

## بررسی اثر ضدسایشی نانوذرات مغناطیسی آهن اکسید در روغن موتور چند درجه‌ای در مقایسه با روغن موتور معمولی

فرشته قربانی نایینی<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا اسکندری<sup>۲</sup> و داود ابراهیمی<sup>۳</sup>

- ۱-دکتری شیمی فیزیک، پژوهش نفت ایرانول، تهران، ایران
- ۲-کارشناس ارشد شیمی آلی، پژوهش نفت ایرانول، تهران، ایران
- ۳-کارشناس ارشد شیمی فیزیک، پژوهش نفت ایرانول، تهران، ایران

دریافت: اسفند ۱۳۹۵، بازنگری: آبان ۱۳۹۶، پذیرش: دی ۱۳۹۶

**چکیده:** در این پژوهش، عملکرد ضدسایشی روغن موتور حاوی نانوماده افزودنی نسبت به روغن موتور معمولی با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور نانوذرات مغناطیسی آهن اکسید ( $Fe_3O_4$ ) به‌عنوان نانوماده افزودنی به روغن موتور ایرانول ریسینگ SAE10W40 انتخاب شد. در ابتدا پایداری نانوسیال به دست آمده با نانوذرات با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری جذب مرئی - فرابنفش و پتانسیل زتا تأیید شد. مشخصات نانوذرات آهن اکسید با روش‌های دستگاهی میکروسکوپی تونل‌زنی روبشی (STM)، طیف‌سنجی تفکیک انرژی (EDS) و طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) بررسی شد. نانوذرات دارای قطری در گستره ۸ تا ۱۳ نانومتر بودند. همچنین، توزیع اندازه نانوذرات با استفاده از دستگاه پراکندگی نور دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. عملکرد ضدسایشی نانوذرات  $Fe_3O_4$  در روغن چند درجه‌ای با آزمون‌های چهار ساچمه و فالکس بررسی شد. بررسی نتایج به‌دست آمده به‌طور کلی بیانگر بهبود عملکرد ضدسایشی روغن موتور ناشی از افزودن نانوذرات بود. نانوذرات مغناطیسی آهن اکسید با غلظت ۰/۱ درصد، افزایش قدرت جوش خوردگی روغن موتور چند درجه‌ای از ۷۶/۳۲ به ۹۲/۷۴ کیلوگرم نیرو و افزایش شاخص بار سایش از ۲۵۰ به ۳۱۵ کیلوگرم نیرو را در آزمون چهار ساچمه از خود نشان می‌دهد. افزون بر آن باعث افزایش حد تحمل بارهای خطی از ۱۱۶۰ به ۱۲۲۰ پوند نیرو در مقایسه با روغن موتور معمولی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** روغن موتور چند درجه‌ای، نانوذرات مغناطیسی آهن اکسید، ضدسایش، نانوماده افزودنی

### مقدمه

و یا جامد که میان دو سطح قرار می‌گیرند و یکنواختی حرکت یک سطح بر روی دیگری را بهبود می‌بخشند و از ایجاد آسیب بر روی سطوح جلوگیری می‌کنند روانکار گفته می‌شود. در سامانه‌های روانکاری، بسته به شرایط متفاوت، از رژیم‌های روانکاری

روانکاری دانش آسان سازی حرکت نسبی سطوح در تماس با یکدیگر است. این علم به عنوان یکی از رشته‌های بسیار مهم در علوم مهندسی شناخته می‌شود. به‌طور کلی به لایه‌های گاز، مایع

سیالی که به آن افزوده می‌شوند، می‌دهند که از آن جمله می‌توان به بهبود انتقال گرما و پایداری، کاهش توان لازم برای انتقال سیال، کاهش گرفتگی و انسداد مجاری، کاهش اندازه سامانه‌های انتقال گرما و کاهش هزینه‌ها اشاره کرد. انواع متفاوتی از نانوذرات به‌عنوان افزودنی روانکار مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳ تا ۹]. در سال‌های اخیر، توجه زیادی به بهبود کیفیت سوخت در موتور خودروها شده است. بنابراین، در فرمول‌بندی<sup>۲</sup> روغن موتور به روانکارهایی توجه شده که باعث کاهش گرانشی و اصطکاک می‌شوند [۱۰ تا ۱۲]. در این بین، فرو سیال‌های بر پایه  $Fe_3O_4$  و  $(Fe_2O_3 - \text{مگنیمیت})$  به دلیل ویژگی‌های مغناطیسی و زیست‌سازگاری، بهبود ویژگی‌های روغن مورد استفاده در خودرو، حجم زیادی از مطالعات و بررسی‌ها را به خود اختصاص داده‌اند [۱۳ تا ۲۵]. کالیانی<sup>۳</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۶ به منظور بهبود سایش و اصطکاک روغن هیدرولیک ISO GREED 68 از نانو ذرات  $Fe_3O_4$  در غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۵ استفاده کرده‌اند. در سال ۲۰۱۵ رامچاندرا<sup>۴</sup> به منظور کاهش مصرف سوخت و کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن (NOX) از فرو سیال‌ها در روغن دیزل استفاده کرده است. وانگ<sup>۵</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۱ از نانو اکسید آهن در غلظت‌های بالا (۴٪) به منظور بهبود سایش و اصطکاک در روغن پایه استفاده کرده‌اند. در پژوهش حاضر، از نانوذرات مغناطیسی آهن اکسید با غلظت پایین در روغن موتور ایرانول ریسینگ 10W40 به منظور کمینه‌کردن اصطکاک و افزایش فشار پذیری سامانه در شرایط سخت (ترافیک‌های سنگین و مسیرهای پر شیب) و در نهایت کمینه‌کردن مصرف سوخت استفاده شد. در بیشتر منابع مورد مطالعه به منظور بررسی عملکرد ضدسایشی نانوذرات از نانو سیالات در روغن پایه (SN500, SN600) استفاده شده است. درحالی‌که در کار حاضر، از فرآورده نهایی (روغن موتور چند درجه‌ای<sup>۶</sup>) استفاده شده است تا برهم‌کنش‌های لازم بین روغن موتور و نانوذرات انجام گیرد و در نهایت عملکرد ضدسایشی نانوذرات با روغن موتور چند درجه‌ای مورد بررسی قرار گیرد.

