

A Case-Based Evaluation of Thermophysical Property Changes on Helicopter Powertrain Lubricant Performance

Ali Mehrabi* 

Flight and Engineering Department, IAMU, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: September 20, 2025

Revised: December 26, 2025

Accepted: January 05, 2026

ePublished: June 17, 2026

ABSTRACT

In this study, the evolution of thermophysical and rheological properties of Aeroshell Turbine Oil 500 during its service life was experimentally investigated in two helicopter platforms operating under different conditions: a Military Attack Helicopter (MAH) subjected to severe thermal and mechanical loads, and a Military Utility Helicopter (MUH) operating under comparatively milder conditions. Engine and gearbox oil samples were collected over 200 hours of operation at 25-hour intervals. The experimental analysis included measurements of viscosity, thermal conductivity, density, and specific heat capacity, along with the evaluation of thermal diffusivity and rheological behavior. The results indicated that oil degradation in the engine was significantly more severe than in the gearbox. Kinematic viscosity increased by 34% in the MAH engine and 25% in the MUH, leading to a proportional rise in frictional losses. Thermal conductivity decreased by 23.7% in the MAH and 18.9% in the MUH, reflecting a reduction in oil cooling capability. In both platforms, specific heat decreased while density increased, indicating structural changes associated with thermal aging. Rheological analysis showed Newtonian behavior in the gearboxes of both helicopters. However, engine oil exhibited nearly Newtonian behavior after prolonged operation and transitioned to mild shear-thinning behavior in the MAH engine during the final service stage. These findings highlight the importance of continuous monitoring of oil thermophysical properties in high-load aircraft systems and provide a basis for optimizing maintenance strategies, lubricant selection, and thermal management system design.

Keywords: Thermophysical properties, Oil degradation, Helicopter, Powertrain Lubricant

How to cite this article

Mehrabi A, A Case-Based Evaluation of Thermophysical Property Changes on Helicopter Powertrain Lubricant Performance. Modares Mechanical Engineering; 2026;26(08):635-647.

*Corresponding author's email: alimehrabi110@gmail.com

*Corresponding ORCID ID:0000-0002-5266-674X



Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



ارزیابی موردی اثرات تغییرات ترموفیزیکی بر روانکار گیربکس و موتور بالگرد

علی مهربانی ^{ID}

گروه مهندسی هواگردها، دانشکده مهندسی و پرواز، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش، تغییرات خواص ترموفیزیکی و رئولوژیکی روغن توربین آبروشل ۵۰۰ در طول دوره کارکرد در دو پلتفرم بالگردی با شرایط عملیاتی متفاوت بررسی شده است. بالگرد تهاجمی بل ۲۰۹ با تنش‌های حرارتی بالا و ناگهانی و بالگرد ترابری بل ۲۱۴ با شرایط تنش‌های مکانیکی بیشتر و پیوسته انتخاب شدند. نمونه برداری از موتور و گیربکس در یک دوره کارکردی انجام شد. آزمون‌های آزمایشگاهی شامل اندازه‌گیری ویسکوزیته، رسانایی حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه، چگالی، محاسبه تغییرات ضریب نفوذ حرارتی و تحلیل رفتار رئولوژیکی بود. نتایج نشان داد که شدت تخریب روغن در موتور بیشتر از گیربکس است. در موتور بل ۲۰۹، ویسکوزیته تا ۳۴٪ و در بل ۲۱۴ تا ۲۵٪ افزایش یافت که این امر منجر به افزایش متناظر تلفات اصطکاکی شد. رسانایی حرارتی در موتور بل ۲۰۹ تا ۲۳/۷٪ و در بل ۲۱۴ تا ۱۸/۹٪ کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش توانایی خنک‌کاری روغن است. ظرفیت گرمایی ویژه در هر دو پلتفرم کاهش و چگالی افزایش یافت که به تغییرات ساختاری ناشی از پیری حرارتی و اکسیداسیون نسبت داده می‌شود. تحلیل رفتار رئولوژیکی نشان داد که روغن در گیربکس هر دو پلتفرم رفتار نیوتنی دارد اما در موتور بل ۲۰۹ پس از ۱۰۰ ساعت و در بل ۲۱۴ پس از ۱۵۰ ساعت به رفتار شبه‌نیوتنی و در موتور بل ۲۰۹ در ۵۰ ساعت آخر به غیر نیوتنی ملایم با شاخص سیال ۰/۹۴ تغییر می‌کند. این نتایج اهمیت پایش دوره‌ای روغن در سامانه‌های هوایی با وظایف سخت نشان می‌دهد و به بهینه‌سازی برنامه‌های تعمیر و نگهداری، طراحی سامانه‌های خنک‌کاری و انتخاب نوع روانکار مناسب کمک می‌کند.

کلیدواژه‌ها: روغن موتور، خواص ترموفیزیکی، بالگرد، تخریب روغن

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۲۷

نحوه ارجاع به این مقاله

مهربانی علی، ارزیابی موردی اثرات تغییرات ترموفیزیکی بر روانکار گیربکس و موتور بالگرد، مهندسی مکانیک مدرس، ۶۴۷-۶۳۵ (۰۸): ۲۶(۰۸): ۱۴۰۵

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: alimehrabi110@gmail.com

*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: 0000-0002-5266-674X



۱- مقدمه

روانکاری نقش مهمی در افزایش راندمان ماشین‌آلات و تجهیزات ایفا می‌کند و به افزایش طول عمر اجزای مکانیکی کمک می‌کند [۱]. تلفات ناشی از اصطکاک موتورهای احتراق داخلی تقریباً ۱۸٪ از توان نظری تولید شده را شامل می‌شود [۲]. بهبود در مصرف سوخت و عملکرد موتور احتراق داخلی را می‌توان با کاهش تلفات اصطکاکی به دست آورد [۳]. بنابراین موتورهای احتراقی به روانکاری کارآمد نیاز دارند که این امر به چالشی برای طراحان و محققان تبدیل می‌شود [۵]. وظیفه اصلی روغن‌ها کاهش اصطکاک بین قطعاتی است که در سایش با یکدیگر هستند. علاوه بر این، روغن موتور می‌تواند قطعاتی را که به دلیل اصطکاک گرم می‌شوند، خنک کند [۶]. عملکرد، طول عمر و راندمان موتورهای احتراق داخلی به طور پیچیده‌ای با خواص ترموفیزیکی روغن‌های روان‌کننده مرتبط است [۷]. در میان این خواص، ویسکوزیته و رسانایی حرارتی بیشترین تاثیر را بر عملکرد روغن موتور دارند [۹].

لزجت یکی از مهمترین خواص روان‌کننده‌ها است. این مشخصه بر ظرفیت بار لایه روان‌کننده تأثیر می‌گذارد و مستقیماً بر تلفات ناشی از اصطکاک و عمر قطعات اثر می‌گذارد [۹]. به طور کلی ضریب تلفات ناشی از اصطکاک با کاهش لزجت کم می‌شود که برای صرفه‌جویی در مصرف سوخت مفید است اما در صورت کارکرد موتور در شرایط حداکثر توان امکان دارد روغن توانایی روانکاری خود را از دست داده و قطعات به شدت دچار سایش شوند [۷، ۱۰، ۱۱]. همچنین با افزایش این مشخصه، تنش برشی ایجاد شده توسط خود روغن باعث افزایش تلفات توان موتور می‌شود. به طور کلی یک محدوده بهینه برای ضریب ویسکوزیته وجود دارد که با دور شدن از آن توان خروجی موتور کاهش می‌یابد [۱۲، ۱۳].

خاصیت مهم دیگر رسانایی حرارتی روغن است. یکی از وظایف روغن موتور، خنک‌کاری موتور است و همچنین دیگر خواص روغن نظیر لزجت به شدت به دما وابسته هستند؛ بنابراین نگره داشتن دمای روغن در محدوده‌ی دمایی مورد نیاز بسیار حائز اهمیت می‌باشد [۸، ۱۴]. به طور کلی رسانایی حرارتی بالاتر، اتلاف گرما از اجزای موتور را بهبود می‌بخشد، خنک‌کنندگی را افزایش می‌دهد و تنش حرارتی را کاهش می‌دهد [۱۵]. هرچند این دو خاصیت اصلی ترین خواص روغن‌های روانکار محسوب می‌شوند اما خواص دیگری نیز بر عملکرد موتور تاثیر دارند. برای مثال روغن‌هایی با گرمای ویژه بالاتر می‌توانند دمای موتور را بهتر مدیریت کنند [۱۶]. چگالی نیز بر نرخ جریان جرمی و توزیع فشار درون موتور تأثیر می‌گذارد [۱۷].

