مطالعه تجربی استفاده از نانوسیالات روانساز جهت کاهش سایش و فرسایش

رضا جعفری مقدم[۱*]، محمد قلم باز [۲] و علی حیدری مقدم [۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
[۲] عضو هیات علمی، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
[۳] عضو هیات علمی، گروه مهندسی مواد، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: تابستان ۹۷ پذیرش: تابستان ۹۷

چکیده

در تحقیق حاضر نحوه ی تاثیر گذاری منفی نانوسیالات در امر سایش و فرسایش شناسایی شده و به دنبال استفاده بهینه ی آنها در امر سایش و فرسایش هستیم. در دنباله، اشاره خواهد شد که تاثیرات منفی نانوذرات بر امر سایش و فرسایش، عمدتا متوجه شکل نانوذرات می‌باشد. در این میان، نانوذرات WS_2 به جهت دارا بودن مشخصه هندسی نسبتا گرد، در جهت بهبود امر سایش و فرسایش به عنوان نانوذراتی موثر شناسایی شده و لذا آزمایشی در این روال صورت می‌پذیرد. آزمایش صورت گرفته در تحقیق پیشرو شامل تست های متعددی در سرعت، فشار و قطعات کاری مختلف می‌باشد. به عنوان خلاصه ای از نتایج بدست آمده، نانوسیال WS_2/H-100 میتواند سایش قطعات ST420 و ST316 را در بازه فشاری ۲-۸کیلوگرم نیرو و بازه سرعت حدود ۱۹-۲۲۰دور بر دقیقه به طور متوسط تا حدود ۱۴٪ در غلظت ۵٪ حجمی نانوذرات کاهش دهد. این در حالیست که سایش قطعه کاری Mo40 در بازه های مذکور در حدود ۳٪ در غلظت حجمی ۵٪ بود. در خصوص فرسایش قطعات ST420 و ST316 در بازه های نامبرده مذکور تا حدود ۷٪ در غلظت حجمی ۵٪ فرسایش سطح را نسبت به روغن پایه کاهش می‌دادند، در حالیکه این مقدار برای قطعه کاری Mo40 در حدود ۲٪ گزارش شد. .

* **عهده‌دار مکاتبات: r.jafarimoghaddam@gmail.com**

کلمات کلیدی: نانو سیالات، سایش و فرسایش، نانوسیال WS2/H-100

Abstract

The present study aims to identify nanoparticles amenable to the decrease of erosion and corrosion in various working states. In this regard it is argued that the negative effects on erosion and corrosion imposed due to the presence of nanoparticles are reflected from the nanoparticles shape. In this situation, WS2 featured by possessing an almost round shape is suitable for decreasing the erosion and corrosion which is undergone the present experiment. The presented experiments are in different rotational speeds as well as different working pressures. As a gist, WS2/H-100 nanofluids are suitable to decrease the surface erosion associated with ST420 and ST316 up to about 14% in 5% volumetric fraction, in the working pressures ranging from 2-8 Kg-Force and in the rotational speeds ranging from 19-220rpm. This was whilst, for the above range and with respect to Mo40 the decreasing effect was identified to be about 3%. For the corrosion, the use of nanoparticles with 5% volumetric fraction was suitable to decrease the corrosion effect of the working allows ST420 and ST316 up to 7% compared to the pure base fluid (oil). However, in the same conditions it was recorded a decrease of about 2% with respect to Mo40.

Keywords: nanofiuids, erosion and corrosion, nanofiuids WS2/H-100

۱- مقدمه

با پیشرفت علم، تولید نانوذرات از مواد گوناگون میسر شده است. یکی از خصوصیاتی که مواد در ابعاد نانو دارند، نسبت سطح به حجم بالای آن هاست که توانایی های خاصی به آن ها بخشیده است. خواص حرارتی، مکانیکی، نوری، مغناطیسی و الکتریکی مواد در ابعاد نانو، مافوق خواص آن ها در ابعاد معمول است. بنابراین، مطالعات و تحقیقات روی مواد با ابعاد نانو توجه بسیاری از دانشمندان و مهندسین را به‌خود جلب کرده است. روش های تولید نانوسیالات متنوع بوده و برای آن خوانندگان را به منابع [۱-۵] ارجاع می‌دهیم. به علاوه، عمده تحقیقات در مورد

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.3.3]

نانوسیالت به انتقال حرارت معطوف شده و راجع به تاثیرات جانبی آن توجه کمتری شده است. همانگونه که در قسمت چکیده مشخص شد، در تحقیق پیشرو برآنیم که صرف نظر از اثرات نانوسیالات بر مسئله انتقال حرارت، به تاثیر آنها در امر سایش و فرسایش پرداخته و متعاقبا به دنبال کاهش اینگونه اثرات با استفاده از نانوسیالات باشیم. همانگونه که میدانیم، بسیاری از مکانیزم ها در صنعت ها و صنایع مختلف مکانیزم های لغزشی میباشند، به گونه ای که دو سطح نسبت به هم درحال لغزش میباشند. در بسیاری از این مکانیزم ها، از یک روانساز برای روانسازی لغزش و یا به طور کلی حرکت نسبی دو سطح استفاده میشود. یکی از نکاتی که میتواند در بسیاری از اینگونه مکانیزم ها حائز اهمیت باشد، بحث سایش و خوردگی دو سطح در حضور روانساز میباشد. لذا در این زمینه تاکنون مطالعات زیادی جهت بهبود این امر صورت پذیرفته است و متعاقبا روابط نسبتا تئوریک و تجربی در این زمینه موجود می‌باشد[۱۰-۲۲]. در حالیکه حدودا ۲ دهه از بررسی کاربردی نانوسیالات میگذرد، تاکنون عمده تحقیقات متوجه بحث انتقال حرارت بوده و توجه کمتری در امر سایش و فرساش مربوط به استفاده از نانوسیالات شده است که به طور مشخص به عنوان اثری جانبی تلقی می‌شود. لذا بسیاری از جزئیات مربوط به اثرات حضور نانوذرات در سیال روانساز، هنوز به طور دقیق بررسی نشده است. در تحقیق پیشرو، با استفاده از ابزارات آزمایشگاهی، در صدد شبیه سازی اثرات استفاده از نانوروانسازها در امر سایش و اصطکاک صفحات لغزشی هستیم. از نظرگاه تئوری، حضور نانوذرات در سیال پایه در امر سایش و فرسایش به گونه زیر تعبیر میشود:

اگر فرض کنیم که به طور معمول خلل و فرج های صفحات در ابعاد میکرومتر هستند (این فرض تقریبا متناسب با صفحات سخت می‌باشد) لذا اگر ذراتی با ابعاد کوچکتر(مثلا نانومتر) در سیال پایه حضور داشته باشند، اینگونه ذرات میتوانند خلل و فرج های موجود در سطوح را پر کرده و به دنبال آن ضریب اصطکاک سطح را کاهش دهند. اما باید توجه داشت که صرف کوچکتر بودن ابعاد ذرات معلق در سیال پایه، تضمینی برای نشست اینگونه ذرات در خلل و فرج سطوح نیست. در حالت کلی، شکل نانوذرات، برهمکنش الکترواستاتیک ذرات و سطح، هندسه جریان (رینولدز جریان) و هندسه مسئله نیز از دیگر عوامل موثر در کیفیت نانوروانساز در مقایسه با روانساز پایه میباشند. آنچه که مبرهن است، این است که در هر کاربرد، نانوروانساز مربوطه نیز می‌بایست متناسب با آن شرایط تعیین گردد و با توجه به بحث از پیش رفته، هنوز یک نانوروانساز بهینه جهت امر روانسازی به طور منحصر به فرد و متناسب با هرگونه شرایط کاری ارائه داده نشده است.

