



## اندازه گیری آزمایشگاهی لزجت دینامیکی نانوسیال هیبریدی روغن روانکار موتور - نانولوله کربنی چند جداره - اکسید مس و ارایه نتایج به صورت یک رابطه کاربردی

علیرضا آقایی<sup>1</sup>، حسین خراسانی زاده<sup>2\*</sup>، قنبر علی شیخزاده<sup>2</sup>

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

\* کاشان، صندوق پستی 8731753153، khorasan@kashanu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 08 آبان 1395

پذیرش: 26 آبان 1395

ارائه در سایت: 28 آذر 1395

کلید واژگان:

لزجت

نانوسیال هیبریدی

نانولوله کربنی چند جداره

سیال نیوتنی

رابطه تجربی

### چکیده

در این تحقیق لزجت دینامیکی نانوسیال هیبریدی روغن روانکار موتور (روغن 5w-50) - نانولوله کربنی چند جداره - اکسیدمس در کسر حجمی های 0.05، 0.1، 0.25، 0.5، 0.75 و 1 درصد از نانوذرات و در دماهای 5، 15، 25، 35، 45 و 55 درجه سلسیوس اندازه گیری شده است. این نانوسیال هیبریدی با روش دو مرحله ای ساخته شده و برای اندازه گیری های لزجت از دستگاه ویسکومتر بروکفیلد ساخت کشور امریکا استفاده شده است. مقادیر آزمایشگاهی به دست آمده نشان می دهد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات لزجت افزایش یافته و همچنین با زیاد شدن دما لزجت کاهش می یابد. بر اساس داده های آزمایشگاهی بیشترین و کمترین افزایش در لزجت نانوسیال در یک دمای ثابت با افزایش کسر حجمی نانوذرات از 0.05 تا 1 به ترتیب 35.52 و 12.92 درصد است که به ترتیب در دماهای 55 و 15 درجه سلسیوس رخ می دهد. با توجه به اهمیت وجود لزجت بالاتر روغن موتور در دماهای بالاتر این نتیجه بسیار مهم است. مقادیر اندازه گیری شده لزجت این نانوسیال در نرخ برش ها و دماهای مختلف، نشان می دهد که رفتار آن نیوتنی است. با استفاده از نتایج به دست آمده و به منظور محاسبه و تخمین لزجت نانوسیال در شبیه سازی ها یک رابطه کاربردی وابسته به دما و کسر حجمی توسعه داده شده است، که تطبیق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

## Experimental measurement of the dynamic viscosity of hybrid engine oil -Cu-MWCNT nanofluid and development of a practical viscosity correlation

Alireza Aghaei, Hossein Khorasanizadeh\*, Ghanbar Ali Sheikhzadeh

Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

\* P.O.B. 8731753153 Kashan, Iran, khorasan@kashanu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 29 October 2016  
Accepted 16 November 2016  
Available Online 18 December 2016

### Keywords:

Viscosity  
Hybrid nanofluid  
MWCNT  
Newtonian fluid  
Empirical correlation

### ABSTRACT

In this experimental study dynamic viscosity of hybrid engine oil (5w-50)-Cu-MWCNT nanofluid for volume fractions of 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 and 1 percent of nanoparticles for temperatures of 5, 15, 25, 35, 45, 55 °C has been measured. This hybrid nanofluid has been prepared utilizing the two-step method. For viscosity measurement, the Brookfield viscometer has been used. The experimental measurements indicate that by increasing volume fraction of nanoparticles the viscosity increases; also, by increasing the temperature the viscosity decreases. Based on the experimental results the maximum and minimum viscosity increases with volume fraction increase from 0.05 to 1 at a constant temperature are 35.52 and 12.92 percent, respectively, relating to 55 and 15°C. Measurement of the nanofluid viscosity with different volume fractions, shear rates and temperatures indicates its Newtonian behavior. A new temperature and volume fraction dependent viscosity correlation, developed in this study to be used in numerical simulations, shows very good agreement with experimental results.

### 1- مقدمه

کامپوزیت (به هم چسبیده) در سیال پایه پخش می شود. یک نانوسیال هیبریدی با نانوذراتی خاص دارای خواص ترموفیزیکی متفاوتی نسبت به نانوسیال هایی است که با همان نانوذرات ولی به صورت مجزا ساخته شده باشد. تاکنون مطالعات متعددی برای شناخت خواص نانوکامپوزیت ها به منظور کاربرد آن ها در سنسورهای الکترو شیمیایی و نانوکریستال ها انجام شده است، اما در زمینه خواص نانوسیال های هیبریدی مطالعات محدودی انجام شده است. با توجه به خواص مطلوب نانولوله های کربنی، مانند پایداری شیمیایی

کسر حجمی نانوذرات، دمای نانوسیال، اندازه نانوذرات، نوع سیال پایه و حرکت براونی نانوذرات بر لزجت همه ی انواع نانوسیال ها از جمله نانوسیال های هیبریدی تأثیر دارند. نانوسیال هیبریدی یکی از انواع جدید نانوسیال ها است و به هر نانوسیالی گفته می شود که در ساخت آن از بیش از یک نوع نانوذره استفاده شده باشد. نانوسیال های هیبریدی به دو شکل تولید می شوند: الف) دو یا چند نانوذره را در سیال پایه پراکنده می کنند، ب) نانوذرات به صورت

Please cite this article using:

A. Aghaei, H. Khorasanizadeh, Gh. A. Sheikhzadeh, Experimental measurement of the dynamic viscosity of hybrid engine oil -Cu-MWCNT nanofluid and development of a practical viscosity correlation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 518-524, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مدل‌ها از دقت کافی برای تخمین لزجت نانوسیال هیبریدی برخوردار نیستند. همچنین آن‌ها گزارش نمودند که با افزایش دما و کسر حجمی لزجت نانوسیال به ترتیب کم و زیاد می‌شود.

در جدول 1 به برخی دیگر از مطالعات پیشین در زمینه اندازه‌گیری خواص نانوسیال‌های هیبریدی اشاره شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ساخت نانوسیال‌های هیبریدی تاکنون از سه نوع ترکیب، (الف) نانوذرات اکسید فلزی و فلز، (ب) نانوذرات اکسید فلزی و نانولوله‌های کربنی و (ج) نانوذرات فلزی و نانولوله‌های کربنی استفاده شده است. همچنین با بررسی نتیجه مطالعاتی که به اندازه‌گیری لزجت نانوسیال هیبریدی پرداخته‌اند، مشخص می‌شود که لزجت نانوسیال‌های هیبریدی معمولاً مقداری بین لزجت نانوسیال‌هایی با همان نانوذرات البته به صورت مجزا است [8-15].