روغن‌های روانکار به سه دسته: معدنی، نیمه سنتتیک و تماماً سنتتیک تقسیم می‌شوند. در این میان روغن‌های تماماً سنتتیک از طریق سنتز شیمیایی تولید شده و عملکرد بهتری از نظر پایداری

حرارتی، سیالیت در دمای پایین و حفظ ویسکوزیته و محافظت از قطعات موتور دارند و در شرایط سخت بهتر عمل می‌کنند [۱۸-۲۰]. پژوهش‌های گوناگونی به هدف بهبود خواص ترموفیزیکی روغن روانکار در راستای بهبود عملکرد موتور و طول عمر اجزای آن و همچنین شناخت دلایل تغییر این خواص صورت گرفته است. برای مثال علی و همکاران [۳] با افزودن نانو ذرات (CuO) به روغن پایه ضمن افزایش رسانایی حرارتی، تلفات ناشی از اصطکاک را ۲۰ درصد کاهش دادند.

رستمیان و همکاران [۲۱] با استفاده از نانوروان‌کننده‌های حاوی نانوکریستال سلولز (MXene) بهبود قابل توجهی در مقاومت در برابر سایش را نشان دادند و میزان سایش را در مقایسه با روغن‌های پایه تا ۱۸ درصد کاهش دادند. سینگ و همکاران [۲۲] با استفاده از نانوافزودنی گرافیت در روغن روان‌کننده موتور، مصرف ۱۵/۲ درصد مصرف سوخت را کاهش و راندمان حرارتی را ۲۸/۲۳ درصد افزایش دادند. کامارولزمان و همکاران [۱۳] با افزودن نانو ذرات (CuO) تغییرات خواص ترموفیزیکی روغن موتور را بررسی کردند و بهبود ۴۷ درصدی ویسکوزیته را گزارش کردند. دیسای و همکاران [۲۳] اثرات افزودن نانو ذرات SiO₂ را بررسی کردند و گزارش کردند که افزودن این نانو ذرات به هر نسبت جرمی ای باعث کاهش رسانایی حرارتی و افزایش ویسکوزیته خواهد شد. گاوور و همکاران [۲۴] با بررسی روغن (SAE20W40) نشان دادند که افزودن (CuO) و (FeO) یک رویکرد موثر برای بهبود روغن موتور می‌باشند.

دسته‌ی دیگری از پژوهش‌ها به بررسی رفتار رفتار روغن، نحوه‌ی تخریب و عوامل موثر بر تخریب روغن پرداخته‌اند. آگوس و همکاران [۲۵] با بررسی تخریب روغن در دو سامانه بنزینی و دیزلی نشان دادند که تخریب روغن تابعی از شرایط عملکردی آن می‌باشد چنانکه در موتور دیزلی پس از دوره‌ی مصرف ویسکوزیته روغن ۱۰٪ کاهش و در موتور بنزینی پس از دوره‌ی مصرف ویسکوزیته روغن با افزایش ۶٪ مواجه شد. در پژوهش دیگری آگوس و همکاران [۲۶] با بررسی روغن (SAE5W30) در یک خودروی سواری پس از طول عمر ۲۰۰۰۰ کیلومتر متوجه شدند که اصطکاک ۹ درصد و سایش ۴۲۰ درصد افزایش می‌یابد. در پژوهش دیگری دیور و همکاران [۲۷] عوامل تخریب روغن را پس از دوره مصرف در موتور سوپر شارژ بنزینی بررسی کردند و با طیف سنجی جرمی عوامل تخریب روغن را شناسایی کردند. وولاک و همکاران [۲۸] ترکیبات شیمیایی ایجاد شده در مدت زمان مصرف روغن موتور را در بررسی کردند و برخی مدل‌های عملکردی را برای پیش‌بینی تغییرات شیمیایی کلیدی در روغن ارائه دادند. شورا و همکاران [۲۹] در یک پژوهش اولیه با بررسی روغن موتور استفاده شده در خودرو تغییر ۲۵٪ را برای ویسکوزیته سینماتیکی گزارش کردند.

واکاس و همکاران [۳۰] نشان دادند تاثیر بهبود خواص ترموفیزیک در موتورهای توربوشفت که تحت تنش حرارتی و فیزیکی بالاتری

مکانیکی مرتبط، بر تخریب خواص ترموفیزیکی روان‌کننده، در تحقیقات قبلی به طور سیستماتیک در سامانه های مختلف مقایسه نشده است.

هدف مطالعه حاضر، پر کردن این شکاف مهم با انجام مطالعات آزمایشگاهی در مورد تغییرات خواص ترموفیزیکی کلیدی روغن توربین، روان‌کننده‌ای که به طور گسترده در توربین‌ها و سیستم‌های سنگین استفاده می‌شود، است. این مطالعه بر روی بخش‌های موتور و گیربکس دو پلتفرم هلیکوپتر مختلف انجام شد: یک هلیکوپتر ته‌جامی، یک پلتفرم نظامی که در معرض تنش‌های حرارتی و مکانیکی بالا قرار دارد، و هلیکوپتر کاربردی، یک هلیکوپتر چندمنظوره با شرایط تنش حرارتی و کرنشی پایین‌تر. رویکرد دو پلتفرمی این مطالعه امکان مقایسه منحصر به فرد بین عملکرد روان‌کننده تحت بارهای حرارتی و مکانیکی مختلف را فراهم می‌کند، موضوعی که به ندرت در ادبیات علمی موجود به آن پرداخته شده است. همچنین، اندازه‌گیری خواص در فواصل زمانی خاص ۲۵ ساعته، امکان مطالعه دقیق رفتار زمانی روغن را فراهم می‌کند. مطالعه همزمان خواصی مانند ویسکوزیته، رسانایی حرارتی، ظرفیت حرارتی و چگالی، درک بهتری از تأثیر فرسودگی روغن بر انتقال حرارت، تشکیل فیلم روان‌کننده و در نهایت سلامت و کارایی موتور ارائه می‌دهد. این فواصل زمانی معادل فواصل بازرسی تعمیر و نگهداری هستند. بنابراین، خروجی تحقیق همچنین می‌تواند به طور کامل برای پروتکل‌های تعمیر و نگهداری مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مواد و آزمون ها

در این پژوهش ۴ خاصیت ترموفیزیکی روغن توربین آبروشل ۵۰۰ به عنوان یک رونکار مورد استفاده در موتور های هوایی، توربین های گازی و سیستم های وظیفه سنگین در یک دوره مصرف مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است. خواص ترموفیزیکی شامل: لزجت، رسانایی حرارتی، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه هستند. همچنین خاصیت پخش حرارتی با استفاده از نتایج برای دو روغن محاسبه شد. در خلال اندازه‌گیری ویسکوزیته برای نمونه ها، رفتار رئولوژیکی روغن نیز بررسی شد تا تأثیر تخریب روغن بر رفتار نیوتنی و غیر نیوتنی آن مشخص شود. دوره مصرف این روغن برای بالگرد ها ۲۰۰ ساعت پروزای میباشد، در این بررسی پس از هر ۲۵ ساعت یک بار نمونه گیری از روغن گیربکس و موتور انجام شد تا تغییرات خواص روغن در طول دوره مصرف مشاهده شود. دو پلتفرم انتخاب شده بالگرد بل ۲۰۹ و بل ۲۱۴ میباشد. دلیل این‌تخاب این دو پلتفرم بررسی تأثیر شرایط عملکردی متفاوت بر روغن میباشد تا بتوان ارتباط بین دمای کارکرد موتور، توان موتور، سیستم های خنک کاری موتور و شرایط عملکردی، افزایش توان ناگهانی و ... با خواص ترموفیزیکی روغن را شناسایی کرد.

عمل میکنند شدید تر است. سانتوس و همکاران [۳۱] فرآیند های تخریب روغن های سنتتیک را مورد ارزیابی قرار دادند و گزارش کردند که اکسیداسیون ناشی از حرارت باعث تخریب روغن و افزایش ویسکوزیته آن میشود. در مطالعه اخیر ژو و همکاران [۳۲] خواص ترموفیزیکی و روانکاری روغن موتور تحت تأثیر حضور آمونیاک بررسی شد. نتایج نشان داد که ترکیبات آمونیاک‌دار موجب افزایش چشمگیر ویسکوزیته و پایداری حرارتی روغن شده ولی در عین حال پراکندگی افزودنی‌های کلیدی مانند (ZDDP) را مختل کرده‌اند. اگرچه این ترکیب در شرایط آزمایشگاهی همچنان عملکرد روانکاری را حفظ کرده، اما این تغییرات ساختاری می‌تواند تهدیدی برای عملکرد پایدار موتور در محیط‌های واقعی باشد. این نتایج اهمیت بررسی خواص فیزیکی و شیمیایی روغن در طول زمان را بیش از پیش نمایان می‌کند. ژانگ و همکاران [۳۳] نشان داده‌اند که در دماهای بالای عملیاتی، روغن‌های توربینی دستخوش فرآیندهای اکسیداسیون و تخریب حرارتی می‌شوند که منجر به افزایش لزجت، تشکیل رسوبات و کاهش عملکرد انتقال حرارت می‌گردد. گیمیش و همکاران [۳۴] به تجزیه و تحلیل روغن موتور های کارکرده پرداختند تا رفتار موتور را با استفاده از تغییرات حاصل شده در روغن موتور بررسی و پیش بینی کنند.

