



# مطالعه آزمایشگاهی لزجت نانو سیال هیبریدی اکسید منیزیم و نانولوله کربنی در سیال پایه آب - اتیلن گلیکول

اکبر زارعی<sup>1</sup>، محمد اکبری<sup>2\*</sup>

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد  
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد  
\* نجف آباد، صندوق پستی 8514143131، makbari@pmc.iaun.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 21 اسفند 1394  
پذیرش: 25 اردیبهشت 1395  
ارائه در سایت: 31 خرداد 1395

کلید واژگان:

نانوسیال هیبریدی  
لزجت دینامیکی  
دما  
کسر حجمی

## چکیده

نانوسیالها از تعلیق ذرات بسیار ریز با مقیاس نانو در سیال پایه تهیه می‌شوند و قادر به افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت در مقایسه با سیالات خالص می‌باشند. از آنجایی که لزجت دینامیکی در کاربردهای مرتبط با نانوسیال و مباحث انتقال حرارت و انرژی اهمیت زیادی دارد، در این مطالعه بررسی آزمایشگاهی اثرات کسر حجمی و دما بر روی لزجت دینامیکی نانوسیال ترکیبی اکسید منیزیم و نانولوله کربنی در مخلوط هیبریدی آب و اتیلن گلیکول ارائه شده است. نانوسیال در کسر حجمی‌های 0.025، 0.05، 0.1، 0.2، 0.4، 0.6 و 0.8 درصد آماده شده و آزمایش‌ها در محدوده دمای بین 25 تا 60 درجه سانتیگراد انجام شده است. به علاوه، به بررسی رفتار رئولوژیکی نانوسیال در نرخ برش‌های مختلف رفتار نیوتونی مشاهده شد. با توجه به ضعف روابط تحلیلی موجود در پیش بینی لزجت دینامیکی این نانوسیال و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، یک رابطه جدید پیشنهاد شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی لزجت دینامیکی افزایش می‌یابد. این افزایش در دماهای پایین در مقایسه با دماهای بالاتر چشمگیرتر است. همچنین در دمای 60 درجه سانتیگراد کسر حجمی تأثیر زیادی بر روی لزجت دینامیکی نانوسیال ندارد و این می‌تواند به عنوان یک دستاورد مهم در کاربردهای صنعتی و مهندسی در نظر گرفته شود.

## Experimental investigation of viscosity of MgO-MWCNTs hybrid nanofluid in Water- EG base fluid

Akbar Zareie, Mohammad Akbari\*

Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran  
\* P.O.B. 8514143131, Najafabad, Iran, makbari@pmc.iaun.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 11 March 2016  
Accepted 14 May 2016  
Available Online 20 June 2016

**Keywords:**  
Nanofluid  
dynamic viscosity  
Temperature  
solid volume fractions

### ABSTRACT

Nano-fluids are prepared by suspending the ultrafine nanoscale particles in the base fluid and can be substantially enhanced by the heat transfer rate compared to pure fluids. Because of the great importance of dynamic viscosity applications in related applications of nanofluids in heat transfer and energy systems, experimental investigation of the effects of volume concentration and temperature on dynamic viscosity of MgO – MWCNTs/EG-water hybrid nanofluid has been presented in this study. The nanofluids were prepared with solid volume fractions of 0.025%, 0.05%, 0.1%, 0.2%, 0.4%, 0.6% and 0.8% and experiments were performed in the temperature range of 25 to 60°C. In addition, by investigating the rheological behavior of nanofluid against shear rate, the Newtonian behavior was observed. Regarding the weakness of the previous correlations for predicting the dynamic viscosity of this nanofluid and according to the experimental data, a new equation was proposed. The results showed that by increasing the solid volume fraction, the dynamic viscosity increased. This increase is more tangible at lower temperatures compared with higher temperatures. Moreover, at temperature of 60°C, the solid volume fraction does not have a significant effect on the dynamic viscosity of the nanofluid, an issue considered as an important achievement in the industrial and engineering applications.

### 1- مقدمه

است افزودن نانو ذرات با خواص حرارتی بالا به سیال عامل و ایجاد ماده‌ای به نام نانو سیال است. واژه نانو سیال اولین بار توسط چوی [1] برای معرفی ذرات بسیار کوچک (نانوذرات با اندازه قطر کمتر از 100 نانومتر) که داخل سیال معلق گشته‌اند معرفی شد. در نانوسیال‌ها یک یا چند فاز جامد به سیال اضافه شده که موجب افزایش نرخ انتقال حرارت و تغییر در لزجت می‌شوند. برخی از نانوذرات مانند اکسید آلومینیوم، اکسید منیزیم و... به صورت اکسید فلزی هستند و به سادگی در مایعات پراکنده و معلق می‌شوند. برخی دیگر

عواملی چون اختلاف دما، سطح مقطع و ضریب انتقال حرارت پارامترهای تأثیرگذار بر میزان تبادل گرما در مبدل‌های حرارتی هستند. سیالات مختلفی مانند آب، اتیلن گلیکول و انواع روغن‌ها در سال‌های گذشته به عنوان سیال عامل در صنعت و طراحی مهندسی مورد استفاده قرار گرفته که مشکل عمده این سیالات رسانش حرارتی کم آن‌ها و کاهش نرخ انتقال حرارت است. یکی از روش‌های جدید که برای افزایش رسانش حرارتی این سیالات معرفی شده

