



## پایش وضعیت کیفیت روغن در موتور اشتعال جرقه‌ای بنزینی با استفاده از اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک روغن

اسماعیل قاسمی<sup>۱</sup>، سید وحیدحسینی<sup>۲\*</sup>، سیده کوثر یزدان پرست<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، [e\\_qasemi@shahroodut.ac.ir](mailto:e_qasemi@shahroodut.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، [v\\_hosseini@shahroodut.ac.ir](mailto:v_hosseini@shahroodut.ac.ir)

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، [kosar\\_yazdanparast@vu.iust.ac.ir](mailto:kosar_yazdanparast@vu.iust.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

### چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۶ بهمن ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۷ اسفند ۱۳۹۷

کلیدواژه‌ها:

پایش وضعیت

کیفیت روغن

حسگر خازنی

ضریب دی‌الکتریک

موتور بنزینی

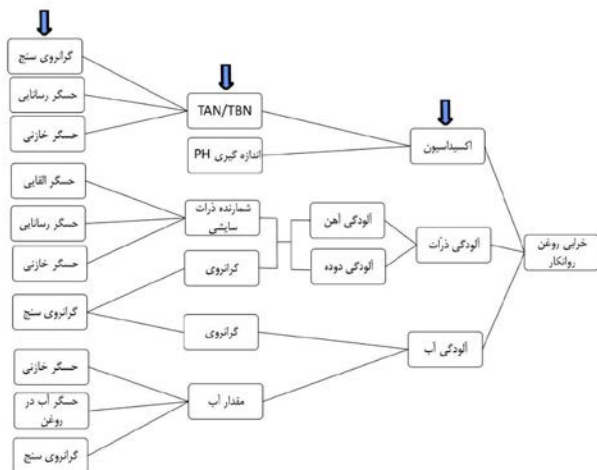
روغن در موتورهای احتراق داخلی وظایف متعددی را بر عهده دارد و پایش وضعیت آن قابلیت بالایی را برای تشخیص عیوب بوجود می‌آورد. امروزه تحلیل روغن ابزار مؤثری در بهینه‌سازی و نظارت بر سامانه‌های موتوری و روانکارها بشمار می‌آید. تحقیق حاضر به پایش وضعیت کیفیت روغن در یک موتور بنزینی با استفاده از اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک روغن می‌پردازد. در ابتدا حسگر خازنی با ساختار شانه‌ای با امکان عبور روغن از وسط آن بگونه‌ای طراحی و ساخته می‌شود که دارای قدرت تشخیص بالایی برای کاربرد موتوری باشد. بر اساس نتایج اختلاط آب با روغن تا ۱/۵٪، باعث افزایش خطی ضریب دی‌الکتریک روغن و زاویه  $\theta$  می‌شود. افزایش بیشتر درصد آب باعث افزایش غیرخطی ضریب دی‌الکتریک روغن خواهد شد. به منظور بررسی رفتار اکسایش روغن در شرایط واقعی و تحت کنترل، کیفیت روغن در آزمون دوام موتوری با استفاده از حسگر شانه‌ای و یک حسگر صنعتی دیگر پایش می‌شود. اکسایش روغن موتور بدلیل کارکرد موتور باعث افزایش ضریب دی‌الکتریک روغن می‌شود ولی زاویه  $\theta$  ثابت می‌ماند. نتایج حاکی از انطباق بسیار خوب عملکرد حسگر شانه‌ای ساخته شده با حسگر تجاری دارد. در نهایت عملکرد حسگر در برهم‌کنش دو عامل آب و اکسایش ارزیابی می‌شود. بر اساس نتایج در صورتیکه ضریب دی‌الکتریک روغن و زاویه  $\theta$  افزایش قابل توجهی داشته باشد، احتمال ورود آب به روغن وجود خواهد داشت و در صورت افزایش تنها ضریب دی‌الکتریک، کارکرد روغن و اکسایش باعث خرابی روغن شده است.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

## مقدمه

آن‌ها را نشان می‌دهد [۲]. به عنوان مثال، برای محتوای آب، درصد آلودگی آب در روغن را اندازه‌گیری می‌کنند. این پارامترهای عملکردی برای موتورهای احتراق داخلی، گیربکس، سامانه‌های هیدرولیک، توربین و کمپرسورها لازم و حیاتی هستند. محتوای آب می‌تواند توسط حسگر ظرفیت خازنی، حسگر گرانیوی و حسگر آب در روغن اندازه‌گیری شود.



شکل ۱: رابطه بین ویژگی اساسی خرابی روغن با پارامترهای عملکردی و حسگرهای پایش وضعیت

جدول ۱: متغیرهای عملکردی، برنامه‌ها و معیار برای خرابی روغن‌ها [۲]

پارامتر عملکردی	معمکرد اندازه گیری	واحد	معیار خرابی	کاربردها				روش‌های اندازه‌گیری موجود	
				چرخ خرابی	سیستم‌های هیدرولیک	موتور	کمپرسور		توربین
گرانیوی (۴۰-۴۵)	آلودگی روانکار توسط روغن های دیگر	Cst (mm2/s)	≥۵۵ ≤۵۰	بله	بله	بله	بله	بله	گرانیوی مرکزی، گرانیوی میکرو سونی
گرانیوی (۱۰۰-۴۵)	اکسیداسیون	%	≤۲	بله	بله	بله	بله	بله	حسگر خازنی، گرانیوی مرکزی، حسگر آب در روغن
TAN/TBN	عدد اسیدی یا بازی، روانکار	mgKOH/gm	≥۰.۶ ≤۰.۵	بله	بله	بله	بله	بله	گرانیوی مرکزی، حسگر رسانایی
	حضور معلق یا گاز در روغن کثیف	%	≥۲۰ ≤۱۴۰	نه	بله	بله	بله	نه	دماسنج
	ذرات ساینده در میلیون	ppm	≤۴۰	بله	بله	بله	بله	بله	حسگر خازنی، گرانیوی مرکزی، حسگر القایی
	شمارش ذرات برای اندازه نمونه ۱۰۰ cc	mg/L	≤۲۰۰	نه	بله	بله	نه	نه	حسگر رسانایی، حسگر القایی