عمده پژوهش‌های پیشین بر پایداری اکسیداتیو و رفتار تریبولوژیکی روان‌کننده‌ها در شرایط آزمایشگاهی کنترل‌شده متمرکز بوده‌اند. در حالی که از بررسی همزمان تغییرات در چندین ویژگی فیزیکی کلیدی، مانند ویسکوزیته، رسانایی حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی، در سیستم‌های مختلف موتور و در طول مدت زمان‌های عملیاتی مختلف غافل بوده‌اند. اگرچه تحقیقات قبلی تأثیر خواص روان‌کننده و استراتژی‌های بهبود آنها را بررسی کرده است، ماهیت مصرفی روغن‌های موتور در موتورهای احتراق داخلی، همراه با عمر مفید محدود آنها، بر نیاز حیاتی به بررسی تکامل خواص ترموفیزیکی در طول چرخه عمر عملیاتی روغن تأکید می‌کند. چنین تحقیقاتی برای توسعه استراتژی‌های مبتنی بر شواهد برای افزایش فواصل تخلیه روغن، بهبود عملکرد روان‌کننده و در نهایت افزایش راندمان و دوام کلی موتور ضروری است. با این وجود، چالش‌های عملی، از جمله دشواری به دست آوردن نمونه‌های روغن نماینده در طول کارکرد واقعی موتور و هزینه‌های قابل توجه مرتبط با آزمایش‌های آزمایشگاهی گسترده، به طور قابل توجهی مانع مطالعات جامع در مورد تخریب خواص ترموفیزیکی در شرایط عملکردی شده است. با وجود استفاده گسترده از روان‌کننده‌های کاملاً مصنوعی در موتورهای وظیفه سنگین، هنوز کمبود قابل توجهی از داده‌های تجربی در مورد تغییرات طولانی مدت خواص ترموفیزیکی آنها در هنگام قرار گرفتن در محیط‌های عملیاتی واقعی وجود دارد. علاوه بر این، تأثیر شرایط عملیاتی موتور مانند دما، بارگذاری حرارتی، سرعت دورانی و تنش‌های

۱-۲- مواد

۱-۱-۲- سامانه های عملکردی

از موتور و گیربکس دو سامانه عملکردی بل ۲۰۹ و بل ۲۱۴ نمونه گیری شد. دلیل انتخاب این دو سامانه تفاوت های ساختاری اعم از توان، دمای روغن، دور موتور، فشار روغن و ... میباشد. با این بررسی میتوان به تاثیر این عوامل بر تخریب روغن پرداخت. (جدول ۱) برخی مشخصات این دو سامانه را نشان میدهد.

جدول ۱ مقایسه پارامترهای فنی موتور و گیربکس بالگرد بل ۲۱۴ و بل ۲۰۹
Table 1 Technical Comparison of Bell209 and Bell 214 with Focus on Engine and Gearbox

parameter	MAH [35][36][37]	MUH [38][39]
Engine	Pratt & Whitney Canada T400-CP-400 (Twin-Pac)	Lycoming T5508D
Power (hp)	3250	2930
Engine speed (rpm)*1000	20-30	20-30
Weight (kg)	3500	3422
Oil Temperature (°C)	80-150	80-120
Oil Pressure (bar)	4-10	4-7
Application	Fighter	Transportation
Maximum speed (km/h)	277	260
Ceiling (m)	3200	5000
Gearbox	Single-stage	Dual-stage
Gearbox oil temperature (°C)	80-140	80-130
Gearbox oil Pressure (bar)	5-8	5-8

۲-۱-۲- روغن

روغن توربین آبروش ۵۰۰ یک روانکار سنتتیک نسل دوم است که برای موتورهای توربینی هواپیماها و بالگردها طراحی شده است. این روغن با ویسکوزیته ۵ میلی‌متر مربع بر ثانیه بر پایه استرهای هیدراته سنتتیک تولید شده است. پایداری حرارتی و اکسیداسیونی بالا از مهم ترین ویژگی های این روغن میباشد. ویژگی برجسته این روغن، توانایی آن در حفظ ویسکوزیته و محافظت از اجزای موتور تحت تنش‌های برشی بالا است. به دلیل خواص طبیعی پایه سنتتیک آن، از تشکیل رسوبات جلوگیری کرده و در برابر خوردگی فلزات در دماهای بالا مقاومت می‌کند. علاوه بر کاربرد در موتورهای هوافضا، این روغن برای نسخه‌های صنعتی و دریایی برخی موتورها نیز تأیید شده است، که نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان آن در شرایط سخت است. بررسی تغییرات ترموفیزیکی این روغن در طول مدت کارکرد در سامانه های هوایی تحت شرایط سخت میتواند به بهبود این نوع روغن ها و همچنین پروتکل های استفاده از این روغن کمک شایانی کند.

۲-۲- روش های اندازه گیری

۱-۲-۲- اندازه گیری رسانایی حرارتی

برای اندازه گیری رسانایی حرارتی از روش استوانه های هم مرکز استفاده شده است (شکل ۱-الف). در این روش رسانایی حرارتی پس از رسیدن به شرایط پایدار بر اساس رسانش یک بعدی شعاعی اندازه گیری میشود. در این آزمایش سیال تحت بررسی به درون محفظه ی استوانه ای تزریق میشود. یک هیتر که توان آن توسط پتانسومتر تنظیم میشود جداره داخلی را گرم کرده و دمای سطح گرم اندازه گیری میشود، جداره ی بیرونی سیال توسط یک جریان آب، خنک میشود و دمای آن نیز اندازه گیری میشود. سپس از طریق معادلات (۱-۳) رسانایی حرارتی سیال اندازه گیری میشود.

$$q_{tot} = q_{con} + q_{loss} \quad (1)$$

$$q_{con} = \frac{2k\pi l(T_H - T_C)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2)$$

در معادله (۱)، q_{tot} نشان دهنده ی توان تولید شده توسط هیتر بر حسب (وات) است که بخشی از آن توسط سیال تحت آزمایش از طریق رسانایی حرارتی منتقل شده و بخش دیگر آن تلف میشود. معادله ی (۲)، انتقال حرارت یک بعدی شعاعی را نشان میدهد که در آن ارتفاع استوانه (متر)، r_2 و r_1 به ترتیب شعاع خارجی و داخلی استوانه (متر)، T_H و T_C دمای سطح گرم و سطح سیال (سانتیگراد) و K ضریب رسانایی حرارتی (وات بر متر کلونین) میباشد. تلفات حرارتی طبق رابطه ای که در کاتالوگ دستگاه بیان شده مطابق معادله (۳) محاسبه میشود.

$$q_{loss} = 1.8063 * \Delta T - 0.4143 \quad (3)$$

برای هر نمونه روغن توان های مختلف انتخاب شد و پس از رسیدن به شرایط پایدار محاسبات مربوطه انجام گرفت. رسانایی حرارتی محاسبه شده برای روغن بر حسب دمای میانگین گزارش شد. دمای میانگین از معادله (۴) محاسبه شد.

$$T_{mean} = \frac{T_H + T_C}{2} \quad (4)$$

۲-۲-۲- اندازه گیری ویسکوزیته

برای اندازه گیری ضریب لزجت از دستگاه لزجت سنج استوانه ای بروکفیلد که به یک حمام دما مجهز شده بود استفاده شد (شکل ۱-ب). تمام نمونه ها در دما های بین ۳۰ تا ۶۰ درجه مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین از نرخ های برش مختلف استفاده شد تا رفتار رئولوژیکی روغن مورد ارزیابی قرار بگیرد. دستگاه مورد استفاده ویسکوزیته دینامیکی را بر حسب معادله (۵) محاسبه میکند. ویسکوزیته سینماتیکی از طریق معده (۶) محاسبه شد.

$$\eta = \tau / \dot{\gamma} \quad (5)$$

$$v = \eta / \rho \quad (6)$$

در معادله (۵)، η ویسکوزیته دینامیکی (سانتی پواز)، τ گشتاور (میلی نیوتن متر) و $\dot{\gamma}$ نرخ برش میباشد. در معادله (۶)، v ویسکوزیته سینماتیکی (سانتی استوک) و ρ چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب) میباشد.