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Zareie, M. Akbari, Experimental investigation of viscosity of MgO-MWCNTs hybrid nanofluid in Water- EG base fluid, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 199-204, 2016 (in Persian)

آزمایش 29 نانو متر بود. تحلیل‌ها نشان داد که لزجت با افزایش دما بصورت نمایی کاهش یافته و افزایش غلظت نانوذرات، افزایش لزجت را در بردارد. یامساوا و همکاران [6] کار خود را روی لزجت نانوذرات آلومینا و دی اکسید تیتانیوم معلق در اتیلن گلیکول و آب (80:20) در کسر حجمی‌های مختلف تا 4% و در دمای 15 تا 60 درجه سانتیگراد انجام دادند. پس از استخراج رابطه از نتایج آزمایش و مقایسه با روابط نظری دیگر محققین مشخص شد که روابط نظری جهت محاسبه لزجت نانوسیال‌ها مناسب نیستند. رابطه پیشنهاد شده تابعی از لزجت سیال پایه، دما و کسر حجمی نانوذرات بود. وسو و همکاران [7] به بررسی ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیال حاوی ذرات Cu-Zn و Zn، Cu در پایه روغن گیاهی پرداختند. در این تحقیق اندازه نانوذرات Zn و Cu، 60 نانومتر و ترکیب Zn-Cu، 70 نانومتر بوده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در کسر حجمی 0.5% ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال حاوی Zn، Cu و Zn-Cu به ترتیب 42، 36 و 48 درصد افزایش داشته است. همت و همکاران [8] به بررسی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال هیبریدی Ag-MgO در پایه آب در کسر حجمی‌های مختلف پرداختند. اندازه ذرات 25 و 40 نانومتر و تغییرات کسر حجمی بین 0 تا 2% بوده است. نتایج او نشان می‌دهد که در محدوده کسر حجمی 0% تا 2% ضریب انتقال حرارت 15.8% افزایش یافته است. اخیرا در یک مطالعه تجربی همت و سعدالدین [9] به بررسی لزجت نانوسیال اکسید روی - اتیلن گلیکول پرداختند. در این تحقیق تجربی از روش امواج فراصوت برای آماده سازی نانوسیال پایه اتیلن گلیکول حاوی نانوذرات اکسید روی با غلظت‌های حجمی مختلف استفاده شد. لزجت دینامیکی نانوسیال را در کسرهای حجمی مختلف از 0.25 تا 5% با استفاده از ویسکومتر بروکفیلد مجهز به حمام دما در درجه حرارت‌های مختلف اندازه‌گیری نمودند. در این آزمایش دما در محدوده 25°C تا 50°C برای لزجت در نظر گرفته شده که روابطی از نظر دما و کسر حجمی پیشنهاد شده است. در تحقیقی دیگر همت و همکاران [10] به بررسی خواص انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال آب- نانولوله کربنی دو جداره عامل دار هیدروکربنی در جریان مغشوش و کسر حجمی‌های متعدد نانوذرات پرداختند. براساس نتایج آزمایش مشاهده شد که مدل‌های تئوری لزجت پاسخگوی تخمین لزجت نانو سیال نیستند.

همانطور که ملاحظه شد تاکنون لزجت دینامیکی نانو سیال اکسید منیزیم و نانو لوله کربنی در سیال پایه آب و اتیلن گلیکول در کسرهای حجمی مختلف و دماهای متفاوت مورد بررسی قرار نگرفته و کار خاصی روی آن انجام نشده است. در این مقاله لزجت دینامیکی نانو سیال اکسید منیزیم و نانو لوله کربنی در سیال پایه آب و اتیلن گلیکول در کسرهای حجمی مختلف و دماهای متفاوت اندازه‌گیری شده و نتایج ارائه می‌شوند.

## 2- آماده سازی نانوسیال

نانوذرات اکسید منیزیم و نانولوله کربنی، که مشخصات آنها در جدول 1 ارائه شده است، از شرکت یو اس ریسرچ نانومتریال تهیه شد. اولین قدم در آماده سازی نانوسیال تعلیق و پایداری نانوذرات در سیال پایه است. در این تحقیق آب-اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه مورد استفاده قرار گرفته است. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اکسید منیزیم و نانولوله کربنی در جدول 1 آمده است.

