

مطالعه تجربی رفتار رئولوژیکی نانوسیال هیبریدی MgO-MWCNT/5W-50:

پیشنهاد یک رابطه تجربی سه متغیره

محمد همت اسفه^۱ علی اکبر عباسیان آرانی^۲ و سعید اسفنده^۳

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه کاشان

محمد همت اسفه^۱

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه امام حسین (ع)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۵/۱۸)

چکیده

پژوهش حاضر به بررسی رفتار رئولوژیکی نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم (۶۵٪) - نانولوله کربنی (۳۵٪) در سیال پایه روغنی ۵۰-۵W پرداخته است. ویسکوزیته نانوسیال مورد بررسی در بازه دمایی ۵ الی ۵۵ درجه (در ۶ دما) و در بازه کسر حجمی ۰/۰۵ الی ۱ درصد (در ۶ کسر حجمی) مورد بررسی قرار گرفته و اثر این دو پارامتر (دما و کسر حجمی) به همراه اثر تغییرات نرخ برش در بازه 665.5 s^{-1} الی 11997 s^{-1} بر تغییرات ویسکوزیته نانوسیال مطالعه شده است. نتایج حاصل از برازش منحنی‌های توانی روی داده‌های حاصل از نتایج آزمایشگاهی و دستیابی به مقادیر ضریب تعیین (R^2) بسیار نزدیک به مقدار واحد نشان از رفتار غیرنیوتنی نانوسیال مذکور در تمامی کسرهای حجمی و دماها دارد. به منظور پیش‌بینی مقادیر ویسکوزیته به‌ازای دما، کسر حجمی و نرخ برش‌های مختلف نیز یک رابطه تجربی جدید ($R^2 = 0.999$) متأثر از سه متغیر پیشنهاد شده است. کاهش ویسکوزیته نانوسیال نسبت به سیال پایه در کسر حجمی‌های ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲۵ درصد نیز از دیگر نتایج جالب توجه این پژوهش می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: نانوسیال هیبریدی پایه روغنی، کاهش ویسکوزیته، رابطه تجربی سه متغیره

Experimental Study of Rheological Behavior of MgO-MWCNT/5W-50 Hybrid Nanofluid: Proposing a New Three-variable Correlation

M. Hemmat Esfe

Mech. Eng. Dep't.
Imam hossein University

A.A. Abbasian-Arani, and S. Esfandeh

Mech. Eng. Dep't.
University of Kashan

(Received: 13/May/2017 ; Accepted: 09/August/2017)

ABSTRACT

In the present study, the rheological behavior of hybrid nanofluid (MgO(65%) – MWCNT(35%)/5w50) has been studied. the viscosity of mentioned nanofluid was measured at 5°C- 55°C and 0% – 1% volume fraction range. then the effect of these two parameters on viscosity was studied. Also, the effect of shear rate changes (665.5 s^{-1} - 11997 s^{-1}) on viscosity changes was studied. Fitting power law curves on experimental data and achieve R^2 's with very close to unity was considered as a sign of non-Newtonian behavior of present nanofluid. In order to forecast viscosity quantities as functions of solid volume fraction, temperature, and shear rate, a novel three variable correlation has been proposed (with $R^2=0.999$). Viscosity reduction of nanofluid in comparison with the base oil in solid volume fractions of 0.05%, 0.1%, and 0.25% is another remarkable result of the present study.

Keywords: Oil-based Hybrid Nanofluid, Viscosity Reduction, Tri-variable Experimental Correlation

۱- استادیار: m.hemmatesfe@gmail.com

۲- استادیار (نویسنده پاسخگو): Abbasian@kashanu.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری: s_esfandeh@grad.kashanu.ac.ir

فهرست علائم و اختصارات

A	مساحت، m^2
m	ضریب پایداری
n	ضریب قانون توانی
T	دما، $^{\circ}C$

علائم یونانی

ρ	جرم مخصوص، kg/m^3
φ	کسر حجمی
$\dot{\gamma}$	نرخ برش
μ	ضریب لزجت
τ	تنش برشی

زیر نویس ها

f	سیال
nf	نانوسیال

۱- مقدمه

مطالعات بسیاری در زمینه تاثیر دما و کسر حجمی بر لزجت نانوسیالات انجام شده که نشان از اهمیت پارامتر لزجت در صنعت و علوم مهندسی دارد [۴-۱]. همت و همکاران [۵] رفتار رئولوژیکی نانوسیال هیبریدی اکسید آلومینیوم (۶۵٪) نانولوله‌های کربنی (۳۵٪) در سیال پایه روغن 5W-50 با کسرهای حجمی ۰ الی ۱ درصد و در محدوده دمایی ۵ الی ۵۵ درجه سانتی‌گراد با هدف تسهیل کاربردهای آن در صنعت خودرو را ارزیابی کردند. آنها مشاهده کردند که رفتار غیرنیوتنی نانو روان‌کننده با افزایش کسر حجمی جامد و کاهش دما افزایش می‌یابد. آنها علت این پدیده را تشکیل نانوخوشه‌ها در سیال پایه بیان کردند که بر نیروی واندروالس تاثیر گذاشته و منجر به افزایش لزجت می‌شود. سلطانی و اکبری [۶] به تاثیر دما و غلظت ذرات بر لزجت دینامیکی نانوسیال هیبریدی حاوی نانولوله‌های کربنی- اکسید منیزیم^۲ در کسرهای حجمی ۰ الی ۱ درصد در سیال پایه اتیلن گلیکول و با محدوده دمایی ۳۰ الی ۶۰ درجه سانتی‌گراد پرداختند. نتایج آنها نشان داد که نانوسیال مورد نظر در کسرهای حجمی و دماهای مختلف رفتار نیوتنی از خود نشان می‌دهد. آنها افزایش ۱۶۸ درصدی لزجت در کسر حجمی

