



مروری بر رفتار رئولوژیکی نانوسیالات هیبریدی و بررسی عوامل موثر بر ویسکوزیته آن‌ها

محمد همت اسفه

دانشیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

یوسف شکری

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

چکیده

مخلوط کلوئیدی از ذرات فلزی و غیرفلزی با اندازه (100 نانومتر) در سیال معمولی، نانوسیال نامیده می‌شود. نانوسیالات به دلیل خواص رئولوژیکی و حرارتی برترشان به عنوان سیالات انتقال حرارت بالقوه در نظر گرفته می‌شوند. در دوره اخیر نانوسیالات مورد توجه محققان قرار گرفته است. تحقیق بر روی رفتار رئولوژیکی نانوسیالات از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این مطالعه خلاصه‌ای از تعدادی از کارهای تحقیقاتی مهمی را ارائه می‌کند که در مورد رفتار رئولوژیکی نانوسیالات منتشر شده‌اند. این پژوهش نه تنها تأثیر شکل ذرات و محدوده سرعت برش را بر رفتار رئولوژیکی نانوسیالات مورد بررسی قرار می‌دهد، بلکه سایر عوامل مؤثر بر رفتار رئولوژیکی را نیز مورد مطالعه قرار می‌دهد. این عوامل عبارتند از نوع نانوذرات، کسر حجمی در سیالات پایه، دما و اسیدیته. از بررسی متون، مشخص شده است که شکل ذرات، کسر حجمی آن، محدوده سرعت برش، سورفکتانت و میدان مغناطیسی به طور قابل توجهی بر رفتار رئولوژیکی هر نانوسیال تأثیر می‌گذارد. مشاهده شده است که نانوسیالات حاوی نانوذرات کروی به احتمال زیاد رفتار نیوتنی را نشان می‌دهند و آنهایی که حاوی نانولوله‌ها رفتار جریان غیرنیوتنی هستند. علاوه بر این، نانوسیالات رفتار نیوتنی را در مقادیر نرخ برشی پایین نشان می‌دهند در حالی که در مقادیر نرخ برشی بالا مانند سیال غیر نیوتنی رفتار می‌کنند. مطابق تمام نتایج بدست آمده، ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش و با افزایش دما کاهش می‌یابد. همچنین نتایج مطالعات مختلف نشان داد که نانوسیالات حاوی نانولوله‌های کربنی چند جداره اغلب دارای رفتار غیر نیوتنی برای نرخ‌های برش پایین و رفتار نیوتنی برای نرخ‌های برش بالا هستند.

واژگان کلیدی: ویسکوزیته دینامیکی، رفتار رئولوژیکی، نانوسیال، نانوذرات، نانولوله‌های کربنی



مقدمه

نانوسیال از افزودن ذرات نانومتری در سیال پایه ایجاد می شود. نانوسیال اولین بار توسط چوی (Choi & Eastman, 1995) در سال 1995 ابداع شد. از آن زمان تاکنون کارهای گسترده ای بر روی ایجاد مایعات مبتنی بر نانو با ویژگی های ترموفیزیکی متمایز انجام شده است. انواع مختلفی از نانوذرات مورد مطالعه شامل اکسیدهای فلزی مانند تیتانیوم اکسید^۱، سیلیکون اکسید^۲، اکسید مس^۳، اکسید آلومینیوم^۴، روی^۵ و مگنیت^۶، انواع فلزات خالص مانند آهن، نقره، آلومینیوم و طلا، کاربیدها شامل تیتانیوم و سیلیسیم^۷، انواع مواد کربنی (گرافیت، الماس و نانولوله های کربنی تک جداره و چندجداره) هستند. بسیاری از این نانوذرات در مایعاتی از جمله آب، آب/اتیلن گلیکول، اتیلن گلیکول و روغن ها استفاده شده اند. نانوسیالات به دو دسته اصلی نانوسیال های مونو و هیبریدی تقسیم می شوند. چوی و ایستمن (Choi & Eastman, 1995) پیشنهاد کردند که در نانوسیال مونو از نوع خاصی از نانوذره برای تولید سوسپانسیون با استفاده از چندین روش مختلف استفاده می شود. مطالعات مختلف نشان داده اند که این نوع از نانوسیال ها عملکرد بهتری دارند. زیرا دارای مواد پایه اند که از نظر حرارتی بسیار مفید می باشند. شماتیکی از نحوه تشکیل نانوسیالات در شکل (1) نشان می دهد.



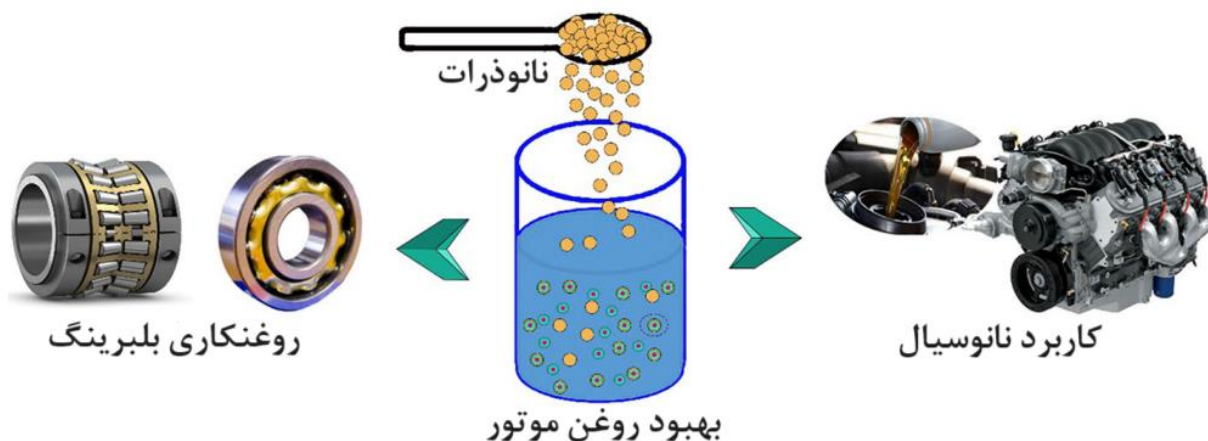
شکل 1- نحوه تشکیل نانوسیال

سیالات غالباً به عنوان حامل گرما و تجهیزات انتقال حرارت استفاده می شوند. نانوسیال ها دارای کاربردهای فراوانی می باشند. تحقیقات مختلف پژوهشگران نشان می دهد که ضریب انتقال حرارت نانو سیالات در مقایسه با سیالات پایه بیشتر است. که این امر باعث گردیده در زمینه های مختلف از جمله صنعتی و غیر صنعتی از کاربردهای آنها استفاده شود. با توجه به نوع نانوسیال از کاربردهای مختلف آنها می توان به سیالات خنک کننده در سیستم های انتقال حرارت، سیالات روانکار، سوخت های مایع، سیستم های خنک کننده وسایل نقلیه در صنعت حمل و نقل، سیستم های گرمایشی و سرمایشی هیدرونیک در ساختمان ها و

¹ TiO₂² SiO₂³ Cu₂O⁴ Al₂O₃⁵ ZnO⁶ Fe₃O₄⁷ Si



فرآیندهای صنعتی در پتروشیمی، نساجی، خمیر و کاغذ و سایر فرآوری‌هایی که در آنها هدایت حرارتی سیالات انتقال حرارت نقش اساسی دارند، اشاره نمود. در شکل (2) کاربرد نانوسیالات در صنایع مختلف نشان داده شده است.



شکل 2- برخی از کاربرد نانوسیالات (Hemmat Esfe et al, 2023)

ویژگی‌های سیال پایه نقش مهمی در تعیین خصوصیات کلی نانوسیالات ایفا می‌کند، از جمله اثرات بر ویسکوزیته، انتقال حرارت، و خواص مکانیکی و حرارتی سیستم. در واقع، ترکیب مایع پایه با نانوذرات به منظور بهبود خصوصیات سیال و بهینه‌سازی عملکرد در کاربردهای مختلف صورت می‌گیرد (Anish et al, 2020; Esfe et al, 2016; Jahanshiri & Sabbaghi, 2016).

نانوسیالات هیبرید دسته‌ای از نانوسیالات هستند که ترکیبی از دو نوع نانوذره غیر همسان (یعنی نانوکامپوزیت هیبریدی) هستند که درون سیال پایه تعلیق شده است. هدف از استفاده از نانوکامپوزیت‌های هیبرید در سیال واسطه، بهبود مشخصه‌های انتقال حرارت سیال پایه از طریق مشخصه‌های ترموفیزیکی ترکیب شده نانومواد مؤثر است. عباسی و همکاران (Abbasi et al, 2013) در تحقیق خود بر روی نانوسیالات هیبریدی $MWCNT/Al_2O_3$ این نانوسیالات را به وسیله فرآیند دو مرحله‌ای محلول گرمایی تهیه نموده و برای این کار از $MWCNT$ ، آلومینیوم استات، آمونیاک، تریتون، اسید نیتریک و اتانول استفاده کرده‌اند. در این تحقیق، نانولوله‌های عامل‌دار با فرآیند محلول-حرارتی با کسرهای حجمی مختلف از 0/2 تا 1٪ از گروه‌های اسید کربوکسیلیک تهیه شده است. برادران یارمند و همکاران (Yarmand et al, 2015) در مطالعه خود روش شیمیایی جدید و ساده‌ای برای تهیه نانوسیالات هیبریدی نقره - صفحات گرافین در آب ارائه نمودند و خواص ترموفیزیکی، انتقال حرارت و ضریب اصطکاک را برای این نانوسیالات بررسی کردند. البته باید ذکر گردد، که سوسپانسیون تهیه شده توسط نویسندگان از محدوده نانو خارج شده و تصاویری که در مطالعه آنها ارائه شده نشان می‌دهد که این سوسپانسیون‌ها به محدوده میکروسیال وارد شده‌اند. لذا مشاهده می‌گردد که ویسکوزیته بین 25٪ تا 31٪ برای کسر حجمی 0/1٪ افزایش می‌یابد. این در حالی است که هدایت حرارتی برای دماهای 20 و 40 درجه سانتی-گراد به ترتیب 11٪ و 22٪ افزایش می‌یابد. مونخ بایار و همکاران (Munkhbayer et al, 2013) در مطالعه خود نانوسیالات هیبریدی نانولوله کربنی - نقره را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد هدایت حرارتی به ازای 0/05٪ وزنی نانولوله کربنی به اضافه 3٪ وزنی نقره در دمای 40 درجه سانتی-گراد 14/5٪ افزایش می‌یابد. این نتایج در شرایطی بدست می‌آید که برای نانوسیالات نانولوله کربنی با 0/05٪ وزنی بدون وجود نقره افزایش هدایت حرارتی فقط به میزان 4٪ است. همت و همکاران (Esfe et al, 2015) هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی مس - تیتانیا را در سیال پایه آب و اتیلن

گلیکول با استفاده از شبکه عصبی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش هدایت حرارتی برای این نانو سیال در کسر حجمی ۱٪ در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۲۰٪ و برای دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد ۲۷٪ بوده است.

در یک دهه گذشته، تحقیقات بر روی نانوسیالات توسط محققان افزایش یافته است. بر خلاف برخی ناسازگاری‌ها در نتایج گزارش شده و درک ناقص از مکانیزم‌های انتقال حرارت در نانوسیالات، این سیالات به عنوان عامل انتقال حرارت هنوز امیدوار کننده است. در ادامه تحقیقات بر روی نانوسیالات، محققان سعی بر آن داشته‌اند که از نانوسیالات جدید هیبریدی در تحقیقات خود استفاده نمایند. ایده استفاده از نانوسیالات هیبریدی از جایی شروع شد که محققان به دنبال نانوسیالاتی با خاصیت انتقال حرارتی بهتر و افت فشار کمتر بودند که بتوانند مزیت‌های بیشتر و معایب کمتری را بدست آورند. مروری بر تحقیقات گذشته نشان می‌دهد هیبریدهای مناسب می‌تواند نانوسیالات نویدبخشی را برای افزایش انتقال حرارت به وجود آورند. با این حال، تحقیقات بسیاری نیاز است تا بر چالش‌های آماده‌سازی، پایداری، خواص و کاربردهای این نانوسیالات فائق آمد. دو روش‌های برای تهیه نانوسیالات هیبریدی وجود دارد که که طبق جدول (۱) استفاده از روش دو مرحله‌ای بیشتر از یک مرحله‌ای می‌باشد.

