

## تحلیل انرژی، تعادل گرمایی و مدل‌سازی عملکرد موتور دیزل با استفاده از نانو مواد اضافه‌شده به روغن موتور

سامان کرمی<sup>۱</sup>، محمد غلامی پرشکوهی<sup>۲\*</sup>، بهمن نجفی<sup>۳</sup> و داود محمدزمانی<sup>۴</sup>

### چکیده

در راستای کاهش تلفات گرمایی و بهینه‌سازی عملکرد موتورهای دیزلی تحقیقات بسیاری صورت گرفته است. روان‌کاری یکی از راه‌های خیلی مؤثر در کاهش اصطکاک و کم کردن گرمای اضافی تولید شده در یک سامانه مکانیکی است. در این تحقیق جهت تحلیل انرژی موتور دیزل تک سیلندر، سعی شد خواص روان‌کاری روغن موتور بهبود یابد. بدین منظور از نانو اکسید مس و نانو اکسید تیتانیوم به قطر میانگین ۴۰ نانومتر برای ساخت نانو روانکار استفاده شد. نانو ذرات اکسید مس و اکسید تیتانیوم با درصد وزنی به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد، به‌صورت مساوی و یکنواخت با هم ترکیب و در روغن پایه توزیع و در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند. پس از آزمون و ارزیابی، نتیجه نشان داد که تأثیر نانو ذره ترکیبی اکسید مس و اکسید تیتانیوم در روغن موتور بر توان معادل دود آگزوز و سیستم خنک‌کننده معنی‌دار بود. با افزودن ۰/۲۵ درصد وزنی نانوذرات به روغن روان‌کننده، در حدود ۲/۵ درصد به توان مفید خروجی افزوده شد. با افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانو اکسید مس و نانو اکسید تیتانیوم به روغن روان‌کننده، حدود ۱۶/۵ درصد توان معادل دود آگزوز افزایش یافت و متناسب با افزایش درصد مواد نانو در روغن روان‌کننده، تلفات گرمایی معادل خنک‌کننده کاهش یافت.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی، توان مفید، روان‌کاری، مدل‌سازی، نانو مواد.

**ارجاع:** کرمی س. غلامی پرشکوهی م. نجفی ب. و محمدزمانی د. ۱۴۰۰. تحلیل انرژی، تعادل گرمایی و مدل‌سازی عملکرد موتور دیزل با استفاده از نانو مواد اضافه‌شده به روغن موتور. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۱: ۵۷-۶۶.

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران.

۳- استاد گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۴- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران.

\* نویسنده مسئول: [gholamihassan@yahoo.com](mailto:gholamihassan@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۳

## مقدمه

در ناحیه فصل مشترک مواد و قطعات روان کاری شده است. اخیراً نیز نانو ذرات به دلیل اندازه، شکل و دیگر خواص منحصر به فردشان به عنوان نوع جدیدی از افزودنی‌ها پدیدار گشته‌اند. نانو روانکارها نوعی روانکار مهندسی ساخته شده از نانو ذرات، پراکنده کننده‌ها و روانکار پایه‌اند که خواص روان کاری و خواص انتقال حرارت بهبود یافته نسبت به روانکارهای متداول دارند (Lee *et al.*, 2009a; Lee *et al.*, 2009b). استفاده از روانکارهای حاوی نانو ذرات مختلف به دلیل بهبود خواص سطحی و قابلیت انتقال حرارت، افزایش بازده موتور و کاهش هزینه تعمیرات، بسیار جذاب و مورد توجه‌اند (Vakili-Nezhaad & Dorany, 2009).

پژوهشگران زیادی گزارش کرده‌اند که نانو روانکارها در کاهش اصطکاک و سایش و نیز افزایش قابلیت انتقال حرارت مؤثرند. در تحقیقی، ویژگی‌های ضد سایشی روغن موتور چند درجه‌ای ایرانول ریسینگ 10W40 حاوی نانوذرات  $Fe_3O_4$  در غلظت‌های متفاوت، در مقایسه با روغن موتور چند درجه‌ای معمولی، توسط Ghorbani *et al.*, (2018) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد 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 فشار پذیری، ضد سایشی و کاهش اصطکاک در روغن موتور استفاده کرد.

در پژوهشی، Chengzhi *et al.*, (2014) اثر نانو ذرات مس را روی سطوح اصطکاک با استفاده از روش دینامیک مولکولی بررسی کردند. نتایج تحقیق نشان داد که تأثیر نانو ذرات مس روی کاهش اصطکاک در سرعت‌های پایین بیش‌تر از سرعت‌های بالا است و علت آن تشکیل فیلم نانو ذرات مس روی سطح است. در مطالعه دیگری *et al.*, Etefaghi (2011) به بررسی میزان توانایی و نحوه عملکرد نانو ذرات در بهبود ویژگی ضد سایشی و قابلیت انتقال حرارت روغن موتور و بررسی تغییرات ایجاد شده در برخی خواص روغن شامل گرانروی، نقطه ریزش و نقطه اشتعال پرداختند. برای این منظور نانو ذرات کربن نانو بال با استفاده از آسیاب گلوله‌ای، درون روغن موتور بهران پیش‌تاز SAE 20W50 پراکنده شدند، سپس آزمون‌های

بهینه سازی عملکرد موتورهای دیزلی، موضوع پژوهش بیشتر پژوهشگران این زمینه در دهه‌های اخیر است. یکی از ابزارهای مؤثر در حرکت به سمت بهینه سازی عملکرد سامانه‌های حرارتی، تحلیل انرژی است. از راه کارهای افزایش بازده موتورهای احتراق داخلی، تمرکز بر کاهش تلفات انرژی در موتور است. انرژی ورودی در موتور به چهار بخش (کار مفید، تلفات انرژی سیستم خنک کننده، تلفات انرژی در آگروز و تلفات محاسبه نشده) تقسیم می‌گردد. تلفات روغن توسط محققان جزء تلفات محاسبه نشده در نظر گرفته می‌شود.

