجمیعی"، نشریه مواد نوین دوره ۱۱ شماره ۳۹، صفحه ۴۳-۶۰، اردیبهشت ۱۳۹۹.
- [13]A. S. Kherbeet, H. Mohammed, B. Salman, H. E. Ahmed, O. A. Alawi, M. Rashidi, Experimental study of nanofluid flow and heat transfer over microscale backward- and forward-facing steps, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 65, pp. 13-21, 2015.
- [14]C. Popiel, J. Wojtkowiak, Simple formulas for thermophysical properties of liquid water for heat transfer calculations (from 0 C to 150 C), Heat transfer engineering, Vol. 19, No. 3, pp. 87-101, 1998.
- [15]B. C. Pak, Y. I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, Experimental Heat Transfer an International Journal, Vol. 11, No. 2, pp. 151-170, 1998.
- [16]G. O. Brown, The history of the Darcy-Weisbach equation for pipe flow resistance, Environmental and Water Resources History, Vol. 38, No. 7, pp. 34-43, 2002.
- [17]R. B. Mansour, N. Galanis, C. T. Nguyen, Effect of uncertainties in physical properties on forced convection heat transfer with nanofluids, Applied Thermal Engineering, Vol. 27, No. 1, pp. 240-249, 2007.
- [18]Y. He, Y. Jin, H. Chen, Y. Ding, D. Cang, H. Lu, Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, No. 11, pp. 2272-2281, 2007.
- [19]Y. Xuan, Q. Li, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, Journal of Heat transfer, Vol. 125, No. 1, pp. 151-155, 2003.
- [20]C. Nguyen, F. Desgranges, G. Roy, N. Galanis, T. Mare, S. Boucher, H. Angue Mintsa, Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids-hysteresis phenomenon, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 28, No. 6, pp. 1492-1506, 2007.