جدول ۱- روش‌های تهیه نانوسیالات هیبریدی

روش	نوع فرآیند	سیال پایه	مواد	مرجع
تک مرحله‌ای	شیمیایی	روغن ترانسفورماتور	SiO ₂ - Ag	(Botha et al, 2011)
تک مرحله‌ای	حرارتی	آب	CNT- Ag	(Munkhbayar et al, 2013)
دو مرحله‌ای	مکانیکی	آب	Al ₂ O ₃	(Ho et al, 2010, 2011)
دو مرحله‌ای	مکانیکی	آب	CNT-Fe ₂ O ₃	(Chen et al, 2014)
دو مرحله‌ای	مکانیکی	آب	Ag-TiO ₂	(Batmunkh et al, 2014)
دو مرحله‌ای	شیمیایی	آب	Al ₂ O ₃ -Cu	(Suresh et al 2011)
دو مرحله‌ای	شیمیایی	آب	SiO ₂ -CNT	(Baghbanzadeh et al, 2012)
دو مرحله‌ای	شیمیایی	آب	Al ₂ O ₃	(Nine et al, 2012)
دو مرحله‌ای	شیمیایی	آب	Cu-TiO ₂	(Madhesh et al, 2014)
دو مرحله‌ای	شیمیایی	آب	CNT-Fe ₃ O ₄	(Sundar et al, 2014)
دو مرحله‌ای	شیمیایی	آب	الماس- نیکل	(Sundar et al, 2014)

چهار خاصیت ترموفیزیکی سیال شامل جرم ویژه، ویسکوزیته، ضریب رسانایی گرمایی و گرمای ویژه با افزودن نانوذرات به سیال پایه، دستخوش تغییراتی می‌شوند. پژوهشگران مختلف نظریات متفاوت در مورد اثر اضافه کردن نانوذرات بر خواص ترموفیزیکی نانوسیالات بیان کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن نانوذرات باعث افزایش خواص ترموفیزیکی به جز گرمای ویژه می‌شود. افزایش جرم ویژه گرانی و ضریب رسانایی گرمایی به عوامل مختلفی از جمله خواص نانوذرات، خواص سیال پایه، کسر حجمی نانوذرات و دما بستگی دارد. نانوسیالات به دلیل اینکه باعث تغییرات خواص ترموفیزیکی می‌شود کاربردهای زیادی پیدا کرده‌اند. به همین دلیل بررسی خواص ترموفیزیکی نانوسیالات دارای اهمیت می‌باشد.

یکی از خصوصیات مهم در مورد سیالات، ویسکوزیته است که به مقاومت در برابر حرکت داخلی در سیالات اشاره دارد. ویسکوزیته به عنوان عامل اصلی انتقال جرم در لایه‌های مختلف سیالات عمل می‌کند و زمانی ظاهر می‌شود که لایه‌های مختلف سیال نسبت به یکدیگر حرکت دارند. ویسکوزیته را می‌توان به عنوان نیروی بازدارنده و اندازه خواص اصطکاکی سیال نام برد. ویسکوزیته تابع دما و فشار است و به دو صورت ویسکوزیته مطلق یا دینامیکی و ویسکوزیته سینماتیکی بیان می‌شود. ویسکوزیته سیال معمولاً برای طراحی‌های مهندسی و تعریف اعداد بی‌بعد مثل رینولدز و پرانتل مورد استفاده قرار می‌گیرد. ویسکوزیته سیال در محاسبه توان مورد نیاز پمپ‌ها، مخلوط کردن فرآیندها، سیستم لوله کشی‌ها، پودر کردن مایعات و



نگهداری مایعات، تزریق مایعات و حمل و نقل مایعات استفاده می‌شود. ویسکوزیته سیال به منظور محاسبه توان مورد نیاز پمپ‌ها، نگهداری مایعات، سیستم‌های لوله‌کشی، پودر کردن مایعات مخلوط کردن فرآیندها، تزریق مایعات و حمل و نقل مایعات مورد استفاده قرار داد. یکی از راه‌های تشخیص رفتار سیالات (نیوتنی یا غیر نیوتنی)، واکنش آن به تغییرات تنش برشی می‌باشد. در صورتی که با تغییر نرخ برش، تنش برشی به صورت خطی تغییر کند سیال مربوطه رفتاری نیوتنی از خود نشان می‌دهد. اما اگر تنش برشی تغییرات غیر خطی داشته باشد در این صورت آن سیال را غیر نیوتنی می‌نامند. بسیاری از مدل‌ها برای رفتار شبه پلاستیک ارائه شده است که برخی پایه‌ی تئوری داشته و برخی دیگر پایه‌ی تجربی دارند و بیشتر سعی در برازش داده‌ها^۸ دارند برای نمونه ارتباط تجربی بین نمودارهای تنش برشی - نرخ برش برقرار شود. یکی از این مدل‌ها مدل قانون توانی می‌باشد که توسط معادله (1) بیان شده است. ارتباط بین تنش برشی و نرخ برش (رسم شده به صورت یک منحنی دو لگاریتمی) در یک سیال شبه پلاستیک^۹ را می‌توان با یک خط مستقیم در یک گستره‌ی تنش یا نرخ برشی به دست آورد. برای منحنی جریان رابطه (1) قابل استفاده است (Sundar et al, 2014):

$$\tau_{xy} = m(\dot{\gamma}_{yx})^n \quad (1)$$

بنابراین ویسکوزیته ظاهری برای سیال قانون توانی یا استوالد دی وال به صورت رابطه (2) است (Sundar et al, 2014):

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

برای $n < 1$ سیال دارای خصوصیات شبه پلاستیک است.

برای $n = 1$ سیال رفتار نیوتنی دارد.

برای $n > 1$ سیال رفتار دیلاتانت^{۱۰} دارد.

مطالعات گسترده‌ای در مورد رفتار رئولوژیکی نانوسیالات طی سال‌های اخیر صورت گرفته است، جدول (2) به برخی از مطالعات صورت گرفته در مورد رفتار رئولوژیکی نانوسیال اشاره دارد. در جدول (3) نیز خلاصه‌ای مطالعات صورت گرفته درباره تاثیر نوع و شکل نانوذرات مختلف بر رفتار رئولوژیکی نانو سیال‌ها ذکر شده است.

جدول 2- برخی از مطالعات صورت گرفته در زمینه رفتار رئولوژیکی نانوسیالات

مرجع	نتایج	شرایط	سیال پایه	نانوذره	محقق
(Hemmat Esfe et al., 2017)	مطابق نتایج بدست آمده نانو روغن رفتار نیوتنی را از خود نشان می‌دهد. ویسکوزیته با افزایش کسر حجمی افزایش و با بالا رفتن دما کاهش می‌یابد. ماکزیمم افزایش ویسکوزیته نانوروغن نسبت به روغن خالص 33/3 درصد گزارش شده است	$T=25-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ $SVF= 0.05 - 1\%$ $SR= 0 - 4000\text{ s}^{-1}$	SAE40	MWCNTs , ZnO	همت اسفه و همکاران
(Esfe et al, 2016)	نانوروانکار در کسر حجمی های 0 تا 1 درصد مطابق رفتار نیوتنی و در کسر حجمی های 1/5 و 2 درصد رفتار غیر نیوتنی را از خود نشان می‌دهد.	$T=25-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ $SVF= 0 - 2\%$ $SR= 0 - 500\text{ s}^{-1}$	SAE40	MWCNTs, SiO2 (20-80)	همت اسفه و همکاران
(Eshgarf et al, 2016)	نتایج اندازه‌گیری در نرخ‌های برش مختلف نشان داد که سیال پایه (مخلوط آب و اتیلن گلیکول) از خود رفتار نیوتنی دارند، در حالی که همه نمونه‌های نانو سیال رفتار غیر نیوتنی مشابه مدل توانی (شبه پلاستیک) و با شاخص توان کمتر از یک نشان دادند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی ویسکوزیته نانو سیال افزایش می‌یابد.	$T=27.5-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ $SVF= 0.0625 - 2\%$ $SR= 0 - 120\text{ s}^{-1}$	EG-Water	MWCNTs, SiO2	اشگرف و همکاران

⁸ Curve fitting

⁹ Shear thinning

¹⁰ Dilatant



(Xie et al, 2010)	سوسپانسیون رفتار نیوتنی را از خود نشان می‌دهد. ویسکوزیته سوسپانسیون ها با افزایش غلظت نانوذرات افزایش و با افزایش دما کاهش می‌یابد.	$T=10-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ $SVF=0.5-5\%$ $SR=10-150\text{ s}^{-1}$	EG	MgO	ایکسی و همکاران
(Yu et al, 2009)	نانو سیال حاوی کسر حجمی کم (کمتر از 0/02) رفتار نیوتنی را از خود نشان می‌دهد، در حالی سوسپانسیون حاوی کسر حجمی بالا (بیشتر از 0/03) نانو سیال مطابق رفتار شبه پلاستیک رفتار خواهد کرد.	$T=10-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ $SVF=0.01-0.05\%$ $SR=0-100\text{ s}^{-1}$	EG	ZnO	یو و همکاران
(Asadi et al, 2020)	حداکثر ویسکوزیته دینامیکی در کسر حجمی جامد 1٪ و دمای 25 درجه سانتی‌گراد رخ داد. بررسی رفتار رئولوژیکی نشان داد که نانوسیال تهیه شده رفتار نیوتنی دارد.	$T=25-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ $SVF=0.1-1\%$	water	CuO-TiO ₂	اسدی و همکاران
(Sepehrnia et al, 2023)	اندازه‌گیری‌های ویسکوزیته در نرخ‌های برشی، کسر حجمی و دماهای مختلف نشان داد که روغن موتور 10W40 و نانولوله کربنی هیبریدی رفتار غیرنیوتنی دارند.	$T=5-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ $SVF=0.25-1.5\%$ $SR=20-1000\text{ rpm}$	10W40	CeO ₂ -CuO	سپهرنیا و همکاران
(Sepehrnia et al, 2023)	مشخص شد که نانوسیال هیبریدی مورد مطالعه مانند یک سیال غیر نیوتنی رفتار می‌کند. علاوه بر این، شاخص قانون توان محاسبه شده کمتر از واحد بود که منجر به ویژگی‌های شبه پلاستیکی نانوسیال هیبریدی در تمام کسر حجمی‌ها و دماها شد.	$T=5-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ $SVF=0.05-1\%$ $SR=50-1000\text{ rpm}$	5W30	MWCNT-SiO ₂	سپهرنیا و همکاران
(Toghraie et al, 2023)	وابستگی ویسکوزیته نانوسیال به نرخ برشی نشان داد که نانوسیال هیبریدی مورد مطالعه رفتار غیر نیوتنی دارد.	$T=25-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ $SVF=0.0625-1\%$ $SR=666.5-9331\text{ s}^{-1}$	SAE40	MWCNT-TiO ₂	طغرای و همکاران

جدول 3- خلاصه‌ای از اثر نوع، شکل و اندازه نانوذرات مختلف بر رفتار رئولوژیکی نانو سیال‌ها

