

A Comparative Study of the Aging Process of VG46 and VG68 Hydraulic Oils During Service

Pezhman Nikandish ^{a*}

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Nikandish P. A Comparative Study of the Aging Process of VG46 and VG68 Hydraulic Oils During Service. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2025;5(2):305-324.

 <https://10.66224/masm.5.2.305>

KEYWORDS

Hydraulic Oil,
Oil Ageing,
Viscosity Index,
Total Acid Number.

ABSTRACT

Hydraulic oils in mobile machinery are subjected to severe mechanical and thermal stresses, leading to accelerated degradation. This study presents a comparative field investigation of the ageing processes of VG46 and VG68 hydraulic oils in sugar cane harvesters operating in the hot and dusty climate of Khuzestan, Iran. A continuous 1,000-hour field test was conducted, with oil samples collected at 100-hour intervals (according to ISO standards). Key properties, including rheological characteristics, chemical stability, and particle contamination levels, were analyzed to evaluate the degradation kinetics under real-world operating conditions (according to ISO and ASTM standards). The results indicate that kinematic viscosity at 40°C decreased by 23.2% for VG46 and 12.1% for VG68, demonstrating that mechanical shear degradation dominated over thermal oxidation. Furthermore, the Viscosity Index (VI) dropped by 16% for VG46 and 10% for VG68, confirming the mechanical scission of polymer chains in the viscosity index Improvers. Chemically, VG46 exhibited a higher oxidation rate, with a sharp increase in Total Acid Number (TAN) observed between 300 and 400 hours, indicating premature depletion of antioxidant reserves. In terms of contamination, VG46 reached a final cleanliness code of 24/24/23 (NAS Class >12), whereas VG68 maintained a superior code of 23/22/21 (NAS Class 12). These findings suggest that VG68 offers superior rheological and tribological stability under severe duty cycles. Consequently, the use of VG68 hydraulic oil can significantly mitigate the risk of sudden component failures and extend the service life of hydraulic power transmission systems in harsh environments.

Extended Abstract

1. Introduction

Hydraulic oils, as the vital fluid in power transmission systems of heavy machinery, play a crucial role in energy transfer, lubrication of moving parts, and cooling. However, under harsh operating conditions, a complex process known as oil aging occurs, leading to permanent changes in the physicochemical and rheological properties of the fluid. This phenomenon results from the synergistic interaction of chemical factors (such as thermal oxidation and hydrolysis), physical factors (such as mechanical shear of polymer chains), and external contaminants (such as solid particles and water). Ultimately, this leads to the molecular degradation of the base oil and additives, reducing the fluid's ability to maintain a stable lubricating film. In heavy mobile machinery, this aging process occurs with significantly greater intensity compared to conventional industrial systems. The acceleration of degradation is attributed to continuous operation in hot and dusty climates under severe dynamic loads. Under such conditions, VG46 and VG68 hydraulic oils face serious challenges. Severe

* Corresponding author. Tel.: +989166417277

E-mail address: nikandish@jsu.ac.ir

DOI: <https://10.66224/masm.5.2.305>

Received: May 13, 2025; Received in revised form: June 14, 2025; Accepted: June 27, 2025.

© Author



shear stresses generated as the fluid passes through the clearances of high-pressure pumps and control valves lead to the physical fracture of polymer chains and a steady decline in viscosity. Simultaneously, high ambient and operating temperatures accelerate oxidation reactions, promoting the formation of sludge and acidic compounds. The overlap of mechanical and chemical degradation processes threatens lubricating film stability, increasing the likelihood of transitioning from hydrodynamic lubrication to mixed or boundary friction regimes. This regime shift results in severe component wear, increased friction coefficients, and sudden failures in mobile machinery. Given the high sensitivity of power transmission system components to viscosity fluctuations and particle contamination, monitoring the dynamics of these degradation processes under real operating conditions is a technical imperative. This monitoring is also an economic necessity for preventing unauthorized downtime and optimizing maintenance costs. While international standards such as ISO 4406 and NAS 1638 provide frameworks for classifying particle contamination, a deep understanding of how these quantities interact with the rheological properties of different hydraulic oils in hot climates remains a critical research need. Therefore, a comparative evaluation of VG46 and VG68 oil aging behaviors under real operating conditions of sugar cane harvesters is a top priority in tribology and machinery engineering. A review of recent studies indicates that researchers have focused on various operating conditions; however, most previous studies relied on controlled laboratory tests or failed to examine the combined effects of severe shear, high temperatures, and external contaminants. This limited perspective provides an incomplete picture of oil behavior in real-world applications. Furthermore, practical comparisons between similar viscosity grades, such as VG46 and VG68, regarding rheological stability, oxidation resistance, and particle generation in hot, high-pressure climates, have received little attention. This study addresses this gap by conducting a field investigation of VG46 and VG68 oils in sugar cane harvesters in the hot climate of Khuzestan. The main innovation of this research lies in the simultaneous analysis of shear degradation, thermal oxidation, and particle accumulation, demonstrating which oil offers superior stability under real-world stresses.

2. Method

This study was designed and executed as a field investigation to comparatively analyze the aging process of VG46 and VG68 hydraulic oils in sugar cane harvesters operating in Khuzestan Province, Iran. To control influencing variables and ensure result comparability, two harvesters of the same model and generation were selected from a single farm with similar terrain and crop conditions. These machines were equipped with power transmission systems operating under harsh conditions, including working pressures up to 300 bar and oil temperatures ranging from 60 to 100°C. The VG46 and VG68 base oils used were multi-grade, mineral-hydrocarbon-based fluids containing standard additive packages, including viscosity index improvers, antioxidants, and anti-wear agents, classified according to ISO 11158 specifications. To ensure sample representativeness and eliminate initial discrepancies, the oil tanks of both machines were completely drained and refilled with new oil matching the manufacturer's technical specifications prior to the test. Initial parameters, including kinematic viscosity, viscosity index (VI), Total Acid Number (TAN), and particle cleanliness codes, were measured according to international standards to establish a homogeneous baseline. Operating conditions, including task types and daily working hours, were strictly monitored and standardized throughout the test period to ensure that observed changes in oil properties directly reflected the aging process under the mechanical, thermal, and environmental stresses of the Khuzestan climate.

Oil sampling was conducted at 100-hour intervals (from 0 to 1000 hours). To prevent external contamination, sampling protocols adhered to ISO 3170-1 and ISO 15377 standards. Samples were collected from the main system drain valve when the oil temperature reached the operational range (approximately 60°C), a condition that optimizes sample representativeness by reducing viscosity and homogenizing suspended particles. Samples were stored in amber glass containers (500 mL capacity), pre-cleaned with organic solvents, to prevent photo-degradation and oxidative degradation of additives. Post-sampling, samples were kept at 4°C away from direct sunlight to inhibit chemical changes prior to analysis. The sampling methodology was grounded in three fundamental principles: natural hydrodynamic mixing due to continuous pump operation, sampling from the return line before final filtration to capture all wear debris, and ensuring reproducibility by analyzing three independent samples per interval and reporting their arithmetic mean.

The primary parameters evaluated included rheological properties (kinematic viscosity and VI), chemical properties (TAN), and particulate contamination (particle count and mass). All analyses were performed in an accredited tribology laboratory using calibrated equipment in accordance with ASTM and ISO standards. Kinematic viscosity was measured at 40°C and 100°C using an SVM 3001 viscometer per ASTM D445. The Viscosity Index (VI) was calculated based on kinematic viscosity values at 40°C and 100°C, following ASTM

D2270. TAN was determined via potentiometric alkaline titration according to ASTM D664. Particulate contamination was assessed using three complementary methods: particle cleanliness coding based on ISO 4406 using a PAMAS GT-700 laser particle counter; contamination number calculation per NAS 1638; and suspended particle mass determination via filtration and gravimetric analysis according to ISO 4407. To guarantee data integrity, a multi-layered analytical framework was implemented, including precise equipment calibration, use of standard reference materials, and statistical analysis of random errors, yielding a coefficient of variation (CV) of less than 2% for all datasets.

3. Result

Rheological analyses demonstrated that both VG46 and VG68 oils experienced a decline in viscosity over the 1,000-hour operational period; however, this reduction was significantly more pronounced in VG46 (23.2%) compared to VG68 (12.1%). This disparity indicates that in VG46, shear degradation and the physical fracture of polymer chains in viscosity index improvers dominated over chemical oxidation. The 16% decrease in the Viscosity Index for VG46, versus 10% for VG68, confirms that the molecular structure of the heavier base oil offers superior mechanical stability against the shear stresses exerted by high-pressure pumps. From the perspective of chemical degradation kinetics, although oxidation rates were significant in both oils, VG68 exhibited greater chemical stability. The sudden spike in Total Acid Number (TAN) for VG46 between 300 and 400 hours signified the premature depletion of antioxidant reserves and a rapid transition into accelerated oxidation. In contrast, the higher viscosity of VG68 acted as a physical barrier, retarding the diffusion of free radicals and thereby extending the oil's useful life.

Regarding particulate contamination monitoring, the performance divergence between the two oils became evident. VG46 rapidly reached a critical cleanliness code of 24/24/23 and an NAS number exceeding 12, whereas VG68 maintained a superior code of 23/22/21 with an NAS number of 12. The exponential increase in fine particles ($>4 \mu\text{m}$) in VG46 resulted from the thinning of the lubricating film and microscopic metal-to-metal contact. Furthermore, the generation of coarse particles ($>14 \mu\text{m}$) in VG46 indicated the system's entry into an acute wear regime and surface fatigue. Data revealed that the rheological stability of VG68, by preserving lubricating film thickness, prevented metal-to-metal contact and drastically reduced the rate of contaminant generation. These findings align with previous studies emphasizing the critical role of viscosity in managing lubrication regimes in heavy mobile machinery.

This study demonstrates that hydraulic oil selection must extend beyond initial specifications to encompass dynamic stability under harsh operating conditions. VG68, owing to its superior resistance to shear degradation, higher oxidative stability, and lower contaminant production, emerges as the optimal choice for power transmission systems under severe conditions. Implementing VG68 reduces the probability of sudden hydraulic component failures. Additionally, by delaying the attainment of critical cleanliness codes, it optimizes maintenance costs and minimizes unplanned operational downtimes. It is recommended that in the design of hydraulic power transmission systems for mobile machinery in hot climates, priority be given to oils with higher viscosity and appropriate shear stability indices. Future research should focus on developing predictive models for oil service life by integrating tribological data with machine learning algorithms, enabling more accurate prediction of optimal oil change intervals. These results confirm that in harsh working conditions, the rheological and chemical stability of higher-viscosity oils plays a vital role in maintaining the health of hydraulic systems and extending the lifespan of machinery.

4. Conclusion

This study comparatively investigated the aging and degradation processes of VG46 and VG68 hydraulic oils in sugar cane harvesters operating in the hot, dusty climate of Khuzestan. Findings from 1,000 hours of continuous operation provide robust evidence of VG68's superior performance under mechanical, thermal, and environmental stresses. Rheological analyses revealed that viscosity loss in VG46 (23.2%) and the reduction in its Viscosity Index (16%) were significantly greater than in VG68 (12.1% and 10%, respectively). This indicates that shear degradation and the physical fracture of polymer chains in viscosity index improvers dominated the aging process in VG46. Chemically, the sudden spike in Total Acid Number (TAN) for VG46 between 300 and 400 hours signified premature antioxidant depletion and rapid entry into accelerated oxidation. In contrast, the higher viscosity of VG68 acted as a physical barrier, retarding free radical diffusion and extending service life. Particulate monitoring showed VG46 rapidly reaching critical cleanliness codes (24/24/23, NAS >12), while VG68 maintained stability (23/22/21, NAS 12). The exponential increase in fine ($>4 \mu\text{m}$) and coarse ($>14 \mu\text{m}$) particles

in VG46 resulted from lubricating film thinning and surface fatigue, indicating a transition to severe wear regimes. VG68's rheological stability preserved film thickness, preventing metal-to-metal contact and reducing contaminant generation. The study emphasizes that hydraulic oil selection must prioritize dynamic stability under harsh conditions over initial specifications. VG68, with its superior resistance to shear degradation, higher oxidative stability, and lower contaminant production, is the optimal choice for power transmission systems in severe conditions. Its implementation reduces sudden failure risks and optimizes maintenance costs by delaying critical cleanliness thresholds. It is recommended that designs for mobile machinery in hot climates prioritize oils with higher viscosity and appropriate shear stability indices.



