



بررسی تجربی اثر نانوذرات بر خواص فیزیکی و مقاومت سایشی روان کارهای زیستی

عباس تقی پور^{۱*}، رضا پولتنگری^۲

۱- دانشکده مهندسی ساخت و فناوری های صنعتی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، ab.taghipoor@iau.ac.ir
 ۲- دانشکده مهندسی ساخت و فناوری های صنعتی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، reza.poultangari@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲۸، بازنگری: ۱۴۰۵/۲/۸، پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۱۴

چکیده:

در این پژوهش، تأثیر نانوذرات تیتانیوم دی اکسید (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 مخلوط های نانوروان کار: نانوذرات TiO_2 با غلظت های 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 ته نشینی از سورفکتانت-Span 80 استفاده شد.
 - ارزیابی تجربی: آزمون های سایش با دستگاه پین روی دیسک و اندازه گیری خواص فیزیکی شامل نقطه ریزش، نقطه اشتعال و گرانروی مطابق استانداردهای بین المللی انجام شد.
 - تحلیل نتایج: عملکرد مخلوط های نانو روان کار با روغن پایه مقایسه گردید.
- نتایج نشان داد که نانو روان کار حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانوذرات TiO_2 بهترین عملکرد را دارد، به طوری که 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 یافته ها حاکی از پتانسیل بالای نانوذرات TiO_2 در بهبود عملکرد روان کارهای زیستی است.

*عهده دار مکاتبات: ab.taghipour@iau.ir

کلمات کلیدی: نانوذرات، اصطکاک، خواص فیزیکی، روان کار زیستی، سایش.

نحوه استناد به این مقاله عباس تقی پور، رضا پولتنگری. بررسی تجربی اثر نانوذرات بر خواص فیزیکی و مقاومت سایشی روان کارهای زیستی. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۵؛ ۱۳ (۱): ۱۷-۳۹.

۱-مقدمه

روان کارها به عنوان یکی از اجزای کلیدی در صنایع مختلف، نقش حیاتی در کاهش اصطکاک، جلوگیری از سایش، انتقال حرارت و افزایش طول عمر ماشین آلات و تجهیزات مکانیکی ایفا می کنند. با این حال، روان کارهای سنتی مبتنی بر نفت خام، به دلیل مشکلات زیست محیطی مانند سمیت بالا، تجزیه ناپذیری و وابستگی به منابع فسیلی، با چالش های جدی مواجه هستند. این مسائل موجب شده است که پژوهش ها به سمت توسعه روان کارهای زیستی سوق پیدا کند [۱]. روان کارهای زیستی، که از منابع تجدیدپذیر مانند روغن های گیاهی تولید می شوند، به دلیل زیست تخریب پذیری، سمیت کم و سازگاری با محیط زیست، گزینه های مناسبی برای جایگزینی روان کارهای سنتی هستند. روغن سویا به عنوان یکی از رایج ترین روغن های گیاهی، به دلیل در دسترس بودن، هزینه پایین و خواص روان کاری مناسب، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. با این حال، روغن سویا خالص دارای محدودیت هایی مانند پایداری اکسیداتیو پایین، گرانروی بالا در دماهای پایین و خواص ضد سایشی ضعیف است [۲]. برای غلبه بر این محدودیت ها، روش های مختلفی از جمله اصلاح شیمیایی (مانند اپوکسی سازی) و افزودن مواد افزودنی پیشرفته مورد استفاده قرار گرفته اند. در این میان، فناوری نانو به عنوان یک راهکار نوین، پتانسیل بالایی برای بهبود خواص روان کارهای زیستی نشان داده است. نانوذرات به دلیل اندازه بسیار کوچک (در حد نانومتر) و سطح ویژه بالا، می توانند خواص فیزیکی و شیمیایی روان کارها را به طور قابل توجهی بهبود بخشند. نانوذرات تیتانیوم دی اکسید (TiO_2) به دلیل خواص منحصر به فردی مانند پایداری حرارتی بالا، مقاومت در برابر سایش و توانایی پراکندگی مناسب در سیالات، به عنوان یکی از گزینه های امیدوارکننده برای بهبود عملکرد روان کارها شناخته شده اند. افزودن این نانوذرات به روغن های پایه می تواند منجر به کاهش اصطکاک و سایش، افزایش پایداری حرارتی و بهبود خواص رئولوژیکی شود [۳]. با این حال، چالش هایی مانند پراکندگی یکنواخت نانوذرات در روغن پایه و پایداری بلندمدت آن ها در سیال وجود دارد. برای حل این مشکلات، از روش هایی مانند استفاده از حمام اولتراسونیک و افزودن سورفکتانت ها مانند span80 استفاده می شود. این روش ها به پراکندگی بهتر نانوذرات و جلوگیری از ته نشینی آن ها کمک می کنند.

استفاده از نانوذرات در روان کارها به منظور بهبود خواص عملکردی، موضوع تحقیقات گسترده ای در دو دهه اخیر بوده است. نانوذرات به دلیل 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 دی اکسید (TiO_2) به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد، از جمله پایداری حرارتی بالا، مقاومت در برابر سایش و توانایی پراکندگی مناسب در سیالات، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته اند [۴، ۵]. در سال های اخیر، مطالعات متعددی به بررسی تأثیر نانوذرات TiO_2 بر خواص روان کارها پرداخته اند. به عنوان مثال، ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱، در مطالعه ای بر روی نانو روان کارهای مبتنی بر روغن های معدنی نشان دادند که افزودن نانوذرات TiO_2 می تواند ضریب اصطکاک و نرخ سایش را به ترتیب تا ۲۰٪ و ۳۰٪ کاهش دهد. این پژوهش همچنین تأکید کرد که پراکندگی یکنواخت نانوذرات در روغن پایه، نقش کلیدی در بهبود عملکرد روان کارها دارد [۶]. در زمینه روان کارهای زیستی، کومار و همکاران در سال ۲۰۲۰، تأثیر نانوذرات TiO_2 را بر روغن کرچک، به عنوان پایه روان کار 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 روغن پایه را بهبود بخشیده و نقطه اشتعال را افزایش داده اند [۷]. در مورد روغن سویا به عنوان پایه روان کارهای زیستی نیز تحقیقاتی انجام شده است. شارما و همکاران در سال ۲۰۲۰، نشان دادند که اپوکسی سازی روغن سویا می تواند پایداری حرارتی و اکسیداتیو آن را افزایش دهد. با این حال، بهبود خواص ضدسایشی و کاهش اصطکاک همچنان به عنوان چالشی در این زمینه مطرح است [۸]. در این راستا، علی و همکاران در سال ۲۰۲۲، در مطالعه ای 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.

