

بررسی تجربی تأثیر نانو ذرات بر خواص تریبولوژیکی زیست روانکارها

مصطفی وفايي زاده^{*}، دانشجو، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، m.vafaeizadeh@yahoo.com
عباس تقی پور^{*}، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، taghipoor@iaud.ac.ir

چکیده

دستیابی به ماده‌ای افزودنی با قابلیت بالا به منظور بهبود سطح کیفیت روان کار، افزایش طول عمر و کارایی آن، سازگاری با محیط زیست، قابلیت بازیافت و کاهش هزینه‌ی تولید آن از چالش‌های اساسی صنعت روان کاری کشور می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از روش آزمون پین روی دیسک، تأثیر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم به عنوان ماده افزودنی با غلظت‌های وزنی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد بر خواص تریبولوژیکی روان کار زیستی بررسی شد. بعد از انجام آزمون‌های سایش، ضریب اصطکاک و رسانایی گرمایی، بهترین نمونه انتخاب و به منظور پایش وضعیت روغن و آنالیز عناصر فرسایشی در موتورسیکلت تک سیلندر هوندا CDI-125 به صورت میدانی مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس آزمون‌های انجام شده مشخص شد نانو روان کار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی دارای بهترین نتایج است. به عبارتی افزایش غلظت وزنی نانو ذرات به عنوان افزودنی در روغن زیستی اپوکسی نتیجه مثبتی در بهبود خواص ضد سایشی و اصطکاک آن داشت. همچنین نتایج آنالیز عنصری نشان داد کاربرد مخلوط نانو روان کار تأثیر مثبتی در کاهش عناصر فرسایشی آهن، کروم، آلومینیم، قلع و نیکل نداشت ولی عناصر فرسایشی مس، سرب و مولیبدن کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: نانو ذرات، روغن زیستی، ضریب اصطکاک، خواص ضد سایشی.

Experimental Study of the Influence of Nanoparticles on the Tribological Properties of Biological Lubricants

M. Vafaeizadeh

Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

A. Taghipoor

Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

Abstract

To achieve a high-performance additive to improve lubricant quality, increasing its lifespan and efficiency, as well as environmental compatibility, recycling capability and reducing production costs and processing are among the key challenges facing the lubrication industry in the country. In this study, the effect of titanium dioxide nanoparticles as an additive with concentrations of 0.1, 0.2 and 0.5 wt% were investigated on tribological properties of lubricants using pin-disk test method. According to importance of condition monitoring on oil analysis and analysis element of erosion, after the wear tests, coefficient of friction and thermal conductivity coefficient, the best sample was chosen and used in the single-cylinder Honda CDI-125 motorcycle. According to the results of the tests, it was found that the nano-lubricant with a concentration of 0.5% by weight has the best performance. In other words, increasing the weight concentration of nanoparticles as an additive in epoxy biofuel has a positive effect on improving anti-wear properties and friction. Also the elemental analysis results showed that the application of a nano-lubricant did not have a positive effect on reducing the erosion elements of iron, chromium, aluminum, tin and nickel, but the erosion elements of copper, lead and molybdenum decreased.

Keywords: Nanoparticles, Bio Oile, Friction coefficient, Anti-wear properties.

برنامه‌ی روان کاری پایدار است که شاید کمی با تعاریف روان کاری قدیمی متفاوت باشد. روان کارهای پایه نفتی، متداول‌ترین نوع روان کارهای مورد استفاده در صنعت هستند اما به دلایل مختلف (عملکرد، هزینه و مسائل زیست محیطی)، سعی در محدودتر شدن استفاده از آن‌هاست. روان کارهای زیستی، یکی از پیشنهادهای موفق برای این جایگزینی است؛ روان کننده‌های زیستی اشاره به همه‌ی روان کننده‌هایی دارد که زیست دوست و غیر سمی برای بشر و سایر موجودات زنده به‌ویژه در محیط‌های آبی می‌باشد و مزایایی از قبیل تجدید پذیری، آلودگی کمتر، لزجت بالا، پایداری برشی بالا و هزینه‌ی دفع پایین دارد. امروزه از روغن‌های حیوانی و گیاهی با

۱- مقدمه

روان کاری، روشی است برای جلوگیری از اصطکاک و سایش سطوح متحرکی که روی یکدیگر قرار می‌گیرند. امروزه توسعه‌ی صنعت روان کاری یک بخش مهم از توسعه‌ی صنایع ماشینی و صنایع مربوط به آن شده است. علاوه بر این، با مطرح شدن بحث‌های جدیدی چون بهینه‌سازی مصرف و حفظ منابع تجدید ناپذیر و همچنین رعایت الزامات زیست محیطی، مطالعه بر روی روان کارها جایگاه خاصی در بین علوم پیدا کرده است. برای جلوگیری از فرسایش و از کارافتادگی زودرس ماشین‌آلات صنعتی و همچنین دسترسی به بیشترین بازده مکانیکی در حداقل زمان یک برنامه‌ی روان کاری مناسب جزء مهم‌ترین شرایط مورد نیاز خواهد بود. در قرن حاضر برنامه‌ی روان کاری مناسب، یک

^{*} نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: taghipoor@iaud.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳/۱۹

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۰۲

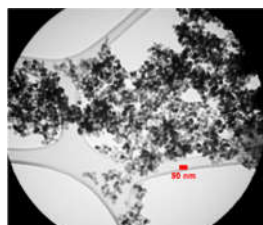
استفاده از واکنش استری شدن^۱ تلاش‌های زیادی در جهت تهیه‌ی روان‌کننده‌های زیستی شده است [۱]. یکی از روش‌های بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی روان‌کارهای پایه، بهره‌گیری از مواد افزودنی مختلف با خواص منحصربه‌فرد می‌باشد. در این راستا به‌منظور افزایش و بهبود عملکرد روان‌کننده‌ها از فناوری نانو نیز بهره‌برده شده است. در سال‌های اخیر استفاده از نانو مواد در روان‌کننده‌ها به دلیل بهبود خواص سطحی و قابلیت انتقال گرما، افزایش بازده موتور و کاهش هزینه‌های تعمیرات، به‌عنوان یک ایده‌ی نو بسیار موردتوجه واقع شده است [۲]. درواقع نانو ذرات در فاصله‌ی بین دو سطح درگیر شده و در منافذ بسیار ریز سطوح قرار می‌گیرند و خواص ضد اصطکاک و ضد سایش نسبتاً بالایی در سطوح ایجاد می‌نمایند. این توانایی نانو ذرات به کروی بودن آن‌ها مربوط می‌شود که بین دو سطح مانند ساجمه، قرارگرفته و موجب کاهش ضریب اصطکاک می‌شود [۳]. پژوهشگران انواع مختلفی از نانو مواد ساخته‌شده از مواد فلزی، آلی و معدنی را برای ساخت نانو روان‌کارها مورد استفاده قرار داده‌اند. مهم‌ترین مزیت استفاده از نانو مواد در روان‌کارها به دلیل اندازه‌ی کوچک آن‌ها می‌باشد. در محدوده‌ی نانومتری، تغذیه‌ی کامل سطح مشترک غلظتی صورت پذیرفته و همچنین سنتز ذرات کامپوزیت با ویژگی‌های مختلفی چون کاهش اصطکاک، سایش و خوردگی امکان‌پذیر می‌باشد. نانو افزودنی‌ها نسبت به افزودنی‌های معمول تا حدودی به دما حساس نیستند و واکنش‌های اصطکاکی در آن‌ها بسیار محدود می‌باشد. همچنین اندازه‌ی نانومتری این مواد موجب افزایش سطح تماس آن‌ها می‌گردد و در دمای محیط نیز کارآمد می‌باشند. مکانیسم ضد سایشی نانو افزودنی‌ها به دو صورت شکل می‌گیرد. نانو ذرات ممکن است ذوب شوند و به سطح اصطکاکی بپیوندند و یا این‌که با واکنش با سطح، تشکیل یک لایه‌ی محافظ دهند [۲].

