



مطالعه آزمایشگاهی و مقایسه‌ای خواص ترموفیزیکی نانوسیالات مختلف با هدف انتخاب بهترین نانوروانکار

محمد همت اسفه ^{id}

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

برجسته‌ها

- نانو روانکار با نسبت ۴۰:۶۰ دارای رفتاری غیرنیوتونی ولی نانوروانکار با نسبت ۱۰:۹۰ و بر حسب غلظت نانوذرات دارای هر دو رفتار نیوتونی و غیرنیوتونی است.
- عملکرد نانوروانکار به عنوان روغن موتور هیبریدی برای ۹۰٪ وزنی از Al_2O_3 بهتر از ۶۰٪ وزنی است.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۳

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۱/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۰۳/۰۱

*نویسنده مسئول:

M.Hemmatesfe@semnan.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

نانوسیالات هیبریدی

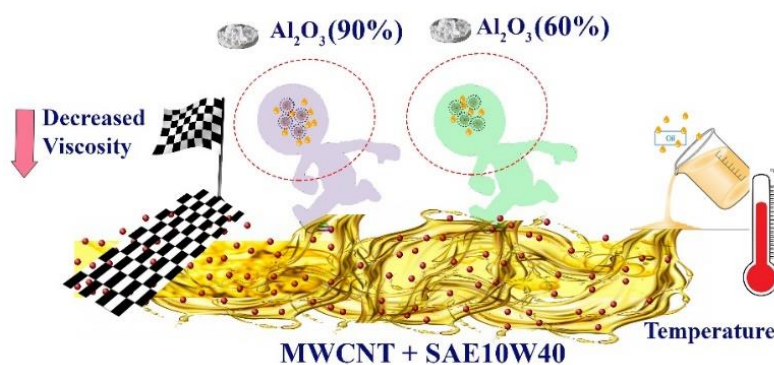
ویسکوزیته

مقایسه خواص ترموفیزیکی

بررسی تجربی

روش سطح پاسخ

چکیده گرافیکی



چکیده

در این پژوهش، تأثیر نسبت نانوذرات در عملکرد ویسکوزیته روغن پایه مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در دمای $55-5^{\circ}C$ ، کسر حجمی ۱٪-۰/۰۵ و نرخ برش‌های $10^4-10^6 s^{-1}$ انجام شد. هدف این مطالعه، دستیابی به مشخصات نانوروانکار بهینه است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که نانوسیالات دارای رفتاری غیرنیوتونی و از نوع شبه‌پلاستیک هستند. بیش‌ترین افت ویسکوزیته برای $MWCNT/Al_2O_3$ (10%:90%)-10W40 و $MWCNT/Al_2O_3$ (40%:60%)-10W40 به ترتیب به میزان ۱۳٪-۸ و ۸۵٪-۱۰ بدست آمد. برآیند بررسی‌ها نشان می‌دهد که نانوروغن $MWCNT/Al_2O_3$ (10%:90%)-10W40 نسبت به نانوروغن رقیب عملکرد روانکاری بهتری را در شرایط استارت (روانایی بهتر روغن) و حرکت موتور (رفتار کنترل شده‌تر) داشته است. با استفاده از روش سطح پاسخ، برای پیش‌بینی داده‌های پاسخ هدف، مدل تجربی سه متغیره-سه درجه‌ای نرمالایزه شده با مشخصات تابع انتقال توانی، $\lambda = -0/15$ و مقدار ثابت برابر با صفر ارائه‌گردید. حاشیه انحراف $2/66\% < MOD < 2/72\%$ محاسبه گردید. آنالیز حساسیت ویسکوزیته نشان داده که با افزودن نانوذره در کسر حجمی‌های بالا، حساسیت به تغییرات در ویسکوزیته بیشتر شده است.

۱- مقدمه

"نانو" کلمه‌ای یونانی به معنی کوچک است و برای تعیین، مقدار یک میلیاردیم تعریف شده است [۱]. چون یک اتم تقریباً ۱۰ نانومتر است نانو از فناوریهای هایتک و به‌روز در جهان امروزه بشمار می‌رود. اگرچه دانش این فناوری مربوط به ۶۰ سال قبل که توسط ریچارد فاینمن به عنوان پایه گذار این علم [۲] برمی‌گردد ولی این فناوری به سرعت توانسته در بخش‌های مختلف صنایع در کشورهای مختلف گسترش پیدا کند. ویژگی‌ها و خواص منحصر به فردی که علم نانو در ترکیب با سیالات و دیگر ترکیبات ایجاد کرده باعث شده تا پنجره جدیدی در علوم مختلف باز شود. امروزه علم نانو در بخش‌های مختلف نظام اقتصادی و پزشکی در حال بکارگیری است. برای نمونه در بخش صنعت نفت (ازدیاد برداشت نفت و گاز) [۳-۵]، پزشکی (انتقال دارو، مهندسی بافت و...) [۶، ۷]، مدیریت شهری (پوشش‌های ساختمانی، تصفیه کننده هوا و...) [۸-۱۰]، منابع طبیعی (انرژی و آب) [۱۱، ۱۲]، صنعت خودرو (سیستم خنک‌کننده و...) [۱۳-۱۵] و هوافضا (نانو در سوخت موشک و...) [۱۶] استفاده از نانو کمک قابل توجهی کرده است. محققان تلاش دارند تا خواص ترموفیزیکی سیالات (ویسکوزیته، ضریب انتقال حرارت) را با ترکیب نانومواد در سیالات (آب، اتیلن گلیکول، روغن و...) بهبود دهند. در قرن ۱۹ که شروع بکارگیری علم نانو در سیالات بود تا اکنون تحقیقات بسیار زیادی در این زمینه انجام شده است. محققان مختلفی با بکارگیری طیف مختلفی از نانومواد در سیالات مختلف خواص ترموفیزیکی و رفتار رئولوژیکی را مورد بررسی قرار دادند [۱۶-۱۹]. برای نمونه در تحقیقی در سال ۲۰۲۱ [۲۰] رفتار رئولوژیکی نانوسیالات آلومینای مبتنی بر نمک حاوی ۱/۵-۰/۵ درصد وزنی نانو ذرات آلومینا با اندازه اسمی ۱۳/۶ نانومتر ارزیابی شد. نتایج آنها نشان داد که نانوسیالات مبتنی بر نمک مذاب با ۰/۵ درصد وزنی Al_2O_3 دارای رفتار نیوتنی با شاخص رفتار رئولوژیکی $n=1$ است. چو و همکاران [۲۱] به مطالعه رفتار رئولوژیکی نانوسیال هیبریدی MWCNT-TiO₂/5W40 به صورت تجربی پرداختند. آزمایش‌ها در کسر حجمی ۱٪-۰/۰۵، دمای ۲۰-۶۰ °C و با استفاده از

ویسکومتر بروکفیلد انجام شد. رفتار نانوسیال بر خلاف روغن 5W40 از نوع غیر نیوتنی و نازک شدن با برش بود. همچنین ویسکوزیته نانوسیال با افزایش کسر حجمی نانوذرات و کاهش دما و نرخ برش، افزایش می‌یابد و حضور نانوذرات باعث افزایش ویسکوزیته تا ۷۹۰٪ شد. گیوا و همکاران [۲۲] به بررسی ویسکوزیته نانوسیال هیبریدی MWCNT-Fe₂O₃ بر پایه آب دیونیزه شده در دمای ۵۵ °C-۵ و کسر حجمی ۱/۵-۰/۱ به صورت آزمایشگاهی پرداختند. ساختار نانوذرات با استفاده از TEM بررسی شد. نتایج مربوط به پایداری نانوسیالات نیز خوب بود. نتایج مربوط به ویسکوزیته نانوسیال نشان داد که با افزایش یافتن غلظت نانوذرات، افزایش می‌یابد. حداکثر افزایش ویسکوزیته به میزان ۳۵/۷٪ نسبت به سیال پایه اتفاق افتاد. همچنین نانوسیال هیبریدی MWCNT-Fe₂O₃ نسبت به نانوسیال تک ذره‌ای شامل Fe₂O₃ دارای عملکرد بهتر و ویسکوزیته کمتری بود. چاندراسکار و همکاران [۲۳] برای بررسی رفتار رئولوژی نانوسیال از ترکیب Al_2O_3 /آب با قطر اسمی ۴۳ نانومتر در کسر حجمی‌های مختلف ۰/۳۳-۰/۵ درصد استفاده کردند. هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال‌ها اندازه‌گیری شد و مشخص گردید که افزایش گرانیروی به طور قابل توجهی بیشتر از افزایش هدایت گرمایی است. همچنین آنها نشان دادند که هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیالات با افزایش ذرات نانو در سیال پایه، افزایش می‌یابد. در پایان برای پیش بینی رسانایی گرمایی و گرانیروی نانوسیالات، مدل تجربی با دقت قابل قبول ارائه شد. اشو و همکاران [۲۴] به مطالعه تاثیرات نسبت اختلاط نانوذرات بر روی ویسکوزیته نانوسیال هیبریدی Al_2O_3 -ZnO پرداختند. اندازه گیری ویسکوزیته در دماها و کسر حجمی‌های مختلف انجام شد. نتایج نشان داد ویسکوزیته با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش و با افزایش دما کاهش می‌یابد. در تمام غلظت‌ها و دماهای بررسی شده، نانوسیال هیبریدی با نسبت ۱:۱ کمترین مقدار ویسکوزیته را در مقایسه با سایر نسبت‌های ۲:۱ و ۱:۲ داشت. در تحقیقی [۲۵] رفتار رئولوژی نانوروغن هیبریدی $Al_2O_3(65\%)$ -MWCNT(35%)/5W50 در کسر حجمی ۰ تا ۱٪ و دمای بین ۵ تا ۵۵ درجه سانتیگراد و نرخ برشی بین 10^{-1} تا 10^4 s⁻¹

ویسکوزیته نانوسیال های ترکیبی با دما به طور آزمایشی بررسی و مشخص گردید که با افزایش دما، ویسکوزیته نانوروانکارها کاهش میابد. مو و همکاران [۲۹] به بررسی تأثیر غلظت و اندازه نانوذرات بر روی خواص رئولوژیکی در نانوسیال هیبریدی Al_2O_3-Cu/W با کسر حجمی $0/3-1/5$ و اندازه نانوذرات 50 نانومتری از Cu و اندازه های 20 ، 30 و 50 نانومتری از نانوذرات Al_2O_3 پرداختند. نتایج نشان داد با افزایش کسر حجمی، ویسکوزیته افزایش می یابد. در کسر حجمی بیش تر از $0/3$ ، ویسکوزیته با افزایش اندازه نانوذرات، افزایش می یابد. کمترین ویسکوزیته نیز متعلق به نانوذرات با اندازه 20 نانومتر بود. نانوسیالات با اندازه های 30 و 50 نانومتر دارای رفتاری غیر نیوتنی بودند اما نانوذرات با اندازه 20 نانومتر در غلظت های کم (کم تر از $0/3$) و نرخ برشی پایین (کمتر از $1000 s^{-1}$) دارای رفتاری نیوتنی بودند. در این مطالعه به بررسی و مقایسه خواص رئولوژیکی نانوسیال هیبریدی $MWCNT / Al_2O_3$ بر پایه روغن موتور $10W40$ در نسبت های مختلف از نانوذرات پرداخته می شود. در ابتدا روند تهیه نانو روغن ها به همراه مشخصات نانوذرات Al_2O_3 و $MWCNT$ و سپس نحوه اندازه گیری ویسکوزیته نانوسیالات و دستگاه های مورد استفاده بیان می گردد. به منظور بررسی صحت نتایج آزمایشگاهی، عدم قطعیت مربوط به ویسکوزیته نانو روغن محاسبه می شود. ارائه نتایج که شامل بررسی رفتار رئولوژیکی نانوروغن با استفاده از روش های مختلف، تحلیل میزان افزایش ویسکوزیته و تأثیر پارامتر دما بر ویسکوزیته می باشد در ادامه بیان می گردد. به منظور پیش بینی ویسکوزیته نانو سیال با استفاده از روش سطح پاسخ، رابطه ای برحسب دما، کسر حجمی و نرخ برشی نانو روغن ارائه گردید و دقت آن با استفاده از پارامترهای مختلف ارزیابی شد. نتایج مربوط به MOD و حساسیت نیز ارائه گردید.