این پژوهش همچنین تأکید کرد که استفاده از سورفکتانت‌ها مانند span80 می‌تواند به پراکندگی بهتر نانوذرات و پایداری بلندمدت آن‌ها در روغن پایه کمک کند [۹]. علاوه بر این، وانگ و همکاران در سال ۲۰۲۳، در مطالعه‌ای بر روی نانو روان کارهای 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، ۰/۵ درصد وزنی است. این مطالعه همچنین گزارش کرد که افزودن نانوذرات TiO_2 گرانیروی روغن پایه را کاهش داده و نقطه ریزش را بهبود بخشیده است [۱۰]. با توجه به اهمیت روزافزون استفاده از روان کارهای زیستی و نیاز به بهبود خواص آن‌ها، بررسی تأثیر نانوذرات بر عملکرد این روان کارها از اهمیت بالایی برخوردار است. نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) به دلیل خواص منحصر به فردی مانند پایداری حرارتی بالا، مقاومت در برابر سایش و توانایی پراکندگی مناسب در سیالات، به عنوان یکی از گزینه‌های امیدوارکننده برای بهبود عملکرد روان کارها شناخته شده‌اند. با این حال، تأثیر غلظت‌های مختلف این نانوذرات بر خواص فیزیکی و عملکردی روان کارهای زیستی به طور 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 به عنوان یک روان کار زیستی انجام شده است. در این پژوهش، از آزمون‌های تجربی مانند آزمون سایش پین روی دیسک، اندازه‌گیری گرانیروی، نقطه ریزش و نقطه اشتعال برای ارزیابی عملکرد نانو روان کارها استفاده شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند به توسعه روان کارهای زیستی با عملکرد برتر و کاهش اثرات زیست محیطی کمک کند. این پژوهش در راستای پاسخگویی به نیاز صنایع به روان کارهای پایدار و با عملکرد بالا انجام شده است و می‌تواند به عنوان گامی مؤثر در جهت کاهش وابستگی به منابع فسیلی و توسعه فناوری‌های سبز در حوزه روان کارها 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 تهیه نانو روان کار و آزمون‌های پایداری تشریح شده است. در ادامه، آزمایش‌های لازم برای مقایسه عملکرد سیال پایه با نانوسیال شرح داده شده‌اند. آزمایش‌های انجام شده شامل آزمون سایش با استفاده از دستگاه پین روی دیسک، اندازه‌گیری ضریب اصطکاک و تعیین خواص فیزیکی نانومخلوط‌های روان کار می‌باشد. در این پژوهش از مواد شیمیایی زیر استفاده شد:

- روان کار پایه: روغن سویا اپوکسی شده به عنوان پایه روان کار زیستی انتخاب شد. این روغن به دلیل زیست تخریب پذیری، سمیت کم و خواص روان کاری مناسب، به عنوان 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 به عنوان افزودنی نانویی برای بهبود خواص روان کار پایه استفاده شد.
- سورفکتانت: سورفکتانت Span 80 (سوربیتان مونو اولئات) به منظور بهبود پراکندگی نانوذرات در روغن پایه و جلوگیری از ته نشینی 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 پراکندگی یکنواخت نانوذرات در روغن پایه.
- دستگاه ویسکومتر، برای اندازه‌گیری گرانیروی نمونه‌ها در دماهای مختلف.

- دستگاه اندازه گیری نقطه ریزش، برای تعیین کم ترین دمایی که نمونه روان کار قابلیت جریان پذیری خود را حفظ می کند.
- دستگاه اندازه گیری نقطه اشتعال، برای تعیین دمایی که نمونه روان کار در معرض شعله، بخارات قابل اشتعال تولید می کند.
- دستگاه پین روی دیسک، برای ارزیابی خواص اصطکاکی و سایشی نمونه ها تحت شرایط کنترل شده.

۲-۱- روان کار پایه

برای انتخاب روغن، عوامل و پارامترهای متعددی مورد توجه قرار می گیرد. در این پژوهش، از روغن سویا اپوکسی شده Liaflex 6500 تولیدی شرکت بسپارلیا که یکی از روغن های گیاهی مهم و پر کاربرد محسوب می شود، به عنوان روغن پایه استفاده شد. روغن های گیاهی به دلیل تجدیدپذیر بودن و سازگاری با محیط زیست، جایگزین مناسبی برای مواد پتروشیمی در برخی کاربردها شده اند. ترکیبات درصدی و مشخصات فیزیکی روغن سویا به ترتیب در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است. روغن های سویا حاوی مقادیر قابل توجهی اسید چرب هستند که قابلیت تبدیل به اسید اپوکسی چرب را دارند. با توجه به مصرف گسترده ی این روغن، افزایش طول عمر و بهبود خواص روان کاری آن از اهمیت بالایی برخوردار است. روغن های گیاهی مانند روغن سویا، به عنوان موادی تجدیدپذیر، غیرسمی و زیست تخریب پذیر شناخته می شوند [۱۱].

جدول ۱: درصد ترکیبات تشکیل دهنده ی روغن سویا [۱۱]

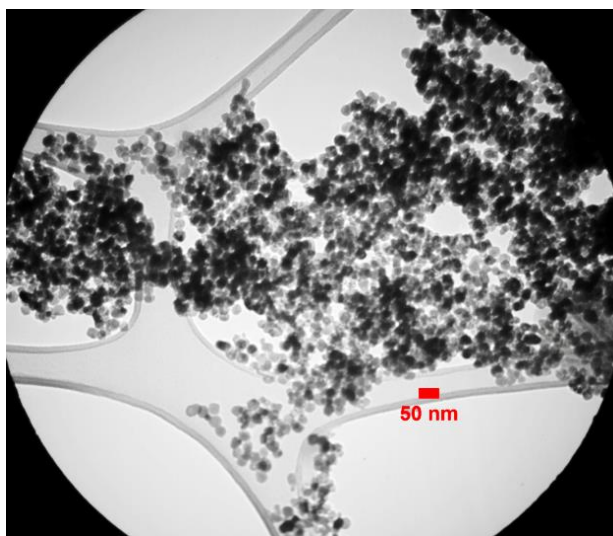
اسید چرب	درصد اسید چرب
لینولنیک اسید	۷/۷۸
لینولئیک اسید	۴۷/۰۶
اولئیک اسید	۲۴/۴۸
استارئیک اسید	۳/۷۷
پالمیتیک اسید	۱۱/۴

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

ویژگی ها	مقدار
شکل ظاهری	مایع شفاف مایل به زرد با بویی بسیار کم
ویسکوزیته سینماتیکی @ 25 °C (m ² /s)	۵۰۰
نقطه ی اشتعال °C	۲۲۷
دانسیته kg/m ³	۹۹۴

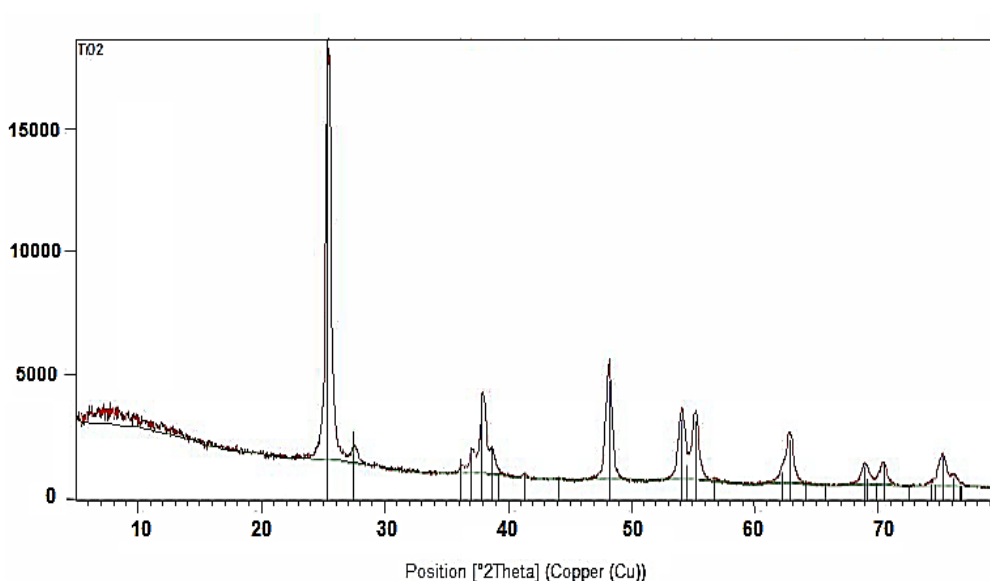
۲-۲- نانوذرات تیتانیوم دی اکسید

در این پژوهش، از نانوذرات تیتانیوم دی اکسید (TiO₂) از نوع آناتاس با قطر ۱۰ تا ۲۵ نانومتر و خلوص ۹۹٪ استفاده شده است. شکل (۱) تصویر TEM گرفته شده از نانوذرات تیتانیوم دی اکسید مورد استفاده در این پژوهش را نشان می دهد. این تصویر به وضوح مورفولوژی و اندازه ی نانوذرات را نمایش می دهد. همان طور که در تصویر مشاهده می شود، نانوذرات دارای شکل تقریباً کروی بوده و اندازه ی آن ها در حدود ۲۵ نانومتر است.