بحث کلی و به ظاهر حاکم بر مسئله کیفیت نانوروانسازها، اندازه ذرات و شکل ذرات میباشند. به گونه ای که هر چه وجوه تقارن تپوگرافیکی ذرات بیشتر باشد، این ذرات در تقابل با سطح، ضریب اصطکاک را با غلتش خود کاهش میدهند. و در این حالت، میتوان گفت که هر چقدر که تقارن ذرات بیشتر باشد، درجه آزادی حرکت ذرات در خلل و فرج ها بیشتر شده، و به دنبال آن جریان منظمتری را در ناحیه نزدیک سطح (و همچنین درون خلل و فرج ها) خواهیم داشت که نتیجتا میتواند منجر به کاهش اصطکاک سطح گردد.

برای شفاف سازی بیشتر مسئله به چندین تحقیق در زمینه کیفیت انواع روانسازهای نانو در امر سایش و فرسایش میپردازیم.

شن و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که بسیاری از WS_2 بعنوان یک لایه نازک روی هم انباشته می‌شوند. این لایه نازک یک ساختار بسیار قوی‌ای را تشکیل می‌دهد که همزمان قابلیت انعطاف‌پذیری خاصی را از خود نشان میدهد. بنابراین لایه‌هایی که باین صورت تشکیل می‌شوند می توانند یک سطح گسترده با قدرت زیاد و مقاوم در برابر تنش‌های برشی روی قطعه‌کار تشکیل دهند. هو و همکاران (۲۰۱۰) گزارش دادند که لایه فیزیکی نانو ذرات WS_2 می توانند قطعه‌کار را در طول فرآیند اصطکاک که منجر به سایش می‌شود به طور مناسبی نگه دارد و این نانو ذرات WS_2 متوانند به راحتی روی سطح جذب شوند و تاثیرات روغنکاری خوبی را روی سطح بجا بگذارند. به طور کلی، آزمایش‌های بسیاری روی خواص خنک‌کاری و روغنکاری نانو ذرات WS_2 و همچنین CNT یا کربن نانوتیوب که بصورت نانو تیوب ساخته می‌شود گزارش شده است.کالیتا و همکاران(۲۰۱۲) آزمایشی را در مورد اثر نانوسیال بر روی سطح قطعه‌کار یا سطح خردکن انجام دادند. به عنوان مثال، آزمایشی را برای تاثیر نانو سیال روی سطح خردکن چدنی و آلیاژ EN24 انجام دادند. آزمایش بدین صورت انجام شد که نانو ذرات WS_2 را در روغن پایه مثل پرولاین و روغن سویا ترکیب کردند، بدین منظور که تاثیر آن را رو خردکن چدنی بررسی کنند. این محققان خواص تریبولوژی نانوذرات WS_2 (بوسیله اندازه‌گیری نیرویی که برای خردکردن بکار می‌رود)، ضریب اصطکاک، انرژی مخصوص خرد کردن و نسبت نیروی خردکردن را بدست آورند. به علاوه در آن تحقیق، شکل گیری لایه یا فیلم WS_2 روی چرخ‌های خردکن بوسیله دستگاه اسکنینگ الکترومیکروسکپی(SEM) اندازه گیری شده است.

کلایتی و همکاران(۲۰۱۰) همچنین آزمایشی برای شناسایی اصطکاک بر روی خردکن‌ها انجام دادند. آنها اثرات روغنکاری خردکن‌های خشک را با روغن‌های انباشته، روغن سویا MQL و همچنین روغن سویا با نانوذرات MOS_2 و AL_2O_3 و همچنین تحت فشار ۲۰ نیوتن و سرعت خطی ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلیمتر بر ثانیه را انجام دادند. با استفاده از این آزمایش‌ها ضریب اصطکاک محاسبه شد و کیفیت سطح قطعه‌کار توسط دستگاه SEM و اثرات روغنکاری نانوسیال MQL روی قطعه‌کار مشخص شد و در نهایت معلوم گردید که نانوسیال MOS_2/AL_2O_3 در پایه MQL تاثیرات روغنکاری بهتری را در مقایسه با سایر تکنیک‌های روغنکاری فراهم می‌کند.

سیریدهاران و مالکین(۲۰۰۹) اثرات نانوسیال MQL در حضور WS_2 و CNT بر روی امر اصطکاک بررسی کردند. آنها دریافتند که اینگونه نانو سیالات می‌تواند به طور موثری سختی و زبری سطح را بهبود ببخشد همچنین انرژی کمتری را برای خردکردن مصرف کند.

شن و همکاران(۲۰۰۸)، آزمایشی را با استفاده از نانوذرات‌های جت MQL خردکن و AL2O3 و الماس(PCD) انجام دادند. و همچنین آزمایش دیگری را با نانوذرات‌های CNT یا کربن نانوتیوب که به سیال خردکن افزایش می‌دهند را انجام دادند. آنها همچنین دمای سطح را با استفاده از نیرویی که برای خردکن مصرف می‌شود(G)، و همچنین Ra (زبری سطح) را در حین انجام آزمایش بررسی کردند. نتایج نشان داد که با استفاده از این نانوذرات خواص روغنکاری و هدایت حرارتی نانوذرات بطور قابل ملاحضه‌ای افزایش پیدا کرد و باعث بهبود سطح قطعه‌کار گردید و همچنین کیفیت و عمر مفید سطح در حین عملیات خردکردن

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.3.3]

افزایش پیدا کرد. این پدیده بطور موثری از سوختگی قطعه‌کار جلوگیری می‌کند و سطح قطعه‌کار را از لحاظ ایمنی بهبود می‌بخشد و عمر مفید قطعه‌کار را تا حد زیادی در مقابل خرد شدن افزایش می‌دهد. آلیاژهای با پایه نیکل نشان می‌دهند که علاوه بر داشتن قدرت بهتر مقاومت بیشتری را در مقابل اکسید شدن و فرسایش شدن مقاومت بیشتری را در دماهای ۶۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سیلسیوس نشان می‌دهند.

کاماتا و اوبیتاوا(۲۰۰۷) گزارش دادند، آلیاژهایی که بر پایه نیکل ساخته می‌شوند به دو گروه تقسیم می‌شوند، آلیاژهایی که بر در مقاوم به حرارت و آیاژهای مقاوم به فرسایش، و این دو گروه بر پایه خواص نیکل ساخته شده‌اند.

دادزینسکی و همکاران(۲۰۰۴) همچنین گزارش دادند دماهای بالایی که نانوسیال‌های بر پایه آلیاژهای نیکل(GH4169) در آنها بکار می‌رود به طور گسترده‌ای در مصارف انرژی زیردریایی‌ها و هوافضا بکار برده می‌شود و همچنین از این ابزارها بطور گسترده در ساخت و سازهای مکانیکی و محصولات الکتریکی استفاده می‌شود. رحیم و ساساهارا(۲۰۱۱) نشان دادند که قطعه‌کارهایی که برپایه آلیاژهای نیکل بکار برده می‌شوند عمدتا در فرآیندهای خردکنی و حصول سطح با دقت بالا بکار برده می‌شوند.