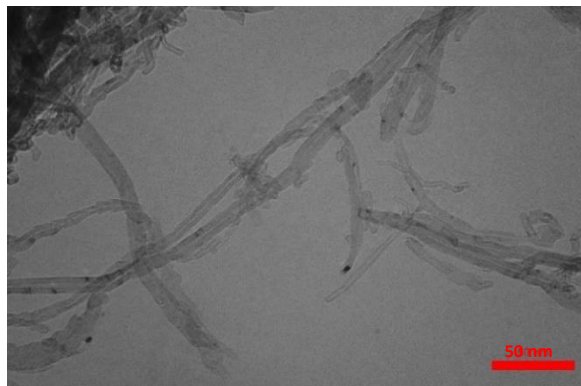
۲- فرآیند تجربی

۲-۱- تهیه نمونه

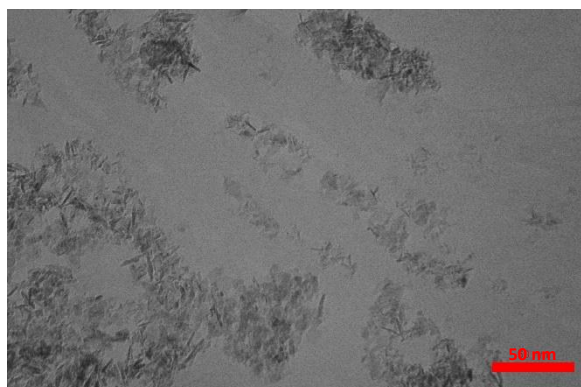
برای تهیه نانوروغن نیاز به نانومواد و روغن پایه است. در این پژوهش از نانوذرات اکسید آلومینیوم و نانولوله کربنی با

و $666/5S^{-1}$ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنها نشان داده که نانوروان کننده ترکیبی، یک سیال غیر نیوتنی است، همچنین شاخص قاعده توانی نشان دهنده رفتار برشی نازک (شبه پلاستیک) سیال است. همچنین مشاهده شد که با افزایش کسر حجمی و دما، رفتار غیر نیوتنی نانوروان کننده به ترتیب افزایشی و کاهشی است. آن ها به منظور پیش بینی گرانروی ماده روان کننده نانو ترکیبی، همبستگی جدید بر اساس دما و کسر حجمی ارائه دادند. محققان در پژوهشی [۲۶] رفتار رئولوژی (رابطه تنش برشی و گرانروی با سرعت برشی) سیال مبرد نانویی $Al_2O_3/R141b$ را برای غلظت های حجمی $0/05-0/15$ و دمای 4 تا 16 درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار دادند. از این آزمایش مشخص شد که، مبرد نانویی رفتار غیر نیوتنی از خود نشان داده است. با این حال، در نرخ برشی بالا، روند کاملاً نزدیک به رفتار نیوتنی پیدا شد. علاوه بر این، گرانروی با افزایش سرعت برش و غلظت حجمی افزایش و با افزایش دما کاهش می یابد. مخرجی و همکاران [۲۷] به بررسی تجربی خواص ترموفیزیکی و عملکرد جوش جریان زیر سرد نانوسیال $Al_2O_3/water$ در یک لوله افقی پرداختند. نانوسیالات به روش دو مرحله ای و در کسر حجمی های مختلف تهیه شدند. پایداری نانوسیال ها با استفاده از آنالیز پتانسیل زتا بررسی شد و نتایج نشان از پایداری خوب نانوسیالات بدون استفاده از سورفکتانت داشت. همچنین ویسکوزیته نانوسیال با افزودن نانوذرات افزایش و با دما کاهش یافت. افزایش انتقال حرارت در جوشش جریان زیر سرد نانوسیال نیز اتفاق افتاد. در مقاله ای [۲۸] رفتار رئولوژی ویسکوزیته نانوسیالات تک جزئی و دوجزئی Al_2O_3 ، SiO_2 بر پایه آب و ترکیبی آنها (نانو ذرات $Al_2O_3 + SiO_2$ رقیق شده در آب) مطالعه شده است. تحقیقات تجربی آنها نشان داده که نانوروانکارها دارای رفتار غیر نیوتنی است. نانوسیالات آلومینا و دو نانوسیال ترکیبی مورد مطالعه دارای رفتار نازک شدن با برش و نانوسیال سیلیس دارای یک رفتار ضخیم شدن با برش هستند. آن ها مشاهده کردند که ویسکوزیته نسبی کلی آلومینا درمقایسه نانوسیال SiO_2 بیشتر است. همچنین ویسکوزیته نانوسیال با ترکیب $0/05$ سیلیکا با آلومینا، در مقایسه با نتایج نانوسیال SiO_2 ، بیشتر است. بعلاوه، تغییر

برای محاسبه مقدار جرم نانوذرات لازم در تهیه کسر حجمی‌های مختلف از رابطه (۱) استفاده شده است [۳۰]. همچنین برای توزیع نانومواد، از یک ترازوی دیجیتالی محفظه دار (شکل ۴) با دقت 0.001 گرم استفاده شد.

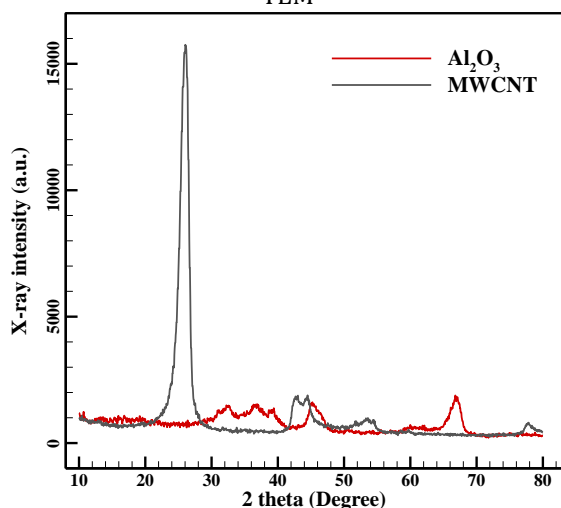


الف) MWCNT

ب) Al_2O_3

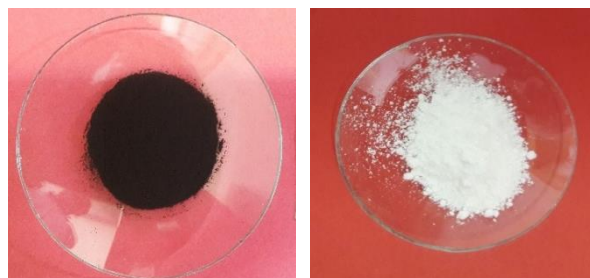
شکل (۲): نمونه‌های شناسایی شده با استفاده از روش

TEM



شکل (۳): آنالیز XRD برای نمونه‌های مختلف

نسبت ترکیب $60:40$ و $90:10$ در روغن پایه 10W40 استفاده گردید. روغن بهران پیشتاز، روغن برجسته موتور که دارای بالاترین استانداردهای جهانی است و برای اکثر اتومبیل‌های بنزینی سبک و وسایل نقلیه دیزلی سنگین مناسب است در این مطالعه استفاده شد. مشخصات فیزیکی و خواص شدتی در جدول ۱ بیان شده است. تصاویر مربوط به نانوذرات در شکل ۱ قرار داده شده است.



ب) MWCNT

الف) Al_2O_3

شکل (۱): نانوذرات بکار رفته در روغن پایه SAE 10W40
جدول (۱): مشخصات نانوذرات مورد استفاده در مطالعه حاضر

نانوذرات	خلوص	APS	SSA	رنگ	چگالی واقعی	ساختار
MWCNTs	$>99\%$	$5-15$ nm	233 m ² /g	سیاه	~ 2.1 g/cm ³	استوانه‌ای
Al_2O_3	$\geq 99\%$	20 nm	138 m ² /g	سفید	3.97 g/cm ³	شبهه به کره

برای تصویربرداری از نمونه و تعیین ویژگی‌های سطحی و مورفولوژی (اندازه و شکل بافت نمونه‌ها) و همچنین تصاویری با اطلاعات مختلف از سطح نمونه مثل پستی و بلندی سطح یا تصاویری از توزیع فازها در سطح روبش از روشهای میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ الکترونی عبوری به دلیل قدرت تفکیک بالا و همچنین اشعه پراش ایکس استفاده شده است. در شکل‌های ۲ و ۳ نمونه‌های تصاویر مربوط به عکسبرداری TEM و XRD مشاهده می‌شود.

ویسکومتر بروکفیلد مدل CAP 2000+ (شکل ۶) ساخت شرکت ایالت متحده استفاده گردید. مشخصات مربوط به ویسکوزیته سنج در جدول ۲ بیان شده است. مشخصات فنی و شرایط محیط عملکردی هم در جدول ۳ بیان شده است. قبل از اندازه‌گیری، برای کاهش خطای محاسبات دستگاه، فرآیند کالیبراسیون صورت گرفت. همچنین تمام مقادیر ویسکوزیته دو مرتبه اندازه‌گیری و سپس میانگین داده‌ها ثبت گردید. برخی اندازه‌گیری‌های ویسکوزیته برای نانوروانکارها در جدول ۴ بیان شده است.



