The Journal of Engine Research

Spring 2024, Vol. 71, No. 1, pp. 52-66

Journal Homepage: www.engineresearch.ir

Original Research

The effect of using copper nanoparticles in engine oil on fuel consumption

Mohammadreza Saeedpour[1], Ali Qasemian[1*], Mansour Hemmati[2], Mohammadparsa Dolatyar[1]

[1] School of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
[2] Knowledge-based Nano Idea Tejarat Sharq Company, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:
Internal Combustion Engine
Fuel Consumption
Engine Warm-up Period
Copper Nanoparticles
Nano-oil

ABSTRACT

The engine warm-up period is one of the most important factors of high fuel consumption and poor engine performance due to factors such as lack of proper fuel evaporation, lack of complete fuel combustion, premature shutdown of the flame front, and infiltration of hydrocarbon substances such as engine oil into the combustion chamber. In this research, the effects of adding copper nanoparticles to engine oil with different weight concentrations of 0%, 0.2%, and 0.4% on fuel consumption and engine performance during the engine warm-up period have been investigated. The engine oil used was a standard engine oil with a nominal concentration of 20w-50 with an API SL/CF quality level and the engine used was an air-cooled single-cylinder gasoline internal combustion engine. The results of this research indicate that the use of engine oil containing 0.2% and 0.4% nanoparticles, respectively, reduced fuel consumption by 5% and 9.1% during the warm-up period.

© 2024 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

* Corresponding author
E-mail address: qasemian@iust.ac.ir (M. Qasemian)

Received 9 March 2024; Accepted 25 April 2024
E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Saeedpour M, Qasemian A, Hemmati M, Dolatyar M. The effect of using copper nanoparticles in engine oil on fuel consumption. The Journal of Engine Research. 2024 Mar 20;71(1):52-66. doi: 10.22034/ER.2024.2025005.1032

نشریه علمی تحقیقات موتور
بهار ۱۴۰۳، جلد ۷۱، شماره ۱، صفحه ۵۲-۶۶
تارنمای نشریه: www.engineresearch.ir

مقاله پژوهشی

تأثیر استفاده از نانوذرات مس در روغن موتور درون‌سوز روی مصرف سوخت

محمدرضا سعیدپور[۱]، علی قاسمیان[۱*]، منصور همتی[۲]، محمدپارسا دولت‌یار[۱]

[۱] دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
[۲] شرکت دانش‌بنیان نانو ایده تجارت شرق، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:
موتور احتراق داخلی
مصرف سوخت
دوره گرم شدن موتور
نانوذرات مس
نانو روغن

چکیده

دوره حرارتی گذاری گرم شدن موتور به‌واسطه عواملی چون عدم تبخیر درست سوخت، عدم احتراق کامل سوخت، خاموشی پیش از موعد جبهه شعله و نفوذ مواد هیدروکربنی مانند روغن موتور به داخل محفظه احتراق یکی از مهم‌ترین عوامل مصرف سوخت بالا و عملکرد ضعیف موتور است. در این پژوهش تأثیرات افزودن نانوذرات مس به روغن موتور با غلظت‌های وزنی متفاوت به مقدار ۰٪ و ۰,۲٪ و ۰,۴٪ بر روی مصرف سوخت و عملکرد موتور در حین دوره گرم شدن موتور بررسی شده است. روغن موتور مورد استفاده روغن استاندارد موتور با غلظت اسمی ۲۰-۵۰w با سطح کیفیت API SL/CF و موتور مورد استفاده یک موتور درون‌سوز بنزینی تک‌استوانه هوا خنک بوده است. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که استفاده از روغن موتور حاوی نانوذرات ۰,۲ و ۰,۴ درصد بترتیب ۵٪ و ۹,۱٪ درصد طی دوره گرم شدن کاهش مصرف سوخت را موجب شدند.

© 2024 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

* نویسنده مسئول
پست الکترونیکی: qasemian@iust.ac.ir (علی قاسمیان)

دریافت ۹ فروردین ۱۴۰۳؛ پذیرش ۶ اردیبهشت ۱۴۰۳
شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: Saeedpour M, Qasemian A, Hemmati M, Dolatyar M. The effect of using copper nanoparticles in engine oil on fuel consumption. The Journal of Engine Research. 2024 Mar 20;71(1):52-66. doi: 10.22034/ER.2024.2025005.1032

۱- مقدمه

امروزه بخش عمده‌ای از سفرهای درون‌شهری خودروها با پیشرانه درون‌سوز بر روی سفرهای کوتاه (چه از نظر مسافت و چه از نظر زمان) تمرکز دارد؛ به‌طوری که می‌توان گفت که تا ۸۰٪ آلایندگی ناشی از موتورهای درون‌سوز در طول دوره گذرای گرم شدن موتور رخ می‌دهد [۱].

یکی از تأثیرگذارترین عوامل بر روی مقدار مصرف سوخت در موتورهای درون‌سوز مقدار اصطکاک و به تبع آن مقدار بار در موتور است. این در حالی است که در طول دوره گرم شدن موتور به دلیل وجود عواملی چون جذب گرمای حاصل از احتراق توسط دیواره جامد استوانه، سیال خنک‌کننده، روغن روانکار و غیره تنها ۸٪ از انرژی سوخت وارد شده در محفظه احتراق به تولید توان اختصاص پیدا می‌کند [۲].

همچنین در پژوهش‌های انجام گرفته توسط دنیلز[1] [۳] نشان داده شد که مقدار گشتاور لازم برای چرخاندن موتور در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، ۳۰٪ بیشتر از شرایطی است که در آن دمای سیال خنک‌کننده ۸۵ درجه سلسیوس باشد. در پژوهش دنیلز مشخص شد که مقدار غلظت روغن و به دنبال آن انرژی مورد نیاز برای انتقال روغن در مسیرهای روغن‌کاری موتور بسیار تحت تأثیر دما قرار دارد. در نتیجه یکی از بهترین مسیرها با هدف کاهش مصرف سوخت در طول دوره گرم شدن موتور کاهش اصطکاک موتور سرد است. اصطکاک در موتور درون‌سوز طی دوره گرم شدن موتور مستقیماً با روغن موتور و ویژگی‌ها و عملکرد آن در دمای سرد در ارتباط است. درواقع می‌توان گفت که بهبود عملکرد روغن در دمای سرد و یا بهبود عملکرد موتور در دوره گرم شدن مستقیماً بر روی مصرف سوخت تأثیرگذار است.

روش‌های گوناگونی به منظور بهبود عملکرد روغن در دمای سرد وجود دارند. افزودن بهبوددهنده‌های روان‌ساز و بهبوددهنده‌های اصطکاک به روغن پایه، بهره‌گیری از فناوری نانو و روغن با گرانروی متغیر از جمله این روش‌ها هستند. افزودن ذرات جامد با ابعاد نانومتری از جمله نوین‌ترین روش‌های بهبود خواص روغن می‌باشد که در پایین به بررسی چندین پژوهش انجام گرفته در این راستا پرداخته شده است.

خلاقیت استفاده از روش ترکیب ذرات جامد در سیالات صنعتی با هدف بهبود عملکرد سیال در ابعاد میلیمتری و میکرومتری آغاز شده و در نهایت با دسترسی به نانوذرات جامد به بلوغ خود رسیده است. نانوسیالات امروزی با توجه به خصوصیات جالب توجه و مطلوبی که در مقایسه با سیالات خالص دارند در سال‌های اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. این تمرکز بر روی کاربرد و خواص نانوسیالات به حدی است که در سال ۲۰۲۰ نزدیک به ۹٪ انتشارات علمی نمایه شده در WoS مرتبط با فناوری نانو و نانوسیالات بوده است [۴].

