

بررسی تأثیر نانوذره‌ها روی ویژگی‌های روغن‌های روان‌کننده و میزان عملکرد آن در کاهش سایش

خدیجه دیده بان⁺، شیدا براغ

گروه شیمی، دانشگاه پیام نور تهران، ایران

چکیده: نانوذره‌ها تأثیر مهمی در بهبود عملکرد روغن موتور به ویژه در کاهش سایش دارند. در این پژوهش، از نانوذره‌های MOS_2 و Al_2O_3 برای بهبود عملکرد روغن و کاهش سایش استفاده شده است. نانوذره‌ها پس از تهیه با نسبت‌های وزنی گوناگون به روغن موتور SN10W40 افزوده شد. آزمون‌های گرانونی، نقطه اشتعال، نقطه انجماد و چهارساجمه روی فرآورده انجام شده و نتیجه‌ها با روغن بدون نانوذره‌ها مورد مقایسه قرار گرفت. نتیجه‌ها نشان داد که افزودن نانوذره‌های MOS_2 و Al_2O_3 به روغن موتور باعث بهبود عملکرد سایشی آن شد که از بین این دو، MOS_2 نتیجه‌های بهتری از خود نشان داد. افزودن نانوذره‌های MnO_2 به روغن، انتقال گرمایی روغن را بهبود داد.

واژه‌های کلیدی: روغن روانکار؛ ویژگی‌های سایشی؛ نانوذره‌ها؛ MnO_2 ؛ Al_2O_3 ؛ MOS_2

KEYWORDS: Lubricant Oil; Wear property; Nanoparticles; MOS_2 ; Al_2O_3 ; MnO_2 .

مقدمه

که در نتیجه لغزش ذرات روان‌کننده بر روی یکدیگر ایجاد می‌شود بایستی با سرعت و به طور مؤثر از محل روانکاری (به عنوان نمونه یاتاقان) منتقل شود بدون آن که اثر ناخواسته‌ای بر سطوح در حرکت نسبی بگذارد. بنابراین یک روان‌کننده خوب بایستی دارای قابلیت جذب و انتقال گرما باشد [۱، ۲]. روانکارها را در یک نگاه کلی می‌توان به دو دسته بزرگ روانکارهای خودرو و روانکارهای صنعتی تقسیم کرد. درصد زیادی از روغن‌های روان‌کننده که بر پایه روغن‌های نفتی تولید می‌شود صرف روانکاری موتورهای احتراق داخلی در بخش حمل و نقل می‌شود. روغن پایه نفتی دارای پایداری و دوام قابل پذیرشی برای تولید روغن موتور می‌باشد. روغن‌های روان‌کننده از دو بخش اصلی روغن پایه و افزودنی تشکیل شده اند: روغن پایه و افزودنی. روغن پایه ماده‌ای است که پس از طی تعدادی عملیات پالایش از نفت خام

روان‌کننده ماده‌ای است که با قرار گرفتن مابین دو سطح باعث پایین آمدن نیروی مقاوم در برابر حرکت یا نیروی اصطکاک بین آن‌ها و در نتیجه کاهش نیروی لازم برای شروع و ادامه حرکت نسبی سطوح می‌شود. چنانچه بتوان به طور مطلق از تماس سطوح دارای حرکت نسبی با یکدیگر جلوگیری نمود در این صورت می‌توان اصطکاک و ساییدگی را از میان برداشت. بنابراین وظیفه اصلی یک روان‌کننده از بین بردن اصطکاک و ساییدگی است. ولی جلوگیری از تماس سطوح تنها وظیفه یک روان‌کننده نمی‌باشد زیرا آنجایی که روان‌کننده خود باید متحمل نیروهای برشی در هنگام حرکت باشد بایستی مقاومت روان‌کننده در برابر تنش برشی ناچیز و یا در حدی به مراتب کمتر از نیروی مقاومت یا اصطکاک دو سطحی باشد که روان‌کننده در بین آن‌ها قرار گرفته است. افزون بر این، گرمایی

