ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

10.22034/IJME.2024.428830.1884

بررسی تجربی تأثیر نانوذرات تولیدی از زغال باگاس نیشکر (نانو بیوچار) بر خواص ضدسایشی روان‌کار مورد استفاده در هوزینگ یاتاقان پمپ‌های سانتریفوژ در صنعت نفت و پتروشیمی

عباس تقی‌پور[۱*]، پژمان نیک‌اندیش[۲]، میلاد ستاره[۲]

۱- استادیار، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: taghipoor@iaud.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۶ آذر ۱۴۰۲

پذیرش: ۲ فروردین ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

آزمون سایش

نانوذرات زیستی

نسبت زبری

آزمون آنالیز عنصری

چکیده

در این پژوهش، تأثیر نانوذرات بیوچار بر خواص ضدسایشی یک روان‌کار صنعتی بررسی شد. در فاز اول با استفاده از دستگاه آسیای مکانیکی، نانوذرات از زغال باگاس نیشکر تولید شد. تولید نانوذرات بیوچار از محصولات پسماند نیشکر، به‌عنوان نانوذرات زیستی می‌تواند گامی در جهت کاهش مشکلات زیست‌محیطی باشد. نانوذرات تولیدشده از طریق آزمون‌های EDS و XRD مورد ارزیابی قرار گرفتند. در فاز دوم نانوذرات بیوچار تولیدی با غلظت ۰/۵ درصد وزنی با روغن گلدن اسپیدی 20W-50، مورداستفاده در سیستم خنک‌کاری هوزینگ یاتاقان پمپ‌های صنعت نفت و پتروشیمی، ترکیب و خواص ضدسایشی، ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت هدایت (k) هر کدام از مخلوط‌ها تعیین شد. بر اساس آزمون‌های انجام شده و نتایج حاصل، مشخص شد افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو روان‌کار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی نسبت به روان‌کار پایه ٪۹/۱۶ و میزان کاهش ضریب اصطکاک آن نسبت به روغن پایه در سرعت‌های خطی ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۳ m/s به ترتیب ۲۶/۶۷، ۳۲/۳ و ٪۲۷/۸۷ می‌باشد؛ بنابراین در فاز سوم، برای بررسی میدانی نقش نانوذرات بیوچار در هوزینگ یاتاقان پمپ‌ها از مخلوط نانو روان‌کار استفاده می‌شود. نتایج آنالیز عنصری نشان می‌دهد عناصر فرسایشی آهن، کروم، آلومینیم، قلع، مس و سرب مربوط به مخلوط نانو روان‌کار زیستی در مقایسه با روغن معمول، کاهش داشته است. بنابراین کاربرد نانوذرات بیوچار در ترکیب با روغن مورداستفاده در هوزینگ یاتاقان پمپ‌های صنایع پتروشیمی تأثیر مثبتی در بهبود عملکرد آن دارد.

Experimental study of the effect of nanoparticles produced from sugarcane bagasse charcoal (nano biochar) on the anti-wear properties of lubricants used in bearing housing of centrifugal pumps in the petrochemical industry

Abbas Taghipoor[1*], Pezhman Nikandish[2], Milad Setareh[2]

1- Assistant Professor, Materials and Energy Research Center, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Jundi-shapur University of Technology, Dezful, Iran

* Corresponding Author's Email: taghipoor@iaud.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 7 December 2023

Accepted: 21 March 2024

Keywords:

Wear Test

Bio Nano Particles

Roughness Ratio

Elemental Analysis Test

Abstract

In this study, the effect of bio nanoparticles (biochar) was investigated on anti-wear properties of an industrial lubricant. In the first phase, nanoparticles were produced sugarcane bagasse charcoal by ball mill method. The production of biochar nanoparticles from sugarcane waste products as biological nanoparticles can be a step towards reducing environmental problems. The produced nanoparticles were evaluated by EDS and XRD tests. In the second phase, biochar nanoparticles produced with a concentration of 0.5% by weight was combined with Golden Speed 20W-50 oil used in the cooling system of bearing housing of oil and petrochemical pumps then were determined anti-wear properties, coefficient of friction and heat transfer coefficient (k) of blends. Based on the results, the thermal conductivity coefficient of nano lubricant with a concentration of 0.5% by weight increased by 9.16% compared to the base lubricant and the reduction of its friction coefficient compared to the base oil at linear speeds of 0.15, 0.2 and m/s 0.3 is 26.67, 32.3 and 27.87% respectively; Therefore, in the third phase of this nano-lubricant blend, the role of biochar nanoparticles in combination with oil was used to field the pump bearing housing. The results of elemental analysis showed that the erosive elements of iron, chromium, aluminum, tin, copper and lead related to the nano-lubricant blend were reduced compared to conventional oil. Therefore, the use of biochar nanoparticles in combination with the oil used in the bearing housing of petrochemical industry pumps has a positive effect on improving its performance.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Taghipoor A, Nikandish P, Setareh M. Experimental study of the effect of nanoparticles produced from sugarcane bagasse charcoal (nano biochar) on the anti-wear properties of lubricants used in bearing housing of centrifugal pumps in the petrochemical industry. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Mar 20;11(1):1-14. doi: 10.22034/IJME.2024.428830.1884 [In Persian]

۱– مقدمه

تمایل به تهیه موادی با ابعاد نانومتری و استفاده از آن‌ها، با توجه به خصوصیات صنعتی جالب این مواد، روزبه‌روز در حال افزایش است، اما نانوذرات حاصل از روش‌های شیمیایی که امروزه به کار برده می‌شوند، به دلیل استفاده از مواد شیمیایی خطرناک، سمی بودن و آسیب‌های زیست‌محیطی حاصل از آن‌ها، نگرانی‌های زیادی را ایجاد کرده است. روش‌های شیمیایی تهیه این نانوذرات منجر به باقی‌ماندن مقداری از واکنش‌گرهای سمی در کاربردهای زیستی می‌شود. تولید نانوذرات با استفاده از اصول شیمی سبز، جایگاه ویژه‌ای در پژوهش‌ها دارد و انواع گوناگونی از سامانه‌های زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ استفاده از نانوذرات در روان‌کننده‌ها به دلیل بهبود خواص سطحی و قابلیت انتقال حرارت، افزایش بازده و کاهش هزینه‌های تعمیرات، به‌عنوان یک ایده‌ی نو بسیار مورد توجه واقع شده است. اصطکاک ناشی از وضعیت روان‌کاری نامناسب دستگاه‌ها، عامل هدررفت انرژی می‌باشد و سهم بزرگی را در افزایش هزینه‌های عملیاتی صنایع، دارا است. بهینه‌سازی و بهبود روش‌های بهره‌برداری از منابع و فرایندهای فرآورش، تبدیل و انتقال انرژی و نیز اجرای مدیریت انرژی، از جمله روش‌هایی است که توسعه پایدار را به دنبال دارد.