بهبود بخشیدن به خواص روان کاری، عامل مهم برای صرفه جویی در انرژی کلی ورودی به یک سامانه مکانیکی است. روان کاری یکی از راه‌های مؤثر در کاهش اصطکاک و کم کردن گرمای اضافی تولید شده در یک سامانه مکانیکی است. روانکار پایه با ایجاد یک لایه روغن بر روی سطوح اصطکاک، آن‌ها را از یکدیگر جدا می‌کند و گرمای اضافی و ذرات سایشی ایجاد شده را برطرف می‌نماید. بسیاری از محققان روش‌های مختلفی را به منظور بهبود خواص روان کاری روغن پایه، مطرح کرده‌اند. استفاده از مواد افزودنی مختلف با خواص منحصر به فرد برای تقویت خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی روانکارهای پایه، یکی از این روش‌ها است. خواص روانکارها با اضافه کردن افزودنی‌های شیمیایی مخصوص به روغن پایه تغییر می‌کند (Choi *et al.*, 2009).

روان کاری به عنوان علم تسهیل کننده حرکت نسبی سطوح در تماس با یکدیگر، تعریف شده است. در هر کجا که سطوح هم‌جوار و در تماس با یکدیگر، دارای حرکت نسبی هستند، روان کاری نقش مهمی در انجام حرکت به نحو صحیح، مداوم و اقتصادی ایفا می‌کند. عدم روان کاری صحیح ماشین‌آلات علاوه بر آنکه باعث کاهش بازده مکانیکی و کم شدن بازده زمانی ماشین می‌شود، سبب فرسایش بیش از حد و از کار افتادگی زودرس می‌گردد (Taheri, 2003).

انتخاب روغن موتور مناسب برای خودرو تعیین کننده کارایی قطعات موتور در دراز مدت خواهد بود. در حال حاضر علاوه بر روغن پایه، افزودنی‌های فراوانی برای بهبود خواص روغن موتور موجود هستند. نانو ذرات باعث کاهش ضریب اصطکاک می‌شوند که تأثیر آنها کاهش اصطکاک

### مواد و روش‌ها

در این مطالعه، داده‌برداری بر روی یک موتور ثابت و در شرایط آزمایشگاهی انجام و آزمایش با چهار تیمار و هر تیمار با سه بار تکرار انجام شد. از روغن بهران پیش‌تاز با درجه گرانی SAE 20W50 و سطح کیفیت API SJ/CF4 به‌عنوان سیال پایه استفاده گردید.

جهت ساخت نانو روغن، از نانو ذرات اکسید مس و اکسید تیتانیوم به قطر میانگین ۴۰ نانومتر به‌صورت مساوی و یکنواخت با هم ترکیب و استفاده شد که با نسبت مشخص وزنی، در محیط روغن، بدون اضافه نمودن پایدارساز اضافه گردیدند. نانو ذرات ترکیب شده با درصد وزنی به‌ترتیب صفر، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد در روغن پایه توزیع گردید، سپس با استفاده از همزن به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۷۰ درجه سلسیوس، پخش نانو ذرات در روغن یکنواخت شد. در این حالت رنگ روغن از حالت قهوه‌ای به سبز تغییر یافت و ذرات کلوخه شده با کمی دقت مشخص بود. با استفاده از حمام مافوق صوت (Backer vCLEAN1-L4Ultrasonic Cleaner) به مدت ۳۰ دقیقه در فرکانس ۲۸Hz و با استفاده از همزن دور بالا (۲۵۰۰۰ دور بر دقیقه) به مدت ۱۵ دقیقه تمامی کلوخه‌های موجود در سیال از بین رفت و سیالی با رنگ کاملاً یکنواخت و پایدار به دست آمد و بعد از پایدارسازی توسط دستگاه التراسونیک، به‌عنوان تیمارهای آزمایش مورد استفاده قرار گرفتند ( $K_0, K_1, K_2, K_3$ ) به ترتیب نانو ذره ترکیبی (اکسید مس و اکسید تیتانیوم) با درصد وزنی صفر، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد در روغن پایه).

آزمایش‌ها در حالت تمام بار (بار ۱۰۰ درصد) و سرعت ثابت ۱۵۰۰ دور در دقیقه انجام شد. پارامترهای مورد اندازه‌گیری در این مطالعه شامل دما، دبی هوای ورودی، دبی سوخت، گشتاور و توان ترمزی موتور بودند که با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی اندازه‌گیری شدند.

### تجهیزات

تجهیزات لازم برای آزمون موتور شامل: موتور دیزل، دینامومتر مدل Dyno D400، سیستم سوخت رسانی، دستگاه آلاینده‌سنج AVL Ditest مدل MD418، اتاق کنترل مربوط به اعمال تغییرات در شرایط کاری موتور، ثبت و نمایش داده‌های مربوط به موتو) و سوخت لازم بود. شکل ۱ شماتیک تجهیزات را نشان می‌دهد.

تجربی به منظور بررسی خواص ذکر شده انجام گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که ضریب هدایت حرارتی روغن حاوی ذرات کربن نانو بال با غلظت ۰/۱ درصد وزنی، ۱۸ درصد نسبت به روغن پایه افزایش داشت. همچنین براساس نتایج آزمون چهار ساچمه، میزان سایش در روغن حاوی نانو ذرات به میزان ۵ درصد نسبت به روغن فاقد نانو ذرات کاهش یافت.

Shakiba *et al.*, (2019) تحقیقی تحت عنوان بررسی عددی اثر افزودن نانو ذرات به روغن موتور بالگرد انجام دادند. نتایج آنها نشان داد افزودن نانو ذرات مختلف نظیر نانو ذرات طلا، تیتانیوم دی‌اکسید، الماس، تفلون و ... به روغن بالگرد سبب بهبود خواص انتقال حرارت، کارکرد بهتر موتور، کوچک‌سازی سیستم روان‌کاری موتور، توانایی تحمل بارگذاری‌های زیاد، توانایی پرواز در ارتفاعات بالاتر و افزایش قدرت و بازدهی موتور گردید.

Morid & Khorsand (2018) به بررسی تأثیر نانوذرات اکسید مس بر ویسکوزیته روغن موتور بهران پیش‌تاز پرداختند. آن‌ها با افزودن پودر نانوذرات اکسید مس با درصد وزنی به ترتیب ۱٪، ۲ و ۴ و پایدارسازی توسط دستگاه اولتراسونیک، پس از اندازه‌گیری ویسکوزیته با دستگاه بروکفیلد مشاهده کردند ویسکوزیته در ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت.

