

## فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

تأثیر نانو ذرات سرامیکی سیلیسیم کاربید بر خواص تریبولوژیکی روغن پایه پارافینیک SN500HVI

میثم مکاریان<sup>۱</sup>، الهام عامری<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرضا، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرضا، ایران.

\* ameri@iaush.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۲	نانوذره سرامیکی سیلیسیم کاربید (SiC) در روغن پایه به منظور بررسی خواص اصطکاک و سایش در مبحث تریبولوژیکی مورد بررسی قرار گرفت. نانو ذرات در درصدهای وزنی ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۱ و ۵ به روغن پایه اضافه شد. جهت افزایش پایداری نانوذره SiC در روغن پایه از اولئیک اسید جهت اصلاح سطح استفاده شد و برای مشخصه یابی از دستگاه‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)، پراش پرتو ایکس (XRD) و طیف‌سنج مادون‌قرمز با تبدیل فوریه (FTIR) استفاده شد. این بررسی برای روغن پایه SN500HVI از شرکت نفت سپاهان ایران انجام شد. آزمون‌های سایش و اصطکاک روی مخلوط نانوذره و روغن SN500HVI صورت پذیرفت. اثرات تریبولوژیکی روغن پایه/ نانوذره با استفاده از آزمون آزمایشگاهی بین روی دیسک مطابق با روش استاندارد آزمون ASTM G99 بررسی شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از XRD میانگین اندازه نانو ذرات اصلاح سطح شده کمتر از ۳۰ نانومتر به دست آمد. مخلوط روغن پایه/ نانوذره با غلظت‌های ۰٫۲۵، ۰٫۵ و ۱ درصد وزنی به ترتیب موجب کاهش ۲۶٪، ۱۵٪ و ۴٪ در ضریب اصطکاک شد. این رفتار تریبولوژیکی ناشی از نشستن و چسبیدن نانو ذرات روی سطوح درگیر سایش می‌باشد. همچنین توپوگرافی سطوح فرسایش یافته با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) آنالیز شد. نتایج نشان دادند که نانوذره SiC با توجه به مناسب بودن خواص فیزیکی همچون سختی مناسب، شکل کروی و سطح ویژه بالا می‌تواند افزودنی مؤثری جهت بالا بردن کیفیت روغن روانکار در بحث کاهش اصطکاک و سایش به شمار آید.
کلید واژگان: نانوذره سرامیک سیلیسیم کاربید تریبولوژی روغن روانکار	

### The Effect of Silicon Carbide Ceramic Nanoparticles on the Tribological Properties of SN500HVI Paraffinic Base Oil

Meisam Makkarian<sup>1</sup>, Elham Ameri<sup>2\*</sup>

1- Department of Chemical Engineering, Shahreza Branch, Islamic Azad University, P.O. Box 311-86145, Shahreza, Iran,

\* ameri@iaush.ac.ir

#### Article Information

Original Research Paper

Dor:

20.1001.1.24233226.1401.16.1.3.0

#### Keywords:

Nanoparticle

Ceramic

Silicon Carbide

Tribology

Lubricant Oil

#### Abstract

The effect of silicon carbide (SiC) nanoparticles on the tribological properties of the base oil was investigated by friction and wear tests. SiC nanoparticles were synthesized by sol-gel method and added to the base oil at various weight percentages of (0.25, 0.5, 1 and 5). To increase the stability of SiC nanoparticles in the base oil, the surface was modified using oleic acid. To characterize the morphology of SiC nanoparticles, the FT-IR, FESEM and XRD techniques were applied. This investigation was carried out in the base oil SN500HVI from Sepahan Oil Company, Iran. The friction and wear tests were performed on the mixture of SN500HVI/nanoparticles. The tribological properties of nanoparticles in base oil were investigated using pin on disc test according to ASTM G99 test method. Based on the results obtained by XRD, the average size of SiC was known to be less than 30 nm. The mixture of nanoparticles in base oil with concentrations of 0.25, 0.5 and 1 wt.% led to reduction of friction coefficient by 26%, 15%, and 4%, in comparison to pure base oil, respectively. This tribological behavior was due to adhesiveness of nanoparticles on involving surfaces. Furthermore, the topography of worn surfaces was analyzed using FESEM. The results illustrated that the nanoparticles can be an effective additives to improve the quality of lubricants in terms of reducing the friction and wear due to their proper physical properties such as suitable hardness, spherical shape and high specific surface area.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Meisam Makkarian, Elham Ameri, The Effect of Silicon Carbide Ceramic Nanoparticles on the Tribological Properties of SN500HVI Paraffinic Base Oil, New Process in Material Engineering, 2022, 16(1), 27-41.

## ۱- مقدمه

روغن‌ها رایج‌ترین روان کننده‌ها در کاربردهای صنعتی و تجهیزات مکانیکی جهت بهبود خواص سایش و اصطکاک هستند. امروزه کلیه روانکارها با پایه معدنی و سنتزی، برای داشتن کارآیی مفید، نیازمند افزودنی‌هایی هستند که بتوانند خواص تریبولوژیکی روغن همچون خواص ضد سایش، ظرفیت تحمل بار، فشارپذیری و کاهش اصطکاک را تحت شرایط مرزی کنترل نمایند، از این رو افزودنی‌های تحمل فشار شدید و ضد سایش معمولاً برای بهبود عملکرد خواص تریبولوژی روانکار استفاده می‌شوند [۱]. این افزودنی‌ها دارای ترکیبات مختلف هستند، به طور مثال ترکیبات حاوی گوگرد و فسفر به عنوان افزودنی‌هایی هستند که از گذشته تا به امروز برای پوشاندن سطوح فلزها استفاده شده‌اند، زیرا با تشکیل لایه‌هایی روی سطوح برش خورده فلزات مانع از سایش و تنش شدید می‌شوند [۲]. با این حال، استفاده از ترکیبات حاوی فسفر و گوگرد محدودیت‌هایی جهت کنترل مقدار سولفات و فسفر پایین (SAPS) در روانکارهای مدرن دارد [۳]. پژوهش‌ها حاکی از آن است که افزودن ذرات جامد به روغن نیز می‌تواند میزان سایش و اصطکاک را بین دو سطح درگیر کاهش دهد. مشکل استفاده از ذرات جامد این است که این مواد غالباً به راحتی اکسید و رسوب شده و باعث انسداد خطوط انتقال می‌شوند [۴]. استفاده از نانو ذرات با خواص فیزیکی و شیمیایی بالا یکی از روش‌های بهبود خواص تریبولوژیکی روغن می‌باشد که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. نانو ذرات با مواد جامد معمولی متفاوت‌اند زیرا غالباً خصوصیات ویژه‌ای همچون نقطه ذوب کم، چگالی کم، اندازه بسیار کوچک و سطح ویژه زیاد دارند. مطالعات جدید نشان می‌دهد که در مقایسه با مواد ضد سایش و ضد اصطکاک قدیمی، بسیاری از نانو ذرات معدنی مانند فلزها [۵-۶]، سولفید فلزها [۷] و اکسیدهای فلزی [۸-۹] با محیط‌زیست سازگارتر بوده و باعث حفظ کیفیت و کارایی بیشتر روغن موتورها در کیلومترهای بالا می‌شود.

یکی از معایب استفاده از نانو ذرات معدنی این است که در بسیاری از مواد به راحتی جمع می‌شوند و پراکندگی ضعیفی در حلال‌های آلی و روغن دارند، لذا کاربرد و کارایی بسیاری از آن‌ها کاملاً محدود است. البته مشکل پراکندگی می‌تواند با استفاده از برخی روش‌های فیزیکی و شیمیایی حل شود [۱۰]. برخی نانو ذرات در روانکارها، جهت ترمیم خوردگی و یا تشکیل لایه تریوفیلیم مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۱]. برخی دیگر همچون نانو ذرات اکسید فلزی با قرار گرفتن روی سطوح سایش روند تماس فلز به فلز را کاهش داده و فیلم مقابله با بار ایجاد می‌کند. به طور خلاصه می‌توان سازوکار کاهش اصطکاک و کاهش سایش نانو ذرات را در اثر کلوئیدی آن‌ها، اثر چرخشی و تشکیل فیلم محافظ دانست [۱۲-۱۴]. استفاده از نانو ذرات، بدون اختلاط با روغن برای سلامتی انسان خطرناک است، زیرا نانو ذرات با محصولات ناشی از سوخت در هوا پراکنده می‌شوند. با این حال، با مخلوط کردن نانوذره با روغن روان کننده، نانو ذرات به سختی به عنوان نانو ذرات حاصل از احتراق در هوا پراکنده می‌شوند [۱۵]. پژوهش‌های بسیاری جهت بررسی خواص تریبولوژیکی نانو ذرات در روانکارها صورت گرفته است.