تحقیقات متعددی به بررسی ساخت حسگرهای ویژه‌ای برای اندازه‌گیری کیفیت روغن به منظور نظارت بر خرابی روغن پرداخته‌اند. در سال ۲۰۰۵ اسمیتینگال و مویر در تحقیق خود بر روی موتور دیزل نشان دادند که حسگر ظرفیت الکتریکی قادر به تشخیص اکسایش روغن، آلودگی آب و تشخیص آلودگی ذرات است [۳]. رادنوبی و کیسوا از یک حسگر شبکه خازنی برای اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک در یک روغن با آلودگی مصنوعی استفاده کرده‌اند [۴]. ترنر و آستین ثابت دی‌الکتریک و حساسیت مغناطیسی روغن را اندازه‌گیری کرده و سپس آن

در سامانه‌های مکانیکی که در آن‌ها از روغن به عنوان روانکار استفاده می‌شود، پایش وضعیت روغن قابلیت بالایی را در تشخیص عیوب مکانیکی دارد و به عنوان ابزاری مؤثر، امکان بهینه‌سازی سامانه‌ها و نظارت‌های مختلف، نظیر بررسی کیفیت قطعات و سازوکارها، روند استهلاک تجهیز و روانکار و چگونگی انجام تعمیرات را فراهم می‌سازد. تحلیل روغن یکی از روش‌های اصلی مراقبت از وضعیت موتورهای احتراق داخلی به شمار می‌رود. اطلاعات به‌دست‌آمده از تحلیل روغن منجر به کاهش آسیب‌ها و خسارت‌های وارده به موتور، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری می‌شود. از اهداف اجرای وضعیت روغن در موتورهای احتراق داخلی می‌توان نظارت بر کیفیت روغن، آلودگی روغن و ارزیابی ذرات سایشی در موتورهای احتراق داخلی را نام برد.

بر اساس استانداردهای موجود، سه دسته‌بندی از آنالیز روغن وجود دارد. دسته اول تجزیه و تحلیل، در خارج از محل می‌باشد. روغن نمونه‌برداری شده و برای تجزیه و تحلیل، پیشنهاد نگهداری و تعمیرات مناسب به آزمایشگاه فرستاده می‌شود. فرآیند تجزیه و تحلیل نمونه روغن از چند هفته تا یک ماه تأخیر دارد که این بازه زمانی امکان مراقبت صحیح را دچار مشکل می‌کند. دسته دوم تجزیه و تحلیل روغن با کیت‌های قابل حمل است. در این روش مهندسان می‌بایست هر بار از موتور نمونه روغن بگیرند. نمونه روغن را در کیت قرار داده و در محل به‌صورت آنی اکتساب داده کنند. کارکرد این کیتها محدود و مقطعی است. دسته سوم پایش روغن به‌صورت برخط است که در سالیان اخیر بسیار مورد علاقه محققان بوده است. اطلاعات وضعیت سلامت روغن از طریق حسگرها در سامانه گردش روغن جمع‌آوری شده و توسط الگوریتم توسعه یافته تجزیه و تحلیل می‌شود و پیشنهاد نگهداری و تعمیرات مناسب در همان لحظه صادر می‌شود. هدف از پایش وضعیت روغن به‌صورت برخط تشخیص زود هنگام خرابی اجزای موتور و یا روغن، قبل از رسیدن به حالت بحرانی و کنترل وضعیت ماشین به‌صورت دائمی می‌باشد [۱].

پارامترهایی که عملکرد روغن و یا سطح خرابی آن را توصیف می‌کند پارامترهای عملکردی نامیده می‌شود. این پارامترها عبارتند از گرانیوی، آلایندگی آب، عدد اسیدی کل<sup>۱</sup>، عدد بازی کل<sup>۲</sup>، شمارش ذرات، مقدار PH و غیره. هر پارامتر عملکردی را می‌توان با برخی تکنیک‌های سنجش، اندازه‌گیری کرد.

عوامل اساسی خرابی روغن اکسایش، آلودگی ذرات و آلودگی آب هستند. رابطه بین این عوامل و پارامترهای عملکردی و حسگرهای وضعیت روغن موجود که شامل گرانیوی سنج، حسگر رسانایی، حسگر خازنی، حسگر القایی و حسگر آب در روغن می‌شوند در شکل (۱) نشان داده شده است [۲].

جدول (۱) پارامترهای عملکردی برای انواع مختلف برنامه‌ها و معیارهای آن‌ها برای خرابی روغن و استفاده از قوای محرکه و متعلقات

<sup>2</sup> Total Base Number

<sup>1</sup> Total Acid Number

شناخته شده اندازه‌گیری کردند [۱۸]. پریکسات و همکاران دستگاهی به منظور اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک و هدایت مواد مختلف بر پایه اندازه‌گیری فاز و دامنه ولتاژ ارائه دادند [۱۹]. هاشمی و فرهودینا مسیرهای شانه‌ای بر روی برد مدار چاپ کردند که روغن در بین آنها قرار گیرد. این حسگر روی مخزن روغن قرار می‌گیرد و از دقت و عملکرد این حسگر اطلاعاتی منتشر نشده است [۲۰].

اگرچه تحقیقات قابل ملاحظه‌ای در سالیان اخیر در زمینه حسگرهای برخط پایش وضعیت روغن انجام گرفته است ولی کماکان جنبه‌های مختلف عملکرد این نوع حسگرها نیاز به مطالعه دارد. عموماً این نوع حسگرها می‌بایست در شرایط کارکرد واقعی موتور قرار بگیرند تا بتوان عملکرد این حسگرها را ارزیابی کرد. ژو روش‌های خازنی و رسانایی پایش وضعیت روغن را از لحاظ روش کارکرد، حسگرهای موجود، قابلیت برخط بودن، قابلیت پیش‌بینی خرابی روغن و نوع خرابی‌ها، حساسیت حسگر، پیچیدگی پردازش داده‌ها و هزینه‌های آن را مقایسه کرده است [۱]. به نظر می‌رسد روش‌های خازنی و اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک در مجموع عملکرد بهتری در شناسایی کیفیت روغن دارند. در این راستا این تحقیق هم به مطالعه اثر کیفیت روغن با استفاده از حسگرهای خازنی در موتورهای احتراق داخلی بنزینی می‌پردازد.

