



## بررسی تجربی عملکرد ضد سایشی نانو روان کارها در گیربکس ماشین آلات دوار

عباس تقی پور

استادیار، گروه مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران  
دزفول، 113، taghipoor@iaud.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 مهر 1397

پذیرش: 5 دی 1397

ارائه در سایت: خرداد 1398

### کلیدواژگان:

آزمون سایش

ضریب انتقال حرارت

نانو ذرات جامد

آزمون آنالیز عنصری

هدف این پژوهش، استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی جهت بررسی عملکرد ضد سایشی، کاهش اصطکاک و بهبود انتقال حرارت روغن صنعتی پر کاربرد در گیربکس ماشین‌های دوار به نام Shell Omalla S2 G220 حاوی نانو مواد افزودنی نسبت به روغن پایه می‌باشد. برای این منظور نانو ذرات سیلیکا و نانو ذرات آلومینا به‌عنوان دو نوع ماده‌ی افزودنی به روغن مذکور انتخاب شدند. در این پژوهش به‌منظور پیشگیری از مشکلات ناشی از رسوب نانو ذرات بر روی اجزای گیربکس، نانوذره با غلظت‌های 0/1، 0/2 و 0/4 درصد وزنی برای ساخت نانو روان کارها انتخاب گردید. برای پراکنده کردن نانو ذرات درون سیال پایه و دستیابی به یک نانو سیال پایدار از سورفکتانت Span 80 و دستگاه اولتراسونیک پروبی استفاده شد. سپس خواص فیزیکی روغن پایه و روغن حاوی نانو ذرات شامل گرانروی، شاخص گرانروی، چگالی، نقطه‌ی ریزش و نقطه‌ی اشتعال اندازه‌گیری شد. آزمون سایشی استاندارد چهار ساچمه، تعیین ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت هدایتی نیز بر روی نمونه‌های ساخته‌شده انجام گرفت. پس از انجام آزمایش‌ها بهترین ترکیب روغن حاوی نانو ذرات در مقایسه با روغن پایه انتخاب و جهت بررسی آزمون آنالیز عنصری در گیربکس پمپ استفاده شد. نتایج پژوهش، کاهش میانگین سایش به میزان 7/4%، کاهش ضریب اصطکاک به میزان 10% و بهبود ضریب انتقال حرارت هدایتی به میزان 10/7% را نشان داد. نتایج آزمون آنالیز عنصری نیز نشان داد عناصر سایشی قطعات داخلی گیربکس به‌طور چشمگیری کاهش یافته است.

## Experimental study of anti-wear performance of nano lubricants in rotary machines gearboxes

Abbas Taghipoor

Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.  
P.O.B. 113. Dezful, Iran, taghipoor@iaud.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 3 October 2018  
Accepted 26 December 2018  
Available Online June 2019

### Keywords:

Wear test  
Heat transfer coefficient  
Solid nanoparticles  
Elemental analysis

### Abstract

The aim of this study is the using laboratory tests to evaluate the anti-wear performance, reduce friction and improve the heat transfer of powerful industrial oil in gearbox of rotary machines called Shell Omalla S2 G220 containing nano additives to the base oil. For this purpose, silica and alumina nano particles were selected to be added to the mentioned oil. In this study, concentrations of nano particles was 0.1, 0.2 and 0.4 wt% to prevent nanoparticle deposition problems on gear components. Surfactant Span 80 and an ultrasonic probe were used to disperse nanoparticles inside the base fluid and to achieve a stable nano-fluid. Then, the physical properties of the base oil and the nano lubricants including viscosity, viscosity index, density, pour point and ignition point were measured. The standard four ball wear test, friction coefficient and conduction heat transfer coefficient test were performed on the samples. After the experiments, the best combination of oil containing nanoparticles was selected in comparison with the base oil and charged to pump gearbox for the elemental analysis test. The results of this study showed 7.4% reduction in wear, 10% reduction in friction coefficient and 10.7% improvement in the conduction heat transfer coefficient. The results of the elemental analysis also showed abrasive elements of the internal components of the gearbox reduced significantly.

### 1- مقدمه

خرابی‌های ناشی از عدم روان کاری مناسب و صحیح، راهکارها و روش‌های جدیدی ابداع شده است. انتخاب روغن مناسب حاوی افزودنی‌های خاص و سپس انجام پایش وضعیت مستمر منجر به افزایش طول عمر تجهیز و کاهش توقفات ماشین برای تعمیر می‌شود. عدم روان کاری صحیح، علاوه بر آنکه باعث تقلیل راندمان مکانیکی و پایین آمدن بازده زمانی ماشین‌آلات می‌شود، منتج به فرسایش بیش‌ازحد، فرسودگی و از کارافتادگی زودرس

امروزه روغن به‌عنوان یک روان کار صنعتی به‌طور فراوان و در طیف وسیعی از تجهیزات صنعتی بکار گرفته می‌شود. روان کارها عمدتاً به‌منظور ایجاد بستری مناسب جهت درگیری سطوح در حال حرکت به‌منظور جلوگیری از سایش و کاهش میزان اتلاف انرژی‌های اصطکاکی و انتقال حرارت تولیدی در تجهیزات دوار ایفای نقش می‌کنند. به‌منظور بالا بردن کیفیت روغن و کاهش

Please cite this article using:

A. Taghipoor, Experimental study of anti-wear performance of nano lubricants in rotary machines gearboxes, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 30-38, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.smeir.org