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که به‌طور کلی مطالعات در زمینه اندازه‌گیری خواص نانوسیال‌های هیبریدی بسیار کمتر از نانوسیال‌ها است. همچنین محدود مطالعات انجام شده برای خواص نانوسیال‌های هیبریدی نشان می‌دهد، بیشتر ضریب هدایت حرارتی این نوع از نانوسیال‌ها مورد توجه بوده است و مطالعات بسیار کمی برای اندازه‌گیری لزجت آن‌ها انجام شده است. با توجه به بررسی مطالعات پیشین، تاکنون لزجت نانوسیال هیبریدی روغن روانکار موتور (روغن 50-5W) - نانولوله کربنی چند جداره<sup>1</sup> - اکسید مس اندازه‌گیری نشده است. در این مطالعه لزجت نانوسیال هیبریدی روغن روانکار موتور (روغن 50-5W) - نانولوله کربنی چند جداره - اکسید مس (که در ادامه متن به صورت روغن 50-5W - نانولوله کربنی چند جداره - اکسید مس ذکر خواهد شد) با کمک ویسکومتر در کسرهای حجمی 0.05، 0.1، 0.25، 0.5، 0.75 و 1 درصد از نانوذرات در دماهای 5، 15، 25، 35، 45 و 55 درجه سلسیوس اندازه‌گیری شده است. ابتدا مقادیر اندازه‌گیری شده با پیش‌بینی مدل‌های موجود تئوری و تجربی، ارائه شده در مطالعات پیشین، مقایسه می‌شود و توانایی این مدل‌ها ارزیابی می‌شود. در پایان با توجه به داده‌های بدست آمده آزمایشگاهی یک رابطه کاربردی برای محاسبه لزجت این نانوسیال هیبریدی توسعه داده می‌شود.

## 2- آزمایش

در این قسمت خصوصیات نانوذرات و روغن مورد استفاده و همچنین نحوه تهیه نانوسیال هیبریدی روغن روانکار موتور (روغن 50-5W) - نانولوله کربنی چند جداره - اکسید مس توضیح داده می‌شود و سپس نحوه اندازه‌گیری لزجت دینامیکی نانوسیال شرح داده می‌شود.

### 2-1- تهیه نانوذرات و روغن

روغن مورد استفاده روغن موتور SAE 5W-50 تولیدی شرکت بهران است. چگالی این روغن در دمای 15 درجه سلسیوس  $(0.9 \text{ gr/cm}^3)$ ، شاخص لزجت آن 94 است. دمای ریزش<sup>2</sup> و دمای اشتعال برای این روغن به ترتیب 21- و 236 درجه سلسیوس است.

نانوذرات اکسید مس و نانولوله‌های کربنی چند جداره از شرکت امریکایی تحقیقات نانوموادها<sup>3</sup> تهیه شده‌اند و در شکل 1 تصویر این نانوذرات نشان داده است. همچنین خصوصیات نانوذرات استفاده شده در جدول 2 ارائه شده است.

که به جلوگیری از ته‌نشینی و جلوگیری از خوردگی در نانوسیال کمک می‌کند، و همچنین ضریب رسانایی الکتریکی و حرارتی بالا معمولاً در ساخت نانوسیال‌های هیبریدی یکی از نانوذرات موجود نانولوله کربنی و نانوذره انتخابی دیگر یک اکسید فلزی است.

اضافه نمودن نانولوله‌های کربنی به سیال‌های پایه حالت ژله‌ای به آن‌ها می‌دهد، ولی اضافه نمودن نانوذره اکسیدی از حالت ژله‌ای نانوسیال می‌کاهد. نکته دیگری که در موضوع استفاده از نانولوله‌های کربنی به‌عنوان نانوذره بایستی رعایت شود استفاده از درصدهای کم کسر حجمی آن است تا لزجت افزایش زیادی نداشته باشد. در واقع استفاده از نانوسیال هیبریدی با نانوذره اکسید فلزی به‌همراه نانولوله‌های کربنی به‌عنوان یکی دیگر از نانوذرات حاضر، کمک شایانی به حفظ خواص مطلوب حضور نانولوله‌های کربنی مانند رسانایی حرارتی بالا و کاهش اثرات نامطلوب آن مانند افزایش لزجت می‌نماید.