هیدرودینامیک، روانکاری الاستو هیدرودینامیک<sup>۱</sup>، روانکاری جامد و روانکاری مرزی استفاده می‌شود. در سامانه روانکاری مرزی، بیشترین مقدار اصطکاک رخ می‌دهد. کم بودن روغن، سرعت بسیار کم سطوح و یا زیاد بودن بار باعث می‌شود که لایه بسیار نازکی از روانکار (در حد ابعاد مولکولی) تمامی نیروی وارده را تحمل کند. در بسیاری از موارد وقتی روانکاری تحت شرایط مرزی صورت می‌گیرد، چون لایه کامل روغن نمی‌تواند روی سطح فلز باقی بماند، در نتیجه اصطکاک و به دنبال آن ساییدگی افزایش می‌یابد و ممکن است جوش خوردگی موضعی اتفاق بیفتد. برای جلوگیری از جوش خوردگی و کم کردن سایش، مواد افزودنی ضدسایشی مورد نیاز است. سیالات فلزکاری، سیالات هیدرولیک، روغن‌های موتور و گریس‌ها از جمله روانکارهایی هستند که به این مواد افزودنی نیازمندند. در شرایطی که دو سطح تحت شرایط بار و دما زیاد روی یکدیگر بلغزند، اصطکاک و سایش سطوح تماس زیاد است که برای جلوگیری از آن باید از مواد افزودنی فشارپذیر استفاده کرد. به طور کلی افزودنی‌های ضدسایش بیشتر برای کاهش اصطکاک در شرایط فشار متوسط و افزودنی‌های فشارپذیر که واکنش پذیرتر هستند زمانی که فشار روی سامانه زیاد باشد استفاده می‌شوند. با افزایش دما افزودنی‌های ضدسایشی و فشار پذیر با سطح واکنش داده و لایه‌هایی را در سطح فلز به وجود می‌آورند. این لایه‌ها که باعث کاهش اصطکاک و سایش می‌شوند، بسته به ترکیب افزودنی ممکن است لایه‌های فسفید، سولفید، سولفات، اکسیدها و کربیدهای آهن باشند [۱]. امروزه نانوفناوری با به کار بردن نانوذرات به عنوان افزودنی در روانکارها (نانوسیال با پایه روغن) مقدار ساییدگی و اصطکاک با روغن را کاهش می‌دهد و سبب افزایش طول عمر و کیفیت روغن می‌شود. نانوذرات در فاصله بین دو سطح درگیر شده و در منافذ بسیار ریز سطوح قرار می‌گیرند و خواص ضد اصطکاک و ضدسایش به نسبت بالایی در سطوح ایجاد می‌کنند. این ویژگی‌ها ناشی از اندازه بسیار کوچک و سطح ویژه بسیار زیاد این نانوذرات است [۲]. از طرفی نانوذرات ویژگی‌های کاربردی قابل توجهی به

1. Elasto-Hydrodynamic Lubrication 2. Formulation 3. Kalyani 4. Ramachandran 5. Wang 6. Multi grade engine oil

## بخش تجربی

مواد و دستگاه‌ها

یکنواخت، مخلوط به دست آمده به مدت یک ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد با همزن مغناطیسی هم‌زده شد. سپس برای رسیدن به مخلوطی که یک نانوسیال پایدار را تشکیل دهد، از دستگاه همگن‌ساز فراصوت به مدت بیست دقیقه استفاده شد. از آنجایی که دمای مخلوط در نتیجه امواج فراصوت، افزایش می‌یابد. با ایجاد وقفه در اعمال موج، از گرم‌شدن زیاد مخلوط (تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد) و تخریب احتمالی نانوذرات، جلوگیری شد. سپس با دستگاه طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش در فواصل زمانی متفاوت مقدار جذب و طول موج اندازه‌گیری شد. پس از اطمینان از پایداری نانوسیال، نمونه‌های مورد نظر با غلظت‌های متفاوتی از نانوآکسید آهن تحت آزمون‌های سایشی قرار داده شد.

## نتیجه‌ها و بحث

برای بررسی پایداری نانوسیال مغناطیسی از دو روش زیر استفاده شد:

### طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش

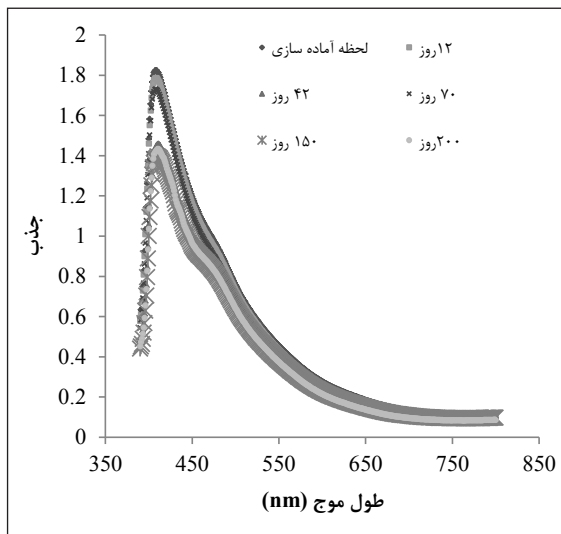
با گرفتن طیف جذبی نانوذرات می‌توان خواص اپتیکی نانوذرات را مورد بررسی قرار داد. ذرات در گستره نانومتری دارای یک پیک جذبی مشخص هستند. برخلاف مواد توده‌ای، نانوذرات دارای خواص اپتیکی منحصر به فردی هستند. عامل‌هایی مانند اندازه و ثابت دی‌الکتریک محیط به شدت بر جابه‌جایی قله جذب نانوذرات تأثیر گذارند. با گذشت زمان ذرات میل به هم چسبیدن دارند و اندازه ذرات بزرگ‌تر می‌شوند. برای اطمینان از پایداری نانوسیال، مقدار جذب و طول موج نانوذرات  $Fe_3O_4$  در غلظت‌های متفاوت با سیال پایه (روغن چند درجه‌ای ریسینگ 10W40 معمولی) در زمان‌های متفاوت با دستگاه طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش اندازه‌گیری می‌شود. در فواصل زمانی متفاوت، طیف جذبی گرفته شده با طیف جذبی اولیه مقایسه می‌شود. اگر موقعیت قله‌ها به سمت طول موج‌های بلندتر تمایل پیدا کند این به آن معناست که ذرات بزرگ‌تر شده و به اصطلاح ذرات به هم چسبیده‌اند، و اگر قله

در این پژوهش، از روغن موتور ایرانول ریسینگ SAE 10W40 از شرکت نفت ایرانول و نانوذرات مغناطیسی آهن اکسید  $(Fe_3O_4)$  ساخت شرکت Specialty Resources FZE استفاده شده است. همچنین، به منظور بررسی پایداری نانوذرات از دستگاه طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش<sup>۱</sup> مدل Cary 100 Conc و دستگاه پراکندگی نور دینامیکی<sup>۲</sup> ساخت شرکت Malvern Instruments Ltd به منظور تعیین توزیع اندازه نانوذرات استفاده شده است. از دستگاه میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی<sup>۳</sup> ساخت شرکت Tescan مدل Mira برای ریخت‌شناسی نانوذرات مغناطیسی آهن اکسید استفاده شده است. همگن‌سازی نانوذرات با دستگاه فراصوت<sup>۴</sup> انجام شد. آزمون چهارساقچه با دستگاه شرکت Stanhop-Seta و طبق روش استاندارد ASTM D2783 انجام گرفت. همچنین، آزمون فالکس با دستگاه FalexPin & VeeBlock Test Machine و طبق روش استاندارد ASTM D3233 مورد بررسی قرار گرفته است.