تولید نانوذرات بیوچار از پسماند نیشکر، به‌عنوان نانوذرات زیستی می‌تواند روشی برای کاهش مشکلات زیست‌محیطی و افزایش رونق اقتصادی در کشور به‌ویژه استان خوزستان باشد؛ چون‌که سالیانه مقادیر زیادی از باگاس نیشکر بدون استفاده هدر می‌رود. نانوذرات به دلیل مساحت سطح ویژه بسیار بالا و ساختار هندسی آن‌ها در ترکیب با روان‌کارها می‌توانند سبب بهبود خواص ضدسایشی و کاهش اصطکاک قابل ملاحظه‌ای شوند؛ چراکه نانوذرات در بین سطوح اصطکاکی، خلل و فرج را پرکرده و اصطکاک لغزشی را به اصطکاک غلتشی تبدیل می‌کند. لاد و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۷ پژوهشی تحت عنوان مطالعه‌ی خواص تریبولوژیکی نانوذرات به عنوان بهبوددهنده در روغن موتور چند درجه‌ای انجام دادند. نانوذره‌ی مورد استفاده در این پژوهش تیتانیوم دی‌اکسید با غلظت ۱/۵ درصد وزنی بود. دستگاه آزمون سایش مورد استفاده نیز از نوع پین روی دیسک و متغیرهای مستقل شامل بارگذاری‌های 40N، 60N و 90N در سرعت‌های لغزشی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ m/s بود. نتایج، بهبود معنی‌دار خواص تریبولوژیکی روغن را نشان داد. سانا کریشنا و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۸ در پژوهش خود تحت عنوان اثر نانوذرات بر رفتار حرارتی، رئولوژیکی و تریبولوژیکی روغن کمپرسور مبرد از روغن پلی آلکیلن گلیکول[1] و نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید (TiO_2)، سیلیسیم دی‌اکسید (SiO_2) و دی‌آلومینیم تری‌اکسید (Al_2O_3) استفاده نمودند. باتوجه به نتایج، با افزایش غلظت نانوذرات، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته‌ی سیال افزایش یافت. حداکثر افزایش ضریب هدایت حرارتی برای نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید، سیلیسیم دی‌اکسید و دی‌آلومینیم تری‌اکسید به ترتیب ۱/۳۸، ۱/۳۱ و ۱/۴۸٪ و افزایش مربوط به ویسکوزیته به ترتیب ۵/۶۴، ۱۰/۳۴ و ۷/۹۱٪ بود. نتایج آزمون‌های تریبولوژیکی نشان داد که نانو روان-کننده‌ها حاوی تیتانیوم دی‌اکسید و سیلیسیم دی‌اکسید دارای اصطکاک و خواص ضدسایش بهتری نسبت به روان‌کننده‌ی پایه هستند. سو و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۸ در پژوهشی تأثیر نانولوله‌های کربنی را روی خواص تریبولوژیکی روغن‌های زیستی بررسی کردند. دستگاه آزمون سایش از نوع پین روی دیسک بود. نانولوله‌ی کربن از نوع چند دیواره با اندازه‌های مختلف و غلظت‌های ۰/۰۵ و ۰/۲۵ درصد وزنی استفاده شد. نتایج نشان داد که این نانوذرات می‌توانند کاهش اصطکاک و خاصیت ضدسایشی روغن را به‌طور معنی‌داری بهبود بخشد. همچنین با توجه به نتایج، بهترین ترکیب با غلظت ۰/۰۵ درصد وزنی بود. سینگ و همکاران [۴] در سال ۲۰۲۰ در پژوهشی به بررسی رفتار اصطکاکی و سایش روغن کرچک با نانوذرات TiO_2 به‌عنوان افزودنی پرداختند. نانوذرات با غلظت وزنی ۰/۱ تا ۰/۳ درصد به روغن کرچک پایه اضافه شدند. نانوذرات با غلظت ۰/۲٪، دارای حداقل ضریب اصطکاک و غلظت ۰/۳٪ بیشترین ضریب اصطکاک را دارد. از نظر میزان سایش نیز حداقل مقدار در غلظت ۰/۲٪ حاصل شد. صبا و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۸ پژوهشی تحت عنوان بررسی خصوصیات تریبولوژیکی، هدایت حرارتی و مقاومت خوردگی ترکیب نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید و الماس را انجام دادند. بر اساس نتایج با افزایش درصد نانوذرات، میزان سایش به طور قابل‌توجهی کاهش یافت. خصوصیات حرارتی نیز با افزایش نانوذرات کم شد. بر اساس نتایج آزمون خوردگی، مقاومت خوردگی نمونه‌ها با افزایش نانوذرات تا ۰/۲۵درصد وزنی زیاد شد و بعد از آن کاهش یافت. چاوراسیا و همکاران [۶] در سال ۲۰۲۰ در پژوهشی به بررسی خواص اصطکاکی و ضد سایشی روغن اصلاح شده شیمیایی Sal Shorea Robusta به عنوان روان‌کار زیستی با استفاده از نانوذرات اکسید مس پرداختند. بر اساس نتایج، بیشترین کاهش اصطکاک در غلظت وزنی ۰/۲۵٪ و کم‌ترین سایش در غلظت ۰/۵٪ به‌دست آمد. قربانی و همکاران [۷] در سال

[1] Polyalkylene Glycol

۲۰۲۱ در یک پژوهش توانستند پوشش‌های اپوکسی هوشمند چندمنظوره با ترکیب میکرو کپسول‌ها شامل ۱۵ درصد وزنی روغن بذر کتان و درصدهای مختلف نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید (۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد وزنی) بسازند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که پوشش هوشمند حاوی ۱۶ درصد وزنی TiO_2 بهترین عملکرد را در محیط‌های خوردگی به دلیل ترمیم خراش به صورت لایه به لایه دارد. این بررسی نشان داد که، افزودن ۴ درصد وزنی نانو ذرات TiO_2 اثر منفی بر خواص ضد سایش دارد که این امر به دلیل تشکیل ذرات نانوکامپوزیت می‌باشد. با این حال، با افزایش درصد نانوذرات TiO_2 تا ۱۲ درصد وزنی، خواص ضد سایشی روند افزایشی داشت. آلکاهتانی و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۲ در پژوهشی، عملکرد تریبولوژیکی و خواص رئولوژیکی روغن موتور با نانو افزودنی‌های گرافن را بررسی کردند. روغن مورد استفاده SAE5W-30 و نانو ذرات گرافن با غلظت‌های وزنی ۰/۰۳، ۰/۰۶، ۰/۰۹، ۰/۱۲ و ۰/۱۵ می‌باشد. آزمون سایش نیز توسط دستگاه چهار ساچمه و تحت بارهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ نیوتن انجام شد. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات به روغن موتور میزان سایش و ضریب اصطکاک را به‌ترتیب ٪۱۵ و ٪۳۳ نسبت به روغن پایه کاهش می‌دهد. همچنین ضریب هدایت حرارتی به اندازه ٪ ۷۷/۴ افزایش می‌یابد.

با توجه به مزایای ذکر شده، ترکیب نانو ذرات زیستی با روان‌کارها می‌تواند اثرات زیست محیطی سودمندی داشته باشد، از طرفی با توجه به کاربرد فراوان روغن گلدن اسپیدی 20W-50 که یک روغن مهم و پرکاربرد در پمپ‌های گریز از مرکز هلندی با محرک توربین است و در صنعت نفت و پتروشیمی کاربرد زیادی دارد؛ نانو ذرات زیستی به‌عنوان افزودنی با روغن مذکور می‌تواند نقش مثبتی در بهبود خواص تریبولوژیکی آن ایفا کند و سبب افزایش عمر و بهبود کارکرد پمپ‌ها شود و تا حد زیادی مشکلات زیست محیطی ناشی از روغن‌های معدنی را نیز کاهش دهد. بنابر این، مطالعه تجربی تأثیر نانوذرات زیستی بر خواص تریبولوژیکی و حرارتی روان‌کار مورد استفاده در صنعت پتروشیمی ضروری است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تولید نانو ذرات از زغال باگاس نیشکر

در این پژوهش نانوذرات با روش آسیای مکانیکی تولید شد. ابتدا زغال باگاس نیشکر که به روش پیرولیز تحت دما و زمان مشخص پخت شده است، تهیه گردید. تولید نانو ذرات در مرکز تحقیقات مواد و انرژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول انجام شد. برای اطمینان از خشک بودن، زغال مورد نظر ابتدا به مدت ۳ ساعت تحت دمای ۸۰°C داخل آون قرار گرفت. جهت تولید نانوذرات از دستگاه آسیای مکانیکی سیاره‌ای مدل Retcsh ساخت کشور آلمان استفاده شد. بدین منظور جرم مشخصی از زغال و گلوله‌های ساچمه‌ای از جنس فولاد ضد زنگ با نسبت مشخص درون کاپ‌ها قرار گرفتند. سرعت دوران و زمان معین توسط دستگاه تنظیم و فرایند تولید نانوذرات آغاز شد. تولید نانوذرات با سرعت ۳۰۰rpm و مدت‌زمان ۸ ساعت انجام شد. پس از تولید نانوذرات، جهت بررسی کیفیت و اندازه‌ی آن‌ها از نانوذرات تولیدی نمونه گرفته شد و با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM[1]) تصویربرداری انجام گردید تا در خصوص اندازه‌ی ذرات آن در حد نانو اطمینان حاصل گردد.

۲-۲- انتخاب میزان غلظت نانو ذرات در ترکیب با روغن پایه

غلظت نانوذرات تأثیر زیادی در عملکرد نانو روان‌کارها دارد، به‌گونه‌ای که غلظت‌های بالا (>٪۰/۵wt) موجب رسوب ذرات بر روی قطعات شده و ذرات بزرگ‌تر همانند ناخالصی‌ها موجب ایجاد خراش بر روی سطوح می‌شود و در نتیجه اصطکاک بین سطوح افزایش می‌یابد. همچنین در غلظت‌های خیلی پایین (<٪۰/۰۵wt) نانوذرات نمی‌توانند سطوح اصطکاکی را به طور کامل پوشش بدهند و درنتیجه عملکرد خوبی ندارند؛ بنابراین غلظت مورداستفاده باید در حد بهینه باشد که در اکثر پژوهش‌های قبلی، غلظت در محدوده‌ی ۰/۱ تا ۰/۵ درصد وزنی به‌عنوان غلظت بهینه نانوذرات بیان شده است [۹]. در این پژوهش جهت ترکیب نانوذرات از غلظت وزنی ۰/۵ درصد، استفاده شد.

[1] Scanning Electron Microscopy

۲-۳- مشخصات روغن پایه

برای انتخاب روغن، عوامل مختلفی وجود دارد. جهت بررسی عملکرد نانو روان‌کار به‌صورت میدانی، پمپ‌های گریز از مرکز هلندی با محرک توربین که در صنعت نفت و پتروشیمی کاربرد زیادی دارد انتخاب شد. در این پژوهش از روغن گلدن اسپیدی 20W-50 که یک روغن مهم و پرکاربرد می‌باشد به‌عنوان روغن پایه استفاده گردید. این روغن ساخت شرکت بهران تحت لیسانس شرکت Exxen آمریکا می‌باشد. مشخصات فیزیکی این روغن در جدول ۱ ذکر گردیده است.