اشگرف و همکاران [1] در مطالعه‌ای آزمایشگاهی اثر دما و کسر حجمی نانوذرات را بر لزجت نانوسیال هیبریدی آب - اتیلن گلیکول - نانولوله کربنی چند جداره - اکسید سلیسیم بررسی نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها این نانوسیال رفتاری غیرنیوتنی از خود نشان می‌دهد و لزجت آن با افزایش دما کاهش می‌یابد. بهرامی و همکاران [2] لزجت نانوسیال هیبریدی آب - اتیلن گلیکول - آهن - اکسید مس را در کسرهای حجمی 0.05 تا 1.5 درصد و محدوده‌ی دمایی 25 تا 50 درجه سلسیوس اندازه‌گیری کردند. آن‌ها گزارش کردند که این نانوسیال رفتاری غیرنیوتنی دارد. لزجت این نانوسیال هیبریدی با افزایش دما کاهش یافته و با زیاد شدن کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. افرند و همکاران [3] در یک بررسی آزمایشگاهی رفتار رئولوژیکی نانوسیال هیبریدی اتیلن گلیکول - نقره - اکسید آهن را در کسرهای حجمی 0.0375 تا 1.2 درصد و محدوده‌ی دمایی 25 تا 50 درجه سلسیوس بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها این نانوسیال هیبریدی برای کسرهای حجمی بزرگ‌تر از 0/6 درصد رفتاری غیرنیوتنی دارد و لزجت نانوسیال با افزایش دما کاهش می‌یابد. سلطانی و اکبری [4] لزجت نانوسیال هیبریدی اتیلن گلیکول - اکسیدمنیزیم - نانولوله کربنی چند جداره را در کسرهای حجمی 0 تا 1 درصد از نانوذرات و دماهای 30 تا 60 درجه سلسیوس را به صورت تجربی اندازه‌گیری کردند. بر اساس نتایج آن‌ها نانوسیال هیبریدی مورد مطالعه رفتاری نیوتنی دارد. همچنین آن‌ها افزایش 168 درصدی در لزجت نانوسیال هیبریدی را نسبت به سیال پایه در کسر حجمی 1 درصد گزارش کردند. ایشان رابطه‌ای نمایی برای توصیف تغییرات لزجت بر حسب دما و کسر حجمی نانوسیال هیبریدی ارایه نمودند. کومار و همکاران [5] در مطالعه‌ای آزمایشگاهی لزجت نانوسیال هیبریدی روغن - روی - مس را در کسرهای حجمی 0 تا 0.5 درصد از نانوذرات اندازه‌گیری کردند. بر اساس نتایج آن‌ها لزجت نانوسیال هیبریدی بررسی شده با افزایش کسر حجمی نانوذرات زیاد می‌شود. در یک مطالعه اخیر اسدی و اسدی [6] به صورت آزمایشگاهی لزجت نانوسیال هیبریدی روغن - نانولوله کربنی چند جداره - اکسید روی را در محدوده دمایی 5 تا 55 درجه سلسیوس و کسرهای حجمی 0.125 تا 1 درصد از نانوذرات اندازه‌گیری نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها با افزایش دما لزجت نانوسیال کم می‌شود. از طرف دیگر زیاد شدن کسر حجمی نانوذرات باعث افزایش حداکثر 45 درصدی لزجت نانوسیال نسبت به لزجت سیال پایه می‌شود. همچنین در مطالعه اخیر دیگری، افرند و همکاران [7] به صورت تجربی اثر دما و کسر حجمی را بر لزجت نانوسیال هیبریدی روغن SAE40 - نانولوله کربنی چند جداره - اکسید سلیسیم بررسی نمودند. آن‌ها نتایج بدست آمده را با پیش‌بینی مدل‌های موجود مقایسه نموده و نتیجه گرفتند این

<sup>1</sup> Multi Walled Carbon Nanotube

<sup>2</sup> Pour point

<sup>3</sup> US Research Nanomaterials

**جدول 1** برخی مطالعات در زمینه خواص ترموفیزیکی نانوسیال‌های هیبریدی  
**Table 1** Studies on thermophysical properties of hybrid nanofluids

سیال پایه	نانوذرات	نویسنده
آب	مس - اکسید آلومینیم	سورش و همکاران [8]
آب	نانولوله کربنی - اکسید آلومینیم	عباسی و همکاران [9]
آب	مس - اکسید مس	نین و همکاران [10]
آب	نقره - اکسید تیتانیوم	بتمونخ و همکاران [11]
آب	- اکسید آهن	چن و همکاران [12]
آب	نقره - اکسید منیزیم	همت اسفه و همکاران [13]
روغن	نقره - کربید سلیسیم	بوئا و همکاران [14]
اتیلن گلیکول	نقره - نانولوله کربنی	مانخیاپار و همکاران [15]

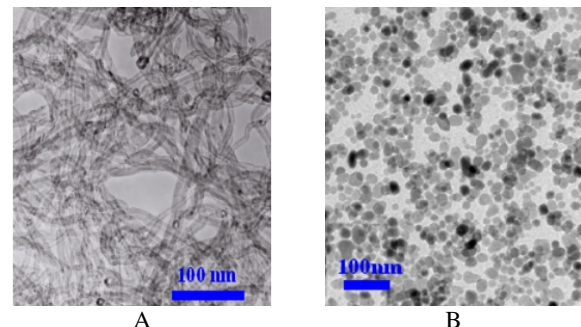
### 2-2- آماده‌سازی نانوسیال هیبریدی

نانوسیال در کسرهای حجمی 0.05، 0.1، 0.25، 0.5، 0.75 و 1 درصد از نانوذرات آماده شده‌اند. محاسبه کسر حجمی کلی نانوذرات موجود در نانوسیال هیبریدی توسط رابطه (1) انجام شده است. در این رابطه  $\phi$  کسر حجمی نانوذرات بر حسب درصد،  $m$  جرم و  $\rho$  چگالی است. جرم نانوذرات اکسیدمس و نانولوله کربنی چند جداره با ترازوی الکترونیکی آزمایشگاهی AND مدل GF 600 با دقت 1 mg اندازه‌گیری شده است.

$$\phi = \frac{\left(\frac{m}{\rho}\right)_{\text{CuO}} + \left(\frac{m}{\rho}\right)_{\text{MWCNT}}}{\left(\frac{m}{\rho}\right)_{\text{OH}} + \left(\frac{m}{\rho}\right)_{\text{CuO}} + \left(\frac{m}{\rho}\right)_{\text{MWCNT}}} \times 100 \quad (1)$$

برای تهیه نانوسیال از روش دو مرحله‌ای استفاده شده است. در این روش نانوذراتی که جداگانه تولید شده‌اند، با روش‌های مناسبی در سیال پایه پراکنده می‌شوند. علت استفاده از روش دو مرحله‌ای ساده‌تر و ارزان‌تر بودن آن نسبت به روش یک مرحله‌ای است. همچنین تجربه نشان داده است که برخلاف روش تک مرحله‌ای، روش دو مرحله‌ای برای تهیه نانوسیال‌ها با نانوذرات اکسیدی مناسب است [16]. اندازه و چگونگی توزیع نانوذرات در سیال پایه نقشی اساسی در تعیین رفتار حرارتی و هیدرولیکی نانوسیال دارد. به همین دلیل مهم‌ترین موضوعی که در روش دو مرحله‌ای باید در نظر داشت رفع مشکل کلوخه‌شدن و چسبندگی نانوذرات است. برای این منظور نانوسیال به مدت سه ساعت با کمک هم‌زن مغناطیسی، چرخانده شده است.