شکل ۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM از تیتانیوم دی اکسید

شکل (۲) الگوی پراش پرتو X نانوذرات تیتانیوم دی اکسید را نشان می دهد. در این تصویر هیچ پیک مزاحمی در الگوی پراش مشاهده نمی شود و پهن شدگی قله ها دلیلی بر کوچک بودن اندازه ذرات می باشد.



شکل ۲: الگوی پراش پرتو X نانوذرات تیتانیوم دی اکسید

تیتانیوم دی اکسید مورد استفاده در این پژوهش از نوع آناتاس بوده که دارای ساختاری کروی شکل است. این ویژگی باعث می شود تا این نانوذرات تأثیر بهتری در کاهش اصطکاک و سایش قطعات موتور از خود نشان دهند [۱۲]. دلیل این امر آن است که ذرات کروی شکل می توانند در خلل و فرج سطوح قطعات قرار گرفته و ناهمواری های موجود را پر کنند. علاوه بر این، به دلیل سطح ویژه بالا و اندازه ی بسیار کوچک این ذرات، آن ها قادرند به راحتی روی یکدیگر بلغزند و از تماس مستقیم بین سطوح قطعات موتور جلوگیری کنند. جدول (۳) مشخصات فیزیکی نانوذرات تیتانیوم دی اکسید را نشان می دهد.

جدول ۳: مشخصات فنی نانوذرات تیتانیوم دی اکسید از نوع آناتاس

ویژگی	مقدار
اندازه ی 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 تعیین کننده ای در عملکرد نانو روان کارها ایفا می کند. به گونه ای که غلظت های بالاتر از ۰/۵ درصد وزنی می تواند منجر به رسوب نانوذرات بر روی سطوح قطعات شده و ذرات بزرگ تر، مشابه ناخالصی ها، باعث ایجاد خراش و افزایش اصطکاک شوند. از سوی دیگر، در غلظت های بسیار پایین (کم تر 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، غلظت های بین ۰/۱ تا ۰/۵ درصد وزنی به عنوان محدوده بهینه برای نانوذرات شناخته شده اند [۱۳]. براین اساس، در پژوهش حاضر، به منظور بررسی اثر نانوذرات تیتانیوم دی اکسید، از غلظت های وزنی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد استفاده شد.

۲-۳- روش تهیه ی نانو روان کار و بررسی پایداری آن

پراکندگی و پایداری نانوذرات در سیال پایه و دستیابی به یک نانوسیال پایدار از اهمیت بالایی برخوردار است و روش های مختلفی برای دستیابی به این هدف مورد استفاده قرار می گیرند. در این پژوهش، برای پراکنده سازی نانوذرات در سیال پایه و ایجاد یک نانوسیال پایدار، از سورفکتانت Span 80 و حمام اولتراسونیک استفاده شد. Span 80 یک سورفکتانت غیریونی و آمفی فیلک (دوگانه دوست) است که به عنوان یک ترکیب سنتزی، کاملاً زیست تخریب پذیر بوده و به راحتی در محیط زیست تجزیه می شود. این ماده به صورت یک مایع ویسکوز و زرد رنگ است که در حلال های مختلفی مانند آب، الکل ها و اسیدهای چرب محلول می باشد. 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 اکسیدکننده های قوی اکسید می شود. این ویژگی ها باعث شد تا از این ماده به عنوان عامل پراکنده کننده 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 به دقت کنترل شود. مطالعات نشان داده اند که مواد افزودنی نانو روان کارها تنها در صورت اعمال اولتراسونیک در مدت زمان بهینه، بهترین پایداری و پراکندگی را از خود نشان می دهند. به عنوان مثال، در یک مطالعه مشخص شد که پایداری پراکندگی نانوذرات با ۶۰ دقیقه اولتراسونیک بهینه ترین نتیجه را دارد و سوسپانسیون حاصل به مدت ۱۵ روز پایدار باقی می ماند [۱۴]. براین اساس، در این پژوهش نمونه ها 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 می شود و امواج اولتراسونیک ایجاد شده توسط آن، پیوندهای بین ذرات کلوخه شده را شکسته و باعث بهبود کیفیت و یکنواختی محلول می شود (شکل ۳).

در این پژوهش، سورفکتانت Span 80 و نانوذرات تیتانیوم دی اکسید 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 تهیه شده به صورت 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 ایجاد شده در نمونه‌ها به صورت دوره‌ای و پیوسته مشاهده و ثبت گردید. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات تیتانیوم دی اکسید به روغن پایه هیچ گونه 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 تهیه شده است.



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

۲-۴- تعیین خواص فیزیکی مخلوط‌های نانوروان کار

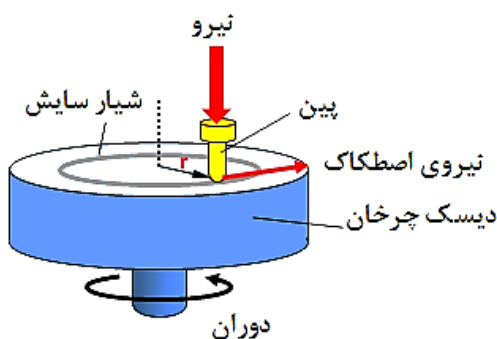
در این پژوهش، برای تعیین گرانروی مخلوط‌ها، از ویسکومتر نوع موئینه بر اساس استاندارد ملی ایران INSO 195 استفاده شد. این دستگاه مجهز به یک حمام پارافینی است که برای حفظ دمای پایدار به کار می‌رود. گرانروی روان کارها در دو دمای ۴۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. همچنین، نقطه‌ی اشتعال روغن‌های روان کار مورد استفاده بر اساس استاندارد ASTM D92 و با استفاده از دستگاه ظرف در باز کلوند سنجش شد. نقطه‌ی اشتعال به عنوان یکی از شاخص‌های مهم ایمنی و عملکردی روان کارها، تعیین گردید. علاوه بر این، نقطه‌ی ریزش روان کارها نیز بر اساس استاندارد ASTM D97 اندازه‌گیری شد. نقطه‌ی ریزش به عنوان کم‌ترین دمایی تعریف می‌شود که در آن یک مایع، به‌ویژه روان کننده، قابلیت جریان یافتن دارد. این پارامتر تعیین‌کننده‌ی حداقل دمای کارکرد روان کار 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 سرد شدن، به‌ازای هر ۳ درجه‌ی سانتی‌گراد کاهش دما، سیالیت نمونه‌ها بررسی می‌شود. پایین‌ترین دمایی که در آن نمونه قابلیت جریان یافتن دارد، به عنوان نقطه‌ی ریزش ثبت می‌گردد. این اندازه‌گیری‌ها به منظور ارزیابی دقیق خواص فیزیکی روان کارها 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 روان کار و حتی در دمای بالا محاسبه و ذخیره کند. در این دستگاه، امکان تعویض نقش نمونه‌ها وجود دارد، به‌طوری‌که نمونه‌ی ساینده می‌تواند 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. 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 پیموده شده، محیط آزمون و خواص ماده