جدول ۱ مشخصات فنی روغن [۱۰]

ویژگی‌ها	
ویسکوزیته سینماتیکی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (مترمربع بر ثانیه)	۵۰۰±۲۰
شکل ظاهری	مایع شفاف مایل به زرد
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	۹۰۶
نقطه‌ی اشتعال (درجه سانتی‌گراد)	۲۴۰
نقطه‌ی ریزش (درجه سانتی‌گراد)	-۱۲

۲-۴- تهیه نانو سیال و بررسی پایداری آن

پراکندگی و پایداری نانوذرات در روغن پایه برای روغن‌های روان‌کار اهمیت زیادی دارد، دستیابی به یک نانوسیال پایدار و مناسب برای کاربردهای صنعتی بزرگ‌ترین چالش است؛ موضوع پایداری نانوسیال از محدودیت‌های این پژوهش نیز است که برای حل این مشکل و پراکنده کردن نانوذرات درون سیال پایه از سورفکتانت Span 80 و حمام اولتراسونیک استفاده شد. نمونه‌ها برای مدت‌زمان ۳۰ دقیقه تحت امواج اولتراسونیک قرار گرفتند. حمام اولتراسونیک، دارای یک محفظه فلزی است که مقداری آب داخل آن قرار دارد؛ دستگاه متصل به این ظرف، امواج ماورای صوت ایجاد می‌کند. یکی از موارد استفاده از این حمام، پخش ذرات داخل محلول و در نتیجه یکنواخت شدن محلول موردنظر است. حمام اولتراسونیک مورداستفاده در این پژوهش، ساخت کشور دانمارک، شرکت Struers و مدل Metason120T می‌باشد. همچنین در این پژوهش، سورفکتانت و نانوذرات با نسبت ۱:۱ به روغن پایه افزوده شدند، نانوذرات بیوچار نیز با غلظت وزنی ۰/۵درصد وزنی، به روغن پایه افزوده شد که برای توزین نمونه‌ها از ترازوی دیجیتال آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم استفاده شد. برای بررسی پایداری استاتیکی نانو روان‌کارهای ساخته‌شده، هرکدام از مخلوط‌ها به‌صورت دیداری مورد بررسی قرار گرفتند. برای این منظور همه نمونه‌های ساخته‌شده درون ظروف شیشه‌ای کاملاً شفاف ریخته شده و برای مدت‌زمان ۳ ماه در یک محیط کاملاً ساکن نگهداری شدند و روند تغییرات ایجادشده در آن‌ها به‌صورت دوره‌ای و پیوسته مشاهده و ثبت گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که افزودن نانوذرات به روغن هیچ‌گونه تغییر حالتی در آن ایجاد نمی‌کند. از طرف دیگر با گذشت زمان هیچ‌گونه رسوب و تغییر فازی مشاهده نشد که بیانگر پایداری بسیار خوب این نانوسیال است.

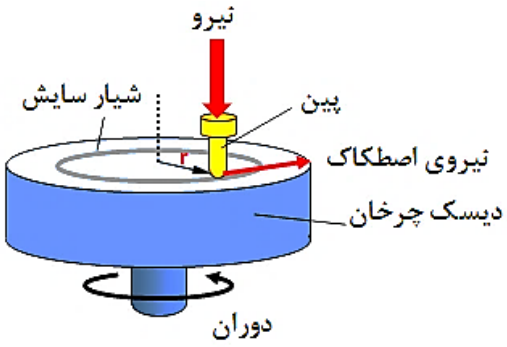
۲-۵- آزمون ضریب هدایت حرارتی

برای تعیین ضریب هدایت حرارتی، از یک دستگاه با نام تجاری KD2-Pro ساخت شرکت Devices Decagon از کشور آمریکا استفاده گردید. ضریب هدایت حرارتی سیالات به‌عنوان توانایی آن‌ها در انتقال گرما است. این دستگاه از روش منبع حرارت خط گذرا برای اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی استفاده می‌کند.

۲-۶- آزمون سایش پین روی دیسک

دستگاه آزمون سایش، با سنجش و ارزیابی مقاومت به سایش و محاسبه‌ی ضریب اصطکاک مواد و آلیاژها، عمر قطعات را در حین سرویس پیش‌بینی می‌نماید. این تجهیز آزمایشگاهی دارای قابلیت آزمون سایش از نوع پین روی دیسک می‌باشد، سایش و ضریب اصطکاک نمونه را در اثر تماس چرخشی بین پین و نمونه، در محیط‌های خشک، سیال روان‌کار و دمای بالا محاسبه و ذخیره می‌نماید. تجهیزات آن شامل یک دیسک گردان است که یک گلوله یا پین بر روی آن با نیروی مشخصی با نمونه تماس دارد (شکل ۱). آزمون سایش طبق استاندارد

ASTM G99 انجام می‌شود، مقدار سایش به عواملی چون مقدار نیروی اعمالی، مشخصات دستگاه آزمون، سرعت چرخش، فاصله‌ی چرخش، محیط و خواص ماده که متغیرهای سیستم هستند بستگی دارد. دستگاه به‌صورت کاملاً اتوماتیک عمل نموده و اندازه‌گیری پارامترهای دما، طول مسیر سایش، سرعت دیسک و نیروی وارده بر پین و مشاهده‌ی آن‌ها توسط رایانه صورت می‌گیرد. نیروی عمودی نیز به روش مکانیکی اعمال می‌شود. مشخصات فنی دستگاه نیز در جدول ۲ ذکر شده است.



شکل ۱ تصویر محل قرارگیری پین و نمونه سایش

جدول ۲ مشخصات فنی دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک و شرایط محیطی [۱۱]

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

مهم‌ترین عوامل مؤثر در این آزمایش نیروی عمود بر پین، سرعت خطی دیسک، زمان و مسافت طی شده سایش است. در این پژوهش نیروی عمودی وارد بر پین به‌صورت ثابت و مقدار ۶۰N، سرعت‌های خطی دیسک ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۳m/s و مسافت پیموده شده ۲۰۰۰m در نظر گرفته شد.

۲-۷- آزمون زبری سطح

برای اندازه‌گیری زبری از زبری‌سنج[1] تماسی استفاده شد. در این زبری‌سنج یک هد همانند سوزن‌های گرامافون بر روی سطح حرکت کرده و با توجه به تعداد نوسانات و حداکثر جابه‌جایی، زبری سطح را مشخص می‌کند. سوزن در حالی‌که بر روی سطح حرکت می‌کند، منطبق با زبری سطح، بالا و پایین می‌رود. این حرکات عمودی سوزن به‌وسیله‌ی یک مبدل الکتریکی به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل شده و تقویت می‌گردد. سیگنال‌ها باعث حرکت یک قلم بر روی کاغذ خواهد شد. نمودار رسم شده توسط قلم، نشان‌دهنده‌ی حرکات عمودی سوزن به‌صورت تابعی از مسافت طی شده در طول سطح خواهد بود. در این پژوهش از دستگاه زبری‌سنج مدل SJ-210 ساخت شرکت میتوتویو[2] از کشور ژاپن استفاده شد. دقت دستگاه تا ۰/۰۰۲µm و محدوده‌ی سرعت آن ۰/۷۵ mm/s -۰/۲۵ می‌باشد.