بررسی مقایسه‌ای فرآیند پیری روغن‌های هیدرولیک VG46 و VG68 در حین بهره‌برداری

پژمان نیک‌اندیش* الف

الف استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده صنعتی جندی‌شاپور دزفول، دزفول، ایران، nikandish@jsu.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
<p>روغن‌های هیدرولیک در سامانه‌های انتقال توان ماشین‌های متحرک، به دلیل مواجهه با تنش‌های مکانیکی و حرارتی شدید، دچار پیری شتابان می‌شوند. پژوهش حاضر، با هدف بررسی مقایسه‌ای فرآیند پیری روغن‌های VG46 و VG68، در بستر عملیاتی ماشین‌های برداشت نیشکر، در اقلیم گرم خوزستان، انجام شد. این مطالعه، با طراحی میدانی مبتنی بر ۱۰۰۰ ساعت بهره‌برداری پیوسته و نمونه‌برداری منظم، در بازه‌های ۱۰۰ ساعته (مطابق با استانداردهای ISO)، تصویری روشن از سیر تحول خواص رئولوژیکی، شیمیایی و آلودگی ذرات (بر اساس استانداردهای ISO و ASTM)، ترسیم می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهند که گرانیروی روغن‌های VG46 و VG68 به ترتیب ۲۳/۲ و ۱۲/۱ درصد نسبت به مقادیر اولیه کاهش داشته‌اند. در حالی که، افت شاخص گرانیروی روغن‌های VG46 و VG68، به ترتیب به میزان ۱۶ و ۱۰ درصد تعیین گردید که نشان‌دهنده تخریب زنجیره‌های پلیمری بیشتر روغن VG46، است. همچنین، نرخ افزایش شاخص اسیدی (TAN)، در روغن VG46، سریع‌تر از روغن VG68 تعیین گردید. جهش ناگهانی در شاخص اسیدی بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ ساعت، تخلیه‌ی زودهنگام آنتی‌اکسیدان‌ها در روغن VG46 را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، نرخ تولید ذرات معلق در روغن VG46، منجر به رسیدن کد تمیزی نهایی آن به ۲۴/۲۴/۲۳ و کلاس NAS، بالاتر از ۱۲ شد. در مقابل، روغن VG68، با کد ۲۳/۲۲/۲۱ و کلاس NAS، ۱۲ عملکرد پایدارتری را به نمایش گذاشت. بر اساس این شواهد، روغن VG68، در شرایط کاری سخت، پایداری تریبولوژیک برتری دارد و به‌کارگیری آن در سامانه‌های هیدرولیکی، ریسک خرابی ناگهانی اجزاء را به‌شدت کاهش می‌دهد.</p>	<p>روغن هیدرولیکی، پیری روغن، شاخص گرانیروی، شاخص اسیدی کل.</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۴</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۶</p>

۱- مقدمه

روغن‌های هیدرولیک، به‌عنوان سیالات عامل در سامانه‌های انتقال توان، نقشی حیاتی در انتقال انرژی، روانکاری قطعات متحرک و خنک‌کاری اجزای داخلی، ایفا می‌کنند [۱]. با این حال، در طول زمان و تحت تأثیر شرایط عملیاتی، فرآیندی پیچیده و غیر قابل برگشتی تحت عنوان، پیری روغن، رخ می‌دهد که منجر به تغییرات دائمی در خواص فیزوشیمیایی و رئولوژیکی سیال می‌گردد [۲]. این پدیده ناشی از تعامل هم‌افزایی عوامل شیمیایی (مانند اکسیداسیون حرارتی و تخریب آب‌کافتی یا هیدرولیز)، فیزیکی (مانند برش مکانیکی زنجیره‌های پلیمری) و آلودگی‌های خارجی (نظیر ذرات جامد و آب) است که در نهایت، به تخریب ساختار مولکولی روغن پایه و افزودنی‌های حیاتی آن، از جمله بهبوددهنده‌های شاخص گرانیروی (VI)، و کاهش توانایی سیال در حفظ فیلم روانکاری پایدار منجر می‌شود [۳ و ۴]. در ماشین‌های متحرک سنگین، این فرآیند پیری با شدت بسیار

بیشتری نسبت به سامانه‌های صنعتی معمول رخ می‌دهد [۴]. این شتاب‌گیری در تخریب، ناشی از کارکرد مداوم ماشین‌های متحرک سنگین در اقلیم‌های گرم و گردوغباری، و تحت تأثیر بارهای دینامیکی شدید و چرخه‌ای است [۵]. در چنین شرایط کاری دشوار، روغن‌های هیدرولیک VG46 و VG68 (نمونه روغن‌های متداول در صنعت هیدرولیک)، با چالش‌های جدی مواجه می‌شوند [۶]. تنش‌های برشی شدید ناشی از عبور سیال از لقی موجود در ساختار پمپ‌های هیدرولیکی با فشار بالا و شیرهای کنترلی، منجر به شکست فیزیکی زنجیره‌های پلیمری بلند و کاهش پایدار گرانشی می‌شود [۷]. هم‌زمان، گرمای بالای محیط و دمای کاری سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی (که می‌تواند به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز برسد)، سرعت واکنش‌های اکسیداسیون شیمیایی را افزایش داده و تولید لجن و ترکیبات اسیدی را تسریع می‌کند [۸]. هم‌زمانی فرآیندهای تخریب مکانیکی و اکسیداسیون شیمیایی، پایداری فیلم روانکاری را تهدید کرده و احتمال گذار از حالت روانکاری هیدرودینامیک (حالت ایده‌آل در روانکاری)، به رژیم‌های اصطکاک مخلوط یا مرزی را افزایش می‌دهد. این گذار رژیم روانکاری، منجر به سایش شدید قطعات، افزایش ضریب اصطکاک و بروز خرابی‌های ناگهانی در ماشین‌های متحرک می‌گردد [۸ و ۹]. با توجه به حساسیت بالای اجزای به کار رفته در ساختار سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی به نوسانات گرانشی و آلودگی ذرات معلق، پایش پویایی (سینتیک) این فرآیندهای تخریب در شرایط واقعی بهره‌برداری، یک الزام فنی محسوب می‌شود. این پایش، ضرورتی اقتصادی برای پیشگیری از توقف‌های غیرمجاز و بهینه‌سازی هزینه‌های نگهداری و تعمیرات نیز به شمار می‌رود [۱۰]. استانداردهای بین‌المللی نظیر ISO 4406 و NAS 1638 چارچوب‌هایی را برای طبقه‌بندی آلودگی ذرات فراهم ساخته‌اند، با این حال، درک عمیق از نحوه تعامل این کمیت‌ها با خواص رئولوژیک روغن‌های هیدرولیکی مختلف در اقلیم‌های گرم، همچنان مورد نیاز است [۸]. بنابراین، ارزیابی مقایسه‌ای رفتار پیری روغن‌های VG46 و VG68 در شرایط عملیاتی واقعی ماشین‌های برداشت نیشکر، با هدف شناسایی فرآیندهای غالب تخریب و ارائه راهکارهای بهینه برای انتخاب سیالات مناسب، از اولویت‌های پژوهشی روز در حوزه تریبولوژی و مهندسی ماشین‌آلات محسوب می‌شود [۱ و ۱۱].

مرور مطالعات انجام‌شده در حوزه تریبولوژی و پایداری روغن‌های هیدرولیک، نشان می‌دهد که پژوهشگران در سال‌های اخیر تلاش کرده‌اند تا فرآیندهای پیچیده تخریب سیالات هیدرولیکی و روانکار را در شرایط عملیاتی متنوعی بررسی کنند. برای نمونه، برای نمونه، باچفسکی و سچاوینسکی در یکی از مطالعات پایه‌ای دریافتند که پایش ذرات جامد، شاخصی حساس‌تر از گرانشی برای تشخیص وضعیت سلامت سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی است [۱۳]. این یافته، زیربنایی محکم برای پژوهش‌های آتی در حوزه پایش وضعیت فراهم آورد. در ادامه، ریبریو و همکاران تأکید کردند که پایداری حرارتی، عاملی بنیادین در حفظ خواص روانکاری در دماهای بالا است [۱۴]، درحالی‌که پرادهان و همکاران، همبستگی مستقیمی میان افزایش شاخص اسیدی کل و نرخ فرسایش قطعات مکانیکی مشاهده کردند و بر این باور بودند که اکسیداسیون شیمیایی، از عوامل اصلی کاهش عمر مفید روغن محسوب می‌شود [۲]. در حوزه پایش هوشمند، وانگ و همکاران، راهکاری را برای پایش بلادرنگ مبتنی بر تلفیق داده‌های چندحسی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین ارائه کردند که حاکی از آن بود، روش‌های هوش مصنوعی قادرند با دقتی قابل توجه، الگوهای تخریب روغن را پیش‌بینی نمایند [۹]. با پیشرفت فناوری‌های شبیه‌سازی، خراسانی و رزمجو نشان دادند که نوسانات بار و دما تأثیر چشمگیری بر سینتیک اکسیداسیون روغن دارد [۱۵]. همچنین، سینگ و همکاران، تأکید کردند که ورود ذرات خارجی نظیر گرد و غبار، نه تنها به‌عنوان ساینده عمل می‌کند، بلکه سرعت تخریب شیمیایی روغن را نیز افزایش می‌دهد [۴]. برای درک عمیق‌تر پدیده تخریب، گائو و همکاران، فرآیند مولکولی تخریب بهبوددهنده‌های شاخص گرانشی را تحت تنش حرارتی و برشی شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که زنجیره‌های پلیمری در دماهای بالا به سرعت شکسته شده و این امر منجر به افت پایدار گرانشی می‌گردد [۷]. هم‌زمان، یانگ و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی تأیید کردند که ساختار مولکولی افزودنی‌ها، نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار رئولوژیک روغن در دماهای بالا دارد [۱۲]. در پژوهشی دیگر، لی و همکاران نشان دادند که فیلتراسیون ناکارآمد منجر به تجمع ذرات ساینده و افزایش سرعت تخریب روغن و قطعات مکانیکی می‌شود [۸]. از منظر تریبولوژیکی، نیر و تومانیك، نقش حیاتی اندازه ذرات جامد را در گذار رژیم‌های سایش از حالت ملایم به شدید در پمپ‌های هیدرولیکی مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که ذرات بزرگ‌تر از ۱۴ میکرون، عامل اصلی سایش مخرب و ایجاد خستگی سطحی محسوب می‌شوند [۱۰]. در جدیدترین مطالعات، ژانگ و لی، تحلیل مقایسه‌ای پایداری برشی و افت گرانشی را در روغن‌های چنددرجه‌ای ماشین‌آلات سنگین انجام دادند و نتایج این پژوهش نشان داد که روغن‌های با گرانشی بیشتر، مقاومت

بهتری در برابر افت گرانی ناشی از برش دارند [۶]. در پژوهشی دیگر، ژانگ و همکاران مدلی ریاضی برای پیش‌بینی وضعیت سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی ارائه کردند که نشان می‌دهد کاهش کد تمیزی، احتمال خرابی پمپ را به‌صورت نمایی افزایش می‌دهد [۱۱]. درنهایت، ژائو و همکاران، روشی نوین برای عیب‌یابی هوشمند سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، با بهره‌گیری از پایش وضعیت روغن و الگوریتم‌های یادگیری عمیق توسعه دادند و نشان دادند که تلفیق داده‌های پایش روغن با این الگوریتم‌های پیشرفته، دقت بالایی در طبقه‌بندی الگوهای تخریب فراهم می‌آورد [۱].

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در شناخت فرآیندهای تخریب روغن‌های هیدرولیک، اکثر پژوهش‌های پیشین یا بر شرایط آزمایشگاهی کنترل‌شده متمرکز بوده‌اند و یا از بررسی تأثیر متقابل و زنجیره‌ای تنش‌های برشی شدید، گرمای بالای محیط کار و نفوذ آلاینده‌های خارجی، غافل مانده‌اند. این نوع نگاه به عوامل تخریب مکانیکی، شیمیایی و محیطی، تصویری ناقص و غیر واقعی از رفتار و عملکرد روغن‌های هیدرولیک، در شرایط بهره‌برداری واقعی از ماشین‌های متحرک سنگین، ارائه می‌دهد. همچنین، مقایسه کاربردی و کمی بین روغن‌های هیدرولیک هم سطح و مشابه، مانند روغن‌های VG 46 و VG 68، از منظر پایداری رئولوژیک (تحمل در برابر فشار و حرکت)، مقاومت در برابر اکسیداسیون و تولید ذرات ریز فلزی و غیرفلزی، در شرایط اقلیمی گرم و پرفشار، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش با پر کردن این خلأ، به بررسی عینی و میدانی فرآیند پیری دو روغن هیدرولیک VG68 و VG46، در شرایط واقعی بهره‌برداری ماشین‌های برداشت نیشکر، در اقلیم گرم خوزستان می‌پردازد. نوآوری اصلی این مطالعه در تحلیل هم‌زمان و اندازه‌گیری تأثیرات ناشی از همپوشانی تخریب ناشی از برش، اکسیداسیون حرارتی و تجمع ذرات آلاینده، بر اساس استانداردهای ISO 4406 و NAS 1638، بر عملکرد روانکاری و ضد سایش این دو نوع روغن هیدرولیکی است. این رویکرد نشان می‌دهد کدام یک از این نوع روغن‌های هیدرولیکی در مواجهه با تنش‌های واقعی عملکرد پایدارتری دارند.

