Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 54(4) (2022) 187-190
DOI: 10.22060/mej.2021.20275.7206

Study of Rheological Behavior of Water-Ethylene Glycol /Nano Al2O3 –Nano Graphene Hybrid Nanofluid at Low Temperatures

N. Nayebpashaee[1]*, S. M. M.Hadavi[2]

[1] Technology and Engineering Research Center, Standard Research Institute (SRI), Alborz, Iran.
[2] Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

ABSTRACT: Nanofluids are a new generation of fluids with very high potential in industrial applications. In this study, the effect of temperature and concentration of nanoparticles consisting of Al2O3 nanoparticles and graphene nanoplates on the rheological behavior of the base fluid consisting of water and ethylene glycol was studied. Also, 0.2%vol. of oleic acid and 0.2%wt. of sodium dodecyl sulfonate were added to the base fluid as a surfactant to disperse the nanoparticles. The volume fraction of nanoparticles in this study was considered 0.05, 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2, and 2.5% by volume, and also to investigate the effect of temperature, the tested temperatures were selected in the temperature range of 263-293K. The morphology and microstructure of the nanoparticles were investigated by scanning and transmission electron microscopy. Detection of phases in nanoparticles was performed by X-Ray Diffraction analysis. Also, the specific area and porosity of nanoparticles were determined. The dynamic viscosity of hybrid nanofluids was measured and compared with the base fluid. The results showed that the rheological properties of nanofluid were dependent on temperature and nanoparticle concentration, especially at sub-zero temperatures. Hybrid nanofluid samples with solid volume fraction less than 0.5% showed Newtonian behavior, while samples with higher solid volume fractions showed non-Newtonian shear thinning behavior.

Review History:

Received: Jul. 22, 2021
Revised: Oct. 26, 2021
Accepted: Nov. 04, 2021
Available Online: Nov. 24, 2021

Keywords:

Hybrid nanofluid
Ethylene glycol
Viscosity
Alumina nanoparticles
Graphene nanoplates

1- Introduction

Nanofluid is a colloidal suspension which consists of nanoparticles and a base liquid. The nanoparticles used in nanofluids are typically made of metals(Cu, Ni, Al, etc.), oxides(Al_2O_3, TiO_2, CuO, SiO_2, Fe_2O_3, Fe3O4, $BaTiO_3$, etc.), carbides(SiC, TiC, etc.), or some other compounds (AlN, $CaCO_3$, graphene, carbon nanotubes, etc.) while the base fluids basically include water, ethylene glycol, propylene glycol, engine oil, etc. Hybrid nanofluids are the next generation of nanofluids which are made of a combination of more than one type of nanoparticles suspended in a base fluid. The thermophysical and rheological properties of hybrid nanofluids, such as thermal conductivity and viscosity values are higher than those for single nanofluids, which recommended that hybrid nanofluids have great potential in thermodynamic applications. Hybrid nanofluids may be prepared via single or two-step methods. The most commonly used method for the preparation of hybrid nanofluid is the two-step method. Previous research has revealed that nanofluids have superior thermophysical properties such as thermal conductivity, thermal diffusivity, viscosity, and convective heat transfer coefficients when compared to base fluids such as oil or water. These unique properties provide a wide range of applications for nanofluids, such as: Automobile applications, Solar energy applications, Mechanical applications, Reactor-heat exchange, Optical applications, Biomedical applications, and Electronics cooling. There are many experimental studies to investigate the thermal conductivity and viscosity behavior of nanofluids with different nanoparticles. These researches lead to the development of nanofluids in various industrial applications.

2- Methodology

The used Al_2O_3 nanoparticles and graphene nanoplatelets were obtained from US research nanomaterials. Ethylene glycol with purity ≥99% and distilled water were used for preparing the base fluid. The X-Ray Diffraction (XRD) studies were carried out by a Philips PW1730 X-ray diffractometer using Cu ($K\alpha$ =1.54060 A°) radiation for 2θ (20° to 80°) in steps of 0.03° with a step scan time of 0.6s. The test was performed to identify the phase and crystal structure of nanoparticles. The size and morphology of nanoparticles were analyzed by Transmission Electron Microscopy (TEM) using the Philips CM120 instrument. To be able to investigate the surface morphology of the nanoparticles, TESCANMIRA3 Scanning Electron Microscopy (SEM) was used. Before the

*Corresponding author's email: n.nayebpashaee@standard.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

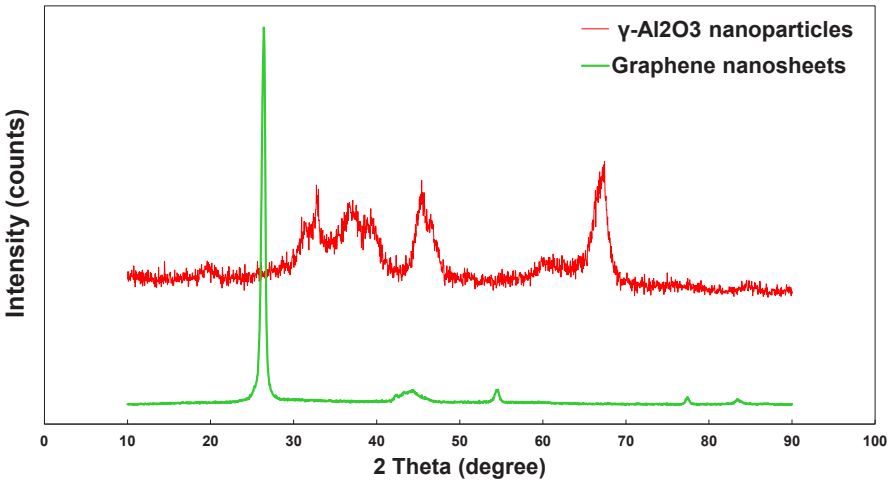


Fig. 1. XRD patterns of nanosized γ-Al_2O_3 and graphene nanoplatelets.

analysis, samples were covered by gold coating using an IB-3 ionic sputter coater. Brunauer-Emmett-Teller (BELSORB MINI II, BEL, JAPAN) N2-adsorption at 77 K was conducted to determine the Molecular sieve surface area, porosity, and specific surface area (SSA) of Al_2O_3 nanoparticles and graphene nanoplatelets using a five-point BET isotherm ((TriStar II Plus, Micromeritics) after degassing the samples for ≥1 h at 140 °C). The BET equation was used to calculate the specific surface area. In the present research, the hybrid nanofluids were prepared using a two-step method. The base fluid was a combination of distilled water and ethylene glycol (W:EG/50:50 concentrations in Volume Percent at 298.15 K) and the amount of 0.2 volume percentage oleic acid (OA) and 0.2 weight percentage sodium dodecyl sulfonate (SDS) as surfactants to stabilize and disperse the nanoparticles. Nanoparticles were dispersed in ethylene glycol /water with solid volume fractions of 0.05, 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2 and 2.5 %. Equal volumes of Al_2O_3 nanoparticles and graphene nanoplatelets have been dispersed in the base fluid. The viscosity of Al_2O_3 - graphene/ ethylene glycol -water nanofluids with solid volume fractions ranging from 0.05% to 2.5% were measured in a temperature range from 263.15K to 303.15K. A Brookfield viscometer with a temperature bath was used to measure the viscosities of Al2O3 - graphene/ ethylene glycol -water nanofluids in the shear rate range of 0.3 RPM – 70 RPM. The ranges of repeatability and accuracy of the viscometer are, respectively, ±0.2% and ±1.0%. The viscometer was tested with a mixture of pure water and ethylene glycol (50:50) at different temperatures before being used to measure the dynamic viscosity of the hybrid nanofluids.

3- Results and Discussion

The XRD patterns of Al_2O_3 nanoparticles and graphene nanoplatelets are presented in Fig. 2. The XRD pattern of the nano size γ-alumina. Diffraction peaks of the nano γ-alumina are indicated at 32.81°, 36.72°, 45.38°, 66.59°, and 67.24° at d-spacings of 2.726, 2.446, 1.996, 1.403 and 1.391 Å respectively. For Graphene, a sharp and tight peak at 26.42° and some short peaks at 43.348°, 54.484°, 77.421° and 83.478° could be seen in the XRD output of the graphene nanoplates; the strong peak at $2\theta = 26.42$ with d-spacing of 3.370 Å attributed to the (002) crystalline plane.Fig. 2 shows the dynamic viscosity and shear stress values as a function of shear rate at different temperatures for different solid volume fractions. As can be seen, the shear stress is dependent on the shear rate for hybrid nanofluids with solid volume fractions ranging from 0.5 to 2.5% by volume. For these samples, increasing the shear rate at constant temperature leads to a nonlinear decrease in viscosity, indicating non-Newtonian behavior at all temperatures studied. It can also be observed that the n values are less than 1, indicating that the hybrid nanofluids exhibit shear thinning behavior at high concentrations. The samples with a solid volume fraction less than 0.1 vol% ($\varphi \leq 0.1$ vol%) show different rheological behavior. For solid volume fractions of 0.05 and 0.1 vol%, the variation in viscosity versus shear rate is insignificant and the viscosity values remain approximately constant as the shear rate increases, indicating that the hybrid nanofluid approximates Newtonian behavior. This is confirmed by the nearly linear relationship between shear stress and the shear rate at these temperatures.

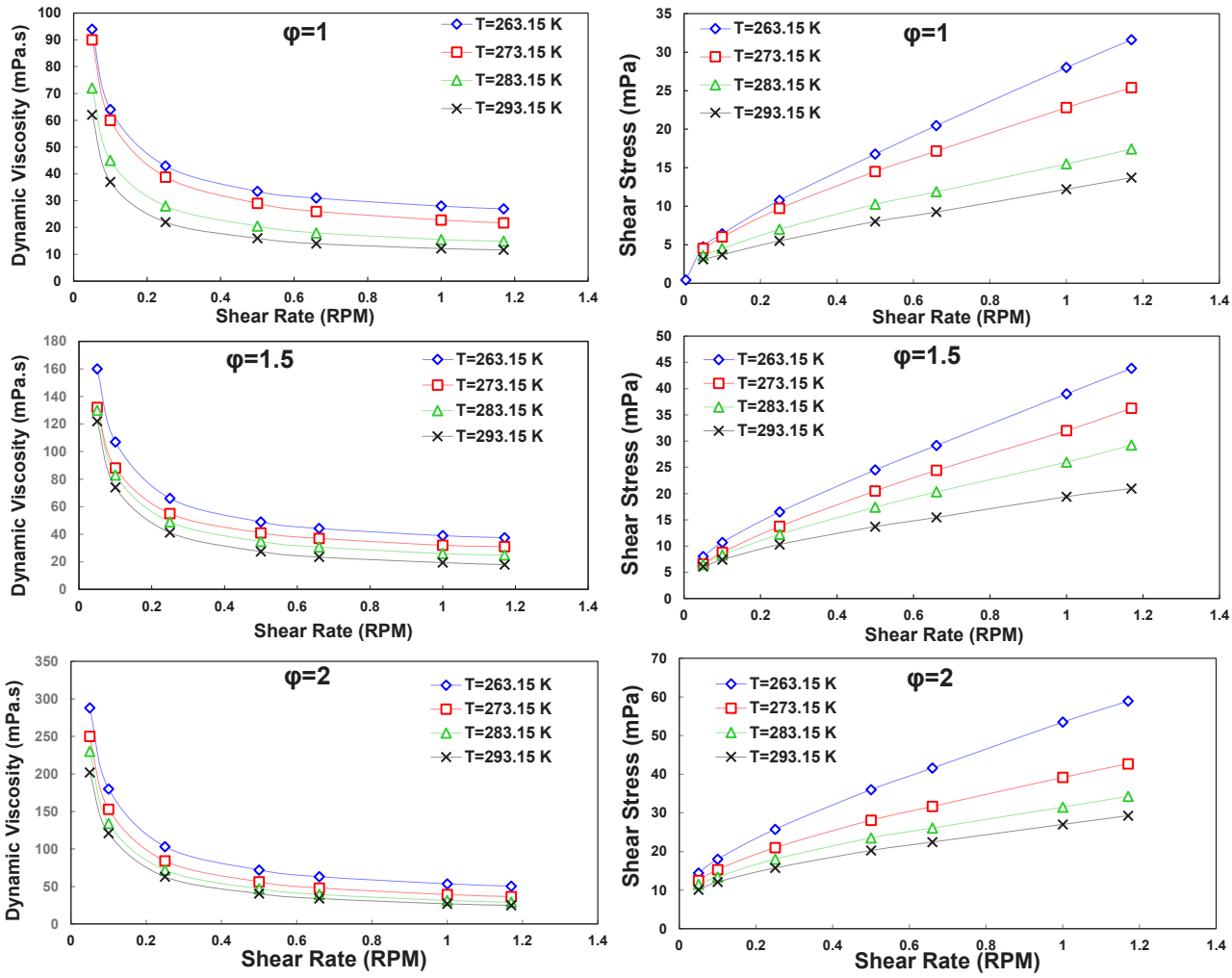


Fig. 2. Viscosity (left) and shear stress (right) of nanofluid against the shear rate for solid volume fractions of 1, 1.5, and 2 at different temperatures.

4- Conclusions

The effect of nanoparticle concentration and temperature on the rheological properties of graphene-Al_2O_3/ethylene glycol-water hybrid nanofluid at low temperatures was studied. The hybrid nanofluids were prepared using a combination of water-ethylene glycol (W: EG/50:50 concentrations in volume percent at 298.15 K) and surfactants containing oleic acid and sodium dodecyl sulfonate. The dynamic viscosity of the hybrid nanofluids were determined experimentally for temperatures between 263.15 K and 303.15K. The main results of the current work are summarized below:

1. Experiments show that the rheological properties of hybrid nanofluids are strongly affected by the concentration of nanoparticles and temperature, especially at sub-zero temperatures.

2. The measurement results of dynamic viscosity of nanofluids showed that the hybrid nanofluid of samples with solid volume fraction less than 0.5% had Newtonian behavior, while those with higher solid volume fraction (0.5%-2.5%) had non-Newtonian behavior and followed the power-law model.