نام دستگاه هم‌زن UP400S و ساخت شرکت هیشلر<sup>1</sup> آلمان است. وزن این وسیله 3.2 کیلوگرم و ولتاژ 230 ولت تک‌فاز و فرکانس 50 تا 60 هرتز و حداکثر جریان مصرفی 4 آمپر است. نانوسیال به مدت 7 ساعت در معرض امواج فراصوت توسط دستگاهی با توان 400 وات و با فرکانس 24 کیلوهرتز



**Fig. 1** TEM micrographs of (a) CuO nanoparticles, (b) MWCNTs  
 شکل 1 تصاویری از: (a) نانوذرات اکسید مس و (b) نانولوله‌های کربنی چند جداره

**جدول 2** خصوصیات اکسیدمس و نانولوله‌های کربنی چند جداره [17]

**Table 2** Properties of CuO and MWCNTs [17]

نانولوله‌های کربنی چند جداره	اکسیدمس	خواص نانوذرات
95%	99%	خلوص نانوذرات
سیاه	سیاه	رنگ
طول 50 $\mu\text{m}$		اندازه
قطر خارجی 5-15 nm	قطر خارجی 40 nm	
قطر داخلی 3-5 nm		
3000 (W/mK)	76.5 (W/mK)	ضریب رسانایی حرارتی ( $k$ )
2.1 (g/cm <sup>3</sup> )	6.32 (g/cm <sup>3</sup> )	چگالی ( $\rho$ )
233 (m <sup>2</sup> /g)	20 (m <sup>2</sup> /g)	مساحت سطح مخصوص (SSA)

قرار گرفته است.

### 3-2- اندازه‌گیری لزجت دینامیکی

برای اندازه‌گیری لزجت نانوسیال از دستگاه ویسکومتر CAP2000+ ساخت شرکت بروکفیلد<sup>2</sup> آمریکا استفاده شده است. لزجت نانوسیال در کسرهای حجمی 0.05، 0.1، 0.25، 0.5، 0.75 و 1 درصد از نانوذرات و برای محدوده دمایی 5 تا 55 درجه سلسیوس (با گام هر 10 درجه) اندازه‌گیری شده است. در ابتدا ویسکومتر با روغن در دمای اتاق کالیبره شده است. آزمایش‌ها برای محدوده نرخ برش 667 تا 7998 1/s انجام شده است. دقت ویسکومتر  $\pm 2$  درصد بیشینه مقدار قابل اندازه‌گیری توسط ویسکومتر است. همه آزمایش‌ها در هر کسر حجمی و دمای مشخص در نرخ‌های برش مختلف تکرار شده‌اند.

### 3- نتایج

در این بخش ابتدا رفتار رئولوژی نانوسیال از نظر نیوتنی بودن بررسی می‌شود. سپس مقادیر لزجت اندازه‌گیری شده نانوسیال هیبریدی در کسرهای حجمی و دماهای مختلف گزارش می‌شود. در مرحله بعد مقادیر آزمایشگاهی لزجت با پیش‌بینی مدل‌های تئوری و تجربی موجود مقایسه و توانایی این مدل‌ها ارزیابی می‌شود. در پایان یک رابطه برای تخمین لزجت نانوسیال هیبریدی در کسرهای حجمی و دماهای مختلف، که برای کاربردهای مختلف از جمله انجام شبیه‌سازی‌ها توسعه داده شده است، ارائه می‌شود.

#### 1-3- رفتار رئولوژی نانوسیال

اگر رابطه بین تنش برشی و نرخ برش در سیالی به صورت خطی باشد آن سیال را نیوتنی می‌گویند و یک سیال نیوتنی از رابطه لزجت نیوتن (رابطه (2)) تبعیت می‌کند.

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

در این رابطه  $\mu$  لزجت،  $\dot{\gamma}$  نرخ برش و  $\tau$  تنش برشی است. دانستن رفتار رئولوژی نانوسیال برای کاربردهای حرارتی و شبیه‌سازی‌های عددی مفید است. برای درک رفتار نیوتنی یا غیرنیوتنی یک سیال بایستی لزجت آن در نرخ برش‌های مختلف اندازه‌گیری شود. در این مطالعه برای نرخ برش‌های 667 تا 7998 1/s در دماها و کسرهای حجمی مختلف آزمایش انجام شده است و به عنوان یک نمونه در شکل 2 تنش برشی نانوسیال بر حسب نرخ برش در کسر حجمی 1 درصد (بزرگ‌ترین کسر حجمی) در دماهای مختلف رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود رابطه خطی بین تنش برشی و نرخ برش برقرار است و در نتیجه این نانوسیال رفتاری نیوتنی دارد.

<sup>2</sup> Brookfield

<sup>1</sup> Hielscher

و از این نظر نیز مقاومت بیشتری بین لایه‌های سیال در برابر حرکت ایجاد می‌شود. بایستی توجه داشت که افزایش لزجت روغن موتور هر چند باعث نیاز به توان پمپاژ بیشتر می‌شود، ولی همواره اثر منفی بر عملکرد موتور نخواهد داشت. بنا به پیشنهاد انجمن مهندسان خودرو<sup>1</sup> در مناطق گرمسیری بایستی از روغن موتور با لزجت بالاتر استفاده شود تا روغن در دماهای بالا نیز کارکرد مطلوب خود را حفظ کند. در نتیجه استفاده از نانو روغن با کسر حجمی بالاتر برای این مناطق یک پیشنهاد مناسب است. از طرف دیگر هنگامی که فلز با فلز در جریان کارکرد موتور تماس پیدا می‌کند (مثل برخورد رینگ با دیواره سیلندر و غیره) وجود نانوذرات در روغن می‌تواند به‌عنوان عاملی در برابر ساییدگی این قطعات متحرک عمل نماید.

بر اساس داده‌های تجربی این تحقیق، بیشترین و کمترین افزایش در لزجت نانوسیال در یک دمای ثابت با زیاد شدن کسر حجمی نانوذرات از 0.05 تا 1 به ترتیب 35.52 و 12.92 درصد است که در دماهای 55 و 15 درجه سلسیوس رخ می‌دهد. افزایش بیشتر لزجت با ازدیاد کسر حجمی نانوذرات در دماهای بالا، یک مزیت برای استفاده از این نانوسیال به‌عنوان روغن موتور در مناطق گرمسیری است. همچنین نکته مثبت دیگر اینست که افزایش نسبی لزجت نانوسیال با زیاد شدن کسر حجمی در دماهای پایین کمتر از دماهای بالا است. با افزایش دما نیروهای بین مولکولی ذرات روغن تضعیف شده و در نتیجه نانوذرات می‌توانند تماس بیشتری با ذرات روغن داشته و توزیع مناسب‌تری در سرتاسر آن پیدا نمایند. وجود نانوذرات در همه لایه‌های روغن به‌دلیل توزیع مناسب آن (همگنی)، افزایش لزجت روغن را موجب می‌شود.

