

بررسی مقایسه‌ای رفتار رئولوژی نانو روغن‌های دارای درصد ترکیب مختلف نانوذرات در روغن پایه و تعیین بهینه‌ترین نانو روانکار

چکیده: بررسی خواص دو نانو روانکار هیبریدی ZnO(70%)-MWCNT(30%)/SAE40 و ZnO(50%)-MWCNT(50%)/SAE40 در شرایط مختلف به روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی و معرفی نانو روانکار بهتر در این مطالعه انجام می‌شود. آزمایش‌ها در محدوده دمایی ۲۵-۵۰°C، کسر حجمی ۰/۰۶۲۵-۱ درصد و نرخ برشی $666.5-9331 \text{ s}^{-1}$ و با استفاده از ویسکومتر بروکفیلد CAP 2000+ انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهد هر دو نانو روانکار دارای رفتار غیر نیوتونی و از نوع شبه پلاستیک می‌باشند. بیشترین افزایش ویسکوزیته برای نانو روانکار ZnO(50%)-MWCNT(50%)/SAE40 و به میزان ۲۸٪ و بیشترین افت ویسکوزیته برای نانو روانکار ZnO(70%)-MWCNT(30%)/SAE40 و به میزان ۳٪ اتفاق افتاد و بنابراین نانو روانکار ZnO(70%)-MWCNT(30%)/SAE40 از تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی برخوردار است و همچنین $R^2 = 0.9999$ بدست آمد. مقدار $3\% < \text{MOD} < 3\%$ - بدست آمد و بیانگر خطای کم مدل‌سازی است.

واژه‌های راهنما: نانو روغن هیبریدی، ویسکوزیته، MWCNT، رفتار رئولوژیکی، RSM

محمد همت اسفه*

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

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۲

Mohammad
Hemmat Esfe*
Associate Professor,
Mechanical Engineering,
Department of
Mechanical Engineering,
Imam Hossein University,
Tehran

A comparative study of the rheological behavior of nano-oils containing different percentages of nanoparticles in the base oil and determining the most optimal nano-lubricant

Abstract: The investigation of the properties of two hybrid nano-lubricants MWCNT (30%)/ZnO(70%)-SAE40 and MWCNT(50%)/ZnO(50%)-SAE40 in different conditions by experimental and modeling methods and introducing a better nano-lubricant are done in this study. Experiments are performed in the temperature range of 25-50°C, volume fraction of 0.0625-1% and shear rate of 666.5-9331s⁻¹ and the viscometer of Brookfield CAP 2000+ is used the results showed that both nano-lubricants have non-Newtonian and pseudo-plastic behavior. The highest increase of viscosity is occurred for nano lubricant of MWCNT-ZnO (50%-50%)/SAE40 by 28%, and the highest drop is occurred for nanolubricant MWCNT-ZnO (30%-70%)/SAE40 by 3% and therefore MWCNT-ZnO (30%-70%)/SAE40 nanolubricant has better performance. The results of the correlation provided by rsm method are in good agreement with the experimental data and $R^2 = 0.9998$ is obtained. The value of $-0.95\% < \text{MOD} < 1.10\%$ is obtained and indicates a low modeling error. The sensitivity of nano-oil also increased with increasing the volume fraction.

Keywords: Hybrid Nano Oil, Viscosity, Nanofluid, MWCNT, Rheological Behavior, RSM

۱- مقدمه

افزایش بهره‌وری و بهبود عملکرد و کیفیت سیالات و دسترسی به مواد در اندازه مولکولی بسیار کوچک با نسبت سطح به حجم زیاد توجه محققان زیادی را در صنعت به خود جلب کرده است. نسبت سطح به حجم یک ذره ۱۰ نانومتری حدود ۱۰۰۰ برابر بیشتر از ۱۰ میلی‌متر می‌باشد که این نسبت علاوه بر افزایش انتقال حرارت باعث کاهش چگالی و افزایش ویسکوزیته می‌شود [۱-۳].

رشد قابل توجه صنعت خودرو در سال‌های اخیر باعث پیشرفت در سایر صنایع مرتبط شده است. یکی از این صنایع، تولید روغن موتور است. روغن موتور نقش اساسی در روغن کاری و خنک سازی موتورها دارد. روغن موتورهای با کیفیت پایین، باعث کاهش طول عمر قطعات موتور می‌شوند [۴-۷].

طی سالهای اخیر، تلاش‌های زیادی برای بهبود کیفیت و کارایی روغن موتور انجام شده است. یکی از آنها افزودن ذرات در اندازه نانو به روغن‌های خالص است که نانوروغن نامیده می‌شوند [۸-۱۱]. نانوروغن‌ها دارای خواص رئولوژیکی ویژه و متفاوت در مقایسه با روغن‌های پایه هستند [۱۲-۱۴]. یکی از مهمترین پارامترها در بررسی خواص رئولوژیکی نانوروغن‌ها، ویسکوزیته آن‌ها است. ویسکوزیته یک پارامتر مؤثر در روان کننده‌های مانند روغن موتور که به دما، سرعت برش، کسر حجمی جامد و سایر پارامترها بستگی دارد [۱۵-۱۸]. بررسی اثرات ویسکوزیته بر کارایی روغن‌های پایه توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است [۱۹].

اسدی و همکارانش [۲۰] تغییرات ویسکوزیته نانوسیال MWCNTs-MgO/SAE40 در دمای ۲۵-۵ درجه سانتی‌گراد و در غلظت ۲۵-۲ درصد را گزارش کردند. آزمایشات رئولوژیکی نانوسیال نشان داد که نانوسیال ساخته شده دارای رفتار نیوتنی مانند روغن پایه است. همچنین با افزایش دما، ویسکوزیته کاهش می‌یابد و حداکثر افزایش ویسکوزیته در غلظت ۲٪ در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۶۵٪ و حداقل افزایش آن در غلظت ۲۵٪ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برابر با ۱۴/۴٪ است.

همت اسفه و همکاران [۲۱] به بررسی تغییرات ویسکوزیته نانوروغن کننده MWCNT-ZnO(10%-90%)/5W50 در دما و نرخ برش‌های مختلف پرداختند. نتیجه بهینه سازی ویسکوزیته نانوسیال نشان داد که در دمای ۵۴ درجه سانتی‌گراد و کسر حجمی ۰/۱٪، حداقل مقدار ویسکوزیته برابر ۳۸/۱۶٪ است. سپیانی و همکارانش [۲۲] تغییرات ویسکوزیته و خصوصیات

رئولوژیکی روغن پایه SAE50 تحت تأثیر نانوذرات ZnO در کسر حجمی‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشات بدست‌آمده نشان می‌دهد در دمای پایین و کسر حجمی ۱/۵ درصد، بیشترین میزان افزایش ویسکوزیته به میزان ۱۲ درصد است. همچنین مشاهده شده که با افزایش دما، ویسکوزیته ۴۰۰ درصد کاهش یافته است.

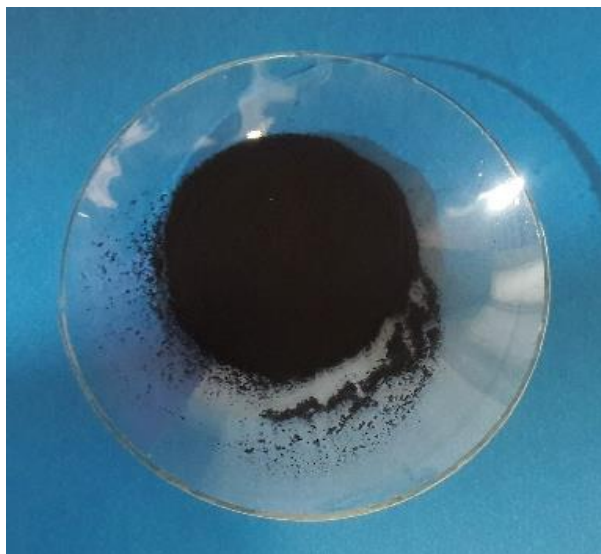
حوزین و همکاران [۲۳] به بررسی انتقال حرارت و ویسکوزیته سه نانوسیال بر پایه آب و با حضور نانوذرات TiO₂، ZnO و نقره پرداختند. اندازه نانوذرات ZnO، TiO₂ و نقره به ترتیب برابر با ۱۴، ۲۰ و ۱۶ نانومتر گزارش شد. نانوسیالات با غلظت‌های حجمی ۰/۲۵٪ تهیه شدند و به منظور بررسی کیفیت توزیع نانوذرات از تست پتانسیل زتا استفاده شد. نتایج نشان داد نانوسیالات دارای پایداری و توزیع خوبی هستند و میزان افزایش ویسکوزیته برای نانوسیالات ZnO، TiO₂ و نقره بر پایه آب به ترتیب برابر با ۵/۳، ۵/۱ و ۴/۷ بدست آمد.

همت اسفه و همکاران [۲۴] به بررسی تغییرات ویسکوزیته دینامیکی نانوروغن کننده ترکیبی MWCNT-ZnO/SAE40 در دمای ۶۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد و کسر حجمی ۱-۰٪ پرداختند. نتایج این گونه آزمایشات در دماها و کسر حجمی‌های مختلف نشان داد که نانوروغن کننده رفتار نیوتنی دارد. اندازه‌گیری ویسکوزیته نیز نشان می‌دهد که با افزایش دما ویسکوزیته کاهش می‌یابد و با افزایش کسر حجمی، افزایش می‌یابد. همچنین حداکثر افزایش ویسکوزیته نانوروغن کننده برابر ۳۳/۳ درصد است.

داردان و همکاران [۲۵] تغییرات رفتار رئولوژیکی و ویسکوزیته سیال پایه SAE40 با افزودن نانوذرات MWCNT-Al₂O₃ در دما و کسر حجمی‌های مختلف را مورد بررسی قرار داده است. آزمایشات رئولوژیکی نانوسیال نشان داد که نانوسیال ساخته شده دارای رفتار نیوتنی مانند روغن پایه است. نتایج اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال نشان داد با افزایش کسر حجمی و کاهش دما، ویسکوزیته نانوسیال افزایش پیدا می‌کند.

همت اسفه و همکاران [۲۶] به بررسی ویسکوزیته روغن پایه SAE40 در اثر افزودن نانوذره MWCNTs-SiO₂ در دماهای مختلف و کسر حجمی بین ۰/۰۶۲۵ تا ۲ درصد پرداختند. نتایج بدست آمده در آن تحقیق به افزایش ۳۰/۲ درصدی ویسکوزیته در بهترین حالت اشاره می‌کند. جیلین [۲۷] تأثیر دما و کسر حجمی جامد بر ویسکوزیته پویای روغن موتور SAE50 در حضور نانوذره ZnO را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که در محدوده دمای ۶۵-

ترکیب های مختلف ۳۰:۷۰ و ۵۰:۵۰ در روغن پایه SAE40 استفاده گردید. در شکل (۱) و جدول (۱)، نانوذرات، مشخصات فیزیکی و خواص شدتی گزارش شده است.