۲- روش انجام پژوهش

۲-۱- طراحی مطالعه و شرایط عملیاتی

برای ارزیابی فرآیند پیری روغن‌های هیدرولیکی VG 46 و VG 68، یک مطالعه میدانی با مدت زمان ۱۰۰۰ ساعت بهره‌برداری پیوسته، طراحی و اجرا شد. این پژوهش، در بستر عملیاتی ماشین‌های برداشت نیشکر، در استان خوزستان، طراحی و اجرا گردید. به منظور کنترل متغیرهای اثرگذار و اطمینان از مقایسه‌پذیری نتایج، دو دستگاه ماشین برداشت از یک مدل و نسل ساخت یکسان انتخاب شدند که در یک مزرعه نیشکر با شرایط زمین و پوشش گیاهی مشابه مستقر بودند. هر یک از این دستگاه‌ها مجهز به سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی مختلفی بودند که وظیفه‌ی انتقال توان به تیغه‌های برش، سامانه‌های انتقال محصول و هدایت ماشین برداشت را بر عهده دارند. این سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی تحت شرایط کاری سخت، شامل فشارهای کاری بالا (تا ۳۰۰ بار) و دمای عملیاتی روغن در محدوده ۶۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد فعالیت می‌کردند. روغن‌های پایه VG46 و VG68 مورد استفاده، هر دو از نوع چنددرجه‌ای، بر پایه هیدروکربن‌های معدنی و دارای بسته‌های افزودنی استاندارد شامل بهبوددهنده‌های شاخص گرانی، ضد اکسیداسیون و ضد سایش بودند که مطابق با مشخصات استاندارد ISO 11158 طبقه‌بندی می‌شدند. این پژوهش با هدف تحلیل هم‌زمان تغییرات خواص رئولوژیکی، شیمیایی و آلودگی ذرات معلق در شرایط عملیاتی واقعی، تحت تأثیر تنش‌های مکانیکی شدید و اقلیم گرم و گردوغباری، انجام گرفت. در ادامه، جزئیات کامل روش نمونه‌برداری، تجهیزات مورد استفاده، پروتکل‌های آزمایشگاهی و استانداردهای حاکم بر اندازه‌گیری‌ها تشریح شده است.

۲-۲- روند نمونه‌برداری و جمع‌آوری داده

برای اطمینان از نمایندگی دقیق نمونه‌ها و حذف خطاهای ناشی از تفاوت‌های اولیه، پیش از شروع آزمون، مخازن روغن هر دو دستگاه به طور کامل تخلیه و با روغن نو، مطابق با مشخصات فنی سازنده پر شدند. کمیت‌های اولیه روغن‌ها، شامل گرانی، سینماتیک، شاخص گرانی، عدد اسیدی کل (TAN) و کد تمیزی ذرات، طبق استانداردهای بین‌المللی اندازه‌گیری گردید تا شرایط اولیه‌ی همگن ایجاد شود و اطمینان حاصل گردد که هر دو سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی با وضعیت اولیه‌ی کاملاً

مشابهی آغاز به کار می‌کنند. همچنین، در طول دوره‌ی بهره‌برداری، شرایط کاری ماشین‌ها از نظر نوع عملیات (برش نیشکر، انتقال و تخلیه‌ی محصول) و مدت زمان فعالیت روزانه، به دقت کنترل یکسان‌سازی گردید. این رویکرد کنترلی به‌منظور اطمینان از این نکته بود که تغییرات مشاهده شده در خواص روغن، ناشی از تفاوت در بار کاری یا الگوی استفاده نباشد، بلکه بازتابی مستقیم از فرایند پیری روغن تحت تأثیر تنش‌های مکانیکی، حرارتی و محیطی اقلیم خوزستان باشد. نمونه‌برداری از روغن هیدرولیک در بازه‌های زمانی ۱۰۰ ساعته (۰ تا ۱۰۰۰ ساعت) انجام پذیرفت. این بازه‌ها با در نظر گرفتن شتاب بالای فرآیند تخریب در ساعات اولیه و سپس تثبیت نسبی روند پیری روغن، انتخاب شدند. به‌منظور پیشگیری از آلودگی خارجی نمونه‌ها و اطمینان از نمایندگی نمونه، دستورالعمل‌های نمونه‌برداری مطابق با استانداردهای ISO 3170-1 (نمونه‌برداری از مایعات در جریان لوله‌ای) و ISO 15377 (راهنمای نمونه‌برداری از روغن‌های روانکار در مخازن و سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی بسته) اجرا گردید [۱۶ و ۱۷]. نمونه‌ها از شیر تخلیه‌ی اصلی سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی، زمانی که دمای روغن هیدرولیکی به محدوده‌ی کاری عملیاتی (حدود ۶۰°C) رسیده بود، جمع‌آوری شدند. درواقع، دمای ۶۰°C، به دلیل کاهش گرانروی روغن و یکنواخت‌تر شدن توزیع ذرات معلق، شرایط بهینه‌ای برای نمونه‌برداری فراهم می‌آورد. نمونه‌ها در ظروف شیشه‌ای قهوه‌ای با ظرفیت ۵۰۰ میلی‌لیتر، که پیش از استفاده با حلال‌های آلی شسته و خشک شده بودند، نگهداری می‌شدند تا از تجزیه‌ی نوری و اکسیداسیون افزودنی‌ها جلوگیری گردد. پس از نمونه‌برداری، نمونه‌ها در دمای ۴۰°C و دور از نور مستقیم خورشید نگهداری شدند تا از تغییرات شیمیایی پیش از آزمایش جلوگیری شود. به‌منظور اطمینان از نمایندگی دقیق نمونه‌ها و کاهش خطاهای اندازه‌گیری، روش‌شناسی نمونه‌برداری بر سه اصل بنیادین استوار بود که با اصول حاکم بر پایش وضعیت روغن‌های هیدرولیکی همخوانی دارد:

- اختلاط هیدرودینامیکی طبیعی: جریان پیوسته و متلاطم روغن در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، ناشی از کارکرد مداوم پمپ‌های فشار قوی، منجر به اختلاط یکنواخت ذرات معلق و توزیع همگن افزودنی‌ها می‌شود. این پدیده، یکنواختی غلظت آلاینده‌ها را در سراسر سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی تضمین می‌کند.

- مکان نمونه‌برداری: نمونه‌ها از خط بازگشت روغن به مخزن، پیش از ورود به فیلترهای نهایی، جمع‌آوری شدند. این موقعیت، نماینده‌ی کامل از وضعیت سیال، پس از عبور از تمامی اجزای تحت سایش (پمپ، شیرها، موتورها و سیلندرها) ارائه می‌دهد و آلاینده‌های تولید شده در طول چرخه کاری را بدون حذف توسط فیلتر، حمل می‌کند. این رویکرد با توصیه‌های استاندارد ISO 4405، و رویکرد ژانگ و همکاران مبنی بر اهمیت نمونه‌برداری از نقاطی که نماینده‌ی وضعیت سیال به‌کار رفته در ساختار سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی هستند، مطابقت دارد [۱۱].

- تضمین تکرارپذیری و کاهش خطای تصادفی: برای افزایش دقت و تکرارپذیری نتایج، برای هر بازه‌ی زمانی، سه نمونه مستقل تهیه و میانگین حسابی آن‌ها به‌عنوان داده‌ی نهایی گزارش شد. این اقدام، با توصیه‌های لی و همکاران، مبنی بر کاهش ناهمگنی لحظه‌ای ذرات و بهبود کیفیت داده‌های پایش وضعیت، به‌طور کامل همسو است [۸].

۲-۳- کمیت‌های مورد بررسی و روش‌های اندازه‌گیری

کمیت‌های اصلی مورد بررسی در این پژوهش شامل خواص رئولوژیکی (گرانروی و شاخص گرانروی)، خواص شیمیایی (شاخص کل اسیدی، TAN) و کمیت‌های مرتبط با آلودگی ذرات (تعداد و جرم ذرات در اندازه‌های مختلف) بود. تمامی آزمایش‌ها در آزمایشگاه مجاز تریبولوژی و با استفاده از دستگاه‌های کالیبره شده و مطابق با استانداردهای ASTM و ISO انجام گرفت.

- اندازه‌گیری گرانروی سینماتیک: گرانروی سینماتیک روغن‌ها در دو دمای کلیدی ۴۰°C و ۱۰۰°C اندازه‌گیری شد. دمای ۴۰°C نشان‌دهنده شرایط محیطی و شروع گرمایش سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی است، درحالی‌که، دمای ۱۰۰°C نشان‌دهنده شرایط بحرانی کاری است. برای این منظور از، دستگاه گرانروی-سنج مدل SVM 3001، استفاده شد. دقت اندازه‌گیری دما ۱/۰۱± و دقت اندازه‌گیری گرانروی ۵/۰± درصد بود. هر اندازه‌گیری، سه بار تکرار شد و میانگین مقادیر، به‌عنوان داده نهایی، ثبت گردید. این روش، مطابق با استاندارد ASTM D445 (روش استاندارد آزمایش برای گرانروی سینماتیک روغن‌های شفاف و کدر) است [۱۸].

- محاسبه شاخص گرانروی (VI): شاخص گرانروی (VI) به‌عنوان یک کمیت بی‌بعد، معیاری بنیادین برای توصیف حساسیت گرانروی سیالات هیدرولیکی نسبت به تغییرات دمایی تلقی می‌شود. در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، پایداری این شاخص تحت تنش‌های حرارتی و مکانیکی، نقشی تعیین‌کننده در حفظ ضخامت فیلم روانکاری و تضمین کارایی سیستم ایفا می‌کند [۱۹]. در این مطالعه، محاسبه‌ی شاخص گرانروی، بر اساس مقادیر گرانروی سینماتیک، در دو دمای مرجع 40°C (U) و 100°C (Y)، و مطابق با استاندارد ASTM D2270، انجام پذیرفت [۱۹]. برای این منظور، ابتدا، مقادیر مرجع L و H ، که به ترتیب بیانگر گرانروی سینماتیک در دمای 40°C برای روغنی با شاخص گرانروی صفر و 100 می‌باشند، از جداول استاندارد مذکور استخراج شدند. با توجه به اینکه گرانروی روغن‌های مورد مطالعه (VG 68 و VG 46) در دمای 100°C ، کمتر از حد آستانه 70cSt بوده و در محدوده‌ی جدول استاندارد قرار دارند، مقادیر مرجع L و H ، به‌طور مستقیم از جدول ۱ استاندارد ASTM D2270، استخراج گردیدند. طبق رویه‌ی این استاندارد، انتخاب فرمول محاسبه شاخص گرانروی، بر اساس مقایسه مقدار اندازه‌گیری شده U (گرانروی در 40°C) با مقدار مرجع H ، انجام می‌شود. بر این اساس، در شرایطی که $U \leq H$ باشد، شاخص گرانروی روغن هیدرولیکی از رابطه‌ی (۱) به دست می‌آید [۱۹]:

$$VI = \frac{L - U}{L - H} \times 100 \quad (1)$$

به همین ترتیب، در صورتی که $U > H$ باشد، ابتدا متغیر کمکی N ، طبق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد [۱۹]:

$$N = \frac{\log H - \log U}{\log Y} \quad (2)$$

سپس شاخص گرانروی روغن هیدرولیکی، با جایگذاری کمیت N ، در رابطه (۳) به دست می‌آید [۱۹]:

$$VI = \frac{10^N - 1}{0.00715} + 100 \quad (3)$$

شاخص گرانروی، حساسیت روغن به تغییرات دما را نشان می‌دهد. در واقع، هر چه این شاخص بالاتر باشد، تغییرات گرانروی روغن با تغییر دما کمتر و پایداری حرارتی روغن بیشتر است. در روغن‌های چند درجه‌ای، شاخص گرانروی مقادیر بسیار بالایی دارد که این ویژگی ناشی از حضور افزودنی‌های بهبوددهنده گرانروی می‌باشد. این افزودنی‌ها با دارا بودن زنجیره‌های پلیمری بلند، با تغییر ساختار خود در دماهای مختلف، افت گرانروی ناشی از افزایش دما را جبران کرده و پایداری حرارتی سیال را تضمین می‌نمایند [۳]. کاهش قابل توجه در شاخص گرانروی طی دوره‌ی بهره‌برداری (نزدیک شدن مقدار U به H)، نشان‌دهنده‌ی تخریب مکانیکی و شکست زنجیره‌های پلیمری این افزودنی‌ها تحت تأثیر تنش‌های برشی شدید و دمای بالا است [۷]. این پدیده، منجر به از دست رفتن توانایی روغن در حفظ ضخامت فیلم روانکاری در دماهای بالا و افزایش وابستگی گرانروی به دما می‌شود که می‌تواند منجر به ورود سامانه‌ی انتقال توان به رژیم‌های روانکاری ناپایدار و افزایش سایش قطعات مکانیکی گردد [۳].