۱ درصد و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد را ثبت کردند. همچنین آنها گزارش دادند که لزجت دینامیکی نانوسیال با افزایش دما کاهش می‌یابد و علت آن را به این صورت بیان کردند که در دماهای بالاتر، انرژی مولکول‌ها و فاصله بین مولکولی بیشتر است، در نتیجه تأثیر مولکول‌ها روی یکدیگر کم است. زارعی و اکبری [۷] اثر کسر حجمی و دما بر روی لزجت دینامیکی نانوسیال هیبریدی حاوی اکسید منیزیم و نانولوله کربنی با کسرهای حجمی ۰/۰۲۵ الی ۰/۸، در مخلوط آب و اتیلن گلیکول و محدوده دمایی ۲۵ الی ۶۰ درجه سانتی‌گراد را مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد کسر حجمی تاثیر چندانی بر لزجت دینامیکی نانوسیال ندارد که یک دستاورد مهم برای کاربردهای صنعتی و مهندسی می‌باشد. آنها مشخص کردند که تاثیرپذیری لزجت نانوسیال از کسر حجمی بیش از تاثیرپذیری این پارامتر نسبت به دما است. همت و همکاران [۸] تاثیر دما و کسر حجمی نانوسیال هیبریدی نانولوله کربنی چند جداره (۲۰٪) و دی‌اکسید سیلیسیم^۳ (۸۰٪) در سیال پایه SAE40 با کسر حجمی‌های ۰ الی ۲ درصد و در محدوده دمایی ۲۵ الی ۵۰ درجه سانتی‌گراد بر رفتار رئولوژیکی روغن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج اندازه‌گیری شده آنها نشان داد که تا کسر حجمی ۱ درصد نانو روان‌کننده رفتار نیوتنی و در کسر حجمی ۱/۵ و ۲ درصد رفتاری غیرنیوتنی نشان می‌دهد. آنها مشخص کردند که لزجت با افزایش دما، کاهش و با افزایش کسر حجمی ذره جامد، افزایش می‌یابد. اسدی و همکاران [۹] لزجت دینامیکی نانوسیال هیبریدی حاوی نانولوله‌های کربنی (۲۰٪)، اکسید منیزیم (۸۰٪) در سیال پایه روغنی SAE50 با کسر حجمی ۰/۲۵ تا ۲ درصد ذرات جامد و در بازه دمایی ۲۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که نانوسیال در تمامی دماها و کسرهای حجمی رفتاری نیوتنی از خود نشان می‌دهد. در نتایج مطالعات اسدی و همکاران، کمترین میزان افزایش ویسکوزیته در کسر حجمی ۰/۲۵ و به میزان ۲۰ درصد گزارش شد. همچنین اشگرف و همکاران [۱۰] اثر دما و کسر حجمی نانوذرات هیبریدی که حاوی مخلوطی از آب و اتیلن گلیکول (۵۰:۵۰ حجمی) به عنوان سیال پایه و ترکیبی از نانولوله

1- Al₂O₃-MWCNT

2- MgO-MWCNT

3- SiO₂-MWCNT

می‌کند. در پژوهشی دیگر اسدی و همکاران [۱۵] به بررسی لزجت دینامیکی نانوسیال هیبریدی حاوی نانولوله‌های کربنی-اکسید روی با سیال پایه روغن موتور در دماهای مختلف در بازه ۵ درجه سانتیگراد تا ۵۵ درجه سانتیگراد و با کسر حجمی جامد در محدوده ۰/۱۲۵ الی ۱ درصد پرداختند. آنها دریافتند که در دماهای پایین با افزایش کسر حجمی لزجت افزایش بیشتری پیدا می‌کند. افزون و همکاران [۱۶] پژوهشی تجربی در زمینه اثر درجه حرارت و غلظت نانوذرات بر گرانروی دینامیکی نانوسیال هیبریدی حاوی نانولوله‌های کربنی-سیلیسیم دی اکسید با سیال پایه روغن موتور (SAE40) در کسر حجمی صفر الی ۱ درصد و در محدوده دمایی ۲۵ الی ۶۰ درجه سانتیگراد صورت دادند. آنها دریافتند که با افزایش مقدار ذرات جامد در سیال، با توجه به نیروهای واندروالسی بین ذرات، نانوخوشه‌های بزرگتر به وجود می‌آیند. این نانو خوشه‌ها از حرکت لایه روغن روی یکدیگر جلوگیری می‌کند که منجر به افزایش بیشتر لزجت می‌شود. جدول ۱ مروری بر روابط تجربی ارائه شده توسط محققان مختلف را نشان می‌دهد.

با مطالعه پژوهش‌های گذشته و روابط تجربی پیشنهادی ارائه شده در این پژوهش‌ها (جدول ۱) می‌توان دریافت که در هیچ یک از این روابط ریاضی پیشنهادی اثری از پارامتر نرخ برش مشاهده نمی‌شود و در اکثریت قریب به اتفاق موارد، ویسکوزیته نانوسیالات اعم از نیوتنی و غیرنیوتنی تنها به صورت تابعی از دما و کسرحجمی بیان شده است. رابطه‌ای که در پژوهش حاضر برای پیش‌بینی ویسکوزیته نانوسیال مذکور ارائه شده است، علاوه بر پارامترهای دما و کسرحجمی به پارامتر نرخ برش نیز وابسته است که این با توجه به رفتار غیرنیوتنی نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم و نانولوله کربنی با سیال پایه ۵۰W-۵ امری ضروری به نظر می‌رسد. لازم به ذکر است این امر تقریباً در تمامی روابط پیشنهادی پیش‌بینی ویسکوزیته موجود در پژوهش‌های گذشته مغفول مانده است. دقت بالای پیش‌بینی روابط ارائه شده و نیز ارائه رابطه ویسکوزیته به صورت تابعی سه متغیره (دما، کسرحجمی و نرخ برش) که شاید در موارد معدودی از تحقیقات گذشته به آن اشاره شده باشد را می‌توان از نوآوری‌های خیره‌کننده کار حاضر دانست. همچنین نانوسیال تهیه شده در کنار بهبود

کربنی چند جداره و دی اکسید سیلیسیم با کسرهای حجمی ۰/۰۶۲۵ الی ۲ درصد بودند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که با اضافه کردن مقدار کمی ذرات جامد به سیال پایه، رفتار نانوسیال غیر نیوتنی می‌شود. همچنین آنها نشان دادند لزجت با افزایش دما، کاهش و با افزایش کسر حجمی ذرات، افزایش چشمگیری دارد. در پژوهشی دیگر از همت و همکاران [۱۱] به بررسی اثرات تعلیق نانولوله کربنی چند دیواره با غلظت حجمی ۰/۰۲۵ الی ۰/۷۵ و درجه حرارت، بر رفتار رئولوژیک روغن موتور 10W40 پرداخته شد. آنها با اندازه‌گیری لزجت در نرخ‌های برشی مختلف نشان دادند که تمام نمونه‌های نانوسیال رفتاری غیر نیوتنی دارند، حال آن‌که روغن موتور رفتار نیوتنی از خود نشان دادند. همت و همکاران [۱۲] به بررسی نانوسیال هیبریدی حاوی نانولوله‌های کربنی-اکسید روی^۱ در سیال پایه SAE40 در دماهای مختلف (۲۵ الی ۶۰ درجه) و کسرهای حجمی مختلف (۰ الی ۱ درصد) پرداختند. آنها با اندازه‌گیری لزجت دریافتند که با افزایش دما، لزجت کاهش و با افزایش کسر حجمی جامد، لزجت افزایش می‌یابد. ساهید و همکاران [۱۳] لزجت نانوسیال اکسید منیزیم با کسر حجمی صفر تا ۵ درصد در سیال پایه اتیلن گلیکول را مورد مطالعه قرار دادند. براساس نتایج مطالعه آن‌ها، لزجت موثر تمام نمونه‌ها صرف نظر از اندازه نانوذرات و یا کسر حجمی، با افزایش دما به صورت نمایی کاهش یافت. آنها دریافتند که در کسر حجمی ثابت، نانوسیال حاوی اکسید منیزیم با قطر ۲۱ نانومتر، لزجت موثر بالاتری در مقایسه با نانوسیال حاوی اکسید منیزیم با اندازه ۱۰۵ و ۱۲۵ نانومتری را دارد، که علت آن طبق نظریه بروانی قابل توجیه است، چراکه ذرات کوچکتر اتلاف انرژی بالاتری دارند و تعامل ذره - ذره به دلیل افزایش حرکت تصادفی ذرات (سرعت بالاتر در مقایسه با ذرات بزرگتر) بیشتر است. صدی و همکاران [۱۴] لزجت نانوسیال حاوی ۵ درصد وزنی نانولوله کربنی و ۰/۲۵ درصد وزنی سورفکتانت صمغ عربی در سه دمای ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه سانتیگراد را اندازه‌گیری کردند. نتایج آنها نشان داد که بر خلاف آب، نانوسیال پایه آبی حاوی نانوذرات نانولوله کربنی چندجداره مانند یک سیال غیر نیوتنی رفتار کرده و لزجت دینامیکی آن بر اساس نرخ برش تغییر

