



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Experimental Investigation of Rheological and Tribological Behavior of Engine Oil Containing Silica Aerogel Nanoparticles

Ramin Adhami^a, Seyfolah Saedodin^{a*}, Seyed Hadi Rostamian^{b*}

^a Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

^b School of Engineering, Damghan University, Damghan, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-09-09

Revised: 2025-01-17

Accepted: 2025-01-20

Keywords:

Rheological properties;

Tribological behavior;

Engine oil;

Nanofluid;

Silica aerogel;

Wear rate.

ABSTRACT

This paper investigates the rheological and tribological behavior of motor oil containing silica-aerogel nanoparticles at different concentrations and temperatures. The nanoparticles were suspended in SAE20W50 base oil at concentrations of 0.28, 1.4, 2.8, and 5.5wt% and tested at different temperatures. The friction and wear tests were carried out by a pin on disk device according to ASTM G99 standard. The dynamic viscosity measured by the Brookfield CAP 2000+ viscometer. The power-law index obtained for all concentrations showed that the fluid has non-Newtonian shear thinning behavior. The results of the wear measurements showed that the nanofluid with a concentration of 5.5wt% at 25 °C decreased the friction coefficient by 22.39%. At the same temperature the friction coefficient, 19.40 % reduced by the concentration of 2.8 wt% respect to the base oil. At this temperature, the wear rate also decreased for concentrations of 5.5wt% and 2.8wt%, 61.1%, and 50%, respectively. By selecting the concentration of 2.8wt% as the optimal concentration, the experiments were resumed at temperatures of 100 and 200 °C with this concentration. The results showed that at 100 °C and with optimum concentration, the friction coefficient decreased by 25.80%, and the wear rate by 51.36% compared to the base oil.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.35262.2726>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: s_sadodin@semnan.ac.ir, h.rostamian@du.ac.ir

How to cite this article:

R. Adhami, S. Saedodin and S. H. Rostamian. "Experimental Investigation of Rheological and Tribological Behavior of Engine Oil Containing Silica Aerogel Nanoparticles," Journal of Modeling in Engineering, 23 82 (2025): 193-204, doi: 10.22075/jme.2025.35262.2726

بررسی آزمایشگاهی رفتار رئولوژیکی و تریبولوژیکی روغن موتور حاوی نانوذرات سیلیکا آبروژل

رامین ادهمی کلان^۱، سیف الله سعدالدین^{۱*}، سید هادی رستمیان^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۹	این مقاله به بررسی آزمایشگاهی رفتار رئولوژیکی و تریبولوژیکی نانوروغن حاوی نانوذرات سیلیکا آبروژل در غلظت ها و دماهای مختلف و مدلسازی رفتار رئولوژی این نانو روغن می پردازد. نانوذرات در روغن پایه SAE20W50، در غلظت های ۰/۲۸، ۰/۴، ۱/۸، ۲/۸ و ۵/۵ درصد وزنی تعلیق شد و در دماهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. ضریب اصطکاک و سایش با استفاده از دستگاه تست پین روی دیسک و بر اساس استاندارد ASTM G99 انجام شد و ویسکوزیته دینامیکی با دستگاه ویسکومتر بروکفیلد مدل کپ ۲۰۰۰ اندازه گیری شد. پس از بررسی خواص رئولوژیکی نانوسیال، شاخص توانی نشان دهنده رفتار غیرنیوتنی برای سیال از نوع رقیق برشی بود. نتایج اندازه گیری های سایش نمایانگر آن بود که نانوسیال با غلظت ۵/۵ درصد وزنی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد اصطکاک را به میزان ۲۲/۳۹ درصد و غلظت ۲/۸ درصد وزنی در همین دما به میزان ۱۹/۴۰ درصد نسبت به روغن پایه کاهش دادند. نرخ سایش نیز به ترتیب برای غلظت ۵/۵ و ۲/۸ درصد وزنی، ۶۱/۱ درصد و ۵۰ درصد نسبت به روغن خالص کاهش پیدا کرد. با انتخاب غلظت ۲/۸ درصد وزنی به عنوان غلظت بهینه، برای نخستین بار آزمایشات در محدوده دما بالا که شامل دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی گراد ادامه انجام گردید. در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد ضریب اصطکاک توسط نانوسیال با غلظت بهینه (۲/۸ درصد وزنی) تا ۲۵/۸۰ درصد و سایش نیز تا ۵۱/۳۶ درصد نسبت به روغن پایه کاهش یافت.

واژگان کلیدی:

رفتار رئولوژیکی،
ضریب اصطکاک،
روغن موتور،
نانوسیال،
سیلیکا آبروژل،
نرخ سایش.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.35262.2726>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

کاهش اصطکاک و سایش قطعات می تواند راهکار مناسبی برای حفظ انرژی و هزینه باشد. در سال ۲۰۱۷، حدود ۲۳ درصد انرژی مصرفی در جهان مرتبط با تماس های تریبولوژیکی قطعات بود، که ۲۰ درصد آن صرف مقابله با اصطکاک و ۳ درصد آن صرف تعمیر یا بازسازی قطعاتی که بر اثر سایش آسیب دیده اند؛ شد [۱]. در کنار مطالعات

زیادی که بر روی خواص حرارتی [۲-۵] و خواص رئولوژیکی [۶-۸] نانوسیالات انجام شده است، تحقیقات مختلفی نیز برای درک تاثیر تعلیق نانوذرات در روغن برای بررسی میزان تغییرات اصطکاک و سایش آن انجام شده است [۹-۱۱]. در بین نانوذرات فلزی، نانوذره فلزی مس یکی از نانوذرات پرتعداد این زمینه است. تاثیر اندازه و کسر حجمی نانوذرات مس دو پارامتر مهم در بررسی خواص تریبولوژی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: s_sadodin@semnan.ac.ir

h.rostamian@du.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲. دانشکده مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

استناد به این مقاله:

رامین ادهمی، سیف الله سعدالدین و سید هادی رستمیان. "بررسی آزمایشگاهی رفتار رئولوژیکی و تریبولوژیکی روغن موتور حاوی نانوذرات سیلیکا آبروژل." مدل سازی در مهندسی، ۲۳ ۸۲ (۱۴۰۴): ۲۰۴-۱۹۳. doi: 10.22075/jme.2025.35262.2726

دارای ذرات نانو با غلظت ۰/۱ درصد افزایشی معادل ۱۸ درصدی نسبت به نمونه خالص داشت. همچنین بر اساس نتایج آزمون چهار ساچمه ای میزان سایش در روغن حاوی غلظت ۰/۵ درصد نانو ذرات نسبت به روغن بدون افزودنی نانو، کاهش داشته است. البته تاثیر نانوذرات فولرن بر خواص رئولوژیکی روغن ها در پژوهش احمدی و همکاران [۳۳] و رستمیان و همکاران [۳۴] به عنوان افزودنی به ترتیب در روغن هیدرولیک و روغن موتور مورد بررسی قرار گرفته است. در هر یک از این تحقیقات رفتار پایداری نانوروغن مطلوب گزارش شده است و میزان افزایش ویسکوزیته در کسرهای حجمی مختلف در این تحقیقات کمتر از ۱۴ درصد بود که نشان از کارایی مطلوب این نانوذره در نانوروغن می باشد. نانوذرات دیگری که توسط گرین برگ و گولاچ و همکارانشان مورد بررسی قرار گرفت، IF-WS2 است که در غلظت های مختلف و در روغن های پایه متفاوتی مورد استفاده قرار گرفته است. این نانوذرات تا ۵۰ درصد ضریب اصطکاک را کاهش دادند [۳۵-۳۶]. جدول ۱ برخی از مطالعات دیگر را که به بررسی خواص سایشی نانوذرات در روغن های موتور پرداخته است، ارائه می کند.