3. Hybrid nanofluids show surprising rheological behavior at sub-zero temperatures and low concentrations which can be attributed to the existence of oleic acid and graphene nanoplatelets.

References

[1] Banisharif, M. Aghajani, S. Van Vaerenbergh, P. Estellé, A. Rashidi, Thermophysical properties of water ethylene glycol (WEG) mixture-based Fe3O4 nanofluids at low concentration and temperature, Journal of Molecular Liquids, 302 (2020) 112606.

[2] R. Siburian, H. Sihotang, S.L. Raja, M. Supeno, C. Simanjuntak, New route to synthesize of graphene nano sheets, Oriental Journal of Chemistry, 34(1) (2018) 182.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

N. Nayebpashaee, S. M. M.Hadavi, Study of Rheological Behavior of Water-Ethylene Glycol /Nano Al2O3 –Nano Graphene Hybrid Nanofluid at Low Temperatures , Amirkabir J. Mech Eng., 54(4) (2022) 187-190.

DOI: 10.22060/mej.2021.20275.7206

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۴، سال ۱۴۰۱، صفحات ۹۰۵ تا ۹۲۴
DOI: 10.22060/mej.2021.20275.7206

مطالعه رفتار رئولوژیکی نانوسیال هیبریدی آب-اتیلن گلیکول/نانوآلومینا-نانوگرافن در دماهای پایین

نسیم نایب پاشائی[1*]، سید محمدمهدی هادوی[2]

۱-پژوهشکده فناوری و مهندسی، پژوهشگاه استاندارد، البرز، ایران
۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

خلاصه: نانوسیالات که از توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیال پایه حاصل می‌شوند، نسل جدیدی از سیالات با پتانسیل بسیار بالا در کاردبردهای صنعتی هستند. در این پژوهش، تأثیر دما و غلظت نانوذرات متشکل از نانوذرات آلومینا و نانوصفحات گرافن بر رفتار رئولوژیکی سیال پایه متشکل از آب و اتیلن گلیکول مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین به میزان ۰/۲ درصد حجمی اولئیک اسید و ۰/۲درصد وزنی سدیم دودسیل سولفونات به عنوان ماده فعال سطحی برای پراکندگی نانوذرات به سیال پایه اضافه شدند. کسرحجمی نانوذرات ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد حجمی و دماهای مورد آزمایش در بازه دمائی ۲۹۳-۲۶۳ کلوین انتخاب شد. بررسی مورفولوژی و ریزساختار نانوذرات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ الکترونی عبوری انجام شد. تشخیص فازهای نانوذرات به وسیله آنالیز تفرق اشعه ایکس انجام شد. همچنین مساحت ویژه و تخلخل نانوذرات تعیین شد. ویسکوزیته دینامیک نانوسیالات هیبریدی اندازه‌گیری و با سیال پایه مقایسه شد. نتایج نشان داد که خصوصیات رئولوژیکی نانوسیال خصوصاً در دماهای زیر صفر به دما و غلظت نانوذرات وابسته است. نمونه‌های نانوسیال هیبریدی با کسرهای حجمی جامد کمتر از ۰/۵٪ رفتار نیوتنی داشتند، در حالی که نمونه‌های با کسرهای حجمی جامد بالاتر رفتار غیر نیوتنی رقیق‌گردانی برش را نشان می‌دهند.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۳۱
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۰۴
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۹/۰۳

کلمات کلیدی:
نانوسیال هیبریدی
اتیلن گلیکول
ویسکوزیته
نانو ذرات آلومینا
نانوصفحات گرافن

۱- مقدمه

نانوسیال ترکیبی است که با افزودن ذرات در مقیاس نانو (۱۰۰نانومتر) به یک سیال پایه با هدف بهبود انتقال حرارت حاصل می‌شود. نانوسیالات مخلوط جامد – مایع هستند که شامل یک سیال پایه و ذرات نانو است. نانوذرات معمولاً ذرات فلزی همانند Cu, Ni, Al، اکسیدها مانند Al_2O_3 ، $BaTiO_3$ ، CuO ، SiO_2 ، Fe_2O_3 ، Fe_3O_4 و ترکیبات دیگری مثل AlN, SiC، $CaCO_3$ و گرافن می‌باشد. سیال پایه معمولاً آب، اتیلن گلیکول، پروپیلن گلیکول، روغن موتور می‌باشد [۳-۱]. یکی از کاربردهای نانوسیالات، استفاده در کاربردهای هدایت حرارت می‌باشد. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که انتقال حرارت نانوسیالات نسبت به سیالات متداول افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد. این رفتار به عواملی چون شکل نانوذرات، توزیع اندازه و کسر حجمی آنها، دما، ضریب هدایت حرارتی نانوذرات و سیال پایه بستگی دارد [۱و ۲ و ۴].

طی یک دهه گذشته ، ویژگی انتقال حرارت نانوسیالات به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است [۵-۷]. این امر با استفاده از سیستم‌های نانوسایز برای کاربردهای مختلف مورد توجه قرار گرفته است. در مباحث مرتبط با انتقال حرارت، ویسکوزیته نانوسیالات بسیار مهم است. با این حال، بیشتر تحقیقات به ویژه به منظور افزایش سرعت انتقال حرارت در کاربردهای گرمایش، در دماهای متوسط و بالا انجام شده است. به دلیل عدم وجود مطالعات در زمینه کاربرد نانوسیالات در دماهای پایین (زیر صفر)، کاربرد و بازاریابی استفاده از نانوسیالات در مصارف صنعتی خنک کننده پیشرفت نکرده است [۸]. در سالهای گذشته مطالعات متعددی در زمینه رفتار رئولوژیکی نانوسیالات در محدوده دمائی ۲۰ درجه سانتیگراد تا ۷۰ درجه سانتیگراد انجام شده است [۱۲-۹].

در پژوهش انجام شده توسط الاداگ و همکاران [۱۳] ویسکوزیته نانوسیالات Al_2O_3 و CNT مبتنی بر آب را در غلظت کم و دمای پایین و تغییرات آن ناشی از کاهش دما و زمان برشی را مورد بررسی قرار داده است. این تحقیقات نشان داد که بسته به میزان سرعت برشی، نانوسیالات به عنوان مایعات نیوتنی یا غیر نیوتنی رفتار می‌کنند .

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: n.nayebpashaee@standard.ac.ir

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 فرمائید.

توانایی پایین آوردن نقطه انجماد آب، فشار بخارکم و خوردگی نسبتاً کم اتیلن گلیکول، آن را به یک سیال مناسب جهت استفاده به عنوان کاهش نقطه انجماد آب و سیال انتقال حرارت در سیستم‌های خنک کننده تبدیل می‌کند. در مطالعات انجام شده، اطلاعات کمی در ارتباط با ویژگی‌های رئولوژیکی دمای پایین نانوسیالات موجود است. برای گسترش کاربرد نانوسیالات در دماهای پایین، تحقیق و مطالعه در مورد رئولوژی این نانوسیالات بسیار مهم است [۱۴].

به منظور تعیین کاربرد نانوسیالات برای استفاده به عنوان یک مایع انتقال حرارت در دماهای پایین، کولکارنی و همکاران [۱۴ و ۱۵]، ویژگی‌های رئولوژیکی ترکیبات اتیلن و پروپیلن گلیکول و مخلوط آب ۶۰:۴۰ (با وزن) با درصد حجمی متفاوت (۰درصد تا ۶/۱۲ درصد) نانوذرات اکسید مس (CuO) در دماهای مختلف در محدوده ۳۵- درجه سانتیگراد تا ۵۰ درجه سانتی گراد را بررسی کردند. نایک و همکاران [۱۶] ویسکوزیته مخلوط پروپیلن گلیکول و آب (۶۰:۴۰ نسبت وزنی) را اندازه‌گیری کرده و نانوسیالات حاصل از آن را با اضافه کردن غلظت متفاوت حجمی (از ۰/۰۲۵ تا ۱/۲) از نانوذرات مس در دمای بین ۱۵- درجه سانتیگراد و ۳۰ درجه سانتیگراد اندازه‌گیری کرد. آن‌ها گزارش دادند که با کاهش دما، ویسکوزیته بصورت تصاعدی افزایش می‌یابد. در این پژوهش، رفتار رئولوژیکی نانوذرات مخلوط آب - اتیلن گلیکول (نسبت حجمی ۵۰:۵۰ در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد) در دماهای بین ۲۰- درجه سانتیگراد و ۲۰ درجه سانتیگراد بررسی شده تا عملکرد اینگونه نانوسیالات از طریق مطالعات تجربی در شرایط کاهش دما بررسی شود.

بنی‌شریف و همکاران [۱۷] ویسکوزیته دینامیک نانوسیالات پایدار با نانوذرات MWCNT، مس و Fe_3O_4 بر پایه آب و اتیلن گلیکول را مطالعه نمودند. در تمامی دماها، به جز دماهای پایین، برای سیال در محدوده ۲۰- درجه سانتیگراد تا ۲۰ درجه سانتیگراد رفتار نیوتنی گزارش شده است. در این پژوهش، افزایش قابل توجه در ویسکوزیته برای نانوسیالات با نانوذرات MWCNT مشاهده نشد، در حالی که کاهش ویسکوزیته در نانوسیالات حاوی نانوذرات مس و Fe_3O_4 مشاهده شده است.

اکثر تحقیقات انجام شده در زمینه مطالعه رفتار نانوسیالات در دماهای متوسط و بالا (۳۲۸-۲۹۸ کلوین) انجام شده است. مطالعات بسیار کمی به طور خاص روی رفتار رئولوژیکی و خواص ترموفیزیکی نانوسیالات در دمای پایین متمرکز شده است [۱۳ و ۱۸]. فقدان چنین مطالعاتی در زمینه رفتار نانوسیالات هیبریدی در دماهای منفی (زیر صفر درجه سانتی گراد) آشکارتر است. به دلیل عدم وجود مطالعات در زمینه کاربرد نانوسیالات در دماهای پایین (زیر صفر)، کاربرد صنعتی و بازاریابی استفاده از نانوسیالات در مصارف صنعتی خنک کننده پیشرفت نکرده است.

عدم وجود مطالعات کافی در زمینه اندازه‌گیری خواص رئولوژیکی و ترموفیزیکی نانوسیالات هیبریدی در دماهای پایین انگیزه اصلی این تحقیق بوده است. سیال پایه انتخابی در این مطالعه، با هدف کاربرد به عنوان سیال پایه در سنتز سیال ضد یخ/یخ زدای بدنه هواپیما[1] انتخاب شد. بطور کلی محلول‌های ضد یخ / یخ زدای بدنه هواپیما از مواد پایه اتیلن گلیکول، دی اتیلن گلیکول یا پروپیلن گلیکول تشکیل شده‌اند که با آب رقیق شده و نیز شامل افزودنی‌های بازدارنده از خوردگی[2]، مواد خیس کننده[3] و مواد ضد کف می‌باشند [۱۹ و ۲۰]. متداول‌ترین ترکیب سیال پایه محلول ضد یخ/یخ زدای بدنه هواپیما، مخلوط آب – اتیلن گلیکول با نسبت ۵۰:۵۰ درصد حجمی می‌باشد. بنابراین مخلوط آب – اتیلن گلیکول با نسبت ۵۰:۵۰ درصد حجمی به عنوان سیال پایه[4] انتخاب شد. افزودنی‌های نانو بگونه‌ای انتخاب شدند که سازگار با جنس بدنه هواپیما باشند. بر مبنای اطلاعات فعلی نویسندگان تاکنون مطالعه‌ای بر روی سیستم نانوسیال هیبریدی آب – اتیلن گلیکول/ نانوآلومینا-نانوگرافن انجام نشده است.

در این مطالعه، تأثیر دما و غلظت نانوذرات متشکل از نانوذرات آلومینا و نانوصفحات گرافن بر رفتار رئولوژیکی سیال پایه متشکل از آب و اتیلن گلیکول مورد مطالعه قرار گرفت. در تهیه نانوسیال هیبریدی، مخلوط آب – اتیلن گلیکول با نسبت ۵۰:۵۰ درصد حجمی در دمای ۲۹۸ کلوین به عنوان سیال پایه در نظر گرفته شد. نانوذرات که از حجم مساوی نانو ذرات آلومینا و نانوصفحات گرافن تشکیل شده بودند در مقدار معینی از سیال پایه تعلیق شدند. همچنین به میزان ۰/۲ درصد حجمی اولئیک اسید[5] و ۰/۲درصد وزنی سدیم دودسیل سولفونات[6] به عنوان ماده فعال سطحی[7] برای تثبیت و پراکندگی نانوذرات به سیال پایه اضافه شدند. نانوسیالات با استفاده از روش دو مرحله‌ای تهیه شدند. کسرحجمی نانوذرات در این تحقیق ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد حجمی لحاظ گردید و همچنین جهت بررسی اثر دما، دماهای مورد آزمایش در بازه دمایی ۲۹۳-۲۶۳ کلوین انتخاب شد. بررسی مورفولوژی و ریزساختار نانوذرات توسط میکروسکوپ الکترونی

1 Aircraft Anti-ice/De-ice fluid
2 Corrosion inhibitors
3 Wetting agent
4 base fluid
5 Oleic Acid (OA)
6 Sodium Dodecyl Sulfonate (SDS)
7 Surfactant

روبشی و میکروسکوپ الکترونی عبوری انجام شد. تشخیص فازهای موجود در نانوذرات به وسیله آنالیز تفرق اشعه ایکس انجام شد. همچنین مساحت ویژه و تخلخل نانوذرات از طریق اندازه‌گیری تخلخل سنجی جذب و واجذب[1] تعیین شد. پس از سنتز نانوسیال هیبریدی آب – اتیلن گلیکول/ نانو گرافن – نانو آلومینا، پایداری نانوسیالات با روش پتانسیل زتا سنجیده شد. همچنین، ویسکوزیته دینامیک نانوسیالات هیبریدی اندازه‌گیری و با سیال پایه مقایسه شد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲- ۱- مشخصه یابی نانوذرات

به منظور شناسایی فازهای موجود در نمونه از دستگاه پراش اشعه ایکس با ولتاژ ۱۰ و۴۰ کیلو ولت، شدت جریان ۲۵ و ۳۰ میلی آمپر، طول موج اشعه ۱/۵۴ آنگستروم و لامپ کاتد مسی و فیلتر نیکل استفاده شد. دستگاه به کار رفته دستگاه مدل فیلیپس پی دبلیو ۱۷۳۰[2] است. برای این منظور نمونه‌های در نظر گرفته شده برای بررسی‌های فازی و سطحی تحت آنالیز قرار گرفتند. در نهایت الگوی پراش اشعه ایکس از سطح نمونه‌ها تهیه و بر اساس الگوی به دست آمده شناسایی فازها با استفاده از کارتهای استاندارد انجام شد.