نانوسیال اکسید منیزیم (50%) و نانو لوله کربنی (50%) در سیال پایه آب (60%) و اتیلن گلیکول (40%) در کسر حجمی‌های 0.025، 0.05، 0.1، 0.2، 0.4، 0.6 و 0.8 درصد به روش دو مرحله‌ای تهیه شده است. مقدار اکسید منیزیم

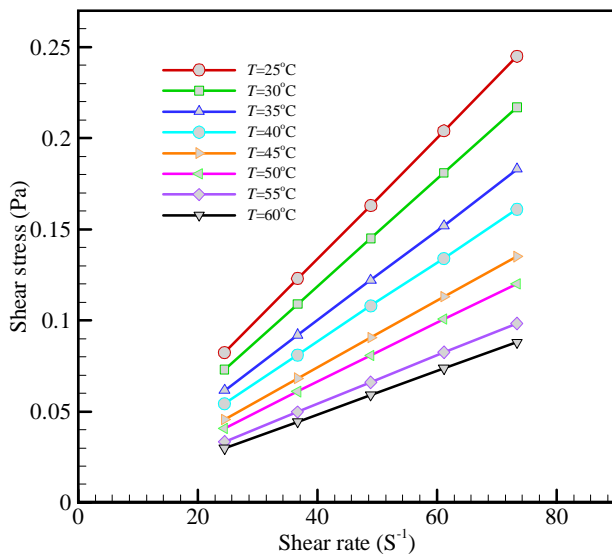
مانند الماس، نانولوله‌های کربنی و... موجب افزایش چشمگیری در انتقال حرارت نسبت به نانوذرات اکسیدی خواهند شد. بنابراین استفاده از این دو نوع نانو ماده به صورت همزمان می‌تواند ترکیبی پایدار با خواص ویژه حرارتی ایجاد کند. یکی از عوامل تاثیرگذار بر ضریب انتقال گرما لزجت است که نقش چشمگیری در روابط حاکم بر انتقال حرارت دارد. با اضافه کردن نانوذرات به سیالات پایه لزجت آنها نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. از آنجایی که لزجت پارامتری مهم در تعیین توان پمپاژ، عدد رایلی، عدد رینولدز و در نتیجه مقدار انتقال حرارت است، آزمایشات و پژوهش‌های متعددی پیرامون میزان لزجت و انتقال حرارت در نانو سیالات انجام شده است. اشگرف و همکاران [2] اثر دما و کسر حجمی نانوسیال ترکیبی دی اکسید سیلیسیوم و نانو لوله های کربنی در مخلوط آب و اتیلن گلیکول را بصورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری در بازه دمایی 27.5 تا 50 درجه سلسیوس و در کسرهای حجمی 0.0625، 0.025، 0.05، 0.075، 1، 1.5 و 2 درصد انجام شد. نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان داد که به طور کلی لزجت ظاهری با افزایش کسر حجمی، افزایش و با افزایش دما، کاهش می‌یابد. همچنین نتایج اندازه گیری در نرخ برش‌های مختلف نشان داد که سیال پایه از خود رفتار نیوتنی ولی نانوسیال رفتار غیر نیوتنی دارند.

حسینی پور و همکاران [3] رفتار انتقال حرارت جابجایی اجباری و افت فشار نانوسیال نانولوله‌های کربنی چند جداره بر پایه آب دیونیزه در حال جریان از طریق لوله مدور افقی تحت شرایط مرزی بار حرارتی دیواره ثابت را به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزودن مقدار بسیار کمی از نانولوله‌های کربنی به آب، ضریب انتقال حرارت جابجایی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین داده‌های افت فشار در غلظت‌ها و اعداد رینولدز مختلف بررسی شده است. در غلظت‌های پایین نانولوله‌های کربنی، مقدار افت فشار در نانوسیالات محتوی نانولوله‌های کربنی و سیالات پایه تقریبا برابر شده است و اختلاف بین آنها قابل چشم‌پوشی است. در نتیجه توان اضافی برای پمپ نانوسیال نانولوله کربنی/آب در غلظت‌های پایین مورد نیاز نیست. آنها نشان دادند که بیشترین میزان افزایش ضریب انتقال حرارت 42.8% بوده است که در رینولدز 2027 و غلظت 0.2% وزنی رخ داده است.

تاثیر پارامترهایی مانند قطر نانوذرات، دمای نانوسیال و کسر حجمی نانوذرات بر روی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال آب- آهن به صورت تجربی توسط همت و سعدالدین [4] بررسی شد. نانوذرات آهن (Fe) در سه قطر مختلف 35-45 نانومتر، 65-75 نانومتر و 95-105 نانومتر تهیه و در کسرهای حجمی 0.0313%، 0.0625%، 0.125%، 0.5% و 1% درون سیال پایه آب دیونیزه تعلیق شده است. ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات به دست آمده در کسرهای حجمی پایین و در قطرهای مختلف فوق الذکر، در دماهای مختلف از جمله 27، 35، 45 و 55 درجه سانتی گراد به صورت تجربی به دست آمده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد با افزایش دما و کاهش قطر نانوذرات، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می‌یابد. در ادامه با تکیه بر یافته‌ها و مقادیر تجربی حاصله، مدل جدیدی به منظور تخمین ضریب هدایت حرارتی پیشنهاد گردیده است.