* عهده دار مکاتبات

+E-mail: kh_didehban@yahoo.com

و با تغییر قطر ذره‌ها این ویژگی‌ها بهینه می‌شود [۶]. در سال ۲۰۱۴ میلادی یاتیش و همکاران نانوذره‌های TiO_2 را روی گرانروی روغن روانکار مورد پژوهش قرار دادند. گرانروی برشی مخلوط به دست آمده با درصد‌های حجمی گوناگون به سه روش تجربی، نظری و مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های تجربی از افزودن نانوذره‌های TiO_2 به روغن نشان داد که با افزایش غلظت نانوذره‌ها، گرانروی نیز افزایش می‌یابد و این افزایش در دماهای پایین‌تر چشمگیرتر است [۷]. در سال ۱۳۹۳ مرضیه شکرریز و همکاران با استفاده از پوشش‌دار کردن نانوذره‌های نیکل با قطر بین ۷ تا ۱۳ نانومتر با ماده‌های فعال سطحی از جنس دی‌آلکیل دی‌تیو فسفریک اسید، عملکرد ضدسایشی آن را در روغن پایه و روغن چند درجه‌ای با استفاده از آزمون چهارساقچه و فالکس (حد تحمل بارهای خطی) بررسی کردند. نتیجه‌های این پژوهش نشان داد که افزودن نانوذره‌های بدون پوشش با غلظت ۰/۱ درصد موجب بهبود چشمگیر نقطه جوش خوردگی در آزمون چهارساقچه شده است اما در غلظت‌های کم‌تر اثر ضدسایشی چشمگیری دیده نشده است [۸]. عملکرد برخی نانوساختارهای سیلیسی و کربنی در بهبود ویژگی‌های روان‌سازی سیال توسط مهشاد علائی و همکاران در سال ۱۳۹۶ مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، نانوماده‌ها با استفاده از ماده فعال سطحی مناسب به سیال حفاری افزوده شد و تأثیر افزایش نانوماده‌های مورد نظر بر کاهش اصطکاک بررسی شد. نتیجه‌های این بررسی نشان داد که ریخت‌شناسی و ساختار شیمیایی تأثیر زیادی بر ویژگی‌های تریبولوژی داشته و گرافن اکسید برترین ویژگی‌ها را در بهبود ویژگی‌های روان‌سازی سیال حفاری از خود نشان داده است [۹].

هدف از این کار پژوهشی بررسی تأثیر افزودن نانوذره‌های MOS_2 ، Al_2O_3 و MnO_2 در ویژگی‌های سایشی روغن موتور $SN:10W40$ با استفاده از آزمون‌های استاندارد روغن شامل آزمون‌های گرانروی، نقطه ریزش، نقطه اشتعال و چهارساقچه است.

بخش تجربی

تهیه روغن

برای ساخت یک نانوروانکار، نیاز به روغن روانکار به عنوان سیال پایه و نیز نانوذره‌های مورد نظر برای افزودن به روغن روانکار می‌باشد. در این پژوهش از روغن روانکار $API:SN$ و $SAE:10W40$ که بالاترین سطح کیفیت روز دنیا برای موتورهای بنزینی است استفاده می‌شود. برای تهیه این روغن روانکار از روغن‌های پایه پلی‌آلفالین (PAO_4) و روغن پایه گروه III استفاده می‌شود [۱۰].

به دست می‌آید و به طور متوسط ۹۰ درصد حجم روغن‌ها را تشکیل می‌دهد. تنها تعدادی از ویژگی‌های ضروری روغن‌ها در روغن پایه وجود دارد و برای این که روغن‌های روان‌کننده همه ویژگی‌های لازم را داشته و بتوانند وظیفه‌های خود را به طور کامل انجام دهند، به آن‌ها مواد افزودنی افزوده می‌شود. به طور کلی مواد افزودنی به موادی گفته می‌شود که برای ایجاد برخی از ویژگی‌ها و یا بهبود برخی از خواص روان‌کننده‌ها به آن‌ها افزوده می‌شود و به طور متوسط ۱۰ درصد حجم روغن‌های روانکار را تشکیل می‌دهند [۲].

نانوفناوری یا آرایش اتم‌ها در مقیاس نانومتری، همان کنار هم قرار گرفتن صدها اتم در ابعاد چند نانومتر است که ویژگی‌های نوین و برجسته‌ای را نتیجه می‌دهد. این فناوری در زمینه‌های گوناگون دانش وارد شده و در صنایع گوناگون نیز، فراورده‌هایی بر این پایه ایجاد شده است. در سال‌های اخیر از یک سو نبود کارایی کافی روانکارهای متداول در کاهش اصطکاک و سایش ایجاد شده در سطح‌های تماسی و از سوی دیگر ظهور و گسترش روزافزون فناوری نانو موجب پیدایش نسل جدیدی از روانکارها موسوم به نانوروانکارها شده است. در اساس نانوروانکارها مخلوط‌های جامد - مایعی هستند که از پراکنده‌سازی نانو ذره‌های گوناگون با اندازه ذره‌های کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر در درون یک روانکار پایه تهیه می‌شوند. استفاده از روانکارهای دارای نانوذره‌های گوناگون به دلیل بهبود ویژگی‌های سطحی و قابلیت انتقال گرما، افزایش بازده موتور و کاهش هزینه‌ی تعمیرهای بسیار جذاب و مورد توجه‌اند. پژوهشگران زیادی گزارش کرده‌اند که نانوروانکارها در کاهش اصطکاک و سایش و نیز افزایش قابلیت انتقال گرما مؤثرند [۳].