### 3-3- تغییر لزجت نانوسیال هیبریدی با دما

برای مشاهده بهتر تغییر لزجت نانوسیال با دما، در شکل 4 تغییر لزجت دینامیکی نانوسیال هیبریدی با دما در کسرهای حجمی مختلف نشان داده شده است. از این شکل مشاهده می‌شود که در همه‌ی کسرهای حجمی با زیاد شدن دما لزجت نانوسیال کاهش می‌یابد. این رفتار در دیگر مطالعات نیز گزارش شده است [4-2].

علت این رفتار کم شدن نیروی واندروالس بین مولکولی با زیاد شدن دما و در نتیجه کاهش مقاومت سیال در برابر جاری شدن است. در کسرهای

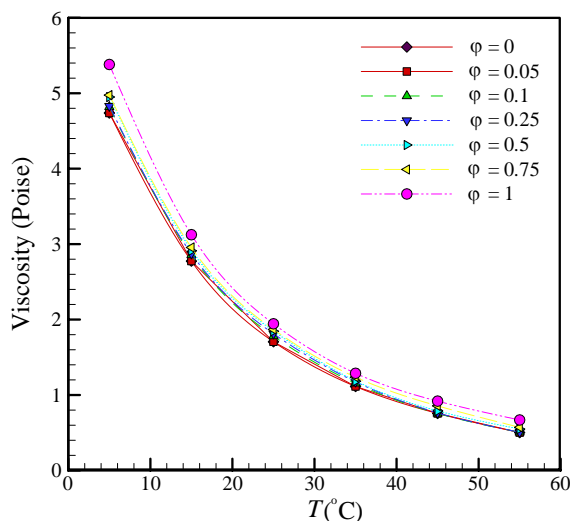


Fig. 4 Variation of dynamic viscosity of hybrid nanofluid with temperature at different volume fractions

شکل 4 تغییر لزجت دینامیکی نانوسیال هیبریدی با دما در کسرهای مختلف

<sup>1</sup> Society of Automotive Engineers (SAE)

### 2-3- تغییر لزجت نانوسیال هیبریدی با کسر حجمی نانوذرات

در شکل 3 تغییر لزجت دینامیکی نانوسیال هیبریدی با افزایش کسر حجمی نانوذرات در دماهای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش کسر حجمی نانوذرات در همه‌ی دماها لزجت نانوسیال افزایش می‌یابد.

این رفتار برای لزجت نانوسیال را محققین دیگر نیز گزارش نموده‌اند [7-1]. لزجت مقاومت سیال در برابر جاری شدن است. در مایعات لزجت به‌دلیل نیروهای واندروالس بین مولکول‌ها است و با افزایش این نیرو لزجت افزایش می‌یابد. هنگامی که نانوذرات اکسیدمس و نانولوله‌های کربنی چند جداره به روغن اضافه شوند تماس و نیروهای بین مولکولی بین ذرات روغن و نانوذرات بیشتر شده و باعث افزایش مقاومت سیال در برابر جاری شدن، یعنی افزایش لزجت، می‌شود. همچنین با زیاد شدن کسر حجمی نانوذرات، به‌دلیل ازدیاد نیروهای مولکولی بین نانوذرات امکان خوشه‌ای شدن آن‌ها بیشتر شده

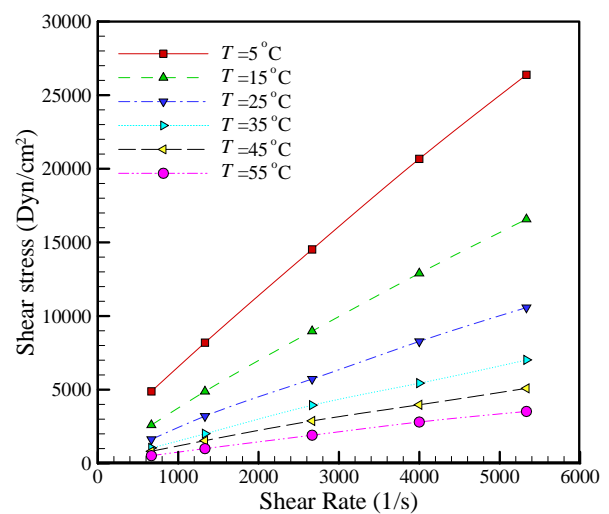


Fig. 2 Nanofluid shear stress versus shear rate at different temperatures for  $\phi=1\%$

شکل 2 تنش برشی نانوسیال بر حسب نرخ برش در دماهای مختلف برای کسر حجمی 1 درصد

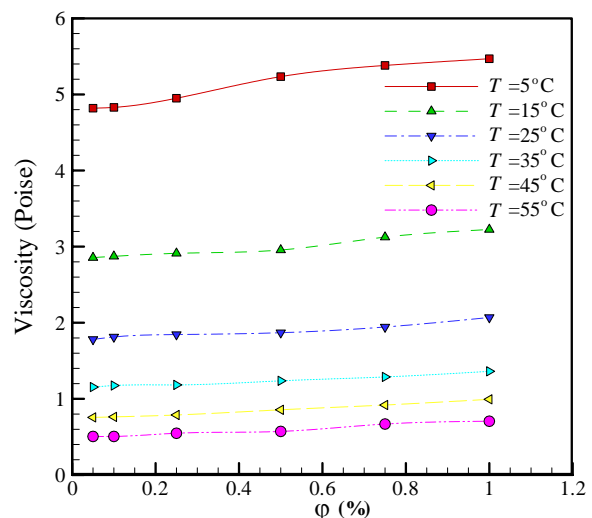


Fig. 3 Variation of the nanofluid dynamic viscosity with volume fraction at different temperatures

شکل 3 تغییرات لزجت دینامیکی نانوسیال هیبریدی با کسر حجمی نانوذرات

اندازه‌گیری شده از پیش‌بینی مدل‌های موجود باشد. بایستی توجه داشت که مدل‌های موجود یا برای حضور تنه‌های نانوذرات کروی و یا برای حضور تنه‌های نانوذرات استوانه‌ای در سیال پایه هستند و هیچ کدام از آن‌ها مربوط به وجود همزمان نانوذرات کروی و استوانه‌ای در سیال پایه نیستند.