در مطالعه‌ای که توسط حسینی و همکاران در سال ۲۰۱۳ صورت گرفت، به ارزیابی نقش افزودن نانو الماس‌ها روی ویژگی‌های روان‌های موتور و سایش بخش‌های داخلی موتور پرداختند. این محققین به این نتیجه رسیده‌اند که افزودن نانو الماس، موجب بهبود چشمگیر خواص عملکرد روان‌موتور نسبت به نمونه روان‌موتور بدون نانو ذرات الماس گردیده است [۳]. تراجانو و همکاران در سال ۲۰۱۴، تأثیر نانو ذرات حاوی اکسیژن را بر روی روان‌های گیاهی مورد مطالعه قرار دادند. به این منظور، از نانو ذرات اکسید مس و اکسید روی استفاده شد. برای تعیین رفتار تریبولوژیکی روان‌گیاهی حاوی نانو ذرات ذکر شده، از دستگاه رفت و برگشتی فرکانس بالا استفاده شد. نتایج نشان داد که افزودن نانو ذرات حاوی اکسیژن، ضمن افزایش خواص تریبولوژیکی روان‌های گیاهی، سبب افزایش قابلیت سازگاری روان‌های گیاهی با طبیعت می‌شود [۴]. هیو و همکاران در سال ۲۰۱۴، اثر نانو ذرات مس را روی سطوح اصطکاکی با استفاده از روش دینامیک مولکولی بررسی نموده‌اند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که تأثیر نانو ذرات مس روی کاهش اصطکاک در سرعت‌های پایین بیشتر از سرعت‌های بالا است که علت آن تشکیل فیلم نانو ذرات مس روی سطح می‌باشد [۵]. باس و همکاران در سال ۲۰۱۴، اثر افزودنی‌های بور را روی عملکرد

روغن‌موتور بررسی نمودند. این محققین از روغن‌های پایه حاوی دو نوع ترکیب بور با غلظت‌های مختلف استفاده نمودند. نتایج نشان‌دهنده‌ی تشکیل یک تریبو فیلم در شرایط مرزی یا روان کاری مخلوط است. همچنین نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که افزایش ترکیبات بور، باعث کاهش ضریب اصطکاک از ۱۰ تا ۵۰ درصد در شرایط آزمایشی متفاوت می‌گردد. غلظت بهینه‌ی ۴٪ برای باریک اسید و نیز نیتريد بور شش‌وجهی به دست آمد [۱]. باسکار و همکاران در سال ۲۰۱۵، به بررسی آزمایشگاهی رفتار روان‌کارهای زیستی حاوی نانو ذرات به روش چهار ساجمه پرداختند. در این پژوهش، اکسید مس (CuO)، دی‌سولفید تنگستن (WS₂) و دی‌اکسید تیتانیوم (TiO₂) به‌عنوان نانو ذرات افزودنی به روان‌کارهای زیستی در نظر گرفته شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که اکسید مس، مشخصه‌های رفتار تریبولوژیکی روان‌کارهای زیستی را بیش از سایر مواد افزودنی بهبود می‌بخشد [۲]. فیلیپ و کوالیو در سال ۲۰۱۶، خواص تریبولوژیکی روان‌کننده‌هایی که از دی‌اکسید تیتانیوم به‌عنوان ماده‌ی افزودنی در آن‌ها استفاده شده است را بررسی کردند. در این پژوهش، از یک روش جدید برای آماده‌سازی روان‌کننده‌ی حاوی نانوذرات دی اکسید تیتانیوم استفاده شد. نتایج نشان داد که روش جدید فرآوری روان‌کننده باعث می‌شود که اندازه‌ی متوسط نانو ذرات به ۵۰ تا ۱۰۰ نانومتر برسد و سطح آن‌ها از چربی‌دوست به چربی‌گریز تغییر می‌کند. این تغییرات سبب بهبود خواص تریبولوژیکی روان‌کننده‌های حاوی دی‌اکسید تیتانیوم می‌شود که با این روش پیشنهادی تهیه شده‌اند [۶]. آژمن و همکاران در سال ۲۰۱۸ پژوهشی تحت عنوان بررسی خواص تریبولوژیکی اکسید مس در روان‌کار با کمک دستگاه سایش پین روی دیسک انجام دادند. در این پژوهش آزمایش‌ها در سرعت لغزشی m/s ۰/۲، نیروی ۹/۸ N، فشار تماسی ۹/۳ GPa و مدت زمان ۶۰ دقیقه انجام شد. روغن مورد استفاده نیز روغن SAE40 بود. نتایج کاهش ضریب اصطکاک و میزان سایش را به ترتیب ۵۶٪ و ۴۸٪ نشان داد [۷]. لاد و همکاران در سال ۲۰۱۷ پژوهشی با عنوان مطالعه خواص تریبولوژیکی نانوذرات به عنوان بهبود دهنده به روغن موتور چند درجه ای انجام دادند. نانو ذرات مورد استفاده اکسید تیتانیوم با غلظت ۱/۵ درصد وزنی بود. دستگاه آزمون سایش مورد استفاده پین روی دیسک بود و متغیرهای مستقل شامل بارگذاری های ۴۰N، ۶۰N و ۹۰N وارد بر پین در سرعت‌های لغزشی ۱۰/۵ و ۱/۵ m/s بود. نتایج بهبود معنی دار خواص تریبولوژیکی روغن را نشان داد [۸]. تریودی و باهات نیز در سال ۲۰۱۷ پژوهشی تحت عنوان تأثیر روغن روان‌کار بر روی رفتار تریبولوژیکی در دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک انجام دادند. پژوهش جهت ارزیابی اصطکاک و سایش مواد به کار رفته در سیلندر و رینگ پیستون موتور چهار زمانه انجام شد. آزمون‌ها تحت بار ثابت، نیروی ۱۴۰N و مدت زمان ۱۰۵ دقیقه انجام شد. نتایج کاهش اصطکاک و سایش برای مخلوط‌های نانو روان‌کار را نشان داد [۹]. با توجه به مزایای روان‌های زیستی و نانو ذرات در روان‌کارها، بررسی تأثیر نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر خواص تریبولوژیکی روان‌کننده ضروری به نظر می‌رسد.

^۱ transesterification

ذرات نمی‌توانند سطوح اصطکاکی را به‌طور کامل پوشش بدهند و در نتیجه عملکرد خوبی ندارند. بنابراین غلظت مورد استفاده باید در حد بهینه باشد که در اکثر پژوهش‌های قبلی، غلظت در محدوده ۰/۱ تا ۵/۰ wt% به‌عنوان غلظت بهینه نانو ذرات بیان شده است [۱۲]. به همین خاطر در این پژوهش جهت بررسی اثر نانو ذرات از غلظت‌های وزنی ۰/۱، ۰/۲ و ۵/۰ wt% استفاده شد.