می‌توان گفت که به طور کلی استفاده از ذرات جامد در ابعاد نانومتری به عنوان افزودنی در روغن‌های روانکار می‌تواند موجب بهبود عملکرد و ویژگی‌های روغن موتور در دمای سرد شوند [۵]. در تحقیقاتی که بر روی افزودنی‌های جامد اضافه شده به روغن روانکار انجام گرفته مشخص شده است که ابعاد این ذرات و به دنبال آن نسبت سطح به حجم آنها نقش اصلی در ظهور ویژگی‌های جدید در روغن روانکار را ایفا می‌کند. در میان انواع ذرات جامد، نانوافزودنی IF-WS2 مقدار نفوذ قابل توجه در سطوح، افزایش مقاومت سطوح نسبت به تخریب و برخورد و تشکیل سطوح خود روانکار را به عنوان ویژگی منحصر به فرد برای روغن ایجاد می‌کند [۶].

لی[2] و همکاران [۷] آثار استفاده از نانوذرات فولرن (نانو ساختار کربنی) را در غلظت‌های متفاوت بررسی کردند، محافظت از سطوح در برابر اصطاک خشک، کاهش ضریب اصطکاک و بهبود انتقال حرارت از جمله خواص ظاهر شده در روغن معدنی پایه بوده است.

نانوذرات الماس می‌توانند با ایجاد حالت اندودکاری بر روی سطح، یک لایه محافظ در برابر سایش و دیگر آسیب‌های

[1] Daniels
[2] Lee

فیزیکی ایجاد کرده و موجب کاهش ضریب اصطکاک شوند [۸]. در مصارف موتوری استفاده از نانوذرات الماس موجب کاهش مصرف سوخت و افزایش عمر قطعات می‌شود [۹]. همچنین در مطالعه انجام گرفته توسط صداقت حسینی و همکاران، بهبود عملکرد روانکاری روغن موتور و بهبود عملکرد موتور بر اثر استفاده از نانوذرات الماس مشاهده شده است [۱۰].

یکی دیگر از نانو افزودنی‌های جامد مورد توجه نانوذرات فلزی گروه B1 هستند (طلا، نقره، مس و...). این گروه از نانوذرات باید توسط روش‌هایی نسبت به تشکیل توده‌های بزرگ و خارج شدن از ابعاد نانومتری مقاوم شوند [۱۱]. استفاده از نانوذرات فلزی در روغن موتور می‌تواند موجب افزایش گرانروی سیال پایه بشود این موضوع در تحقیقات رئیسیان و خرسند [۱۲] به وضوح نمایش داده شده است. همچنین بیان شده است که روش پایدارسازی این نانوذرات به‌منظور جلوگیری از کلوخه‌شدگی این ذرات بسته به ابعاد نانوذرات باید انتخاب شوند و در صورت انتخاب ناصحیح روش می‌تواند تأثیرات مخربی بر روی مقدار پایداری و پراکندگی داشته باشد. نانوذرات پوشش‌دار مس به طور چشمگیر می‌توانند موجب بهبود مقاومت سایشی سطوح، افزایش توان تحمل بار توسط روغن، کاهش ضریب اصطکاک و ترمیم سطوح آسیب دیده شود.

در تحقیقات انجام گرفته توسط بهمن رحمتی نژاد و همکاران [۱۳] نشان داده شده است که افزایش گرانروی سیال در سامانه خنک‌کننده خودرو به واسطه استفاده از نانوذرات جامد به عنوان افزودنی با غلظت بالا، موجب افزایش افت فشار سیال در هنگام عبور از مبدل حرارتی و در نتیجه کاهش شاخص مریت (نسبت انتقال حرارت به توان مصرفی تلمبه) شده است.

در پژوهش انجام گرفته توسط علی قاسمیان و همکاران [۱۴] تأثیرات بهره‌گیری از نانوذرات مس اکسید به عنوان افزودنی به روغن روانکار و سیال عامل یک جعبه‌دنده خودکار به صورت حل عددی و آزمایشگاهی (عملی) بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان دهنده افزایش ۱۳درصدی عدد ناسلت بر اثر استفاده از نانوذرات مس با غلظت ۲٪ است. همچنین نتایج نشان دهنده این موضوع است که چه با تغییر غلظت نانوذرات و چه با تغییر سرعت جریان، ضریب عملکرد حرارتی[1] در مقایسه با سیال بدون نانو ذرات همواره بیشتر از ۱ است در نتیجه بهبود حرارتی ایجاد شده در نتیجه افزایش انتقال حرارت بیشتر از اثرات منفی ظاهر شده در مبحث اصطکاک است.

ژو[2] و همکاران [۱۵] مشاهده کردند که نانوذرات مس دارای پوشش از جنس دی آلکیل دی-تیفسفات[3] در ابعاد ۲-۵ نانومتری خواص سایشی و روانکاری روغن پارافین را به خوبی بهبود دادند اما در ابعاد ۱۲ نانومتری این خواص کاهش پیدا کرده است. می‌توان گفت که نانوذرات فلزی مس در ابعاد کوچک‌تر با توجه به دمای ذوب کم و واکنش‌پذیری شدید بخوبی با سطوح تماس برهم‌کنش کرده و لایه محافظ با هدف بهبود خواص ضدسایش تشکیل می‌دهند.

وو[4] و همکاران [۱۶] نشان دادند که افزودن نانوذرات مس موجب افزایش گرانروی روغن می‌شود اما ترکیب این نانوذرات با روغن موتور دارای سطح کیفی API-SF موجب کاهش ۱۸,۴٪ در ضریب اصطکاک و کاهش عمق و تعداد شکاف‌های سایشی به مقدار ۱۶,۷٪ شده است. این ذرات در ترکیب با روغن پایه تا ۷۸٪ درصد از شکاف‌های سایشی را کاهش داده است. نتایج حاکی از تشکیل یک لایه محافظ بر روی سطوح اصطکاکی و به دنبال آن رفع چسبندگی و مقاومت در برابر اصطکاک خشک است.

پادگورساکس[5] و همکاران [۱۷] انواع نانوذرات فلزی ازجمله، آهن، مس، کبالت و ترکیبات آنها را بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد نانوذرات مس دارای بیشترین تأثیر در ضریب اصطکاک هستند. در بهترین حالت ترکیب نانوذرات آهن و مس می‌تواند تا ۵۰٪ کاهش مقادیر اصطکاک را سبب شوند.

---

[1] Thermal performance factor
[2] Zhou
[3] Dialkyldithiophosphate
[4] Wu
[5] Padgurskas

چنگژی[1] و همکاران [۱۸] تأثیرات استفاده از نانوذرات مس و روی را در روش دینامیک مولکولی بررسی کردند. نتایج حاکی از تشکیل لایه نازکی از مس روی سطوح سایشی و کاهش ضریب اصطکاک بوده است. از طرف دیگر عملکرد مس بر روی سطوح در سرعت‌های پایین بهتر ارزیابی شد. به طور کلی استفاده از نانوذرات فلزی در روانکارها موجب ظهور چهار ویژگی تحت عناوین: تأثیر کلوئیدی، تأثیر غلطشی، تشکیل لایه محافظ و استفاده از حالت جسم سوم شده است که همگی برای کاهش اصطکاک دارای نتایج مطلوبی هستند [۱۹].

