نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۹، شماره ۳، پاییز۱۴۰۱، ص: ۱۰۱- ۱۱۴

J. Energy Conversion
Volume: 9, Issue: 3, 2022: 101-114

DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.6.1

بهبود خواص تریبولوژیکی روان‌کارها با افزودنی نانو ذرات اکسید مس

نادیا خرم‌شاهی بیات[۱]، عباس تقی‌پور[۲و*]

۱- دانشجو، گروه مهندسی مکانیک، واحددزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، nadia.khb@gmail.com
۲ *- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحددزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران ، taghipoor@iaud.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۶، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۰

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی تجربی نقش نانو ذرات اکسید مس در بهبود خواص تریبولوژیکی روان‌کار می‌باشد. این پژوهش شامل سه مرحله است. در مرحله اول نانو ذرات اکسید مس با درصدهای وزنی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ به عنوان افزودنی به روغن بهران سوپر توربو دیزل SAE 15W-40 اضافه شد. برای پراکنده کردن نانو ذرات در روان‌کار از حمام التروسونیک و همچنین برای پایداری سیال و جلوگیری از ته‌نشینی نانو ذرات جامد از سورفکتانت span80 استفاده گردید. در مرحله دوم آزمون‌های تجربی، شامل آزمون سایش با استفاده از دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک و آزمون رسانایی گرمایی انجام گرفت. در مرحله سوم نیز نتایج حاصل تحلیل و عملکرد مخلوط‌های نانو سیال با سیال پایه مقایسه گردید. نتایج این پژوهش کاهش مقادیر ضریب اصطکاک، کاهش میزان سایش و افزایش رسانایی گرمایی مخلوط‌های نانو روان‌کار در مقایسه با سیال پایه را نشان داد. بر اساس نتایج، کم‌ترین ضریب اصطکاک، کم‌ترین میزان سایش و بیشترین ضریب رسانایی گرمایی مربوط به مخلوط نانو روان‌کار حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانو ذرات اکسید مس می‌باشد. میزان کاهش ضریب اصطکاک این مخلوط نانو روان‌کار در مقایسه با روغن پایه ٪۳۷/۱، میزان کاهش سایش ٪۵۸/۳ و میزان افزایش رسانایی گرمایی در مقایسه با روغن پایه ٪۳/۸۴ بود. نتایج گویای نقش مثبت نانو ذرات اکسید مس به عنوان افزودنی در بهبود خواص تریبولوژیکی روان‌کار می‌باشد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** taghipoor@iaud.ac.ir

کلمات کلیدی: نانو ذرات اکسید مس، رسانایی گرمایی، ضریب اصطکاک، سایش، روان‌کار.

۱- مقدمه

در بسیاری از سیستم‌های مکانیکی، اصطکاک یکی از دلایل اصلی اتلاف انرژی است و استفاده از نانو ذرات به‌منظور کاهش این اتلافات یکی از پیشنهادهای مهندسان حوزه نانو روان‌کار می‌باشد. شناسایی افزودنی مناسب برای خواص روان‌کاری توسط افزودنی‌هایی که دارای ویژگی‌های، قیمت پایین، قابلیت دسترسی و کارایی باکیفیت بالاتری هستند، امری ضروری و حیاتی است. روان‌کارها با ایجاد یک لایه نازک مناسب روی سطوح دارای اصطکاک، آن‌ها را از یکدیگر جدا کرده، گرما و ذرات سایشی ایجاد شده را برطرف می‌نمایند. امروزه روغن‌ها وظایف متعددی دارند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به روان‌کاری قطعات به‌منظور کاهش میزان اصطکاک و سایش اشاره نمود. خواص روغن‌ها عمدتاً ناشی از افزودنی‌هایی است که به‌منظور بهبود و یا ایجاد خواص موردنیاز به آن‌ها افزوده می‌شود. واژه روان‌کاری به‌عنوان علم تسهیل نسبی سطوح در تماس با یکدیگر تعریف شده

نحوه استناد به این مقاله: نادیا خرم‌شاهی بیات، عباس تقی‌پور. بهبود خواص تریبولوژیکی روان‌کارها با افزودنی نانو ذرات اکسید مس. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۱; ۹ (۳) : ۱۰۱-۱۱۴. **DOR:** 20.1001.1.20089813.1401.9.3.6.1

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-27]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.6.1]