### 3-5- ارائه یک رابطه کاربردی برای پیش‌بینی لزجت نانوسیال

**هیبریدی روغن 50-5w-50 نانولوله کربنی چندجداره - اکسید مس**  
مقایسه‌ای که بین مقادیر آزمایشگاهی لزجت نانوسیال هیبریدی روغن 50-5w-50 نانولوله کربنی چندجداره - اکسید مس با پیش‌بینی‌های مدل‌های موجود انجام شد، نشان داد که مدل‌های موجود برای تخمین لزجت این نوع نانوسیال مناسب نیستند. به همین دلیل در این تحقیق با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی یک رابطه جدید و کاربردی برای پیش‌بینی لزجت نانوسیال مورد مطالعه توسعه داده شده است. این رابطه دارای  $R^2$  مساوی 0.997 و عبارت است از:

$$\mu_{nf} = a + b\phi + cT + d\phi^2 + eT^2 + f\phi^3 + gT^3 \quad (3)$$

$$0 < \phi < 1 \text{ (\%)} , \quad 5^\circ\text{C} < T < 55^\circ\text{C}$$

$\mu$  در این رابطه لزجت (بر حسب پویز  $\mu$ ),  $\phi$  کسر حجمی نانوذرات و  $T$  دما بر حسب درجه سلسیوس است.  $a$  تا  $g$  تمام مقادیر ثابتی هستند که در جدول 3 ارائه شده‌اند. متأسفانه برای روابط پیشنهاد شده در چند مطالعه، که در آن‌ها لزجت نانوسیال به صورت نسبی ارایه شده است [4]، مشخص نشده است لزجت سیال پایه در چه دمایی اندازه‌گیری شده است. به منظور سهولت استفاده و شفافیت و جلوگیری از احتمال اشتباه، در رابطه (3) از نمایش لزجت به صورت نسبی (لزجت نانوسیال نسبت به سیال پایه) اجتناب شده است. با این وجود در شکل 6 مقادیر آزمایشگاهی لزجت نسبی در دو دمای 5 و 55 درجه سلسیوس با مقادیر به دست آمده از رابطه (3) در دو نمودار جداگانه مقایسه شده‌اند. نمودارهای این شکل نشان می‌دهند که استفاده از رابطه توسعه‌داده شده برای تخمین لزجت نانوسیال هیبریدی روغن 50-5w-50 نانولوله کربنی چند جداره - اکسید مس در مطالعات آینده از جمله در شبیه‌سازی‌ها از دقت کافی برخوردار است.

### 3-6- تحلیل انحراف

به منظور مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با نتایج به دست آمده از رابطه پیشنهادی برای تخمین لزجت درصد انحراف داده‌ها از مقادیر آزمایشگاهی با استفاده از رابطه (4) محاسبه شده است.

$$\text{dev} = \frac{\mu_{\text{exp}} - \mu_{\text{pred}}}{\mu_{\text{exp}}} \times 100 \quad (4)$$

در شکل 7 درصد انحراف مقادیر به دست آمده از رابطه نسبت به مقادیر آزمایشگاهی در کسرهای حجمی و دماهای مختلف نشان داده شده است. هر اندازه که مقادیر در این نمودار به خط گذرنده از صفر نزدیک‌تر باشند دقت رابطه تخمین زنده بیشتر است. بیشترین مقدار انحراف پیش‌بینی رابطه نسبت به داده‌های آزمایشگاهی 0.9 درصد است که در دمای  $55^\circ\text{C}$  و برای کسر حجمی 0.05 رخ می‌دهد. با توجه به شکل 7 مشخص می‌شود که رابطه پیشنهادی دارای دقت مناسبی برای تخمین لزجت نانوسیال هیبریدی است.

### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق لزجت نانوسیال هیبریدی روغن 50-5w-50 نانولوله کربنی - اکسید مس در کسرهای حجمی 0.05، 0.1، 0.25، 0.5، 0.75 و 1 درصد از

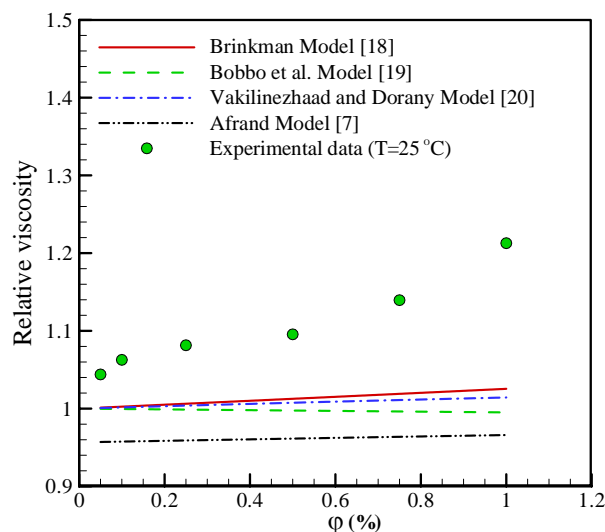
حجمی بالاتر انحنای نمودارها بیشتر است. این رفتار لزجت نانوسیال به این دلیل است که در کسرهای حجمی بالاتر نانوذرات می‌توانند تعامل بیشتری با یکدیگر داشته و در نتیجه امکان کلوخه‌ای شدن آن‌ها افزایش می‌یابد.

با کلوخه‌ای شدن نانوذرات، و به دلایلی که قبلاً شرح داده شد، لزجت زیاد می‌شود. بر اساس داده‌های تجربی بیشترین و کمترین کاهش در لزجت نانوسیال در یک کسر حجمی ثابت با زیاد شدن دما از 5 تا 55 درجه سلسیوس به ترتیب 8.5 و 6.5 برابر است که در کسرهای حجمی 0.05 و 1 درصد از نانوذرات رخ می‌دهد. آگاهی از بیشینه و کمینه تغییر لزجت یک روغن برای کاربردهای مختلف آن در صنعت و به طور خاص موتورهای احتراق داخلی اهمیت دارد.