اثر غلظت نانو ذرات در خواص روغنکاری و انتقال حرارت نانوسیالات بطور گسترده‌ای بصورت آزمایشگاهی بررسی شده است. بعنوان مثال فن و ونگ(۲۰۱۱) نشان دادند که افزودن مقدار کمی از نانوذرات در حد یک تا پنج درصد حجمی می‌تواند هدایت حرارتی نانوسیال را بیست الی سی درصد افزایش دهد. ستی و همکاران(۲۰۱۵) تاثیر غلظت جریان MQL و غلظت نانوذرات را در ماشینهای خردکن بررسی کردند. نانوسیالی مانند سیال فلز کاری از مقداری از نانو ذره در مقیاس‌های ۰.۰۵ ، ۰.۱ ، ۰.۵ و حتی یک درصد حجمی از نانوذرات را از فلزاتی مانند AL2O3 و CUO استخراج کرده و آن را در مایعاتی مثل آب و غیره اضافه کرده و در طول فرآیند خردکردن به سطح اضافه کنیم. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که نوع نانوذرات و مقدار غلظت آنها که در سیال پایه مخلوط شده است و همچنین سیال MQL نقشی اساسی را در کاهش اصطکاک ایفاد می‌کنند. تیسای و جیان(۲۰۱۲) اثر تغییرات غلظت وزنی نانوذرات گرافیت را در مقیاس یک‌دهم درصد، نیم‌درصد، یک‌درصد و سه‌درصد و حتی پنج‌درصد را بصورت آزمایشگاهی در عمل مشاهده کردند. این دانشمندان مقادیر سختی سطح و همچنین جهت‌های چرخ‌های خردکن، دماهای سطح خردکن و نیروی مصرفی خردکن را با استفاده از نانوذره جتMQL اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد در پارامترهای ذکر شده(سختی و زبری سطح و غیره) با استفاده از این نانوذره بسیار پایین‌تر از راه‌های مرسومی که قبلا بکار گرفته می‌شد می‌باشد. بنابراین توصیه شد غظت وزنی کوچکتر از پنج درصد وزنی جهت خواص روغنکاری و خنک‌کاری سطح بکار برده شود. ژانگ و همکاران(۲۰۱۴) نقش نانوذرات WS2 را در روغنکاری سطوح در غلظت‌های متفاوت بررسی کردند. غلظت‌های بکار برده شده توسط این محققان یک، دو و سه درصد وزنی بود و نتایج نشان داد که انرژی مخصوص خردکردن و زبری سطح قطعه‌کار ابتدا افزایش و در نهایت با افزایش غلظت نانوذرات WS2 کاهش پیدا کرد. علاوه بر آن آزمایش‌ها نشان داد که اثرات بهینه روغنکاری، خنک‌کاری وکاهش انرژی خردکن نانوذرات جت MQL در غلظت دو درصد اتفاق می‌افتد. پیدا کردن غلظت بهینه نانوذرات در نانوسیالات در اندازه‌گیری و یافتن خواص بهینه روغنکاری مانند انرژی مخصوص خردکن و همچنین ضریب اصطکاک سطح، منوط به مطالعه بررسی دقیق آنها می‌باشد. با این وجود هنوز مطالعه و آزمایش‌های دقیق و جامع روی پیدا کردن غلظت بهینه نانوذرات در نانوسیالات انجام نشده است. همانطور که می‌دانیم تغییر غلظت نانوذرات نه تنها باعث تغییر انرژی مخصوص خردکن، نیروهای خردکن و زبری و خواص سطح می‌شود بلکه باعث تغییر انتقال حرارت نیز می‌گردد. و این پارامترها به طور متفاوتی در حال تغییر هستند. با وجود این این مقاله تاثیر غلظت نانوسیال‌های مانند WS2، CNTs، و WS2-CNTs در انرژی‌های سطح، سختی قطعه‌کار و همچنین روی انرژی مخصوص خردکن را در آلیاژهای پایه نیکل نشان می‌دهد و همچنین غلظت بهینه نانوسیال در این مقاله پیدا شده و نتایج آزمایشگاهی آن با نتایج تیوریکال و نتایج عددی بدست آمده مقایسه می‌شود

۲- روش انجام آزمایش

در تحقیق حاضر، از دستگاه AMI Wear Test Machine برای اندازه گیری سایش استفاده شده است. شرح کار دستگاه به صورت زیر است: پین روی دیسک روش متداولی برای ارزیابی رفتار سایشی و تریبولوژیکی انواع مواد فلزی، سرامیکی، کامپوزیتها و پوشش های فلزی مواد می باشد . در این روش از حرکت لغزشی پین روی دیسک برای ایجاد سایش استفاده می شود. روش متداول به این صورت است که دیسک از جنس فولاد ابزار با سختی بالا ساخته می شود و عضو سایا است. همچنین پین عضو ساییده شونده و ماده مورد آزمایش است که روی دیسک قرار می گیرد. مهمترین عوامل موثر در این آزمایش نیروی عمود بر پین، . سرعت خطی دیسک، زمان و مسافت طی شده سایش است. همچنین برای درک صحیح مکانیزم های سایش شناسایی میزان تغییرات ضریب اصطکاک و دمای سطح سایش و حجم صدای تولیدی بسیار مهم می باشد. آزمون می تواند تحت دما یا رطوبت مشخص و کنترل شده ای صورت گیرد.

مشخصات سیستم مکانیکی

•نیروی عمودی بوسیله سروجک با قابلیت تنظیم نیرو توسط نرم افزار تا حداکثر Kg۱۰ اعمال می گردد.

•سروموتور با قدرت W۴۰۰و حداکثر سرعت rpm۲۵۰ و گیربکس با نسبت ۱۲/۱ به عنوان محرک دیسک

•قابلیت جابجایی محل پین روی دیسک و قابلیت نصب پین از قطر 1mm تا 14mm

•قابلیت نصب انواع دیسک با قطرهای مختلف تا قطرcm۲۵

مشخصات سیستم اندازه گیری، کنترل و نرم افزار

•قابلیت تنظیم سرعت دیسک از طریق نرم افزار تا سرعت 250 rpm با کنترل حلقه بسته سرعت با دقت ۰.۰۱٪

•قابلیت نمایش نیروی عمودی در نرم افزار که بوسیله سنسور مربوطه اندازه گیری می شود.