است و با موضوعاتی همچون فرسودگی، طراحی و جنس مواد در ارتباط است. عملکرد قوی یا ضعیف یک روغن روان‌کار به عملکرد مواد افزودنی آن بستگی دارد[۱]. خواص روغن‌ها عمدتاً ناشی از افزودنی‌هایی است که به‌منظور بهبود و یا ایجاد خواص موردنیاز به آن‌ها افزوده شده است. واژه روان‌کاری با موضوعاتی همچون فرسودگی، طراحی و جنس مواد در ارتباط است. عدم روان‌کاری صحیح ماشین‌آلات علاوه بر آنکه باعث تقلیل راندمان مکانیکی و پایین آمدن بازده زمانی ماشین می‌شود، فرسایش بیش از حد، فرسودگی و ازکارافتادگی زودرس را به دنبال دارد. نانو ذرات به دلیل خواص منحصر به فردشان که باعث بهبود رفتار تریبولوژیکی روغن روان‌کار می‌شوند به‌عنوان نوع جدیدی از افزودنی‌ها مورداستفاده قرارگرفته‌اند. از نانو ساختارهای مختلفی به‌عنوان مواد افزودنی برای بهبود خواص تریبولوژیکی می‌توان استفاده کرد. نانو تکنولوژی یا آرایش اتم‌ها در مقیاس نانومتری، همان کنار هم قرار گرفتن صدها اتم در ابعاد چند نانومتر است که خصوصیات جدید و ممتازی را نتیجه می‌دهد. 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 غلتکی 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 روغن‌های موتور و سایش بخش‌های داخلی موتور پرداختند. این محققین به این نتیجه رسیده‌اند که افزودن نانو الماس، موجب بهبود چشم‌گیر خواص و عملکرد روغن موتور نسبت به نمونه روغن موتور بدون نانو ذرات الماس گردیده است[۳]. تراجانو و همکاران در سال ۲۰۱۴، تأثیر نانو ذرات حاوی اکسیژن را بر روی روغن‌های گیاهی مورد مطالعه قراردادند. به این منظور، از نانو ذرات اکسید مس و اکسید روی استفاده شد. برای تعیین رفتار تریبولوژیکی روغن گیاهی حاوی نانو ذرات ذکرشده، از دستگاه رفت و برگشتی فرکانس بالا استفاده شد. نتایج نشان داد که افزودن نانو ذرات حاوی اکسیژن، ضمن افزایش خواص تریبولوژیکی روغن‌های گیاهی، سبب افزایش قابلیت سازگاری روغن‌های 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 روغن موتور 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 روان‌کاری 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 نیترید بور شش وجهی به دست آمد[۱]. باسکار و همکاران در سال ۲۰۱۵، به بررسی آزمایشگاهی رفتار روان‌کارهای زیستی حاوی نانو ذرات به روش چهار ساچمه پرداختند. در این پژوهش، اکسید مس(CuO)، دی‌سولفید تنگستن(WS_2) و دی‌اکسید تیتانیوم(TiO_2) 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 نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم استفاده شد. نتایج نشان داد که روش جدید فرآوری روان کننده 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 تریبیولوژیکی روان‌کننده‌های حاوی دی‌اکسید تیتانیوم می‌شود که با این روش پیشنهادی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.6.1]

تهیه شده‌اند [۶]. آزمن 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 ۰/۲ m/s، نیروی ۹/۸ N، فشار تماسی ۰/۹۳ GPaدر مدت زمان ۶۰ دقیقه انجام شد. روغن مورد استفاده نیز روغن SAE40 بود. نتایج کاهش ضریب اصکاک و میزان سایش را به ترتیب ٪۵۶ و ٪۴۸ نشان داد[۷]. لاد و همکاران در سال ۲۰۱۷ پژوهشی با عنوان مطالعه خواص تریبولوژیکی نانو ذرات به عنوان بهبود دهنده به روغن موتور چند درجه‌ای 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 ۰/۵، ۱ و ۱/۵ m/sبود. نتایج بهبود معنی‌دار 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 نقش مثبت نانو ذرات به عنوان افزودنی در ترکیب با روان‌کارها، بررسی تأثیر نانو ذرات اکسید مس با درصدهای وزنی مختلف بر خواص تریبولوژیکی روغن‌های روان‌کننده ضروری به نظر می‌رسد.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱ مشخصات روغن پایه

روغن مورد استفاده در این پژوهش، روغن موتور SAE 15W-40 بود. بهران سوپر توربو دیزل،روغن موتور دیزلی نیمه سینتتیک مرغوب است که برای روان‌کاری خودروهای دیزل چهار زمانه سرعت بالا با طراحی موتور سال ۲۰۰۲ و بالاتر که مجهز به سیستم‌های کنترل نشر آلاینده‌ها هستند و در شرایط عملیاتی سخت کار می‌کنند، توصیه می‌شود. این محصول با استفاده از روغن پایه و مواد افزودنی مرغوب، تولید می‌شود. این روغن دارای ویژگی‌های بسیار خوب از جمله، مقاومت عالی در برابر اکسیداسیون در شرایط دمایی بالا و در نتیجه کاهش تولید رسوب و لجن، قدرت بالا در کنترل دوده و ذرات ناشی از احتراق (قدرت پاک کنندگی و پراکنده سازی عالی)، پایداری عالی در برابر کاهش گران‌روی در کارکردهای طولانی (پایداری برشی عالی)، محافظت از قطعات موتور در برابر سایش، قابلیت عملکرد در گستره وسیع دمایی، روان‌کاری عالی در هنگام روشن کردن موتور و در حین کار در شرایط سخت عملیاتی، سازگاری با سیستم‌های کنترل نشر آلاینده‌ها و طول عمر بالا می‌باشد. روغن پایه طی مراحل تولید، مواد افزودنی و فاقد ارزش موجود در آن، از روغن کارکرده جدا شده و پیوندهای مولکولی تقویت می‌شوند تا کیفیت ازدست‌رفته دوباره احیا گردد. خواص شیمیایی و فیزیکی این روغن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: مشخصات فنی[1] روغن مورد استفاده در پژوهش[۱۰]