شکل (۶): ویسکومتر مورد استفاده در آزمایشگاه

جدول (۲): مشخصات دستگاه ویسکومتر

مشخصات	شرح
نوع	CAP 2000+
ولتاژ ورودی	۱۱۵-۲۳۰ V
فرکانس ورودی	۵۰-۶۰ Hz
مصرف برق	کمتر از ۳۴۵ ولت
رنج گشتاور	۱۸۱۰۰ rpm
سرعت	۵-۱۰۰۰ rpm
دما	۵۵ - ۵ °C
مواد	دوک‌های مخروطی و صفحات حرارتی از کاربید تنگستن و نگهدارنده نمونه از تفلون ساخته شده‌اند.
تأثیر عوامل محیطی	ویسکومتر CAP 2000+ باید در شرایط زیر کار کند: دمای محیط: ۲۰ - ۵ °C رطوبت: ۲۰-۸۰%

$$\phi = \left(\frac{\left(\frac{W}{\rho}\right)_{Al_2O_3} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{MWCNT}}{\left(\frac{W}{\rho}\right)_{MWCNT} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{Al_2O_3} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{base-oil}} \right) \times 100 \quad (1)$$



شکل (۴): ترازوی آزمایشگاهی مورد استفاده با دقت

۰/۰۰۱

برای تهیه نانوروانکارهایی با پراکندگی مناسب از روش‌های پایدارسازی مانند اختلاط و فراصوت استفاده گردید. به منظور تعلیق و پراکندگی اولیه نانوذرات در روغن پایه از دستگاه همزن مغناطیسی (شکل ۵) به مدت ۱ ساعت استفاده شد. همچنین برای کاهش ناپایداری و حذف نانوذرات خوشه‌ای و عدم تشکیل رسوب از دستگاه لرزاننده مافوق صوت (شکل ۵) به مدت ۸ ساعت استفاده گردید.



الف) همزن مغناطیسی (ب) لرزاننده مافوق صوت

شکل (۵): ابزارهای مورد استفاده در پراکندگی

نانوروان کننده‌ها

۲-۲- اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی

برای تحلیل رفتار رئولوژی نانوروانکارها نیاز به اندازه‌گیری داده‌های ویسکوزیته است. برای همین منظور از دستگاه

۲-۳- تحلیل عدم قطعیت

در پژوهش حاضر از دستگاه ویسکومتر برای بدست آوردن داده‌ها استفاده شده است و بر اساس راهنمای دستگاه، مقدار دقت ± 2 برای اندازه گیری ویسکوزیته و ± 1 برای اندازه گیری دما است. عدم قطعیت اثر جمعیتی خطاها بر نتایج نهایی است و برای محاسبه آن از رابطه (۲) استفاده می‌شود [۳۱].

$$U = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

در این فرمول، U بیانگر عدم قطعیت و S انحراف از معیار و N تعداد تست‌ها می‌باشد. مقدار S از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۳۱].

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

در معادله ۳، X_i و \bar{X} به ترتیب برابر با مقدار اندازه گیری شده و مقدار میانگین می‌باشند. برای نانوسیال MWCNT/Al₂O₃(10%:90%)-10W40 و در دما، کسر حجمی و نرخ برشی‌های به ترتیب ۱۵ درجه سانتی گراد، ۰/۵٪ و $1333s^{-1}$ مقادیر جدول ۵ بدست آمد. بنابر این مقدار عدم اطمینان برابر با ۰/۰۸ می‌باشد.

جدول (۵): عدم اطمینان در اندازه گیری ویسکوزیته

شماره آزمایش	ویسکوزیته اندازه گیری شده
۱	۱۹۶/۴
۲	۱۹۶/۶
۳	۱۹۵/۹
میانگین	۱۹۶/۳
S	۰/۱۳
U	۰/۰۸

۳- بحث و نتیجه گیری

کلید ارزیابی‌های رئولوژیکی مواد به پارامترهای اساسی مانند تنش (نیرو در هر منطقه) و کرنش (تغییر شکل در طول) بستگی دارد. طبیعت رفتار نیوتنی این است که در مقابل تغییرات تنش برشی رابطه خطی از خود نشان می‌دهد و ویسکوزیته ظاهری نسبت به نرخ برشی ثابت باقی می‌ماند.

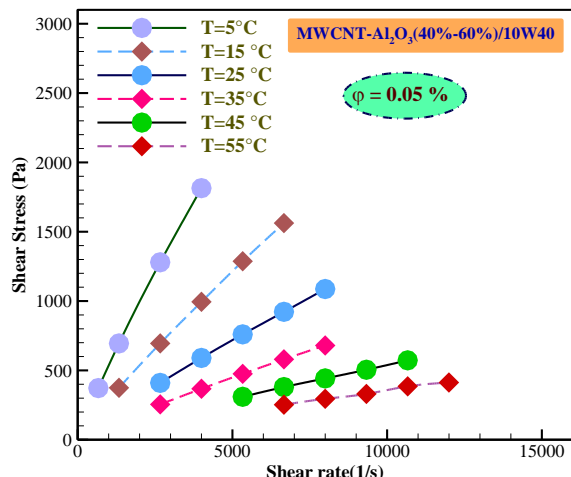
جدول (۳): محدوده شرایط برای اندازه‌گیری ویسکوزیته

نانوسیال	رنج شرایط آزمایشگاهی		
	دما (°C)	کسر حجمی (%)	تنش برشی (s ⁻¹)
MWCNT/Al ₂ O ₃ (40%:60%)-10W40	۵-۵۵	۰/۰۵-۱	۶۶۶/۵-۱۱۹۹۷
MWCNT/Al ₂ O ₃ (10%:90%)-10W40	۵-۵۵	۰/۰۵-۱	۶۶۶/۵-۱۱۹۹۷

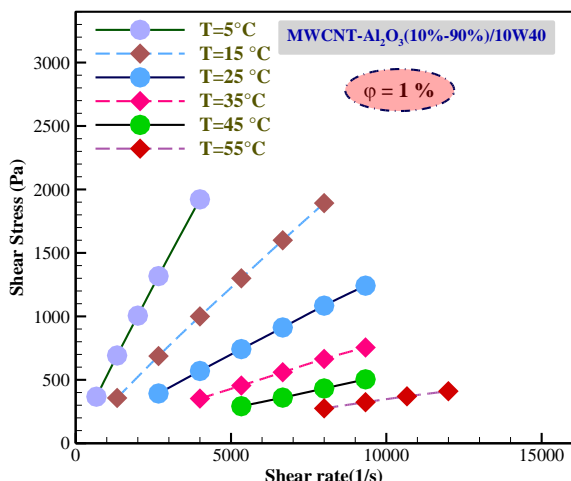
جدول (۴): برخی داده‌های اندازه گیری شده توسط

ویسکومتر CAP2000+

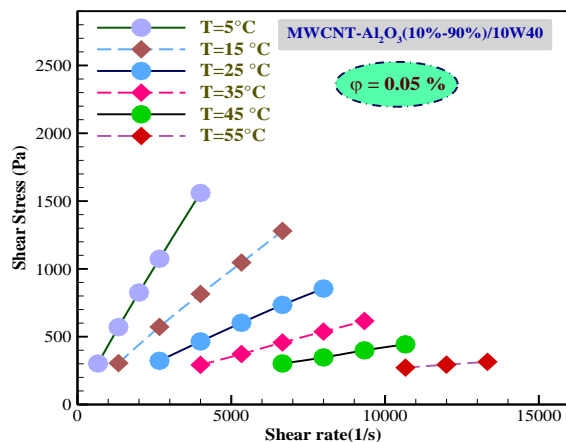
نانوسیال	کسر حجمی (%)	دما (°C)	تنش برشی (s ⁻¹)	ویسکوزیته (mPas)
MWCNT/Al ₂ O ₃ (40%:60%)-10W40	۰/۰۵	۵	۶۶۶/۵	۵۵۹
	۰/۱	۱۵	۱۳۳۳	۲۸۳
	۰/۲۵	۲۵	۳۹۹۹	۱۵۱/۹
	۰/۵	۳۵	۶۶۶۵	۹۴/۱
	۰/۷۵	۴۵	۹۳۳۱	۶۲/۹
MWCNT/Al ₂ O ₃ (10%:90%)-10W40	۱	۵۵	۱۰۶۶۴	۴۳/۸
	۰/۰۵	۵	۳۹۹۹	۳۹۰
	۰/۱	۱۵	۱۳۳۳	۲۳۶
	۰/۲۵	۲۵	۳۹۹۹	۱۲۳/۷
	۰/۵	۳۵	۶۶۶۵	۸۰
	۰/۷۵	۴۵	۹۳۳۱	۵۳
	۱	۵۵	۱۰۶۶۴	۳۴/۷



ب) $\phi = 0.05\%$ و $\text{MWCNT}/\text{Al}_2\text{O}_3(40\%:60\%)/10\text{W}40$



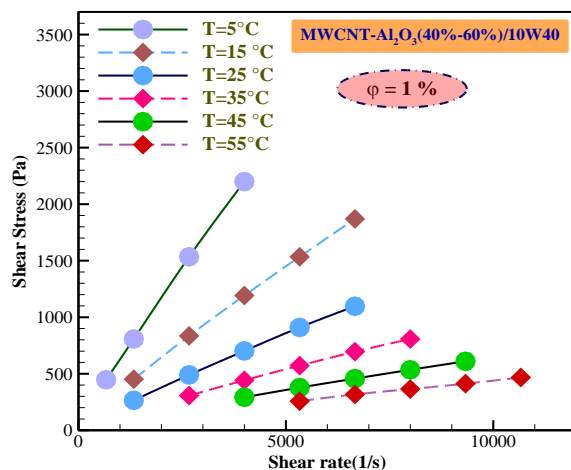
ج) $\phi = 1\%$ و $\text{MWCNT}/\text{Al}_2\text{O}_3(10\%:90\%)/10\text{W}40$



د) $\phi = 0.05\%$ و $\text{MWCNT}/\text{Al}_2\text{O}_3(10\%:90\%)/10\text{W}40$

