نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
J. Energy Conversion
Volume: 13, Issue:1, 2026: 17-39
دوره ۱۳، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص: ۱۷-۳۹

بررسی تجربی اثر نانوذرات بر خواص فیزیکی و مقاومت سایشی روان‌کارهای زیستی

عباس تقی‌پور[۱و*]، رضا پولتنگری[۲]

۱،*- دانشکده مهندسی ساخت و فناوری‌های صنعتی، واحددزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران ، ab.taghipoor@iau.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی ساخت و فناوری‌های صنعتی، واحددزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران ، reza.poultangari@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸، بازنگری: ۱۴۰۵/۲/۸، پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۱۴

چکیده:

در این پژوهش، تأثیر نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) بر بهبود خواص ضدسایشی، کاهش اصطکاک و خواص فیزیکی روغن سویای اپوکسی شده مورد بررسی قرار گرفت. پژوهش در چهار مرحله اصلی انجام شد:

- تهیه مخلوط‌های نانوروان‌کار: نانوذرات TiO_2 با غلظت‌های وزنی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد با روغن سویای اپوکسی شده ترکیب شدند.
- پراکندگی و پایداری نانوذرات: برای پراکندگی یکنواخت نانوذرات از حمام اولتراسونیک و برای جلوگیری از ته‌نشینی از سورفکتانت Span-80 استفاده شد.
- ارزیابی تجربی: آزمون‌های سایش با دستگاه پین روی دیسک و اندازه‌گیری خواص فیزیکی شامل نقطه ریزش، نقطه اشتعال و گرانروی مطابق استانداردهای بین‌المللی انجام شد.
- تحلیل نتایج: عملکرد مخلوط‌های نانو روان‌کار با روغن پایه مقایسه گردید.

نتایج نشان داد که نانو روان‌کار حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانوذرات TiO_2 بهترین عملکرد را دارد، به‌طوری‌که ضریب اصطکاک و نرخ سایش به ترتیب ٪۷/۹۳ و ٪۵۷/۱۴ کاهش یافت. هم‌چنین، گرانروی ٪۱۱/۹۵ و نقطه اشتعال ٪۳ کاهش نشان داد، اما تغییر محسوسی در نقطه ریزش مشاهده نشد. این یافته‌ها حاکی از پتانسیل بالای نانوذرات TiO_2 در بهبود عملکرد روان‌کارهای زیستی است.

* **عهده‌دار مکاتبات:** ab.taghipour@iau.ir

کلمات کلیدی: نانوذرات، اصطکاک، خواص فیزیکی، روان‌کار زیستی، سایش.

نحوه استناد به این مقاله عباس تقی‌پور، رضا پولتنگری. بررسی تجربی اثر نانوذرات بر خواص فیزیکی و مقاومت سایشی روان‌کارهای زیستی. **مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۵; ۱۳ (۱) : ۱۷-۳۹.**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

۱-مقدمه

روان‌کارها به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی در صنایع مختلف، نقش حیاتی در کاهش اصطکاک، جلوگیری از سایش، انتقال حرارت و افزایش طول عمر ماشین‌آلات و تجهیزات مکانیکی ایفا می‌کنند. با این‌حال، روان‌کارهای سنتی مبتنی بر نفت خام، به‌دلیل مشکلات زیست‌محیطی مانند سمیت بالا، تجزیه‌ناپذیری و وابستگی به منابع فسیلی، با چالش‌های جدی مواجه هستند. این مسائل موجب شده است که پژوهش‌ها به سمت توسعه روان‌کارهای زیستی سوق پیدا کند [۱]. روان‌کارهای زیستی، که از منابع تجدیدپذیر مانند روغن‌های گیاهی تولید می‌شوند، به‌دلیل زیست‌تخریب‌پذیری، سمیت کم و سازگاری با محیط زیست، گزینه‌های مناسبی برای جایگزینی روان‌کارهای سنتی هستند. روغن سویا به‌عنوان یکی از رایج‌ترین روغن‌های گیاهی، به‌دلیل در دسترس بودن، هزینه پایین و خواص روان‌کاری مناسب، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. با این‌حال، روغن سویا خالص دارای محدودیت‌هایی مانند پایداری اکسیداتیو پایین، گرانروی بالا در دماهای پایین و خواص ضد سایشی ضعیف است [۲]. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، روش‌های مختلفی از جمله اصلاح شیمیایی (مانند اپوکسی‌سازی) و افزودن مواد افزودنی پیشرفته مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این میان، فناوری نانو به‌عنوان یک راهکار نوین، پتانسیل بالایی برای بهبود خواص روان‌کارهای زیستی نشان داده است. نانوذرات به‌دلیل اندازه بسیار کوچک (در حد نانومتر) و سطح ویژه بالا، می‌توانند خواص فیزیکی و شیمیایی روان‌کارها را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشند. نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) به‌دلیل خواص منحصر به‌فردی مانند پایداری حرارتی بالا، مقاومت در برابر سایش و توانایی پراکندگی مناسب در سیالات، به‌عنوان یکی از گزینه‌های امیدوارکننده برای بهبود عملکرد روان‌کارها شناخته شده‌اند. افزودن این نانوذرات به روغن‌های پایه می‌تواند منجر به کاهش اصطکاک و سایش، افزایش پایداری حرارتی و بهبود خواص رئولوژیکی شود[۳]. با این‌حال، چالش‌هایی مانند پراکندگی یکنواخت نانوذرات در روغن پایه و پایداری بلندمدت آن‌ها در سیال وجود دارد. برای حل این مشکلات، از روش‌هایی مانند استفاده از حمام اولتراسونیک و افزودن سورفکتانت‌ها مانند span80 استفاده می‌شود. این روش‌ها به پراکندگی بهتر نانوذرات و جلوگیری از ته‌نشینی آن‌ها کمک می‌کنند.

استفاده از نانوذرات در روان‌کارها به‌منظور بهبود خواص عملکردی، موضوع تحقیقات گسترده‌ای در دو دهه اخیر بوده است. نانوذرات به‌دلیل اندازه کوچک و سطح ویژه بالا، توانایی بهبود خواصی مانند کاهش اصطکاک، افزایش مقاومت در برابر سایش و بهبود پایداری حرارتی را دارند. در این میان، نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) به‌دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فرد، از جمله پایداری حرارتی بالا، مقاومت در برابر سایش و توانایی پراکندگی مناسب در سیالات، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند [۵,۴]. در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی به بررسی تأثیر نانوذرات TiO_2 بر خواص روان‌کارها پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱، در مطالعه‌ای بر روی نانو روان‌کارهای مبتنی بر روغن‌های معدنی نشان دادند که افزودن نانوذرات TiO_2 می‌تواند ضریب اصطکاک و نرخ سایش را به‌ترتیب تا ٪۲۰ و ٪۳۰ کاهش دهد. این پژوهش هم‌چنین تأکید کرد که پراکندگی یکنواخت نانوذرات در روغن پایه، نقش کلیدی در بهبود عملکرد روان‌کارها دارد [۶]. در زمینه روان‌کارهای زیستی، کومار و همکاران در سال ۲۰۲۰، تأثیر نانوذرات TiO_2 را بر رروغن‌کرچک، به‌عنوان پایه روان‌کار بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانوذرات TiO_2 منجر به کاهش ۲۵ درصدی ضریب اصطکاک و ۴۰ درصدی نرخ سایش شد. این مطالعه هم‌چنین گزارش کرد که نانوذرات TiO_2 پایداری حرارتی روغن‌پایه را بهبود بخشیده و نقطه اشتعال را افزایش داده‌اند [۷]. در مورد روغن سویا به‌عنوان پایه روان‌کارهای زیستی نیز تحقیقاتی انجام شده است. شارما و همکاران در سال ۲۰۲۰، نشان دادند که اپوکسی‌سازی روغن سویا می‌تواند پایداری حرارتی و اکسیداتیو آن را افزایش دهد. با این‌حال، بهبود خواص ضدسایشی و کاهش اصطکاک هم‌چنان به‌عنوان چالشی در این زمینه مطرح است [۸]. در این راستا، علی و همکاران در سال ۲۰۲۲، در مطالعه‌ای بر روی روغن سویا اپوکسی شده حاوی نانوذرات TiO_2 گزارش کردند که افزودن ۰/۳ درصد وزنی نانوذرات، ضریب اصطکاک را تا ٪۱۵ و نرخ سایش را تا ٪۳۵ کاهش داده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

این پژوهش هم‌چنین تأکید کرد که استفاده از سورفکتانت‌ها مانند span80 می‌تواند به پراکندگی بهتر نانوذرات و پایداری بلندمدت آن‌ها در روغن‌پایه کمک کند [۹]. علاوه بر این، وانگ و همکاران در سال ۲۰۲۳، در مطالعه‌ای بر روی نانو روان‌کارهای مبتنی بر روغن‌های گیاهی، تأثیر غلظت‌های مختلف نانوذرات TiO_2 را بررسی کردند. نتایج نشان داد که غلظت بهینه نانوذرات برای دستیابی به بهترین عملکرد، ۰/۵درصد وزنی است. این مطالعه هم‌چنین گزارش کرد که افزودن نانوذرات TiO_2 گرانروی روغن‌پایه را کاهش داده و نقطه ریزش را بهبود بخشیده است [۱۰]. باتوجه به اهمیت روزافزون استفاده از روان‌کارهای زیستی و نیاز به بهبود خواص آن‌ها، بررسی تأثیر نانوذرات بر عملکرد این روان‌کارها از اهمیت بالایی برخوردار است. نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) به‌دلیل خواص منحصربه‌فردی مانند پایداری حرارتی بالا، مقاومت در برابر سایش و توانایی پراکندگی مناسب در سیالات، به‌عنوان یکی از گزینه‌های امیدوارکننده برای بهبود عملکرد روان‌کارها شناخته شده‌اند. بااین‌حال، تأثیر غلظت‌های مختلف این نانوذرات بر خواص فیزیکی و عملکردی روان‌کارهای زیستی به‌طور کامل بررسی نشده است. این مطالعه با هدف بررسی تأثیر نانوذرات TiO_2 با غلظت‌های مختلف (۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی) بر خواص فیزیکی و عملکردی روغن سویا اپوکسی شده به‌عنوان یک روان‌کار زیستی انجام شده است. در این پژوهش، از آزمون‌های تجربی مانند آزمون سایش پین روی دیسک، اندازه‌گیری گرانروی، نقطه ریزش و نقطه اشتعال برای ارزیابی عملکرد نانو روان‌کارها استفاده شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند به توسعه روان‌کارهای زیستی با عملکرد برتر و کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک کند. این پژوهش در راستای پاسخگویی به نیاز صنایع به روان‌کارهای پایدار و با عملکرد بالا انجام شده است و می‌تواند به‌عنوان گامی مؤثر در جهت کاهش وابستگی به منابع فسیلی و توسعه فناوری‌های سبز در حوزه روان‌کارها مورد توجه قرار گیرد.