مطالعات اخیر آشکار می‌کنند که برخی از ساختارهای کربنی هدایت حرارتی خیلی خوبی دارند. بنابراین تعداد زیادی از مطالعات به بررسی تأثیر و نقش نانو مواد و نانو ذرات در بهبود ویژگی ضد سایشی و قابلیت انتقال حرارت سیالات می‌پردازد. اگرچه مطالعات نسبتاً وسیعی بر روی بهبود بخشیدن خواص روان‌کاری و انتقال حرارت که دو عامل بسیار مهم برای صرفه‌جویی در انرژی کلی داده‌شده به یک سامانه مکانیکی است صورت گرفته، اما همچنان لازم است تحقیقات بیشتری در این موضوع انجام شود. در راستای کاهش تلفات گرمایی و بهینه‌سازی عملکرد موتورهای دیزلی سعی شد با انتخاب نسبت‌های مختلفی از ترکیبات مربوط به نانو ذرات در روغن پایه، تأثیر آن بر روی خواص مکانیکی، حرارتی و استهلاکی موتورها با شبیه‌سازی عددی و ارائه الگوهای مختلف بررسی و مورد ارزیابی قرار گیرد.

در تحقیق حاضر موتور مورد آزمایش از نوع آب خنک بود و تلفات گرمایی غیر قابل کنترل یعنی گرمای از دست رفته به‌صورت تابش و جابجایی از بدنه موتور در زیر مجموعه گرمای منتقل شده به سیال خنک‌کاری قرار گرفت. در بررسی تعادل گرمایی، فرآیند احتراق فقط به صورت فرآیندی برای آزاد کردن انرژی سوخت در نظر گرفته شد و از قانون اول ترمودینامیک به‌صورت معادله (۱) استفاده شد (Kochak et al., 2011).

$$\dot{Q}_{fuel} = P_b + \dot{Q}_{exh} + \dot{Q}_{cooling} \quad (1)$$

در معادله (۱)،  $\dot{Q}_{fuel}$ ،  $P_b$ ،  $\dot{Q}_{exh}$  و  $\dot{Q}_{cooling}$  به ترتیب توان معادل سوخت مصرفی، توان ترمزی (توان مفید)، توان معادل تلف شده به‌صورت دود آگزوز و توان معادل تلف شده از طریق سیستم خنک‌کننده بر حسب کیلووات هستند.

توان معادل انرژی گرمایی کل همان توان معادل انرژی شیمیایی سوخت است که طی فرآیند احتراق به گرما تبدیل می‌شود. توان معادل انرژی گرمایی کل با استفاده از ارزش گرمایی سوخت و دبی جرمی آن از معادله (۲) محاسبه شد (Yuksel & Ceviz, 2002).

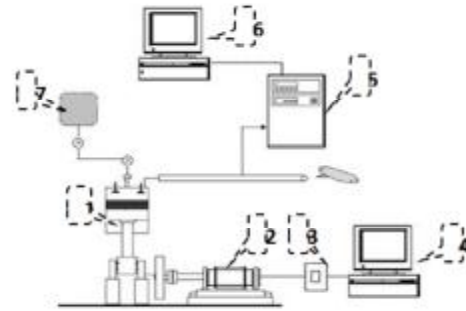
$$\dot{Q}_{fuel} = \dot{m}_f + \dot{Q}_{LHV.f} \quad (2)$$

در معادله (۲)،  $\dot{m}_f$  و  $\dot{Q}_{LHV.f}$  به ترتیب دبی جرمی سوخت ( $kg.sec^{-1}$ ) و ارزش حرارتی پایینی سوخت ( $kJ.kg^{-1}$ ) هستند.

توان خروجی ( $P_b$ ) در واقع توان روی چرخ لنگر بر حسب کیلووات است که با استفاده از سرعت دورانی ( $n$ ) بر حسب دور در دقیقه و گشتاور ( $T$ ) اندازه‌گیری شده به وسیله دینامومتر بر حسب نیوتون متر از معادله (۳) محاسبه شد (Yuksel & Ceviz, 2002):

$$P_b = \frac{2p.n.T}{60000} \quad (3)$$

به دلیل اختلاف دمای دود خروجی و دمای محیط، دود خروجی دارای گرمای محسوس است. چون دود خروجی مخلوط گازی است، لذا با فرض ایده آل بودن آن از الگوی دالتون در تعیین گرمای محسوس استفاده می‌شود. با استفاده از تغییرات آنتالپی در فشار ثابت و دمای متوسط آگزوز (میانگین دمای آگزوز و محیط) و دبی جرمی آلاینده‌های خروجی آگزوز تلفات گرمایی آگزوز از معادله (۴) محاسبه شد (Abbasi et al., 2018).



شکل ۱- شماتیک تجهیزات آزمایشگاه (۱- موتور ۲- دینامومتر، ۳- کنترل از راه دور، ۴- سامانه داده‌گیری مربوط به عملکرد موتور، ۵- دستگاه تحلیل دود، ۶- سامانه آلاینده‌سنج و ۷- مخزن سوخت).

### مشخصات موتور مورد آزمایش

موتور تحت آزمایش در این مطالعه یک موتور دیزلی تک سیلندر، چهارزمانه، اشتعال تراکمی و آب خنک بود. این موتور به دینامومتر وصل شد و بعد از رسیدن به شرایط پایدار، داده‌برداری از موتور طبق ماتریس آزمایش‌ها انجام گردید. مشخصات موتور به شرح جدول ۱ است.

جدول ۱- مشخصات موتور تحت آزمایش	
مشخصات	شرح
نوع موتور	تک سیلندر - دو سوپاپ
کارخانه سازنده	کرلوسکار
قطر × کورس پیستون (mm)	۱۰۲×۱۱۶
حجم جابجایی (cm <sup>3</sup> )	۹۴۸/۱
نسبت تراکم	۱۷/۵
حداکثر قدرت (kW.rpm)	۷/۴ kW در ۱۵۰۰ rpm
حداکثر سرعت (rpm)	۳۰۰۰
نوع سیستم خنک کاری	آب‌خنک

### تئوری تعادل گرمایی

تعادل گرمایی موتور اطلاعات مفیدی در مورد نحوه پخش انرژی اولیه سوخت فراهم می‌کند که بررسی آن، درصد کار مفید و نیز تلفات گرمایی موتور، که از اهداف اصلی در تحقیق حاضر بود را مشخص کرد. اجزاء تعادل گرمایی موتور شامل انرژی ورودی (مربوط به سوخت و هوا)، توان مفید خروجی روی محور موتور، انرژی موجود در دود خروجی، انرژی منتقل شده به سیال خنک‌کاری و انرژی‌های منتقل شده به‌صورت تابش و جابجایی از بدنه موتور است (Shadidi et al., 2018).