ویژگی‌ها	استاندارد	مقدار
گران‌روی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (cSt)	ASTM D445	۱۵/۴
شاخص گران‌روی	ASTM D2270	۱۴۳
نقطه اشتعال (درجه سانتی‌گراد)	ASTM D92	۲۲۰
نقطه ریزش (درجه سانتی‌گراد)	ASTM D97	-۲۷
چگالی در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد (kg/m^3)	ASTM D4052	۸۷۵
قلیاییت (mg KOH/g)	ASTM D2896	۱۲

1-Data Sheet

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

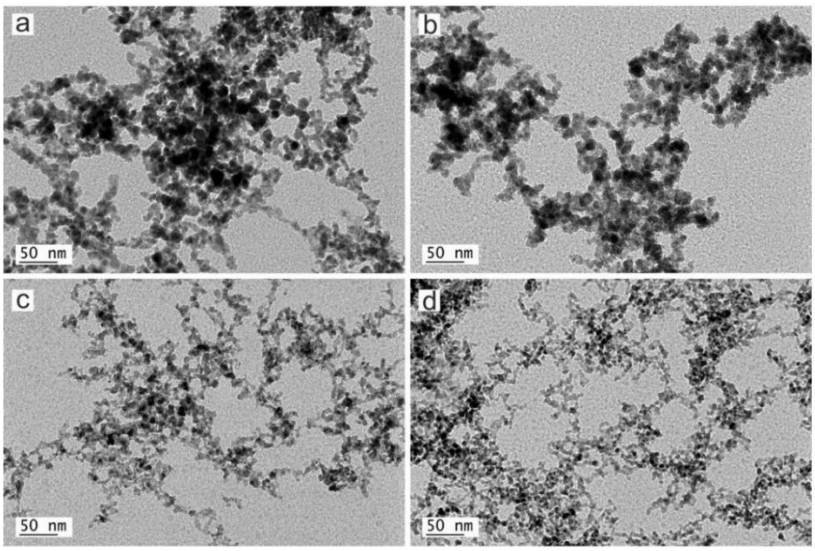
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.6.1]

۲-۲ مشخصات نانو مواد

نانو ذرات انتخابی در این پژوهش نانو ذرات اکسید مس بود. اکسید مس به‌صورت ذرات کروی با قطر میانگین ۴۰ نانومتر بود که مشخصات آن در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۲: مشخصات فنی نانو ذرات اکسید مس[۱۱]

پارامتر	واحد اندازه‌گیری	مقدار
رنگ	-	سبز تیره
متوسط اندازه ذرات	nm	۴۰
خلوص	درصد (٪)	۹۹
ظرفیت گرمایی ویژه	kJ/kg.°C	۳۸۳
چگالی توده‌ای	g/cm^3	۰/۷۹
چگالی حقیقی	g/m^3	۶/۴
مساحت سطح ویژه	g/m^2	~۲۰



شکل ۱: تصویر TEM نانو ذرات اکسید مس [۱۳]

شکل ۱ تصویر TEM[1] نانو ذرات اکسید مس مورد استفاده 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 پرکردن ناهمواری‌ها به دلیل کوچکی و سطح ویژه زیاد به‌سادگی روی‌هم می‌لغزند و باعث کاهش سایش، اصطکاک و کاهش انرژی مصرفی و تولید دما می‌شوند. غلظت نانو ذرات تأثیر زیادی در عملکرد نانو روان‌کارها دارد، به‌گونه‌ای که غلظت‌های بالای ۰/۵ درصد وزنی 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 ۰/۰۵

[1]- Transmission Electron Microscope

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.6.1]

درصد وزنی نانو 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 محدوده‌ی ۰/۱ تا ۰/۵ درصد وزنی به‌عنوان غلظت بهینه نانو ذرات بیان شده است[۱۲]. به همین خاطر در این پژوهش جهت بررسی اثر نانو ذرات اکسید مس از غلظت‌های وزنی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی استفاده شد.

۲-۳ روش ساخت نانو سیال و بررسی پایداری

به دلیل اهمیت موضوع پراکندگی و پایداری نانو ذرات 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 مدت‌زمان ۳۰ دقیقه تحت امواج آلتراسونیک قرار گرفتند. امواج حمام آلتراسونیک می‌توانند پیوندهای بین تکه‌های کلوخه شده را بشکنند و باعث افزایش کیفیت محلول شوند. حمام اولتراسونیک مورد استفاده در این پژوهش، ساخت کشور دانمارک، شرکت Struers مدل Melason 120T می‌باشد که دارای ظرفیت حدود ۳/۳۶ لیتر، توان ۱۲۵ وات و قابلیت ایجاد نوسان ۵۰ الی ۶۰ هرتز در مایعات با قابلیت کنترل زمان می‌باشد (شکل ۲). در این پژوهش، سورفکتانت و نانو ذرات با نسبت ۱:۱ و نانو ذرات اکسید مس با غلظت‌های مختلف ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی به روغن پایه افزوده شد. بدین منظور برای توزین نمونه‌ها از ترازوی دیجیتال آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم استفاده شد. پایداری استاتیک نانو سیالات ساخته‌شده به‌صورت دیداری مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور همه نمونه‌های ساخته شده درون ظروف شیشه‌ای کاملاً شفاف ریخته شده و برای مدت زمان ۳ ماه در یک محیط کاملاً ساکن نگهداری شدند و روند تغییرات ایجاد شده در آن‌ها به‌صورت دوره‌ای و پیوسته مشاهده و ثبت گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که افزودن نانو ذرات اکسید مس به روغن پایه هیچ‌گونه تغییر حالتی در آن ایجاد نکرد. از طرف دیگر با گذشت زمان هیچ‌گونه رسوب و تغییر فازی مشاهده نشد که بیان‌گر پایداری بسیار خوب این نانو سیال می‌باشد.