ذرات ممکن است ذوب شوند و به سطح اصطکاکی بپیوندند و یا این که با واکنش با سطح، یک لایه‌ی محافظ تشکیل دهند. به بیان ساده‌تر با پر کردن خلل و فرج سطوح در تماس با یکدیگر، زبری (عامل اصطکاک) را از بین می‌برند و لغزش را تسهیل می‌کنند. ترکیب روان کارها با مواد افزودنی باعث افزایش طول عمر و کیفیت روان کار می‌گردد، همچنین به دلیل مسائل زیست‌محیطی بسیار مورد توجه قرار گرفته است [5]. نانو ذرات پس از ترکیب با روغن پایه باعث بهبود خواص آن از قبیل، کاهش ضریب اصطکاک، کاهش مقدار ساییدگی در اجزای موتور، ترمیم سطوح درگیر و بهبود خواص سطحی، افزایش بازده موتور در اثر افزایش فشار در سیلندر، کاهش مصرف سوخت در اثر کاهش اصطکاک، افزایش طول عمر موتور، کاهش مصرف روغن و کاهش هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات می‌شوند [6]. اتفاقی و همکارانش در سال 1390 نانو ذرات کربن نانو بال را با استفاده از آسیای گلوله‌ای درون روغن موتور بهران پیش‌تاز SAE20W50 پراکنده کرده و سپس با انجام آزمون‌های تجربی دریافتند که ضریب هدایت حرارتی روغن حاوی ذرات نانو بال با غلظت 0/1% وزنی، 18% نسبت به روغن پایه افزایش یافته و همچنین بر اساس آزمون چهار ساچمه، میزان سایش در روغن حاوی نانو ذرات به میزان 5% نسبت به روغن فاقد نانو ذرات کاهش یافته است [5]. زارع و همکارانش در سال 1394 با بررسی ماده افزودنی نانو ذرات آلومینا ( $Al_2O_3$ ) به ماده‌ی روان-کار در فرآیند شکل‌دهی عمیق به منظور کاهش سایش قالب و کاهش نیروی شکل‌دهی و افزایش شکل‌پذیری ورق دریافتند که افزودن 0/5% وزنی نانو ذرات آلومینا سبب بهبود قابل‌ملاحظه خاصیت روان کاری می‌شود که در مقایسه با روان کار معمولی نیروی شکل‌دهی و زبری سطح به ترتیب به میزان 16/39% و 19/43% کاهش می‌یابد. همچنین دریافتند که با استفاده از روان کار حاوی نانو ذرات 23/94% ماکزیمم ضخامت در نقطه‌ی بحرانی کاهش می‌یابد [7]. گرینبرگ و همکارانش در سال 2004 در پژوهش خود تحت عنوان اثر نانو ذرات تنگستن سولفید ( $WS_2$ ) بر کاهش اصطکاک در روان کارها به این نتیجه رسیدند که اضافه نمودن این نانوذره به روغن پایه سبب کاهش 50% ضریب اصطکاک می‌شود [8]. شکرریز و همکارانش در سال 1393 با بررسی نانوذره نیکل پوشش‌دار و ترکیب آن با روغن روان کار نتایج مشابهی در بهبود خواص ضد سایش روان کار گرفتند. آن‌ها دریافتند که با افزایش حداکثر 1% نانوذره نیکل پوشش‌دار خاصیت ضدسایش به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد [9]. واو و همکارانش، در سال 2007 خواص روان کاری

تجهیز نیز می‌گردد. دستیابی به ماده افزودنی با قابلیت بالا و ارزان قیمت به منظور بهبود سطح کیفیت روان کار و افزایش طول عمر و کارایی آن و همچنین سازگاری با محیط‌زیست و قابلیت بازیافت و کاهش هزینه تولید و فرآوری آن از چالش‌های اساسی صنعت روان کاری کشور می‌باشد. استفاده از روغن با کیفیت بالا، صرفه‌جویی در هزینه و جلوگیری از اتلاف انرژی و کاهش مصرف سوخت را به دنبال دارد. لذا دستیابی به مواد افزودنی جدید با کارایی بالا یک اصل انکارناپذیر در صنعت و ماشین‌آلات صنعتی می‌باشد. در سال‌های اخیر به دلیل عدم کارایی کافی روان‌کننده‌های سنتی و متداول در کاهش اصطکاک و کیفیت پایین آن‌ها و از طرف دیگر با ظهور و گسترش روزافزون فناوری نانو موجب پیدایش نسل جدیدی از نانو روان کار شده است. اساساً نانو روان کارها مخلوط همگنی از مایع - جامد می‌باشند که از ترکیب عناصر فلزی و غیرفلزی جامد با قطر حدوداً 100 نانومتر با افزودن به روغن پایه تولید می‌شوند. بسیاری از پژوهشگران گزارش داده‌اند که این ترکیبات نانو به دلیل مساحت سطح ویژه بسیار بالا می‌توانند با بهبود خواص ضد سایش و کاهش اصطکاک قابل‌ملاحظه، باعث افزایش راندمان و کاهش هزینه‌ها شوند [1]. در بررسی‌های بیشتر در خصوص روان کاری با افزودنی ذرات نانو نشان می‌دهد که هر نانوذره ویژگی‌های خاصی در روان کار ایجاد می‌کند [2].

در سال‌های اخیر استفاده از نانو مواد در روان‌کننده‌ها به دلیل بهبود خواص سطحی و قابلیت انتقال حرارت، افزایش بازده موتور و کاهش هزینه‌های تعمیرات، به‌عنوان یک ایده نو مورد توجه واقع شده است [3]. سنتز نانو ذرات و جایگزینی مولکول‌های آلی با ذرات بسیار کوچک مواد جامد به‌آسانی امکان‌پذیر نمی‌باشد. همچنین به دلیل آن که محلول‌های کلوتیدی اساساً ناپایدار هستند بهره‌گیری از این فناوری را در روان کارها با چالش بزرگی روبه‌رو کرده است. پژوهشگران انواع مختلفی از نانو مواد ساخته‌شده از مواد فلزی، آلی و معدنی را برای ساخت نانو روان کارها مورد استفاده قرار داده‌اند [4]. مهم‌ترین مزیت استفاده از نانو مواد در روان کارها به دلیل اندازه کوچک آن‌ها می‌باشد. در محدوده‌ی نانومتری، تغذیه‌ی کامل سطح مشترک غلظتی صورت پذیرفته و همچنین سنتز ذرات کامپوزیت با ویژگی‌های مختلفی چون کاهش اصطکاک، سایش و خوردگی امکان‌پذیر می‌باشد. نانو افزودنی‌ها نسبت به افزودنی‌های معمول، تا حدودی به دما حساس نیستند و واکنش‌های اصطکاکی در آن‌ها بسیار محدود می‌باشد، مکانیسم ضد سایشی نانو افزودنی‌ها به دو صورت شکل می‌گیرد، نانو

روغن جزء روغن‌های پرمصرف و گران‌قیمت در صنعت پتروشیمی می‌باشد و با توجه به نیاز به افزایش طول عمر و همچنین بهبود خواص روان کاری آن، مدنظر قرار گرفت. نانو مواد انتخابی در این پژوهش شامل نانو آلومینا گاما به صورت ذرات کروی با حداکثر قطر 20 نانومتر و خلوص 99% می‌باشد. علاوه بر نانو آلومینا از نانو سیلیکا هم به دلیل ارزانی و در دسترس بودن و قابلیت توزیع و پراکندگی مناسب و تشکیل نانو سیال پایدار و همچنین ساختار کروی آن در این پژوهش استفاده شد. مشخصات فنی این دو نانوذره به شرح جدول 2 است.