با بررسی تحقیقات گذشته می توان نتیجه گرفت استفاده از نانوذرات مختلف اکسیدی و کربنی در روغن های موتور مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار گرفته است و نتایج متنوعی در خصوص کاهش یا افزایش رفتار سایشی حاصل شده است. بنابراین با نگاه مقایسه ای، نوآوری های مهم این مطالعه شامل استفاده از یک نانوذره جدید (سیلیکا آبروژل) با پایداری بالا در روغن موتور و بررسی رفتار سایشی در محدوده دماهای بالا (۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتیگراد) است، که در هیچ مطالعه قبلی دیده نشده است. آبروژل ماده ای فوق سبک متخلخلی است که از ژل سیلیکا ساخته می شود به طوری که در ساختار آن قسمت مایع ژل، از آن خارج شده و گاز جایگزین آن می شود. در نتیجه جامدی متخلخل و بسیار سبک بدست می آید که وزن بسیار کمی دارد، اما به دلیل ساختار دندان فرکتالی، مقاومت مکانیکی بسیار بالایی از خود نشان می دهد. از دیگر مزایا و علل استفاده از این نانوذره، چگالی بسیار پایین است که باعث پایداری بهتر

نانوروغن در این دسته از مطالعات بوده است. نتایج نمایانگر عملکرد بهتر نانوذرات کوچکتر و کاهش اصطکاک و نرخ سایش با حضور نانوذرات مس می باشد [۱۲-۱۵].

استفاده از نانوذرات اکسیدی در روغن موتور جهت بهبود خواص آن نیز از دیگر موضوعات مورد توجه پژوهشگران بوده است. اکسید مس یکی از نانوذرات اکسید فلزی رایج است که در زمینه کاهش اصطکاک از سوی محققین مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۶-۱۷]. این نانوذرات علاوه بر کاهش اصطکاک، باعث بهبود خواص فیزیکی-شیمیایی روغن نیز شده است [۱۸]. از دیگر نانوذرات استفاده شده در این زمینه می توان به نانوذرات TiO_2 و Al_2O_3 اشاره کرد که در غلظت های مختلف و به صورت جداگانه یا هیبریدی مورد مطالعه قرار گرفته اند [۱۹-۲۲]. در تحقیق دیگری کوتیا و همکاران [۲۳] دو نانوذره Al_2O_3 و SiO_2 به روغن گیربکس اضافه کردند، که این دو نانوذره با غلظت ۰/۳ درصد خواص اصطکاکی را به ترتیب ۲۵ و ۲۲ درصد بهبود بخشیدند. نانوذرات دیگری مثل BA و hBN از دیگر نانوذرات مورد استفاده محققین بوده اند که باعث کاهش ۱۰ تا ۵۰ درصدی ضریب اصطکاک شدند [۲۴-۲۵]. در تحقیقات دینش و همکاران نانوذرات ZnO به همراه یک نوع نانوذره کربنی به روغن موتور افزوده شد. این نانوسیال نتوانست باعث کاهش اصطکاک شود [۲۶].

از نانوذرات کربنی مورد استفاده در تحقیقات می توان به فولرن^۲ اشاره کرد. فولرن در غلظت ها و اندازه های مختلف و در روغن های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. همچنین آلوترپ های کربن به شکل های مختلف نظیر انواع نانولوله های چند جداره^۳ و تک جداره^۴، گرافیت^۵، کربن سیاه^۶، فولرن، نانوکپسول های کربنی^۷، نانورقه های گرافنی^۸ به عنوان نانوذره به روغن افزوده شدند و نتایج مختلفی در کاهش اصطکاک و سایش داشتند [۲۷-۳۱]. به عنوان نمونه اتفاقی و همکارانش [۳۲] به بررسی تاثیر نانو ذرات کربن نانو بال^۹ بر عملکرد روغن موتور پرداختند. برای این منظور نانو ذرات با استفاده از آسیاب گلوله ای درون روغن موتور بهران پیشتاز SAE 20W50 پراکنده شد. سپس آزمون های تجربی به منظور بررسی خواص ذکر شده انجام گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد ضریب هدایت حرارتی روغن

⁶ Carbon Black

⁷ Carbon Nanocapsules

⁸ Graphene Nanosheets

⁹ carbon nano balls

² Fullerene (C60)

³ MWCNTs

⁴ SWCNTs

⁵ Graphite

بازدید چشمی صورت می‌گیرد، یکی از مزیت‌های مهم این نانوذره نسبت به مطالعات مشابه است. در نهایت در این مطالعه سعی بر این بوده است که شرایط آزمایشات به شرایط واقعی نزدیک‌تر باشد.

در قسمت اول این مطالعه به بررسی خواص رئولوژیکی در چهار غلظت مورد مطالعه پرداخته می‌شود. سپس در بخش دوم نتایج تست سایش در دمای محیط و دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتیگراد برای نخستین بار در مسافت یک کیلومتر برای غلظت‌های مختلف نانوذرات تحلیل می‌شود.

سوسپانسیون شده و ته‌نشینی ذرات بسیار دیرتر اتفاق می‌افتد. همچنین به علت وزن پایین و حجم بالا، میزان ذرات کمتری در نانوسیال استفاده می‌شود که از نظر اقتصادی بسیار قابل توجه است. مزیت دیگر این نانوذره، روغن دوست بودن آن است که با توجه به سیال پایه که روغن موتور می‌باشد این نکته حائز اهمیت است. از سوی دیگر این ذره رنگ روغن را تغییر نمی‌دهد که این امتیاز در بسیاری از نانوذرات اکسیدی و کربنی دیده نمی‌شود، با توجه به این نکته که تشخیص زمان تعویض روغن از طریق

جدول ۱- خلاصه ای از مطالعات مهم در زمینه بررسی رفتار تریبولوژیکی نانوروغن‌ها

جتی و همکارش [۱۹]	CuO-Multi grade mineral oil	۰/۵ - ۱ - ۱/۵ درصد وزنی	کاهش ۵۰ درصدی ضریب اصطکاک.
احمدعلی و همکاران [۲۲]	SAE5W30- Al ₂ O ₃ +TiO ₂ hybrid	۰/۰۵ - ۰/۱ - ۰/۲۵ - ۰/۵ درصد وزنی	بهبود ۱/۷ تا ۲/۵ درصد بازده مکانیکی موتور، کاهش مصرف سوخت تا حدود ۴ لیتر در هر ۱۰۰ کیلومتر.
کوتیا و همکاران [۲۳]	SAE15W40- Al ₂ O ₃ -SiO ₂	۰/۳ - ۰/۴ - ۰/۹ درصد حجمی	کاهش نرخ سایش در غلظت ۰/۳ درصد Al ₂ O ₃
وارداهامان و همکاران [۳۱]	SAE20W40- MWCNTs	۰/۵ درصد وزنی	کاهش ۷۱/۴۲ درصدی سایش توسط MWCNTs
وتس و همکاران [۳۷]	Paraffine oil- Graphene oxide	۰/۲ درصد وزنی	کاهش ۷۵ درصدی ضریب اصطکاک

جدول ۲- مشخصات نانوذرات استفاده شده.