در سال ۲۰۲۱ اثر تریبولوژیکی نانو ذرات SiC در روغن سبوس برنج توسط آنانانان دسامپی و همکاران بررسی شد [۱۶]. در این پژوهش نانو ذرات سرامیکی SiC در غلظت بهینه ۰/۰۳ درصد وزنی به روغن سبوس برنج اضافه شدند که باعث کاهش ضریب اصطکاک روغن از ۰/۰۹ به ۰/۰۷۶ شدند. باتز و همکاران نیز خواص تریبولوژیکی نانوذره CuO در روغن پلی آلفا اولفین را بررسی نمودند. نتایج به دست آمده با استفاده از آزمون حلقه نشان از اثربخشی نانو ذرات CuO و کاهش ۲۰ درصدی ضریب اصطکاک روغن بود [۱۷]. لیجوان چن و دینگکی ژو به بررسی خواص تریبولوژیکی نانوذره CuS اصلاح سطح شده با اولئیک اسید در روغن پارافینیک پرداختند. نتایج حاصل از آزمون پین روی دیسک نشان داد در غلظت بهینه ۰/۵ درصد وزنی از نانوذره، ضریب اصطکاک روغن

مواد استفاده شده جهت اصلاح سطح نانوذره نیز از شرکت مرک آلمان تهیه شد.

### ۱-۲- روغن پایه

روغن پایه SN500HVI (High Viscosity Index) استفاده شده نمونه‌ای از روغن پایه‌های پارافینیک و از پرکاربردترین روغن‌های تولیدشده در شرکت نفت سپاهان ایران می‌باشد. این روغن پایه پس از استخراج با حلال از واحد موم‌گیری به دست می‌آید و جز روغن‌های گروه یک محسوب می‌شود. از مزایای این روغن پایه، پایداری اکسیداسیون و فراریت کم آن است. برخی از ویژگی‌های این روغن پایه در جدول ۱ آورده شده است.

پارافینیک تا ۶۲ درصد کاهش یافته است [۱۸]. همچنین ویژگی‌های ظرفیت اعمال بار و توزیع فشار نانو ذرات SiC در روانکارها توسط سری‌ها رشا و همکاران مطالعه شد که این ویژگی‌ها برای روانکار حاوی نانو ذرات در مقایسه با روان کننده بدون نانوذره بهبود یافته بود [۱۹]. در این پژوهش، نانوذره سرامیکی SiC جهت بهبود خواص اصطکاک و سایش روغن پایه در مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نانوذره SiC در بین نانو ذرات دیگر، جز نانو ذرات با چگالی بالا محسوب شده و لذا پایداری و پراکنده کردن آن در روغن پایه نیز حائز اهمیت است.

### ۲- مواد و روش‌ها

نانو ذره SiC سنتز شده در حضور روغن پایه SN500HVI از شرکت نفت سپاهان ایران مورد مطالعه قرار گرفت. کلیه

جدول (۱): خواص روغن پایه SN500HVI

خواص فیزیکی	نتیجه	ASTM
گرانروی حرکتی (۱۰۰ درجه سلسیوس) (سانتی استوک)	۱۰/۵ - ۱۱/۲	D-7042
گرانروی حرکتی در ۴۰ درجه سلسیوس (سانتی استوک)	۸۵ - ۱۰۲	D-7042
شاخص گرانروی (بدون بعد) (حداقل)	۹۰	D-2270
چگالی (۱۵ درجه سلسیوس) (کیلوگرم بر مترمکعب)	۰/۸۸۵ - ۰/۸۹۶	D-4052
نقطه ریزش (درجه سلسیوس) (حداکثر)	-۶	D-5950
نقطه اشتعال (درجه سلسیوس) (حداقل)	۲۴۵	D-92
رنگ (حداکثر)	۱	D-1500
جدایی پذیری از آب (۸۲ درجه سلسیوس) (دقیقه)	۴۰/۳۷ میلی لیتر (در ۱۵ دقیقه)	D-1401
درصد تبخیر نواک (حداکثر)	۴	D-5800
میزان کف (میلی لیتر)	۱۰/۰ و ۳۰/۰ و ۱۰/۰	D-892

### ۳-۲- روش اصلاح سطح نانو ذرات SiC

اصلاح سطح نانوذره SiC سنتز شده جهت افزایش پایداری و پراکنده شدن آن در روغن پایه انجام شد. از اسید اولئیک جهت اصلاح سطح نانوذره استفاده شد. جهت اصلاح سطح نانو ذرات با اولئیک اسید، ابتدا ۲ گرم نانوذره در ۸۰ گرم n-هپتان به خوبی پخش شد و سپس ۱۰ گرم اولئیک اسید به مخلوط فوق اضافه گردید و به مدت ۳۰ دقیقه با همزن

### ۲-۲- سنتز نانوذره SiC

کلیه مواد جهت سنتز نانوذره SiC نیز از شرکت سیگما آلد ریچ تهیه شدند. سنتز نانو ذرات SiC با روش‌های گوناگون مطالعه شد [۲۴-۲۰] و سپس روش سل ژل به دلیل سهولت و با ایجاد تغییراتی در شرایط سنتز جهت کنترل اندازه، توزیع شکل و بلورینگی نانو ذرات SiC، انتخاب شد [۲۴]. نتایج آزمون‌های مشخصه یابی نانو ذرات سنتز شده با نتایج به دست آمده از روش مرجع نیز مطابقت داشت.

## ۵-۲-آزمون‌های مشخصه يابی نانو ذرات SiC

برای مشاهده مورفولوژی نانوذره SiC سنتز شده و نمونه اصلاح سطح شده آن، از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل MIRA3 (ساخت شرکت TE-SCAN، جمهوری چک) مجهز به طیف‌سنجی انرژی پرتویکس (EDX) استفاده شد. همچنین برای شناسایی اندازه و مشخصات کریستالوگرافی نمونه اصلاح سطح شده، آزمون مشخصه يابی توسط دستگاه پراش پرتویکس (XRD) مدل Explorer (ساخت شرکت GNR، ایتالیا) صورت گرفت. آنالیز XRD، بر اساس کارت استاندارد JCPDS (شماره ۲۹-۲۹۱۱۲۹) ارزیابی شد. با استفاده از رابطه شرر اندازه تقریبی ذرات کریستالی نمونه‌ها به دست آمد:

$$D = 0.9\lambda / B\cos\theta \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در رابطه فوق  $D$  متوسط اندازه ذرات،  $B$  نصف ضخامت در بیشترین ارتفاع برای صفحات کریستالی نانو ذرات،  $\theta$  زاویه اشعه و  $\lambda$  طول موج می‌باشد. اندازه‌گیری‌های جذب نور نانوذره SiC اصلاح شده نیز توسط دستگاه طیف‌سنج مادون‌قرمز با تبدیل فوریه (FTIR) مدل UV1800 (ساخت شرکت Shimadzu، ژاپن) و با استفاده از قرص پتاسیم برمید گزارش شده است. آنالیز طیف‌سنجی در محدوده طول موج  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  مورد استفاده قرار گرفت. ارزیابی پایداری نانو ذرات SiC اصلاح سطح شده با روش پتانسیل زتا و توسط نانوپتانسیومتر مدل ZS90 (ساخت شرکت Malvern، انگلیس) تعیین شد.

## ۶-۲-آزمون انجام شده بر نانو سیال آزمون

### سایش

آزمون سایش با دستگاه آزمون اصطکاک عمومی پین روی دیسک مدل ۰۳ TSN-WTC (ساخت شرکت تجهیز صنعت نصر، ایران) انجام شد که برای اندازه‌گیری تماس کشویی به کار رفته و اجزای آن دیسک و پین می‌باشد. مشخصات پین و دیسک در جدول ۲ ضمیمه شد. آزمون

مغناطیسی مخلوط شد. این مرحله با ۲۰ گرم اسید اولئیک نیز مجدداً تکرار شد. سپس نمونه‌ها داخل اولتراسونیک قرار داده شد، سیستم گرمایش اولتراسونیک (مدل S60H ساخت شرکت Elma، آلمان) روی ۸۰ درجه تنظیم و در فرکانس ۴۴ KHz به مدت ۱ ساعت هم زده شد. در این دما هپتان تبخیر شده و اسید اولئیک بر روی سطح نانو ذرات نشست. سپس محلول حاوی نانو ذرات اصلاح سطح شده در سانتریفیوژ (مدل Behdad، ایران) با دور ۴۰۰۰ rpm در مدت ۱ ساعت قرار گرفت. مجدداً چندین مرحله شست و شو با هپتان و سانتریفیوژ مجدد صورت گرفت. هپتان جمع شده روی سطح فالكون نیز تخلیه شد و سپس مخلوط نهایی در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت در آون قرار داده شد تا مخلوط خشک شود و هپتان تبخیر شود. بدین صورت اولئیک اسید اضافه از روی سطح شسته شد. دو نمونه از نانو ذرات اصلاح سطح شده با مقادیر ۱۰ و ۲۰ گرم اولئیک اسید تهیه و به ترتیب با  $\alpha$ ،  $\beta$  نام‌گذاری شد. در انتها، آزمون FESEM انجام و نمونه بهتر از لحاظ ریخت شناسی جهت سایر آزمون‌ها انتخاب شد.