شکل ۱- تصویر TEM نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم [۱۳]

۳-۲- روش ساخت نانو سیال و بررسی پایداری

به دلیل اهمیت موضوع پراکندگی و پایداری نانومواد در سیال پایه برای روغن‌های روان‌کار، ساخت و دستیابی به یک نانوسیال پایدار و مناسب برای کاربردهای صنعتی بزرگترین چالش است. برای پراکنده کردن نانو ذرات درون سیال پایه و دستیابی به یک نانوسیال پایدار از سورفکتانت Span 80 و حمام آلتراسونیک استفاده شد. نمونه‌ها برای مدت زمان ۳۰ دقیقه تحت امواج آلتراسونیک قرار گرفتند. امواج حمام آلتراسونیک می‌توانند پیوندهای بین تکه‌های کلوخه شده را بشکنند و باعث افزایش کیفیت محلول شوند. تصویر حمام آلتراسونیک در شکل ۲ نشان داده شده است. در این پژوهش، سورفکتانت و نانو ذرات با نسبت ۱:۱ و نانو ذرات تیتانیوم با غلظت‌های مختلف ۰/۱، ۰/۲ و ۵/۰ درصد وزنی به روغن پایه افزوده شد. بدین منظور برای توزین نمونه‌ها از ترازوی دیجیتال آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم استفاده شد (شکل ۳).



شکل ۲- حمام آلتراسونیک مورد استفاده در این پژوهش



شکل ۳- ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مشخصات روغن پایه

در این پژوهش، از روغن سویا که یک روغن گیاهی مهم و پرکاربرد می‌باشد به‌عنوان روغن پایه استفاده شد. روغن‌های گیاهی، تجدید پذیر و دوست‌دار محیط زیست هستند که جایگزین مواد پتروشیمی در برخی کاربردها شده‌اند. مشخصات فیزیکی این روغن در جدول ۱ ذکر گردیده است. روغن‌های سویا حاوی مقادیر بالای اسید چرب هستند که می‌توان به اسید اپوکسی چرب تبدیل شوند. با توجه به اینکه این روغن جزء روغن‌های پرمصرف می‌باشد نیاز به افزایش طول عمر و همچنین بهبود خواص روان کاری آن دارد.

۲-۲- مشخصات نانو مواد

نانوذره انتخابی در این پژوهش نانوذره دی‌اکسید تیتانیوم از نوع آناتاس بود. دی‌اکسید تیتانیوم به‌صورت ذرات کروی با قطر ۲۵-۱۰ نانومتر و خلوص ۹۹٪ می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۱- مشخصات فنی^۱ روغن مورد استفاده در پژوهش [۱۰]

ویژگی‌ها	
لزجت سینماتیکی در دمای ۲۵°C (m ² /s)	۵۰۰±۲۰
شکل ظاهری	مایع شفاف مایل به زرد
چگالی (kg/m ³)	۹۹۴
نقطه‌ی اشتعال (°C)	۲۲۷

جدول ۲: مشخصات فنی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم [۱۱]

اندازه قطر (نانومتر)	۱۰-۲۵
سطح ویژه (m ² /gr)	۲۴۰-۲۰۰
شکل هندسی پودر	کروی
رنگ	سفید
چگالی (gr/cm ³)	۳/۹

شکل ۱ تصویر TEM نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. مهم‌ترین ویژگی برای انتخاب این نانو مواد ساختار کروی بودن آن‌ها می‌باشد زیرا نانو ذرات با ساختار کروی خواص تریبولوژیکی بهتری از خود نشان می‌دهند و با نفوذ به خلل و فرج سطوح و پر کردن ناهمواری‌ها به دلیل کوچکی و سطح ویژه زیاد به‌سادگی روی هم می‌لغزند و باعث کاهش سایش، اصطکاک و کاهش انرژی مصرفی و تولید دما می‌شوند. غلظت نانو ذرات تأثیر زیادی در عملکرد نانو روان کارها دارد، به‌گونه‌ای که غلظت‌های بالای ۵/۰ wt% موجب رسوب ذرات بر روی قطعات شده و ذرات بزرگ‌تر همانند ناخالصی‌ها موجب ایجاد خراش بر روی سطوح شده و اصطکاک افزایش می‌یابد. همچنین در غلظت‌های خیلی پایین و کم‌تر از ۵/۰ wt% نانو

^۱Data Sheet

۵-۲ - آزمون تعیین رسانایی گرمایی

برای انجام آزمون رسانایی گرمایی از یک دستگاه با نام تجاری KD2-Pro ساخت شرکت Decagon، استفاده گردید. این دستگاه یک وسیله ی پرتابل است که بر اساس استاندارد مرجع EN55022:1987 از روش منبع گرمایی خط گذرا برای اندازه گیری رسانایی استفاده می کند (شکل ۵).



شکل ۵- دستگاه تعیین رسانایی گرمایی

۶-۲ - آزمون آنالیز عنصری

پس از انجام آزمون ها، با توجه به نتایج حاصل، مخلوط نانو روان کاری که نتایج بهتری داشت، تعیین و جهت ارزیابی عملکرد میدانی در موتورسیکلت تک سیلندر هندتا CDI-125 استفاده شد. علت انتخاب این موتورسیکلت به خاطر کاربرد فراوان آن در سطح شهر دزفول می باشد. برای پراکنده کردن نانو ذرات درون سیال پایه و دستیابی به یک نانوسیال پایدار همانند بخش ۲-۳ از سورفکتانت Span 80 با نسبت ۱:۱ با غلظت نانو ذرات و حمام آلتراسونیک به مدت ۳۰ دقیقه استفاده شد. پس از آماده شدن مخلوط نانو روان کار ابتدا از موتورسیکلت تک سیلندر هندتا CDI-125 که بیش از سه ماه با روغن ایرانول ۶۰۰۰ استفاده کرده بود به دقت نمونه گیری شد. بدین منظور جهت اطمینان، در ابتدا بخشی از روغن تخلیه و از قسمت میانی روغن خروجی به حجم ۳۰۰cc نمونه گیری شد. سپس مخزن روغن موتور و مسیرهای روان کاری با بنزین شستشو و مخلوط نانو روان کار تهیه شده درون آن ریخته شد و پس از سه ماه کارکرد موتورسیکلت، مجدداً نمونه گیری - های لازم با دقت انجام و پس از انجام آزمون آنالیز عنصری نتایج آن با روغن معمول یعنی روغن ایرانول ۶۰۰۰ مورد استفاده در موتور مذکور مقایسه و تحلیل شد.

