

بررسی اثر نرخ برش بر ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره/ اکسید روی - روغن موتور در دماها و کسرهای حجمی مختلف

میثم اسدی^۱، سیف الله سعدالدین^{۲*}

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

* سمنان، ۳۷۱۱۱-۳۵۱۳۱، s_sadodin@semnaniau.ac.ir

چکیده

در پژوهش حاضر به بررسی اثر نرخ برش بر ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال ترکیبی نانولوله کربنی چندجداره/ اکسیدروی - روغن موتور پرداخته شده است. نانوسیال مورد مطالعه با استفاده از روش دومرحله‌ای و بدون استفاده از هیچگونه پایدار کننده در کسرهای حجمی مختلف (۰/۵ و ۱ درصد) بعنوان نمونه آزمایشگاهی تولید شد. کلیه آزمایشات در محدوده دمایی بین ۵ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد و در نرخ‌های برش بین ۵۰ تا ۱۰۰۰ دور بر دقیقه انجام شده است. نتایج آزمایشات انجام شده بر روی نانوسیال مورد مطالعه نشان می‌دهد که گرچه سیال پایه در تمامی دماها و نرخ‌های برش مورد مطالعه رفتاری نیوتنی از خود نشان می‌دهد، نانوسیال تولید شده در دماهای ۵ و ۱۵ درجه سانتی‌گراد، رفتاری غیرنیوتنی و در دماهای ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد، رفتار نیوتنی از خود نشان میدهد.

کلیدواژگان

نانوسیال، ویسکوزیته دینامیکی، نرخ برش، نانولوله کربنی چند جداره، اکسید روی، روغن موتور

An Experimental Investigation on the Effects of Shear Rate on Dynamic Viscosity of MWCNT-ZnO/Engine Oil on Different Temperatures and Solid Concentrations

Meisam Asadi¹, Seyfolah Saedodin^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

* P.O.B. 35131-37111 Semnan, Iran, s_sadodin@semnaniau.ac.ir

Abstract

The aim of the present study is to investigate the effects of shear rate on dynamic viscosity of MWCNT-ZnO/engine oil hybrid nanofluid. Using two-step method and without using any surfactant, the studied nanofluid has been produced in different solid concentration (0.125, 0.5, and 1%) as the experimental sample. All the experiments were conducted in the temperatures ranging from 5 to 55°C and shear rates ranging from 50 to 1000 RPM. Based on the experimental results, although the base fluid showed Newtonian behavior in all the studied temperatures and shear rates, in the temperatures of 5 and 15°C, the studied nanofluid shows Non-Newtonian behavior while it shows Newtonian behavior in the temperatures of 25, 35, 45, and 55°C.

Keywords

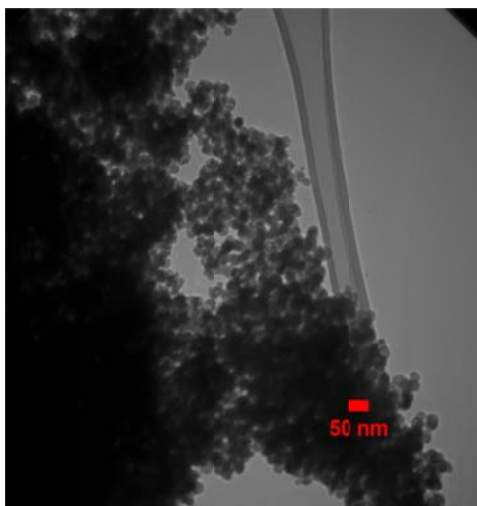
Nanofluid, Dynamic Viscosity, Shear Rate, MWCNT, ZnO, Engine Oil

