



Study of the effect of nanoparticles on thermophysical properties and rheological behavior of cooling fluid in combustion engines

Amir Hossein Adeli, Omid Nabiei, Mohammad Azadi^{*}, Mojtaba Biglari

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Cooling Nanofluid
Heat Transfer Coefficient
Viscosity
Shear Stress
Non-Newtonian Fluid
Titanium Dioxide
Nanoparticles
Silicon Dioxide Nanoparticles

ABSTRACT

The cooling system is one of the most important components that affects the performance of an engine. This system increases the heat transfer and fuel economy, leading to improved the engine performance. Most internal combustion engines have a coolant fluid that can be air or a liquid coolant that flows through a heat exchanger (radiator) and is cooled by air. The rheological and thermophysical properties of the nanofluid are of great importance for calculating the performance of pumping in this system. The heat transfer inside the radiator can be increased by increasing the heat transfer surface area and increasing the heat transfer coefficient. The heat transfer coefficient can be increased by appropriate heat transfer methods or by improving the thermophysical properties of the heat transfer medium such as coolant fluids. In this study, two samples of the thermophysical properties of the base fluid, which is a solution of distilled water and ethylene glycol with equal presence percentages, were investigated after adding titanium dioxide and silicon dioxide nanoparticles, at the temperatures of 30°C and 60°C. The viscosity, shear stress, and thermal conductivity coefficient of the prepared nanofluid were measured at two volume concentrations of 1% and 2% and then, validated using various theoretical models. The results indicated an improvement in heat transfer by 8% and 17% for the temperatures of 30°C and 60°C, respectively. The rheological behavior of the prepared nanofluid at two volume concentrations of 1% and 2% was also examined and validated using different theoretical models. Additionally, the results showed a decrease in the shear stress with increasing the temperature and an increase in the shear stress with increasing the volume concentration of nanoparticles.



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: m_azadi@semnan.ac.ir (M. Azadi)

Received 20 January 2024; Accepted 4 May 2024

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Adeli AH, Nabiei O, Azadi M, Biglari M. Study of the effect of nanoparticles on thermophysical properties and rheological behavior of cooling fluid in combustion engines. The Journal of Engine Research. 2023 Nov 22;70(3):1-17. doi: [10.22034/ER.2024.2019916.1023](https://doi.org/10.22034/ER.2024.2019916.1023)

مطالعه اثر نانوذرات بر خواص ترموفیزیکی و رفتار رئولوژیکی سیال خنک‌کاری در موتورهای احتراقی

امیر حسین عادل، امید نبی‌ئی، محمد آزادی*، مجتبی بیگلری

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

سیستم خنک‌کننده یکی از مهم‌ترین مجموعه‌های تأثیرگذار بر کارکرد موتور می‌باشد. این سیستم انتقال حرارت و اقتصاد سوخت را افزایش می‌دهد که منجر به بهبود عملکرد موتور می‌شود. اغلب موتورهای احتراق داخلی سیال خنک‌کننده دارند که می‌تواند هوا یا خنک‌کننده مایع باشد که در مبدل حرارتی (رادیاتور) جریان داشته و به وسیله هوا خنک می‌شود. برای گردش سیال در این سیستم خواص رئولوژیکی و ترموفیزیکی نانوسیال برای محاسبات پمپاژ عملکرد اهمیت بسیار بالایی دارد. انتقال حرارت درون رادیاتور می‌تواند از راه افزایش سطح انتقال حرارت و افزایش ضریب انتقال حرارت افزایش یابد. ضریب انتقال حرارت می‌تواند با استفاده از روش‌های انتقال حرارت مناسب‌تر و یا از راه بهبود خواص ترموفیزیکی ماده انتقال حرارت مانند سیالات خنک‌ساز افزایش یابد. در این مطالعه، خواص ترموفیزیکی سیال پایه که محلولی از آب مقطر و اتیلن گلیکل با درصد حضور برابر است، پس از افزودن نانوذرات دی‌اکسید تیتانیم و دی‌اکسید سیلیسیم در دو دمای ۳۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد بررسی گردیده است. لزجت، تنش برشی و ضریب انتقال حرارت هدایت نانوسیال تهیه شده در دو غلظت حجمی ۱ و ۲ درصد اندازه‌گیری و با مدل‌های تئوری متفاوت صحت‌سنجی شده‌اند. نتایج، نشان دهنده بهبود انتقال حرارت به میزان ۸ و ۱۷ درصد به ترتیب برای دماهای ۳۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد است. رفتار رئولوژیکی نانوسیال تهیه شده در دو غلظت حجمی ۱ و ۲ درصد بررسی و با مدل‌های تئوری متفاوت صحت‌سنجی شده‌اند. همچنین، نتایج نشان‌دهنده کاهش مقدار تنش برشی با افزایش دما و افزایش آن با افزایش غلظت حجمی نانوذرات می‌باشد.

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

نانوسیال خنک‌کاری
ضریب انتقال حرارت
جابجایی
لزجت
تنش برشی
سیال غیر نیوتونی
نانو دی‌اکسید تیتانیم
نانو دی‌اکسید سیلیسیم



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: m_azadi@semnan.ac.ir (محمد آزادی)

دریافت ۳۰ دی ۱۴۰۲؛ پذیرش ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۳
شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: Adeli AH, Nabiei O, Azadi M, Biglari M. Study of the effect of nanoparticles on thermophysical properties and rheological behavior of cooling fluid in combustion engines. The Journal of Engine Research. 2023 Nov 22;70(3):1-17. doi: 10.22034/ER.2024.2019916.1023

۱- مقدمه

۱-۱- نانو سیالات

نانوذرات ذراتی هستند که ابعاد آن در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر باشد. نانوذرات علاوه بر نوع فلزی، عایق‌ها و نیمه هادی‌ها، نانوذرات ترکیبی نظیر ساختارهای هسته لایه را نیز در بر می‌گیرند. این ذرات در شکل‌ها و سطوح گوناگونی مانند کروی، ورقه‌ای، شاخه‌ای، لوله‌ای و میله‌ای یافت می‌شوند. نانوسیال‌ها با دو روش به نام‌های روش دو مرحله‌ای^۱ و روش تک مرحله‌ای^۲ تهیه می‌شوند. در روش دومرحله‌ای ابتدا نانوذره یا نانولوله معمولاً به وسیله روش رسوب‌دهی شیمیایی از حالت بخار^۳ در فضای گاز بی‌اثر به صورت گردهای خشک تهیه می‌شود، در مرحله بعد نانوذره یا نانولوله در داخل سیال پراکنده می‌شود. برای این کار از روش‌هایی مانند لرزاننده‌های فراصوت و سورفکتانت‌ها^۴ استفاده می‌شود تا توده‌های نانوذره‌ای به حداقل رسیده و باعث بهبود رفتار پراکندگی شود. نکته اساسی در این روش تجمع نانوذرات بر اثر چسبندگی آن‌ها به همدیگر است که از معایب این روش به شمار می‌آید. در روش یک مرحله‌ای، منبع فلزی تحت شرایط خلأ تبخیر می‌شود. در این روش، تراکم توده نانوذرات به حداقل مقدار خود می‌رسد، اما فشار بخار ضعیف سیال یکی از معایب این فرایند محسوب می‌شود. با این حال روش‌های شیمیایی تک مرحله‌ای مختلفی برای تهیه نانوسیال به وجود آمده است که از آن جمله می‌توان به روش احیای نمک فلزات و تهیه محلول آن در حلال‌های مختلف برای تهیه نانوسیال فلزات اشاره کرد [۱].