از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل وگا تسکان[3] مجهز به آشکارساز ایدکس[4] (مدل اینکا آکسفورد[5]) برای بررسی و تعیین مورفولوژی و اندازه نانوذرات استفاده گردید. خروجی این آنالیز تصاویری هستند که می‌توانند در فهم بهتر توپوگرافی سطح نمونه‌ها به کار روند. دستگاه به کار گرفته شده برای این آنالیزساخت شرکت تی ای – اسکن[6] است و از دقت بالایی برخوردار است.

تصاویر حاصل از آنالیز میکروسکوپ الکترونی عبوری به منظور بررسی مورفولوژی و بررسی ریزساختاری نانوذرات مورد استفاده قرار گرفت. دستگاه مورد استفاده برای این آنالیز فیلیپس سی ام ۱۲۰[7] است.

آنالیز اندازه‌گیری تخلخل سنجی جذب و واجذب برای اندازه‌گیری مساحت ویژه نانوذرات استفاده می‌شود و این آنالیز براساس سنجش حجم گاز نیتروژن جذب و واجذب شده توسط سطح ماده در دمای ثابت نیتروژن مایع کار می‌کند. براساس این آنالیز بررسی امکان پخش یکنواخت نانوذرات در سیال پایه انجام می‌شود. دستگاه مورد استفاده ساخت کمپانی بی ای ال[8] کشور ژاپن می‌باشد.

۲- ۲- تهیه نانوسیال

اولین قدم در انجام مطالعه حاضر، آماده‌سازی نانوسیال و تعلیق پایدار نانوذرات درون سیال پایه می‌باشد. در این تحقیق برای آماده‌سازی نانوسیال از روش دومرحله‌ای استفاده می‌شود. برای انجام آزمایش‌هایی با کمترین خطا در اختیار داشتن نمونه‌های پایدار و همگن مهمترین شرط است. کلوخه شدن یا عدم تعلیق مناسب نانوذرات در سیال پایه می‌تواند خطای زیادی در اندازه‌گیری ایجاد کند. برای جلوگیری از این پدیده روش‌های مختلفی وجود دارد. استفاده از ماده فعال سطحی یکی از راهکارهای مؤثر در این زمینه می‌باشد.

در این مطالعه، در بررسی‌های آزمایشگاهی، سیال ضد یخ/یخ زدای سنتز شده به عنوان سیال پایه مورد مطالعه قرار گرفت. آب/ محلول ضد یخ سنتز شده با نسبت ۵۰:۵۰ درصد حجمی در دمای ۲۹۸ کلوین به عنوان سیال پایه در نظر گرفته شدند. همچنین به میزان ۰/۲ درصد حجمی اولئیک اسید و ۰/۲درصد وزنی سدیم دودسیل سولفونات به عنوان ماده فعال سطحی برای تثبیت و پراکندگی نانوذرات به سیال پایه اضافه شدند. خواص فیزیکی و شیمیایی نانوذرات آلومینا، نانوصفحات گرافن، اتیلن گلیکول و اولئیک اسید به ترتیب در جدول‌های ۱ تا ۴ ارائه شده‌اند.

کسرحجمی نانوذرات در این تحقیق ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد حجمی لحاظ گردید و همچنین جهت بررسی اثر دما، دماهای مورد آزمایش در بازه دمایی ۲۹۳–۲۵۳ کلوین قرار داده شد. نانوذرات که از حجم مساوی نانوآلومینا و گرافن تشکیل شده بودند در مقدار معینی از مخلوط آب / محلول ضد یخ سنتز شده تعلیق شدند. مقادیر مورد نیاز نانوذرات Al_2O_3 و گرافن برای تهیه نمونه‌های نانوسیال هیبریدی از معادله (۱) بدست آمد [۱۲ و ۲۷–۲۴]:

$$\varphi = \frac{\left(\frac{w}{\rho}\right)_{Al_2O_3} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{graphene}}{\left(\frac{w}{\rho}\right)_{Al_2O_3} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{graphene} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{water} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{EthyleneGlycole}} \quad (۱)$$

1 Adsorption/Desorption Porosimetry (BET)
2 Philips PW1730
3 Tescan Vega
4 Energy Dispersive Spectroscopy Systems (EDS)
5 Inca OXFORD
6 TE-SCAN
7 Philips CM120
8 BEL

جدول ۱. اطلاعات فیزیکی و شیمیایی نانوذرات Al_2O_3

Table 1. Physical and chemical Specifications of Al_2O_3 nanoparticles

مشخصه	مقدار
خلوص	+۹۹%
رنگ	سفید
اندازه	۱۵ nm
مورفولوژی	تقریباً کروی
مساحت سطح ویژه (SSA)	۱۳۸ m^2/g
دانسیته	۳۸۹۰ kg/m^3
ظرفیت حرارتی ویژه	۸۸۰ J/(kg-K)

جدول ۲. اطلاعات فیزیکی و شیمیایی نانوصفحات گرافن

Table 2. Physical and chemical Specifications of graphene nanoplatelets

مشخصه	مقدار
خلوص	۹۹/۵%
رنگ	سیاه
ضخامت	۲-۱۸ nm
مورفولوژی	شبه صفحه‌ای
مساحت سطح ویژه (SSA)	۵۰۰-۱۲۰۰ m^2/g
دانسیته	۲۳۰ kg/m^3

جدول ۳. اطلاعات فیزیکی و شیمیایی اتیلن گلیکول

Table 3. Physical and chemical Specifications of ethylene glycol

مشخصه	مقدار
فرمول شیمیائی	$C_2H_6O_2$
ظاهر	شفاف، بی‌رنگ
بو	بدون بو
جرم مولی	۶۲/۰۷ g/mol
دانسیته	۱۱۳۰/۲۰ kg/m^3
نقطه جوش	۱۹۷/۳ °C
هدایت حرارتی	۰/۲۴۴ W/m K (۲۰°C)
ویسکوزیته	۱۶/۱ cP (۲۰°C)

جدول ۴. اطلاعات فیزیکی و شیمیایی اولئیک اسید [۲۱-۲۳].

Table 4. Physical and chemical Specifications of oleic acid

مشخصه	مقدار
فرمول شیمیائی	$C_{۱۸}H_{۳۴}O_{۲}$
نقطه ذوب	۲۸۶/۱۵ K
نقطه انجماد	۲۷۷/۱۵ K
نقطه ابری شدن(Cloud point)	۲۹۳/۱۵ K±۱
نقطه ریزش (Pour point)	۲۷۳/۱۵ K±۱
ویسکوزیته	۳۸/۸۰ mPa.s

جدول ۵. مقادیرنانوذرات، اتیلن گلیکول و آب مورد استفاده برای تهیه حجم ۴۰۰ میلی لیتر نانوسیال هیبریدی

Table 5. Mass of nanoparticles, ethylene glycol (EG) and water used for the preparing a volume of 400 ml of hybrid nanofluid

درصد حجمی جامد(%)	جرم(g) [±۰/۰۰۱]			
	آب	اتیلن گلیکول	گرافن	$Al_{۲}O_{۳}$
۰	۲۲۲/۶۴۰	۱۹۹/۶۴۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۰/۰۵	۲۲۲/۵۲۹	۱۹۹/۵۴۲	۰/۰۲۳	۰/۳۸۹
۰/۱	۲۲۲/۴۱۷	۱۹۹/۴۴۲	۰/۰۴۶	۰/۷۷۸
۰/۵	۲۲۱/۵۲۷	۱۹۸/۶۴۴	۰/۲۳۰	۳/۸۹۰
۱	۲۲۰/۴۱۴	۱۹۷/۶۴۶	۰/۴۶۰	۷/۷۸۰
۱/۵	۲۱۹/۳۰۰	۱۹۶/۶۴۷	۰/۶۹۰	۱۱/۶۷۰
۲	۲۱۸/۱۸۷	۱۹۵/۶۴۹	۰/۹۲۰	۱۵/۵۶۰
۲/۵	۲۱۷/۰۷۴	۱۹۴/۶۵۱	۱/۱۵۰	۱۹/۴۵۰

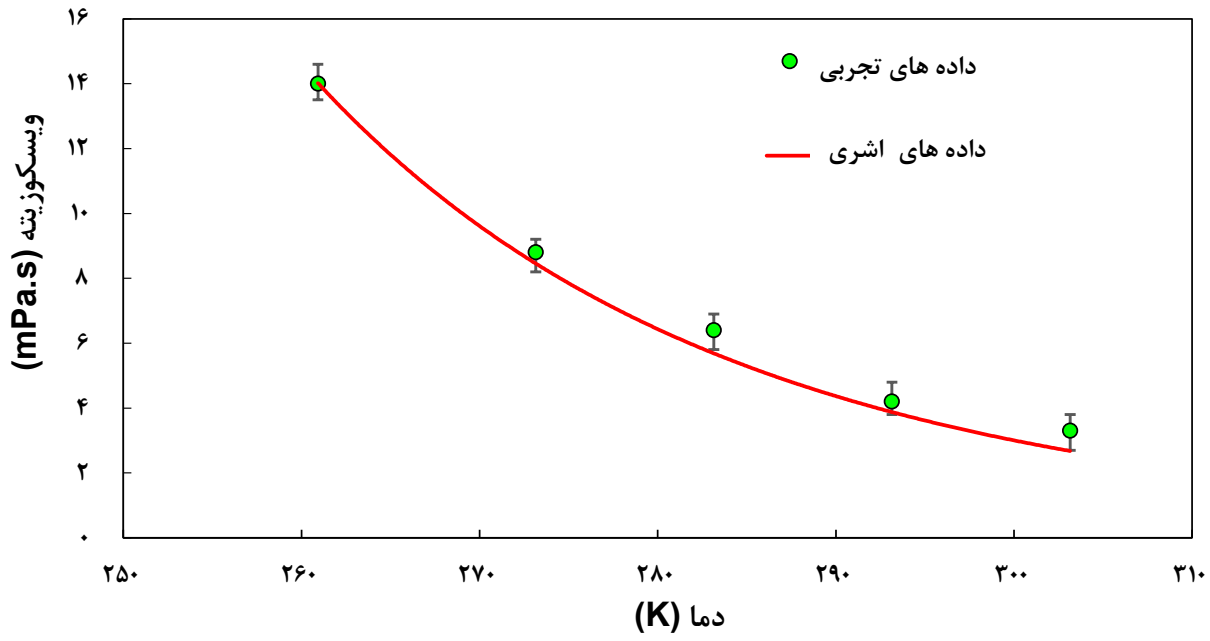
که در آن φ درصد حجمی نانوذرات است، ρ دانسیته بر حسب کیلوگرم در متر مکعب و W جرم بر حسب کیلوگرم است. مقادیر نانوذرات، اتیلن گلیکول[1] و آب مورد استفاده برای تهیه حجم ۴۰۰ میلی لیتر نانوسیال هیبریدی محاسبه و در جدول ۵ گزارش شده است. غلظت ماده فعال سطحی برای همه نمونه‌ها ثابت بود. در تحقیق حاضر، نانوسیالات با استفاده از روش دو مرحله‌ای تهیه شدند. جهت شکستن تجمع ذرات و تعلیق یکنواخت از دستگاه همزن التراسونیک پرابی به مدت ۱۸۱دقیقه استفاده گردید.

1 Ethylene Glycol (EG)

۲- ۳- مشخصه یابی نانوسیالات

۲- ۳- ۱- آنالیز پایداری نانوسیالات

دو استراتژی مجزا برای ارزیابی ثبات نانوسیالات وجود دارد: مشاهده بصری و اندازه‌گیری پتانسیل زتا. در این مطالعه از هر دو روش استفاده شد. در استراتژی اول (فرایند مشاهده)، نمونه‌های نانوسیال هیبریدی آماده شده از جنبه رسوب ذرات به مدت حدود چهارده روز مورد ارزیابی قرار گرفتند. پس از گذشت مدت زمان دو هفته هیچگونه رسوب قابل توجهی در نانوسیالات مشاهده نشد و پایداری قابل قبول رویت گردید.



شکل ۱. مقایسه بین نتایج ویسکوزیته تجربی و داده‌های اشری [۲۸] مخلوط آب و اتیلن گلیکول (۵۰-۵۰) در دماهای مختلف.

Fig. 1. Comparison between experimental results and ASHRAE data on viscosity of a mixture of water-ethylene glycol (50–50) at different temperatures

در این مطالعه، از پتانسیل زتا به عنوان یکی از روش‌های ارزیابی پایداری نانوسیالات استفاده شد. پتانسیل زتای نانوسیالات هیبریدی در دمای ۲۹۸ کلوین با استفاده از دستگاه زتاسایزر نانو اس‌زد ۱۰۰[1] ساخته شده توسط شرکت هوریبا[2] ژاپن اندازه‌گیری شد.

۲- ۳- ۲- اندازه‌گیری ویسکوزیته نانوسیالات

ویسکوزیته نانوسیالات هیبریدی با کسرهای حجم جامد از ۰/۰۵ تا ۲/۵ درصد در دامنه دمائی از ۲۶۳/۱۵ تا ۳۰۳/۱۵ کلوین اندازه‌گیری شد. از یک ویسکومتر بروکفیلد با مخزن دمایی برای اندازه‌گیری ویسکوزیته‌های نانوسیال‌ها در محدوده نرخ برش ۰/۳ دور در دقیقه تا ۷۰ دور در دقیقه استفاده شد. دامنه‌های تکرار و دقت ویسکومتر به ترتیب ۰/۲± و ۱/۰± است.