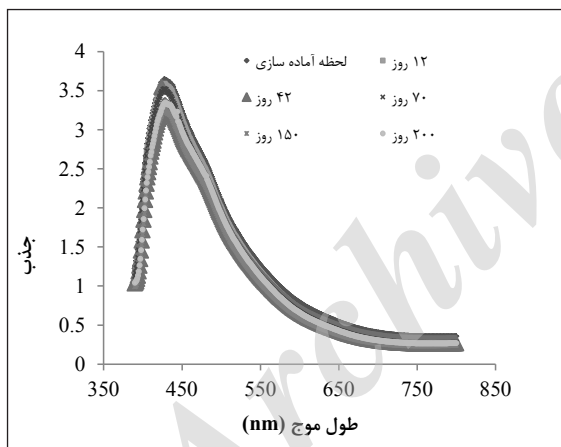
### روش کار

در این پژوهش به منظور بررسی عملکرد تریبولوژیکی نانوذرات  $Fe_3O_4$  در بهبود خاصیت ضدسایشی و کاهش اصطکاک در روغن موتور چند درجه‌ای در مقایسه با روغن موتور معمولی، در ابتدا یک نمونه روغن موتور چند درجه‌ای معمولی طبق ساختار مربوط به روغن موتور ایرانول ریسینگ 10W40 تهیه شد. سپس در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و با استفاده از همزن مغناطیسی به مدت حداکثر ۹۰ دقیقه برای یکنواختی کامل هم‌زده شد. این سیال همچنین به‌عنوان سیال پایه برای آزمایش جذب به کار گرفته شد. در ادامه از مخلوط روغن موتور چند درجه‌ای معمولی به همراه نانوذرات  $Fe_3O_4$  با نسبت‌های وزنی ۰/۰۱ : ۹۹/۹۹، ۰/۰۵ : ۹۹/۹۵ و ۰/۱ : ۹۹/۹۹، استفاده شده است. برای دستیابی به یک مخلوط

1. Ultraviolet-visible spectroscopy 2. Dynamic light scattering 3. Scanning tunneling microscopy 4. Ultrasonic



شکل ۲ طیف جذبی نانو ذرات مغناطیسی اکسید آهن در غلظت ۰/۰۵ در زمان‌های متفاوت



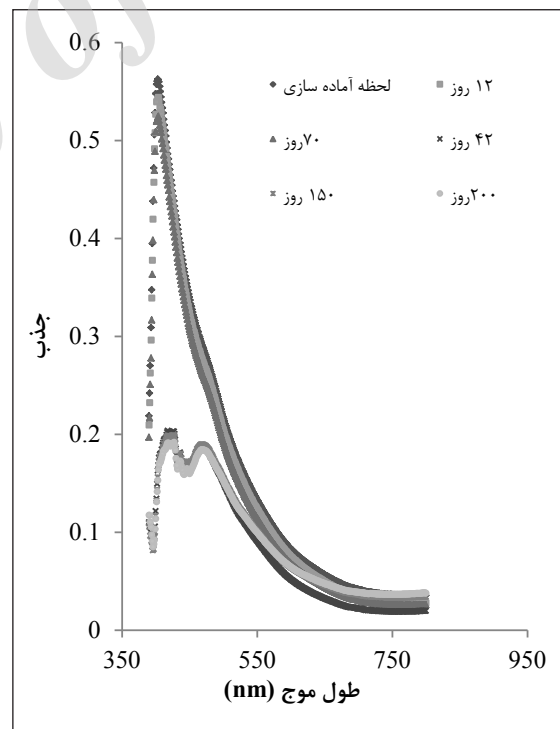
شکل ۳ طیف جذبی نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن در غلظت ۰/۱ در زمان‌های متفاوت

نور دینامیکی، پتانسیل زتا<sup>۱</sup> است. اگر همه ذرات داخل تعلیقه دارای بار منفی و یا مثبت باشند، ذرات تمایل به دفع یکدیگر دارند و تمایلی به هم‌انباشتگی از خود نشان نمی‌دهند و منجر به پایداری خوب تعلیقه می‌شود. تمایل ذرات هم بار به دفع یکدیگر رابطه مستقیمی با پتانسیل زتا دارد. به‌طور کلی مرز پایداری و

جذب اپتیکی در همان محل قبلی باشد و موقعیت آن نسبت به مقدار اولیه تغییر نکند به این معنی است که با گذشت زمان اندازه ذرات تغییر نکرده است و نانوذرات پایدار هستند [۳ و ۳۷ تا ۴۲]. در شکل‌های ۱ تا ۳، مقدار طول موج نانوذرات در زمان‌های صفر (لحظه آماده شدن نانوسیال)، ۱۲، ۴۲، ۷۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ روز پس از آماده‌سازی نمونه به ترتیب در غلظت‌های ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ نشان داده شده است. با گذشت زمان مقدار جذب و طول موج نانوذرات در غلظت‌های وزنی ۰/۰۵ و ۰/۱ بدون تغییر مانده و نشان‌دهنده آن است که با گذشت زمان اندازه ذرات تغییر نکرده و نانوذرات به‌صورت یک تعلیقه کلوئیدی، پایدار هستند.

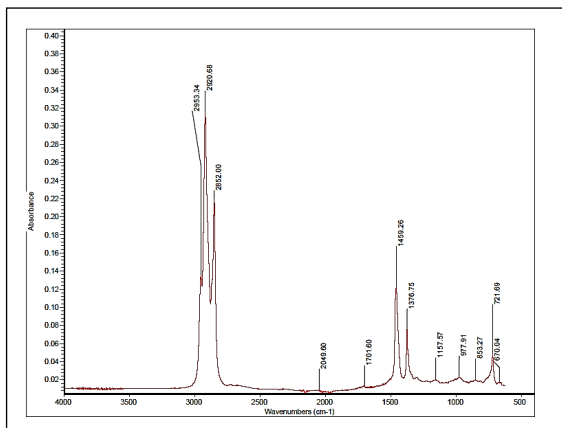
#### پتانسیل زتا

یکی از موارد قابل اندازه‌گیری با استفاده از دستگاه پراکندگی

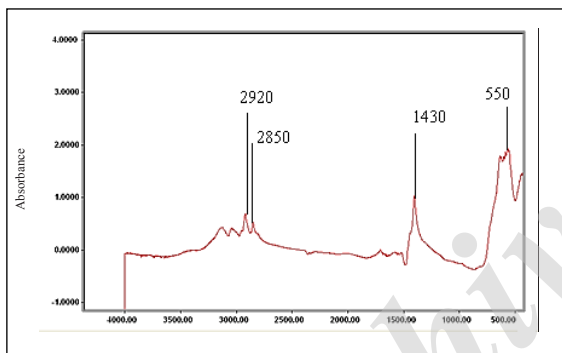


شکل ۴ طیف جذبی نانو ذرات مغناطیسی اکسید آهن در غلظت ۰/۰۱ در زمان‌های متفاوت

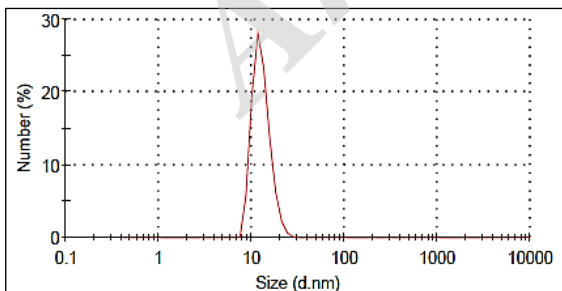
1. Zeta potential



شکل ۴ طیف FT-IR نمونه روغن موتور ریسینگ 10W40 حاوی نانوذرات  $Fe_3O_4$



شکل ۵ طیف FT-IR نانوذرات آهن اکسید



شکل ۶ توزیع اندازه نانوذرات  $Fe_3O_4$  در روغن موتور ریسینگ 10W40

ناپایداری تعلیقه را می‌توان برحسب پتانسیل زتا تعیین کرد. ذراتی که پتانسیل زتای آن‌ها از ۳۰ میلی‌ولت بیشتر و یا از -۳۰ میلی‌ولت کمتر باشد، پایدارند و در نقطه ایزوالکتریک<sup>۱</sup> که پتانسیل زتا در آن نقطه صفر است، سامانه کلوئیدی کمترین پایداری را دارد. در واقع پتانسیل زتا عاملی برای ثبات بالقوه سامانه کلوئیدی است [۲۶ و ۲۷]. با توجه به اهداف این پژوهش برای اطمینان از پایداری نانوسیال مقدار پتانسیل زتا در غلظت ۰٫۱ درصد وزنی از نانوسیال اندازه‌گیری شد که مقدار آن برابر ۱۳۶ mv بود. نتیجه به‌دست آمده حاکی از عدم کلوخه‌شدن ذرات و پایداری تعلیقه است.