شکل ۲: حمام آلتراسونیک مورداستفاده

۲-۴ آزمون تعیین رسانایی گرمایی

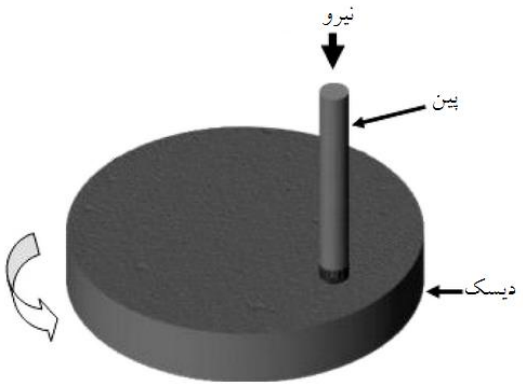
برای انجام آزمون رسانایی گرمایی از یک دستگاه با نام تجاری KD2-Pro ساخت شرکت Decagon، استفاده گردید. این دستگاه یک وسیله‌ی پرتابل است که بر اساس استاندارد مرجع EN55022:1987 از روش منبع گرمایی خط گذرا برای اندازه-گیری رسانایی گرمایی استفاده می‌کند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.6.1]

۵-۲ آزمون سایش پین روی دیسک

دستگاه آزمون سایش، دستگاهی است که برای پیش‌بینی رفتار تریبولوژیکی مواد و آلیاژهای مهندسی در شرایط عملیاتی به کار می‌رود. این تجهیز آزمایشگاهی، سایش و ضریب اصطکاک نمونه را در اثر تماس چرخشی بین پین و نمونه، در محیط-های خشک، سیال روان‌کار و دمای بالا محاسبه و ذخیره می‌نماید. این قابلیت وجود دارد که نمونه‌ی سایشی به‌عنوان پین و جسم ساینده به‌عنوان دیسک نیز قرار گیرد. تصویر شماتیکی از دستگاه پین روی دیسک در شکل ۳ نشان داده شده است. مشخصات فنی دستگاه نیز در جدول ۳ ذکرشده است.



شکل ۳: تصویر محل قرارگیری پین/ گلوله و نمونه سایش، مسیر سایش، جهت چرخش

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

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

از استاندارد ASTM G99 برای آزمون سایش استفاده می‌شود، مقدار سایش در هر سیستم معمولاً به عوامل مختلف مثل مقدار نیروی اعمالی؛ مشخصات دستگاه آزمون؛ سرعت چرخش؛ فاصله چرخش؛ محیط و خواص ماده که متغیرهای سیستم هستند؛ بستگی دارد. در این پژوهش از دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک در محیط کنترل شونده سیال TSN-WTC 03 متعلق به شرکت تجهیز صنعت نصر استفاده گردید. در این دستگاه نیز، آزمون سایش مطابق با استاندارد ASTM G-99 انجام می‌شود. پین‌ها 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 طراحی‌شده نیز حجم مشخصی از سیال درون خود جای می‌دهد و طراحی آن طوری می‌باشد که بتوان دیسک‌های مورداستفاده را ثابت کرده و آزمایش را در حضور سیال روان کننده انجام داد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.6.1]

۳-نتایج

۳-۱ نتایج آزمون رسانایی گرمایی

نتایج این آزمون در جدول ۴ ذکرشده است. با توجه به نتایج حاصل با افزایش میزان نانو ذرات اکسید مس در روان‌کار، رسانایی گرمایی بیشتر شد. با افزایش غلظت نانو ذرات اکسید مس تا ۰/۱ درصد وزنی، تغییری در مقدار ضریب رسانایی گرمایی مشاهده نشد، اما با افزایش غلظت نانو ذرات اکسید مس در روان‌کار، ضریب رسانایی گرمایی بهبود یافته و مقدار این ضریب در مخلوط‌های نانو روان‌کار با غلظت ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی نسبت به روغن‌پایه به ترتیب ٪۲/۳ و ٪۳/۸۴ افزایش داشت (شکل ۴). بیشترین مقدار ضریب رسانایی گرمایی در مخلوط نانو روان‌کار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی از نانو ذرات اکسید مس مشاهده گردید. افزایش رسانایی گرمایی با افزایش میزان نانو ذرات در سیال، مربوط به افزایش سطح ویژه نانو ذرات می‌باشد که فاصله-ی ذرات در سیال را کم و امکان قرارگیری اتم‌ها در کنار هم و تشکیل ساختار خوشه‌ای فراهم می‌شود، این ساختار همانند یک مبادله کن لوله و پوسته عمل می‌کند که در آن نانو ذرات حکم لوله و سیال روان‌کار مثل پوسته تبادل گرما می‌کنند و یا به نحوی دیگر رسانایی گرمایی را افزایش می‌دهد. پس 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 مورد توجه قرارگرفته است. ژوان و لی [۱۶و۱۵] در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که به دلیل حرکات بی‌نظم نانو ذرات که تبادل انرژی در سیال را شتاب می‌دهند، توزیع حرارتی افزایش‌یافته 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 روان‌کار را می‌توان یک نکته‌ی مثبت در ارتباط با بهبود خواص روان‌کاری 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 روان‌کارها 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 روان‌کارها با افزایش غلظت نانو ذرات اکسید مس افزایش یافت. این بهبود برای نانو روان‌کار با غلظت ۰/۱ درصد وزنی نسبت به روغن پایه ٪۳ بود. نتایج گزارش کاویاراسو و واسانتان [۱۹] نیز که در پژوهش خو 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