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 کنترل شده با سیال را دارا می باشد. برای انجام آزمون، نمونه ها بر اساس شرایط استاندارد آماده سازی شده و روی نگهدارنده ی دستگاه قرار می گیرند. پس از اعمال نیروی مورد نظر، پین به عنوان عامل ساینده بر روی دیسک حرکت می کند. در این آزمون، سرعت دورانی دیسک ۱۵۰۰ دور در دقیقه، نیروی وارد بر پین ۹۰ نیوتن و مسافت پیموده شده توسط پین روی دیسک ۱۱۳۰ متر در نظر گرفته شد. پین ها از جنس فولاد بلبرینگ ساخته و با سنگ مغناطیسی پرداخت شدند تا کم ترین زبری سطح را داشته باشند. دیسک ها نیز از جنس CK45 ساخته و به طور مشابه پرداخت شدند تا امکان استفاده از هر دو طرف دیسک فراهم شود. فیکسچر طراحی شده برای این آزمون قادر است حجم مشخصی از سیال روان کننده را در خود جای دهد و دیسک ها را به طور ثابت نگه دارد تا آزمون در حضور سیال انجام شود.

پس از اتمام آزمون، نمونه ها با استون و الکل شسته و پس از خشک شدن، با استفاده از ترازوی دیجیتالی توزین شدند. اختلاف وزن دیسک ها قبل و بعد از آزمون به عنوان معیاری برای اندازه گیری میزان سایش در نظر گرفته شد. خروجی دستگاه شامل نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده برای هر نمونه است که به صورت یک فایل اکسل ارائه می گردد.



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

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل نمونه ها در دستگاه پین روی دیسک

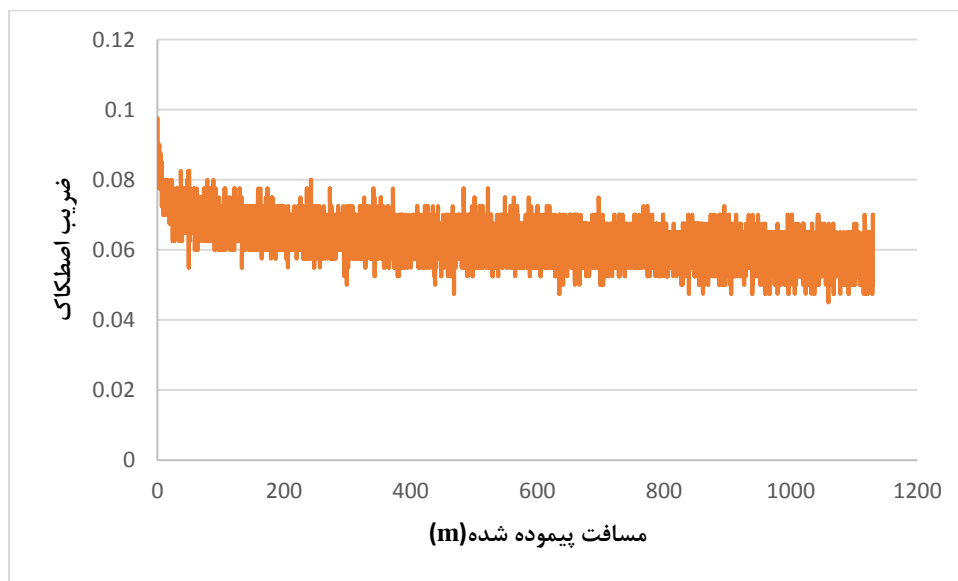
نتایج آزمون سایش روغن پایه نشان دهنده ی تغییرات ضریب اصطکاک در محدوده ی ۰/۰۴۵ تا ۰/۰۹۷ است، میانگین ضریب اصطکاک نیز حدود ۰/۰۶۳ است. ضریب اصطکاک در محدوده ی نسبتاً وسیعی (۰/۰۴۵ تا ۰/۰۹۷) تغییر کرده است. این تغییرات می تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

- ناهمگونی سطح تماس: ممکن است سطح تماس بین پین و دیسک کاملاً یکنواخت نباشد که منجر به تغییرات موضعی در ضریب اصطکاک می شود.
- ویژگی های روان کاری روغن پایه: روغن پایه ممکن است در برخی شرایط نتواند لایه ی روان کاری پایدار و یکنواختی ایجاد کند که باعث نوسان در ضریب اصطکاک می شود.
- شرایط آزمایشگاهی: عواملی مانند دما، سرعت چرخش و نیروی اعمالی می توانند بر ضریب اصطکاک تأثیر بگذارند و باعث تغییرات در نتایج شوند.

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

با این حال، این مقدار نسبت به برخی روان کارهای پیشرفته تر ممکن است بالاتر باشد، که نشان دهنده‌ی نیاز به بهبود خواص روان کاری روغن پایه است. البته در تحلیل عملکرد روغن پایه با توجه به نتایج به دست آمده، می توان گفت، نقاط قوت شامل :

- روغن پایه توانسته است ضریب اصطکاک را در محدوده‌ی نسبتاً پایینی نگه دارد که نشان دهنده‌ی عملکرد اولیه‌ی مناسب آن است.
 - میانگین ضریب اصطکاک به دست آمده نشان می دهد که روغن پایه تا حدی از سایش و اصطکاک جلوگیری کرده است. همچنین در خصوص نقاط ضعف آن می توان به موارد زیر اشاره کرد:
 - تغییرات نسبتاً زیاد در ضریب اصطکاک (از ۰/۰۴۵ تا ۰/۰۹۷) نشان دهنده‌ی ناپایداری در عملکرد روان کاری روغن پایه است.
 - این نوسانات می تواند ناشی از عدم تشکیل لایه‌ی روان کاری پایدار یا ناهمگونی در توزیع روغن در سطح تماس باشد.
- باتوجه به موارد فوق می توان نتیجه گرفت که روغن پایه عملکرد اولیه‌ی مناسبی در کاهش اصطکاک دارد، اما نوسانات در ضریب اصطکاک نشان دهنده‌ی نیاز به بهبود خواص روان کاری آن است. همچنین با بهینه سازی ترکیب روغن و افزودن مواد افزودنی مناسب، می توان به کاهش بیشتر ضریب اصطکاک و افزایش پایداری عملکرد روان کاری دست یافت.



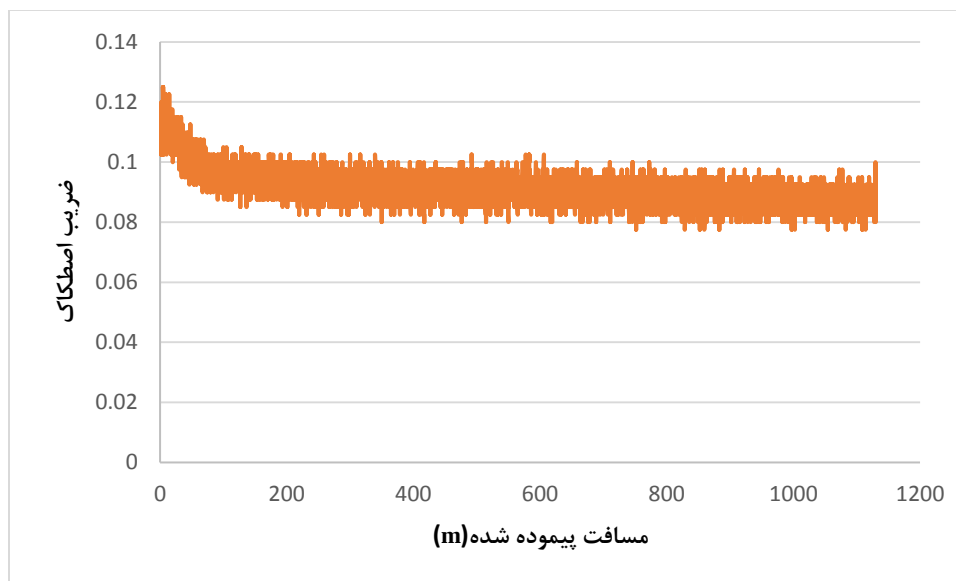
شکل ۵: تغییرات ضریب اصطکاک برای روغن پایه