در سال‌های اخیر پیشرفت‌های بسیار بزرگی در زمینه امکان ساخت نانوذرات از مواد گوناگون و مهار شدید بر روی اندازه، ترکیب و یکنواختی آن‌ها صورت گرفته است. به علت اشکالات موجود در استفاده از سیالات سنتی و حتی ریزسیال‌ها^۵، از جمله رسوب یا ته‌نشینی ذرات، ساییدگی، مسدود کردن لوله‌ها و افزایش افت فشار در مجرای سیالات، محققان به نانوسیال که نسل جدیدی از سیالات با ظرفیت بسیار زیاد در کاربردهای صنعتی است روی آوردند. بر اساس پیشینه تحقیق، گفته می‌شود که به طور کلی، لزجت نانوسیالات بیشتر از لزجت سیالات پایه است. این خاصیت سیال (لزجت) نیز مانند سایر خواص از جمله ضریب هدایتی، به درصد حجمی نانوذرات، با یک وابستگی مستقیم، وابسته است [۱]. علاوه بر مورد گفته شده، نانوسیالات رفتارها و ویژگی‌های روانه‌شناسی متفاوتی نسبت به موارد مشابه در سیال پایه دارند که می‌تواند در سامانه‌های تلمبه، مؤثر واقع شوند. نانوسیال عموماً دارای هدایت گرمایی بالایی هستند و به همین علت نرخ انتقال حرارت در آن‌ها بسیار زیاد است. نانوسیال بوسیله پخش و منتشر کردن ذرات در اندازه‌های نانومتری در سیالات متداول منتقل‌کننده گرما، به منظور افزایش هدایت گرمایی و بهبود عملکرد انتقال حرارت ساخته می‌شود.

۱-۲- پایداری نانوسیال

بر اساس مطالعات انجام شده، سه روش کلی برای افزایش پایداری نانوسیال وجود دارد. اولین مورد افزودن مواد فعال سطحی یا سورفکتانت‌ها هستند. این مواد، حاوی یک سر قطبی آب‌دوست و یک سر آب‌گریز (معمولاً یک زنجیره هیدروکربنی) هستند. این روش روشی ساده و مقرون به صرفه برای افزایش پایداری نانوسیال است. روش بعدی مهار pH نانوسیال است. پایداری یک نانوسیال ارتباط مستقیمی با خواص الکتروکینتیکی آن دارد. بنابراین می‌توان با تنظیم pH نانوسیال، به پایداری مطلوب رسید [۲]. روش آخر ارتعاش فراصوت است. به منظور افزایش پایداری نانوسیال می‌توان از لرزاننده‌های فراصوت استفاده کرد. دو روش قبلی ذکر شده با اصلاح سطح نانوذرات به بهبود پایداری نانوسیال

¹ Two-Step Process

² Single-Step Process

³ Chemical Vapor Deposition

⁴ Surfactant

⁵ Microfluids

کمک می‌کنند اما در این روش، امواج فراصوت سبب از بین رفتن پیوندهای سطحی ضعیف میان نانوذرات شده و در نتیجه باعث شکسته شدن توده‌ها شده و پایداری نانوسیال را افزایش می‌دهند [۲].

۳-۱- خواص نانوسیال

چهار خاصیت ترموفیزیکی سیال وجود دارد که با افزودن نانوذرات به سیال پایه، مقدارشان تغییر می‌کند. این خواص عبارتند از: چگالی، لزجت، ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه. به‌طور کلی افزودن نانوذرات باعث افزایش این خواص بجز گرمای ویژه و لزجت می‌شود. درصد این افزایش به عوامل مختلفی از جمله درصد حجمی نانوذرات، خواص نانوذرات، خواص سیال پایه و دما بستگی دارد. همچنین به علت اینکه این خواص به غلظت نانوذرات در سیال پایه بستگی دارند، با تغییر غلظت نانوذرات، خواص نانوسیال قابل تنظیم است. ضریب هدایت حرارتی (k) یکی از مهم‌ترین عواملی است که برای مطالعه انتقال حرارت بررسی می‌شود. مروری بر تحقیقات موجود نشان می‌دهد که افزودن درصد کمی از نانوذرات باعث افزایش چشم‌گیر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه می‌شود. همچنین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به متغیرهایی از جمله: ترکیب درصد شیمیایی نانوذرات و نانوسیال، درصد حجمی نانوذرات، شکل و اندازه ذرات، مواد فعال سطحی، دما و ... بستگی دارد [۳-۶].

پژوهشگران به این نتیجه رسیده‌اند که عملکرد نانوسیال‌ها در انتقال حرارت عموماً بیشتر از پیش‌بینی نظری است و دلیل این مشاهدات به این نکته برمی‌گردد که در این الگوها اثرات اندازه ذرات و نیروهای بین مولکولی اعمال نمی‌شود. در طول سال‌های گذشته محققان چندین روش آزمایشگاهی را برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی پیشنهاد کرده‌اند. رایجترین روش‌ها برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی عبارت از: روش سیم داغ گذرا^۱، روش سطوح موازی پایا^۲، روش استوانه‌ای^۳ هستند [۷].

ویژگی مهم دوم لزجت دینامیکی (μ) است که در مقایسه با ضریب هدایت حرارتی، تحقیقات کمتری در مورد لزجت نانوسیال صورت گرفته است. پژوهش‌های مختلف نشان دادند که لزجت نانوسیال بیشتر از سیالات پایه است. لزجت نیز مانند ضریب هدایتی به درصد حجمی نانوذرات بستگی دارد و با درصد حجمی رابطه مستقیم دارد [۷].

۴-۱- پیشینه پژوهش‌های انجام شده

تعدادی از پژوهش‌های پیشین که تحقیقاتی بر مواد و شرایط مشابه انجام داده‌اند، بعنوان نمونه معرفی شده‌اند و نتایج تکمیلی از بررسی خواص فیزیکی سیالات پس از افزودن نانوذرات مورد بحث قرار گرفته است.

سندیا^۴ و همکاران [۸]، به بررسی عملکرد محلول ۴۰ درصد اتیلن گلیکول و ۶۰ درصد آب بر پایه TiO_2 به عنوان یک خنک کننده در رادیاتور ماشین پرداخته‌اند. ضریب انتقال حرارت جابه جایی اجباری برای نانوسیال TiO_2 با غلظت های ۰٫۵-۱٫۰ درصد اندازه‌گیری شده و با داده های سیال اصلی در رادیاتور ماشین مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت تابعی از غلظت حجمی، دما و نرخ جریان است و استفاده از این غلظت ذرات نرخ انتقال حرارت را تا ۳۷ درصد نسبت به سیال پایه افزایش داده‌اند. بهیمانی^۵ و همکاران [۹]، به بررسی تغییرات خواص فیزیکی سیال پایه آب پس از افزودن نانوذرات TiO_2 با قطر ۱۵ نانومتر به آن و حفظ شرایط کاری، در دمای ۸۰ درجه، شار ۹۰-۱۲۰ لیتر بر دقیقه و غلظت حجمی ۰٫۱-۱٫۰ پرداخته‌اند، که نتیجه حاصل شده از این پژوهش، بهبود ۴۵-۴۰ درصد، در انتقال حرارت را در غلظت ۱ درصد نسبت به آب خالص نشان می‌دهد. این نتایج

¹ THW (Transient Hot- Wire Technique)

² Steady-State Parallel-Plate Method

³ Cylindrical Cell Method

⁴ Sandhya

⁵ Bhimani

نیز بیانگر وابستگی خواص فیزیکی نانوسیال به تغییرات دما، غلظت و شار است که در مقایسه با آب خالص غیر قابل چشم‌پوشی است.

در مقاله کیهانی^۱ و همکاران [۱۰]، به بررسی تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی و افت فشار در نانوسیال TiO_2 -water پرداخته شده است. در این پژوهش از نانوذرات اکسید تیتانیم با قطر بیشینه ۱۵ نانومتر و محدوده غلظت حجمی ۰٫۱-۲ درصد استفاده شده است. بهترین نتیجه حاصل شده برابر ۸ درصد بهبود در عدد ناسلت است که در غلظت حجمی ۲ درصد و عدد رینولدز ۱۱۸۰۰ بدست آمده است.