الف) MWCNT



ب) ZnO

شکل ۱ نمونه های نانوذرات تهیه شده با روش دومرحله ای

جدول ۱ مشخصات فیزیکی و خواص شدتی نانوذرات

نانوذرات	MWCNTs	ZnO
خلوص	>۹۵ wt%	۹۹%
رنگ	سیاه	سفید
چگالی واقعی	~۱/۲ g.cm ^۳	۵/۶۰۶g/cm ^۳
APS	ID: ۳-۵ nm OD: ۱۵-۵ nm ~۵۰ um (Length)	۳۰-۱۰ nm
SSA	>۲۳۳ m ^۲ .g	۶۰-۲۰ m ^۲ /g
ساختار	استوانه ای	شبهه به کره

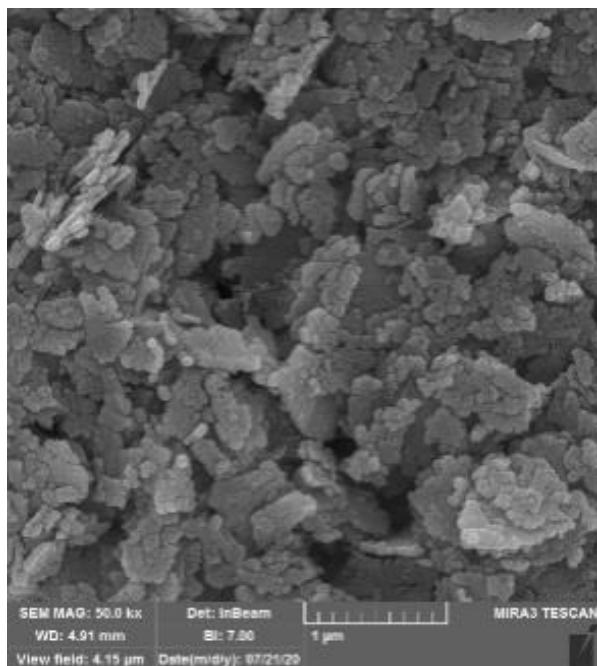
۲۵ درجه سانتی گراد و کسر حجمی های مختلف، با افزایش غلظت، ویسکوزیته به مقدار ۲۵/۳ درصد نسبت به روغن پایه افزایش یافته است موسوی و همکاران [۱۲] در مطالعه ای تجربی به مطالعه خواص رئولوژیکی نانوسیالات ZnO و MoS₂ بر پایه روغن دیزل پرداختند. تأثیر دما و کسر حجمی نانوذرات بر روی ویسکوزیته هر دو نانوسیال مورد پژوهش قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوسیالات شامل ZnO دارای ویسکوزیته دینامیکی بالاتری نسبت به نانوسیالات شامل MoS₂ هستند. همچنین حداکثر افزایش ویسکوزیته سینماتیکی در کسر وزنی ۰/۷ برای هر دو نانوسیال حاصل شد. محتوای بهینه نانوذرات ZnO و MoS₂ به ترتیب ۰/۴ و ۰/۷ درصد وزنی گزارش شد.

عبداللهی مقدم و همکاران [۲۸] تغییرات رئولوژیکی نانو روان کننده هیبریدی با پراکندگی نانوذرات اکسید مس (CuO) و نانولوله های کربنی چند جداره (MWCNT) به روغن موتور SAE40 و ویسکوزیته نانوسیال در کسرهای حجمی ۱٪-۰/۶۲۵ و دمای ۵۰-۲۵ درجه سانتیگراد و نرخ برشی متفاوت اندازه گیری کردند. نتایج نشان داد که در غلظت ۱٪، ویسکوزیته نانو روان کننده ترکیبی، ۴۷/۲۹ درصد بیشتر از ویسکوزیته روغن پایه است. مطالعه انجام شده بر روی رفتار رئولوژیکی ثابت کرد که نانو روغن روان کننده و روغن خالص نیوتونی نبوده است. در این مطالعه به بررسی و مقایسه خواص رئولوژیکی نانوسیال هیبریدی ZnO - MWCNT بر پایه روغن موتور SAE40 در نسبت های مختلف از نانوذرات پرداخته می شود. در ابتدا روند تهیه نانو روغن ها به همراه مشخصات نانوذرات ZnO 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 ویسکوزیته نسبی 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 بر حسب دما، کسر حجمی و نرخ برشی نانو روغن ارائه گردید و دقت آن با استفاده از پارامترهای مختلف ارزیابی شد.

۲- فرآیند تجربی

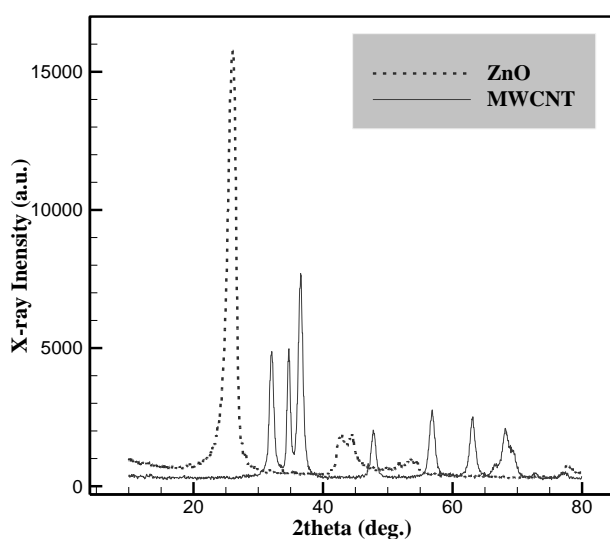
۲-۱- تهیه نمونه

برای تهیه نانوروانکار نیاز به نانوذرات و روغن پایه است. به همین منظور از نانوذرات اکسید روی و نانولوله کربنی با نسبت



ZnO (ب)

شکل ۲ تصاویر SEM از نانوذرات مختلف



شکل ۳ آنالیز XRD برای نانوذرات مختلف

۲-۲- اندازه گیری ویسکوزیته دینامیکی

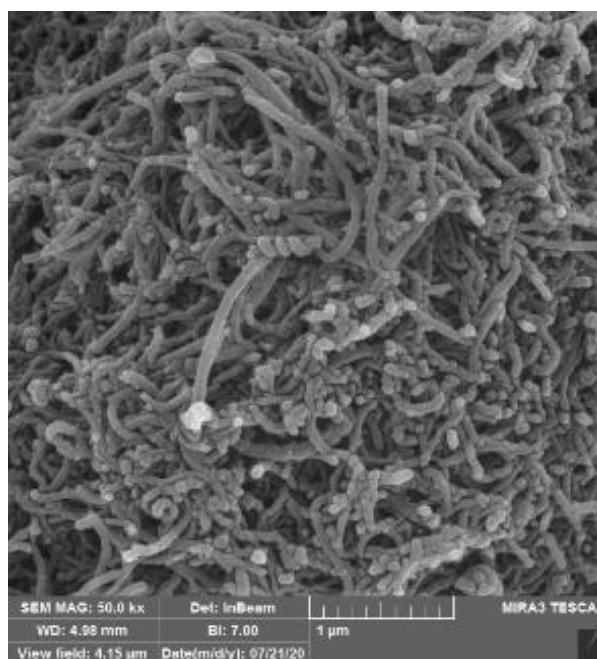
برای تحلیل رفتار رئولوژیکی نانوروغن ها، نیاز به کسب اطلاعات از خواص ترموفیزیکی از جمله ویسکوزیته است. به همین منظور از دستگاه ویسکومتر بروکفیلد CAP2000+ برای اندازه گیری ویسکوزیته در محدوده شرایط آزمایش برای هر یک از نانوروانکارها استفاده شد (جدول ۲). قبل از اندازه گیری، فرآیند کالیبراسیون برای کاهش خطا در اندازه گیری انجام گردید. همچنین برای افزایش دقت در نتایج تحلیل رئولوژی، آزمایش ها دوبار اندازه گیری و سپس میانگین داده ها ثبت

برای تعیین مشخصات فیزیکی و بررسی مورفولوژی سطح نمونه (شناسایی اولیه مواد، اندازه گیری ابعاد ذرات، شکل هندسه و آنالیز ساختاری مواد نانوذرات) از روشهای عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز اشعه پراش ایکس استفاده گردید. در شکل های (۲) و (۳)، نمونه تصاویر مربوط به عکس برداری ها مشاهده می شود.

برای محاسبه مقدار نانومواد مصرفی با نسبت ترکیب های مختلف از رابطه (۱) استفاده گردید. همچنین از یک ترازوی دیجیتال محفظه دار (برای افزایش دقت در اندازه گیری و حذف تاثیرات محیطی از جمله هوا) برای توزین بکار گرفته شد.

$$\varphi = \left(\frac{\left(\frac{w}{\rho}\right)_{NP} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{MWCNT}}{\left(\frac{w}{\rho}\right)_{MWCNT} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{NP} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{base-oil}} \right) \times 100 \quad (1)$$

بعد از تهیه نانوروغن ها در کسر حجمی های مختلف، از دستگاه همزن مغناطیسی به مدت ۳۰ دقیقه برای مخلوط و همگن سازی اولیه استفاده گردید. همچنین برای کاهش ناپایداری و شکاندن خوشه های نانوذرات از دستگاه لرزاننده مافوق صوت به مدت ۱ ساعت استفاده شد. در طول ارتعاش، دمای دستگاه در 60°C به منظور تسهیل در جداسازی نانوذرات و کاهش خوشه ها ثابت بود.



MWCNT (الف)

۲-۳- عدم قطعیت

ویسکومتر CAP2000+ که در این مطالعه استفاده شد دارای دقت ± 2 برای ویسکوزیته و ± 1 برای دما می باشد. عدم قطعیت به صورت اثر تجمعی خطاها بر نتایج نهایی تعریف می شود و برای محاسبه آن می توان از فرمول (۲) استفاده کرد.

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

U نشان دهنده عدم قطعیت، S بیانگر انحراف از معیار و N تعداد تست ها می باشد. S را از رابطه (۳) می توان محاسبه کرد.

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

\bar{X} و X_i برابر با مقدار اندازه گیری شده و مقدار میانگین است.

برای نانوسیال MWCNT-ZnO(30%-70%) / SAE40 در دمای ۳۵ درجه سانتی، کسر حجمی ۰/۱۲۵٪ و نرخ برشی s^{-1} ۶۶۶۵ مقادیر جدول (۵) بدست آمد. بنابر این مقدار عدم اطمینان برابر با ۰/۱۲۱ می باشد.