#### شناسایی و اندازه‌گیری قطر نانوذرات مغناطیسی آهن اکسید

به منظور شناسایی نانوذرات مغناطیسی از نمونه روغن حاوی نانوذرات، طیف FTIR<sup>۲</sup> گرفته شد [۲۸ تا ۳۱] که در شکل ۴ دیده می‌شود. در این طیف، پیک ناحیه<sup>۱</sup>  $cm^{-1}$  ۲۹۲۰ و  $cm^{-1}$  ۲۸۵۲ مربوط به ارتعاشات کششی نامتقارن و متقارن  $CH_2$  و پیک‌های ناحیه<sup>۲</sup>  $cm^{-1}$  ۱۱۵۷ تا  $cm^{-1}$  ۱۴۵۹ مربوط به ارتعاشات خمشی گروه‌های الکیلی هستند. پیک مربوط به ناحیه  $cm^{-1}$  ۶۷۰ مربوط به ارتعاشات کششی Fe-O در حضور روغن موتور چند درجه‌ای است. طیف FTIR نانوذرات مغناطیسی آهن اکسید در شکل ۵ آورده شده است. در این شکل، پیک  $cm^{-1}$  ۵۵۰ ارتعاشات کششی Fe-O مربوط به نانوذرات آهن اکسید است.

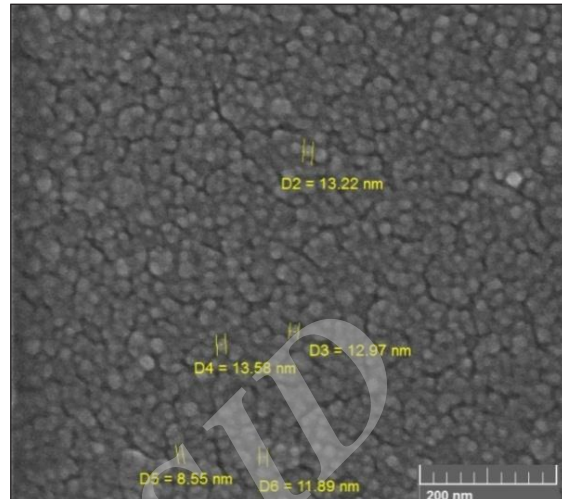
برای تعیین توزیع ذرات نانومغناطیسی در روغن موتور ریسینگ 10W40 از دستگاه پراکندگی نور دینامیکی استفاده شد. توزیع اندازه<sup>۳</sup> ذرات نمونه روغن حاوی ۰٫۱ درصد نانوماده مورد بررسی قرار گرفت. این توزیع ذرات در شکل ۶ نشان داده شده است. برای بررسی قطر نانوذرات از میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی (STM) استفاده شد. همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود قطر نانوذرات در گستره ۱۳-۸ نانومتر است. شکل ۸ مربوط به طیف تفکیک انرژی (EDS) از نمونه نانوآکسید آهن است که پیک‌های مربوط به نانوذرات مغناطیسی آهن اکسید در آن قابل مشاهده است.

1. Isoelectric point      2. Fourier transform infrared      3. Size distribution

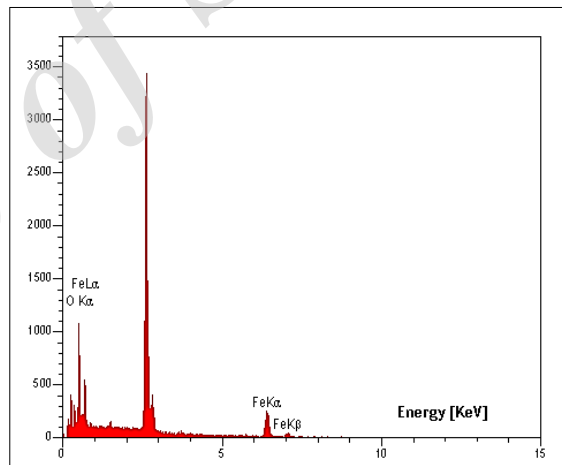
می‌گیرند. از این آزمایش برای اندازه‌گیری توانایی روغن دنده و سایر روانکارها در جلوگیری از سایش قطعات استفاده می‌شود. آزمایش در یک سرعت، دما و بار مشخص انجام شد. پس از پایان آزمایش میانگین قطر اثرسایش روی سه ساچمه ثابت به عنوان نتیجه آزمایش گزارش می‌شود. همچنین این آزمایش برای ارزیابی بازده روغن در بارهای خیلی زیاد نیز است. برای این منظور، ساچمه بالایی با سرعت  $1770 \pm 60$  دور در دقیقه، روی سه ساچمه ثابت پایینی می‌چرخد (ولی دمای آزمایش، کنترل شده نیست). زمان هر آزمایش ده ثانیه است. اگر در این بازه زمانی ساچمه‌ها به هم جوش نخورند، مقدار بار افزایش می‌یابد و این روال تا زمانی که ساچمه دوران کننده به سه ساچمه ثابت جوش بخورد ادامه می‌یابد. در عمل با افزایش بار (فشار)، روغن از بین قطعات فلزی کنار کشیده شده و در نتیجه دو قطعه فلزی با یک دیگر تماس پیدا می‌کنند. این مسئله توأم با جوش خوردگی‌های موقت و جدا شدن‌های متوالی روغن شده و باعث فرسایش شدید قطعات می‌شود. درخاتمه نتیجه این آزمایش به صورت نقطه جوش خوردن<sup>۳</sup> (مقدار باری که باعث جوش خوردن ساچمه‌ها شده است) و شاخص بارسایش<sup>۴</sup> گزارش می‌شود. شاخص بار سایش برابر با میانگین بارهای به کار برده شده برای ده آزمایش پیش از رسیدن به نقطه جوش خوردن چهار ساچمه به یکدیگر است. این شاخص توانایی روانکار را در به حداقل رساندن سایش در بار اعمال شده نشان می‌دهد و تنها عاملی است که رفتار فشار پذیری روانکار را پیش از نقطه جوش خوردگی نشان می‌دهد. هرچه این مقدار بیشتر باشد خواص فشار پذیری سامانه بهتر خواهد بود. شکل ۹، الگو میانگین قطر خراش در برابر بار اعمال شده را نشان می‌دهد. در این شکل نخستین خط نمایش داده شده، خط هرتز<sup>۵</sup> است که میانگین قطر خراش بر حسب میلی‌متر، که از یک فرورفتگی که با تغییر شکل توپ‌ها تحت بار ایستایی (پیش از انجام آزمون) ایجاد شده است را نشان می‌دهد. قطر خراش از معادله ۱ به دست آمد.