کشور سازنده	سایز (nm)	چگالی (g/lit)	مساحت سطح ویژه (m ² /gr)	رنگ	شکل	نانوذره
آمریکا	۲۰-۱۵	۶۰	۶۴۰	سفید	کروی	سیلیکا آبروژل

جدول ۳- مشخصات نیمه سنتتیک شرکت نفت بهران با نوع SAE20W50

مشخصات فیزیکی- شیمیایی	گرانروی 100°C cSt	شاخص گرانروی	حداقل نقطه اشتعال °C	حداکثر نقطه ریزش °C	دانسیته 15°C Kg/m ³	قلیائیت کل mg KOH/g
روش آزمون	ASTM D-445	ASTM D-2270	ASTM D-92	ASTM D-97	ASTM D-4052	ASTM D-2896
بهران پيشتاز 20W50	19	120	228	-24	885	7.5

سایش بوده و همچنین پایداری مناسب تر و صرفه اقتصادی بالاتری دارد. سپس غلظت بهینه در دماهای بالاتر، شامل دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی گراد تحت آزمایش های سایش و اصطکاک قرار گرفت. آزمایش های اصطکاک در یک مسافت ثابت یعنی از صفر تا ۱۰۰۰ متر بوده، دور موتور (rpm) ۸۰ و بار اعمال شده بر نمونه ۱۸۰ نیوتن است. جنس نمونه تحت آزمایش غوطه ور در روغن نیز از نوع فولاد ۵۲۱۰۰ است.

برای محاسبه عدم قطعیت دستگاه سایش از روش مک کلینتاک استفاده می شود. در محاسبه ضریب اصطکاک (C) در دستگاه سایش از رابطه ۱ استفاده می شود که به دو پارامتر F و N که به ترتیب بار وارد شده در طول تست و بار عمودی تکیه گاه هستند وابسته است. بنابراین عدم قطعیت پارامتر سایش مطابق رابطه ۲ محاسبه می شود.

$$C = \frac{F}{N} \quad (1)$$

$$\frac{\omega_C}{C} = \left[\left(\frac{\omega_F}{F} \right)^2 + \left(\frac{\omega_N}{N} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

نسبت $\frac{\omega_C}{C}$ عدم قطعیت نسبی ضریب اصطکاک نامیده می شود که برای محاسبه آن به عدم قطعیت های نسبی نیروی عمودی تکیه گاه و بار وارد شده نیاز است. عدم قطعیت نسبی دو نیروسنج موجود در دستگاه که برای اندازه گیری دو نیروی یاد شده به کار می روند طبق کاتالوگ دستگاه ۲ درصد است. لذا پس از جایگذاری مقادیر در رابطه ۲ عدم قطعیت پارامتر سایش مطابق رابطه ۳ برابر ۲/۸۲ درصد محاسبه می شود.

$$\frac{\omega_C}{C} = \left[(0.02)^2 + (0.02)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 2.82\% \quad (3)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی رفتار رئولوژیکی

رئولوژی شاخه ای از فیزیک است که در آن به نحوه تغییر شکل مواد یا واکنش جریان به نیروهای اعمال شده یا فشارها پرداخته می شود. خواص ماده ای که در آن این تغییر شکل ها یا رفتارهای جریان تحت قوانین حاکم بر رئولوژی اتفاق می افتد، خواص رئولوژیکی ماده می نامند.

۲- معرفی مواد و تجهیزات آزمایش

ذرات نانو سیلیکا (SiO_2) با خلوص ۹۹/۵ درصد که به شکل آبروژل سنتز شده اند به برند زیامتر^{۱۰} که محصول شرکت داو^{۱۱} آمریکا است تعلق دارد. مشخصات این نانوذره در جدول ۲ قابل مشاهده است. روغن موتور پایه مورد استفاده از نوع نیمه سنتتیک شرکت نفت بهران با نوع SAE20W50 می باشد که مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است.

نانوسیال به روش دومرحله ای تهیه شده است. نانوذرات به کمک همزن مغناطیسی و هموژنایزر اولتراسونیک در روغن تعلیق شدند. از هیچ ماده شیمیایی برای پایداری نانوسیال استفاده نشده است. شکل (۱) نانوسیالات آماده شده را در غلظت های مختلف نمایش می دهد. همانگونه که ملاحظه می شود هیچگونه رسوب ظاهری در نانوسیال دیده نمی شود.



شکل ۱- نانوسیالات تعلیق شده در ۴ غلظت مورد مطالعه

پس از آماده سازی نانوسیال دستگاه ویسکومتر بروکفیلد مدل کپ ۲۰۰۰ (از نوع مخروط و صفحه)^{۱۲} برای اندازه گیری ویسکوزیته استفاده شده است. برای انجام تست نیاز به ۵/۰ سی سی از نمونه بوده که دما از طریق صفحه زیرین ویسکومتر و روش ترموالکتریک با دقت ۰.۱ درجه سانتیگراد تنظیم می شود. مطابق کاتالوگ شرکت سازنده در تمامی سرعت ها صحت اندازه گیری $\pm 2\%$ می باشد. برای تست سایش نیز از دستگاه پین روی دیسک استفاده شد که طبق استاندارد ASTM G99 تست ها را انجام شده است.