پژوهش‌های بسیاری در این زمینه در سال‌های گذشته انجام شده است. تأثیر نانوذره‌های مس در نسبت‌های جرمی ۰/۵ تا ۲ درصد در سال ۲۰۰۷ میلادی توسط هراندیز و همکاران انجام شد. بهبود ویژگی‌های سایشی با افزایش نسبت جرمی در این پژوهش دیده شد [۴]. تأثیر نانوذره‌های الماس توسط فرگام رحمانیان و همکاران در سال ۱۳۸۵ انجام شد. نانوذره‌های الماس سخت بوده و کروی شکل هستند و می‌توانند اصطکاک لغزشی را به غلطشی تبدیل کرده و باعث کاهش ضریب اصطکاک شوند. همچنین به علت هدایت گرمایی بالای الماس، این مواد عملکرد ویژه‌ای برای سامانه‌های خنک کننده از خود نشان می‌دهند [۵]. تأثیر افزودن نانوذره‌های SiO_2 روی ویژگی‌های روانکاری پارافین در پژوهشی در سال ۲۰۱۰ میلادی توسط پنگ و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی مشخص شد که ویژگی‌های روانکاری پارافین با وجود این نانوذره‌ها بهبود می‌یابد

آزمون‌های روغن‌های روانکار

پس از تهیه روغن روانکار، برای اطمینان از کیفیت فاورده آزمون‌های فیزیکی و شیمیایی به شرح زیر انجام می‌شود:

آزمون گرانروی

برای اندازه‌گیری گرانروی از دستگاه استاندارد ویژه‌های که شامل یک لوله موئینه که دارای یک اوریفیس است استفاده می‌شود. روش کار به این صورت است که زمان عبور حجم معینی از روغن بین دو علامت تحت تأثیر نیروی جاذبه زمین بر حسب ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. سپس این زمان در عدد ثابت گرانروی سنج ضرب می‌شود و گرانروی سینماتیک بر حسب سانتی استوک در دمای معین به دست می‌آید. هر چه زمان تخلیه روغن بیش‌تر باشد بیانگر بالاتر بودن گرانروی آن است هر چه این زمان کم‌تر باشد گرانروی پایین‌تر است [۱۱].

تعیین شاخص گرانروی

تغییر گرانروی با دما با شاخص گرانروی اندازه‌گیری و بیان می‌شود. اگر دما کم شود، گرانروی افزایش می‌یابد و اگر دما افزایش یابد گرانروی کاهش می‌یابد. شاخص گرانروی یک ارزش عددی برای نشان دادن تغییر گرانروی یک روغن با تغییر دما است. هر چه شاخص گرانروی بزرگ‌تر باشد بیانگر این است که گرانروی روغن نسبت به تغییر دما تغییر کم‌تری دارد. برای اندازه‌گیری شاخص گرانروی از روش استاندارد ASTM D2270 استفاده می‌شود [۱۲].

نقطه ریزش

نقطه ریزش یک روغن، پایین‌ترین دمایی است که در آن دما (در شرایط استاندارد از پیش تعیین شده) روغن می‌تواند جریان داشته باشد. برای اندازه‌گیری نقطه ریزش از روش استاندارد ASTM D97 استفاده می‌شود [۱۳].

نقطه اشتعال

نقطه اشتعال عبارت است از پایین‌ترین دمایی که روغن باید گرم شود تا در شرایط مشخص بخار یا گاز کافی برای تشکیل مخلوط قابل اشتعال با هوا ایجاد شود و اگر شعله کوچک یا مشعل نزدیک آن برده شود سطح مایع برای لحظه‌هایی آتش بگیرد. این آزمون بر اساس استاندارد ASTM D92 انجام می‌شود [۱۴].

آزمون چهارساجمه

برای بررسی خواص ضدسایشی روانکارها از این آزمون مطابق با استاندارد ASTM D 2783 استفاده می‌شود. در این آزمون سه گوی فولادی در کنار هم در یک محفظه قرار داده شده و به طور کامل ثابت می‌شوند. سپس یک گلوله فولادی دیگر بر روی آن‌ها قرار گرفته و تحت بار اعمال شده و با سرعت معین می‌چرخد. روانکار مورد آزمون در بین گلوله‌های فلزی قرار گرفته و اندازه زخم‌های سایشی بر روی هر یک از سه گلوله زیرین در راستای سایش و راستای عمود بر آن اندازه‌گیری می‌شود [۱۵، ۱۶].