جدول ۵ عدم اطمینان در اندازه گیری ویسکوزیته

شماره آزمایش	ویسکوزیته اندازه گیری شده	
۱	۱۷۸/۹	۱۷۸/۹
۲	۱۷۸/۳	۱۷۸/۳
۳	۱۷۹/۲	۱۷۹/۲
میانگین	۱۷۸/۸	
S	۰/۲۱	
U	۰/۱۲۱	

۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- رفتار رئولوژیکی

رئومتر دستگاهی است که توانایی اندازه گیری خصوصیات رئولوژیکی مواد مختلف در طیف وسیعی از نرخ برش و درجه حرارت را دارد. پارامتر مهمی که در مطالعه رفتار رئولوژیکی نانوسیالات کاربرد دارد، ویسکوزیته است که برای توصیف بافت سیال استفاده می شود [۲۹-۳۰].

گردید. برخی از داده های اندازه گیری شده در جدول (۳) گزارش شده است. در جدول (۴) مشخصات فنی و شرایط محیطی استفاده از دستگاه ویسکومتر ذکر شده است.

جدول ۲ مشخصات اندازه گیری نانوروغن ها

نانوسیال	MWCNT(30%)/ZnO (70%)-SAE40	MWCNT(50%)/ZnO (50%)-SAE40
تنش برشی (s^{-1})	۶۶۶/۹۳۳۱-۵	۶۶۶/۹۳۳۱-۵
کسر حجمی (%)	۰/۱-۰۶۲۵	۰/۱-۰۶۲۵
دما ($^{\circ}C$)	۵۰-۲۵	۵۰-۲۵

جدول ۳ برخی از داده های اندازه گیری شده با ویسکومتر CAP2000+

نانوسیال	کسر حجمی (%)	دما ($^{\circ}C$)	نرخ برشی (s^{-1})	μ (mPa.s)
MWCNT(50%)/ZnO(50%)-SAE40	۰/۰۶۲۵	۲۵	۱۳۳۳	۳۵۶
	۱	۳۰	۱۳۳۳	۳۲۶
	۰/۲۵	۴۵	۲۶۶۶	۱۱۴/۴
MWCNT(30%)/ZnO(70%)-SAE40	۰/۰۶۲۵	۲۵	۱۳۳۳	۳۴۵
	۰/۲۵	۴۵	۲۶۶۶	۱۱۵/۳
	۱	۳۰	۱۳۳۳	۳۰۸

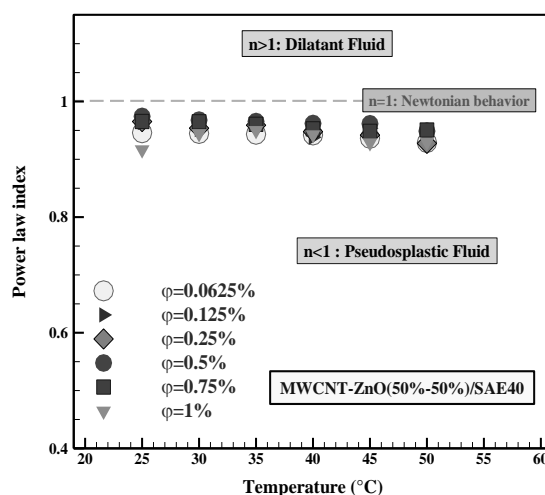
جدول ۴ مشخصات تکنیکی دستگاه ویسکومتر

مشخصات	CAP ۲۰۰۰+
ولتاژ ورودی	۱۱۵-۲۳۰ V
فرکانس ورودی	۵۰-۶۰ Hz
توان مصرفی	کمتر از ۳۴۵ ولت
رنج گشتاور	۱۸۱۰۰ rpm
سرعت	۵-۱۰۰۰ rpm
دما	۵-۵۵ $^{\circ}C$
جنس ماده	دوک های مخروطی و صفحات حرارتی از کاربید تنگستن و نگهدارنده نمونه از تفلون ساخته شده اند.
تاثیر عوامل محیطی	شرایط دمای محیطی ویسکومتر: $5-20^{\circ}C$ شرایط میزان رطوبت ویسکومتر: ۲۰-۸۰٪

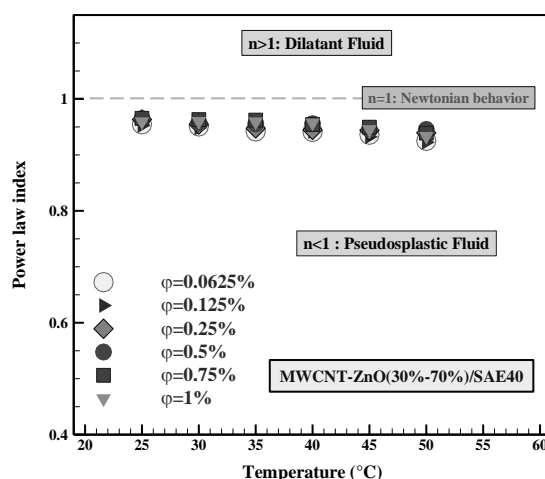
۳-۱-۱- شاخص قاعده توانی^۱

از روش‌های مهم برای تشخیص رفتار رئولوژیکی نانوروغن‌ها، استفاده از مدل قاعده توانی^۱ است. نمودار قاعده توانی براساس تغییرات دما برای هر دو نانوروغن رسم شده است. در این قسمت به بررسی و مقایسه رفتار رئولوژیکی نانوروغن‌های هیبریدی و دسته‌بندی آن‌ها در گروه‌های نیوتنی و غیرنیوتنی با استفاده از شاخص توانی پرداخته می‌شود. در معادله‌ی (۴)، پارامترهای m و n به ترتیب بیانگر ضریب قدرت سیال و شاخص جریان در محدوده دمایی مختلف برای تشخیص رفتار نیوتنی و غیر نیوتنی نانوذرات است.

$$\tau = m(\dot{\gamma})^n \quad (۴)$$



الف) MWCNT-ZnO(50%-50%) / SAE40



ب) MWCNT-ZnO(30%-70%) / SAE40

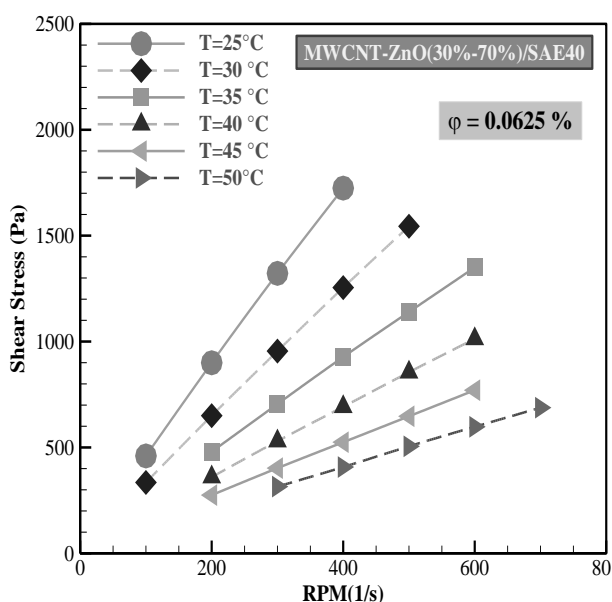
شکل ۴ اثر دما و کسر حجمی بر روی شاخص قاعده توانی

شکل (۴)، محدوده مقادیر n را با توجه به تغییرات دما در پارامترهای مختلفی چون کسر حجمی و نرخ برش نشان می‌دهد که رفتار غیرنیوتنی نانوروغن را آشکار می‌کند. بنابراین یکی از شروط لازم برای بکارگیری ترکیب نانوساختار در صنعت، نوسانی بودن ویسکوزیته است که در مقادیر $n < 1$ محقق می‌شود.

۳-۱-۲- رابطه بین تنش برشی (τ) و نرخ برشی (γ̇)

رفتار رئولوژیکی هر سیال از رابطه بین تنش برشی (τ) و نرخ برشی (γ̇) تعریف می‌شود. تنش برشی، نیروی برشی در واحد سطح است. این نسبت به عنوان معیاری از ویسکوزیته (η) می‌باشد. ویسکوزیته یک پارامتر اساسی برای تعیین رفتار رئولوژیکی سیالات شناخته شده است. ویسکوزیته می‌تواند به عنوان اندازه گیری مقاومت در طی جریان توسط لایه‌های مجاور به یکدیگر تعریف شود [۳۱-۳۲]. با توجه به شکل (۵)، شیب منحنی‌های جریان در محدوده دمایی مختلف برای تشخیص رفتار نیوتنی و غیرنیوتنی نانوذرات مرد استفاده قرار می‌گیرد.

با توجه به شکل (۵) می‌توان نتیجه گرفت هر سه نانو روغن در گروه سیالات غیرنیوتنی و از نوع شبه پلاستیک و رفتار رقیق گردانی برش^۳ طبقه‌بندی می‌شوند. این ویژگی برای روغن موتورها و روانکارهای دیگر در صنعت، امتیاز محسوب می‌شود.



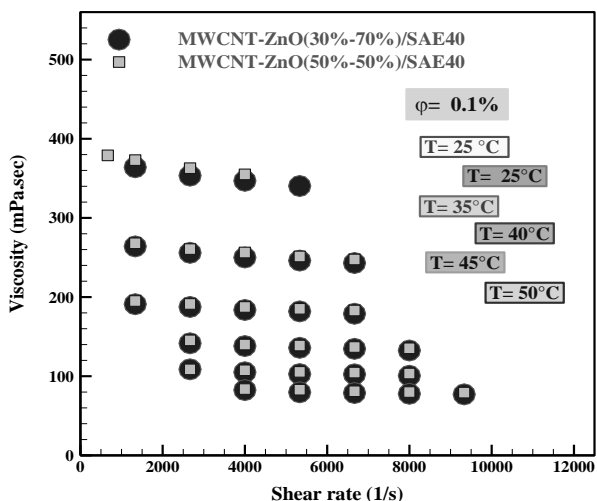
الف) MWCNT-ZnO(30%-70%) / SAE40 و $\phi = 0.0625\%$