مرجع	رفتار رئولوژیکی	شکل و نوع نانوذره	سیال پایه	نانوذره	محقق
(Chen et al, 2007)	نیوتنی	کروی شکل	EG	TiO ₂	چن و همکاران
(Yu et al, 2009)	غیر نیوتنی از نوع شبه پلاستیک	کروی شکل	EG	ZnO	یو و همکاران
(Ruan & Jacobi, 2012)	غیر نیوتنی از نوع شبه پلاستیک	لوله‌ای شکل	EG	MWCNT	روآن و جاکوبی
(Ko et al, 2007)	نیوتنی	کروی شکل	Ethanol	SiO ₂	چوالیبر و همکاران
(Chevalier et al, 2007)	نیوتنی	کروی شکل	Ethanol	SiO ₂	چوالیبر و همکاران
(Pastoriza-Gallego et al, 2011)	نیوتنی	کروی شکل	EG	Al ₂ O ₃	گالگو و همکاران
(Aladag et al, 2012)	غیرنیوتنی برای نرخ برشی پایین و نیوتنی برای نرخ برشی‌های بالا	کروی شکل	water	Al ₂ O ₃	آلاداغ و همکاران
	غیر نیوتنی از نوع شبه پلاستیک	لوله‌ای شکل	water	CNT	
(Kwak & Kim, 2005)	نیوتنی	میله‌ای شکل	EG	CuO	کواک و کیم



(Saeedinia et al, 2012)	غیرنیوتنی	کروی شکل	oil (SN-500)	CuO	سعیدینیا و همکاران
(Prasher et al, 2006)	نیوتنی	کروی شکل	PG	Alumina	پراشر و همکاران

در این مطالعه به بررسی عوامل مختلف تاثیرگذار بر ویسکوزیته نانوسیال پرداخته می شود. تاثیر عواملی نظیر دما، کسر حجمی نانوذرات، نرخ برش، اندازه و شکل نانوذره بر روی ویسکوزیته نانوسیال مورد بررسی قرار گرفته و مطالعات صورت گرفته در این زمینه بررسی می شود.

اثرات عوامل مختلف بر ویسکوزیته

تجربه ها نشان می دهند که ویسکوزیته نانوسیال ها تحت تأثیر متغیرهای مختلفی از جمله دما، کسر حجمی، ابعاد ذرات، شکل، نرخ برش و... قرار دارد. در شکل 3- عوامل موثر بر ویسکوزیته نانوسیال مشاهده می شود.



شکل 3- عوامل موثر بر ویسکوزیته نانوسیال

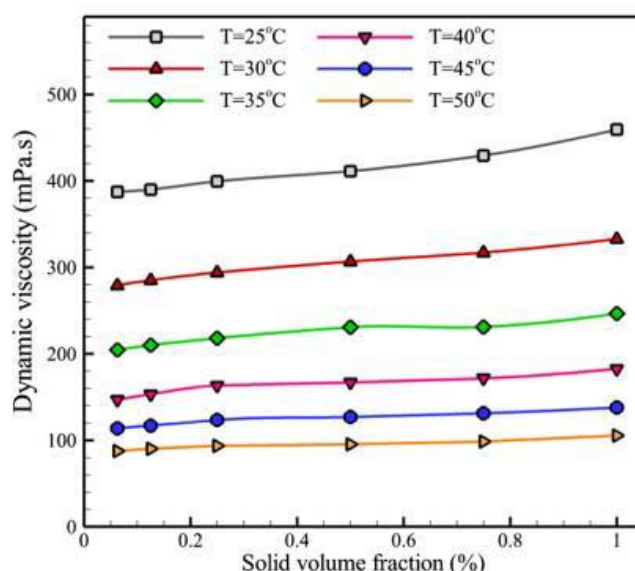
کسر حجمی

روشن است که با افزایش کسر حجمی نانوسیالات، ویسکوزیته آنها نیز افزایش می یابد. رابطه بین ویسکوزیته و کسر حجمی غیر خطی است و برخی از آنها نیز به صورت توانی ارائه می شوند. البته رابطه توانی ممکن است در بازه ای از کسر حجمی به خوبی با داده های آزمایشگاهی سازگار باشد ولی در کسرهای حجمی بالاتر به خوبی با داده های آزمایشگاهی منطبق نمی شود. نکته بسیار مهم دیگری که می توان در این قسمت بیان نمود این است که ممکن است یک نانوسیال تا کسر حجمی مشخصی رفتاری نیوتنی از خود بروز دهد ولی پس از آن رفتاری غیر نیوتنی از خود نشان می دهد. در این رابطه می توان به رفتار سیالات نانولوله های کربنی اشاره نمود که حتی در کسر حجمی های بسیار کم نیز (0/3) از خود رفتار غیر نیوتنی نشان می دهند. توجه نکردن به این پدیده باعث شده است که محققان روابطی را ارائه نمایند که جامع نبوده و فقط به یک میزان نرخ برش که در آزمایش استفاده شده است مربوط شود و عملاً نمایانگر رفتار جامعی از این سیالات نیست. می توان گفت اغلب محققانی که بر روی موضوع ویسکوزیته نانوسیالات متمرکز بوده اند، تأثیر کسر حجمی را مورد بررسی قرار داده اند و تقریباً همه آنها

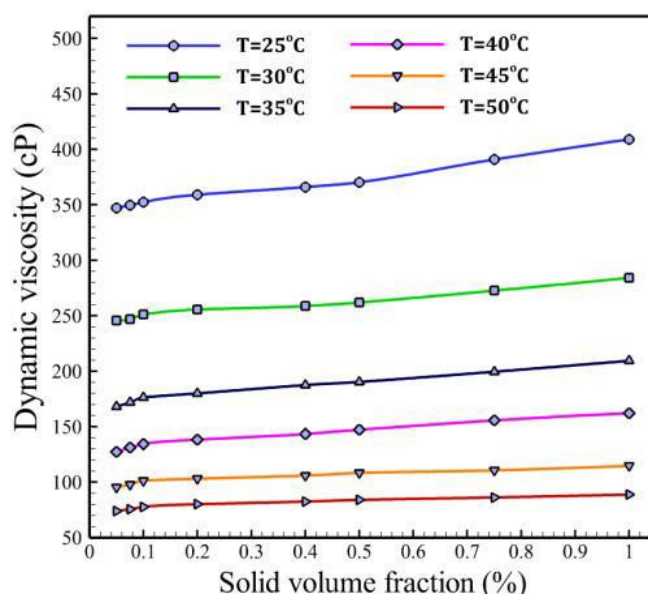


افزایش ویسکوزیته را با کسر حجمی به اثبات رسانده‌اند. از دیدگاه مولکولی نیز این نتیجه قابل توجیه است و همانطور که در بخش‌های گذشته اشاره شد، ذرات موجود در سیال پایه باعث تغییر پروفیل سرعت سیال شده و نیروی پسای بیشتری را به سیال تحمیل می‌کند.

داس و همکاران (Das et al, 2003) و پوترا و همکارانش (Putra et al, 2003) ویسکوزیته نانو سیال آب و آلومینا را با اندازه ذرات 38 نانومتر بررسی کردند. داده‌های به دست آمده در مطالعه آن‌ها نشان داد ویسکوزیته نانوسیال با افزایش کسر حجمی نانوذرات، افزایش یافته و رفتار نانوسیال به صورت نیوتونی می‌باشد. همت و همکاران (Esfe et al, 2017) در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی اثر کسر حجمی و دما بر روی ویسکوزیته دینامیکی نانو سیال هیبریدی حاوی نانوذرات MWCNTs-SiO₂ و MWCNTs-ZnO در سیال پایه SAE40 پرداختند. نتایج یافته‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات ویسکوزیته افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که رفتار رئولوژیکی نانوروغن با افزایش کسر حجمی محسوسی نداشته و مطابق مدل نیوتنی رفتار می‌کند. در شکل (4) و (5) تغییرات ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات هیبریدی حاوی نانوذرات MWCNTs-SiO₂ و MWCNTs-ZnO در سیال پایه SAE40 نشان داده شده است. مطابق شکل‌های 4 و 5 افزایش کسر حجمی نانوذرات و کاهش دما منجر به افزایش ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال می‌شود.



شکل 4- تغییرات ویسکوزیته دینامیکی نانو روغن هیبریدی SAE40 حاوی MWCNTs-SiO₂ (Esfe et al, 2017)



شکل 5- تغییرات ویسکوزیته دینامیکی نانو روغن هیبریدی SAE40 حاوی MWCNTs (Esfe et al, 2017)

اثر دما

اثر دما بر ویسکوزیته مایعات یکی از مسائل اساسی در بررسی رفتار رئولوژیکی سیالات است. اغلب قانونی که تغییرات ویسکوزیته را نسبت به دما مدل می کند به صورت معادله (3) بیان می شود:

$$\eta(T) = \eta_0 \times e^{\left(\frac{E}{RT}\right)} \quad (3)$$

که در این روابط $\eta(T)$ ویسکوزیته در دمای T ، η_0 ویسکوزیته اولیه، E انرژی فعال سازی، R ثابت گازها (حدوداً 8.314) و T دما برحسب کلوین می باشد.

این معادله نشان می دهد که با افزایش دما، ویسکوزیته کاهش می یابد. انرژی فعال سازی نمایانگر انرژی لازم برای حرکت ذرات درون سیال است. هنگامی که دما افزایش می یابد، انرژی لازم برای ذرات حرکت افزایش یافته و به تبع آن ویسکوزیته نیز کاهش می یابد. این اثر به خصوص در نانوسیالات مشاهده می شود. نانوذرات موجود در این سیالات می توانند به عنوان مواد جداسازی عمل کنند و اندازه ی سطح مخصوص زیادی داشته باشند. این ویژگی ها باعث افزایش تعاملات مولکولی و کاهش ویسکوزیته در دماهای بالا نیز می شوند. در مقایسه با اثرات کسر حجمی، تعداد مطالعات بیشتری در مورد تاثیر دما بر ویسکوزیته نانوسیالات وجود دارد. سپیانی و همکاران (Sepyani et al, 2017) اثر دما را بر روی ویسکوزیته نانولوله های کربنی روغن موتور اکسید روی در دماهای بین 25 تا 50 درجه سانتی گراد مورد بررسی قرار داد و نتایج آن ها نشان داد که ویسکوزیته نانوسیال با افزایش دما کاهش می یابد. آنوپ و همکاران (Anoop et al, 2009) نانوسیالات اکسید مس - اتیلین گلیکول، اکسید آلومینیوم - اتیلین گلیکول و اکسید آلومینیوم - آب را در دمای 20 تا 50 درجه سانتی گراد و غلظت حجمی 0.5، 1، 2، 4، 6٪ بررسی کردند، نتایج نشان داد که ویسکوزیته با افزایش دما کاهش می یابد. نامبورا و همکاران (Namburu et al, 2007) به این نتیجه رسیدند که نانوسیالات حاوی ذرات CuO در مخلوط اتیلین گلیکول و آب، در دمای بین 35 تا 50 درجه سانتی گراد با کسر حجمی 0 تا 6٪ مانند سیالات نیوتنی عمل نمی کنند به طوری که با افزایش دما، ویسکوزیته به صورت تصاعدی کاهش می یابد. نگوین و همکاران (Nguyen et al, 2008) در مطالعه ای به بررسی تاثیر دما بر روی ویسکوزیته نانوسیالات حاوی دو نوع نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم با دو اندازه ذرات 36 و 47 نانومتر و یک نوع نانوسیال آب - اکسید مس پرداختند. نتایج آن ها نشان داد کسر حجمی نانوذرات تا 4٪ تاثیر چندانی بر شیب شکل ویسکوزیته بر حسب دما ندارد.