•تبدیل تعداد دور یا زمان سایش به مسافت طی شده از طریق نرم افزار

•تنظیم سرعت خطی دیسک بر اساس قطر مسیر سایش توسط نرم افزار

•سنسور دما از نوعPT100 برای اخذ دمای نمونه

•سنسور نیروی اصطکاک با ظرفیتKg۱۰

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.3.3]

•محاسبه ضریب اصطکاک از روی نیروی عمودی (FN مقدار ثابت) و نیروی اصطکاک (FF) و ارائه نمودار مربوطه

•نمایش لحظه ای داده ها (زمان، دور، دما و نیرو) به صورت نمایشگر و نمودار در نرم افزار

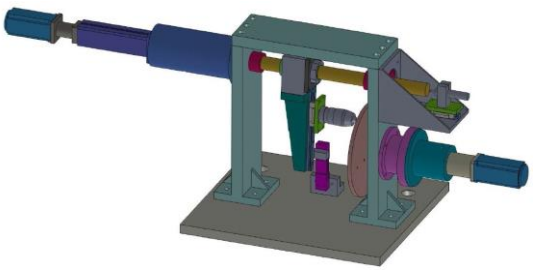
•تنظیم اتمام آزمایش بر حسب تعداد دورهای دیسک در نرم افزار

•قابلیت اجرای آزمون در شرایط نیروی عمودی ثابت و سرعت افزایشی دیسک از حداقل دور تا حداکثر آن با شیب تنظیم شده توسط نرم افزار

•قابلیت اجرای آزمون در شرایط سرعت ثابت دیسک و نیروی عمودی افزایشی از حداقل نیرو تا حداکثر آن با شیب تنظیم شده توسط نرم افزار

•قابلیت اندازه گیری کاهش وزن نمونه بر اساس کاهش طول آن حین آزمون

نمایی از این دستگاه در شکل (1) نشان داده شده است

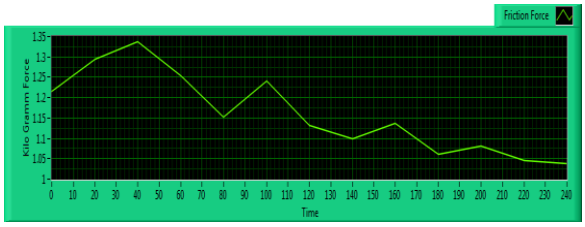


شکل۱: دستگاه تست سایش به صورت شماتیک

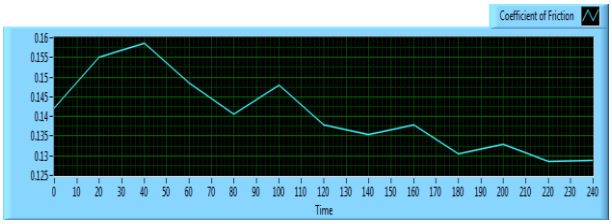
در این بخش، شمایی از خروجی دستگاه مکانیکی که به وسیله حسگر خروجی به صفحه مانیتور وصل میشد، نمایش داده می‌شود. خروجی دستگاه سه نمودار کلی ضریب اصطکاک، میکرومتر فرسایش یا همان خوردگی و نیروی برشی وارد بر سطح بر حسب زمان می‌باشد. از آنجایی که ضریب بی بعد اصطکاک یک معیاری کلی تر برای بررسی امر سایش می‌باشد، لذا نتایج مربوط به نیروی برشی را میتوان در تحلیل پیشرو صرف نظر کرد.

همانگونه که از کیفیت برداشت داده از این دستگاه برمی آید، نتایج خروجی به صورت تابعی از زمان می‌باشند که برای راحتی کار و بیشتر به منظور ارائه ای کاربردی از تحقیق حاضر، این نتایج به صورت متوسط مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته اند.

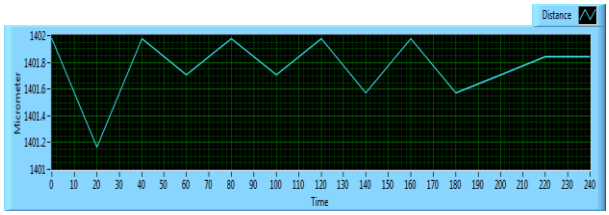
نمایی از حالت خروجی دستگاه که به صورت تابعی از زمان می‌باشد، برای سه فاکتور اشاره شده بالا و در حالت سیال پایه برای قطعه کاری ST420 در فشار (نیرو فشاری) ۲ کیلوگرم-نیرو نمایش داده شده است. شکل‌های شماره ۲ الی ۴ حالت متوسط گیری شده‌ی بازه ای را نشان داده، حال آنکه شکل های ۵ و ۶ نتایج اولیه و خام دستگاه را نشان می دهد.



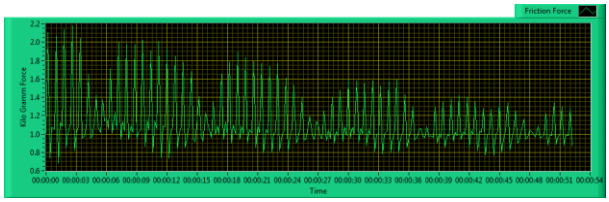
شکل۲: نمودار نیرو برشی سطح بر حسب زمان به صورت متوسط گیری شده بازه‌ای برای قطعه‌کار ST420 در حالت ۲ کیلوگرم نیرو فشاری



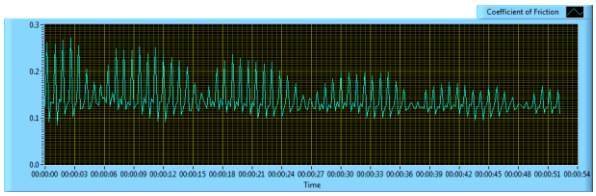
شکل۳: نمودار ضریب اصطکاک بر حسب زمان به صورت متوسط گیری شده بازه‌ای برای قطعه‌کار ST420 در حالت ۲ کیلوگرم نیرو فشاری



شکل۴: نمودار خوردگی سطح بر حسب زمان به صورت متوسط گیری شده بازه‌ای برای قطعه‌کار ST420 در حالت ۲ کیلوگرم نیرو فشاری



شکل۵: نمودار نیرو برشی سطح بر حسب زمان به صورت نتایج خام برای قطعه‌کار ST420 در حالت ۲ کیلوگرم نیرو فشاری



شکل ۶: نمودار نیرو برشی سطح بر حسب زمان به صورت نتایج خام برای قطعه‌کار ST420 در حالت ۲ کیلوگرم نیرو فشار

۴- نتایج و بحث

قبل از شرح نتایج بدست آمده از تحقیق پیشرو، باید یاد آور شد که نانوسیال WS2/Oil در ۳ غلظت مختلف ۱٪، ۳٪ و ۵٪ حجمی تهیه شده و روغن پایه نیز H-100 میباشد. این روغن به خصوص به این دلیل انتخاب شد که کاربرد بسیاری در صنایع مختلف دارا میباشد و لذا نتایج تحقیق پیشرو در مجامع صنعتی نیز کاربرد دارد. همانگونه که در بخش قبل توصیف گشت، دستگاه مکانیکی توصیف شده به منظور ثبت اطلاعات سایشی به طور زمانی مورد استفاده واقع گشت. اطلاعات خروجی اصلی این دستگاه متشکل از دو بخش زیر است:

۱- نتایج مربوط به اصطکاک پوسته ای- سایش

۲-نتایج مربوط به فرسایش سطح

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.3.3]

در خصوص بخش اول، خروجی اصلی دستگاه به صورت ضریب اصطکاک پوسته ای میباشد که به صورت بی بعد تعریف میشود.

در خصوص بخش دوم نیز، نتایج به صورت میکرومتر خوردگی سطح قابل وضوح است.

به منظور کلی سازی تحقیق پیشرو، تمامی نانوسیالات و سیال پایه بر روی سه قطعه کار مختلف و پرکاربرد به نام های ST316، ST420 و Mo40 صورت پذیرفت. به علاوه، تمامی تست های انجام شده در ۲ نیروی فشاری مختلف و همچنین سه سرعت متفاوت صورت گرفت.