۲- انجام آزمایش

به منظور انجام آزمایش حاضر، نانوسیال هیبریدی پایه روغنی اکسید منیزیم و نانولوله کربنی، محصول شرکت US Nano Research مورد استفاده قرار گرفت. همچنین در این تحقیق روغن از نوع 5W50 به عنوان سیال پایه مورد استفاده قرار گرفت.

قطعی نرخ انتقال حرارت، افزایش چندانی در رشد مقدار ویسکوزیته ایجاد نمی‌کند (عدم نیاز به قدرت مضاعف جهت پمپاژ سیال) و حتی در کسرهای حجمی پایین نانوذرات، کاهش مقدار ویسکوزیته نسبت به روغن پایه مشاهده شده است، که این ویژگی را می‌توان از دیگر مزایای استفاده از نانوذرات در روغن‌های موتور خودرو دانست.

جدول (۱): مروری بر روابط تجربی ارائه شده برای ویسکوزیته نانوسیالات بر پایه روغن.

محقق	سیال پایه	نانو ذره	محدوده کارایی	رابطه تجربی
وکیلی نژاد و دورانی [۳]	روغن	MWCNT	$T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 0.4\phi - 39\phi^2 + 11.43\phi^3)$
			$\phi = 0.1\%$	$\mu_{nf} = 0.19T^2 - 29.103T + 1012.83$
همت و همکاران [۵]	5W50	Al ₂ O ₃ -MWCNT (% ۶۵ - % ۳۵)	$0\% \leq \phi \leq 1\%$ $5 \leq T \leq 55 \text{ }^\circ\text{C}$	$\mu_{nf} = -744.8 + \frac{1806\phi^{0.01382}}{T^{0.2}}$
اسدی و همکاران [۹]	SAE50	MgO-MWCNT (% ۸۰ - % ۲۰)	$0.25\% \leq \phi \leq 2\%$ $25 \leq T \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$	$\mu_{nf} = 328201 \times T^{-2.053} \times \phi^{0.9359}$
اسدی و همکاران [۱۵]	روغن موتور	ZnO - MWCNT	$0.125\% \leq \phi \leq 1\%$ $5 \leq T \leq 55 \text{ }^\circ\text{C}$	$\mu_{nf} = 796.8 + 76.26\phi + 12.88T + 0.7695\phi T + \frac{-196.9T - 16.53\phi T}{\sqrt{T}}$
افزند و همکاران [۱۷]	SAE40	SiO ₂ - MWCNT	$0 < \phi < 1$ $30 \leq T \leq 60 \text{ }^\circ\text{C}$	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 0.0033 + \exp(0.07731\phi^{1.452}T^{0.3387})$

۴۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد تهیه و مورد آزمایش قرار گرفته است. همچنین مشخصات نانوذرات مورد استفاده (ارائه شده توسط شرکت (US Research Nanomaterials) در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین نتایج آنالیز میکروسکوپی (توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری^۱) و پراش اشعه ایکس^۲ در شکل ۱ نشان داده شده است.

۱-۲- آماده‌سازی نانوسیال

فرآیند تعلیق و پایدارسازی نانوذرات در سیال پایه به عنوان یکی از اصلی‌ترین مراحل تهیه نانوسیال به طورکاملاً دقیق صورت پذیرفت. لازم به ذکر است که نانوسیال اکسید منیزیم (۶۵٪)، نانولوله کربنی (۳۵٪) با سیال پایه روغن ۵۰-۵W به صورت دو مرحله‌ای، در کسرهای حجمی ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد حجمی و در دماهای ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵

1- TEM

2- XRD

۲-۲- اندازه‌گیری ویسکوزیته و آماده‌سازی شرایط دمایی

در این پژوهش به منظور اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی از لزجت سنخ نوع دورانی ساخت شرکت بروکفیلد^۱ استفاده شد. محدوده قابل اندازه‌گیری پارامتر ویسکوزیته توسط این دستگاه در بازه ۱۵ mPa.sec تا 2×10^6 mPa.sec قرار دارد. لازم به ذکر است که دستیابی به دمای پایدار مورد نظر جهت انجام آزمایش در دماهای مختلف توسط حمام آب و قرار دادن نانوسیال در داخل آن صورت می‌پذیرد.

۳- نتایج و بحث

در این بخش به بررسی‌های متعددی در زمینه شناسایی رفتار رئولوژیکی نانوسیال پرداخته شده است.

۳-۱- رفتار غیرنیوتنی نانوسیال

مطالعات حاصل از برآزش منحنی‌های توانی بر روی داده‌های حاصل از نتایج آزمایشگاهی نشان از تطابق رفتار نانوسیال حاوی نانولوله‌های کربنی (۳۵٪)، اکسید منیزیم (۶۵٪) با رفتار توابع توانی (توان کمتر از مقدار واحد) دارد. در واقع پروفیل تنش برشی وارده به نانوسیال بر حسب نرخ برش به صورت توانی با توان کوچکتر از واحد است و از معادله (۱) تبعیت می‌کند. بنابراین، نانوسیال مورد بررسی غیرنیوتنی و از نوع شبه پلاستیک ($n < 1$) است.

$$\tau = m\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

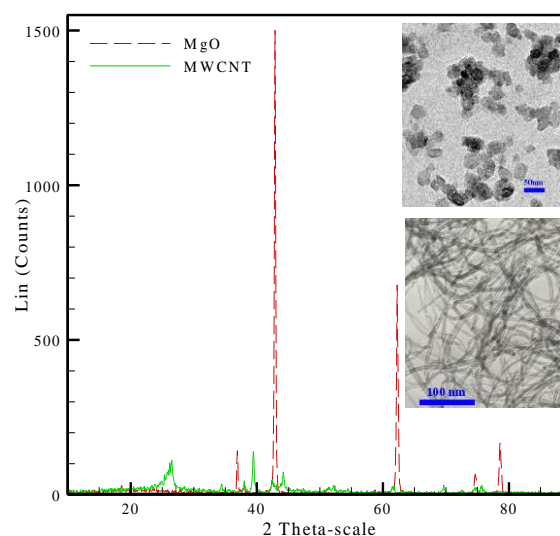
همچنین در سیالات غیرنیوتنی ویسکوزیته نانوسیال، به ویسکوزیته ظاهری معروف است که به صورت رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$\mu = m\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

در روابط بالا، μ ویسکوزیته ظاهری، τ تنش برشی، $\dot{\gamma}$ نرخ برش و m و n به ترتیب ضریب و توان قانون لزجت نیوتن می‌باشند.