## ۴-۲-تهیه نانو سیال SN500HVI با نانو ذرات

### SiC اصلاح سطح شده

در این پژوهش، ۴ درصد وزنی متفاوت از نانو ذرات SiC اصلاح سطح شده جهت تهیه مخلوط نانو سیال مورد استفاده قرار گرفته است. مقادیر وزنی متفاوت از نانو ذره با درصدهای متفاوت ۰/۲۵٪، ۰/۵٪، ۱٪ و همچنین ۵٪ به روغن پایه SN500HVI اضافه شد. نتایج با یک نمونه روغن پایه بدون نانوذره نیز مورد مقایسه قرار گرفت. برای از بین بردن رسوب و ایجاد پراکندگی یکنواخت در نانو ذرات، نمونه با جت میکسر به مدت ۳۰ دقیقه با دور ۱۰۰۰ (دور بر دقیقه) هم زده شد. سپس نانوروانکارها در لرزاننده التراسونیک به مدت ۲ ساعت قرار گرفته و در ادامه جهت آزمایش‌های تریبولوژیکی مورد استفاده قرار گرفت.

پايه حاوي نانوذره SiC در درصد وزني هاي ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۵ انجام شد. تصاوير روي سطوح ديسک ها پس از آزمايش اصطکاک و سايش نيز با استفاده از میکروسکوپ الکتروني روبشي (FESEM) تهيه شد.

### ۳- نتايج و بحث

#### ۳-۱- مورفولوژي و آناليز FESEM نانو ذره

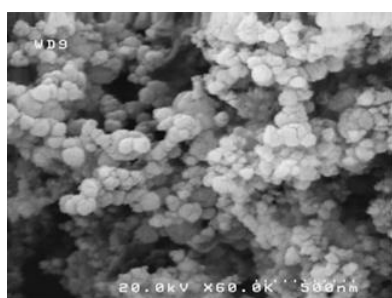
SiC (شکل ۱) تصاوير FESEM نانو ذرات سيليسيم کارييد قبل از اصلاح سطح و نانو ذرات سيليسيم کارييد اصلاح سطح شده با ۱۰٪ و ۲۰٪ وزني اولتيک اسيد را در بزرگنمايي ۶۰ هزار برابر نشان مي دهد. (شکل ۱) مقدار کيفي عناصر نانوذره SiC اصلاح سطح شده با نسبت هاي متفاوت اولتيک اسيد را توسط EDS نشان مي دهد. تصاوير تهيه شده از نانو ذرات سيليسيم کارييد قبل از اصلاح سطح و نانو ذرات سيليسيم کارييد اصلاح سطح شده با نسبت هاي متفاوت اولتيک اسيد در (شکل ۱) داراي مورفولوژي تقريباً به صورت گل شکفته مي باشند. نانو ذرات سراميکي سيليسيم کارييد در هر سه شکل، کروي شکل، هم اندازه و داراي نظم منحصربه فردي هستند.

سايش با استفاده از استاندارد G99 و با ايجاد برخي تغييرات سخت گيرانه تر جهت واضح تر شدن نتايج انجام شد.

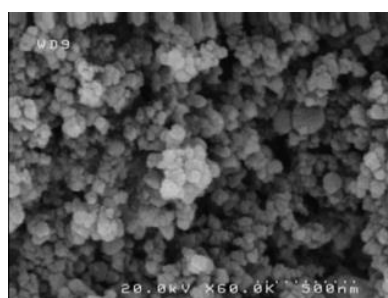
جدول (۲): مشخصات پين و ديسک ها

مشخصات پين	جنس	قطر	سختي
مشخصات ديسک	فولاد ۵۲۱۰۰	۶ mm	۶۴ HRC
	فولاد ST ۳۷	۴۰ mm	۲۵۰ HV

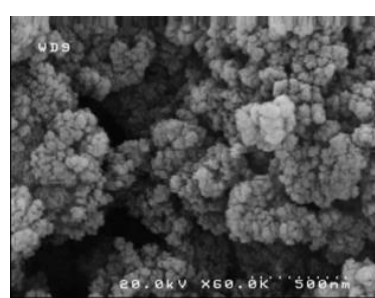
جهت انجام آزمون سايش، روي سطوح ديسک ها به ترتيب با کاغذ سنباده ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ صيقل داده شد. مطابق استاندارد آزمون، قبل و بعد از هر آزمايش، تمام اجزای آزمون تميز شد و به مدت ۵ دقيقه در حمام اولتراسونيك قرار گرفت و سپس با اتانول شسته شده و با هوای گرم قبل و بعد از آزمايش خشک شد تا ناخالصي هاي احتمالي از بين برود. همچنين قبل از تحليل سطح کارکرده، تمام نمونه ها با دقت با تولوئن و سپس استون تميز شدند تا روان کننده باقيمانده از آن خارج شود. آزمون ضريب اصطکاک با اعمال بار ۱۰ نيوتن انجام شد. ديسک با سرعت ثابت ۶۰۰ دور در دقيقه به مدت ۱۰ دقيقه و به صورت ۵ قطره نانو سيال روان کننده بر روي ديسک در دمای اتاق در چرخش قرار گرفت. ضريب اصطکاک و ميزان سايش به طور خودکار ثبت شد. آزمايش روي روغن



بعد از اصلاح سطح با ۲۰٪ وزني اولتيک اسيد

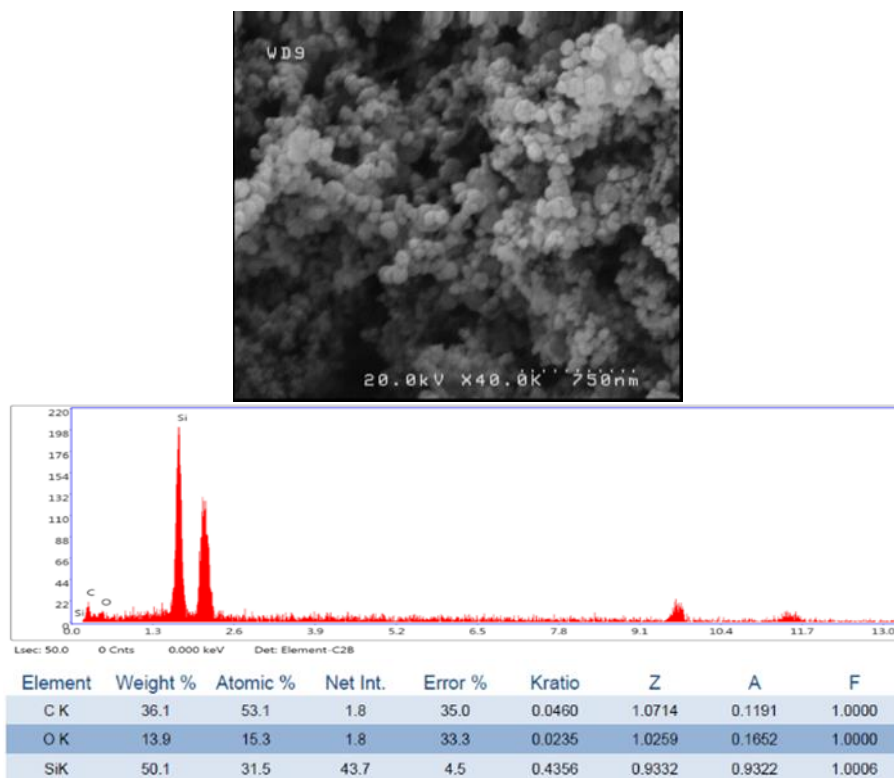


بعد از اصلاح سطح با ۱۰٪ وزني اولتيک اسيد

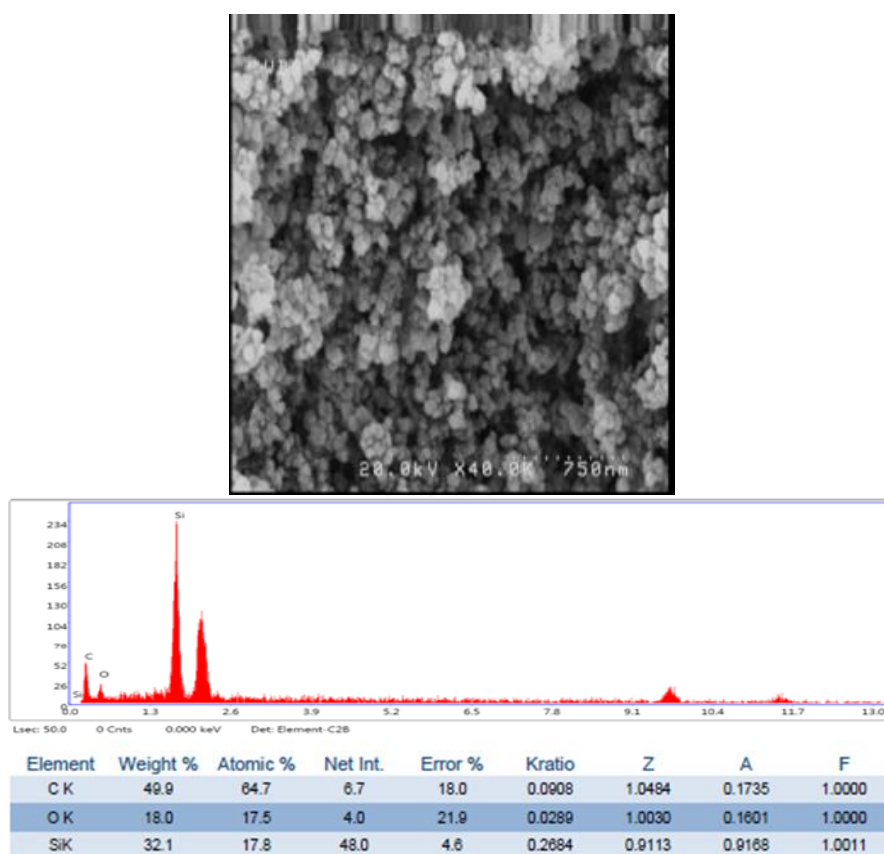


قبل از اصلاح سطح

شکل (۱): نانو ذرات سيليسيم کارييد قبل از اصلاح سطح و نانو ذرات سيليسيم کارييد اصلاح سطح شده با ۱۰٪ و ۲۰٪ وزني اولتيک اسيد