$$D_h = 8.73 \times 10^{-2} (p)^{1/3} \quad (1)$$

که در آن  $D_h$  قطر خراش و  $P$  بار اعمال شده در حالت ایستایی



شکل ۷ تصویر STM از نانو ذرات مغناطیسی اکسید آهن



شکل ۸ طیف تفکیک انرژی (EDS) از نمونه نانو اکسید آهن

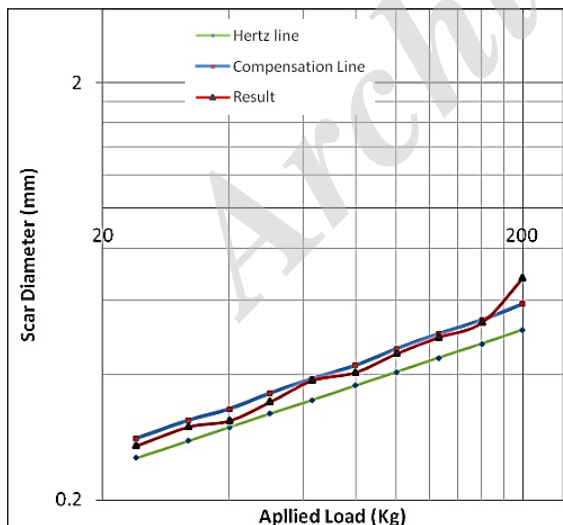
### ارزیابی ویژگی‌های تریبولوژیکی نانوذرات $Fe_3O_4$

رفتار تریبولوژیکی نانوذرات مغناطیسی در غلظت‌های متفاوت با روغن معمولی چند درجه‌ای با آزمون چهار ساچمه<sup>۱</sup> و فالکس<sup>۲</sup> مورد ارزیابی قرار گرفت [۳۳ تا ۳۶]. در آزمون چهار ساچمه، سه ساچمه در پایین قرار گرفته و در یک محفظه محکم به یکدیگر نگه‌داشته می‌شود و ساچمه دیگر روی این سه ساچمه، روی یک محور می‌چرخد. ساچمه‌ها داخل روغن مورد آزمایش قرار

1. Zeta potential    2. Falex test    3. Weld point    4. Load wear index    5. Hertz line

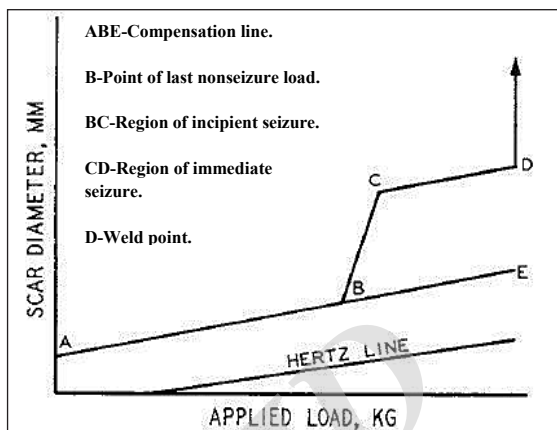


متوسط قطر خراش بر حسب میلی‌متر و مربوط به نتیجه آزمون است. شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ به ترتیب نتایج قطر خراش در برابر بار اعمال شده در روغن موتور معمولی چند درجه‌ای و همچنین روغن موتور چند درجه‌ای حاوی غلظت‌های وزنی ۰٫۰۱، ۰٫۰۵ و ۰٫۱ از نانوذرات  $Fe_3O_4$  را نشان می‌دهد. همچنین، جدول‌های ۱ تا ۴ به ترتیب نتایج آزمون چهار ساچمه مربوط به روغن موتور معمولی چند درجه‌ای و همچنین روغن موتور چند درجه‌ای حاوی غلظت‌های متفاوتی از نانوذرات  $Fe_3O_4$  را نشان می‌دهد. جدول ۵ مقایسه خواص سایشی روغن موتور معمولی و روغن موتور حاوی نانوذرات  $Fe_3O_4$  در غلظت‌های متفاوت به دست آمده از آزمون‌های چهار ساچمه و فالکس را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از آزمون چهار ساچمه حاکی از آن است که شاخص بار سایش در روغن حاوی نانوذرات نسبت به روغن معمولی افزایش پیدا کرده است. همچنین، با افزایش غلظت نانوذرات از ۰٫۰۱ به ۰٫۱ این شاخص بیشتر شده است. نتایج نشان می‌دهد، افزودن مقدار ۰٫۱ درصد از نانوذرات مغناطیسی به روغن چند درجه‌ای منجر به ارتقای قابل توجه نقطه جوش خوردگی ساچمه‌ها در آزمون چهار ساچمه نسبت به روغن معمولی می‌شود. همچنین افزایش نانوذرات  $Fe_3O_4$  به



شکل ۱۰ قطر خراش در برابر بار اعمال شده در روغن موتور معمولی چند درجه‌ای ریسینگ 10W40

1. Compensation Line      2. Corrected Load



شکل ۹ الگو تغییر قطر خراش در برابر بار اعمال شده

است. دومین خط در شکل ۹، خط تصحیح<sup>۱</sup> است (نقاط ABE). این خط، نشان دهنده میانگین قطر خراش بر حسب میلی‌متر بر روی توپ‌های ثابت، در اثر چرخش توپ متحرک، تحت بارهای اعمال شده و در حضور روغن استاندارد این دستگاه پیش از نقطه گریپاژ و جوش خوردگی است. نقطه B در شکل ۹ مربوط به آخرین وزنه پیش از درگیر شدن (گریپاژ) ساچمه‌ها با ساچمه متحرک است. در محدوده B-C قطر خراش افزایش یافته و مرحله ابتدایی درگیر شدن ساچمه‌ها است. در محدوده C-D درگیری ساچمه‌ها به طور کامل رخ داده و در نهایت در نقطه D جوش خوردگی صورت می‌گیرد. در روغن‌هایی که از افزودنی‌های ضدسایش استفاده می‌شود، قطر خراش کمتر شده و گستره B به بعد مشاهده نمی‌شود.

به منظور محاسبه شاخص بار سایش از معادله ۲ استفاده می‌شود.

$$A / 10 = \text{شاخص بار سایش (kgf)} \quad (2)$$

که در آن، A مجموع بارهای تصحیح شده<sup>۲</sup> در ده آزمایش پیش از نقطه جوش خوردگی است.

بار تصحیح شده از معادله ۳ به دست آمد.

$$LD_{1/2} / X = \text{بار تصحیح شده (kgf)} \quad (3)$$

که در آن، L بار اعمال شده بر حسب کیلوگرم نیرو، Dh قطر خراش مربوط به خط هرترز بر حسب میلی‌متر است و X

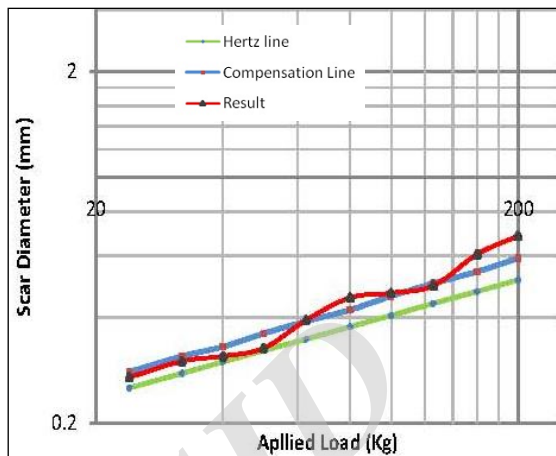
روغن چند درجه‌ای باعث تغییر و افزایش نتایج آزمون فالکس (حد تحمل بارهای خطی) نسبت به روغن معمولی شده است. آزمون فالکس روشی برای تعیین مشخصه تأثیر فشار زیاد یا مشخصه ضداصطکاک روغن‌ها و گریس‌ها است.