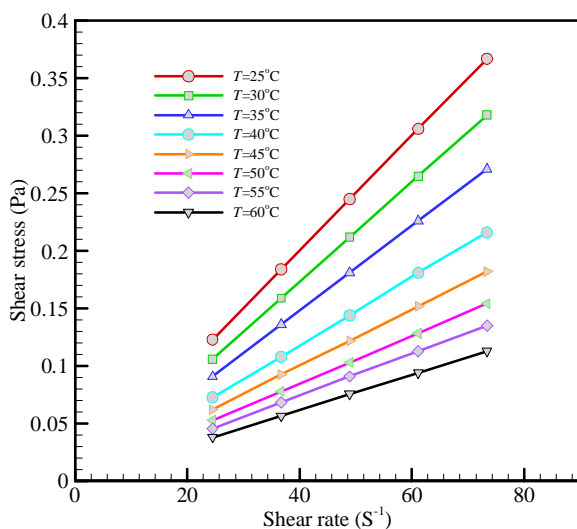
در یک پژوهش آزمایشگاهی نامبورا و همکاران [5] به بررسی خواص جریان‌ی نانو سیال آب و اتیلن گلیکول (60-40) و اکسید مس پرداختند. در این آزمایش رابطه لزجت برای کسر حجمی نانو ذرات تا 6.12% و محدوده دمایی 35 تا 50 درجه سانتیگراد بیان شد. قطر نانوذرات مورد استفاده در این

لزجت نانوسیال یک خاصیت ترموفیزیکی مهم در میزان توان پمپ، روانکاری و انتقال حرارت جابجایی به حساب می‌آید. برای ارزیابی خصوصیات رئولوژیکی نانوسیال هیبریدی، لزجت نانوسیال در محدوده تغییرات دور 20-60 rpm و در نتیجه نرخ برش‌های متفاوت اندازه‌گیری شد. برای این اسپیندل ضریب تبدیل دور به نرخ برش 1.223 است. شکل‌های 1 و 2 تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ برش را برای نانوسیال هیبریدی در کسر حجمی و دماهای مختلف نشان می‌دهد. با توجه به روند خطی تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ برش مشاهده می‌شود که نانوسیال هیبریدی رفتاری نیوتنی دارد. این موضوع یک معیار اساسی در استفاده از این نانوسیال در کاربردهای حرارتی مانند انتقال حرارت جابجایی است.



**Fig. 1.** Shear stress as a function of shear rate for MgO- MWCNTs/ Water-EG nanofluid at the solid volume fraction of 0.4% at various temperatures

شکل 1 تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ برش در کسر حجمی 0.4% و دماهای متفاوت برای نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم و نانولوله کربنی/ آب و اتیلن گلیکول



**Fig. 2.** Shear stress as a function of shear rate for MgO- MWCNTs/ Water-EG nanofluid at the solid volume fraction of 0.8% at various temperatures

شکل 2 تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ برش در کسر حجمی 0.8% و دماهای متفاوت برای نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم و نانولوله کربنی/ آب و اتیلن گلیکول

**جدول 1** مشخصات نانولوله‌های کربنی چند جداره و نانوذرات اکسید منیزیم  
**Table 1** Characteristics of MWCNTs and MgO nanoparticles

| مشخصات   | مقدار                 |              |
|--|-----------------------|--------------|
|  | نانولوله های کربنی    | اکسید منیزیم |
| خلوص   | +0.99%                | +0.99%       |
| رنگ  | پودر سیاه             | پودر سفید    |
| اندازه   | 5-20 = قطر خارجی (nm) | 50(nm)       |
|  | 3-5 = قطر داخلی (nm)  |              |
|  | 50 = طول (μm)         |              |
| هدایت حرارتی (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) | 1500                  | 60           |
| چگالی (gcm <sup>-3</sup> )                       | ~2.1                  | 3.58         |
| سطح ویژه (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )       | 233                   | 25           |

و نانو لوله کربنی مورد نیاز برای کسر حجمی‌های متفاوت با استفاده از رابطه زیر مشخص می‌شود [11].

$$\phi\% = \left[ \frac{\left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{MgO}} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{MWCNT}_s}}{\left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{MgO}} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{MWCNT}_s} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{Water}} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{EG}}} \right] \quad (1)$$

که در آن درصد کسر حجمی،  $\rho$  چگالی و  $w$  وزن می‌باشد. آماده‌سازی نانوذرات با استفاده از یک ترازوی دیجیتال با دقت 1 میلی گرم انجام شده است. ظروف محتوی نانوسیال که شامل پودر اکسید منیزیم، نانو لوله کربنی، آب و اتیلن گلیکول است را داخل بشر 600 میلی‌لیتر ریخته و از دستگاه هم زن مافوق صوت به مدت 7 ساعت جهت شکستن ذرات کلوخه شده و حل شدن کامل نانو ذرات در سیال پایه استفاده نموده تا نانوسیال به صورت پایدار به دست آید. ضمناً قبل از انجام آزمایش نانوسیال موجود به مدت 30 دقیقه موج دهی شده است.

### 3- روش انجام آزمایش

در این تحقیق، برای اندازه‌گیری لزجت دینامیکی نانوسیال اکسید منیزیم و نانو لوله کربنی در سیال پایه آب و اتیلن گلیکول از لزجت‌سنج نوع دورانی، مدل لزجت‌سنج بروکفیلد مجهز به یو ال آداپتور استفاده شده است. محدوده اندازه گیری دما و لزجت دستگاه به ترتیب در بازه 100°C- تا 300°C و 15mPa.s تا 2×10<sup>6</sup> mPa.s است. همچنین محدوده دقت و تکرار پذیری لزجت‌سنج بروکفیلد به ترتیب ±0.2% و ±1.0% است. برای اندازه‌گیری لزجت با حجم مایعات کم در دماهای مختلف و تنظیم دما، نیاز به حمام آب گرم است.