تأثیر اندازه ذرات

تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که اندازه نانو ذرات در ترکیبات نانوسیالات تأثیر چشم‌گیری بر روی ویسکوزیته آن‌ها دارد. مطالعات انجام شده توسط نامبورا و همکاران (Namburu et al, 2007) نشان می‌دهد که با افزایش اندازه ذرات اکسید مس در اندازه‌های 20، 50 و 100 نانومتر، ویسکوزیته نانوسیال کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، همت و همکاران (Hemmat Esfe et al, 2015) ویسکوزیته نانوسیال آب-آهن را با قطرهای 37، 71 و 98 نانومتر بررسی کرده‌اند و نتایج نشان می‌دهند که با افزایش قطر ذره، ویسکوزیته نانوسیال افزایش می‌یابد. افزون بر این، نسبت ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال با افزایش غلظت و اندازه ذرات افزایش می‌یابد. هی و همکاران (He et al, 2007) نیز ویسکوزیته نانوسیال اکسید تیتانیوم-آب را برای اندازه‌های مختلف نانو (95، 145 و 210 نانومتر) مورد مطالعه قرار داده‌اند. در حالی که برخی از نتایج قبلی به نتایج متناقضی منجر شده بودند، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ویسکوزیته نانوسیالات با افزایش قطر ذره کاهش می‌یابد. مطالعات لو و فان (Lu & Fan, 2008) نیز ویسکوزیته نانوسیالات اکسید آلومینیوم-آب و اکسید آلومینیوم-اتیلن گلیکول را برای اندازه‌های مختلف به صورت عددی و تجربی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش قطر ذره، ویسکوزیته نانوسیالات کاهش می‌یابد. کولکارانی و همکاران (Kulkarni et al, 2008) در تحقیقات خود به بررسی اثر اندازه ذره در نانوسیالات پرداختند و برای نانو ذرات با سه اندازه مختلف 20، 50 و 100 نانومتر اندازه‌گیری انجام دادند. نتایج نشان داد که با افزایش اندازه ذره، ویسکوزیته نانوسیال کاهش می‌یابد. در ادامه، جمال و همکاران (Gamal et al, 2023) در یک بررسی تجربی به خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیالات اکسید روی و اکسید منیزیم بر پایه آب و اتیلن گلیکول پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که ویسکوزیته و هدایت حرارتی نانوسیال با افزایش غلظت نانو ذره به طور یکنواخت افزایش می‌یابد. حداکثر افزایش برای اکسید روی و اکسید منیزیم به ترتیب 34/5٪ و 45/1٪ مشاهده شد. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که گرمای ویژه نانوسیال‌ها با افزایش کسر حجمی نانوذرات و نسبت غلظت اتیلن گلیکول در سیال پایه کاهش می‌یابد، اما با افزایش دما افزایش می‌یابد. این پژوهشگران همچنین یک ارزیابی نظری از عملکرد انتقال حرارت ارائه کردند و نشان دادند که نانوسیال‌های اکسید روی و اکسید منیزیم دارای پتانسیل استفاده در کاربردهای انتقال حرارت با رژیم‌های جریان آرام هستند. برای رژیم آشفته، ترجیحاً از غلظت‌های نانوذرات کمتر از 0/5 درصد و برای نانوسیالات اکسید روی، بیشتر از 1٪ اکسید منیزیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جدول (4) برخی از مطالعات صورت گرفته در زمینه تأثیر اندازه نانوذرات بر ویسکوزیته نانوسیال ذکر شده است.

جدول 4- مطالعات صورت گرفته در مورد تأثیر اندازه نانوذرات بر ویسکوزیته

ذره	سیال پایه	کسر حجمی ذرات	سایز ذره (نانومتر)	شکل ذره	حداکثر ویسکوزیته نسبی	دما (سانتی‌گراد)	مرجع
AL ₂ O ₃	پروپیلن گلیکول	3-0/5	27-40-50	بدون شکل	1/3762	30-60	(Yalçın et al, 2023)
AL ₂ O ₃	آب	5	12-28-32-80	بدون شکل	1/882	25	(Kanti et al, 2023)
AL ₂ O ₃	آب	1-3	10-30	کروی	2/07	5-50	(Koca et al, 2018)
SiO ₂	آب	4-0/5	6.5-28-65	انواع مختلف	1/49	10-50	(Pordanjani et al, 2021)
MgO	آب	2-0/5	21-15-47	استوانه‌ای	1/91	10-50	(Marulasiddeshi et al, 2022)
Fe	آب	1-0/03	37-71-98	کروی	1/073	25	(Esfe et al, 2017)
SiC	آب	1/4	16-29-66-90	کروی	1/857	15-45	(Tembhare et al, 2022)



اثر شکل ذرات

به نظر می‌رسد، شکل نانوذرات در محاسبات تحلیلی از اهمیت زیادی برخوردار است. اندازه نانوذرات نیز عامل مهمی در برخی از آزمایش‌ها تشخیص داده شده است (Chopkar et al, 2008). با این حال، سنجش این دو متغیر و تعیین کمیت آن برای سوسپانسیون‌های دارای ذرات غیر یکنواخت مشکل است. ذرات به شکل‌های مختلف درون نانوسیالات وجود دارند. ذرات ممکن است کروی، بیضی شکل، متخلخل و یا به صورت فیبری شکل و رشته‌ای باشند. هر کدام از این ذرات که درون نانوسیال قرار گیرند ویسکوزیته متفاوتی را ایجاد می‌کند. بسیاری از روابط تئوری اولیه که برای محاسبه ویسکوزیته سوسپانسیون‌ها ارائه شده، ذرات را کروی در نظر گرفته‌اند که در بسیاری از مواقع این روابط برای نانوسیالات مقادیر درستی را پیش‌بینی نمی‌کند. ابتدایی‌ترین رابطه در این زمینه، رابطه انیشتین (Einstein, 1905) است که رابطه‌ای را برای ذرات کروی در یک سیال ارائه نموده است. همچنین یکی دیگر از دلایل عدم توانایی این رابطه در پیش‌بینی مقدار ویسکوزیته به دلیل فرض اینشتین برای سرعت جریان بسیار کم بوده است. پس از او این رابطه توسط افراد مختلف برای جریان‌های گوناگون تصحیح شده است. این مشخصه را در نانولوله‌های کربنی به صورت نسبت ابعاد آن (طول به قطر نانولوله) در نظر می‌گیرند. در مطالعه‌ای که توسط کاردناس و همکاران (Gómez et al, 2015) انجام گرفت، این مشخصه به خوبی مورد بازرسی واقع شد. آن‌ها در تحقیق خود از سه نوع MWCNT استفاده کرده‌اند که مشخصات آن‌ها در جدول (5) آمده است:

جدول 5- جدول مربوط به تحقیق کاردناس و همکاران (Gómez et al, 2015)

نمونه MWCNT	سیال پایه	طول (میکرومتر)	قطر (نانومتر)	نسبت ابعاد (L/D)	کسر وزنی (%)	کسر حجمی (%)
نمونه اول	آب	20	30	600	0/25	0/12
نمونه دوم	آب	8	80	100	0/5	0/24
نمونه سوم	آب	36	15	2400	0/5	0/24

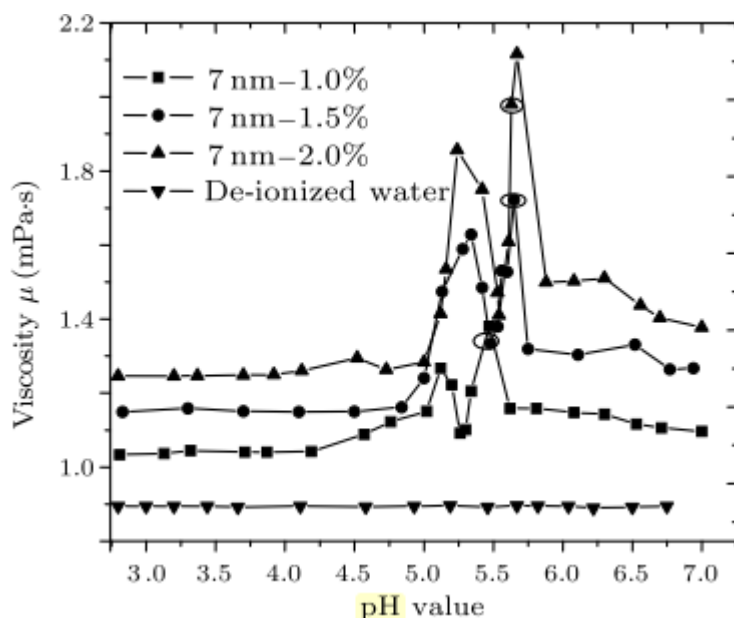
آن‌ها این‌گونه گزارش کرده‌اند که ویسکوزیته نمونه دوم از نمونه سوم و نمونه سوم از نمونه اول بیشتر است. این نتایج با وجود آن است که کسر حجمی نمونه دوم و سوم با هم برابر است، ولی نسبت ابعاد نانولوله‌ها در نمونه دوم و سوم به ترتیب 100 و 2400 است. نتایج اندازه‌گیری رسانایی برای نمونه اول، که حاوی کمترین غلظت حجمی نانولوله‌های پراکنده در 0.12 درصد و نسبت ابعاد 600 (l/d) بود، افزایش 6.3 درصدی را در مقایسه با سیال پایه نشان داد. نمونه‌های دوم و سوم، که حاوی غلظت حجمی یکسانی 0/24 درصد، اما با نسبت‌های 100 و 2400 بودند، به ترتیب افزایش‌های متفاوتی در هدایت حرارتی، 8/8 درصد و 17 درصد نشان دادند. این تفاوت با این واقعیت توضیح داده می‌شود که نانوذراتی که کمترین قطر را دارند، دارای مساحت ویژه بزرگ تری هستند که به حرکت براونی کمک می‌کند، که عامل مهمی در افزایش رسانایی حرارتی نانوسیال‌ها در نظر گرفته می‌شود.

اثر میزان PH نانوسیال

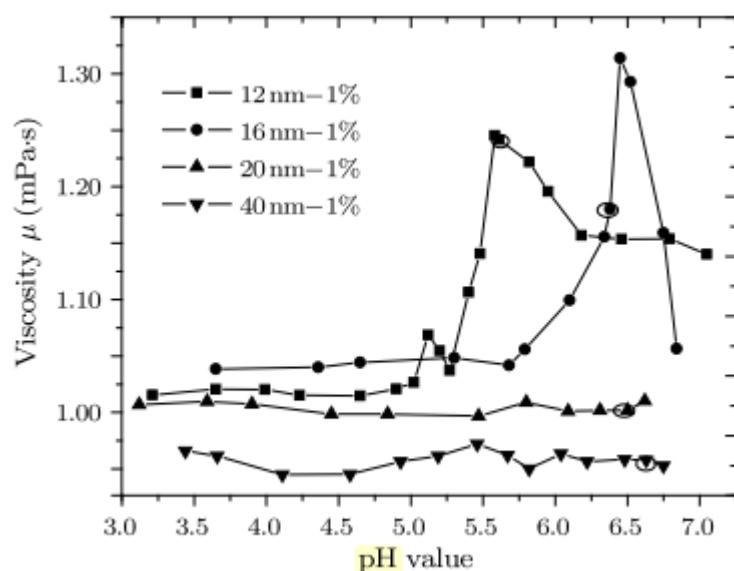
مقدار اسیدیته نیز یکی دیگر از عوامل تاثیرگذار بر روی ویسکوزیته و هدایت حرارتی نانوسیالات است. این عامل که گاهی با عنوان پتانسیل زتا نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد، توسط محققان متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیقات گوناگون ثابت شده است که هر نانوسیال با نانوذرات خاص در مقدار اسیدیته مشخصی بهترین عملکرد حرارتی را دارد. این نقطه بهینه برای عملکرد حرارتی با افزایش ویسکوزیته نیز همراه است. بنابراین برای سیستم‌های مهندسی لازم است که در این خصوص نقاط کارکرد بهینه‌ای را متناسب با هر نانو سیال معرفی نمود. جیا-فی و همکاران (Jia-Fei et al, 2009) تأثیر اندازه ذرات و PH را بر روی ویسکوزیته نانوسیالات بررسی نموده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که زمانی که ذرات کوچک می‌شوند، مقدار



PH تأثیر بیشتری بر روی ویسکوزیته نانو سیال دارد. این تأثیر برای نانوذرات کوچکتر از 20 نانومتر بیشتر برآورد شده است. شماتیک ویسکوزیته بر حسب میزان اسیدیته برای اندازه ذرات 7 نانومتر و 12 تا 40 نانومتر در شکل های (6 و 7) آورده شده است:



شکل 6- ویسکوزیته نانوسیالات سیلیکا (7 نانومتر) در آب دیونیزه بر حسب اندازه pH (Jia-Fei et al, 2009)



شکل 7- ویسکوزیته نانوسیالات سیلیکا (12, 16, 20 و 40 نانومتر) مختلف بر حسب PH (Jia-Fei et al, 2009)

مقایسه شکل های (6) و (7) که مربوط به نانوسیالات با اندازه ذرات مختلف است، نشان دهنده تفاوت اندازه نانوذرات در تأثیر pH بر ویسکوزیته نانوسیالات است.