### اصول کارکرد حسگر

در حسگرهای خازنی، روغن به عنوان دی‌الکتریک در بین تیغه‌های خازن قرار می‌گیرد. اساس کار تغییر ضریب دی‌الکتریک روغن با تغییر کیفیت روغن روانکار می‌باشد. برای محاسبه ضریب دی‌الکتریک روغن در خازن با صفحات موازی از رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$C = (K \epsilon_0 A) / d \quad (1)$$

$$K = C / C_0 \quad (2)$$

که در این روابط  $\epsilon_0$  ضریب گذردهی الکتریک خلا،  $K$  ضریب دی‌الکتریک روغن (رابطه (۲))،  $A$  مساحت صفحه خازن بر حسب  $(m^2)$ ،  $d$  فاصله بین دو صفحه خازن بر حسب  $(m)$ ،  $C$  ظرفیت خازنی یک خازن که بین صفحات آن ماده دی‌الکتریک قرار گرفته (بر حسب فاراد  $F$ ) و  $C_0$  ظرفیت خازنی یک خازن در خلا (بدون ماده دی‌الکتریک) است. ضریب دی‌الکتریک روغن بسته به فرمول شیمیایی آن بین ۲ الی ۳ متغیر است. با توجه به مراجع مقدار  $\epsilon_0$  ثابت و برابر  $8.854187817 \times 10^{-12} (PF/m)$  می‌باشد [۲۱]. ضریب دی‌الکتریک هوا  $1.00059$ ، کاغذ  $3/7$ ، آب  $80$  می‌باشد [۲۲].

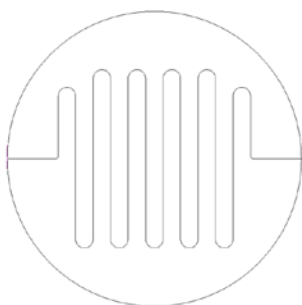
گذردهی مختلط یک خازن شامل دو بخش حقیقی و موهومی می‌باشد. بسته به هندسه الکتروود، گذردهی مختلط به طور مستقیم به امپدانس مختلط مربوط است. خازن در میدان الکتریکی متناوب، در برابر عبور جریان از خود مقاومتی نشان می‌دهد که بستگی به بسامد میدان الکتریکی دارد. هر اندازه‌گیری از امپدانس مختلط الکتروود شاخصی برای سنجش خرابی روغن است. با توجه به شکل (۲)

را به گرانشی روغن مرتبط کرده‌اند [۵]. علاوه بر این چو و پارک یک سامانه ساختند که ارسال بی‌سیم اطلاعات ظرفیت خازن روغن و انرژی بین حسگر و دریافت کننده برای ماشین که توسط حسگر ظرفیت IDT اندازه‌گیری می‌شد را انتقال می‌داد [۶]. گوان و همکاران حسگر ثابت دی‌الکتریک را با یک روش تحلیلی به نام طیف سنجی دی‌الکتریک برای اندازه‌گیری میزان اکسایش روغن ترکیب کردند [۷].

مکدونالد نشان داد که اندازه‌گیری از امپدانس الکتروود در روغن می‌تواند بعنوان شاخصی برای سنجش خرابی روغن باشد. در شیمی تحلیلی امپدانس الکتروود تابعی از بسامد است که معمولاً به عنوان روش اندازه‌گیری طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی معرفی می‌شود [۸]. بینگتون و همکاران نشان دادند که حسگر امپدانس الکتروشیمیایی برای تشخیص مواد شیمیایی و تغییر خواص روغن از جمله عدد اسیدی کل، عدد بازی کل، محتوای دوده، گرانشی و درجه نیتراسیون کاربرد دارد [۹، ۱۰]. حسگر تجاری EIS، نمونه‌ای از این روش است که توسط شرکت Poseidon System توسعه یافته است. آنها روشی به نام "طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی با باند پهن" را توسعه دادند و با استفاده از سیگنال ولتاژ به مایع در یک الکتروود و دریافت توسط الکتروود دیگر، امپدانس در بسامدهای مختلف اندازه‌گیری کردند [۱۱]. کلیستر حسگری برای اندازه‌گیری کیفیت روغن بر اساس گذردهی (ضریب دی‌الکتریک) روغن شامل یک حسگر خازنی برای قرار گرفتن در معرض روغن و مدار نوسان‌ساز اسپلاتوری طراحی کرد که دامنه خروجی آن وابسته به نسبت بخش حقیقی به بخش موهومی گذردهی روغن ( $\tan \delta$ ) است، تغییر می‌کرد [۱۲]. هاپکینز و همکاران تجهیزاتی ساختند که در آن از مدار پل برای اندازه‌گیری امپدانس AC استفاده می‌شود و با استفاده از یک خازن روغنی، تغییرات دی‌الکتریک در اثر خرابی روغن تغییر می‌کرد [۱۳]. ایشان در ثبت اختراعی دیگر پایش وضعیت سیالات را با استفاده از مدار پل یکسان و امکانات محاسباتی ارائه کردند [۱۴]. میتزلر و همکاران یک حسگر خازنی با صفحات موازی را جهت نصب بین بدنه موتور و صافی را به نحوی طراحی کردند که تغییرات ظرفیت خازن باعث تغییر در بسامد نوسان‌ساز مرتبط شود [۱۵]. اسمیتز و همکاران از حسگر خازنی هم مرکز در امتداد محور خود برای ترکیبی از سوخت و الکترول استفاده کردند. اندازه‌گیری ظرفیت حسگر وسیله‌ای فراهم می‌کند که با توجه به آن مقدار الکترول در سوخت را مشخص شود. همچنین این خازن اطلاعات مقایسه‌ای در مورد محتوای آب در روغن می‌دهد [۱۶]. کُکس روشی برای اندازه‌گیری میزان آب شور و برش آن ارائه داد که کیفیت روغن را توسط اندازه‌گیری دما، مقاومت و ثابت دی‌الکتریک ارزیابی می‌کرد. هیچ جزئیاتی در مورد عملکرد مکانیکی این حسگر ارائه نشده است [۱۷]. سا و همکاران حسگر برخط شناسایی رطوبت در روغنی ارائه کردند که شامل سه سیلندر خازنی هم مرکز است به نحوی که روغن از وسط آن عبور کند. سپس تغییرات ظرفیت خازنی و ضریب دی‌الکتریک را با استفاده از روش‌های

خازنی در حساسیت حسگر تاثیرگذار است. بنابراین در این پژوهش طرحی از خازن با مساحت بزرگ و فاصله کم بین دو صفحه برای افزایش ظرفیت خازن داده شده است. پس از بررسی و آزمون چند طرح اولیه، طرح هندسی جدیدی از حسگر خازنی که در شکل (۴) نشان داده شده، طراحی و ساخته شده است.