- اندازه‌گیری شاخص اسیدی کل (TAN): عدد یا شاخص اسیدی کل (TAN)، به‌عنوان شاخص حساس، برای پایش میزان پیشرفت فرآیند اکسیداسیون و تجمع محصولات اسیدی (مانند اسیدهای آلی کوتاه زنجیر) در روغن هیدرولیک، اندازه‌گیری گردید. این کمیت با استفاده از روش خنثی‌سازی پتانسیومتری القایی (تیتراسیون پتانسیومتری قلیایی)، مطابق با استاندارد ASTM D664 تعیین شد [۲۰]. در این روش، وزن مشخصی از نمونه روغن در مخلوطی از حلال‌های آلی مناسب (معمولاً تولوئن و ایزوپروپانول) حل می‌شود تا محیطی غیرآبی و همگن ایجاد گردد. سپس، یک محلول استاندارد هیدروکسیدپتاسیم (KOH) در متانول، به‌صورت قطره قطره به محلول روغن اضافه می‌شود (عملیات خنثی‌سازی یا تیتراسیون) [۲۰]. برخلاف روش‌های قدیمی که از تغییر رنگ شناساگر استفاده می‌کردند، در این استاندارد از یک الکتروود ترکیبی متصل به پتانسیومتر دیجیتال، برای ثبت تغییرات پتانسیل الکتریکی در طول فرآیند استفاده می‌شود. نقطه پایانی آزمایش با استفاده از منحنی خنثی‌سازی و با تعیین نقطه عطف در تغییرات شیب پتانسیل، به‌صورت خودکار و با دقت بالا توسط دستگاه تعیین می‌گردد. این روش، خطای انسانی را حذف کرده و حساسیت لازم برای تشخیص مقادیر کم اسید را فراهم می‌آورد. لازم به ذکر

است که افزایش عدد اسیدی کل، نشان‌دهنده شروع یا شدت‌گیری فرآیند اکسیداسیون شیمیایی روغن است که در آن رادیکال‌های آزاد، زنجیره‌های هیدروکربنی را به ترکیبات اسیدی تبدیل می‌کنند [۱۰]. این کمیت نقش حیاتی در پایش سلامت شیمیایی روغن دارد. افزایش ناگهانی یا شیب تند در نمودار TAN می‌تواند نشان‌دهنده تخلیه کامل ذخیره آنتی‌اکسیدانی و ورود روغن به فاز اکسیداسیون شتاب‌دار باشد [۳]. بنابراین، پایش عدد اسیدی کل به‌عنوان یک پیش‌بینی‌کننده زود هنگام برای تخریب شیمیایی و کاهش عمر مفید روغن در نظر گرفته می‌شود.

- پایش وضعیت آلودگی ذرات جامد و سلامت مکانیکی: برای ارزیابی کمی و کیفی آلودگی ذرات جامد و تأثیر آن بر سلامت مکانیکی سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، از سه روش مکمل و استاندارد استفاده شد:

الف: کدگذاری تمیزی ذرات بر اساس استاندارد ISO 4406: تعداد ذرات معلق در حجم مشخصی از روغن با استفاده از دستگاه شمارشگر ذرات لیزری مدل PAMAS GT-700، مطابق با استاندارد ISO 4406:2021 اندازه‌گیری گردید. این دستگاه ذرات را در سه محدوده ابعادی بزرگ‌تر از ۴، ۶ و ۱۴ میکرون طبقه‌بندی می‌کند. بر این اساس، شاخص تمیزی روغن به‌صورت سه‌تایی (برای نمونه ۲۰/۱۸/۱۵)، گزارش می‌شود که به ترتیب نشان‌دهنده تعداد ذرات بزرگ‌تر از ۴، ۶ و ۱۴ میکرون در هر ۱۰۰ میلی‌لیتر روغن است. این کدگذاری، معیاری استاندارد برای پایش روند افزایش آلودگی در طول زمان است [۱۲].

ب: عدد آلودگی: برای ارزیابی احتمال بروز نقص در قطعات حساس هیدرولیکی، عدد آلودگی بر اساس استاندارد NAS 1638، محاسبه شد. این استاندارد روغن را بر اساس بیشینه تعداد مجاز ذرات در پنج محدوده‌ی ابعادی (۱۵-۵، ۲۵-۱۵، ۵۰-۲۵، ۱۰۰-۵۰ و ۵۰۰-۱۰۰ میکرون)، به دسته‌بندی‌های آلودگی (از Class 00 تا Class 9) تقسیم می‌کند. استفاده از این استاندارد به ویژه برای تشخیص ذرات درشت‌تر که پتانسیل مسدود کردن شیرهای حساس (شیرهای تناسبی و سرو) و ایجاد سایش شدید را دارند، حائز اهمیت است [۴].

ج: تعیین جرم ذرات معلق: علاوه بر شمارش ذرات، جرم ذرات خارجی معلق در ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب روغن با استفاده از روش غربال‌گری و وزن‌کشی دقیق تعیین گردید. نمونه روغن از فیلترهای مخصوص با منافذ مشخص عبور داده شد و سپس فیلترها خشک و در ترازوی حساس با دقت ۰/۰۱ میلی‌گرم، وزن شدند. تفاوت وزن فیلتر قبل و بعد از آزمایش، جرم کل ذرات معلق را نشان می‌دهد. این روش مطابق با استاندارد ISO 4407، انجام پذیرفت و برای ارزیابی بار آلودگی کلی و ظرفیت ذره‌گیری واحد پلایش (واحد فیلتراسیون روغن) مفید است [۸].

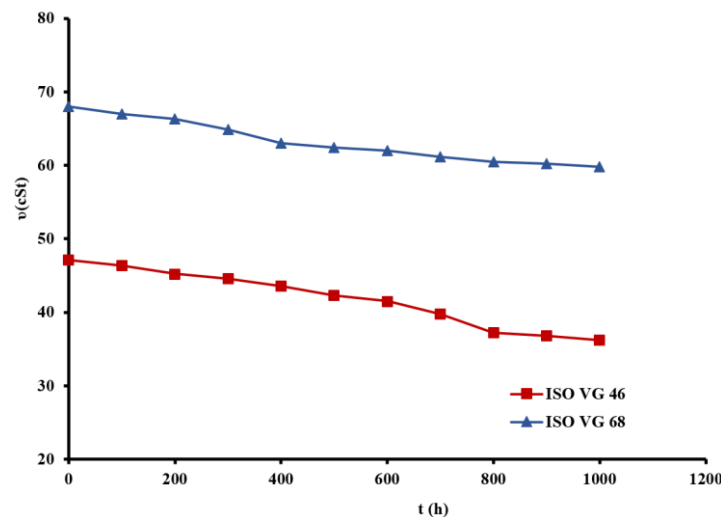
۲-۴- کنترل کیفیت و اعتبارسنجی داده‌ها

در این پژوهش، برای تضمین اعتبار علمی داده‌ها، یک چارچوب تحلیلی چندلایه در نظر گرفته شد. این رویکرد، فراتر از کالیبراسیون یا تنظیم متداول و معمول دستگاه‌های اندازه‌گیری، با هدف حذف خطاهای سیستماتیک و تضمین پایایی نتایج، در مواجهه با پیچیدگی‌های فرآیند پیری روغن، طراحی گردید. بدین منظور، علاوه بر تنظیم دقیق دستگاه‌های اندازه‌گیری بر اساس الزامات استانداردهای ASTM و ISO، از مواد مرجع استاندارد و نمونه‌های کنترلی، به‌منظور پایش تغییرات کالیبراسیون، در طول دوره‌ی ۱۰۰۰ ساعته‌ی آزمایش استفاده شد تا پایداری عملکرد تجهیزات تضمین گردد. هم‌زمان، با انجام آزمایش‌های مکرر، برای تمامی کمیت‌های کلیدی، تحلیل آماری خطاهای تصادفی صورت پذیرفت که نتایج آن نشان‌دهنده‌ی انحراف معیار و ضریب تغییرات (CV) کمتر از ۲ درصد برای کل مجموعه داده‌ها بود. این سطح از دقت، مبنای محکمی برای تشخیص تفاوت‌های معنادار در آهنگ تخریب فراهم آورد. در مرحله اعتبارسنجی اولیه، تطبیق دقیق مقادیر پایه‌ی مشخصه‌های رئولوژیکی، شیمیایی و کدهای تمیزی روغن‌های VG 68 و VG46، با مشخصات فنی اعلام‌شده توسط تولیدکننده، صحت عملیات شستشو و پر کردن مخازن و عدم وجود آلودگی اولیه را تأیید کرد و بدین ترتیب، خطاهای سیستماتیک ناشی از شرایط آغازین به حداقل رسید. در نهایت، اجرای این روند جامع کنترل کیفیت تضمین می‌کند که تغییرات مشاهده شده در خواص رئولوژیکی، شیمیایی و آلودگی ذرات، بازتابی خالص از تعامل تنش‌های مکانیکی، حرارتی و محیطی اقلیم خوزستان بر ساختار مولکولی روغن‌ها است. بنابراین، می‌توان اطمینان حاصل کرد که این تغییرات، ناشی از خطاهای اندازه‌گیری یا تفاوت‌های اولیه، در کیفیت روغن‌های هیدرولیک نمی‌باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل رئولوژیکی و پایداری حرارتی-مکانیکی

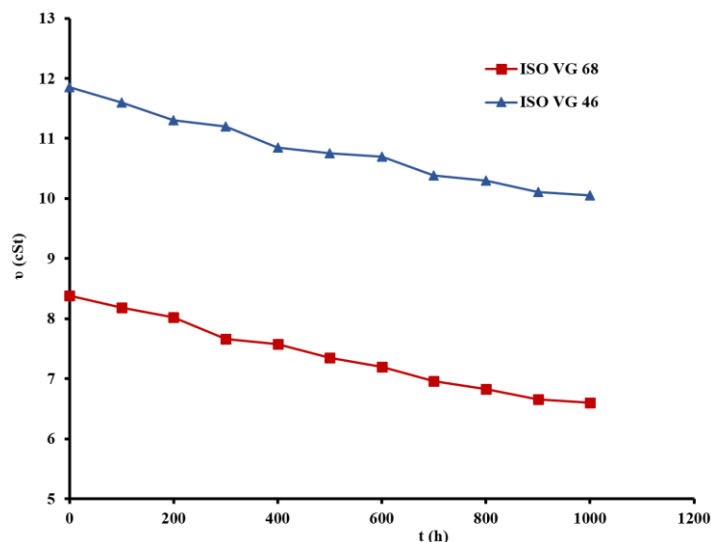
شکل (۱)، روند تغییرات گرانشی سینماتیک (v) روغن‌های هیدرولیکی VG68 و VG46 در دمای 40°C طی ۱۰۰۰ ساعت بهره‌برداری در ماشین برداشت نیشکر را به نمایش می‌گذارد. تحلیل کمی داده‌ها بیانگر کاهش پایداری گرانشی در هر دو نوع روغن است، به گونه‌ای که گرانشی روغن VG46 از مقدار اولیه $47/16\text{cSt}$ به $36/2\text{cSt}$ و در روغن VG68، از 68cSt به $59/8\text{cSt}$ در پایان دوره آزمون، تنزل یافته است. بر این اساس، گرانشی روغن‌های VG68 و VG46، در طول دوره آزمون، به ترتیب ۲۳/۲ درصد و ۱۲/۱ درصد نسبت به وضعیت اولیه کاهش یافته‌اند. دلیل اصلی این کاهش، پدیده‌ی تخریب برشی است که در آن فشار و برش شدید باعث قطع شدن زنجیره‌های بلند پلیمری و ساختاری موجود در روغن می‌شود [۱۱]. در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی تحت فشار بالا، نظیر ماشین‌های برداشت نیشکر، تنش‌های برشی شدید ناشی از عبور سیال از پمپ‌ها و شیرهای کنترلی منجر به برش زنجیره‌های پلیمری شده و به‌طور مستقیم کاهش گرانشی را به دنبال دارد. پدیده‌ی اکسیداسیون، به‌طور معمول، موجب افزایش گرانشی می‌شود. با این حال، مشاهدات حاضر نشان می‌دهند که در بازه‌ی زمانی ۰ تا ۱۰۰۰ ساعت، تخریب مکانیکی بر اکسیداسیون شیمیایی غلبه یافته است. این یافته، با گزارش‌های ژانگ و همکاران که خاطرنشان کرده‌اند معیارهای گرانشی در سیستم‌های مدرن اغلب بیش از حد سخت‌گیرانه هستند، همخوانی دارد [۱۱]. با این حال، کاهش ۲۳/۲ درصدی گرانشی در روغن VG46 نشان‌دهنده‌ی شدت تنش‌های مکانیکی در اقلیم گرم خوزستان است. این میزان کاهش می‌تواند پایداری لایه‌ی نازک روان‌کاری و راندمان حجمی سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی را به چالش بکشد.