۲-مواد و روش‌ها

در این بخش، مواد، تجهیزات و روش‌های انجام آزمایش‌های لازم برای پژوهش ارائه شده است. ابتدا مشخصات تجهیزات و مواد مورد نیاز ذکر شده و سپس روش ترکیب و تهیه‌ی نانوروان‌کار و آزمون‌های پایداری تشریح شده است. در ادامه، آزمایش‌های لازم برای مقایسه‌ی عملکرد سیال پایه با نانوسیال شرح داده شده‌اند. آزمایش‌های انجام‌شده شامل آزمون سایش با استفاده از دستگاه پین روی دیسک، اندازه‌گیری ضریب اصطکاک و تعیین خواص فیزیکی نانومخلوط‌های روان‌کار می‌باشد. در این پژوهش از مواد شیمیایی زیر استفاده شد:

- روان‌کار پایه: روغن سویا اپوکسی شده به‌عنوان پایه روان‌کار زیستی انتخاب شد. این روغن به‌دلیل زیست‌تخریب‌پذیری، سمیت کم و خواص روان‌کاری مناسب، به‌عنوان جایگزینی پایدار برای روغن‌های معدنی سنتی مورد استفاده قرار گرفت.
- نانوذره: نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) با خلوص بالا و اندازه ذرات کم‌تر از ۵۰ نانومتر به‌عنوان افزودنی نانویی برای بهبود خواص روان‌کار پایه استفاده شد.
- سورفکتانت: سورفکتانت Span 80 (سوربیتان مونواولئات) به‌منظور بهبود پراکندگی نانوذرات در روغن‌پایه و جلوگیری از ته‌نشینی آن‌ها به کار گرفته شد.

هم‌چنین برای انجام آزمایش‌ها و آنالیز نمونه‌ها از دستگاه‌ها و تجهیزات زیر استفاده شد:

- ترازوی دیجیتال :مدل AW 320 شیمادزو (SHIMADZU) برای اندازه‌گیری دقیق مقادیر مواد شیمیایی و نانوذرات.
- دستگاه اولتراسونیک، برای پراکنده‌سازی یکنواخت نانوذرات در روغن‌پایه.
- دستگاه ویسکومتر، برای اندازه‌گیری گرانروی نمونه‌ها در دماهای مختلف.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

- دستگاه اندازه‌گیری نقطه ریزش، برای تعیین کم‌ترین دمایی که نمونه روان‌کار قابلیت جریان‌پذیری خود را حفظ می‌کند.
- دستگاه اندازه‌گیری نقطه اشتعال، برای تعیین دمایی که نمونه روان‌کار در معرض شعله، بخارات قابل اشتعال تولید می‌کند.
- دستگاه پین روی دیسک، برای ارزیابی خواص اصطکاکی و سایشی نمونه‌ها تحت شرایط کنترل‌شده.

۲-۱- روان‌کار پایه

برای انتخاب روغن، عوامل و پارامترهای متعددی مورد توجه قرار می‌گیرد. در این پژوهش، از روغن سویا اپوکسی شده Liaflex 6500 تولیدی شرکت بسپارلیا که یکی از روغن‌های گیاهی مهم و پرکاربرد محسوب می‌شود، به‌عنوان روغن‌پایه استفاده شد. روغن‌های گیاهی به‌دلیل تجدیدپذیر بودن و سازگاری با محیط‌زیست، جایگزین مناسبی برای مواد پتروشیمی در برخی کاربردها شده‌اند. ترکیبات درصدی و مشخصات فیزیکی روغن سویا به‌ترتیب در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است. روغن‌های سویا حاوی مقادیر قابل‌توجهی اسید چرب هستند که قابلیت تبدیل به اسید اپوکسی چرب را دارند. باتوجه‌به مصرف گسترده‌ی این روغن، افزایش طول عمر و بهبود خواص روان‌کاری آن از اهمیت بالایی برخوردار است. روغن‌های گیاهی مانند روغن سویا، به‌عنوان موادی تجدیدپذیر، غیرسمی و زیست‌تخریب‌پذیر شناخته می‌شوند[۱۱].

جدول ۱: درصد ترکیبات تشکیل دهنده‌ی روغن سویا [۱۱]

اسید چرب	درصد اسید چرب
لینولنیک اسید	۷/۷۸
لینولئیک اسید	۴۷/۰۶
اولئیک اسید	۲۴/۴۸
استارئیک اسید	۳/۷۷
پالمیتیک اسید	۱۱/۴

جدول ۲: مشخصات روغن سویا اپوکسی شده که در این پژوهش استفاده شده

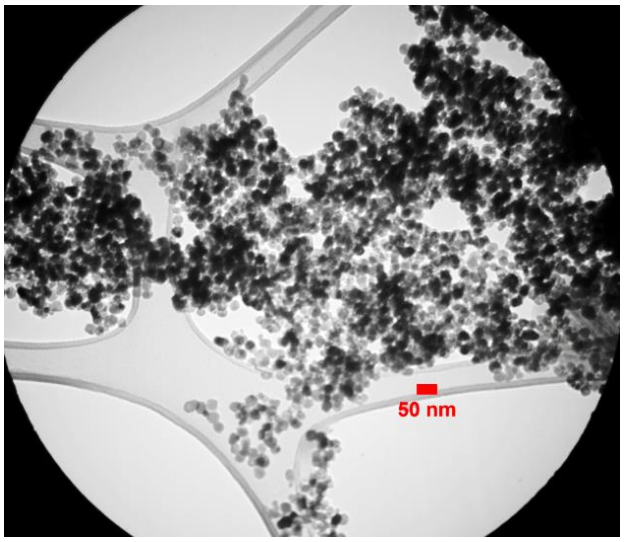
ویژگی‌ها	مقدار
شکل ظاهری	مایع شفاف مایل به زرد با بویی بسیار کم
ویسکوزیته سینماتیکی ^{o}C 25 @ (m^2/s)	۵۰۰
نقطه‌ی اشتعال ^{o}C	۲۲۷
دانسیته kg/m^3	۹۹۴

۲-۲- نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید

در این پژوهش، از نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) از نوع آناتاس با قطر ۱۰ تا ۲۵ نانومتر و خلوص ٪۹۹ استفاده شده است. شکل (۱) تصویر TEM گرفته‌شده از نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. این تصویر به‌وضوح مورفولوژی و اندازه‌ی نانوذرات را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود، نانوذرات دارای شکل تقریباً کروی بوده و اندازه‌ی آن‌ها در حدود ۲۵ نانومتر است.

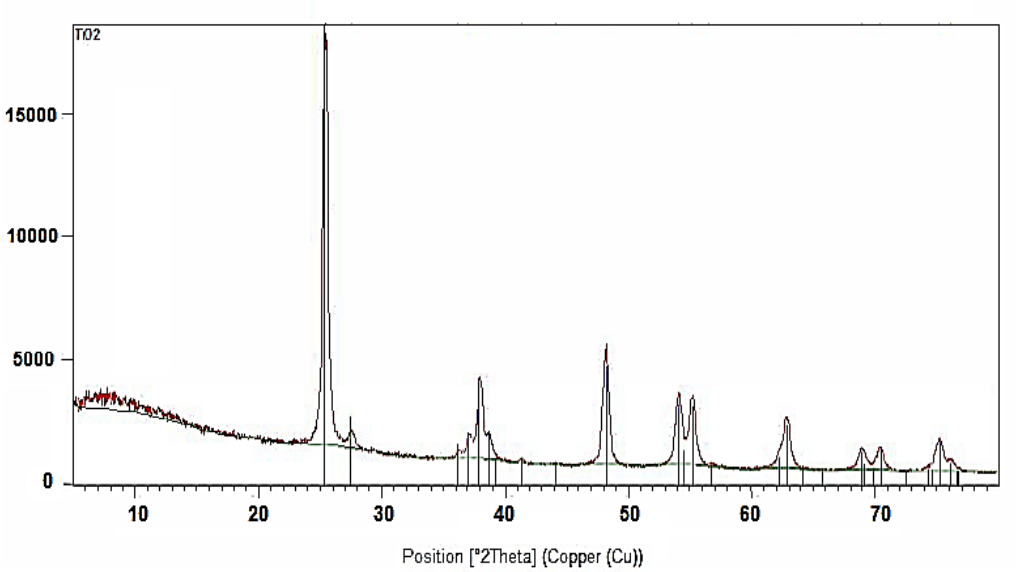
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]



شکل ۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM از تیتانیوم دی‌اکسید

شکل (۲) الگوی پراش پرتو X نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید را نشان می‌دهد. دراین تصویر هیچ پیک مزاحمی در الگوی پراش مشاهده نمی‌شود و پهن شدگی قله‌ها دلیلی بر کوچک بودن اندازه‌ی ذرات می‌باشد.



شکل ۲: الگوی پراش پرتو X نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید

تیتانیوم دی‌اکسید مورد استفاده در این پژوهش از نوع آناتاس بوده که دارای ساختاری کروی‌شکل است. این ویژگی باعث می‌شود تا این نانوذرات تأثیر بهتری در کاهش اصطکاک و سایش قطعات موتور از خود نشان دهند [۱۲]. دلیل این امر آن است که ذرات کروی‌شکل می‌توانند در خلل و فرج سطوح قطعات قرار گرفته و ناهمواری‌های موجود را پر کنند. علاوه بر این، به‌دلیل سطح ویژه‌ی بالا و اندازه‌ی بسیار کوچک این ذرات، آن‌ها قادرند به‌راحتی روی یکدیگر بلغزند و از تماس مستقیم بین سطوح قطعات موتور جلوگیری کنند. جدول (۳) مشخصات فیزیکی نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

جدول ۳: مشخصات فنی نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید از نوع آناتاس

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

غلظت نانوذرات نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد نانو روان‌کارها ایفا می‌کند .به‌گونه‌ای که غلظت‌های بالاتر از ۰/۵ درصد وزنی می‌تواند منجر به رسوب نانوذرات بر روی سطوح قطعات شده و ذرات بزرگ‌تر، مشابه ناخالصی‌ها، باعث ایجاد خراش و افزایش اصطکاک شوند. از سوی دیگر، در غلظت‌های بسیار پایین (کم‌تر از ۰/۰۵ درصد وزنی)، نانوذرات قادر به پوشش کامل سطوح اصطکاکی نبوده و در نتیجه عملکرد مطلوبی نخواهند داشت؛ بنابراین، انتخاب غلظت بهینه نانوذرات از اهمیت بالایی برخوردار است. براساس مطالعات پیشین، غلظت‌های بین ۰/۱ تا ۰/۵ درصد وزنی به‌عنوان محدوده بهینه برای نانوذرات شناخته شده‌اند [۱۳]. براین‌اساس، در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی اثر نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید، از غلظت‌های وزنی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد استفاده شد.

۲-۳- روش تهیه‌ی نانو روان‌کار و بررسی پایداری آن

پراکندگی و پایداری نانوذرات در سیال پایه و دستیابی به یک نانوسیال پایدار از اهمیت بالایی برخوردار است و روش‌های مختلفی برای دست‌یابی به این هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش، برای پراکنده‌سازی نانوذرات در سیال پایه و ایجاد یک نانوسیال پایدار، از سورفکتانت Span 80 و حمام اولتراسونیک استفاده شد. Span 80 یک سورفکتانت غیریونی و آمفی‌فیلیک (دوگانه دوست) است که به‌عنوان یک ترکیب سنتزی، کاملاً زیست‌تخریب‌پذیر بوده و به‌راحتی در محیط‌زیست تجزیه می‌شود. این ماده به‌صورت یک مایع ویسکوز و زردرنگ است که در حلال‌های مختلفی مانند آب، الکل‌ها و اسیدهای چرب محلول می‌باشد. Span 80 در دمای محیط به حالت مایع بوده و از پایداری دمایی بالایی برخوردار است. این سورفکتانت در حضور اکثر ترکیبات شیمیایی و حرارت پایدار است و تنها در مواجهه با اکسیدکننده‌های قوی اکسید می‌شود. این ویژگی‌ها باعث شد تا از این ماده به‌عنوان عامل پراکنده‌کننده و پایدارکننده سوسپانسیون نانوذرات در این پژوهش استفاده شود.