نتایج آزمون سایش نانو مخلوط روان کار با غلظت ۰/۱ درصد وزنی نشان دهنده‌ی تغییرات ضریب اصطکاک در محدوده‌ی ۰/۰۷۷ تا ۰/۱۲۵ است، میانگین ضریب اصطکاک نیز حدود ۰/۰۹۱ است. این نتایج نسبت به روغن پایه، افزایش ۴۴/۴۵ درصدی در ضریب اصطکاک را نشان می دهد. ضریب اصطکاک در محدوده‌ی ۰/۰۷۷ تا ۰/۱۲۵ تغییر کرده است که نشان دهنده‌ی نوسانات نسبتاً زیاد در عملکرد روان کاری نانو مخلوط است. این نوسانات می تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

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

- تجمع نانوذرات: احتمالاً نانوذرات در غلظت ۰/۱ درصد وزنی به درستی 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 روان کاری کافی نباشد. در برخی موارد، غلظت‌های پایین نانوذرات می‌توانند باعث افزایش اصطکاک شوند، زیرا ممکن است به جای تشکیل لایه‌ی محافظ، به عنوان ذرات ساییده عمل کنند.
- عدم تشکیل لایه‌ی روان کاری پایدار: نانوذرات ممکن است نتوانند لایه‌ی روان کاری مؤثری تشکیل دهند که منجر به افزایش اصطکاک می‌شود.

باتوجه به 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 روان کاری 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 روان کار 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.



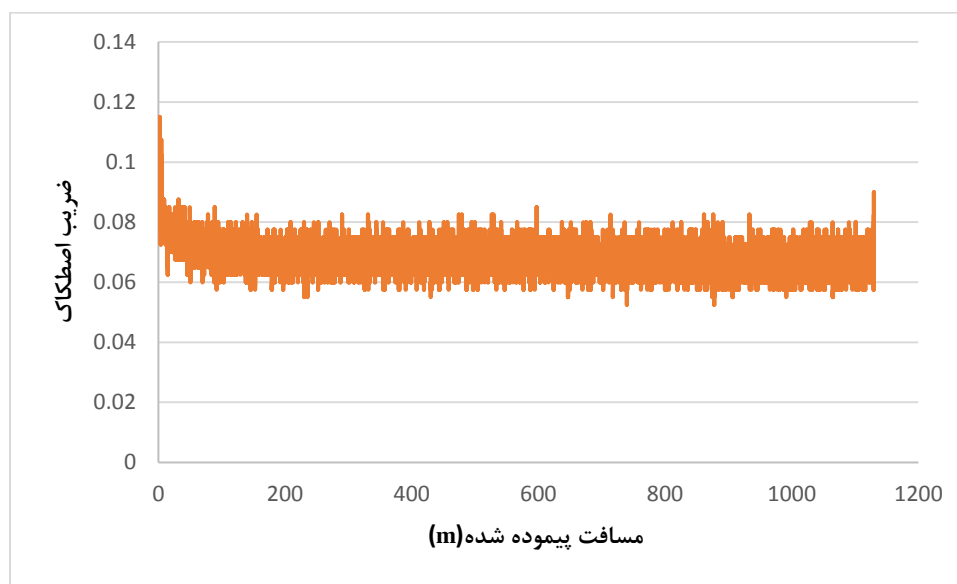
شکل ۶: تغییرات ضریب اصطکاک برای نمونه با غلظت ۰/۱ درصد وزنی

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

- توزیع ناهمگون نانوذرات: اگرچه پراکندگی نانوذرات بهبود یافته 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 روان کار 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 روان کاری 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 روان کار پایه نشان‌دهنده‌ی بهبود عملکرد روان کاری 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 روان کاری 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 روان کار با غلظت ۰/۲ درصد وزنی نسبت به روان کار پایه بهبود قابل توجهی در کاهش ضریب اصطکاک داشته است. با این حال، هنوز نوساناتی در ضریب اصطکاک مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی نیاز به بهینه‌سازی بیشتر در پراکندگی نانوذرات و افزایش غلظت آن‌ها است.

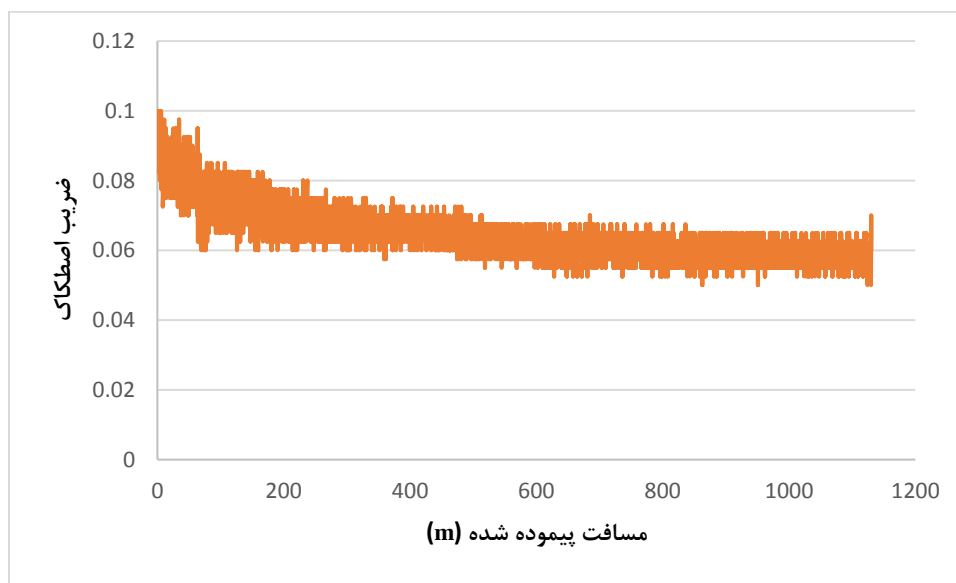


شکل ۷: تغییرات ضریب اصطکاک برای نمونه با غلظت ۰/۲ درصد وزنی

ضریب اصطکاک برای مخلوط نانو روان کار با غلظت ۰/۲ درصد وزنی، در محدوده ۰/۵ تا ۰/۱ تغییر کرده است که نشان دهنده‌ی بهبود قابل توجه در پایداری عملکرد روان کاری نسبت به غلظت‌های پایین‌تر (۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی) است. با این حال، هنوز نوساناتی در ضریب اصطکاک مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