در تحقیقات انجام شده توسط مهدیار و حسینی [۲۰] ظهور تأثیر غلطشی نانوذرات الماس در سطح دینامیک مولکولی بررسی شده است. همچنین در نتایج آورده شده است که تغییر فرایند اصطکاکی از لغزشی به غلتشی ضریب اصطکاک میان دو سطح آهنی را از ۰,۲۴ به ۰,۰۵ رسانده است.

کاستیلو و اسپایکس[2] [۲۱] در تحقیقات خود نشان دادند که لایه‌مرزی تشکیل شده توسط روغن حاوی نانوذرات در سرعت‌های پایین، تا ۲ برابر به واسطه مکانیزم غلتکی ذرات رشد می‌کند.

تحقیقات سانکوینگ[3] و همکاران [۲۲] به این نکته اشاره دارد که همه محصولات واکنش در فرایند روانکاری نمی‌تواند سبب بهبود مقاومت در مقابل سایش گردند، برای مثال نانوذرات CeF3 تحمل فشار بسیار خوبی از خود نشان دادند و عملکرد مناسبی نسبت به کاهش اصطکاک داشتند، ولی از سوی دیگر خواص ضدخورندگی خوبی ندارند. دلیل این رفتار هسته اتم‌های F در CeF3 بوده که خاصیت شیمیایی فعال‌تری داشته و در نتیجه خورندگی را افزایش می‌دهد.

نانوذرات توزیع شده در روغن‌های روانکار می‌توانند لایه‌ای از رسوب را تشکیل دهند که سبب کاهش تنش برشی جفت‌های در حال سایش شده و آسیب‌های میکرونی و خراش سطحی را خنثی می‌کند. این فرایند می‌تواند سطح را صاف نموده و حتی منجر به کاهش اصطکاک، جلوگیری از سایش و حتی ایجاد خاصیت خود ترمیمی در یک سطح ساییده شده بشود [۲۳].

مانی قنبری [۲۴] در تحقیقات خود بر روی استفاده از نانوذرات آلومینیوم ترکیب شده با سوخت دیزل افزایش توان ترمزی موتور تا ۲٪ کاهش مصرف سوخت تا ۶٪ و کاهش آلایندگی موتور در تولید گازهای CO و HC را نشان داد. همچنین نتایج حاکی از افزایش مقادیر تولید گاز CO_2 بوده است که می‌تواند تأثیر مثبت حضور نانوذرات فلزی در محفظه احتراق را بر روی فرایند احتراق و تولید توان استنباط کرد.

در تحقیقات حرارتی انجام گرفته توسط ژیائو[4] [۲۵] بر روی روغن موتور به همراه افزودنی‌های نانو Al_2O_3-MWCN مشخص شده است که حضور ذرات فلزی در ابعاد نانومتری رسانش حرارتی روغن را بهبود می‌بخشد. در این بررسی‌ها بیان شده است که رسانش حرارتی روغن موتور و دیگر مایعات با افزایش دما، کاهش می‌یابد که رفتار مطلوبی نیست و در مقابل وجود نانوذرات فلزی در روغن موتور نه‌تنها از این کاهش رسانش جلوگیری می‌کند، بلکه در صورت بهره‌گیری از نانوذرات با غلظت مناسب، با افزایش دما رسانش حرارتی سیال افزایش می‌یابد.

در تحقیقات انجام گرفته توسط کنان–لئو[5] [۲۶] روی تأثیر استفاده از نانوذرات فلزی در روغن موتور بر رسانش حرارتی سیال مشخص شده است که مقدار غلظت نانوذرات با مقدار بهبود رسانش حرارتی نسبت خطی و مستقیمی ندارد و دو برابر کردن غلظت نانوذرات به معنای تأثیرگذاری دو برابر نیست و با افزایش غلظت نانوذرات در روغن، نرخ تغییر ضریب رسانش حرارتی روغن نسبت به دما افزایش می‌یابد.

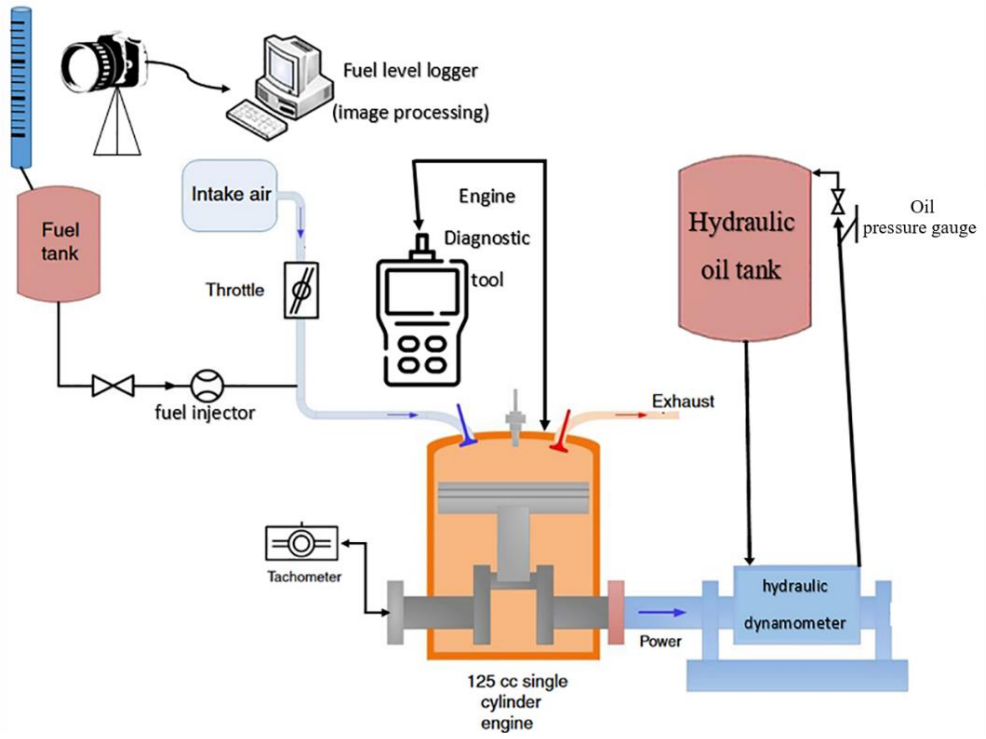
گوپتا[6] [۲۷] در تحقیقات خود بر روی نانوذرات مس به عنوان افزودنی به روغن‌های روانکار آثار بهره‌گیری از

[1] Chengzhi
[2] Castillo & Spikes
[3] Sunqing
[4] Xiao
[5] KeNan Liu
[6] Gupta

این نانوذرات فلزی را در گرانروی، ضریب اصطکاک و سایش بررسی کرده است. بنابر یافته‌های او، افزودن نانوذرات مس به روغن موجب افزایش گرانروی روغن پایه خواهد شد اما با افزایش دما این اثر کاهش می‌یابد تا جایی که در دمای بالاتر از ۹۰درجه سانتی‌گراد حضور نانوذرات مس تا غلظت ۲٪ تأثیر چشم‌گیری نخواهد داشت. مقدار ضریب اصطکاک با استفاده از نانوذرات مس در بارگذاری‌های سبک تا ۹۵٪ و در بارگذاری‌های سنگین بیش از ۷۵٪ کاهش یافت است. مقدار سایش نیز بارگذاری سبک تا ۱۰٪ کاهش‌یافته است و این تأثیر در بارگذاری سنگین به بیش از ۵۰٪ رسیده است. در این پژوهش رفتار حرارتی و مکانیکی یک موتورسیکلت شهری با سامانه سوخت‌رسانی افشانه در طول دوره گذرای حرارتی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد و تأثیرات بهره‌گیری از نانوذرات جامد فلزی مس به عنوان افزودنی به روغن موتور در غلظت‌های ۰٪ ، ۰٫۲٪ و ۰٫۴٪ مورد بحث واقع می‌شود. در طی این آزمایش‌ها، موتور هدف از همان لحظه راه‌اندازی سرد تحت بار قرار می‌گیرد. مقدار گشتاور اعمالی بر روی موتور با استفاده از لگام ترمز و سرعت دوران موتور توسط مهار دریچه گاز مدیریت می‌شود، در نتیجه در تمام طول آزمایش مقدار توان خروجی موتور در مقادیر مشخصی ثابت نگاه‌داشته می‌شود. مقدار مصرف سوخت در تمام مدت انجام آزمایش به صورت لحظه‌ای ثبت شده است. نقطه تمایز و نوآوری این پژوهش را می‌توان بررسی اثرات استفاده نانوذرات مس به عنوان افزودنی به روغن موتور در غلظت‌های جرمی متفاوت در طول دوره گرم شدن موتور و همچنین ثبت لحظه‌ای مصرف سوخت موتور از همان لحظه ابتدایی راه‌اندازی سرد دانست.