³ Shear thinning

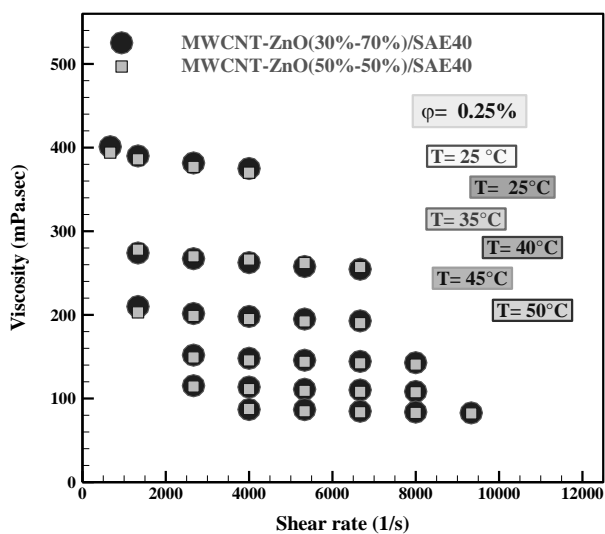
¹ Power law Index

۳-۱-۳- ویسکوزیته-نرخ برش

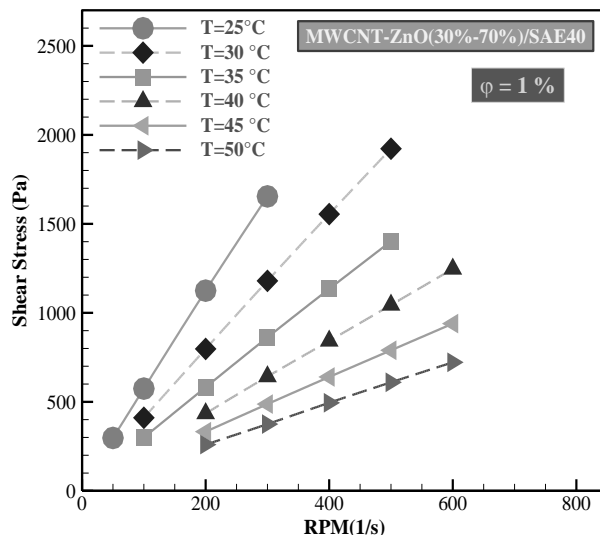
یکی از مناسب‌ترین و مهم‌ترین عوامل در تعیین نوع نانوسیال، رفتار رئولوژیکی نانوسیالات در برابر نرخ برش اعمال شده می‌باشد. نانوسیالات با توجه به رفتاری که در مقابل اعمال تنش برشی از خود نشان می‌دهند، به دو گروه از سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی تقسیم بندی می‌شوند. در شکل (۶) تاثیرپذیری ویسکوزیته نانوروغن از نرخ برش‌های مختلف در دما و کسر حجمی‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. شیب نمودارها نشان دهنده وابستگی ویسکوزیته نانوروغن به تغییرات نرخ برش می‌باشد، که این تغییر شیب در دماهای ابتدایی بیشتر نشان داده می‌شود.



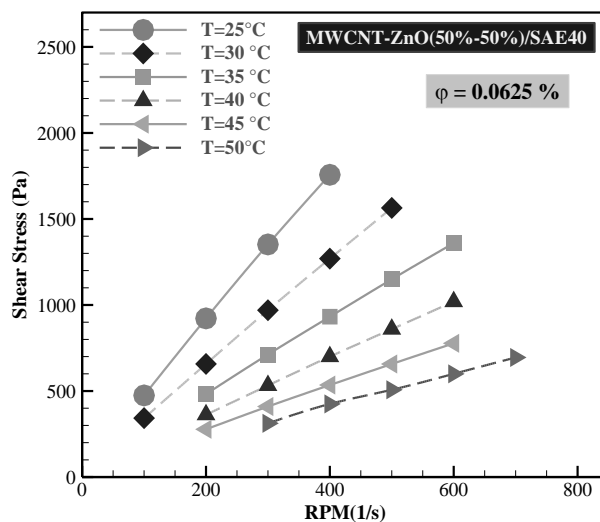
الف) $\phi = 0.1\%$



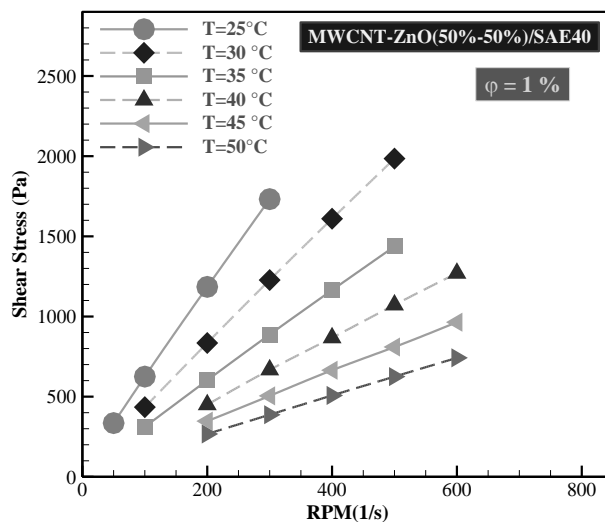
ب) $\phi = 0.25\%$



ب) $\phi = 1\%$ و MWCNT-ZnO(30%-70%) / SAE40

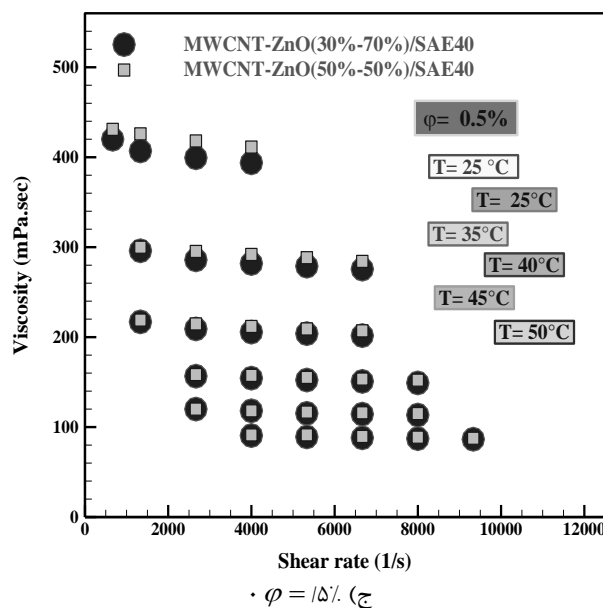
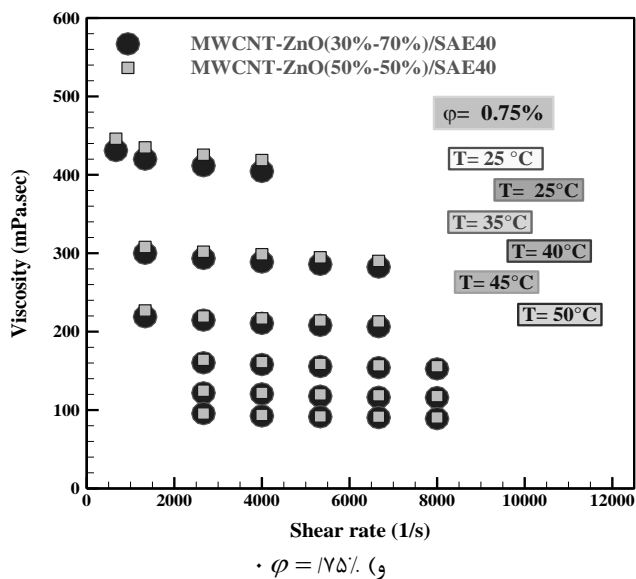


ج) $\phi = 0.0625\%$ و MWCNT-ZnO(50%-50%) / SAE40



د) $\phi = 1\%$ و MWCNT-ZnO(50%-50%) / SAE40

شکل ۵ منحنی تغییرات نرخ برشی-تنش برشی در دماها و کسرهای حجمی مختلف



شکل ۶ وابستگی ویسکوزیته نسبت به نرخ برش در دماها و کسر حجمی های مختلف

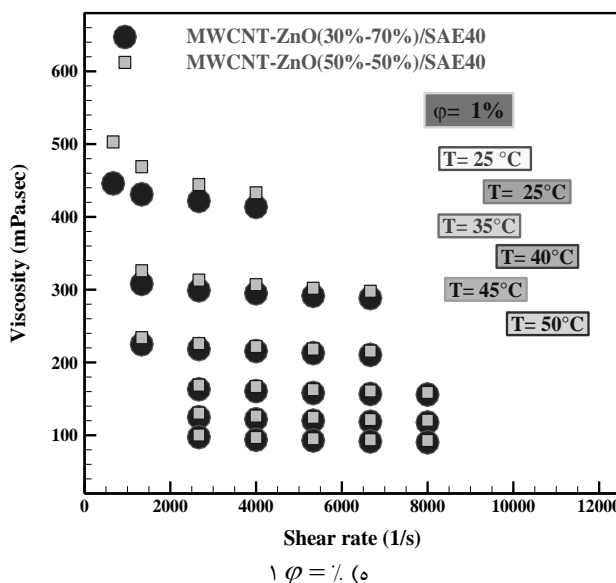
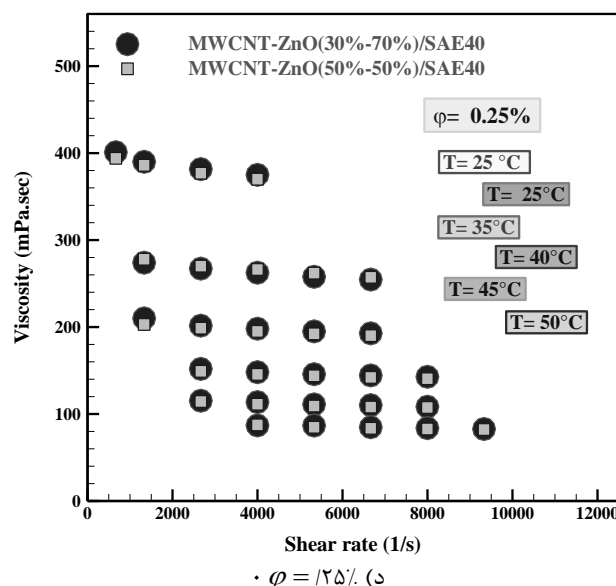
در جدول های (۶) و (۷) درصد های دقیق تغییرات ویسکوزیته نسبت به نرخ برش برای نانوروغن ها در تمامی دماها و کسر حجمی ها گزارش شده است. بیش ترین و کمترین درصد تغییرات ویسکوزیته نانوروغن MWCNT-ZnO(50%-50%)/SAE40 به ترتیب برابر با ۶۹/۹- و ۳/۶- درصد است.

۳-۲- ویسکوزیته نسبی

ویسکوزیته نسبی یکی از مفاهیم مهم در مقایسه ی بین نانوروغن ها با روغن خالص بعد از افزودن نانوذرات است [۳۲]. با افزودن نانوذرات به روغن پایه، ویسکوزیته روغن افزایش می یابد. ویسکوزیته نسبی با استفاده از رابطه ی (۵) از تقسیم ویسکوزیته ی نانوروغن بر ویسکوزیته روغن خالص قابل محاسبه است.

$$Relative\ viscosity = \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} \right) \quad (5)$$

بدیهی است که در مواردی که ویسکوزیته نانوروغن نسبت به سیال پایه اش افزایش داشته است دارای مقادیر ویسکوزیته ی نسبی بیشتر از ۱ و در مواردی که ویسکوزیته ی نسبی کمتر از ۱ بدست آمده یعنی ویسکوزیته ی نانوروغن نسبت به روغن خالص کاهش یافته است. باتوجه به شکل (۷)، ویسکوزیته نسبی نانوروغن MWCNT-ZnO(50:50)/SAE40 بالاتر از خط ۱ واقع شده است در حالی که در نانوروغن MWCNT-ZnO(3:7)/SAE40 مقدار ویسکوزیته نسبی در کسر حجمی 0.0625% کمتر از خط ۱ مشاهده شده است و ویسکوزیته ی نانو روغن نسبت به سیال پایه کاهش داشته است.