پس از انجام تست سایش و اصطکاک در دمای محیط، غلظت بهینه از بین چهار غلظت موجود انتخاب شد. غلظت بهینه غلظتی است که دارای کمترین میزان اصطکاک و

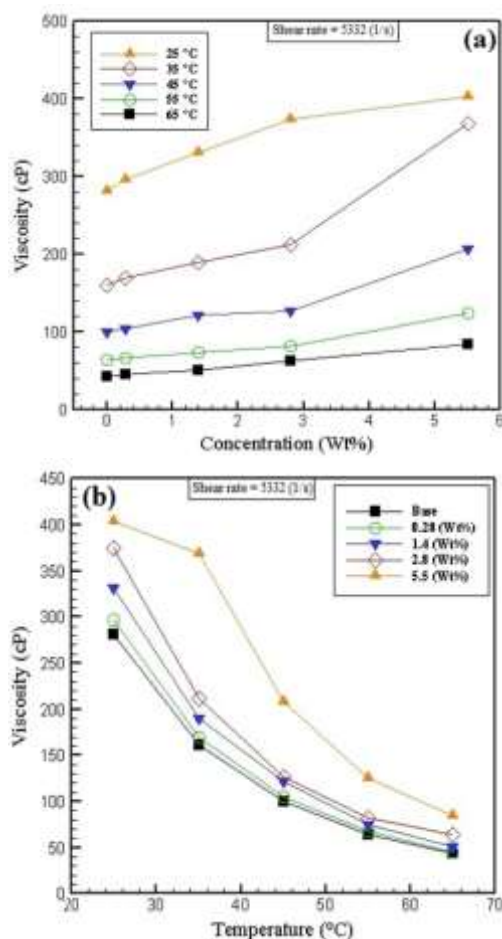
¹² Brookfield CAP 2000+ Cone and Plate Viscometer

¹⁰ XIAMETER

¹¹ DOW

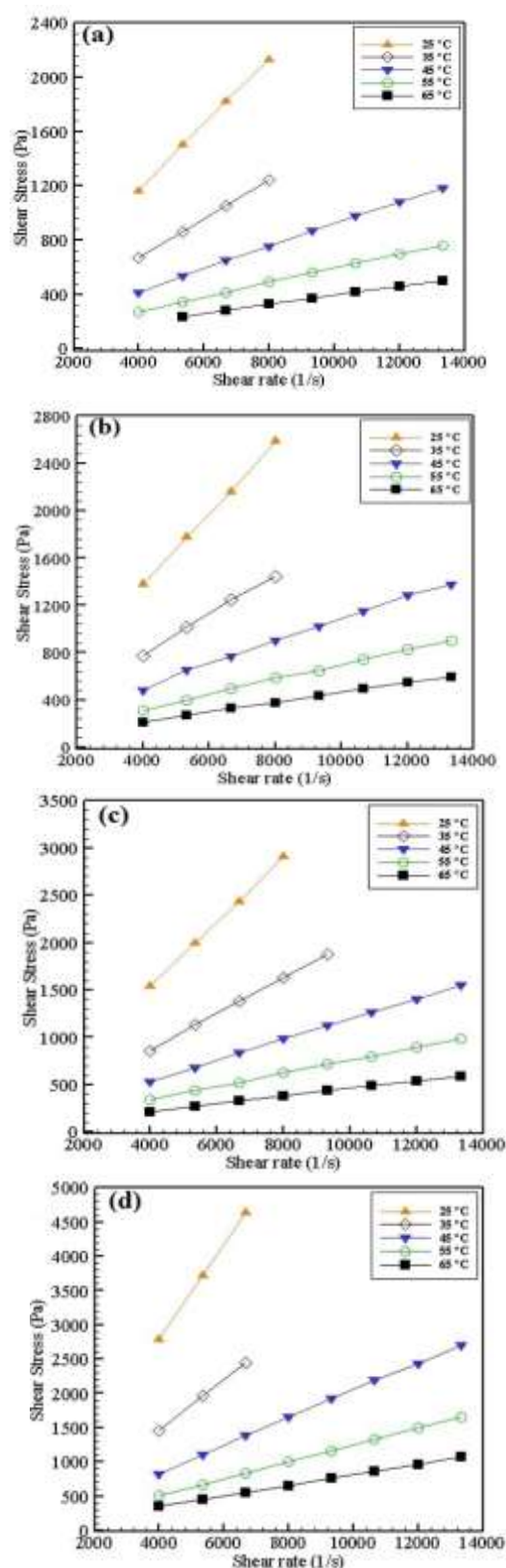
در شکل (۲) نمودارهای نرخ برشی^{۱۳} نسبت به تنش برشی^{۱۴} برای دماهای ۲۵ تا ۶۵ درجه سانتی گراد ارائه شده است. نرخ برشی بین ۳۹۹۹ تا ۱۳۳۳۰ (1/s) است. بالاترین تنش برشی برای دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و غلظت ۵/۵ درصد وزنی^{۱۵} است. علت این امر بالاتر بودن ویسکوزیته در این دما و برای این غلظت نسبت به سایر دماها و غلظت ها است. با افزایش دما تنش برشی کاهش می یابد. همانطور که ملاحظه می شود با افزایش نرخ برشی، تنش برشی نیز افزایش می یابد.

شکل (۳) تغییرات ویسکوزیته را در یک نرخ برش ثابت به میزان ۵۳۳۲ (1/s) در غلظت ها و دماهای مختلف نمایش می دهد.



شکل ۳- (a) ویسکوزیته بر حسب غلظت در دماهای تحت آزمایش. (b) ویسکوزیته بر حسب دما در غلظت های مختلف

همانطور که در شکل (۳-الف) مشخص است، ویسکوزیته با افزایش غلظت نانوسیال افزایش می یابد. علت این پدیده را می توان اینگونه تحلیل نمود که نانوذرات حرکت لایه های



شکل ۲- نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش در دماهای مختلف برای غلظت (a) ۰/۲۸ درصد وزنی (b) ۱/۴ درصد وزنی (c) ۲/۸ درصد وزنی (d) ۵/۵ درصد وزنی

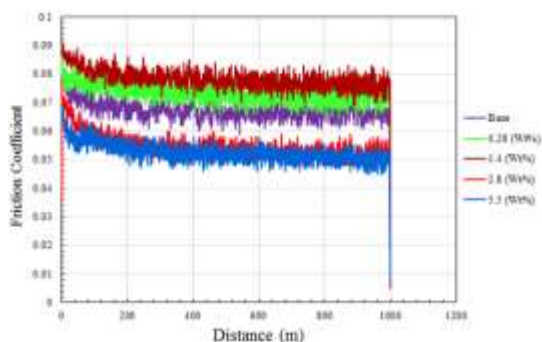
¹⁵ Weight Fraction (Wt)