۳- نتایج

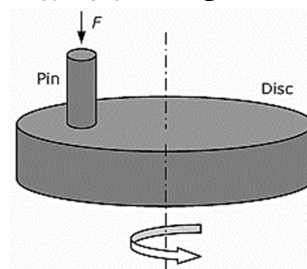
۱-۳ - نتایج آزمون رسانایی گرمایی

نتایج حاصل از این آزمون در جدول ۴ ذکر شده است. با توجه به نتایج حاصل با افزایش میزان نانو ذرات جامد در روان کار، رسانایی گرمایی بیشتر شد. این افزایش برای نانو روان کارها با غلظت ۰/۱ و ۰/۲ wt% نسبت به روغن پایه به ترتیب ۰/۶۱٪، ۰/۶۱٪ و ۱/۸۵٪ بود (شکل ۶). افزایش رسانایی گرمایی با افزایش میزان نانو ذرات در سیال، مربوط به افزایش سطح ویژه نانو ذرات می باشد که فاصله ی ذرات در سیال کم و امکان قرارگیری اتمها در کنار هم و تشکیل ساختار خوشه ای فراهم می شود، این ساختار همانند یک مبادله کن لوله و پوسته عمل می کند که در آن نانو ذرات حکم لوله و سیال روان

پایداری استاتیک نانو سیالات ساخته شده به صورت دیداری مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور همه نمونه های ساخته شده درون ظروف شیشه ای کاملاً شفاف ریخته شده و برای مدت زمان ۳ ماه در یک محیط کاملاً ساکن نگهداری شدند و روند تغییرات ایجاد شده در آن ها به صورت دوره ای و پیوسته مشاهده و ثبت گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که افزودن نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم به روغن هیچ گونه تغییر حالتی در آن ایجاد نکرد. از طرف دیگر با گذشت زمان هیچ گونه رسوب و تغییر فازی مشاهده نشد که بیانگر پایداری بسیار خوب این نانو سیال می باشد.

۴-۲ - آزمون سایش پین روی دیسک

دستگاه آزمون سایش، دستگاهی است که برای پیش بینی رفتار تریبولوژیکی مواد و آلیاژهای مهندسی در شرایط عملیاتی به کار می رود. این تجهیز آزمایشگاهی، سایش و ضریب اصطکاک نمونه را در اثر تماس چرخشی بین پین و نمونه، در محیط های خشک، سیال روان کار و دمای بالا محاسبه و ذخیره می نماید. این قابلیت وجود دارد که نمونه ی سایشی به عنوان پین و جسم ساینده به عنوان دیسک نیز قرار گیرد. تصویر شماتیکی از دستگاه پین روی دیسک در شکل ۴ نشان داده شده است. مشخصات فنی دستگاه نیز در جدول ۳ ذکر شده است.



شکل ۴- تصویر محل قرارگیری پین / گلوله و نمونه سایش، مسیر سایش، جهت چرخش

جدول ۳- مشخصات فنی دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک [۱۴]

۱-۳۰۰	سرعت چرخش نگه دارنده (rpm)
۶-۱۰	قطر پین (mm)
۳۰-۶۰	قطر دیسک (mm)
۲۰-۵۰	قطر مسیر سایش (mm)
۵۲۱۰۰ رولبرینگ	جنس پین
ck45	جنس دیسک
۰-۱۰۰	نیروی عمودی (N)
۰-۱۰۰	نیروی اصطکاک (N)

پین ها از جنس فولاد بلبرینگ طراحی و سنگ مغناطیس زده شد تا کمترین زبری سطح را داشته باشد، دیسک ها نیز از جنس CK45 ساخته شد و سنگ مغناطیس زده شد تا بتوان از دو طرف دیسک استفاده نمود، فیسکچر طراحی شده نیز حجم مشخصی از سیال درون خود جای می دهد و طراحی آن طوری می باشد که بتوان دیسک های مورد استفاده را ثابت کرده و آزمایش را در حضور سیال روان کننده انجام داد.

۲-۳- آزمون اصطکاک و سایش

این آزمون با استفاده از دستگاه سایش پین روی دیسک در دمای محیط، سرعت دورانی ۱۵۰rpm و نیروی وارد بر پین ۹۰N انجام شد. همان‌گونه که اشاره شد، مسافت در نظر گرفته‌شده برای پیمودن پین روی دیسک نیز ۱۱۳۰ متر در نظر گرفته شد. قبل از انجام آزمون نمونه پین‌ها و دیسک‌ها با ترازویی با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن و پس از اتمام آزمون نیز نمونه‌ها با استون و الکل شسته شد و بعد از خشک نمودن نمونه‌ها دوباره توزین گردید. بر اساس اختلاف وزن حاصل، میزان سایش پین‌ها و دیسک‌ها مشخص شد. نمودار تغییرات ضریب اصطکاک برحسب مسافت پیموده شده نیز توسط نرم‌افزار دستگاه ثبت که در ادامه به تحلیل آن‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۲-۱- تغییرات ضریب اصطکاک

در شکل‌های ۷ تا ۱۰ تغییرات ضریب اصطکاک برحسب مسافت پیموده شده به ترتیب برای روغن پایه و مخلوط‌های نانو روان‌کار به ترتیب با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵wt% در سرعت ۱۵۰rpm و نیروی ۹۰N وارد بر پین نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷ محدوده‌ی تغییرات ضریب اصطکاک برای روغن پایه بین ۰/۰۴۵ تا ۰/۰۹۷ می‌باشد. میانگین این ضریب حدود ۰/۰۶۳ ثبت شد. این تغییرات برای مخلوط نانو روان‌کار با غلظت ۰/۱wt% نیز در محدوده‌ی بین ۰/۰۷۷ تا ۰/۱۲۵ بود، میانگین آن‌ها ۰/۰۹۱ ثبت شد (شکل ۸) که در مقایسه با روغن پایه افزایش یافته است. با افزایش غلظت نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم مطابق شکل ۹ برای مخلوط نانو روان‌کار با غلظت ۰/۲wt% ضریب اصطکاک کاهش و محدوده‌ی این تغییرات بین ۰/۰۵۲-۰/۱۱۵ بود که میانگین ۰/۰۶۱ برای این مخلوط در نظر گرفته شد.

مطابق شکل (۱۰) نیز این تغییرات برای مخلوط روان‌کار با غلظت ۰/۵wt% بین ۰/۰۵-۰/۱ به دست آمد که مقدار میانگین ۰/۰۵۸ ثبت شد. با توجه به نتایج حاصل از آزمون، میانگین تغییرات ضریب اصطکاک برای نانو روان‌کارها با غلظت ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی در مقایسه با روغن پایه به ترتیب ۴۴/۴۵٪، ۳/۱۷٪، ۳/۱۷٪ کاهش و ۷/۹۳٪ کاهش داشته است. با توجه به نتایج حاصل، ضریب اصطکاک نانو سیال با غلظت ۰/۱wt% در مقایسه با روغن پایه افزایش داشته است. علت آن می‌تواند ترکیب ناهمگن نانو ذرات جامد در روان‌کار باشد که ذرات جامد به‌عنوان جسم ساینده بین سطوح تماسی عمل کرده و سبب افزایش ضریب اصطکاک شده است. البته این یافته با گزارش کاویاراسو و واسانتان [۱۹] که از غلظت ۰/۱ درصد وزنی برای نانو ذرات مس و اکسید مس استفاده نمودند، هم‌خوانی ندارد.