در تحقیق پیشرو، نتایج متوسط برای کمیت های سایش (ضریب اصطکاک) و فرسایش (میزان خوردگی) به صورت متوسط حالات زمانی محاسبه شد که خلاصه ای از نتایج بدست آمده در شکل۷ تا ۱۴ نشان داده شده است.

شکل۷ الی ۱۰ مربوط به ضریب سایش (ضریب اصطکاک) برای نانوسیالات مختلف و همچنین سیال پایه می‌باشد، در حالیکه تصاویر ۱۱ الی۱۴ همین روال را برای مقدار خوردگی نمایش میدهند.

در شکل ۷ که مربوط به ضریب اصطکاک سیال پایه می‌باشد، مشخص است که با افزایش نیروی فشاری بر روی هر قطعه کار، ضریب اصطکاک نیز افزایش میابد. اما در هر نیروی فشاری مشخص و قطعه کاری مشخص، با افزایش سرعت دیسک دوار، این ضریب به نسبت کاهش میابد. قبل از توصیف بیشتر نتایج در وهله اول باید اشاره کرد که ضریب اصطکاک اندازه گیری شده، Cf می‌باشد که به صورت فاکتوری بی بعد اندازه گیری می‌شود. معمولا با افزایش سرعت مشخصه مسئله که در اینجا همان سرعت دیسک دوار است، این ضریب کاهش پیدا می‌کند. یا به تعبیری دیگر این چنین میتوان گفت که با افزایش عدد رینولدز در مسئله، معمولا انتظار بر کاهش این ضریب می‌رود. و این امر کاملا مجزا از افزایش تنش پوسته ای بر روی سطح قطعه کار می‌باشد. در واقع با توجه به تعریف این ضریب (ضریب اصطکاک) میتوان نوشت:

$$C_f = \frac{\tau_w \equiv \mu \frac{\partial u}{\partial x_i}\Big|_{x_i=0}}{\frac{1}{2}\rho U_0^{\,2}} \qquad (۱)$$

در فرمول بالا، طوا مقیاس متناسب با مختصات مسئله است، سرعت مشخصه موجود در مسئله، وتنش برشی بر روی دیوار میباشد.

معمولا با افزایش عدد رینولدز در مسئله (با یک طول و سرعت مشخصه خاص) تنش دیواره نیز افزایش می‌یابد. به تعبیر دیگر میتوان گفت که با افزایش سرعت مشخصه مسئله، تنش دیواره نیز افزایش می‌یابد و لذا صورت کسر فرمول فوق به طور معمول با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد اما آنچه مشخص است، مخرج کسر نیز به دلیل افزایش سرعت مشخصه زیاد می‌شود. در اینجا باید به این نکته اشاره کرد که معمولا نرخ افزایش تنش برشی دیواره با توانی کمتر از۲ از سرعت مشخصه است و لذا در حالت معمول، با افزایش سرعت مشخصه در مسئله (همانگونه که پیشتر اشاره شد، این سرعت مشخصه در مسئله حاضر همان سرعت دیسک دوار است) ضریب بی بعد سایش (ضریب بی بعد اصطکاک پوسته ای) کاهش میابد که این چنین رفتاری نیز به تبع در تست های آزمایش شده مشاهده گشت.

شکل شماره ۸ گویای این امر است که افزایش نانوذرات به H-100 باعث کاهش اصطکاک پوسته ای به نسبت در تمامی حالات شده است. با توجه به این شکل، روال کاهش ضریب اصطکاک پوسته ای در هر قطعه کاری مورد آزمایش و در هر فشاری قابل مشاهده میباشد که طبیعتا مورد تائید بحث از پیش رفته می‌باشد. به علاوه، مجددا، ضریب اصطکاک سطح در فشار های بالاتر و برای هر قطعه کاری، مقدار بزرگتری را نشان میدهد. لذا میتوان در اینجا نتیجه گیری کرد که افزایش WS2 به مقدار غلظت حجمی ۱٪ در کاهش اصطکاک پوسته ای مثمر ثمر واقع گشته است.

موارد از پیش رفته، برای تصاویر شماره ۹ و ۱۰ نیز صادق میباشند اما نکته جالب توجه در طول محاسبات تحقیق پیشرو گویای این امر است که کاهش سایش برای هر قطعه کاری و فشار کاری با افزایش نانوذرات به طور موثر کاهش پیدا نمیکرد. به تعبیر دقیق تر، دو قطعه کاری ST420 و ST316 به تغییرات غلظت نانوذرات واکنش مثبت تری نشان می‌دادند نسبت به Mo40. این واکنش مثبت تقریبا در تمامی فشار و سرعت کاری با افزایش نانوذرات قابل مشاهده میبود، اما قطعه کاری Mo40 رفتاری به نسبت متفاوت تری نشان میداد. با توجه به نتایج بدست آمده، افزایش نانوذرات به میزان ۱٪ حجمی، تاثیری مثبت بر روی ضریب سایش قطعه کار Mo40 گذاشته و این ضریب به میزان متوسط حدودا ۶٪ کاهش یافت، اما این درصد در غلظت های بالاتر به میزان کمتر از ۰.۵٪ تنزل کرد. گرچه چنین رفتاری در دو قطعات کاری دیگر نیز مشاهده شد، اما در بدترین حالت، این مقدار تاثیر مثبت افزایش نانوذرات در امر سایش از ۳٪ کمتر نمیبود. به تعبیر دقیق تر، متوسط حالات تست شده در تمامی سرعت ها و فشار های کاری برای قطعه کاری ST420 گویای این امر است که با افزایش نانوذرات به مقدار ۱٪حجمی، متوسط مقدار ضریب اصطکاک به مقدار حدود ۷٪ کاهش پیدا کرد. با افزایش مقدار نانوذرات به میزان۳٪ این مقدار متوسط کاهش ضریب اصطکاک پوسته ای به میزان حدود ۴٪ و در حالت غلظت۵٪ حجمی به میزان ۳٪ رسید که در کل پاسخ مثبت این قطعه کار را به نانوسیال WS2/H-100 نشان می‌دهد. برای قطعه کاری ST316 نیز چنین رفتار مثبتی مشاهده شد به گونه ای که با افزایش مقدار نانوذرات به میزان ۱٪ حجمی، مقدار متوسط ضریب اصطکاک سطح به میزان ۷.۸٪ کاهش پیدا میکرد. این پاسخ کاهشی مثبت به میزان حدود ۳ ٪ در حالت ۳٪ غلظت حجمی نانوذرات میبود و در حالت ۵٪ نانوذرات، این مقدار کاهشی تقریبا ثابت میماند. توجه فرمایید که درصد های اخیر ذکر شده، هر حالت را با حالت قبل مقایسه میکند، به این معنا که تا اینجا به این نکته اشاره گشت که با افزایش غلظت نانوذرات، شیب کاهش ضریب اصکاک پوسته ای به صورت متوسطی از تمامی حالات تست شده، کاهش میابد، حال آنکه مقدار کاهش این ضریب بی بعد، با افزایش نانوذرات به طور کل (به جز حالا Mo40 که به شیب افزایش نزدیک به ۰ منتهی گشت) رو به افزایش بود. به گونه ای که این مقدار متوسط کاهش برای دو قطعه کاری ST420 و ST316 به مقدار حدودا ۱۴٪ میبود، حال آنکه برای قطعه کاری Mo40 حدودا ۳٪ گزارش میشد.