در روش اولتراسونیک، زمان یک پارامتر کلیدی است که برای دست‌یابی به یک سوسپانسیون پایدار باید به‌دقت کنترل شود. مطالعات نشان داده‌اند که مواد افزودنی نانو روان‌کارها تنها در صورت اعمال اولتراسونیک در مدت‌زمان بهینه، بهترین پایداری و پراکندگی را از خود نشان می‌دهند. به‌عنوان مثال، در یک مطالعه مشخص شد که پایداری پراکندگی نانوذرات با ۶۰ دقیقه اولتراسونیک بهینه‌ترین نتیجه را دارد و سوسپانسیون حاصل به مدت ۱۵ روز پایدار باقی می‌ماند [۱۴]. براین‌اساس، در این پژوهش نمونه‌ها به مدت ۶۰ دقیقه تحت امواج اولتراسونیک قرار گرفتند. حمام اولتراسونیک مورد استفاده در این پژوهش، ساخت شرکت Struers دانمارک، مدل Melason 120T، دارای ظرفیت ۳۶/۳ لیتر، توان ۱۲۵ وات و قابلیت ایجاد نوسان ۵۰ تا ۶۰ هرتز در مایعات بود. این دستگاه مجهز به یک محفظه فلزی است که با آب پر می‌شود و امواج اولتراسونیک ایجاد شده توسط آن، پیوندهای بین ذرات کلوخه شده را شکسته و باعث بهبود کیفیت و یکنواختی محلول می‌شود (شکل ۳).

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

در این پژوهش، سورفکتانت Span 80 و نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید با نسبت ۱:۱ و در غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی به روغن پایه افزوده شدند. برای توزین دقیق مواد، از ترازوی دیجیتال آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم استفاده شد. پایداری استاتیک نانوسیالات تهیه‌شده به‌صورت دیداری مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، نمونه‌ها در ظروف شیشه‌ای شفاف ریخته شده و به مدت ۳ ماه در محیطی کاملاً ساکن نگهداری شدند. تغییرات ایجادشده در نمونه‌ها به‌صورت دوره‌ای و پیوسته مشاهده و ثبت گردید. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید به روغن پایه هیچ‌گونه تغییر حالتی در آن ایجاد نکرده و پس از گذشت زمان، هیچ رسوب یا تغییر فازی مشاهده نشد. این موضوع بیانگر پایداری بسیار خوب نانوسیال تهیه‌شده است.



شکل ۳: مراحل پراکنده شدن نانوذرات در نانو روانکار به وسیله‌ی دستگاه آلتراسونیک.

۲-۴- تعیین خواص فیزیکی مخلوط‌های نانوروان‌کار

در این پژوهش، برای تعیین گران‌روی مخلوط‌ها، از ویسکومتر نوع موئینه بر اساس استاندارد ملی ایران INSO 195 استفاده شد. این دستگاه مجهز به یک حمام پارافینی است که برای حفظ دمای پایدار به کار می‌رود. گران‌روی روان‌کارها در دو دمای ۴۰ و ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. هم‌چنین، نقطه‌ی اشتعال روغن‌های روان‌کار مورد استفاده بر اساس استاندارد ASTM D92 و با استفاده از دستگاه ظرف در باز کلولند سنجش شد. نقطه‌ی اشتعال به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم ایمنی و عملکردی روان‌کارها، تعیین گردید. علاوه بر این، نقطه‌ی ریزش روان‌کارها نیز بر اساس استاندارد ASTM D97 اندازه‌گیری شد. نقطه‌ی ریزش به‌عنوان کم‌ترین دمایی تعریف می‌شود که در آن یک مایع، به‌ویژه روان‌کننده، قابلیت جریان‌یافتن دارد. این پارامتر تعیین‌کننده‌ی حداقل دمای کارکرد روان‌کار در شرایط عملیاتی است. روش اندازه‌گیری نقطه‌ی ریزش به این صورت است که ابتدا نمونه‌ها گرم شده و سپس با سرعت مشخصی سرد می‌شوند. در طول فرآیند سردشدن، به‌ازای هر ۳ درجه‌ی سانتی‌گراد کاهش دما، سیالیت نمونه‌ها بررسی می‌شود. پایین‌ترین دمایی که در آن نمونه قابلیت جریان‌یافتن دارد، به‌عنوان نقطه‌ی ریزش ثبت می‌گردد. این اندازه‌گیری‌ها به‌منظور ارزیابی دقیق خواص فیزیکی روان‌کارها و تعیین محدوده‌ی دمایی مناسب برای کاربرد آن‌ها انجام شد.

۲-۵- آزمون سایش پین روی دیسک

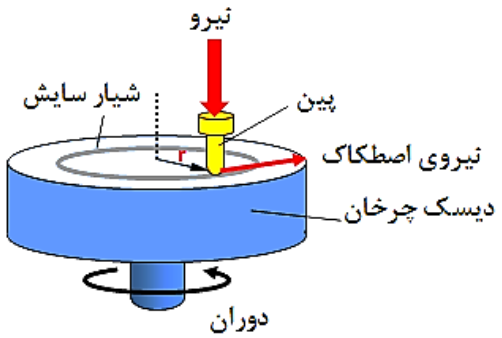
دستگاه آزمون سایش، ابزاری است که برای پیش‌بینی رفتار تریبولوژیکی مواد و آلیاژهای مهندسی در شرایط عملیاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دستگاه قادر است سایش و ضریب اصطکاک نمونه‌ها را در اثر تماس چرخشی بین پین و دیسک، در محیط‌های خشک، سیال روان‌کار و حتی در دمای بالا محاسبه و ذخیره کند. در این دستگاه، امکان تعویض نقش نمونه‌ها وجود دارد، به‌طوری‌که نمونه‌ی ساینده می‌تواند به‌عنوان پین و جسم ساینده به‌عنوان دیسک نیز قرار گیرد. تصویر شماتیکی از دستگاه پین روی دیسک در شکل (۴) نشان داده شده است. آزمون سایش در این پژوهش مطابق با استاندارد ASTM G99 انجام گرفت. مقدار سایش در هر سیستم به عوامل متعددی مانند نیروی اعمالی، مشخصات دستگاه، سرعت چرخش، مسافت پیموده‌شده، محیط آزمون و خواص ماده

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

بستگی دارد. در این پژوهش، از دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک مدل TSN-WTC 03 ساخت شرکت تجهیز صنعت نصر استفاده شد. این دستگاه قابلیت انجام آزمون در محیط کنترل‌شده با سیال را دارا می‌باشد. برای انجام آزمون، نمونه‌ها بر اساس شرایط استاندارد آماده‌سازی شده و روی نگهدارنده‌ی دستگاه قرار می‌گیرند. پس از اعمال نیروی مورد نظر، پین به‌عنوان عامل ساینده بر روی دیسک حرکت می‌کند. در این آزمون، سرعت دورانی دیسک ۱۵۰۰ دور در دقیقه، نیروی وارد بر پین ۹۰ نیوتن و مسافت پیموده‌شده توسط پین روی دیسک ۱۱۳۰ متر در نظر گرفته شد. پین‌ها از جنس فولاد بلبرینگ ساخته و با سنگ مغناطیسی پرداخت شدند تا کم‌ترین زبری سطح را داشته باشند. دیسک‌ها نیز از جنس CK45 ساخته و به‌طور مشابه پرداخت شدند تا امکان استفاده از هر دو طرف دیسک فراهم شود. فیکسچر طراحی‌شده برای این آزمون قادر است حجم مشخصی از سیال روان‌کننده را در خود جای دهد و دیسک‌ها را به‌طور ثابت نگه دارد تا آزمون در حضور سیال انجام شود.

پس از اتمام آزمون، نمونه‌ها با استون و الکل شسته و پس از خشک‌شدن، با استفاده از ترازوی دیجیتال توزین شدند. اختلاف وزن دیسک‌ها قبل و بعد از آزمون به‌عنوان معیاری برای اندازه‌گیری میزان سایش در نظر گرفته شد. خروجی دستگاه شامل نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی‌شده برای هر نمونه است که به‌صورت یک فایل اکسل ارائه می‌گردد.



شکل ۴ : شکل شماتیکی از مکانیزم کاری دستگاه اندازه‌گیری سایش پین روی دیسک

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل نمونه‌ها در دستگاه پین روی دیسک

نتایج آزمون سایش روغن‌پایه نشان‌دهنده‌ی تغییرات ضریب اصطکاک در محدوده‌ی ۰/۰۴۵ تا ۰/۰۹۷ است، میانگین ضریب اصطکاک نیز حدود ۰/۰۶۳ است. ضریب اصطکاک در محدوده‌ی نسبتاً وسیعی (۰۰/۰۴۵ تا ۰/۰۹۷) تغییر کرده است. این تغییرات می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

- ناهمگونی سطح تماس: ممکن است سطح تماس بین پین و دیسک کاملاً یکنواخت نباشد که منجر به تغییرات موضعی در ضریب اصطکاک می‌شود.
- ویژگی‌های روان‌کاری روغن‌پایه: روغن‌پایه ممکن است در برخی شرایط نتواند لایه‌ی روان‌کاری پایدار و یکنواختی ایجاد کند که باعث نوسان در ضریب اصطکاک می‌شود.
- شرایط آزمایشگاهی: عواملی مانند دما، سرعت چرخش و نیروی اعمالی می‌توانند بر ضریب اصطکاک تأثیر بگذارند و باعث تغییرات در نتایج شوند.

میانگین ضریب اصطکاک ۰/۰۶۳ نشان‌دهنده‌ی عملکرد نسبتاً مناسب روغن پایه در کاهش اصطکاک بین سطوح تماس است. این مقدار در محدوده‌ی قابل قبولی قرار دارد و نشان می‌دهد که روغن پایه توانسته است تا حدی از سایش و اصطکاک جلوگیری کند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

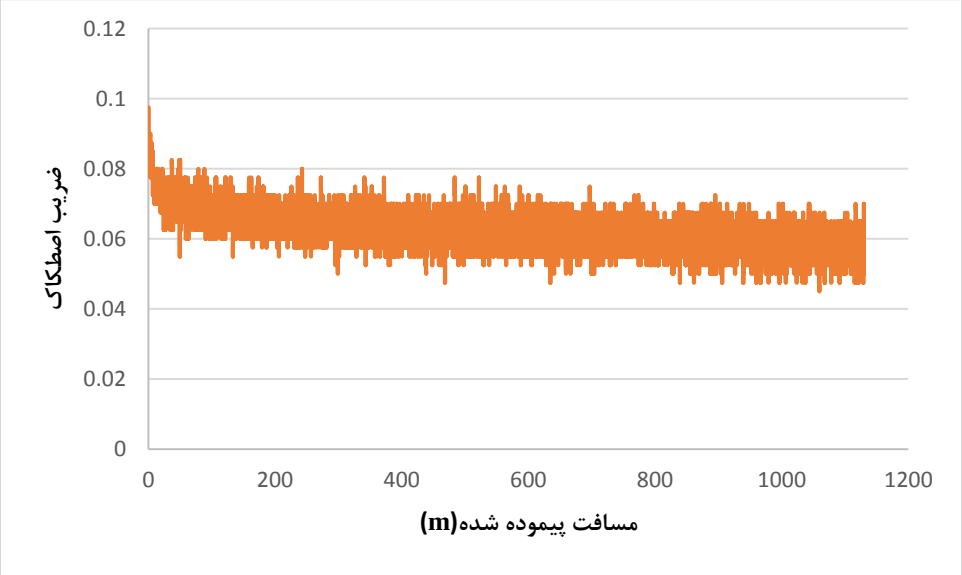
با این‌حال، این مقدار نسبت به برخی روان‌کارهای پیشرفته‌تر ممکن است بالاتر باشد، که نشان‌دهنده‌ی نیاز به بهبود خواص روان‌کاری روغن پایه است. البته در تحلیل عملکرد روغن پایه با توجه به نتایج به‌دست آمده، می‌توان گفت، نقاط قوت شامل :

- روغن‌پایه توانسته است ضریب اصطکاک را در محدوده‌ی نسبتاً پایینی نگه دارد که نشان‌دهنده‌ی عملکرد اولیه‌ی مناسب آن است.
- میانگین ضریب اصطکاک به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که روغن‌پایه تا حدی از سایش و اصطکاک جلوگیری کرده است.