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f \times 3600}{P_b} \quad (۸)$$

### تجزیه آماری و مدل‌سازی

داده‌های حاصل از آزمون در مورد اجزای چهارگانه تعادل گرمایی موتور به همراه پارامترهای دیگر محاسبه شده، با استفاده از آزمون‌های اسکینوس و کورتوسیس از نظر نرمال بودن مورد آزمون قرار گرفته و در قالب طرح آماری اسپلیت پلات و بر اساس طرح پایه کاملاً تصادفی تجزیه واریانس شدند. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS16 و آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱٪ انجام شد.

با توجه به اینکه یافتن مقادیر بهینه بیو دیزل و سرعت موتور در مورد اجزای تعادل گرمایی موتور یکی از اهداف اصلی این تحقیق است لذا محاسبه مقادیر بهینه مستلزم مدل‌سازی اجزای تعادل گرمایی بر اساس مقادیر مختلف بیودیزل، افزودنی نانو و سرعت‌های مختلف موتور بود. به‌منظور یافتن بهترین مدل ریاضی در راستای پوشش وضعیت کاری موتور، مدل‌سازی اجزای تعادل گرمایی نیز با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS16 انجام گرفت. به‌منظور دستیابی به مدلی که بتواند اجزای تعادل گرمایی موتور را با حداقل خطا پیش‌بینی نماید، از پارامترها و آزمون‌های معروف یعنی ضریب تبیین، آزمون F، آزمون معنی‌داری ضرایب، آزمون ناهمسانی واریانس، آزمون ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و آزمون استقلال خطا استفاده شد. در انتخاب مدل مورد نظر، سادگی، مشتق‌پذیر بودن و پیوستگی مدل‌ها نیز جزء شاخص‌های انتخاب بودند. لازم به توضیح است که ریشه میانگین مربعات خطا با استفاده از معادله (۹) محاسبه گردید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{obs,i} - x_{pred,i})^2}{n}} \quad (۹)$$

در معادله (۹)،  $x_{obs}$  و  $x_{pred}$  به ترتیب تعداد نمونه، مقدار مشاهده شده (واقعی) و مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل است.

با در نظر گرفتن پارامترها و شاخص‌های یاد شده در مورد ارزیابی مدل‌های ریاضی، مدل‌های مختلف کلاسیک (شامل: مدل خطی درجه اول، مدل لگاریتمی، مدل معکوس، مدل درجه دوم، مدل درجه سوم، مدل توانی، مدل ترکیبی، مدل رشد و مدل نمایی) و غیرکلاسیک (با در نظر گرفتن

$$\dot{Q}_{exh} = \dot{m}_{exh} \times \bar{C}_{p,g} \times \Delta T_{exh} \quad (۴)$$

در معادله (۴)،  $\Delta T$  عبارت است از اختلاف دمای دود

خروجی و محیط ( $^{\circ}K$ ) و  $\dot{m}_{exh}$  نیز دبی جرمی گازهای خروجی از اگزوز بر حسب ( $kg \cdot sec^{-1}$ ) که با استفاده از مجموع دبی جرمی هوا و سوخت ورودی به موتور (معادله (۵)) محاسبه شد.

$$\dot{m}_{exh} = \dot{m}_a + \dot{m}_f \quad (۵)$$

در معادله (۵)،  $\dot{m}_a$  دبی جرمی هوا ( $kg \cdot sec^{-1}$ ) بود. همچنین در معادله (۴)،  $\bar{C}_{p,g}$  گرمای ویژه متوسط گازهای خروجی اگزوز در فشار ثابت و دمای متوسط اگزوز بر حسب ( $kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^{\circ}K^{-1}$ ) است که با استفاده از معادله (۶) محاسبه شد:

$$\bar{C}_{p,g} = \sum_{i=1}^n (C_{p,i} \times X_i / 100) \quad (۶)$$

در معادله (۶)،  $C_{p,i}$  و  $X_i$  به ترتیب ظرفیت گرمایی ویژه هر آلاینده در فشار ثابت و درصد آن در مخلوط گازهای خروجی اگزوز بودند. ترکیبات گازی موجود در دود اگزوز شامل دو بخش ترکیبات شناخته شده و ترکیبات ناشناخته برای دستگاه آنالیز دود می‌باشد. به طوری که مقادیر مربوط به درصد حجمی بخشی از ترکیبات گازی موجود در دود اگزوز ( $CO$ ،  $CO_2$ ،  $O_2$  و  $UHC$  و  $NO_x$ ) توسط دستگاه آنالیز دود تعیین شد و گرمای ویژه این گازها در دمای متوسط اگزوز در جداول ترمودینامیک موجود می‌باشد که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند. در مورد ترکیبات گازی ناشناخته برای دستگاه آنالیز دود نیز با توجه به اینکه بخش زیادی از اجزای تشکیل‌دهنده گازهای خروجی اگزوز مربوط به هوای ورودی به داخل سیلندر می‌باشد (به دلیل حجم بیشتر هوا نسبت به سوخت)، لذا از گرمای ویژه هوا در دمای متوسط برای این بخش از مخلوط گازهای خروجی اگزوز استفاده گردید (Özcan & Söylemez, 2006).

تلفات انرژی به صورت گرمای منتقل شده به سیال خنک‌کننده شامل تلفات گرمایی به صورت جابجایی و تابش از بدنه موتور، تلفات گرمایی سیستم روغن کاری و ... بر اساس پایستگی انرژی در موتور با استفاده از معادله (۷) محاسبه شد (Abedin et al., 2015):

$$\dot{Q}_{cooling} = \dot{Q}_{fuel} - (P_b + \dot{Q}_{exh}) \quad (۷)$$

مصرف ویژه سوخت نیز با استفاده از معادله (۸) محاسبه شد (Rahimi et al., 2016).

### نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر نانو ذره ترکیبی اکسید مس و اکسید تیتانیوم در روغن موتور بر توان معادل دود آگزوز و سیستم خنک‌کننده معنی‌دار بود ولی بر توان مفید خروجی اثر معنی‌دار نداشت (جدول ۲).