¹³ Shear rate

¹⁴ Shear Stress

۲-۳- بررسی رفتار تریبولوژیکی

نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت در شکل (۴) ارائه شده است. در تست اصطکاک در دمای محیط، هدف تعیین بهترین غلظت از نظر کاهش اصطکاک بین قطعات و همچنین کاهش سایش و افزایش طول عمر آنها است. در این مطالعه ابتدا تمامی غلظت‌های مورد مطالعه در یک مسافت ثابت یعنی صفر تا ۱۰۰۰ متر، در دور ۸۰ (rpm) و دمای محیط مورد آزمایش اصطکاک قرار داده شد. بار اعمال شده بر نمونه ۱۸۰ نیوتن بود. نتایج تست در دمای محیط نشان‌دهنده این بود که با افزایش غلظت ابتدا ضریب اصطکاک نانوسیال نسبت به روغن خالص بالاتر بوده است، اما از مقدار غلظت ۲/۸ درصد وزنی نتایج تغییر کرد. نمی‌توان گفت با افزایش غلظت کاهش اصطکاک ادامه پیدا می‌کند، چون افزایش غلظت بیش از حد باعث نتیجه عکس در تست اصطکاک می‌شود. علت این امر پیوستن ذرات به هم و اثر منفی این امر در سایش است. دو غلظت ۵/۵ درصد و ۲/۸ درصد بهترین نتایج را نشان دادند. درحالی‌که متوسط ضریب اصطکاک روغن پایه در طول آزمایش ۰/۰۶۷ بود، غلظت ۲/۸ درصد وزنی، دارای متوسط ضریب اصطکاک ۰/۰۵۴ و غلظت ۵/۵ درصد وزنی دارای ضریب اصطکاک متوسط ۰/۰۵۲ بود. به نظر می‌رسد که با افزایش غلظت نتایج بهتر شده و در ابتدا تا یک غلظت مشخص، ضریب اصطکاک نانوسیال بیشتر از روغن پایه است. در غلظت ۵/۵ درصد وزنی ضریب اصطکاک در حدود ۲۲/۳۹ درصد و غلظت ۲/۸ درصد وزنی در حدود ۱۹/۴۰ درصد کاهش یافته است.



شکل ۴- ضریب اصطکاک نسبت به مسافت برای نانوسیال در غلظت‌های مختلف در دمای محیط.

در شکل (۵) نمودار مقایسه متوسط ضرایب اصطکاک برای غلظت‌های مختلف در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد ارائه

روغن بر روی هم را سخت تر می‌کند و مقاومت روغن در برابر جاری شدن بیشتر می‌شود که در نهایت ویسکوزیته نانوسیال افزایش می‌یابد. بیشترین ویسکوزیته برای غلظت ۵/۵ درصد وزنی است که ۶۹۷ سانتی پواز^{۱۶} است. در شکل (۳-ب) نمودار مقدار ویسکوزیته نانوسیال نسبت به دما ارائه شده است. میزان بیشینه ویسکوزیته در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و برای غلظت ۵/۵ درصد وزنی مشاهده می‌شود. با افزایش دما، ویسکوزیته کاهش پیدا می‌کند. علت این امر ضعیف شدن پیوند مولکولی است. تاثیر دما نسبت به تاثیر غلظت، در مقدار ویسکوزیته بیشتر است. مقدار بیشینه، در نرخ برش ۳۹۹۹ (1/s) اتفاق افتاده است. برای تعیین خواص رئولوژیکی و تشخیص نوع رفتار نانوسیال، ابتدا باید نحوه محاسبه تنش برشی ارائه شود. میزان تنش برشی سیال با کمک رابطه ۴ بدست می‌آید. با توجه به فرمول چنانچه $n=1$ باشد سیال رفتار نیوتنی، چنانچه $n<1$ سیال رفتار شبه پلاستیک (رقیق برشی) و چنانچه $n>1$ باشد سیال رفتار دیلاتانت (غلظ برشی) خواهد داشت.

$$\tau = k \mu^n \quad (۴)$$

برای تعیین رفتار نانوسیال حاوی سیلیکا آبروژل تابع توانی، بر روی نقاط گراف تنش برشی بر حسب نرخ برش برازش داده شده و با توجه به تابع برازش شده مقدار شاخص n برای تمامی غلظت‌ها بدست آمد. جدول ۴ مقادیر شاخص n را در دماها و غلظت‌های مختلف نمایش می‌دهد. متوسط شاخص R^2 برای همه غلظت‌ها حدود ۰/۹۸۵ بود. با توجه به شاخص n که عددی کوچکتر از ۱ است، نانوسیال رفتاری غیرنیوتنی دارد. این سیال غیرنیوتنی از نوع رقیق‌شونده‌ی برشی^{۱۷} است. منظور از رقیق‌شونده‌ی برشی، رقیق‌تر شدن سیال با افزایش نرخ برشی است. در واقع با افزایش نرخ برشی، ویسکوزیته نانوسیال کاهش می‌یابد.

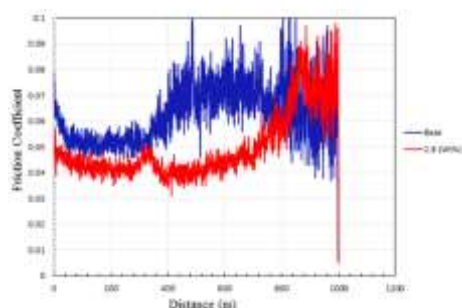
جدول ۴- فرمت شاخص توانی نانوسیال در دماها و غلظت‌های مختلف

غلظت (درصد وزنی)	دما (°C)	25	35	45	55	65
0.28		0.43	0.51	0.51	0.51	0.4
1.4		0.44	0.52	0.52	0.52	0.51
2.8		0.48	0.48	0.52	0.52	0.5
5.5		0.45	0.46	0.56	0.56	0.54

¹⁷ Shear-Thinning (Pseudoplastic)

¹⁶ Centipoise (cP)

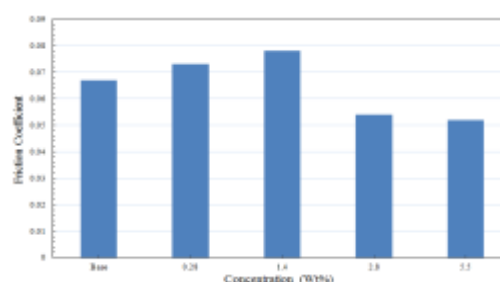
در شکل (۷) تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به مسافت در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد ارائه شده است. در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد، روغن خالص دارای متوسط ضریب اصطکاک در حدود ۰/۰۶۳ داشت و نانوسیال با غلظت ۲/۸ درصد وزنی دارای متوسط ضریب اصطکاک در حدود ۰/۰۴۹ بود. کاهش ۲۲/۲۲ درصدی ضریب اصطکاک در این دما قابل مشاهده است. در مسافت‌های بیشتر مشاهده شد که ضریب اصطکاک نانوسیال با روغن پایه برابر و گاهی اوقات بیشتر می‌شود، مهمترین علت این امر می‌تواند اکسید شدن روغن در دمای بالاتر و مسافت‌های طولانی‌تر باشد، که باعث از بین رفتن خاصیت‌های ضد اصطکاک و در برخی موارد به علت ذرات جامد به وجود آمده، باعث افزایش اصطکاک حتی نسبت به روغن پایه می‌شود.



شکل ۷- ضریب اصطکاک نسبت به مسافت در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد برای روغن پایه خالص و نانوسیال با غلظت ۲/۸ درصد وزنی.