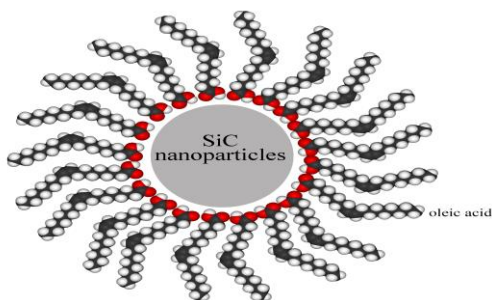
(الف)



(ب)

شکل (۲): نتایج آزمون EDS-FESEM نانوذره SiC اصلاح شده (الف) با ۱۰٪ اولئیک اسید و (ب) با ۲۰٪ اولئیک اسید

شد. این کار با پخش کردن نانو ذرات در حضور هپتان و اولئیک اسید در دما و زمان مشخص انجام شد. روش‌های اصلاح سطح متفاوت می‌توانند سازوکارهای مختلفی به وجود بیاورد. در اصلاح سطح نانو ذرات SiC با اولئیک اسید، گروه کربوکسیل موجود در اسید می‌تواند با گروه هیدروکسیل روی نانو ذرات از طریق پیوند هیدروژنی جذب شود [۲۸] و بر روی سطوح نانوذره بنشیند. طولانی بودن زنجیره اسید اولئیک از طرفی باعث ایجاد نانوساختارها به صورت میسل در روغن می‌شود (شکل ۳) و از طرف دیگر، طولانی بودن زنجیره‌های غیر قطبی اسید اولئیک که سطح ذرات SiC را پوشش داده، باعث وجود یک نیروی دافعه الکتروستاتیک بین ذرات SiC می‌شود که از تجمع آن‌ها محافظت می‌کند. نمونه اصلاح سطح شده با اسید آلی به راحتی در انواع مختلف حلال‌های آلی از جمله تولوئن، بنزن و روغن پارافینیک قابلیت پراکندگی دارد. استفاده از هپتان جهت افزایش کشش سطحی روی سطح نانوذره بوده و اصطلاحاً با خیس کردن سطوح باعث تسهیل و تسریع جذب گروه عاملی کربوکسیلیک موجود در اسید اولئیک روی سطح نانو ذرات می‌شوند.



شکل (۳): اولئیک اسید تثبیت شده روی سطح نانوذره

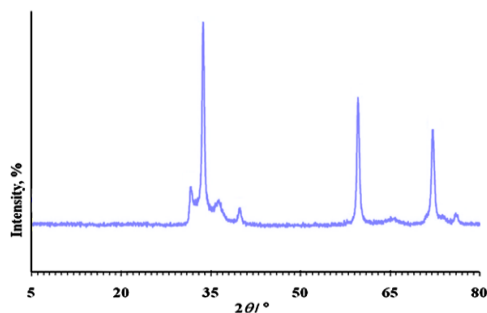
جهت ارزیابی پایداری نانو ذرات از روش رسوب گذاری استفاده شد که در مقالات زیادی از آن استفاده شده است. در این روش در طول زمان و یا پس از طی زمان مشخصی از نانو سیال تصویر تهیه می‌شود. این روش از ساده‌ترین و متداول‌ترین روش‌ها برای ارزیابی پایداری نانو روانکارها می‌باشد [۱]. نتایج رسوب گذاری نشان داد آگلومرها و فلاک‌ها برای نانو ذرات SiC اصلاح سطح شده تشکیل

در (شکل ۲) با تغییر نسبت مقدار اسید اولئیک مصرفی به ترتیب به ۱۰ و ۲۰ گرم، دو نمونه از نانو ذرات اصلاح سطح شده تهیه و به ترتیب با (الف) و (ب) نامگذاری شد. نمودار به دست آمده از EDS نیز درصد عناصر را در هر دو نمونه نشان می‌دهد که در نمونه اصلاح سطح شده با ۲۰ درصد اولئیک اسید، درصد عناصر اکسیژن و کربن با توجه به استفاده از اولئیک اسید بیشتر جهت اصلاح سطح افزایش یافته است. طبق نتایج پژوهش‌های انجام شده، هرچه نانو ذرات اندازه کوچک‌تر داشته و کروی شکل و نامتراکم باشند، بهتر می‌توانند در بین سطوح درگیر نفوذ کرده و جابه‌جا شوند [۱]. در این مطالعه تفاوت چشمگیری بین اندازه نانو ذرات نسبت به درصد اولئیک اسید استفاده شده وجود نداشت اما با توجه به مورفولوژی بهتر نانو ذرات نمونه (ب) از لحاظ کروی‌تر بودن و پراکندگی بهتر (شکل ۲-ب) در ادامه مراحل از این نمونه استفاده شد و جهت آزمون سایش مورد استفاده قرار گرفت.

## ۲-۳- سازوکار اصلاح سطح و پایداری نانوذره SiC با اولئیک اسید

اندازه نانو ذرات سنتز شده در این مطالعه تقریباً ۳۰ نانومتر می‌باشند با این حال با توجه به سنگینی نسبی نانو ذرات SiC می‌بایست به خوبی در حلال پراکنده شوند، در غیر این صورت پس از زمان کوتاهی به هم چسبیده و در نتیجه با زیاد شدن جرم و کم شدن کشش سطحی خود امکان تجمع و رسوب پیدا می‌کنند. گزارش‌های محدودی نسبت به نانو ذرات غیر اکسید با پایداری و تعلیق بیش از ۱ ماه وجود دارد [۲۵]. نانو ذرات SiC به دلیل وجود گروه هیدروکسیل روی سطح آن‌ها، با استفاده از اولئیک اسید امکان اصلاح سطح آن‌ها وجود دارد [۲۶] و می‌توان به طور یکنواخت آن‌ها را در روغن پارافینیک توزیع کرد. برای به دست آوردن سوسپانسیون پایدار، داشتن سطح زنجیره‌های آلکیل با ضخامت پیوند کافی و نسبت ضخامت به اندازه برای سطح نانو ذرات ضروری است. اولئیک اسید دارای یک گروه فعال و یک زنجیره آلکیل طولانی است و حدود ۱۸ اتم کربن دارد که جهت اصلاح سطح نانو ذرات استفاده

ناخالصی در الگوی پراش، این حقیقت را نشان می‌دهد که نانوذره SiC تک فاز و دارای خلوص بسیار بالایی است. تمامی پیک‌های به دست آمده از الگوی XRD نمونه بلند و نوک تیز می‌باشد و این نشان‌دهنده بلورینه بودن نانو ذرات استفاده شده است [۲۹-۳۰]. اندازه نانو ذرات اصلاح سطح شده به کمک رابطه شرر حدود ۳۰ نانومتر به دست آمد.



شکل (۵): طیف XRD از نانوذره SiC

### ۴-۳- نتایج حاصل از آزمون FTIR نانو ذرات

#### سیلیسیم کاربید

شکل ۶ طیف‌های FTIR سیلیسیم کاربید را قبل و بعد از اصلاح سطح نشان می‌دهد. آزمون FTIR از نمونه جهت حصول اطمینان از تثبیت اولئیک اسید روی نانو ذره انجام شد. برای نانو ذرات سیلیسیم کاربید در طیف FTIR محدوده عدد موجی  $400-1300 \text{ cm}^{-1}$  باندهایی ظاهر می‌شوند که عمدتاً مربوط به ناحیه اثرانگشتی می‌باشد و در هر دو نمودار تقریباً یکسان هستند. باند جذبی  $677 \text{ cm}^{-1}$  با پیک قوی در  $739 \text{ cm}^{-1}$  در هر دو نمودار مربوط به کشش Si-C است. در این قسمت عمدتاً به دنبال تفسیر باندهای جذبی اضافه شده پس از اصلاح سطح مربوط به اسید اولئیک بوده تا نسبت به صحت اصلاح سطح اطمینان پیدا شود و حضور اسید اولئیک ( $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$ ) روی سطح نانوذره SiC نیز مشخص شود. پس از اصلاح سطح، دو پیک با شدت ضعیف در  $2855 \text{ cm}^{-1}$  و  $2926 \text{ cm}^{-1}$  نمایان شده که مربوط به ارتعاشات کششی متقارن و نامتقارن -CH<sub>2</sub> هستند [۳۱]. در شکل ۶ (ب) یک پیک جدید در  $1717 \text{ cm}^{-1}$  ظاهر شده در حالی که در شکل (الف) چنین قله‌ای در نانوذره سیلیسیم کاربید مشاهده نمی‌شود. این پیک

نشده است. (شکل ۴-ب) مربوط به روغن حاوی ۱٪ نانو ذرات اصلاح سطح شده با اولئیک اسید پس از گذشت ۵ روز می‌باشد. این در حالی است که نانو ذرات اصلاح سطح نشده پس از ۲ روز به طور کامل ته‌نشین شدند (شکل ۴-الف). همچنین تصویر (شکل ۴-ج) مربوط به نانو ذرات اصلاح سطح شده در روغن پس از گذشت یک ماه می‌باشد که نشان می‌دهد نانو ذرات به خوبی در روغن پراکنده شده‌اند و نشانه‌ای از ایجاد رسوب در آن مشاهده نمی‌شود.