### 3-4- مقایسه داده‌های تجربی با پیش‌بینی چند مدل موجود

در شکل 5 مقادیر اندازه‌گیری شده لزجت نانوسیال و پیش‌بینی چند مدل موجود به صورت نسبی (نسبت به سیال پایه روغن) در دمای 25 درجه سلسیوس ارائه و مقایسه انجام شده است. مدل‌های انتخابی شامل مدل تئوری و مشهور برینکمن [18]، که در اکثر مطالعات مربوط به نانوسیال‌ها از آن استفاده شده است، مدل تجربی بوبو و همکاران [19]، مدل وکیلی‌نژاد و درانی [20] مخصوص وجود نانولوله‌های کربنی در روغن و مدل افزند و همکاران [7]، مبتنی بر داده‌های تجربی برای نانوسیال هیبریدی با سیال پایه روغن، می‌شوند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود همه‌ی مدل‌های بررسی شده مقدار لزجت تخمینی را از لزجت اندازه‌گیری شده نانوسیال هیبریدی روغن 50-5w-50 نانولوله کربنی چندجداره - اکسید مس کمتر پیش‌بینی نموده‌اند. در این خصوص نزدیک‌ترین پیش‌بینی مربوط به مدل برینکمن است؛ با این وجود بیشترین و کمترین اختلاف مربوط به پیش‌بینی این مدل نسبت به داده‌های آزمایشگاهی 18.3 و 4.3 درصد و به ترتیب مربوط به کسرهای حجمی 0.05 و 1 است. در مجموع هیچ‌کدام از مدل‌های موجود برای پیش‌بینی لزجت نانوسیال هیبریدی مورد مطالعه مناسب نیستند.

سطح بیشتر نانولوله‌های کربنی که منجر به تماس‌های سطحی بیشتر با دیگر مولکول‌ها می‌شود و نوع تعامل مولکولی بین نانولوله‌های کربنی چندجداره و نانوذرات اکسید مس می‌تواند علت بیشتر بودن مقادیر لزجت



**Fig. 5** The measured relative viscosity and predictions of some existing models at  $25^\circ\text{C}$

شکل 5 لزجت نسبی اندازه‌گیری شده نانوسیال و پیش‌بینی چند مدل موجود در دمای 25 درجه سلسیوس



جدول 3 ضرایب ثابت در رابطه توسعه داده شده (3)

Table 3 Constant values in the proposed correlation (3)

g	f	e	d	c	b	a
-0.00005	0.092	0.006	-0.148	-0.314	0.416	6.326

شده است. مقادیر آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات لزجت نانوسیال هیبریدی زیاد می‌شود. همچنین با افزایش دما لزجت کاهش می‌یابد. بر اساس داده‌های تجربی بیشترین و کمترین افزایش در لزجت نانوسیال در یک دمای ثابت با زیاد شدن کسر حجمی نانوذرات از 0.05 تا 1 به ترتیب 35.52 و 12.92 درصد است که در دماهای 55 و 15 درجه سلسیوس رخ می‌دهد. همچنین بیشترین و کمترین کاهش در لزجت نانوسیال در یک کسر حجمی ثابت با زیاد شدن دما از 5 تا 55 درجه سلسیوس به ترتیب 8.5 و 6.5 برابر است که در کسرهای حجمی 0.05 و 1 درصد از نانوذرات رخ می‌دهد. مقادیر اندازه‌گیری شده لزجت در نرخ برش‌های مختلف نشان می‌دهد که این نانوسیال هیبریدی رفتاری نیوتنی دارد. مقایسه مقادیر لزجت با مدل‌های موجود نشان داد که این مدل‌ها برای محاسبه لزجت نانوسیال هیبریدی مناسب نیستند. به همین دلیل یک رابطه جدید مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی برای محاسبه و پیش‌بینی لزجت نانوسیال هیبریدی روغن 50-5W - نانولوله کربنی - اکسید مس ارائه و توان‌مندی آن بررسی و تأیید شد.

## 5- مراجع

- [1] 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.
- [2] M. Bahrami, M. Akbari, A. Karimipour, M. Afrand, An experimental study on rheological behavior of hybrid nanofluids made of iron and copper oxide in a binary mixture of water and ethylene glycol: NonNewtonian behavior, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 79, No. 5, pp. 231-237, 2016.
- [3] M. Afrand, D. Toghraie, B. Ruhani, Effects of temperature and nanoparticles concentration on rheological behavior of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Ag/EG hybrid nanofluid: An experimental study, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 77, No. 2, pp. 38-44, 2016.
- [4] O. Soltan, M. Akbari, Effects of temperature and part icles concentration on the dynamic viscosity of MgO MWCNT/ethylene glycol hybrid nanofluid: Experimental study, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Vol. 84, No. 3, pp. 564-570, 2016.
- [5] M. S. Kumar, V. Vasu, A. Venu Gopa, Thermal conductivity and rheological studies for Cu-Zn hybrid nanofluids with various basefluids, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 66, No. 8, pp. 321-327, 2016.
- [6] M. Asadi, A. Asadi, Dynamic viscosity of MWCNT/ZnO-engine oil hybrid nanofluid: An experimental investigation and new correlation in different temperatures and solid concentrations. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 76, No. 5, pp. 41-45, 2016.
- [7] M. Afrand, K. Nazari Najafabadi, M. Akbari, Effects of temperature and solid volume fraction on viscosity of SiO<sub>2</sub>-MWCNTs/SAE40 hybrid nanofluid as a coolant and lubricant in heat engines. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 102, pp. 45-54, 2016.
- [8] S. Suresh, K. Venkataraj, P. Selvakumar, M. Chandrasekar, Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cu/water hybrid nanofluid in heat transfer. *Experimental Thermal Fluid Science*, Vol. 38, No. 3, pp. 54-60, 2012.
- [9] S. M. Abbasi, A. Rashidi, A. Nemati, K. Arzani, The effect of functionalisation method on the stability and the thermal conductivity of nanofluid hybrids of carbon nanotubes/gamma alumina. *Ceram International*, Vol. 39, No. 4, pp. 3885-3891, 2013.
- [10] M. J. Nine, B. Munkhbayar, M. S. Rahman, H. Chung, H. Jeong, Highly productive synthesis process of well dispersed Cu<sub>2</sub>O and Cu/Cu<sub>2</sub>O nanoparticles and its thermal characterization. *Material Chemistry Physics*, Vol. 141, No.2, pp. 636-642, 2013.
- [11] M. Batmunkh, M. R. Tanshen, M. J. Nine, M. Myekhlai, H. Choi, H. Chung, Thermal conductivity of TiO<sub>2</sub> nanoparticles based aqueous nanofluids with an addition of a modified silver particle, *Indian Engineering Chemistry Research*, Vol. 53, No. 20, pp. 8445-8451, 2014.
- [12] L. Chen, M. Cheng, D. Yang, L. Yang, Enhanced thermal conductivity of nanofluid by synergistic effect of multi-walled carbon nanotubes and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles, *Applied Mechanics Material*, Vol. 548-549, No. 3, pp. 118-123, 2014.
- [13] M. Hemmat Esfe, A. A. Abbasian Arani, M. Rezaie, W. M. Yan, A. Karimipour, Experimental determination of thermal conductivity and