محققان این پدیده را به دو عامل وابسته دانسته اند:



۱- تأثیر بعد فرکتال توده‌ها df : این عامل از تفاوت در ساختار سطح توده‌ها سرچشمه می‌گیرد. اضافه نمودن الکترولیت، باعث تغییر سطح توده‌های نانوذرات شده و بار سطحی آنها را تغییر می‌دهد که این عاملی برای تفاوت در مقدار ویسکوزیته نانوذرات با اندازه‌های مختلف می‌شود.

۲- لایه دوگانه الکتريکی حول ذرات: آزمایش‌ها نشان می‌دهد که بارهای الکتريکی موجود در نانوسیالات، لایه دوگانه الکتريکی حول نانوذرات را تغییر می‌دهد و بنابراین باعث تغییر ضریب الکتروویسکوز اولیه P می‌شود که تأثیر این ضریب و بعد فرکتال در معادله (4) مورد توجه قرار گرفته است:

$$\mu_r = 1 + [\eta](1 + p)(d_a/d)^{3-df} \quad (4)$$

تأثیر سایر پارامترها

نوع سیال پایه، روش تثبیت سوسپانسیون، مقدار pH و روش تولید از دیگر پارامترهای تأثیرگذار بر ویسکوزیته نانوسیال است که در ادامه به برخی از آنها به اختصار پرداخته خواهد شد. ساندر و همکاران (Sundar et al, 2013) ویسکوزیته نانوسیال اکسید آهن را در سیال پایه آب -اتیلن گلیکول بررسی نمودند و پی بردند که ویسکوزیته نانوسیال به سیال پایه بستگی دارد و ترکیب متفاوت نانو ذره اکسید آهن در مخلوط آب و اتیلن گلیکول 40:60٪ ورنی باعث افزایش 269 درصدی ویسکوزیته نانوسیال نسبت به سیال پایه می‌شود. مطالعات صورت گرفته در مورد اثرات پارامترهای مختلف دما، نرخ برشی و کسر حجمی نانوذرات روی ویسکوزیته نانوسیالات به طور خلاصه در جدول (6) ارائه شده است.

جدول 6- مطالعات صورت گرفته در مورد اثر پارامترهای مختلف ورودی روی ویسکوزیته نانوسیال

مرجع	محقق	نانوسیال	سیال پایه	نتایج
(Ghasemi & Karimipour, 2018)	Ghasemi et al.	CuO	liquid paraffin	ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال با افزایش دما کاهش می‌یابد.
(Esfe et al, 2018)	Hemmat Esfe et al	ZrO ₂ -MWCNT	10W40	بررسی رفتار رئولوژیکی نانوسیال هیبریدی نشان داد که رفتار نانوسیال به صورت غیر نیوتنی است.
(Karimipour et al, 2018)	Karimipour et al	CuO	liquid paraffin	افزایش کسر حجمی نانوذرات منجر به افزایش قابل توجه ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال در مقایسه با سیال می‌شود.
(Kole & Dey, 2011)	Kole et al	CuO	gear oil	افزایش کسر حجمی و کاهش دما باعث افزایش ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال می‌گردد.
(Zhu et al, 2021)	Zhu, Y. et al.	MWCNT-WO ₃	Water-EG	ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال با افزایش کسر حجمی نانوذرات و کاهش دما افزایش یافت.
(Marulasiddeshi et al, 2022)	Marulasiddeshi et al	Al ₂ O ₃ -CuO	Water	هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیالات هیبریدی در مقایسه نانوسیال مونیو به طور قابل توجهی بالاتر است.
(Wanatasanappan et al, 2023)	Wanatasanappan et al	Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃	Water-EG	تجزیه و تحلیل رفتار رئولوژیکی نانوسیال هیبریدی نشان داد سیال از نوع نیوتنی می‌باشد.
(Esfe & Arani, 2018)	Hemmat Esfe et al	MWCNT-SiO ₂	5W50	تغییرات ویسکوزیته نانوسیال در برابر



				نرخ برشی نشان داد که نانوسیال به نرخ برشی وابسته است و این نشان دهنده غیرنیوتنی بودن نانوسیال است.
--	--	--	--	--

مدل‌های کلاسیک برای تخمین ویسکوزیته و سوسپانسیون

در این بخش، مدل‌های تجربی و تحلیلی کلاسیک ارائه شده توسط محققین اخیر جمع‌آوری شده و مقایسه مختصری بین آثار کلاسیک و مطالعات دهه اخیر انجام شده است تا توانایی آن‌ها در پیش‌بینی رفتار رئولوژیکی و تخمین ویسکوزیته سوسپانسیون‌ها ارزیابی شود.

روابط تحلیلی

روابط کمتری برای تعیین ویسکوزیته نانوسیال در مقایسه با ضریب هدایت گرمایی وجود دارد. اولین رابطه‌ای که برای مخلوط معلق ذرات جامد در مایع استخراج گردید، روابط انیشتین در جدول (7) می‌باشد که ویسکوزیته را بصورت تابعی از غلظت حجمی تعیین می‌کند که μ_f ویسکوزیته سیال و ϕ غلظت حجمی نانوذرات نسبت به سیال پایه است. رابطه انیشتین تنها برای کسر حجمی کوچک‌تر از 2٪ تایید شده است و برای مقادیری که دارای کسر حجمی بزرگ‌تر هستند، مقدار ویسکوزیته را کمتر از واقعی برآورده می‌کند. برینکمن روابط فوق را برای استفاده در کسرهای حجمی که دارای ظرفیت بالاتر توسعه داد. فرانکل و اکریوس (Frankel & Acrivos, 1967)، نیلسن (Nielsen, 1970)، لاندگرن (Lundgren, 1972) نیز روابطی را برای ویسکوزیته پیشنهاد نمودند که رابطه نیلسن برای کسر حجمی‌های کم معتبر بوده و رابطه لاندگرن با استفاده از سری تیلر اثبات شده است. ولی بچلر (Brady & Vicia, 1995) اثرات هیدرودینامیکی یا حرکت براونی بر ویسکوزیته محلول را آزمایش کرد و روابطی را اثبات کرد که برای کسر حجمی تا 10٪ صدق می‌کرد. کارهای انجام شده در این بخش در جدول (7) ارائه گردیده است.

جدول 7- بیان تحلیل عمومی برای روابط لزجت نانوسیال به صورت تابعی از کسر حجمی

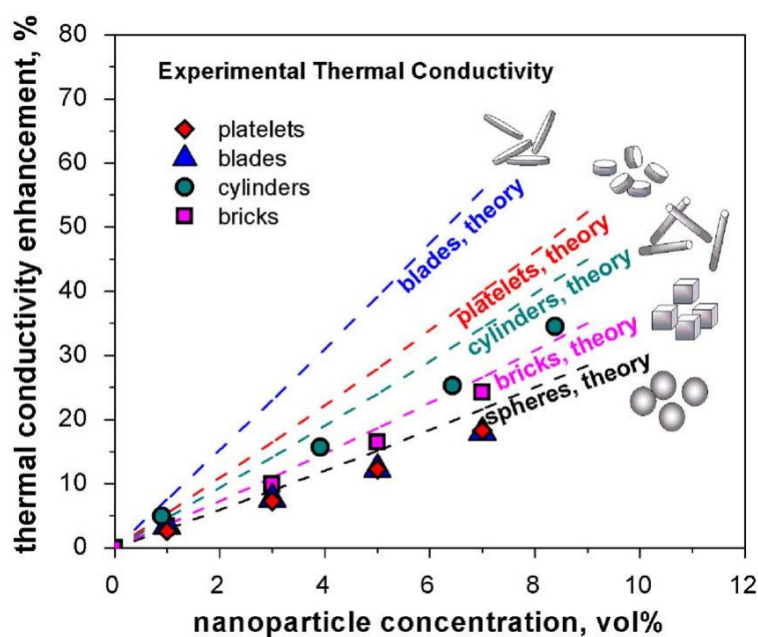
محقق	رابطه	مرجع
انیشتین	$\mu_{eff} = (1 + 2.5\phi)$	(Einstein, 1905)
برینکمن	$\mu_{eff} = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}}$	Brinkman,) (1952
بچلر	$\mu_{eff} = (1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2)$	Batchelor,) (1977
لوندگرن	$\mu_{eff} = (1 + 2.5\phi + 25.4\phi^2 + 0(\phi^3))$	Graham,) (1981
گراهام	$\mu_{eff} = (1 + 2.5\phi + 4.5 \div [(h/d_p)(2 + h/d_p)(1 + h/d_p)^2])$	(Namburu et al, 2007)
افرند و همکاران	$\mu_{eff} = 0.9952 + 0.0305\phi + 0.7167\phi^2 - 0.8848\phi^3 + 0.5161\phi^4$	(Afrand et al, 2016)
نامیورو و همکاران	$\log(\mu_{eff}) = Ae^{-B\phi}$ $A = 1.8375\phi^2 - 29.643\phi + 165.56$ $B = 4 \times 10^{-6}\phi^2 - 0.001\phi + 0.0186$	(Namburu et al, 2007)
معصومی و همکاران	$\mu_{eff} = 1 + \frac{\rho_p V_b d_p^2}{72N\delta}$ $\delta = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\phi} d_p}, V_b = \frac{1}{d_p} \sqrt{\frac{18k_b T}{\pi \rho_p d_p}}$	(Masoumi et al, 2009)



(Putra et al, 2003)	$\mu_{eff} = 0.34 - 2 \times 10^{-4}T + 2.9 \times 10^{-7}T^2$	پوترا و همکاران
(Afrand et al, 2016)	$\mu_{eff} = 0.00337 + \exp(0.07731\phi^{1.452}T^{0.3387})$	افرند و همکاران

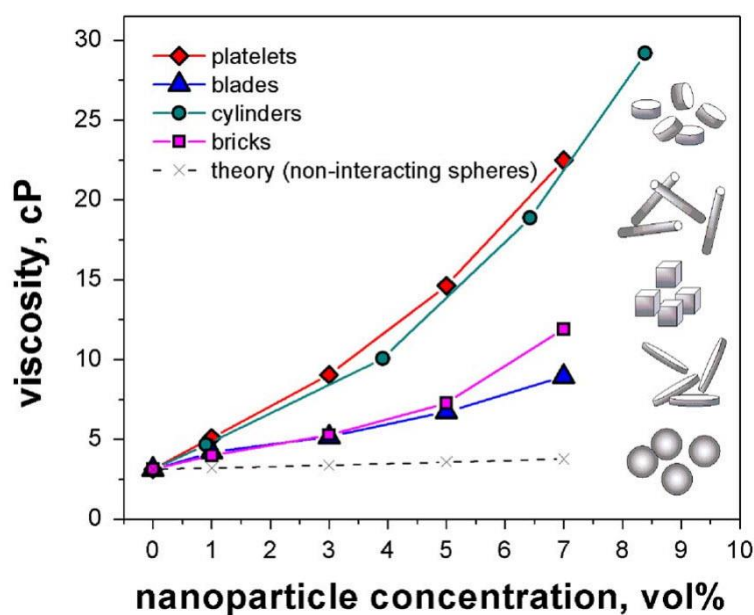
با توجه به جدول (7) مشخص است که هیچ کدام از روابط فوق الذکر قادر نمی باشند تا ویسکوزیته نانوسیال را در محدوده وسیعی از کسرهای حجمی تخمین بزنند. با مقایسه نمودن معادلات ارائه شده و نتایج آزمایشگاهی، مشاهده می گردد. که دقت میزان دقت معادلات تحلیلی کلاسیک بدست آمده برای تخمین ویسکوزیته نانوسیال در محدوده مورد نظر قابل قبول نمی باشد و به تحقیقات بیشتری نیاز است.