- توزیع ناهمگون نانوذرات: اگرچه پراکندگی نانوذرات بهبود یافته 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 (۰/۵۸) نسبت به مقدار میانگین روان کار پایه (۰/۶۳) کاهش ۷/۹۳ درصدی را نشان می‌دهد. این بهبود قابل توجه نشان دهنده‌ی تأثیر مثبت افزایش غلظت نانوذرات به ۰/۵ درصد وزنی است. این کاهش ضریب اصطکاک می‌تواند ناشی از تشکیل لایه‌ی روان کاری مؤثرتر توسط نانوذرات باشد، که باعث کاهش اصطکاک و سایش بین سطوح تماس می‌شود. در تحلیل عملکرد نانو روان کار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی، کاهش ۷/۹۳ درصدی ضریب اصطکاک نسبت به روان کار پایه نشان دهنده‌ی بهبود قابل توجه عملکرد روان کاری نانو مخلوط است و میانگین ضریب اصطکاک در محدوده‌ی بسیار مطلوبی قرار دارد و نشان می‌دهد که نانوذرات توانسته‌اند به طور مؤثری از سایش و اصطکاک جلوگیری کنند. در مورد نقاط ضعف این مخلوط، نوسانات در ضریب اصطکاک (۰/۵ تا ۰/۱) نشان دهنده‌ی این است که هنوز پایداری کامل در عملکرد روان کاری وجود ندارد. این نوسانات ممکن است ناشی از توزیع ناهمگون نانوذرات یا تجمع آن‌ها در برخی مناطق باشد. با توجه به نتایج، نانو روان کار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی نسبت به روان کار پایه بهبود قابل توجهی در کاهش ضریب اصطکاک داشته است. با این حال، هنوز نوساناتی در ضریب اصطکاک مشاهده می‌شود که نشان دهنده‌ی نیاز به بهینه‌سازی بیش‌تر در پراکندگی نانوذرات و افزایش غلظت آن‌ها است. این نتایج نشان دهنده‌ی پتانسیل بالای نانو روان کارها برای بهبود خواص روان کاری 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، به طور خلاصه نمایش داده شده است.

جدول ۴: مقایسه‌ی تغییرات ضریب اصطکاک در تمام نمونه‌ها

نمونه مورد آزمایش	تغییرات ضریب اصطکاک	میانگین ضریب اصطکاک	تغییرات نسبت به روان کار پایه
روان کار پایه	۰/۰۴۵ - ۰/۰۹۷	۰/۰۶۳	----
نمونه با غلظت ۰/۱ درصد	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^۱ در سال ۲۰۱۷، انجام شد، نانوذرات TiO_2 با غلظت‌های مختلف به روغن پایه 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^۲ در سال ۲۰۰۷ انجام شد، نانوذرات Al_2O_3 با غلظت‌های مختلف به روغن پایه 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 روغن پایه 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 به طور مؤثری ضریب اصطکاک را کاهش دهند، اما کاهش ضریب اصطکاک در این پژوهش کمی کمتر از این مقدار است. این تفاوت ممکن است ناشی از تفاوت در نوع نانوذرات و خواص آن‌ها باشد [۱۷]. ژانگ و همکاران^۳ نیز در سال ۲۰۲۰، در پژوهشی اثر نانوذرات TiO_2 با غلظت‌های مختلف را بر روی روغن پایه 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.

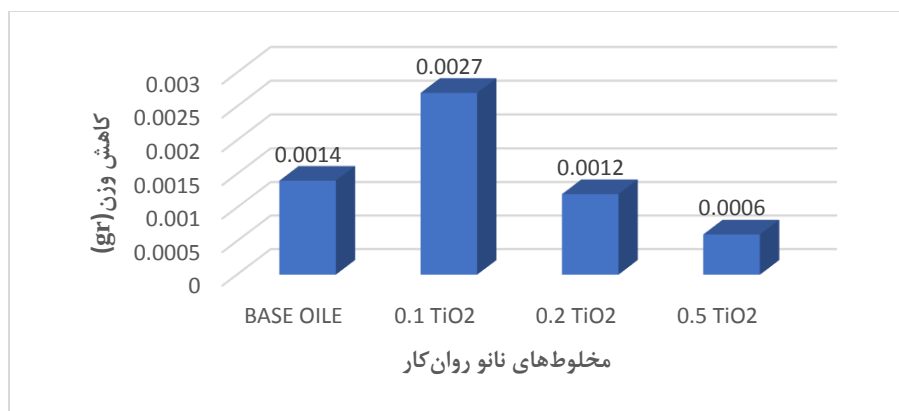
- نوع نانوذرات: نانوذرات مختلف مانند Al_2O_3 ، TiO_2 یا الماس خواص روان کاری متفاوتی دارند.
- روش های پراکنده سازی: روش های مختلف پراکنده سازی نانوذرات می توانند بر عملکرد آن ها تأثیر بگذارند.
- شرایط آزمایشگاهی: دما، سرعت چرخش و نیروی اعمالی می توانند بر نتایج تأثیر بگذارند.

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

- در غلظت ۰/۱ درصد وزنی، نانو روان کار نه تنها بهبودی در کاهش ضریب اصطکاک نشان نداد، بلکه افزایش قابل توجهی در ضریب اصطکاک مشاهده شد. این افزایش می تواند ناشی از عوامل زیر باشد:
- توزیع ناهمگون نانوذرات: در غلظت های پایین، نانوذرات ممکن است به طور یکنواخت در روغن پخش نشده باشند و حتی به عنوان ذرات ساینده عمل کنند.
 - تجمع نانوذرات: اگر نانوذرات به درستی پراکنده نشوند، ممکن است تجمع کرده و باعث افزایش اصطکاک شوند.
 - عدم تشکیل لایه ی روان کاری مؤثر: در غلظت های پایین، نانوذرات ممکن است نتوانند لایه ی محافظتی مؤثری تشکیل دهند.
- در غلظت ۰/۲ درصد وزنی، بهبود نسبی در عملکرد روان کاری مشاهده شد، اما کاهش ضریب اصطکاک چندان چشم گیر نبود. این بهبود می تواند ناشی از عوامل زیر باشد:
- پراکندگی بهتر نانوذرات: افزایش غلظت نانوذرات ممکن است به پراکندگی بهتر آن ها کمک کرده باشد.
 - تشکیل لایه ی روان کاری اولیه: نانوذرات ممکن است شروع به تشکیل لایه ی محافظتی کرده باشند، اما این لایه هنوز به طور کامل پایدار نیست.
 - نوسانات در ضریب اصطکاک: محدوده ی نسبتاً وسیع ضریب اصطکاک (۰/۰۵۲ تا ۰/۱۱۵) نشان دهنده ی ناپایداری در عملکرد روان کاری است.
- برای غلظت ۰/۵ درصد وزنی، بهبود قابل توجهی در کاهش ضریب اصطکاک مشاهده شد. این بهبود می تواند ناشی از عوامل زیر باشد:
- تشکیل لایه ی روان کاری مؤثر: در غلظت های بالاتر، نانوذرات ممکن است لایه ی محافظتی پایدارتری تشکیل دهند که باعث کاهش اصطکاک می شود.
 - پراکندگی بهتر نانوذرات: افزایش غلظت نانوذرات ممکن است به پراکندگی بهتر و یکنواخت تر آن ها کمک کرده باشد.
 - کاهش نوسانات: محدوده ی ضریب اصطکاک (۰/۰۵ تا ۰/۱) نسبت به غلظت های پایین تر باریک تر است که نشان دهنده ی پایداری بیش تر در عملکرد روان کاری است.

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

- در آزمون سایش پین روی دیسک، تغییرات کاهش وزن دیسک ها، برای روان کار پایه و مخلوط های تهیه شده با غلظت های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی به صورت نمودار شکل (۹) مشاهده می شود.