[1] Roughness Tester
[2] Mitutoyo

۲-۸- آزمون آنالیز عنصری

با انجام آنالیز روغن، عوامل مخرب در روان‌کار نمایان شده و تا اصلاح کامل آن، امکان کنترل و پیگیری موضوع را میسر می‌سازد. علاوه بر آن می‌توان منبع عیب را شناسایی و نسبت به رفع آن اقدامات لازم را انجام داد. از جنبه‌های مهم پایش وضعیت بر پایه‌ی آنالیز روغن بحث صرفه‌جویی اقتصادی است. درصورتی‌که آنالیز روغن به‌درستی اجرا شود نه تنها قادر به کاهش قابل‌توجه هزینه در بخش نگهداری و تعمیرات است؛ بلکه نقش مهمی نیز در افزایش تولید و یا خدمات خواهد داشت. از جمله پمپ‌های مورداستفاده در صنعت نفت و پتروشیمی، پمپ‌های گریز از مرکز ساخت کشور هلند با محرک توربین هستند. پمپ نشان داده شده در شکل ۲ با سرعت ۱۶۵۰ دور بر دقیقه و ظرفیت جابه‌جایی ۵۵۰۰ گالن در دقیقه کار می‌کند و از اهمیت بالایی برخوردار هستند. جهت جلوگیری از ایجاد فشار بیش از حد بر روی تکیه‌گاه‌ها، باید از روغن مناسب در سیستم خنک‌کاری آن استفاده شود. روغن مورداستفاده با ایجاد یک فیلم روغن بین تکیه‌گاه و محور، مانع از سایش و ایجاد اصطکاک می‌شود. تکیه‌گاه‌های دو طرف از نوع یاتاقان‌های لغزشی بوشی (دوتکه) با روکش بابیت هستند. یک حسگر دما حین کارکرد پمپ، حرارت یاتاقان را پایش می‌کند و با بالارفتن حرارت یاتاقان، محرک پمپ (توربین) را خاموش می‌کند که سبب اختلال و توقف تولید در کارخانه می‌شود. ایجاد حرارت می‌تواند به دلیل بالارفتن حرارت روغن و یا پایین آمدن کیفیت روغن باشد، به دلیل اینکه روغن هوزینگ را نمی‌توان حین کارکرد پمپ تعویض کرد؛ استفاده از روغن مناسب که تحمل دور، بار، حرارت و حفظ ویسکوزیته را داشته باشد و از نظر اقتصادی ارزان باشد بسیار حائز اهمیت است. استفاده از روغنی مناسب که در صورت ایجاد مشکل در سیستم خنک‌کاری یا نشتی هوزینگ بتواند با ضریب هدایت حرارتی مناسب از ایجاد اصطکاک بیش از حد بین تکیه‌گاه و محور پمپ تا رفع اشکال و برگشت به شرایط ایده‌آل جلوگیری کند، اهمیت دارد. با توجه به قیمت بالای قطعات این‌گونه پمپ‌ها، هزینه‌ی بالای تعمیرات، زمان‌بر بودن، از سرویس خارج بودن دستگاه جهت تعمیرات، استفاده از روغن مناسب، ضروری و دارای اهمیت است. پس از انجام کلیه‌ی آزمایش‌ها و مشخص‌شدن نتایج، بهترین نمونه‌ی روغن تعیین و در هوزینگ یاتاقان پمپ‌ها، مورداستفاده قرار گرفت. بدین منظور پس از ۹۶۰ ساعت کارکرد از آن نمونه‌گیری و آنالیز عنصری آن انجام می‌شود تا در عمل کیفیت آن مورد ارزیابی قرار گیرد. با آماده‌شدن مخلوط نانو روان‌کار ابتدا از هوزینگ که با روغن پایه معمولی کار کرده بود به‌دقت نمونه‌گیری می‌شود. برای اطمینان، در ابتدا بخشی از روغن تخلیه و از قسمت میانی روغن خروجی به حجم ۳۰۰cc نمونه‌گیری و سپس مخزن روغن و مسیرهای آن شستشو و مخلوط نانو روان‌کار به میزان ۵ لیتر تهیه و درون مخزن آن ریخته می‌شود، پس از ۹۶۰ ساعت کارکرد، مجدداً نمونه‌گیری‌های لازم با دقت انجام و جهت آزمون آنالیز عنصری به شرکت البرز تدبیر کاران ارسال و نتایج آن با روغن پایه، مقایسه و تحلیل می‌شود.

نمونه‌ای از خرابی تکیه‌گاه بر اثر افزایش دما

مقایسه دو تکیه‌گاه یاتاقان از نظر سایش
سمت راست: تأثیر نانوروان‌کار
سمت چپ : تأثیر روان‌کار پایه

آسیب دیدن شافت پمپ به‌دلیل تخریب کامل تکیه‌گاه در اثر عدم ایجاد فیلم روغن و تماس مستقیم با محورپمپ

شکل ۲ پمپ مورد استفاده جهت انجام آنالیز عنصری و نمونه‌ای از خرابی‌های ناشی از سایش در تکیه‌گاه‌های یاتاقان آن

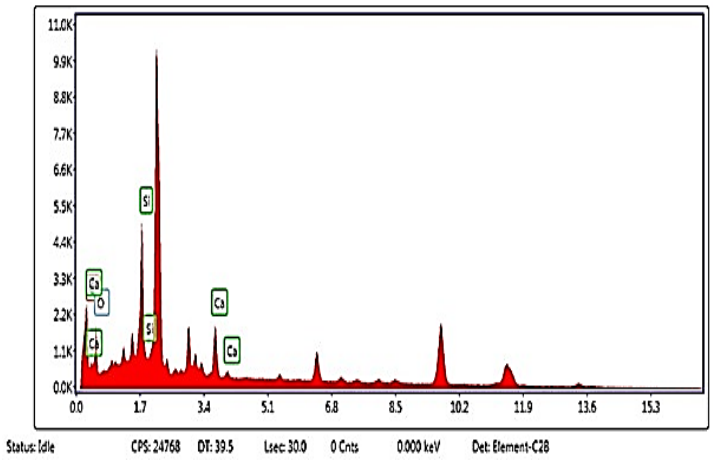
۳- نتایج و بحث

۳-۱- نانو ذرات تولیدی از زغال باگاس نیشکر

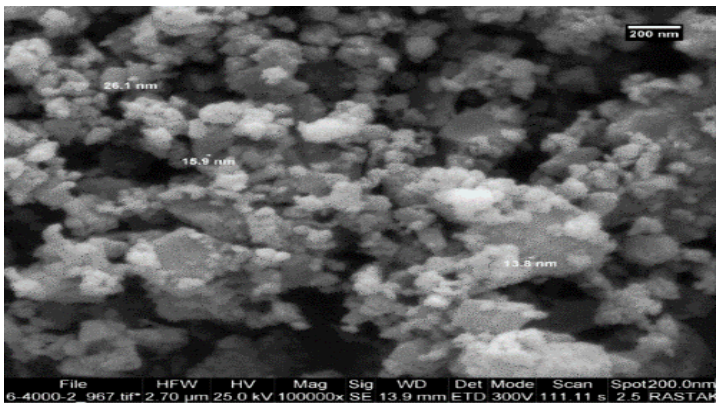
عناصر موجود در مخلوط نانوذرات تولیدی و میزان آن‌ها با استفاده از آنالیز EDS[1]، در جدول ۳ ذکر شده است. نتایج آنالیز EDS نشان‌دهنده‌ی عناصر کربن، اکسیژن، سیلیسیم و کلسیم است (شکل۳). بر اساس نتایج، پیک‌های اصلی مربوط به سیلیسیم و کربن می‌باشد. از سوی دیگر محصول فرایند آسیا کاری به دلیل افزایش سطح ویژه، به‌شدت تمایل به انجام واکنش با اتمسفر محیط را دارد، لذا وجود عنصر اکسیژن به دلیل مذکور به‌واسطه‌ی حمل و نقل و جابه‌جایی نمونه پودر در اتمسفر محیط قبل از آنالیز می‌باشد. تصویر مربوط به SEM پودر حاصل از فرایند آسیاکاری در شکل ۴ نشان داده شده است. نانوذرات تولیدشده دارای ابعاد کوچک و مناسبی هستند. در طول فرایند آسیاکاری، ذرات پودر به‌واسطه‌ی اعمال ضربه توسط گلوله‌های آسیاب، تحت تغییر فرم پلاستیسیته قرار می‌گیرند. این فرایند موجب انتقال جرم بین ذرات پودر شده و در نهایت موجب تشکیل ترکیبات جدید و نیز تغییر فاز ذرات پودر می‌گردد. بررسی نتایج XRD نیز تشکیل ترکیب‌های دی‌اکسید سیلیسیم (SiO_2) و کربنات کلسیم ($CaCo_3$) را نشان می‌دهد.

جدول ۳ عناصر موجود در پودر نانو ذرات حاصل از فرایند آسیا کاری به مدت ۸ ساعت

عنصر	٪ وزنی	٪ اتمی	Net Int.
کربن (C)	۲۹/۳۹	۴۰/۸۲	۲۴۸/۱۶
اکسیژن (O)	۴۲/۲۲	۴۴/۰۳	۴۶۰/۱۹
سیلیسیم (Si)	۱۸/۶۹	۱۱/۱۱	۱۴۴۲/۸۳
کلسیم (Ca)	۹/۷	۴/۰۴	۵۳۴/۰۱



شکل ۳ آنالیز EDS مربوط به پودر نانو ذرات حاصل از فرایند آسیا کاری به مدت ۸ ساعت



شکل ۴ تصویر SEM از نانو ذرات تولیدشده با مدت زمان ۸ ساعت با بزرگ‌نمایی ۱۰۰هزار برابر