دماهای مورد استفاده در این تحقیق 25، 30، 35، 40، 45، 50، 55 و 60 درجه سانتی گراد است. آب درون حمام را به 60 درجه سانتی‌گراد رسانده، آب به دستگاه به صورت رفت و برگشت پمپاژ می‌شود. برای دماهای پایین‌تر دمای آب داخل حمام به دمای دلخواه رسانده می‌شود. بعد از رسیدن آب به دمای مورد نیاز آزمایش، نانوسیال را داخل دستگاه ریخته و با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری لزجت بروکفیلد، آزمایش در دماهای مختلف انجام می‌شود. در بررسی رفتار رئولوژیک نانوسیال هر آزمایش به منظور دقت بیشتر 3 بار تکرار می‌شود. پس از داده برداری از نتایج آزمایش با میانگین‌گیری از 3 تکرار هر آزمایش مقدار لزجت ثبت می‌شود.

### 4- نتایج و بحث بر روی نتایج

#### 1-4 رفتار نیوتنی

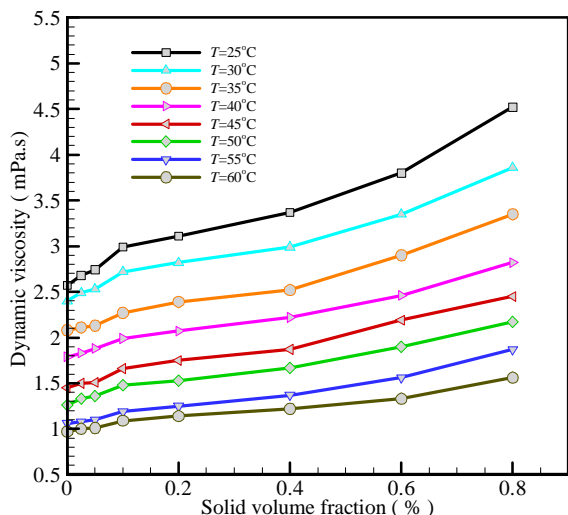


Fig. 4 Viscosity variation versus solid volume fraction at different temperatures

شکل 4 تغییرات لزجت با کسر حجمی در دماهای متفاوت

شکل های 5 و 6 تغییرات لزجت نسبی را در دماها و کسرهای حجمی متفاوت نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود لزجت نسبی تغییرات کمی با دما داشته و این تغییرات در کسرهای حجمی بالاتر قابل توجه‌تر می‌شود. بیشترین تغییرات در لزجت نسبی بین دماهای 25 °C تا 60 °C در کسرهای حجمی 0.025، 0.05، 0.1، 0.2 درصد به ترتیب برابر 4.7%، 5.6%، 8.3% و 6.4% است. این رفتار نشان می‌دهد که در کسرهای حجمی پایین‌تر لزجت نسبی در دماهای مختلف تقریباً ثابت و مستقل از دما است. بیشترین تغییرات در لزجت نسبی در کسرهای حجمی 0.4، 0.6 و 0.8 درصد به ترتیب برابر 11.4%، 13.9% و 18.9% می‌باشد. همچنین بیشترین تغییرات در لزجت نسبی با افزودن ذرات تا کسر حجمی 0.8 درصد تا حدود 80 درصد است. این نشان می‌دهد که تغییرات لزجت نانو سیال با کسر حجمی، در مقایسه با دما، حساسیت بیشتری دارد.

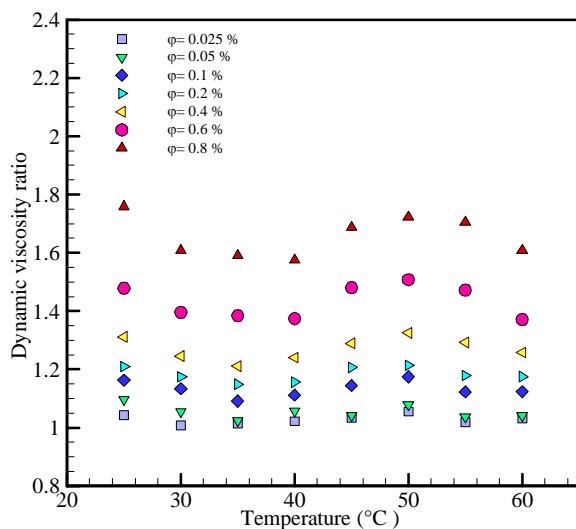


Fig. 5 Dynamic viscosity ratio versus temperature at different solid volume fractions