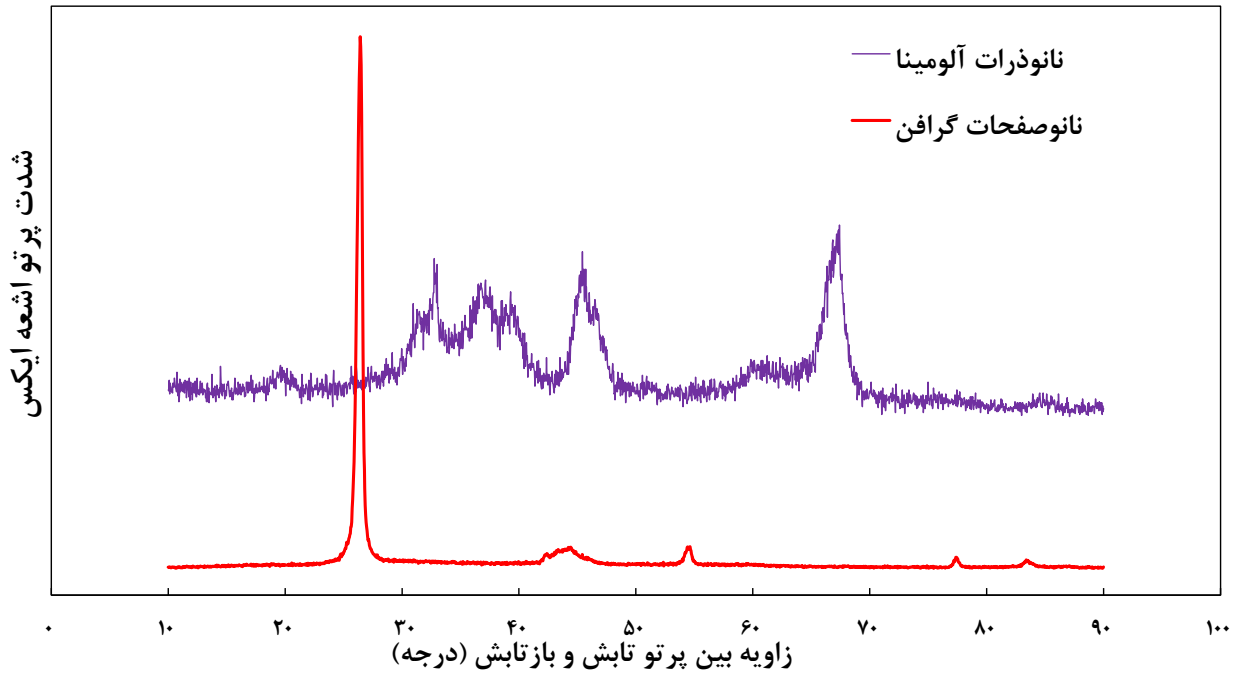
قبل از استفاده از ویسکومتر برای اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات هیبریدی، به منظور ارزیابی دقت ویسکومتر، ویسکوزیته مخلوط آب خالص و اتیلن گلیکول (۵۰:۵۰) در دماهای مختلف اندازه‌گیری شد و نتایج با داده‌های ارائه شده در اشری[3] [۲۸] مقایسه شد. نتایج در شکل ۱ ارائه شده است. مطابق با شکل ۱ مطابقت منطقی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های گزارش شده در منبع اشری [۲۸] وجود دارد. میانگین انحراف مطلق بین داده‌های اشری [۲۸] و داده‌های تجربی در این مطالعه کمتر از ۲٪ است.

۳- نتایج و بحث

۳- ۱- نتایج مشخصه‌یابی نانوذرات

الگوی پراش اشعه ایکس نانوذرات پودر آلومینا Al_2O_3 و نانوصفحات گرافن در شکل ۲ ارائه شده است. پیک‌های پراش نانوذرات $\gamma-Al_2O_3$ در ۳۲/۸۱ درجه، ۳۶/۷۲ درجه، ۴۵/۳۸ درجه، ۶۶/۵۹ درجه و ۶۷/۲۴ درجه در فواصل ۲/۷۲۶، ۲/۴۴۶، ۱/۹۹۶، ۱/۴۰۳ و ۱/۳۹۱ مشاهده شده است. این قله‌ها به ترتیب با صفحات کریستالوگرافی (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۴۰۰)، (۴۲۲) و (۴۴۰) مطابقت دارند [۳۱-۲۹]. در الگوی پراش اشعه ایکس نانوذرات پودر آلومینا هیچ پیک مربوط به ناخالصی مشاهده نشد. با استفاده از معادله شرر (معادله (۲)) اندازه متوسط بلوری برابر با ۱۲ نانومتر برای نانوذرات آلومینا بدست می‌آید:

1 Zetasizer Nano SZ100
2 Horiba
3 ASHRAE



شکل ۲. الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به نانوذرات γ-AL_2O_3 و نانوصفحات گرافن

Fig. 2. XRD patterns of nanosized γ-Al_2O_3 and graphene nanoplatelets

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \qquad (۲)$$

که در آن λ طول موج اشعه ایکس، β پهنای پیک در نصف ارتفاع بیشینه[1] و θ زاویه پراش براگ است.

الگوی پراش اشعه ایکس نانو صفحات گرافن در شکل ۲ نشان داده شده است. پیک تیز و باریک در زاویه ۲۶/۴۲ درجه و برخی از پیک‌های کوتاه در ۴۳/۳۴۸ درجه، ۵۴/۴۸۴ درجه، ۷۷/۴۲۱ درجه و ۸۳/۴۷۸ درجه را می‌توان در طیف پراش اشعه ایکس نانوصفحات گرافن مشاهده کرد. پیک اصلی در زاویه برابر با ۲۶/۴۲ درجه و با فاصله صفحه ۳/۳۷۰ آنگستروم مربوط به صفحه بلوری (۰۰۲) از مشخصه‌های اصلی نانوصفحات گرافن است [۳۲ و ۳۳].

مورفولوژی نانوذرات Al_2O_3 و نانو صفحات گرافن توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد (شکل ۳). شکل ۳-الف تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوذرات γ-Al_2O_3 را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود مورفولوژی نانوذرات آلومینا بیشتر به شکل کروی است و اندازه آن در حدود ۲۵-۱۰ نانومتر است. همانطور که در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود، پودرهای نانو تا حدی آگلومره شده‌اند. تشکیل تجمع ذرات(آگلومراسیون) به دلیل نسبت سطح و حجم بسیار زیاد نانوذرات است.

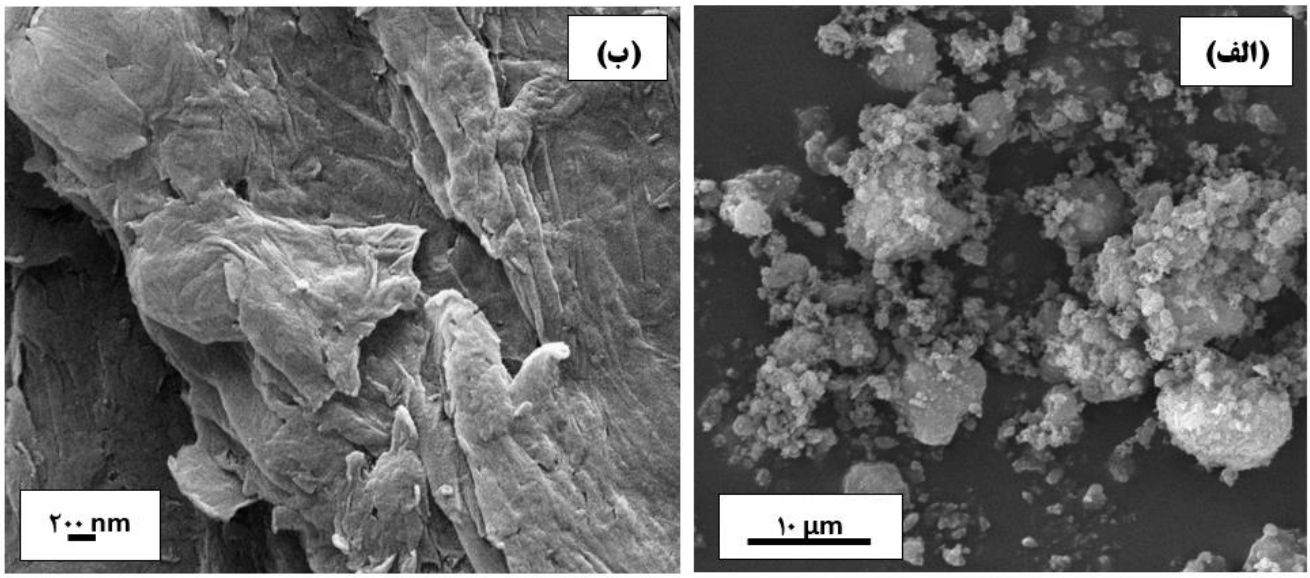
مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکل ۳-ب) نشان می‌دهد که نانوصفحات گرافن از ورقه‌های کوتاه لایه‌های گرافن تشکیل شده‌اند که دارای یک بعد جانبی ۴-۱۲ نانومتر و ضخامت ۲-۱۸ نانومتر هستند. ورقه‌های گرافن روی هم جمع شده و مانند کاغذهای نازک چروکیده به نظر می‌رسند.

بررسی‌های بیشتر در مورد اندازه و شکل ذرات نانو با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری بدست آمد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانوذرات γ-Al_2O_3 در شکل ۴-الف نشان داده شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانوذرات Al_2O_3 اندازه‌های مختلفی را در محدوده ۱۶ تا ۲۱ نانومتر نشان داد. همه ذرات شکل کروی را نشان می‌دهند. شکل ۴-ب تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانوصفحات گرافن است که بسیاری از چین و چروک‌ها[2] و مناطق تا شده[3] را نشان می‌دهد که ساختار معرف نانو صفحات گرافن است.

1 Full Width at Half Maximum (FWHM)

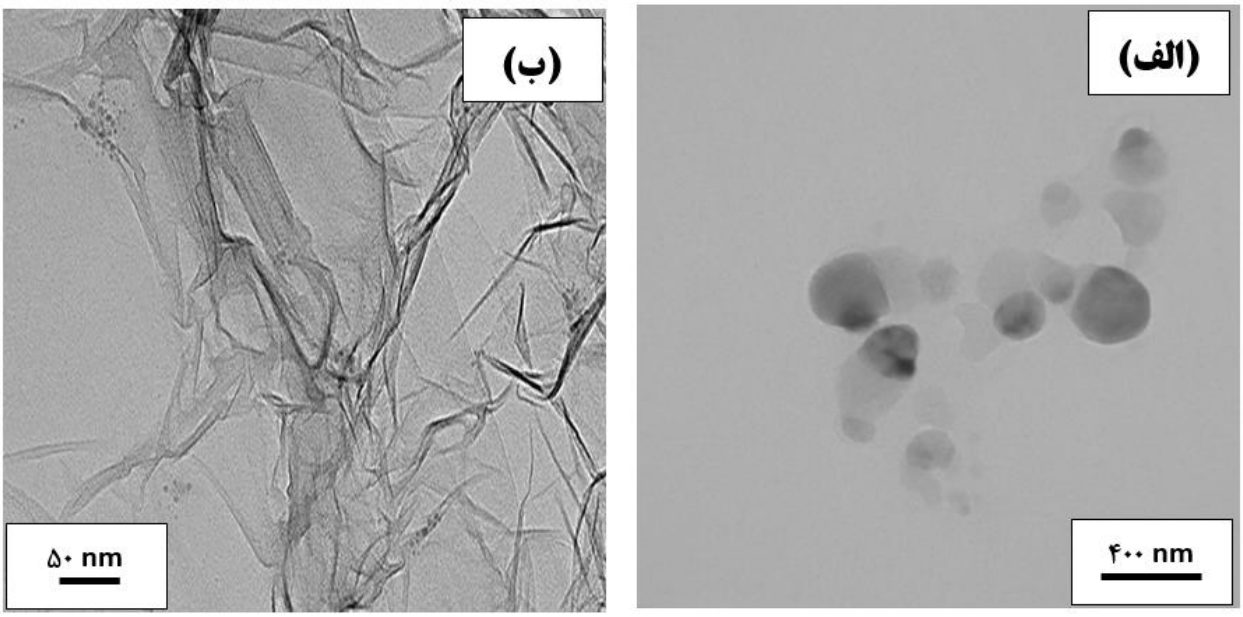
2 wrinkles

3 folded regions



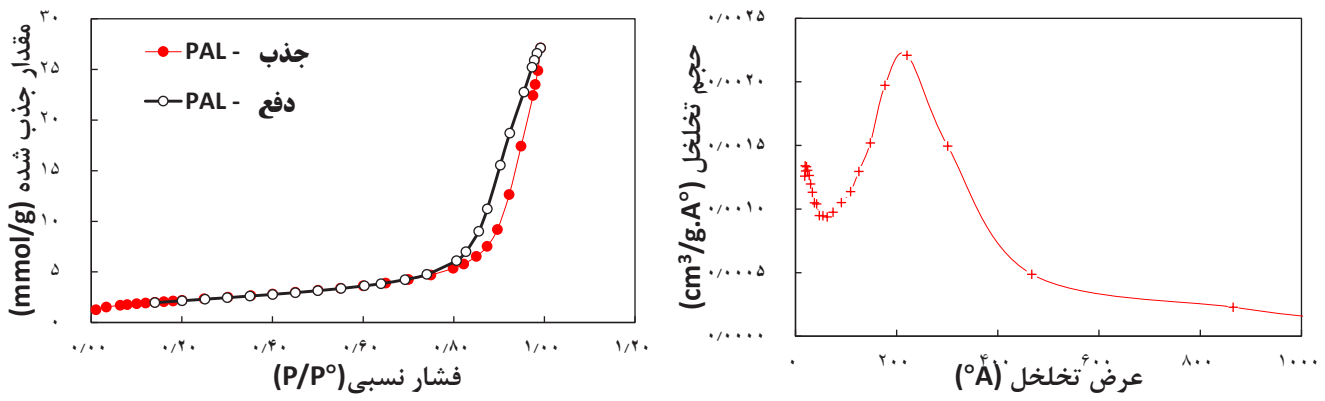
شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی الف) γ-AL_2O_3 و ب) نانو صفحات گرافن.