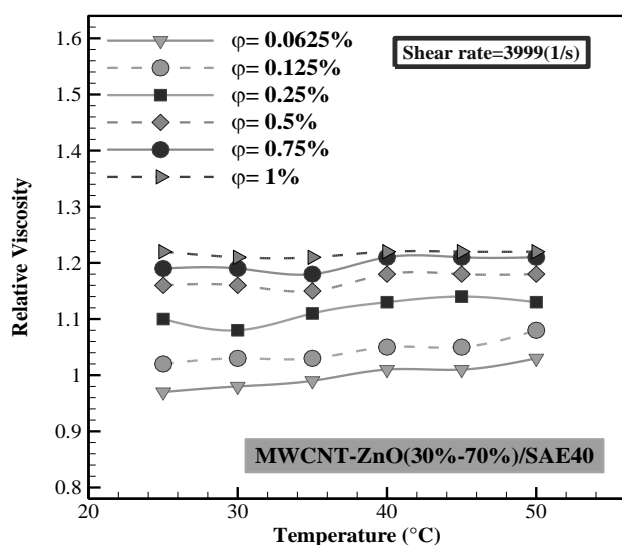


جدول ۶ درصد تغییرات ویسکوزیته نانوروغن MWCNT ZnO (30%-70%)/SAE40 در کسر حجمی‌های مختلف

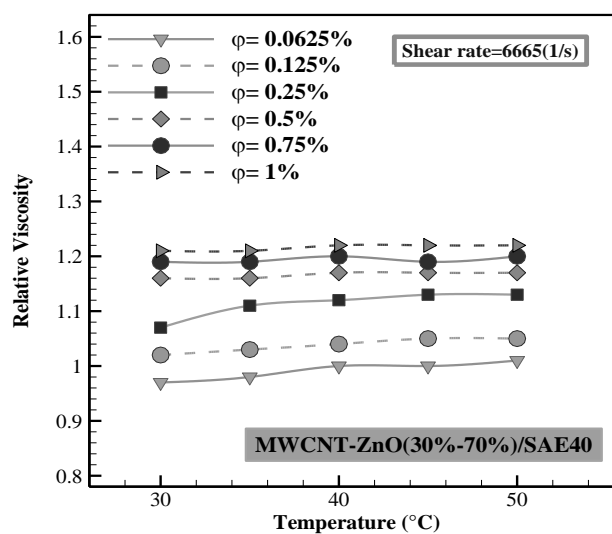
نانوسیال	کسر حجمی (%)	تغییرات ویسکوزیته					
		۲۵°C	۳۰°C	۳۵°C	۴۰°C	۴۵°C	۵۰°C
MWCNT-ZnO (30%-70%)/SAE40	۰/۰۶۲۵	-۲۱/۶	-۱۹/۳	-۱۱/۲	-۸/۴	-۶/۸	-۵/۱
	۰/۱۲۵	-۲۳/۷	-۲۱	-۱۲/۱	-۹/۱	-۸/۱	-۵/۴
	۰/۲۵	-۲۶	-۱۹/۴	-۱۷/۲	-۹/۱	-۶/۹	-۴/۱
	۰/۵	-۲۶/۲	-۲۰/۴	-۱۵/۳	-۷/۵	-۶/۶	-۴/۱
	۰/۷۵	-۲۶/۶	-۱۷/۶	-۱۲/۷	-۷/۸	-۶	-۶/۵
	۱	-۳۲/۳	-۱۹/۶	-۱۴/۶	-۷/۲	-۷	-۷/۲

جدول ۷ درصد تغییرات ویسکوزیته نانوروغن MWCNT-ZnO (50%-50%)/SAE40 در کسر حجمی‌های مختلف

نانوسیال	کسر حجمی (%)	تغییرات ویسکوزیته					
		۲۵°C	۳۰°C	۳۵°C	۴۰°C	۴۵°C	۵۰°C
MWCNT-ZnO (50%- 50%)/SAE40	۰/۰۶۲۵	-۲۶/۵	-۲۲/۳	-۱۰/۹	-۸/۴	-۶/۹	-۳/۶
	۰/۱۲۵	-۲۴	-۲۰/۵	-۱۲	-۱۰	-۵/۳	-۴/۵
	۰/۲۵	-۲۴	-۲۰/۸	-۱۲/۹	-۸/۵	-۶/۹	-۵/۳
	۰/۵	-۱۹/۷	-۱۲/۸	-۱۲	-۶/۲	-۵	-۳/۷
	۰/۷۵	-۲۷/۲	-۱۷/۸	-۱۴	-۸/۲	-۶/۹	-۵
	۱	-۶۹/۹	-۲۸/۲	-۱۸/۴	-۱۰	-۹/۷	-۷/۵

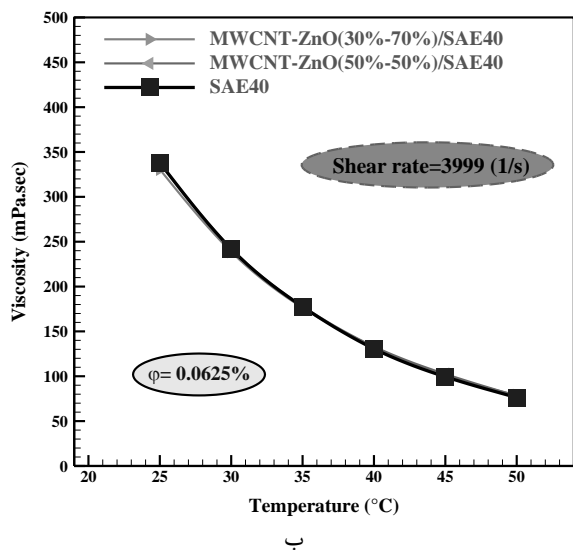
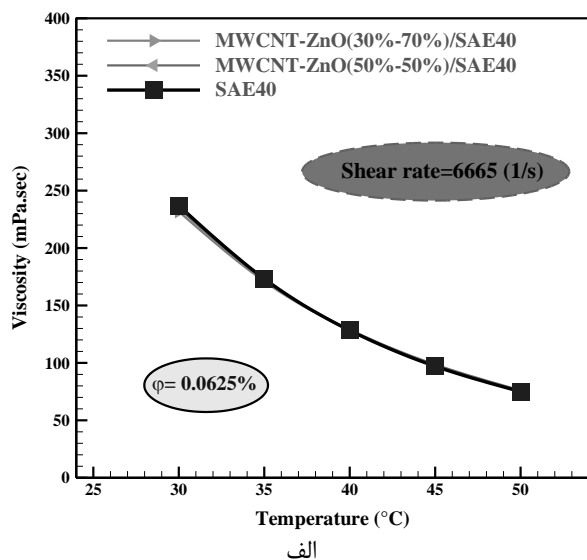


ب

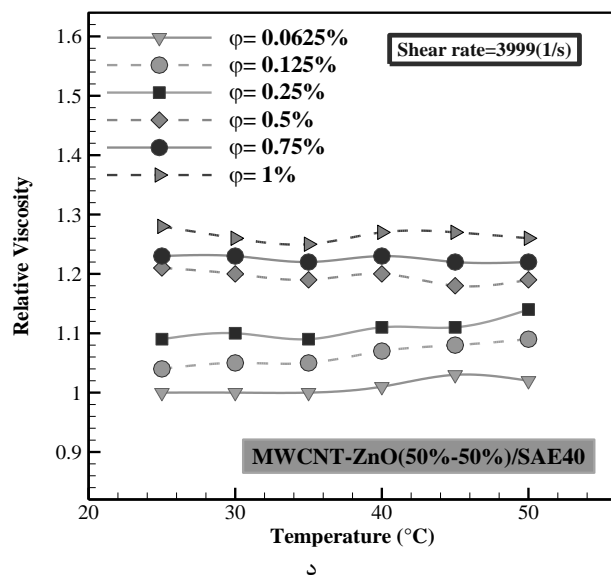
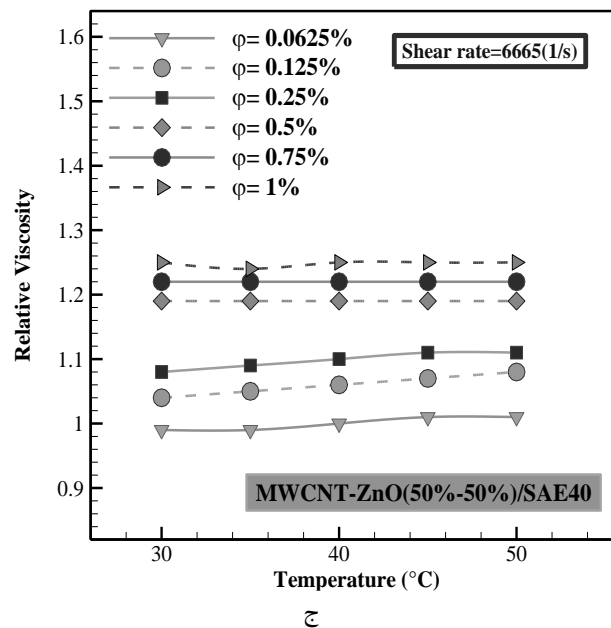


الف

دما با ویسکوزیته رابطه ذاتی دارد. کل جامعه تحقیقاتی، دما را مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامتر برای ویسکوزیته نانوسیالات توصیف می‌کند. با افزایش دما، جاذبه بین ملکولی نانوذرات و سیالات پایه تضعیف می‌شوند و از این رو، ویسکوزیته نانوسیالات با افزایش دما کاهش می‌یابد [۳۱]. در آخرین مقایسه‌ی این تحقیق، نمودارهای ویسکوزیته-دما ارائه شده است که تأثیر پارامتر دمای آزمایش بر ویسکوزیته‌ی نانوروغن را بیان می‌کند. در این مرحله تأثیر نانوذرات به روغن خالص در کسر حجمی‌های ۰/۰۶۲۵٪ با دور موتورهای بالا و پایین مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. طبق شکل (۸)، کاهش ویسکوزیته در نانوروغن MWCNT-ZnO(30%-70%) دیده می‌شود اما نانوروغن دیگر مماس با خط روغن پایه است.