همانگونه که در فصل های پیش اشاره شد، دلیل عمده احتمالی تاثیر مثبت حضور WS2 بر روی امر سایش را میتوان در پدیده ی از بین بردن طیف اولیه ناهمواری سطح جست و جو کرد. به این گونه که این نانوذرات به دلیل دارا بودن شکلی نسبتا گرد میتوانند خلل و فرج سطوح را به طرز

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.3.3]

موثری پر کرده و اصطکاک سطح را کاهش دهند. در یک نگاه ریزبین فیزیکی، عوامل متعددی از جمله پالس الکترواستاتیک ذرات نانوسیال با سطح مورد نظر، هندسه طیفی سطح ناهمواروغیره در کیفیت تاثیر نانوذرات مذکور بر روی امر سایش دخیل می‌باشند که در اینجا به ذکر آنها پرداخته نمیشود.

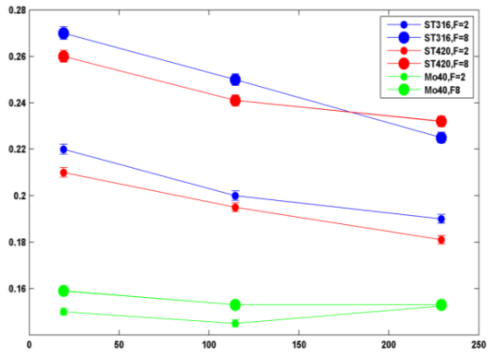
تصاویر شماره ۱۱ تا ۱۴ گویای امر خوردگی در حضور نانوسیالات WS2/H-100 می‌باشند.

قبل از شروع به بحث فرسایش، ذکر این نکته حائز اهمیت است که امر خوردگی در کل شامل پیچیدگی های فیزیکی بیشتری نسبت به امر سایش می‌باشد. تعبیر معمول و قابل انتظار عمدتا به این صورت میباشد که با افزایش سایش (ضریب اصطکاک پوسته ای) فرسایش و یا همان خوردگی نیز افزایش یابد که با حس فیزیکی در وهله اول سازگاری بیشتری دارد. اما باید به این نکته اشاره کرد که حتی امر سایش به خودی خود نیز شامل پیچیدگی های به خصوصی می‌باشد که به طور خلاصه در قسمت قبل اشاره کرد، حال آنکه فرسایش یک مرحله جلوتر از سایش قرار دارد.

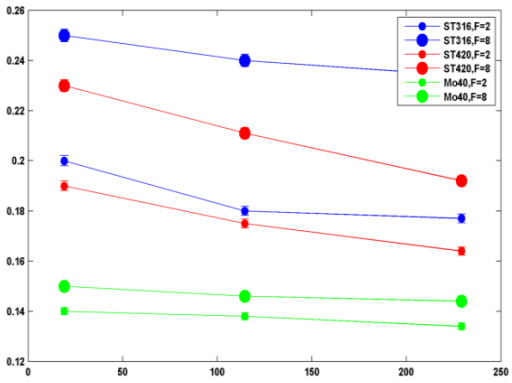
علاوه بر مسائل مربوط به سیال و یا نانوسیال که به خودی خود شامل تاثیر عوامل متعددی از جمله عدد رینولذر محلی و کلی (که عمدتا منجر به تغییر رژیم سیال از لایه ای به توربولانس میشود)، تاثیر طول مشخصه های متعدد در مسئله (که در اینجا هندسه سطح ناهموار به طور مشخص طول مشخصه های خاصی را در مسئله درگیر می‌کند)، تاثیر دو مکانیزم لغزشی اصلی مربوط به نانوذرات که به صورت حرکت های ناشی از ترموفورسیس و براوانی شناخته می‌شوند و غیره، عوامل مربوط به استحکام سطح مربوطه نیز در مسئله درگیر خواهد شد. به این دلیل عمدتا گفته می‌شود که فرسایش معمولا یه مرحله جلوتر از سایش قرار دارد.

استحکام سطح نیز به خودی خود به عوامل متعددی از جمله ساختار ملکولی سطح در تماس با سیال، رئولوژی سطح (وابستگی مقاومت سطح به عوامل متعدد) و غیره مربوط می‌باشد.

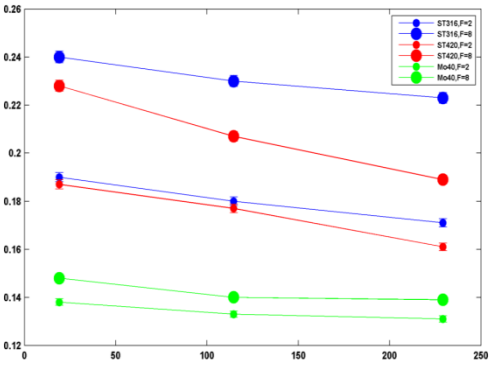
در مشاهده تصاویر ۶ تا ۸ مشخص است که با افزایش نانوذرات WS2 به روغن H-100، خوردگی سطح به میزانی نسبتا کم تغییر کرده است. مجددا قابل مشاهده است که Mo40 حساسیت کمتری از خود در مقایسه با سایر قطعات کاری تست شده نشان داده است. در این حالت نیز، متوسط این تاثیر بین حالات روغن پایه و نانوسیال با بیشترین غلظت آزمایش شده، اندازه گیری شد. با توجه به نتایج بدست آمده، این تاثیر کاهشی برای دو قطعه کاری ST420 و ST316 در حدود ۷٪ گزارش شد، حال آنکه برای قطعه کاری Mo40 به میزان حدود ۲٪ محاسبه شد.



شکل ۷: ضریب اصطکاک در حالت سیال پایه



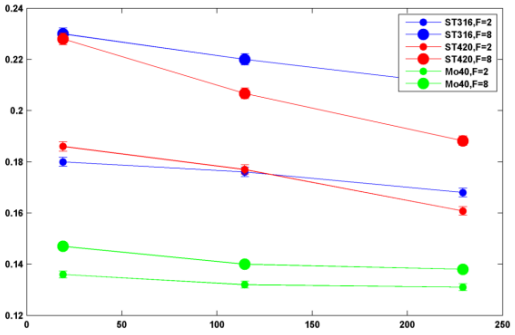
شکل۸: ضریب اصطکاک در حالت نانوسیال با غلظت ۱ درصد



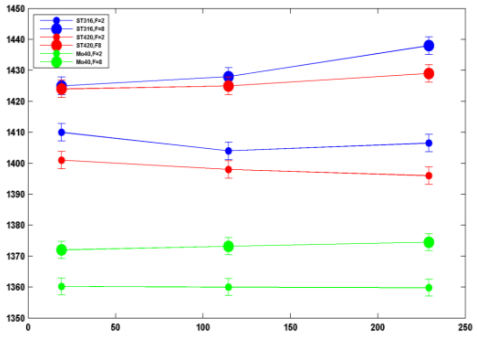
شکل ۹: ضریب اصطکاک در حالت نانوسیال با غلظت ۳ درصد