نانوذرات و تشکیل نانوخوشه‌ها رفتار غیرنیوتنی دارد. در پژوهشی دیگر لی و همکاران [۲] نانوسیال اتیلن گلیکول-اکسید روی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داده که رفتار نانوسیال در تمامی کسرهای حجمی نیوتنی می‌باشد. کوله و دی [۳] در مطالعه‌ای نانوسیال ضدیخ-اکسید آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که رفتار نانوسیال با افزودن نانوذرات در کسرهای حجمی مورد مطالعه نیوتنی می‌باشد. بابو و همکاران [۴] نیز به بررسی نانوسیال آب-نانولوله کربنی تک جداره پرداخته و مشاهده کردند که رفتار سیال پایه در دماهای مختلف نیوتنی می‌باشد، اما با افزودن نانوذرات نانولوله کربنی تک جداره رفتار نانوسیال در دماهای پایین غیرنیوتنی و در دماهای بالا نیوتنی می‌باشد. در یک بررسی آزمایشگاهی دیگر همت و همکاران [۵] به بررسی رفتار نانوسیال هیبریدی آب-نقره/اکسید منیزیم پرداختند و مشاهده کردند که رفتار نانوسیال مورد مطالعه در تمامی کسرهای حجمی و دماها، نیوتنی می‌باشد. در پژوهشی دیگر فواک و همکاران [۶] به بررسی ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال آب-نانولوله کربنی چند جداره

۱- مقدمه

نرخ برش یکی از پارامترهایی است که بر ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات تاثیرگذار می‌باشد. هنگامی که یکی از لایه‌های سیال نسبت به لایه‌ی مجاورش دارای حرکت نسبی باشد، انتقال اندازه‌ی حرکت مولکولی باعث انتقال اندازه حرکت از یک قسمت به قسمت دیگر می‌شود. اما در مقابل این حرکت مقاومتی وجود دارد، به طوری که برای حرکت سیال نیاز به اعمال نیرو یا همان تنش برشی می‌باشد. نانوسیالات در مقابل نیروی برشی رفتارهای متفاوتی دارند. رفتار سیال در برابر نرخ برش اعمال شده، یکی از مهمترین عوامل در تعیین نوع سیال می‌باشد. سیالات با توجه به رفتاری که در مقابل اعمال تنش برشی از خود نشان می‌دهند، به دو دسته‌ی سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی تقسیم بندی می‌شوند. از این رو پژوهش‌های زیادی بر روی ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات انجام شده است.

یو و همکاران [۱] به بررسی ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال اتیلن گلیکول-اکسید روی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که نانوسیال در کسرهای حجمی پایین رفتار نیوتنی و در کسرهای حجمی بالا به دلیل وجود



شکل ۲ تصویر TEM نانوذرات اکسید روی

پس از تولید نانوسیال پایدار نانوسیال مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌های تولید شده به مدت یک هفته به صورت چشمی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بدست آمده پایداری مناسب نمونه‌ها را نشان داد. در شکل‌های ۱ و ۲ تصویر TEM نانوذرات مورد استفاده نشان داده شده است. در شکل ۳ نیز تصویری از نمونه‌های تولید شده در کسرهای حجمی مختلف و سیال پایه نشان داده شده است.