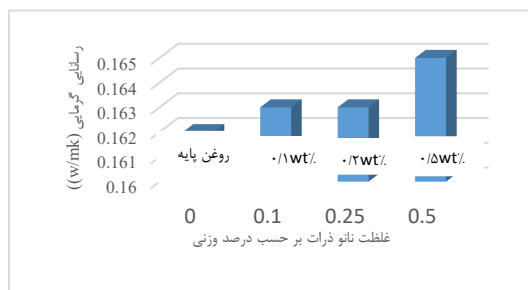
بر اساس یافته آن‌ها برای نانو ذرات مس و اکسید مس ضریب اصطکاک به ترتیب ۵۴٪ و ۲۲٪ کاهش یافت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده با افزایش غلظت روغن به میزان ۰/۲ و ۰/۵wt% ضریب اصطکاک کاهش یافت. علت آن می‌تواند یکی از نقش‌های نانو ذرات باشد که با پوشاندن سطوح زیر و پر کردن خلل و فرج سطوح لغزشی، لایه‌ی محافظی بین دو سطح ایجاد می‌کند. این یافته با گزارش رشید [۲۰] مطابقت دارد؛ او در پژوهش خود تحت عنوان بررسی عملکرد نانو روان‌کار از نظر انتقال گرما و خواص تریبولوژیکی در یک

کار مثل پوسته تبادل گرما می‌کنند و یا به نحوی دیگر رسانایی گرمایی را افزایش می‌دهد.

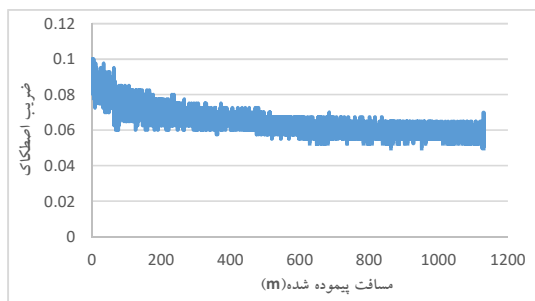
یکی از فواید کاربرد نانو ذرات در سیال کمک به بهبود رسانایی گرمایی آن می‌باشد. با توجه به اینکه جامدات فلزی و اکسیدهای آن‌ها، رسانش بالاتری نسبت به سیالات دارند، ایده‌ی پراکنده‌سازی ذرات جامد درون سیال، برای بالا بردن رسانش سیال موردتوجه قرار گرفته است. ژوان و لی [۱۵و۱۶] در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که به دلیل حرکات بی‌نظم نانو ذرات که تبادل انرژی در سیال را شتاب می‌دهند، توزیع حرارتی افزایش یافته و سبب افزایش انتقال گرما در نانو سیالات می‌شود، بنابراین رسانایی گرمایی نانو سیال در مقایسه با سیال پایه بیشتر می‌شود. بهبود رسانایی گرمایی روغن روان کار را می‌توان یک نکته‌ی مثبت در ارتباط با بهبود خواص روان کاری روغن پایه در نظر گرفت. این یافته با نتایج حاصل از پژوهش هادی و محمد [۱۷] [تطابق دارد. آن‌ها در پژوهش خود بهبود رسانایی گرمایی نانو روان کارها با نانو ذرات گرافیت و اکسید روی را گزارش نمودند. البته تأثیر نانو ذرات گرافیت نسبت به اکسید روی در بهبود رسانایی گرمایی بیشتر بوده است. همچنین اتفاقی و همکاران [۱۸] در پژوهش خود گزارش نمودند، رسانایی گرمایی نانو روان کارها با افزایش غلظت نانو ذرات اکسید مس افزایش یافت. این بهبود برای نانو روان کار با غلظت ۰/۱wt% نسبت به روغن پایه ۳٪ بود. نتایج گزارش کاویاراسو و واسانتان [۱۹] نیز که در پژوهش خود از نانو ذرات مس و اکسید مس با غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۰۵ درصد وزنی در ترکیب با روغن پایه SAE20W40 استفاده نمودند، حاکی از افزایش رسانایی گرمایی نانو سیال‌ها به میزان ۴/۲٪ و ۲/۱٪ به ترتیب برای مس و اکسید مس دارد.

جدول ۴- میزان رسانایی گرمایی نانو سیال‌ها با غلظت‌های مختلف

درصد وزنی نانو ذرات	رسانایی گرمایی k (W/m.K)
۰	۰/۱۶۲
۰/۱	۰/۱۶۳
۰/۲	۰/۱۶۳
۰/۵	۰/۱۶۵



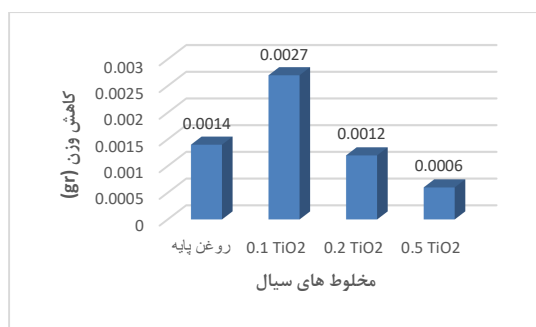
شکل ۶- تغییرات رسانایی گرمایی



شکل ۱۰ - ضریب اصطکاک نانو سیال (۰/۵wt%)

۳-۲-۲- کاهش وزن دیسک‌ها

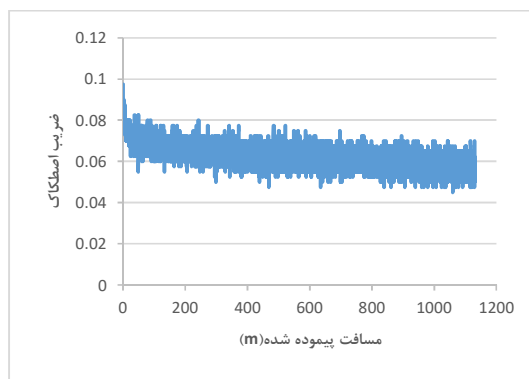
در شکل ۱۱ نمودار تغییرات کاهش وزن دیسک‌های مورد استفاده در این آزمون برای روغن پایه و مخلوط‌های نانو روان کار با غلظت‌های وزنی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵wt% نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل کم‌ترین میزان سایش دیسک‌ها مربوط به مخلوط روان کار با غلظت ۰/۵wt% می‌باشد که البته با توجه به اینکه کم‌ترین میزان اصطکاک مربوط به همین مخلوط بود انتظار می‌رفت که کم‌ترین میزان سایش نیز ایجاد شود. از طرفی با توجه به نتایج حاصل که در بخش قبلی به آن اشاره شد، ضریب اصطکاک مخلوط نانو روان کار با غلظت ۰/۱ درصد وزنی نسبت به روغن پایه افزایش داشت و به تبع آن میزان سایش دیسک‌ها نیز زیاد شد، این میزان افزایش در مقایسه با روغن پایه ۹۲/۸۶٪ بود. میزان کاهش وزن دیسک‌ها در اثر سایش برای مخلوط‌های نانو روان کار با غلظت‌های وزنی ۰/۲ و ۰/۵wt% نیز نسبت به روغن پایه به ترتیب ۷/۱۴٪ و ۵۷/۱۴٪ بود. با توجه به نتایج حاصل از آزمون سایش پین روی دیسک برای مخلوط‌های مختلف نانو سیال در سرعت ثابت ۱۵۰rpm نشان داد مخلوط‌های حاوی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم نسبت به روغن پایه به‌جز مخلوط حاوی ۰/۱ درصد وزنی، ضریب اصطکاک کمتر و به تبع آن سایش کم‌تری دارد. بنابراین می‌توان ادعا کرد که کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در روان کار به‌عنوان افزودنی می‌تواند خاصیت ضد سایشی آن‌ها را بهبود ببخشد.