تهیه نانوروانکار

در این پژوهش، از نانوذره‌ها MnO_2 و Al_2O_3 و MOS_2 برای تهیه نانوروانکار استفاده می‌شود. به منظور ایجاد پایداری بهتر از همزن فراصوت برای تهیه این مخلوط‌ها استفاده شد. برای بررسی تأثیر غلظت نانوذره‌ها در کارایی روغن روانکار، مخلوط‌هایی از این ۳ نانوذره با غلظت‌های ۰/۰۳، ۰/۵ و ۱ درصد تهیه شد و آزمون‌های گرانروی، شاخص گرانروی، نقطه ریزش و نقطه اشتعال انجام شد. پس از بررسی نتیجه چهار آزمون یاد شده، بهینه نتیجه‌ها در غلظت‌های یاد شده به دست آمده و سرانجام آزمون چهارساجمه برای بررسی ویژگی‌های ضدسایشی نانوروانکار در آن غلظت انجام گرفت.

نتیجه‌ها و بحث**نتیجه‌های کمی آزمون****نتیجه‌های آزمون‌های روغن بدون افزودن نانوذره‌ها**

در این آزمون از روغن SN۱۰W۴۰ استفاده شد. آزمون گرانروی در دو دمای ۴۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس انجام شد و شاخص گرانروی با استفاده از جدول‌های استاندارد محاسبه شد. همچنین آزمون‌های نقطه اشتعال، نقطه ریزش و چهار ساجمه نیز بر روی این نمونه انجام شد که نتیجه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

نتیجه‌های آزمون‌های روغن با افزودن نانوذره‌ها MOS_2

سه نمونه از ترکیب روغن SN۱۰W۴۰ با نانوذرات MOS_2 در نسبت‌های جرمی گوناگون تهیه شده و همه آزمون‌های بالا روی آن‌ها انجام شد. نتیجه‌های آزمون‌های بالا مطابق جدول ۲ می‌باشد. بهترین نتیجه‌ها از چهار آزمون اول در نسبت جرمی ۰/۱٪ به دست آمد. در نتیجه آزمون چهارساجمه این نسبت جرمی انجام شد.

جدول ۱- نتیجه‌های کمی آزمون‌های گرانروی، نقطه اشتعال، نقطه ذوب و چهارساقچه برای روغن SN10W40

نوع آزمون	نتیجه آزمون	استاندارد اندازه‌گیری
آزمون گرانروی در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس	۱۳/۹۲ cSt	ASTM D۴۴۵
آزمون گرانروی در دمای ۴۰ درجه سلسیوس	۸۵/۸ cSt	ASTM D۴۴۵
تعیین شاخص گرانروی (VI)	۱۶۷	ASTM D۲۲۷۰
آزمون نقطه اشتعال	۲۲۲ °C	ASTM D۹۲
آزمون نقطه ریزش	-۴۴ °C	ASTM D۹۷
آزمون چهار ساقچه	۳۱۵ kgf	ASTM D۲۷۸۳

جدول ۲- نتیجه‌های کمی آزمون‌های گوناگون روغن برای روغن SN10W40 دارای نانوذره‌های MOS₂

نوع آزمون	نتیجه‌های آزمون		
	نسبت جرمی ۰/۵٪	نسبت جرمی ۰/۱٪	نسبت جرمی ۰/۰۳٪
آزمون گرانروی در دمای ۱۰۰ °C	۱۳/۹ cSt	۱۳/۸ cSt	۱۳/۹ cSt
آزمون گرانروی در دمای ۴۰ °C	۸۹ cSt	۹۱ cSt	۱۰۰ cSt
تعیین شاخص گرانروی (VI)	۱۶۰	۱۶۰	۱۵۰
آزمون نقطه اشتعال	۲۲۲ °C	۲۲۲ °C	۲۲۲ °C
آزمون نقطه ریزش	-۴۴ °C	-۴۶ °C	-۳۹ °C
آزمون چهارساقچه	---	۳۴۰ Kgf	---

در شکل ۱ نشان داده شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که با افزودن نانوذره‌های MOS₂ و Al₂O₃ در نسبت جرمی ۰/۱٪ گرانروی در ۱۰۰ °C کاهش یافته است یعنی عملکرد روغن بهبود یافته است ولی در نسبت جرمی ۰/۵٪ افزایش می‌یابد و در نسبت جرمی ۰/۰۳٪ تقریباً تغییر چشمگیری رخ نمی‌دهد. همچنین مشخص شده است که با افزودن نانوذره‌های گرانروی MnO₂ در هر سه نسبت جرمی افزایش یافته است که نسبت به دو نوع نانوذره دیگر عملکرد مناسبی از خود نشان نداده است.