در مقاله نبیل^۲ و همکاران [۱۱]، به بررسی ضریب انتقال حرارت هدایت و لزجت دینامیکی نانوسیال ترکیبی متشکل از ۶۰ درصد آب و ۴۰ درصد اتیلن گلیکل به عنوان سیال پایه و نانوذرات SiO_2 و TiO_2 پرداخته شده است. در این پژوهش غلظت حجمی نانوسیال در محدوده ۰٫۵-۳ درصد و دما نیز محدوده ۳۰-۸۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل شده از این پژوهش بیانگر افزایش ضریب انتقال حرارت هدایت با افزایش غلظت حجمی و دما و کاهش لزجت دینامیکی با افزایش دما و افزایش آن با افزایش غلظت حجمی است. بیشترین تغییر در ضریب انتقال حرارت هدایتی در دما ۸۰ درجه سانتیگراد و غلظت حجمی ۳ درصد حاصل گردیده است که مقدار آن، ۲۲٫۸ درصد است. با توجه به مطالعات انجام گرفته در زمینه خنک‌کاری موتور، از بهبود چشم‌گیر انتقال حرارت وقتی که از نانوذرات استفاده می‌شود نمی‌توان چشم‌پوشی کرد. این مقدار بهبود با توجه به شرایط آزمایش مقالات مختلف، مقداری متفاوت دارد. هر آزمایش دارای شرایطی مهار شده مانند عدد رینولدز، دمای ورودی به مبدل حرارتی، غلظت حجمی نانوذرات و قطر آن‌ها است. نتایج تمام پژوهش‌های نام برده و سایر پژوهش‌های مشابه [۱۲، ۱۳]، [۱۴-۱۹] و [۲۱-۲۴] نشانگر این است که نرخ انتقال حرارت وابستگی شدیدی به غلظت و نوع نانوذرات دارد.

با بررسی مطالعات صورت گرفته در موضوع خنک‌کاری موتور با استفاده از نانوذرات، محدوده بهبود انتقال حرارت با استفاده از نانوذراتی با غلظت ۰٫۲-۵٪ مانند: SiO_2 ، Al_2O_3 ، Fe_2O_3 و TiO_2 ، ۲۰-۵۵ درصد بوده است. با توجه به نتایج مطالعات پیشین، نانوسیال این پژوهش متشکل از اتیلن گلیکل و آب به مقدار حضور بترتیب ۵۰ و ۵۰ و از SiO_2 و TiO_2 به عنوان نانوذرات استفاده گردد.

افرند^۳ و همکاران [۲۵]، تأثیرات دما و غلظت نانوذرات بر رفتار روانه‌شناسی نانوسیال ترکیبی متشکل از Fe_3O_4 -Ag/EG بررسی شده است. ترکیب پایدار و همگن نانوسیال مذکور در غلظت‌های ۰٫۳۷۵، ۰٫۰۷۵، ۰٫۱۵، ۰٫۳، ۰٫۶ و ۱٫۲ درصد آماده گردیده است. لزجت دینامیکی نانوسیال در این پژوهش، به ترتیب در محدوده نرخ برش و دما ۱۲٫۲۳-۱۲۲٫۳ و ۲۵-۵۰ سانتیگراد اندازه‌گیری شده است. نتایج بیانگر رفتار نیوتنی نانوسیال‌های با غلظت کمتر از ۰٫۳ درصد و رفتار غیرنیوتنی در ۰٫۶ و ۱٫۲ درصد می‌باشد. در نهایت در این پژوهش با استفاده از نمودار تنش برشی برحسب نرخ برش، ضرایب رابطه قانون توانی بدست می‌آید که نتایج گویای محدود بودن تمام شاخص‌های رفتار جریان در بازه ۰٫۶۷۰۶-۰٫۵۳۹ می‌باشد که نشانه رفتار سدو پلاستیک^۴ یا به اصطلاح نازک-برش^۵ در تمام دماها است. بررسی‌ها نشان می‌دهد، با افزایش غلظت حجمی شاخص جریان سیال کاهش و شاخص استحکام سیال افزایش می‌یابد. همچنین شاخص استحکام سیال با افزایش دما کاهش می‌یابد.

اشگرف^۶ و آفرند [۲۶]، تحقیقاتی بر روی رفتار روانه‌شناسی نانوکولنت‌های ترکیبی متشکل از SiO_2/EG و کاربرد آن‌ها در گرمایش و سرمایش سامانه‌ها انجام شده است که در محدوده دمایی ۲۷٫۵-۵۰ سانتیگراد و

¹ Kayhani

² Nabil

³ Afrand

⁴ Pseudoplastic

⁵ Shear Thinning

⁶ Eshgarf

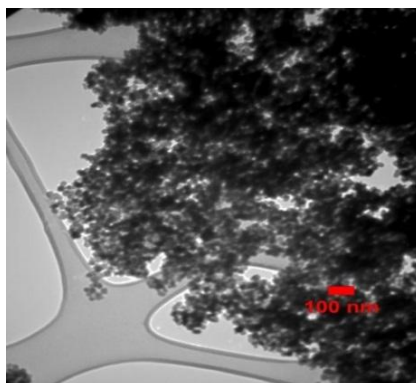
محدوده غلظت ۰,۰۶۲۵ تا ۲ درصد مورد آزمایش قرار گرفته است. همچنین نسبت ذرات هر دو نانوذره برابر بوده و آب و اتیلن گلیکل نیز با درصد حضور برابر وجود دارند. لزجت دینامیکی در نرخ برش های ۰,۶۱۲-۱۲۲۳ اندازه گیری گردیده است. نتایج نشان می دهد که سیال پایه رفتار روانه شناسی نیوتنی و نانوکولنتها رفتار غیرنیوتنی (شبه پلاستیک) با شاخص جریان سیال کمتر از یک دارند. به علاوه نتایج بیانگر افزایش لزجت ظاهری با افزایش غلظت حجمی و کاهش آن با افزایش دما می باشد. لزجت ظاهری در این پژوهش با افزایش نرخ برش کاهش چشم گیری دارد، و شاخص جریان سیال با افزایش غلظت حجمی و دما، کاهش می یابد. علاوه بر این شاخص استحکام سیال و به تبع آن لزجت ظاهری با افزایش غلظت حجمی افزایش، و با افزایش دما کاهش می یابد. از مقادیر بدست آمده می توان دریافت که مقدار شاخص استحکام سیال، با افزایش غلظت حجمی افزایش، و با افزایش دما کاهش می یابد. از طرف دیگر شاخص رفتار سیال، کمتر از یک بوده است که بیانگر رفتار سدوپلاستیک می باشد. با توجه به نتایج آزمایش های انجام شده، مشاهده می گردد که لزجت نانوسیال با افزایش دما کاهش و در مقابل با افزایش غلظت افزایش می یابد.

ایزدی و همکاران [۲۷]، عدنان^۱ و همکاران [۲۸]، پیغمبرزاده و همکاران [۱۲] و اوامر^۲ و همکاران [۲۹] نیز با بررسی تأثیر حضور نانوذرات در سیال پایه آب و اتیلن گلیکل به این نتیجه رسیده اند که پس از افزایش دما، لزجت افت شدیدی خواهد داشت. در مقابل، این اتفاق نظر وجود دارد که با افزایش غلظت حجمی نانوسیالات، لزجت دینامیکی افزایش خواهد داشت، البته لازم به ذکر است که کاهش لزجت پس از افزایش دما، چشم گیرتر از افزایش آن پس از افزایش غلظت حجمی است.

۲- مواد، تجهیزات، روش تحقیق و معادلات حاکم

۲-۱- مشخصات کلی مواد و تجهیزات مورد استفاده

سیال پایه متشکل از آب مقطر (H_2O) و اتیلن گلیکل ($C_2H_6O_2$) با درصد حضور برابر می باشند. نانوذرات انتخابی اکسید تیتانیوم (TiO_2) و اکسید سیلیسیوم (SiO_2) بترتیب با قطرهای ۱۰-۲۵ و ۱۲ نانومتر، چگالی آن ها ۲,۶۵ و ۱,۱۱ گرم بر سانتی متر مکعب و خلوص هر دو نانوذره انتخابی ۹۹,۹۹ درصد بوده است. تصویربرداری ذره بین برقی عبوری^۳ از نانوذرات نام برده در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده است. حجم نمونه ساخته شده برای هر آزمایش ۱۵۰ سی سی بوده که برابر با مجموع وزن سیالات پایه و نانوذرات استفاده شده در هر آزمون است. در این تحقیق همچنین برای پایداری بیشتر محلول آب و اتیلن گلیکل و گرد TiO_2 از سورفکتانت Arabic Gum استفاده گردیده است، که معیار آن بر اساس تجربیات قبلی و نتایج حاصل شده در پژوهش های پیشین است.