### نتیجه‌گیری

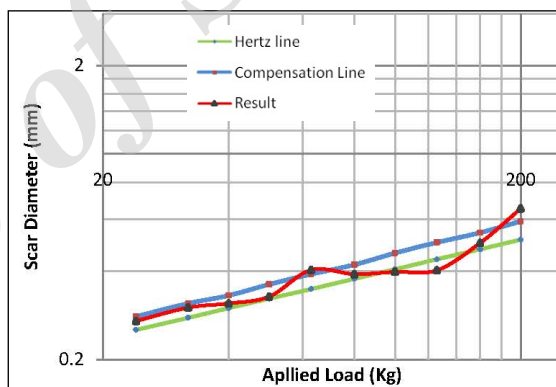
ویژگی‌های ضدسایشی روغن موتور چند درجه‌ای ایرانول ریسینگ 10W40 حاوی نانوذرات  $Fe_3O_4$  در غلظت‌های متفاوت، در مقایسه با روغن موتور چند درجه‌ای معمولی مورد بررسی قرار گرفته شد. نتایج نشان داد که در غلظت ۰٫۱٪ و ۰٫۰۱٪، شاخص بار سایش بیشتر و نقطه جوش خوردگی ساچمه‌ها در آزمون چهارساچمه افزایش می‌یابد. همچنین، بر اساس آزمون فالکس، حد تحمل بارهای خطی در غلظت‌های کار شده از نانوذرات در روغن چند درجه‌ای در مقایسه با روغن موتور چند درجه‌ای معمولی افزایش یافته است. به دلیل اندازه بسیار کوچک و سطح ویژه بسیار زیاد این نانوذرات ویژگی‌های ضداصطکاک و ضدسایش به نسبت بالایی در سطح ایجاد می‌کنند. در مقایسه با سایر مطالعات انجام گرفته در منابع در این مقاله به منظور عملکرد بهتر روغن با نانو اکسید آهن از روغن موتور چند درجه‌ای به جای روغن پایه و ذرات با قطر کمتر از ۱۵ نانومتر به منظور پراکندگی بهتر استفاده شده است. به این ترتیب نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانو اکسید آهن با قطر ۸ تا ۱۳ نانومتر با غلظت‌های بررسی شده در روغن موتور چند درجه‌ای ایرانول ریسینگ 10W40 سازگاری داشته است و ویژگی‌های پراکندگی آن در روغن موتور مطلوب است. بنابراین، از این نانوذرات می‌توان برای بهبود خواص فشارپذیری، ضدسایشی و کاهش اصطکاک در روغن‌های موتوری استفاده کرد.

### سپاسگزاری

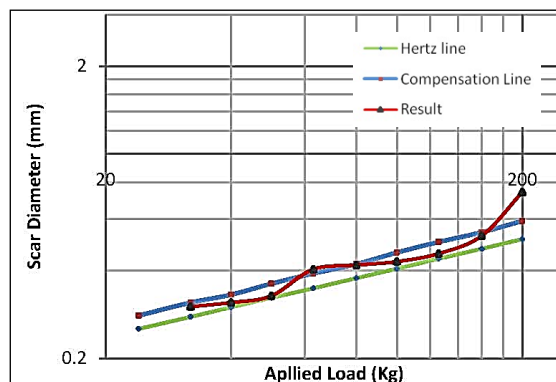
بدین وسیله از مدیریت پژوهش و توسعه شرکت نفت ایرانول برای حمایت مالی این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.



شکل ۱۱ قطر خراش در برابر بار اعمال شده در غلظت ۰٫۱ از نانوذرات  $Fe_3O_4$



شکل ۱۲ قطر خراش در برابر بار اعمال شده در غلظت ۰٫۰۵ از نانوذرات  $Fe_3O_4$



شکل ۱۳ قطر خراش در برابر بار اعمال شده در غلظت ۰٫۱ از نانوذرات  $Fe_3O_4$



جدول ۱ نتایج آزمون چهارساجمه مربوط به روغن موتور معمولی چند درجه‌ای ریسینگ 10W40

میزان بار اعمال شده (kgf)	نتایج آزمون (X) (mm)	خط هر تزی (mm)	خط تصحیح (mm)	فاکتور LD <sub>h</sub> (mm)	بار تصحیح شده (kgf)
۲۴	۰٫۲۷	۰٫۲۵۲	۰٫۲۸	۶٫۰۵	۲۲٫۴۱
۳۲	۰٫۳۰	۰٫۲۷۷	۰٫۳۱	۸٫۸۷	۲۹٫۶۷
۴۰	۰٫۳۱	۰٫۲۰۰	۰٫۳۳	۱۱٫۹۶	۳۸٫۵۸
۵۰	۰٫۳۴	۰٫۳۲۲	۰٫۳۶	۱۶٫۱۰	۴۶٫۸۰
۶۳	۰٫۳۹	۰٫۳۴۷	۰٫۳۹	۲۱٫۸۶	۵۶٫۴۸
۸۰	۰٫۴۱	۰٫۳۷۶	۰٫۴۲	۳۰٫۰۸	۷۴٫۲۷
۱۰۰	۰٫۴۵	۰٫۴۰۵	۰٫۴۶	۴۰٫۵۰	۹۰٫۲۰
۱۲۶	۰٫۴۹	۰٫۴۳۸	۰٫۵۰	۵۵٫۲۰	۱۱۲٫۴۲
۱۶۰	۰٫۵۳	۰٫۴۷۴	۰٫۵۴	۷۵٫۸۰	۱۴۲٫۲۱
۲۰۰	۰٫۶۸	۰٫۵۱۱	۰٫۵۹	۱۰۲٫۲۰	۱۵۰٫۲۹
مجموع					۷۶۳٫۲۴

جدول ۳ نتایج آزمون چهارساجمه مربوط به روغن موتور چند درجه‌ای به همراه نانوذرات Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> در غلظت ۰٫۰۵ درصد وزنی

میزان بار اعمال شده (kgf)	نتایج آزمون (X) (mm)	خط هر تزی (mm)	خط تصحیح (mm)	فاکتور LD <sub>h</sub> (mm)	بار تصحیح شده (kgf)
۲۴	۰٫۲۷	۰٫۲۵۲	۰٫۲۸	۶٫۰۵	۲۲٫۴۰۷۴
۳۲	۰٫۳۰	۰٫۲۷۷	۰٫۳۱	۸٫۸۷	۲۹٫۵۶۶۷
۴۰	۰٫۳۱	۰٫۲۹۹	۰٫۳۳	۱۱٫۹۶	۳۸٫۵۸۰۷
۵۰	۰٫۳۳	۰٫۳۲۲	۰٫۳۶	۱۶٫۱۰	۴۹٫۲۳۵۵
۶۳	۰٫۴۰	۰٫۳۴۷	۰٫۳۹	۲۱٫۸۶	۵۴٫۲۴۳۲
۸۰	۰٫۳۹	۰٫۳۷۶	۰٫۴۲	۳۰٫۰۸	۷۷٫۱۲۸۲
۱۰۰	۰٫۴۷	۰٫۴۰۵	۰٫۴۶	۴۰٫۵۰	۱۰۲٫۱۵۱
۱۲۶	۰٫۴۰	۰٫۴۳۸	۰٫۵۰	۵۵٫۲۰	۱۳۷٫۳۱۳۴
۱۶۰	۰٫۵۰	۰٫۴۷۴	۰٫۵۴	۷۵٫۸۰	۱۵۲٫۲۰۸۸
۲۰۰	۰٫۶۵	۰٫۵۱۱	۰٫۵۹	۱۰۲٫۲۰	۱۵۶٫۷۴۸۵
مجموع					۸۱۹٫۴۷۴