۲- چیدمان آزمایشگاه

در این قسمت دستگاه و میز آزمایشگاهی استفاده شده در این پژوهش معرفی شده و ویژگی‌های آنها بررسی می‌شود. شکل ۱، نحوه چیدمان اجزای آزمایش را نشان می‌دهد.

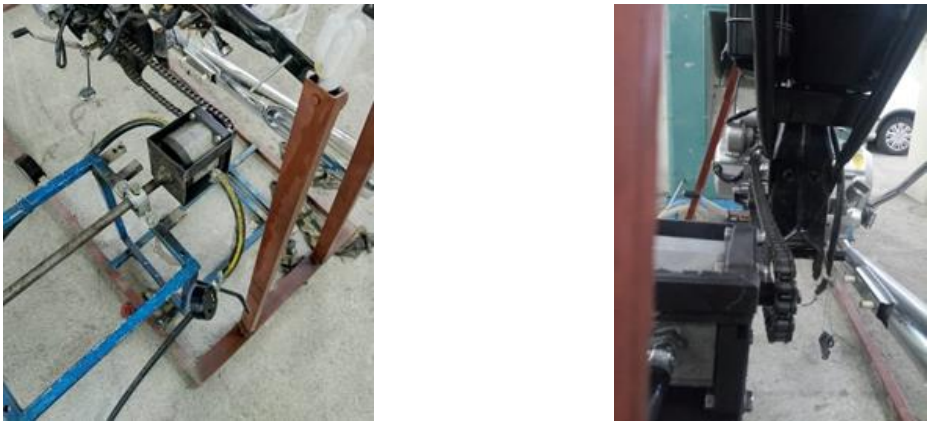


شکل ۱ شمای چیدمان دستگاه آزمون

جدول ۱ مشخصات موتور درون‌سوز

عنوان	ویژگی
نام موتور	125-EFI
حجم جابه‌جایی	۱۲۵ سی‌سی
حداکثر توان	۷٫۴ کیلووات (۸۷۳۹ دور در دقیقه = د.د.د.)
حداکثر گشتاور	۸٫۲۶ نیوتون متر (۶۰۰۰ د.د.د.)
حجم روغن موتور	۹۰۰ سی‌سی
تعداد استوانه	۱ استوانه
چرخه کاری	۴ زمانه (چرخه اتو)
نوع سامانه احتراقی	اشتعال جرقه‌ای (SI)
سامانه خنک‌کننده	هوا خنک (جریان آزاد)
سامانه سوخت‌رسانی	پاشش برقی (افشانه تحت فشار)
تعداد دنده جعبه دنده	۵ دنده

به منظور اعمال بار بر روی موتور از یک لگام ترمز هیدرولیکی که با استفاده از زنجیر به محور خروجی جعبه دنده متصل شده است بهره گرفته شده است (شکل ۲).



شکل ۲ لگام ترمز روغنی

هسته اصلی این لگام ترمز یک تلمبه روغن پره‌ای با حداکثر فشار اسمی ۲۵۰ بار و قابلیت تلمبه روغن تا غلظت SAE 10W است. یک مخزن روغن سطح آزاد، به عنوان منبع تأمین روغن و همچنین جاذب حرارت تولید شده توسط تلمبه روغن با ظرفیت ۱۵ لیتر استفاده شده است. به منظور اعمال بار با توجه به نشتی داخلی بسیار اندک تلمبه پره‌ای، یک شیر جریان فشار قوی سوزنی با فشار اسمی ۱۵۰ بار در مسیر خروجی تلمبه روغن قرار داده شده است. با بستن شیر جریان، فشار در خروجی تلمبه روغن افزایش یافته و این فشار به صورت گشتاور مقاوم در برابر چرخش محور تلمبه ظاهر می‌شود. این گشتاور را می‌توان با فشار روغن ایجاد شده در مسیر خروجی تلمبه ارتباط داد و با مهار فشار، مقدار گشتاور اعمالی به موتور را مهار کرد.

یکی از مهم‌ترین متغیرهای مشخص‌کننده رفتار، عملکرد موتور و بازده حرارتی موتور، مقدار مصرف سوخت لحظه‌ای موتور حین عبور از دوره حرارتی گذرا است. در سامانه سوخت‌رسانی افشانه‌ای نمی‌توان تنها از نیروهای ثقلی به منظور تأمین سوخت استفاده کرد، بلکه یک تلمبه برقی وظیفه تأمین سوخت با فشار مشخص را بر عهده دارد. با توجه به هدف نهایی پژوهش یک مخزن سوخت با بدنه پلیمری طراحی و ساخته شده و تلمبه برقی مذکور به صورت دائم بر روی بدنه آن نصب شده است (شکل ۳).

شکل ۳ مخزن سوخت پلیمری

بدنه مخزن سوخت از جنس PVC ساخته شده است. سطح مقطع ثابت این تلمبه (در جهت عمود بر سطح افق) امکان اندازه‌گیری مصرف سوخت را از طریق اندازه‌گیری ارتفاع تأمین کرده است، اما نرخ مصرف سوخت بسیار کم توسط موتور انتخابی موجب ایجاد خطا و یا عدم ظاهر شدن تغییرات در سطح ارتفاع مخزن سوخت به طور معنی‌دار می‌شود. به منظور رفع این مشکل، یک مخزن استوانه‌ای شفاف مدرج با سطح مقطع دایره‌ای و قطر ۲٫۵ سانتی‌متر به مجموعه پایش مصرف سوخت اضافه شده است. با قراردادن مخزن شفاف در سطحی بالاتر از دیوار بالایی مخزن پلیمری، سوخت ریخته شده در استوانه شفاف به واسطه نیروهای ثقلی به مخزن PVC منتقل می‌شود. در این وضعیت کوچک‌ترین تغییر در مقدار سوخت موجود در کل مجموعه سوخت‌رسانی به صورت تغییر ارتفاع در سوخت موجود در استوانه شفاف ظاهر می‌شود و با توجه به سطح مقطع کوچک استوانه، تغییرات کوچک نیز قابل‌اندازه‌گیری هستند.

در این آزمایش برای ثبت مقدار مصرف سوخت از دوربین رایانه‌ای و روش پردازش تصویر استفاده شده است. به این منظور یک دوربین وظیفه تصویربرداری دائم از سطح بنزین موجود در استوانه شفاف را دارد. برای اطمینان از صحت اطلاعات نمایش داده شده، همچنین افزایش سرعت انتقال اطلاعات و دسترسی به اطلاعات مخابره شده میان حسگرها، عملگرها و واحد مهار برقی موتور و نمایش آنها بر روی نمایشگر از یک دستگاه عیب‌یاب برقی موتور مورد آزمایش استفاده شده است (شکل ۴).