شکل (۷): منحنی تغییرات تنش برشی-نرخ برشی در دما، کسر حجمی و مواد مختلف

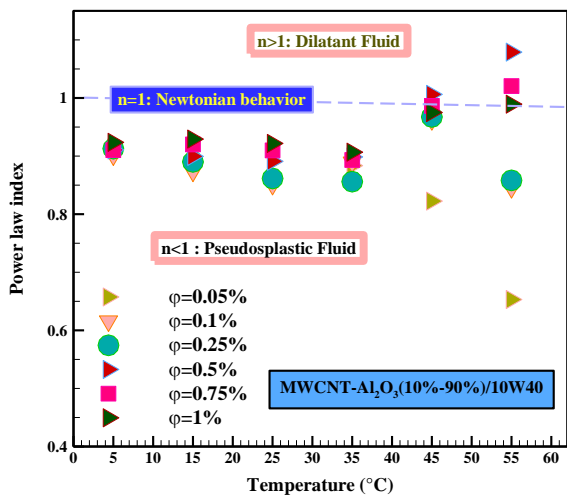
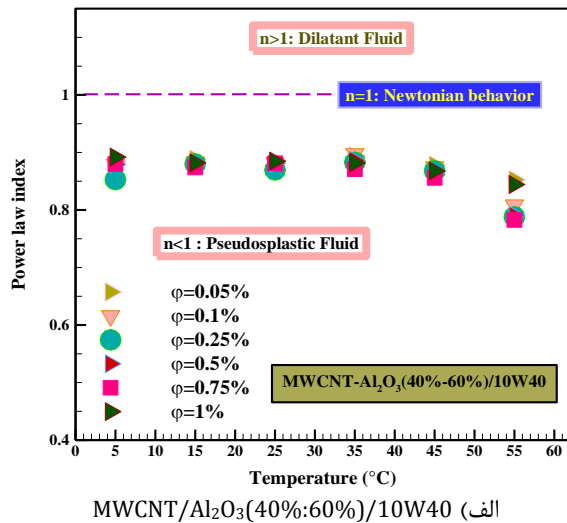
از طرف دیگر سیالاتی که وابسته به نرخ برش یا رابطه غیر خطی بین نرخ برش و تنش برشی در آنها دیده می‌شود، نانوسیالات غیرنیوتنی هستند. مطالعات روی رفتار رئولوژیکی نانوسیالات نشان می‌دهد که این سیالات بسته به دو ماهیت جریان نیوتنی و غیر نیوتنی به تعدادی از عوامل و شرایط بستگی دارند. برخی از فاکتورهای قابل توجه شامل غلظت، دما، سیالیت سیالات پایه، و همچنین نوع و اندازه نانوذرات هستند. به عنوان مثال، یک نانوسیال با غلظت کم رفتار نیوتنی از خود نشان می‌دهد اما در غلظت بالاتر رفتار متفاوت دارد [۳۲-۳۵]. در ابتدا جهت تعیین نوع رفتار جریان نانوروان کننده‌های هیبریدی MWCNT- $\text{Al}_2\text{O}_3/10\text{W}40$ با درصد‌های مختلف، رئوگرام‌های آن‌ها در دماها و غلظت‌های مختلف بررسی و مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در شکل ۷ منحنی‌های تنش برشی-نرخ برشی در تمامی دماها و در دو کسر حجمی ۰/۰۵٪ و ۱٪ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۷ شیب منحنی‌های جریان در دماهای ۵-۵۵°C در نرخ برش‌های مختلف نشان داده شده است. در نتیجه تا اینجای مقایسه می‌توان گفت نانو روغن‌ها رفتارهای غیرنیوتنی دارند که جهت استفاده در روانکاری امتیاز محسوب می‌شود. همان طور که در شکل ۷ مشخص است با افزایش یافتن دما در نرخ برشی ثابت، مقدار تنش برشی کاهش می‌یابد و علت این است که با افزایش دما فاصله بین مولکولها زیادتر شده و بنابر این تنش برشی که معیاری از نیروی وارد بر سطح می‌باشد کاهش می‌یابد و در واقع نیروی بین نانوذرات و سیال پایه کم‌تر شده است.



الف) $\phi = 1\%$ و $\text{MWCNT}/\text{Al}_2\text{O}_3(40\%:60\%)/10\text{W}40$

۱-۳- شاخص توانی

غیرنیوتنی می‌باشد. اما همین نانوروغن در دماهای بالا ($45-55^{\circ}\text{C}$) و کسرهای حجمی (0.1% و 0.5%) (بیشترین مقدار n) دارای مقدار 1.020 ، 1.079 ، 1.063 بوده و نشان دهنده تمایل بیشتر به رفتار نیوتنی می‌باشد.



شکل (۸): اثر دما و کسر حجمی بر روی شاخص توان

۲-۳- ویسکوزیته-نرخ برشی

در این بخش تأثیرپذیری ویسکوزیته نانوروغن‌ها در مقایسه با روغن پایه از نرخ برش‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. نرم شوندگی با برش به ویژگی‌های غیرنیوتنی نانوسیالات گفته می‌شود. نانوذرات بیشتر به صورت سنگدانه‌های موجود در سیالات می‌باشد. در سیالات به دلیل

مدل قانون توانی یکی دیگر از راه‌های تشخیص رفتار رئولوژیک نانوسیالات هیبریدی شامل نانوذره MWCNT- Al_2O_3 در روغن پایه 10W40 می‌باشد که برای هر دو نانوروغن مورد مقایسه قرار می‌گیرد. طبق رابطه (۴)، از برازش منحنی تنش برشی τ (Pa)-نرخ برش $\dot{\gamma}$ (s⁻¹) مقادیر n حاصل می‌شود. طبق معادله (۴) [۳۶] که m و n به ترتیب شاخص ثبات و قانون توانی هستند، به بررسی نتایج آزمایشگاهی با استفاده از منحنی‌های شکل ۸ می‌پردازیم.

$$\tau = m\dot{\gamma}^n \quad (4)$$

بر طبق این قاعده، مقادیر n در رابطه (۴)، در صورتی که برابر با مقدار واحد باشند ($n = 1$) از رفتار نیوتنی پیروی می‌کند. همچنین در صورتی که داده n در بازه بزرگ‌تر ($n > 1$) یا کوچک‌تر ($n < 1$) از مقدار واحد قرار گیرد، نانوروغن از رفتار دیلاتانت یا غیرنیوتنی تبعیت می‌کند. همانطور که در شکل ۸ مشخص شده است نانوروغن MWCNT- Al_2O_3 (40% - 60%)/10W40 در تمامی دماها و کسرهای حجمی دارای مقدار n کمتر از مقدار واحد است و نانوروغن از نوع غیرنیوتنی می‌باشد. همچنین با افزایش دما، فاصله نانوروغن با $n = 1$ بیشتر شده و این نشان دهنده تمایل بیشتر به رفتار غیرنیوتنی می‌باشد. اما نانوروغن MWCNT- Al_2O_3 (10%-90%)/10W40 در دماهای بالاتر و کسر حجمی‌های بالا، مقدار n بالاتر از مقدار واحد است و نانوروغن از نوع نیوتنی و دیلاتانت می‌باشد. در حالیکه شاخص جریان (n) برای این نانو روغن (MWCNT- Al_2O_3 (10%-90%)/10W40) در دماهای بالا و کسرهای حجمی پایین (0.05%) بیانگر این است که فاصله نانوروغن با $n = 1$ بیشتر شده و بنابراین تمایل بیشتر به رفتار غیرنیوتنی می‌باشد.

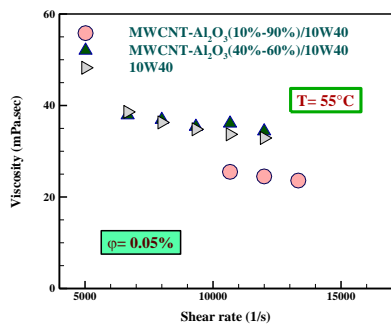
در جدول ۶ مقادیر دقیق n برای نانوروغن‌های مورد مطالعه گزارش شده است. نانوروغن MWCNT- Al_2O_3 (10%-90%)/10W40 در بالاترین محدوده دمایی (55°C) و در کسر حجمی (0.05%) (پایین‌ترین مقدار n) دارای مقدار 0.6531 است و این نشان دهنده تمایل بیشتر به رفتار

(۵۵ درجه سانتی گراد) با افزایش نرخ برش، ویسکوزیته نانوروغن‌ها ثابت می‌ماند و به همین دلیل، منحنی ویسکوزیته و نرخ برش در دماهای پایین و بالا (5°C و 55°C) بزرگنمایی شده است تا تأثیر نرخ برش آزمایش بر ویسکوزیته نانوروغن‌ها نسبت به روغن پایه به‌خوبی مشخص شود. وابسته بودن ویسکوزیته به پارامترهای دما، غلظت و نرخ برش نشان‌دهنده‌ی غیرنیوتنی بودن نانوروغن است.

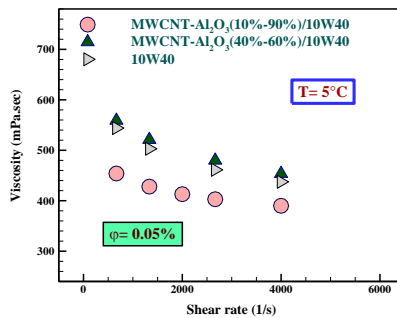
وجود سنگدانه‌ها (نانوذرات)، تحرک سیالات کمتر شده و در نتیجه چسبندگی در نانوسیالات بیشتر می‌شود. با افزایش نرخ برش، نانوذرات به ساختارهای کوچکتر تقسیم می‌شوند و بنابراین تحرک سیالات بیشتر شده و کاهش ویسکوزیته سیال اتفاق می‌افتد [۲۸]. منحنی ویسکوزیته بر حسب نرخ برشی برای هر دو نانوروغن در مقایسه با روغن پایه در کسر حجمی 0.05% در تمامی دماها در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌کنید، در دماهای بالا

جدول (۶): مقادیر شاخص قاعده توانی در کسر حجمی و دماهای مختلف

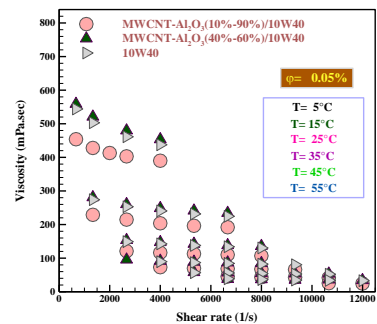
نانوسیال	کسر حجمی (%)	شاخص قاعده توانی (n)				
		5°C	15°C	25°C	35°C	45°C
MWCNT- Al_2O_3 (40%-60%)/10W40	0.05%	0.884	0.8882	0.0105	0.0105	0.8525
	0.1%	0.8793	0.8832	0.011	0.011	0.8086
	0.25%	0.8527	0.8801	0.025	0.025	0.7882
	0.5%	0.8794	0.8785	0.05	0.05	0.7906
	0.75%	0.8799	0.8738	0.075	0.075	0.7826
	1%	0.892	0.8819	0.1	0.1	0.8443
MWCNT- Al_2O_3 (10%-90%)/10W40	0.05%	0.9148	0.8884	0.0105	0.0105	0.6531
	0.1%	0.9017	0.8738	0.011	0.011	0.8455
	0.25%	0.9128	0.8901	0.025	0.025	0.8582
	0.5%	0.9106	0.8995	0.05	0.05	1.079
	0.75%	0.9103	0.9201	0.075	0.075	1.0205
	1%	0.9237	0.9293	0.1	0.1	0.9894