حسگر از دو قسمت جدا از هم ساخته شده که فاصله بین دو صفحه 0.4mm است. در ساخت حسگر از ALUMINUM7072 استفاده شده است. در حسگر مورد نظر پس از اندازه‌گیری ظرفیت خازنی، با مشخص بودن پارامترهای  $d$  و  $A$  مقدار ضریب دی‌الکتریک روغن بدست می‌آید.



شکل ۴: سطح مقطع هسته مرکزی حسگر خازنی

### روش آزمون

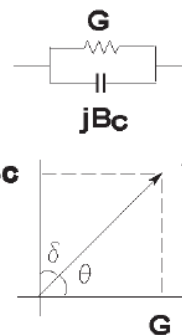
در حسگر کیفیت روغن ساخته شده، روغن از بین هسته مرکزی عبور می‌کند. آلودگی روغن با آب، دوده، ذرات آهنی یا غیر آهنی و اکسایش روغن بر ضریب گذردهی آن اثر می‌گذارد و باعث تغییر آن می‌شود. در نتیجه اندازه‌گیری ظرفیت خازنی و سپس محاسبه مقدار ضریب دی‌الکتریک روغن امکان پایش وضعیت کیفیت روغن را فراهم می‌کند. حسگر خازنی به‌گونه‌ای طراحی شده که ظرفیت الکتریکی بالایی داشته باشد تا ضریب دی‌الکتریک روغن توسط تجهیزات اندازه‌گیری قابل سنجش با دقت بالا باشد. اندازه‌گیری ظرفیت خازن با دستگاه RCL METER MASTECH 5308 مطابق شکل (۵) انجام شده است.



شکل ۵: تزریق روغن به حسگر خازنی و خوانش ظرفیت خازن توسط RCL METER

روغن از طریق لوازم هیدرولیک از میان این خازن عبور کرده و ظرفیت خازنی به صورت برخط از طریق RCL Meter به رایانه منتقل شده و

تانژانت زاویه  $\theta$  نسبت بین بخش موهومی و بخش حقیقی گذردهی خازن است و با معادله (۳) تعریف می‌شود.



شکل ۲: زاویه  $\theta$  نسبت بین بخش موهومی و بخش حقیقی گذردهی

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{B_c}{G} \right) \quad (3)$$

در معادله (۳) رسانایی الکتریکی ( $G$ ) بخش حقیقی گذردهی بر حسب زیمنس است (محور افقی نمودار) و پذیرندگی ( $B_c$ ) بخش موهومی گذردهی بر حسب زیمنس می‌باشد (محور عمودی نمودار) [23]. رسانایی الکتریکی با معادله (۴) بدست می‌آید، در این معادله  $R$  مقاومت الکتریکی بر حسب اهم است. پذیرندگی با معادله (۵) بدست می‌آید. در این معادله  $\omega$  بسامد زاویه‌ای بر حسب رادیان بر ثانیه و  $C$  ظرفیت خازنی بر حسب فاراد ( $F$ ) است.

$$G = \frac{1}{R} \quad (4)$$

$$B_c = \omega C \quad (5)$$

و در نتیجه می‌توان زاویه  $\theta$  را با رابطه (۶) بدست آورد.

$$\theta = \tan^{-1}(\omega CR) \quad (6)$$

آلودگی‌ها و خرابی‌های روغن روی بخش حقیقی گذردهی یا بخش موهومی آن یا هر دو قسمت آن تاثیر می‌گذارد. بنابراین علاوه بر ظرفیت خازنی، مقدار تغییرات  $\theta$  هم می‌تواند مشخصه‌ای برای پایش کیفیت روغن باشد. در نتیجه با اندازه‌گیری ظرفیت خازن و زاویه  $\theta$  می‌توان میزان خرابی روغن موتور را پایش کرد. شکل (۳) طرح شماتیک عملکرد حسگر پایش کیفیت روغن را نشان می‌دهد.



شکل ۳: طرح شماتیک آزمایش حسگر کیفیت روغن خازنی

علت استفاده از ضریب دی‌الکتریک به جای ظرفیت خازنی حذف اثر اندازه خازن و فاصله بین دو صفحه خازن است. مقدار بزرگی ظرفیت

آزمون، موتور با استفاده از دینامومتر ادی کارنت تحت بارگذاری مشخصی قرار گرفت و روغن موتور در شرایط دمایی و فشاری خاص در موتور جریان یافت. بر اساس دستورات سازنده، ساعت کارکرد قابل قبول روغن ۲۰۰ ساعت می‌باشد و پس از آن، روغن می‌بایست به همراه صافی تعویض گردد.



شکل ۶: نمایی از آزمون دوام موتور TU5 در اتاق آزمون دینامومتری

برای مقایسه و بررسی صحت عملکرد حسگر از یک حسگر کیفیت روغن دیگر با نام تجاری TAN DELTA استفاده شده است [۲۵]. این حسگر با استفاده از ارتباط اکسایش روغن و تغییر خاصیت دی‌الکتریک، نظارت بر خط بر کیفیت روغن را ارائه می‌دهد. بر اساس ادعای سازنده این حسگر قادر به شناسایی برخط آلودگی آب و اکسایش می‌باشد. خروجی حسگر به صورت ضریب عمر (LF) معرفی می‌شود، بصورتی که برای روغن نو LF=0% و برای روغن کامل تخریب شده LF=100% است. شکل (۷) تصویری از این حسگر را نشان می‌دهد.