شکل ٤ دستگاه عیب‌یاب برقی

دمنده هوا، جهت شبیه‌ساز حرکت موتور در سطح شهر، دارای دو مقدار دمش ۷۵۰۰ (CFM) و ۵۰۰۰ (CFM) بوده که بترتیب معادل سرعت دوران ۱۵۰۰ و ۱۰۰۰ د.د.د. از موتور برقی تک‌فازی این دمنده است.

با توجه به مشخصات این دمنده و سطح مقطع کانال، جریان سیال خنک‌کننده بترتیب با سرعت ۱۴٫۷ و ۹٫۹ متر بر ثانیه در دو دور متفاوت که معادل ۵۳ کیلومتر بر ساعت و ۳۵٫۵ کیلومتر بر ساعت از دهانه کانال خارج می‌شود. با هدف نزدیک‌شدن به شرایط واقعی استفاده از این نوع وسیله نقلیه، فاصله ۵۶ سانتی‌متری بین دهانه کانال و پره‌های حرارتی موتور هوا خنک در نظر گرفته شده است. این فاصله سرعت برخورد هوا با پره‌های خنک‌کننده موتور مطابق سرعت ۲۵ کیلومتر بر ساعت و یا معادل با ۷ متر بر ثانیه تنظیم شده است.

۲-۱- آماده‌سازی نانو روغن

نانو روغن مورد استفاده در این مطالعه طی دو مرحله اصلی ساخته می‌شود. در مرحله اول نانو روغن مس با غلظت ۱۰ درصد وزنی به روش یک‌مرحله‌ای ساخته می‌شود.

در این روش نانوذرات به‌صورت مستقیم در روغن موتور وارد می‌شوند. این روش که مبتنی بر کاهش شیمیایی یون‌های مس است از استات مس به عنوان تأمین‌کننده یون مس استفاده شده و یون‌های مس توسط احیاء کننده تبدیل به اتم‌های فلزی مس می‌گردد. بر اساس نسبت یون مس به احیاء کننده، اندازه و شکل نانوذرات مهار می‌گردد و نانوذرات سنتز شده به‌وسیله پایدارکننده‌ای محلول در روغن، پایدار شده و بدین‌وسیله از کلوخه‌شدن آنها جلوگیری می‌گردد.

از آنجایی که نانو روغن موتور سنتز شده با غلظت ۱۰ درصد وزنی آماده‌سازی شد، با استفاده از همزن مکانیکی به غلظت‌های مورد نظر رسانده شد و همچنین در همزن فراصوت به مدت یک ساعت برای یکنواخت کردن نانوذرات در روغن پایه قرار داده شد.

۲-۲- روش اجزای آزمون

در این بخش روش‌های آزمایشی این پژوهش و شرایط اعمالی به موتور در طول هر آزمون و همچنین هدف از طراحی چنین آزمونی بیان می‌شود.

۲-۲-۱- بارگذاری سنگین در دورهای تند

در این آزمون به‌محض روشن شدن موتور (راه‌اندازی سرد) لگام ترمز برای اعمال گشتاور ۵,۵ الی ۵,۸ نیوتن متر بر روی موتور تنظیم شده و مقادیر دور موتور بر روی مقدار ۶۰۰۰ د.د.د. ثابت می‌شود. این شرایط تا پایان انجام آزمایش (رسیدن دمای بستار به ۱۱۰ درجه سلسیوس) حفظ می‌شود.

۲-۲-۲- بارگذاری سنگین در دورهای کُند

این آزمون همانند آزمون قبل تحت گشتاور اعمالی ۵,۵ الی ۵,۸ نیوتون متر انجام می‌پذیرد اما به منظور نشان دادن تأثیر تغییر دور موتور بر روی مقادیر آلاینده و عملکرد موتور، این آزمون در دور موتور ۳۰۰۰ د.د.د. انجام می‌شود.

۲-۲-۳- بارگذاری سبک در دورهای کُند

دور موتور هدف در این آزمون همچون آزمون قبل ۳۰۰۰ د.د.د. است؛ اما مقدار گشتاور استخراجی معادل ۳,۳ الی ۳,۵ نیوتون متر تنظیم می‌شود.

۲-۲-۴- بارگذاری سبک در دور تند

این آزمون در مقایسه با آزمون قبل تأثیر افزایش دور موتور در بارگذاری‌های ملایم و در مقایسه با آزمون اول تأثیر کاهش بارگذاری در دورهای تند را نشان می‌دهد. شرایط این آزمون بیشترین فاصله با شرایط تمام بار موتور را دارد. مقدار دور موتور در این آزمون ۶۰۰۰ د.د.د. و مقدار گشتاور اعمالی ۳,۳ الی ۳,۵ نیوتن متر است.

۲-۲-۵- کارکرد درجا

در این آزمون نیز پس از روشن‌کردن موتور و قرار دادن دنده در حالت خلاص، ارتباط میان موتور و لگام ترمز را قطع کرده و موتور صرفاً توسط تنظیمات کارخانه در دور پایه (IDLE) روشن می‌ماند. جدول ۲، حالت‌های اجرا آزمون را به صورت خلاصه نشان می‌دهد.

جدول ۲ حالت‌های اجرای آزمون

دور موتور (د.د.د)	گشتاور اعمالی (نیوتن.متر)	شرایط کاری موتور
۶۰۰۰	۵٫۵ الی ۵٫۸	دور بالا – بار زیاد
۳۰۰۰	۵٫۵ الی ۵٫۸	دور میانی – بار زیاد
۳۰۰۰	۳٫۳ الی ۳٫۵	دور پایین – بار میانی
۶۰۰۰	۳٫۳ الی ۳٫۵	دور بالا – بار میانی
دور درجا	بدون بار	درجا

۳– بحث بر روی نتایج

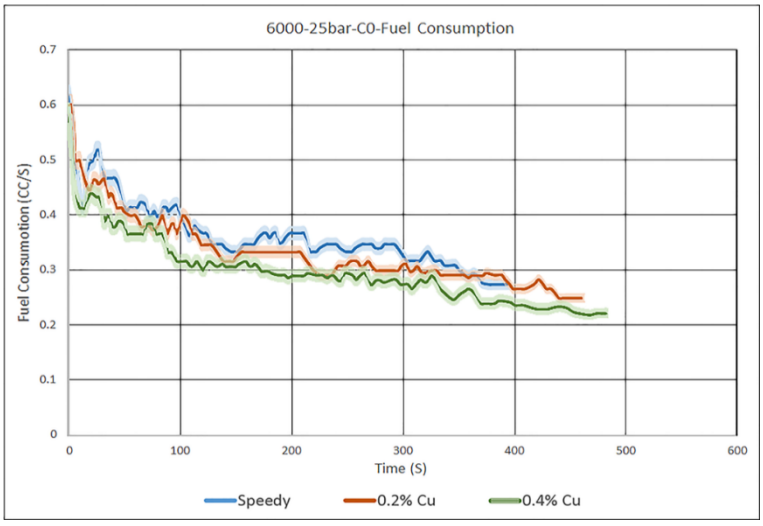
در این بخش نتایج عملکرد موتور با استفاده از روغن استاندارد و نانو روغن با غلظت‌های جرمی ۰٫۲ و ۰٫۴ درصد بر روی مصرف سوخت طی دوره گرم شدن موتور تحلیل می‌شود. در تمامی نمودارهایی که در این بخش نشان داده شده اند، خطوطی که با رنگ آبی نشان داده شده است برای روغن استاندارد موتور با غلظت اسمی W۵۰–۲۰ و سطح کیفیت SN استاندارد API، خطوط نارنجی رنگ برای استفاده از روغن موتور مشابه به عنوان روغن پایه، به همراه افزودنی نانوذرات مس به مقدار ۰٫۲ درصد جرمی است. در نهایت خطوط سبز رنگ مقادیر مربوط به افزودن ۰٫۴ درصد جرمی از نانوذرات مس به روغن استاندارد موتور پایه را نشان می‌دهد. منظور از گرم شدن موتور، دوره‌ای گذرا است که در آن دمای بستار موتورسیکلت از دمای محیط به دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس برسد.