هم‌چنین در خصوص نقاط ضعف آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تغییرات نسبتاً زیاد در ضریب اصطکاک (از ۰/۰۴۵ تا ۰/۰۹۷) نشان‌دهنده‌ی ناپایداری در عملکرد روان‌کاری روغن پایه است.
- این نوسانات می‌تواند ناشی از عدم تشکیل لایه‌ی روان‌کاری پایدار یا ناهمگونی در توزیع روغن در سطح تماس باشد.

باتوجه به موارد فوق می‌توان نتیجه گرفت که روغن‌پایه عملکرد اولیه‌ی مناسبی در کاهش اصطکاک دارد، اما نوسانات در ضریب اصطکاک نشان‌دهنده‌ی نیاز به بهبود خواص روان‌کاری آن است. هم‌چنین با بهینه‌سازی ترکیب روغن و افزودن مواد افزودنی مناسب، می‌توان به کاهش بیشتر ضریب اصطکاک و افزایش پایداری عملکرد روان‌کاری دست‌یافت.



شکل ۵: تغییرات ضریب اصطکاک برای روغن پایه

نتایج آزمون سایش نانو مخلوط روان‌کار با غلظت ۰/۱ درصد وزنی نشان‌دهنده‌ی تغییرات ضریب اصطکاک در محدوده‌ی ۰/۰۷۷ تا ۰/۱۲۵ است، میانگین ضریب اصطکاک نیز حدود ۰/۰۹۱ است. این نتایج نسبت به روغن‌پایه، افزایش ۴۴/۴۵ درصدی در ضریب اصطکاک را نشان می‌دهد. ضریب اصطکاک در محدوده‌ی ۰/۰۷۷ تا ۰/۱۲۵ تغییر کرده است که نشان‌دهنده‌ی نوسانات نسبتاً زیاد در عملکرد روان‌کاری نانو مخلوط است. این نوسانات می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

- توزیع ناهمگون نانوذرات: اگر نانوذرات به طور یکنواخت در روغن پخش نشده باشند، ممکن است در برخی مناطق عملکرد بهتری داشته باشند و در برخی مناطق ضعیف‌تر عمل کنند.

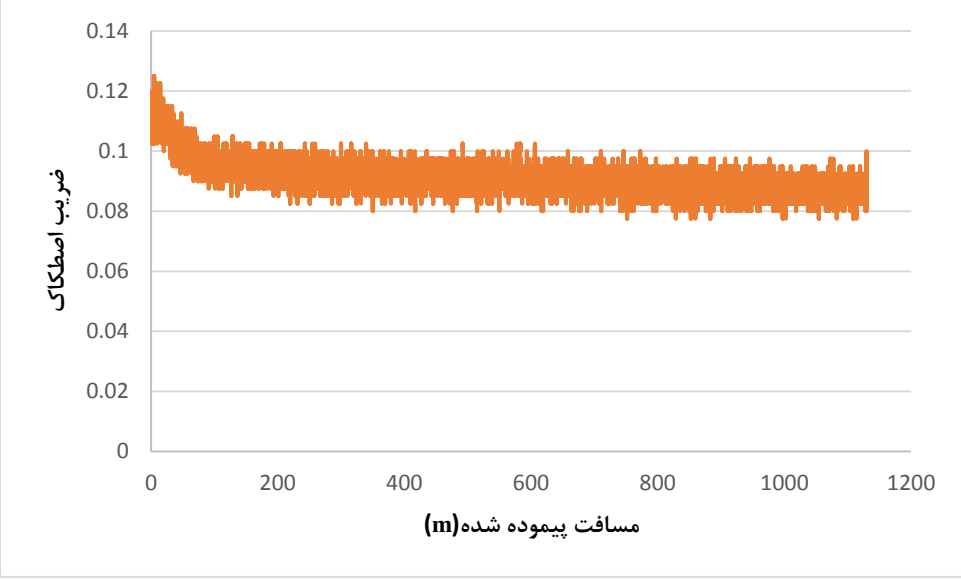
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

- تجمع نانوذرات: احتمالاً نانوذرات در غلظت ۰/۱ درصد وزنی به‌درستی پراکنده نشده‌اند و تجمع آن‌ها باعث افزایش اصطکاک شده است.
- شرایط آزمایشگاهی: عواملی مانند دما، سرعت چرخش و نیروی اعمالی نیز می‌توانند بر نتایج تأثیر بگذارند.

میانگین ضریب اصطکاک ۰/۰۹۱ نسبت به روغن پایه (۰/۰۶۳) افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. این افزایش ممکن است به دلایل زیر باشد:

- غلظت پایین نانوذرات: غلظت ۰/۱ درصد وزنی ممکن است برای بهبود خواص روان‌کاری کافی نباشد. در برخی موارد، غلظت‌های پایین نانوذرات می‌توانند باعث افزایش اصطکاک شوند، زیرا ممکن است به‌جای تشکیل لایه‌ی محافظ، به‌عنوان ذرات ساینده عمل کنند.
- عدم تشکیل لایه‌ی روان‌کاری پایدار: نانوذرات ممکن است نتوانند لایه‌ی روان‌کاری مؤثری تشکیل دهند که منجر به افزایش اصطکاک می‌شود.

باتوجه‌به نتایج، افزایش ۴۴/۴۵ درصدی ضریب اصطکاک نسبت به روغن پایه نشان‌دهنده‌ی عملکرد ضعیف نانو مخلوط در این غلظت است. هم‌چنین نوسانات زیاد در ضریب اصطکاک (۰/۰۷۷ تا ۰/۱۲۵) نشان‌دهنده‌ی ناپایداری در عملکرد روان‌کاری نانو مخلوط است. اگرچه نتایج در این غلظت مطلوب نیست، اما این آزمایش اطلاعات ارزشمندی در مورد رفتار نانوذرات در غلظت‌های پایین ارائه می‌دهد و می‌تواند به بهینه‌سازی فرمولاسیون کمک کند. به‌طور خلاصه، نتایج آزمون نشان می‌دهد که نانو مخلوط روان‌کار با غلظت ۰/۱ درصد وزنی عملکرد ضعیف‌تری نسبت به روغن پایه دارد و باعث افزایش قابل توجه ضریب اصطکاک می‌شود. این افزایش ممکن است ناشی از غلظت پایین نانوذرات، توزیع ناهمگون یا تجمع آن‌ها باشد. برای بهبود عملکرد، پیشنهاد می‌شود غلظت نانوذرات افزایش یابد و روش‌های بهتری برای پراکنده‌سازی آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۶: تغییرات ضریب اصطکاک برای نمونه با غلظت ۰/۱ درصد وزنی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

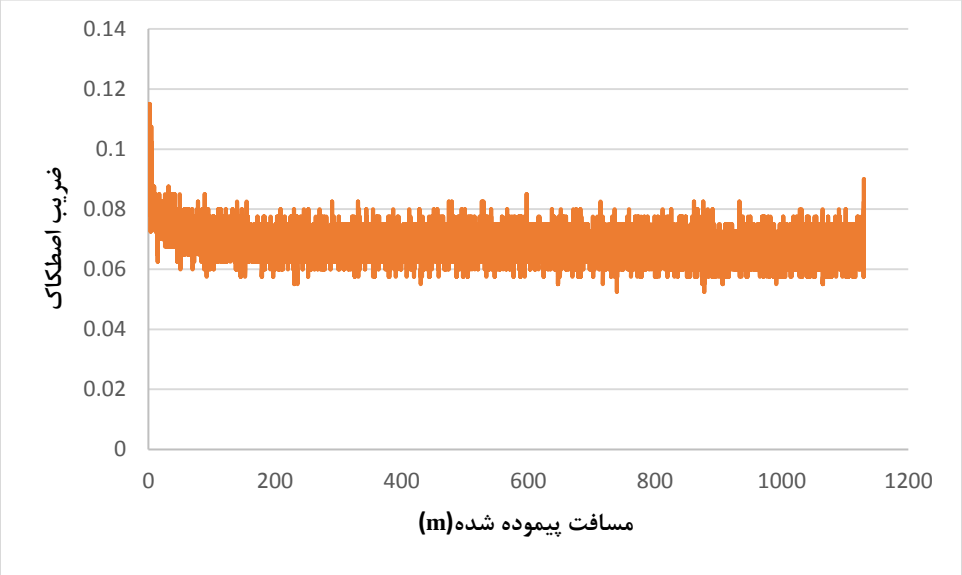
[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

محدوده‌ی تغییرات ضریب اصطکاک برای مخلوط نانو روان‌کار با غلظت ۰/۲ درصد وزنی، بین ۰/۰۵۲ تا ۰/۱۱۵ می‌باشد، که نشان‌دهنده‌ی بهبود نسبی در پایداری عملکرد روان‌کاری نسبت به غلظت ۰/۱ درصد وزنی است. بااین‌حال، هنوز نوساناتی در ضریب اصطکاک مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

- توزیع ناهمگون نانوذرات: اگرچه پراکندگی نانوذرات بهبودیافته است، اما ممکن است هنوز به‌طور کامل یکنواخت نباشد.
- شرایط آزمایشگاهی: عواملی مانند دما، سرعت چرخش و نیروی اعمالی می‌توانند بر نتایج تأثیر بگذارند.

میانگین ضریب اصطکاک ۰/۰۶۱ نسبت به روان‌کار پایه (۰/۰۶۳) کاهش ۳/۱۷ درصدی را نشان می‌دهد. این بهبود نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت افزایش غلظت نانوذرات به ۰/۲ درصد وزنی است. این کاهش ضریب اصطکاک می‌تواند ناشی از تشکیل لایه‌ی روان‌کاری مؤثرتر توسط نانوذرات باشد، که باعث کاهش اصطکاک و سایش بین سطوح تماس می‌شود. با توجه به نتایج کاهش ۳/۱۷ درصدی ضریب اصطکاک نسبت به روان‌کار پایه نشان‌دهنده‌ی بهبود عملکرد روان‌کاری نانو مخلوط است. میانگین ضریب اصطکاک (۰/۰۶۱) در محدوده‌ی قابل قبولی قرار دارد و نشان می‌دهد که نانوذرات توانسته‌اند تا حدی از سایش و اصطکاک جلوگیری کنند. ولی نوسانات در ضریب اصطکاک (۰/۰۵۲ تا ۰/۱۱۵) نشان‌دهنده‌ی این است که هنوز پایداری کامل در عملکرد روان‌کاری وجود ندارد. این نوسانات ممکن است ناشی از توزیع ناهمگون نانوذرات یا تجمع آن‌ها در برخی مناطق باشد.

به‌طور خلاصه نتایج آزمون نشان می‌دهد که نانو روان‌کار با غلظت ۰/۲ درصد وزنی نسبت به روان‌کار پایه بهبود قابل‌توجهی در کاهش ضریب اصطکاک داشته است. بااین‌حال، هنوز نوساناتی در ضریب اصطکاک مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی نیاز به بهینه‌سازی بیشتر در پراکندگی نانوذرات و افزایش غلظت آن‌ها است.