رسانایی گرمایی k (W/m.K)	درصد وزنی نانو ذرات
۰/۱۳	۰
۰/۱۳	۰/۱
۰/۱۳۳	۰/۲
۰/۱۳۵	۰/۵

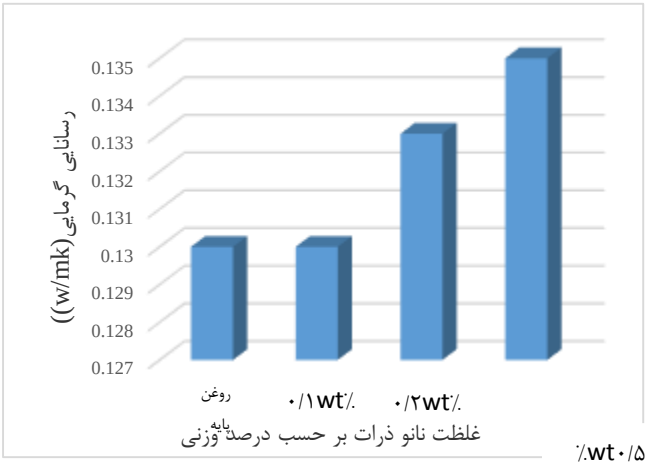
۳-۲ نتایج آزمون سایش

همان‌گونه که ذکر شد این آزمون با استفاده از دستگاه سایش پین روی دیسک در دمای محیط، سرعت دورانی rpm ۱۵۰و نیروی وارد بر پین N ۹۰ انجام شد. مسافت در نظر گرفته شده برای پیمودن پین روی دیسک نیز ۱۱۳۰ متر در نظر گرفته شد. قبل از انجام آزمون، نمونه‌ی دیسک‌ها با ترازویی با دقت ۰/۰۰۰۱ 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

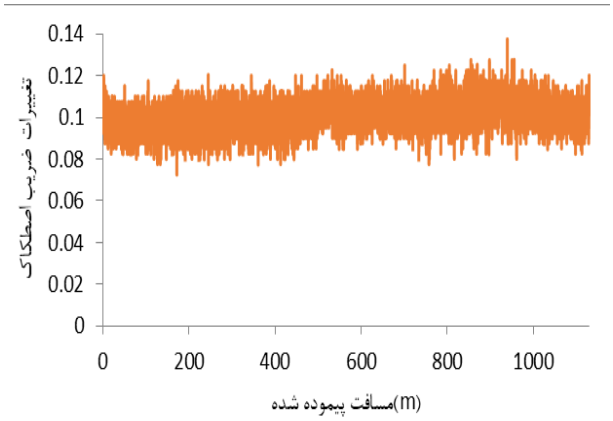
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.6.1]

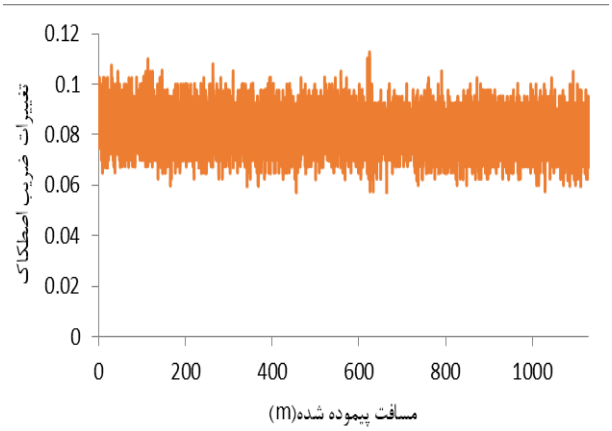
دیسک‌ها مشخص شد. نمودار تغییرات ضریب اصطکاک برحسب مسافت پیموده شده نیز توسط نرم‌افزار دستگاه ثبت که در ادامه به تحلیل آن‌ها پرداخته می‌شود.