۳–۱– نمایش مقادیر عدم قطعیت در نمودارها

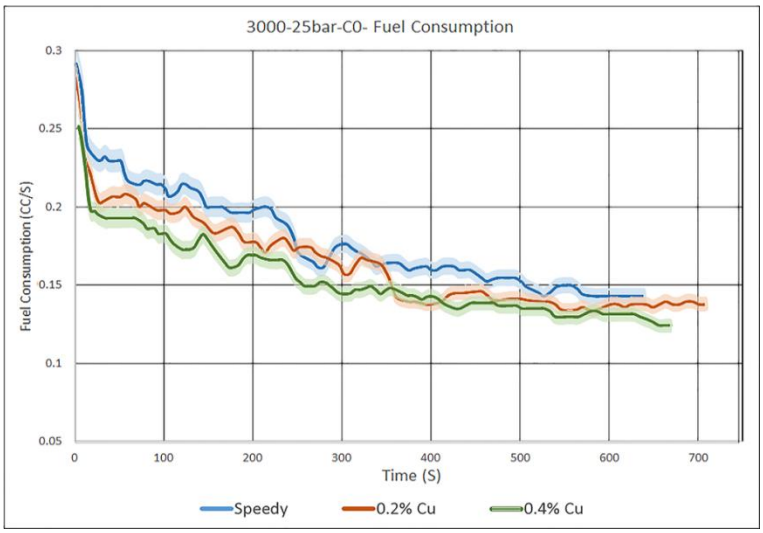
تمام نمودارهای نمایش داده شده در این بخش به گونه‌ای نمایش داده شده که علاوه بر نمایش مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه‌ها، محدوده عدم قطعیت متغیرها نیز نمایش داده می‌شود. محدوده کم‌رنگ هر نمودار که رنگی مشابه به نمودار مرجع آن دارد، محدوده عدم قطعیت مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

۳–۲– تأثیرات استفاده از نانو روغن مس بر روی مصرف سوخت

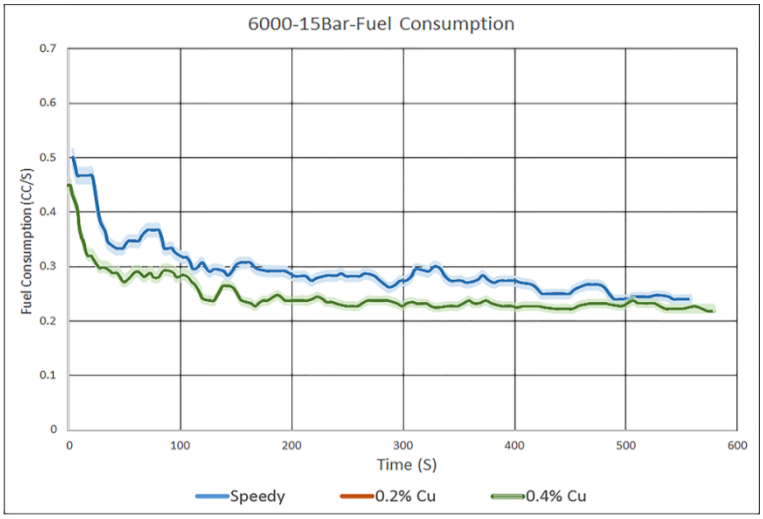
نمودارهای ارائه شده مصرف سوخت موتورسیکلت بر حسب زمان و بعد از روشن شدن موتور را نشان می‌دهند. محور عمودی نمایشگر مقدار مصرف سوخت حجمی موتور بر حسب سی‌سی بر ثانیه و محور افقی زمان بر حسب ثانیه است.



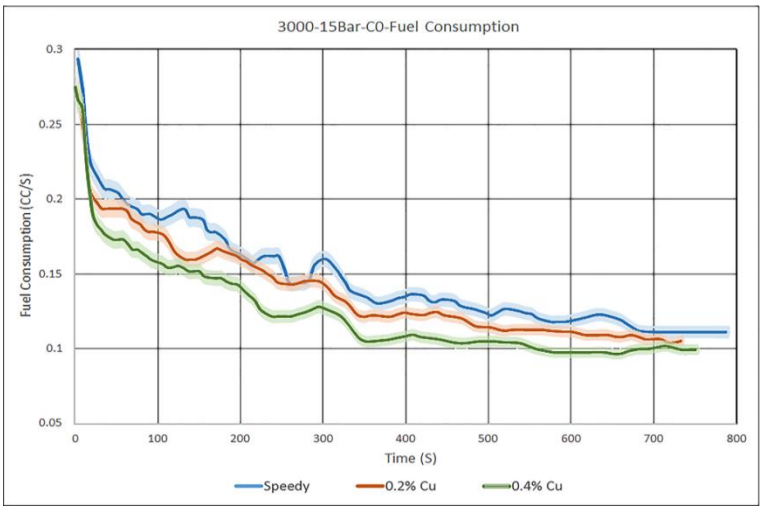
شکل ۵ نمودار مصرف سوخت آزمون ۶۰۰۰ د.د.د. تحت بار ۵٫۵ نیوتن‌متر



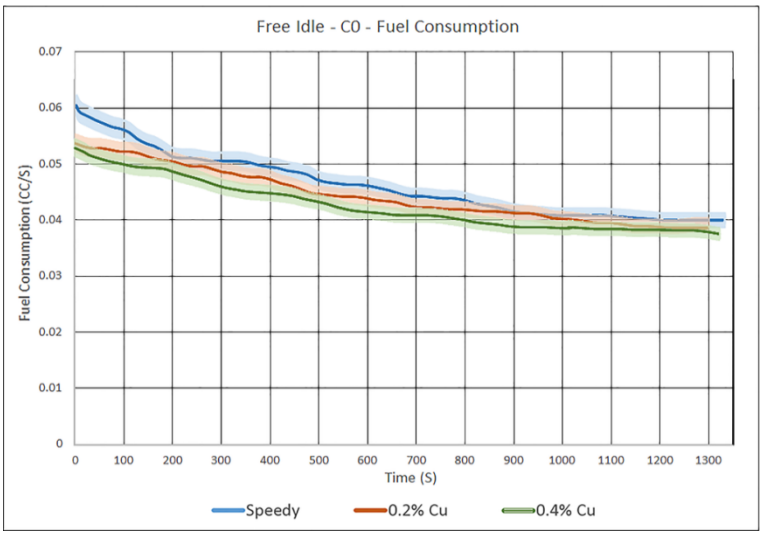
شکل ٦ نمودار مصرف سوخت آزمون ۳۰۰۰ د.د.د. تحت بار ۵٫۵ نیوتن‌متر