در شکل ۲ روند تغییرات m و n در دماها و کسرهای حجمی مختلف نشان داده شده است. کاهش گستره تغییرات ضریب m در دماهای بالا و همچنین برخلاف آن رشد گستره تغییرات ضریب n توانی در دماهای بالاتر از نکات قابل توجه در شکل ۲ است. از دیگر موارد مهم و قابل مشاهده در شکل ۲ می‌توان به مقادیر کوچکتر از واحد n در تمامی دماها و کسرهای حجمی اشاره کرد، که این امر نیز نشان از رفتار غیرنیوتنی نانوسیال مورد بررسی دارد.

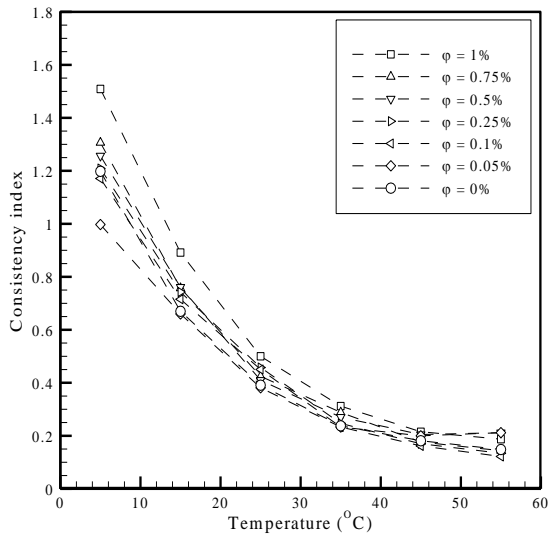
در شکل ۳ نیز به بررسی تنش برشی بر حسب نرخ برش پرداخته شده است که وجود انحنا (تغییرات توانی) در منحنی تغییرات برای تمامی دماها و کسرهای حجمی ارائه شده، قابل مشاهده است و همان‌طور که در گذشته بیان شد، این می‌تواند نشانه‌ای آشکار از رفتار غیرنیوتنی (از نوع شبه پلاستیک) شبه پلاستیک نانوسیال باشد.



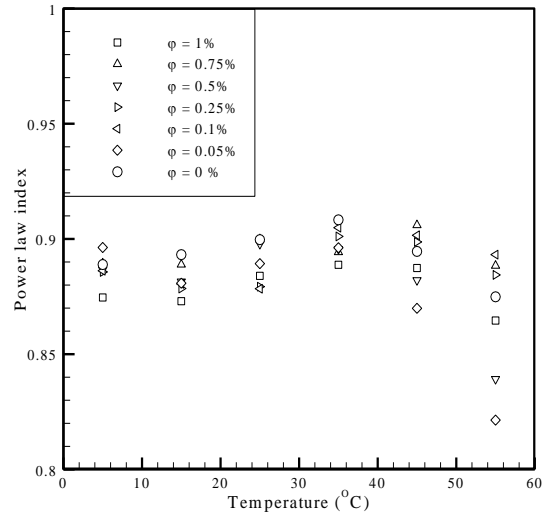
شکل (۱): نتایج تست‌های XRD و TEM.

جدول (۲): مشخصات نانوذرات مورد استفاده در پژوهش حاضر.

مشخصات	نوع نانوذره	
	نانولوله کربنی	اکسید منیزیم
خلوص	۰/۹۹٪	۰/۹۹٪
اندازه	قطر داخلی (۲-۵ نانومتر)	۵۰ نانومتر
	قطر خارجی (کمتر از ۷ نانومتر)	
جرم مخصوص	$2/1 \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$3/6 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

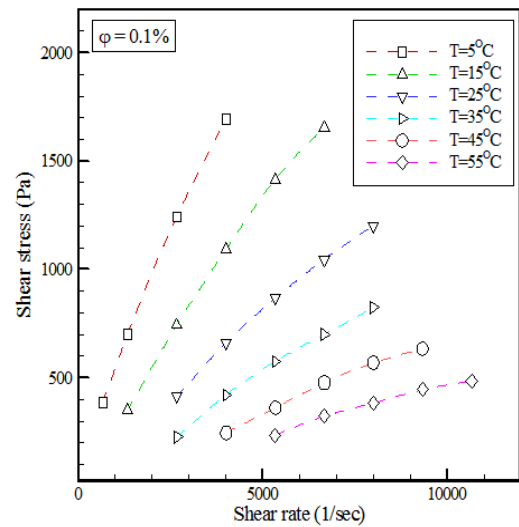
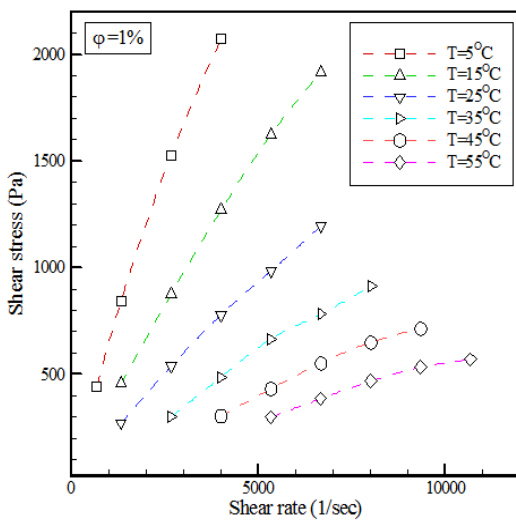
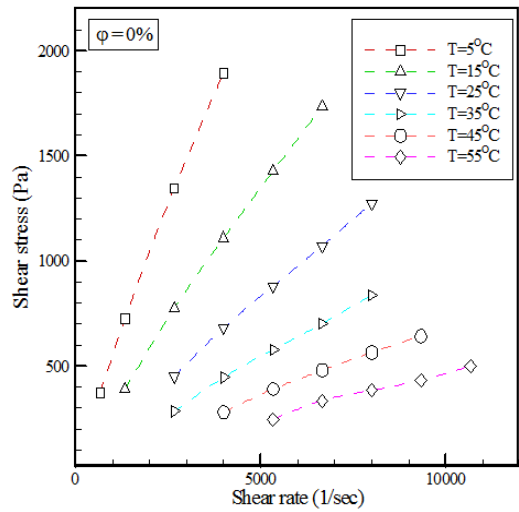
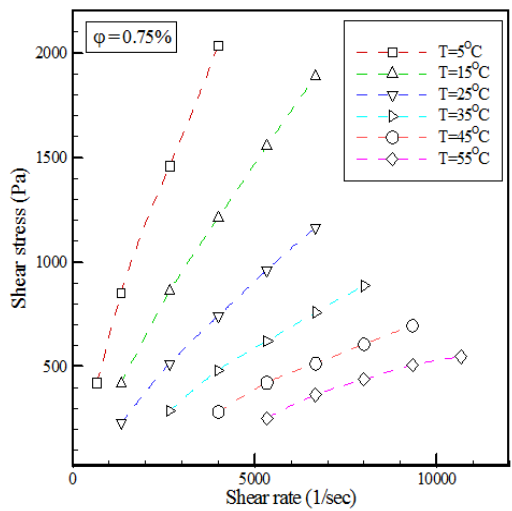