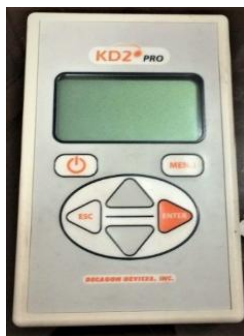


شکل ۱ تصویر TEM از نانوذرات SiO_2 [۳۰، ۳۱]

¹ Adnan

² Omer

³ Transmission Electron Microscopy (TEM)



شکل ۴ دستگاه اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی KD2

۲-۱-۳- دستگاه لزجت سنج

برای اندازه‌گیری لزجت نیز از لزجت‌سنج استوانه‌ای بروکفیلد^۱ که به یک حمام دما تجهیز شده بود استفاده گردیده است. چرخشگر به کار رفته در این آزمایش ULA است که دارای ضریب نرخ برشی ۱,۲۲۳ و ضریب ثابت ۰,۶۴ است. اندازه‌گیری‌ها برای نرخ برش‌های مختلف صورت گرفته است. دقت و تکرار پذیری این لزجت‌سنج بترتیب ۱ و ۰,۲ درصد کل گستره اندازه‌گیری^۲ است. به منظور ارزیابی رفتار روانه‌شناسی (نیوتنی یا غیرنیوتنی) نانوسیال، همه آزمایش‌ها برای هر نمونه در هر دما با دوره‌های مختلف (نرخ برش‌های مختلف) تکرار شد.

۲-۲- روش آزمون، معادلات حاکم و تهیه نانوسیال

ظرفی با ظرفیت حداقل ۳۰۰ سی سی در نظر گرفته و بعد از آن آب و اتیلن گلیکل به نحوی که مجموع وزن آن‌ها ۱۵۰ سی سی شود، به نسبت برابر داخل ظرف ریخته می‌شود. البته باید وزن نانوذرات حاضر در سیال پایه را نیز در محاسبات به حساب آورد. مقدار حضور نانوذرات با توجه به غلظت‌های مدنظر با استفاده از معادله^۱ محاسبه می‌شود.

$$\varphi = \left[\frac{\left(\frac{W}{\rho}\right)_{SiO_2} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{TiO_2}}{\left(\frac{W}{\rho}\right)_{SiO_2} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{Water} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{EG} + \left(\frac{W}{\rho}\right)_{TiO_2}} \right] \times 100 \quad (1)$$

که φ مقدار غلظت حجمی، ρ چگالی برحسب کیلوگرم بر مترمکعب و W جرم برحسب کیلوگرم است. ظرف حاوی سیال پایه و نانوذرات را داخل دستگاه فراصوت گذاشته و محلول به مدت ۴۰ دقیقه تحت توان ۳۰۰ وات قرار داده می‌شود تا محلول کاملاً همگن و عاری از هرگونه توده یا کلوخه باشد. جدول ۱، بیانگر آزمون‌های انجام شده و شرایط کاری متفاوت برای آن‌ها است.

جدول ۱ موارد آزمایش شده و شرایط کاری

شرایط کاری دوم		شرایط کاری اول		آزمون	نمونه
غلظت (%)	دما (°C)	غلظت (%)	دما (°C)		
۲	۶۰	۱	۳۰	اندازه‌گیری ضریب هدایت و لزجت	EG/W
۲	۶۰	۱	۳۰	اندازه‌گیری ضریب هدایت و لزجت	EG/W + SiO ₂
۲	۶۰	۱	۳۰	اندازه‌گیری ضریب هدایت و لزجت	EG/W + TiO ₂
۲	۶۰	۱	۳۰	اندازه‌گیری ضریب هدایت و لزجت	EG/W + TiO ₂ + SiO ₂

^۱ DV-1-PRIME Model^۲ Full Scale Range

برای صحت‌سنجی نتایج بدست آمده از آزمایشات، می‌توان اعداد و درصد بهبود هر کدام از دو خاصیت مورد بررسی را با نظریه‌هایی با خطاهای بسیار کم مقایسه کرد. نظریه‌های مختلفی از جمله نظریهٔ ماکسول^۱ (۲)، براگمن^۲، الگوی همیلتون-کراسر^۳، کورچون^۴ (۳) و الگوی پاک و چو^۵ (۴) برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال پیشنهاد شده است که در این مقاله محاسبات با الگوهای پاک و چو، ماکسول و کورچون انجام شده است.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{1 + 2\beta\varphi}{1 - \beta\varphi} \cdot \beta = \frac{(k_p - k_f)}{(k_p + 2k_f)} \quad (2)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 4.4Re^{0.4}Pr^{0.66} \left(\frac{T}{T_F}\right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_f}\right)\varphi^{0.66} \quad (3)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 7.47\varphi \quad (4)$$

که β ، k_{nf} ، k_{bf} و k_p به ترتیب ضریب انبساط، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، ضریب هدایت حرارتی سیال پایه و ضریب هدایت حرارتی نانوذرات هستند. برای محاسبه‌ی لزجت دینامیکی نانوسیال نیز الگوهای انشتین^۶، باتچر^۷، وارد^۸، رندوارد^۹ و کورچون پیشنهاد شده‌اند که در این پژوهش از الگوی کورچون (۵) استفاده شده است.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu} = \frac{1}{1 - 34.87 \left(\frac{d_p}{d_f}\right)^{-0.3} \varphi^{1.03}} \quad (5)$$

موضوع قابل توجه دیگر این است که، لزجت ظاهری (μ_a) برای سیالات نیوتنی مقداری برابر با مقدار لزجت دینامیکی دارد و برای سیالات غیر نیوتنی از رابطه ۶ بدست می‌آید:

$$\mu_a = m \frac{du^{n-1}}{dy} \quad (6)$$

با توجه به اینکه شاخص جریان سیال (n) در سیالات نیوتنی برابر یک است، و شاخص استحکام سیال (m) برابر است با لزجت دینامیکی، بنابراین لزجت ظاهری و دینامیکی در این نوع سیالات باهم برابرند. دستگاه لزجت سنج مورد استفاده، مقادیر تنش برشی را گزارش نمی‌دهد، می‌توان مقادیر تنش برشی را با استفاده از معادلات قانون توانی^{۱۰} به صورت نظری بدست آورد. معادلات ۷ و ۸ بترتیب بیانگر قانون توانی برای محاسبه تنش برشی در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی است:

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy}\right)^n \quad (7)$$

برای سیالات نیوتنی: $\mu = m = cte$ و $n = 1$

$$\tau = \mu_a \left(\frac{du}{dy}\right)^{n-1} \left(\frac{du}{dy}\right) \quad (8)$$

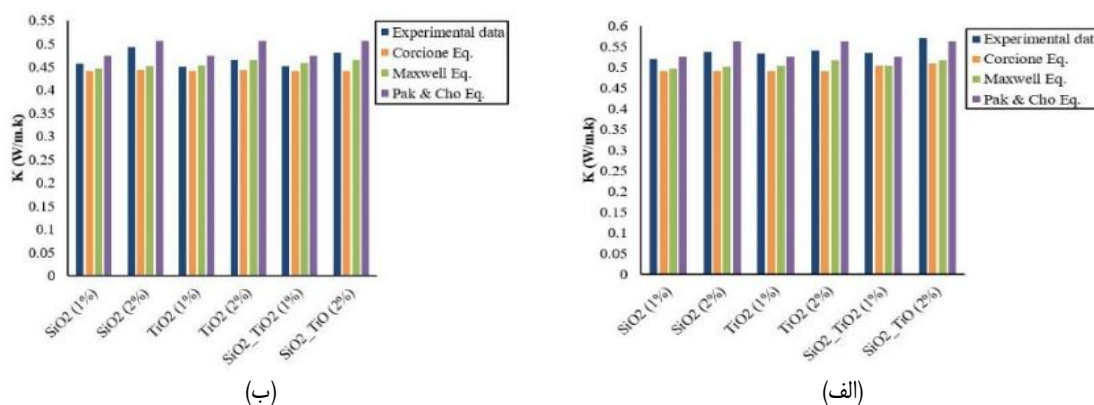
برای سیالات غیرنیوتنی: $m = \mu_a \left(\frac{du}{dy}\right)^{n-1}$ و $n > 1$ یا $n < 1$

1 Maxwell
2 Bruggman
3 Hamilton-Crosser
4 Corcione
5 Pak and Cho
6 Einstein Model
7 Batcher Model
8 Ward Model
9 Rendeward Model
10 Power Law

۳- نتایج و بحث

به عنوان اولین بخش از نتایج کیفی، پایداری نانوسیالات ساخته شده بررسی شد و مشخص گردید که همگن بودن نانوسیال تا حدود کمتر از یک ماه (۳۰ روز)، بصورت چشمی قابل درک است و عملاً نانوسیال، پایداری خود را حفظ می‌نماید. پس از این مدت زمان، بدون اعمال یک نیروی خارجی، عملاً فرایند ته‌نشینی ذرات نانو، صورت می‌گرفت. لذا مدت زمان پایداری برای کاربرد خودرویی، مدت زمان معقولی به نظر می‌رسد که اینک، با وجود تلمبه آب موتور و به دلیل چرخش سیال، یک نیروی خارجی بصورت تقریباً دائم، وجود دارد.