شکل ۷: حسگر کیفیت روغن شرکت TAN DELTA [۲۵]

### بحث روی نتایج

ورود آب به روغن یکی از انواع خرابیها در موتور احتراق داخلی به حساب می‌آید که بدلیل وجود نشستی به داخل موتور اتفاق می‌افتد و متعاقباً باعث خرابی روغن و افزایش شدید نرخ خرابی قطعات در موتور می‌شود. در آزمون اول، پس از اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک روغن نو، بررسی اثر آلاینده‌گی آب در روغن در دمای محیط مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۸ تغییرات ضریب دی‌الکتریک روغن و زاویه  $\theta$  را بر حسب درصد آلاینده‌گی آب در روغن نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۸، ضریب دی‌الکتریک روغن نو مورد استفاده برابر با ۲/۲ اندازه‌گیری شده است. از آنجایی که ضریب دی‌الکتریک آب در محدوده ۸۰ می‌باشد،

اطلاعات تجزیه و تحلیل می‌شوند. آزمایشات در بسامد 100kHz انجام شده است. برای انجام آزمایشات موتوری و بررسی عملکرد حسگر از روغن موتور بهران سوپر پیشتاز 10w40 استفاده شده است. مشخصات این روغن بر اساس اطلاعات سازنده در جدول (۲) ارائه شده است. در این تحقیق برای بررسی رفتار واقعی روغن اکسیدشده در موتورهای درونسوز، از موتور TU5 که یکی از موتورهای پر کاربرد در صنعت حمل و نقل خودروبی است، استفاده شده است. جدول (۳) مشخصات این موتور را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مشخصات روغن استفاده شده در موتور TU5 در آزمون

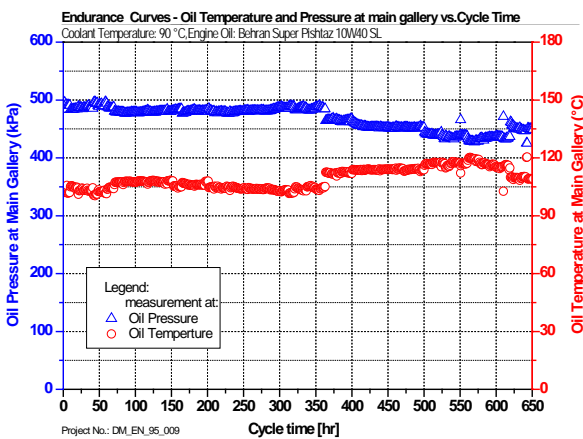
مشخصات فیزیکی و شیمیایی	واحد	روش آزمون	بهران سوپر پیشتاز 10w40
گرانروی در 100 °C	cSt	D-445	15.5
شاخص گرانروی	-	D-2270	160
حداقل نقطه اشتعال	°C	D-92	224
حداکثر نقطه ریزش	°C	D-97	-33
دانسیته در 15 °C	Kg/m <sup>3</sup>	D-1298	869
قلیائیت کل	mgKOH/g	D-2896	7.5

جدول ۳: مشخصات موتور TU5 در حین آزمون

متغیر	واحد	مقدار
نوع موتور	-	چهار زمانه تنفس طبیعی
نوع سوخت	-	بنزین
تعداد سیلندر	-	4
نوع آرایش موتور	-	خطی
قطر استوانه	mm	82
کورس پیستون	mm	78.5
حجم موتور	cm <sup>3</sup>	1600
نسبت تراکم	-	10.8
توان حداکثر	kW	75 @ 5600 rpm
گشتاور حداکثر	Nm	140.4 @ 3800 rpm
نوع روغن مصرفی	-	SAE 10W40-API SL
حجم روغن موتور	Lit	4
نوع مدار روانکاری	-	پمپ روغن چرخنده خارجی با اتصال غیر مستقیم بدون خنک‌کن روغن دارای افشانه خنک‌کاری پیستون

به منظور بررسی رفتار واقعی و تکرارپذیری روغن موتور، آزمون دوام در اتاق آزمون موتوری انجام گرفته است. شکل (۶) نمایی از شرایط کارکرد موتور TU5 در آزمون دوام نوسانات تسمه که مطابق با استاندارد شرکت خودروسازی پژو انجام شده است [۲۴]، را نشان می‌دهد. در این اتاق

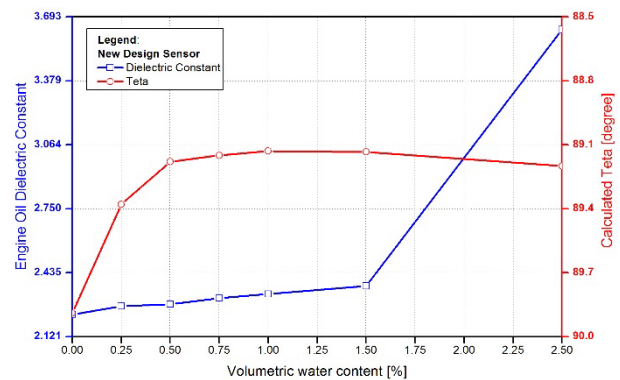
دوام دچار افت توان قابل توجهی نشده است که نشان دهنده حفظ سلامت موتور در حین آزمون دوام است. تاریخچه دما و فشار روغن موتور در آزمون دوام موتوری در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در این آزمون سعی شده که دمای روغن در محدوده ۱۰۵ تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد قرار گیرد تا شرایط اکسایش در روغن به وجود آید. در طول آزمون، فشار روغن تقریباً ثابت و در محدوده ۴۷۰ کیلوپاسکال قرار داشته است. در انتهای آزمون دلیل افزایش نسبی دمای روغن، فشار روغن هم به میزان اندکی افت کرده است. علاوه بر موارد ذکر شده، در آزمون دوام رفتار دبی گازهای ناشی از احتراق و فشار محفظه احتراق مورد بررسی قرار گرفت و در محدوده نسبتاً ثابتی قرار داشت که همه این موارد نشان دهنده حفظ سلامت نسبی موتور و رفتار سایشی قطعات در شرایط کارکرد آزمون دوام دارد.