شکل ۷ نمودار مصرف سوخت آزمون ۶۰۰۰ د.د.د. تحت بار ۳٫۵ نیوتن‌متر



شکل ۸ نمودار مصرف سوخت آزمون ۳۰۰۰ د.د.د. تحت بار ۳٫۵ نیوتن‌متر



شکل ۹ نمودار مصرف سوخت آزمون کارکرد درجا

در تمام موارد نمایش داده شده در بالا می‌توان مشاهده کرد که بهره‌گیری از نانوذرات مس به عنوان افزودنی به روغن موتور، موجب بهبود عملکرد و کاهش مصرف سوخت موتور شده است. قابل مشاهده است که استفاده از نانوذرات مس موجب کاهش مصرف سوخت در همان لحظات اولیه روشن شدن موتور شده است. این موضوع را می‌توان به بهبود خاصیت اصطکاک خشک قطعات ارتباط داد. در تمامی موارد قابل مشاهده است که در مناطق میانی نمودارها تأثیرات بهره‌گیری از نانوذرات مس به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این موضوع را می‌توان به خاصیت کاهش اصطکاک لغزشی[1]، تغییر نوع روغن‌کاری، کاهش حجم و سطح نشتی‌های داخلی موتور، بهبود سطوح اصطکاکی و ... توسط نانوذرات مس ارتباط داد. در هنگام عملکرد سرد موتور که اصطکاک در مقایسه با توان خروجی از موتور مقادیر بزرگتری را به خود اختصاص می‌دهد، نقش نانو روغن‌ها در بازیابی این توان از دست رفته به واسطه بهبود اصطکاک، پررنگ‌تر بوده و با افزایش دما و کاهش این نسبت، نقش نانوذرات کاهش پیدا می‌کند.

اگرچه کاهش تأثیرات بهره‌گیری از این نانوذرات در ثانیه‌های پایانی نمودارها کاملاً قابل مشاهده است، اما این کاهش تأثیرگذاری هیچگاه به صفر نرسیده است. این کاهش مصرف سوخت را می‌توان وابسته به کاهش ضرایب اصطکاک ناشی از تغییر نوع اصطکاکی از سایشی به غلتکی، افزایش فشار استوانه بواسطه بهبود آب‌بندی حلقه‌های سمبه و در نتیجه افزایش بازده موتور و عواملی از این دست دانست. دوبرابر کردن غلظت ذرات تأثیری به‌مراتب کمتر از افزودن مقادیر اولیه نانو مس به روغن گذاشته است.

بخشی از اطلاعات کمی قابل استخراج از این نمودارها به صورت جدول ۳ آورده شده است. منظور از درصد کاهش مصرف سوخت در واقع مقایسه مصرف سوخت تجمیعی هر آزمون با آزمون مشابه (از نظر شرایط اعمالی به موتور) با استفاده از روغن استاندارد موتور است. درصد کاهش مصرف سوخت نهایی، مقادیر مصرف سوخت موتور را در ۳۰ ثانیه آخر هر آزمون با یکدیگر مقایسه می‌کند.

در آزمون کارکرد درجا می‌توان کاهش محسوس مصرف سوخت در دماهای سرد و میانی را مشاهده کرد، اما در دماهای نهایی و داغ در موتور، اختلاف میان مقادیر مصرف سوخت بین نمونه‌ها کاهش پیدا کرده؛ اما نظم و ترتیب آنها تغییر نکرده و نشان‌دهنده کاهش مصرف سوخت به واسطه استفاده از نانوذرات مس در روغن است.

[1] Sliding Friction

شیب نمودار مصرف سوخت در لحظات اولیه روشن‌کردن موتور در منحنی‌های مربوط به روغن‌هایی که حاوی نانوذرات مس هستند کمتر از روغن استاندارد موتور است. این موضوع نشان‌دهنده بهبود ضریب اصطکاک خشک در قطعات موتور پیش از رسیدن روغن روانکار در مراحل ابتدایی راه‌اندازی سرد است.

جدول ۳ نتایج کمی مصرف سوخت در حالت‌های مختلف آزمون

نوع روغن	کل سوخت در طول گرم‌شدن (CC)	کاهش مصرف سوخت	مقادیر نهایی مصرف سوخت (CC/S)	کاهش مصرف سوخت نهایی
۶۰۰۰ د.د.د. — ۵٫۵ نیوتون‌متر				
استاندارد موتور	۱۴۶	---	۰٫۲۷۳	---
۰٫۲٪ جرمی مس	۱۳۶	٪ ۶٫۸	۰٫۲۵۸	۶٪
۰٫۴٪ جرمی مس	۱۲۸	٪ ۱۲٫۳	۰٫۲۴۸	۹٪
۳۰۰۰ د.د.د. — ۵٫۵ نیوتون‌متر				
استاندارد موتور	۱۱۵		۰٫۱۴۳	---
۰٫۲٪ جرمی مس	۱۰۹	٪ ۵٫۲	۰٫۱۳۸	٪ ۳٫۵
۰٫۴٪ جرمی مس	۱۰۶	٪ ۷٫۸	۰٫۱۳۴	٪ ۳٫۶
۶۰۰۰ د.د.د. — ۳٫۵ نیوتون‌متر				
استاندارد موتور	۱۴۲	---	۰٫۲۵	---
۰٫۴٪ جرمی مس	۱۲۴	٪ ۱۲٫۶	۰٫۲۲	۱۲٪
۳۰۰۰ د.د.د. — ۳٫۵ نیوتون‌متر				
استاندارد موتور	۱۱۱	---	۰٫۱۱۱	---
۰٫۲٪ جرمی مس	۱۰۳	٪ ۷٫۲	۰٫۱۰۵	٪ ۵٫۵
۰٫۴٪ جرمی مس	۹۵	٪ ۱۴٫۴	۰٫۱۰۰	٪۱۰
کارکرد درجا				
استاندارد موتور	۶۳	---	۰٫۰۴	---
۰٫۲٪ جرمی مس	۶۰	٪ ۴٫۸	۰٫۰۳۹۳	٪۲
۰٫۴٪ جرمی مس	۵۷	٪ ۹٫۶	۰٫۰۳۸۴	٪۴

۴- نتیجه‌گیری

در طی این پژوهش به صورت عملی تأثیر بهره‌گیری از نانوذرات مس به عنوان افزودنی به روغن استاندارد موتور بر روی مصرف سوخت لحظه‌ای در طول دوره حرارتی گرم شدن موتور بررسی شد. مجموعه نتایج نشان‌دهنده تأثیر کاملاً مطلوب این نانوذرات بر روی مصرف سوخت و کاهش مصرف در تمام نقاط کاری موتور بوده است. مقدار تأثیرگذاری این نانوذرات در دماهای سرد و لحظات اولیه روشن‌سازی موتور به مراتب بیشتر از دوره کارکرد پایا در موتور است. می‌توان گفت که عامل اصلی مشاهده این نتایج تأثیر مستقیم و شدید این نانوذرات بر روی ضرایب اصطکاک و خاصیت روانکاری روغن موتور و همچنین ترمیم سطوح اصطکاکی دانست، زیرا که گرم شدن موتور و واردشدن به محدوده کارکرد پایا به معنای کاهش توان اصطکاکی تلف شده از موتور و در نتیجه کاهش تأثیر استفاده از این نانوذرات است.

کاهش مقدار مصرف سوخت در ثانیه‌های اول روشن شدن موتور و همچنین کاهش مقدار مصرف سوخت با شیب

زیاد در ثانیه‌های ابتدایی روشن شدن موتور نشانگر بهبود خاصیت اصطکاک خشک قطعات است. بیشترین تأثیرگذاری استفاده از این نانوذرات در آزمون مربوط به بارگذاری سبک در دورهای کُند بوده است که دقیقاً مشابه شرایط کارکرد موتورهای احتراق داخلی در مصارف شهری است.