آزمون نقطه اشتعال

نتیجه‌های آزمون نقطه اشتعال برای روغن بدون نانوذره‌ها و روغن‌های دارای نانوذره‌ها در نسبت‌های جرمی گوناگون در شکل ۲ نشان داده شده است. مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که با افزودن نانوذره‌های MOS₂ و Al₂O₃، تأثیری در نقطه اشتعال روغن به وجود نیامده است ولی با افزودن نانوذرات MnO₂، نقطه اشتعال افزایش یافته است که ناشی از افزایش هدایت گرمایی روغن در اثر افزودن نانوذره می‌باشد.

نتیجه‌های آزمون‌های روغن با افزودن نانوذره‌های Al₂O₃

سه نمونه با نسبت‌های جرمی گوناگون از ترکیب این نانوذره به روغن بالا تهیه شده و پس از انجام آزمون‌ها نتیجه‌هایی مطابق جدول ۳ به دست آمده است. پس از انجام سه آزمون اول، بهترین نتیجه‌ها در نسبت جرمی ۰/۱٪ به دست آمده و آزمون چهارساقچه نیز در این نسبت جرمی انجام شد.

نتیجه‌های آزمون‌های روغن با افزودن نانوذره‌های MnO₂

سه نسبت جرمی از ترکیب این نانوذره با روغن تهیه شده است. نتیجه‌های آزمون‌های بالا در نسبت‌های جرمی گوناگون و آزمون چهارساقچه در نسبت جرمی ۰/۱٪ در جدول ۴ ارائه شده است.

بررسی و تفسیر نتیجه‌ها

آزمون گرانروی در دمای ۱۰۰ °C

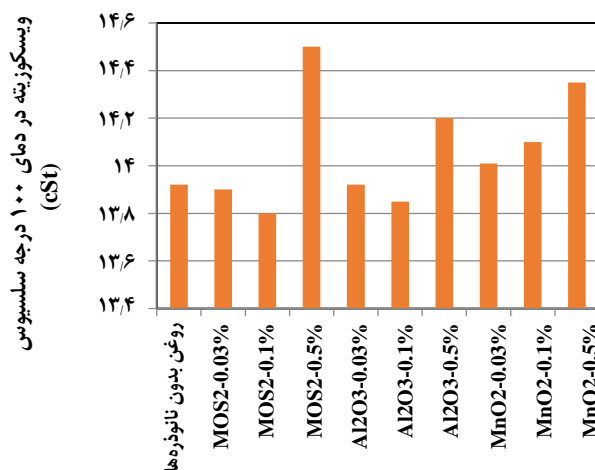
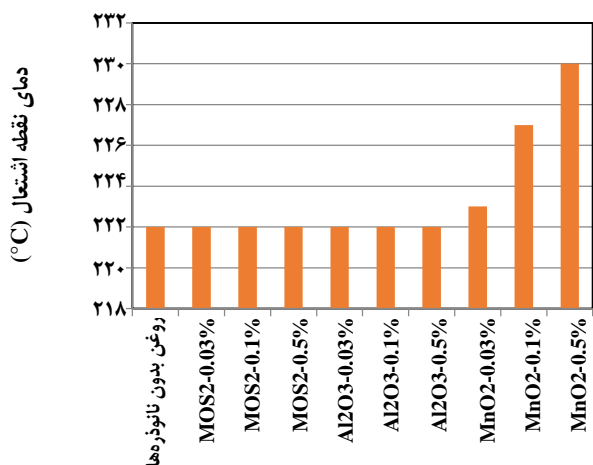
نتیجه‌های آزمون گرانروی برای روغن بدون نانوذره‌ها و روغن‌های دارای نانوذره‌ها در نسبت‌های جرمی گوناگون

جدول ۳- نتیجه‌های کمی آزمون‌های گوناگون روغن برای روغن SN10W40 دارای نانوذره‌های Al_2O_3 .