شکل‌های 1 و 2 به ترتیب تصویر TEM نانو آلومینا و نانو سیلیکا مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد که دارای قطر میانگین 20 و 12 نانومتر به ترتیب برای آلومینا و سیلیکا می‌باشد. مهم‌ترین ویژگی برای انتخاب این نانو مواد ساختار کروی بودن آن‌ها می‌باشد زیرا نانو ذرات با ساختار کروی خواص تریبولوژیکی بهتری از خود نشان می‌دهند و بانفوذ به خلل و فرج سطوح و پر کردن ناهمواری‌ها به دلیل کوچکی و سطح ویژه زیاد به سادگی روی هم می‌لغزند و باعث کاهش سایش و اصطکاک و کاهش انرژی مصرفی و تولید دما می‌شوند.

جدول 1 مشخصات فنی روغن Shell Omalla S2 G220 [14]

ویژگی‌ها	روش	Omalla SG 220
شاخص ویسکوزیته	ISO3448	220
ویسکوزیته سینماتیکی در 40 درجه سانتی‌گراد (مترمربع بر ثانیه)	ISO3104	220
ویسکوزیته سینماتیکی در 100 درجه سانتی‌گراد (مترمربع بر ثانیه)	ISO3104	19/4
شاخص ویسکوزیته	ISO2909	100
چگالی (کیلوگرم/مترمکعب) در 15 سانتی‌گراد	ISO12185	899
نقطه اشتعال (سانتی‌گراد)	ISO2595	240
نقطه ریزش (سانتی‌گراد)	ISO3016	-8

جدول 2 مشخصات فنی نانو ذرات آلومینا و سیلیکا

مشخصات فنی	آلومینا	سیلیکا
اندازه قطر (نانومتر)	20	11-13
سطح ویژه (m <sup>2</sup> /gr)	138	200
شکل هندسی پودر	کروی	کروی
رنگ	سفید	سفید
ظرفیت حرارتی ویژه (J/kg.k)	880	730
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	3890	2400

دو نوع روغن شامل روغن‌موتور API-SF و روغن پایه حاوی نانو ذرات مس (CuO)، تیتانیوم (TiO<sub>2</sub>) و نانو الماس را بررسی کردند. آزمایش‌های اصطکاک و سایش به کمک یک دستگاه آزمون لغزشی رفت و برگشت انجام گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که نانو ذرات افزوده شده به روغن‌ها تأثیر بسزایی در کاهش اصطکاک و سایش داشته است. به گونه‌ای که ضریب اصطکاک در روغن‌های API-SF و روغن پایه، حاوی نانو ذرات به ترتیب 18/4% و 5/8% کاهش و علاوه بر این عمق شکاف‌های سایشی به ترتیب 16/7 و 78/8% در مقایسه با روغن فاقد نانو ذرات CuO کاهش یافت [10]. کوو و همکارانش، در سال 2010 رفتارهای روان کاری روغن معدنی را بررسی کردند. خواص فشار نهایی و ضد سایشی آن‌ها با استفاده از دستگاه آزمون دیسک روی دیسک تحت بارهای عمودی مختلف ارزیابی شد و نتایج آن‌ها بیانگر بهبود خواص روان کاری نانو روغن‌ها نسبت به روغن‌های فاقد نانو ذرات بود [11]. بر اساس یافته‌های جیاوو در سال 2011 خواص ضد سایشی آلومینا (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) در مقایسه با سیلیکات (SiO<sub>2</sub>) کمتر است ولی خاصیت نفوذپذیری Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بهتر می‌باشد. اگرچه هرکدام از این نانو ذرات به تنهایی خواص روان کاری برابری دارند و انتظار می‌رود که ترکیب این دو ماده باهم خواص بهتری را ارائه دهد [12]. یانگ در سال 2014 با بررسی روغن پایه سیلیکون و نانو ذرات نقره دریافت که یک فیلم سه لایه‌ای شبیه ساختار ساندویچ باعث کاهش اصطکاک و سایش می‌گردد و لایه درونی به عنوان یک بستر اولیه برای چسبیدن نانو ذرات بر روی پایه سیلیکونی عمل می‌نماید. لایه وسطی که حاوی نانو ذرات نقره است قادر به افزایش ظرفیت حمل بار و لایه بیرونی، فیلم روغن خودآرایی شده است که نرم بوده و می‌تواند تنش برشی را کاهش دهد [13].

نانوذرات به دلیل مساحت سطح ویژه بسیار بالا در ترکیب روان کارها می‌توانند سبب بهبود خواص ضد سایشی و کاهش اصطکاک قابل ملاحظه‌ای شوند. با توجه به اهمیت روان کارها در عملکرد تجهیزات صنعتی، بررسی تأثیر نانوذرات AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> به عنوان مواد افزودنی بر روی خواص آن ضروری به نظر می‌رسد.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- ساخت نانو روان کارها

در این پژوهش، از یک روغن صنعتی مهم و پرکاربرد در گیربکس ماشین‌آلات دوار به نام Shell Omalla S2 G220 که یک روغن پایه سنتتیکی است به عنوان روغن پایه استفاده شد. مشخصات فیزیکی این روغن در جدول 1 ذکر گردیده است. این



Fig. 3 Ultrasonic probiotic device used in research

شکل 3 دستگاه اولتراسونیک پروبی مورد استفاده در پژوهش

پایداری استاتیک نانو سیالات ساخته شده به صورت دیداری مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور همه نمونه‌های ساخته شده درون ظروف شیشه‌ای کاملاً شفاف ریخته شده و برای مدت زمان 6 ماه در یک محیط کاملاً ساکن نگهداری شدند و روند تغییرات ایجاد شده در آنها به صورت دوره‌ای و پیوسته مشاهده و ثبت گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که افزودن نانو ذرات سیلیکا به روغن هیچ‌گونه تغییر حالتی در آن ایجاد نمی‌کند در حالی که نانو ذرات آلومینا موجب تغییر رنگ روغن شد. همچنین با گذشت زمان نانو ذرات آلومینا اندکی رسوب کردند، که با گذر زمان مقدار رسوب و ته‌نشینی افزایش یافت. از طرف دیگر در نمونه‌های نانو سیال حاوی نانو ذرات سیلیکا با گذشت زمان هیچ‌گونه رسوب و تغییر فازی مشاهده نشد که بیانگر پایداری بسیار خوب این نانو سیال می‌باشد. به همین خاطر در ادامه پژوهش تنها از نانوذره‌ی سیلیکا جهت انجام آزمایش‌ها استفاده شد.