Fig. 3. Scanning Electron Microscopy images of a) γ-Al_2O_3 and b) graphene nanoplatelets



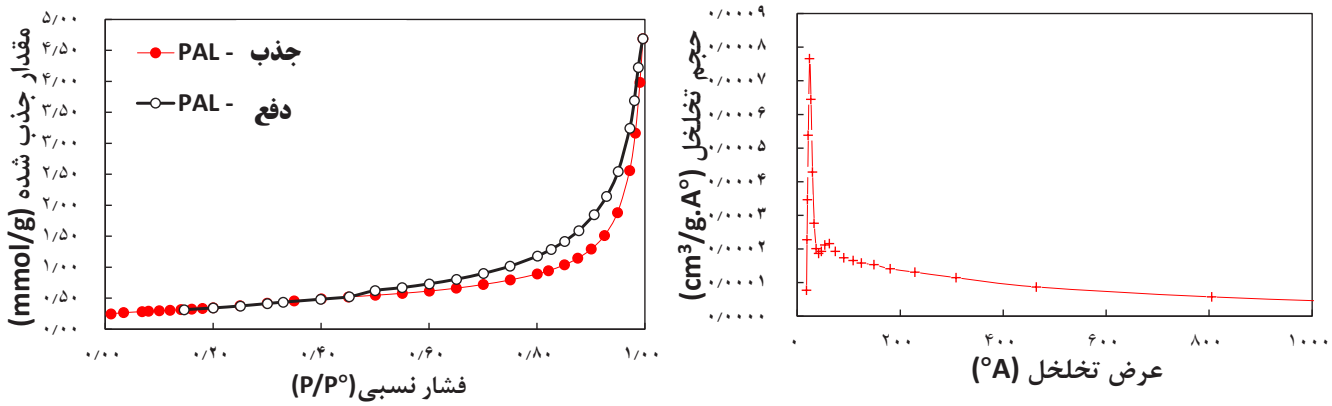
شکل ۴. تصاویر تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از الف) نانوذرات γ-AL_2O_3 و ب) نانو صفحات گرافن.

Fig. 4. TEM images of a) γ-Al_2O_3 nanoparticles and b) Graphene Nanoplatelets.



شکل ۵. ایزوترم‌های جذب / دفع N_2 و توزیع قطر منافذ نانوصفحات AL_2O_3 .

Fig. 5. N_2 adsorption/desorption isotherms and pore diameter distribution of Al_2O_3 nanoparticles



شکل ۶. ایزوترم‌های جذب / دفع N_2 و توزیع قطر منافذ نانوذرات گرافن.

Fig. 6. N_2 adsorption/desorption isotherms and pore diameter distribution of graphene nanoplatelets.

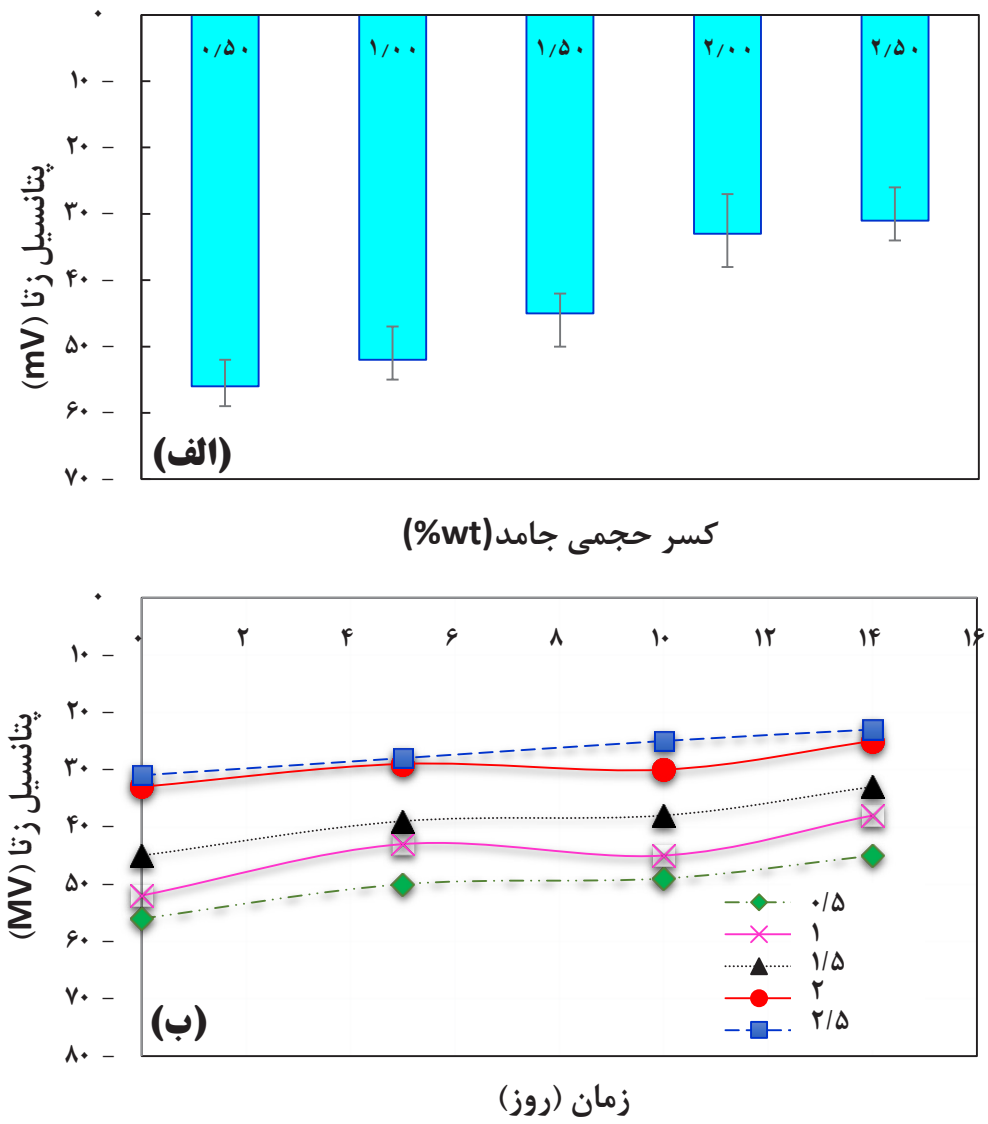
اندازه ذرات، ساختار حفرات و سطح نانوذرات با استفاده از تجزیه و تحلیل اندازه‌گیری تخلخل‌سنجی جذب و واجذب مشخص شد. مساحت سطح آنالیز اندازه‌گیری تخلخل‌سنجی جذب و واجذب نانوذرات در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. ایزوترم جذب – دفع (شکل‌های ۵ و ۶) یک حلقه هیسترزیس را نشان می‌دهد که بسیار شبیه به ایزوترم نوع IV است. سطح تخلخل‌سنجی جذب و واجذب، حجم منافذ (تخلخل) و متوسط اندازه منافذ نانوصفحات گرافن به ترتیب حدود ۲۷/۵۱۰مترمربع در گرم ، ۰/۰۸۹ سانتی متر مربع در گرم و ۱۲۹/۰۰۰ Å تعیین شد.

سطح تخلخل‌سنجی جذب و واجذب، حجم منافذ و میانگین اندازه منافذ نانوذرات Al_2O_3 به ترتیب حدود ۱۵/۱۷۸ متر مکعب در گرم، ۰/۷۸ سانتی‌متر مکعب در گرم و ۵۸/۱۷۴ درجه سانتیگراد تعیین شد. رابطه بین سطح خاص و اندازه ذرات در مدل اندازه‌گیری تخلخل‌سنجی جذب و واجذب به صورت معادله (۳) است:

$$d_{BET} = \frac{6000}{\rho\, S_{BET}} \qquad (۳)$$

که در آن ρ چگالی جامد (g/cm^3) است، S_{BET} سطح ویژه (m^2/g) و d_{BET} اندازه ذرات است. اندازه متوسط نانوذرات آلومینا ۸/۶۴ نانومتر تعیین شد که با اندازه دانه محاسبه شده توسط معادله شرر آنالیز تفرق اشعه ایکس[1] و تجزیه و تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی مطابقت دارد.

1 XRD Scherrer



شکل ۷. پتانسیل زتای نانوسیالات هیبریدی بر حسب الف) کسر حجمی جامد و ب) زمان.

Fig. 7. Zeta potential of hybrid nanofluids a) at different concentrations and b) with standing time.

۳- ۲- نتایج پایداری نانوسیالات

برای تأیید پایداری نانوسیالات هیبریدی، آنالیز پتانسیل زتا انجام شد. پتانسیل زتای نانوسیالات هیبریدی در ۲۹۸ کلوین به عنوان تابعی از کسر حجمی جامد و زمان در شکل ۷ نشان داده شده است. از شاخص پتانسیل زتا برای ارزیابی پایداری نانوذرات استفاده می‌شود که مربوط به نیروهای دافعه الکترواستاتیک بین نانوذرات است. نانوسیال پایدار دارای پتانسیل زتا بیش از ۳۰ میلی ولت می‌باشد. مقادیر کمتر از ۱۵ میلی ولت برای پتانسیل زتا نشان دهنده ناپایداری نانوسیالات است [۳۶-۳۴].

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مقادیر پتانسیل زتای نانوسیالات هیبریدی از ۳۱- تا ۵۵- میلی ولت متغیر است که برای پایداری نانوسیال کافی است. همچنین با توجه به شکل مشخص می‌شود که حداکثر مقادیر پتانسیل زتا در بالاترین مقادیر غلظت نانوذرات حاصل شده است. این را می‌توان با فاصله کمتر بین نانوذرات در غلظت‌های بالاتر، که منجر به تجمع ذرات می‌شود، توضیح داد. مطابق با شکل ۷- ب مقادیر پتانسیل زتای نانوسیالات با افزایش زمان کاهش می‌یابد. با توجه به گرانش و حرکت براونی، ذرات نانو به تدریج با گذشت زمان تمایل به آگلومراسیون و تشکیل تجمع دارند [۶ و ۳۵ و ۳۷].

۳- ۳- نتایج اندازه‌گیری ویسکوزیته

اندازه‌گیری‌های ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال هیبریدی در محدوده دمائی از ۲۶۳/۱۵ تا ۲۹۳/۱۵ کلوین برای نانوسیال با کسر حجمی جامد ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد انجام شد. برای بررسی ویسکوزیته یک نانوسیال هیبریدی، ابتدا باید رفتار نیوتنی یا غیر نیوتنی نانوسیال مطالعه شود. مایعات نیوتنی از قانون ویسکوزیته نیوتون تبعیت می‌کنند. تنش برشی در این مایعات مستقل از میزان برش است. رابطه (۴) مشخصه آن است:

$$\tau = m\dot{\gamma} \qquad (۴)$$

که در آن μ ویسکوزیته ، τ تنش برشی و $\dot{\gamma}$ نرخ برش بر حسب s^{-1} است. مایعات غیر نیوتنی از قانون نیوتن تبعیت نمی‌کنند و تنش برشی آنها با نرخ برشی تغییر می‌کند. معادله زیر رفتار غیرنیوتنی را نشان می‌دهد:

$$\tau = m\dot{\gamma}^{n} \qquad (۵)$$

که در آن τ تنش برشی، $\dot{\gamma}$ نرخ برش، m شاخص استحکام سیال[1] و n شاخص رفتار جریان[2] است. وقتی n کوچک‌تر از ۱ باشد، رفتار رقیق گردانی برش[3] تعریف می‌شود. سیال ضخیم شونده برش[4] با n بزرگ‌تر از ۱ مرتبط است.

در شکل ۸ ویسکوزیته دینامیکی و مقادیر تنش برشی به ازای سرعت برش در دماهای مختلف برای مقادیر مختلف کسر حجمی جامد نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تنش برشی نانوسیالات هیبریدی با کسرهای حجمی جامد از ۰/۵ تا ۲/۵ وابسته به سرعت برشی است. در این نمونه‌ها، هنگامی که دما ثابت است، افزایش سرعت برشی منجر به کاهش غیرخطی ویسکوزیته می‌شود که نشان دهنده رفتار غیرنیوتنی در تمام دماهای مورد مطالعه است. همچنین می‌توان دریافت که مقادیر n کمتر از ۱ است که نشان می‌دهد نانوسیالات هیبریدی در غلظت‌های بالا دارای یک رفتار رقیق گردانی برش هستند.