نتیجه‌های آزمون			نوع آزمون
نسبت جرمی ۰/۵٪	نسبت جرمی ۰/۱٪	نسبت جرمی ۰/۰۳٪	
۱۴/۲ cSt	۱۳/۸۵ cSt	۱۳/۹۲ cSt	آزمون گرانروی در دمای ۱۰۰ °C
۹۵ cSt	۸۹ cSt	۸۶ cSt	آزمون گرانروی در دمای ۴۰ °C
۱۵۴	۱۶۰	۱۶۶	تعیین شاخص گرانروی (VI)
۲۲۲ °C	۲۲۲ °C	۲۲۲ °C	آزمون نقطه اشتعال
-۳۷ °C	-۴۵ °C	-۴۴ °C	آزمون نقطه ریزش
---	۳۳۰ Kgf	---	آزمون چهارساقچه

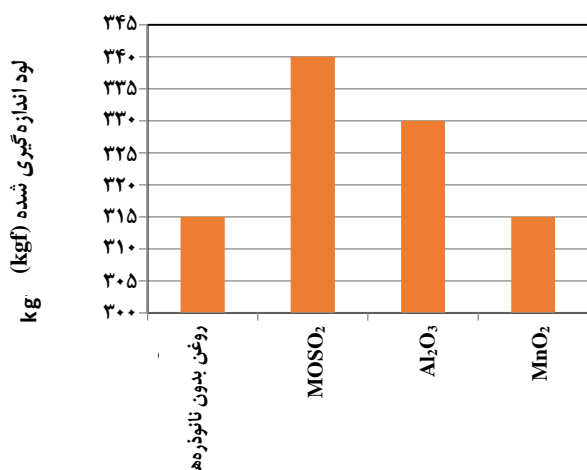
جدول ۴- نتیجه‌های کمی آزمون‌های گوناگون روغن برای روغن SN10W40 دارای نانوذره‌های MnO_2 .

نتیجه‌های آزمون			نوع آزمون
نسبت جرمی ۰/۵٪	نسبت جرمی ۰/۱٪	نسبت جرمی ۰/۰۳٪	
۱۴/۳۵ cSt	۱۴/۱ cSt	۱۴/۰۱ cSt	آزمون گرانروی در دمای ۱۰۰ °C
۱۰۰ cSt	۹۰ cSt	۸۸ cSt	آزمون گرانروی در دمای ۴۰ °C
۱۴۷	۱۶۱	۱۶۴	تعیین شاخص گرانروی (VI)
۲۳۰ °C	۲۲۷ °C	۲۲۳ °C	آزمون نقطه اشتعال
-۳۶ °C	-۴۴ °C	-۴۴ °C	آزمون نقطه ریزش
---	۳۱۵ Kgf	---	آزمون چهارساقچه

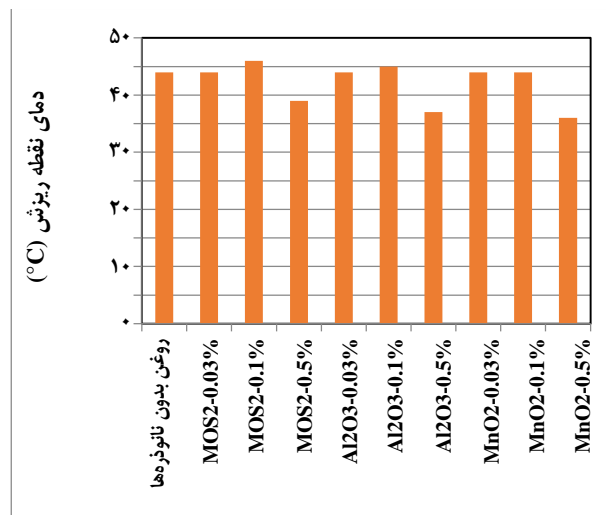


شکل ۲- نمودار مقایسه تأثیر افزودن نانوذره‌های MOS_2 ، Al_2O_3 و MnO_2 به روغن SN10W40 در نسبت‌های جرمی گوناگون روی نقطه اشتعال روغن.

شکل ۱- نمودار تأثیر افزودن نانوذره‌های MOS_2 ، Al_2O_3 و MnO_2 به روغن SN10W40 در نسبت‌های جرمی گوناگون روی گرانروی روغن.



شکل ۴- نمودار تأثیر نانوذره‌های MOS₂، Al₂O₃ و MnO₂ به روغن SN10W40 در نسبت جرمی ۱/۰٪ روی ویژگی‌های سایشی روغن.



شکل ۳- نمودار مقایسه تأثیر افزودن نانوذره‌های MOS₂، Al₂O₃ و MnO₂ به روغن SN10W40 در نسبت‌های جرمی گوناگون روی نقطه ریزش روغن.