شکل ۷: تغییرات ضریب اصطکاک برای نمونه با غلظت ۰/۲ درصد وزنی

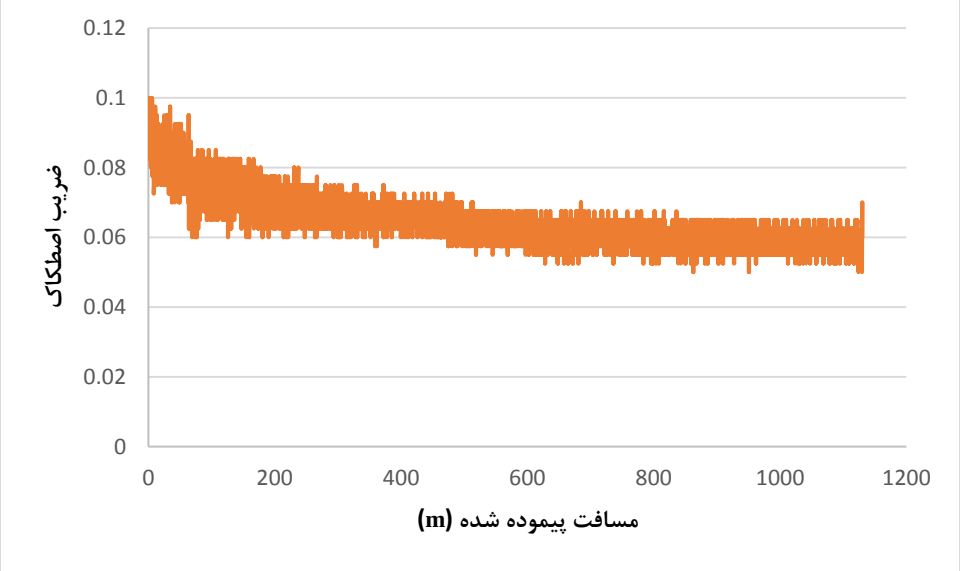
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

ضریب اصطکاک برای مخلوط نانو روان‌کار با غلظت ۰/۲ درصد وزنی، در محدوده‌ی ۰/۰۵ تا ۰/۱ تغییر کرده است که نشان‌دهنده‌ی بهبود قابل‌توجه در پایداری عملکرد روان‌کاری نسبت به غلظت‌های پایین‌تر (۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی) است. بااین‌حال، هنوز نوساناتی در ضریب اصطکاک مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

- توزیع ناهمگون نانوذرات: اگرچه پراکندگی نانوذرات بهبودیافته است، اما ممکن است هنوز به طور کامل یکنواخت نباشد.
- شرایط آزمایشگاهی: عواملی مانند دما، سرعت چرخش و نیروی اعمالی می‌توانند بر نتایج تأثیر بگذارند.

میانگین ضریب اصطکاک (۰/۰۵۸) نسبت به مقدار میانگین روان‌کار پایه (۰/۰۶۳) کاهش ۷/۹۳ درصدی را نشان می‌دهد. این بهبود قابل توجه نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت افزایش غلظت نانوذرات به ۰/۵ درصد وزنی است. این کاهش ضریب اصطکاک می‌تواند ناشی از تشکیل لایه‌ی روان‌کاری مؤثرتر توسط نانوذرات باشد، که باعث کاهش اصطکاک و سایش بین سطوح تماس می‌شود.

در تحلیل عملکرد نانو روان‌کار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی، کاهش ۷/۹۳ درصدی ضریب اصطکاک نسبت به روان‌کار پایه نشان‌دهنده‌ی بهبود قابل‌توجه عملکرد روان‌کاری نانو مخلوط است و میانگین ضریب اصطکاک در محدوده‌ی بسیار مطلوبی قرار دارد و نشان می‌دهد که نانوذرات توانسته‌اند به‌طور مؤثری از سایش و اصطکاک جلوگیری کنند. در مورد نقاط ضعف این مخلوط، نوسانات در ضریب اصطکاک (۰/۰۵ تا ۰/۱) نشان‌دهنده‌ی این است که هنوز پایداری کامل در عملکرد روان‌کاری وجود ندارد. این نوسانات ممکن است ناشی از توزیع ناهمگون نانوذرات یا تجمع آن‌ها در برخی مناطق باشد. باتوجه به نتایج، نانو روان‌کار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی نسبت به روان‌کار پایه بهبود قابل‌توجهی در کاهش ضریب اصطکاک داشته است. با این‌حال، هنوز نوساناتی در ضریب اصطکاک مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی نیاز به بهینه‌سازی بیش‌تر در پراکندگی نانوذرات و افزایش غلظت آن‌ها است. این نتایج نشان‌دهنده‌ی پتانسیل بالای نانو روان‌کارها برای بهبود خواص روان‌کاری است، اما نیاز به تحقیقات بیش‌تر برای دست‌یابی به عملکرد پایدارتر وجود دارد.



شکل ۸ : تغییرات ضریب اصطکاک برای نمونه با غلظت ۰/۵ درصد وزنی

جدول (۴) تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به مسافت طی شده در دستگاه پین روی دیسک برای چهار نمونه، به‌طور خلاصه نمایش داده شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

جدول ۴: مقایسه‌ی تغییرات ضریب اصطکاک در تمام نمونه‌ها

نمونه مورد آزمایش	تغییرات ضریب اصطکاک	میانگین ضریب اصطکاک	تغییرات نسبت به روان‌کار پایه
روان‌کار پایه	۰/۰۹۷ -۰/۰۴۵	۰/۰۶۳	----
نمونه با غلظت ۱/ ۰درصد	۰/۰-۱۲۵/۰۷۷	۰/۰۹۱	۴۴/۴۵٪ افزایش
نمونه با غلظت ۰/۲ درصد	۰/۰-۱۱۵/۰۵۲	۰/۰۶۱	۳/۱۷٪ کاهش
نمونه با غلظت ۰/۵ درصد	۰/۰-۱/۰۵	۰/۰۵۸	۷/۹۳٪ کاهش

نتایج حاصل از این پژوهش، با نتایج برخی از پژوهش‌ها هم‌خوانی و با برخی از پژوهش‌ها مغایرت دارد که در ادامه به مواردی از آن‌ها اشاره می‌شود.

در مطالعه‌ای که توسط گولزار و همکاران[1] در سال ۲۰۱۷، انجام شد، نانوذرات TiO_2 با غلظت‌های مختلف به روغن‌پایه افزوده شدند. نتایج نشان داد در غلظت ۰/۱ درصد وزنی، ضریب اصطکاک حدود ۱۰ درصد و در غلظت ۰/۵ درصد وزنی، ضریب اصطکاک حدود ۲۰ درصد کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات TiO_2 می‌توانند به طور مؤثری ضریب اصطکاک را کاهش دهند، اما کاهش ضریب اصطکاک در این پژوهش (۷/۹۳ درصد در غلظت ۰/۵ درصد وزنی) کمی کم‌تر از این مقدار است. این تفاوت ممکن است ناشی از تفاوت در روش‌های پراکنده‌سازی نانوذرات یا شرایط آزمایش باشد [۱۵].

در مطالعه‌ای که توسط وو و همکاران[2] در سال ۲۰۰۷ انجام شد، نانوذرات Al_2O_3 با غلظت‌های مختلف به روغن‌پایه افزوده شدند. نتایج نشان داد در غلظت ۰/۱ درصد وزنی، ضریب اصطکاک حدود ۵ درصد و در غلظت ۰/۵ درصد وزنی، ضریب اصطکاک حدود ۱۵ درصد کاهش یافت. این نتایج مشابه نتایج این پژوهش در غلظت ۰/۲ درصد وزنی (کاهش ۳/۱۷ درصدی) است، اما در غلظت ۰/۵ درصد وزنی، کاهش ضریب اصطکاک در این پژوهش (۷/۹۳ درصد) کمی کم‌تر از این مقدار است[۱۶].

در مطالعه‌ای دیگر که توسط راپوپورت و همکاران در سال ۲۰۰۳ انجام شد، نانوذرات الماس با غلظت‌های مختلف به روغن‌پایه افزوده شدند. نتایج نشان داد، در غلظت ۰/۱ درصد وزنی، ضریب اصطکاک حدود ۸ درصد و در غلظت ۰/۵ درصد وزنی، ضریب اصطکاک حدود ۲۵ درصد کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات الماس می‌توانند به‌طور مؤثری ضریب اصطکاک را کاهش دهند، اما کاهش ضریب اصطکاک در این پژوهش کم‌تر از این مقدار است. این تفاوت ممکن است ناشی از تفاوت در نوع نانوذرات و خواص آن‌ها باشد [۱۷]. ژانگ و همکاران[3] نیز در سال ۲۰۲۰، در پژوهشی اثر نانوذرات TiO_2 با غلظت‌های مختلف را بر روی روغن‌پایه بررسی کردند. نتایج نشان داد در غلظت ۰/۱ درصد وزنی، ضریب اصطکاک حدود ۱۲ درصد و در غلظت ۰/۵ درصد وزنی، ضریب اصطکاک حدود ۲۲ درصد کاهش یافت [۱۸].

با جمع‌بندی مقایسه‌ها مشخص می‌شود نتایج این پژوهش در غلظت‌های پایین (۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی) نسبت به برخی مطالعات دیگر مانند[۱۵]، [۱۶]، [۱۷] و[۱۸] عملکرد ضعیف‌تری را نشان می‌دهد، اما در غلظت ۰/۵ درصد وزنی، کاهش ضریب اصطکاک به نتایج برخی مطالعات نزدیک است. تفاوت‌های مشاهده‌شده ممکن است ناشی از عوامل زیر باشد:

[1] Gulzar et al.

[2] Wu et al.

[3] Zhang et al.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

- نوع نانوذرات: نانوذرات مختلف مانند TiO_2، Al_2O_3 یا الماس خواص روان‌کاری متفاوتی دارند.
- روش‌های پراکنده‌سازی: روش‌های مختلف پراکنده‌سازی نانوذرات می‌توانند بر عملکرد آن‌ها تأثیر بگذارند.
- شرایط آزمایشگاهی: دما، سرعت چرخش و نیروی اعمالی می‌توانند بر نتایج تأثیر بگذارند.

۳-۱-۱- تحلیل نمودارها و نتایج حاصل از آزمون ضریب اصطکاک

در غلظت ۰/۱ درصد وزنی، نانو روان‌کار نه تنها بهبودی در کاهش ضریب اصطکاک نشان نداد، بلکه افزایش قابل توجهی در ضریب اصطکاک مشاهده شد. این افزایش می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

- توزیع ناهمگون نانوذرات: در غلظت‌های پایین، نانوذرات ممکن است به‌طور یکنواخت در روغن پخش نشده باشند و حتی به‌عنوان ذرات ساینده عمل کنند.
- تجمع نانوذرات: اگر نانوذرات به‌درستی پراکنده نشوند، ممکن است تجمع کرده و باعث افزایش اصطکاک شوند.
- عدم تشکیل لایه‌ی روان‌کاری مؤثر: در غلظت‌های پایین، نانوذرات ممکن است نتوانند لایه‌ی محافظتی مؤثری تشکیل دهند.

در غلظت ۰/۲ درصد وزنی، بهبود نسبی در عملکرد روان‌کاری مشاهده شد، اما کاهش ضریب اصطکاک چندان چشم‌گیر نبود. این بهبود می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

- پراکندگی بهتر نانوذرات: افزایش غلظت نانوذرات ممکن است به پراکندگی بهتر آن‌ها کمک کرده باشد.
- تشکیل لایه‌ی روان‌کاری اولیه: نانوذرات ممکن است شروع به تشکیل لایه‌ی محافظتی کرده باشند، اما این لایه هنوز به‌طور کامل پایدار نیست.
- نوسانات در ضریب اصطکاک: محدوده‌ی نسبتاً وسیع ضریب اصطکاک (۰/۰۵۲ تا ۰/۱۱۵) نشان‌دهنده‌ی ناپایداری در عملکرد روان‌کاری است.