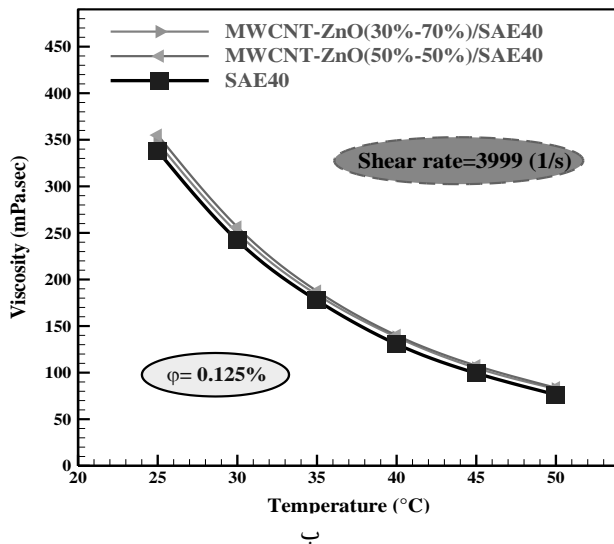
شکل ۸ مقایسه تأثیر دمایی بر ویسکوزیته نانوروغن‌های مورد مطالعه در کسر حجمی ۰/۰۶۲۵٪



شکل ۷ ویسکوزیته‌ی نسبی بر حسب کسر حجمی در دماهای مختلف

طبق نتایجی که در جدول (۸) گزارش شده است، کمترین مقدار ویسکوزیته نسبی مربوط به نانوروغن MWCNT-ZnO(3:7)/SAE40 در کسر حجمی ۰/۰۶۲۵٪ در دمای ۲۵ °C و نرخ برش ۳۹۹۹(1/s) و به میزان (۰/۳٪) گزارش شده است. بیشترین ویسکوزیته نسبی مربوط به نانوروغن MWCNT-ZnO(5:5)/SAE40 در کسر حجمی ۱٪، دمای ۲۵ °C و نرخ برش ۳۹۹۹(1/s) بوده است که برای این شرایط ویسکوزیته نسبی ۲۸٪ گزارش شده است.

۳-۲-۱- تأثیر دما بر ویسکوزیته



شکل ۹ مقایسه تاثیر دمایی بر ویسکوزیته نانوروغن‌های مورد مطالعه در کسر حجمی ۰/۱۲۵٪

۳-۲-۲- بیان همگرایی

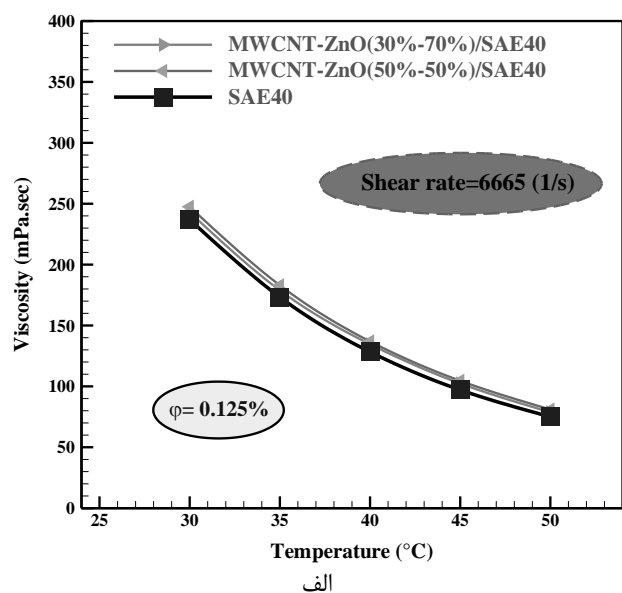
مدلسازی ویسکوزیته نانوسیال MWCNT-ZnO(30:70)/SAE40 بر مبنای داده‌های تجربی و با استفاده از روش سطح پاسخ انجام شد. روش سطح پاسخ با استفاده از روش‌های آماری و ریاضی، رابطه‌ای را ارائه می‌دهد که متشکل از پارامترهای مستقل و وابسته است که در اینجا پارامترهای مستقل عبارتند از کسر حجمی، نرخ برشی و دما و پارامتر وابسته یا هدف، ویسکوزیته می‌باشد. مدل‌های مختلفی در روش سطح پاسخ می‌توان ارائه داد که شامل رابطه‌های دو، سه، چهار و پنج درجه‌ای می‌باشد و بر اساس پارامترهای ارزیابی دقت مانند R^2 ، $Adj-R^2$ و انحراف استاندارد می‌توان مدل مناسب را انتخاب کرد. در صورتی که پراکندگی داده‌ها قابل توجه باشد بهتر است از تابع انتقال استفاده کرد که در این مطالعه تابع انتقال لگاریتمی به صورت معادله (۶) در نظر گرفته شد. جدول (۱۱) که بیانگر پارامترهای دقت مربوط به رابطه (۶) می‌باشد نیز ارائه شد که بر اساس آن $R^2=0.9999$ و $Adjusted R^2 = 0.9999$ می‌باشد که مقادیر خوبی برای مدل سازی هستند.

$$\begin{aligned}
 \text{Log}(\text{Viscosity}) = & 3.82659 - 0.086902T + 0.561283\varphi - \\
 & 0.000032\gamma - 0.002844T\varphi + 1.02994E - 06T\gamma + \\
 & 3.57150E - 06\varphi\gamma + 0.002092T^2 - 1.02122\varphi^2 + \\
 & 3.17641E - 09\gamma^2 + 0.000027T^2\varphi - 2.52444E - 08T^2\gamma + \\
 & 2.20069E - 11T\gamma^2 - 2.08619E - 06\varphi^2\gamma - 0.000032T^3 + \\
 & 0.979565\varphi^3 - 4.20169E - 13\gamma^3 + 1.59687E - 12T^2 * \gamma^2 - \\
 & 7.59353E - 15T * \gamma^3 + 2.08343E - 07T^4 - 0.342556\varphi^4 + \\
 & 2.97145E - 17\gamma^4
 \end{aligned} \quad (6)$$

در جدول (۹) به بررسی و مقایسه دقیق و آماری اختلاف ویسکوزیته نانوروغن‌های ذکر شده با سیال پایه در کسر حجمی ۰/۰۶۲۵ درصد در دور موتور پایین (۳۹۹۹ (1/s) (دماهای پایین‌تر)) و دور موتور بالا (۶۶۶۵ (1/s) (دماهای بالاتر)) پرداخته شده است. با دقت به اعداد این جدول، نانوروغن MWCNT-ZnO (30-70%)/SAE40 در دور عملکرد پایین، افت ویسکوزیته‌ی بیشتری نسبت به سیال پایه در مقایسه با نانوروغن دیگر داشته و از طرفی اختلاف ویسکوزیته این نانوروغن با سیال پایه در نرخ برش بالا و دمای ۵۰°C به عدد صفر رسیده است که گویای بازگشت ویسکوزیته نانوروغن مذکور به ویسکوزیته سیال پایه است و همچنین نشان‌دهنده عملکرد عالی این نانوروغن در فصول گرم و در نواحی گرمسیر است.

در شکل (۹)، مقایسه در کسر حجمی ۰/۱۲۵٪ انجام شده است. در این کسر حجمی، افزایش ویسکوزیته برای هر دو نانوروغن نسبت به روغن پایه دیده شده است.

مقادیر دقیق تغییرات ویسکوزیته نانوروغن بر حسب دما در جدول (۱۰) برای کسر حجمی ۰/۱۲۵٪ گزارش شده است. طبق داده‌های جدول (۱۰)، برای هر دو نانوروغن در دمای ابتدایی، افت ویسکوزیته گزارش نشده است اما در نانوروغن MWCNT-ZnO(30:70)/SAE40 در همه دماها، افزایش ویسکوزیته کمتر از نانوروغن MWCNT-ZnO(50:50)/SAE40 است.



جدول ۸ داده‌های آماری درصد تغییرات ویسکوزیته نسبی نانوروغن‌ها

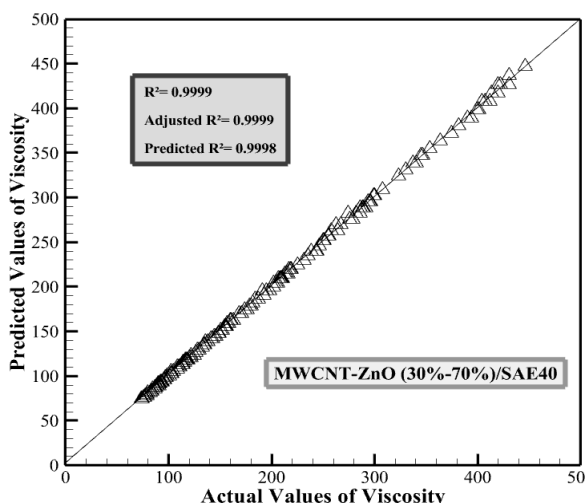
روغن نانو	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	T (°C)	$\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}\right)$			
			$\phi = 0\%/0.625$	$\phi = 0\%/1.125$	$\phi = 0\%/1.75$	$\phi = 1\%$
MWCNT-ZnO (30%-70%) /SAE40	۳۹۹۹ (۳۰۰rpm)	۲۵°C	۰/۹۷(-۰/۳)	۱/۰۲	۱/۱۹	۱/۲۲
		۳۰°C	۰/۹۸	۱/۰۳	۱/۱۹	۱/۲۱
		۳۵°C	۰/۹۹	۱/۰۳	۱/۱۸	۱/۲۱
		۴۰°C	۱/۰۱	۱/۰۵	۱/۲۱	۱/۲۲
	۶۶۶۵ (۵۰۰rpm)	۳۵°C	۰/۹۸	۱/۰۳	۱/۱۹	۱/۲۱
		۴۰°C	۱	۱/۰۴	۱/۲	۱/۲۲
		۴۵°C	۱	۱/۰۵	۱/۱۹	۱/۲۲
		۵۰°C	۱/۰۱	۱/۰۵	۱/۲	۱/۲۲
			$\phi = 0\%/0.625$	$\phi = 0\%/1.125$	$\phi = 0\%/1.75$	$\phi = 1\%$
MWCNT-ZnO (50%-50%) /SAE40	۳۹۹۹ (۳۰۰rpm)	۲۵°C	۱	۱/۰۴	۱/۲۳	۱/۲۸(۰/۲۸)
		۳۰°C	۱	۱/۰۵	۱/۲۳	۱/۲۶
		۳۵°C	۱	۱/۰۵	۱/۲۲	۱/۲۵
		۴۰°C	۱/۰۱	۱/۰۷	۱/۲۳	۱/۲۷
	۶۶۶۵ (۵۰۰rpm)	۳۵°C	۰/۹۹	۱/۰۵	۱/۲۲	۱/۲۴
		۴۰°C	۱	۱/۰۶	۱/۲۲	۱/۲۵
		۴۵°C	۱/۰۱	۱/۰۷	۱/۲۲	۱/۲۵
		۵۰°C	۱/۰۱	۱/۰۸	۱/۲۲	۱/۲۵