(b)



(a)

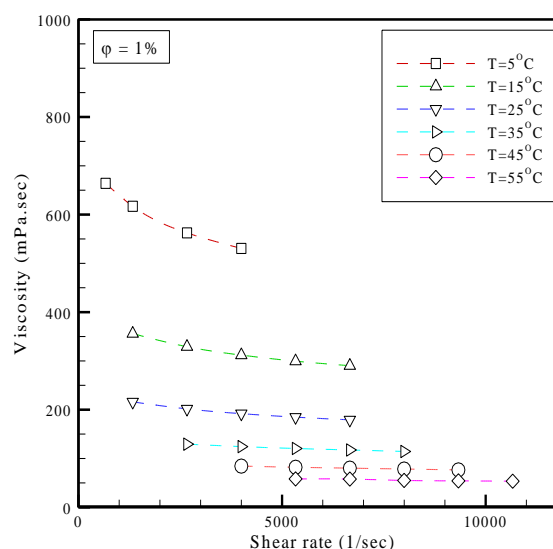
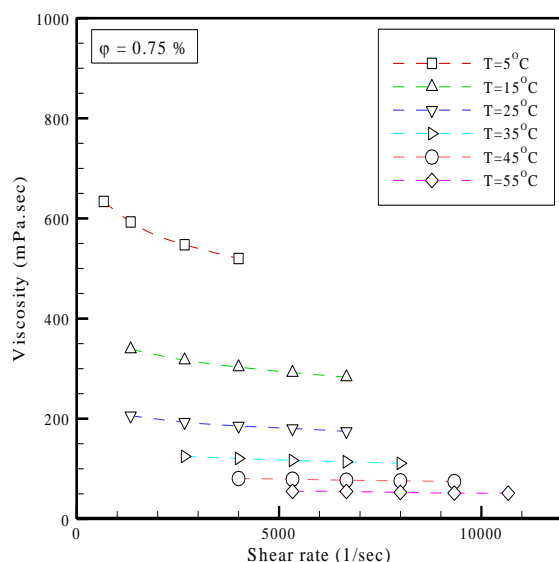
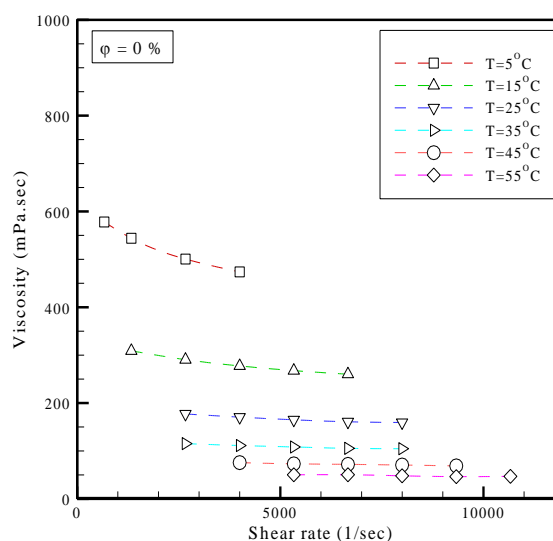
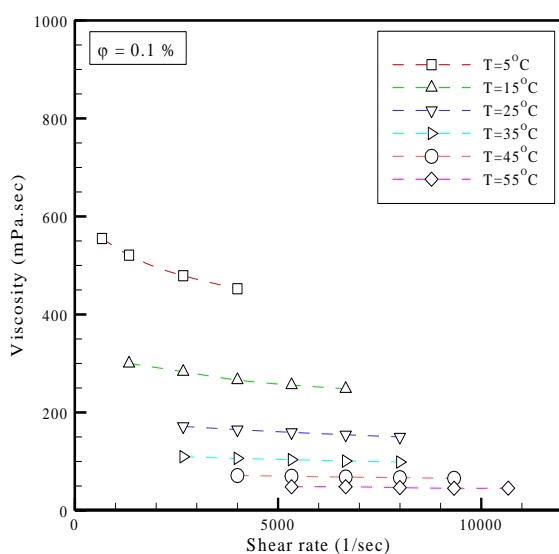
شکل (۲): توزیع مقادیر ضرایب m و n در کسرهای حجمی مختلف.



شکل (۳): منحنی تنش برشی بر حسب نرخ برش در دماهای مختلف و کسرهای حجمی مختلف.

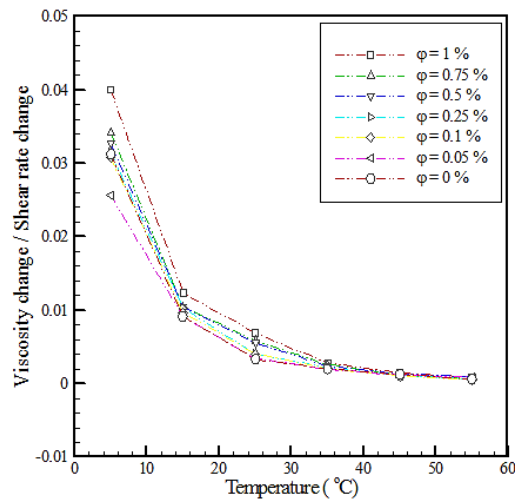
به بررسی مقادیر نسبت تغییرات ویسکوزیته به تغییرات نرخ برشی در دماها و کسرهای حجمی مختلف پرداخته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار شیب تغییرات ویسکوزیته نسبت به نرخ برشی با افزایش دما و همچنین با کاهش کسر حجمی کاهش یافته است. همچنین با افزایش دما مقدار شیب منحنی تغییرات ویسکوزیته نسبت به تغییرات نرخ برشی در کسرهای حجمی مختلف کاهش یافته، به سمت یکدیگر متمایل شده و به یک مقدار یکسان میل می‌کنند.