۲-۲-۳- ظرفیت گرمایی ویژه

برای اندازه گیری ظرفیت گرمایی ویژه روغن، از دستگاه کالری متر استفاده شد (شکل ۱-ج). در این آزمایش، روغن تا دمای مد نظر گرم میشود سپس به کالری متر تزریق میشود، جایی که اطراف نمونه تحت آزمایش در یک استخر آب غرق است. سپس طبق قانون اول ترمودینامیک میزان انرژی جذب شده توسط آب با میزان انرژی از دست رفته توسط روغن، پس از رسیدن روغن و آب به دمای تعادل، برابر در نظر گرفته شده و ظرفیت گرمایی ویژه روغن محاسبه میشود. معادله (۷) اساس کار این دستگاه را نشان میدهد.

$$m_{oil} C_{oil} (T_{mean} - T_{o1}) = m_w C_w (T_{mean} - T_{w1}) \quad (7)$$

۲-۳-۱- صحت سنجی و کالیبراسیون

پیش از انجام تست نمونه های روغن ، دو نمونه آب مقطر و اتیلن گلیکول که خواص آنها در هر دما مشخص است مورد آمایش قرار گرفت و با مقادیر گزارش شده در مراجع مقایسه شد تا از کالیبره بودن دستگاه اطمینان حاصل شود [۴۱]. نتایج نشان داد که دستگاه ها کالیبره هستند و میتوان به نتایج آنها اعتماد کرد. (شکل ۲) نتایج تست های کالیبراسیون را نشان میدهند. همچنین به هدف صحت سنجی از نتایج مربوط به روغن، نتایج مربوط به نمونه استفاده نشده با داده های گزارش شده توسط شرکت سازنده [۴۲] و تحقیق کیگان و همکاران [۴۳] مقایسه و ارزیابی شد. این نتایج در (جدول ۲) گزارش شده است. همچنین (جدول ۳) با توجه به تفاوت نتایج تست ها و مقادیر بیان شده در کتب مرجع برای هر یک از خواص ترموفیزیکی ، درصد خطای هر دستگاه را بیان میکند.

جدول ۲ مقایسه نتایج پژوهش فعلی با تحقیقات پیشین

Table 2 Comparing the results of the current study with previous research

	Viscosity at 40 °C (m ² /s)	Density (g/cm ³)
Shell [42]	23-25.4	-
Cican et al. [43]	25	0.999 (at 22 °C)
Experimental Measurement	25.1	0.986

در معادله (۷)، m جرم (گرم)، C ظرفیت گرمایی ویژه (ژول بر گرم درجه سانتی گراد) میباشد.

۲-۲-۴- چگالی

برای اندازه گیری چگالی از دستگاه چگالی سنج آنتون پار استفاده شد (شکل ۱-د) و تست ها در دمای ۵۰ درجه انجام شد. این دستگاه کاملاً اتوماتیک است و از دقت بالاتری نسبت به روش هایی مانند پینکومتر و هیدرومتر برخوردار است.

۲-۳-۲- روش کار

از موتور و گیبرکس هر بالگرد پس از هر ۲۵ ساعت پروازی نمونه گیری شده است و در اختیار محققین قرار گرفته است. در طی مدت کارکرد ۲۰۰ ساعت روغن توربین آبروشل ۵۰۰، ۳۲ نمونه به علاوه یک نمونه بدون کارکرد مورد ارزیابی قرار گرفته است. از هر نمونه در دما های مختلف ۴ تست مربوط به ویسکوزیته، رسانایی حرارتی، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه صورت پذیرفت تا تغییرات خواص در طول دوره مصرف مورد ارزیابی قرار گیرد. لازم به ذکر است نتایج مربوط به هر تست پس از رسیدن به شرایط پایدار انجام شده است و همچنین به علت وجود رسوب در روغن در شرایط کاری، از فیلتر کردن نمونه ها خودداری شده تا نتایج در حد امکان به شرایط کاری روغن نزدیک باشد.

از هر نمونه چند بار تست گرفته شد، سپس یک خط بر روی نتایج بدست آمده برازش شد و با در نظر گرفتن ضریب خطای دستگاه، داده های خارج از محدوده حذف شد. تمام نتایج گزارش شده میانگین داده های قابل قبول در هر کارکرد میباشد.



(ب)



(الف)



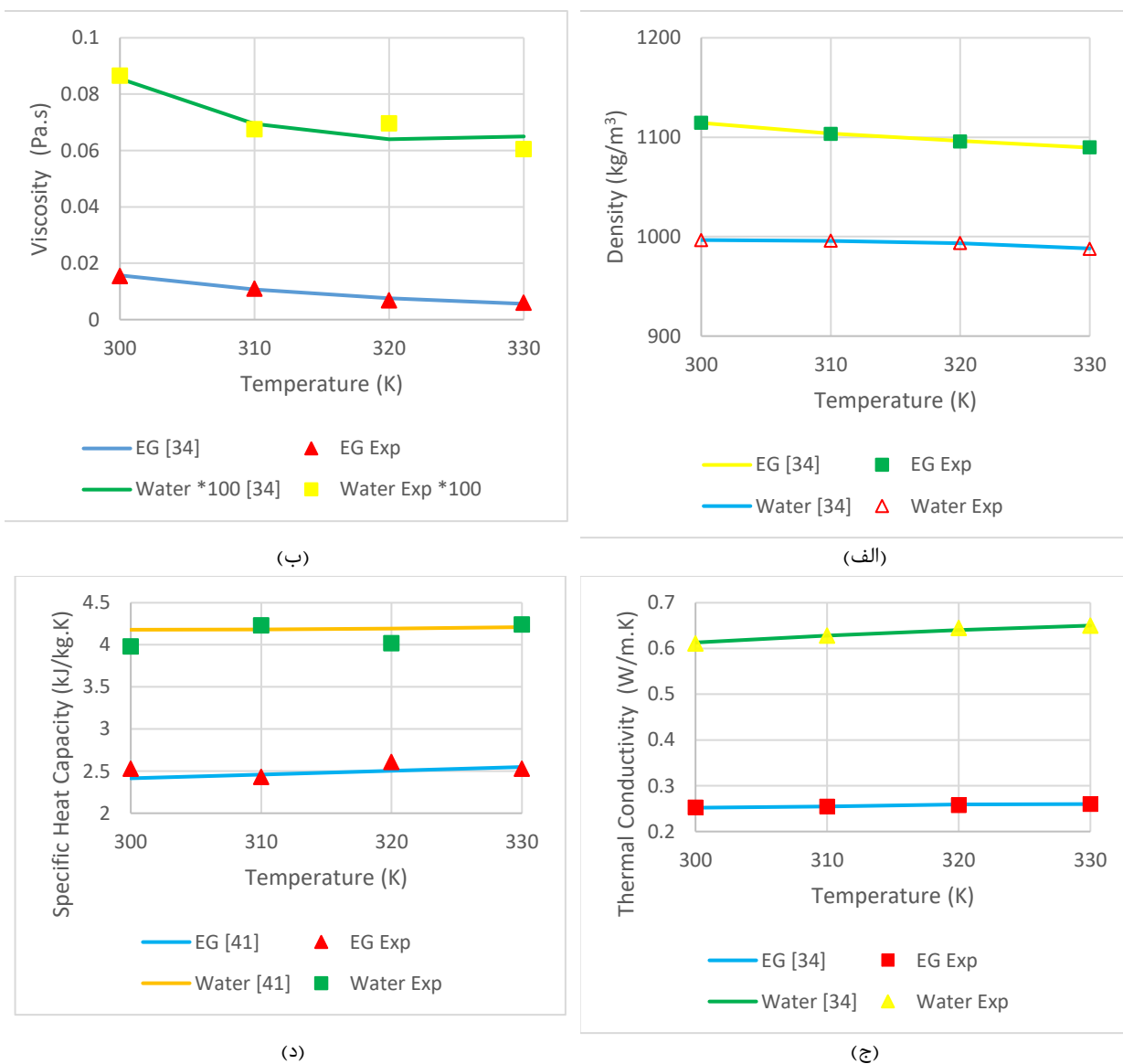
(د)



(ج)

شکل ۱) دستگاه های اندازه گیری خواص ترموفیزیکی (الف) دستگاه اندازه گیری رسانایی حرارتی مایعات و گاز ها (ب) ویسکومتر (ج) کالری متر (د) دنتیومتر آنتون پار

Fig.1 Thermophysical properties measurement setups



شکل ۲) خواص ترموفیزیکی اندازه گیری شده برای اتیلن گلیکول و آب مقطر در مقایسه با منبع الف) چگالی ب) ویسکوزیته ج) رسانایی حرارتی د) ظرفیت گرمایی ویژه

Fig.2 Measured thermophysical properties of water and ethylene glycol and values mentioned in the reference

جدول ۳) دقت و درصد خطای مربوط به سامانه های اندازه گیری خواص ترموفیزیکی
Table 3 Accuracy and percentage error related to thermophysical properties measurement systems