شکل ۱ مقایسه‌ی تغییرات گرانشی سینماتیک (v) روغن‌های هیدرولیکی VG68 و VG46 در دمای 40°C در طول دوره‌ی آزمون

شکل (۲)، رفتار گرانشی سینماتیک نمونه‌های روغن VG68 و VG46 را در دمای 100°C ، به‌عنوان نماینده‌ی از شرایط کاری سنگین و دماهای بحرانی، به تصویر می‌کشد. تحلیل کمی نمودار حاکی از کاهش قابل‌توجه گرانشی در هر دو روغن است، به گونه‌ای که گرانشی روغن VG46، از $8/38$ به $6/6\text{cSt}$ (کاهش حدود ۲۱/۲ درصدی) و روغن VG68، از $11/85$ به $10/05\text{cSt}$ (کاهش حدود ۱۵/۲ درصدی) طی دوره‌ی آزمون تغییر یافته است. این روند نزولی در دمای بالا، شاخصی حیاتی برای ارزیابی پایداری حرارتی و برشی روغن محسوب می‌شود. لازم به ذکر است که کاهش گرانشی در دمای 100°C ، اهمیت بسزایی در حفظ ضخامت لایه‌ی نازک روان‌کاری در نقاط داغ و تحت بارهای سنگین سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی دارد. از منظر فیزیک شیمیایی پلیمرها، کاهش گرانشی در دمای بالا نشان‌دهنده تخریب ساختاری افزودنی‌های بهبوددهنده شاخص گرانشی است که وظیفه جلوگیری از کاهش شدید گرانشی با افزایش دما را بر عهده دارند [۷]. مقایسه نتایج با پژوهش‌های ژانگ و لی در سال ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که اگرچه روغن VG68 مقاومت نسبتاً بهتری در برابر کاهش گرانشی در دمای بالا از خود نشان داده، اما

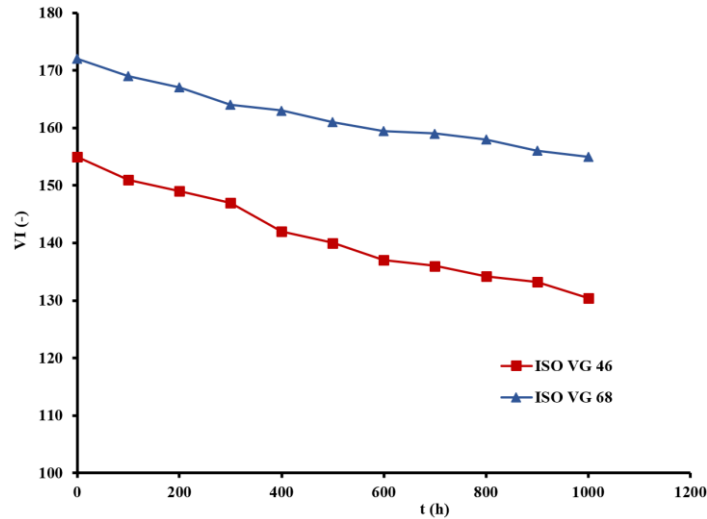
نتایج حاضر بیانگر آن است که هر دو روغن در آزمایش حاضر تجربه کاهش قابل توجهی داشته‌اند [۶]. این واقعیت بر نوآوری پژوهش حاضر در خصوص بررسی اثرات اقلیمی تأکید می‌ورزد. در این شرایط، هم‌افزایی میان دمای محیطی بالای خوزستان و گرمای عملکردی سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی مختلف در ساختار ماشین برداشت نیشکر، باعث شتاب‌گیری تخریب برشی فراتر از الگوهای معمول آزمایشگاهی شده است. این وضعیت پتانسیل انتقال رژیم روانکاری از حالت هیدرودینامیک کامل به روانکاری مخلوط و در نهایت افزایش سایش قطعات را دارد که با مشاهدات سایر محققان در خصوص حساسیت سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی مدرن به نوسانات گرانی در دمای کار همخوانی کامل دارد [۳].



شکل ۲ مقایسه‌ی تغییرات گرانی سینماتیک (v) روغن‌های هیدرولیکی VG46 و VG68 در دمای ۱۰۰°C در طول دوره‌ی آزمون

شکل (۳)، نوسانات شاخص گرانی (VI) روغن‌های VG46 و VG68 را به‌عنوان معیاری از وابستگی گرانی به تغییرات دما طی دوره بهره‌برداری، به تصویر می‌کشد. نتایج آزمایشگاهی بیانگر آن است که شاخص گرانی روغن VG46 از ۱۵۵ به ۱۳۰/۴ و در روغن VG68 از ۱۷۲/۱ به ۱۵۵/۳ کاهش یافته است. این افت شاخص گرانی روغن‌های VG46 و VG68، که به ترتیب در حدود ۱۶ و ۱۰ درصد است، تاییدکننده‌ی تجزیه و تحلیل‌های انجام شده در شکل‌های (۱) و (۲) می‌باشد و به‌طور عمیق‌تری به تخریب شیمیایی و فیزیکی اجزای افزودنی روغن اشاره دارد. کاهش شاخص گرانی نشان می‌دهد که روغن توانایی خود را برای حفظ خواص روانکاری در نوسانات دمایی از دست داده و رفتار آن به سمت روغن‌های تک‌درجه‌ای (روغن‌های با شاخص گرانی پایین) میل می‌کند. دلیل فیزیکی این پدیده، شکسته شدن زنجیره‌های پلیمری افزودنی‌های تنظیم‌کننده‌ی گرانی توسط تنش‌های مکانیکی (فشار) و حرارت است. در این صورت، روغن دیگر نمی‌تواند در دماهای بالا ضخامت لازم را حفظ کند [۲]. کاهش شاخص گرانی در این مطالعه، به‌ویژه در روغن هیدرولیکی VG46 نشان می‌دهد که فرآیند پیری روغن در شرایط سخت عملکردی ماشین برداشت نیشکر، با سرعت بالایی در حال پیشرفت است. این کاهش می‌تواند منجر به نازک شدن فیلم روغن در شرایط دمای کاری بالا و در نتیجه افزایش اصطکاک و ناکارآمدی سیستم در اقلیم گرم استان خوزستان شود که ضرورت پایش مداوم این پارامتر را بیش‌ازپیش نمایان می‌سازد. این ضرورت پایش مداوم در مطالعات دیگر نیز مورد تأکید قرار گرفته است، به‌طوری‌که پژوهش‌های گسترده نشان می‌دهند تخریب افزودنی‌های اصلاح‌کننده گرانی، عامل اصلی افت عملکرد در روغن‌های هیدرولیکی تحت فشار است [۹]. همچنین سایر محققان بر این باورند که کنترل شاخص گرانی می‌تواند نقش کلیدی در پیشگیری از خسارات مکانیکی و تضمین پایداری سیستم‌های تحت تنش داشته باشد [۱۲]. تلفیق داده‌های تجربی حاصل از ارزیابی گرانی در دماهای ۴۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (شکل‌های ۱ و ۲) به همراه روند نزولی شاخص گرانی (شکل ۳)، بیانگر آن است که روغن‌های مذکور در این شرایط عملیاتی با سرعت بالایی در حال از دست دادن کیفیت خود هستند. در این بستر عملیاتی، هم‌پوشانی میان فشار مکانیکی و تنش حرارتی محیط، عمق تخریب ساختاری روغن را فراتر از پیش‌بینی‌های کلاسیک برده است. به‌ویژه افت قابل‌توجه ۲۳ درصدی گرانی در نمونه VG46 و کاهش ۱۶ واحدی شاخص گرانی آن، هشدار جدی محسوب می‌شود که نشان می‌دهد حاشیه ایمنی روانکاری در نقاط داغ سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی (۱۰۰°C)

به شدت کاهش یافته است. چنین فروپاشی در ویژگی‌های رئولوژیکی، پتانسیل وقوع شکست فیلم روغن و ورود به رژیم اصطکاک مخلوط را افزایش می‌دهد که تهدیدی مستقیم برای تداوم عمر اجزاء سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی است. بر این اساس، اگرچه در پایش‌های استاندارد، معمولاً آلودگی ذرات معلق اولویت دارد، اما در کاربردهای با بار چرخه‌ای سنگین و اقلیم گرم، نادیده گرفتن افت پایداری برشی و تغییرات گرانروی می‌تواند زمینه‌ساز ناکارآمدی سامانه شود.



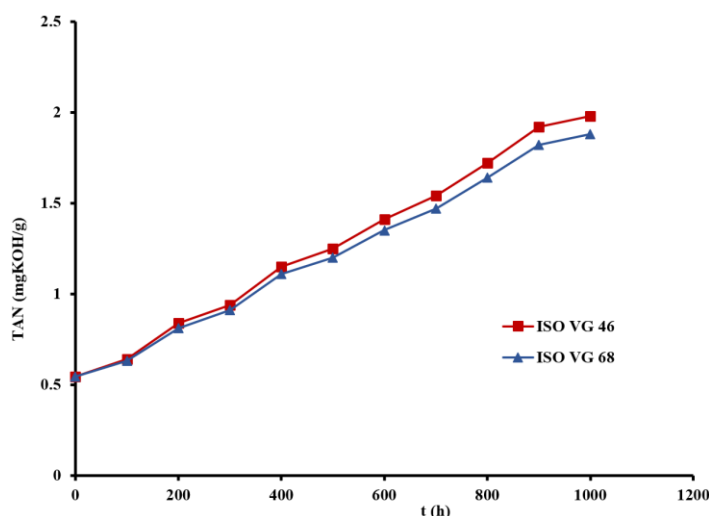
شکل ۳ مقایسه‌ی تغییرات شاخص گرانروی (VI) روغن‌های هیدرولیکی VG68 و VG46 در طول دوره‌ی آزمون

۳-۲- روند تخریب شیمیایی و پایداری اکسیداسیونی

شکل (۴)، روند تغییرات شاخص اسیدی کل (TAN) را برای دو روغن VG68 و VG46 نشان می‌دهد. تحلیل این داده‌ها، بینش مهمی درباره‌ی آهنگ تخریب شیمیایی و مکانیسم‌های حفاظتی روغن‌ها فراهم می‌سازد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار اولیه‌ی شاخص اسیدی کل برای هر دو روغن VG68 و VG46، پیش از ورود به سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی ماشین برداشت نیشکر، برابر با 0.543 mgKOH/g ، اندازه‌گیری گردید. مقدار یکسان شاخص اسیدی کل روغن‌های هیدرولیکی VG46 و VG68، در ابتدای به‌کارگیری آن‌ها در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی ماشین برداشت نیشکر، حاکی از یکسان بودن کلاس کیفی و بسته‌ی افزودنی‌های اولیه‌ی این دو روغن هیدرولیکی است. با این حال، در طول دوره‌ی آزمایش، نرخ افزایش شاخص اسیدی کل در دو روغن هیدرولیکی تفاوت معناداری نشان داد.