[1] Energy Dispersive Spectroscopy

۳-۲- آزمون ضریب هدایت حرارتی

نتایج حاصل از این آزمون در جدول ۴ ذکرشده است. با توجه به نتایج حاصل، با ترکیب نانو ذرات بیوچار با روغن پایه ضریب هدایت حرارتی بیشتر می‌شود. این افزایش برای مخلوط نانو روان‌کار نسبت به روغن پایه حدود ٪۹/۱۶ می‌باشد. به دلیل بالا بودن سطح ویژه نانوذرات، فاصله‌ی ذرات در سیال کم می‌شود و امکان قرارگیری اتم‌ها در کنار هم و تشکیل ساختار خوشه‌ای فراهم می‌شود، این ساختار همانند یک مبدل لوله و پوسته عمل می‌کند که در آن نانو ذرات حکم لوله و سیال روان کار مثل پوسته تبادل حرارت می‌کنند و ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. بهبود ضریب هدایت حرارتی روان‌کار را می‌توان یک نکته‌ی مثبت در ارتباط با بهبود خواص روان‌کاری روغن پایه در نظر گرفت. این یافته با نتایج اسماعیل و همکاران[1] در سال ۲۰۲۳ هم‌خوانی دارد. آن‌ها در در پژوهشی تحت عنوان بهبود خواص حرارتی و تریبولوژیکی روان کننده PVE[2] اصلاح شده با افزودن نانوذرات SiO_2 و TiO_2 در سال ۲۰۲۳ اثر نانوذرات در روان‌کار پایه به‌کار رفته در کمپرسورهای سیستم تبرید را بررسی کردند. نتایج تأثیر مثبت هر دو نانوذرات در افزایش هدایت حرارتی را نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش غلظت نانوذرات، هدایت حرارتی افزایش می‌یابد [۱۲]. کبلینسکی[3]، ایستمن[4] و چوی[5] چهار عامل اصلی را در افزایش غیرعادی رسانش نانو سیال‌ها مؤثر می‌دانند که می‌توان با بررسی آن‌ها رفتار غیرعادی نانو سیال‌ها را توجیه کرد. ازجمله‌ی این موارد می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- حرکت براونی نانو ذرات
- نانو لایه‌های ایجادشده در مرز نانو ذرات و سیال پایه
- طبیعت انتقال گرما در نانو ذرات و بررسی انتقال فوتونی
- تأثیر خوشه شدن نانو ذرات [۱۲].

دمای بالای روغن می‌تواند سبب تسریع در میزان اکسیده شدن روغن‌پایه شود، به‌طوری‌که طبق معادلات آرینوس به ازای هر ۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش دمای کارکرد روغن، نرخ اکسیده شدن روغن دو برابر شده و سبب افزایش گران‌روی آن می‌گردد. از طرفی روغن پایه دارای مواد سبک و فراری است که در صورت بالا رفتن دما بیشتر از حد مجاز، تبخیر شده و سبب افزایش گران‌روی سیال می‌شود. بنابراین افزایش ضریب هدایت حرارتی روغن روان‌کار به‌منظور بالا بردن مقاومت آن در برابر افزایش دما، به‌عنوان یک پارامتر مهم در بهبود عملکرد آن می‌باشد. بهبود ضریب هدایت حرارتی روغن روان‌کار را می‌توان یک نکته‌ی مثبت در ارتباط با بهبود خواص روان‌کاری روغن پایه در نظر گرفت. این یافته با نتایج حاصل از پژوهش هادی و محمد [۱۴] در سال ۲۰۱۵ تطابق دارد. آن‌ها در پژوهش خود بهبود ضریب هدایت حرارتی نانو روان‌کارها با نانو ذرات گرافیت و اکسید روی را گزارش نمودند. البته تأثیر نانوذرات گرافیت نسبت به اکسید روی در بهبود ضریب هدایت حرارتی بیشتر می‌باشد.

جدول ۴ میزان ضریب انتقال حرارت هدایتی مخلوط‌های روان‌کار

ضریب هدایت حرارتی (K)	نوع روان‌کار
۰/۱۳۱ (w/m.k)	روغن پایه
۰/۱۴۳ (w/m.k)	نانو روان‌کار

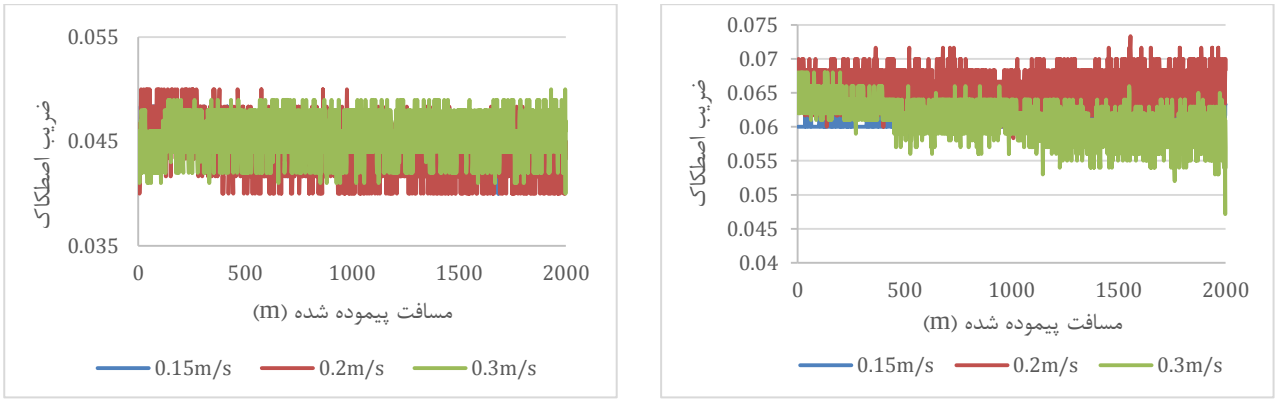
۳-۳- آزمون اصطکاک و سایش

۳-۳-۱- تأثیر سرعت‌های خطی پین بر تغییرات ضریب اصطکاک

در شکل‌های ۵-الف و ۵-ب به ترتیب تغییرات ضریب اصطکاک برحسب مسافت پیموده شده ۲۰۰۰ متر برای روغن پایه و مخلوط نانو روان‌کار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی در سرعت‌های خطی ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۳ m/s نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵-الف در سرعت خطی ۰/۱۵m/s محدوده‌ی تغییرات ضریب اصطکاک برای روغن پایه بین ۰/۰۶۵- ۰/۰۵۸ و میانگین این تغییرات ۰/۰۶ ثبت

[1] Ismail
[2] Polyvinyl Ether
[3] Keblinski
[4] Eastman
[5] Choi

شد. محدوده‌ی این تغییرات در سرعت خطی ۰/۲m/s بین ۰/۰۷۳- ۰/۰۵۸ و میانگین این تغییرات ۰/۰۶۵ و در سرعت خطی ۰/۳ m/s بین ۰/۰۶۸-۰/۰۵۲ و میانگین ۰/۰۶۱ می‌باشد. در شکل ۵-ب تغییرات ضریب اصطکاک برای نانو روان‌کار حاوی نانوذرات بیوچار در سرعت‌های خطی مذکور نشان داده شده است. در تمام سرعت‌های خطی محدوده‌ی تغییرات ضریب اصطکاک برای این نانو روان‌کار بین ۰/۰۵-۰/۰۴ و میانگین این تغییرات ۰/۰۴۴ ثبت شد. با مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده مشخص شد عملکرد نانو روان‌کار حاوی نانو ذرات، مثبت است، به‌گونه‌ای که میزان کاهش ضریب اصطکاک آن نسبت به روغن پایه در سرعت‌های خطی ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۳ m/s به ترتیب ۲۶/۶۷، ۳۲/۳ و ۲۷/۸۷٪ می‌باشد و بیانگر نقش مثبت نانو ذرات جهت بهبود ضریب اصطکاک بین سطوح لغزشی درگیر باهم می‌باشد.



(الف) سیال پایه (ب) نانو سیال

شکل ۵ نمودار تغییرات ضریب اصطکاک در نیروی عمودی ۶۰N وارد بر پین و سرعت‌های خطی ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۳ m/s

نانو ذرات با پوشاندن سطوح زبر و پر کردن خلل و فرج سطوح لغزشی، لایه‌ی محافظی بین دو سطح ایجاد می‌کند که سبب کاهش اصطکاک بین سطوح می‌شود. این یافته با نتایج تاپلیال و همکاران [۱۵] هم‌خوانی دارد. آن‌ها در سال ۲۰۲۳ در پژوهش خود تحت عنوان ارزیابی تجربی رفتار رئولوژیکی و تریبولوژیکی نانوسیالات، از روغن موتور SAE 5W40 به‌عنوان سیال پایه و برای تهیه نانو سیالات از نانوذرات مس و MoS_2 با غلظت وزنی ۰/۱ و ۰/۲ درصد استفاده کردند. نتایج آزمون اصطکاک نشان می‌دهد برای نانو سیال با غلظت وزنی ۰/۲ درصد از مس و MoS_2 میزان کاهش اصطکاک در مقایسه با سیال پایه به ترتیب ۶٪ و ۴٪ می‌باشد. همچنین این یافته با گزارش رشید [۱۶] مطابقت دارد؛ او در پژوهش خود تحت عنوان بررسی عملکرد نانو روان‌کار از نظر انتقال حرارت و خواص تریبولوژیکی در یک موتور اشتعال تراکمی که از نانوذرات گرافن با اندازه‌ی ۶۰ نانومتر و غلظت ۰/۰۱ درصد وزنی استفاده نمود، کاهش ۲۱٪ ضریب اصطکاک و ۲۳٪ ضریب هدایت حرارتی را گزارش نمود.