شکل ۳ نمونه‌های تولید شده در کسرهای حجمی مختلف و سیال پایه

۳- اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی

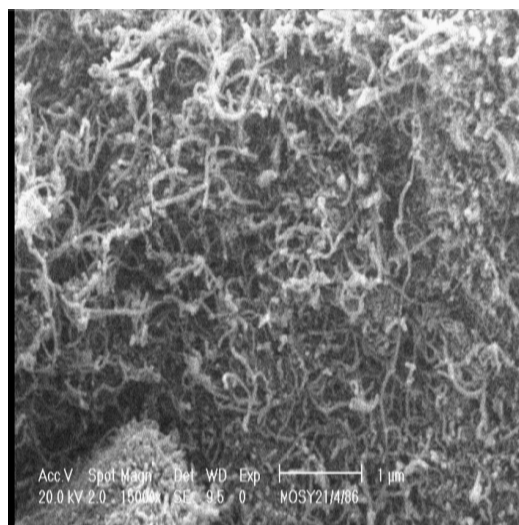
در این پژوهش جهت اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی از ویسکومتر بروکفیلد ساخت کشور آمریکا مدل CAP2000+ استفاده شده است. این ویسکومتر دارای بازه‌ی اندازه‌گیری نرخ برش کم با هندسه‌ی مخروط و صفحه می‌باشد. این دستگاه قادر به تنظیم دمای سیال می‌باشد به طوریکه با تعیین دما پس از مدت زمان کوتاهی دمای سیال به دمای دلخواه رسیده و قادر به اندازه‌گیری ویسکوزیته‌ی سیال در دمای مورد نظر می‌باشیم. محدوده‌ی دمایی کارکرد ویسکومتر بین ۵ تا ۷۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین سرعت چرخش اسپیندل می‌تواند از ۵ تا ۱۰۰۰ دور بر دقیقه متغیر باشد. با تغییر سرعت چرخش اسپیندل نرخ برش سیال تغییر کرده و تغییرات ویسکوزیته‌ی سیال با تغییر نرخ برش قابل اندازه‌گیری است. ویسکوزیته

پرداختند. نتایج آنها حاکی از نیوتنی بودن نانوسیال در کسرهای حجمی پایین و غیرنیوتنی بودن رفتار سیال در کسرهای حجمی بالا می‌باشد. سیگ و همکاران [۷] به بررسی رفتار نانوسیال اتیلن گلیکول- نانولوله کربنی چند جداره پرداختند و مشاهده نمودند که با افزودن نانوذرات به سیال پایه رفتار نانوسیال غیرنیوتنی می‌شود. همت و همکاران [۸] نیز به بررسی رفتار نانوسیال اتیلن گلیکول- هیدروکسید منیزیم پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزوده شدن نانوذرات به سیال پایه رفتار نانوسیال نیوتنی می‌باشد.

پژوهش‌های زیادی [۹-۱۸] بر روی ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات مختلف انجام شده است. اما در این میان، با توجه به بررسی‌های انجام شده پژوهش‌های اندکی بر روی نانوسیالات پایه روغنی انجام شده است. از این رو بررسی ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره/ اکسید روی- روغن موتور، هدف پژوهش حاضر قرار گرفته است.

۲- آماده‌سازی نانوسیال

در این پژوهش نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره/ اکسید روی- روغن موتور با استفاده از روش دو مرحله‌ای در کسرهای حجمی مختلف تولید شده است. اندازه متوسط نانوذرات مورد استفاده ۳۰ نانومتر بوده است. درصد استفاده از نانوذرات اکسید روی ۸۵٪ و نانولوله کربنی چند جداره ۱۵٪ می‌باشد. پس از اینکه نانوذرات در سیال پایه ریخته شدند، به مدت ۱ ساعت توسط همزن مغناطیسی همگن سازی شده سپس به مدت ۲ ساعت توسط همزنایزر آلتراسونیک مراحل همگن سازی ادامه پیدا کرد تا نانوسیال پایدار شود. جهت پایدار سازی نیز از همزنایزر آلتراسونیک ۱۲۰۰ وات ساخت شرکت تاپ سونیک، ایران بهره گرفته شده است.



شکل ۱ تصویر TEM نانوذرات نانولوله کربنی چند جداره

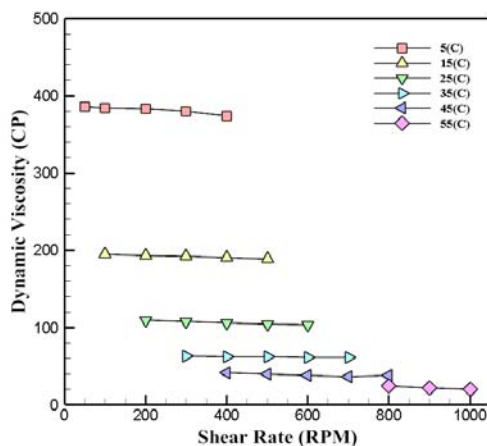
متفاوتی دارند. رفتار سیال در برابر نرخ برش اعمال شده، یکی از مهمترین عوامل در تعیین نوع سیال می‌باشد. سیالات به دو دسته نیوتنی و غیرنیوتنی دسته بندی می‌شوند. این دسته بندی با توجه به تغییر نرخ برش در سیال انجام می‌شود. سیالات نیوتنی دارای ویژگی‌های از قبیل:

- ۱- ویسکوزیته فقط به دما وابسته است و با تغییر نرخ برش ثابت می‌ماند.
 - ۲- نرخ برش با تنش برشی متناسب است.
 - ۳- ویسکوزیته حاصل تقسیم تنش برشی به نرخ برش می‌باشد.
- رابطه ویسکوزیته سیالات به صورت زیر می‌باشد.

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

که در رابطه‌ی بالا μ ویسکوزیته، τ تنش برشی و $\dot{\gamma}$ نرخ برش می‌باشد. با توجه به رابطه مشاهده می‌شود که ویسکوزیته با نرخ برش رابطه‌ی معکوس دارد. نرخ برش تعداد دفعاتی است که لایه‌های سیال در واحد زمان برش داده می‌شود.

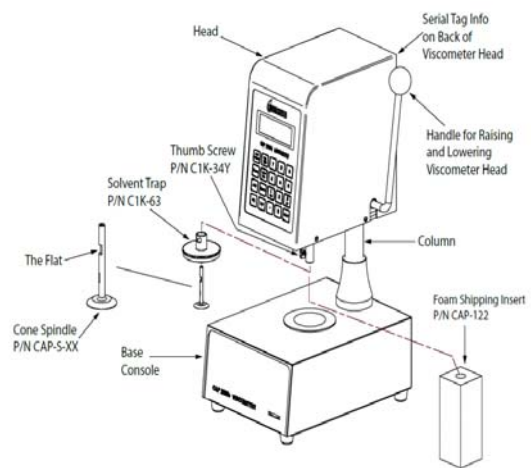
در پژوهش حاضر، ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره/اکسید روی- روغن موتور در نرخ‌های برش مختلف اندازه‌گیری شده تا رفتار نانوسیال مورد بررسی با تغییرات نرخ برش مشخص شود. در شکل ۵ ویسکوزیته دینامیکی سیال پایه (روغن موتور) در دماهای مختلف و نرخ‌های برش مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش نرخ برش در یک دمای معین، ویسکوزیته دینامیکی تغییری نمی‌یابد که این امر حاکی از نیوتنی بودن رفتار سیال پایه می‌باشد.



شکل ۵ ویسکوزیته دینامیکی بر حسب نرخ برش در دماهای مختلف برای سیال پایه

در شکل ۶ نیز نمودار ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال در کسر حجمی ۰/۱۲۵ درصد در دماهای مختلف و نرخ‌های برش مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با افزودن نانوذرات و افزایش نرخ برش، ویسکوزیته دینامیکی در دماهای ۵ و ۱۵ درجه سانتی‌گراد کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. اما در دماهای ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد تقریباً ویسکوزیته ثابت باقی می‌ماند.

اندازه‌گیری شده می‌تواند بر حسب سانتی پوز (CP)، پوز (P)، میلی پاسکال ثانیه (mPa.s) یا پاسکال ثانیه (Pa.s)، به صورت دلخواه نمایش داده شود. نمایی از اجزای ویسکومتر CAP2000 در شکل ۴ نشان داده شده است.