ماسودا و همکاران (Masuda et al, 1993) نخستین پژوهشگرانی بودند که به صورت آزمایشگاهی ویسکوزیته ی برخی از نانوسیالات با پایه آب را در دمای اتاق تا دمای حدودی 67 سانتی گراد به دست آوردند. علاوه بر این در تحقیق دیگری، کانگ و همکاران (Masuda et al, 1993) ویسکوزیته نانوسیالات الماس فوق تعلیق شده در اتیلن گلیکول، نقره-آب و سیلیکا-آب را اندازه گیری نمودند و به این نتایج رسیدند که افزایش ویسکوزیته برای الماس- اتیلن گلیکول به میزان 50٪ و برای نقره-آب و سیلیکا-آب به ترتیب 30٪ و 20٪ خواهد بود. پراشر و همکاران (Kumar et al, 2010) با تحقیقاتی که بر روی ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات آلومینا-آب انجام دادند، نشان دادند که ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات آلومینا-آب از نرخ برش مستقل می باشد و دارای رفتار نیوتنی است که با افزایش کسر حجمی ذرات جامد افزایش ویسکوزیته را از خود نشان می دهد. تحقیقات دیگری که توسط چن و همکاران (Chein & Huang, 2005) انجام شد، نشان داد که استفاده از نانوذرات در سیالات، علاوه بر اینکه انتقال حرارت را افزایش می دهد، باعث افزایش ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال نیز می شود. یافته های تحقیق دیگری که توسط تیموفیو و همکاران (Timofeeva et al, 2009) انجام شد، نشان داد که زمانی استفاده از یک نوع نانوسیال می تواند مفید باشد که افزایش انتقال حرارت آن چهار برابر افزایش ویسکوزیته آن باشد. ماکسول اولین کسی بود که طرح ایده استفاده از ذراتی با ابعاد نانومتری را در درون سیال به شیوه سوسپانسیونی مطرح کرد (Maxwell, 1873). و انقلابی بزرگی در زمینه انتقال حرارت در سیالات پدید آمد. ولی به علت داشتن جرم زیاد ذرات و اندازه آنها باعث رسوب و ته نشینی ذرات می شد مورد تأیید محققان قرار نگرفت. ولی چوی و همکاران (Choi & Eastman, 1995) بعد از گذشت حدود یک قرن بعد از آن با پخش نمودن ذرات با ابعاد نانومتری درون سیال های رایج به نسل جدیدی از سیالات دست یافتند که به نانوسیال معروف شد. تیموفیو و همکاران (Timofeeva et al, 2009) با مطالعه تحقیقاتی که بروی شکل نانو ذرات بر هدایت حرارتی نانو سیال آلومینا-آب هدایت حرارتی این نانو سیال ها را در چهار شکل متفاوت (تیغه ای، استوانه ای، بشقابی و مکعبی) را مورد بررسی قرار دادند و نتایج آن را در شکل (8) گزارش دادند که با توجه به بررسی های انجام شده بر روی نانوذرات و مشخص بودن مقدار کروی بودن آنها، ضریب شکل را برای تک تک آنها بدست آوردند و با استفاده از مدل همپلتون-کراسر هدایت حرارتی آنها را بصورت تئوری محاسبه نمودند و با نتایج مشاهدات تجربی مقایسه کردند. نتایج تجربی نشان داد که هدایت حرارتی در شکل های بشقابی، تیغه ای، مکعبی و استوانه ای به ترتیب کمترین مقدار را دارد.



شکل 8- هدایت حرارتی بر حسب غلظت در تحقیقات تیموفیو و همکاران (Timofeeva et al, 2009)

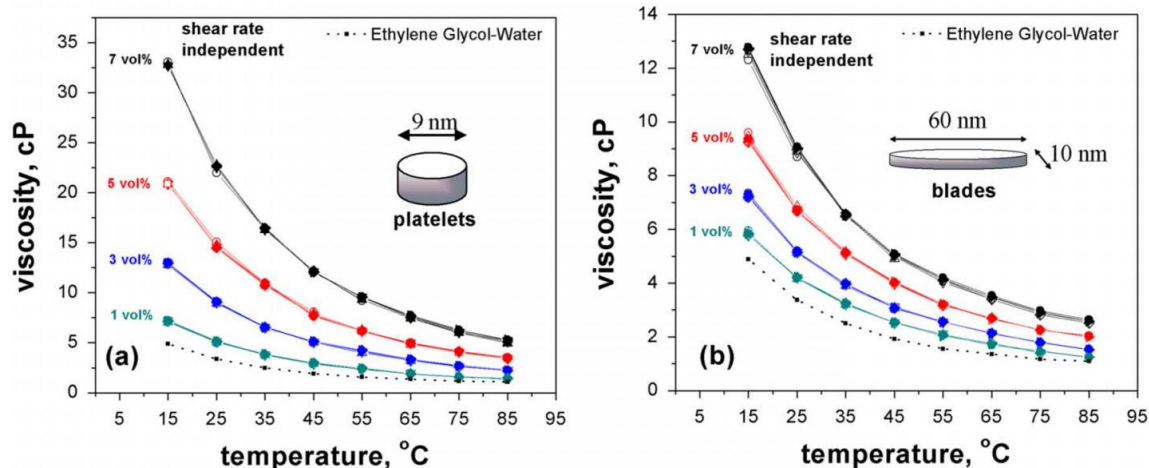
علاوه بر این تیموفیو و همکاران ویسکوزیته نانوسیال را در اشکال مختلف بررسی کردند. نتایج حاصل شده در شکل (9) گزارش شده است که نشان می‌دهد ویسکوزیته به ترتیب اولویت در شکل‌های استوانه‌ای، تیغه‌ای، مکعبی و بشقابی دارای بیشترین مقدار ممکن می‌باشد.



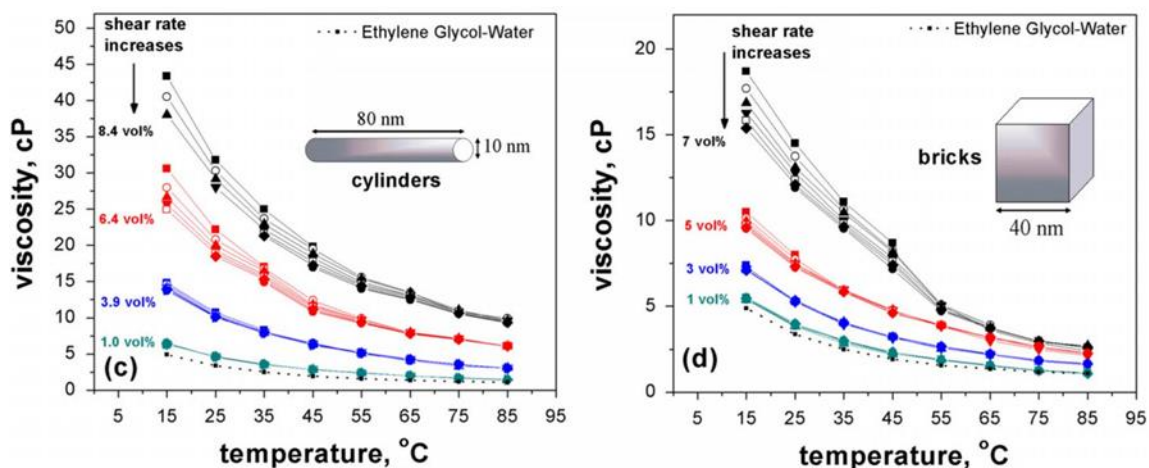
شکل 9- ویسکوزیته بر حسب غلظت در تحقیقات تیموفیو و همکاران (Timofeeva et al, 2009)



تیموفیو و همکاران در شکل‌های (10) و (11) نشان دادند که رفتار نانوسیال در غلظت‌های بیشتر از 4٪ برای شکل‌های مکعبی و استوانه‌ای از نوع غیرنیوتنی و برای شکل‌های تیغه‌ای و بشقابی از نوع نیوتنی است.



شکل 10- رفتار نیوتنی نانوسیال دارای نانو ذراتی با شکل‌های تیغه‌ای و بشقابی شکل (Timofeeva et al, 2009)



شکل 11- رفتار غیرنیوتنی نانوسیال دارای نانو ذراتی با شکل‌های مکعبی و استوانه‌ای (Timofeeva et al, 2009)

در مطالعاتی که توسط ما و همکاران بررسی شد، نانوسیال پایداری که حاوی نانوذرات گرافن و سیلیکا بود مورد سنتز قرار گرفت. از بررسی خواص رئولوژیک این نانوذرات سنتز شده پی می‌بریم که اگر با افزایش یافتن نرخ برشی، ویسکوزیته ثابت بماند رفتار سیالات نیوتنی خواهد بود (Ma et al, 2013). نامبورا و همکاران (Namburu et al, 2007) تاثیر اندازه ذره اکسید مس را در سه اندازه 20، 50 و 100 نانومتر بررسی کردند و به نتایج رسیدند که نشان می‌دهد ویسکوزیته نانوسیال با افزایش قطر ذره، کاهش می‌یابد. علاوه بر این همت و همکاران (Hemmat Esfe et al, 2015) ویسکوزیته نانو سیال آب-آهن را با قطرهای 37، 71 و 98 بررسی نمودند که نتایج حاصل شده نشان داد ویسکوزیته نانوسیال با افزایش یافتن قطر ذره، افزایش می‌یابد. علاوه بر این نسبت ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال با افزایش غلظت ذرات و قطر آن‌ها افزایش می‌یابد.