شکل ۴ : تغییرات رسانایی گرمایی



شکل ۵ : نمودار تغییرات ضریب اصطکاک برحسب مسافت برای روغن‌پایه



شکل ۶ : نمودار تغییرات ضریب اصطکاک برحسب مسافت برای مخلوط نانو روانکار حاوی ۰/۱ درصد وزنی نانو ذرات اکسید مس

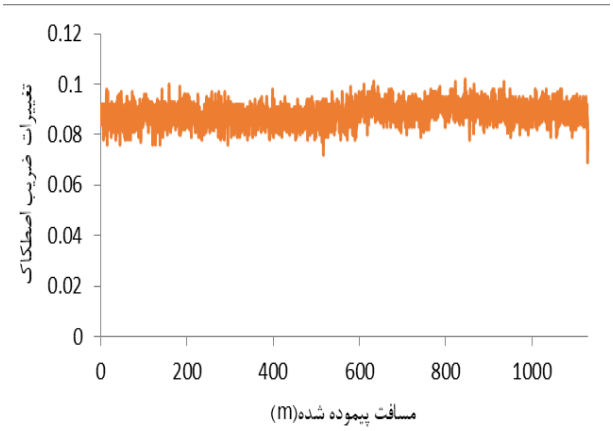
۳-۳ تغییرات ضریب اصطکاک

در شکل‌های ۵ تا ۸ 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 ۰/۵ درصد وزنی در سرعت ۱۵۰rpm و نیروی ۹۰N وارد بر پین نشان داده‌شده است. با توجه به شکل ۵ محدوده‌ی تغییرات ضریب اصطکاک برای روغن پایه بین ۰/۰۷۲۵ تا ۰/۱۳۷۵ می‌باشد. میانگین این ضریب ۰/۱۰۵ ثبت شد. این تغییرات برای مخلوط نانو روان‌کار با غلظت ۰/۱ درصد وزنی نیز در محدوده‌ی بین ۰/۰۶۲۵ تا ۰/۱۱۲۵ بود، میانگین آن‌ها ۰/۰۸۷۵ ثبت شد (شکل ۶). با افزایش غلظت نانو ذرات اکسید مس مطابق شکل ۷ برای مخلوط نانو روان‌کار با غلظت ۰/۲ درصد وزنی محدوده‌ی تغییرات ضریب اصطکاک بین ۰/۰۶۹ تا ۰/۱۰۲ بود و میانگین ۰/۰۸۵۵ برای

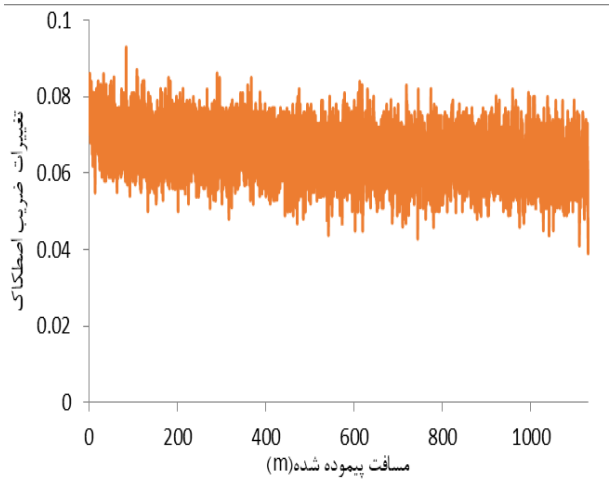
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.6.1]

این مخلوط ثبت شد. مطابق شکل ۸ نیز این تغییرات برای مخلوط روان‌کار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی بین ۰/۰۳۹ تا ۰/۰۹۳ و مقدار میانگین ۰/۰۶۶ بود. با توجه به نتایج حاصل از آزمون، 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 ۱۶/۶٪، ۱۸/۵۷٪ و ۳۷/۱٪ کاهش داشته است.



شکل ۷ : نمودار تغییرات ضریب اصطکاک برحسب مسافت برای مخلوط نانو روانکار حاوی ۰/۲ درصد وزنی نانو ذرات اکسید مس



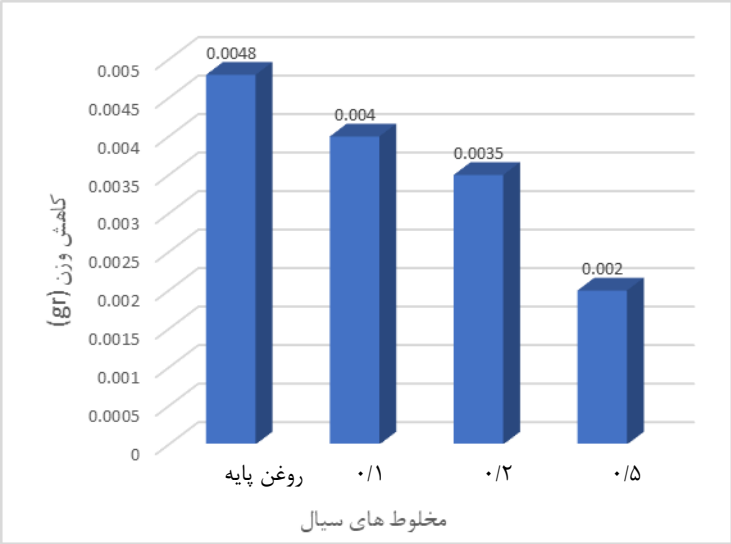
شکل ۸ : نمودار تغییرات ضریب اصطکاک برحسب مسافت برای مخلوط نانو روانکار حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانو ذرات اکسید مس

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده با افزایش غلظت نانو ذرات در ترکیب با روغن پایه، ضریب اصطکاک کاهش یافت. علت آن می‌تواند یکی از نقش‌های نانو ذرات باشد که با پوشاندن سطوح زبر 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 موتور اشتعال تراکمی که از نانوذره‌ی گرافن با اندازه‌ی ۶۰ نانومتر و غلظت ۰/۰۱ درصد وزنی استفاده نمود، کاهش ۲۱٪ ضریب اصطکاک و افزایش 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 روان‌کار 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.