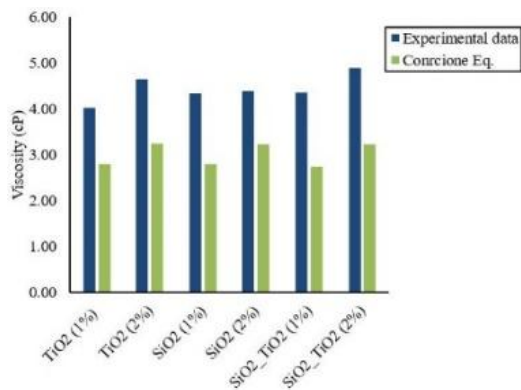
نتایج کمی سایر آزمایش‌ها، بیانگر وابستگی شدید مقدار انتقال حرارت هدایتی به دما و غلظت حجمی نانوسیال است. در این پژوهش مشاهده گردید که با افزایش غلظت حجمی نانوسیال و دما، ضریب انتقال حرارت هدایت افزایش می‌یابد که این امر منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت سیال در حالت ایستایی می‌گردد. بررسی‌های گوناگونی در زمینه بررسی ضریب انتقال حرارت جابجایی و حتی ضریب انتقال حرارت کلی نیز انجام شده است که نتایج آن‌ها نیز بیانگر افزایش ضریب انتقال حرارت کلی و جابجایی با افزایش غلظت حجمی و دما نانوسیال است. در شکل ۵، ضریب انتقال حرارت هدایت نانوسیال بر حسب غلظت در دو دمای ثابت برای الگوی کورچيون، ماکسول و پاک و چو در کنار داده‌های تجربی به عنوان یک مقایسه کلی ارائه شده است.



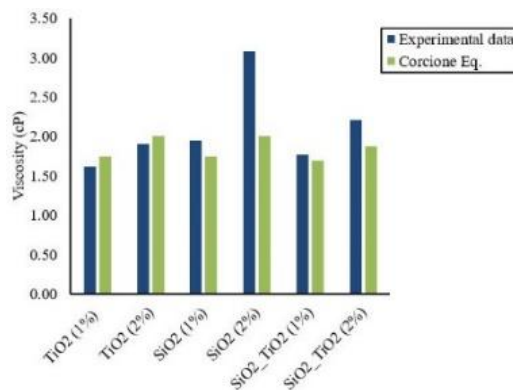
شکل ۵ ضریب‌های هدایت بدست آمده از هر چهار روش بر حسب غلظت در دمای ثابت الف) ۳۰ و ب) ۶۰ درجه سانتیگراد

با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده، مشاهده می‌گردد که لزجت نانوسیال با افزایش دما کاهش و در مقابل با افزایش غلظت افزایش می‌یابد. برای صحت‌سنجی مقادیر بدست آمده حاصل از آزمایش‌ها برای لزجت، از الگوی کورچيون استفاده شده است. مطابق با نمایش نتایج در شکل ۶ مقادیر بدست آمده برای لزجت از دو روش کورچيون و آزمایش تجربی، بیشترین خطای بین این دو روش در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد، ۳۴ درصد و در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد، ۳۵ درصد بوده است.

علاوه بر تأثیر دما و غلظت حجمی بر لزجت دینامیکی، تأثیر نرخ برش (کرنش برشی) دستگاه در تعداد دورهای متفاوت چرخشگر به منظور بررسی رفتار روانه‌شناسی نانوسیال و تأثیر آن بر روی مقدار تغییرات لزجت بررسی گردیده است. در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد تمام سیالات اعم از سیال پایه و نانوسیال‌های تولیدی به دلیل عدم تغییر مقدار لزجت در نرخ برش‌های متفاوت، رفتاری نیوتنی خواهند داشت. از طرفی در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد، مقدار لزجت در نرخ برش‌های متفاوت، تغییر می‌کند و این بیانگر رفتار غیرنیوتنی سیال پایه و نانوسیالات تولیدی است.



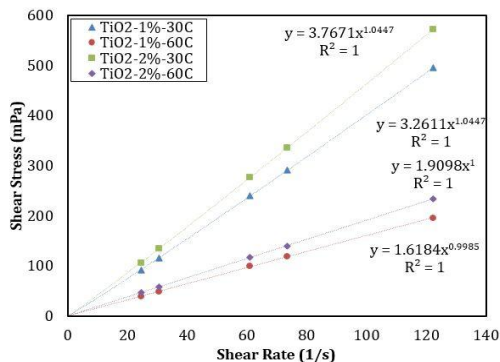
(ب)



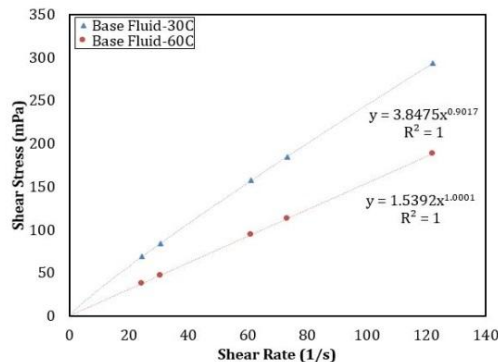
(ف)

شکل ۶ مقایسه مقادیر تجربی لزجت با الگوی کورچین در دمای ثابت الف) ۳۰ و ب) ۶۰ درجه سانتیگراد

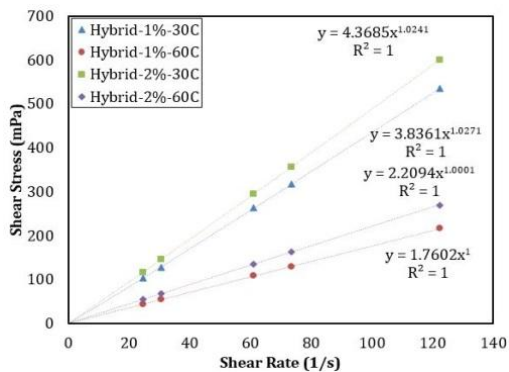
سیال پایه متشکل از درصد حضور برابر آب مقطر و اتیلن گلیکل، در دما ۶۰ درجه سانتیگراد رفتاری کاملاً نیوتنی از خود نشان می‌دهد، اما در دما ۳۰ درجه سانتیگراد، رفتار روانه‌شناسی شبه پلاستیک با شاخص سیال $n = 0.09017$ ارائه می‌دهد. با توجه به معادلات موجود در شکل ۷، می‌توان بیان کرد که، شاخص استحکام سیال با افزایش دما، کاهش می‌یابد و شاخص جریان سیال ثابت می‌ماند. در نانوسیالات ترکیبی با غلظت ۱ و ۲ درصد حجمی همانند سیال پایه، نانوسیال تولیدی نیز، در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد رفتاری نیوتنی از خود نشان می‌دهد و در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد رفتار غیرنیوتنی خفیفی ارائه می‌دهد.