## 2-2- آزمایش تعیین خواص فیزیکی نانو روان کارها

برای ارزیابی کیفیت نانو روغن به دست آمده و مقایسه آن با روغن پایه توسط تجهیزات آزمایشگاهی مناسب خواص فیزیکی روغن پایه و روغن حاوی نانو مواد، شامل ویسکوزیته روغن در دمای استاندارد 40 درجه و 100 درجه سانتی‌گراد، شاخص ویسکوزیته، چگالی روغن، نقطه ریزش و نقطه اشتعال اندازه‌گیری و نتایج حاصل ثبت شد.

## 2-3- آزمون سایش توسط دستگاه چهار ساچمه

به منظور بررسی تأثیر نانو مواد بر خواص سایشی روغن، نمونه‌ها شامل روغن پایه و روغن حاوی نانو مواد تهیه و آزمون سایش مطابق استاندارد ASTM D2266 توسط دستگاه نشان داده شده در شکل 4 انجام شد.

غلظت نانو ذرات تأثیر زیادی در عملکرد نانو روان کارها دارد، به گونه‌ای که غلظت‌های بالا (<0/5wt%) موجب رسوب ذرات بر روی قطعات شده و ذرات بزرگ‌تر همانند ناخالصی‌ها موجب ایجاد خراش بر روی سطوح شده و اصطکاک افزایش می‌یابد. همچنین در غلظت‌های خیلی پایین (>0/05wt%) نانو ذرات نمی‌توانند سطوح اصطکاکی را به طور کامل پوشش بدهند و در نتیجه عملکرد خوبی ندارند. بنابراین غلظت مورد استفاده باید در حد بهینه باشد که در اکثر پژوهش‌های قبلی، غلظت در محدوده‌ی 0/1 تا 0/5wt% به عنوان غلظت بهینه نانو ذرات بیان شده است [15].

در این پژوهش به منظور پیشگیری از مشکلات ناشی از رسوب نانو ذرات بر روی اجزای گیربکس و نیز دست‌یابی به نمونه‌های پایدار، غلظت‌های 0/1، 0/2 و 0/4wt% برای ساخت نانو روان کارها انتخاب گردید. برای پراکنده کردن نانو ذرات درون سیال پایه و دستیابی به یک نانو سیال پایدار از سورفکتانت Span 80 و دستگاه اولتراسونیک پروبی Ultrasonic (Homogenizer) Y921 In-syclan, china استفاده شد. این نوع همزن اولتراسونیک که تصویر آن در شکل 3 نشان داده شده است به علت تماس مستقیم پروب با سیال توزیع بسیار بهتری حاصل می‌شود. همچنین سورفکتانت و نانو ذرات با نسبت 1:1 به روغن پایه افزوده شدند. سپس نمونه‌ها برای مدت زمان 30 دقیقه تحت امواج اولتراسونیک با توان 400 وات قرار گرفتند.

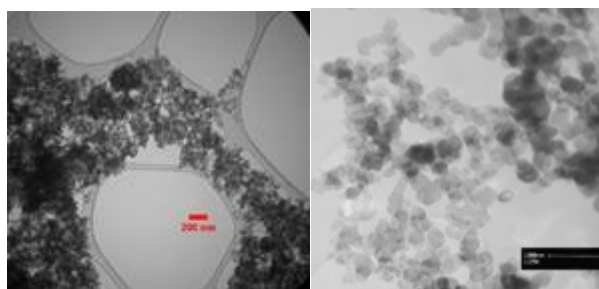


Fig. 1 TEM Image of Nano Alumina [16]

شکل 1 تصویر TEM نانو آلومینا [16]

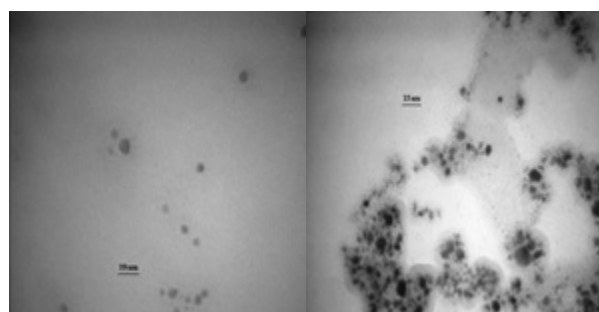


Fig. 2 TEM Image of Nano Silica [16]

شکل 2 تصویر TEM نانو سیلیکا [16]

2-5- اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی ( $k$ )

آزمون تعیین ضریب انتقال حرارت هدایتی ( $k$ ) توسط دستگاه  $KD_2$  ساخت شرکت Decagon Devices انجام شد (شکل 5). در این پژوهش ضریب هدایت حرارتی روغن پایه و نانو روان کارهای ساخته شده حاوی نانو ذرات سیلیکا، در دمای  $25^\circ C$  و در چهار تکرار اندازه گیری و میانگین آن ثبت شد.