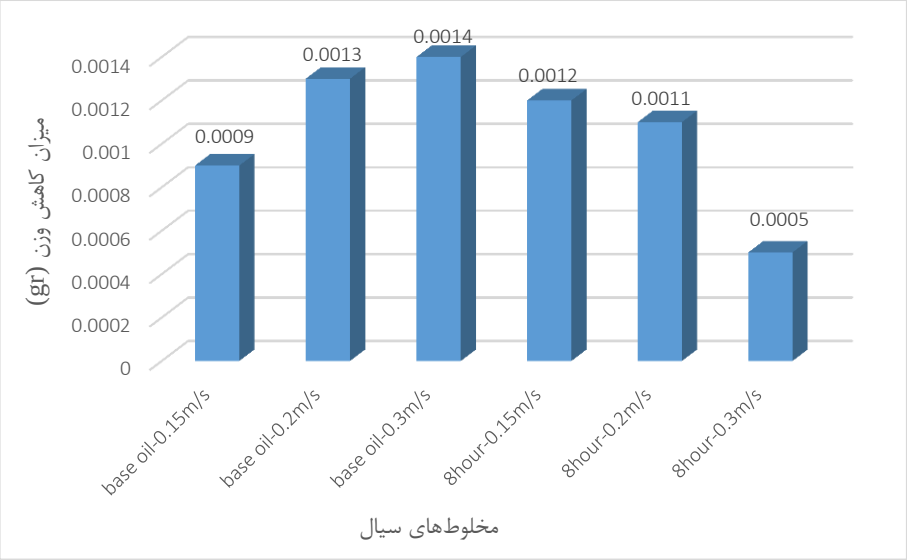
۳-۳-۲- کاهش وزن دیسک‌ها

نتایج تغییرات کاهش وزن دیسک‌های مورداستفاده در آزمون سایش برای روغن پایه و مخلوط نانو روان‌کار در سرعت‌های خطی ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۳ m/s نشان داد که کم‌ترین میزان سایش دیسک‌ها مربوط به نانو روان‌کار و بیشترین میزان سایش دیسک‌ها نیز مربوط به روغن پایه در سرعت خطی ۰/۳ m/s است (شکل ۶). بنابراین می‌توان ادعا کرد که کاربرد نانوذرات بیوچار در روان‌کار به‌عنوان افزودنی می‌تواند خاصیت ضد سایشی آن‌ها را بهبود ببخشد. این یافته با نتایج حاصل از پژوهش احمدعلی و همکاران [۱۷] مطابقت دارد. آن‌ها در پژوهش خود گزارش نمودند؛ استفاده از نانوذرات تیتانیوم دی اکسید و آلومینیم دی اکسید در روان‌کار در مقایسه با روغن پایه، میزان سایش را به ترتیب ۲۱٪ و ۲۹٪ کاهش می‌دهد.

طبق نظر (لی و همکاران [۱۸] بهبود خواص فشار پذیری و ضد سایشی نانو روان‌کارها ناشی از سه اثر نانوذرات می‌باشد که عبارت‌اند از:

- ذرات نانو همانند غلتک‌هایی بین دوسطح اصطکاکی عمل نموده و تماس بین دوسطح را کاهش می‌دهد.
- ذرات نانو با پوشاندن سطوح زبر، لایه‌ی محافظی بین سطوح ایجاد می‌کند.

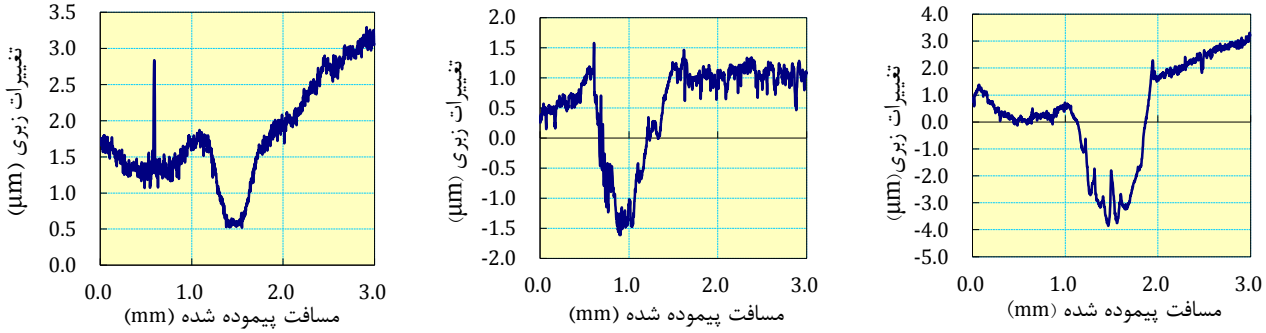
ذرات نانو اضافه‌شده به روغن اثر مرمتی دارد؛ به‌گونه‌ای که با پر کردن خلل و فرج و خراشیدگی‌ها جرم ازدست‌رفته را جبران می‌کند و زبری سطوح را کاهش می‌دهد.



شکل ۶ کاهش وزن دیسک‌ها

۳-۴- نتایج آزمون زبری سطوح سایشی

زبری نقش مهمی در تعیین اثر متقابل اشیاء باهم دارد و با دانستن آن بسیاری از رفتارهای اجزای مکانیکی قابل پیش‌بینی خواهد بود. اگر سطوح قطعات که توسط فرایندهای مختلف تولید می‌شوند کاملاً صاف نباشد، درگیری قطعات با یکدیگر در نقاط خاصی صورت می‌گیرد و تنش‌های زیادی در آن قسمت‌ها ایجاد می‌کند که موجب تغییر شکل پلاستیکی و ایجاد اتصالات موضعی می‌شود. آزمون تعیین زبری در مسافتی به طول ۳ mm بر روی دیسک‌های سایشی انجام شد. تغییرات زبری سطح سایشی با روغن پایه به ترتیب در سرعت‌های خطی ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۳ m/s تحت نیروی عمودی ۶۰N وارد بر پین در شکل ۷ نشان داده شده است.



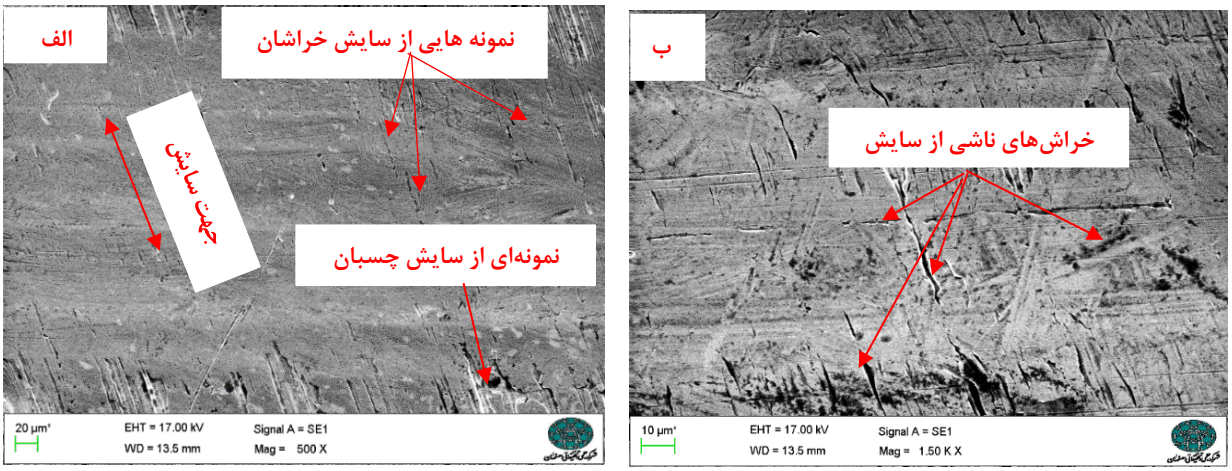
الف) تحت نیروی ۶۰N و سرعت خطی ۰/۱۵ m/s **ب)** تحت نیروی ۶۰N و سرعت خطی ۰/۲ m/s **ج)** تحت نیروی ۶۰N و سرعت خطی ۰/۳ m/s

شکل ۷ نمودار تغییرات زبری سطح سایشی با روغن پایه

با توجه به نتایج حاصل، میانگین بلندترین ارتفاع زبری (Rz) به ترتیب ۲/۶۵۴، ۱/۶۵۶ و ۱/۳۲۸ میکرومتر می‌باشد. با بررسی سطح سایشی، نمونه‌هایی از سایش خراشانی[1] و سایش چسبان[2] مشاهده می‌شود. سایش خراشان هنگام حرکت پین به‌عنوان جسم ساینده