ج) 55°C و $\phi = 0.05\%$



ب) 5°C و $\phi = 0.05\%$



الف) $\phi = 0.05\%$ و دماهای مختلف

شکل (۹): وابستگی ویسکوزیته نسبت به نرخ برش در دماها و کسر حجمی‌های مختلف

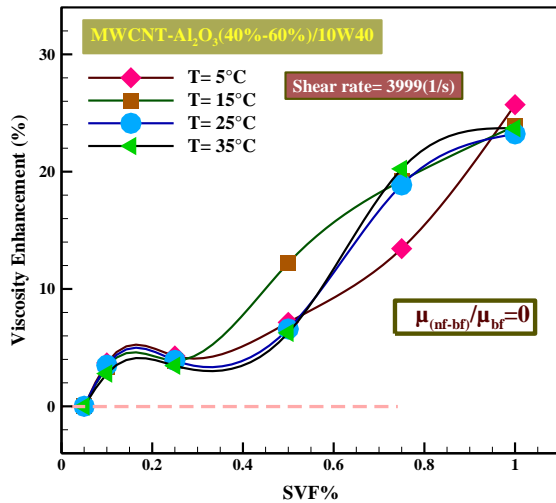
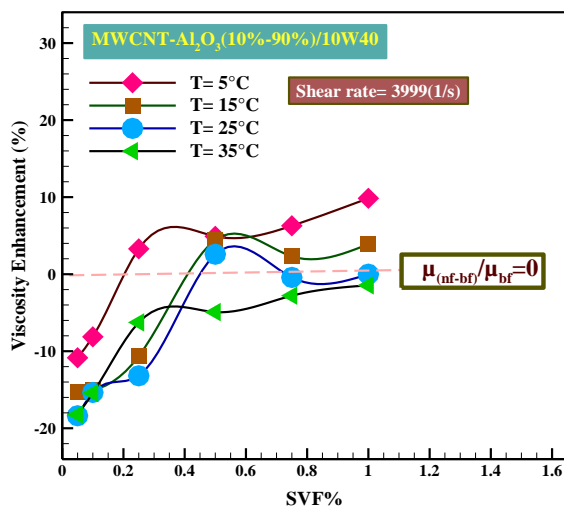
۳-۳- مقایسه ویسکوزیته

هدف بعدی این تحقیق مقایسه تغییرات ویسکوزیته نانوروغن‌ها بعد از افزودن نانوذرات است. مقایسه میزان افزایش ویسکوزیته روغن‌ها پس از تزریق نانوذرات در محدوده دمایی مختلف یکی دیگر از راه‌های معرفی نانوروانکار مطلوب می‌باشد.

طبق رابطه (۵)، درصد افزایش ویسکوزیته برحسب تغییرات کسر حجمی در بازه‌ی دمایی ۵-۳۵°C برای نرخ برش 3999s^{-1} (دور عملکردی پایین خودرو) و در بازه‌ی دمایی ۱۵-۵۵°C برای نرخ برش 6665s^{-1} (دور عملکردی بالای خودرو) مورد مقایسه قرار گرفت.

$$\text{Viscosity Enhancement}(\%) = \frac{\mu_{nf} - \mu_{bf}}{\mu_{bf}} \times 100 \quad (5)$$

یکی از ویژگی‌های برجسته انتخاب نانوروغن مناسب، افت ویسکوزیته نانوروغن بعد از افزودن نانوذره به روغن موتور است. این افت ویسکوزیته سبب توجه صنعتگران در بکارگیری روانکاری موتور در شرایط مختلف جوی است. با توجه به منحنی‌های شکل ۱۰ و ۱۱ با افزوده شدن نانوذره به روغن‌های پایه در همه دماها افت ویسکوزیته در نانوروغن MWCNT-Al₂O₃(10%-90%) مشاهده شده است. در نانوروغن MWCNT-Al₂O₃(40%-60%) و در کسر حجمی پایین، افت ویسکوزیته دیده نشده است. همانطور که در منحنی‌های شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود، نانوروغن MWCNT-Al₂O₃(10%-90%) در هر دو نرخ برش 3999s^{-1} و 6665s^{-1} و در کسرهای حجمی مختلف نسبت به سیال پایه خالص، دچار افت ویسکوزیته شده است. در صورتی که در نانوروغن MWCNT-Al₂O₃(40%-60%) افزودن نانوذرات به سیال پایه سبب شده تا مقادیر ویسکوزیته در دماهای مختلف افزایش یابد و در کسر حجمی ۰/۰۵٪ کمترین مقدار ویسکوزیته و در کسر حجمی ۱٪ بیشترین مقدار ویسکوزیته حاصل شود. علت این مطلب افزایش نیروهای واندروالسی بین نانوسیال می‌باشد که حضور نانوذرات بیش‌تر، باعث آن شده است و نانوذرات با پیوندهای قوی‌تر، باعث افزایش ویسکوزیته شده‌اند.

MWCNT/Al₂O₃(40%:60%)/10W40 (الف)MWCNT/Al₂O₃(10%:90%)/10W40 (ب)

شکل (۱۰): ویسکوزیته‌ی نسبی بر حسب کسر حجمی در دماهای مختلف و نرخ برش 3999s^{-1}

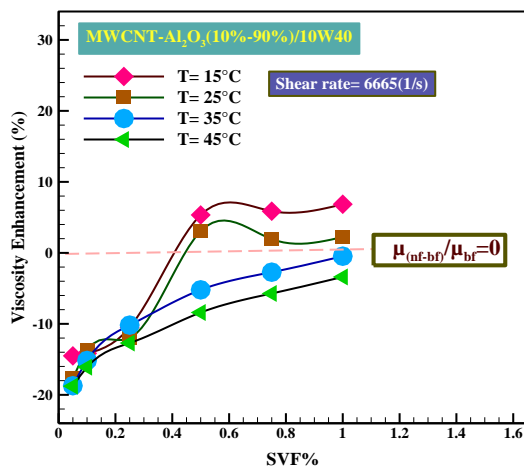
در جدول ۷، درصد تغییرات ویسکوزیته هر دو نانوروغن بعد از افزودن نانوذره در نرخ برش و کسرهای حجمی مختلف و دمای ثابت گزارش شده است. طبق این جدول بیشترین افت ویسکوزیته در نانوروغن MWCNT-Al₂O₃(10%-90%) در پایین‌ترین کسر حجمی و در نرخ برش 6665s^{-1} اتفاق افتاده است و برابر ۱۸/۷۸٪- می‌باشد.

۳-۴- تاثیر دما بر روی ویسکوزیته

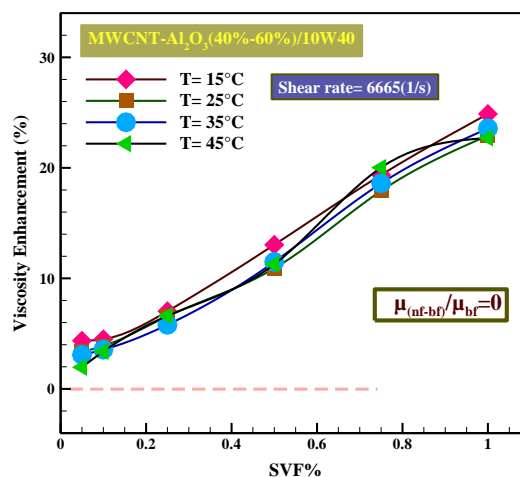
یکی از اهداف مهم، مقایسه‌ی اختلاف ویسکوزیته‌ی نانوروغن‌ها نسبت به سیال پایه در دماهای مختلف است. از

تضعیف می‌شوند و نانوذرات و سیال راحت‌تر بر روی هم می‌لغزند و از این رو، ویسکوزیته نانو سیالات با افزایش دما کاهش می‌یابد.

موارد پر کاربرد در توصیف ویسکوزیته نانوروغن هیبریدی، تحلیل اثر دما بر رفتار ویسکوزیته است. همانطور در منحنی‌های شکل ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است، با افزایش دما در نرخ برش‌های مختلف، ویسکوزیته کاهش می‌یابد. با افزایش دما، جاذبه بین ملکولی نانوذرات و سیالات پایه



MWCNT/Al₂O₃(10%:90%)/10W40 (ب)

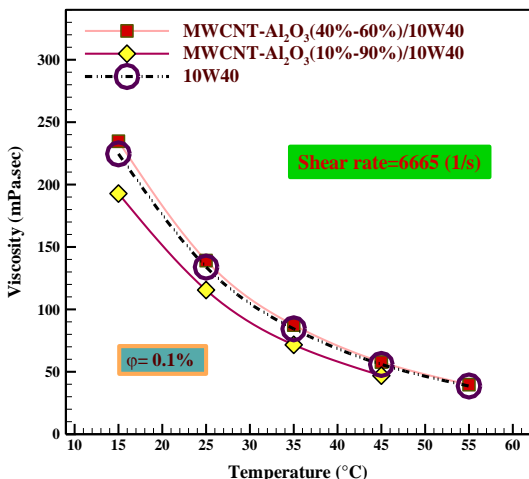
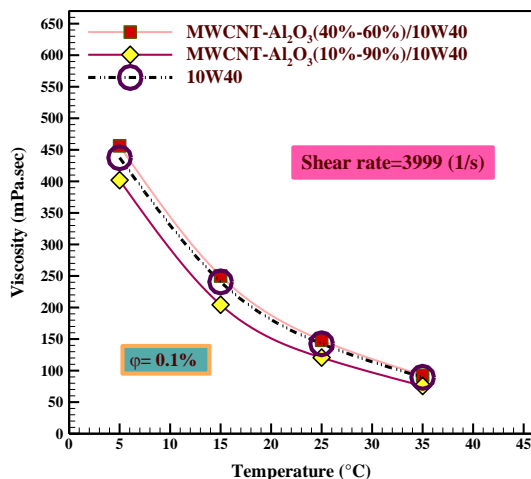


MWCNT/Al₂O₃(40%:60%)/10W40 (الف)