جدول 3 مشخصات فنی دستگاه اندازه گیری و ثبت ضریب اصطکاک

**Table 3** Specifications of the measuring device and recording the friction coefficient

مشخصات فنی دستگاه		پارامترهای قابل اندازه گیری و ثبت	
رنج اعمال نیرو	0/1 تا 100 نیوتن	سرعت خطی برحسب میلی متر بر دقیقه	پارامترهای قابل اندازه گیری و ثبت
سرعت	100-200 میلی متر بر دقیقه	نیروی اصطکاک برحسب نیوتن	سرعت
دما	محیط	ضریب اصطکاک ( $\mu$ )	دما
ابعاد	440 میلی متر طول، 300 میلی متر عرض و 550 میلی متر ارتفاع	اطلاعات سیستم	ابعاد
وزن دستگاه	25 کیلوگرم		وزن دستگاه
نیروی محرکه دستگاه	AC 220، تک فاز ویندوز XP		نیروی محرکه دستگاه
قابلیت استفاده برای مواد فلزی، پلاستیکی، لاستیکی، سرامیکی، و...	کاربری ساده و آسان		قابلیت استفاده برای مواد فلزی، پلاستیکی، لاستیکی، سرامیکی، و...
قابلیت استفاده هم به صورت تر و هم خشک	قابلیت ثبت و رکورد متوسط دامنه		قابلیت استفاده هم به صورت تر و هم خشک
قابلیت ثبت زمان واقعی و فضای ذخیره اطلاعات	نیروی اصطکاک/ ضریب اصطکاک		قابلیت ثبت زمان واقعی و فضای ذخیره اطلاعات
قابلیت تغییر پارامترها در حین آزمون			قابلیت تغییر پارامترها در حین آزمون

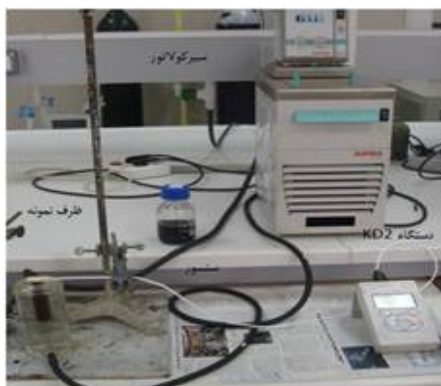


Fig. 5 device  $KD_2$ -Pro to measure the heat conduction coefficient ( $k$ )  
 شکل 5 دستگاه  $KD_2$ -Pro برای اندازه گیری ضریب هدایت حرارت ( $k$ )

2-6- آزمون میدانی و تزریق نانو روغن در محفظه گیربکس

در گام آخر برای انجام آزمون میدانی و ارزیابی نانو روان کار، 8 لیتر از نانو سیال تهیه و با تعویض روغن گیربکس پمپ P-

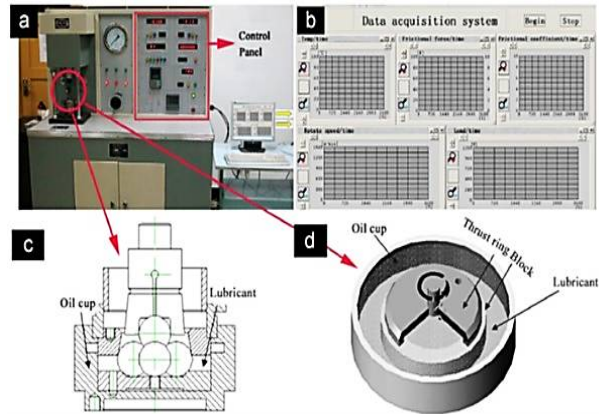


Fig. 4 Schematic diagram of the four-shaft machine

شکل 4 تصویر شماتیک دستگاه چهار ساچمه [2]

در آزمون مورد نظر سه نمونه روغن 0/1، 0/2، و 0/4wt% نانو سیال حاوی سیلیکا و یک نمونه فاقد نانو سیال برای مدت زمان مشابه 60 دقیقه و تحت بار 40 کیلوگرم و دور 1500rpm قرار گرفتند و پس از انجام آزمون میزان خراش متوسط ساچمه ها اندازه گیری و اعلام شد.

2-4- آزمون اندازه گیری ضریب اصطکاک

برای اندازه گیری تأثیر نانو مواد در روغن روان کار بر میزان اصطکاک، آزمون ضریب اصطکاک ایستایی ( $\mu_s$ ) و ضریب اصطکاک جنبشی ( $\mu_k$ ) انجام شد. این آزمون بر روی چهار نمونه روغن شامل نانو ذرات با درصدهای وزنی مذکور و روغن پایه انجام شد. روش آزمون مطابق استاندارد ASTM G115 بود، دستگاه به کار گرفته شده در این آزمون از دو صفحه لغزنده ساخته شده که روی هم قرار گرفته اند. صفحه پایینی ثابت و صفحه بالایی قابلیت حرکت و لغزش دارد. با اعمال نیروی افقی به صفحه بالایی نیروی لازم جهت لغزش به آرامی افزایش می یابد تا زمانی که صفحه بالایی شروع به حرکت نماید و اصطلاحاً در آستانه حرکت قرار گیرد، در این لحظه بیشینه نیروی لازم ثبت می شود. با تقسیم بیشینه نیروی ثبت شده بر نیروی ایجاد شده توسط وزن صفحه، ضریب اصطکاک ایستایی به دست می آید. برای اندازه گیری ضریب اصطکاک جنبشی میزان نیرو برای لغزش صفحه در فاصله 30 میلی متری اندازه گیری و ثبت می شود و با تقسیم میانگین نیروهای ثبت شده بر نیروی ایجاد شده توسط نیروی وزن صفحه بالایی، ضریب اصطکاک جنبشی به دست آمد. این آزمون یک بار بدون حضور روغن، یک بار با حضور روغن پایه و یک بار با حضور روغن حاوی نانو انجام و مقدار ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی در هر آزمون ثبت شد. مشخصات فنی دستگاه اندازه گیری ضریب اصطکاک در جدول 3 ذکر شده است.

نتایج در جدول 4 ذکر شده است.