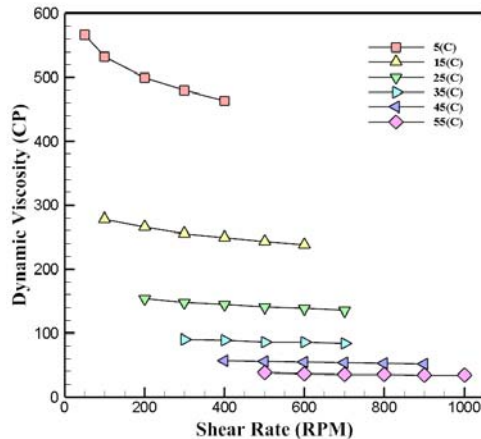
شکل ۴ نمای شماتیک ویسکومتر + CAP2000

نکته‌ی ضروری که در هنگام اندازه‌گیری ویسکوزیته باید رعایت شود این است که مقدار سیال ریخته شده روی صفحه‌ی زیر اسپیندل باید به اندازه‌ی کافی باشد. زیاد یا کم بودن مقدار سیال در اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی تاثیرگذار خواهد بود. قابل توجه است که در پژوهش حاضر نکته فوق به دقت رعایت شده تا مقادیر ویسکوزیته اندازه‌گیری شده توسط دستگاه دارای کمترین میزان خطا باشند. مسئله‌ی حائز اهمیت دیگر این است که تغییرات ویسکوزیته دینامیکی با دما تا زمانی قابل اندازه‌گیری می‌باشد که مقدار گشتاور زاویه‌ای ویسکومتر برای نانوسیال مورد مطالعه بین ۱۰٪ تا ۱۰۰٪ درصد باشد. با افزایش دما ویسکوزیته نانوسیال کاهش یافته و متناسب با آن گشتاور زاویه‌ای ویسکومتر کاهش می‌یابد. اگر گشتاور زاویه‌ای کمتر از ۱۰٪ درصد شود، ویسکومتر قادر به اندازه‌گیری ویسکوزیته نانوسیال نمی‌باشد و ویسکوزیته نشان داده شده مقادیر صحیحی را نشان نمی‌دهد. آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری ویسکوزیته دینامیکی حداقل سه مرتبه انجام شده است و در صورتی که بازه داده‌های اندازه‌گیری شده نزدیک به یکدیگر بوده باشند، عدد نهایی به صورت میانگین آن‌ها گزارش شده است. در صورتی که خطاهای مختلف اندازه‌گیری و محیطی سبب ایجاد اختلاف در یکی از این داده‌ها نسبت به سایرین شده باشد، پس از رفع خطا، آزمایش مربوطه پنج مرتبه دیگر تکرار شده و عدد نهایی با توجه به میانگین آن گزارش شده است.

۴- نتایج و بحث

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، نرخ برش یکی از پارامترهایی است که بر ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات تاثیرگذار می‌باشد. هنگامی که یکی از لایه‌های سیال نسبت به لایه‌ی مجاورش دارای حرکت نسبی باشد، انتقال اندازه حرکت مولکولی باعث انتقال اندازه حرکت از یک قسمت به قسمت دیگر می‌شود. اما در مقابل این حرکت مقاومتی وجود دارد، به طوری که برای حرکت سیال نیاز به اعمال نیرو یا همان تنش برشی می‌باشد. سیالات دارای ویسکوزیته بالا نیاز به نیروی برشی بیشتری نسبت به سیالات دارای ویسکوزیته پایین می‌باشند. نانوسیالات در مقابل نیروی برشی رفتارهای

سانتی‌گراد، به دلیل کاهش ویسکوزیته دینامیکی با افزایش نرخ برش غیرنیوتنی بوده و در دماهای ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد رفتار این نانوسیال نیوتنی می‌باشد. کاهش ویسکوزیته با افزایش نرخ برش به دلیل کاهش نانوخوشه‌ها می‌باشد. به عبارتی با اعمال نیروی برشی نانوخوشه‌های ایجاد شده در سیال برش داده شده و از بین می‌روند. تعداد نانوخوشه‌های شکسته شده با میزان نیروی برشی اعمال شده به سیال متناسب بوده و هرچه تعداد نانوخوشه‌های شکسته شده بیشتر باشد، ویسکوزیته کاهش بیشتری خواهد داشت.