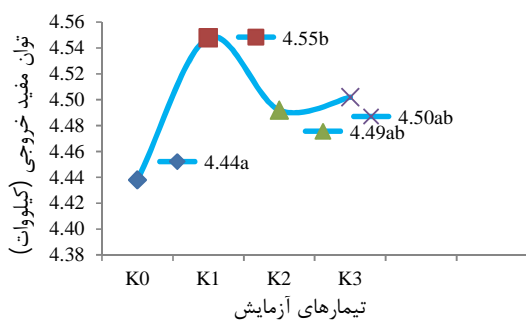
ترکیبات خطی و غیرخطی متغیرهای مربوط به درصد بیودیزل و سرعت موتور با اشکال نمایی و مثلثاتی) در مورد اجزای تعادل گرمایی موتور مورد آزمایش برآزش گردید و بهترین مدل ریاضی قابل دسترس برای هر یک از اجزای یاد شده بر اساس پارامترها و شاخص‌های یاد شده انتخاب شدند.

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر نانو ذره ترکیبی اکسید مس و نانو اکسید تیتانیوم بر اجزای تعادل گرمایی موتور تحت آزمایش

منبع تغییر	درجه آزادی	توان مفید خروجی	توان معادل دود آگزوز	توان معادل تلف‌شده از سیستم خنک‌کننده
نانو ذره ترکیبی	۳	۰/۰۱۰ <sup>ns</sup>	۰/۸۹۵***	۳/۶۰۲**
خطا	۱۶	۰/۰۰۵	۰/۰۲۵	۰/۴۵۱
کل	۲۰	-	-	-

\*\*\*, \*\*, \*، ns: به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۰۱، ۰/۰۱، ۰/۰۵ و عدم معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵.

یکدیگر می‌شوند که خود سبب افزایش گرانیوی سیال پایه می‌گردد. این نتایج مشابه نتایج Chengzhi et al., (2014) بود.



شکل ۲- تغییرات مربوط به توان مفید خروجی با کاربرد درصد‌های مختلف نانو ذره ترکیبی

حروف مشابه نشانگر عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

### توان معادل تلف‌شده از طریق گازهای خروجی آگزوز

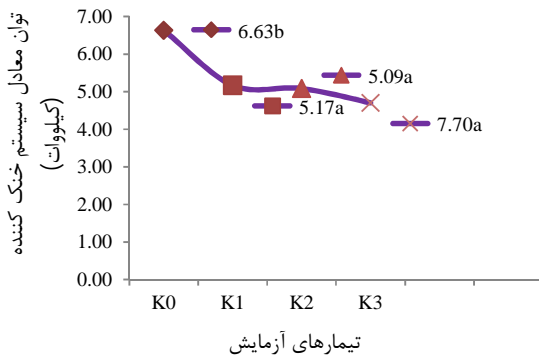
شکل ۳ تغییرات توان معادل گازهای خروجی آگزوز را با کاربرد درصد‌های مختلف نانو اکسید مس و نانو اکسید تیتانیوم نشان می‌دهد. در حالت کلی افزایش درصد نانو اکسید مس و نانو اکسید تیتانیوم موجب افزایش توان معادل دود آگزوز شد. تیمارهای  $K_0$  و  $K_2$  به ترتیب با ۵/۸۶ و ۶/۸۳ کیلووات دارای کمترین و بیشترین تلفات گرمایی به‌صورت دود آگزوز بود.

به عبارت دیگر، با افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانو اکسید مس و نانو اکسید تیتانیوم ترکیبی به روغن روان‌کننده، حدود ۱۶/۵ درصد توان معادل دود آگزوز افزایش یافت. مقایسه میانگین نشان داد بین تیمارهای  $K_0$  با  $K_1$  اختلاف

### توان مفید خروجی

شکل ۲ تغییرات توان مفید را با کاربرد درصد‌های مختلف نانو اکسید مس و نانو اکسید تیتانیوم در روغن روان‌کاری نشان می‌دهد. تیمارهای  $K_0$  و  $K_1$  به ترتیب با ۴/۴۴ و ۴/۵۵ کیلووات دارای کمترین و بیشترین توان مفید خروجی هستند. به بیان دیگر، با افزودن ۰/۲۵ درصد وزنی نانو اکسید مس و نانو اکسید تیتانیوم به روغن روان‌کننده، در حدود ۲/۵ درصد به توان مفید خروجی افزوده شد. این نتیجه نشان داد که در مجموع افزودن نانو ذره ترکیبی اکسید مس و اکسید تیتانیوم به روغن روان‌کاری موجب افزایش توان مفید موتور می‌شود که مقدار حداکثر این افزایش در افزودن ۰/۲۵ درصد بود. دلیل اصلی این پدیده بهبود خاصیت روان‌کاری توسط روغن با حضور نانو ذره است که به دلیل اندازه‌های بسیار ریز این مواد میزان ضریب اصطکاک بین روغن روان‌کاری و اجزای متحرک موتور به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و در نهایت منجر به کاهش اصطکاک، تولید گرمای اصطکاکی کمتر و استفاده مفید از توان سوخت می‌گردد. نتیجه مطالعه Ettefaghi et al., (2011) تاییدی بر این نتیجه بود. هنگامی که نانو ذرات به روغن اضافه می‌شوند نانو ذرات ما بین لایه‌های روغن قرار گرفته و موجب سهولت حرکت لایه‌های سیال بر روی یکدیگر می‌شوند در نتیجه گرانیوی اندکی کاهش می‌یابد اما با افزایش غلظت، نانو ذرات به یکدیگر می‌پیوندند و کلوخه‌ای (آگلومره) می‌شوند و با ایجاد ذرات بزرگ‌تر و نامتقارن میزان برخوردها افزایش یافته و در نتیجه مانع حرکت لایه‌های سیال بر روی

ذرات ترکیبی اکسید مس و اکسید تیتانیوم به روغن روان کاری بود که در نهایت موجب کاهش دمای سیال خنک‌کننده و در نتیجه کاهش توان معادل آن گردید.