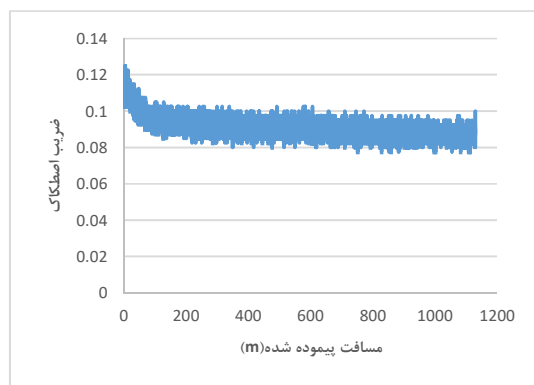
شکل ۱۱ - کاهش وزن دیسک‌ها

این یافته با نتایج حاصل از پژوهش احمدعلی و همکاران [۲۱] مطابقت دارد. آن‌ها در پژوهش خود گزارش نمودند استفاده از نانو ذرات دی‌اکسید آلومینیم و دی‌اکسید تیتانیوم در مخلوط روان کار در مقایسه با روغن پایه میزان سایش را به ترتیب ۲۱٪ و ۲۹٪ کاهش می‌دهد. اینگول و همکاران نیز در پژوهش خود گزارش نمودند استفاده از نانو

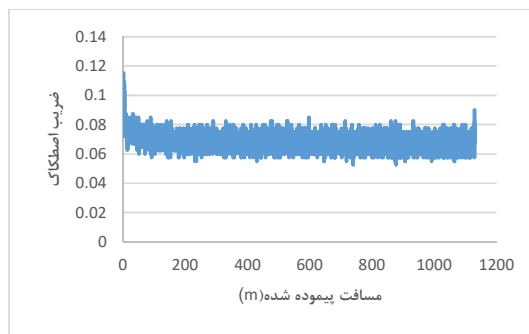
موتور اشتعال تراکمی که از نانوذره‌ی گرافن با اندازه‌ی ۶۰ نانومتر و غلظت ۰/۰۱ درصد وزنی استفاده نمود، کاهش ۲۱٪ ضریب اصطکاک و ۲۳٪ رسانایی گرمایی را گزارش نمود. همچنین احمدعلی و همکاران [۲۱] در پژوهش خود تحت عنوان بهبود خواص تریبولوژیکی مجموعه رینگ و پیستون در موتور اتومبیل با کمک نانو مواد دی‌اکسید آلومینیم و دی‌اکسید تیتانیوم به‌عنوان افزودنی در روان کار با غلظت‌های ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد وزنی گزارش نمودند، کاربرد این نانو ذرات سبب کاهش ضریب اصطکاک، کاهش افت توان و فرسایش شده است. همچنین غلظت بهینه‌ی نانو ذرات در این پژوهش ۰/۲۵ درصد وزنی گزارش شده است.



شکل ۷ - تغییرات ضریب اصطکاک سیال پایه



شکل ۸ - تغییرات ضریب اصطکاک نانو سیال (۰/۱wt%)



شکل ۹ - ضریب اصطکاک نانو سیال (۰/۲wt%)

۳-۳- آزمون آنالیز عنصری

با توجه به نتایج حاصل از آزمون‌ها در این پژوهش بهترین نمونه‌ی نانو روان‌کار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی از نانوذرات دی اکسید تیتانیوم انتخاب شد. جهت بررسی میدانی نقش روغن زیستی در ترکیب با نانوذرات دی اکسید تیتانیوم، یک لیتر از این روغن با نانوذرات دی اکسید تیتانیوم با غلظت ۰/۵ درصد وزنی ترکیب شد. نتایج آنالیز عنصری روغن معمول، روغن ایرانول ۶۰۰۰ و نانو روغن زیستی در جدول ۵ ذکر شده است. به‌طور کلی می‌توان مواد خارجی موجود در روغن را به سه دسته تقسیم‌بندی نمود:

- (۱) افزودنی‌های روغن که هر یک، برای منظور خاص و با حد و مقدار معین و استاندارد به روغن تولیدی در کارخانه اضافه می‌گردد.
- (۲) آلاینده‌ها: مواد خارجی از قبیل ضدیخ، سوخت، گردوخاک و آب که وارد روغن می‌شوند.
- (۳) عناصر فرسایشی، در هنگام کار اجزای موتور، مقادیر فلزات سایشی میکروسکوپی به روغن اضافه می‌شود. در شرایط عادی کار موتور، سایش به آهستگی صورت می‌پذیرد و مقدار عناصر سایشی در روغن به‌طور پیوسته و آرام زیاد می‌شود. نمونه‌گیری‌های منظم و متوالی و ارزیابی مقدار عناصر فرسایشی این نمونه‌ها، تغییرات غیر متعادل را مشخص خواهد کرد و از این طریق می‌توان به علل احتمالی وجود آن‌ها پی برد.

هر یک از این پارامترها نه‌تنها مبین عیوب موجود در ماشین بوده، بلکه تعیین‌کننده امکان یا عدم امکان ادامه استفاده از روغن موجود در ماشین نیز هستند [۲۶]. در هنگام کار تجهیز، مقادیر میکروسکوپی فلزات سایشی به روغن اضافه می‌شود. در شرایط طبیعی، سایش به آهستگی صورت گرفته و مقدار عناصر سایشی در روغن به‌طور پیوسته و آرام و با افزایش زمان کارکرد روغن زیاد می‌شود. نمونه‌گیری‌های منظم و متوالی و ارزیابی مقدار عناصر فرسایشی این نمونه‌ها، تغییرات غیرمتعادل را مشخص خواهد کرد و از این طریق می‌توان به علل احتمالی آن پی برد.

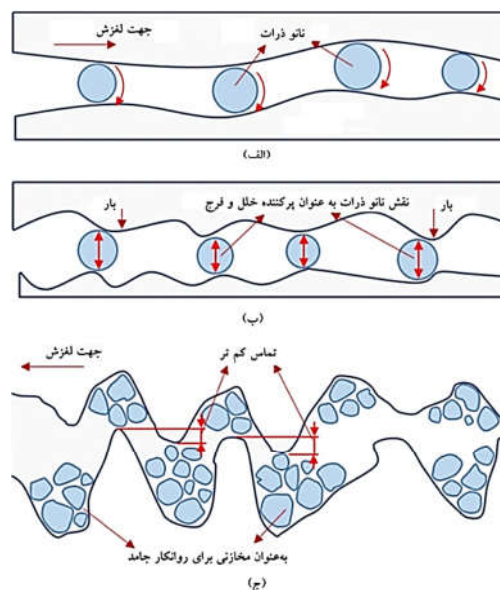
جدول ۵- نتایج آزمون آنالیز عنصری

عناصر فرسایشی	نام عنصر	روغن حاوی نانو ذرات	روغن معمول
	Fe	۲۹۱	۱۶۱
	Cr	۵/۵	۳/۷
	Al	۴۸/۹	۳۳/۹
	Cu	۶	۷/۹
	Pb	۱	۱/۲
	Sn	۱۵/۵	۰
	Ni	۲/۸	۱/۹
	Ti	۳۱۸	۲/۴
	Ag	۰	۰
افزود	Mo	۱/۷	۳/۲
	Zn	۲۳۰	۱۷۳
	P	۲۰۳	۲۶۳