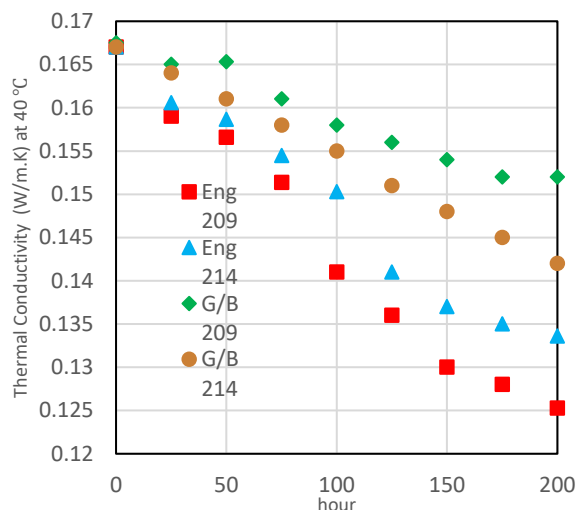
Test	Accuracy	Error %
Thermal Conductivity	0.0001 (W/m.K)	1.30
Viscosity	0.0001 (Pa.s)	1.27
Density	0.00001 (g/cm ³)	0.031
Specific Heat Capacity	0.1 (kJ/kg.K)	9.15

جدول ۴) ویسکوزیته موتور و گیربکس بالگرد بل ۲۱۴ و بل ۲۰۹ در هر کارکرد

Table 4 Viscosity of gearbox and engines of 209 and 214 at 40°C

hour	Eng 209 (mm ² /s)	Eng 214 (mm ² /s)	G/B 209 (mm ² /s)	G/B 214 (mm ² /s)
0	25.10	25.1	25.1	25.1
25	27.20	26.06	25.26	25.33
50	28.09	26.66	25.38	25.56
75	28.60	27.45	25.79	25.79
100	30.32	28.23	26.03	26.03
125	30.59	29.57	26.12	26.26
150	31.86	29.80	26.22	26.49
175	32.78	30.59	26.36	26.72
200	33.71	31.37	26.43	26.96

اما در گیربکس تغییرات بر عکس است. در ۲۱۴، ۱۲ درصد کاهش میابد اما در ۲۰۹، نزدیک به ۹ درصد کاهش مشاهده شد. با توجه به (شکل ۳) میتوان دید شیب تغییرات ویسکوزیته و رسانایی حرارتی مشابه است. ویسکوزیته در روغن ۲۰۹، بیشترین افزایش را داشته و همچنین بیشترین کاهش در رسانایی حرارتی. همچنین تغییرات در گیربکس ۲۰۹ کمترین میزان را به خود اختصاص داده است. (جدول ۵) رسانایی حرارتی برای هر نمونه را در هر کارکرد نشان میدهد.



شکل ۴) تغییرات رسانایی حرارتی در طول کارکرد

Fig.4 changes in thermal conductivity during the operation period

جدول ۵) رسانایی حرارتی روغن در هر کارکرد

Table 5 Thermal conductivity of gearbox and engines of 209 and 214 at 40 °C

hour	Eng 209 (W/m.K)	Eng 214 (W/m.K)	G/B 209 (W/m.K)	G/B 214 (W/m.K)
0	0.167	0.167	0.1675	0.167
25	0.159	0.160	0.165	0.164
50	0.156	0.158	0.1653	0.161
75	0.1513	0.154	0.161	0.158
100	0.141	0.150	0.158	0.155
125	0.136	0.141	0.156	0.151
150	0.13	0.137	0.154	0.148
175	0.128	0.135	0.152	0.145
200	0.12525	0.133	0.152	0.142

۳- نتایج

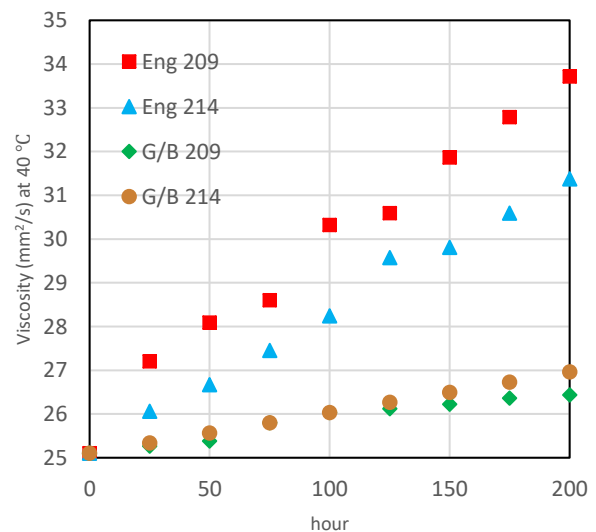
با انجام تست بر روی ۳۳ نمونه روغن که از موتور و گیربکس دو پلتفرم بل ۲۰۹ و بل ۲۱۴ نمونه گیری شده بود تغییرات خواص ترموفیزیکی روغن در طول کارکرد و همچنین تغییرات رفتار رئولوژیکی روغن مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳-۱-۱- تغییرات ویسکوزیته

تغییرات ویسکوزیته سینماتیکی روغن در هر کارکرد در (شکل ۶) نشان داده شده است. تمام اندازه گیری ها در دمای ۴۰ درجه انجام شد. میتوان دید که ویسکوزیته روغن در تمام حالات با طی کردن دوره مصرف افزایش میابد. اما تغییرات در موتور برای روغن تا ۷ برابر شدید تر است. روغن در موتور ۲۰۹، با ۳۴٪ افزایش بیشترین تغییر را داشت پس از آن روغن در موتور ۲۱۴ با ۲۵٪ افزایش، روغن در گیربکس ۲۱۴، ۷/۵٪ افزایش و روغن در گیربکس ۲۰۹، ۵/۲٪ افزایش را در طول مدت مصرف از خود نشان دادند. یکی از رایج ترین دلایل تغییر خواص روغن در گیربکس، وجود ذرات معلق درشت و برای روغن در موتور، تنش های حرارتی و تغییرات ساختار شیمیایی میباشد. میتوان نتیجه گرفت که تنش حرارتی نقش بسیار مهم تری در تغییر خاصیت لزجت روغن دارد. (جدول ۴) نشان دهنده لزجت در هر کارکرد میباشد. لازم به ذکر است که مقدار ویسکوزیته گزارش شده، ویسکوزیته ظاهری بوده است.

۳-۱-۲- تغییرات رسانایی حرارتی

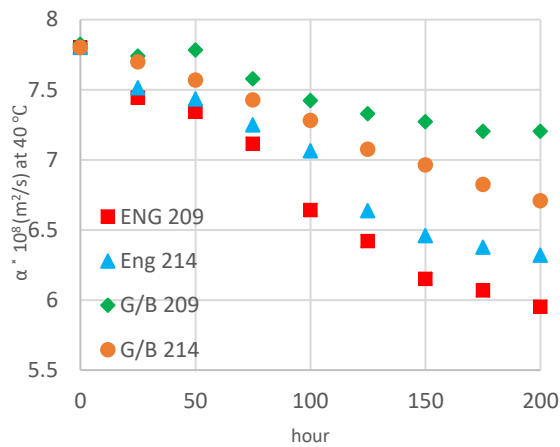
تغییرات رسانایی حرارتی در (شکل ۴) نشان داده شده است. رسانایی حرارتی در روغن موتور بل ۲۰۹، ۲۵ درصد کاهش میابد. همچنین این روغن در موتور ۲۱۴، ۱۷ درصد کاهش میابد. علت این اتفاق، دمای عملکردی بالاتر در ۲۰۹ و همچنین دور موتور بالاتر میباشد که باعث تضعیف خاصیت خنک کاری روغن میشود.



شکل ۳) تغییرات ویسکوزیته سینماتیکی در طول کارکرد در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد

Fig.3 changes in kinematic viscosity during the operation period

به روغن موتور بل ۲۰۹ با ۲۳/۷٪ کاهش است. این اتفاق نشان دهنده عدم توزیع دمای بیشتر در روغن موتور میباشد که باعث تخریب بیشتر این روغن شده است.