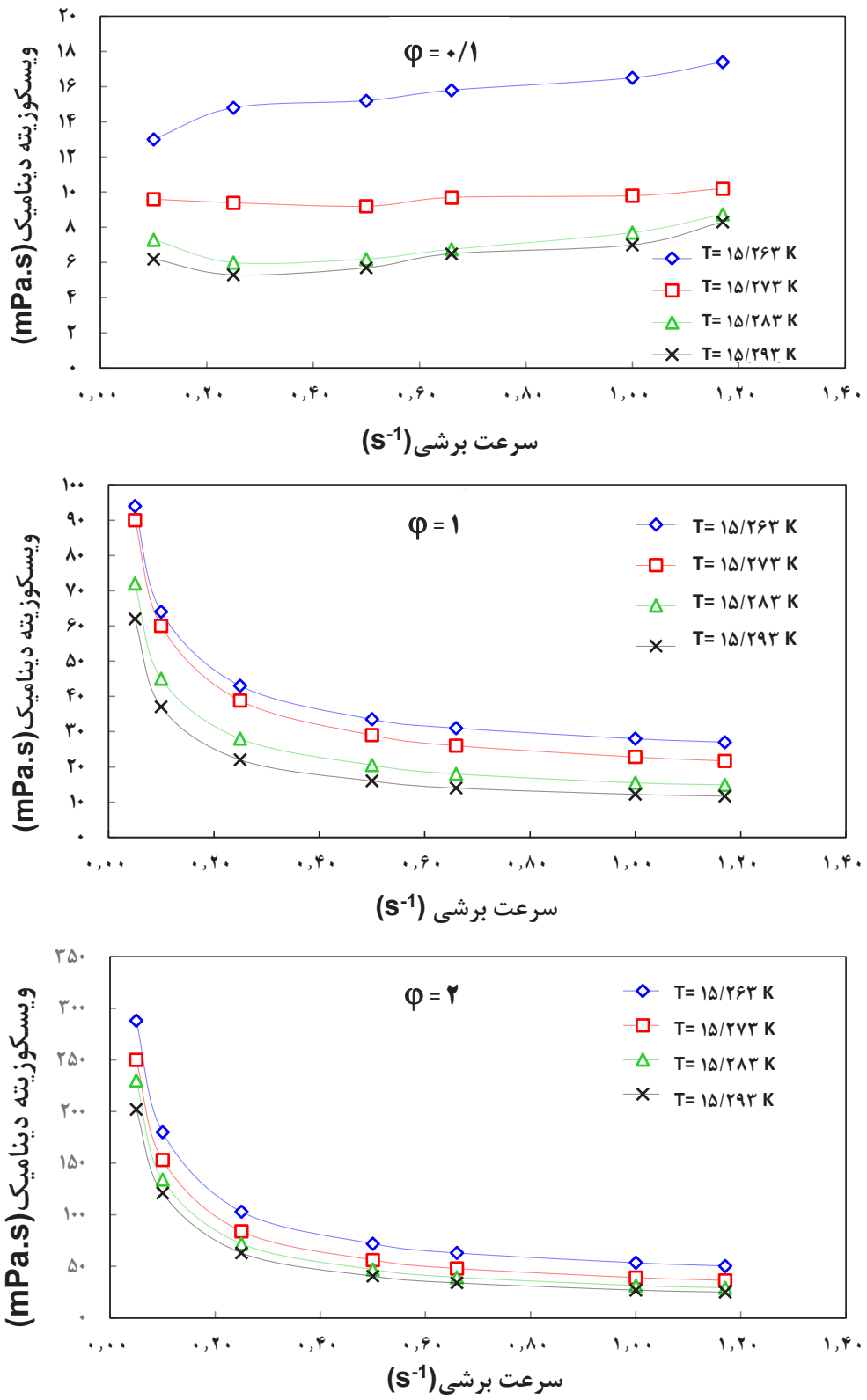
نمونه‌هایی با کسرهای حجمی جامد کمتر از ۰/۱ درصد رفتار رئولوژیکی متفاوتی را نشان می‌دهد. برای کسر حجمی جامد ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد، تغییر ویسکوزیته در برابر نرخ برشی ناچیز است و مقادیر ویسکوزیته تقریباً ثابت می‌ماند. وقتی که نرخ برش افزایش می‌یابد نانوسیال هیبریدی متمایل به رفتار نیوتنی است. رابطه تقریباً خطی بین تنش برشی و نرخ برشی در این دما تأیید می‌شود. برای نانوسیالات هیبریدی با کسرهای حجم جامد ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد، در دمای زیر صفر)دمای برابر با ۲۶۳ کلوین)، منحنی‌های جریان برشی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت برش، مقادیر ویسکوزیته تا حدی افزایش می‌یابد و این نشان‌دهنده رفتار غیر نیوتنی است.

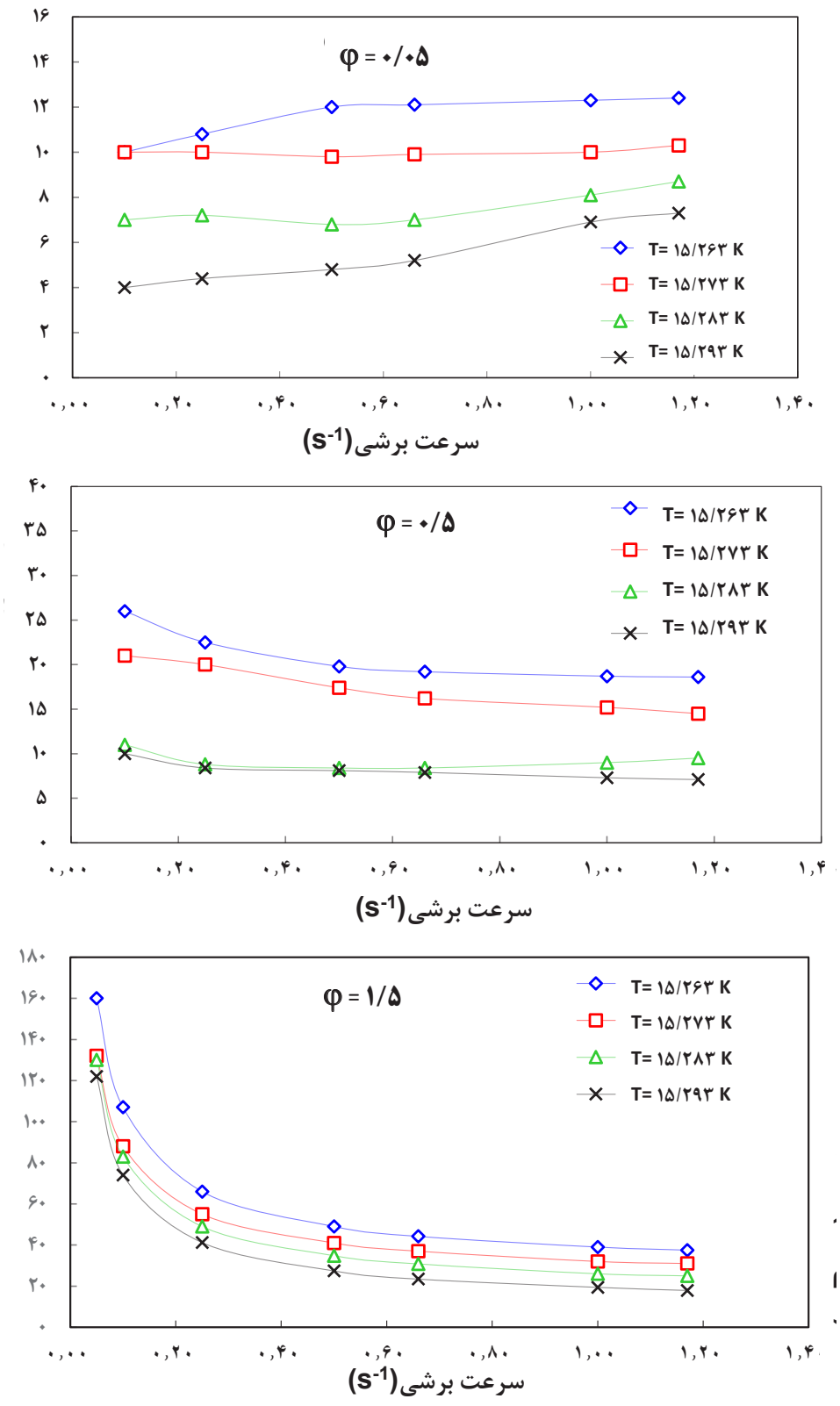
رفتار شگفت‌آور نانوسیال در دمای زیر صفر قبلاً توسط برخی محققان گزارش شده است [۲۴ و ۳۶]. در تحقیق حاضر، این پدیده را می‌توان به وجود اسید اولئیک نسبت داد. در این مطالعه اسید اولئیک به عنوان ماده فعال سطحی به سیال پایه اضافه می‌شود. در دماهای پایین نقطه ریزش[5] و نقطه ابر[6] از شاخص‌های مهم سیالیت اسید اولئیک به عنوان یک ماده فعال سطحی غیریونی هستند. همانطور که در جدول ۵ گزارش شده است، نقطه ابر اسید اولئیک ۱± ۲۸۳/۱۵ کلوین است، یعنی دمایی که مایع در اثر تبلور تحت سرمایش شروع به ابری شدن می‌کند. نقطه ابر، احتمال وجود ماده فعال سطحی را به عنوان ذرات جامد در سیال پایه نشان می‌دهد. اسید اولئیک در دماهای کمتر از نقطه ابر دیگر به طور کامل در سیال پایه قابل حل نیست و منجر به ایجاد حالت ابری می‌شود. نقطه ریزش اسید اولئیک ۱۵±۲۷۳/۱ کلوین است، یعنی دمایی که در آن خصوصیات جریان تغییر می‌کند [۲۸]. در دمای زیر صفر، اسید اولئیک تمایل به تجمع و تشکیل ساختارهای بلوری ماکرو دارد که منجر به محدود شدن جریان ساده سیستم و افزایش اصطکاک داخلی و در نتیجه افزایش ویسکوزیته می‌شود [۲۴]. علاوه بر این، افزایش گرانروی در دمای زیر صفر را می‌توان به نانوصفحات گرافن به دلیل دارا بودن ساختارهای منحصر به فرد و ویژگی‌های ذاتی آن نسبت داد. با رسوب اسید اولئیک به عنوان فاز دوم، نانوصفحات گرافن می‌توانند تجمع یافته و خوشه‌های آبی تشکیل دهند [۳۷].

بنی‌شریف و همکاران [۲۳] بر روی نانوسیالات مبتنی بر مخلوط آب اتیلن گلیکول حاوی نانوذرات Fe_3O_4 با غلظت حجمی ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد در دامنه دمایی ۲۵۳/۱۵ تا ۲۹۳/۱۵ کلوین مطالعه کرد و در دامنه دمائی ۲۶۳/۱۵ تا ۲۹۳/۱۵ کلوین رفتار نیوتنی و به ازای دمای ۲۵۳/۱۵ کلوین رفتار غیر نیوتنی مشاهده نمودند.

1 consistency index
2 power law index
3 shear–thinning
4 Shear–thickening

5 pour point
6 cloud point


φ = ۰/۱
φ = ۱
φ = ۲
T= ۱۵/۲۶۳ K
T= ۱۵/۲۷۳ K
T= ۱۵/۲۸۳ K
T= ۱۵/۲۹۳ K
ویسکوزیته دینامیک (mPa.s)
سرعت برشی (s-1)



شکل ۸. ویسکوزیته دینامیک به ازای نرخ برشی و کسر حجمی‌های ۰/۰۵، ۰/۱ ، ۰/۵ ، ۱، ۱/۵ و ۲ در دماهای مختلف

Fig. 8. Dynamic viscosity versus shear rate and volume fraction of 0.05, 0.1, 0.5, 1, 1.5 and 2 at different temperatures

کولکارنی و همکاران نانوسیالات مبتنی بر نانوذرات CuO در یک مخلوط ۴۰:۶۰ آب/اتیلن گلیکول را مطالعه نمودند و روند مشابهی را گزارش کردند. بر مبنای این مطالعه نانوسیال در دامنه دمایی ۲۳۸/۱۵ تا ۳۲۳/۱۵ کلوین رفتار نیوتنی را نشان می‌دهد و در دمای ۲۵۳/۱۵ کلوین ویسکوزیته نانوسیال با افزایش سرعت برشی کاهش می‌یابد که نشان دهنده رفتار رقیق‌گردانی برش است.

مطابق با شکل ۸ نانو سیالات هیبریدی با کسرهای حجمی جامد بالاتر(کسر حجمی در محدوده ۰/۵ تا ۲/۵)، در دمای زیر صفر (دمای برابر با ۲۶۳ کلوین) رفتار رقیق گردانی برش را نشان می‌دهد و ویسکوزیته با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد. رفتار نازک شدن برشی غیر نیوتنی مشاهده شده در غلظت‌های بالا در ۲۶۳/۱۵ کلوین به جذب مولکول‌های اسید اولئیک در سطوح نانوذره نسبت داده می‌شود، که باعث کاهش میزان انجماد اسید اولئیک در دمای پایین می‌شود. از طرف دیگر، تشکیل لایه جذب شده ناشی از وجود اسید اولئیک در سیال پایه، منجر به برهم کنش دافع استریک بین ذرات نانو می‌شود که ویسکوزیته را کاهش می‌دهد [۳۸]. در نتیجه، با وجود رفتار منحصر به فرد اسید اولئیک در دمای زیر صفر، رفتار نازک شدن برش برای غلظت‌های بالاتر نانوذرات به دست آمد.