در شکل ۴ نیز ویسکوزیته نانوسیال بر حسب نرخ برش در دماها و کسرهای حجمی مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمامی کسرهای حجمی تغییرات ویسکوزیته با نرخ برش کاملاً محسوس است. وابستگی مقدار ویسکوزیته به نرخ برش نیز نشان از رفتار غیرنیوتنی نانوسیال مورد بررسی در پژوهش حاضر دارد، به‌گونه‌ای که در برخی دماها کاهش بیش از ۲۰ درصدی ویسکوزیته نانوسیال با رشد نرخ برش مشاهده شد. در شکل ۵



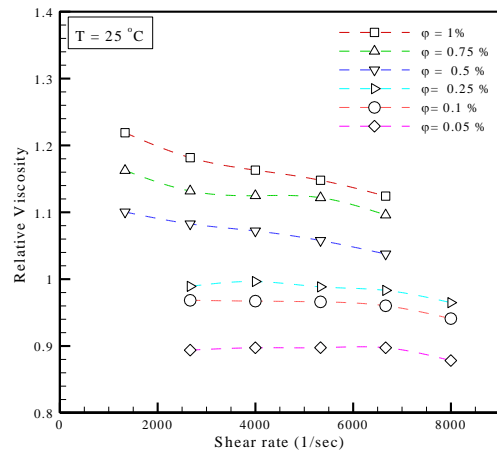
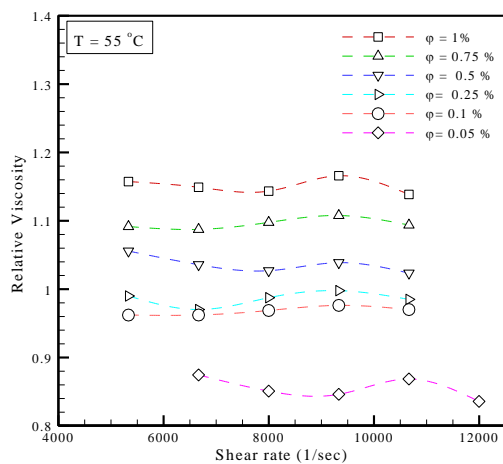
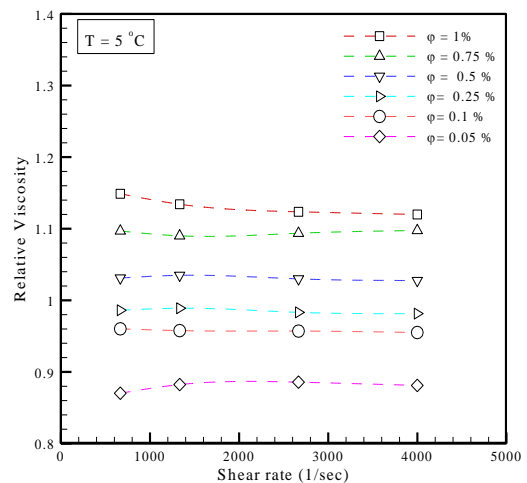
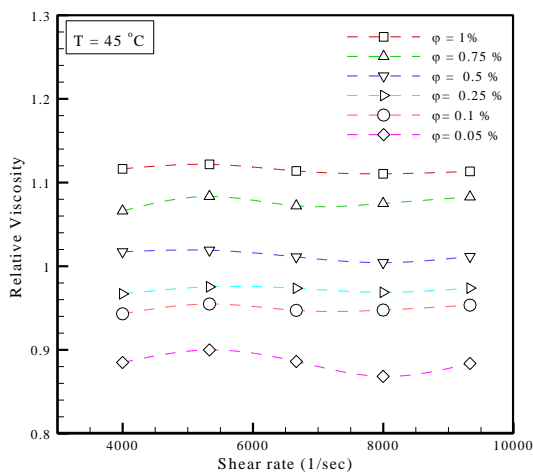
شکل (۴): منحنی تغییرات ویسکوزیته بر حسب نرخ برش در دماهای مختلف و کسرهای حجمی مختلف.

حسب نرخ برش در کسرهای حجمی و دماهای مختلف نشان داده شده است. کاهش ویسکوزیته نانوسیال نسبت به سیال پایه در کسرهای حجمی ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲۵ درصد در تمامی دماها به وضوح قابل مشاهده است و در سه کسر حجمی بیان شده مقادیر ویسکوزیته نسبی، مقادیری کوچکتر از واحد دارد. کاهش بیش از ۱۰ درصدی ویسکوزیته نانوسیال نسبت به سیال پایه در برخی دماها و کسرهای حجمی یکی از نتایج حالب توجه در این پژوهش می باشد. شکل ۷ نیز به مقایسه نتایج روند تغییرات ویسکوزیته نسبی نسبت به تغییرات کسر حجمی در نرخ برشهای مختلف، با نتایج همت و همکاران [۵] می پردازد. آنها [۵] در پژوهش خود به مطالعه ویسکوزیته نانوسیال هیبریدی اکسید آلومینیوم- نانولوله کربنی با سیال پایه روغنی 5W50 پرداختند. برخلاف نتایج حاصله از پژوهش حاضر، در پژوهش همت و همکاران [۵]، تمامی مقادیر ویسکوزیته نسبی، بزرگتر از واحد بوده و از ویسکوزیته روغن (سیال پایه) مقدار بیشتری دارد.



شکل (۵): نسبت تغییرات ویسکوزیته به تغییرات نرخ برشی در دماها و کسرهای حجمی مختلف.

در شکل ۶ ویسکوزیته نسبی (نسبت ویسکوزیته نانوسیال به ویسکوزیته سیال پایه در دما و نرخ برش مساوی) نانوسیال بر



شکل (۶): منحنی تغییرات ویسکوزیته نسبی به نرخ برش در دماها و کسرهای حجمی مختلف.

ابتدا روابطی برای بیان ضرایب m و n بر حسب پارامترهای دما و کسر حجمی معرفی شدند. این روابط در فرمول‌های (۳) و (۴) قابل مشاهده است. همچنین دقت بالای روابط ارائه شده در تخمین مقادیر m و n در کسرهای حجمی و دماهای مختلف به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ قابل مشاهده است. در نهایت رابطه (۵) به عنوان رابطه پیشنهادی جهت تخمین مقدار ویسکوزیته ارائه شده است. مقدار ضریب تعیین (R^2) در روابط (۳) و (۴) ۰/۹۹۹ است که نشان از دقت بسیار بالای روابط مذکور در تخمین مقادیر m و n دارد. در شکل ۱۰ نیز به مقایسه میزان انطباق مقادیر ویسکوزیته حاصل از رابطه پیشنهادی (۵) با مقادیر آزمایشگاهی در کسرهای حجمی مختلف پرداخته شده است. محاسبات نشان از وجود حداکثر خطای ۸ درصدی در پیش‌بینی مقادیر ویسکوزیته نانوسیال مورد بررسی توسط رابطه پیشنهادی (۵) داشت.