شکل (۱۱): ویسکوزیته‌ی نسبی بر حسب کسر حجمی در دماهای مختلف و نرخ برش (1/s) ۶۶۶۵

جدول (۷): داده‌های آماری درصد تغییرات افزایش ویسکوزیته نانوروغن‌ها

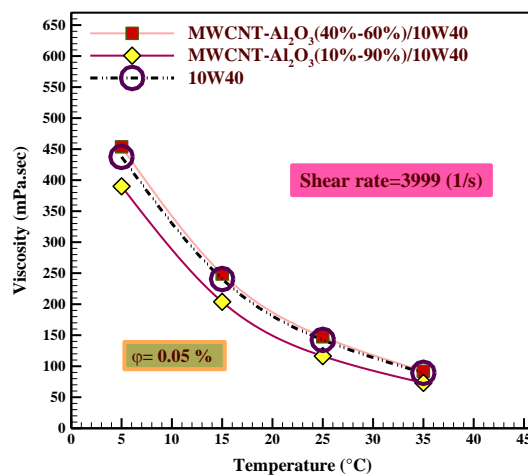
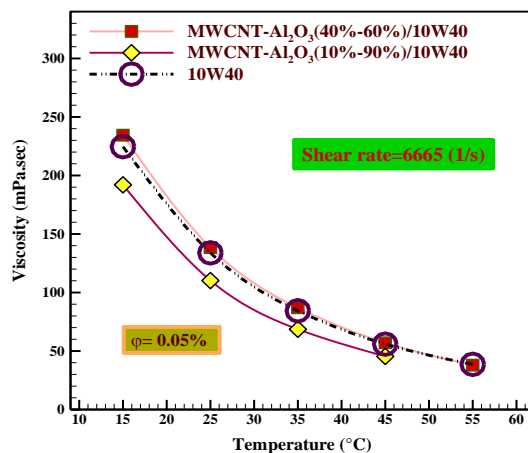
$\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}\right) \%$				T (°C)	$\dot{\gamma}$ (1/s)	روغن نانو
$\phi = 1\%$	$\phi = 0.75\%$	$\phi = 0.1\%$	$\phi = 0.05\%$			
۲۵/۷۱	۱۳/۴۴	۳/۷	۰	۵	۳۹۹۹	MWCNT-Al ₂ O ₃ (40%-60%)/10W40
۲۳/۸۹	۱۹/۲۴	۳/۳۶	۰	۱۵	(۳۰۰rpm)	
۲۳/۲۲	۱۸/۸۷	۳/۵	۰	۲۵		
۲۳/۷۱	۲۰/۲۴	۲/۷۹	۰	۳۵		
۲۴/۸۸	۱۹/۳۶	۴/۴۹	۴/۳۶	۱۵	۶۶۶۵	
۲۲/۹۲	۱۷/۹۲	۳/۸۸	۳/۳۶	۲۵	(۵۰۰rpm)	
۲۳/۵۷	۱۸/۶	۳/۵۵	۳/۰۸	۳۵		
۲۲/۷۱	۲۰/۰۳	۳/۳۹	۱/۹۶	۴۵		
۹/۸۵	۶/۲۸	-۸/۱۳	-۱۰/۸۵	۵	۳۹۹۹	MWCNT-Al ₂ O ₃ (10%-90%)/10W40
۳/۹	۲/۳۲	-۱۵/۰۴	-۱۵/۲۹	۱۵	(۳۰۰rpm)	
۰	-۰/۴۲	-۱۵/۳۶	-۱۸/۳۸	۲۵		
-۱/۴۵	-۲/۷۹	-۱۵/۴۳	-۱۸/۲۳	۳۵		
۶/۸۵	-۵/۸۷	-۱۴/۱۵	-۱۴/۵۱	۱۵	۶۶۶۵	
۲/۲۴	۱/۹۴	-۱۳/۷۴	-۱۷/۶۹	۲۵	(۵۰۰rpm)	
-۰/۴۷	-۲/۷۲	-۱۵/۱۶	-۱۸/۷۲	۳۵		
-۳/۳۹	-۵/۷۲	-۱۶/۱	-۱۸/۷۸	۴۵		

الف) $\phi = 0.1\%$ و نرخ برش 6665 s^{-1} ب) $\phi = 0.1\%$ و نرخ برش 3999 s^{-1}

شکل (۱۲): مقایسه تأثیر دمایی بر ویسکوزیته نانوروغن‌های مورد مطالعه در کسر حجمی ۰/۱٪.

نتایج جدول ۸، اثبات می‌کند که نانوروغن MWCNT-Al₂O₃(10%-90%) در همه دماها، افت ویسکوزیته نسبت به روغن پایه دارد. همچنین بیشترین افت ویسکوزیته در دمای ابتدایی برابر ۱۰/۸۵٪- است. نانوروغن MWCNT-Al₂O₃(40%-60%) در همه دماها، افزایش ویسکوزیته را نشان می‌دهد به جز در دمای بالا ۵۵ درجه سانتی‌گراد که افت ویسکوزیته برابر ۰/۷- می‌باشد. در ادامه، مقایسه دیگری جهت بررسی تأثیر دما بر ویسکوزیته‌ی نانوروغن‌ها در کسر حجمی بزرگتر (۰/۱٪) صورت گرفت. با توجه به شکل ۱۳، نانوروغن MWCNT-Al₂O₃(10%-90%) در کسر حجمی بالاتر و در همه دماها، دارای افت ویسکوزیته می‌باشد. در

در شکل ۱۲ تأثیر دما بر ویسکوزیته نانوسیالات MWCNT-Al₂O₃(40%-60%) و Al₂O₃(10%-90%) و سیال پایه 10W40 در کسر حجمی ۰/۰۵٪ و در نرخ برش‌های ۳۹۹۹ (1/s) و ۶۶۶۵ (1/s) باهم مقایسه شدند. با توجه به شکل ۱۲، نانوروغن MWCNT-Al₂O₃(10%-90%) در کسر حجمی ۰/۰۵٪ در همه دماها نسبت به سیال پایه افت ویسکوزیته دارد اما نانوروغن MWCNT-Al₂O₃(40%-60%) در دماهای بالاتر مماس با روغن پایه است. لذا بصورت دقیق، اختلاف ویسکوزیته نانوروغن‌ها با روغن پایه محاسبه و در جدول ۸ گزارش شده است.

الف) $\phi = 0.05\%$ و نرخ برش 3999 s^{-1} ب) $\phi = 0.05\%$ و نرخ برش 6665 s^{-1}

شکل (۱۲): مقایسه تأثیر دمایی بر ویسکوزیته نانوروغن‌های مورد مطالعه در کسر حجمی ۰/۰۵٪.

۴-۱- روش RSM

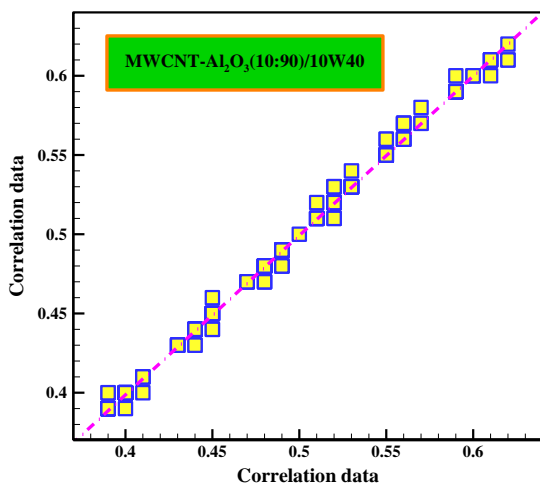
در این پژوهش داده‌های آزمایشگاهی نانروانکار منتخب MWCNT/Al₂O₃-10W40 با استفاده از روش سطح پاسخ، مدل‌سازی و ارتباط بین متغیرهای مستقل (دما، کسر حجمی و نرخ برش) و متغیر وابسته (ویسکوزیته) تعیین گردید و به ترتیب هر کدام به عنوان ورودی و خروجی به نرم‌افزار معرفی شدند. به جهت عدم کفایت آماری داده‌های مدل شده، داده‌های تجربی توسط مدل درجه دو با مشخصه تابع انتقال توانی، $\lambda = -0.15$ و مقدار ثابت برابر با صفر، نرم‌لایز و سپس پیش بینی شدند. گزارش‌های آماری نتایج مدل و پارامترهای بااهمیت آن در جداول ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود.

۴-۲- همبستگی جدید

رابطه (۶) برای پیش بینی مقادیر پاسخ هدف در شرایط مختلف آزمایشگاهی با امکان اعمال تغییر در متغیرهای مستقل با استفاده از روش سطح پاسخ ارائه شده است.

$$\begin{aligned} (Viscosity)^{-0.15} = & +0.38023 + 3.94253E \\ -003 T - 0.034372 \varphi + & 3.28635E - 006 \dot{\gamma} \\ -3.10868E - 008 T \dot{\gamma} - & 1.61609E - 006 \varphi \dot{\gamma} \\ +0.026252 \varphi^2 & \end{aligned} \quad (6)$$

در شکل ۱۴ همبستگی قابل قبول داده‌های آزمایشگاهی پس از مدل سازی نسبت به داده‌های پیش بینی شده نشان داده شده است.



شکل (۱۴): میزان همبستگی داده‌های پیش‌بینی و واقعی

حالی که در کسر حجمی بالاتر، نانروغن MWCNT-Al₂O₃(40%-60%) افزایش ویسکوزیته کمتری نسبت به روغن پایه دارد. مقادیر دقیق تغییرات ویسکوزیته نانروغن بر حسب دما در جدول ۹ با کسر حجمی ۰/۱٪ گزارش شده است. طبق داده‌های جدول ۹، نانروغن MWCNT-Al₂O₃(10%-90%) دارای بیشترین افت ویسکوزیته در دمای ۵°C و نرخ برش $3999S^{-1}$ و به میزان ۸/۱۳٪ است.

جدول (۸): بررسی مقایسه‌ای تأثیر دما بر ویسکوزیته نانروغن‌ها نسبت به سیال پایه

نرخ برشی (1/s)	دما (°C)	$\Delta(\mu_{n-b})_f \varphi = 0.05$	$\Delta(\mu_{n-b})_f \varphi = 0.05$
		MWCNT-Al ₂ O ₃ (40%-60%) / 10W40	MWCNT-Al ₂ O ₃ (10%-90%) / 10W40
۳۹۹۹	۵	۱۶/۲ (۳/۷٪)	-۴۷/۵ (-۱۰/۸۵٪)
	۱۵	۸/۱	-۳۶/۸
	۲۵	۵	-۲۶/۲
۶۶۶۶	۳۵	۲/۵	-۱۶/۳
	۳۵	۲/۶	-۱۵/۸
	۴۵	۱/۱	-۱۰/۵
۵۵	-	-۰/۷	-

جدول (۹): بررسی مقایسه‌ای تأثیر دما بر ویسکوزیته نانروغن‌ها نسبت به سیال پایه

نرخ برشی (1/s)	دما (°C)	$\Delta(\mu_{n-b})_f \varphi = 0.01$	$\Delta(\mu_{n-b})_f \varphi = 0.01$
		MWCNT-Al ₂ O ₃ (40%-60%) / 10W40	MWCNT-Al ₂ O ₃ (10%-90%) / 10W40
۳۹۹۹	۵	۱۸/۸ (۴/۲۹٪)	-۳۵/۶ (-۸/۱۳٪)
	۱۵	۹/۴	-۲۶/۲
	۲۵	۵/۶	-۲۱/۹
۶۶۶۶	۳۵	۳/۱	-۱۳/۸
	۳۵	۳	-۱۲/۸
	۴۵	۱/۹	-۹
۵۵	-	-	-