Fig. 6 Oil injection in pump gearbox P-2101 Fanavaran petrochemical company

شکل 6 تزریق روغن در گیربکس پمپ P-2101 پتروشیمی فن آوران

جدول 4 مقایسه خواص فیزیکی روغن پایه و نانو روان کارها

Table 4 Comparison of physical properties of base oil and nano lubricants

نام آزمون	روغن پایه	نانو روان کار (%0/1)	نانو روان کار (%0/2)	نانو روان کار (%0/4)
گرانروی @40°C (cSt)	215	260	265	285
گرانروی @100°C (cSt)	19/32	41/2	43/09	46/09
شاخص گرانروی	102	215	220	235
چگالی @15 °C (kg/m <sup>3</sup> )	893	1030	1059	1065
نقطه ریزش (°C)	-9	-33	-36	-39
نقطه اشتعال (°C)	265	273	280	295

### 2-3- بررسی و نتایج حاصل از آزمون چهار ساچمه

به منظور بررسی عملکرد روغن حاوی نانو ذرات سیلیکا و روغن پایه بر میزان سایش بین سطوح از دستگاه آزمون چهار ساچمه استفاده شد. کاهش قطر، نشانگر کاهش سایش در قطعه به دلیل وجود اصطکاک لغزشی بین سطوح تماسی می باشد. به خاطر این مسئله است که در مقیاس میکروسکوپی سطوح مجاور و در تماس باهم صاف و صیقلی نیستند مقدار زیادی برجستگی و فرورفتگی در سطح فلز وجود دارد. با حضور نانو سیال این خلل و فرج پر می شوند و اصولاً سطوح زبر از بین می روند. در نتیجه امکان برهم کنش سطوح تیز بر یکدیگر از بین می رود و مقدار سایش کم می شود. لازم به توضیح است که در صورتی که از

2101B واحد اسید استیک پتروشیمی فن آوران شارژ و پس از سه ماه کارکرد نمونه روغن آنالیز عنصری و نتایج آن ثبت شد (شکل 6).

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- خواص فیزیکی

خواص فیزیکی روغن حاوی نانو ذرات و روغن پایه شامل گرانروی در دمای 40 درجه سانتی گراد و 100 درجه سانتی گراد، شاخص گرانروی، چگالی، نقطه ریزش و نقطه اشتعال انجام شد. نتایج حاصل در ادامه ذکر شده است.

#### 3-1-1- گرانروی و چگالی

پژوهش های مختلف صورت گرفته نشان می دهد که تغییر گرانروی نانو سیالات، به شدت تحت تأثیر عوامل متعددی از قبیل نوع نانو ذرات، نوع سیال پایه، درصد ترکیب نانو ذرات با سیال پایه، روش مورد استفاده برای پراکنده سازی نانو ذرات درون سیال پایه و همچنین میزان پراکندگی نانو ذرات قرار دارد. نتایج پژوهش های گذشته نشان می دهد که هرچه غلظت بالاتر باشد میزان گرانروی هم افزایش می یابد ولی در غلظت های پایین چندان محسوس نیست. علت افزایش شاخص گرانروی به علت ماهیت اصطکاک بین ذرات و لغزش آنها روی هم ناشی می شود. نتایج آزمون در جدول 4 ذکر شده است. همان گونه که نتایج نشان می دهد، با افزایش درصد ترکیب نانو ذرات در سیال پایه منجر به افزایش چگالی سیال می شود. بدیهی است که علت افزایش آن به دلیل جرم فلزی نانو ذرات می باشد.

#### 3-1-2- نقطه ریزش و نقطه اشتعال

علاوه بر گرانروی، خواص متعدد دیگری در رابطه با کیفیت عملکرد روغن در شرایط مختلف مطرح است که از آن جمله می توان به نقطه ریزش و نقطه اشتعال اشاره نمود. این دو شاخص در واقع بیانگر محدوده ای عملکرد دمایی روغن می باشند. زیرا نقطه ریزش کمترین دمایی است که در آن روغن می تواند جریان داشته باشد و نقطه اشتعال بالاترین دمایی است که روغن به اندازه کافی به بخار تبدیل شده و با هوا، مخلوط قابل اشتعال به وجود می آورد، که در واقع این دو کمیت نشان دهنده ای کمینه و بیشینه دمای کارکرد روغن می باشند. برای اندازه گیری نقطه ریزش از استاندارد ASTM D97 و برای اندازه گیری نقطه اشتعال از استاندارد ASTM D92 استفاده شد. نتایج آزمون نشان داد این دو کمیت با افزایش میزان نانوذره به طور چشمگیری بهبود می یابد.

روغن پایه ضریب اصطکاک ایستایی تقریباً 10 درصد کم شده و همچنین ضریب اصطکاک جنبشی حدود 3/6 درصد کاهش یافته است.

جدول 6 نتایج حاصل از آزمون ضریب اصطکاک

Table 6 The results of the friction coefficient test

ضریب اصطکاک جنبشی	ضریب اصطکاک ایستایی	نمونه
0/221	0/313	بدون روغن
0/21	0/25	نانوروان کار (0/1%)
0/201	0/235	نانوروان کار (0/2%)
0/2	0/23	نانوروان کار (0/4%)
0/208	0/261	روغن پایه

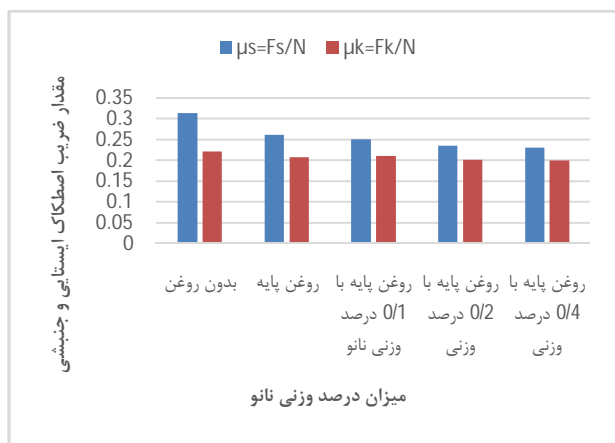


Fig. 8 Comparison of static and kinetic friction coefficient of base oil and oil Contains nano-fluid

شکل 8 مقایسه ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی روغن پایه و روغن حاوی نانو سیال

در توجیه علمی می توان به این مسئله اشاره کرد که نانو ذرات ریز کروی با نفوذ بین خلل و فرج سطوح درگیر یک لایه محافظ مرمتی تشکیل می دهند و سطوح زبر را می پوشانند و این ذرات کروی با کاهش سطوح درگیر به نقاط تماس همانند بلبرینگ های غلتشی، ماهیت لغزش را به غلتش تبدیل می کنند و باعث کاهش چشمگیر اصطکاک می شوند. چون نیروی راه اندازی و حرکت اولیه برای شروع حرکت بیشتر است در نتیجه نیروی اصطکاک ایستایی هم بیشتر می باشد و با گذشت زمان و حرکت سطوح نیروی کمتری برای حرکت نیاز است.