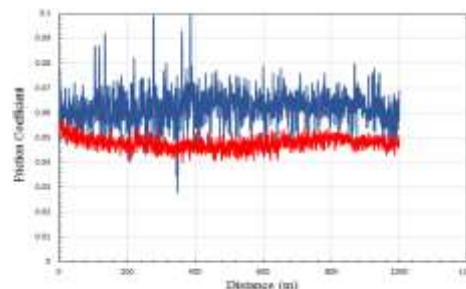
چنانچه در بخش اصطکاک عملکرد نانوسیال در دماهای مختلف مقایسه شود، همانگونه که در شکل (۸) ارائه شده است، در دمای محیط نانوسیال با غلظت ۲/۸ درصد وزنی، دارای متوسط ضریب اصطکاک ۰/۰۵۴ بود، در حالی که در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد، این عدد به ۰/۰۴۶ رسید. یعنی متوسط ضریب اصطکاک نانوسیال با غلظت ۲/۸ درصد وزنی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد به میزان ۱۴/۸۱ درصد، کمتر از نانوسیال با همان غلظت در دمای محیط است. اما هر چه دمای محیط آزمایش بیشتر شد، طبیعتاً میزان قدرت نانوسیال در کاهش اصطکاک، کاهش یافت و در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد، متوسط ضریب اصطکاک نسبت به دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد افزایش یافت. در این دما متوسط ضریب اصطکاک به عدد ۰/۰۴۹ رسید. این عدد نسبت به دمای ۲۵ درجه سانتی گراد ۹/۲۶ درصد کمتر است، اما طبیعتاً نسبت به دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد بیشتر است. علت این امر همانطور که گفته شد، کاهش

شده است. همانطور که اشاره شد ضریب اصطکاک در ابتدا تا غلظت ۱/۴ درصد وزنی رو به افزایش بوده است، اما از غلظت ۲/۸ درصد وزنی ضریب اصطکاک کاهش پیدا می‌کند و در غلظت ۵/۵ درصد وزنی به کمترین میزان خود می‌رسد. علت این موضوع را می‌توان اینگونه توجیه نمود که در غلظت ۲.۸ و ۵.۵ درصد وزنی، نانوذرات در بین ضایعه‌های سطوح که بر اثر سایش یا هر علتی به وجود آمده قرار گرفته که باعث حرکت راحت‌تر سطوح می‌گردند. از طرفی در غلظت‌های کمتر اثر نانوذرات موجب کندی حرکت لایه‌های سیال شده و این اثر تا غلظت ۱.۴ درصد ادامه می‌یابد.



شکل ۵- ضریب اصطکاک در غلظت‌های مختلف در دمای محیط

به علت پایداری بیشتر و صرفه اقتصادی بالاتر غلظت ۲/۸ درصد وزنی نسبت به ۵/۵ درصد این غلظت را به عنوان غلظت بهینه در نظر گرفته و آزمون‌ها در دماهای بالاتر با این غلظت ادامه داده شد. شرایط مرحله دوم آزمایش‌ها مشابه با مرحله اول بود؛ مسافت ۱۰۰۰ متر، بار وارد بر موتور ۱۸۰ نیوتن و سرعت دور موتور (rpm) ۸۰ است. طبق نمودار ۶ در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد، متوسط ضریب اصطکاک روغن پایه ۰/۰۶۲ بود و متوسط ضریب اصطکاک نانوسیال با غلظت ۲/۸ در حدود ۰/۰۴۶ بود. کاهش ۲۵/۸۰ درصدی ضریب اصطکاک در این دما، میزان مطلوبی نسبت به روغن خالص محسوب می‌شود.



شکل ۶- ضریب اصطکاک نسبت به مسافت، در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد برای روغن پایه خالص و نانوسیال با غلظت ۲/۸ درصد وزنی.

هم پیوستن نانوذرات و کلوخه شدن افزایش می یابد. این امر می تواند موجب افزایش ضریب اصطکاک و نرخ سایش شود.

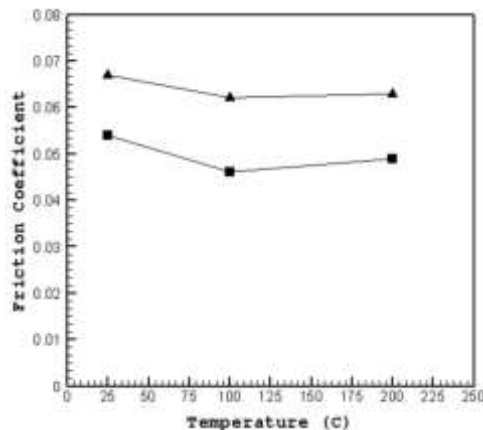
۴- نتیجه گیری

این مطالعه پتانسیل استفاده از نانوذرات سیلیکا آبروژل را در یک نمونه از روغن های موتور متداول از حیث بررسی توانان ویسکوزیته و سایش مورد بررسی قرار داد. نتایج پس از مطالعه ویسکوزیته سیال مشخص شد که با افزایش غلظت نانوسیال و کاهش دما میزان ویسکوزیته نانوسیال افزایش می یابد. بیشترین میزان ویسکوزیته مربوط به غلظت ۵/۵ درصد وزنی و دمای ۲۵ درجه سانتی گراد بود که میزان آن برابر با ۶۹۹/۴ سانتی پواز اندازه گیری شد. پس از آزمایش های ویسکوزیته و با توجه به قانون توانی، خواص رئولوژیکی نانوسیال مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی ها نشان داد نانوروغن در همه غلظت ها رفتاری غیرنیوتنی از نوع رقیق شونده ی برشی دارد. تست های سایش در مرحله اول شامل نانوسیال با ۴ غلظت ۰/۲۸، ۱/۴، ۲/۸ و ۵/۵ درصد وزنی در دمای محیط یعنی ۲۵ درجه سانتی گراد بود. غلظت ۵/۵ درصد وزنی با کاهش ۲۲/۳۹ درصدی و غلظت ۲/۸ درصد وزنی با کاهش ۱۹/۴۰ درصدی ضریب اصطکاک نسبت به روغن پایه بهترین نتایج را نشان دادند. نرخ سایش نیز در این دما به وسیله نانوسیال با غلظت ۵/۵ درصد وزنی ۶۱/۱ درصد و با غلظت ۲/۸ درصد وزنی تا ۵۰ درصد نسبت به روغن پایه کاهش یافت. در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد ضریب اصطکاک توسط نانوسیال با غلظت ۲/۸ درصد وزنی تا ۲۵/۸۰ درصد و سایش نیز تا ۵۱/۳۶ درصد نسبت به روغن پایه کاهش پیدا کرد. در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد نیز نانوسیال بهینه، ضریب اصطکاک را تا ۲۲/۲۲ درصد نسبت به روغن پایه کاهش داد. این نتایج نشان دهنده ی عملکرد مثبت این نانوذرات به عنوان افزودنی به روغن موتور بوده است. با توجه به این نتایج، می توان دریافت که برای صنعتی نمودن یک نانو روغن بعد از بررسی رفتار پایداری نانوذرات در روغن، بایست محدوده مناسبی از غلظت بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به هزینه، رفتار رئولوژیکی و تریبولوژیکی آن غلظت مناسب انتخاب و ارائه گردد.