شکل ۸ ویسکوزیته دینامیکی بر حسب نرخ برش در دماهای مختلف برای کسر حجمی ۱ درصد

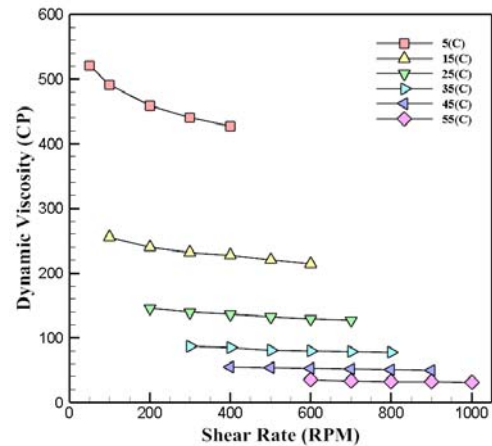
۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر نرخ برش بر ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره/اکسیدروی- روغن موتور پرداخته شده است. نتایج حاکی از آن است که:

- ۱- رفتار سیال پایه در دماهای مختلف نیوتنی می‌باشد.
- ۲- رفتار نانوسیال مورد مطالعه در تمامی کسرهای حجمی و دماهای ۵ و ۱۵ درجه سانتی‌گراد غیر نیوتنی می‌باشد.
- ۳- رفتار نانوسیال مورد مطالعه در تمامی کسرهای حجمی و دماهای ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد غیر نیوتنی می‌باشد.

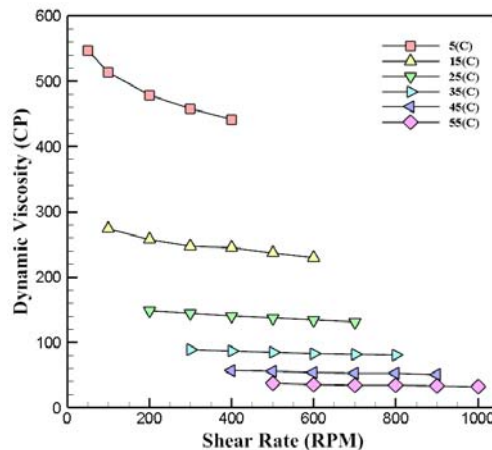
۶- مراجع

- [۱] W. Yu, H. Xie, L. Chen, Y. Li, Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid, *Thermochimica Acta*, Vol. 491, No. 1, pp. 92-96, 2009.
- [۲] H. Li, L. Wang, Y. He, Y. Hu, J. Zhu, B. Jiang, Experimental investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 88, pp. 363-368, 2015.
- [۳] M. Kole, T. Dey, Viscosity of alumina nanoparticles dispersed in car engine coolant, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34, No. 6, pp. 677-683, 2010.
- [۴] S. Bobbo, L. Fedele, A. Benetti, L. Colla, M. Fabrizio, C. Pagura, S. Barison, Viscosity of water based SWCNH and TiO₂ nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 36, pp. 65-71, 2012.
- [۵] M. H. Esfe, A. A. Arani, M. Rezaie, W.-M. Yan, A. Karimpour, Experimental determination of thermal conductivity and dynamic viscosity of Ag-MgO/water hybrid nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 66, pp. 189-195, 2010.



شکل ۶ ویسکوزیته دینامیکی بر حسب نرخ برش در دماهای مختلف برای کسر حجمی ۰/۱۲۵ درصد

در شکل ۷ ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال مورد بررسی در کسر حجمی ۰/۵ درصد و در دماها و نرخ‌های برش مختلف نشان داده شده است. با اندکی دقت در شکل، مشاهده می‌شود که روند نمودار مانند نمودار شکل ۶ می‌باشد با این تفاوت که، شیب کاهش ویسکوزیته دینامیکی در دماهای ۵ و ۱۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر شده است. به عبارتی دیگر با افزایش کسر حجمی نانوذرات، افزایش نرخ برش تاثیر بیشتری بر ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال مورد مطالعه خواهد گذاشت.