### 3-4- نتایج آزمون اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی (k)

در این آزمون پس از ساخت نمونه ها با درصدهای وزنی 0/1%wt و 0/2%wt و 0/4%wt از ترکیب نانوذره سیلیکا با روغن پایه آزمون انجام شد. نتایج حاصل از این آزمون در جدول 7 ذکر شده

درصد نانوی زیادی استفاده شود، اولاً امکان کلوخه شدن و چسبیدن نانو ذرات به یکدیگر فراهم می شود؛ از طرفی با پر شدن خلل و فرج سطوح، این سطوح به صورت یک جسم اضافه فلزی بین سطوح ایجاد مزاحمت در حرکت می کنند. در این پژوهش انتظار می رفت در غلظت 0/4% سایش کمتری حاصل شود که این گونه نشد و اثر آن با غلظت 0/2% یکسان شد. علت آن می تواند توزیع غیر یکنواخت نانو ذرات در این ترکیب باشد. نتایج در جدول 5 و شکل 7 ارائه شده است.

### 3-3- بررسی نتایج حاصل از آزمون ضریب اصطکاک

هدف از انجام این آزمون، بررسی و مقایسه عملکرد سیال روان کار حاوی نانوذرات سیال با روغن پایه در برابر اصطکاک می باشد. برای این منظور نمونه های روغن شامل روغن پایه و دیگری ترکیب روغن حاوی نانو سیلیکا با غلظت های وزنی 0/1wt%، 0/2wt% و 0/4wt% تهیه و آزمون انجام شد. در گام نخست دو صفحه بدون تزریق مایع روان کار و به صورت خشک روی هم می لغزند. در آزمون دوم بین صفحات روغن حاوی نانو و در آزمون سوم روغن پایه بین صفحات لغزان قرار گرفت. نتایج در جدول 6 ذکر شده است.

جدول 5 مقایسه آزمون چهار ساچمه روغن پایه و روغن حاوی 0/1، 0/2 و 0/4wt% نانوذره

Table 5 Comparison of the test of four base oils and oil contained 0.1, 0.2 and 0.4wt% nano particles

نام آزمون	روغن پایه + 0/1% نانوذره	روغن پایه + 0/2% نانوذره	روغن پایه + 0/4% نانوذره	روغن پایه
آزمون چهار ساچمه	0/26	0/25	0/25	0/27

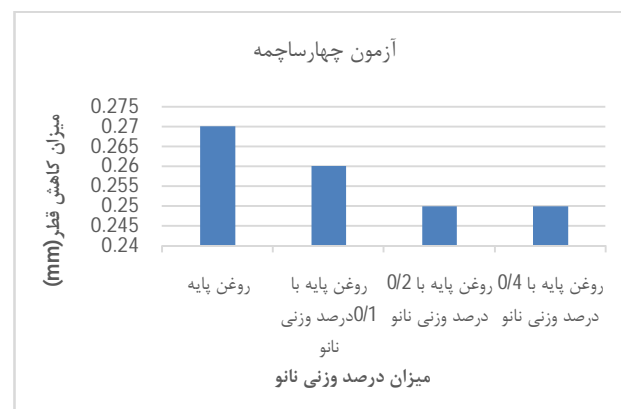


Fig. 7 Reduction in the diameter of the balls by abrasion in four oil samples

شکل 7 مقدار کاهش قطر ساچمه ها در اثر سایش در چهار نمونه روغن

همان طور که از شکل 8 مشخص است با افزودن نانو سیلیکا به

نمونه روغن در گیربکس پمپ شارژ شد و پس از عملکرد سه ماهه ماشین از تجهیز، نمونه گیری و آزمون آنالیز عنصری نمونه ها انجام و نتایج آن با روغن پایه مقایسه شد. با توجه به نتایج حاصل از آزمون میزان عناصر فرسایشی مثل آهن، کرم و آلومینیوم صفر شد که نشان دهنده تأثیر خوب نانوذره اضافه شده به روغن در این پژوهش بود. البته با توجه به نوع نانو به کار رفته یعنی سیلیکات، میزان عنصر سیلیس در آزمون افزایش یافته بود. آزمون، نانوذره سیلیکا را به دلیل بالا رفتن آن در حجم نمونه به عنوان مادهی آلاینده اعلام نمود. چون وجود سیلیس در روغن در آنالیز عنصری نشانهی حضور گردو خاک و ترکیب آن با روغن جزء آلاینده ها محسوب می شود.

#### 4- نتیجه گیری

هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر نانوذرات بر روی خاصیت ضد سایشی روغن گیربکس بود. برای این منظور نانوذره سیلیکا با درصدهای وزنی 0/1wt، 0/2wt و 0/4wt به روغن صنعتی مهم و پرکاربرد در گیربکس ماشین آلات دوار به نام Shell Omalla S2 G220 افزوده شد. ابتدا خواص فیزیکی ترکیب های مختلف روغن اندازه گیری شد. نتایج بهبود خواص فیزیکی روغن مذکور با افزایش میزان نانوذره را نشان داد. سپس آزمون استاندارد چهار ساچمه بر روی نانو روان کارهای ساخته شده و روغن پایه انجام گرفت که نتیجهی آن کاهش میانگین 7/4% میزان سایش در نمونه های حاوی نانوذرات سیلیکات نسبت به روغن پایه بود. پس از آن ضریب اصطکاک و ضریب هدایت حرارتی نمونه ها تعیین شد. بر اساس نتایج ثبت شده کاهش ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی به ترتیب به میزان 10 و 3/6% و بهبود ضریب انتقال حرارت هدایتی به مقدار 10/7% حاصل شد. در مرحلهی آخر آنالیز عنصری روغن روان کار حاوی 2wt% نانوذره سیلیکا مورد استفاده در گیربکس پمپ انجام شد. نتایج آزمون کاهش چشمگیر میزان عناصر فرسایشی مثل آهن، کرم و آلومینیوم و بهبود عملکرد اجزای گیربکس از نظر سایش را نشان داد.

#### 5- تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی داخلی است که با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول انجام شده است.