شکل ۱۰: تاریخچه دما و فشار روغن موتور در آزمون دوام

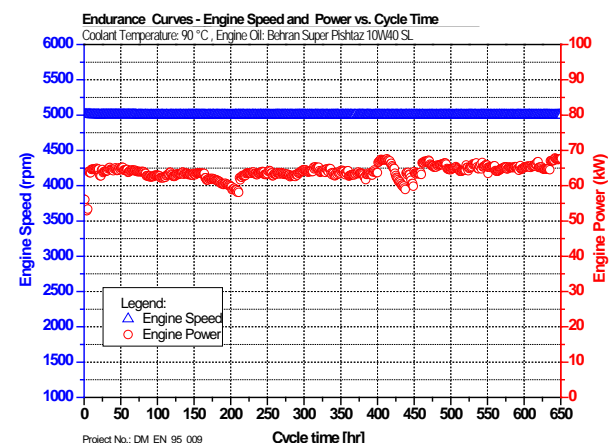
شکل (۱۱) تغییرات ضریب دی‌الکتریک روغن موتور که توسط حسگر جدید بدست آمده است را بر حسب ساعت آزمون دوام بر روی موتور TU5 نشان می‌دهد. همچنین جهت مقایسه عملکرد حسگر طراحی شده، ضریب عمر حسگر کیفیت روغن TAN DELTA برای همین روغن در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در حین آزمون دوام، نمونه های روغن هر ۵۰ ساعت برداشته شده است و روغن موتور و صافی آن بعد از ۲۰۰ ساعت کارکرد تعویض شده است. در نتیجه در طول آزمون، چهار بار روغن موتور در ساعات شروع آزمون، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ تعویض شده است. بر اساس نتایج، ضریب دی‌الکتریک روغن در طول زمان رفتار تناوبی به نحوی داشته است که با افزایش ساعت کارکرد روغن در بازه مشخصی افزایش یافته و سپس با تعویض روغن مجدداً کاهش پیدا کرده است. در طول آزمون دوام، سطح آب در مخزن مبدل حرارتی موتور مورد پایش قرار گرفت و در طول آزمون سطح آب موتور هیچ تغییری نکرد. در نتیجه نشی آب به محفظه موتور وجود نداشته است و در واقع روغن دچار اکسایش در شرایط کارکرد واقعی شده است. نتایج ضریب عمر حسگر TAN DELTA هم رفتار مشابهی شبیه به حسگر خازنی ساخته شده دارد و نتایج حسگر

در نتیجه افزایش مقدار آب باعث افزایش ضریب دی‌الکتریک روغن شده است. این افزایش تا اختلاط ۱/۵٪ نسبت حجمی آب خطی تغییر کرده است. افزایش این میزان آب باعث افزایش ۴/۵٪ ضریب دی‌الکتریک روغن شده است. سپس با افزایش بیشتر درصد آب رفتار ضریب دی‌الکتریک بصورت غیرخطی فزاینده شده است. علاوه بر این به محض ورود آب به روغن تا ۰/۵٪ نسبت حجمی، زاویه  $\theta$  بیش از ۰/۷ درجه کاهش داشته است و سپس با افزایش درصد نسبی حجم آب تغییرات آن کم شده است. لازم بذکر است اگر حجم روغن یک موتور احتراق داخلی بنزینی ۴ لیتر در نظر گرفته شود، حسگر موجود امکان تشخیص کمتر از ۱۰ CC ورود آب به روغن موتور را خواهد داشت.



شکل ۸: تغییرات ضریب دی‌الکتریک و زاویه  $\theta$  روغن بر حسب درصد آلاینده‌گی به آب

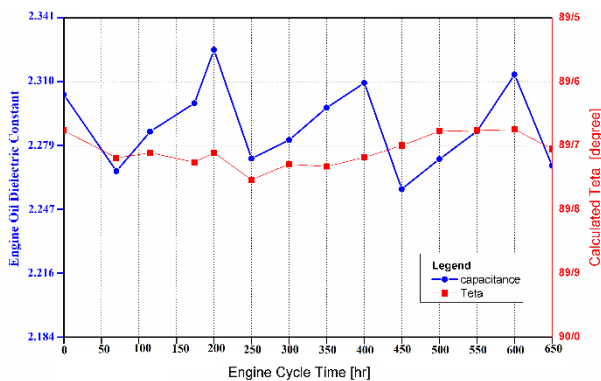
جهت بررسی عملکرد حسگر موجود در شرایط واقعی کارکرد، پایش رفتار ضریب دی‌الکتریک و زاویه  $\theta$  روغن بعنوان پارامتر کیفیت روغن در حین آزمون دوام موتور TU5 مورد مطالعه قرار گرفت. شکل (۹) توان کارکرد موتور TU5 را در کارکرد آزمون دوام نشان می‌دهد.



شکل ۹: پایش توان کارکرد موتور TU5 در ساعات مختلف آزمون دوام در دور موتور ۵۰۰۰ د.د.د با روغن موتور

موتور مذکور بصورت متوسط ۶۵ کیلووات در دور ۵۰۰۰ د.د.د در حالت دریچه ۱۰۰٪ توان خالص داشته است. همچنین در ۶۵۰ ساعت آزمون

تغییرات زاویه  $\theta$  و ضریب دی‌الکتریک روغن در شکل (۱۳) نشان داده شده است. بر اساس شکل (۱۳) علی‌رغم تغییرات ضریب دی‌الکتریک روغن در حین ساعت آزمون، رفتار زاویه  $\theta$  نسبتاً ثابت و تغییرات آن کمتر از ۰/۰۵ درجه گزارش شده است. لذا در موتور TU5 رفتار کارکرد روغن همراه با اکسایش تنها بر ضریب دی‌الکتریک روغن می‌تواند اثر بگذارد. لذا انتخاب ظرفیت خازنی به عنوان مهمترین مشخصه حسگر می‌تواند خروجی‌های دقیق‌تری را به کاربر در زمینه خرابی روغن اعلام نماید. جهت بررسی اندرکنش فرایند کارکرد واقعی روغن و اختلاط آب، ۶ نمونه مختلف روغن با ساعت کارکرد مشخص در موتور و درصد مشخص آب برای آزمایش این پارامترها بر روی خروجی حسگر، تهیه شده است. مشخصات این نمونه‌ها در جدول شماره (۴) بیان شده است.