شکل ۹: تغییرات کاهش وزن دیسک‌ها برای تمام نمونه‌ها

نتایج آزمون سایش و ضریب اصطکاک نانو روان کارهای حاوی نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) در غلظت‌های مختلف (۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی) نشان‌دهنده رفتار متفاوتی نسبت به روغن پایه است. این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که تغییرات در غلظت نانوذرات تأثیر مستقیمی بر میزان سایش و ضریب اصطکاک دارد. برای غلظت ۰/۱ درصد وزنی، میزان سایش، افزایش ۹۲/۸۶ درصدی و ضریب اصطکاک، افزایش ۴۴/۴۵ درصدی نسبت به روغن پایه دارد. در این غلظت، هم میزان سایش و هم ضریب اصطکاک به‌طور قابل توجهی افزایش یافته‌اند. این افزایش می‌تواند ناشی از عواملی چون توزیع ناهمگون نانوذرات، تجمع نانوذرات و عدم تشکیل لایه‌ی روان کاری مؤثر محافظتی باشد. برای غلظت ۰/۲ درصد وزنی، میزان سایش، کاهش ۱۴/۲۸ درصدی و ضریب اصطکاک، کاهش ۳/۱۷ درصدی نسبت به روغن پایه دارد. در این غلظت، بهبود نسبی در عملکرد روان کاری مشاهده شد، اما کاهش میزان سایش و ضریب اصطکاک چندان چشم‌گیر نبود. این بهبود می‌تواند ناشی از عواملی مثل پراکندگی بهتر نانوذرات، تشکیل لایه‌ی روان کاری 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 روغن پایه دارد. در این غلظت، بهبود قابل توجهی در کاهش میزان سایش و ضریب اصطکاک مشاهده شد. این بهبود می‌تواند ناشی از عواملی نظیر تشکیل لایه‌ی روان کاری 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، در حالی که 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 لئو و همکاران^۱ که اثر نانوذرات TiO_2 با غلظت‌های مختلف را بر روغن پایه 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 روغن پایه است [۱۹]. نتایج وانگ و همکاران^۲ نیز در بررسی اثر نانوذرات TiO_2 با غلظت‌های مختلف بر روان کار 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 روان کار 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].

^۱ Liu et al.

^۲ Wang et al.

بهبود خواص فشارپذیری و ضدسایشی نانو روان کارها ناشی از سه اثر اصلی نانوذرات است. این اثرات به طور هم زمان عمل می کنند و باعث افزایش کارایی روان کارها در شرایط سخت و تحت بارهای سنگین می شوند. در زیر به توضیح این سه اثر پرداخته می شود:

۱- اثر غلتشی^۱

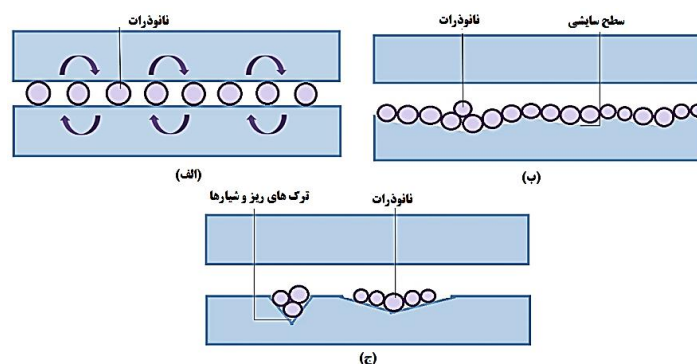
نانوذرات به عنوان ذرات جامد در روان کار، در شرایطی که سطوح در تماس با یکدیگر قرار می گیرند، می توانند بین سطوح غلتیده شوند. این غلتش باعث کاهش تماس مستقیم بین سطوح و در نتیجه کاهش اصطکاک و سایش می شود. مکانیسم آن به گونه ای است که نانوذرات مانند بلبرینگ های کوچک عمل می کنند و با غلتیدن بین سطوح، از تماس مستقیم فلز با فلز جلوگیری می کنند. این امر به ویژه در شرایط بارگذاری بالا و سرعت های پایین مؤثر است که نتیجه آن کاهش اصطکاک و سایش، افزایش عمر مفید قطعات و بهبود عملکرد روان کاری است.

۲- اثر پوشش دهی^۲

نانوذرات می توانند روی سطوح فلزی رسوب کرده و یک لایه ی نازک و محافظ تشکیل دهند. این لایه به عنوان یک مانع فیزیکی عمل می کند و از تماس مستقیم سطوح جلوگیری می کند. نانوذرات به طور یکنواخت روی سطوح پخش شده و یک لایه ی محافظ تشکیل می دهند. این لایه می تواند از سایش، خوردگی و آسیب های سطحی جلوگیری کند که نتیجه آن، افزایش مقاومت سطوح در برابر سایش، بهبود خواص ضدخوردگی و افزایش پایداری روان کار در شرایط سخت است.

۳- اثر ترمیمی^۳

نانوذرات می توانند در مناطقی که سایش یا آسیب سطحی رخ داده است، رسوب کرده و نواقص سطحی را پر کنند. این فرآیند به عنوان ترمیم سطحی عمل می کند و از پیشرفت آسیب جلوگیری می کند. نانوذرات در مناطق آسیب دیده تجمع کرده و با پر کردن ترک ها و حفره ها، سطح را صاف و یکنواخت می کنند. این امر باعث کاهش تمرکز تنش و جلوگیری از گسترش آسیب می شود که نتیجه آن، افزایش عمر مفید قطعات، کاهش نیاز به تعمیرات و بهبود عملکرد کلی سیستم است. این سه اثر (غلتشی، پوشش دهی و ترمیمی) به طور هم زمان عمل می کنند و باعث بهبود خواص فشارپذیری و ضدسایشی نانو روان کارها می شوند. این اثرات به ویژه در شرایطی که روان کار تحت بارهای سنگین، دماهای بالا و سرعت های مختلف قرار می گیرد، بسیار مؤثر هستند. با استفاده از نانوذرات، می توان به روان کارهایی با عملکرد بهتر، عمر طولانی تر و مقاومت بیش تر در برابر سایش دست یافت [۲۰، ۲۱ و ۲۲].



الف: تأثیر غلتشی، ب: نقش نانوذرات به عنوان پرکننده خلل و فرج، ج: تأثیر اصلاحی (ترمیمی)

شکل ۱۰: ساز و کار عملکرد نانو روان کارها بر روی سطوح اصطکاکی [۲۳]

^۱ Rolling Effect

^۲ Coating Effect

^۳ Mending Effect

۳-۲- نتایج آزمون تعیین خواص فیزیکی

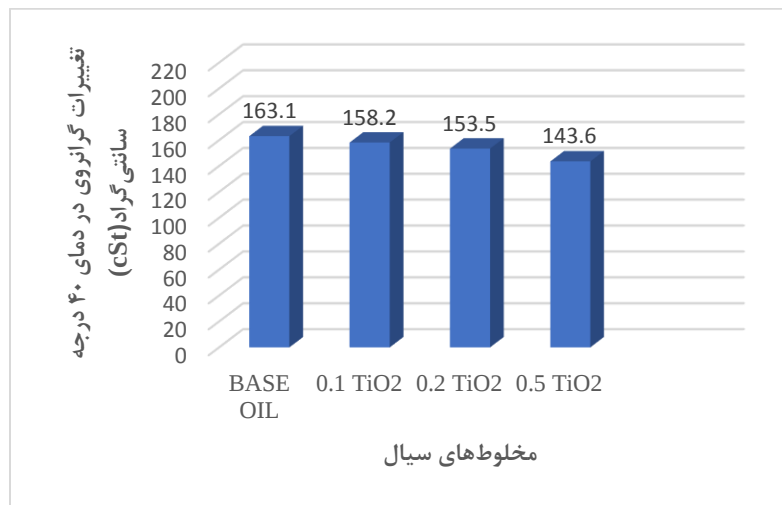
۳-۲-۱- نتایج آزمون گرانروی

نتایج آزمون گرانروی نمونه‌های نانو روان کار 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 روان کار 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 روان کار 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.