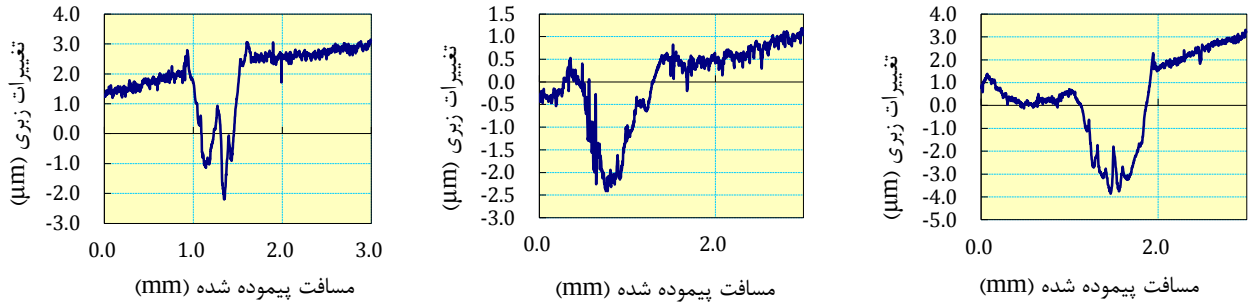
[1] Abrasive Wear
[2] Adhesive Wear

روی دیسک به وجود می‌آید. در این سایش خراش روی سطح ایجاد می‌شود و هنگامی اتفاق می‌افتد که یک سطح سخت و زبر در برابر یک سطح نرم‌تر حرکت لغزشی داشته باشد، در آن فرورفتگی و شیار ایجاد می‌شود که نتیجه‌ی آن کاهش وزن در نمونه نرم می‌باشد. آسیب واردشده به سطح آشکار است و می‌توان در شکل ۸ مشاهده کرد. نمونه‌هایی از سایش چسبان نیز با شدت کم بر روی سطح سایشی دیده می‌شود. اگر سطوح قطعات که توسط فرایندهای مختلف تولید می‌شوند کاملاً صاف نباشد درگیری قطعات با یکدیگر در نقاط خاصی صورت می‌گیرد و تنش‌های زیادی در آن قسمت‌ها ایجاد می‌کند که موجب تغییر شکل پلاستیکی و ایجاد اتصالات موضعی می‌شود. این سایش موقعی رخ می‌دهد که لغزش موضعی بین دو سطح درگیر موجب گسیختگی اتصال و نهایتاً انتقال ماده از یک سطح به سطح دیگر شود و سطح ماده به‌صورت پوسته‌پوسته جدا می‌شود.



شکل ۸ سطح سایشی با روغن پایه الف) با بزرگ‌نمایی ۵۰۰ برابر ب) با بزرگ‌نمایی ۱۵۰۰ برابر

میزان زبری برای سطح سایشی آغشته به نانو روغن در سرعت‌های خطی ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۳ m/s مطابق با شکل ۹ به ترتیب ۲/۶۵۴، ۱/۴۰۷ و ۱/۵۶۱ میکرومتر حاصل شد. بر اساس نتایج در سرعت خطی ۰/۱۵ m/s میانگین تغییرات زبری مخلوط نانو روان‌کار با روغن پایه یکسان بود. در سرعت خطی ۰/۲ m/s بهترین عملکرد، مربوط مخلوط نانو روان‌کار بود، به‌گونه‌ای که میانگین تغییرات زبری آن در مقایسه با روغن پایه ۱۵/۰۳٪ کمتر شد؛ اما در سرعت خطی ۰/۳ m/s، میانگین تغییرات زبری مخلوط نانو روان‌کار در مقایسه با روغن پایه ۱۷/۵۴٪ بیشتر شد.

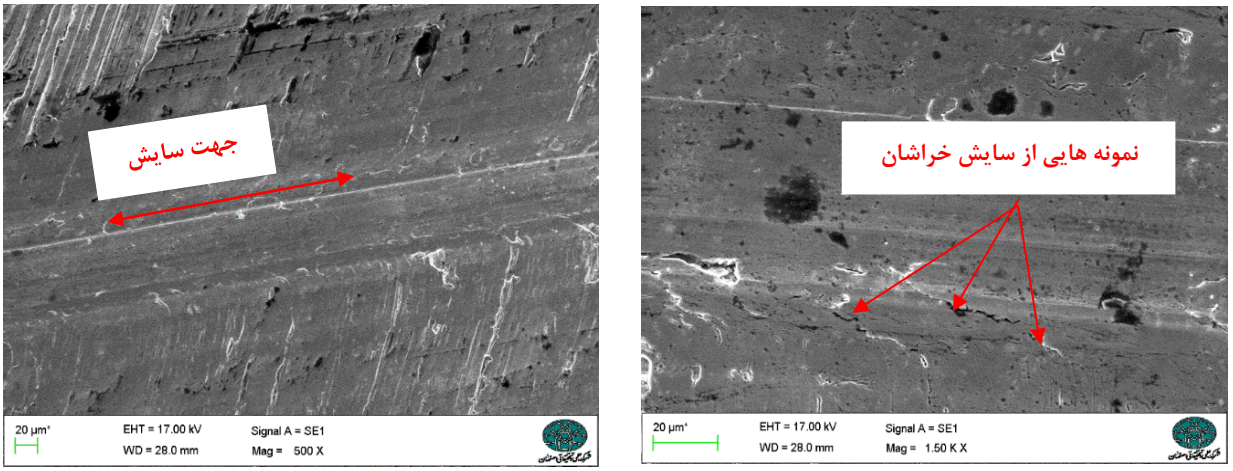


الف) تحت نیروی ۶۰N و سرعت خطی ۰/۱۵ m/s **ب)** تحت نیروی ۶۰N و سرعت خطی ۰/۲ m/s **ج)** تحت نیروی ۶۰N و سرعت خطی ۰/۳ m/s

شکل ۹ نمودار تغییرات زبری سطح سایشی با نانو روغن

با بررسی سطح سایش نمونه دیسک با نانو روغن (شکل ۱۰)، سطح سایشی در مقایسه با روغن پایه آسیب کم‌تری داشته است. در سطح سایش تنها نشانه‌هایی از آسیب خراشان مشاهده شد. نتایج نشان می‌دهد، نانوذرات بیوچار در ترکیب با روغن کاهش سایش سطح و آسیب‌های وارده را به دنبال دارد. این یافته با نتایج پژوهش اینگول و همکاران [۱۹] مطابقت دارد. آن‌ها نیز در پژوهش خود به

این نتیجه رسیدند که کاربرد نانوذرات تیتانیوم دی اکسید در روان‌کار می‌تواند نوسان تغییرات ضریب اصطکاک در طول آزمون را کاهش دهد، همچنین با افزایش غلظت نانو ذرات به‌عنوان افزودنی به روغن پایه، سایش سطح کاهش یابد. در نمونه‌هایی که از تیتانیوم دی‌اکسید استفاده شد، سایش از نوع خراشان سبک و سایش چسبان کم بود. نتایج پژوهش سینق و بهومیک [۲۰] نیز کاهش میزان زبری سطح سایش هنگام کاربرد نانولوله‌های کربنی چند دیواره به‌عنوان ماده افزودنی در ترکیب با روغن را نشان می‌دهد. همچنین نتایج حاصل با یافته‌های لینرا دل ریو و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۲۳ که در پژوهش خود، رفتار تریبولوژیکی و رئولوژیکی نانو روان‌کارهای هیبریدی برای کاربرد در موتورهای احتراق داخلی را به‌صورت تجربی بررسی کردند، مطابقت دارد. آن‌ها اثر نانوذرات اکسید منیزیم (MgO) در ترکیب با روغن موتور SAE 10W-40 و دو مایع یونی (IL_1 و IL_3) مختلف بر پایه فسفونیوم را بررسی نمودند. نتایج آزمون اصطکاک با جفت صفحات لغزشی فولاد-فولاد برای نانو روان‌کار هیبریدی بر پایه IL_3، ضریب اصطکاک و حجم سایش را به ترتیب ۷ و ۵۹ درصد در مقایسه با روغن پایه SAE 10W-40 کاهش داد. جالب توجه است، مشخصه‌های ترموفیزیکی توسط آزمون رئولوژی نشان داد که افزودن نانوذرات و مایعات یونی نه بر ویسکوزیته و نه بر رفتار نیوتنی روغن موتور تأثیری نمی‌گذارد و امکان استفاده از آن‌ها را در موتورهای احتراق داخلی فراهم می‌کند.



شکل ۱۰ سطح سایشی با نانو روغن حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانو ذرات الف) با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر ب) با بزرگنمایی ۱۵۰۰ برابر

بر اساس آزمون‌های انجام‌شده (شامل ضریب اصطکاک، ضریب هدایت حرارتی و میزان سایش) و نتایج حاصل برای دو نمونه روغن، مشخص شد نانو روان‌کار حاوی نانو ذرات بیوچار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی دارای بهترین نتایج است؛ به همین خاطر در مرحله‌ی پایانی پژوهش (آزمون آنالیز عنصری) از این مخلوط نانو روان‌کار جهت بررسی عملکرد میدانی آن استفاده می‌شود.