برای غلظت ۰/۵درصد وزنی، بهبود قابل توجهی در کاهش ضریب اصطکاک مشاهده شد. این بهبود می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

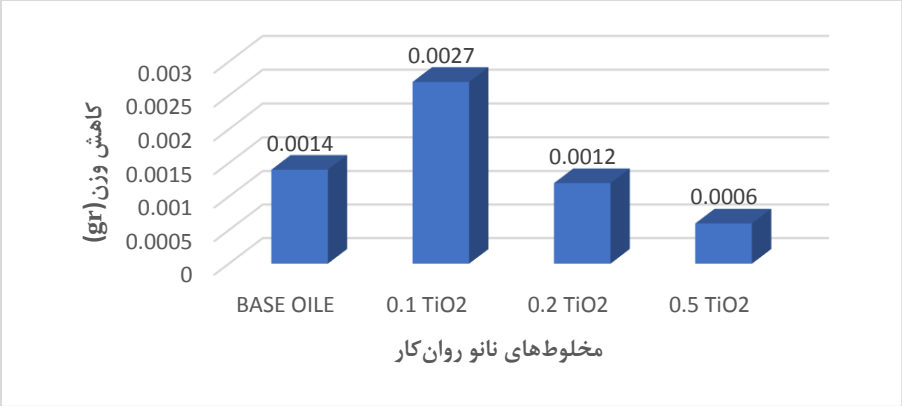
- تشکیل لایه‌ی روان‌کاری مؤثر: در غلظت‌های بالاتر، نانوذرات ممکن است لایه‌ی محافظتی پایدارتری تشکیل دهند که باعث کاهش اصطکاک می‌شود.
- پراکندگی بهتر نانوذرات: افزایش غلظت نانوذرات ممکن است به پراکندگی بهتر و یکنواخت‌تر آن‌ها کمک کرده باشد.
- کاهش نوسانات: محدوده‌ی ضریب اصطکاک (۰/۰۵ تا ۰/۱) نسبت به غلظت‌های پایین‌تر باریک‌تر است که نشان‌دهنده‌ی پایداری بیش‌تر در عملکرد روان‌کاری است.

۳ -۲ تحلیل نتایج آزمون سایش با دستگاه پین روی دیسک

در آزمون سایش پین روی دیسک، تغییرات کاهش وزن دیسک‌ها، برای روان‌کار پایه و مخلوط‌های تهیه شده با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی به‌صورت نمودار شکل (۹) مشاهده می‌شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]



شکل ۹: تغییرات کاهش وزن دیسک‌ها برای تمام نمونه‌ها

نتایج آزمون سایش و ضریب اصطکاک نانو روان‌کارهای حاوی نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) در غلظت‌های مختلف (۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی) نشان‌دهنده‌ی رفتار متفاوتی نسبت به روغن‌پایه است. این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که تغییرات در غلظت نانوذرات تأثیر مستقیمی بر میزان سایش و ضریب اصطکاک دارد. برای غلظت ۰/۱درصد وزنی، میزان سایش، افزایش ۹۲/۸۶ درصدی و ضریب اصطکاک، افزایش ۴۴/۴۵ درصدی نسبت به روغن‌پایه دارد. در این غلظت، هم میزان سایش و هم ضریب اصطکاک به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته‌اند. این افزایش می‌تواند ناشی از عواملی چون توزیع ناهمگون نانوذرات، تجمع نانوذرات و عدم تشکیل لایه‌ی روان‌کاری مؤثر محافظتی باشد. برای غلظت ۰/۲درصد وزنی، میزان سایش، کاهش ۱۴/۲۸ درصدی و ضریب اصطکاک، کاهش ۳/۱۷ درصدی نسبت به روغن‌پایه دارد. در این غلظت، بهبود نسبی در عملکرد روان‌کاری مشاهده شد، اما کاهش میزان سایش و ضریب اصطکاک چندان چشم‌گیر نبود. این بهبود می‌تواند ناشی از عواملی مثل پراکندگی بهتر نانوذرات، تشکیل لایه‌ی روان‌کاری اولیه و نوسانات در ضریب اصطکاک و سایش باشد. در غلظت ۰/۵ درصد وزنی، میزان سایش، کاهش ۵۷/۱۴ و ضریب اصطکاک، کاهش ۷/۹۳ درصدی نسبت به روغن‌پایه دارد. در این غلظت، بهبود قابل‌توجهی در کاهش میزان سایش و ضریب اصطکاک مشاهده شد. این بهبود می‌تواند ناشی از عواملی نظیر تشکیل لایه‌ی روان‌کاری مؤثر، پراکندگی بهتر نانوذرات و کاهش نوسانات باشد. نتایج این پژوهش در بعضی موارد با نتایج سایر پژوهش‌ها هم‌خوانی و با بعضی پژوهش‌های دیگر مغایرت دارد. به‌طور مثال در غلظت ۰/۱ درصد وزنی، نتایج این پژوهش، افزایش سایش (۹۲/۸۶ درصد) را نشان می‌دهد، درحالی‌که در مطالعه‌ی [۱۸]، کاهش ۱۰ درصدی در میزان سایش مشاهده شده است و در غلظت ۰/۵ درصد وزنی، میزان کاهش سایش در پژوهش حاضر (۵۷/۱۴ درصد) و بیش‌تر از کاهش ۲۵ درصدی در مطالعه‌ی [۱۸] است. یا در پژوهش لیو و همکاران[1] که اثر نانوذرات TiO_2 با غلظت‌های مختلف را بر روغن‌پایه بررسی کردند به این نتیجه رسیدند که در غلظت ۰/۱ درصد وزنی، کاهش سایش حدود ۸ درصد و در غلظت ۰/۵ درصد وزنی، کاهش سایش حدود ۲۰ درصد نسبت به روغن‌پایه است [۱۹]. نتایج وانگ و همکاران[2] نیز در بررسی اثر نانوذرات TiO_2 با غلظت‌های مختلف بر روان‌کار نشان داد، در غلظت ۰/۱ درصد وزنی، کاهش سایش حدود ۱۲ درصد و در غلظت ۰/۵ درصد وزنی، کاهش سایش حدود ۲۲ درصد نسبت به روغن پایه می‌باشد. برای بهبود عملکرد روان‌کار می‌توان از روش‌هایی مثل بهینه‌سازی روش‌های پراکنده‌سازی، افزایش غلظت نانوذرات و بررسی ویژگی‌های نانوذرات مثل استفاده از نانوذرات با اندازه‌ی کوچک‌تر و خلوص بالاتر استفاده کرد که ممکن است نتایج بهتری حاصل شود [۱۰].

[1] Liu et al.
[2] Wang et al.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

بهبود خواص فشارپذیری و ضدسایشی نانو روان‌کارها ناشی از سه اثر اصلی نانوذرات است. این اثرات به‌طور هم‌زمان عمل می‌کنند و باعث افزایش کارایی روان‌کارها در شرایط سخت و تحت بارهای سنگین می‌شوند. در زیر به توضیح این سه اثر پرداخته می‌شود:

۱- اثر غلتشی[1]

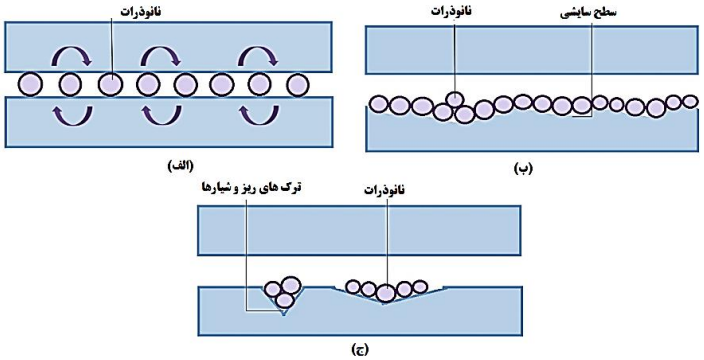
نانوذرات به‌عنوان ذرات جامد در روان‌کار، در شرایطی که سطوح در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند، می‌توانند بین سطوح غلتیده شوند. این غلتش باعث کاهش تماس مستقیم بین سطوح و در نتیجه کاهش اصطکاک و سایش می‌شود. مکانیسم آن به‌گونه‌ای است که نانوذرات مانند بلبرینگ‌های کوچک عمل می‌کنند و با غلتیدن بین سطوح، از تماس مستقیم فلز با فلز جلوگیری می‌کنند. این امر به‌ویژه در شرایط بارگذاری بالا و سرعت‌های پایین مؤثر است که نتیجه آن کاهش اصطکاک و سایش، افزایش عمر مفید قطعات و بهبود عملکرد روان‌کاری است.

۲- اثر پوشش‌دهی[2]

نانوذرات می‌توانند روی سطوح فلزی رسوب‌کرده و یک لایه‌ی نازک و محافظ تشکیل دهند. این لایه به‌عنوان یک مانع فیزیکی عمل می‌کند و از تماس مستقیم سطوح جلوگیری می‌کند. نانوذرات به‌طور یکنواخت روی سطوح پخش شده و یک لایه‌ی محافظ تشکیل می‌دهند. این لایه می‌تواند از سایش، خوردگی و آسیب‌های سطحی جلوگیری کند که نتیجه آن، افزایش مقاومت سطوح در برابر سایش، بهبود خواص ضدخوردگی و افزایش پایداری روان‌کار در شرایط سخت است.

۳- اثر ترمیمی[3]

نانوذرات می‌توانند در مناطقی که سایش یا آسیب سطحی رخ داده است، رسوب‌کرده و نواقص سطحی را پر کنند. این فرآیند به‌عنوان ترمیم سطحی عمل می‌کند و از پیشرفت آسیب جلوگیری می‌کند. نانوذرات در مناطق آسیب‌دیده تجمع کرده و با پر کردن ترک‌ها و حفره‌ها، سطح را صاف و یکنواخت می‌کنند. این امر باعث کاهش تمرکز تنش و جلوگیری از گسترش آسیب می‌شود که نتیجه آن، افزایش عمر مفید قطعات، کاهش نیاز به تعمیرات و بهبود عملکرد کلی سیستم است. این سه اثر (غلتشی، پوشش‌دهی و ترمیمی) به‌طور هم‌زمان عمل می‌کنند و باعث بهبود خواص فشارپذیری و ضدسایشی نانو روان‌کارها می‌شوند. این اثرات به‌ویژه در شرایطی که روان‌کار تحت بارهای سنگین، دماهای بالا و سرعت‌های مختلف قرار می‌گیرد، بسیار مؤثر هستند. با استفاده از نانوذرات، می‌توان به روان‌کارهایی با عملکرد بهتر، عمر طولانی‌تر و مقاومت بیش‌تر در برابر سایش دست‌یافت [۲۰، ۲۱ و ۲۲].



الف: تأثیر غلتشی، ب: نقش نانوذرات به‌عنوان پرکننده خلل‌وفرج، ج: تأثیر اصلاحی (ترمیمی)

شکل ۱۰ : ساز وکار عملکرد نانو روان‌کارها بر روی سطوح اصطکاکی [۲۳]

[1] Rolling Effect
[2] Coating Effect
[3] Mending Effect

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

۳-۲- نتایج آزمون تعیین خواص فیزیکی

۳-۲-۱- نتایج آزمون گران‌روی

نتایج آزمون گران‌روی نمونه‌های نانو روان‌کار حاوی نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) در دو دمای ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد نشان‌دهنده‌ی رفتار متفاوتی نسبت به تغییر غلظت نانوذرات است. نتایج آزمون گران‌روی در دمای ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، نشان داد، با افزایش غلظت نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید، گران‌روی نانو روان‌کار کاهش می‌یابد. بیش‌ترین کاهش گران‌روی، در غلظت ۰/۵ درصد وزنی، به میزان ۱۱/۹۵ درصد مشاهده شد. این کاهش می‌تواند ناشی از اثر روان‌کنندگی نانوذرات باشد. نانوذرات TiO_2 با تشکیل لایه‌ای نازک روی سطوح، اصطکاک را کاهش داده و باعث بهبود جریان‌پذیری روان‌کار می‌شوند. در غلظت‌های پایین‌تر (۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی)، نانوذرات ممکن است به‌طور کامل پراکنده نشده باشند، اما در غلظت ۰/۵ درصد وزنی، پراکندگی بهتر و تشکیل لایه‌ی محافظتی مؤثرتر باعث کاهش بیش‌تر گران‌روی می‌شود. این رفتار نشان‌دهنده‌ی این است که نانوذرات در دمای پایین‌تر، تأثیر بیش‌تری بر کاهش گران‌روی دارند.