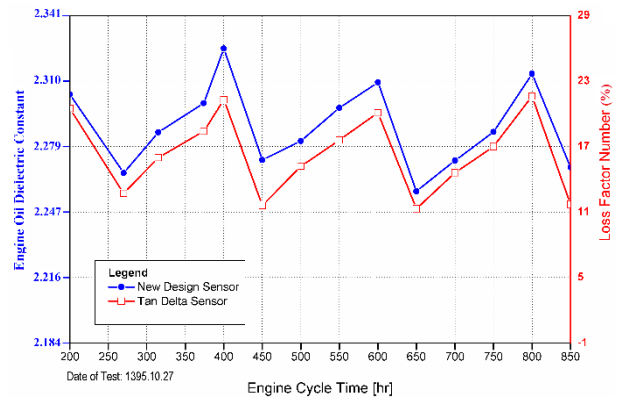
شکل ۱۳: تغییرات ضریب دی‌الکتریک روغن و زاویه  $\theta$  در طول کارکرد موتور TU5 در آزمون دوام

جدول ۴: نمونه‌های مختلف روغن با ساعت کارکرد و درصد مشخص آب برای آزمایش

نمونه روغن	ساعت کارکرد روغن	ساعت کارکرد موتور	نسبت حجمی اختلاط آب
۱	۵۰	۲۵۰	۰
۲	۵۰	۴۵۰	۰
۳	۱۰۰	۵۰۲	۰
۴	۵۰	۲۵۰	۵٪
۵	۵۰	۴۵۰	۵٪
۶	۱۰۰	۵۰۲	۵٪

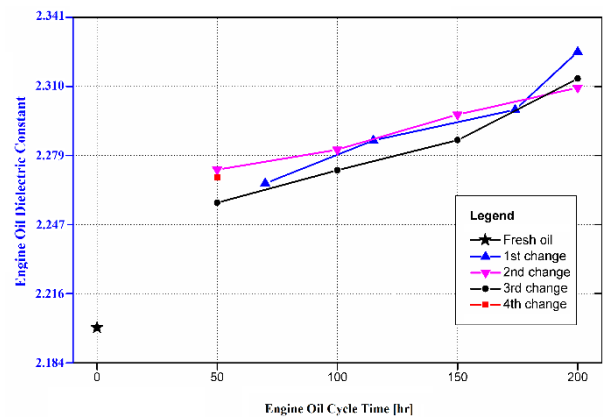
شکل (۱۴) نیز ضریب دی‌الکتریک روغن را بر حسب ساعت کارکرد روغن نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۱۴) افزایش ضریب دی‌الکتریک روغن در صورت خرابی روغن اتفاق خواهد افتاد و برهم‌کنش این دو عامل باعث خطا در تشخیص خرابی روغن نمی‌شود. بنابراین حسگر قادر به تشخیص خرابی روغن است اما تشخیص اینکه خرابی دقیقاً بر اثر کدام عامل بوده است نیاز به ترکیب این حسگر با حسگرهای دیگر شناسایی پارامترهای عملکردی دارد. ولی وجود همین یک حسگر

ساخته شده انطباق بسیار خوبی با این حسگر TAN DELTA دارد. بر اساس نتایج حسگر TAN DELTA با هر بار تعویض روغن رفتار نسبتاً تکرار پذیر را نشان می‌دهد در حالی که در حسگر ساخته شده، پرش‌هایی در نقاط متناظر از جمله در ساعات ۵۰، ۲۵۰، ۴۵۰ و ۶۵۰ اتفاق می‌افتد. دلیل این تغییرات باز و بست حسگر ساخته شده در این ساعات است که می‌تواند بر ظرفیت خازنی و محاسبه ضریب دی‌الکتریک روغن اثرگذار باشد. این موضوع لزوم تهیه پوشش و همبندی حسگر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: مقایسه ضریب دی‌الکتریک روغن حسگر ساخته شده با ضریب عمر حسگر TAN DELTA بر حسب ساعت کارکرد موتور

شکل (۱۲) ضریب دی‌الکتریک روغن بر حسب ساعت کارکرد روغن در هر مرحله تعویض روغن را نشان می‌دهد. این شکل بیانگر محدوده مشخص تغییر ظرفیت خازنی در هر مرحله تعویض است به طوری که خروج از این محدوده می‌تواند بیانگر خرابی غیرمتعارف روغن باشد. بر این اساس، در موتور مذکور با درجه حرارت مشخص روغن و محدوده توان مشخص، ضریب دی‌الکتریک روغن حدود ۰/۱۱ واحد افزایش خواهد داشت. این در حالی است که قدرت تفکیک پذیری حسگر ساخته شده در محدوده ۰/۰۰۲ واحد قرار دارد و بخوبی می‌تواند رفتار خرابی کیفیت روغن را پایش کند.



شکل ۱۲: تغییرات ضریب دی‌الکتریک روغن موتور بر حسب ساعت کارکرد روغن در آزمون دوام

[3] Schmitgal, J., and Moyer, S., "Evaluation of sensors for on-board diesel oil condition monitoring of U.S. Army ground equipment", TACOM/TARDEC, Report No. 14113, 2005.

[4] Raadnui, S., and Kieesuwan, S., "low-cost condition monitoring sensor for used oil analysis", Wear, Vol. 14, pp. 1794-1800, 2003.

[5] Turner, J.D., and Austin, L., "Electrical techniques for monitoring the condition of lubrication oil", measurement science and technology, Vol, pp. 1794-1800, 2003.

[6] Cho, J. and Park, S., "capacitive sensor for automotive engine oil degradation using wireless network," International Symposium on Advanced Packaging Materials: Microtech, APM '10, pp. 88-91, 2010.

[7] Guan, L., Feng, X., et al., "application of dielectric spectroscopy for engine lubrication oil degradation monitoring", sensors and actuators A: physical, vol. 168, pp. 22-29, 2011.

[8] Macdonald, J. R., "impedance spectroscopy", Annals of biomedical engineering, vol. 20, pp. 289-305, 1992.

[9] Byington, C., Palmer, C., et al. "An integrated, real-time oil quality monitor and debris measurement capability for drive train and engine systems", Proceedings of American Helicopter Society, 66th Annual Forum and Technology Display, Phoenix, Arizona, pp. 11-13, 2010.

[10] Byington, C. S., Mackos, N. A., et al., "application of symbolic regression to electrochemical impedance spectroscopy data for lubricating oil health evaluation," Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, Vol. 3, No. 112, pp. 1-10, 2012.

[11] Jakoby, B., and Velekoop, M.J., "physical sensors for water-in-oil emulsions", sensors and actuators A, vol. 110, pp. 28-32, 2004.

[12] Collister, C.J., "electrical measurement of oil quality", U.S. Patent, No. 6,459,995, 2002.

[13] Hopkins, E. L. and Irwin, L. K., "instrument for capacitively testing the condition of lubricating oil", U. S. Patent, No. 3,182,255, 1965.