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

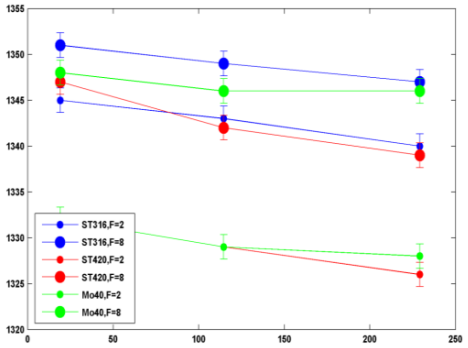
[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.3.3]



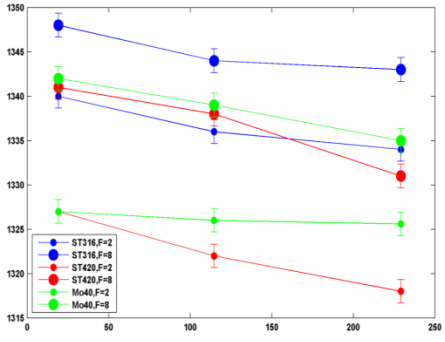
شکل ۱۰: ضریب اصطکاک در حالت نانوسیال با غلظت ۵ درصد



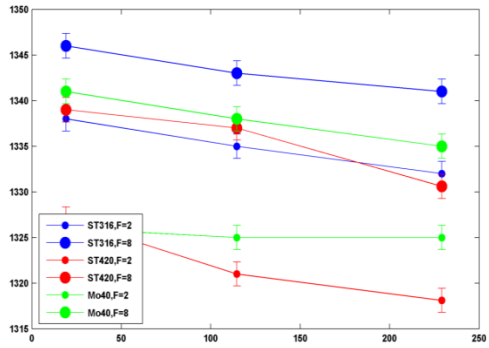
شکل ۱۱: خوردگی سطح در حالت سیال پایه



شکل ۱۲: خوردگی سطح در حالت نانوسیال با غلظت ۱ درصد



شکل ۱۳: خوردگی سطح در حالت نانوسیال با غلظت ۳ درصد



شکل ۱۴: خوردگی سطح در حالت نانوسیال با غلظت ۵ درصد

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق به طور کلی حاکی از موثر بودن نانوسیال WS2/H-100 در بهبود امر سایش و فرسایش می باشد. اما حقیقتا برای کلی سازی ادعای حاضر، تحقیقات بیشتری مورد نیاز میباشد، از آنجایی که عوامل کاملا متنوعی میتواند نتایج آزمایش کنونی را تحت تاثیر قرار دهد از جمله، رژیم سیال از حیث توربولانس و یا لایه ای بودن، طیف ناهمواری سطح و بازخورد رژیم سیال در مواجهه به طول مشخصه های متعدد در مسئله، استحکام سطوح مد نظر و غیره. با این حال، نظر به عملکرد مثبت نانوسیال WS2/H-100 میتوان به آسانی تحقیقات متعددی را در این پیرامون برای تحکیم این مدعا گسترش داد.

با توجه به نتایج برآمده از تحقیق پیشرو، نانوسیال WS2/ H-100 کارایی مثبتی در کاهش سایش و فرسایش سطوح از خود نشان میداد، به گونه ای که نظر به سطوح ST420 و ST316 تمامی حالت های مختلف تست شده در فشار و سرعت های کاری مختلف و همچنین در غلظت های مختلف حاکی از عملکرد مناسب این نانوسیالات در امر سایش و فرسایش را دارد. اما ذکر این نکته ضروری است که کاربران صنعتی باید در نظر داشته باشند که هرچند در تمامی غلظت های کاری مختلف تست شده، عملکرد مثبتی مشاهده میشود، اما شیب این عملکرد مثبت رو به کاهش است. به این معنی که با افزایش مقدار نانوذرات WS2 به سیال پایه روغن، از میزان نرخ کاهش سایش و فرسایش کاسته می‌شود. لذا اگر برای صنعتی سازی این نانوسیال در امر سایش و فرسایش در تدارک تدبیراتی هستیم، باید براورد های مالی نیز مدنظر قرار گیرد. در نظر به سطح Mo40 نیز، تاثیر مثبت حضور نانوذرات WS2 در سیال پایه روغن احساس میشد، اما این تاثیر مثبت این نانوذرات به مراتب کمتر از دو سطح دیگر مذکور گزارش شد. مجددا در این حالت نیز مشاهده شد که با افزایش غلظت نانوذرات از تاثیر مثبت حضور اینگونه نانوذرات کاسته شد.

در اینجا شاید به نظر برسد که هر چه سطح سایشی بکار برده شده نرم تر باشد، نانوذرات مذکور تاثیر مثبت کمتری از خود نشان می‌دهند. این نتیجه را می‌توان به آسانی در نتایج تحقیق حاضر دنبال کرد، به گونه ای که فولاد Mo40 از دو نوع فولاد دیگر ST316 و ST420 نرم تر بوده و لذا مشاهده گشت که حضور نانوذرات WS2 به طرز قابل قبولی مثمر ثمر واقع نشدند. اما برای اثبات این ادعا در حالت کلی به تحقیقات بیشتری نیاز داریم، از آنجایی که حداقل در امر سایش و نه فرسایش، تاثیر مثبت نانوذرات مذکور به دستکاری شدن طیف ناهمواری سطح توسط نانوذرات

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.3.3]

وابسته است و نه نرمی و یا سختی سطح، حال آنکه عدم موفقیت سطح Mo40 در حضور اینگونه نانوسالات، متوجه هر دو امر سایش و فرسایش می‌باشد.

در اینجا، به عنوان نتیجه عملی تحقیق پیشرو میتوان به این نکته اشاره کرد که نانوسیال WS2/H-100 تاثیر مثبتی در امر سایش و فرسایش می‌تواند از خود نشان دهد، لذا مستحق تحقیقات بیشتر برای عملی سازی این تاثیرات مثبت می‌باشد.

فهرست علائم

محل فهرست علائم قبل از مراجع است. ابتدا علائم انگلیسی به ترتیب حروف الفبا و سپس علائم یونانی به ترتیب حروف الفبا تایپ شود. در بالای حروف یونانی نوشته شود: "فهرست علائم یونانی"

فهرست علامت‌ها

علائم انگلیسی	
C_f	ضریب اصطکاک، بی بعد
U_0	سرعت، m/s
علائم یونانی	
ρ	چگالی، kg/m^3
τ_w	تنش برشی، N/m^2
μ	ضریب اصطکاک، بی بعد

مراجع

[1] Masuda, H., Ebata, A., thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of γ-Al_2o_3 , SiO_2 and TiO_2 ultra-fine particles)", Netsu Bussei (Japan), Vol.4, No. 4, pp. 227-233, 1993.

[2] Choi, S. U. S., "Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles", Developments and Applications of Non-Newtonian flows, D. A. Siginer and H. P. Wng eds., *FED, V. 231/MD*, Vol.66, pp. 99, 1995.

[3] Akoh, H., Tsukasaki, Y., Yatsuya, S., Tasaki, A., "Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate," *Journal of Crystal Growth*, Vol. 45, pp. 495-500, 1978.

[4] Wgener, M., Murty, B. S., Gunther, B., "Preparation of metal Nanosuspensions by high-pressure Dc-sputtering on running liquids," in: Komarnel, S., Parker, J. C., Wollenberger, H. J., (Eds.), *Nanocrystalline and Nanocomposite Materials*, Vol. 457, Materials Research Society, Pittsburgh, PA, pp. 149-154, 1997.