ذرات دی اکسید تیتانیوم با غلظت ۰/۲۵ درصد وزنی ضریب اصطکاک کاهش و مقدار میانگین آن در این غلظت ۰/۰۹ ثبت شد. همچنین افزایش غلظت نانوذره در ترکیب با روغن پایه سبب کلوخه‌ای شدن نانو ذرات و رسوب آن‌ها بر روی سطوح ساییده شده شد، به‌گونه‌ای که با افزایش غلظت تا ۲ درصد وزنی میزان ضریب اصطکاک نسبت به روغن پایه افزایش یافت [۲۲]. ژیا و همکاران [۲۳] نیز در پژوهش خود که از نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در ترکیب با امولسیون آب-روغن استفاده کردند، کاهش ضریب اصطکاک گزارش شد؛ همچنین در این پژوهش این نتیجه حاصل شد که کاهش ضریب اصطکاک می‌تواند در نتیجه‌ی کاهش زبری سطوح باشد و اگر زبری سطوح بیش‌ازاندازه کم شود، استفاده از نانو ذرات نمی‌تواند نقش مثبتی در روان کاری ایفا کند، چون‌که ذرات نانو نمی‌تواند در خلل و فرج سطوح تماس جای‌گیر شود و خود به‌عنوان جسم ساییده عمل می‌کند. طبق نظر

لی^۱ و همکاران [۲۴] بهبود خواص فشار پذیری و ضد سایشی نانو روان کارها ناشی از سه اثر نانو ذرات می‌باشد که عبارت‌اند از:

- ذرات نانو همانند غلتک‌هایی بین دو سطح اصطکاکی عمل نموده و تماس بین دو سطح را کاهش می‌دهد.
- ذرات نانو با پوشاندن سطوح زبر، لایه‌ی محافظی بین سطوح ایجاد می‌کند.
- ذرات نانو اضافه‌شده به روغن اثر مرمتی دارد، به‌گونه‌ای که با پر کردن خلل و فرج و خراشیدگی‌ها جرم ازدست‌رفته را جبران می‌کند و زبری سطوح را کاهش می‌دهد. این موارد به‌صورت نمادین در شکل ۱۲ نشان داده‌شده است.



الف: تأثیر غلظتی، ب: نقش نانو ذرات به‌عنوان پرکننده خلل و فرج،

ج: تأثیر اصلاحی (ترمیمی)

شکل ۱۲ - سازوکار عملکرد نانو روان کارها بر روی سطوح

اصطکاکی [۲۵]

¹ Lee

الایزدهها	Ca	۳۹۶	۴۴۵
	Ba	۲۰۱	۹/۳
	Mg	۲۳/۷	۲۷/۳
	Si	۱۵/۵	۱۱/۴
	Na	۳/۶	۱/۲
	B	۰/۹	۰/۳

با توجه به نتایج حاصل از آنالیز عنصری مربوط به روغن معمول مورد استفاده در موتورسیکلت و مخلوط نانو روان کار زیستی نشان داد میزان عناصر فرسایشی آهن، کروم، آلومینیم، قلع، نیکل و تیتانیوم مربوط به مخلوط نانو روان کار زیستی در مقایسه با روغن معمول افزایش داشته است. با توجه به اینکه نانو ذرات مورد استفاده تیتانیوم بود افزایش این عنصر در مخلوط نانو روان کار طبیعی بود. اما با توجه به نتایج خوب حاصل از آزمون سایش و اصطکاک مربوط به مخلوط نانو روان کار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم، افزایش عناصر فرسایشی آهن، کروم، آلومینیم، قلع و نیکل در مخلوط نانو روان کار زیستی غیرمنتظره بود. دلایل مختلفی را می توان برای این موضوع در نظر گرفت. از جمله فرایند مربوط به تهیه مخلوط نانو روان کار که ممکن است مخلوط به درستی همگن و پایدار نشده باشد و نانو ذرات موجود در آن خود به عنوان جسم ساینده عمل کرده باشد که نتیجه آن افزایش عناصر فرسایشی بوده است. البته عناصر فرسایشی مس، سرب و مولیبدن کاهش یافت. با توجه به افزایش غیرعادی عناصر فرسایشی در روغن این امکان را فراهم می آورد تا نسبت به بررسی پارامترهای آن و سرویس و بازبینی اجزای موتور نظیر رینگها، پیستون و سیستم های جانبی موتور نظیر روان کاری و... اقدام نمود و این اقدامات بازبینی را تا زمان رفع مشکل ادامه داد. این موضوع نشان دهنده نیاز به اشراف کلی و تحلیل نتایج با دید باز و بررسی تمام پارامترهای تأثیرگذار بر روی نتایج آنالیز روغن اعم از تعویض روغن های احتمالی، ساعات کارکرد روغن، نحوه نمونه گیری می باشد مدنظر قرار بگیرد تا درک و نتیجه گیری بهتر و در نهایت تنظیم دستور کار صحیح که درواقع خروجی و هدف هرگونه آنالیز روغن است به درستی حاصل گردد.

۴- نتیجه گیری

هدف این پژوهش، بررسی تجربی تأثیر نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم بر رفتار تریبولوژیکی روغن زیستی سویای اپوکسی بود. به این منظور، از نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم نوع آناتاس به عنوان ماده ای افزودنی به روان کننده زیستی مذکور استفاده و با انجام آزمایش های لازم تأثیر آن بر رسانایی گرمایی، اصطکاک و سایش بررسی شد. غلظت نانو ذرات مورد استفاده در این پژوهش ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی بود. نتایج حاصل از آزمون ها شامل موارد ذیل می باشد:

- ترکیب نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم با روغن زیستی اپوکسی سویا سبب بهبود رسانایی گرمایی آن شد و افزایش غلظت وزنی نانو ذرات در ترکیب نیز تأثیر مثبتی داشت به گونه ای که این افزایش برای نانو روان کارها با غلظت ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵wt٪ نسبت به روغن پایه به ترتیب ۰/۶۱٪، ۰/۶۱٪ و ۱/۸۵٪ بود. با افزایش میزان نانو ذرات در سیال، به دلیل افزایش سطح ویژه نانو ذرات، فاصله ی

ذرات در سیال کم، امکان قرارگیری آنها در کنار هم و تشکیل ساختار خوشه ای فراهم شد، در این ساختار نانو ذرات به عنوان لوله و سیال روان کار مثل پوسته تبادل گرما کردند و سبب افزایش ضریب انتقال گرما شد.

- نتایج حاصل از آزمون اصطکاک، میانگین تغییرات ضریب اصطکاک برای نانو روان کارها با غلظت ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی در مقایسه با روغن پایه به ترتیب ۴۴/۴۵٪، ۴۴/۴۵٪، ۳/۱۷٪ کاهش و ۷/۹۳٪ کاهش داشت.
- به دلیل ترکیب ناهمگن نانو ذرات جامد با غلظت ۰/۱ درصد وزنی در روان کار ضریب اصطکاک نانو سیال با این غلظت در مقایسه با روغن پایه افزایش داشت. ذرات جامد به عنوان جسم ساینده بین سطوح تماسی عمل کرده و سبب افزایش ضریب اصطکاک شد.
- با توجه به نتایج حاصل از آزمون سایش، کمترین میزان سایش دیسک ها مربوط به مخلوط روان کار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی بود. با توجه به اینکه کمترین میزان اصطکاک نیز مربوط به همین مخلوط بود انتظار می رفت که کمترین میزان سایش نیز ایجاد شود.
- ضریب اصطکاک مخلوط نانو روان کار با غلظت ۰/۱ درصد وزنی نسبت به روغن پایه افزایش داشت و به تبع آن میزان سایش دیسک ها نیز زیاد شد، این میزان افزایش در مقایسه با روغن پایه ۹۲/۸۶٪ بود.
- میزان کاهش وزن دیسک ها در اثر سایش برای مخلوط های نانو روان کار با غلظت های وزنی ۰/۲ و ۰/۵wt٪ نیز نسبت به روغن پایه به ترتیب ۷/۱۴٪ و ۵۷/۱۴٪ بود.
- بر اساس آزمون های انجام شده (شامل ضریب اصطکاک، رسانایی گرمایی، میزان سایش) و نتایج حاصل برای چهار نمونه روغن، مشخص شد نانو روان کار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی دارای بهترین نتایج است. به عبارتی افزایش غلظت وزنی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم به عنوان افزودنی در روغن زیستی اپوکسی نتیجه مثبتی در بهبود خواص ضد سایشی آن داشت.
- نتایج آنالیز عنصری نشان داد کاربرد مخلوط نانو روان کار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی تأثیر مثبتی در کاهش عناصر فرسایشی آهن، کروم، آلومینیم، قلع و نیکل نداشت ولی عناصر فرسایشی مس، سرب و مولیبدن کاهش یافت.