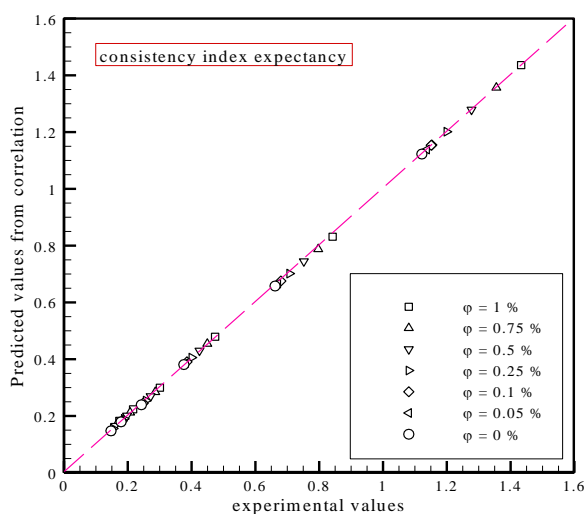
$$m_{bf} = 1.442 - 7.043 \left(\frac{T}{100} \right) + 13.41 \left(\frac{T}{100} \right)^2 - 8.886 \left(\frac{T}{100} \right)^3 \quad (3)$$

$$m_{nf} = m_{bf} [(\varphi + 1)^{0.09254} \exp(0.2T - 0.05802\varphi^{0.9697})]$$

$$n_{bf} = 0.8927 + 0.04568 \left(\frac{T}{100} \right)^2 \quad (4)$$

$$n_{nf} = n_{bf} [(\varphi + 1)^{-0.003106} \exp(0.000857T - 0.0002123\varphi^{1.763})]$$

$$\mu_{nf} = m_{nf} \dot{\gamma}^{(n_{nf}-1)} \quad (5)$$

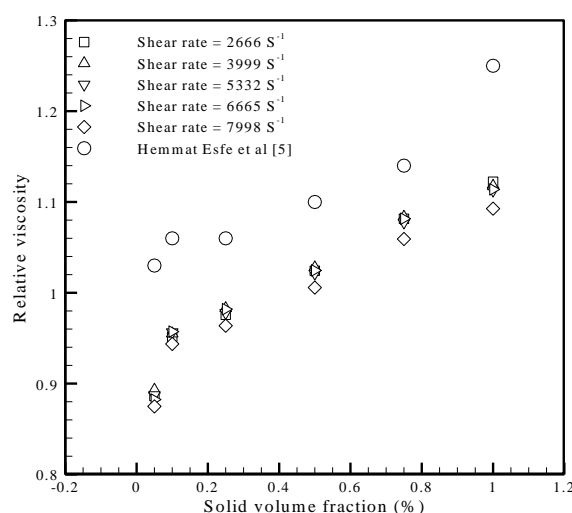


شکل (۸): میزان دقت رابطه پیشنهادی در تخمین مقدار

ضریب m .

البته، همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود روند کلی تغییرات ویسکوزیته نسبی بر حسب کسر حجمی در پژوهش حاضر و پژوهش همت و همکاران شباهت بسیاری با یکدیگر دارند.

رشد کمتر ویسکوزیته نانوسیال اکسید منیزیم- نانولوله کربنی با سیال پایه روغنی 5W50 در مقایسه با نانوسیال اکسید آلومینیوم- نانولوله کربنی با سیال پایه روغنی 5W50 در تمامی کسرهای حجمی می‌تواند از مزایا و برتری نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم- نانولوله کربنی با سیال پایه روغنی 5W50 در مقایسه با ترکیب اکسید آلومینیوم- نانولوله کربنی باشد، چرا که در زمان استفاده از آن در تجهیزات صنعتی و عملیاتی، نیاز به توان پمپاژ کمتری داشته و خطر رسوب و ته‌نشینی آن در تجهیزات به طور محسوسی کاهش می‌یابد.



شکل (۷): لزجت نسبی در 35°C ، مقایسه با پژوهش همت اسفه و همکاران [۵].

۳-۲- رابطه تجربی سه متغیره پیشنهادی

به منظور پیش‌بینی مقادیر ویسکوزیته در دماها و کسرهای حجمی مختلف، رابطه‌ای سه متغیره (تابعی از پارامترهای دما، کسر حجمی و نرخ برش) ارائه شده است. با توجه به رفتار غیرنیوتنی (شبه پلاستیک) نانوسیال مورد بررسی در پژوهش حاضر و با توجه به روابط مربوط به تنش برشی و ویسکوزیته نانوسیالات غیرنیوتنی (بیان شده در روابط (۱) و (۲)) تلاش بر این شد تا رابطه‌ای به فرم کلی رابطه (۲) به عنوان رابطه پیشنهادی تخمین مقدار ویسکوزیته معرفی گردد. بنابراین،

رفتار توابع توانی (توان کمتر از یک) دارد. بنابراین، نانوسیال مورد بررسی غیرنیوتنی و از نوع شبه پلاستیک است.

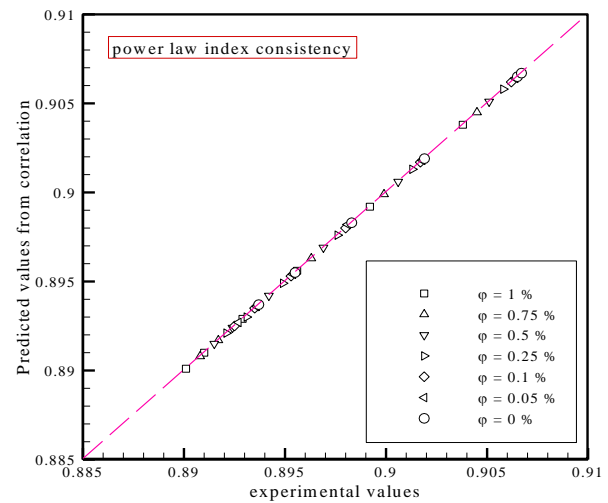
۲- پارامتر ویسکوزیته به عنوان تابعی سه متغیره از متغیرهای دما، کسر حجمی و نرخ برش معرفی شد که این کار تاکنون تقریباً در هیچ یک از پژوهش‌های گذشته صورت نگرفته است. توانایی بالای رابطه ارائه شده (با ضریب تعیین ۰/۹۹۹) در تخمین ویسکوزیته نیز از دیگر مزایای رابطه ارائه شده است.

۳- کاهش ویسکوزیته نانوسیال در مقایسه با سیال پایه در کسرهای حجمی ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲۵ از دیگر نتایج جالب توجه پژوهش حاضر می باشد.