[14] Hopkins, E. L. and Wedel, J. L., "fluid condition monitoring system", U. S. Patent, No. 4,064,455, 1977.

[15] Meitzler, A. H. and Saloka, G. S., "method and apparatus for sensing the condition of lubricating oil in an internal combustion engine", U. S. Patent, No. 4,733,556, 1988.

[16] Schmitz, G. and Reggelen, B., "method of analyzing the alcohol content and/ or the calorific value of fuels", U.S. Patent, No. 5,134,381, 1992.

[17] Cox, P. T., "dielectric cross-plot water cut monitoring apparatus and method", U. S. Patent, No. 5,272,444, 1993.

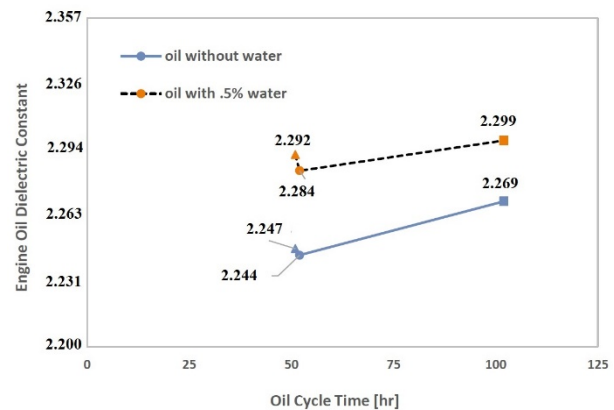
[18] Suh, N. P., Waldman, F. A., et al., "moisture measurement device", U. S. Patent, No. 4,932,243, 1990.

[19] Preikschat, F. K., "electrical impedance measuring apparatus for providing separate

می‌تواند از دیدگاه پایش وضعیت رفتار روغن موتور را در محدوده کارکرد مجاز مورد مطالعه قرار دهد و در زمان خرابی روغن به کاربر اخطار دهد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت توسعه قوای محرکه دینا به دلیل در اختیار گذاشتن شرایط آزمایشگاهی اعلام می‌دارند.



شکل ۱۴: نمودار تغییر ظرفیت خازنی روغن موتور با ساعت کارکرد مختلف، بدون آب و ۰/۵٪ آلودگی آب

## فهرست علائم

$C$	ظرفیت خازن روغن، $F$
$K$	ضریب دی الکتریک
$A$	مساحت صفحه خازن، $m^2$
$d$	فاصله بین دو خازن، $m$
$C_o$	ظرفیت خازن در خلا، $F$
$B_C$	پذیرندگی، siemens
$G$	رسانایی الکتریکی، siemens

## علائم یونانی

$\epsilon_0$	ضریب گذردهی الکتریک خلا، $PF/m$
$\theta$	زوایه تتا، $deg$
$\omega$	بسامد، Hz

## مراجع و منابع

- [1] Zhu, J., "online industrial lubrication oil health condition monitoring, diagnosis and prognostics", thesis, industrial engineering, university of Illinois at Chicago, 2013.
- [2] Zhu, J, He, D., and Bechhoefer, E, "survey of lubrication oil condition monitoring, diagnostics, and prognostics techniques and systems", journal of chemical science and technology (JCST), Vol. 2, No. 3, pp. 100-115, 2013.

Constant of Water from 0°C to 100°C", Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 56, No. 1, pp.1-8, 1956.

[23] Okada, K. Sekino, T., "Impedance Measurement Handbook; Agilent Technologies", Santa Clara, CA, USA, 2011.

[24] Bou Nader, W., "Hot Belt Flapping Durability Test for Accessories Drive", PSA PEUGEOT CITROËN, No. 01527\_12\_00405, 2012.

[25] Tan Delta Systems: Oil Condition Monitoring Technologies, Available: <http://www.tandeltasystems.com>

measurements of the conductivity and dielectric coefficient of various materials", U.S. Patent, No. 4,181,881, 1980.

[20] حاجی هاشمی، ع.، فرهودنیا، م.، "طراحی و بهینه سازی سنسور سنجش کیفیت روغن"، سازمان ثبت اسناد و املاک کشور، شماره اظهارنامه: ۱۳۸۳.۳۸۳۰۶۱۳۱.

[21] International Electrotechnical Commission. [online]. Available: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=121-11-03>

[22] Malmberg, C G., Maryott, A. A., "Dielectric



## Oil Quality Monitoring in Gasoline Spark Ignition Engine Using Oil Dielectric Measurement

E. Qasemi<sup>1</sup>, S. V. Hosseini<sup>2\*</sup>, S. K. Yazdanparast<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, [e\\_qasemi@shahroodut.ac.ir](mailto:e_qasemi@shahroodut.ac.ir)

<sup>2</sup>Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, [v\\_hosseini@shahroodut.ac.ir](mailto:v_hosseini@shahroodut.ac.ir)

<sup>3</sup>Department of Mechanical engineering, Iran University Science & Technology, Tehran, Iran. [kosar\\_yazdanparast@vu.iust.ac.ir](mailto:kosar_yazdanparast@vu.iust.ac.ir)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 15 February 2019

Accepted: 18 March 2019

#### Keywords:

Condition Monitoring

Oil Quality

Capacitive Sensor

Dielectric Coefficient

Gasoline Engine

### ABSTRACT

Oil analysis is one of the main methods for monitoring the status of internal combustion engines and oils to ensure the lubricant's protective performance and engine health. This paper investigate oil condition monitoring in gasoline engine using oil dielectric coefficient measurement. At first capacitive sensor pectinate type is designed and manufactured that engine oil can pass through the sensor with high resolution and accuracy for engine monitoring application. Results show that up to 1.5% water pollution in oil, dielectric coefficient and  $\theta$  is increased linearly. More water pollution increase dielectric coefficient exponentially. Due to investigate oil oxidation in controllable real condition, this sensor and another industrial quality sensor is evaluated in engine durability test. Although oil dielectric coefficient is increased with oil oxidation but also  $\theta$  is constant permanently. Monitoring the result of dielectric behavior of engine oil in new design sensor is similar to industrial quality sensor. In addition interaction effect of water pollution and oil oxidation is studied. Results indicate that this sensor is capable of detecting water pollution and oxidation in engine oil.