شکل ۷) تغییرات ضریب نفوذ حرارتی در طول کارکرد

Fig.7 changes in Thermal Diffusivity during the operation period

۲-۳- رفتار رئولوژیکی

چنانچه با تغییر نرخ برشی اعمال شده به سیال، ویسکوزیته تغییر نکند آن سیال نیوتنی میباشد و در صورت کاهش یا افزایش، رفتار غیرنیوتنی از خود نشان خواهد داد. بنابراین هر نمونه در دمای ۴۰ درجه با اعمال نرخ های برشی متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت.

$$\mu_{app} = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (9)$$

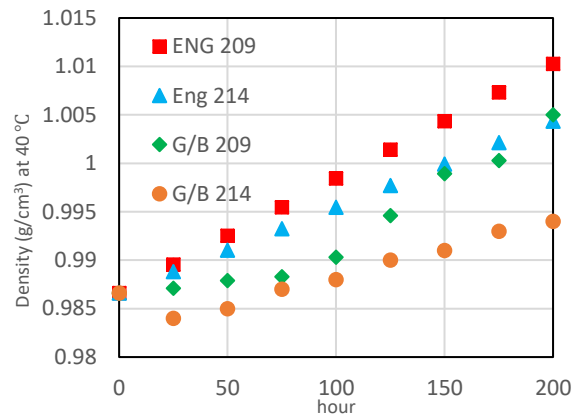
معادله (۸) برای محاسبه ویسکوزیته ظاهری سیالات غیر نیوتنی استفاده میشود. که در آن k شاخص پایداری سیال (پاسکال بر ثانیه)، n نرخ برش و n شاخص سیال میباشد [۴۴]. برای n < 1 سیال شبه پلاستیک محسوب میشود و رفتاری شل شونده خواهد داشت و برای n > 1 سیال دیلانتت میباشد و رفتاری غلیظ شونده نشان میدهد. همچنین برای سیالات نیوتنی n=1 و k برابر با ویسکوزیته میباشد.

بررسی نمونه های روغن نشان داد که روغن در گیربکس هر دو اپلیکیشن، تا پایان طول عمر رفتار نیوتنی خواهد داشت. اما روغن استفاده شده در موتور برای بل ۲۰۹، از ۱۰۰ ساعت مصرف شروع به تغییر میکند. از ۱۰۰ ساعت تا ۱۵۰ ساعت رفتار نسبتا نیوتنی نشان میدهد و در ۵۰ ساعت نهایی طول عمر، خاصیت غیر نیوتنی ملایم را از خود نشان میدهد. (شکل ۸) و (جدول ۶) اطلاعات مربوط به آنالیز رئولوژیکی روغن را برای موتور بل ۲۰۹ نشان میدهد. این رفتار با توجه به نتایج دیگر خواص ترموفیزیکی، ناشی از تخریب شیمیایی روغن و افزایش اسیدیته و تشکیل پلیمر های سنگین میباشد که ناشی از پیری حرارتی در روغن استفاده شده در موتور کبری میباشد.

۳-۱-۳- تغییرات چگالی و ظرفیت گرمایی

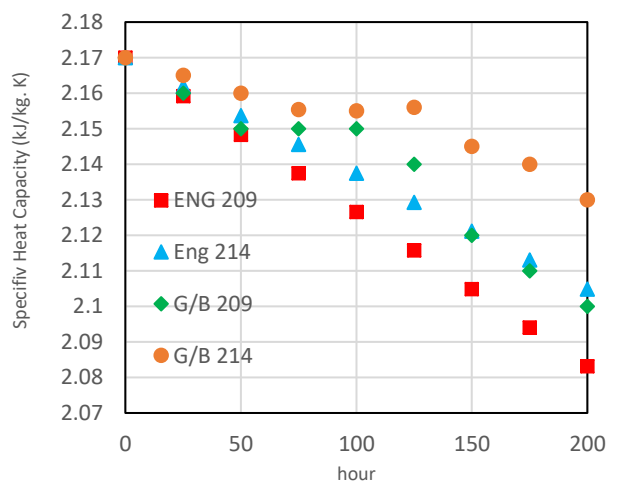
همانطور که در (شکل ۵-۶) میتوان دید، چگالی در تمام نمونه ها افزایش میابد درحالی که ظرفیت گرمایی ویژه کاهش میابد. تغییرات در روغن موتور از روغن گیربکس کمی بیشتر است. چگالی روغن در موتور بل ۲۰۹ با ۲/۵ درصد افزایش بیشترین تغییر را داشته و در گیربکس بل ۲۱۴ با ۰/۰۷ افزایش، کمترین تغییر را داشته است.

همچنین ظرفیت گرمایی ویژه برای روغن موتور بل ۲۰۹ با ۴ درصد کاهش بیشترین تغییر و در گیربکس بل ۲۱۴ با ۱/۸ درصد کاهش کمترین تغییر را به خود اختصاص داده است.



شکل ۵) تغییرات چگالی در طول کارکرد

Fig.5 changes in density during the operation period

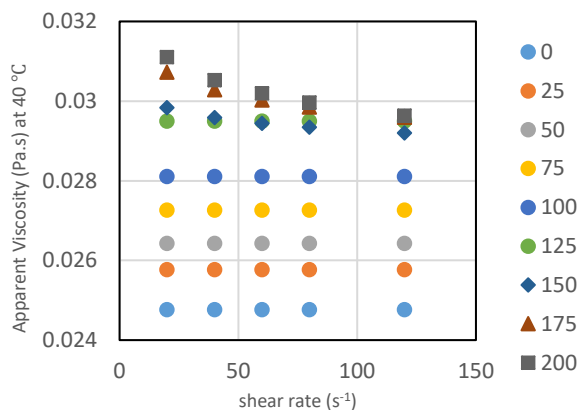


شکل ۶) تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه در طول کارکرد

Fig.6 changes in specific heat capacity during the operation period

۳-۱-۴- پخش حرارتی

ضریب پخش حرارتی که از معادله (۸) محاسبه میشود، این پارامتر نشان دهنده توانایی یک ماده در سرعت توزیع گرما و انتقال آن به محیط اطراف میباشد. عدم توزیع یکنواخت دما توسط روغن باعث ایجاد نقاط داغ میشود که از جمله عوامل تاثیر گذار در تشکیل لجن، اکسیداسیون و آسیب به قطعات میباشد. (شکل ۷) نشان دهنده تغییرات ضریب پخش در طول کارکرد برای هر نمونه روغن میباشد. میتوان دید که بیشترین کاهش مربوط



شکل ۹) ویسکوزیته ظاهری روغن موتور بل ۲۱۴ بر حسب نرخ برش برای هر کارکرد در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد

Fig.9 Apparent viscosity of Bell 214 engine oil as a function of shear rate at 40 °C for each hour of use

جدول ۷) رفتار رئولوژیکی روغن موتور بل ۲۱۴ برای هر کارکرد در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد

Table 7 Rheological Behavior of Bell 214 engine oil for each hour of use

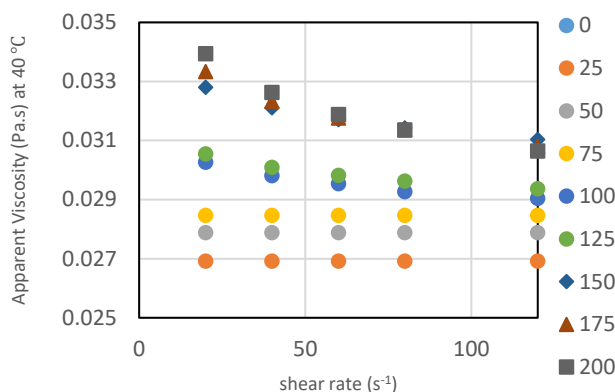
hour	k (Pa/s)	n	Rheological Behavior
0	-	≈1	Newtonian
25	-	≈1	Newtonian
50	-	≈1	Newtonian
75	-	≈1	Newtonian
100	-	≈1	Newtonian
125	-	≈1	Newtonian
150	0.0309	0.988	Nearly Newtonian
175	0.0317	0.979	Nearly Newtonian
200	0.0327	0.973	Nearly Newtonian

در معادله (۱۰)، F تلفات توان اصطکاکی (وات)، η ویسکوزیته دینامیکی روغن (میلی پاسکال ثانیه)، ω سرعت زاویه‌ای موتور (رادیان بر ثانیه)، L عرض یاتاقان (متر)، R شعاع یاتاقان (متر) و c لقی شعاعی یاتاقان (متر) است. میتوان دریافت که افزایش ۳۴٪ ویسکوزیته برای بل ۲۰۹ و ۲۵٪ برای بل ۲۱۴، مستقیماً باعث افزایش تلفات اصطکاکی به همین مقادیر در بالگرد میشود. همچنین میتوان دید که نقش تخریب روغن در دورهای بالاتر حتی کاهش بیشتری در توان خروجی موتور میگذارد.