شکل ۷ ویسکوزیته دینامیکی بر حسب نرخ برش در دماهای مختلف برای کسر حجمی ۰/۵ درصد

در شکل ۸ ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال مورد مطالعه در کسر حجمی ۱ درصد و در دماها و نرخ‌های برش مختلف نشان داده شده است. در مقایسه با شکل ۷ روند نمودارها مشابه بوده و تفاوتی که وجود دارد این است که به نسبت شکل ۷، شیب کاهش ویسکوزیته دینامیکی در دماهای ۵ و ۱۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر شده است. با توجه به نمودارهای نشان داده شده می‌توان نتیجه گرفته که رفتار نانوسیال نانولوله کربنی چند جداره/اکسیدروی- روغن موتور در تمامی کسرهای حجمی مورد بررسی و در دماهای ۵ و ۱۵ درجه

- [۶] T. X. Phuoc, M. Massoudi, R.-H. Chen, Viscosity and thermal conductivity of nanofluids containing multi-walled carbon nanotubes stabilized by chitosan, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 1, pp. 12-18, 2011 .
- [۷] N. Singh, G .Chand, S. Kanagaraj, Investigation of thermal conductivity and viscosity of carbon nanotubes–ethylene glycol nanofluids, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 33, No. 9, pp. 821-827, 2012 .
- [۸] M. H. Esfe, S. Saedodin, A. Asadi, A. Karimipour, Thermal conductivity and viscosity of Mg (OH) 2-ethylene glycol nanofluids, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 120, No. 2, pp. 1145-1149, 2015 .
- [۹] N. Ahammed, L. G. Asirvatham, S. Wongwises, Effect of volume concentration and temperature on viscosity and surface tension of graphene–water nanofluid for heat transfer applications, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 123, No. 2, pp. 1399-1409, 2016 .
- [۱۰] A. Beheshti, M. Shanbedi, S. Z. Heris, Heat transfer and rheological properties of transformer oil-oxidized MWCNT nanofluid, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 118, No. 3, pp. 1451-1460, 2014 .
- [۱۱] H. Chen, Y. Ding, Y. He, C. Tan, Rheological behaviour of ethylene glycol based titania nanofluids, *Chemical Physics Letters*, Vol. 444, No. 4, pp. 333-337, 2007 .
- [۱۲] H. Chen, Y. Ding, C. Tan, Rheological behaviour of nanofluids, *New journal of physics*, Vol. 9, No. 10, pp. 367, 2007 .
- [۱۳] N. Dutt, T. Ghosh, D. Prasad, K. Rani, D. Viswanath, Viscosity of Liquids Theory, Estimation ,Experiment, and Data ,“*Springer*, Vol. 33, pp. 444-553, 2007 .
- [۱۴] M. H. Esfe, S. Saedodin, Turbulent forced convection heat transfer and thermophysical properties of Mgo–water nanofluid with consideration of different nanoparticles diameter, an empirical study, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 119, No. 2, pp. 1205-1213, 2015 .
- [۱۵] M. H. Esfe, S. Saedodin, N. Sina, M. Afrand, S. Rostami, Designing an artificial neural network to predict thermal conductivity and dynamic viscosity of ferromagnetic nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 68, pp. 50-57, 2015 .
- [۱۶] M. H. Esfe, S. Saedodin, S. Wongwises, D. Toghraie, An experimental study on the effect of diameter on thermal conductivity and dynamic viscosity of Fe/water nanofluids, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 119, No. 3, pp. 1817-1824, 2015 .
- [۱۷] I. M. Krieger, T. J. Dougherty, A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres, *Transactions of The Society of Rheology*, Vol. 3, No. 1, pp. 137-152, 1959 .
- [۱۸] S. Murshed, K. Leong, C. Yang, Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47, No. 5, pp. 560-568, 2008 .