جدول ۹ بررسی مقایسه‌ای تاثیر دما بر ویسکوزیته نانوروغن‌ها نسبت به سیال پایه

نرخ برشی (1/s)	دما (°C)	$\Delta(\mu_{n-b})_f \phi = 0.625$	$\Delta(\mu_{n-b})_f \phi = 1.625$
		MWCNT-ZnO(30%-70%) /SAE40	MWCNT-ZnO(50%-50%) /SAE40
۳۹۹۹	T=۲۵°C	-۷/۵(-۲/۰/۲۱)	۱(۰/۰/۲۹)
	T=۳۰°C	-۳/۱	۰/۶
	T=۳۵°C	-۱/۲	۰/۶
	T=۴۰°C	-۱/۹	۲/۵
۶۶۶۵	T=۴۰°C	۰	۰/۷
	T=۴۵°C	۰	۱/۵
	T=۵۰°C	۰/۸	۱/۱

جدول ۱۰ بررسی مقایسه‌ای تاثیر دما بر ویسکوزیته نانوروغن‌ها نسبت به سیال پایه

نرخ برشی (1/s)	دما (°C)	$\Delta(\mu_{n-b})_f \phi = 0.125$	$\Delta(\mu_{n-b})_f \phi = 0.125$
		MWCNT-ZnO(30%-70%) /SAE40	MWCNT-ZnO (50%-50%) /AE40
۳۹۹۹	T=۲۵°C	۸/۸(۲/۶۰/۰/۰)	۱۶/۹(۴/۹۹/۰/۰)
	T=۳۰°C	۸/۱	۱۴/۴
	T=۳۵°C	۶/۲	۱۰
	T=۴۰°C	۷/۵	۹/۴
۶۶۶۵	T=۴۰°C	۶/۳	۸/۶
	T=۴۵°C	۵/۳	۷/۵
	T=۵۰°C	۳/۸	۶



شکل ۱۰ میزان همبستگی داده‌های پیش‌بینی شده با داده‌های واقعی

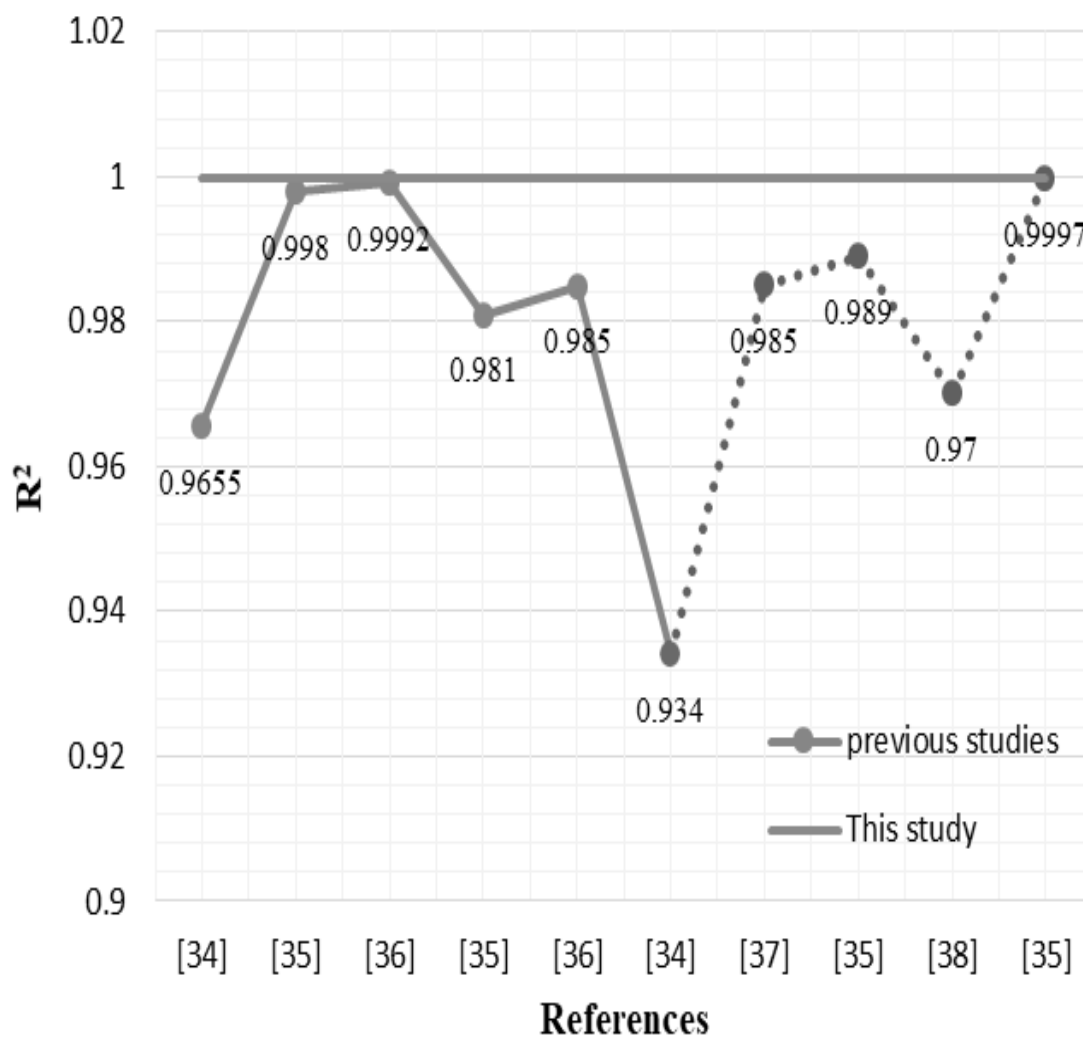
همان طور که در شکل مشخص است مقدار $R^2 = 0.9999$ که برای این مطالعه بدست آمد نسبت به سایر مطالعات بیشتر است.

جدول ۱۱ دقت مدل‌ساز استفاده شده سه‌درجه‌ای بهینه شده

انحراف استاندارد	۰/۰۰۲۶	R^2	۰/۹۹۹۹
میانگین	۲/۲۳	R^2_{adj}	۰/۹۹۹۹
C.V. %	۰/۱۱۴۹	R^2_{Pre}	۰/۹۹۹۸
Adeq Precision	۸۵۵/۲۳۰۵		

شکل (۱۰)، تطابق خوب داده‌های واقعی و داده‌های حاصل از شبیه‌سازی را برای ویسکوزیته نانوسیال MWCNT-ZnO(30:70)/SAE40 نشان می‌دهد.

به منظور بررسی دقت مدل‌سازی، پارامتر آماری R^2 که بیانگر دقت می‌باشد در شکل (۱۱) با کارهای قبلی مقایسه شده است. در این شکل خط یکپارچه بیانگر ویسکوزیته و خط نقطه چین مربوط به هدایت حرارتی می‌باشد.

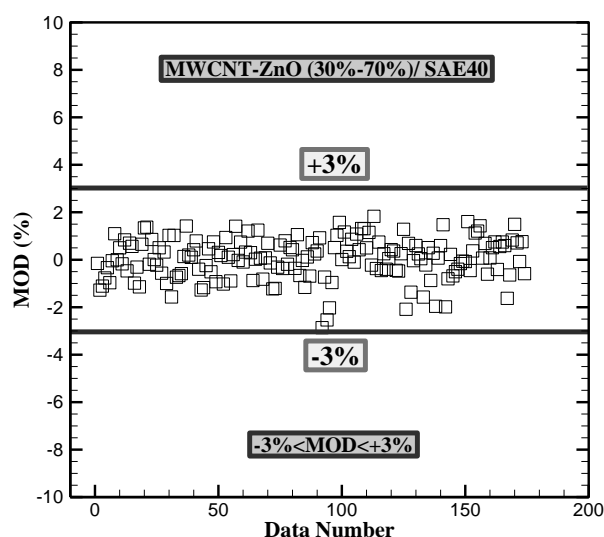


شکل ۱۱ مقایسه مقادیر R^2 در مطالعه حاضر و مطالعات قبلی

۳-۲-۳- انحراف از معیار

معیار MOD که به صورت معادله (۷) تعریف می‌شود برای بررسی دقت رابطه ارائه شده برای محاسبه ویسکوزیته (رابطه ۶) به کار می‌رود. کم بودن مقدار MOD نشان می‌دهد مدلسازی ارائه شده از دقت خوبی برخوردار است. در شکل (۱۲) مقادیر MOD برای این مطالعه ارائه شده است که در محدوده $3\% < MOD < 3\%$ می‌باشد و بنابراین مدلسازی دقت خوبی دارد.

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



شکل ۱۲ محدوده مقادیر حاشیه انحراف در کل داده‌های آزمایشگاهی

توانی نشان داد که این مقدار برای کسر حجمی‌های مختلف کوچک‌تر از ۱ می‌باشد و بنابر این نانوروانکارها رفتاری غیر نیوتونی داشتند. تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ برشی در دماها و کسر حجمی‌های مختلف، دارای روندی خطی و با شیب‌های مختلف بود و بنابراین نانوروانکارها دارای رفتاری غیر نیوتونی و از نوع شبه پلاستیک بودند. تغییرات ویسکوزیته بر حسب نرخ برشی نیز نشان از وابستگی ویسکوزیته به نرخ برشی داشت به گونه‌ای که در دماهای کمتر این وابستگی بیش‌تر بود. مقایسه مقادیر ویسکوزیته نسبی نانوسیالات MWCNT-ZnO (30%-50%)/SAE40 و MWCNT-ZnO (50%-70%)/SAE40 در نرخ برش‌های ثابت نشان داد که میزان افزایش ویسکوزیته نسبی در نانوسیال (50%-50%)/SAE40 بیشتر است و این به علت توانایی کمتر نانوسیال نسبت به نانوسیال رقیب در حرکت کردن و جریان یافتن است که ناشی از حضور بیش‌تر نانوذرات MWCNT است. بررسی تغییرات ویسکوزیته نانوروانکارهای مورد بررسی نشان داد عملکرد نانوروانکار (30%-50%)/SAE40 برای استفاده به عنوان روغن موتور بهتر از نانوروانکار (50%-70%)/SAE40 است. همگرایی ارائه شده برای نانوروانکار منتخب دارای مقادیر $R^2 = 0.9999$ و $R^2_{adj} = 0.9999$ بدست آمد که دقت بالای مدلسازی را نشان می‌دهد. مقادیر مربوط به انحراف از معیار نیز در محدوده $3\% < MOD < 3\%$ قرار گرفت.