۴- نتیجه‌گیری

بررسی آزمایشگاهی تغییرات خواص ترموفیزیکی روغن توربین آبروشل ۵۰۰ استفاده شده در موتور و گیربکس دو سامانه بل ۲۱۴ و کبری در طول مدت استفاده ۲۰۰ ساعت که با نمونه‌گیری در هر ۲۵ ساعت انجام شد، نتایج اصلی این پژوهش شامل موارد زیر است:

- شدت تخریب روغن در در موتور بسیار بیشتر از گیربکس است که نشان دهنده تاثیر بیشتر تنش حرارتی نسبت به تنش برشی بر تخریب روغن میباشد



شکل ۸) ویسکوزیته ظاهری بر حسب نرخ برش در هر کارکرد در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد

Fig.8 Apparent viscosity of Bell 209 engine oil as a function of shear rate at 40 °C for each hour of use

جدول ۶) رفتار رئولوژیکی روغن موتور بل ۲۰۹ برای هر کارکرد در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد

Table 6 Rheological Behavior of Bell 209 engine oil for each hour of use

hour	k (Pa/s)	n	Rheological Behavior
0	-	≈1	Newtonian
25	-	≈1	Newtonian
50	-	≈1	Newtonian
75	-	≈1	Newtonian
100	0.0325	0.976	Nearly Newtonian
125	0.0326	0.978	Nearly Newtonian
150	0.0359	0.969	Nearly Newtonian
175	0.038	0.956	Mildly shear-thinning
200	0.0402	0.943	Mildly shear-thinning

برای روغن موتور بل ۲۱۴، تا پایان دوره عمر رفتار کاملاً غیرنیوتنی نیست، در ۱۲۵ ساعت نخست استفاده رفتار روغن کاملاً نیوتنی و پس از آن رفتار نسبتاً نیوتنی از خود نشان میدهد. (شکل ۹) و (جدول ۷) نتایج آنالیز رفتار رئولوژیکی روغن موتور در بل ۲۱۴ را نشان میدهند. هر چند آنالیز رئولوژیکی روغن تغییر رفتار برخی نمونه‌ها از حالت نیوتنی به غیرنیوتنی را گزارش میدهد اما باید توجه داشت که اساساً روغن‌ها در دماهای پایین رفتار غیرنیوتنی بیشتری نسبت به دماهای بالا نشان میدهند و از آنجا که محدوده عملکردی این روغن بین ۸۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد میباشد، با توجه به بالا بودن شاخص سیال میتوان نتیجه گرفت این روغن‌ها در محدوده عملکردی رفتار کاملاً نیوتنی از خود نشان دهند.

۳-۳- تغییرات تلفات اصطکاکی

در بالگرد‌ها روغن موتور وظیفه روان کاری در بلبرینگ‌های محور موتور را بر عهده دارند و گیربکس اصلی و گیربکس دم به وسیله روغن گیربکس روان کاری میشوند. نتایج نشان داد که تخریب روغن موتور بسیار شدیدتر از تخریب روغن گیربکس است. محاسبه تغییرات تلفات اصطکاکی در طول استفاده از روغن موتور میتواند به یافتن استراتژی‌های مناسب برای افزایش طول عمر موتور کمک کند. تلفات اصطکاکی در بلبرینگ‌های موتور مطابق معادله (۱۰) محاسبه میشود [۴۵].

$$F = \frac{2\pi\mu\omega^2LR^3}{c} \quad (10)$$

- [4] G. Baiocco, E. Menna, E. Mingione, G. Rubino, and N. Ucciardello, "Effect of process parameters and film stratification on morphology and performance of auto-lubricating Ni-GnP electroplated coated steel," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 161, p. 108223, 2024.
doi:10.1016/j.engfailanal.2024.108223
- [5] A. Mishra, H. Siddiqi, U. Kumari, I. D. Behera, S. Mukherjee, and B. C. Meikap, "Pyrolysis of waste lubricating oil/waste motor oil to generate high-grade fuel oil: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 150, p. 111446, 2021.
doi:10.1016/j.rser.2021.111446
- [6] E. Dardan, M. Afrand, and A. H. M. Isfahani, "Effect of suspending hybrid nano-additives on rheological behavior of engine oil and pumping power," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 109, pp. 524–534, 2016.
doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.08.103
- [7] J. Blanco-Rodríguez, X. Simón-Montero, M. Cortada-García, S. Maroto, and J. Porteiro, "Modelling the impact of reducing lubricant viscosity on a conventional passenger car fuel economy and wear protection," *Results Eng.*, vol. 24, p. 103159, 2024.
doi:10.1016/j.rineng.2024.103159
- [8] X. Hou, C. Chu, H. Jiang, W. Guan, and M. K. Ahmed Ali, "Revealing the thermal conductivity and viscosity mechanism of lubricating oil enhanced with nano-silicon carbide using molecular dynamics simulation," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 215, p. 110020, 2025.
doi:10.1016/j.ijthermalsci.2025.110020
- [9] M. Sejkorová, I. Hurtová, P. Jilek, M. Novák, and O. Voltr, "Study of the effect of physicochemical degradation and contamination of motor oils on their lubricity," *Coatings*, vol. 11, no. 1, p. 60, 2021.
doi:10.3390/coatings11010060
- [10] P. Charles, M. Elfassi, and A. A. Lubrecht, "Double-Newtonian rheology in a model piston-ring cylinder-wall contact," *Tribol. Int.*, vol. 43, no. 10, pp. 1902–1907, 2010.
doi:10.1016/j.triboint.2009.11.010
- [11] C. J. Dyson, M. Priest, and P. M. Lee, "Simulating the misting of lubricant in the piston assembly of an automotive gasoline engine: the effect of viscosity modifiers and other key lubricant components," *Tribol. Lett.*, vol. 70, no. 2, p. 49, 2022.
doi:10.1007/s11249-022-01589-0
- [12] A. Fazlali, V. Ghalekhondabi, and F. Alahyarpur, "The experimental comparison between the effect of copper oxide and graphene nanoparticles on rheological behavior and thermal properties of engine oil," *Pet. Sci. Technol.*, vol. 40, no. 7, pp. 803–821, 2022.
doi:10.1080/10916466.2021.2006705
- [13] M. K. Kamarulzaman *et al.*, "Improving the thermophysical properties of hybrid nanocellulose-copper (II) oxide (CNC-CuO) as a lubricant additives: A novel nanolubricant for tribology application," *Fuel*, vol. 332, p. 126229, 2023.
doi:10.1016/j.fuel.2022.126229
- [14] A. Asadi and F. Pourfattah, "Heat transfer performance of two oil-based nanofluids containing ZnO and MgO nanoparticles; a comparative experimental investigation," *Powder Technol.*, vol. 343, pp. 296–308, 2019.
doi:10.1016/j.powtec.2018.11.023
- [15] H. Jiang, X. Hou, C. Chu, W. Guan, Y. Wang, and D. Zhao, "Why do hybrid nanoparticles perform better in improving heat transfer performance of lubricating oil
- ضریب لزجت در سامانه کبری تا ۳۴٪ و در بل ۲۱۴ تا ۲۵٪ افزایش میابد. متعاقبا همین مقدار افزایش در تلفات اصطکاکی ایجاد میکند.
 - ضریب پخش حرارتی در کبری ۲۳/۷٪ و در بل ۲۱۴، ۱۸/۹٪ کاهش میابد. این امر باعث کاهش توانایی خنک کاری روغن، افزایش نقاط داغ و سایش بیشتر میشود. همچنین تحلیل رفتار رئولوژیکی روغن برای نمونه های روغن در موتور و گیربکس نشان داد که:
 - روغن در تمام مدت کارکرد گیربکس رفتار نیوتنی از خود نشان می‌دهد.
 - در موتور بل ۲۱۴، روغن در ۵۰ ساعت پایانی کارکرد رفتار شبه‌نیوتنی دارد.
 - در موتور کبری در بازه ۱۰۰ تا ۱۵۰ ساعت رفتار شبه نیوتنی مشاهده میشود. در ۵۰ ساعت پایانی روغن رفتار غیر نیوتنی ملایم با شاخص سیال ۰/۹۴ از خود نشان میدهد.
- این پژوهش رفتار یک نمونه روغن تماما سنتتیک ویسکوزیته پایین را در دو موتور توربو شفت وظیفه سنگین تحت شرایط عملکردی تهاجمی و ترابری نشان داد. نتایج این مطالعه می‌تواند در بهینه‌سازی برنامه‌های تعویض روغن، طراحی سامانه‌های پایش وضعیت برای موتور و گیربکس بالگرد، و انتخاب دقیق‌تر نوع روغن متناسب با شرایط عملکردی موثر واقع شود. همچنین این تحقیق می‌تواند مبنایی برای بازطراحی سامانه‌های خنک‌کاری یا روان‌کاری در موتورهای هوایی با شرایط عملکردی سخت قرار گیرد. همچنین این تحقیق میتواند پایه ای برای پژوهش های دیگر در موارد زیر باشد:
- ۱- مقایسه روند تخریب با روغن های دیگر
 - ۲- بررسی اثرات افزودنی بر این روغن
 - ۳- بررسی ترکیبات شیمیایی تشکیل شده در روغن موتور سامانه های هوایی وظیفه سنگین
 - ۴- تاثیر استفاده از سیستم های خنک کاری و پایش شرایط روغن بر نحوه تخریب آن
- تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.
- تعارض منافع:** هیچ تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- [1] S. S. Perry and W. T. Tysoe, "Frontiers of fundamental tribological research," *Tribol. Lett.*, vol. 19, no. 3, pp. 151–161, 2005, doi: 10.1007/s11249-005-6142-8.
- [2] M. Cai, R. Guo, F. Zhou, and W. Liu, "Lubricating a bright future: Lubrication contribution to energy saving and low carbon emission," *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 56, no. 12, pp. 2888–2913, 2013, doi: 10.1007/s11431-013-5403-2.
- [3] M. K. A. Ali and H. Xianjun, "Improving the tribological behavior of internal combustion engines via the addition of nanoparticles to engine oils," *Nanotechnol. Rev.*, vol. 4, no. 4, pp. 347–358, 2015.
doi:10.1007/s11431-013-5403-2.