۴-۳ کاهش وزن دیسک‌ها

در شکل ۹ نمودار تغییرات کاهش وزن دیسک‌های مورد استفاده در این آزمون برای روغن پایه و مخلوط‌های نانو روان‌کار با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل کم‌ترین میزان سایش دیسک‌ها مربوط به مخلوط روان‌کار با غلظت ۰/۵ می‌باشد که البته با توجه به اینکه کم‌ترین میزان اصطکاک مربوط به همین مخلوط بود انتظار می‌رفت که کم‌ترین میزان سایش نیز ایجاد شود. میزان کاهش وزن دیسک‌ها در اثر سایش برای مخلوط‌های نانو روان‌کار با غلظت‌های وزنی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی نسبت به روغن پایه به ترتیب ۱۶/۶، ۲۷/۰۸ و ۵۸/۳٪ کم‌تر شد. 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 اکسید مس نسبت به روغن پایه دارای ضریب اصطکاک کم‌تر و به‌تبع آن سایش کم‌تری می‌باشند. بنابراین کاربرد نانو ذرات اکسید مس در روان‌کار به‌عنوان افزودنی می‌تواند خاصیت ضد سایشی آن‌ها را بهبود ببخشد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-27]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.6.1]



شکل ۹ : کاهش وزن دیسک‌ها

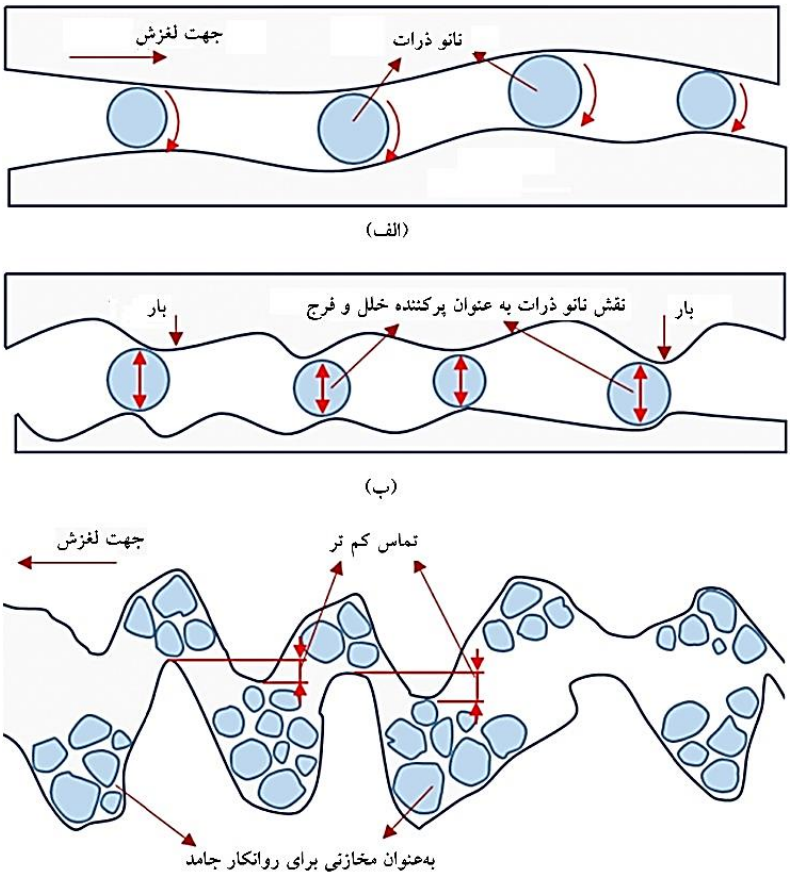
این یافته با نتایج حاصل از پژوهش احمدعلی و همکاران [۲۱] مطابقت دارد. آن‌ها در پژوهش خود گزارش نمودند استفاده از نانو ذرات دی‌اکسید آلومینیم و دی‌اکسید تیتانیوم در مخلوط روان‌کار در مقایسه با روغن پایه میزان سایش را به ترتیب ٪۲۱ و ٪۲۹ کاهش می‌دهد. اینگول و همکاران نیز در پژوهش خود گزارش نمودند استفاده از نانو 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 را گزارش نموده‌اند؛ همچنین در این پژوهش این نتیجه حاصل شد که کاهش ضریب اصطکاک می‌تواند در نتیجه‌ی کاهش زبری سطوح باشد و اگر زبری سطوح بیش از اندازه کم شود، استفاده از نانو ذرات نمی‌تواند نقش مثبتی در روان‌کاری ایفا کند، چون‌که نانو ذرات نمی‌توانند در خلل و فرج سطوح تماس جای‌گیر شود و خود به‌عنوان جسم ساینده عمل می‌کند. طبق نظر لی[۱] و همکاران[۲۴] بهبود خواص فشار پذیری و ضد سایشی نانو روان‌کارها 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 ۱۰ نشان داده‌شده است.