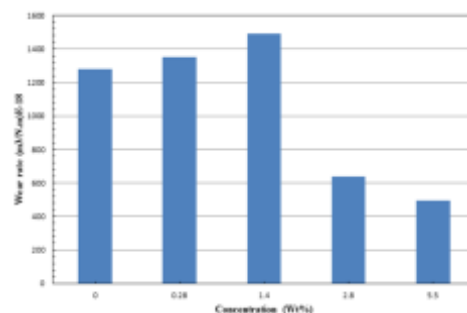
تقدیر و تشکر

این تحقیق در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان و به کمک آزمایشگاه نانورئولوژیک پارک علم و فناوری

ویسکوزیته روغن در دماهای بالاتر، نازک تر شدن فیلم روغن بر روی سطوح و کاهش قدرت عملکردی آن است. البته که همچنان در دماهای بالاتر، عملکرد نانوسیال بسیار مناسب تر از روغن خالص بوده است.



شکل ۸- مقایسه متوسط ضریب اصطکاک روغن پایه و نانوسیال با غلظت بهینه (۲/۸ درصد وزنی) در دماهای مختلف.



شکل ۹- نمودار نرخ سایش برای غلظت های مختلف نانوسیال در بارگذاری ۱۸۰ نیوتن.

در شکل (۹) میزان نرخ سایش در غلظت های مختلف در دمای محیط مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که، نانوسیال با غلظت ۵/۵ درصد وزنی کاهش در حدود ۶۱/۱ درصد در نرخ سایش را داشته است. پس از آن، غلظت ۲/۸ درصد وزنی با ۵۰ درصد کاهش در نرخ سایش نتیجه مناسبی را ارائه کرده است. بیشترین نرخ سایش مربوط به غلظت ۱/۴ درصد وزنی بوده است. مشابه تست اصطکاک از روغن خالص با افزایش غلظت نانوسیال تا میزان ۱/۴ درصد وزنی نرخ سایش افزایش یافته است. پس از آن با افزایش غلظت، نرخ سایش به میزان چشمگیری کاهش پیدا کرده است. باز هم نمی توان اطمینان داشت که با افزایش بیشتر غلظت، نرخ سایش کمتر می شود. چرا که افزایش غلظت باعث افزایش ویسکوزیته شده و احتمال به

دانشگاه سمنان انجام پذیرفت. از تمامی کارکنان این دو مجموعه کمال تشکر را داریم.

تعارض منافع

نویسنده اعلام می کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

دکتر سیف الله سعدالدین، یکی از نویسندگان این مقاله، عضو هیأت تحریریه مجله مدلسازی در مهندسی است، اما هیچ دخالتی در فرآیند ارزیابی این مقاله نداشته است. فرآیند داوری این مقاله توسط دکتر آلبویه، یکی از دبیران در مجله مذکور مدیریت شد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می شوند که مطالب این مقاله را در هیچ

مراجع

- [1] Holmberg, Kenneth, and Ali Erdemir. "Influence of Tribology on Global Energy Consumption, Costs and Emissions." *Friction* 5, no. 3 (2017): 263–84.
- [2] Moayyedi, Mohammad Kazem. "Numerical Assessment and Data-Driven Reduced Order Model for Natural Convection of Water-Copper Nanofluid in Porous Media." *Journal of Heat and Mass Transfer Research* 10, no. 1 (2023): 87-100.
- [3] Tajik, Milad (Tajik Jamal-Abad), Maziar Dehghan, and Amirhossein Zamzamian. "Analysis of Variance of Nanofluid Heat Transfer Data for Forced Convection in Horizontal Spirally Coiled Tubes." *Journal of Heat and Mass Transfer Research* 2, no. 2 (2015): 45–50. <https://doi.org/10.22075/jhmtr.2015.348>.
- [4] Rahman, Md Atiqur, SM Mozammil Hasnain, Shatrudhan Pandey, Anipa Tapalova, Nurgali Akyzbekov, and Rustem Zairov. "Review on nanofluids: preparation, properties, stability, and thermal performance augmentation in heat transfer applications." *ACS omega* 9, no. 30 (2024): 32328-32349.
- [5] Khaledi, Omid, Seyfolah Saedodin, and Seyed Hadi Rostamian. "Energy, Hydraulic and Exergy Analysis of a Compound Parabolic Concentrator Using Hybrid Nanofluid: An Experimental Study." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 136 (2022): 106181.
- [6] Parvar, Mojtaba, Seyfolah Saedodin, and Seyed Hadi Rostamian. "Experimental Study on the Thermal Conductivity and Viscosity of Transformer Oil–Based Nanofluid Containing ZnO Nanoparticles." *Journal of Heat and Mass Transfer Research* 7, no. 1 (2020): 77–84.
- [7] Tajik, Milad (Tajik Jamal-Abad), Maziar Dehghan, Seyfolah Saedodin, Mohammad Sadegh Valipour, and Amirhossein Zamzamian. "An Experimental Investigation of Rheological Characteristics of Non-Newtonian Nanofluids." *Journal of Heat and Mass Transfer Research* 1, no. 1 (2014): 17–23.
- [8] Biswas, Nabarun, Suman Kumar Mandal, Ishan Bhagwatkar, Raman Kumar, Jatinder Kaur, A. Bhowmik, Kishan Choudhuri, and Biplab Bhattacharjee. "Effect of nanoparticle-based lubricants on various performance characteristics of journal bearings: A review." *Engineering Research Express* (2025).
- [9] Viesca, J. L., A. Hernández Battez, R. González, R. Chou, and J. J. Cabello. "Antiwear properties of carbon-coated copper nanoparticles used as an additive to a polyalphaolefin." *Tribology International* 44, no. 7-8 (2011): 829-833.
- [10] Liu, Gang, X. Li, B. Qin, D. Xing, Y. Guo, and R. Fan. "Investigation of the mending effect and mechanism of copper nano-particles on a tribologically stressed surface." *Tribology Letters* 17, no. 4 (2004): 961-966.
- [11] Tang, Zhenglin, and Shaohui Li. "A review of recent developments of friction modifiers for liquid lubricants (2007–present)." *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 18, no. 3 (2014): 119-139.
- [12] Sarma, Pullela K., Vadapalli Srinivas, Vedula Dharma Rao, and Ayyagari Kiran Kumar. "Experimental study and analysis of lubricants dispersed with nano Cu and TiO₂ in a four-stroke two wheeler." *Nanoscale research letters* 6, no. 1 (2011): 233.

مجله دیگری به چلپ نرسانده اند.

مشارکت نویسندگان

سیف الله سعدالدین: در طراحی پژوهش و تحلیل نتایج نقش داشته اند.

سید هادی رستمیان: در مراحل طراحی پژوهش، تحلیل نتایج و نگارش مقاله مشارکت داشته اند.

رامین ادهمی: در جمع آوری داده ها، تحلیل نتایج و نگارش مقاله نقش داشته اند.