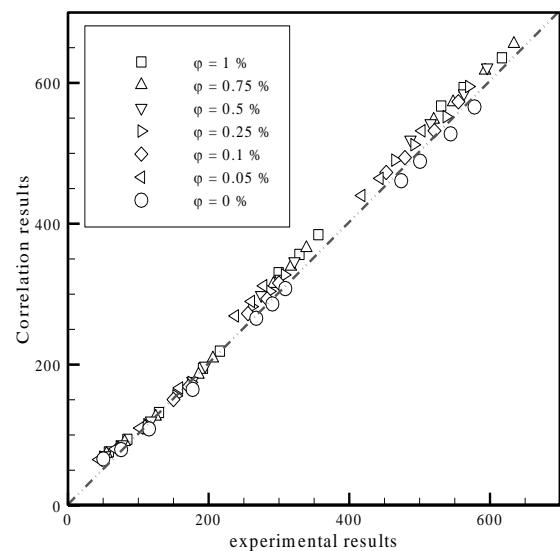
۴- ارائه روابطی به شکل رابطه پیشنهادی ارائه شده در پژوهش حاضر و تعمیم شکل کلی آن برای نانوسیالات غیرنیوتنی دیگر، می تواند محققان را در دستیابی به رابطه‌ای متحدالشکل با هدف پیش‌بینی ویسکوزیته تمامی نانوسیالات یاری کند.

۵- مراجع

1. Hemmat Esfe, M., Abbasian Arani, A.A., Rezaie, M., Yan, W.M., and Karimipour, A. "Experimental Determination of Thermal Conductivity and Dynamic Viscosity of Ag-MgO/water Hybrid Nanofluid", *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, Vol. 66, pp. 189-195, 2015.
2. Hemmat Esfe, M., Saedodin, S., and Mahmoodi, M. "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, pp. 68-78, 2014.
3. Vakili-Nezhaad, G.R. and Dorany, A. "Investigation of the Effect of Multiwalled Carbon Nanotubes on the Viscosity Index of Lube Oil Cuts", *Chemical Engineering Communications*, Vol. 196, No. 9, pp. 997-1007, 2009.
4. Etefaghi, E., Rashidi, A., Ahmadi, H., Mohtasebi, S.S., and Pourkhalil, M. "Thermal and Rheological Properties of Oil-Based Nanofluids From Different Carbon Nanostructures", *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, Vol. 48, pp. 178-182, 2013.
5. Hemmat Esfe, M., Karimpour, R., Abbasian Arani, A.A., and Shahram, J. "Experimental Investigation on Non-Newtonian Behavior of Al₂O₃-MWCNT/5W50 Hybrid Nano-Lubricant Affected by Alterations of Temperature, Concentration and Shear rate for Engine Applications", *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, Vol. 82, pp.97-102, 2017.



شکل (۹): میزان دقت رابطه پیشنهادی در تخمین مقدار ضریب n .



شکل (۱۰): میزان دقت رابطه پیشنهادی در تخمین مقدار ویسکوزیته نانوسیال

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر به بررسی آزمایشگاهی رفتار رئولوژیکی نانوسیال هیبریدی اکسید منیزیم- نانولوله کربنی با سیال پایه 5W50، متأثر از پارامترهای دما، کسر حجمی و نرخ برش پرداخته شد.

۱- بررسی های حاصل از برازش منحنی‌های توانی بر روی داده‌های حاصل از نتایج آزمایشگاهی نشان از مشابهت رفتار نانوسیال اکسید منیزیم- نانولوله کربنی با سیال پایه 5W50 با

12. Hemmat Esfe, M., Afrand, M., Rostamian, S.H., and Toghraie, D. "Examination of Rheological Behavior of MWCNTs/ZnO-SAE40 Hybrid Nano-lubricants under Various Temperatures and Solid Volume Fractions", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 80, pp. 384-390, 2016.
13. Adio, S.A., Mehrabi, M., Sharifpur, M., and Meyer, J.P. "Experimental Investigation and Model Development for Effective Viscosity of MgO-Ethylene Glycol Nanofluids by Using Dimensional Analysis, FCM-ANFIS and GA-PNN techniques", *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, Vol. 72, pp. 71-83, 2016.
14. Sadri, R., Ahmadi, G., Togun, H., Dahari, M., Kazi, S.N., Sadeghinezhad, E., and Zubir, N. "An Experimental Study on Thermal Conductivity and Viscosity of Nanofluids Containing Carbon Nanotubes", *Nanoscale Research Letters*, Vol. 9, No. 151, 2014.
15. Asadi, M. and Asadi, A. "Dynamic Viscosity of MWCNT/ZnO-Engine Oil Hybrid Nanofluid: An Experimental Investigation and New Correlation in Different Temperature", *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, Vol. 76, pp. 41-45, 2016.
16. Afrand, M., Najafabadi, K.N., and Akbari, M., "Effects of Temperature and Solid Volume Fraction on Viscosity of SiO₂-MWCNTs/SAE40 Hybrid Nanofluid as a Coolant and Lubricant in Heat Engines", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 102, pp. 45-54, 2016.
17. Afrand, M., Najafabadi, K.N., Sina, N., Safaei, M.R., Kherbeet, A.Sh., Wongwises, S., and Dahari M. "Prediction of Dynamic Viscosity of a Hybrid Nano-lubricant by an optimal artificial neural network", *Int.*
6. Soltani, O. and Akbari, M. "Effects of Temperature and Particles Concentration on The Dynamic Viscosity of MgO-MWCNT/Ethylene Glycol Hybrid Nanofluid: Experimental Study", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Vol. 84, pp. 564-570, 2016.
7. Zareie, A. and Akbari, M. "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).
8. Hemmat Esfe, M., Afrand, M., Yan, W.M., Yarmand, H., Toghraie, D., and Dahari M. "Effects of Temperature and Concentration on Rheological Behavior of MWCNTs/SiO₂(20-80)-SAE40 Hybrid Nano-Lubricant", *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, Vol. 76, pp. 133-138, 2016.
9. Asadi, A., Asadi, M., Rezaee, M., Siahmargoi, M., and Asadi, F. "The Effect of Temperature and Solid Concentration on Dynamic Viscosity of MWCNT/MgO (20-80)-SAE50 Hybrid Nano-Lubricant", *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, Vol.78, pp. 48-53, 2016.
10. Eshgarf, H., Afrand, M., Hemmat Esfe M. "Experimental Investigation of The Effects of Temperature and Nanoparticles Volume Fraction on The Viscosity of Non-Newtonian Hybrid Nanofluid", *Modarres Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 98-104, 2016 (in Persian).
11. Hemmat Esfe, M., Rostamian, H., and Afrand, M., Wongwises, S. "Examination of Effects of Multi-walled Carbon Nanotubes on Rheological Behavior of Engine Oil (10W40)", *J. Nanostruct*, Vol. 6, No. 4, pp. 257-263, 2016.