مطابق شکل (۴)، با رسیدن شاخص اسیدی کل روغن VG46، به عدد 1.98 mgKOH/g ، نرخ تخریب بالاتری را نسبت به VG68 نشان داد. در پایان آزمون نیز، شاخص اسیدی کل روغن VG68، برابر با 1.88 mgKOH/g ، تعیین گردید. این تفاوت در نرخ افزایش شاخص اسیدی کل، نشان‌دهنده پایداری شیمیایی بهتر روغن VG68 در شرایط سخت کاری است. تحلیل کمی شیب منحنی‌های شاخص اسیدی کل نشان می‌دهد که نرخ اکسیداسیون در روغن هیدرولیکی VG46، حدود 0.014 mgKOH/g در ساعت، و در روغن VG68، حدود 0.013 mgKOH/g در ساعت برآورد می‌شود. اگرچه اختلاف مطلق میان شاخص اسیدی کل دو روغن هیدرولیکی به ظاهر اندک به نظر می‌رسد (حدود 0.1 میلی‌گرم)، اما این تفاوت معادل حدود $5/1$ درصد کاهش در نرخ تولید اسید در روغن VG68 است که از نظر کاربردی و فنی، حائز اهمیت فراوانی است. پژوهش‌های پیشین، که به‌طور عمده بر یک درجه خاص از روغن بودند، اغلب اکسیداسیون را پدیده‌ای مستقل از گرانروی پایه فرض می‌کردند [۱۱]. این در حالی است که، یافته‌های حاضر، با استناد به مطالعات اخیر وانگ و همکاران، مدل متفاوتی را پیشنهاد می‌دهند [۹]. بر این اساس، گرانروی بالاتر روغن هیدرولیکی VG68، به‌عنوان مانعی فیزیکی (ممانعت مولکولی) عمل می‌کند. این ویژگی، نفوذ رادیکال‌های آزاد به درون ساختار مولکولی روغن را دشوارتر کرده و از این طریق، سرعت واکنش‌های زنجیره‌ای اکسیداسیون

را کاهش می‌دهد. در واقع، این پدیده، باعث می‌شود که تولید اسید در روغن هیدرولیکی VG68، نسبت به روغن پایه سبک‌تر (VG46)، کاهش یابد. بدین ترتیب، پایداری ذاتی روغن پایه سنگین‌تر، نه تنها به دلیل ترکیب افزودنی‌ها، بلکه به واسطه‌ی ویژگی‌های فیزیکی خود، منجر به افزایش طول عمر سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی می‌شود. همچنین، شیب ملایم‌تر روند افزایش شاخص اسیدی کل برحسب زمان کارکرد روغن هیدرولیکی VG68، در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی ماشین برداشت نیشکر، بیانگر تخلیه‌ی آهسته‌تر ذخیره آنتی‌اکسیدانی است. این رفتار باعث می‌شود، نقطه عطف تخریب در این روغن نسبت به روغن هیدرولیکی VG46، با تأخیر همراه گردد. در مقابل، عملکرد روغن هیدرولیکی VG46، نشان‌دهنده‌ی حساسیت بالا به نوسانات دمایی روغن در سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی است. مطابق شکل ۴، در بازه‌ی زمانی ۳۰۰ تا ۴۰۰ ساعت، یک جهش ناگهانی در مقدار شاخص اسیدی کل روغن هیدرولیکی VG46، از 0.194 mgKOH/g به 1.115 mgKOH/g ، مشاهده شد. این افزایش شیب‌دار، نشان‌دهنده رسیدن روغن به نقطه اشباع آنتی‌اکسیدانی و شروع فاز اکسیداسیون شتاب‌دار است. چنین رفتاری، روغن VG46 را در برابر تنش‌های دمایی لحظه‌ای در اقلیم گرم خوزستان آسیب‌پذیرتر می‌سازد. در مقابل، روغن VG68 با حفظ رفتار نرم‌تر و پایداری، توانست از وقوع این پدیده‌های تخریب سریع جلوگیری نماید.

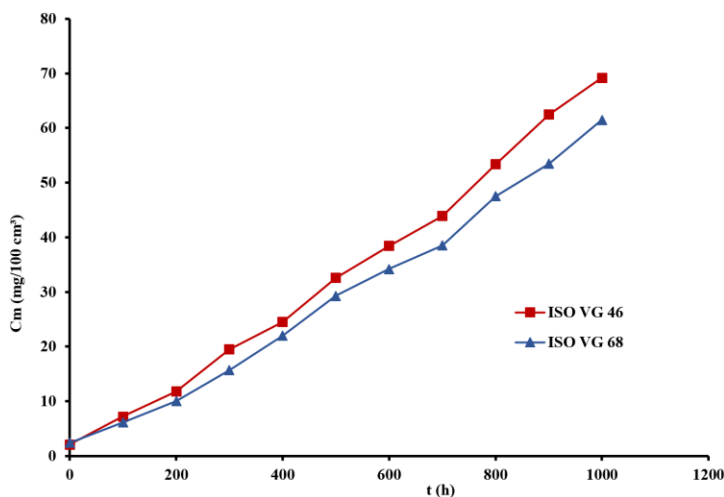


شکل ۴ مقایسه‌ی تغییرات شاخص اسیدی (TAN) روغن‌های هیدرولیکی VG46 و VG68 در طول دوره‌ی آزمون

۳-۳- پایش وضعیت ذرات و سلامت مکانیکی

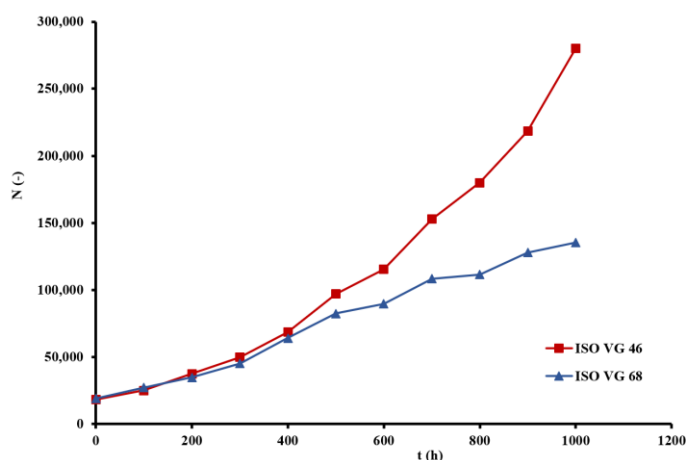
شکل (۵)، روند تغییرات جرم ذرات خارجی معلق در 100 cm^3 (C_m) از روغن‌های VG46 و VG68 را در طول زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تجمع ذرات آلاینده در هر دو نوع روغن طی ۱۰۰۰ ساعت کارکرد، از الگویی نمایی و غیرخطی پیروی می‌کند. با این حال، تحلیل دقیق‌تر دینامیک تجمع این ذرات، تفاوت‌های معناداری را در رفتار هر دو روغن آشکار می‌سازد. روغن VG46 با آغاز از مقدار $2/1$ و رسیدن به $69/2$ میلی‌گرم در 100 cm^3 ، شیب افزایشی بسیار تندتری را در بازه‌های زمانی پایانی (به‌ویژه ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ ساعت) تجربه کرد که نشان‌دهنده‌ی کاهش سریع پایداری این روغن در برابر عوامل تخریبی است. بر اساس یافته‌های ژانگ و لی، این رفتار ناشی از کاهش گرانیروی روغن‌های سبک‌تر تحت تنش‌های برشی و حرارتی بالای محیط است که منجر به نازک‌شدن فیلم روانکاری و افزایش تولید ذرات ناشی از فرسایش می‌گردد [۶]. در مقابل، روغن VG68 با گرانیروی پایه بالاتر، عملکرد کنترل‌کننده‌تری را از خود نشان داد، به‌طوری‌که با وجود نقطه شروع بالاتر، در هزارمین ساعت به مقدار $61/5$ میلی‌گرم رسید. بررسی دقیق شکل ۵ حاکی از آن است که با وجود اینکه هر دو روغن تحت تأثیر شرایط سخت کاری قرار گرفته‌اند، اما نرخ تولید آلودگی در VG68 به دلیل فیلم روغن ضخیم‌تر و مقاومت مکانیکی بالاتر، که مورد تأیید نیر و تومانیک است، پایین‌تر بود [۱۰]. از دیدگاه استاندارد ISO 4406، رسیدن به چنین ترازهایی از آلودگی که توسط سینگ و همکاران تعیین شده، بیانگر ریسک بالای خستگی قطعات و کاهش عمر پمپ‌ها هیدرولیکی می‌باشد [۴]. همچنین، پژوهش‌های جدیدی که توسط ژانگ و همکاران بر روی سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی در ماشین‌های متحرک در شرایط

آب و هوایی گرم انجام شده، تأیید می‌کند که در مناطق با آلودگی محیطی بالا، روغن‌های با گرانیوی کمتر مانند VG46، سریع‌تر از حد انتظار به شاخص‌های تمیزی بحرانی می‌رسند [۱۱]. همچنین، یافته‌های کومار و همکاران، در خصوص ظرفیت ذره‌گیری فیلترها نشان می‌دهد که اگرچه VG68 چگالی بیشتری دارد، اما به دلیل تولید کمتر ذرات فرسایشی، فشار کمتری به سیستم فیلتراسیون وارد می‌کند [۵]. در نهایت، داده‌ها بیانگر آن است که VG68 پایداری بهتری در حفظ خواص تمیزی داشته است.



شکل ۵ مقایسه‌ی تغییرات جرم ذرات خارجی معلق در 100 cm^3 از روغن‌های VG46 و VG68 در طول دوره‌ی آزمون

شکل (۶)، روند تغییرات تعداد ذرات ریز با اندازه بزرگ‌تر از ۴ میکرون را در دو روغن هیدرولیکی VG68 و VG46، در طول ۱۰۰۰ ساعت کارکرد ماشین برداشت نیشکر در خوزستان نمایش می‌دهد.

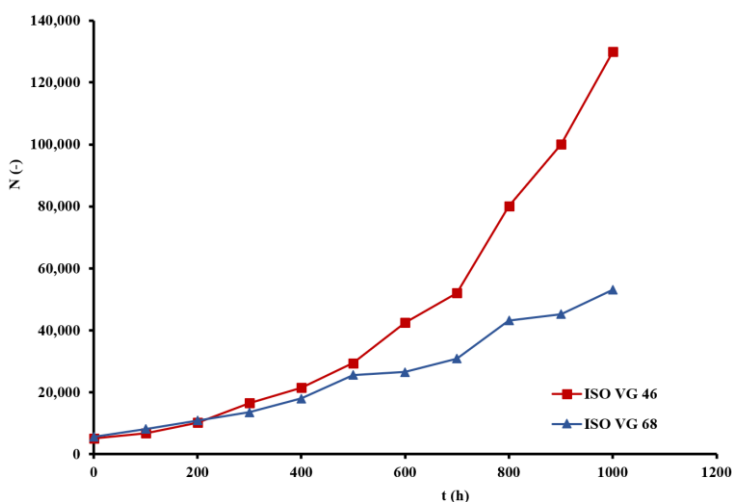


شکل ۶ روند تغییرات غلظت ذرات آلاینده بزرگ‌تر از ۴ میکرون در روغن‌های VG46 و VG68 در طول ۱۰۰۰ ساعت کارکرد

مطابق شکل (۶)، در روغن VG46، تعداد ذرات از ۱۸۴۰۰ در ساعت اولیه به حدود ۲۸۰۰۰۰ در پایان دوره‌ی کارکرد (۱۰۰۰ ساعت) می‌رسد که نشان‌دهنده‌ی یک افزایش نمایی و شتاب‌دار است. این شتاب سریع در تولید ذرات، ریشه در ناپایداری تریبوشیمیایی روغن با گرانیوی پایین در دماهای بالا و فشارهای تماسی شدید دارد، به طوری که کاهش ضخامت فیلم روانکاری، منجر به تماس میکروسکوپی سطح‌های فلزی و آغاز فرآیند اکسیداسیون کاتالیزوری می‌شود. در مقابل، روغن VG68 با شروعی مشابه (۱۹۲۵۰ ذره)، تنها به ۱۳۵۲۰۰ ذره، در پایان دوره می‌رسد. پایداری گرانیوی بالاتر در روغن VG68، توانایی بهتری در جداسازی حرارتی و مکانیکی (عایق حرارتی و مکانیکی) دارد و با حفظ ضخامت فیلم روانکاری، از تماس مستقیم فلز-فلز جلوگیری کرده و نرخ تولید ذرات ریز فرار را به حداقل می‌رساند. این رفتار همسو با یافته‌های وانگ و همکاران است که تأکید