شکل ۴- تغییرات مربوط به توان معادل سیستم خنک‌کننده با کاربرد درصد‌های مختلف نانو ذره ترکیبی حروف مشابه نشانگر عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

### مدل‌سازی اجزای تعادل گرمایی

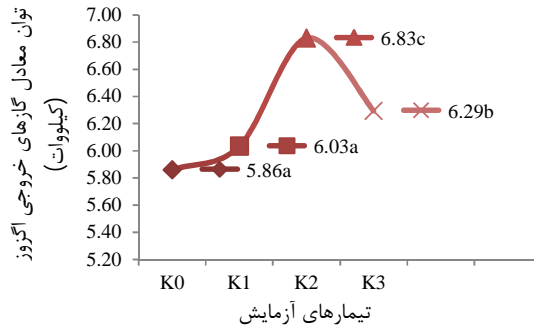
به منظور بررسی و بهینه‌سازی تغییرات اجزای تعادل گرمایی موتور مورد آزمایش، مدل‌های ریاضی برای هر یک از اجزای تعادل گرمایی برازش گردید.

### توان مفید خروجی

نتایج تجزیه واریانس و ارزیابی مدل پیش‌بینی توان مفید خروجی موتور مورد آزمایش در جدول ۳ ارائه شد. مطابق با جدول، مدل خطی چند متغیره با پنج جمله دارای ضریب تبیین ۰/۴۸ بوده و آزمون F در سطح احتمال ۰/۰۵ معنی‌دار بود. استفاده از این مدل نتایج دقیقی در پیش‌بینی توان مفید خروجی ارائه می‌دهد. به‌منظور ارزیابی اعتبار مدل تخمین زده‌شده در صحت پیش‌بینی توان مفید خروجی لازم بود که مقادیر پیش‌بینی‌شده با استفاده از مدل تخمین زده‌شده و نیز مقادیر واقعی مشاهده شده مورد مقایسه قرار گیرند. با بررسی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مقدار آن برای مدل تخمین زده‌شده برابر ۰/۰۵ به دست آمد که نشان‌دهنده خطای کم در پیش‌بینی بود.

جدول ۴ وضعیت ارزیابی ضرایب رگرسیونی مدل پیش‌بینی توان مفید خروجی را نشان می‌دهد. مطابق جدول، دو ضریب مربوط به مدل پیش‌بینی توان مفید خروجی معنی‌دار بوده و به‌طور نسبی مجذور مقدار نانو در افزایش توان مفید بیشترین تأثیر مثبت را داشت. با توجه

معنی‌دار وجود ندارد اما بین سایر تیمارها این اختلاف معنی‌دار بود (شکل ۳). روغن‌های بهینه شده به وسیله‌ی نانو ذرات، میزان انتقال حرارت و بنابراین قابلیت خنک‌کنندگی بالایی از خود بروز می‌دهند. همچنین میزان مصرف روغن با استفاده از روغن بهبود یافته کاهش یافته و عمر تجهیزات افزایش می‌یابد. علت افزایش ضریب هدایت حرارتی را می‌توان با پدیده‌هایی همچون حرکت براونی نانو ذرات، تشکیل فیلم نازک در سطح مشترک مایع و نانو ذرات و طبیعت انتقال حرارت در نانو ذرات نانو اکسید مس و نانو اکسید تیتانیوم مرتبط دانست. در پژوهشی، *Shakiba et al.*, (2019) گزارش مشابهی تحت عنوان بررسی عددی اثر افزودن نانو ذرات به روغن موتور بالگرد ارائه دادند. نتایج آن‌ها نشان داد افزودن نانو ذرات مختلف نظیر نانو ذرات طلا، تیتانیوم دی‌اکسید، الماس، تفلون و... به روغن بالگرد سبب بهبود خواص انتقال حرارت، کارکرد بهتر موتور، کوچک‌سازی سیستم روان کاری موتور، توانایی تحمل بارگذاری‌های زیاد، توانایی پرواز در ارتفاعات بالاتر و افزایش قدرت و بازدهی موتور گردید.



شکل ۳- تغییرات مربوط به توان معادل دود اگزوز با کاربرد درصد‌های مختلف نانو ذره ترکیبی

حروف مشابه نشانگر عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

### توان معادل تلف‌شده از طریق سیستم خنک‌کننده

شکل ۴ تغییرات توان معادل تلف شده از طریق سیستم خنک‌کننده را با کاربرد درصد‌های مختلف نانو اکسید مس و نانو اکسید تیتانیوم نشان می‌دهد. افزایش درصد وزنی نانوذره ترکیبی اکسید مس و اکسید تیتانیوم به روغن روان‌کننده موجب کاهش تلفات گرمایی خنک‌کننده شد. با افزایش درصد مواد نانو در روغن روان‌کننده، تلفات گرمایی معادل خنک‌کننده کاهش یافت. دلیل آن، کاهش تلفات گرمایی موتور (افزایش توان مفید) با افزودن نانو

به کم بودن مقدار میانگین عامل تورم واریانس، متغیرهای مستقل دارای مشکل هم خطی با یکدیگر نبوده و مقادیر پیش بینی مدل اختلاف معنی داری با مقادیر واقعی نداشت. پراکندگی مقادیر واقعی توان مفید خروجی به طور تقریبی منطبق با شرایط نرمال بود. مدل تخمین زده شده برای توان مفید خروجی موتور از نظر آزمون ناهمسانی واریانس نیز مورد تأیید بوده و اختلاف معنی داری در مقادیر توان مفید خروجی در تکرارهای مختلف آزمایش وجود نداشت.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس و ارزیابی مدل پیش بینی توان مفید خروجی موتور مورد آزمایش

نوع مدل	شکل ریاضی مدل	ضریب تبیین	آزمون F	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)
خطی چندمتغیره	$P_b = \exp[2/311 - 0/145 \ln(bsfc) - 0/013 \sin(bsfc) - 0/0000014e^{Nano} + 0/009 \arctg(Nano^2)]$	۰/۴۸	۳/۴۵۹*	۰/۰۵۰

*bsfc*: مصرف ویژه سوخت ترمزی (gr.kWh<sup>-1</sup>), *Nano*: درصد نانو ذره ترکیبی (درصد)، \*معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۵ درصد

جدول ۴- وضعیت ضرایب در مدل برازش شده برای پیش بینی توان خروجی موتور

متغیر مستقل	ضریب	ضریب استاندارد شده بتا	p-value	هم خطی (VIF)
ثابت	۲/۳۱۱	-	۰/۰۰۰	-
$\ln(bsfc)$	-۰/۱۴۵	-۰/۴۳۳	۰/۰۶۲	۱/۳۳۳
$\sin(bsfc)$	-۰/۰۱۳	-۰/۵۳۰	۰/۰۲۰	۱/۱۹۶
$e^{Nano}$	-۰/۰۰۰۰۰۱۴	-۰/۱۶۲	۰/۴۴۴	۱/۲۲۸
$\arctan(Nano^2)$	۰/۰۰۹	۰/۳۶۳	۰/۱۰۵	۱/۲۷۶

دارای ضریب تبیین ۰/۸۹۱ بوده و آزمون F در سطح احتمال ۰/۰۱ معنی دار بود. همچنین مقدار شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۰/۰۲۸ بود که نشان دهنده خطای کم در پیش بینی این مدل بود.