شکل 5 رابطه لزجت نسبی با دما در کسرهای حجمی متفاوت

## 2-4- اثرات دما و کسر حجمی بر روی لزجت دینامیکی

لزجت مقاومت در برابر حرکت نسبی سیال است. این پارامتر نقش کلیدی در انتقال ممنوم بین لایه های سیال داشته و هنگامی که حرکت بین لایه های سیال وجود دارد اثر آن مشهودتر می‌شود. در مایعات، لزجت به خاطر وجود نیروهای واندروالس بین ملکولها ایجاد می‌شود. در شکل 3 تغییرات لزجت دینامیکی با دما در کسرهای حجمی مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشخص است لزجت نانو سیال با افزایش دما کاهش می‌یابد. دلیل آن را این گونه می‌توان توضیح داد که با افزایش دما فعل و انفعالات بین ملکولی و در نتیجه نیروهای واندروالس ضعیف‌تر شده و بنابراین لزجت کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که در کسرهای حجمی بزرگتر (0.4، 0.6 و 0.8 درصد) اثر دما بر تغییرات لزجت نانو سیال قابل ملاحظه‌تر است. در حقیقت در کسرهای حجمی بالاتر احتمال کلوخه شدن ذرات جامد در داخل سیال پایه بیشتر شده و در دماهای بالا پیوندهای ایجاد شده بین ذرات جامد بیشتر گسسته می‌شود و در نتیجه نسبت به دماهای پایین‌تر تغییرات بیشتری را در لزجت ایجاد می‌کند.

شکل 4 تغییرات لزجت دینامیکی نانو سیال بر حسب کسر حجمی را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود لزجت نانو سیال هیبریدی با افزایش کسر حجمی بالا می‌رود. دلیل آن را این گونه می‌توان توضیح داد که با افزودن نانوذرات و نانولوله‌ها به سیال پایه فعل و انفعالات بین ذرات جامد و ملکولهای سیال بیشتر شده و در نتیجه لزجت افزایش می‌یابد. افزایش مقدار ذرات جامد در یک مقدار معین از سیال پایه به دلیل افزایش 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 لزجت می‌شوند. به علاوه همانطور که از شکل مشخص است اثر نیروهای واندروالس در افزایش لزجت با کسر حجمی در دماهای پایین مشهودتر است؛ زیرا در دماهای بالا ذرات می‌توانند بر نیروهای واندروالس غلبه کرده و در نتیجه لزجت به نسبت دماهای پایین با افزایش کسر حجمی رشد کمتری خواهد داشت.

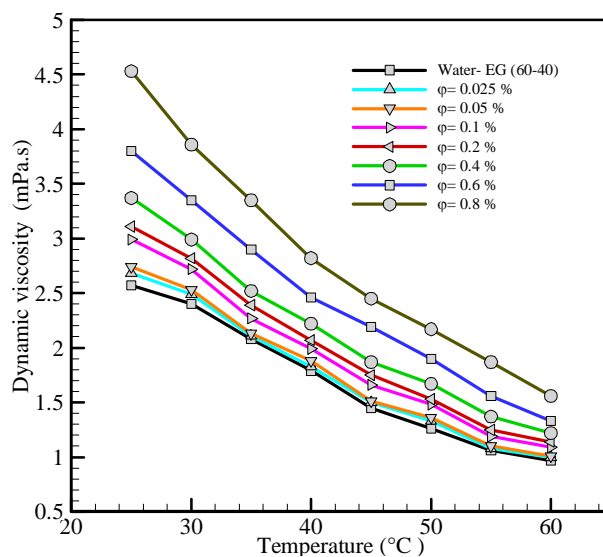


Fig. 3 Viscosity variation versus temperature at different solid volume fractions

شکل 3 تغییرات لزجت بر حسب دما در کسرهای حجمی متفاوت

ایجاد می‌کند. علت اختلاف بین نتایج حاضر و مرجع [13] می‌تواند ناشی از نحوه قرار گرفتن نانولوله‌ها در سیال باشد. مثلاً زمانی که نانولوله‌ها در راستای حرکت سیال قرار گیرند لزجت افزایش کمتری، نسبت به زمانی که نانولوله‌ها به صورت ایستاده قرار گرفته‌اند، دارد [14].

#### 4-4- رابطه پیشنهادی

به منظور تسهیل در محاسبه لزجت نانوسیال اکسید منیزیم و نانو لوله کربنی در سیال پایه آب و اتیلن‌گلیکول در دما و کسرهای حجمی متفاوت، معادله 2 استخراج گردید. این رابطه با برازش منحنی نمودار در نرم افزار سیگما پلات بدست آمده است.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 3.13 + 1.933\phi - 6.33\phi^2 + 1.007\phi^3 - 4.556\phi^4 - 0.1648T + 0.004009T^2 - 0.00003119T^3 \quad (2)$$

لازم به ذکر است که با توجه به این که مقادیر مربوط به لزجت سیال پایه (کسر حجمی صفر) در برازش منحنی مورد استفاده قرار نگرفته است، معادله 2 لزجت نسبی نانوسیال را در محدوده دمایی 25 تا 60°C و کسر حجمی 0.025 تا 0.8 درصد پیش بینی کرده و برای کسر حجمی صفر قابل استفاده نیست.

شکل 8 مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و خروجی های رابطه پیشنهادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اکثر نقاط بر روی نیمساز یا نزدیکی آن قرار دارند که نشان از دقت بالای رابطه پیشنهادی و ارائه نتایج قابل قبول در دامنه کسرهای حجمی و دماهای بررسی شده دارد.