جدول ۲ نتایج آزمون چهارساجمه مربوط به روغن موتور چند درجه‌ای به همراه نانوذرات Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> در غلظت ۰٫۰۱ درصد وزنی

میزان بار اعمال شده (kgf)	نتایج آزمون (X) (mm)	خط هر تزی (mm)	خط تصحیح (mm)	فاکتور LD <sub>h</sub> (mm)	بار تصحیح شده (kgf)
۲۴	۰٫۲۷	۰٫۲۵۲	۰٫۲۸	۶٫۰۵	۲۲٫۴۰۷۴
۳۲	۰٫۳۰	۰٫۲۷۷	۰٫۳۱	۸٫۸۷	۲۹٫۵۶۶۷
۴۰	۰٫۳۱	۰٫۲۹۹	۰٫۳۳	۱۱٫۹۶	۳۸٫۵۶۰۷
۵۰	۰٫۳۳	۰٫۳۲۲	۰٫۳۶	۱۶٫۱۰	۴۹٫۲۳۵۵
۶۳	۰٫۳۹	۰٫۳۴۷	۰٫۳۹	۲۱٫۸۶	۵۵٫۶۲۳۴
۸۰	۰٫۴۶	۰٫۳۷۶	۰٫۴۲	۳۰٫۰۸	۶۶٫۱۰۹۹
۱۰۰	۰٫۴۷	۰٫۴۰۵	۰٫۴۶	۴۰٫۵۰	۸۶٫۳۵۳۹
۱۲۶	۰٫۴۹	۰٫۴۳۸	۰٫۵۰	۵۵٫۲۰	۱۱۲٫۱۹۵۱
۱۶۰	۰٫۶۱	۰٫۴۷۴	۰٫۵۴	۷۵٫۸۰	۱۲۵٫۲۸۹۳
۲۰۰	۰٫۶۸	۰٫۵۱۱	۰٫۵۹	۱۰۲٫۲۰	۱۴۹٫۸۵۳۴
مجموع					۷۳۵٫۲۱۵۲

جدول ۴ نتایج آزمون چهارساقچه مربوط به روغن موتور چند درجه‌ای به همراه نانوذرات  $Fe_3O_4$  در غلظت ۰/۱ درصد وزنی

میزان بار اعمال شده (kgf)	نتایج آزمون (X) (mm)	خط هر تزی (mm)	خط تصحیح (mm)	فاکتور $LD_h$ (mm)	بار تصحیح شده (kgf)
۲۴	۰/۲۷	۰/۲۵۲	۰/۲۸	۶/۰۵	۲۲/۴۰۷۴
۳۲	۰/۳۱	۰/۲۹۹	۰/۳۳	۱۱/۹۶	۳۸/۵۸۰۷
۴۰	۰/۳۲۷	۰/۳۲۲	۰/۳۶	۱۶/۱۰	۴۹/۲۳۵۵
۵۰	۰/۴۰۳	۰/۳۴۷	۰/۳۹	۲۱/۸۶	۵۴/۲۴۳۲
۶۳	۰/۴۱۶	۰/۳۷۶	۰/۴۲	۳۰/۰۸	۷۲/۳۰۷۷
۸۰	۰/۴۲۸	۰/۴۰۵	۰/۴۶	۴۰/۵۰	۹۴/۶۲۶۲
۱۰۰	۰/۴۵۶	۰/۴۳۸	۰/۵۰	۵۵/۲۰	۱۲۱/۰۵۲۶
۱۲۶	۰/۵۲۵	۰/۴۷۴	۰/۵۴	۷۵/۸۰	۱۴۴/۳۸۱۰
۱۶۰	۰/۷۴۰	۰/۵۱۱	۰/۵۹	۱۰۲/۲۰	۱۳۸/۱۰۸۱
۲۰۰	۰/۷۴۲	۰/۵۵۰		۱۳۷/۵۰	۱۸۵/۳۱۰۰
مجموع					۹۲۷/۴۱۱۵

جدول ۵ مقایسه خواص سایشی روغن موتور معمولی و روغن موتور حاوی نانوذرات  $Fe_3O_4$  در غلظت‌های متفاوت به دست آمده از آزمون چهارساقچه و فالکس

روانکارهای مورد آزمون	بار شکست آزمون فالکس (lbf)	نقطه جوش در آزمون چهارساقچه (kgf)	شاخص بار سایش در آزمون چهارساقچه (kgf)
ریسینگ 10W40	۱۱۶۰	۲۵۰	۷۶/۳۲
روغن ریسینگ چند درجه‌ای + ۰/۰۱ درصد وزنی نانوذرات $Fe_3O_4$	۱۱۷۰	۲۵۰	۷۳/۵۲
روغن ریسینگ چند درجه‌ای + ۰/۰۵ درصد وزنی نانوذرات $Fe_3O_4$	۱۱۹۰	۲۵۰	۸۱/۹۴
روغن ریسینگ چند درجه‌ای + ۰/۱ درصد وزنی نانوذرات $Fe_3O_4$	۱۲۲۰	۳۱۵	۹۲/۷۴

## مراجع

- [1]. سلیمانی ارده جانی، م؛ فضلی خانی، م؛ ویسمه، ر؛ فرجی [1]. آمیخته ای از نانوذرات در روغن‌های روانکار "، پایاننامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۹.
- [2]. Chen, L.; Zhang, D.; Chen, J.; Zhou, H.; Wan, H.; Mater. Sci. Eng. A. 415, 156-161, 2006.
- [3]. سلیمانی اسبو کلایی، ص؛ "بررسی رفتار اصطکاک و سایشی [4]. شکرریز، م؛ روزبهانی، آ؛ بیابانی، ط؛ وکیلی، ف؛ نشریه پژوهش‌های کاربردی در شیمی، سال هفتم، شماره ۴-۶۹-۱۳۹۲، ۶۳.
- [5]. Joly-Pottuz, L.; Vacher, B.; Ohmae, N.; Mar-