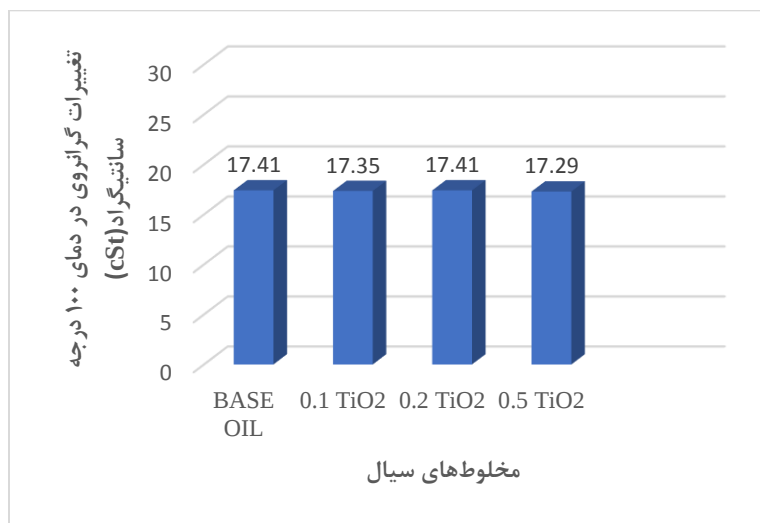
نتایج آزمون گرانروی در دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد نیز نشان داد، با تغییر غلظت نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید، گرانروی نانو روان کار تغییر محسوسی نمی‌کند. در دمای بالا، ویسکوزیته‌ی روغن پایه به‌طور طبیعی کاهش می‌یابد. در این شرایط، تأثیر نانوذرات بر گرانروی ممکن است کم‌تر مشهود باشد، زیرا ویسکوزیته‌ی پایه 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 روغن پایه در دمای بالا باشد. نتایج حاصل در این پژوهش با یافته‌های بسیاری از محققین دیگر مطابقت ندارد. ماسودا^۱ 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 روان کار سبب افزایش گرانروی آن شده است [۲۴]. در پژوهش‌های دیگری مطابق با این یافته گزارش شده است. به‌طور مثال آزمون و همکاران^۲ که در پژوهش خود از مس و اکسید مس استفاده کردند، گزارش نمودند افزایش غلظت نانوذرات سبب کاهش اندکی در میزان گرانروی نانو روان کار 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^۳ 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 روان کار استفاده شد [۲۶].

^۱- Masuda et al^۲- Azman et al^۳- Ahmed Ali et al



شکل ۱۱: تغییرات گرانی روی نمونه‌ها، در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد



شکل ۱۲: تغییرات گرانی روی نمونه‌ها، در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد

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

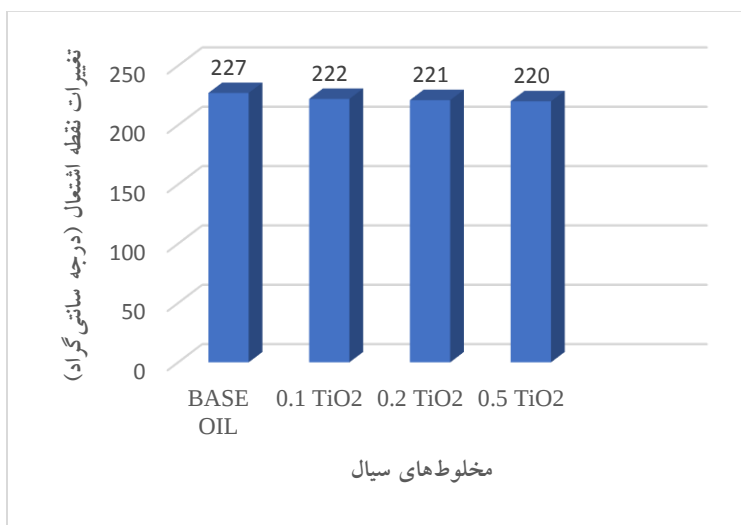
نتایج آزمون تعیین نقطه‌ی اشتعال برای روغن پایه و نانو روان کارهای حاوی نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2) نشان‌دهنده‌ی کاهش جزئی در نقطه‌ی اشتعال با افزایش غلظت نانوذرات است. نتایج نقطه‌ی اشتعال و ریزش نمونه‌های تهیه شده در نمودار شکل (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. بر اساس نتایج، کاهش جزئی نقطه‌ی اشتعال 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.

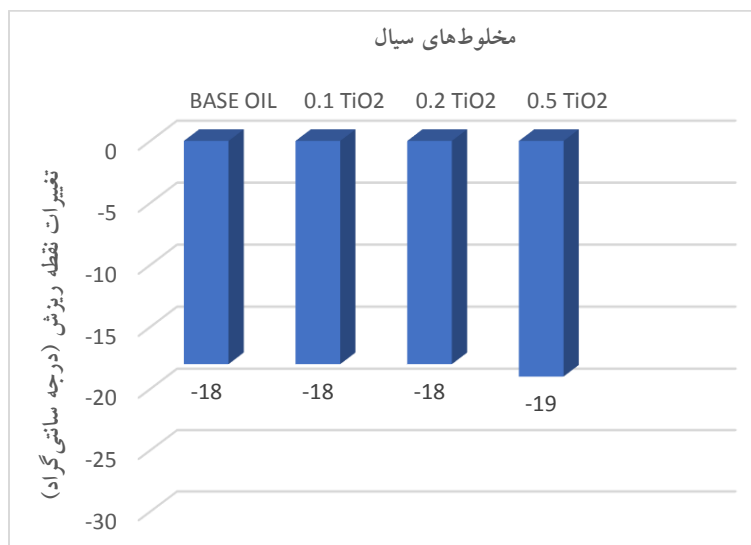
(۲) افزایش سطح تماس:

- 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 به طور 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 این حال، 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 به طور خلاصه، با افزایش غلظت نانوذرات، نقطه‌ی اشتعال به طور 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 این که 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.



شکل ۱۴: تغییرات نقطه‌ی ریزش نمونه‌ها

نتایج آزمون نقطه‌ی ریزش برای روغن پایه و نانو روان کارهای حاوی نانوذرات تیتانیوم دی اکسید (TiO_2) در غلظت‌های مختلف نشان‌دهنده‌ی تغییرات جزئی در نقطه‌ی ریزش است. بر اساس نتایج نقطه‌ی ریزش در غلظت‌های پایین دارای ثبات است. به گونه‌ای که در غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی، نقطه‌ی ریزش نانو روان کارها تغییری نسبت به روغن پایه نداشته و در ۱۸-درجه‌ی سانتی‌گراد باقی مانده است. این نشان‌دهنده‌ی این است که افزودن نانوذرات در این غلظت‌ها تأثیر قابل توجهی 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 کاهش یافته 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، به طور مثال در پژوهش [۱۸] که اثر نانوذرات TiO_2 با غلظت‌های مختلف بر روی روغن پایه 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 دی اکسید (TiO_2) بر خواص روان کاری روغن پایه سویا اپوکسی شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات به طور قابل توجهی خواص تریبولوژیکی و فیزیکی روغن پایه 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

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.

- [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 TiO₂: 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 SiO₂ & Al₂O₃ و کاربرد آن در ماشین آلات دوار حساس، پایان نامه 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 TiO₂/SiO₂ 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 TiO₂ 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 TiO₂ 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.

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

Abbas Taghipour^{1,*}, Reza Poultangari²

^{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 (TiO₂) 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: TiO₂ 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 TiO₂ 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 TiO₂ 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