#### 6- مراجع

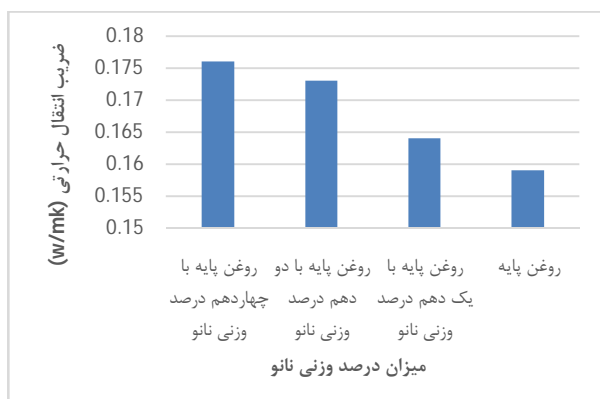
[1] A. Akinci, S. Sen, U. Sen, Friction and wear

است. با توجه به نتایج حاصل با افزایش میزان نانو ذرات جامد در روان کار انتقال حرارت هدایتی بیشتر شد.

**جدول 7** میزان ضریب انتقال حرارت هدایتی در غلظت های مختلف با نانو ذرات مختلف

**Table 7** Coefficient of conduction heat transfer in different concentrations with different nanoparticles

روغن پایه	نانو روان کار	درصد وزنی	دما (°C)
0/159	0/164	0/1wt%	25
0/159	0/173	0/2wt%	25
0/159	0/176	0/4wt%	25



**Fig. 9** Changes in thermal conductivity coefficient

شکل 9 تغییرات ضریب هدایت حرارتی

با مشاهده نتایج به دست آمده، روان کار حاوی نانو ذرات در مقایسه با روان کار پایه افزایشی معادل 9% داشته است (شکل 9). علت اساسی افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی با افزایش میزان نانو ذرات در سیال، مربوط به افزایش ذرات جامد در سیال است، با توجه به اینکه هدایت حرارت در جامدات بیشتر از سیالات است و همچنین به دلیل وجود نانو ذرات با سطح ویژه بالا فاصله ذرات در سیال کم می شود و امکان قرارگیری اتم ها در کنار هم و تشکیل ساختار خوشه ای فراهم می شود، این ساختار همانند یک مبدل لوله و پوسته عمل می کند که در آن نانو ذرات حکم لوله و سیال روان کار مثل پوسته تبادل حرارت می کنند و یا به نحوی دیگر ضریب انتقال حرارت را افزایش می دهد.

#### 3-5- نتایج حاصل از آنالیز عنصری

آنالیز عنصری روغن روان کار به عنوان ابزار کارآمد در صنعت تعمیرات به منظور پیشگیری از بروز خرابی و کاهش توقفات و تعمیرات پیش بینی نشده امری ضروری می باشد. با توجه به نتایج خوب حاصل در آزمایش های صورت گرفته در این پژوهش با نمونه روغن ساخته شده با نانو سیلیکا با غلظت 0/2wt% این



- application as Nanolubricants, *Petroleum Research*, Vol. 24, No. 80, pp. 54-62, 2014. (in Persian فارسی)
- [10] Y. Wu, W. Tsuia, T. Liub, Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives, *Wear*, Vol. 262, Nos. 7-8, pp. 819-825, 2007.
- [11] B.C Ku, Y.C. Han, J.E. Lee, J.K. Lee, S.H. Park, Y.J. Hawng, Tribological Effects of Fullerene (C60) Nanoparticles Added in Mineral Lubricants According to Its Viscosity, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, No. 4, pp. 607-611, 2010.
- [12] D. Jiao, S. Zheng, The tribology properties of alumina/silica composite nanoparticles as lubricant additives, *Applied Surface Science*, Vol. 257 No. 13, pp. 5720-5725, 2011.
- [13] Gu. Yang, Ch. Zhang, Sh. Zhang, P. Zhang, Preparation of sandwich-like self-assembled n-octanethiol film containing doped silver nanoparticles on silicon wafer and evaluation of its tribological properties, *Materials Research Bulletin*, Vol. 55, pp. 88-94, 2014.
- [14] *Technical Data Sheet Shell Omalla S2 G220*, Accessed on 12 February 2013; www.epc.shell.com.
- [15] J. Lee, S. Cho, Y. Hwang, C. Lee, S. Kim, Enhancement of lubrication properties of nano-oil by controlling the amount of fullerene nanoparticle additives, *Tribology Letters*, Vol. 28, No. 2, pp. 203-208, 2007.
- [16] *Iranain Nanomaterils Pioneers Company*, Third unit. No51.Sadaf No.5.Vakil Abad Blv. Mashhad City, Khorasan Province, Iran. Website: iraNanotech.com
- behavior of zirconium oxide reinforced PMMA Composites, *Composites, Part B: Engineering*, No. 56, pp. 42-47, 2013.
- [2] T. Luo, X. Wei, X. Huang, Tribological properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles as lubricating oil additives, *Ceramics International*, Vol. 40, No. 5, pp. 7143-7149, 2013.
- [3] D.X. Peng, Y. Kang, R.M. Hwang, S.S. Shyr, Y.P. Chang, Tribological properties of diamond and SiO<sub>2</sub> nanoparticles added in paraffin, *Tribology International*, Vol. 42, No. 6, pp. 911-917, 2008.
- [4] X. Li, D. Zhu, X. Wang, Experimental investigation on viscosity of Cu-H<sub>2</sub>O nanofluids, *Journal of Wuhan, University of Technology-Mater*, Vol. 24, No. 1, 2009.
- [5] E. Etefaghi, H. Ahmadi, A. Rashidi, S.S. Mohtasebi, R. Soltani, Effects of nano-particles on Properties of Engine Oil and its Functionality Rate on Wear Reduction, *Engine Research*, Vol. 24, No. 24, pp. 3-12, 2011. (in Persian فارسی)
- [6] M. Nasr Azadani, Industrial Lubricants, *Isfahan Oil Refining Company*, 2005. (in Persian فارسی)
- [7] B. Zare Desari, M. Abbaszade, B. Davoudi, Improve lubrication in the deep drawing process using the nanoparticle additiv, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 317-322, 2015. (in Persian فارسی)
- [8] R. Greenberg, G. Halperin, I. Etsion, R. Tenne, The Effect of WS<sub>2</sub> Nanoparticles on Friction Reduction in Various Lubrication Regimes, *Tribology Letters*, Vol. 17, No. 2, pp. 179-186, 2004.
- [9] M. Shekarriz, F. Hagi Ali Akbari, E. Ebrahim Pour Ziaei, Synthesis of coated nickel Nanoparticle and its