کاهش مصرف سوخت به مقدار ۵,۱٪ در هنگام بکارگیری از این نانوذرات با غلظت جرمی تنها ۰,۲٪ نشان دهنده تأثیر چشمگیر بهره‌گیری از آنها است. مقدار کاهش مصرف سوخت با دو برابر کردن غلظت این نانوذرات به ۹٪ محدود شده است. با توجه به هزینه نسبتاً زیاد تولید این نانوذرات و عدم وجود تناسب خطی میان مقدار تأثیرگذاری آنها و غلظت این ذرات در روغن روانکار، می‌توان نتیجه گرفت که یک نقطه بهینه در مقدار به کارگیری آن‌ها با هدف استفاده از مزیت‌های این نانوذرات و در عین حال مهار هزینه تولید و استفاده از آنها در مصارف عمومی وجود دارد.

References

[1] Keshavarz Ali, Qasemian Ali. Heat transfer in internal combustion engines. Tehran: K. N. Toosi University of Technology; 2014. [In Persian]

[2] Nallusamy S, Logeshwaran J. Experimental analysis on nanolubricants used in multi cylinder petrol engine with copper oxide as nanoparticle.Rasayan Journal of Chemistry. 2017Jul;10(3):1050. doi: 10.7324/rjc.2017.1031861

[3] Daniels CC, Braun MJ. The friction behavior of individual components of a spark-ignition engine during warm-up. Tribology Transactions. 2006 Jul 1;49(2):166-73. doi: 10.1080/05698190500544403

[4] Rahmatinejad B, Rahimi Asiabaraki H, Azimpour Shishevan F, Mohtadi Bonab MA. Experimental analysis of the effect of using aluminum oxide nanofluid in improving the heat transfer of XU7 engine radiator. The Journal of Engine Research. 2023;70(2):66-79. doi: 10.22034/er.2023.2011671.1015 [In Persian]

[5] Faraji S, Mehrabadi A, qolami mohammad. Effect of soluble copper nano particles in the oil of engine on the pressure of cylinder compression and amount of exhaust gases. Biosystems Engineering [Internet]. 2013 Nov 26 [cited 2014 Jun 20];3(1):15–25. [In Persian]

[6] Greenberg R, Halperin G, Etsion I, Tenne R. The effect of WS 2 nanoparticles on friction reduction in various lubrication regimes. Tribology Letters. 2004 Aug;17:179-86. doi: 10.1023/b:tril.0000032443.95697.1d

[7] Lee J, Cho S, Hwang Y, Lee C, Kim SH. Enhancement of lubrication properties of nano-oil by controlling the amount of fullerene nanoparticle additives. Tribology Letters. 2007 Nov;28:203-8. doi: 10.1007/s11249-007-9265-2

[8] Puzyr AP, Burov AE, Selyutin GE, Voroshilov VA, Bondar VS. Modified nanodiamonds as antiwear additives to commercial oils. Tribology Transactions. 2012;55(1):149-54. doi: 10.1080/10402004.2011.637662

[9] Sung J. Diamond nanotechnology: Synthesis and applications. Jenny Stanford Publishing; 2019 May 8. doi: 10.1201/9780429066498

[10] Hosseini MS, Rostami M, Mohammadi A. Study of Effects of Nano-diamond as an oil additive on engine oil properties and wear rate of the internal parts of agricultural tractors engines. Mech. Eng. 2013 Apr 18;57:14443-7.

[11] Martin JM, Ohmae N. Nanolubricants. John Wiley & Sons; 2008 Apr 30.

[12] Raeisian Sh, Khorsand H. Studying the effect of nanoparticles size and viscosity of base fluid on dispersion stability of aluminaï engine oil nanofluid. The Journal of Engine Research. 2019;55(55):21-27. [In Persian]

[13] Rahmatinejad B, Rahimi Asiabaraki H, Azimpour Shishevan F. Investigation of the effect of AL2O3 nanofluid in M13NI engine cooling system. The Journal of Engine Research. 2023;70(1):47-65. doi: 10.22034/er.2023.1975318.0 [In Persian]

[14] Qasemian A, Moradi F, Karamati A, Keshavarz A, Shakeri A. Hydraulic and thermal analysis of automatic transmission fluid in the presence of nano-particles and twisted tape: An experimental and numerical study. Journal of Central South University [Internet]. 2021 Nov;28(11):3404–17. doi: 10.1007/s11771-021-4864-x

[15] Zhou J, Yang J, Zhang Z, Liu W, Xue Q. Study on the structure and tribological properties of surface-modified Cu nanoparticles. Materials Research Bulletin. 1999 Jul 1;34(9):1361-7. doi: 10.1016/s0025-5408(99)00150-6
[16] Wu YY, Tsui WC, Liu TC. Experimental analysis of tribological properties of lubricating oils with nanoparticle additives. Wear. 2007 Mar 15;262(7-8):819-25. doi: 10.1016/j.wear.2006.08.021
[17] Padgurskas J, Rukuiza R, Prosyčevas I, Kreivaitis R. Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles. Tribology International. 2013 Apr 1;60:224-32. doi: 10.1016/j.triboint.2012.10.024
[18] Hu C, Bai M, Lv J, Liu H, Li X. Molecular dynamics investigation of the effect of copper nanoparticle on the solid contact between friction surfaces. Applied surface science. 2014 Dec 1;321:302-9. doi: 10.1016/j.apsusc.2014.10.006
[19] Battez AH, González R, Viesca JL, Fernández JE, Fernández JD, Machado A, Chou R, Riba J. CuO, ZrO2 and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants.Wear. 2008 Jul 31;265(3-4):422-8. doi: 10.1016/j.wear.2007.11.013
[20] Mahdiyar N, Hosseini SV. Modeling of Motor Oil Containing Diamond Nanoparticle Between two Iron Abrasion Surfaces Using Molecular Dynamics Methods. The Journal of Engine Research. 2021;62(62):31-41. [In Persian]
[21] Chin˜ as-Castillo F, Spikes HA. Mechanism of action of colloidal solid dispersions. J. Trib.. 2003 Jul 1;125(3):552-7. doi: 10.1115/1.1537752
[22] Sunqing Q, Junxiu D, Guoxu C. Tribological properties of CeF3 nanoparticles as additives in lubricating oils. Wear. 1999 May 1;230(1):35-8. doi: 10.1016/s0043-1648(99)00084-8
[23] Yu Liyan, Hao Chuncheng, Sui Lina, Cui Zuolin. Study on the improving friction and wear properties of lubricating oil with nanoparticles. Journal of Materials Science and Engineering. 2004;22(6):901-5.
[24] Ghanbari M. Experimental study on the effect of Al2O3 nanoparticles in diesel fuel on the performance and emission characteristics of a diesel engine. The Journal of Engine Research. 2021;61(61):35-45. [In Persian]
[25] Tian XX, Kalbasi R, Qi C, Karimipour A, Huang HL. Efficacy of hybrid nano-powder presence on the thermal conductivity of the engine oil: an experimental study. Powder technology. 2020 Jun 1;369:261-9.
[26] Liu K, Zhang Y, Dai F, Sun W. Improved heat transfer of the engine oil by changing it to hybrid nanofluid: Adding hybrid nano-powders. Powder technology. 2021 May 1;383:56-64.
[27] Gupta H, Rai SK, Satya Krishna N, Anand G. The effect of copper oxide nanoparticle additives on the rheological and tribological properties of engine oil. Journal of Dispersion Science and Technology. 2021 Jan 18;42(4):622-32.