نانوذرات و در دماهای 5، 15، 25، 35، 45 و 55 درجه سلسیوس اندازه‌گیری

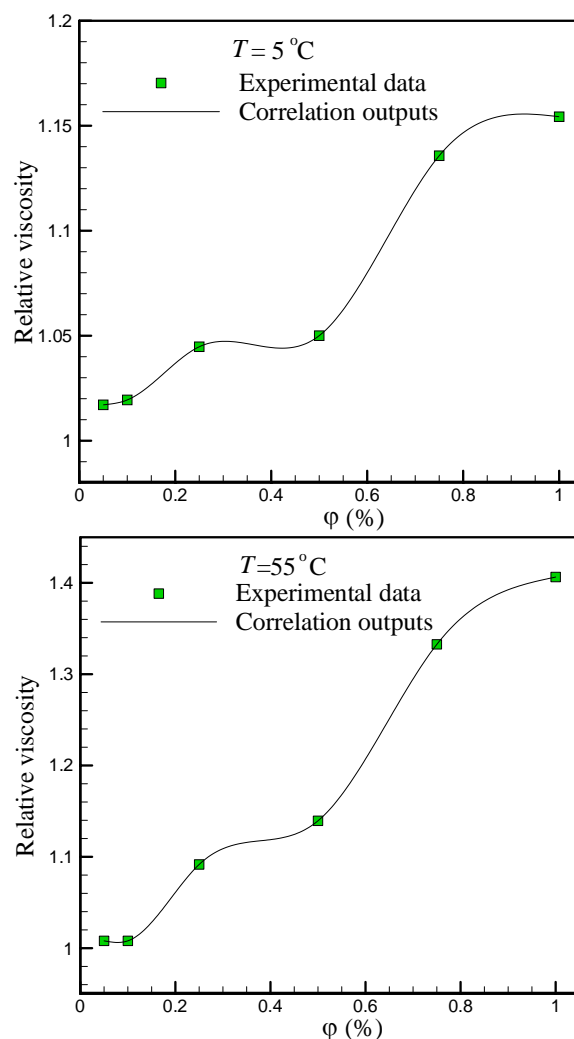


Fig. 6 Experimental data and predictions of the proposed correlation at two different temperatures

شکل 6 مقادیر آزمایشگاهی لزجت نانوسیال هیبریدی و مقادیر به‌دست آمده از رابطه توسعه‌داده‌شده در دو دمای مختلف

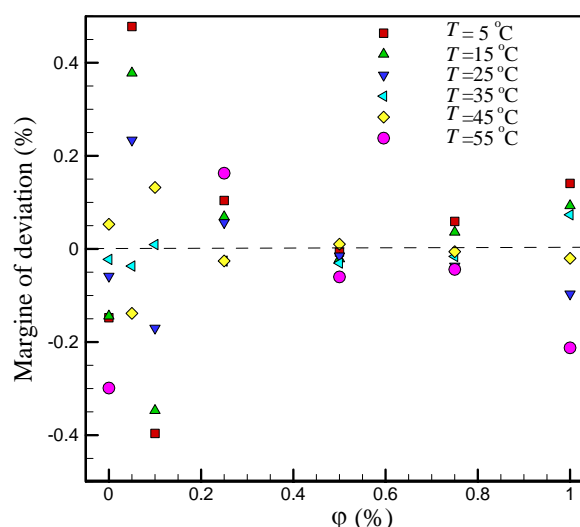


Fig. 7 Percent of measured margin of deviation

شکل 7 درصد انحراف مقادیر حاصل از رابطه پیشنهادی از داده‌های آزمایشگاهی

- glycol based CuO nanofluid for heat transfer applications. *World Academy of Science Engineering and Technology*, Vol. 59, No. 12, pp. 440-446, 2011.
- [17] *US Research Nanomaterials*, Accessed on 27 August 2016, <http://www.us-nano.com/inc/sdetail/218>
- [18] H. C. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solution. *Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, No. 10, pp. 571-581, 1952.
- [19] S. Bobbo, L. Fedele, A. Benetti, L. Colla, M. Fabrizio, C. Pagura, Viscosity of water based SWCNH and TiO<sub>2</sub>nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 36, No. 12, pp. 65-71, 2012.
- [20] G. Vakili-Nezhaad, A. Dorany, Effect of single-walled carbon nanotube on the viscosity of lubricants. *Energy Procedia*, Vol. 14, No. 3, pp. 512-517, 2012.
- dynamic viscosity of Ag-MgO/water hybrid nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 66, No. 16, pp. 189-95, 2015.
- [14] S. S. Botha, P. Ndungu, B. J. Bladergroen, Physicochemical properties of oil-based nanofluids containing hybrid structures of silver nanoparticles supported on silica. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 50, No. 6, pp. 3071-3077, 2011.
- [15] B. Munkhbayar, Md. R. Tanshen, J. Jeoun, H. Chung, H. Jeong, Surfactant-free dispersion of silver nanoparticles into MWCNT-aqueous nanofluids prepared by one-step technique and their thermal characteristics. *Ceram International*, Vol. 39, No. 13, 6415-6425, 2013.
- [16] M. T. Naik, L. S. Sundar, Investigation into thermophysical properties of