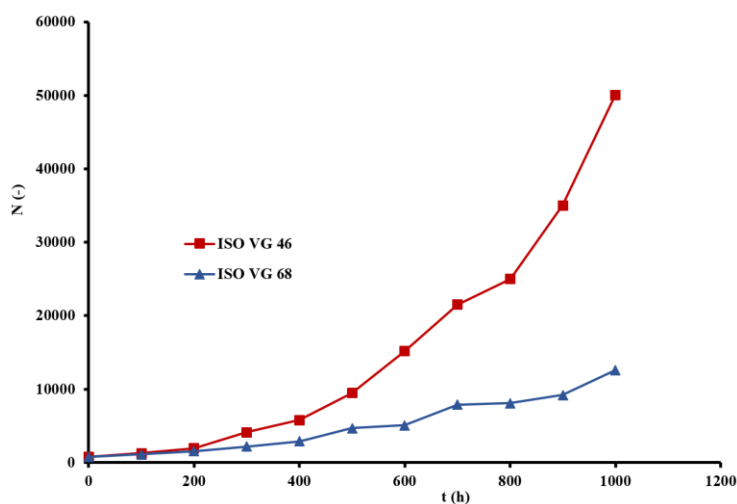
می‌کند، ضخامت فیلم روانکاری، نقش حیاتی در جلوگیری از اکسیداسیون کاتالیزوری و تولید ذرات ریز ایفا می‌کند [۹]. علاوه بر فرآیندهای تریبوشیمیایی، پدیده‌ی تراکم سطحی و رفتار کلوئیدی ذرات نیز در این تفاوت‌ها دخیل است. ذرات زیر ۴ میکرون، به دلیل نسبت سطح به حجم بسیار بالا، تمایل زیادی به معلق ماندن به‌صورت کلوئیدی در روغن دارند که این موضوع، سطح تماس آن‌ها با اکسیژن و فلزات را افزایش داده و سرعت اکسیداسیون را تسریع می‌کند. در روغن VG46، گرانروی پایین‌تر منجر به افزایش شدت تلاطم و برخورد مکرر ذرات می‌شود که این پدیده، علاوه بر تولید ذرات بیشتر، باعث شکستگی زنجیره‌های پلیمری در افزودنی‌های ضدسایش می‌گردد. در مقابل، گرانروی بالاتر VG68 اثر دمپینگ هیدرودینامیک ایجاد کرده و با افزایش نیروی درگ، از برخورد مستقیم و تشکیل خوشه‌های جامد جلوگیری می‌کند. این مشاهدات با اصول حاکم بر پایش وضعیت برخط سیالات، مطرح شده توسط ژانگ و همکاران و همچنین، تحقیقات کومار و همکاران، که بر اثرات هم‌زمان گردوغبار و خواص رئولوژیک روغن در شتاب‌دهی به فرآیند پیری تأکید دارند، کاملاً همسو است [۵ و ۱۱].

شکل (۷)، روند تغییرات تعداد ذرات با اندازه بزرگ‌تر از ۶ میکرون را در دو روغن هیدرولیکی VG46 و VG68 نشان می‌دهد. این اندازه‌ی ذرات، مرز حیاتی بین آلودگی‌های قابل جداسازی توسط فیلترهای هیدرولیکی استاندارد و آلودگی‌های مخرب برای شیرهای حساس (مانند شیرهای سرو و جبران‌کننده‌های فشار) است. در روغن VG46، تعداد ذرات از حدود ۵۱۰۰ در ساعت اولیه به حدود ۱۳۰۰۰۰ در پایان دوره عملکردی می‌رسد. شیب تند منحنی در نیمه دوم دوره، نشان‌دهنده‌ی ورود به فاز سایش حاد در بخش‌های مختلف سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی است. دلایل فیزیکی این افزایش شدید، فرسایش چسبنده و خستگی سطحی ناشی از نوسانات شدید فشار در فیلم روانکاری نازک روغن هیدرولیکی VG46، است که منجر به تخریب موضعی سطح و پاشش ذرات فلزی از عملگرهای هیدرولیکی، شیرها و یاتاقان‌ها می‌شود. در مقابل، روغن هیدرولیکی VG68، با رسیدن به حدود ۵۳۱۰۰ ذره در پایان دوره، عملکردی پایدارتر و یکنواخت‌تر از خود نشان می‌دهد. فیلم روانکاری غلیظ‌تر روغن VG68، توزیع بار را در سطح تماس بخش‌های مختلف اجزای هیدرولیکی، به‌صورت یکنواخت‌تری انجام داده و از تمرکز تنش‌های مکانیکی که پیش‌زمینه‌ی ایجاد ترک‌های خستگی و تخریب سطحی هستند، جلوگیری می‌کند. همچنین، گرانروی بالاتر روغن هیدرولیکی VG68، اثرات ضربه‌ای بارهای دینامیکی ماشین برداشت را جذب کرده و از ایجاد شوک‌های مکانیکی که عامل اصلی تولید ذرات در این اندازه هستند، کاسته است. این رفتار همسو با یافته‌های سینگ و همکاران است که نشان می‌دهند افزایش گرانروی روغن هیدرولیکی به‌طور مستقیم نرخ فرسایش چسبنده را در شرایط بارهای دینامیکی کاهش می‌دهد [۴]. در همین راستا، یافته‌های نایر و تومانیگ درباره فرآیندهای گذار سایش، و همچنین، تحقیقات لی و همکاران نیز بر این نکته تأکید دارند که مدیریت این کلاس از آلودگی‌ها، شرط لازم برای تضمین عملکرد صحیح پمپ و جلوگیری از کاهش بازده سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی است [۸ و ۱۰].



شکل ۷ روند تغییرات غلظت ذرات آلاینده بزرگ‌تر از ۶ میکرون در روغن‌های VG46 و VG68 در طول ۱۰۰۰ ساعت کارکرد

شکل (۸)، توزیع زمانی ذرات درشت با اندازه بزرگ‌تر از ۱۴ میکرون را در دو روغن هیدرولیکی VG46 و VG68 نمایش می‌دهد. این اندازه ذرات به‌عنوان شاخصی حیاتی برای ارزیابی سلامت کلی قطعات مکانیکی در سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی در نظر گرفته می‌شود. وجود پایدار این ذرات، معمولاً نشان‌دهنده‌ی شروع فرآیندهای تخریبی پیشرونده در سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی است. در روغن هیدرولیکی VG46، غلظت این ذرات از ۷۶۰ در ساعت اولیه به حدود ۵۰۰۰۰ در پایان دوره‌ی کارکرد می‌رسد. منحنی تغییرات این روغن بیانگر گذار به یک رژیم سایشی جدید پس از ۵۰۰ ساعت کارکرد است که در آن، شیب نمودار با یک روند نمایی، افزایش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده‌ی ورود سامانه انتقال توان هیدرولیکی به فاز سایش حاد است که ریشه در ناپایداری فیلم روانکاری تحت بارهای سنگین و دینامیکی ماشین برداشت نیشکر دارد. به بیان دقیق‌تر، کاهش ضخامت فیلم روانکاری در روغن هیدرولیکی VG46، منجر به سایش سه‌جانبه و تغییر شکل پلاستیک سطحی در اجزای متحرک پمپ‌ها و عملگرهای هیدرولیکی می‌گردد که درنهایت، به تولید تراشه‌های فلزی با ابعاد بزرگ‌تر منجر می‌شود. در مقابل، روغن هیدرولیکی VG68، با ثبت ۱۲۵۶۸ ذره در پایان دوره‌ی آزمون، پایداری عملکردی بسیار بالاتری را نشان می‌دهد. پایداری رئولوژیک برجسته این روغن هیدرولیکی، امکان ایجاد و حفظ یک لایه‌ی هیدرودینامیک مقاوم را فراهم می‌آورد که به‌طور مؤثری فشار تماسی را تحمل کرده و از قطعات متحرک محافظت می‌نماید. این لایه‌ی محافظ، با جلوگیری از تماس‌های فلزی شدید، از ایجاد خستگی سطحی، که عامل تولید ذرات درشت هستند، جلوگیری می‌نماید. تفاوت معنادار چهار برابری در غلظت ذرات درشت در روغن VG46 نسبت به روغن VG68، نشان می‌دهد که روغن VG46، در معرض ریسک بالای خرابی‌های ناگهانی و احتمال گرفتگی سریع فیلترها قرار دارد. این یافته‌ها با نتایج لی و همکاران همسو است که نشان می‌دهند افزایش گرانیوی با ارتقای پایداری فیلم هیدرودینامیک، نرخ تشکیل ذرات درشت ناشی از خستگی سطحی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد [۸].



شکل ۸ روند تغییرات غلظت ذرات آلاینده بزرگ‌تر از ۱۴ میکرون در روغن‌های VG46 و VG68 در طول ۱۰۰۰ ساعت کارکرد

درنهایت، بررسی تطبیقی داده‌های حاصل از شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) نشان می‌دهد که با وجود قرارگیری هر دو نوع روغن هیدرولیکی در مسیر پیری و آلودگی، روغن VG 68، به دلیل برخورداری از گرانیوی بالاتر و پایداری رئولوژیکی مطلوب‌تر، توانسته است نرخ تولید ذرات را در تمامی رده‌های ابعادی به شکل چشمگیری مهار نماید. در مقابل، روند افزایشی آلاینده‌ها در روغن VG46، که میزان ذرات ریز، متوسط و درشت آن به ترتیب حدود ۲ برابر، ۴/۲ برابر و ۴/۱۵ برابر بیشتر از روغن VG 68 است، بیانگر سایش فعال‌تر قطعات مکانیکی و ناتوانی این روغن در حفظ فیلم روانکار تحت شرایط کاری ماشین‌های برداشت نیشکر در خوزستان می‌باشد. این مشاهدات تجربی با جدیدترین یافته‌های پژوهشی در حوزه تریبولوژی همخوانی کامل دارد. در این مطالعات تصریح شده است که در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی با بارهای دینامیکی بالا و محیط‌های آلوده، ارتقای گرانیوی فقط یک کمیت برای تحمل فشار استاتیکی نیست، بلکه امری حیاتی برای کمینه‌سازی نرخ تولید ذرات ساینده و اکسیدی

محسوب می‌شود [۵ و ۶]. افزون بر این، نتایج تحقیق حاضر با دستورالعمل‌های منتشر شده توسط انجمن ملی سیالات قدرت که بر ضرورت تطبیق گرانشی با الگوی بار و دما جهت کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و بهینه‌سازی چرخه عمر تأکید دارد، مطابقت کامل دارد. این دستورالعمل توصیه می‌کند که استفاده از روغن‌های با گرانشی بالاتر، نظیر VG68، یک استراتژی پیش‌گیرانه کلیدی برای کنترل و مهار تولید آلاینده در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی تحت بار سنگین و محیط‌های کاری خشن است [۱].