روابط تجربی

نگویان و همکاران (Nguyen et al, 2008) به طور تجربی به بررسی اثر دما و کسر حجمی نانوذرات بر ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم پرداختند. اثرات دما و ابعاد ذره در محدوده‌های بین دمای اتاق (25) تا 75 درجه سانتی‌گراد و کسر حجمی بین 1 تا 9/4 درصد به دقت بررسی شد. آنها اثبات کردند که رابطه انیشتین و مشتقات آن فقط در محدوده کسر حجمی بسیار کمی قابل استفاده است و نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد. علاوه بر اینها چند رابطه خاص را برای ویسکوزیته پیشنهاد دادند. برای ذرات اکسید آلومینیوم با قطرهای به ترتیب 47 و 36 نانومتری روابط (5) و (6) پیشنهاد گردید؛

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 2.1275 - 0.0215T - 0.002T \quad (5)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 0.904e^{14.83\phi} \quad (6)$$

روابط (7) و (8) برای در نظر گرفتن اثر دما به ترتیب برای کسرهای حجمی 1 و 4 درصدی ذرات اکسید آلومینیوم پیش‌بینی گردید.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1.125 - 0.007 \quad (7)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 2.1275 - 0.0215T^2 \quad (8)$$

که در آن T دمای سیال بر حسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

$$\ln\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}\right) = A\left(\frac{1}{T}\right) - B \quad (9)$$

با این حال هیچ کدام از روابط فوق قادر به تخمین ویسکوزیته نانوسیال در محدوده وسیعی از کسر حجمی نمی‌باشند. نامبورا و همکاران (Namburu et al, 2007) به بررسی خواص رئولوژیک مخلوط معلق ذرات نانو ذرات اکسید مس در مخلوط 40 به 60 وزنی آب و اتیلن گلیکول به صورت تجربی پرداختند. آنها محدوده نانوسیالات کسر حجمی‌های بین 0 تا 6/12 درصدی و در دماهای بین 35 تا 50 درجه سانتی‌گرادی در نظر گرفتند. براساس نتایج بدست آمده یک مدل را به صورت تجربی از نوع آرنیوس به صورت روبطه (10) ارائه نمودند که ویسکوزیته را به درصد کسر حجمی ذرات و دمای نانوسیال مرتبط می‌کند.

$$\log\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}\right) = Ae^{-BT} \quad (10)$$

$$A = 1.8375\phi^2 - 29.643\phi + 165.56 \quad (11)$$

$$B = 4 \times 10^{-6}\phi^2 - 0.001\phi + 0.0186 \quad (12)$$



که در آن ویسکوزیته نانوسیال اکسید مس بر حسب سانتی پوز، T دما بر حسب کلونین و A و B توابعی از کسر حجمی نانوسیال می‌باشد که در روابط بالا، از 0 تا 6/12 درصد تغییر می‌کند. این درحالی است که نشان می‌دهد در این محدوده رفتار نانوسیال به صورت نیوتنی است. کائو و همکاران (Kao et al, 2007) به بررسی تجربی رفتار نانو سیال اکسید آلومینیوم و مخلوطی از آب و اتیلن گلیکول را مورد مطالعه قرار دادند. مطالعه آن‌ها برای قطر نانوذرات 53 نانومتر و کسرهای حجمی بین 1 تا 10 درصد در محدوده وسیعی از دما صورت گرفت. نتایج نشان داد که نانوسیال در دماهای زیر صفر یعنی محدوده دمایی بین -35 تا 0 درجه سانتی‌گراد دارای رفتار غیرنیوتنی بوده و در محدوده دماهای بالاتر یعنی دماهای بین 0 تا 90 درجه سانتی‌گراد رفتار آنها نیوتنی می‌باشد. همچنین براساس نتایج تجربی معادله (13) را برای ویسکوزیته در این دو محدوده دمایی ارائه دادند؛

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = Ae^{(B/T+C\phi)} \quad (13)$$

در جدول (8) گزارشی از مطالعات و روابط تجربی که توسط محققان مختلف بیان شده، جمع آوری شده است. قابل توجه است که این نتایج مانند قسمت قبل فقط در محدوده بیان شده و برای یک نانوسیال خاصی معتبر بوده و در محدوده وسیعی برای تخمین ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات فاقد اعتبار می‌باشد.

جدول 8- خلاصه‌ای کلی از بررسی‌های تجربی انجام شده در زمینه ویسکوزیته

مدل	فرمول	محدوده کاربرد	مرجع
نگویان و همکاران	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 0.904e^{14.83\phi}$	اکسید آلومینیوم-آب (قطر 47 نانومتر)	(Nguyen et al, 2007)
	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = [1 + 2.5\phi + 150\phi^2]$	اکسید آلومینیوم-آب (قطر 36 نانومتر)	
	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1.125 - 0.0007T$	اکسید آلومینیوم-آب (کسر حجمی یک درصد)	
	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 2.1275 - 0.0215T - 0.002T^2$	اکسید آلومینیوم-آب (کسر حجمی 4 درصدی)	
ابونادا	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \exp (3.003 - 0.4203T - 0.5445\phi + 0.0002553T^2 + 1.622\phi^{-1})$	اکسید آلومینیوم-آب	(Abu-Nada, 2010, Abu-Nada, 2009)
مایگا و همکاران	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = (1 + 7.3\phi + 123\phi^2)$	اکسید آلومینیوم-آب اکسید آلومینیوم-اتیلن گلیکول	(Maiga et al, 2004)
ساهو و همکاران	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = Ae^{(B/T+C\phi)}$	اکسید آلومینیوم-آب گلیکول / آب	(Sahoo et al, 2009)
نامبورا و همکاران	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = Ae^{(B\phi)}$	اکسید آلومینیوم و اکسید مس در اتیلن گلیکول / آب با نسبت 40 به 60	(Namburu et al, 2009)
دوانگدونسو و گ	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = a + b\phi + c\phi^2$	دی اکسید تیتانیوم-آب	(Duangthongsuk & Wongwises, 2009)



نتیجه گیری و پیشنهادات

در این پژوهش، مروری بر مطالعات انجام شده بر رفتار رئولوژیکی نانوسیالات در کسر حجمی نانوذرات، دما و نرخ برشی‌های مختلف صورت گرفت و همچنین تاثیر پارامترهای مختلف دما، کسر حجمی، اسیدیته و... بر روی ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات مورد بررسی واقع شد. به طور کلی نتیجه‌گیری‌های صورت گرفته در این مطالعه عبارتند از:

- مطابق تمام نتایج بدست آمده، ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش و با افزایش دما کاهش می‌یابد.
- نانوسیالات حاوی MWCNT اغلب رفتار غیرنیوتنی برش رقیق (شبه پلاستیک) را برای نرخ‌های برش پایین از خود نشان می‌دهند و برای نرخ‌های برش بالا مطابق رفتار نیوتنی برخورد می‌کنند.
- نانوسیالات حاوی SiO₂ بدون توجه به سیال پایه مورد استفاده، رفتار نیوتنی را در یک رنج بزرگی از نرخ‌های برش از خود نشان می‌دهد.
- اکثر نانوسیالات در نرخ‌های برش پایین رفتار نیوتنی و در نرخ‌های برش بالا رفتار غیر نیوتنی را از خود نشان می‌دهند.
- نانوذرات کروی به احتمال زیاد رفتار نیوتنی را نشان می‌دهند در حالی که نانوذرات با اشکال لوله‌ای و چهارضلعی رفتار غیرنیوتنی نشان می‌دهند.
- افزودن سورفکتانت در نانوسیال، ویسکوزیته آن را افزایش می‌دهد و همچنین ممکن است رفتار جریان آن را به دیلاتانت تغییر دهد.
- با اعمال میدان مغناطیسی خارجی، نانوسیال یک انحراف در رفتار رئولوژیکی از نیوتنی به غیر نیوتنی نشان می‌دهد.

محققان تاکنون توجه بیشتری به نانوسیال‌های حاوی یک نانوذره داشته‌اند در حالی که مطالعات کمی روی نانوسیال‌های هیبریدی انجام شده است. بنابراین، می‌توان تحقیقات بیشتری را با تمرکز بر ترکیبی از نانوذرات مختلف (به عنوان مثال، نانوذرات ترکیبی) انجام داد. نویسندگان تأثیر چند پارامتر مانند شکل نانوذرات، اندازه، غلظت حجمی و محدوده سرعت برش را بر روی رفتار رئولوژیکی نانوسیال‌ها بررسی کرده‌اند و برخی ناسازگاری‌ها را در رابطه با شکل و اندازه ذرات مشاهده کرده‌اند. برخی از محققین دریافته‌اند که در حالی که نانوسیال‌های حاوی نانوذرات کروی می‌توانند هر دو نوع رفتار را از خود نشان دهند (یعنی نیوتنی و غیرنیوتنی)، نانوسیال‌هایی با ذرات لوله‌ای شکل رفتار غیرنیوتنی از خود نشان می‌دهند. این یافته‌ها را می‌توان با آشکار کردن تأثیر شکل و اندازه نانوذرات بر رفتار رئولوژیکی با کار با کیفیت‌تر در آینده، بیشتر کرد. بهینه‌سازی پارامترهای ذکر شده می‌تواند برای نانوسیال‌های مختلف نیز انجام شود که ممکن است در سنتز کلاس جدیدی از نانوسیال‌ها با خواص رئولوژیکی بهتر مفید باشد.



منابع

- Abbasi, S. M., Rashidi, A., Nemati, A., & Arzani, K. (2013). The effect of functionalisation method on the stability and the thermal conductivity of nanofluid hybrids of carbon nanotubes/gamma alumina. *Ceramics International*, 39(4), 3885-3891 .
- Aladag, B. ,Halelfadl, S., Doner, N., Maré, T., Duret, S., & Estellé, P. (2012). Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperatures. *Applied Energy*, 97, 876-880 .
- Anish, W., Sunil, J., & Sadasivuni, K. K. (2020). Viscosity of Al₂O₃-water nanofluids. *Materials Today: Proceedings*, 21, 681-683 .
- Anoop, K., Sundararajan, T., & Das, S. K. (2009). Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(9) .2189-2195 ,(10-
- Batchelor, G. (1977). The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *Journal of fluid mechanics*, 83(1), 97-117 .
- Batmunkh, M., Tanshen, M. R., Nine, M. J., Myekhlai, M., Choi, H., Chung, H., & Jeong, H. (2014). Thermal conductivity of TiO₂ nanoparticles based aqueous nanofluids with an addition of a modified silver particle. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(20), 8445-8451 .
- Botha, S. S., Ndungu, P., & Bladergroen, B. J. (2011). Physicochemical properties of oil-based nanofluids containing hybrid structures of silver nanoparticles supported on silica. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(6), 3071-3077 .
- Brady, J. F., & Vicic, M. (1995). Normal stresses in colloidal dispersions. *Journal of Rheology*, 39(3), 545-566 .
- Brinkman, H. C. (1952). The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The Journal of chemical physics*, 20(4), 571-571 .
- Chein, R., & Huang, G. (2005). Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 25(17-18), 3104-3114 .
- Chen, H., Ding, Y., & Tan, C. (2007). Rheological behaviour of nanofluids. *New journal of physics*, 9(10), 367 .
- Chen, L. F., Cheng, M., Yang, D. J., & Yang, L. (2014). Enhanced thermal conductivity of nanofluid by synergistic effect of multi-walled carbon nanotubes and Fe₂O₃ nanoparticles. *Applied mechanics and materials*, 548, 118-123 .
- Chevalier, J., Tillement, O., & Ayela, F. (2007). Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels. *Applied physics letters*, 91 .(23)
- Choi, S. U., & Eastman, J. A. (1995). *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles* .
- Chopkar, M., Sudarshan, S., Das, P., & Manna, I. (2008). Effect of particle size on thermal conductivity of nanofluid. *Metallurgical and materials transactions A*, 39, 1535-1542 .
- Das, S. K., Putra, N., & Roetzel, W. (2003). Pool boiling characteristics of nano-fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(5), 851-862 .
- Duangthongsuk, W., & Wongwises, S. (2009). Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂-water nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33(4), 706-714 .
- Einstein, A. (1905). *Eine neue bestimmung der moleküldimensionen* ETH Zurich .[
- Esfe, M. H., Afrand, M., Gharehkhani, S., Rostamian, H., Toghraie, D., & Dahari, M. (2016). An experimental study on viscosity of alumina-engine oil: effects of temperature and nanoparticles concentration. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76, 202-208 .
- Esfe, M. H., Afrand, M., Rostamian, S. H., & Toghraie, D. (2017). 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 .
- Esfe, M. H., Afrand, M., Yan, W.-M., Yarmand, H., Toghraie, D., & Dahari, M. (2016). 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 .
- Esfe, M. H., & Arani, A. A. A. (2018). An experimental determination and accurate prediction of dynamic viscosity of MWCNT (% 40)-SiO₂ (% 60)/5W50 nano-lubricant. *Journal of Molecular Liquids*, 259, 227-237 .
- Esfe, M. H. ,Saedodin, S., Akbari, M., Karimipour, A., Afrand, M., Wongwises, S., Safaei, M. R., & Dahari, M. (2015). Experimental investigation and development of new correlations for thermal conductivity of CuO/EG–water nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 65, 47-51 .
- Eshgarf, H., Afrand, M., & Hemmat Esfe, M. (2016). Experimental investigation of the effects of temperature and nanoparticles volume fraction on the viscosity of non-Newtonian hybrid nanofluid. *Modares Mechanical Engineering*, 16(3), 98-104 .
- Frankel, N., & Acrivos, A. (1967). On the viscosity of a concentrated suspension of solid spheres. *Chemical Engineering Science*, 22(6), 847-853 .
- Gamal, M., Radwan, M., Elgizawy, I., & Shedid, M. (2023). Thermophysical characterization on water and ethylene glycol/water-based MgO and ZnO nanofluids at elevated temperatures: An experimental investigation. *Journal of Molecular Liquids*, 369, 120867 .
- Gómez, A. O. C., Hoffmann, A. R. K., & Bandarra Filho, E. P. (2015). Experimental evaluation of CNT nanofluids in single-phase flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86, 277-287 .
- Graham, A. L. (1981). On the viscosity of suspensions of solid spheres. *Applied Scientific Research*, 37, 275-286 .
- He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D., & Lu, H. (2007). Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(11-12), 2272-2281 .