[۱]-Lee

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.6.1]



الف: تأثیر غلتشی، ب:نقش نانو ذرات به‌عنوان پرکننده خلل و فرج،
ج: تأثیر اصلاحی(ترمیمی)

شکل ۱۰ : ساز وکار عملکرد نانو روان کارها بر روی سطوح اصطکاکی[۲۵]

۴-نتیجه‌گیری

بر اساس آزمون‌های انجام‌شده (شامل رسانایی گرمایی، ضریب اصطکاک و میزان سایش) و نتایج حاصل برای چهار نمونه روغن، مشخص شد افزایش غلظت نانو ذرات در ترکیب با روغن پایه تأثیر مثبت در افزایش رسانایی گرما، کاهش ضریب اصطکاک و کاهش میزان سایش دارد. همچنین نتایج نشان داد که مخلوط نانو روان‌کار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی دارای بهترین عملکرد است. بنابراین کاربرد نانو ذرات اکسید مس به‌عنوان افزودنی در روان‌کار نقش مثبتی در بهبود خواص ضد سایشی و حرارتی روغن پایه داشت.

مراجع

[۱] اکبرزاده, م. (۱۳۹۲), تهیه کامپوزیتهای مس و اکسید مس با کربن و زئولیتها و بررسی خواص تریبولوژی آن‌ها به عنوان افزودنی در روان کننده‌ها "، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری - دانشگاه تبریز - دانشکده شیمی.

[2] 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 (2015), 449-454.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-27]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.6.1]

[3] 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 (2013), 14443-14447.

[4] 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 (2014), 1124-1128.

[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 (2014) 302-309.

[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, Vol.6, No.1 (2018), 30–37.

[8] Laad M., Ponnamma D., and Sadasivuni K.K., "Tribological Studies of Nanomodified Mineral based Multi-grade Engine Oil", International Journal of Applied Engineering Research, Vol 12, No 11 (2017), 2855-2861.

[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 (2017) 90-99.

[۱۰] وبسایت شرکت نفت بهران. https://www.behranoil.co/fa/product/2229-15W-40.html

[11] Iranain Nanomaterils Pioneers Company, Third unit. No51.Sadaf No.5.Vakil Abad Blv. Mashhad City, Khorasan Province, Iran. Website: Iran Nano tech.com

[۱۲] ابراهیمی قلعه تکی ا. و تقی پور ع.(۱۳۹۶)، انجام پایش وضعیت بر اساس آنالیز روغن و مقایسه تجربی و آزمایشگاهی آن با افزودنی نانو ذرات Al_2O_3 & SiO_2 و کاربرد آن در ماشین‌آلات دوار حساس، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول.

[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 (2009), 911–917.

[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 nanofuids", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 21 (2000), 58-64.

[16] Xuan Y., and Li Q., "Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids", Journal of Heat Transfer, Vol. 125 (2003) 151-155.

[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] Ettefaghi 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 (2015) 208-211.

[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).

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.6.1]

[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 (2016), 540-554.

[22] Ingole S., Charanpahari A., Kakade A., Umare S.S., Bhatt D.V., and Menghani J., "Tribological behavior of nanoTiO_2 as anadditive in base oil", Wear, Vol. 301 (2013) 776–785.

[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 oil-in-water lubricant", Wear, Vol. 376–377, Part A (2017), 792–802.

[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 (2009), 127-131.

[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 (2016), 1198-1209.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.6.1]

چکیده انگلیسی

Improving The Tribological Properties Of Lubricants With The Addition Copper Oxide(CuO) Nanoparticles

Nadia Khoram Shahi Bayat[1], Abbas Taghipoor[1*]

[1]Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

Received: 2022.07.28 Accepted: 2022.10.02

Abstract

The purpose of this research is to experimentally investigate the role of copper oxide nanoparticles in improving the tribological properties of the lubricant. This research consists of three stages. In the first stage, copper oxide nanoparticles with weight percentages of 0.1, 0.2 and 0.5 were added as an additive to Behran Super Turbo Diesel SAE 15W-40 oil. An ultrasonic bath was used to disperse the nanoparticles in the fluid, and span80 surfactant was used to stabilize the fluid and prevent solid nanoparticles from settling. In the second stage of the experimental tests, including the wear test using the pin-on-disk wear test device and the thermal conductivity test, were performed. In the third stage, the results of the analysis and the performance of the nano-fluid blends were compared with the base fluid. The results of this research showed a decrease in friction coefficient values, a decrease in wear rate and an increase in thermal conductivity of nano-lubricant blends compared to the base fluid. Based on the results, the lowest coefficient of friction, the lowest amount of wear and the highest coefficient of thermal conductivity are related to the nano-lubricant mixture containing 0.5% by weight of copper oxide nanoparticles. The friction coefficient reduction rate of this nano-lubricant mixture was 37.1% compared to the base oil, the wear reduction rate was 58.3% and the thermal conductivity increase rate was 3.84% compared to the base oil. The results show the positive role of copper oxide nanoparticles as an additive in improving the tribological properties of the working fluid.

Key words: copper oxide nanoparticles, thermal conductivity, friction coefficient, wear, lubricant.

*corresponding author: taghipoor@iaud.ac.ir

Cite this article as: Nadia Khoram Shahi Bayat, Abbas Taghipoor. Improving The Tribological Properties Of Lubricants With The Addition Copper Oxide(CuO) Nanoparticles. Journal of Energy Conversion, 2022, 9(3), 101-114. DOR**:** **20.1001.1.20089813.1401.9.3.6.1**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-27]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.3.6.1]