یکی از چالش‌های اساسی در عملکرد سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی در ماشین‌های متحرک، مانند ماشین‌های برداشت نیشکر در شرایط اقلیمی گرم و غبارآلود خوزستان، تسریع فرآیند تخریب روغن و تجمع ذرات آلاینده است. برای ارزیابی کمی این فرآیند، تغییرات شاخص تمیزی روغن‌های VG 46 و VG 68 بر اساس استاندارد ISO 4406:2021 و عدد آلودگی بر اساس استاندارد NAS 1638، در طول ۱۰۰۰ ساعت کارکرد، مورد بررسی قرار گرفت [۲۱ و ۲۲]. نتایج حاصل از شمارش ذرات در جدول (۱) ارائه شده است. بررسی روند تغییرات شاخص تمیزی بر اساس استاندارد ISO 4406 و عدد آلودگی NAS 1638 که در جدول (۱) ارائه شده است، نشان می‌دهد که اگرچه هر دو روغن VG 68 و VG 46 در حالت اولیه دارای شاخص تمیزی قابل قبولی (۱۸/۱۶/۱۳) هستند، اما نرخ رشد آلودگی در آن‌ها تفاوت معناداری دارد. روغن هیدرولیکی VG46، پس از کارکرد ۱۰۰۰ ساعت در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی ماشین برداشت نیشکر، به شاخص آلودگی ۲۴/۲۴/۲۳ و عدد NAS بالاتر از ۱۲ رسید که نشان‌دهنده شیب تند افزایش آلودگی است. افزایش ۶ واحدی شاخص ذرات ۴ میکرونی، بیانگر ۶۴ برابر شدن تعداد ذرات ریز است. این پدیده ناشی از نازک شدن فیلم روانکاری در اثر گرمای خوزستان و تخریب سریع افزودنی‌های بهبوددهنده‌های شاخص گرانشی می‌باشد. در مقابل، روغن VG 68 با رسیدن به شاخص ۲۳/۲۲/۲۱ و عدد NAS ثابت روی ۱۲، پایداری بهتری از خود نشان داده است که این برتری را می‌توان به حفظ ضخامت فیلم روغن در برابر دما و ظرفیت بالاتر در حبس ذرات نسبت داد [۵]. همچنین، کنترل بهتر ذرات بزرگ‌تر از $14\mu m$ در روغن هیدرولیکی VG 68 (افزایش شاخص از ۱۴ به ۲۱ در مقابل ۱۳ به ۲۳ در روغن VG 46)، نشان می‌دهد که این روغن ورود سامانه‌ی انتقال توان هیدرولیکی به فاز فرسایش شدید را به تأخیر انداخته است. بر این اساس، با وجود آلودگی بالا در هر دو نمونه، روغن VG 68، با مهار سریع‌تر تجمع ذرات جامد، کارایی محافظتی برتری برای قطعات هیدرولیکی از خود نشان می‌دهد. این یافته‌ها همسو با نتیجه‌گیری باچفسکی و شچاپوینسکی که برتری پایش ذرات جامد را نسبت به گرانشی در سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی مدرن تأیید می‌کنند، است [۱۳].

جدول ۱ روند تغییرات شاخص تمیزی (ISO 4406) و عدد آلودگی (NAS 1638) در روغن‌های هیدرولیکی VG 68 و VG 46 در طول زمان کارکرد

زمان کارکرد روغن (ساعت)	شاخص ISO 4406 روغن VG46	شاخص NAS 1638 روغن VG46	شاخص ISO 4406 روغن VG68	شاخص NAS 1638 روغن VG68
۰	۱۸/۱۶/۱۳	۹	۱۸/۱۶/۱۳	۹
۱۰۰	۱۹/۱۹/۱۷	۹	۱۹/۱۹/۱۷	۹
۲۰۰	۱۹/۲۰/۱۸	۱۰	۱۹/۲۰/۱۸	۱۰
۳۰۰	۲۰/۲۱/۱۹	۱۰	۲۰/۲۰/۱۸	۱۰
۴۰۰	۲۱/۲۱/۱۹	۱۱	۲۱/۲۱/۱۹	۱۰
۵۰۰	۲۲/۲۲/۲۰	۱۱	۲۲/۲۲/۱۹	۱۱
۶۰۰	۲۲/۲۲/۲۱	۱۲	۲۲/۲۲/۱۹	۱۱
۷۰۰	۲۳/۲۳/۲۱	۱۲	۲۳/۲۲/۲۰	۱
۸۰۰	۲۳/۲۳/۲۲	>۱۲	۲۳/۲۲/۲۰	۱۲
۹۰۰	۲۳/۲۳/۲۲	>۱۲	۲۳/۲۲/۲۰	۱۲
۱۰۰۰	۲۴/۲۴/۲۳	>۱۲	۲۳/۲۲/۲۱	۱۲

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی مقایسه‌ای فرآیند پیری و روند تخریب روغن‌های هیدرولیکی VG46 و VG68، در شرایط عملیاتی ماشین‌های برداشت نیشکر، در اقلیم گرم و گردوغباری خوزستان، پرداخت. یافته‌های حاصل از ۱۰۰۰ ساعت بهره‌برداری پیوسته، شواهد محکمی مبنی بر برتری عملکردی روغن VG68، در برابر تنش‌های مکانیکی، حرارتی و آلاینده‌های محیطی ارائه می‌دهد.

تحلیل‌های رئولوژیکی حاکی از آن بود که هر دو روغن مورد مطالعه، تحت تأثیر شرایط عملیاتی دچار افت گرانروی شدند. لازم به ذکر است که شدت کاهش گرانروی در روغن VG46 (۲۳/۲ درصد)، به‌طور معناداری بیشتر از روغن VG68 (۱۲/۱ درصد) بود. این تفاوت آشکار بیانگر آن است که در روغن VG56، فرآیند تخریب برشی و شکست فیزیکی زنجیره‌های پلیمری موجود در بهبوددهنده‌های شاخص گرانروی، نقش غالب را در فرآیند پیری ایفا کرده و بر اکسیداسیون شیمیایی غلبه داشته است. همچنین، کاهش ۱۶ درصدی شاخص گرانروی در روغن VG46، در مقایسه با کاهش ۱۰ درصدی در روغن VG68، تأیید می‌کند که ساختار مولکولی روغن پایه سنگین‌تر، پایداری مکانیکی و مقاومت بهتری در برابر تنش‌های برشی شدید ناشی از کارکرد پمپ‌های هیدرواستاتیک فشار قوی از خود نشان می‌دهد. تحلیل‌های مربوط به روند تخریب شیمیایی نشان می‌دهد که نرخ اکسیداسیون در هر دو روغن هیدرولیکی قابل توجه بود. با این حال، روغن VG68، پایداری شیمیایی برتری و رفتاری یکنواخت‌تر از خود نشان داد. جهش ناگهانی در عدد اسیدی کل (TAN)، در بازه‌ی ۳۰۰ تا ۴۰۰ ساعت برای روغن VG46، بیانگر تخلیه‌ی زودهنگام ذخایر آنتی‌اکسیدانی و ورود سریع به فاز اکسیداسیون شتاب‌دار است. در مقابل، گرانروی بالاتر روغن VG68، به‌عنوان یک مانع فیزیکی (ممانعت مولکولی) عمل کرده و نفوذ رادیکال‌های آزاد را کند می‌کند که منجر به افزایش طول عمر مفید روغن می‌شود. در بخش پایش وضعیت آلودگی ذرات، تفاوت عملکردی دو روغن هیدرولیکی، به‌طور مشهودی نمایان گردید. روغن هیدرولیکی VG46، با سرعتی زیاد، به شاخص تمیزی بحرانی ۲۳/۲۴/۲۴ و عدد NAS فراتر از ۱۲، دست یافت. در حالی که روغن VG68، با کد ۲۳/۲۲/۱۲ و عدد NAS برابر با ۱۲، پایداری بهتری از خود نشان داد. افزایش نمایی تعداد ذرات ریز (بیش از ۴ میکرون) در روغن VG46، ناشی از نازک شدن فیلم روانکاری و تماس میکروسکوپی سطوح فلزی است. همچنین، تولید ذرات درشت (بیش از ۱۴ میکرون) در روغن VG46، نشان‌دهنده‌ی ورود سامانه به رژیم سایش حاد و خستگی سطحی قطعات است. داده‌ها نشان می‌دهند که پایداری رئولوژیک روغن VG68، با حفظ ضخامت فیلم روانکاری، از انتقال انرژی و تماس فلز-فلز جلوگیری کرده و نرخ تولید آلاینده‌ها را به شدت کاهش می‌دهد. این یافته‌ها همسو با مطالعات پیشین است که بر اهمیت گرانروی در مدیریت رژیم‌های روانکاری در ماشین‌های متحرک سنگین تأکید دارند. در نهایت، این مطالعه تأکید می‌ورزد که انتخاب روغن هیدرولیکی باید فراتر از مشخصات اولیه و بر اساس پایداری دینامیکی در شرایط عملیاتی سخت صورت پذیرد. روغن VG68، به دلیل مقاومت برتر در برابر تخریب برشی، پایداری اکسیداسیونی بالاتر و تولید آلاینده کمتر، گزینه‌ای بهینه، برای سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی، در شرایط سخت، محسوب می‌شود. به‌کارگیری این نوع روغن هیدرولیکی، احتمال خرابی‌های ناگهانی اجزای هیدرولیکی را کاهش می‌دهد. همچنین، با تأخیر در رسیدن به کدهای تمیزی بحرانی، هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و توقفات غیرمجاز عملیاتی را بهینه می‌سازد. پیشنهاد می‌شود در طراحی سامانه‌های انتقال توان هیدرولیکی ماشین‌های متحرک در اقلیم‌های گرم، اولویت با استفاده از روغن‌های با گرانروی بالاتر و شاخص پایداری برشی مناسب باشد. پژوهش‌های آتی می‌توانند بر توسعه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده عمر مفید روغن با تلفیق داده‌های تریبولوژیکی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین تمرکز کنند تا بتوان زمان بهینه تعویض روغن را با دقت بیشتری پیش‌بینی نمود.

Authorship Contribution Statement

Dr. Pezhman Nikandish



Biography: Assistant Professor at Department of Mechanical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Validation, analysis, Investigation, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

۵- مراجع

- [1] Zhao B, Wang L, Zhang W. Intelligent fault diagnosis of hydraulic systems using oil condition monitoring and deep learning algorithms. *Measurement*. 2024; 225: 114012.
- [2] Pradhan MK, Das D, Chattopadhyay S. Physicochemical and tribological characterization of used hydraulic oils from heavy earth moving machinery. *Advances in Tribology*. 2021; 2021: 1-10.
- [3] Li Y, Zhang L, Luo J. Influence of shear stability on the viscosity index of multi-grade hydraulic oils: A rheological analysis. *Lubricants*. 2023; 11(4): 140.
- [4] Singh R, Nair R, Kumar P. Wear debris analysis and contamination control strategies for off-highway hydraulic systems operating in dusty environments. *Industrial Lubricants and Tribology*. 2022; 74(9): 1205-1214.
- [5] Kumar P, Singh R, Patel M. Impact of silica dust ingestion on the tribological performance and viscosity characteristics of hydraulic fluids in agricultural machinery. *Journal of Cleaner Production*. 2023; 384: 135412.
- [6] Zhang H, Li W. Comparative analysis of shear stability and viscosity loss in multi-grade hydraulic lubricants for heavy machinery. *Lubricants*. 2024; 12(2): 45.
- [7] Gao Y, Zhao G, Zhang Q. Molecular degradation mechanism of viscosity index improvers in hydraulic oils under thermal and shear stress. *Tribology International*. 2023; 182: 108415.
- [8] Li J, Chen G, Wei H. Evolution of contamination particles and filtration efficiency evaluation in hydraulic servo systems. *Journal of Fluids Engineering*. 2023; 145(8): 081203.
- [9] Wang Y, Li X, Zhang J. Real-time monitoring of hydraulic oil degradation based on multi-sensor fusion and machine learning algorithms. *Tribology International*. 2021; 154: 106723.
- [10] Nair R, Tomanik E. The role of solid contamination size on the wear regime transition in hydraulic pumps: From mild to severe wear. *Wear*. 2023; 520-521: 203884.
- [11] Zhang W, Zhao B, Liu Z. Real-time monitoring of hydraulic oil contamination based on multi-sensor data fusion and particle size distribution analysis. *Tribology International*. 2024; 188: 109245.
- [12] Yang S, Xu Y, Wang X. Viscosity-temperature characteristics of hydraulic oil based on molecular dynamics simulation. *Lubricants*. 2023; 11(8): 335.
- [13] Baczewski K, Szczawiński P. Investigation of the process of ageing of hydraulic oil during its use. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*. 2016; 73(3): 5-18.
- [14] Ribeiro J, Santos M, Vieira R. Kinematic viscosity of bio-based hydraulic oils as a function of temperature and shear rate. *Energies*. 2021; 14(3): 757.
- [15] Khorasani M, Razmjoo A. Analysis of the relationship between the operational parameters of a marine diesel engine and its lube oil properties. *Lubricants*. 2022; 10(7): 168.
- [16] ISO 3170-1:2008. Hydraulic fluids – Mineral-oil based fluids – Part 1: General guidance for ISO viscosity grades and other types of hydraulic fluids. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 2008.
- [17] ISO 15377:2012. Hydraulic fluid power – Fluids for industrial applications – Evaluation of performance of hydraulic fluids in high-pressure vane pumps. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 2012.
- [18] ASTM D445. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity). West Conshohocken, PA: ASTM International; 2022.
- [19] ASTM D2270. Standard Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40 °C and 100°C. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2022.
- [20] ASTM D664. Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2023.
- [21] ISO 4406:2021. Hydraulic fluid power — Fluids — Method for coding the level of contamination by solid particles. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 2021.
- [22] National Aerospace Standards. NAS 1638: Contamination/Fluid cleanliness levels for aerospace hydraulic systems. Washington, DC: Aerospace Industries Association; 2001.