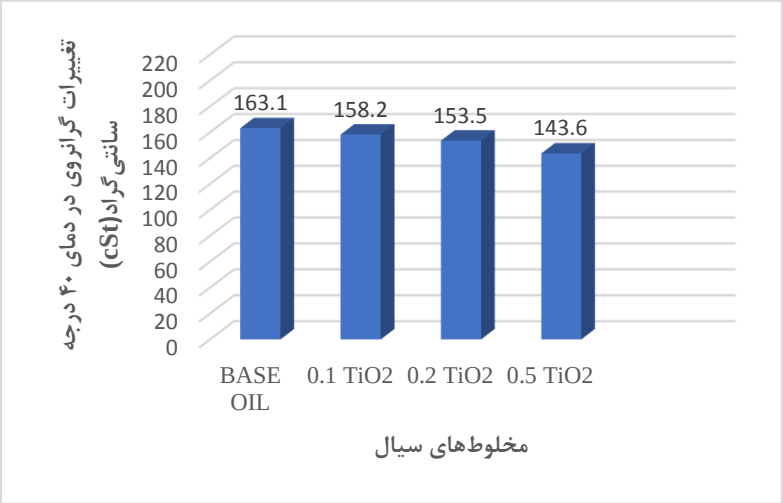
نتایج آزمون گران‌روی در دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد نیز نشان داد، با تغییر غلظت نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید، گران‌روی نانو روان‌کار تغییر محسوسی نمی‌کند. در دمای بالا، ویسکوزیته‌ی روغن‌پایه به‌طور طبیعی کاهش می‌یابد. در این شرایط، تأثیر نانوذرات بر گران‌روی ممکن است کم‌تر مشهود باشد، زیرا ویسکوزیته‌ی پایه خود به‌اندازه‌ی کافی پایین است. نانوذرات ممکن است در دمای بالا به‌طور کامل فعال نشوند یا تأثیر آن‌ها بر گران‌روی به‌دلیل کاهش ویسکوزیته‌ی پایه، کم‌تر قابل‌تشخیص باشد. این رفتار نشان‌دهنده‌ی این است که نانوذرات در دمای بالا، تأثیر کم‌تری بر گران‌روی دارند و بیش‌تر بر خواص ضدسایشی و فشارپذیری تأکید می‌کنند.

پس می‌توان جمع‌بندی کرد که در دمای ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، کاهش گران‌روی با افزایش غلظت نانوذرات نشان‌دهنده‌ی بهبود عملکرد روان‌کاری در شرایط دمایی پایین‌تر است و بیش‌ترین کاهش گران‌روی در غلظت ۰/۵ درصد وزنی (۱۱/۹۵ درصد) نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت نانوذرات در کاهش اصطکاک و بهبود جریان‌پذیری است و در دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، ثبات گران‌روی نشان‌دهنده‌ی این است که نانوذرات در دمای بالا، تأثیر کم‌تری بر گران‌روی دارند و بیش‌تر بر خواص ضدسایشی و فشارپذیری تأکید می‌کنند. این رفتار ممکن است ناشی از کاهش طبیعی ویسکوزیته‌ی روغن‌پایه در دمای بالا باشد. نتایج حاصل در این پژوهش با یافته‌های بسیاری از محققین دیگر مطابقت ندارد. ماسودا[1] و همکاران که در پژوهش خود از نانوذرات دی‌اکسید آلومینیم، دی‌اکسید تیتانیوم و دی‌اکسید سیلیسیم استفاده کردند، در نتایج خود گزارش نمودند که افزایش غلظت نانوذرات در ترکیب روان‌کار سبب افزایش گران‌روی آن شده است [۲۴]. در پژوهش‌های دیگری مطابق با این یافته گزارش‌شده است. به‌طور مثال آزمن و همکاران[2] که در پژوهش خود از مس و اکسید مس استفاده کردند، گزارش نمودند افزایش غلظت نانوذرات سبب کاهش اندکی در میزان گران‌روی نانو روان‌کار شده است. آن‌ها علت کاهش گران‌روی در پژوهش خود را تضعیف نیروهای بین‌مولکولی گزارش کردند که سبب می‌شود لایه‌های نانوذرات به‌آسانی جابه‌جا شوند و مقاومت به برش آن‌ها کم شود [۲۵]. هم‌چنین احمد علی[3] و همکاران نیز کاهش گران‌روی را در نتیجه‌ی ضعیف‌شدن نیروهای بین‌مولکولی گزارش کردند؛ در پژوهش آن‌ها از اکسید آلومینیم و اکسید تیتانیوم در ترکیب با روان‌کار استفاده شد [۲۶].

[1]- Masuda et al
[2]- Azman et al
[3]- Ahmed Ali et al

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]



شکل ۱۱: تغییرات گران‌روی نمونه‌ها، در دمای ۴۰ درجه‌ی‌سانتی‌گراد



شکل ۱۲: تغییرات گران‌روی نمونه‌ها، در دمای ۱۰۰ درجه‌ی‌سانتی‌گراد

۳-۲-۲- نتایج آزمون نقطه‌ی اشتعال و نقطه ریزش

نتایج آزمون تعیین نقطه‌ی اشتعال برای روغن‌پایه و نانو روان‌کارهای حاوی نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) نشان‌دهنده‌ی کاهش جزئی در نقطه‌ی اشتعال با افزایش غلظت نانوذرات است. نتایج نقطه‌ی اشتعال و ریزش نمونه‌های تهیه شده در نمودار شکل (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. بر اساس نتایج، کاهش جزئی نقطه‌ی اشتعال با افزایش غلظت نانوذرات مشاهده شد. هم‌چنین با افزایش غلظت نانوذرات، نقطه‌ی اشتعال به‌طور جزئی کاهش یافته است. این کاهش می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

۱) تأثیر نانوذرات بر ساختار روغن:

- نانوذرات ممکن است ساختار مولکولی روغن را تغییر داده و باعث کاهش نقطه‌ی اشتعال شوند.
- نانوذرات می‌توانند به‌عنوان کاتالیزور عمل کرده و فرآیند اشتعال را تسریع کنند.

۲) افزایش سطح تماس:

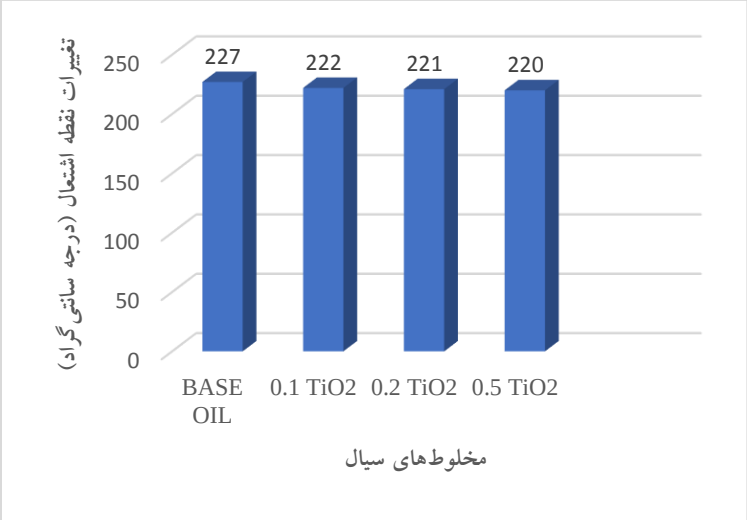
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

- نانوذرات با افزایش سطح تماس، ممکن است باعث تسریع در فرآیند تبخیر و اشتعال شوند.

۳) تغییر در خواص فیزیکی روغن:

- افزودن نانوذرات ممکن است باعث تغییر در ویسکوزیته و سایر خواص فیزیکی روغن شود که به‌طور غیرمستقیم بر نقطه‌ی اشتعال تأثیر می‌گذارد.



شکل ۱۳: تغییرات نقطه‌ی اشتعال نمونه‌ها

نقطه‌ی اشتعال روغن پایه (۲۲۷ درجه‌ی سانتی‌گراد) نسبت به نانو روان‌کارها بالاتر است. این نشان‌دهنده‌ی این است که افزودن نانوذرات، حتی در غلظت‌های پایین، می‌تواند بر نقطه‌ی اشتعال تأثیر بگذارد. با این‌حال، کاهش نقطه‌ی اشتعال در تمام نمونه‌ها نسبت به روغن پایه جزئی است (بین ۵ تا ۷ درجه‌ی سانتی‌گراد). این کاهش چندان چشم‌گیر نیست و نشان‌دهنده‌ی این است که نانوذرات تأثیر محدودی بر نقطه‌ی اشتعال دارند. پس به‌طور خلاصه، با افزایش غلظت نانوذرات، نقطه‌ی اشتعال به‌طور جزئی کاهش یافته است. این کاهش ممکن است ناشی از تأثیر نانوذرات بر ساختار روغن و افزایش سطح تماس باشد. کاهش نقطه‌ی اشتعال در تمام نمونه‌ها نسبت به روغن پایه جزئی است و نشان‌دهنده‌ی این است که نانوذرات تأثیر محدودی بر این پارامتر دارند. با توجه به این‌که نقطه‌ی اشتعال یک پارامتر مهم در تعیین ایمنی و کاربرد روان‌کارها است. کاهش جزئی نقطه‌ی اشتعال در نانو روان‌کارها ممکن است نیاز به بررسی بیش‌تر در کاربردهای خاص داشته باشد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]



شکل ۱۴: تغییرات نقطه‌ی ریزش نمونه‌ها

نتایج آزمون نقطه‌ی ریزش برای روغن‌پایه و نانو روان‌کارهای حاوی نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) در غلظت‌های مختلف نشان‌دهنده‌ی تغییرات جزئی در نقطه‌ی ریزش است. بر اساس نتایج نقطه‌ی ریزش در غلظت‌های پایین دارای ثبات است. به‌گونه‌ای که در غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی، نقطه‌ی ریزش نانو روان‌کارها تغییری نسبت به روغن‌پایه نداشته و در ۱۸ -درجه‌ی سانتی‌گراد باقی‌مانده است. این نشان‌دهنده‌ی این است که افزودن نانوذرات در این غلظت‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر نقطه‌ی ریزش ندارد. اما برای غلظت ۰/۵ درصد وزنی کاهش جزئی نقطه‌ی ریزش را به همراه داشت. در این غلظت، نقطه‌ی ریزش به ۱۹ -درجه‌ی سانتی‌گراد کاهش‌یافته است. این کاهش جزئی ممکن است ناشی از عوامل زیر باشد:

۱-تأثیر نانوذرات بر ساختار روغن:

- نانوذرات ممکن است ساختار مولکولی روغن را تغییر داده و باعث کاهش نقطه‌ی ریزش شوند.

۲-افزایش ویسکوزیته:

- در غلظت‌های بالاتر، نانوذرات ممکن است باعث افزایش ویسکوزیته‌ی روغن شده و در نتیجه نقطه‌ی ریزش را کاهش دهند.