شکل (۴): روغن پایه حاوی نانو ذرات اصلاح سطح نشده، (ب) روغن پایه حاوی نانو ذرات پس از اصلاح سطح و (ج) روغن پایه حاوی نانو ذرات پس از اصلاح سطح شده بعد از گذشت ۱ ماه

بررسی کمی پایداری کلوئیدی نانو ذرات نیز با استفاده از آزمون پتانسیل زتا نیز انجام شد. مقدار مطلق پتانسیل از ۱۷/۱ میلی ولت برای نانو ذرات بدون اصلاح سطح، به ۲۶/۶ میلی ولت پس از اصلاح سطح رسید. افزایش مقدار مطلق پتانسیل زتا نشان‌دهنده افزایش پایداری کلوئید تهیه شده می‌باشد [۲۷].

### ۳-۳- آنالیز XRD نانو ذرات سیلیسیم کاربید

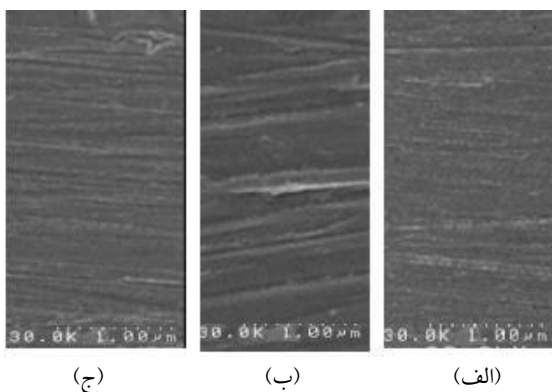
شکل ۵ الگوی XRD نمونه نانوذره SiC شده را قبل از اصلاح سطح نشان می‌دهد. تمامی پیک‌های پراش نمونه به شکل اورتورومبیک بوده و با نمونه استاندارد کاملاً مطابقت داشت. قله‌های پراش پرتو ایکس نانو ذره SiC در  $41^\circ$ ،  $60^\circ$  و  $72^\circ$  ظاهر می‌شوند که نشان‌دهنده ماهیت بلوری SiC است و مطابق با کارت استاندارد JCPDS (شماره ۲۹-۱۱۲۹) می‌باشد. شکل ۵ هیچ پیکی که نشان از ناخالصی باشد در الگوها مشاهده نشد. عدم وجود هرگونه پیک



ضخامت خطوط سایش تا ۵۸۵ نانومتر نسبت به شکل (ب) زبرتر است. با این حال، سطح فرسوده در شکل (ج) زبری کمتری دارد و همچنین در شکل (د) سطح سایشی که توسط روغن پارافینیک حاوی ۰/۵ درصد وزنی از ذرات SiC روانکاری شده با میانگین ضخامت خطوط سایش ۵۷ نانومتر، نسبت به شکل‌های سطوح دیگر نرم‌تر است. همچنین در این سطح شیارهای کم‌عمق‌تر و صاف‌تری توسط نانو ذرات کوچک و سخت SiC اصطلاحاً شخم‌زنی یا تشکیل شده است.

شکل‌های ۷ (ج، د و ه) نشان می‌دهد که حضور نانو ذره باعث ایجاد درگیری کمتر بین سطوح شده و باعث کاهش اصطکاک می‌شود. در این سطوح با ایجاد فیلم از تماس مستقیم سطوح فلزی جلوگیری شده و شیارها با پر شدن نانو ذرات SiC پوشانده شده و محافظت می‌شود. در واقع حضور نانو ذرات باعث خودسازی سطح و یا به اصطلاح (خود ترمیمی) می‌شود.

در مجموع از تصاویر شکل ۷ این نتیجه کلی حاصل می‌شود که خواص فوق‌العاده ضد سایش سیال با افزودن نانو ذرات اصلاح شده به دلیل تشکیل لایه تریبو کامل و یکنواخت می‌شود. کاهش اصطکاک و سایش در مواردی مشهودتر بود که مقدار نانو ذره به اندازه کافی بوده و بتواند به راحتی در بین سطوح درگیر اصطکاک پین و دیسک تماس کشویی ایجاد کند و در حفره‌های ریز سطوح نفوذ کند.

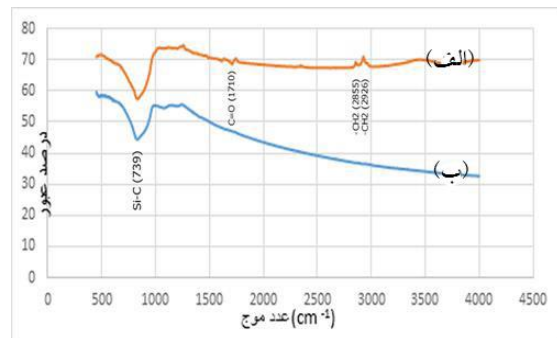


(ج)

(ب)

(الف)

ناشی از پیوند گروه عاملی کربوکسیلیک (COOH) اولئیک اسید با گروه عاملی هیدروکسیل (OH) روی سطح نانو ذره SiC می‌باشد [۳۲].



شکل (۶): طیف‌های FTIR از الف) نانو ذره SiC اصلاح شده و ب) نانو ذره SiC اصلاح نشده

این پیک به نوعی مهم‌ترین پیک در داده‌ها می‌باشد و نشان می‌دهد که اصلاح سطح به نوعی موفقیت‌آمیز بوده است. پیک تیزی که در  $1710 \text{ cm}^{-1}$  ظاهر شده نیز به ارتعاش کششی C=O در کربوکسیلیک نسبت داده می‌شود [۳۳]. نتایج آشکار می‌سازند که محصول به دست آمده سیلیسیم کاربید اصلاح شده با اولئیک اسید است.

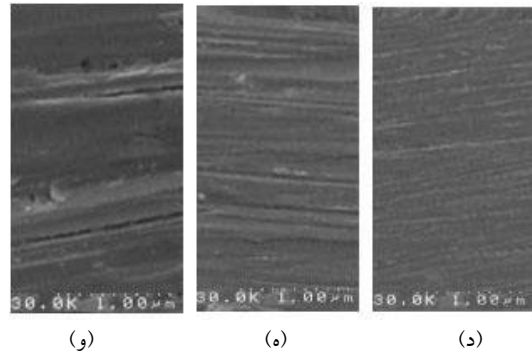
### ۵-۳- تجزیه و تحلیل سطح سایش

روابطی بین خصوصیات تریبولوژیکی و مورفولوژی سطوح فرسوده استنباط شد که بر افزایش درک رفتار نانو ذرات اضافه شده بر سیستم روانکاری مؤثر است. در شکل ۷ تصاویر SEM سطوح پین‌ها با بزرگنمایی ۳۰ هزار برابر و مقیاس  $1 \mu\text{m}$  در حضور روغن SN500HVI در درصدهای وزنی متفاوت نانو ذرات SiC و بدون حضور نانو ذرات آورده شد. هنگامی که از سیال خالص و بدون مواد افزودنی به عنوان روان‌کننده استفاده شد (شکل ۷-ب) سطح فرسوده با حفره‌های عمیق و گسترده مشاهده شد. در شکل (ب) سطح سایش که توسط روغن پارافینیک خالص روغن کاری شده، ظاهری زبر و خشن همراه با خلل و فرج و تعداد زیادی از ماسوره‌های ضخیم و عمیق است که این ناشی از سایش چسبندگی است. همان‌طور که در (شکل ۷-و) نشان داده شده است سطح سایش ایجاد شده توسط روغن پارافینیک حاوی ۵ درصد وزنی از نانو ذرات SiC با

پایداری آن‌ها از عوامل اصلی برای تشکیل تریبوفیلیم مایع در روغن پارافینیک است. نانو ذرات SiC اصلاح شده با اسید اولئیک می‌توانند پایداری بهتری در روغن روانکار ایجاد کنند؛ به عبارت دیگر با بهبود پایداری نانو ذرات و حداقل کردن اندازه کنگلومرا در روغن روانکار این امر باعث اختلاط بهتر آن‌ها شده و باعث می‌شود نانو ذرات به راحتی به نقاط مورد نظر دسترسی پیدا کنند. استفاده از اسید اولئیک در اصلاح سطح نانوذره نیز از همین حیث بوده تا از ایجاد رسوب نانو ذرات جلوگیری کرده و جا به جایی آن‌ها در سراسر نقاط در معرض اصطکاک راحت تر انجام شود. از دیدگاه دوم نیز این امر باعث می‌شود تریبوفیلیم مایع یکنواخت و کامل تری به وجود آید.