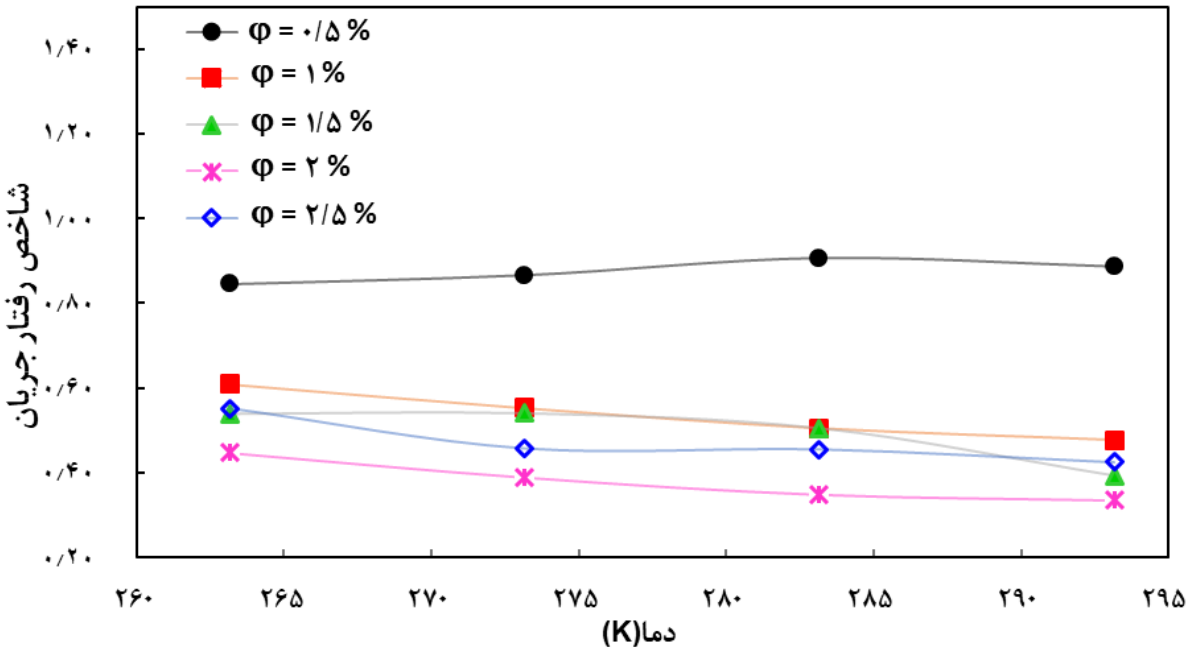
همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، افزودن نانوذرات حتی در کسری با حجم کم به سیال پایه، باعث افزایش ویسکوزیته به طور قابل توجهی می‌شود. ویسکوزیته عامل اصلی انتقال حرکت بین لایه‌های سیال است. به دلیل فعل و انفعالات بین ذرات نانو و سیال پایه، با افزودن ذرات نانو ویسکوزیته مایع پایه افزایش می‌یابد. ویسکوزیته نانوسیال با افزایش کسر حجمی بالا می‌رود. دلیل آن را اینگونه می‌توان توضیح داد که با افزودن نانوذرات به سیال پایه فعل و انفعالات بین ذرات جامد و مولکول‌های سیال بیشتر شده و در نتیجه ویسکوزیته افزایش می‌یابد. افزایش مقدار ذرات جامد در یک مقدار معین از سیال پایه به دلیل نیروهای واندروالس بین آنها، نانوخوشه‌های بزرگ‌تری را ایجاد می‌کند. این نانوخوشه‌ها از حرکت آسان لایه‌های آب و اتیلن گلیکول بر روی یکدیگر جلوگیری کرده سبب افزایش چشمگیر ویسکوزیته می‌شوند. تأثیر غلظت نانوذرات بر روی ویسکوزیته به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین باید توجه داشت که رابطه بین ویسکوزیته و غلظت نانوذرات مشخص نیست. اکثر مطالعات تجربی موجود نشان می‌دهد که افزایش غلظت ذرات باعث افزایش ویسکوزیته نانوسیالات هیبریدی می‌شود. با این حال، برخی گزارش‌ها ادعا می‌کنند که برخی از مخلوط‌ها اثر روانکاری دارند و در نتیجه باعث کاهش ویسکوزیته می‌شوند. مشخص شد که این اثر روانکاری وابسته به غلظت است و در غلظت‌های کم بارزتر است [۴۱].

دما مهمترین و تأثیرگذارترین پارامتر در ویسکوزیته است. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، ویسکوزیته نانوسیال هیبریدی با افزایش دما کاهش می‌یابد. این امر به این دلیل است که با افزایش دما، جاذبه بین مولکولی بین نانوذرات و مایعات پایه آنها ضعیف می‌شود. با فرض تعلیق یکنواخت، در کسر حجمی بالای جامد، تعداد ذرات موجود در حجم معینی از نانوسیال هیبریدی بیشتر است و فاصله بین ذرات جامد در سیال پایه نسبتاً کمتر از غلظت‌های پایین‌تر است. اکثر مطالعات انجام شده [۱۴ و ۱۳ و ۴۲] روند کاهشی ویسکوزیته را با افزایش دما بیان کرده‌اند. اگرچه، برخی از پژوهشگران [۴۳] دریافتند که افزایش دما تاثیری بر ویسکوزیته نسبی ندارد. ژائو و همکاران [۴۳] ویسکوزیته نانوسیالات آب/ آلومینا را با کسرهای مختلف حجمی (٪ ۱/۳۱،٪ ۲/۷۲،٪ ۴/۲۵ و ٪۵/۹۲) تحت دماهای مختلف از ۲۹۶ تا ۳۱۳ کلوین مطالعه کرد و گزارش داد که گرانروی بسیار به کسر حجمی نانوذرات Al_2O_3 وابسته است ولی با تغییر دما، ویسکوزیته ثابت می‌ماند. چن و همکاران [۴۴] در مطالعات خود بر روی نانوسیال اتیلن‌گلیکول TiO_2 /در محدوده دمایی ۲۹۳ تا ۳۳۳ کلوین هیچ تفاوتی در ویسکوزیته نسبی با افزایش دما گزارش نکرد.

همانطور که قبلاً ذکر شد، نمونه‌های نانوسیال هیبریدی با غلظت بالا(کسر حجمی در محدوده ۰/۵ تا ۲/۵) رفتار غیر نیوتنی در تمام دماهای مورد مطالعه دارند. سیال غیر نیوتنی از معادله (۴) تبعیت می‌کنند. مطابق شکل ۸، شاخص استحکام سیال و شاخص رفتار جریان به کسر حجمی نانوذرات و درجه حرارت بستگی دارد. با استفاده از معادله (۵) می‌توان شاخص استحکام سیال و شاخص رفتار جریان را تعیین کرد.

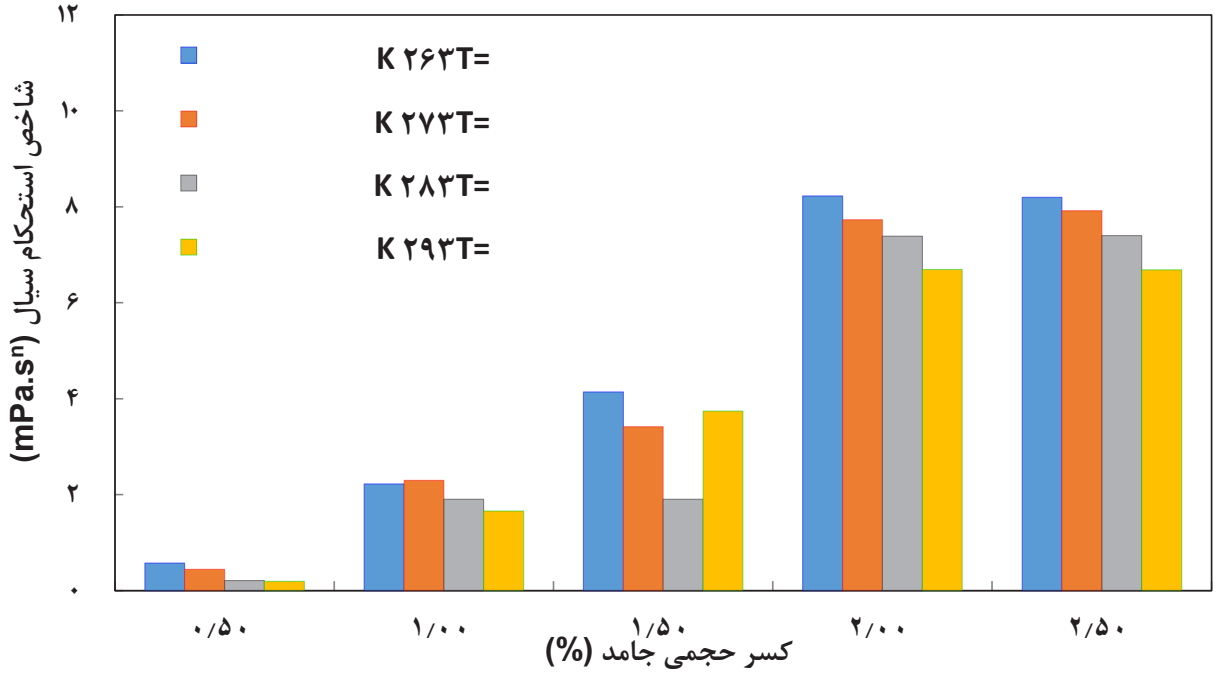
در شکل‌های ۹ و ۱۰ شاخص رفتار جریان و شاخص استحکام سیال به عنوان تابعی از کسر حجمی جامد در دماهای مختلف به تصویر کشیده شده است. مطابق شکل ۹، در همه دما، شاخص رفتار جریان کمتر از یک است که نشانگر سیالات غیرنیوتنی با رفتار رقیق‌شدن برش است.

بر مبنای معادله (۵)، افزایش نرخ برش منجر به کاهش ویسکوزیته می‌شود. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، در کسر حجمی جامد ثابت، افزایش دما تأثیر عمده‌ای بر شاخص رفتار جریان ندارد. شاخص رفتار جریان برای یک سیال نیوتنی ۱ است. در نتیجه، هر چه مقدار شاخص رفتار جریان کمتر از یک باشد، رفتار سیال از رفتار نیوتنی منحرف می‌شود. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، حداکثر مقدار شاخص رفتار



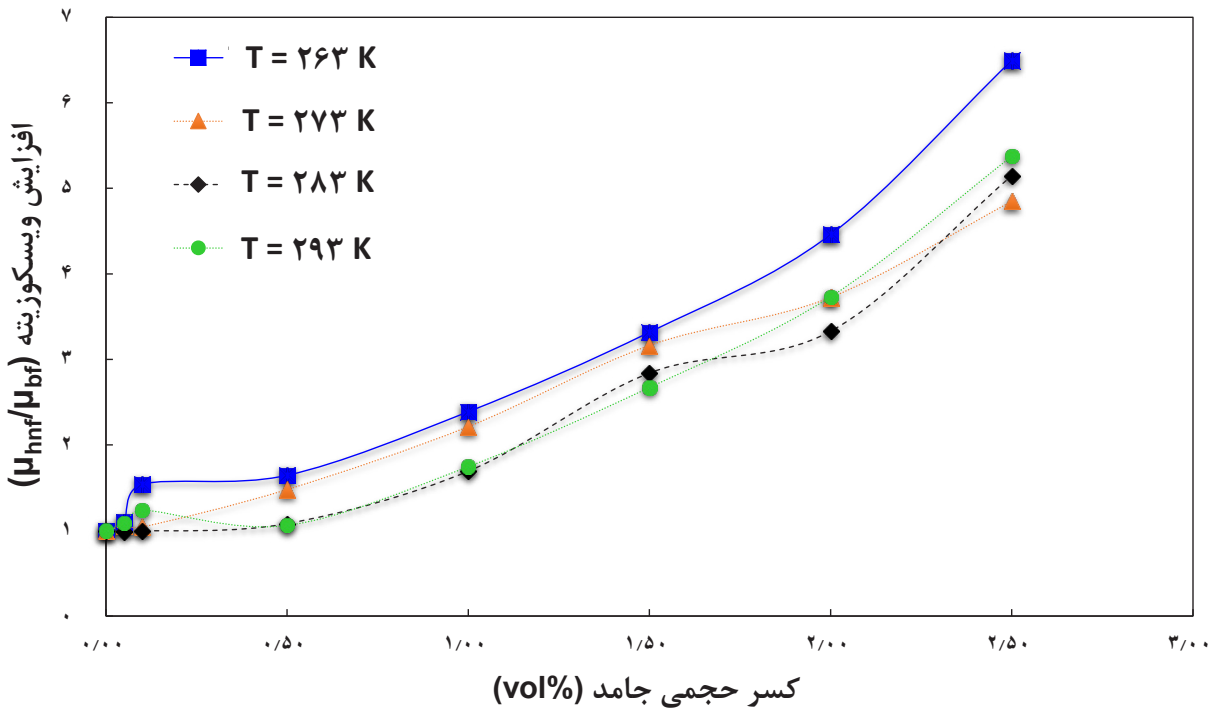
شکل ۹ .شاخص رفتار جریان در دماها و کسرحجمی‌های مختلف

Fig. 9. Power law index versus solid volume fraction at different temperatures



شکل ۱۰.شاخص استحکام سیال در دماها و کسرحجمی‌های مختلف

Fig. 10. Consistency index versus solid volume fraction at different temperatures



شکل ۱۱.افزایش ویسکوزیته نانوسیال نسبت به سیال پایه بر حسب کسر حجمی جامد در دماهای مختلف.

Fig. 11. Viscosity enhancement in viscosity of nanofluid relative to base fluid in terms of solid volume fraction at different temperatures.

جریان به ازای کسر حجمی برابر با ۰/۵ بدست می‌آید ، که نزدیک به یک است. این امر نشان می‌دهد که نانوسیالات هیبریدی با کسرهای حجمی جامد کمتر از ۰/۵ درصد حجمی رفتار نیوتنی را نشان می‌دهد. این نتیجه با نتایج به دست آمده از شکل ۸ سازگار است.

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با کاهش دما و افزایش کسر حجمی جامد، شاخص استحکام سیال افزایش می‌یابد. با افزایش کسر حجمی جامد، تعداد نانوذرات افزایش می‌یابد و در نتیجه حرکات خود به خودی نانوذرات و برخورد با مولکول‌های سیال پایه ایجاد می‌شود. در مقابل، افزایش تعداد نانوذرات (افزایش غلظت نانوذرات) باعث کاهش فاصله بین ذرات نانو و احتمال تجمع ذرات نانو می‌شود. با افزایش کسر حجمی نانوذرات، برخورد بین ذرات افزایش یافته و احتمال آگلومراسیون افزایش می‌یابد و باعث افزایش ویسکوزیته و شاخص استحکام سیال می‌شود. با افزایش دما، سطح انرژی مولکول‌ها افزایش می‌یابد و باعث می‌شود مولکول‌ها بتوانند راحت‌تر بتوانند بر نیروی چسبندگی غلبه کنند. با افزایش دما، مقاومت در برابر حرکت گرانروی کاهش می‌یابد و بنابراین، طبق معادله (۵) که رابطه مستقیمی بین شاخص استحکام سیال و ویسکوزیته نشان داد، شاخص استحکام سیال کاهش می‌یابد.

اگرچه خصوصیات حرارتی نانوسیالات هیبریدی قابل توجه است، اما استفاده از آنها معایبی دارد، از جمله اثرات اصطکاکی بالا و نیاز به قدرت پمپاژ. افزایش ویسکوزیته علت اصلی مسائل فوق است.