نتایج این پژوهش با نتایج بسیاری از محققین هم‌خوانی دارد، به‌طور مثال در پژوهش [۱۸] که اثر نانوذرات TiO_2 با غلظت‌های مختلف بر روی روغن‌پایه بررسی شد. نتایج نشان داد در غلظت‌های پایین (۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی)، نقطه‌ی ریزش تغییری نکرد. اما در غلظت ۰/۵ درصد وزنی، نقطه‌ی ریزش حدود ۱ تا ۲ درجه‌ی سانتی‌گراد کاهش یافت. این نتایج با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد و نشان‌دهنده‌ی کاهش جزئی نقطه‌ی ریزش در غلظت ۰/۵ درصد وزنی است. هم‌چنین در پژوهش [۱۰] نتایج نشان داد در غلظت‌های پایین (۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی)، نقطه‌ی ریزش تغییری نمی‌کند. اما در غلظت ۰/۵ درصد وزنی، نقطه‌ی ریزش حدود ۱ درجه‌ی سانتی‌گراد کاهش یافت. در پژوهش [۱۹] نیز در غلظت‌های پایین (۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی)، نقطه‌ی ریزش تغییری نکرد. اما در غلظت ۰/۵ درصد وزنی، نقطه‌ی ریزش حدود ۲ درجه‌ی سانتی‌گراد کاهش یافت.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر افزودن نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) بر خواص روان‌کاری روغن‌پایه سویا اپوکسی شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات به‌طور قابل‌توجهی خواص تریبولوژیکی و فیزیکی روغن‌پایه را بهبود بخشیده است. در غلظت‌های پایین (۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی)، نانوذرات تأثیر محدودی بر گران‌روی و نقطه‌ی ریزش داشتند، اما در غلظت ۰/۵ درصد

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

وزنی، بهبود چشم‌گیری در کاهش گران‌روی و کاهش سایش مشاهده شد. هم‌چنین، نقطه‌ی ریزش در این غلظت به‌طور جزئی کاهش یافت (از ۱۸- به ۱۹ - درجه‌ی سانتی‌گراد). نقطه‌ی اشتعال نیز با افزایش غلظت نانوذرات به‌طور جزئی کاهش یافت، اما این کاهش چندان چشم‌گیر نبود و نشان‌دهنده‌ی تأثیر محدود نانوذرات بر این پارامتر است. نتایج آزمون سایش نیز نشان داد که نانو روان‌کار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی بیش‌ترین کاهش سایش و ضریب اصطکاک را دارد، که نشان‌دهنده‌ی تشکیل لایه‌ی محافظتی مؤثر توسط نانوذرات است. این بهبود خواص ناشی از سه اثر اصلی نانوذرات، یعنی اثر غلتشی، اثر پوشش‌دهی و اثر ترمیمی، است که به‌طور هم‌زمان عمل می‌کنند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید به روغن پایه سویا اپوکسی‌شده، به‌ویژه در غلظت ۰/۵ درصد وزنی، می‌تواند به‌طور مؤثری خواص روان‌کاری را بهبود بخشد. این بهبود شامل کاهش گران‌روی، کاهش سایش و افزایش پایداری در شرایط دمایی مختلف است. با این‌حال، تأثیر نانوذرات بر نقطه‌ی اشتعال و نقطه‌ی ریزش جزئی بود و نیاز به بررسی‌های بیش‌تر دارد. در پایان پیشنهاد می‌شود پژوهش‌هایی در زمینه تأثیر غلظت‌های بالاتر نانوذرات (۰/۷۵ تا ۱ درصد وزنی) بر خواص روان‌کاری، بررسی تأثیر نانوذرات ترکیبی مانند TiO_2 همراه با نانوذرات دیگر بر بهبود خواص روان‌کاری، استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر برای پراکنده‌سازی نانوذرات به‌منظور بهبود عملکرد آن‌ها، انجام آزمایش‌های بیش‌تر در دماها و شرایط عملیاتی مختلف به‌منظور درک بهتر رفتار نانو روان‌کارها، بررسی تأثیر نانوذرات بر خواص شیمیایی و مطالعه‌ی تأثیر نانوذرات بر خواص شیمیایی روغن پایه، مانند مقاومت در برابر اکسیداسیون و تخریب حرارتی انجام شود.

منابع و مراجع:

[1] Shashidhara, Y. M., & Jayaram, S. R. (2010). Vegetable oils as a potential cutting fluid—An evolution. *Tribology International*, 43(5-6), 1073-1081.

[2] Quinchia, L. A., Delgado, M. A., Valencia, C., Franco, J. M., & Gallegos, C. (2010). Viscosity modification of different vegetable oils with EVA copolymer for lubricant applications. *Industrial Crops and Products*, 32(3), 607-612.

[3] Rapoport, L., Leshchinsky, V., Lvovsky, M., Nepomnyashchy, O., Volovik, Y., & Tenne, R. (2002). Mechanism of friction of fullerenes. *Industrial Lubrication and Tribology*, 54(4), 171-176.

[4] Gulzar, M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Varman, M., Zulkifli, N. W. M., & Mufti, R. A. (2016). Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives. *Journal of Nanoparticle Research*, 18(8), 1-25.

[5] Ali, M. K. A., Xianjun, H., Mai, L., Qingping, C., Turkson, R. F., & Bicheng, C. (2016). 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*, 103, 540-554.

[6] Zhang, Y., et al. (2021). "Tribological properties of TiO_2 nanoparticles as lubricant additives." *Tribology International*, 154, 106725.

[7] Kumar, R., et al. (2020). "Enhancement of tribological properties of castor oil using TiO_2 nanoparticles." *Journal of Cleaner Production*, 252, 119823.

[8] Sharma, B.K., et al. (2020). "Epoxidation of soybean oil for improved lubricant properties." *Industrial Crops and Products*, 145, 112098.

[9] Ali, M.K.A., et al. (2022). "Effect of TiO_2 nanoparticles on the tribological properties of epoxidized soybean oil." *Lubrication Science*, 34(2), 45-58.

[10] Wang, H., et al. (2023). "Optimization of TiO_2 nanoparticle concentration in bio-based lubricants for enhanced performance." *Journal of Nanomaterials*, 2023, 123456.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

[11] Gertz, C., Klostermeyer, H., & Matthäus, B., (2000), Fatty acid patterns of vegetable oils with special emphasis on rapeseed oil and olive oil. Fett/Lipid, 102(12), 438-445.

[12] Li, Hongbo; Wang, Mingxia; Yin, Shu; Liu, Xuetong; Wang, Xiuli. (2019), Anatase TiO_2: Rational Synthesis Methods and Properties for Energy and Environmental Applications." Small Methods. 3(8): 1900019. DOI: 10.1002/smtd.201900019.

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

[14] Jun ZHAO, Yiyao HUANG, Yongyong HE, Yijun SHI. (2020). Nano lubricant additives: A review. Friction, https://doi.org/10.1007/s40544-020-0450-8

[15] M. Gulzar, H. H. Masjuki., M. A. Kalam., M. Varman., N. W. M. Zulkifli., and R. A. Mufti. (2017).Dispersion Stability and Tribological Characteristics of TiO_2/SiO_2 Nanocomposite-Enriched Biobased Lubricant, Tribology Transactions, 60, https://doi.org/10.1080/10402004.2016.1202366

[16] Wu, Y. Y., Tsui, W. C., & Liu, T. C. (2007). Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives. *Wear*, 262(7-8), 819-825. https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.08.021

[17] Rapoport, L., Leshchinsky, V., Lvovsky, M., Nepomnyashchy, O., Volovik, Y., & Tenne, R. (2003). Mechanism of friction of fullerenes. *Industrial Lubrication and Tribology*, 55(1), 15-27. https://doi.org/10.1108/00368790310456701

[18] Zhang, Y., Li, C., Jia, D., Zhang, D., & Zhang, X. (2020). Experimental evaluation of the lubrication performance of TiO_2 nanoparticles as additives in vegetable oil-based lubricants. *Tribology International*, 143, 106080. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106080

[19] Liu, G., Li, X., Qin, B., Xing, D., Guo, Y., & Fan, R. (2019). Investigation of the tribological properties of TiO_2 nanoparticles as additives in vegetable oil-based lubricants. *Wear*, 426-427, 819-825. https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.102

[20] Davim, J. P. (2013). *Tribology of Nanocomposites*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36958-9

[21] Khonsari, M. M., & Booser, E. R. (2016). *Nano Lubricants: From Fundamentals to Applications*. Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119242659

[22] Gupta, S., Singh, R. K., & Kumar, A. (2018). A review on the role of nanoparticles in improving the tribological properties of lubricants. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(3), 297-310. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.003

[23] Morshed, A.; Wu, H.; Jiang, Z. (2021). A Comprehensive Review of Water-Based Nanolubricants. Lubricants, 9, 89. https:// doi.org/10.3390/lubricants9090089

[24] Masuda , H., Ebata , A. and Teramae , K.,(1993), Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Netsu Bussei 7 (4). Pp. 227–233.

[25] Azman , N.F., Samion , S. and Hakim , M.N. , (2018), Investigation of tribological properties of CuO/palm oil nanolubricant using pin-on-disc tribotester. Green Materials 6(1). pp. 30–37.

[26] Ahmed Ali , M.k., Xianjun , H., Mai , L., Qingping , C., FiifiTurkson , R. and Bicheng , Ch., (2016), Improving the tribological characteristics of piston ring assembly in automotive engines using Al2O3 and TiO2 nanomaterials as nano-lubricant additives. Tribology International 103. pp. 540–554.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]

Experimental Investigation of the Effect of Nanoparticles on the Physical Properties and Wear Resistance of Biolubricants

Abbas Taghipour[1,*], Reza Poultangari[2]

[1*] Institute of Manufacturing Engineering and Industrial Technologies, Dez.C. , Islamic Azad University, Dezful, Iran, ab.taghipoor@iau.ac.ir

[2] Institute of Manufacturing Engineering and Industrial Technologies, Dez.C. , Islamic Azad University, Dezful, Iran, reza.poultangari@iau.ac.ir

Received: Winter 2026 Accepted: Spring 2026

Abstract:

In this study, the effect of titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles on improving the anti-wear properties, friction reduction, and physical properties of epoxidized soybean oil was investigated. The research was conducted in four main stages:

- Preparation of nano-lubricant mixtures: TiO_2 nanoparticles were blended with epoxidized soybean oil at weight concentrations of 0.1%, 0.2%, and 0.5%.
- Dispersion and stability of nanoparticles: An ultrasonic bath was used for uniform dispersion of nanoparticles, and Span-80 surfactant was employed to prevent sedimentation.
- Experimental evaluation: Wear tests were performed using a pin-on-disk apparatus, and physical properties, including pour point, flash point, and viscosity, were measured according to international standards.
- Analysis of results: The performance of nano-lubricant mixtures was compared with that of the base oil.

The results indicated that the nano-lubricant containing 0.5% by weight of TiO_2 nanoparticles exhibited the best performance. The friction coefficient and wear rate decreased by 7.93% and 57.14%, respectively. Additionally, viscosity increased by 11.95%, and the flash point decreased by 3%, while no significant change was observed in the pour point. These findings highlight the significant potential of TiO_2 nanoparticles in enhancing the performance of biolubricants.

Keywords: Nanoparticles, Friction, Physical Properties, Biolubricant, Wear.

*corresponding author: ab.taghipoor@iau.ac.ir

Cite this article as: Abbas Taghipour, Reza Poultangari, Experimental Investigation of the Effect of Nanoparticles on the Physical Properties and Wear Resistance of Biolubricants. Journal of Energy Conversion, **2026, 13(1), 17-39**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.2.560]