توان معادل تلف شده از طریق گازهای خروجی آگروز نتایج تجزیه واریانس و ارزیابی مدل پیش بینی توان معادل تلف شده از طریق گازهای خروجی آگروز در جدول ۵ ارائه شد. بر اساس نتایج، مدل خطی چند متغیره با چهار جمله

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس و ارزیابی مدل پیش بینی توان معادل گازهای خروجی موتور مورد آزمایش

نوع مدل	شکل ریاضی مدل	ضریب تبیین	آزمون F	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)
خطی چندمتغیره	$\dot{Q}_{exh} = \exp\left[\frac{1/704 + 0/097 \ln(Nano) - 0/082 \sin(Nano)}{-0/031 \cos(bsfc)}\right]$	۰/۸۹۱	۲۹/۹۲۷**	۰/۰۲۸

*bsfc*: مصرف ویژه سوخت ترمزی (gr.kWh<sup>-1</sup>), *Nano*: درصد نانو ذره ترکیبی (درصد)، \*معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۵ درصد

نرمال بود. پراکندگی مقادیر خطا در مدل تخمین زده شده به طور تقریبی مستقل از مقادیر پیش بینی در این مدل بوده و منطبق با طرح خاصی نبود. مدل تخمین زده شده برای توان معادل تلف شده از طریق گازهای خروجی موتور از نظر آزمون ناهمسانی واریانس نیز مورد تأیید بوده و اختلاف معنی داری در مقادیر توان معادل تلف شده از طریق گازهای خروجی در تکرارهای مختلف آزمایش وجود نداشت.

جدول ۶ وضعیت ارزیابی ضرایب رگرسیونی مدل پیش بینی توان معادل گازهای خروجی آگروز را نشان می دهد. مطابق با جدول ۶، همه ضرایب مربوط به مدل پیش بینی توان معادل تلف شده از طریق گازهای خروجی معنی دار بود. همچنین با توجه به مقدار میانگین عامل تورم واریانس (VIF) که پایین است، متغیرهای مستقل تقریباً مشکل هم خطی با یکدیگر نداشته و مقادیر پیش بینی مدل اختلاف معنی داری با مقادیر واقعی نداشت. پراکندگی مقادیر واقعی در مورد توان معادل تلف شده از طریق گازهای خروجی به طور تقریبی منطبق با شرایط



جدول ۶- وضعیت ضرایب در مدل برازش شده برای پیش‌بینی توان خروجی موتور

متغیر مستقل	ضریب	ضریب استاندارد شده بتا	p-value	هم‌خطی (VIF)
ثابت	۱/۷۰۴	-	۰/۰۰۰	-
Ln(Nano)	-۰/۰۹۷	۰/۷۷۱	۰/۰۰۰	۱/۴۷۱
Sin(Nano)	-۰/۰۸۲	-۰/۹۰۶	۰/۰۰۰	۱/۱۵۲
Cos(bsfc)	-۰/۰۳۱	-۰/۳۵۱	۰/۰۱۴	۱/۴۵۷

خنک‌کننده معنی‌دار بود. با توجه به مقدار میانگین عامل تورم واریانس (VIF) که تقریباً نزدیک به ۱ است، متغیرهای مستقل به‌طور تقریبی مشکل هم‌خطی با یکدیگر نداشته و مقادیر پیش‌بینی مدل اختلاف معنی‌داری با مقادیر واقعی نداشت. پراکندگی مقادیر واقعی در مورد توان معادل تلف‌شده از طریق سیستم خنک‌کننده به‌طور تقریبی منطبق با شرایط نرمال است. پراکندگی مقادیر خطا در مدل تخمین زده‌شده به‌طور تقریبی مستقل از مقادیر پیش‌بینی در این مدل بوده و ضمن وجود تقارن نسبی حول نقطه صفر (در محور افقی)، منطبق با طرح خاصی نبود. مدل تخمین زده‌شده برای توان معادل تلف‌شده از طریق سیستم خنک‌کننده موتور از نظر آزمون ناهمسانی واریانس نیز مورد تأیید بوده و اختلاف معنی‌داری در مقادیر توان معادل تلف‌شده از طریق سیستم خنک‌کننده در تکرارهای مختلف آزمایش وجود نداشت.

### توان معادل تلف‌شده از طریق سیستم خنک‌کننده

نتایج تجزیه واریانس و ارزیابی مدل پیش‌بینی توان معادل تلف‌شده از طریق سیستم خنک‌کننده در موتور مورد آزمایش در جدول ۷ ارائه گردید. مدل خطی چندمتغیره با سه جمله دارای ضریب تبیین ۰/۸۴۴ بوده و آزمون F در سطح احتمال ۰/۰۱ معنی‌دار بود. این نتیجه نشان داد که در مجموع ضرایب رگرسیونی مدل پیش‌بینی توان معادل تلف‌شده از طریق سیستم خنک‌کننده در سطح احتمال ۰/۰۱ معنی‌دار بوده و استفاده از این مدل نتایج دقیقی ارائه می‌دهد. هم‌چنین مقدار شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر ۰/۰۴۳ بود که نشان‌دهنده خطای پایین در پیش‌بینی این مدل بود.