منابع مالی

این پژوهش بدون دریافت هرگونه حمایت مالی مستقیم از نهادها یا سازمانهای خاص انجام شده است.

- [13] Padgurskas, Juozas, Raimundas Rukuiza, Igoris Prosyčevs, and Raimondas Kreivaitis. "Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles." *Tribology International* 60 (2013): 224-232.
- [14] Vadiraj, A., G. Manivasagam, K. Kamani, and V. S. Sreenivasan. "Effect of nano oil additive proportions on friction and wear performance of automotive materials." *Tribology in Industry* 34, no. 1 (2012): 3.
- [15] Wu, Y. Y., W. C. Tsui, and T. C. Liu. "Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives." *Wear* 262, no. 7-8 (2007): 819-825.
- [16] Battez, A. Hernández, Rubén González, J. L. Viesca, J. E. Fernández, JM Díaz Fernández, A. Machado, R. Chou, and J. Riba. "CuO, ZrO₂ and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants." *Wear* 265, no. 3-4 (2008): 422-428.
- [17] Asrul, M., N. W. M. Zulkifli, H. H. Masjuki, and M. A. Kalam. "Tribological properties and lubricant mechanism of nanoparticle in engine oil." *Procedia Engineering* 68 (2013): 320-325.
- [18] Etefaghi, Ehsan-o-llah, Hojjat Ahmadi, Alimorad Rashidi, Seyed Saeid Mohtasebi, and Mahshad Alaei. "Experimental evaluation of engine oil properties containing copper oxide nanoparticles as a nanoadditive." *International Journal of Industrial Chemistry* 4, no. 1 (2013): 28.
- [19] Jatti, Vijaykumar S., and T. P. Singh. "Copper oxide nano-particles as friction-reduction and anti-wear additives in lubricating oil." *Journal of Mechanical Science and Technology* 29, no. 2 (2015): 793-798.
- [20] Kotia, Ankit, Sheeba Borkakoti, and Subrata Kumar Ghosh. "Wear and performance analysis of a 4-stroke diesel engine employing nanolubricants." *Particuology* 37 (2018): 54-63.
- [21] Ali, Mohamed Kamal Ahmed, Hou Xianjun, Liqiang Mai, Chen Bicheng, Richard Fiifi Turkson, and Cai Qingping. "Reducing frictional power losses and improving the scuffing resistance in automotive engines using hybrid nanomaterials as nano-lubricant additives." *Wear* 364 (2016): 270-281.
- [22] Ali, Mohamed Kamal Ahmed, Hou Xianjun, Liqiang Mai, Cai Qingping, Richard Fiifi Turkson, and Chen Bicheng. "Improving the tribological characteristics of piston ring assembly in automotive engines using Al₂O₃ and TiO₂ nanomaterials as nano-lubricant additives." *Tribology International* 103 (2016): 540-554.
- [23] Kotia, Ankit, Gaurab Kumar Ghosh, Isha Srivastava, Piyush Deval, and Subrata Kumar Ghosh. "Mechanism for improvement of friction/wear by using Al₂O₃ and SiO₂/Gear oil nanolubricants." *Journal of Alloys and Compounds* 782 (2019): 592-599.
- [24] Baş, Hasan, and Yunus E. Karabacak. "Investigation of the effects of boron additives on the performance of engine oil." *Tribology Transactions* 57, no. 4 (2014): 740-748.
- [25] Rashidi, Alimorad, Hojjat Ahmadi, Seyed Saeid Mohtasebi, and Mahnaz Pourkhalil. "Thermal and rheological properties of oil-based nanofluids from different carbon nanostructures." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 48 (2013): 178-182.
- [26] Dinesh, R., MJ Giri Prasad, R. Rishi Kumar, N. Jerome Santharaj, J. Santhip, and AS Abhishek Raaj. "Investigation of tribological and thermophysical properties of engine oil containing nano additives." *Materials Today: Proceedings* 3, no. 1 (2016): 45-53.
- [27] Lee, Jaekeun, Sangwon Cho, Yujin Hwang, Changgun Lee, and Soo H. Kim. "Enhancement of lubrication properties of nano-oil by controlling the amount of fullerene nanoparticle additives." *Tribology Letters* 28, no. 2 (2007): 203-208.
- [28] Lee, Jaekeun, Sangwon Cho, Yujin Hwang, Han-Jong Cho, Changgun Lee, Youngmin Choi, Bon-Chul Ku et al. "Application of fullerene-added nano-oil for lubrication enhancement in friction surfaces." *Tribology International* 42, no. 3 (2009): 440-447.
- [29] Jeng, Yeau-Ren, Yao-Huei Huang, Ping-Chi Tsai, and Gan-Lin Hwang. "Tribological properties of carbon nanocapsule particles as lubricant additive." *Journal of tribology* 136, no. 4 (2014): 041801.
- [30] Zin, V., F. Agresti, S. Barison, L. Colla, E. Mercadelli, M. Fabrizio, and C. Pagura. "Tribological properties of engine oil with carbon nano-horns as nano-additives." *Tribology Letters* 55, no. 1 (2014): 45-53.
- [30] Ajay Vardhaman, B. S., M. Amarnath, J. Ramkumar, and Prabhat K. Rai. "Experimental investigations to enhance the tribological performance of engine oil by using nano-boric acid and functionalized multiwalled carbon nanotubes: A comparative study to assess wear in bronze alloy." *Journal of Materials Engineering and Performance* 27, no. 6 (2018): 2782-2795.

- [32] Ettefaghi, Ehsan-o-llah, Hojjat Ahmadi, Alimorad Rashidi, and Seyed-Saeid Mohtasebi. "Investigation of the anti-wear properties of nano additives on sliding bearings of internal combustion engines." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 14, no. 5 (2013): 805-809.
- [33] Ahmadi, Nassim, Seyfolah Saedodin, and Seyed Hadi Rostamian. "Experimental investigation of rheological behavior of fullerene/hydraulic oil nanofluid." *Chemical Papers* 74, no. 11 (2020): 3963-3973.
- [34] Rostamian, Seyed Hadi, Seyfolah Saedodin, Seyed Abbas Asgari, and Amir Hasan Salarian. "Effect of C60-SiO₂ hybrid nanoparticles on thermophysical and tribological properties of a multigrade engine oil: an experimental study." *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry* 147, no. 1 (2022).
- [35] Greenberg, R., G. Halperin, I. Etsion, and Reshef Tenne. "The effect of WS₂ nanoparticles on friction reduction in various lubrication regimes." *Tribology Letters* 17, no. 2 (2004): 179-186.
- [36] Gullac, Burak, and Ozgen Akalin. "Frictional characteristics of IF-WS₂ nanoparticles in simulated engine conditions." *Tribology Transactions* 53, no. 6 (2010): 939-947.
- [37] Vats, Bhavya Nidhi, and Monika Singh. "Evaluation of tribological properties of graphene oxide dispersed paraffin oil." *Materials Today: Proceedings* 25 (2020): 557-562.