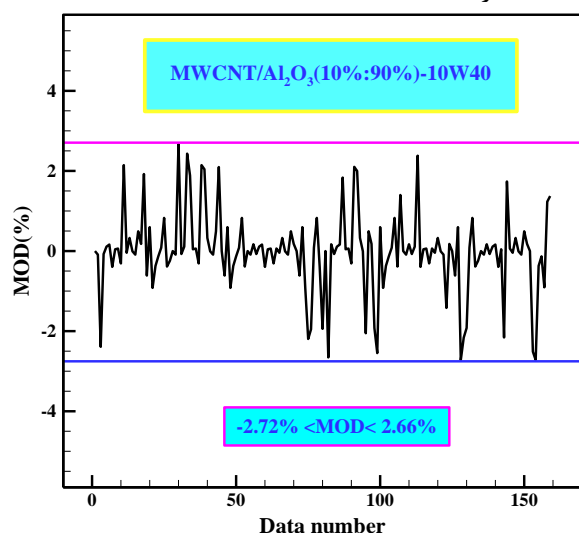
۴- مقایسه نتایج

۳-۴- حاشیه انحراف

یکی از روش‌ها برای تعیین بازه پراکندگی داده‌ها، استفاده از روش حاشیه انحراف (MOD) است. رابطه (۷) بیانگر MOD می‌باشد [۳۷]. بر اساس این روش هرچه داده‌های پراکندگی نسبت به خط معیار کیفیت (خط صفر) همگراتر شوند، تابع مدلساز از خطای کمتری برخوردار است.

$$MOD = \frac{\mu_{rel_{exp}} - \mu_{rel_{pre}}}{\mu_{rel_{exp}}} \times 100 \quad (7)$$

محدوده مجاز پراکندگی حاشیه انحراف در شکل ۱۵ برابر با $2/66\% < MOD < 2/72\%$ برای ۱۵۲ داده، محاسبه گردید.



شکل (۱۵): محدوده مقادیر حاشیه انحراف در کل داده‌های آزمایشگاهی

۴-۴- حساسیت ویسکوزیته

آنالیز حساسیت بررسی می‌کند که در یک شرایط مشخص و تعریف شده و با فرض ثابت بودن سایر متغیرها، اگر مقدار یک متغیر مستقل را تغییر دهیم، متغیر وابسته به آن چقدر تغییر خواهد کرد. رابطه (۸) بیانگر حساسیت می‌باشد [۳۸].

$$Sensitivity = \frac{(Viscosity_{after\ change})_{Pre} - (Viscosity_{before\ change})_{Pre}}{(Viscosity_{before\ change})_{Pre}} \times 100 \quad (8)$$

جدول (۱۰): دقت مدل ساز چهار درجه‌ای

انحراف استاندارد	۲/۳۸۵E+۰۰۳	R ²	۰/۹۹۸۸
میانگین	۰/۴۹	Adj R-Squared	۰/۹۹۸۷
C.V. %	۰/۴۹	Pred R-Squared	۰/۹۹۸۷
PRESS	۱/۰۴۴E-۰۰۳	Adeq Precision	۴۷۲/۰۱۷

جدول (۱۱): ANOVA برای مدل درجه دوم سطح پاسخ

مدل	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	F-Value	p-value Prob > F
معنادر	۰/۷۸	۶	۰/۱۳	۲۲۸۹۵/۸۳	< ۰/۰۰۰۱
A-T	۰/۲۵	۱	۰/۲۵	۴۳۷۶۸/۰۶	< ۰/۰۰۰۱
B-Phi	۵/۸۷۹E-۰۰۳	۱	۵/۸۷۹E-۰۰۳	۱۰۳۳/۶۸	< ۰/۰۰۰۱
C-Shear rate	۱/۳۵۴E-۰۰۳	۱	۱/۳۵۴E-۰۰۳	۲۳۸/۰۳	< ۰/۰۰۰۱
AC	۳/۹۷۳E-۰۰۴	۱	۳/۹۷۳E-۰۰۴	۶۹/۸۵	< ۰/۰۰۰۱
BC	۴/۹۸۲E-۰۰۴	۱	۴/۹۸۲E-۰۰۴	۸۷/۵۸	< ۰/۰۰۰۱
B2	۹/۳۶۸E-۰۰۴	۱	۹/۳۶۸E-۰۰۴	۱۶۴/۶۹	< ۰/۰۰۰۱
باقی مانده	۹/۵۵۴E-۰۰۴	۱۶۸	۵/۶۸۸E-۰۰۶		
Cor Total	۰/۷۸	۱۷۴			

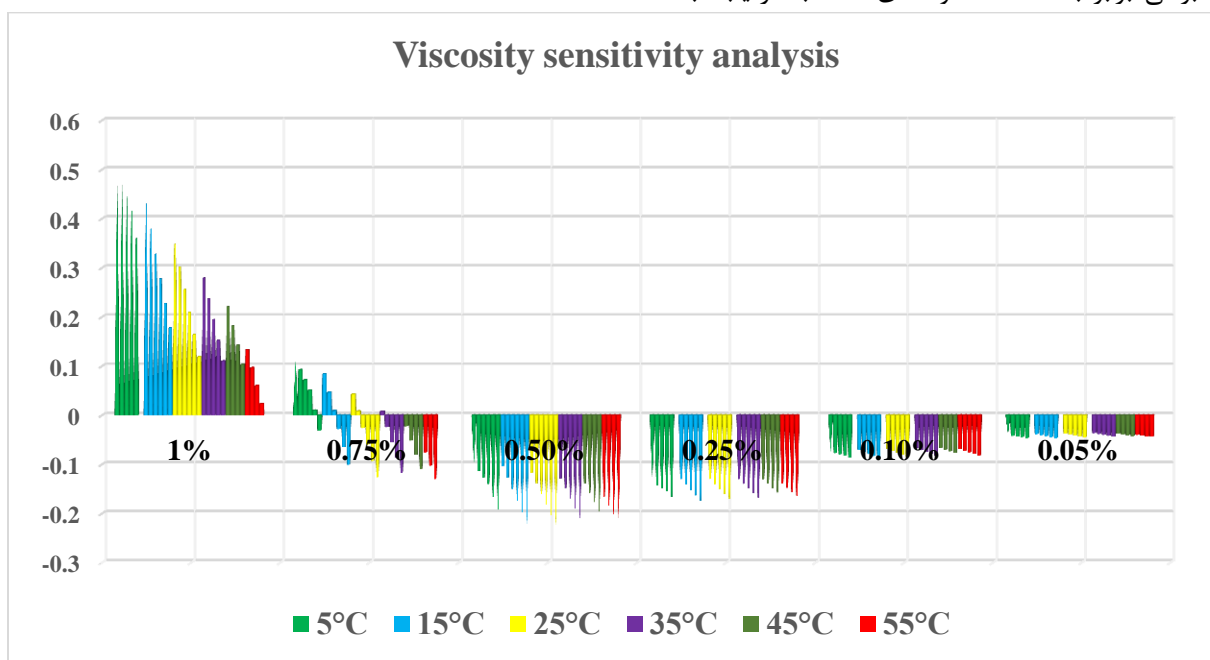
Transform: Power, $\lambda = -0.15$, Constant: 0

شده است. بررسی رفتار رئولوژیکی نانوروانکارها با استفاده از شاخص قاعده توانی، روند تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ برشی و روند تغییرات ویسکوزیته بر حسب نرخ برشی برای هر دو نانو روانکار-10% MWCNT- Al₂O₃ (90% و 40%)/10W40 و 60%)/10W40 انجام شد. نتایج نشان داد که برای نانوروانکار MWCNT- Al₂O₃ (40%-60%)/10W40 رفتاری غیر نیوتونی و از نوع شبه پلاستیک وجود دارد اما برای نانوروانکار MWCNT- Al₂O₃ (10%-690%)/10W40 رفتارهای نیوتنی و غیر نیوتنی مشاهده شد. بررسی تغییرات ویسکوزیته نانوروانکارهای مورد بررسی نشان داد عملکرد نانوروانکار MWCNT- Al₂O₃ (10%-90%)/10W40 برای استفاده به عنوان روغن موتور بهتر از نانوروانکار MWCNT- Al₂O₃ (40%-60%)/10W40 است. همگرایی ارائه شده برای نانوروانکار منتخب دارای مقادیر $R^2 = 0.9988$ و $R^2_{adj} = 0.9987$ بدست آمد که دقت بالای مدلسازی را نشان می‌دهد. مقادیر مربوط به انحراف از معیار نیز در محدوده $2/66\% < MOD < 2/72\%$ قرار گرفت. بیشترین مقادیر مربوط به آنالیز حساسیت نیز برای کسر حجمی $\phi = 1\%$ بدست آمد.

در شکل ۱۶ آنالیز حساسیت ویسکوزیته نسبت به اعمال +۱۰% تغییرات در کسر حجمی های مختلف برای کل داده‌ها در شرایط مختلف آزمایشگاهی با فرض ثابت بودن سایر متغیرها ترسیم شده است. باتوجه به شکل ۱۶، بیشترین حساسیت در کسر حجمی ۱ درصد رخ داده است.

۵- نتیجه‌گیری

بررسی رفتار رئولوژیکی نانو روانکار شامل نانوذرات MWCNT و Al₂O₃ و بر پایه روغن 10W40 برای نسبت‌های مختلف ۱۰:۹۰ و ۴۰:۶۰ به صورت آزمایشگاهی بررسی شد و نانو روانکار دارای عملکرد بهتر معرفی گردید. آزمایش‌ها برای دماها، کسر حجمی‌ها و نرخ برش‌های مختلفی از نانوسیالات انجام شد و مقادیر ویسکوزیته اندازه‌گیری شده با ویسکومتر+CAP2000 ارائه شد. نتایج مربوط به عدم قطعیت نشان داد که این مقدار برابر با ۰/۰۸ می‌باشد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در نسبت ترکیب‌های ۴۰:۶۰ و ۱۰:۹۰ به ترتیب بیشترین افت ویسکوزیته به میزان ۱۰/۸۵٪ و ۸/۱۳٪ در شرایط آزمایشگاهی با کسر حجمی نانوذرات ۰/۰۵٪، نرخ برشی برابر با $3999s^{-1}$ ، دمای ۵°C و کسر حجمی نانوذرات ۱٪، نرخ برشی برابر با $3999s^{-1}$ و دمای ۵°C به ترتیب ثبت



شکل (۱۶): آنالیز حساسیت ویسکوزیته برای کل داده‌ها در شرایط مختلف آزمایشگاهی

processes as well as mitigation options for arsenic removal. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;405:123885.

[12] Mallikarjuna K, Reddy YS, Reddy KH, Kumar PS. A nanofluids and nanocoatings used for solar energy harvesting and heat transfer applications: a retrospective review analysis. *Materials Today: Proceedings*. 2021;37:823-34.