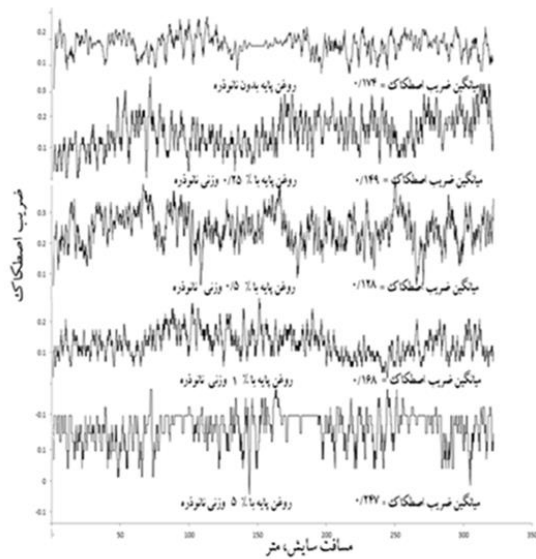
### ۶-۳- تجزیه و تحلیل سطوح سایش در بار بالا

شکل ۸ تصاویر SEM از سطوح سایش روغن پایه SN 500HVI خالص بدون حضور نانو ذرات و به همراه آن‌ها را با بزرگنمایی ۳۰ هزار برابر را نشان می‌دهد. تصاویر پس از انجام آزمون سایش (در بار ۳۰ نیوتن و با سرعت ۶۰۰ دور در دقیقه) گرفته شده است. در تصاویر شکل ۸ کاملاً مشخص است که شیارهای ضخیم تر و عمقی تر همراه با خلل و فرج‌های زیادی نسبت به شکل ۷ به دلیل وجود فلزات و ترد شدن آن‌ها شده که در نتیجه‌ی اعمال بار بیشتر، توده فیبری شکل از روی سطوح شکسته شده و جدا می‌شود. البته در روغن حاوی نانو ذرات، نانو ذرات از تماس مستقیم سطوح جلوگیری کرده و عمق سایش کمتری اتفاق می‌افتد. همان‌طور که در شکل ۸ (ب، ج و د) نشان داده شده است، سایش سطوح فرسوده، برای نانوذره SiC حتی در شرایط بار ۳۰ نیوتن استرس ناشی از تماس و چسبندگی بیشتر ناشی از افزایش بار اتفاق افتاده است. با گذشت زمان آزمون و افزایش فشار و تنش روی سطوح درگیر این امر به تدریج باعث از بین رفتن سختی نیز نرم‌تر به نظر می‌رسد و این یعنی ظرفیت تحمل بار این نانوذره نیز نسبتاً مناسب می‌باشد. به تدریج با افزایش غلظت نانوذره، نانو ذرات SiC در درزا و شیارهای فرسوده سطوح نفوذ کرده و در نتیجه با کاهش سطوح در معرض تماس مستقیم



شکل (۷): تصویر سطح بین آزمون سایش تحت بار ۱۰ نیوتن الف) قبل از انجام آزمون، ب) در حضور روغن پایه بدون حضور نانوذره، ج) در حضور نانو ذرات SiC در غلظت ۰/۲۵٪ وزنی، د) ۰/۵٪ وزنی، ه) ۱٪ وزنی و و) ۵٪ وزنی

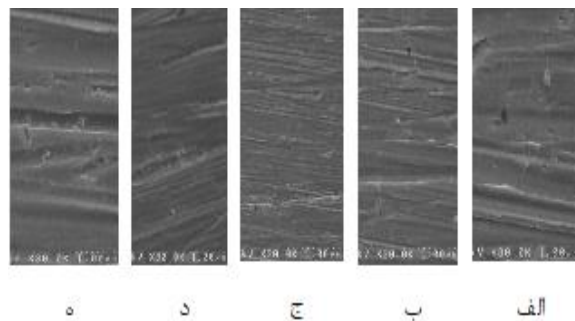
با اضافه شدن درصد وزنی نانو ذرات در روغن روغنکار، لایه محافظ تشکیل شده از نانو ذرات روی سطوح درگیر کامل می‌شود و از تماس مستقیم سطوح جلوگیری می‌کند؛ بنابراین با افزایش درصد نانو ذرات احتمالاً خواص ضد سایشی بهتری ایجاد می‌شود که البته افزایش بیش از حد آن‌ها نیز باعث ایجاد آلودگی شده و می‌تواند نتیجه عکس داشته باشد. همچنین اضافه کردن بیش از حد نانوذره، روی تغییر ویسکوزیته روانکار تأثیرگذار بوده [۳۴] و همچنین ممکن است برخی واکنش‌های تریبوشیمیایی در هنگام فرآیند غلتش را نیز موجب شود [۳۵-۳۶]. این موضوع از دیدگاه دیگر نیز قابل بررسی است که در آن بر اساس نظریه لایه لایه شدن و سرخوردن لایه‌ها روی هم در سایش [۳۷-۳۸]، لایه‌ها به دلیل شکستگی از هم جدا شده و سپس بین تریبوفیلیم و لایه زیرین جمع می‌شوند. با توجه به ضخامت کم لایه تریبوفیلیم، نانو ذرات می‌توانند در هنگام ایجاد اصطکاک کشویی از سطح تریبوفیلیم عبور کنند و جابه‌جا شوند؛ اما برای سطح بدون تریبوفیلیم، جابجایی‌ها با مواد بستر انتقال می‌یابند و در نتیجه می‌توانند استرس زیادی ایجاد کنند [۳۷-۳۸]؛ بنابراین، نانوذره SiC اصلاح سطح شده در لایه تریبوفیلیم می‌تواند خاصیت ضد سایش و ضد اصطکاک را تقویت کند که باعث افزایش عملکرد روغن در فشارهای شدید و افزایش ظرفیت نیروی وارده بر روغن می‌شود [۳۹]. با این تفاسیر انتخاب درصد بهینه نانو ذرات و



شکل (۹): تغییرات ضریب اصطکاک نانوذره SiC بر اساس مسافت سایش در غلظت‌های متفاوت در حضور روغن پایه SN 500HVI با اعمال بار ۱۰ نیوتن

در آزمون سایش تحت اعمال بار ۱۰ نیوتن، با اضافه کردن مقدار نانوذره SiC در روغن پایه به غلظت ۰/۲۵ درصد وزنی، ضریب اصطکاک روغن از ۰/۱۷۴ به ۰/۱۴۹ کاهش یافت. همچنین با ادامه افزایش غلظت نانوذره SiC به ۰/۵ درصد وزنی، میزان ضریب اصطکاک بهبود یافته و به ۰/۱۲۸ تقلیل یافته است، اما با ادامه روند افزایش غلظت نانوذره به ۱ درصد وزنی شیب نمودار کاهش تغییرات ضریب اصطکاک تغییر یافته و با رسیدن به مقدار ۰/۱۶۸ شیب افزایشی پیدا کرده است. با ادامه افزایش غلظت نانوذره به ۵ درصد وزنی نیز مقدار ضریب اصطکاک، حتی نسبت به روغن پایه خالص، بیشتر شد و به ۰/۲۴۷ رسید. این نتایج نشان داد، الزاماً روند افزایش غلظت نانوذره انتخاب شده در روغن پایه موجب کاهش خواص اصطکاک و سایش نشده و در یک غلظت بهینه، شیب کاهشی اصطکاک متوقف می‌شود. پیش از این خاطر نشان شد که ضریب اصطکاک نانو ذرات وابسته به غلظت نانو ذرات در مخلوط است. نتیجه حاصل از تحلیل این نمودارها توأم با سطوح سایش این است که افزایش غلظت نانو ذرات SiC باعث چسبیدن نانو ذرات بیشتری به سطوح شده و با حضور نانو ذرات به عنوان پرکننده‌های اضافی در شیارها و درزها،

باعث بهبود خواص تریبولوژیکی می‌شود. همچنین با توجه به سختی نانو ذرات، در بارهای بالا یک سایش خفیف در ناحیه تماس نیز ایجاد می‌شود و تأثیر عوامل بر میزان این سایش پیچیده است و به متغیرهای زیادی از جمله خصوصیات ذرات مانند اندازه، سختی و شکل و خصوصیات محیطی همچون سطح، شرایط توپوگرافی و نوع روغن کار و میزان بار اعمال شده بستگی دارد. حضور عوامل بسیار و تأثیر آن‌ها برهم، توصیف کامل تری از نقش نانو ذرات و تأثیرگذاری آن‌ها بر اصطکاک و سایش کل می‌دهد. از دیرباز تا به امروز، فقدان اساسی در درک سازوکارهای سایش در هنگام استفاده نانو ذرات وجود داشته و این بدان معنی است که تحقیقات سیستماتیک بر همه خصوصیات تأثیرگذار نانو ذرات هنوز یک معضل اساسی است و نیاز به تحقیقات بیشتری در این حوزه است. به‌طور کلی نتیجه‌ای که از آزمون سایش با بار بالا به دست آمد با نتیجه آزمون در بار کم مطابقت داشت و تا حدودی در تصدیق تصاویر شکل ۷ بود.