جدول ۸ وضعیت ارزیابی ضرایب رگرسیونی مدل پیش‌بینی توان معادل تلف‌شده از طریق سیستم خنک‌کننده را نشان می‌دهد. تمامی ضرایب مربوط به مدل پیش‌بینی توان معادل تلف‌شده از طریق سیستم

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس و ارزیابی مدل پیش‌بینی توان معادل تلف‌شده از طریق سیستم خنک‌کننده موتور مورد آزمایش

نوع مدل	شکل ریاضی مدل	ضریب تبیین آزمون F	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)
خطی چندمتغیره	$\dot{Q}_{cooling} = \exp[-12/457 - 0/119 \ln(Nano) + 2/54 \ln(bsfc)]$	۰/۸۴۴	۰/۰۴۳

bsfc: مصرف ویژه سوخت ترمزی ( $gr.kWh^{-1}$ ), Nano: درصد نانو ذره ترکیبی (درصد)، معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۵ درصد

جدول ۸- وضعیت ضرایب در مدل برازش شده برای پیش‌بینی توان معادل سیستم خنک‌کننده

متغیر مستقل	ضریب	ضریب استاندارد شده بتا	p-value	هم‌خطی (VIF)
ثابت	-۱۲/۴۵۷	-	۰/۰۰۰	-
Ln(Nano)	-۰/۱۱۹	-۰/۳۷۸	۰/۰۰۷	۱/۰۱۹
Ln(bsfc)	۲/۵۴	۰/۸۹۱	۰/۰۰۰	۱/۰۱۹

### نتیجه‌گیری

در حدود ۲/۵ درصد به توان مفید خروجی افزوده شد. افزایش درصد نانو اکسید مس و نانو اکسید تیتانیوم موجب افزایش توان معادل دود آگروز شد. افزایش درصد وزنی ذره ترکیبی اکسید مس و اکسید تیتانیوم به روغن روان‌کننده موجب کاهش تلفات گرمایی خنک‌کننده شد.

تأثیر نانو ذره ترکیبی اکسید مس و اکسید تیتانیوم در روغن موتور بر توان معادل دود آگروز و سیستم خنک‌کننده معنی‌دار بود. با افزودن ۰/۲۵ درصد وزنی نانو اکسید مس و نانو اکسید تیتانیوم به روغن روان‌کننده،

- pollutants of single-cylinder air-cooled diesel engine at different loads using diesel fuel mixtures of copper nanoxide and titanium nanoxide. *9th National Congress of Agricultural Machinery Engineering (Biosystem Mechanics) and Mechanization. Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran. May 2 and 3, Karaj.* (In Persian).
- Shadidi, B., Haji Agha Alizadeh, H., & Ghobadian, B. (2018). Feasibility of using biodiesel herbal fuel and nano cerium and molybdenum oxides as additive to diesel fuel in evaluating the energy balance of the diesel. *Journal of PLANT research (IRANIAN Journal of Biology)*, 31(2): 348-358. (In Persian).
- Shakiba, A., Karami Zarandi, A., & Vahedi, kh. (2019). Numerical Investigation of the Effect of Adding Nanoparticles to Helicopter Motor Oil. *Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics*, 7(1): 49-64. (In Persian).
- Taheri, R. A. (2003). *Monitoring the condition of machines through oil analysis, the book of the supplementary specialized course of marine mechanics, Nesa Education Deputy Publications*, first edition, February.
- Taymaz, I. (2006). An experimental study of energy balance in low heat rejection diesel engine. *Energy*, 31(2-3): 364-371.
- Vakili-Nezhaad, G. R., & Dorany, A. (2009). Investigation of the effect of multiwalled carbon nanotubes on the viscosity index of lube oil cuts. *Chemical Engineering Communications*, 196(9): 997-1007.
- Yu, H. L., Xu, Y., Shi, P. J., Xu, B. S., Wang, X. L., Liu, Q., & Wang, H. M. (2008). Characterization and nano-mechanical properties of tribofilms using Cu nano particles as additives. *Surface and Coatings Technology*, 203(1-2): 28-34.
- Yüksel, F., & Ceviz, M. A. (2003). Thermal balance of a four stroke SI engine operating on hydrogen as a supplementary fuel. *Energy*, 28(11): 1069-1080.
- منابع
- Abbasi, S., Bahrami, H., Ghobadian, B., & Kiani Deh Kiani, M. (2018). Energy analysis of a diesel engine using diesel and biodiesel from waste cooking oil. *Journal of Agricultural Machinery*, 8(1): 149-157. (In Persian).
- Choi, Y., Lee, C., Hwang, Y., Park, M., Lee, J., Choi, C., & Jung, M. (2009). Tribological behavior of copper nanoparticles as additives in oil. *Current Applied Physics*, 9(2): 124-127.
- Ettefaghi, E., Mohtasebi, S. S., Ahmadi, H., Soltani, R., & Rashidi, A. M. (2011). Effects of Nano-Particles on Properties of Engine Oil and its Functionality Rate on Wear Reduction. *The Journal of Engine Research*, 24: 12-19.
- Ghazvini, M., Akhavan-Behabadi, M. A., Rasouli, E., & Raisee, M. (2012). Heat transfer properties of nanodiamond-engine oil nanofluid in laminar flow. *Heat Transfer Engineering*, 33(6): 525-532.
- Ghorbani Naeini, F., Eskandari, H. R., & Ebrahimi, D. (2018). Investigation of anti-wear effect of magnetic iron oxide nanoparticles in multi-grade engine oil compared to conventional engine oil. *Journal of Applied researches in chemistry (JARC)*, 12(1): 71-82. (In Persian).
- Hu, C., Bai, M., Lv, J., Liu, H., & Li, X. (2014). Molecular dynamics investigation of the effect of copper nanoparticle on the solid contact between friction surfaces. *Applied surface science*, 321: 302-309.
- Koochak, M., Mirsalim, M., Keshavarz, A., Ghareghani, A., & Sharghi, P. (2011). Heat Balance of a Natural Gas Fueled Spark Ignition Engine with a Turbocharger. *The Journal of Engine Research*, 6(20): 45 - 58.
- Lee, C. G., Hwang, Y. J., Choi, Y. M., Lee, J. K., Choi, C., & Oh, J. M. (2009a). A study on the tribological characteristics of graphite nano lubricants. *International journal of precision engineering and manufacturing*, 10(1): 85-90.
- Lee, K., Hwang, Y., Cheong, S., Choi, Y., Kwon, L., Lee, J., & Kim, S. H. (2009b). *Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication. Tribology Letters*, 35(2): 127-131.
- Morid, N., & Khorsand, H. (2018). Investigation of the effect of nano CuO particles on the Viscosity of engine oil. *The 7th National Conference and the 2nd International Conference on Chemical Applications in New Technologies*, Tehran, Article code 587. (In Persian).
- Rahimi, A., Ghobadian, B., & Montazeri, M. (2016). Investigation of performance and