[13] Esfe MH, Saedodin S, Rejvani M, Shahram J. Experimental investigation, model development and sensitivity analysis of rheological behavior of ZnO/10W40 nano-lubricants for automotive applications. *Physica E: Low-dimensional systems and nanostructures*. 2017;90:194-203.

[14] Peyghambarzadeh S, Hashemabadi S, Jamnani MS, Hoseini S. Improving the cooling performance of automobile radiator with Al₂O₃/water nanofluid. *Applied thermal engineering*. 2011;31(10):1833-8.

[15] Veličković S, Stojanović B, Ivanović L, Miladinović S, Milojević S. Application of nanocomposites in the automotive industry. *Mobility & Vehicle Mechanics*. 2019;45(3):51-64.

[16] Abdel-Gawad SA, Sadik MA, Shoeib MA. Preparation and properties of a novel nano Ni-B-Sn by electroless deposition on 7075-T6 aluminum alloy for aerospace application. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;785:1284-92.

[17] Chen H, Witharana S, Jin Y, Kim C, Ding Y. Predicting thermal conductivity of liquid suspensions of nanoparticles (nanofluids) based on rheology. *Particuology*. 2009;7(2):151-7.

[18] Chen L, Xie H, Yu W, Li Y. Rheological behaviors of nanofluids containing multi-walled carbon nanotube. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2011;32(4):550-4.

[19] Hemmat Esfe M, Esfandeh S. Mathematical based modeling of thermophysical properties of an enriched oil based hybrid nanofluid. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022;147(3):2125-37.

[20] Isaza-Ruiz M, Mondragón R, Osorio FB, Ventura-Espinosa J, Hernández L. Viscosity and stability analysis of hitec salt-based alumina nanofluids. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2021;222:110923.

[21] Chu Y-M, Ibrahim M, Saeed T, Berrouk AS, Algehyne EA, Kalbasi R. Examining rheological behavior of MWCNT-TiO₂/5W40 hybrid nanofluid based on experiments and RSM/ANN modeling. *Journal of Molecular Liquids*. 2021;333:115969.

۶- مراجع

[1] Adhikari U, Ghosh A, Chandra G. Nano particles of herbal origin: A recent eco-friendly trend in mosquito control. *Asian Pacific Journal of Tropical Disease*. 2013;3(2):167.

[2] Lin P, Allhoff F. Nanoscience and nanoethics: Defining the disciplines. *Nanoethics: The ethical and social implications of nanotechnology*. 2007:3-16.

[3] Alnarabiji MS, Husein MM. Application of bare nanoparticle-based nanofluids in enhanced oil recovery. *Fuel*. 2020;267:117262.

[4] Esfe MH, Hosseinizadeh E, Mosaferi M. Investigation on nanofluid flooding effect on enhancement oil recovery process in a random pore distribution incomplete cone. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2020;117:104629.

[5] Mahmoudpour M, Pourafshary P. Investigation of the effect of engineered water/nanofluid hybrid injection on enhanced oil recovery mechanisms in carbonate reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021;196:107662.

[6] Maqbool K, Shaheen S. Impact of Nanofluid in Medical Treatment by Mathematical Modeling. *Computational Approaches in Biomedical Nano-Engineering*. 2018:227-53.

[7] Toledo C, Gambaro RC, Padula G, Vela ME, Castro GR, Chain CY, et al. Binary medical nanofluids by combination of polymeric Eudragit nanoparticles for vehiculization of tobramycin and resveratrol: antimicrobial, hemotoxicity and protein corona studies. *Journal of pharmaceutical sciences*. 2021;110(4):1739-48.

[8] Abdelrady A, Abdelhafez MHH, Ragab A. Use of insulation based on nanomaterials to improve energy efficiency of residential buildings in a hot desert climate. *Sustainability*. 2021;13(9):5266.

[9] Al-Graiti A, Urbano Gutiérrez R. Investigations on the application of nanomaterials to improve the environmental performance of buildings. 2018.

[10] Yang L, Huang J-n, Ji W, Mao M. Investigations of a new combined application of nanofluids in heat recovery and air purification. *Powder Technology*. 2020;360:956-66.

[11] Maity JP, Chen C-Y, Bhattacharya P, Sharma RK, Ahmad A, Patnaik S, et al. Advanced application of nano-technological and biological

- a new nano-lubricant. *The European Physical Journal Plus*. 2021;136(5):605.
- [32] Mahbubul I, Saidur R, Amalina M. Latest developments on the viscosity of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012;55(4):874-85.
- [33] Mishra PC, Mukherjee S, Nayak SK, Panda A. A brief review on viscosity of nanofluids. *International nano letters*. 2014;4(4):109-20.
- [34] Patra A, Nayak M, Misra A. Viscosity of nanofluids-A Review. *Int J of Thermofluid Science and Technology*. 2020;7(2):070202.
- [35] Sundar LS, Sharma K, Naik M, Singh MK. Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2013;25:670-86.
- [36] Goodwin JW, Hughes RW. *Rheology for chemists: an introduction*: Royal Society of Chemistry; 2008.
- [37] Khetib Y, Sedraoui K, Gari A. Improving thermal conductivity of a ferrofluid-based nanofluid using Fe₃O₄-challenging of RSM and ANN methodologies. *Chemical Engineering Communications*. 2022;209(8):1070-81.
- [38] Ma M, Zhai Y, Yao P, Li Y, Wang H. Synergistic mechanism of thermal conductivity enhancement and economic analysis of hybrid nanofluids. *Powder Technology*. 2020;373:702-15.
- [22] Giwa SO, Sharifpur M, Ahmadi MH, Sohel Murshed S, Meyer JP. Experimental investigation on stability, viscosity, and electrical conductivity of water-based hybrid nanofluid of MWCNT-Fe₂O₃. *Nanomaterials*. 2021;11(1):136.
- [23] Chandrasekar M, Suresh S, Bose AC. Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃/water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010;34(2):210-6.
- [24] Wole-Osho I, Okonkwo EC, Kavaz D, Abbasoglu S. An experimental investigation into the effect of particle mixture ratio on specific heat capacity and dynamic viscosity of Al₂O₃-ZnO hybrid nanofluids. *Powder Technology*. 2020;363:699-716.
- [25] Esfe MH, Karimpour R, Arani AAA, 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. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2017;82:97-102.
- [26] Mahbubul I, Khaleduzzaman S, Saidur R, Amalina M. Rheological behavior of Al₂O₃/R141b nanorefrigerant. *International Journal of heat and Mass transfer*. 2014;73:118-23.
- [27] Mukherjee S, Jana S, Mishra PC, Chaudhuri P, Chakrabarty S. Experimental investigation on thermo-physical properties and subcooled flow boiling performance of Al₂O₃/water nanofluids in a horizontal tube. *International Journal of Thermal Sciences*. 2021;159:106581.
- [28] Moldoveanu GM, Ibanescu C, Danu M, Minea AA. Viscosity estimation of Al₂O₃, SiO₂ nanofluids and their hybrid: an experimental study. *Journal of Molecular Liquids*. 2018;253:188-96.
- [29] Ma M-y, Zhai Y-l, Li Z-h, Yao P-t, Wang H. Particle size-dependent rheological behavior and mechanism of Al₂O₃-Cu/W hybrid nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*. 2021;335:116297.
- [30] Alarifi IM, Alkough AB, Ali V, Nguyen HM, Asadi A. On the rheological properties of MWCNT-TiO₂/oil hybrid nanofluid: An experimental investigation on the effects of shear rate, temperature, and solid concentration of nanoparticles. *Powder Technology*. 2019;355:157-62.
- [31] Esfe MH, Goodarzi M, Esfandeh S. Experimental investigation of thermo-physical properties of MgO-MWCNT (75-25%)/10W40 as



Experimental and Comparative Study of Thermophysical Properties of Different Nanofluids with the Aim of Selecting the Best Nanolubricant

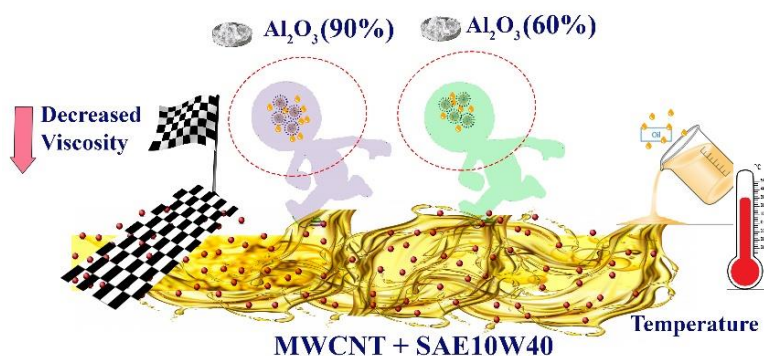
Mohammad Hemmat Esfe^{ID}

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- Nano-lubricant with a ratio of 40:60 has non-Newtonian behavior, but nano-lubricant with a ratio of 10:90 has both Newtonian and non-Newtonian behavior depending on the concentration of nanoparticles
- Performance of nanolubricant as hybrid engine oil is better for 90% of Al₂O₃ than 60%.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 4 March 2022

Received in revised form: 24 March 2022

Accepted: 17 April 2022

Available online: 22 May 2022

*Correspondence:

M.Hemmatesfe@semnan.ac.ir

How to cite this article:

M. Hemmat Esfe. Experimental and comparative study of thermophysical properties of different nanofluids with the aim of selecting the best nanolubricant. Journal of Aerospace Mechanics. 2022; 18(2):125-142.

Keywords:

Hybrid nanofluids

Viscosity

RSM

Experimental investigation

ABSTRACT

In this study, the effect of the ratio of different nanoparticle compositions on the viscosity performance of the base oil is investigated. The aim of this study is to achieve the characteristics of optimal nanolubricants. The experiments are performed at temperatures of 5-55°C, volume fractions of 0.05-1% and shear rates of 665.5-10664s⁻¹. Experimental results showed that nanofluids have a non-Newtonian and quasi-plastic behavior. The maximum viscosity reductions are obtained for MWCNT / Al₂O₃ (10%: 90%) - 10W40 and MWCNT / Al₂O₃ (40%: 60%)-10W40 at -8.13% and -10.85%, respectively. The results show that MWCNT/Al₂O₃(10%:90%)/10W40 nanofluids have better lubrication performance at engine start (lower oil viscosity) and engine movement (more controlled behavior) than competing nanofluid. Using the response level method, to predict the target response data, a normalized three-variable-three-degree model with the characteristics of the power transfer function, $\lambda = -0.15$ and a constant value equal to zero is presented. Margin of deviation is in the range of -2.72 % < MOD < 2/66 %. More viscosity sensitivity also occurred at higher volume fractions.