نتیجه‌گیری

افزودن نانوذره‌های فلزی به روغن‌های روانکار می‌تواند در کیفیت و ویژگی‌های این روغن‌ها تأثیر گذار بوده و با انجام آزمایش‌های مناسب با استفاده از نانوذره‌های گوناگون با نسبت‌های جرمی متفاوت می‌توان به کیفیت مورد نظر نزدیک‌تر شد. در این پژوهش، پس از بررسی نتیجه‌های آزمون‌ها مشخص شد که افزودن نانوذره‌های MOS₂ و Al₂O₃ به روغن روانکار باعث بهبود خواص سایشی روغن شده است که از بین این دو، MOS₂ نتیجه‌های بهتری از خود نشان داده است. همچنین افزودن نانوذره‌های MnO₂ در کاهش سایش روغن روانکار تأثیر محسوسی نداشته است ولی تأثیر مناسبی در افزایش هدایت گرمایی روغن نشان داده است.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۵/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۳

آزمون نقطه ریزش

این آزمون برای روغن دارای نانوذره‌های MOS₂ و Al₂O₃ در نسبت جرمی ۱/۰٪ کاهش دمای نقطه ریزش را نسبت به روغن بدون نانوذرات نشان داده است که باعث ویژگی روانکاری روغن در لحظه استارت شده است ولی در مورد نانوذره‌های MnO₂ تغییری دیده نشده است. نتیجه‌های این آزمون در شکل ۳ نمایش داده شده است.

آزمون چهارساقچه

نتیجه‌های آزمون چهارساقچه در نسبت جرمی ۱/۰٪ برای روغن بدون نانوذرها و روغن‌های دارای نانوذره‌های در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که خواص سایشی روغن با افزودن نانوذرات MOS₂ و Al₂O₃ در نسبت جرمی ۱/۰٪ بهبود یافته است ولی با افزودن نانوذره‌های MnO₂، ویژگی‌های سایشی تغییر محسوسی پیدا نمی‌کند.

مراجع

[۱] طاهری، رضاعلی، "نقش نانو روانکارها در افزایش راندمان و کاهش هزینه های نت موتور"، سومین کنفرانس

ملی نگهداری و تعمیرات، شناسه (COI) مقاله: NCM03_012 (۱۳۸۴).

[۲] شهیدی‌پور، روح‌ا...، "کتاب جامع صنعت روانکار ایران"، شرکت بازار پژوهان نوآور، ص. ۶۸۴ (۱۳۸۴).

[۳] ابوالقاسم کوچکی، علی عباسی، حامد افشاری، حسین شکی، عمادالدین هراتی فر، امیرحسین میردامادیان، "فناوری نانو در صنعت خودرو و کاربردهای آن"، چاپ دوم، تهران، ستاد ویژه توسعه فناوری نانو: ص. ۹۵ (۱۳۹۱).

[4] Hernandez A., Gonzales R., Viesca J.L., Fernandes J.E., Diaz Fernandes J.M., Machdo A., Chou R., Riba J., *CuO, ZrO₂ and ZnO Nanoparticles as Antiwear Additive in Oil Lubricants*, *Wear*, Vol 265: 422-428 (2008).

[۵] رحمانیان، فرگام؛ فرزین، فرین؛ امینیان، مهرداد؛ هاشمی یزدی، حمیدرضا، آشنایی با نانوماس با کاربرد به عنوان افزودنی روغن موتور، "نخستین کنگره بین‌المللی نانوفناوری و کاربردهای آن در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی"، کد COI مقاله: ICNPGP01_055 (۱۳۹۳).

[6] Peng D., Chen C., Kang Y., Chang Y., Chang S., *Size Effects of SiO₂ Nanoparticles as Oil Additives on Tribology of Lubricant*, *Industrial Lubrication and Tribology*: 111-120 (2010).

[7] Yathish K., Binu K., Shenoy B., Rao D., Pai R., *Study Of TiO₂ Nanoparticles as Lubricant Additive in Two-Axial Groove Journal Bearing*, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 8(11): 1723-1729 (2014).

[۸] شکرریز، مریم؛ حاجی علی اکبری، فروزان؛ ابراهیم پور ضیایی، الهه؛ ساخت نانو ذره نیکل پوشش دار و بررسی کاربرد آن در روانکارها، (۸۰): ۵۴ تا ۶۲ (۱۳۹۳).

[۹] علائی، مهشاد؛ سلیمانی، محمد؛ رعیت دوست، سعیده؛ کیان، فاطمه؛ رشیدی، علیمراد؛ سنتز و بررسی عملکرد برخی از نانوساختارهای کربنی و سیلیسی در بهبود ویژگی‌های روان‌سازی و فشارپذیری سیال‌های حفاری، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴): ۳۶: ۱۶۱ تا ۱۷۰ (۱۳۹۶).