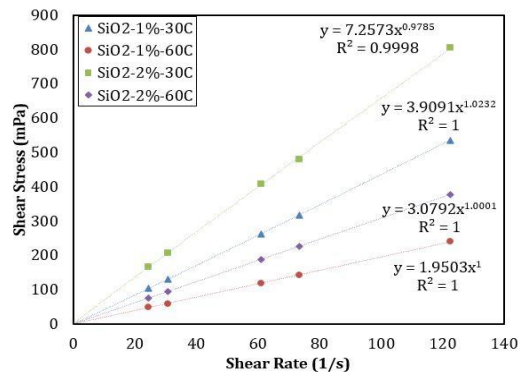
(ب)



(ف)



(د)



(ج)

شکل ۷ تغییرات تنش برشی برحسب نرخ برش، دما و غلظت حجمی برای الف) سیال پایه، ب) نانوسیال تیتانیوم دی‌اکسید، ج) نانوسیال سیلیسیم دی‌اکسید و د) نانوسیال هیبرید

پانگ^۱ و همکاران [۳۳]، در نانوسیالی متشکل از متانول به عنوان سیال پایه و نانوذرات SiO_2 و Al_2O_3 در غلظت حجمی ۰٫۵ تا ۰٫۸۵، به بهبود در انتقال حرارت هدایتی به مقدار ۱۴ درصد دست یافته‌اند. رحمتی نژاد و همکاران [۳۴] تحلیل تجربی اثر استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیم در بهبود انتقال گرمای مبدل حرارتی موتور XU7 در سه حالت آب خالص؛ آب و اتیلن گلیکل (۶۰:۴۰) و در نهایت با نانوسیال با کسرهای حجمی ۱ و ۲ درصد و شارهای ۱۰، ۲۱ و ۳۲ لیتر بر دقیقه، در دو دور کند و تند فن خنک‌کننده را بررسی کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد ازدیاد کسر حجمی نانوذرات به سیال پایه سبب افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی تا شار ۲۱ لیتر در دقیقه شده و بعد از آن این ضریب کاهش می‌یابد. با اضافه کردن ۲ درصد حجمی نانوذرات به سیال پایه در دور تند پنکه خنک‌کننده بترتیب برای شارهای ۱۰، ۲۱ و ۳۲ لیتر در دقیقه، افزایش تقریبی ۳، ۲۰ و ۱۶ درصد ضریب انتقال حرارت همرفتی نسبت به سیال پایه مشاهده شد.

هوانگ^۲ و همکاران [۳۵]، در نانوسیالی متشکل از آب به عنوان سیال پایه و نانوذرات SiO_2 ، در غلظت حجمی ۱ درصد، به بهبود در انتقال حرارت هدایتی به مقدار ۳ درصد دست یافته‌اند. آنجایارکانی^۳ و همکاران [۳۶]، در نانوسیالی متشکل از آب به عنوان سیال پایه و همچنین نانوذرات SiO_2 در غلظت حجمی ۴ درصد، به بهبود در انتقال حرارت هدایتی به مقدار ۹ درصد دست یافته‌اند.

در پژوهش حاضر، مقدار بهبود انتقال حرارت هدایتی در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد پس از افزودن نانوذرات SiO_2 برابر ۱۱٫۵ درصد، و برای دمای ۶۰ درجه سانتیگراد ۹٫۶ درصد است، که بیانگر یکسان بودن رابطه میان ضریب انتقال حرارت هدایتی در این پژوهش و سایر پژوهش‌های نام‌برده است.

آنجایارکانی و همکاران [۳۶]، در نانوسیالی متشکل از آب به عنوان سیال پایه و نانوذرات TiO_2 با قطر بیشینه ۱۳ نانومتر، در غلظت حجمی ۱ و ۲ و ۴ درصد، به بهبود در انتقال حرارت هدایتی به مقدار ۱۵ درصد دست یافته‌اند. جین^۴ و همکاران [۳۷]، در نانوسیالی متشکل از آب به عنوان سیال پایه و نانوذرات TiO_2 با قطر ۸۲ نانومتر، در غلظت حجمی ۰٫۶ به بهبود در انتقال حرارت به مقدار ۳٫۵ درصد دست یافته‌اند. مرشد^۵ و همکاران [۳]، در نانوسیالی متشکل از آب به عنوان سیال پایه و نانوذرات TiO_2 با قطر ۱۵ نانومتر، در غلظت حجمی ۵ درصد به بهبود در انتقال حرارت به مقدار ۲۹ درصد دست یافته‌اند. یو^۶ و همکاران [۳۸]، در نانوسیالی متشکل از آب به عنوان سیال پایه و نانوذرات TiO_2 ، در غلظت حجمی ۱ درصد به بهبود در انتقال حرارت به مقدار ۳ درصد دست یافته‌اند.

در این پژوهش، مقدار بهبود انتقال حرارت هدایتی در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد پس از افزودن نانوذرات TiO_2 برابر ۵٫۵ درصد، و برای دمای ۶۰ درجه سانتیگراد ۱۰٫۵ درصد است، که بیانگر یکسان بودن رابطه میان ضریب انتقال حرارت هدایتی در این پژوهش و سایر پژوهش‌های نام‌برده است.

نابیل و همکاران [۱۱]، پس از بررسی ضریب انتقال حرارت هدایت و لزجت دینامیکی نانوسیال ترکیبی متشکل از ۶۰ درصد آب و ۴۰ درصد اتیلن گلیکل و نانوذرات SiO_2 و TiO_2 در محدوده غلظت حجمی و دما بترتیب ۳-۵، ۰٫۵ درصد و ۸۰-۳۰ درجه سانتیگراد، به بهبودی به مقدار ۲۲٫۸ درصد در غلظت ۳ درصد و دما ۸۰ درجه سانتیگراد دست یافته‌اند. حمید و همکاران [۱۸]، پس از بررسی ضریب انتقال حرارت هدایت و لزجت دینامیکی نانوسیال ترکیبی متشکل از ۶۰ درصد آب و ۴۰ درصد اتیلن گلیکل و نانوذرات SiO_2 و TiO_2 در غلظت حجمی ۱ درصد و در محدوده دما ۸۰-۳۰ درجه سانتیگراد، به بهبودی به مقدار ۱۶ درصد در غلظت ۱ درصد و دما ۸۰ درجه سانتیگراد دست یافته‌اند. این بهبود در حالتی بدست آمده است که از ۲۰ درصد اکسید تیتانیم و ۸۰ درصد اکسید سیلیسیم استفاده گردیده است.

¹ Pang

² Hwang

³ Angayarkanni

⁴ Jin

⁵ Murshed

⁶ Yoo

در این پژوهش، مقدار بهبود انتقال حرارت هدایتی در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد و غلظت حجمی ۱ و ۲ درصد پس از افزودن نانوذرات SiO_2 و TiO_2 بترتیب برابر ۲٫۵ و ۸٫۸ درصد، و برای دمای ۶۰ درجه سانتیگراد و غلظت حجمی ۱ و ۲ درصد، بترتیب ۹٫۳۸ و ۱۶٫۳ درصد است، که بیانگر یکسان بودن رابطه میان ضریب انتقال حرارت هدایتی در این پژوهش و سایر پژوهش‌های نام‌برده است.

در این پژوهش‌ها ضریب انتقال حرارت هدایت و جابجایی جداگانه محاسبه گردیده است که طبعاً مقداری بالاتر از مقدار بهبود در این تحقیق خواهد بود. نتایج بدست آمده از پژوهش‌های نام‌برده نیز شبیه به آزمایش‌های صورت گرفته در این پژوهش است، به طوری که با افزایش دما و غلظت حجمی، ضریب انتقال حرارت هدایتی افزایش می‌یابد.

نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها بیانگر افزایش ضریب انتقال حرارت هدایت با افزایش غلظت حجمی نانوسیال و دما است، در مقاله عدنان و همکاران [۲۸]، پیغمبرزاده و همکاران [۱۳] سیدیک^۱ و همکاران [۳۹]، سندیا و همکاران [۸]، ژائو^۲ و همکاران [۴۰]، رحمتی نژاد و همکاران [۴۳] و پیغمبرزاده و همکاران [۴۴] نیز، تأثیر حضور نانوذرات پراکنده SiO_2 و Al_2O_3 و CuO و Fe_2O_3 و TiO_2 در آب و اتیلن گلیکل که سیال اصلی رادیاتور هستند مورد بررسی قرار گرفته است، که نتایج این پژوهش‌ها نیز بیانگر افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت حجمی است. الیویرا^۳ و همکاران [۴۱] و واجیها^۴ و همکاران [۱۹] نیز، به بررسی تغییرات انتقال حرارت هدایتی در چهار نانوسیال که از ذرات CuO ، Al_2O_3 ، ZnO و MWCNT و سیال پایه آب و اتیلن گلیکل به ترتیب با نسبت حضور ۴۰ و ۶۰ درصد در محدوده دمایی پژوهش ۳۶۳-۲۹۸ درجه سانتیگراد و قطرهای انتخابی ۲۹ و ۷۷ نانومتر پرداختند. علاوه بر این، نتایج آزمایشگاهی بدست آمده برای تغییرات نرخ ضریب انتقال حرارت هدایتی محلول $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-EG/W}$ با نظریه همیلتون-کراسر که بسط یافته الگوی ماکسول است مقایسه گردیده است. نتایج بدست آمده از پژوهش‌های نام‌برده نیز شبیه به آزمایش‌های صورت گرفته در این پژوهش است، به طوری که با افزایش دما و غلظت حجمی، ضریب انتقال حرارت هدایتی افزایش می‌یابد.

با توجه به مقاله آفرند و همکاران [۲۵]، با افزایش دما مقدار شاخص استحکام سیال و شاخص جریان سیال، هر دو کاهش می‌یابد و با افزایش غلظت، مقدار شاخص استحکام سیال افزایش، و شاخص جریان سیال در اکثر موارد کاهش می‌یابد. در مقاله اشگرف و آفرند [۲۶] و ایزدی و همکاران [۲۷] نیز، روند این تغییرات به صورت مذکور است و تغییرات شاخص استحکام سیال و شاخص جریان سیال را در این سه مقاله نشان می‌دهد که بسیار شبیه به تغییرات این دو مولفه در نانوسیالات تولیدی در این تحقیق است.

در پژوهش‌های [۱۲، ۲۸، ۳۹، ۴۰، ۴۱] نیز با بررسی تأثیر حضور نانوذرات در سیال پایه آب و اتیلن گلیکل به این نتیجه رسیده‌اند که پس از افزایش دما، لزجت افت شدیدی خواهد داشت. در مقابل این اتفاق نظر وجود دارد که با افزایش غلظت حجمی نانوسیالات، لزجت دینامیکی افزایش خواهد داشت، لازم به ذکر است که کاهش لزجت پس از افزایش دما، چشم‌گیرتر از افزایش آن پس از افزایش غلظت حجمی است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام گرفته در خصوص یافتن تغییرات مقدار انتقال حرارت هدایت، لزجت دینامیکی و تنش برشی سیال پایه پس از افزودن نانوذراتی با قطر بیشینه ۳۰ نانومتر، در دمای ۳۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد بدین شرح است:

- غلظت حجمی نانوذرات با لزجت رابطه مستقیم دارد، به طوری که مشاهده می‌گردد با افزایش یا کاهش

¹ Sidik

² Zhao

³ Oliveira

⁴ Vajjha

غلظت حجمی، لزجت افزایش یا کاهش می‌یابد. این کمیت همچنین، با ضریب انتقال حرارت هدایت رابطه مستقیم دارد، به طوری که مشاهده می‌گردد با افزایش یا کاهش غلظت حجمی، ضریب انتقال حرارت هدایت افزایش یا کاهش می‌یابد.

- دما با لزجت نانوسیال، رابطه عکس دارد به طوری که با افزایش دما، لزجت دینامیکی نانوسیال کاهش می‌یابد. دما با ضریب انتقال حرارت هدایت نانوسیال، رابطه مستقیم دارد به طوری که با افزایش دما، ضریب انتقال حرارت هدایت نانوسیال افزایش می‌یابد.
- مقدار افزایش انتقال حرارت هدایتی، برای دمای ۳۰ درجه سانتیگراد ۸ درصد و برای دمای ۶۰ درجه سانتیگراد ۱۷ درصد است. برای صحت‌سنجی ضریب انتقال حرارت هدایتی بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی از الگوی کورچیون، ماکسول و پاک و چو استفاده گردید که برای ضریب انتقال حرارت در ۳۰ درجه سانتیگراد، بترتیب ۱۰،۲، ۸،۴ و ۸،۱ درصد و برای دمای ۶۰ درجه سانتیگراد، بترتیب ۱۲،۳، ۹،۳ و ۴،۶ درصد خطا را نشان داد.
- مقدار تنش برشی با دما وابستگی عکس دارد زیرا با افزایش دما تنش برشی کاهش یافته است. همچنین تنش برشی با غلظت حجمی، رابطه مستقیم دارد و با افزایش غلظت حجمی تنش برشی افزایشی خواهد بود. به منظور ادامه کار در این پژوهش، پیشنهاد می‌گردد که دماهای مدنظر برای اجرای آزمون‌های تجربی، نزدیک به دمای کارکردی سیال خنک‌کاری در خودرو باشد که در این صورت، می‌توان آزمون‌ها را در دماهای ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد نیز، تکرار نمود.

فهرست علائم

k	ضریب هدایت حرارتی، $W/(m \cdot K)$
w	جرم، kg
E	دما، °C
Pr	عدد پرانتل
Re	عدد رینولدز
n	شاخص جریان سیال
m	شاخص استحکام سیال

علائم یونانی

ρ	چگالی، kg/m^3
μ	ضریب لزجت دینامیکی $N \cdot s/m^2$
φ	غلظت حجمی %
β	ضریب انبساط K^{-1}
τ	تنش، Pa

زیرنویس‌ها

nf	نانوسیال
bf	سیال پایه
p	نانوذرات
μ_a	لزجت ظاهری

References

- [1] Karimzadeh H, Ghasemali E, Saleemizadeh S. Nanomaterials; Properties, Production and Application, Jahad-e Daneshgahi Isfahan University of Technology Branch Pub, 2005. [In Persian]
- [2] Ghadimi A, Saidur R, Metselaar HS. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011 Aug 1;54(17-18):4051-68. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014
- [3] Murshed SM, Leong KC, Yang C. Enhanced thermal conductivity of TiO₂ - water based nanofluids. International Journal of Thermal Sciences. 2005 Apr 1;44(4):367-73. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2004.12.005
- [4] Xuan Y, Li Q. Heat transfer enhancement of nanofluids. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2000 Feb 1;21(1):58-64. doi: 10.1016/S0142-727X(99)00067-3
- [5] Choi SU, Zhang ZG, Yu W, Lockwood FE, Grulke EA. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. Applied Physics Letters. 2001 Oct 1;79(14):2252-4. doi: 10.1063/1.1408272
- [6] Paul G, Philip J, Raj B, Das PK, Manna I. Synthesis, characterization, and thermal property measurement of nano-Al₉₅Zn₅ dispersed nanofluid prepared by a two-step process. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011 Jul 1;54(15-16):3783-8. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.02.044
- [7] Suresh S, Venkataraj KP, Selvakumar P, Chandrasekar M. Synthesis of Al₂O₃-Cu/water hybrid nanofluids using two step method and its thermo physical properties. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2011 Sep 5;388(1-3):41-8. doi: 10.1016/j.colsurfa.2011.08.005
- [8] Devireddy S, Mekala CS, Veeredhi VR. Improving the cooling performance of automobile radiator with ethylene glycol water based TiO₂ nanofluids. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2016 Nov 1;78:121-6. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.09.002
- [9] Bhimani VL, Rathod PP, Sorathiya AS. Experimental study of heat transfer enhancement using water based nanofluids as a new coolant for car radiators. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2013 Jun;3(6):295-302.
- [10] Kayhani MH, Soltanzadeh H, Heyhat MM, Nazari M, Kowsary F. Experimental study of convective heat transfer and pressure drop of TiO₂/water nanofluid. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2012 Mar 1;39(3):456-62. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.01.004
- [11] Nabil MF, Azmi WH, Hamid KA, Mamat R, Hagos FY. An experimental study on the thermal conductivity and dynamic viscosity of TiO₂-SiO₂ nanofluids in water: ethylene glycol mixture. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2017 Aug 1;86:181-9. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.05.024
- [12] Peyghambarzadeh SM, Hashemabadi SH, Jamnani MS, Hoseini SM. Improving the cooling performance of automobile radiator with Al₂O₃/water nanofluid. Applied Thermal Engineering. 2011 Jul 1;31(10):1833-8. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.02.029
- [13] Peyghambarzadeh SM, Hashemabadi SH, Naraki M, Vermahmoudi A. Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator. Applied Thermal Engineering. 2013 Apr 5;52(1):8-16. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.11.013
- [14] Chavan D, Pise AT. Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid as a coolant. Journal of Thermal Science and Engineering Applications. 2014 Jun 1;6(2):021010. doi: 10.1115/1.4025230
- [15] Heris SZ, Shokrgozar M, Poorpharhang S, Shanbedi M, Noie SH. Experimental study of heat transfer of a car radiator with CuO/ethylene glycol-water as a coolant. Journal of Dispersion Science and Technology. 2014 May 4;35(5):677-84. doi: 10.1080/01932691.2013.805301
- [16] Ravisankar R, Venkatachalapathy VS, Alagumurthy N. Thermal performance improvement of tractor radiator using CuO/Water nanofluid. Heat Transfer - Asian Research. 2017 Jan;46(1):61-74. doi: 10.1002/htj.21198
- [17] Arani AA, Amani J. Experimental study on the effect of TiO₂-water nanofluid on heat transfer and pressure drop. Experimental Thermal and Fluid Science. 2012 Oct 1;42:107-15. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2012.04.017
- [18] Hamid KA, Azmi WH, Nabil MF, Mamat R, Sharma KV. Experimental investigation of thermal conductivity and dynamic viscosity on nanoparticle mixture ratios of TiO₂-SiO₂ nanofluids. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018 Jan 1;116:1143-52. doi:

- 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.087
- [19] Vajjha RS, Das DK. Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009 Oct 1;52(21-22):4675-82. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.027
- [20] Agarwal R, Verma K, Agrawal NK, Duchaniya RK, Singh R. Synthesis, characterization, thermal conductivity and sensitivity of CuO nanofluids. *Applied Thermal Engineering*. 2016 Jun 5;102:1024-36. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.04.051
- [21] Chandran MN, Manikandan S, Suganthi KS, Rajan KS. Novel hybrid nanofluid with tunable specific heat and thermal conductivity: Characterization and performance assessment for energy related applications. *Energy*. 2017 Dec 1;140:27-39. doi: 10.1016/j.energy.2017.08.056
- [22] Leong KY, Razali I, Ahmad KK, Ong HC, Ghazali MJ, Rahman MR. Thermal conductivity of an ethylene glycol/water-based nanofluid with copper-titanium dioxide nanoparticles: An experimental approach. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2018 Jan 1;90:23-8. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.10.005
- [23] Ali HM, Ali H, Liaquat H, Maqsood HT, Nadir MA. Experimental investigation of convective heat transfer augmentation for car radiator using ZnO-water nanofluids. *Energy*. 2015 May 1;84:317-24. doi: 10.1016/j.energy.2015.02.103
- [24] Samira P, Saeed ZH, Motahare S, Mostafa K. Pressure drop and thermal performance of CuO/ethylene glycol (60%)-water (40%) nanofluid in car radiator. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2015 Apr;32:609-16. doi: 10.1007/s11814-014-0244-7
- [25] Afrand M, Toghraie D, Ruhani B. Effects of temperature and nanoparticles concentration on rheological behavior of Fe₃O₄-Ag/EG hybrid nanofluid: an experimental study. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016 Oct 1;77:38-44. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2016.04.007
- [26] Eshgarf H, Afrand M. An experimental study on rheological behavior of non-Newtonian hybrid nano-coolant for application in cooling and heating systems. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016 Sep 1;76:221-7. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2016.03.015
- [27] Izadi F, Ranjbarzadeh R, Kalbasi R, Afrand M. A new experimental correlation for non-Newtonian behavior of COOH-DWCNTs/antifreeze nanofluid. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2018 Apr 1;98:83-9. doi: 10.1016/j.physe.2017.12.031
- [28] Hussein AM, Bakar RA, Kadrigama K. Study of forced convection nanofluid heat transfer in the automotive cooling system. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2014 Mar 1;2:50-61. doi: 10.1016/j.csite.2013.12.001
- [29] Alawi OA, Sidik NA, Xian HW, Kean TH, Kazi SN. Thermal conductivity and viscosity models of metallic oxides nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018 Jan 1;116:1314-25. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.133
- [30] Nabiei O, Study of Nano-Particles Effect on Thermo-Physical Properties and Rheological Behavior of Cooling Fluid in Combustion Engines, BSc Thesis, Semnan University, 2018.
- [31] Data Sheet for Silicon Dioxide Nanopowder (SiO₂, 99+%, 20-30 nm, amorphous), Nanosany Corporation, 2022, Mashhad, Iran.
- [32] Data Sheet for Titanium Oxide Nanoparticle (TiO₂, anatase, 99+%, 10-25 nm), Nanosany Corporation, 2022, Mashhad, Iran.
- [33] Pang C, Jung JY, Lee JW, Kang YT. Thermal conductivity measurement of methanol-based nanofluids with Al₂O₃ and SiO₂ nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012 Oct 1;55(21-22):5597-602. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.048
- [34] Rahmatinejad B, Rahimi Asiabarak H, Azimpour Shishevan F. Investigation of the effect of Al₂O₃ nanofluid in M13NI engine cooling system, *The Journal of Engine Research*, 2023;70(1):47-65. doi: 10.22034/er.2023.1975318.0 [In Persian]
- [35] Hwang YJ, Ahn YC, Shin HS, Lee CG, Kim GT, Park HS, Lee JK. Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids. *Current Applied Physics*. 2006 Oct 1;6(6):1068-71. doi: 10.1016/j.cap.2005.07.021
- [36] Angayarkanni SA, Philip J. Effect of nanoparticles aggregation on thermal and electrical conductivities of nanofluids. *Journal of Nanofluids*. 2014 Mar 1;3(1):17-25. doi: 10.1166/jon.2014.1083
- [37] He Y, Jin Y, Chen H, Ding Y, Cang D, Lu H. 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*. 2007 Jun 1;50(11-12):2272-81. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.10.024

- [38] Yoo DH, Hong KS, Yang HS. Study of thermal conductivity of nanofluids for the application of heat transfer fluids. *Thermochimica Acta*. 2007 Apr 1;455(1-2):66-9. doi: [10.1016/j.tca.2006.12.006](https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.12.006)
- [39] Sidik NA, Yazid MN, Mamat R. A review on the application of nanofluids in vehicle engine cooling system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2015 Nov 1;68:85-90. doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.08.017](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.08.017)
- [40] Zhao N, Li S, Yang J. A review on nanofluids: Data-driven modeling of thermalphysical properties and the application in automotive radiator. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016 Dec 1;66:596-616. doi: [10.1016/j.rser.2016.08.029](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.029)
- [41] Oliveira GA, Contreras EM, Bandarra Filho EP. Experimental study on the heat transfer of MWCNT/water nanofluid flowing in a car radiator. *Applied Thermal Engineering*. 2017 Jan 25;111:1450-6. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2016.05.086](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.086)
- [42] Ganvir RB, Walke PV, Kriplani VM. Heat transfer characteristics in nanofluid-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017 Aug 1;75:451-60. doi: [10.1016/j.rser.2016.11.010](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.010)
- [43] Rahmatinejad B, Rahimi Asiabaraki H, Azimpour Shishevan F, Mohtadi Bonab MA. Experimental analysis of the effect of using aluminum oxide nanofluid in improving the heat transfer of XU7 engine radiator. *The Journal of Engine Research*. 2023 Jun 22;70(2):66-79. doi: [10.22034/er.2023.2011671.1015](https://doi.org/10.22034/er.2023.2011671.1015) [In Persian]
- [44] Peyghambarzadeh SM, Hashemabadi SH, Hoseini SM, Seifi Jamnani M. Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2011 November, 9;38:1283-1290. doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.07.001](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.07.001)