۵- مراجع

- Baş H., and Karabacak Y. E., Investigation of the effects of boron additives on the performance of engine oil. *Tribology Transactions*, 57.4, pp. 740-748, 2014.
- Baskar S., Sriram G., and Arumugam S., Experimental Analysis on Tribological Behavior of Nano Based Bio-Lubricants using Four Ball Tribometer. *Tribology in Industry*, Vol. 37, No.4, pp.449-454, 2015.
- Sedaghat Hosseini M., Rostami M., and Mohammadi A., Study of Effects of Nano-Diamond as an Oil Additive on Engine Oil Properties and Wear Rate of the Internal Parts of Agricultural Tractors Engines, *Mechanical Engineering*, 57A, pp. 14443-14447, 2013.
- Trajano M. F., Moura E.I.F., Ribeiro K. S. B., and Alves S.M., Study of oxide nanoparticles as additives for vegetable lubricants. *Materials Research*, Vol. 17, No.5, pp. 1124-1128, 2014.

- oil-in-water lubricant, *Wear*, Vol. 376-377, Part A, pp.792-802, 2017.
- [24] Lee K., Hwang Y., Cheong S., Choi Y., Kwon L., Lee J., and Kim S.H., Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication, *Tribology Letters*. Vol. 35. pp. 127-131, 2009.
- [25] Zareh-Desari B., and Davoodi B., Assessing the lubrication performance of vegetable oil-based nano-lubricants for environmentally conscious metal forming Processes, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 135, pp. 1198-1209, 2016.
- [۲۶] بهزاد م. و میراحمدی ش.، عیب‌یابی در ماشین‌آلات از طریق آنالیز روغن و ذرات سایشی و تهیه نرم‌افزاری برای انجام آن، هفتمین همایش حمل‌ونقل ریلی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۹۳.
- [5] Hu Ch., Bai M., Lv J., Liu H., and JieLi X., Molecular dynamics investigation of the effect of copper nanoparticle on the solid contact between friction surfaces. *Applied Surface Science*, Vol. 321, pp. 302-309, 2014.
- [6] Filip I., and Covaliu C., Tribological Properties of the Lubricant Containing Titanium Dioxide Nanoparticles as an Additive. *Lubricants* Vol. 4, No.2, 2016.
- [7] Azman N.F., Samion S., Hakim Mat Sot M.N., Investigation of tribological properties of CuO/palm oil nanolubricant using pin-on-disc tribotester, *Green Materials* 6(1), pp.30-37, 2018.
- [8] Laad M., Ponnammam D., and Sadasivuni K.K., Tribological Studies of Nanomodified Mineral based Multi-grade Engine Oil *International Journal of Applied Engineering Research*, Volume 12, Number 11, pp. 2855-2861, 2017.
- [9] Trivedi H.K., Bhatt D.V., Effect of Lubricating Oil on Tribological behaviour in Pin on Disc Test Rig, *www.tribology.fink.rs*, Vol. 39, No. 1, pp. 90-99, 2017.
- [۱۰] کاتالوگ مشخصات فنی روغن سویای اپوکسی، شرکت دانش بنیان فن آوران شیمی سپاهان، شهرک علمی تحقیقاتی، اصفهان. [wwwhttp://fscoco.ir](http://fscoco.ir)
- [۱۱] Iranain Nanomaterials Pioneers Company, Third unit. No51.Sadaf No.5.Vakil Abad Blv. Mashhad City, Khorasan Province, Iran. Website: iranNanotech.com
- [۱۲] ابراهیمی قلعه تکی ا. و تقی پور ع.، انجام پایش وضعیت براساس آنالیز روغن و مقایسه تجربی و آزمایشگاهی آن با افزودنی نانو ذرات SiO_2 و Al_2O_3 و کاربرد آن در ماشین‌آلات دوار حساس، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، ۱۳۹۶.
- [13] Peng D.X., Kang Y., Hwang R.M., Shyr S.S., and Chang Y.P., Tribological properties of diamond and SiO_2 nanoparticles added in paraffin, *Tribol. Int.* Vol. 42, pp. 911-917, 2009.
- [۱۴] کاتالوگ دستگاه آزمون سایش، شرکت تجهیز صنعت نصر، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، مرکز رشد واحدهای فناور، www.tsnco.ir
- [15] Xuan Y., and Li Q., Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, pp. 58-64, 2000.
- [16] Xuan Y., and Li Q., Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 151-155, 2003.
- [17] Hadi N.J., and Mohamed D.J., The effect of nanoparticles on the flow and physical behavior of engine lubricant oil. Collage of Materials Engineering /Polymer and petrochemical industry Department Babylon University/Iraq, 2015.
- [18] Etefaghi E., Ahmadi H., Rashidi A., Mohtasebi S.S., and Alaei M., Experimental evaluation of engine oil properties containing copper oxide nanoparticles as a nanoadditive, *International Journal of Industrial Chemistry*, Vol.4, No. 28, 2013.
- [19] Kaviyarasu T., and Vasanthan B., IMPROVEMENT OF TRIBOLOGICAL AND THERMAL PROPERTIES OF ENGINE LUBRICANT BY USING NANO-MATERIALS, *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, Vol. 7, pp. 208-211, 2015.
- [20] Rasheed A.Kh., HEAT TRANSFER, TRIBOLOGY AND PERFORMANCE OF GRAPHENE NANOLUBRICANTS IN AN IC ENGINE, Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy, 2017.
- [21] Ahmed Ali M.K., Xianjun H., Mai L., Qingping C., Turkson R.F., and Bicheng Ch., Improving the tribological characteristics of piston ring assembly in automotive engines using Al_2O_3 and TiO_2 nanomaterials as nano-lubricant additives, *Tribology International*, Vol. 103, pp.540-554, 2016.
- [22] Ingole S., Charanpahari A., Kakade A., Umare S.S., Bhatt D.V., and Menghani J., Tribological behavior of nano TiO_2 as an additive in base oil, *Wear*, Vol. 301, pp. 776-785, 2013.
- [23] Xia W., Zhao J., Cheng X., Sun J., Wu H., Yana Y., Jiao S., and Jiang Zh., Study on growth behaviour of oxide scale and its effects on tribological property of nano- TiO_2 additive