- [27] N. Dörr, A. Agocs, C. Besser, A. Ristić, and M. Frauscher, "Engine oils in the field: a comprehensive chemical assessment of engine oil degradation in a passenger car," *Tribol. Lett.*, vol. 67, pp. 1–21, 2019.
doi:10.1007/s11249-019-1182-7
- [28] A. Wolak, J. Molenda, G. Zając, and P. Janocha, "Identifying and modelling changes in chemical properties of engine oils by use of infrared spectroscopy," *Measurement*, vol. 186, p. 110141, 2021.
doi:10.1016/j.measurement.2021.110141
- [29] L. Severa, M. Havlíček, and J. Čupera, "Changes of engine oil flow properties during its life cycle," *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.*, vol. 58, no. 4, pp. 203–208, 2010.
<https://acta.mendelu.cz/pdfs/acu/2010/04/21.pdf>
- [30] M. Waqas, R. Zahid, M. U. Bhutta, Z. A. Khan, and A. Saeed, "A review of friction performance of lubricants with nano additives," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 21, p. 6310, 2021.
doi:10.3390/ma14216310
- [31] J. C. O. Santos, I. M. G. Santos, and A. G. Souza, "Thermal degradation process of synthetic lubricating oils: Part I—Spectroscopic study," *Pet. Sci. Technol.*, vol. 33, no. 11, pp. 1238–1245, 2015.
doi:10.1080/10916466.2015.1047031
- [32] X. Xu, C. Ge, B. Zhang, X. Ma, R. Guo, and X. Lu, "The degeneration mechanism of lubricating oil in the ammonia fuel engine," *Tribol. Int.*, vol. 202, p. 110333, 2025.
doi:10.1016/j.triboint.2024.110333
- [33] X. Liu, S. Zhang, and J. Bae, "The impact of renewable energy and agriculture on carbon dioxide emissions: investigating the environmental Kuznets curve in four selected ASEAN countries," *J. Clean. Prod.*, vol. 164, pp. 1239–1247, 2017.
doi:10.1016/j.jclepro.2017.07.086
- [34] R. Grimmig, S. Lindner, P. Gillemot, M. Winkler, and S. Witzleben, "Analyses of used engine oils via atomic spectroscopy—Influence of sample pre-treatment and machine learning for engine type classification and lifetime assessment," *Talanta*, vol. 232, p. 122431, 2021.
doi:10.1016/j.talanta.2021.122431
- [35] "209." [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/655782334/AH-1J-1NFORMATION>
- [36] "209", [Online]. Available: <https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aerobt/en/documents/learn/products/engines/brochures/N61-1733-000-000-T53-v6-bro.pdf>
- [37] "COBRA." [Online]. Available: <https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aerobt/en/documents/learn/products/engines/brochures/N61-1733-000>
- [38] "BELL214." [Online]. Available: https://www.bellcustomer.com/Bulletins/Download?filename=214B-Inspection_and_Airworthiness_Limitations.pdf&utm
- [39] "214." [Online]. Available: <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/139481/en>
- [40] "Densitometer." [Online]. Available: <data:image/jpeg;base64,/9j/4AAQSkZJRgABA4Xfm6eaJHYzf2lrHCUqmll2/RU785yV/JGpjeznul>
- [41] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, and D. P. DeWitt, *Introduction to heat transfer*. John Wiley & Sons, 2011.
- during lubrication process: An experiment and molecular dynamics simulation," *Tribol. Int.*, vol. 193, p. 109418, 2024.
doi:10.1016/j.triboint.2024.109418
- [16] S. Wrenick, P. Sutor, H. Pangilinan, and E. E. Schwarz, "Heat transfer properties of engine oils," in *World Tribology Congress, 2005*, pp. 595–596.
doi:10.1115/WTC2005-64316
- [17] X. Yang, C. Hanzelmann, S. Feja, J. P. M. Trusler, and M. Richter, "Thermophysical property modeling of lubricant oils and their mixtures with refrigerants using a minimal set of experimental data," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 62, no. 44, pp. 18736–18749, 2023.
doi:10.1021/acs.iecr.3c02474?goto=supporting-info
- [18] A. Igartua *et al.*, "Alternative eco-friendly lubes for clean two-stroke engines," *Tribol. Int.*, vol. 44, no. 6, pp. 727–736, 2011.
doi:10.1016/j.triboint.2010.01.019
- [19] M. M. Kallas, M. S. Al Sabek, and Y. Saoud, "Experimental Comparison of the Effect of Using Synthetic, Semi-Synthetic, and Mineral Engine Oil on Gasoline Engine Parts Wear," *Adv. Tribol.*, vol. 2024, no. 1, p. 5997292, 2024.
doi:10.1155/2024/5997292
- [20] W. Habchi and S. Bair, "Quantifying the inlet pressure and shear stress of elasto-hydrodynamic lubrication," *Tribol. Int.*, vol. 182, p. 108351, 2023.
doi:10.1016/j.triboint.2023.108351
- [21] S. H. Rostamian, S. Saedodin, S. A. Asgari, and A. H. Salarian, "Effect of C60-SiO 2 hybrid nanoparticles on thermophysical and tribological properties of a multigrade engine oil: an experimental study," *J. Therm. Anal. Calorim.*, pp. 1–13, 2020.
doi:10.1007/s10973-020-10323-8
- [22] J. P. Singh, S. Singh, T. Nandi, and S. K. Ghosh, "Development of graphitic lubricant nanoparticles based nanolubricant for automotive applications: Thermophysical and tribological properties followed by IC engine performance," *Powder Technol.*, vol. 387, pp. 31–47, 2021.
doi:10.1016/j.powtec.2021.04.010
- [23] N. Desai, A. M. Nagaraj, and N. Sabnis, "Analysis of thermo-physical properties of SAE20W40 engine oil by the addition of SiO2 nanoparticles," *Mater. Today Proc.*, vol. 47, pp. 5646–5651, 2021, doi:10.1016/j.matpr.2021.03.688.
- [24] M. K. Gaur, S. K. Singh, A. Sood, and D. S. Chauhan, "Experimental investigation of physical and tribological properties of engine oil with nano-particles additives," in *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange*, Springer, 2018, pp. 255–268.
doi:10.1007/978-3-319-93587-4_27
- [25] A. Agocs *et al.*, "Comprehensive assessment of oil degradation patterns in petrol and diesel engines observed in a field test with passenger cars—Conventional oil analysis and fuel dilution," *Tribol. Int.*, vol. 161, p. 107079, 2021.
doi:10.1016/j.triboint.2021.107079
- [26] A. Agocs, C. Besser, J. Brenner, S. Budnyk, M. Frauscher, and N. Dörr, "Engine oils in the field: a comprehensive tribological assessment of engine oil degradation in a passenger car," *Tribol. Lett.*, vol. 70, no. 1, p. 28, 2022.
doi:10.1007/s11249-022-01566-7

[42] "Aeroshell Turbine Oil 500 Datasheet." [Online]. Available: <https://www.lubritec.com/wp-content/uploads/2018/04/FT-SH-Aeroshell-Turbine-Oil-500-201014.pdf>

[43] G. Cican, R. Mirea, and M. Căldărar, "Comparative Analysis of Aeroshell 500 Oil Effects on Jet A and Diesel-Powered Aviation Microturbines," *Fuels*, vol. 5, no. 3, pp. 347–363, 2024.

doi:10.3390/fuels5030020

[44] A. Kouadri, E. Douroum, A. R. El Ouederni, A. Benazza, S. Laouedj, and S. Khelladi, "Assessment of mixing behaviors of non-Newtonian pseudoplastic fluids in short microdevices," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 155, p. 107500, 2024,

doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107500

[45] R. I. Taylor, R. T. Dixon, F. D. Wayne, and S. Günsel, "Lubricants & energy efficiency: life-cycle analysis," in *Tribology and Interface Engineering Series*, vol. 48, Elsevier, 2005, pp. 565–572.

doi:10.1016/S0167-8922(05)80058-6