#### 5- نتیجه گیری کلی

در این پژوهش به مطالعه آزمایشگاهی لزجت دینامیکی نانوسیال ترکیبی اکسید منیزیم و نانولوله کربنی در مخلوط آب و اتیلن گلیکول در کسرهای حجمی مختلف و دماهای متفاوت پرداخته شد. نتایج اندازه‌گیری‌ها در نرخ برش‌های مختلف نشان داد که نانوسیال دارای رفتار نیوتنی است. از نتایج بدست آمده مشاهده شد که افزایش کسر حجمی باعث افزایش لزجت

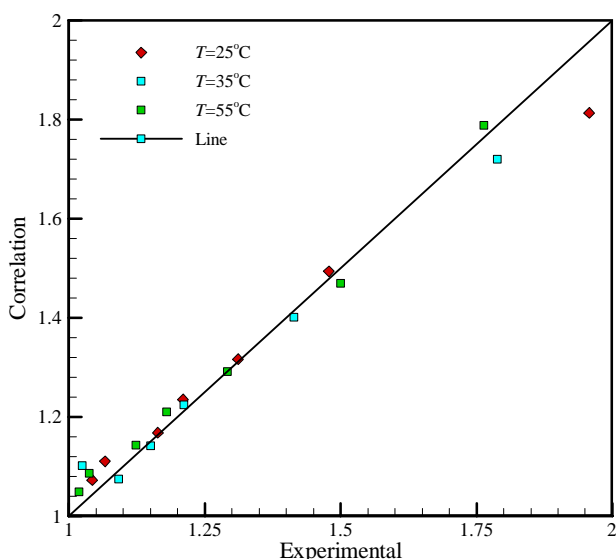


Fig. 8 Comparison of experimental results for dynamic viscosity ratio with results obtained from correlation at different temperatures

شکل 8 مقایسه نتایج آزمایشگاهی نسبت لزجت دینامیکی با نتایج حاصل از رابطه ریاضی استخراج شده در دماهای مختلف

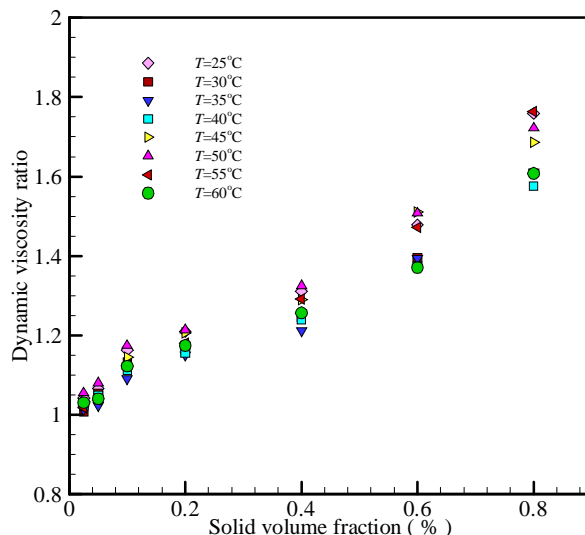


Fig. 6 Dynamic viscosity ratio versus solid volume fraction at different temperatures

شکل 6 رابطه لزجت نسبی با کسر حجمی در دماهای متفاوت

#### 3-4- مقایسه داده‌های حاصل از آزمایش با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده توسط محققین

در شکل 7 مقایسه بین نتایج آزمایش با نتایج تجربی ارائه شده توسط دیگر محققین نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است لزجت نسبی در همه تحقیقات نشان داده شده و کار حاضر با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد. با این وجود لزجت نسبی در تحقیق حاضر بیشتر از سایر تحقیقات است. در واقع لزجت نسبی تابع پارامترهای مختلفی از جمله نوع ذره و سیال، اندازه و شکل ذرات است. این شکل نشان می‌دهد که در یک کسر حجمی خاص، با افزایش نانوذرات اکسیدی [8,9,12] تغییرات ویسکوزیته بسیار کمتر از زمانی است که نانولوله کربنی [13] به سیال اضافه می‌شود. دلیل این افزایش که به واسطه حضور نانولوله های کربنی رخ می‌دهد ناشی از نسبت سطح به حجم زیاد نانولوله‌هاست که تنش برشی بیشتری در سیال

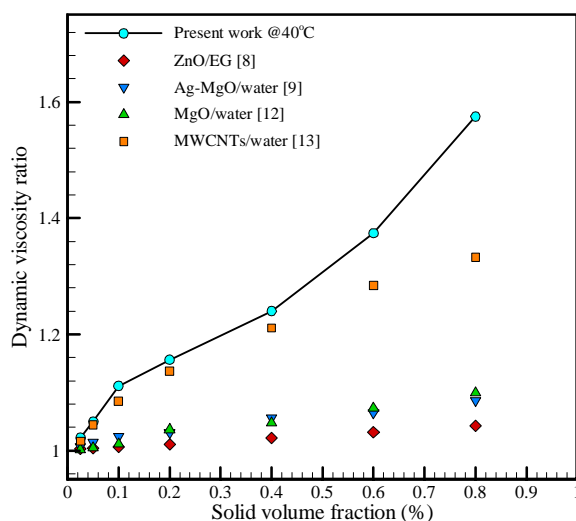


Fig. 7 Comparison between present work and previous experimental works for dynamic viscosity ratio