شکل (۸): تصویر سطح دیسک‌ها بعد از انجام آزمون سایش به ترتیب الف) بدون حضور نانوذره، ب) در حضور نانو ذرات SiC با غلظت ۰/۲۵٪ وزنی، ج) برای ۰/۵٪ وزنی، د) برای ۱٪ وزنی و ه) برای ۵٪ وزنی تحت بار ۳۰ نیوتن

### ۷-۳- ضریب اصطکاک

میانگین ضریب اصطکاک نانوسیال روغن پایه SN 500HVI با درصد‌های وزنی متفاوت SiC در شکل ۷ نشان داده شد.

غلظت‌های بیشتر از غلظت بهینه، نانو ذرات SiC تمایل دارند که در روغن پایه جمع شوند؛ بنابراین، هنگام تماس، ناحیه تماس محکم فشار می‌یابد و تعداد کمی از نانو ذرات به دلیل تجمع می‌توانند به مرکز فشار برسند.

### ۸-۳- مقایسه با کار دیگران

در جدول ۳، مقایسه نتیجه این پژوهش با تعدادی از پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه از نظر نوع آزمون به کار گرفته شده در سنجش خواص تریبولوژیکی، نوع نانو ذرات مورد استفاده، روش سنتز، نوع روغن مورد استفاده، درصد بهینه نانوذره و نوع اصلاح سطح، به تفکیک آورده شده است [۱]. با مقایسه میزان درصد کاهش اصطکاک در پژوهش حاضر با پژوهش‌های دیگر نتیجه می‌شود استفاده از نانو ذرات سرامیکی SiC در روغن روانکار نتیجه مؤثر و قابل قبولی در کاهش اصطکاک نسبت به سایر نانو ذرات در پژوهش‌های مختلف داشته است. از دلایل اصلی تفاوت پژوهش حاضر با برخی از پژوهش‌های مشابه [۴۰] می‌توان به استفاده از روغن پایه‌های غیر یکسان و همچنین استفاده از اولئیک اسید در پژوهش حاضر اشاره نمود. پس نه تنها نوع نانوذره بلکه عوامل مختلف فیزیکی و شیمیایی دیگر می‌توانند بر اثرگذاری روی خواص سایش و اصطکاک مؤثر و مهم باشند.

میزان سایش و خواص تریبولوژیکی روغن پایه SN 500HVI به طرز چشمگیری بهبود می‌یابد. البته این روند ثابت نمی‌باشد، در واقع با افزایش غلظت نانو ذرات SiC، ضریب اصطکاک ابتدا کاهش یافته و سپس با افزایش بیشتر نانو ذرات SiC افزایش می‌یابد؛ بنابراین، هنگامی که مقادیر نانو ذرات SiC به غلظت بهینه برسد، اثر کاهش اصطکاک به وضوح قابل رؤیت است. اگر مقدار اضافی SiC به روانکار پایه اضافه شود، SiC تمایل به تشکیل آگلومره‌های برگشت‌ناپذیر را نشان می‌دهد و آگلومره‌های بین سطوح تماس منجر به کاهش کارایی اصطکاک می‌شوند. کاهش اصطکاک نانو ذرات SiC حدود ۱۵٪ برای غلظت ۲۵٪ وزنی و حدود ۲۶٪ برای ۵٪ وزنی و ۴٪ برای ۱٪ وزنی، در مقایسه با روغن پایه بدون نانو ذرات بود. عملکرد برجسته کاهش اصطکاک نانو ذرات SiC را می‌توان به اندازه کوچک آن‌ها با اندازه کمتر از ۳۰ نانومتر و پراکندگی عالی آن‌ها در روغن پایه و همچنین سختی بالای آن نسبت داد. این خصوصیات باعث می‌شود تا نانو ذرات SiC در غلظت بهینه به راحتی وارد سطوح مورد نظر شود و تحت تنش‌ها و بارهای وارد از سمت سطوح درگیر مقاوم بوده و همچنین مانع از تماس مستقیم سطوح زبر شود. از علل اصلی افزودن نانو ذرات SiC به روان کننده، همین خواص عالی همگن بودن و فشار پذیری و تحمل بار زیاد آن است که باعث مهار سطح می‌شود [۱۶ و ۱۹]. در

جدول (۳): مقایسه پژوهش با سایر پژوهش‌های صورت گرفته

مرجع	میزان درصد کاهش اصطکاک	ضریب اصطکاک نانو سیال	ضریب اصطکاک روغن خالص	نوع آزمون	درصد بهینه نانوذره	روش پراکندگی نانو ذرات	نوع روغن مورد استفاده	اندازه (nm)	نوع نانو ذرات
پژوهش حاضر [۴۰]	۲۶	۰/۱۲۸	۰/۱۷۴	بین روی دیسک	۰/۵	اصلاح سطح	روغن پایه SAE30	۳۰	SiC
[۴۱]	۱۵/۵	۰/۰۷۶	۰/۰۹	چهار ساچمه	۰/۰۳	-	سبوس برنج	۳۰-۵۰	SiC
[۴۱]	۳۷/۵	-	-	چهار ساچمه	۱	اصلاح سطح	روغن مکانیکال	۶۶ و ۵۳ و ۱۲۴	ZnO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> کامپوزیت
[۴۲]	۱۸/۴	-	-	کشویی متقابل	۰/۱	-	روغن موتور	۵	CuO
[۱۷]	۲۰	-	-	اصطکاک حلقه	۱۱	-	PAO 6	۳۰-۵۰	CuO
[۴۳]	۲۵	۰/۰۶	۰/۰۸	اصطکاک حلقه	۰/۳	-	PAO	-	MSH
[۱۸]	۶۲	۰/۰۳۴۵	۰/۰۹	بین روی دیسک	۰/۵	اصلاح سطح	پارافین مایع	-	CuS

## ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، ویژگی‌های تریبولوژیکی نانو ذرات سرامیکی SiC اصلاح شده با اولئیک اسید در روغن پایه SN500HVI مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج زیر بر اساس آزمون‌های تریبولوژیکی و آنالیز سطح سایش به دست آمد:

- با توجه به تصاویر گرفته شده از سطوح پین‌ها پس از انجام آزمون سایش، نانو ذرات SiC سنتز شده با اندازه کوچک خود (قطر میانگین کمتر از ۳۰ نانومتر) می‌تواند در بین شیارهای موجود روی سطوح قرار گرفته و باعث می‌شوند برآمدگی‌ها و سطوح ناهموار روی پین‌ها پس از مدتی به حالت یکنواخت‌تر و هموارتری دست پیدا کنند و از تماس مستقیم شیارها و برآمدگی‌ها روی هم جلوگیری کند.

- استفاده از اسید اولئیک اصلاح شده، می‌تواند پایداری ذرات افزودنی در روغن کاری را بهبود بخشد که با استفاده از خاصیت ضد سایش، تریبو فیلم مایع یکنواخت و کامل‌تری را تولید کند.

- نانو ذرات SiC اصلاح شده با اسید اولئیک، خواص تریبولوژی، تحمل افزایش بار، AW و اصطکاک در روغن پایه SN500HVI را ارتقا می‌دهد. غلظت بهینه این نانو ذره در روغن پایه SN500HVI حدود ۰٫۵ است و هنگامی که غلظت بیش از حد شود، تأثیرگذاری خود را از دست می‌دهد.

- خواص مختلف فیزیکی و شیمیایی نانو ذره همچون اندازه، شکل، پایداری و سختی می‌تواند بر میزان اثرگذاری آن بر رفتار تریبولوژیکی سیالات مؤثر باشد، از جمله خواص فیزیکی نانو ذرات SiC سختی بالا و مقاومت در شرایط سخت تنش و فشار بالا بوده که باعث شده این نانو ذره ظرفیت تحمل بار بیشتر، سایش کمتر و کاهش اصطکاک بیشتری را ارائه دهد.

## ۵- منابع

- [1] Y. J. J. Jason, H. G. How, Y. H. Teoh & H. G. A Chuah, "Study on the Tribological Performance of Nanolubricants", Processes, vol. 8, pp.1372-1385, 2020.
- [2] V. S. Mello, M. F. Trajano, A. E. D. S. Guedes & S. M. Alves, "Comparison Between the Action of Nano-Oxides and Conventional EP Additives in Boundary Lubrication", Lubricants, vol. 8, pp. 54-69, 2020.
- [3] T. Norrby & A. L. Jonsson, "Oxidation stability and base oil sulphur", The European Lubricants Industry Magazine, vol. 148, pp. 32-38, 2018.
- [4] D. X. Peng, C. H. Chen, Y. Kang, Y. P. Chang & S. Y. Chang, "Size effects of SiO<sub>2</sub> nanoparticles as oil additives on tribology of lubricant", Industrial Lubrication and Tribology, vol. 62, pp. 111-120, 2010.
- [5] Y. Zhao, Z. Zhang & H. Dang, "Preparation of tin nanoparticles by solution dispersion", Materials Science and Engineering: A, Vol. 359, pp. 405-407, 2003.
- [6] J. Zhou, J. Yang, Z. Zhang, W. Liu, Q. Xue, "Study on the structure and tribological properties of surface-modified Cu nanoparticles", Materials Research Bulletin, vol. 34, pp.1361-1367, 1999.