۳-۵- آزمون آنالیز عنصری

به‌منظور بررسی میدانی نقش نانوذرات بیوچار در ترکیب با روغن، ۵ لیتر از این روغن با نانو ذرات با غلظت ۰/۵ درصد وزنی ترکیب و در هوزینگ یاتاقان پمپ‌ها استفاده شد. در شرایط طبیعی، سایش به آهستگی صورت می‌گیرد و مقدار عناصر سایشی در روغن به‌طور پیوسته و آرام و با افزایش زمان کارکرد روغن زیاد می‌شود. نمونه‌گیری‌های منظم و متوالی و ارزیابی مقدار عناصر فرسایشی این نمونه‌ها، تغییرات غیرمتعادل را مشخص خواهد کرد و از این طریق می‌توان به علل احتمالی آن پی برد. عناصر فلزی سایشی و عناصر آلاینده‌ها ممکن است از اجزای مختلفی به وجود آیند. نتایج آنالیز عنصری روغن پایه و مخلوط نانو روان‌کار زیستی به کار رفته در هوزینگ یاتاقان پمپ‌ها نشان داد، میزان عناصر فرسایشی آهن، کروم، آلومینیم، قلع، مس و سرب مربوط به مخلوط نانو روان‌کار زیستی در مقایسه با روغن معمول کاهش یافته است. با توجه به نتایج خوب حاصل از آزمون سایش و اصطکاک مربوط به مخلوط نانو روان‌کار با غلظت ۰/۵ درصد وزنی، کاهش این عناصر فرسایشی در مخلوط نانو روان‌کار زیستی قابل انتظار بود. تحلیل نتایج با دید باز و بررسی تمام پارامترهای تأثیرگذار بر روی نتایج آنالیز روغن، اعم از تعویض روغن‌های احتمالی، ساعات کارکرد روغن و نحوه‌ی نمونه‌گیری می‌بایست مدنظر قرار بگیرد تا درک و نتیجه‌گیری بهتر و در نهایت تنظیم دستور کار صحیح که در واقع خروجی و هدف هرگونه آنالیز روغن است به‌درستی حاصل گردد.

۴-نتیجه‌گیری

تصاویر SEM و XRD مربوط به پودر نانوذرات تولیدشده با روش آسیای مکانیکی در سرعت ۳۰۰ rpm و مدت‌زمان ۸ ساعت نشان داد ابعاد نانو ذرات تولیدشده زیر ۱۰۰ نانومتر هستند و کاربرد آن‌ها در ترکیب با روغن جهت بررسی خواص تریبولوژیکی آن مناسب است. ترکیب نانو ذرات بیوچار با روغن پایه سبب افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شود. بر اساس آزمون‌های انجام‌شده (شامل ضریب اصطکاک، ضریب هدایت حرارتی، میزان سایش) و نتایج حاصل برای دو نمونه روغن، مشخص شد مخلوط نانو روان‌کار دارای بهترین نتایج است. این نتایج گویای این مطلب است که وجود نانو ذرات در ترکیب با روغن پایه نتیجه مثبتی در بهبود خواص ضد سایشی دارد. نتایج آنالیز عنصری نیز نشان می‌دهد عناصر فرسایشی مربوط به مخلوط نانو روان‌کار زیستی در مقایسه با روغن معمول کاهش دارد؛ به‌عبارتی کاربرد این نانو ذرات در ترکیب با روغن مورد استفاده در هوزینگ یاتاقان پمپ‌های صنایع پتروشیمی تأثیر مثبتی دارد.

References

[1] Laad M, Ponnamma D, Sadasivuni KK. Tribological Studies of Nanomodified Mineral based Multi-grade Engine Oil. International Journal of Applied Engineering Research. 2017;12(11):2855-61.

[2] Sanukrishna SS, Vishnu S, Krishnakumar TS, Prakash MJ. Effect of oxide nanoparticles on the thermal, rheological and tribological behaviours of refrigerant compressor oil: An experimental investigation. International Journal of Refrigeration. 2018 Jun 1;90:32-45. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2018.04.006

[3] Su Y, Tang Z, Wang G, Wan R. Influence of carbon nanotube on the tribological properties of vegetable-based oil. Advances in Mechanical Engineering. 2018 May;10(5):1687814018778188. doi: 10.1177/1687814018778188

[4] Singh Y, Chaudhary V, Pal V. Friction and wear characteristics of the castor oil with TiO2 as an additives. Materials Today: Proceedings. 2020 Jan 1;26:2972-6. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.612

[5] Saba F, Zhang F, Liu S, Liu T. Tribological properties, thermal conductivity and corrosion resistance of titanium/nanodiamond nanocomposites. Composites Communications. 2018 Dec 1;10:57-63. doi :10.1016/j.coco.2018.06.008

[6] Chaurasia SK, Singh NK, Singh LK. Friction and wear behavior of chemically modified Sal (Shorea Robusta) oil for bio based lubricant application with effect of CuO nanoparticles. fuel. 2020 Dec 15;282:118762. doi :10.1016/j.fuel.2020.118762

[7] Ghorbani M, Ebrahimnezhad-Khaljiri H, Eslami-Farsani R, Vafaeenezhad H. The synergic effect of microcapsules and titanium nanoparticles on the self-healing and self-lubricating epoxy coatings: A dual smart application. Surfaces and Interfaces. 2021 Apr 1;23:100998. doi :10.1016/j.surfin.2021.100998

[8] Alqahtani B, Hoziefa W, Abdel Moneam HM, Hamoud M, Salunkhe S, Elshalakany AB, Abdel-Mottaleb M, Davim JP. Tribological performance and rheological properties of engine oil with graphene nano-additives. Lubricants. 2022 Jun 29;10(7):137. doi :10.3390/lubricants10070137

[9] Lee J, Cho S, Hwang Y, Lee C, Kim SH. Enhancement of lubrication properties of nano-oil by controlling the amount of fullerene nanoparticle additives. Tribology Letters. 2007 Nov;28:203-8.

[10] http://www.behran oil.com/fa/product/2303-HP.html, 2022.

[11] Wear Testing Machine Catalog, Nasr Sanat Tajh Co., Isfahan, Isfahan University of Technology, Technology Units Development Center, www. tsnco.ir

[12] Ismail MF, Azmi WH, Mamat R, Ali HM. Thermal and tribological properties enhancement of PVE lubricant modified with SiO2 and TiO2 nanoparticles additive. Nanomaterials. 2022 Dec 22;13(1):42. doi :10.3390/nano13010042

[13] Hamidi AA, Amrollahi A, Rashidi AM, Hosseini SM, Moghadassi AR. Investigation of nanofluids thermal conductivity modeling; Iranian Chemical Engineering Journal. 2009;8(40). [In Persian]

[14] Hadi NJ, Mohamed DJ. The effect of nanoparticles on the flow and physical behavior of engine lubricant oil (Doctoral dissertation, Thesis. Collage of Materials Engineering/Polymer and Petrochemical Industry Department Babylon University/Iraq). 2015.

[15] Thapliyal P, Kumar A, Thakre GD. Rheological and tribological behaviour of nanofluids: an experimental evaluation. InJournal of Physics: Conference Series 2023 Oct 1 (Vol. 2603, No. 1, p. 012005). IOP Publishing. doi: 10.1088/1742-6596/2603/1/012005

[16] Rasheed AK. Heat transfer, tribology and performance of graphene nanolubricants in an IC engine (Doctoral dissertation, University of Nottingham). 2017.

[17] Ali MK, Xianjun H, Mai L, Qingping C, Turkson RF, Bicheng C. Improving the tribological characteristics of piston ring assembly in automotive engines using Al2O3 and TiO2 nanomaterials as nano-lubricant additives. Tribology International. 2016 Nov 1;103:540-54. doi: 10.1016/j.triboint.2016.08.011

[18] Lee CG, Hwang YJ, Choi YM, Lee JK, Choi C, Oh JM. A study on the tribological characteristics of graphite nano lubricants. International journal of precision engineering and manufacturing. 2009 Jan;10:85-90.
[19] Ingole S, Charanpahari A, Kakade A, Umare SS, Bhatt DV, Menghani J. Tribological behavior of nano TiO2 as an additive in base oil. Wear. 2013 Apr 1;301(1-2):776-85. doi: 10.1016/j.wear.2013.01.037
[20] Singh H, Bhowmick H. Lubricated tribology of hybrid AMMC–steel sliding contact: A comparative investigation between fully formulated commercial engine oils and surfactant functionalized MWCNT–base oil formulation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2021 Feb;235(2):315-28. doi: 10.1177/1350650119901221
[21] del Río JM, Rial R, Nasser K, Guimarey MJ. Experimental investigation of tribological and rheological behaviour of hybrid nanolubricants for applications in internal combustion engines. Tribology Letters. 2023 Mar;71(1):25. doi: 10.1007/s11249-023-01697-5