شکل 7 مقایسه بین کار حاضر و کارهای آزمایشگاهی گذشته برای لزجت دینامیکی نسبی

- Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 19-26, 2015 (in Persian فارسی)
- [4] M. Hemmat Esfe, S. Saedodin, Experimental investigation of the effect of diameter of nanoparticles and temperature on thermal conductivity of Fe-water nanofluid in low concentrations and developing a new model based on experimental data, *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 13, No. 42, pp. 27-42, 2015 (in Persian فارسی)
- [5] D. P. K. Praveen, K. Namburu, M. D. K. Debasmita, S. K. Das, S. U. S. Choi, W. Pradeep, Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, No. 1, pp. 397-402, 2007.
- [6] O. M. T. Yiamsawas, A. Selim Dalkilic, S. Kaewnai, S. Wongwises, Experimental studies on the viscosity of TiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles suspended in a mixture of ethylene glycol and water for high temperature applications, *Applied Energy*, Vol. 111, No. 1, pp. 40-45, 2013.
- [7] V. Vasu, A. V. Gopal, and M. S. Kumar, Thermal Conductivity and Viscosity of Vegetable Oil-Based Cu, Zn, and Cu-Zn Hybrid Nanofluids, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 44, No. 3, pp. 1-7, 2014.
- [8] M. Hemmat Esfe, A. A. Abbasian Arani, M. Rezaie, W.-M. Yan, and A. Karimipour, Experimental determination of thermal conductivity and dynamic viscosity of Ag-MgO/water hybrid nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 66, No. 1, pp. 189-195, 2015.
- [9] M. Hemmat Esfe, S. Saedodin, An experimental investigation and new correlation of viscosity of ZnO-EG nanofluid at various temperatures and different solid volume fractions, *Experimental Thermal and Fluid science*, Vol. 55, No. 1, pp. 82-98, 2014.
- [10] M. Hemmat Esfe, S. Saedodin, O. Mahian, S. Wongwises, Heat transfer characteristics and pressure drop of COOH-functionalized DWCNTs/water nanofluid in turbulent flow at low concentrations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 73, No. 1, pp. 186-194, 2014.
- [11] L. Syam Sundar, M. Hashim Farooky, S. Naga Sarada, M. K. Singh, Experimental thermal conductivity of ethylene glycol and water mixture based low volume concentration of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CuO nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, No. 1, pp. 41-46, 2013.
- [12] M. Hemmat Esfe, S. Saedodin, M. Mahmoodi, Experimental studies on the convective heat transfer performance and thermophysical properties of MgO-water nanofluid under turbulent flow, *Experimental Thermal and Fluid science*, Vol. 52, No. 1, pp. 68-78, 2014.
- [13] M. Hemmat Esfe, S. Saedodin, O. Mahian, S. Wongwises, Thermophysical properties, heat transfer and pressure drop of COOH-functionalized multi walled carbon nanotubes/water nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 58, No. 1, pp. 176-183, 2014.
- [14] M. Baghbanzadeh, A. Rashidi, A. H. Soleimanisalim, Davood Rashtchian, Investigating the rheological properties of nanofluids of water/hybrid nanostructure of spherical silica/MWCNT, *Thermochemica Acta*, Vol. 578, No. 1, pp. 53-58, 2014.

دینامیکی نانوسیال می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که در کسرهای حجمی پایین تر لزجت نسبی در دماهای مختلف تقریباً ثابت و مستقل از دما است. از مقایسه مقادیر لزجت نسبی مشخص شد که تغییرات لزجت نانوسیال با کسر حجمی، در مقایسه با دما، حساسیت بیشتری دارد. بر اساس مقایسه‌ای که با کارهای آزمایشگاهی قبلی انجام گرفت مشخص شد که رفتار رئولوژیک کلی نانوسیال حاضر با رفتار سایر نانوسیالات مشابه است اما مقادیر به دست آمده برای لزجت نسبی متفاوت از کارهای پیشین است. در پایان یک رابطه ریاضی حاصل از برازش منحنی جهت تخمین لزجت نانوسیال ارائه شد. از مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و مدل ریاضی مشخص است که مدل ریاضی به خوبی قادر به پیش بینی لزجت دینامیکی نانوسیال است.

## 6- فهرست علائم

$T$  دما (°C)

### علائم یونانی

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

$\rho$  چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )

$\phi$  کسر حجمی (%)

### زیرنویس‌ها

nf نانو سیال

bf سیال پایه

### اختصارات

W آب

EG اتیلن گلیکول

MgO اکسید منیزیم

MWCNTs نانولوله کربنی چند جداره

nf نانو سیال

## 7- مراجع

- [1] S. U. S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Developments Applications of Non-Newtonian Flows*, Vol. 231, No. 66, pp. 99-105, 1995.
- [2] H. Eshgarf, M. Afrand, M. Hemmat Esfe, Experimental investigation of the effects of temperature and nanoparticles volume fraction on the viscosity of non-Newtonian hybrid nanofluid, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 98-104, 2016 (in Persian فارسی)
- [3] E. Hosseini-pour, S. Zeinali Heris, M. Shanbedi, Experimental investigation of heat transfer coefficient and pressure drop of carbon nanotubes-water nanofluid under constant heat flux,