[5] Eastman, J. A., Choi, S. U., Li, S., Thompson, L. J. and Lee, S., "Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids," *Proc. Symposium Nanophase and Nanocomposite Materials*, Materials Research Socity, Boston, Vol. 457, pp. 3-11, 1997.

[6] Aberoumand S, Jafarimoghaddam A, Moravej M, Aberoumand H, Javaherdeh K, Experimental study on the rheological behavior of silver-heat transfer oil nanofluid and suggesting two empirical based correlations for thermal conductivity and viscosity of oil based nanofluids, Appl. Therm. Eng. 2016; 101: 362–372.

[7] Aberoumand S, Jafarimoghaddam A, On the thermal characteristics of Ag/ heat transfer oil nanofluids flow inside curved tubes: An experimental study, Appl. Therm. Eng. 2016;

[8] Jafarimoghaddam A, Aberoumand S, An empirical investigation on Cu/Ethylene Glycol nanofluid through a concentric annular tube and proposing a correlation for predicting Nusselt number, Alexandria Eng. J 2016; 55: 1047–1052.

[9] Jafarimoghaddam A, Aberoumand S, Aberoumand H, Javaherdeh K. Experimental Study on Cu/Oil Nanofluids through Concentric Annular Tube: A Correlation. Heat Trans. Asian Res. 2016

[10] Shen, G. X., Chen, Y. C., Lin, L., Lin, C. J. and Scantlebury, D., Study on a hydrophobic nano-TiO2 coating and its properties for corrosion protection of metals. Electrochim. Acta, 2005, 50, 5083– 5089.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.3.3]

[11] Alves, H., Ferreira, M. G. S. and Koster, U., Corrosion behavior of nanocrystalline (Ni70Mo30)90B10 alloys in 0.8 M KOH solution. Corros. Sci., 2003, 45, 1833–1845.

[12] Rofagha, R., Langer, R., El-Sherik, A. M., Erb, U., Palumbo, G. and Aust, A. K., The corrosion behavior of nanocrystalline nickel. Scr. Metall. Mater., 1991, 25, 2867–2872.

[13] Youssef, Kh. M. S., Koch, C. C. and Fedkiw, P. S., Improved corrosion behavior of nanocrystalline zinc produced by pulse-current electrodeposition. Corros. Sci., 2004, 46, 51–64.

[14] Mishra, R. and Balasubramaniam, R., Effect of nanocrystalline grain size on the electrochemical and corrosion behavior of nickel. Corros. Sci., 2004, 46, 3019–3029.

[15] Jensen, H. and Sorensen, G., Ion bombardment of nano-particle coatings. Surf. Coat. Technol., 1996, 84, 500–505.

[16] Droniou, P., Fristad, W. E. and Liang, Li. J., Nanoceramic based conversion coating in the paintshop. Coating, 2005, 38, 237–239.

[17] Nalwa, H. S. (ed.), Handbook of Nanostructured Materials and Nanotechnology, Vol. 1, Academic Press, San Diego, 2000.

[18] Guilemany, J. M., Dosta, S., Nin, J. and Miguel, J. R., Study of the properties of WC-Co nanostructured coatings sprayed by high velocity oxy fuel. J. Thermal Spray Technol., 2005, 14, 405–413.

[19] Honggang, J., Maggy, L., Victoria, L. T. and Enrique, J. L., Synthesis of nanostructured coatings by high velocity oxygen fuel thermal spraying. In Handbook of Nanostructured Materials and Nanotechnology, Vol. 1 (ed. Nalwa, H. S.), Academic Press, San Diego, 2000, pp. 159–209.

[20] Rout, T. K., Jha, G., Singh, A. K., Bandyopadhyay, N. and Mohanty, O. N., Development of conducting polyaniline coating: a novel approach to superior corrosion resistance. Surf. Coat. Technol., 2003, 167, 16–24.

[21] Wessling, B. and Posdorfer, J., Nanostructures of the dispersed organic metal polyaniline responsible for macroscopic effects in corrosion protection. Synth. Met., 1999, 102, 1400–1401.

[22] Garcia, B., Lamzoudi, A., Pillier, F., Le, H. N. T. and Deslouis, C., Oxide/polypyrrole composite films for corrosion protection of iron. J. Electrochem. Soc., 2002, 149, 52–60.

[23] Shen, B., Shih, A.J., 2008. Performance of novel MoS2nano-particles based grindingfluids in minimum quantity lubrication grinding. Trans. NAMRI/SME 36,357–364

[24] Hu, K.H., Hu, X.G., Xu, Y.F., Huang, F., Liu, J.S., 2010. The effect of morphology on thetribological properties of MoS2in liquid paraffin. Tribol. Lett. 40 (1),155–165

[25] Kalita, P., Malshe, A.P., Kumar, S.A., Yoganath, V.G., Gurumurthy, T., 2012. Study ofspecific energy and friction coefficient in minimum quantity lubricationgrinding using oil-based nanolubricants. J. Manuf. Process. 14 (2), 160–166

[26] Kalita, P., Malshe, A.P., Jiang, W., Shih, A.J., 2010. Tribological study of nanolubricant integrated soybean oil for minimum quantity lubrication (MQL)grinding. Trans. NAMRI/SME 38, 137–144

[27] Shen, B., Shih, A.J., 2009. Minimum quantity lubrication (MQL) grinding usingvitrified CBN wheels. Trans. NAMRI/SME 37, 129–136

[28] Shen, B., Shih, A.J., Tung, S.C., 2008. Application of nanofluids in minimum quantitylubrication grinding. Tribol. Trans. 51 (6), 730–737

[29] Kamata, Y., Obikawa, T., 2007. High speed MQL finish-turning of inconel 718 withdifferent coated tools. J. Mater. Process. Technol. 192, 281–286

[30] Dudzinski, D., Devillez, A., Moufki, A., Larrouquere, D., Zerrouki, V., Vigneau, J.,2004. A review of developments towards dry and high speed machining ofinconel 718 alloy. Int. J. Mach. Tools Manuf. 44 (4), 439–456

[31] Rahim, E.A., Sasahara, H., 2011. An analysis of surface integrity when drillinginconel 718 using

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.3.3]

palm oil and synthetic ester under MQL condition. Mach. Sci.Technol. 15 (1), 76–90

[32] Fan, J., Wang, L., 2011. Review of heat conduction in nanofluids. J. Heat Transf. 133(4), 040801

[33] Setti, D., Sinha, M.K., Ghosh, S., Rao, P.V., 2015. Performance evaluation ofTi–6Al–4V grinding using chip formation and coefficient of friction under theinfluence of nanofluids. Int. J. Mach. Tools Manuf. 88, 237–248

[34] Tsai, M.Y., Jian, S.X., 2012. Development of a micro-graphite impregnated grindingwheel. Int. J. Mach. Tools Manuf. 56, 94–101

[35] Zhang, Y.B., Li, C.H., Jia, D.Z., Zhang, D.K., Zhang, X.W., 2014. Experimentalevaluation of MoS2nano-particles in jet MQL grinding with different types ofvegetable oil as base oil. J. Clean. Prod. 87, 930–940

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.1.3.3]