شکل ۱۱ ویسکوزیته نسبی برای غلظت‌های مختلف نانوذره را نسبت به سیال پایه در دماهای مختلف نشان می‌دهد. در سیالات ویسکوزیته به خاطر نیروهای واندروالس بین مولکول‌ها ایجاد می‌شود. مطابق با این نمودار، افزایش غلظت نانوذرات باعث افزایش ویسکوزیته نسبی نانوسیال هیبریدی می‌شود. این امر به دلیل دانسیته بیشتر نانوذرات در مقایسه با سیال پایه است. با افزودن نانوذرات به سیال پایه، فعل و انفعالات بین ذرات جامد و مولکول‌های سیال بیشتر شده و در نتیجه ویسکوزیته افزایش می‌یابد. در کسرهای وزنی بالاتر احتمال کلوخه شدن ذرات جامد در داخل سیال پایه بیشتر شده و در دماهای بالاتر پیوندهای ایجاد شده بین ذرات جامد بیشتر گسسته می‌شود و در نتیجه نسبت به دماهای پایین‌تر تغییرات بیشتری در

ویسکوزیته ایجاد می‌کند. همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، نسبت ویسکوزیته نانوسیال‌های هیبریدی نیز وابسته به دما است. با افزایش دما ، نسبت ویسکوزیته نانوسیالات هیبریدی کاهش می‌یابد. دلیل آن را اینگونه می‌توان توضیح داد که با افزایش دما، تجمع‌های بین مولکولی و نیروهای چسبندگی بین مولکول‌ها و در نتیجه نیروی واندروالس ضعیف‌تر می‌شود و بنابراین ویسکوزیته کاهش می‌یابد. اثر نیروهای واندروالس در افزایش ویسکوزیته با کسر حجمی در دماهای پایین مشهودتر است. زیرا در دماهای بالا ذرات می‌توانند بر نیروهای واندروالس غلبه کرده و در نتیجه ویسکوزیته به نسبت دماهای پایین با افزایش کسر حجمی رشد کمتری خواهد داشت. کاهش ویسکوزیته با افزایش دما، پتانسیل استفاده از نانوسیالات هیبریدی را به عنوان خنک کننده‌های برتر در کاربردهای حرارتی نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر دما و غلظت نانوذرات متشکل از نانوذرات آلومینا و نانوصفحات گرافن بر رفتار رئولوژیکی سیال پایه متشکل از آب و اتیلن گلیکول مورد مطالعه قرار گرفت. در تهیه نانوسیال هیبریدی، مخلوط آب–اتیلن گلیکول با نسبت ۵۰:۵۰ درصد حجمی در دمای ۲۹۸ کلوین به عنوان سیال پایه در نظر گرفته شد. نانوذرات که از حجم مساوی نانو ذرات آلومینا و نانوصفحات گرافن تشکیل شده بودند در مقدار معینی از سیال پایه تعلیق شدند. همچنین به میزان ۰/۲ درصد حجمی اولئیک اسید و ۰/۲درصد وزنی سدیم دودسیل سولفونات به عنوان ماده فعال سطحی برای تثبیت و پراکندگی نانوذرات به سیال پایه اضافه شدند. نانوسیالات با استفاده از روش دو مرحله‌ای تهیه شدند. کسرحجمی نانوذرات در این تحقیق ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد حجمی لحاظ گردید و همچنین جهت بررسی اثر دما، دماهای مورد آزمایش در بازه دمائی ۲۹۳–۲۶۳ کلوین طراحی شد. بررسی مورفولوژی و ریزساختار نانوذرات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ الکترونی عبوری انجام شد. تشخیص فازهای موجود در نانوذرات به وسیله آنالیز تفرق اشعه ایکس انجام شد. همچنین مساحت ویژه و تخلخل نانوذرات از طریق آنالیز اندازه‌گیری تخلخل سنجی جذب و واجذب تعیین شد. پس از سنتز نانوسیال هیبریدی آب – اتیلن گلیکول / نانو گرافن – نانو آلومینا، ویسکوزیته دینامیک نانوسیالات هیبریدی اندازه‌گیری و با سیال پایه مقایسه شد و نتایج زیر حاصل شد:

[1] نتایج نشان داد که خصوصیات رئولوژیکی نانوسیال هیبریدی آب–اتیلن گلیکول/نانو گرافن–نانو آلومینا خصوصاً در دماهای زیر صفر به شدت به دما و غلظت نانوذرات وابسته است.

[2] نتایج ویسکوزیته دینامیکی اندازه‌گیری نانوسیالات هیبریدی نشان داد که نمونه‌هایی با کسرهای حجمی جامد کمتر از ۰/۵درصد رفتار نیوتنی داشتند، در حالی که نمونه‌های با کسرهای حجمی جامد بالاتر رفتار غیر نیوتنی داشتند.

[3] نانوسیالات هیبریدی رفتار رئولوژیکی متفاوتی را در دمای زیر صفر و غلظت کم نشان می‌دهد که به وجود اسید اولئیک و نانوصفحات گرافن نسبت داده شود. نانوسیال مورد مطالعه در کسرهای حجمی جامد برابر با ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد، در دماهای بالاتر از صفر درجه سانتیگراد رفتار نیوتنی را نشان می‌دهد. ولی نانوسیالات هیبریدی با کسرهای حجمی جامد برابر با ۰/۰۵ و ۰/۱ درصد، در دمای زیر صفر(دمای برابر با ۲۶۳ کلوین)، رفتار غیرنیوتنی دارند.

[4] افزودن نانوذرات به سیال پایه باعث افزایش ویسکوزیته به طور قابل‌توجهی می‌شود. همچنین ویسکوزیته نانوسیال هیبریدی با افزایش دما کاهش می‌یابد.

منابع مالی/حمایت‌ها

این پژوهش تحت حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور–معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری با شماره طرح ۹۷۰۱۷۹۶۴ انجام شده است.

منابع

[1] S. Chakraborty, P.K. Panigrahi, Stability of nanofluid: A review, Applied Thermal Engineering, 174 (2020) 115259.

[2] Mahbubul, R. Saidur, M. Amalina, Latest developments on the viscosity of nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55(4) (2012) 874-885.

[3] D. Dey, P. Kumar, S. Samantaray, A review of nanofluid preparation, stability, and thermo-physical properties, Heat Transfer—Asian Research, 46(8) (2017) 1413-1442.

[4] L.S. Sundar, K. Sharma, M. Naik, M.K. Singh, Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: a review, Renewable and sustainable energy reviews, 25 (2013) 670-686.

[5] J.R. Satti, D.K. Das, D. Ray, Investigation of the thermal conductivity of propylene glycol nanofluids and comparison with correlations, International Journal of Heat and Mass Transfer, 107 (2017) 871-881.

[6] N. Tan, Y. Zhang, B. Wei, C. Zou, Experimental investigation on optical and thermal properties of propylene glycol–water based nanofluids for direct absorption solar collectors, Applied Physics A, 124(8) (2018) 1-10.

[7] H. Moayedi, Numerical analysis of the effect of configurations of double rotating cylinders on heat transfer enhancement hybrid nanofluid flow in a vented cavity, Amirkabir journal of mechanical engineering, 2021.

[8] G. Sekrani, S. Poncet, Ethylene-and propylene-glycol based nanofluids: a litterature review on their thermophysical properties and thermal performances, Applied Sciences, 8(11) (2018) 2311.

[9] F. Jabbari , A.Rajabpour, S.Saedodin , nvestigation Dynamic Viscosity of Water-Single Wall Carbon Nanotube Nanofluid and Its Effective Factors By Molecular Dynamics Simulation, Amirkabir journal of mechanical engineering, 51(4)(2019) 91-100.

[10] M.H. Esfe, The investigation of effects of temperature and nanoparticles volume fraction on the viscosity of copper oxide-ethylene glycol nanofluids, Periodica Polytechnica Chemical Engineering, 62(1) (2018) 43-50.

[11] I. Kazemi, M. Sefid, M. Afrand, A novel comparative experimental study on rheological behavior of mono & hybrid nanofluids concerned graphene and silica nano-powders: Characterization, stability and viscosity measurements, Powder Technology, 366 (2020) 216-229.

[12] S. Atashrouz, M. Mozaffarian, G. Pazuki, Viscosity and rheological properties of ethylene glycol+ water+ Fe 3 O 4 nanofluids at various temperatures: Experimental and thermodynamics modeling, Korean Journal of Chemical Engineering, 33(9) (2016) 2522-2529.

[13] B. Aladag, S. Halelfadl, N. Doner, T. Maré, S. Duret, P. Estellé, Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperatures, Applied energy, 97 (2012) 876-880.

[14] D.P. Kulkarni, D.K. Das, S.L. Patil, Effect of temperature on rheological properties of copper oxide nanoparticles dispersed in propylene glycol and water mixture, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 7(7) (2007) 2318-2322.

[15] P.K. Namburu, D.P. Kulkarni, D. Misra, D.K. Das, Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture, Experimental Thermal and Fluid Science, 32(2) (2007) 397-402.

[16] M. Naik, G.R. Janardhana, K.V.K. Reddy, B.S. Reddy, Experimental investigation into rheological property of copper oxide nanoparticles suspended in propylene glycol–water based fluids, ARPN J. Eng. Appl. Sci, 5(6) (2010) 29-34.

[17] A. Banisharif, M. Aghajani, S. Van Vaerenbergh, P. Estellé, A. Rashidi, Low Temperature Viscosity of Nanofluids with Water: Ethylene Glycol Base Fluid, in: 1st International Conference on Nanofluids (ICNf2019) & 2nd European Symposium on Nanofluids (ESNf2019), 2019.

[18] D.P. Kulkarni, D.K. Das, R.S. Vajjha, Application of nanofluids in heating buildings and reducing pollution, Applied Energy, 86(12) (2009) 2566-2573.

[19] S.A. Standard, Standard Test Method for Aerodynamic Acceptance of SAE AMS 1424 and SAE AMS 1428 Aircraft Deicing/Anti-icing Fluids, AS5900 Rev. A.(2003).

[20] S.K. Thomas, R.P. Cassoni, C.D. MacArthur, Aircraft anti-icing and de-icing techniques and modeling, Journal of aircraft, 33(5) (1996) 841-854.

[21] N. Salih, J. Salimon, E. Yousif, The physicochemical

and tribological properties of oleic acid based triester biolubricants, Industrial Crops and Products, 34(1) (2011) 1089-1096.

[22] D.R. Lide, Hardness of minerals and ceramics, CRC Handbook of Chemistry and Physics, (2005) 2313-2314.

[23] A. Banisharif, M. Aghajani, S. Van Vaerenbergh, P. Estellé, A. Rashidi, Thermophysical properties of water ethylene glycol (WEG) mixture-based Fe3O4 nanofluids at low concentration and temperature, Journal of Molecular Liquids, 302 (2020) 112606.

[24] Z.Y. Zhou, Q.Q. Di, B. Liu, X.Y. Ma, B.H. Cai, Experimental study on the surface tension of Al2O3-H2O nanofluid, in: Materials Science Forum, Trans Tech Publ, 2016, pp. 394-400.

[25] G. Lu, Y.-Y. Duan, X.-D. Wang, Surface tension, viscosity, and rheology of water-based nanofluids: a microscopic interpretation on the molecular level, Journal of nanoparticle research, 16(9) (2014) 1-11.

[26] M. Afrand, D. Toghraie, B. Ruhani, Effects of temperature and nanoparticles concentration on rheological behavior of Fe3O4–Ag/EG hybrid nanofluid: an experimental study, Experimental Thermal and Fluid Science, 77 (2016) 38-44.

[27] H.W. Xian, N.A.C. Sidik, S.R. Aid, T.L. Ken, Y. Asako, Review on preparation techniques, properties and performance of hybrid nanofluid in recent engineering applications, Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 45(1) (2018) 1-13.

[28] M. Owen, H. Kennedy, ASHRAE Handbook–Fundamentals (IP Edition), American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Inc(2009).

[29] P.D. Shelke, A.S. Rajbhoj, M.S. Nimase, G.A. Tikone, B.H. Zaware, S.S. Jadhav, An efficient, solvent free one pot synthesis of tetrasubstitued imidazoles catalyzed by nanocrystalline γ-alumina, Orient. J. Chem, 32(4) (2016) 2007-2014.

[30] Á.B. Sifontes, B. Gutierrez, A. Mónaco, A. Yanez, Y. Díaz, F.J. Méndez, L. Llovera, E. Cañizales, J.L. Brito, Preparation of functionalized porous nano-γ-Al2O3 powders employing colophony extract, Biotechnology Reports, 4 (2014) 21-29.

[31] A.K. Darban, Y. Kianinia, E. Taheri-Nassaj, Synthesis of nano-alumina powder from impure kaolin and its application for arsenite removal from aqueous solutions, Journal of Environmental Health Science and Engineering, 11(1) (2013) 1-11.

[32] A. Sayah, F. Habelhames, A. Bahloul, B. Nessark, Y. Bonnassieux, D. Tendelier, M. El Jouad, Electrochemical synthesis of polyaniline-exfoliated graphene composite films and their capacitance properties, Journal of Electroanalytical Chemistry, 818 (2018) 26-34.

[33] R. Siburian, H. Sihotang, S.L. Raja, M. Supeno, C. Simanjuntak, New route to synthesize of graphene nano sheets, Oriental Journal of Chemistry, 34(1) (2018) 182.

[34] S. Zainon, W. Azmi, Recent Progress on Stability and Thermo-Physical Properties of Mono and Hybrid towards Green Nanofluids, Micromachines, 12(2) (2021) 176.

[35] H.W. Xian, N.A.C. Sidik, R. Saidur, Impact of different surfactants and ultrasonication time on the stability and thermophysical properties of hybrid nanofluids, International Communications in Heat and Mass Transfer, 110 (2020) 104389.

[36] F. Rubbi, L. Das, K. Habib, N. Aslfattahi, R. Saidur, M.T. Rahman, State-of-the-art review on water-based nanofluids for low temperature solar thermal collector application, Solar Energy Materials and Solar Cells, 230 (2021) 111220.

[37] F. Rubbi, K. Habib, R. Saidur, N. Aslfattahi, S.M. Yahya, L. Das, Performance optimization of a hybrid PV/T solar system using Soybean oil/MXene nanofluids as A new class of heat transfer fluids, Solar Energy, 208 (2020) 124-138.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. Nayebpashaee , S. M. M.Hadavi, Study of Rheological Behavior of Water-Ethylene Glycol /Nano Al_2O_3 –Nano Graphene Hybrid Nanofluid at Low Temperatures , Amirkabir J. Mech Eng., 54(4) (2022) 905-924.

DOI: 10.22060/mej.2021.20275.7206