[۱۰] سازمان ملی استاندارد ایران، "روان‌کننده‌ها-روغن موتور برای روغن‌های بنزینی در سطح کیفیت معادل با API SN - ویژگی‌ها" شماره ۱۷۶۵۱، چاپ اول (۱۳۹۲).

[11] SAE J300., *Engeen Oil Viscosity Classification*, *SAE International*, (2015).

[۱۲] سازمان ملی استاندارد ایران، فرآورده‌های نفتی-محاسبه شاخص گرانروی با استفاده از گرانروی سینماتیک در دمای ۴۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس - آیین کار، شماره ۱۹۵ (۱۳۹۳).

[۱۳] سازمان ملی استاندارد ایران، فرآورده‌های نفتی - روان‌کننده‌ها و اندازه‌گیری نقطه ریزش - روش آزمون، شماره ۲۰۱ (۱۳۹۲).

[۱۴] سازمان ملی استاندارد ایران، فرآورده‌های نفتی - اندازه‌گیری نقطه اشتعال و نقطه آتش‌گیری با دستگاه روباز کیولند - روش آزمون، شماره ۱۹۸، تجدید نظر دوم، (۱۳۹۴).

[۱۵] اتفاقی، احسان...؛ محتسبی، سید سعید؛ احمدی، حجت؛ سلطانی، رضا؛ رشیدی، علیمراد؛ بررسی تأثیر نانوذرات روی خواص روغن موتور و میزان عملکرد آن در کاهش سایش، فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات موتور، (۷): ۲۴: ۳ تا ۱۲ (۱۳۹۰).

- [۱۶] سازمان ملی استاندارد ایران، روغن‌های روان‌کننده - اندازه‌گیری خواص فشارپذیری - روش چهارگلوله، شماره ۳۳۱۰، تجدید نظر اول (۱۳۹۳).
- [۱۷] زارع دثاری، بهروز؛ عباس زاده یخفروزانی، محمد؛ داودی، بهنام؛ بهبود روانکاری در فرآیند کشش عمیق با استفاده از افزودنی نانوذرات، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، مجله مهندسی مکانیک مدرس، (۱۵) ۱: ۳۲۲-۳۱۷ (۱۳۹۴).
- [۱۸] فرزین نژاد، نجمه؛ حسنی راد، سید جمال؛ مروری بر کاربرد فناوری نانو در روانکارها، فصلنامه تخصصی علمی ترویجی فرآیند نو، (۹) ۴۸: ۱۸-۳۵ (۱۳۹۳).
- [۱۹] وکیلی نژاد، غلامرضا؛ شریعتی نیاسر، مجتبی؛ قدمی، مسعود؛ بازیافت روغن پایه موتور از روغن مستعمل به روش استخراج با حلال، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۱) ۲۴: ۳۵ تا ۴۴ (۱۳۸۴)
- [20] Etefaghi E., Ahmadi H., Rashidi A., Mohtasebi S., Alaei M., [Experimental Evaluation of Engine Oil Properties Containing Copper Oxide Nanoparticles as a Nanoadditive](#), *International Journal of Industrial Chemistry*, 4:28 (2013).
- [21] Asrul M., Zulkifli N.W.M., Masjuki H.H., Kalam M.A., [Tribological Properties and Lubricant Mechanism of Nanoparticle in Engine Oil](#), *Procedia Engineering*, Volume 68: 320-325 (2013).
- [22] Mello V.S., Faria E. A., Camargo A.P.P., Alves S.M., [Nanolubricants Developed from Tiny CuO Nanoparticles](#), *Tribology international*, **100**: 263-271 (2016).
- [23] Hwang Y., Lee C., Choi Y., Cheong C., Kim D., Lee K., Lee J., Kim S., [Effect of the Size and Morphology of Particles Dispersed In Nano-Oil on Friction Performance Between Rotating Discs](#), *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(11) (2011).
- [24] Patil V., Jadhav M., Pawar G., Gunjavate P., [Some Studies on Tribological Properties of Lubricating Oil with Nanoparticles as an Additive](#), *International Journal of Advanced Engineering Technology*, Article ID 276753, 7 pages (2014).
- [25] Liu G., Li X., Qin B., Xing D., Guo Y., Fan R., [Investigation of Mending Effect and Mechanism of Copper Nano-Particles on a Tribologically Stressed Surface](#), *Tribol. Lett.*, **17**: 961-966 (2004).