[۷] م. اکبرزاده مقدم، و م. ززند رحیمی، "اعمال پوشش روانکار جامد دی سولفید مولیبدن توسط روش نفوذی حرارتی بر روی فولاد"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۱۱، شماره ۳، صفحه ۱-۱۰، پاییز ۱۳۹۶.

[۸] ص. منافی، و م. طلایی، "مطالعه خواص فیزیکی و مکانیکی پلی یورتان تقویت شده با نانو ذرات تیتانیا"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۱۲، شماره ۴، صفحه ۱-۱۶، زمستان ۱۳۹۷.

[۹] ر. رحیم زاده، ع. شفیعی، و ک. امینی، "بررسی ریز ساختار و خواص سایشی پوشش‌های NiCrAlY تقویت شده با ذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> اعمالی به روش پاشش حرارتی پلاسمایی"، فصلنامه علمی پژوهشی

- additives", *Ceramics International*, vol. 43, pp. 4246-4251, 2017.
- [19] T. R. Sriharsha, S. Saha, K. S. Kumar & D. H. Kumar, "Behavior of nano lubricant operated hydrodynamic solid journal bearing", *International Journal of Advanced Engineering Technology*, vol. 3, pp. 398-401, 2012.
- [20] T. L. Petrenko, V. P. Bryksa & T. T. Petrenko, "Bistable behavior of the nitrogen impurity in SiC nanoclusters", *Nanoscale*, vol. 12, pp. 11536-11555, 2020.
- [21] A. Najafi, F. Golestani-Fard, H. R. Rezaie & N. Ehsani, "A study on sol-gel synthesis and characterization of SiC nano powder", *Journal of sol-gel science and technology*, vol. 59, pp. 205-214, 2011.
- [22] Y. Li, C. Chen, J. T. Li, Y. Yang & Z. M. Lin, "Surface charges and optical characteristic of colloidal cubic SiC nanocrystals", *Nanoscale research letters*, vol. 6, pp. 1-7, 2011.
- [23] G. Q. Jin & X. Y. Guo, "Synthesis and characterization of mesoporous silicon carbide", *Microporous and mesoporous materials*, vol. 60, pp. 207-212, 2003.
- [24] J. Ye, S. Zhang & W. E. Lee, "Novel low temperature synthesis and characterisation of hollow silicon carbide spheres", *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 152, pp. 25-30, 2012.
- [25] Y. Chen, P. Renner & H. Liang, "Dispersion of nanoparticles in lubricating oil: A critical review", *Lubricants*, vol. 7, pp. 2-21, 2019.
- [26] S. J. Schoell, A. Oliveros, M. Steenackers, S. E. Sadow & I. D. Sharp, "Multifunctional SiC Surfaces: From Passivation to Biofunctionalization", *Silicon Carbide Biotechnology*, pp. 63-117, 2012.
- [27] M. Xu, M. Wu, S. Wang & M. Guan, "Study on Rheological Properties of SiC Slurry", *Materials Science and Engineering*, vol. 394, pp. 32133, 2018.
- [28] J. Y. Park, Y. J. Lee, K. W. Jun, J. O. Baeg & Yim, D. J. "Chemical synthesis and characterization of highly oil dispersed MgO nanoparticles", *Journal of Industrial and*
- فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۱۲، شماره ۱، صفحه ۴۱-۵۷، بهار ۱۳۹۷.
- [10] H. H. Patil & D. Sangli, "Tribological properties of SiO<sub>2</sub> nanoparticles added in SN-500 base oil", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 2, pp. 763-768, 2013.
- [11] A. Tomala, M. Rodríguez Ripoll, C. Gabler, M. Remskar & M. Kalin "Interactions between MoS<sub>2</sub> nanotubes and conventional additives in model oils", *Tribology International*, vol. 110, pp. 140-150, 2017.
- [12] A. Tomala, M. R. Ripoll, C. Gabler, M. Remškar & M. Kalin, "Interactions between MoS<sub>2</sub> nanotubes and conventional additives in model oils", *Tribology international*, vol. 110, pp.140-150, 2017.
- [13] Z. S. Hu, J. X. Dong & G. X. Chen, "Study on antiwear and reducing friction additive of nanometer ferric oxide", *Tribology international*, vol. 31, pp. 355-360, 1998.
- [14] M. Zhang, X. Wang, X. Fu & Y. Xia, "Performance and anti-wear mechanism of CaCO<sub>3</sub> nanoparticles as a green additive in poly-alpha-olefin", *Tribology International*, vol. 42, pp. 1029-1039, 2009.
- [15] H. Xie, B. Jiang, J. He, X. Xia & F. Pan, "Lubrication performance of MoS<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> nanoparticles as lubricant additives in magnesium alloy-steel contacts", *Tribology International*, vol. 93, pp. 63-70, 2016.
- [16] A. D. Thampi, E. Sneha, B. Sasidharan & S. Rani, "Effect of SiC nanoparticles on the tribological properties of rice bran oil-based Lubricant", *Materials Science and Engineering*, vol. 1114, pp. 12054, 2021.
- [17] A. H. Battez, R. González, J. L. Viesca, J. E. Fernández J. D., Fernández, A. Machado & J. CuO, Riba, "ZrO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants", *Wear*, vol. 265, pp 422-428, 2008.
- [18] L. Chen & D. Zhu, "Preparation and tribological properties of unmodified and oleic acid-modified CuS nanorods as lubricating oil

- [35] T. Luo, X. W. Wei, X. Huang, L. Huang & F. Yang, "Tribological properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles as lubricating oil additives", *Ceram*, vol. 40, pp. 7143–7149, 2014.
- [36] N. P. Suh, S. Jahanmir & I. E. P. Abrahamson, "The delamination theory of wear", vol. 25, pp. 111-124, 1973.
- [37] C. Zhao, Y. K. Chen, Y. Jiao, A. Loya & G. G. Ren, "The preparation and tribological properties of surface modified zinc borate ultrafine powder as a lubricant additive in liquid paraffin", *Tribology International*, vol. 70, pp. 155-164, 2014.
- [38] Y. Ttsuya & R. Takagi, "Lubricating properties of lead films on copper", *Wear*, vol. 7, pp.131-143, 1964.
- [39] T. Luo, X. W. Wei, H. Y. Zhao, G. Y. Cai & X. Y. "Tribology properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> nanocomposites as lubricant additives", *Ceramics International*, vol. 40, pp.10103-10109, 2014.
- [40] A. Leitans, E. Palcevskis, "Tribological Properties of Zirconium Oxide, Spinel and Mullite Nanopowders as Lubricating Oil Additives", In *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd. vol. 721, pp. 451-455. 2017.
- [41] Q. Chen, S. Zheng, S. Yang, W. Li, X. Song & B. Cao, "Enhanced tribology properties of ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite nanoparticles as liquid lubricating additives", *Journal of sol-gel science and technology*, vol. 61, pp. 501-508, 2012.
- [42] Y. Y. Wu, W. C. Tsuia & T. C. Liu, "Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives", *Wear*, vol. 262, pp. 819-825, 2007.
- [43] Q. Chang, P. Rudenko, D. J. Miller, J. Wen, D. Berman, Y. Zhang & A. Erdemir, "Operando formation of an ultra-low friction boundary film from synthetic magnesium silicon hydroxide additive", *Tribology International*, vol. 110, pp. 35-40, 2017.
- engineering chemistry, vol. 12, pp. 882-887, 2006.
- [29] م. تیموری، ا. منشی، و م. کثیری، "سنتز ویسکرهاي کارييد سيليسيم نانو ساختار با مکانيزم بخار- مایع- جامد (VLS)", فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال 7، شماره 4، صفحه 49-55، زمستان 1392.
- [30] ف. صفاری، ا. منشی، ا. م. نوربخش، و م. سلطانپور، "ساخت و بررسی صیقل دهنده مناسب جهت پولیش شیشه با استفاده از ترکیبات سيليس و اکسيد سريم و کارييد سيليسيم"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال 7، شماره 2، صفحه 25-33، تابستان 1392.
- [31] R. Y. Hong, J. H. Li, S. Z. Zhang, H. Z. Li, Y. Zheng, J. M. Ding & D. G. Wei, "Preparation and characterization of silica-coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles used as precursor of ferrofluids", *Applied Surface Science*, vol. 255, pp.3485-3492, 2009.
- [32] M. Pishvaei & T. F. Farshchi, "Synthesis of high solid content polyacrylate/nanosilica latexes via miniemulsion polymerization", vol.19, pp. 707-716. 2010.
- [33] I. M. Kooter, A. J. Pierik, M. Merckx, B. A. Averill, N. Moguilevsky, A. Bollen & R. Wever, "Difference Fourier transform infrared evidence for ester bonds linking the heme group in myeloperoxidase, lactoperoxidase, and eosinophil peroxidase", *Journal of the American Chemical Society*, vol. 119, pp. 11542-11543, 1997.
- [34] M. H. Esfe, M. Bahiraei, M. H. Hajmohammad & M. Afrand, "Rheological characteristics of MgO/oil nanolubricants: experimental study and neural network modeling", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 86, pp. 245-252, 2017.