۵- مراجع

- [1] D. Huang, Z. Wu, & B. Sundén, Effects of hybrid nanofluid mixture in plate heat exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 72, 190-196, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.11.009>.
- [2] N. Ahammed, L. G. Asirvatham, & S. Wongwises, Entropy generation analysis of graphene–alumina hybrid nanofluid in multiport minichannel heat exchanger coupled with thermoelectric cooler. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 103, 1084-1097, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.070>.
- [3] M. K. A. Ali, H. Xianjun, R. F. Turkson, Z. Peng, & X. Chen, Enhancing the thermophysical properties and tribological behaviour of engine oils using nano-

۴- نتیجه‌گیری

خواص نانو روانکار شامل نانوذرات MWCNT و ZnO و بر پایه روغن SAE40 برای نسبت‌های مختلف ۳۰:۷۰ و ۵۰:۵۰ به صورت آزمایشگاهی و برای اولین بار بررسی شد و نانو روانکار با عملکرد بهتر بیان شد. آزمایش‌ها برای حالت‌های مختلفی از دما، کسر حجمی و نرخ برشی انجام شد و مقادیر ویسکوزیته هر دو نانوروانکار ارائه شد. نتایج مربوط به عدم قطعیت نشان داد که این مقدار برابر با ۰/۱۲۱ می‌باشد. نتایج مربوط به بررسی رفتار رئولوژیکی نانوروانکارها حاکی از رفتار غیرنیوتونی بود. این بررسی‌ها 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 MWCNT ZnO و MWCNT ZnO (30%-70%)/SAE40

- Filter integrated with feed-forward neural network. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 172, 121159, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121159>.
- [12] S. B. Mousavi, S. Z. Heris, & P. Estellé, Viscosity, tribological and physicochemical features of ZnO and MoS₂ diesel oil-based nanofluids: An experimental study. *Fuel*, 293, 12048, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120481>.
- [13] A. Keykhosravi, M. B. Vanani, & C. Aghayari, TiO₂ nanoparticle-induced Xanthan Gum Polymer for EOR: Assessing the underlying mechanisms in oil-wet carbonates. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 204, 108756, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108756>.
- [14] M. Farbod, & N. Bahmani, Fabrication of AlN nanoparticles by arc discharge method and investigation of thermal conductivity of AlN transformer oil-based nanofluid. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 1-8, 2022, <https://doi.org/10.1007/s41779-022-00791-6>.
- [15] H. F. Asl, G. Zargar, A. K. Manshad, M. A. Takassi, J. A. Ali, & A. Keshavarz, Effect of SiO₂ nanoparticles on the performance of L-Arg and L-Cys surfactants for enhanced oil recovery in carbonate porous media. *Journal of Molecular Liquids*, 300, 112290, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112290>.
- [16] Y. M. Chu, M. Ibrahim, T. Saeed, A. S. Berrouk, E. A. Algehyne, & R. Kalbasi, Examining rheological behavior of MWCNT-TiO₂/5W40 hybrid nanofluid based on experiments and RSM/ANN modeling. *Journal of Molecular Liquids*, 333, 115969, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115969>.
- [17] A. Heydari, M. Goharimanesh, & M. R. Gharib, Dynamic viscosity analysis of hybrid nanofluid MWCNT-Al₂O₃/engine oil using statistical models with evaluating its performance in a double tube heat exchanger. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-15, 2022, <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11608-w>.
- [18] M. Rejvani, A. Heidari, & S. Seadodin, Simultaneous effects of MWCNT and SiO₂ on the rheological behavior of cooling oil and sensitivity analysis. *Heliyon*, e12942, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12942>.
- [19] S. Ganapathy, K. R. Viswanathan, S. Raju, & A. K. Appanacheal, Comparative study of different nanolubricants for automotive applications (No. 2016-01-0486). *SAE Technical Paper*, 2016, <https://doi.org/10.4271/2016-01-0486>.
- lubricant additives, *RSC advances*, 6(81), 77913-77924, 2016, <https://doi.org/10.1039/C6RA10543B>.
- [4] H. Pourpasha, S. Z. Heris, & M. Mohammadpourfard, The effect of TiO₂ doped multi-walled carbon nanotubes synthesis on the thermophysical and heat transfer properties of transformer oil: A comprehensive experimental study. *Case Studies in Thermal Engineering*, 41, 102607, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102607>.
- [5] M. Mokarian, & E. Ameri, The effect of Mg (OH) 2 nanoparticles on the rheological behavior of base engine oil SN500 HVI and providing a predictive new correlation of nanofluid viscosity. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(6), 103767, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.103767>.
- [6] H. Cheng, A. M. Abed, A. A. Alizadeh, A. A. Ghabra, F. M. Altalbawy, R. Sabetvand, ... & Y. Riadi, The effect of temperature and external force on the thermal behavior of oil-based refrigerant inside a nanochannel using molecular dynamics simulation. *Journal of Molecular Liquids*, 369, 120893, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120893>.
- [7] X. X. Tian, R. Kalbasi, C. Qi, A. Karimipour, & H. L. Huang, Efficacy of hybrid nano-powder presence on the thermal conductivity of the engine oil: an experimental study. *Powder Technology*, 369, 261-269, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.004>.
- [8] R. Khoramian, R. Kharrat, & S. Golshokooh, The development of novel nanofluid for enhanced oil recovery application. *Fuel*, 311, 122558, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122558>.
- [9] M. Sepehrnia, M. Lotfalipour, M. Malekiyan, M. Karimi, & S. D. Farahani, Rheological Behavior of SAE50 Oil-SnO₂-CeO₂ Hybrid Nanofluid: Experimental Investigation and Modeling Utilizing Response Surface Method and Machine Learning Techniques. *Nanoscale Research Letters*, 17(1), 117, (2022). <https://doi.org/10.1186/s11671-022-03756-7>.
- [10] M. Sepehrnia, K. Mohammadzadeh, M. M. Veyseh, E. Agah, & M. Amani, Rheological behavior of engine oil based hybrid nanofluid containing MWCNTs and ZnO nanopowders: Experimental analysis, developing a novel correlation, and neural network modeling. *Powder Technology*, 404, 117492, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117492>.
- [11] M. Jamei, I. A. Olumegbon, M. Karbasi, I. Ahmadianfar, A. Asadi, & M. Mosharaf-Dehkordi, On the Thermal Conductivity Assessment of Oil-Based Hybrid Nanofluids using Extended Kalman

- [28] M. A., Moghaddam, & K. Motahari, Experimental investigation, sensitivity analysis and modeling of rheological behavior of MWCNT-CuO (30–70)/SAE40 hybrid nano-lubricant. *Applied thermal engineering*, 123, 1419-1433, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.200>.
- [29] N. Nayeypashae, & S. M. M. Hadavi, Thermal conductivity and rheological studies for graphene-Al₂O₃/ethylene glycol-water hybrid nanofluid at low temperatures. In *Journal of Nano Research* (Vol. 73, pp. 139-160). Trans Tech Publications Ltd, 2022, <https://doi.org/10.4028/p-h9do2u>.
- [30] A. K. Sharma, A. K. Tiwari, & A. R. Dixit, Rheological behaviour of nanofluids: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 779-791, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.033>
- [31] P. C. Mishra, S. Mukherjee, S. K. Nayak, & A. Panda, A brief review on viscosity of nanofluids. *International nano letters*, 4(4), 109-120, 2014, <https://doi.org/10.1007/s40089-014-0126-3>.
- [32] H. Khodadadi, S. Aghakhani, H. Majd, R. Kalbasi, S. Wongwises, & M. Afrand, A comprehensive review on rheological behavior of mono and hybrid nanofluids: effective parameters and predictive correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 997-1012, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.103>.
- [33] X. Hu, D. Yin, J. Xie, X. Chen, & C. Bai, Experimental study of viscosity characteristics of graphite/engine oil (5 W-40) nanofluids. *Applied Nanoscience*, 1-14, 2020, <https://doi.org/10.1007/s13204-019-01240-w>.
- [34] H. Adun, D. Kavaz, M. Dagbasi, H. Umar, & I. Wole-Osho, An experimental investigation of Thermal conductivity and dynamic viscosity of Al₂O₃-ZnO-Fe₃O₄ ternary hybrid nanofluid and development of machine learning model. *Powder Technology*, 394, 1121-1140, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.09.039>.
- [35] L. Li, Y. Zhai, Y. Jin, J. Wang, H. Wang, & M. Ma, Stability, thermal performance and artificial neural network modeling of viscosity and Thermal conductivity of Al₂O₃-ethylene glycol nanofluids. *Powder Technology*, 363, 360-368, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.006>.
- [36] M. H. Esfe, F. Zabihi, H. Rostamian, & S. Esfandeh, Experimental investigation and model development of the non-Newtonian behavior of CuO-MWCNT-10w40 hybrid nano-lubricant for lubrication purposes. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 112045, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112045>.
- [20] A. Asadi, M. Asadi, M. Rezaei, M. Siahmargoi, & F. Asadi, The effect of temperature and solid concentration on dynamic viscosity of MWCNT/MgO (20–80)–SAE50 hybrid nano-lubricant and proposing a new correlation: An experimental study. *International communications in heat and mass transfer*, 78, 48-53, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.08.021>.
- [21] M. Hemmat Esfe, M. Goodarzi, M. Reiszadeh, & M. Afrand, Evaluation of MWCNTs-ZnO/5W50 nanolubricant by design of an artificial neural network for predicting viscosity and its optimization. *Journal of Molecular Liquids*, 277, 921-931, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.08.047>.
- [22] K. Sepyani, M. Afrand, & M. Hemmat Esfe, An experimental evaluation of the effect of ZnO nanoparticles on the rheological behavior of engine oil. *Journal of Molecular Liquids*, 236, 198-204, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.04.016>.
- [23] O. Hozién, W. M. El-Maghlany, M. M. Sorour, & Y. S. Mohamed, Experimental study on thermophysical properties of TiO₂, ZnO and Ag water base nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*, 334, 116128, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116128>.
- [24] M. H. Esfe, M. Afrand, S. H. Rostamian, & D. Toghraie, Examination of rheological behavior of MWCNTs/ZnO-*SAE40* hybrid nano-lubricants under various temperatures and solid volume fractions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 80, 384-390, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.07.011>.
- [25] E. Dardan, M. Afrand, & A. M. Isfahani, Effect of suspending hybrid nano-additives on rheological behavior of engine oil and pumping power. *Applied Thermal Engineering*, 109, 524-534, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.103>.
- [26] M. Hemmat Esfe, M. Afrand, W. M. Yan, H. Yarmand, D. Toghraie & M. Dahari, Effects of temperature and concentration on rheological behavior of MWCNTs/SiO₂ (20–80)-*SAE40* hybrid nano-lubricant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 133-138, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.015>.
- [27] J. Ma, A. Shahsavari, A. A. Al-Rashed, A. Karimipour, H. Yarmand, & S. Rostami, Viscosity, cloud point, freezing point and flash point of zinc oxide/*SAE50* nanolubricant. *Journal of Molecular Liquids*, 298, 112045, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112045>.

- [38] M. Ghazvini, H. Maddah, R. Peymanfar, M. H. Ahmadi, & R. Kumar, Experimental evaluation and artificial neural network modeling of Thermal conductivity of water based nanofluid containing magnetic copper nanoparticles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 551, 124, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.124127>.
- 249, 677-687, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.11.020>.
- [37] S. Zhang, Y. Li, Z. Xu, C. Liu, Z. Liu, Z. Ge, & L. Ma, Experimental investigation and intelligent modeling of Thermal conductivity of R141b based nanorefrigerants containing metallic oxide nanoparticles. *Powder Technology*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.10.019>.