- tin, J.M.; Epicier, T.; Tribology Letters 30, 69-80, 2008.
- [6]. Joly-Pottuz, L.; Vacher, B.; Le, M.; Martin, J. M.; Mieno, T.; He, C.N.; Zhao, N.Q.; Tribology Letters 29, 213-219, 2008.
- [7]. Chou, C.C.; Lee, S.H.; J. Mater. Synth. Process. 201, 542-54, 2008.
- [8]. Joly-Pottuz, L.; Dassenoy, F.; Belin, M.; Vacher, B.; Martin, J.M.; Fleischer, N.; Tribology Letters, 18(40, 477-485. 2005.
- [9]. Bakunin, V.N.; Suslov, A.Yu.; Kuzmina, G.N.; Parenago, O.P.; J. Nano. Res. 6, 273-284, 2004.
- [10]. Bissessur, R.; Liu, P.K.Y.; Solid State Ionics, 177, 191-196, 2006.
- [11]. Haviland, M.L.; Goodwin, M.C.; SAE Technical Paper 790, 945, 1979.
- [12]. Haviland, M.L.; Linden, J.L.; SAE Technical Paper 821,227,1982.
- [13]. گیوه‌کی، ت؛ قاسمی، آ؛ نجفی، ف؛ باغشاهی، س؛ نعمتی، ع؛ مجله‌ی علم و مهندسی سرامیک ۱، ۹-۱۹، ۱۳۹۱
- [14]. Ramachandran, S.B.; Int. J. Sci. Res. Public. 5, 1-4, 2015.
- [15]. Kalyani, R.; Chockalingam, G.; Gurunathan, K.; Adv. Sci. Eng. Med. 8, 228-232, 2016.
- [16]. Wang, S.; Liu, S.; Liu, T.; Proceedings of Int. Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), Xian-Ning, China, 4960 – 4963, 2011.
- [17]. Jang, J.H.; Lim, H.B.; Microchem. J. 94, 148-158, 2010.
- [18]. Saurín, N.; Espinosa, T.; Sanes, J.; Carrión, F.J.; Bermúdez, M.D.; Lubricants. 3, 650-663, 2015.
- [19]. Bermúdez, M.D.; Jiménez, A.E.; Sanes, J.; Carrión, F.J.; Molecules 14, 2888-2908, 2009.
- [20]. Yu, X.; Jiang, Z.; Wei, D.; Zhou, C.; Huang, Q.; Yang, D.; Wear. 302 (1-2), 1286-1294, 2013.
- [21]. Patel, S.J.; Deheri, G.M.; Patel, J.R.; Tribology in Industry 36, 259-268, 2014.
- [22]. Patel, J.R.; Deheri, G.; Mech. Eng. 14, 89-99, 2016.
- [23]. Song, X.; Qiu, Z.; Yang, X.; Gong, H.; Zheng, S.; Cao, B.; Wang, H.; Möhwald, H.; Shchukin, D.; Chem. Mater. 26(17), 5113-5119, 2014.
- [24]. Huang, W.; Shen, C.; Liao, S.; Wang, X.; Tribol. Lett. 41(1), 145-151, 2011.
- [25]. Ellahi, R.; Zeeshan, A.; Hassan, M.J.; Zhejiang Univ-Sci A (Appl Phys & Eng).1-12, 2015.
- [26]. قرایلو، د؛ مراده، س؛ مجله دانش آزمایشگاهی ایران ۱، ۲۰-۱۳۹۴، ۱۴.
- [27]. قرایلو، د؛ معین درباری، م؛ مجله دانش آزمایشگاهی ایران ۱، ۳۶-۱۳۹۳، ۳۰.
- [28]. Silva, V.A.J.; Andrade, P.L.; Silva, M.P.C.; Bustamante, A.; Santos, L.D.; Valladares, D.; Albino, A.; J. Magn. Mater. 343, 138-143, 2013.
- [29]. Mahdavi, M.; Bin Ahmad, M.; Jelas Haron, Md.; Namvar, F.; Nadi, B.; Zaki Ab Rahman, M.; Amin, J.; Molecules 18, 7533-7548, 2013.
- [30]. Sharafi, A.; Seyedsadjadi, M.; Int. J. BioInorg. Hybrid Nanomater 3, 437-441, 2013.
- [31]. Andrade, A.L.; Souza, D.M.; Pereira, M.C.; Fabris, J.D.; Domingues, R.Z.; Cerâmica 55, 420-424, 2009.
- [32]. Spânu, C.; Rîpă, M.; Ștefănescu, I.; Deleanu, L.; The Annals of University “Dunarea de Jos” of Galati Fascicle VIII, Tribology 13, 99-103, 2007.
- [33]. ASTM D2783-03, Standard Test Method for Wear Preventive Characteristics of Lubricating Fluid (Four-Ball Method).

- [34]. ASTM D3233-93 (Reapproved 1998), Standard Test Method for Measurement of Extreme Pressure Properties of Fluid Lubricants (Falex Pin and Vee Block Method).
- [35]. Srinivas, V.; Kodanda Rama Rao, Ch.; Abyudaya, M.; Siva Jyothi, E.; *Uni. J. Mech. Eng.* 2, 220-225, 2014.
- [36]. شکرریز، م؛ حاجی علی اکبری، ف؛ ابراهیم پوررضایی، آ؛ مجله پژوهش نفت ۸۰، ۵۴-۶۲، ۱۳۹۲.
- [37]. حسینی، س.ح؛ محمدی، م؛ مجله فناوری نانو ۴، ۲۸-۳۲، ۱۳۹۲.
- [38]. Safaei-Naeini, Y.; Aminzare, M.; Golestani-Fard, F.; Khorasanizadeh, F.; Salahi, E.; *Iranian J. Mater. Sci. Eng. (IJMSE)* 9(1), 62-68, 2012.
- [39]. Srinivas Rao, D.; Kishora Dash, R.; *Adv. Mater. Lett.* 6(3), 247-251, 2015.
- [40]. Ching-Song, J.; Der-chi, T.; Tun-Ping, T.; Chang, H.; Tsing-Tshih, T.; Chih-Yu, L.; Chi-Hsiang, L.; *Rev. Adv. Mater. Sci.* 10, 283-288, 2005.
- [41]. Sadeghi, R.; Etemad, S.Gh.; Keshavarzi, E.; Haghshenasfard, M.; *Microfluid Nanofluid* 18 (5-6), 1023-1030, 2014.
- [42]. Atiya, E.G.; Mansour, Diaa-Eldin A.; Khattab, R.M.; Azmy, A.M.; *IEEE. Trans. Dielectr. Insul.* 22(5), 2463-2472, 2015.

## Investigation of anti-wear effect of magnetic iron oxide nanoparticles in multi-grade engine oil compared to conventional engine oil

F. Ghorbani Naeini<sup>1,\*</sup>, H.R. Eskandari<sup>2</sup>, D. Ebrahimi<sup>3</sup>

1. Assistant Prof. in Physical Chemistry, Research Institute of Iranol Oil Company, Tehran, Iran
2. MSc in Organic Chemistry, Research Institute of Iranol Oil Company, Tehran, Iran
3. MSc in Physical Chemistry, Research Institute of Iranol Oil Company, Tehran, Iran

Received: March 2017, Revised: November 2017, Accepted: January 2018

**Abstract:** In this study, the performance of anti-wear in engine oil which contain nanomaterial additive has been compared and evaluated to conventional engine oil, by using laboratory tests. For this purpose, magnetic iron oxide nanoparticles ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) as a nanomaterial additive were selected to use in Iranol Racing engine oil, SAE 10W40. At first the stability of the nano-fluid, obtained by the nanoparticles, was confirmed by using UV and zeta potential devices. The iron oxide nanoparticles were characterized by scanning tunneling microscopy (STM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS), and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The nanoparticles have a diameter in the range of 8-13 nm. Size distribution of nanoparticles by dynamic light scattering (DLS) was also investigated. Anti-wear performance of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles in multi-grade engine oil was evaluated by means of the four ball and falex test. The results generally indicate the improvement of anti-wear performance engine oil which was prepared by adding nanoparticles. Magnetic iron oxide nanoparticles with concentration of 0.1 percent, increase weld strength from 76.32 to 92.74 kgf and load wear index (LWI) from 250 to 315 kgf, in the four ball test. Additionally it has increased the falex test results (linear load carrying) from 1160 to 1220 lbf, compared to conventional engine oil.

**Keywords:** Multi-grade engine oil, Magnetic iron oxide nanoparticles, Anti-wear, Nanomaterial