- Hemmat Esfe, M., Afrand, M., Rostamian, S. H., & Toghraie, D. (2017). 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.07.011>
- Hemmat Esfe, M., Alidoust, S., Hatami, H., & Toghraie, D. (2023). Rheological behavior of 10W40 base oil containing different combinations of MWCNT-Al₂O₃ nanoparticles and determination of the target nano-lubricant for industrial applications. *Micro and Nano Systems Letters*, 11(1), 14 .
- Hemmat Esfe, M., Saedodin, S., Wongwises, S., & Toghraie, D. (2015). An experimental study on the effect of diameter on thermal conductivity and dynamic viscosity of Fe/water nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 119, 1817-1824 .
- Ho, C., Huang, J., Tsai, P., & Yang, Y. (2010). Preparation and properties of hybrid water-based suspension of Al₂O₃ nanoparticles and MEPCM particles as functional forced convection fluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(5), 490-494 .
- Ho, C., Huang, J., Tsai, P., & Yang, Y. (2011). On laminar convective cooling performance of hybrid water-based suspensions of Al₂O₃ nanoparticles and MEPCM particles in a circular tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(11-12), 2397-2407 .
- Jahanshahi, F., & Sabbaghi, S. Influence of monodispersed CuO nanoparicles on the tribological behavior of hydraulic oil .
- Jia-Fei, Z., Zhong-Yang, L., Ming-Jiang, N & , Ke-Fa, C. (2009). Dependence of nanofluid viscosity on particle size and pH value. *Chinese Physics Letters*, 26(6), 066202 .
- Kanti, P. K., Sharma, P., Maiya, M. P., & Sharma, K. V. (2023). The stability and thermophysical properties of Al₂O₃-graphene oxide hybrid nanofluids for solar energy applications: application of robust autoregressive modern machine learning technique. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 253, 112207 .
- Kao, M.-J., Chang, H., Wu, Y.-Y., Tsung, T.-T., & Lin, H.-M. (2007). Producing aluminum-oxide brake nanofluids using plasma charging system. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, 28(2), 123-131 .
- Ko, G. H., Heo, K., Lee, K., Kim, D. S., Kim, C., Sohn, Y., & Choi, M. (2007). An experimental study on the pressure drop of nanofluids containing carbon nanotubes in a horizontal tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(23-24), 4749-4753 .
- Koca, H. D., Doganay, S., Turgut, A., Tavman, I. H., Saidur, R., & Mahbulul, I. M. (2018). Effect of particle size on the viscosity of nanofluids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1664-1674 .
- Kulkarni, D. P., Namburu, P. K., Ed Bargar, H., & Das, D. K. (2008). Convective heat transfer and fluid dynamic characteristics of SiO₂ ethylene glycol/water nanofluid. *Heat Transfer Engineering*, 29(12), 1027-1035 .
- Kumar, S., Prasad, S. K., & Banerjee, J. (2010). Analysis of flow and thermal field in nanofluid using a single phase thermal dispersion model. *Applied Mathematical Modelling*, 34(3), 573-592 .
- Kwak, K.-Y., & Kim, C.-Y. (2005). Viscosity and thermal conductivity of copper oxide nanofluid dispersed in ethylene glycol. *Korea-Australia Rheology Journal*, 17(2), 35-40 .
- Lu, W.-Q., & Fan, Q.-M. (2008). Study for the particle's scale effect on some thermophysical properties of nanofluids by a simplified molecular dynamics method. *Engineering analysis with boundary elements*, 32(4), 282-289 .
- Lundgren, T. S. (1972). Slow flow through stationary random beds and suspensions of spheres. *Journal of fluid mechanics*, 51(2), 273-299 .
- Ma, W., Yang, F., Shi, J., Wang, F., Zhang, Z., & Wang, S. (2013). Silicone based nanofluids containing functionalized graphene nanosheets. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 431, 120-126 .
- Madhesh ,D., Parameshwaran, R., & Kalaiselvam, S. (2014). Experimental investigation on convective heat transfer and rheological characteristics of Cu-TiO₂ hybrid nanofluids. *Experimental thermal and fluid science*, 52, 104-115 .
- Marulasiddeshi, H. B., Kanti, P. K., Jamei, M., Prakash, S. B., Sridhara, S. N., & Said, Z. (2022). Experimental study on the thermal properties of Al₂O₃-CuO/water hybrid nanofluids: Development of an artificial intelligence model. *International Journal of Energy Research*, 46(15), 21066 .21083-
- Masoumi, N., Sohrabi, N., & Behzadmehr, A. (2009). A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(5), 055501 .
- Masuda, H., Ebata, A., & Teramae, K. (1993). Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ ultra-fine particles .
- Maxwell, J. C. (1873). *A treatise on electricity and magnetism* (Vol. 1). Clarendon press .
- Munkhbayar, B., Tanshen, M. R., Jeoun, J ., Chung, H., & Jeong, H. (2013). Surfactant-free dispersion of silver nanoparticles into MWCNT-aqueous nanofluids prepared by one-step technique and their thermal characteristics. *Ceramics International*, 39(6), 6415-6425 .
- Namburu, P. K., Kulkarni, D. P ., Misra, D., & Das, D. K. (2007). Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(2), 397-402 .
- Nguyen, C., Desgranges, F., Galanis, N., Roy, G., Maré, T., Boucher, S., & Mintsa, H. A. (2008). Viscosity data for Al₂O₃-water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable? *International Journal of Thermal Sciences*, 47(2), 103-111 .
- Nielsen, L. E. (1970). Generalized equation for the elastic moduli of composite materials. *Journal of applied physics*, 41(11), 4626-4627 .
- Nine, M. J., Batmunkh, M., Kim, J.-H., Chung, H.-S., & Jeong, H.-M. (2012). Investigation of Al₂O₃-MWCNTs hybrid dispersion in water and their thermal characterization. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 12(6), 4553-4559 .



- Pastoriza-Gallego, M. J., Lugo, L., Legido, J. L., & Piñeiro, M. M. (2011). Thermal conductivity and viscosity measurements of ethylene glycol-based Al₂O₃ nanofluids. *Nanoscale Research Letters*, 6, 1-11 .
- Pordanjani, A. H., Aghakhani, S., Afrand, M., Sharifpur, M., Meyer, J. P., Xu, H., Ali, H. M., Karimi, N., & Cheraghian, G. (2021). Nanofluids: Physical phenomena, applications in thermal systems and the environment effects-a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128573 .
- Prasher, R., Song, D., Wang, J., & Phelan, P. (2006). Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications. *Applied physics letters*, 89 .(13)
- Putra, N., Roetzel, W., & Das, S. K. (2003). Natural convection of nano-fluids. *Heat and mass transfer*, 39(8-9), 775-784 .
- Ruan, B., & Jacobi, A. M. (2012). Ultrasonication effects on thermal and rheological properties of carbon nanotube suspensions. *Nanoscale Research Letters*, 7, 1-14 .
- Saeedinia, M., Akhavan-Behabadi, M., & Razi, P. (2012). Thermal and rheological characteristics of CuO-Base oil nanofluid flow inside a circular tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(1), 152-159 .
- Sepyani, K., Afrand, M., & Esfe, M. H. (2017). An experimental evaluation of the effect of ZnO nanoparticles on the rheological behavior of engine oil. *Journal of Molecular Liquids*, 236, 198-204 .
- Sundar, L. S., Singh, M. K., Ramana, E. V., Singh, B., Grácio, J., & Sousa, A. C. (2014). Enhanced thermal conductivity and viscosity of nanodiamond-nickel nanocomposite nanofluids. *Scientific Reports*, 4(1), 4039 .
- Sundar, L. S., Singh, M. K., & Sousa, A. C. (2013). Thermal conductivity of ethylene glycol and water mixture based Fe₃O₄ nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 49, 17-24 .
- Sundar, L. S., Singh, M. K., & Sousa, A. C. (2014). Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT-Fe₃O₄/water hybrid nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 52, 73 .83-
- Tembhare, S. P., Barai, D. P., & Bhanvase, B. A. (2022). Performance evaluation of nanofluids in solar thermal and solar photovoltaic systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111738 .
- Timofeeva, E. V., Routbort, J. L., & Singh, D. (2009). Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids. *Journal of applied physics*, 106(1), 014304 .
- Yalçın, G., Öztuna, S., Dalkılıç, A. S., & Wongwises, S. (2023). The influence of particle size on the viscosity of water based ZnO nanofluid. *Alexandria Engineering Journal*, 68, 561-576 .
- Yarmand, H., Gharekhani, S., Ahmadi, G., Shirazi, S. F. S., Baradaran, S., Montazer, E., Zubir, M. N. M., Alehashem, M. S., Kazi, S., & Dahari, M. (2015). Graphene nanoplatelets-silver hybrid nanofluids for enhanced heat transfer. *Energy Conversion and Management*, 100, 419-428 .
- Yu, W., Xie, H., Chen, L., & Li, Y. (2009). Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid. *Thermochimica Acta*, 491(1-2), 92-96 .



Abstract

A colloidal mixture of metal and non-metal particles with size (100 nm) in normal fluid is called nanofluid. Nanofluids are considered as potential heat transfer fluids due to their superior rheological and thermal properties. In the recent period, nanofluids have attracted the attention of researchers. Research on the rheological behavior of nanofluids is very important. This study presents a summary of a number of important research works that have been published on the rheological behavior of nanofluids. This research not only examines the effect of particle shape and cutting speed range on the rheological behavior of nanofluids, but also studies other factors affecting the rheological behavior. These factors include the type of nanoparticles, volume fraction in base fluids, temperature and acidity. From the review of the literature, it has been found that the shape of the particles, its volume fraction, range of cutting speed, surfactant and magnetic field significantly affect the rheological behavior of each nanofluid. It has been observed that nanofluids containing spherical nanoparticles most likely exhibit Newtonian behavior and those containing nanotubes exhibit non-Newtonian flow behavior. In addition, nanofluids exhibit Newtonian behavior at low shear rate values, while at high shear rate values, they behave like a non-Newtonian fluid. According to all the obtained results, the dynamic viscosity of nanofluids increases with increasing volume fraction of nanoparticles and decreases with increasing temperature. Also, the results of various studies showed that nanofluids containing multi-walled carbon nanotubes often have non-Newtonian behavior for low shear rates and Newtonian behavior for high shear rates.

Key words: Dynamic viscosity, rheological behavior, nanofluid, nanoparticles, carbon nanotubes