

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید

طراحی و ساخت حسگر آزمایشگاهی پایش وضعیت آنلاین روغن موتور بنزینی با روش اندازه گیری ضریب دی الکتریک

نگارنده:

اسماعیل قاسمی

استاد راهنما:

دکتر سید وحید حسینی

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۱۷۷/۲۹۶/۱۳
تاریخ: ۱۳/۱۲/۱۳۹۶

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صور جلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی آقای اسماعیل قاسمی با شماره دانشجویی ۹۳۱۳۲۸۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید تحت عنوان طراحی و ساخت حسگر آزمایشگاهی پایش وضعیت آنلاین روغن موتور بنزینی با روش اندازه گیری ضریب دی الکتریک که در تاریخ ۹۶/۱۱/۰۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۸۸.۴۷ درجه علمی) مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر سید وحید حسینی	استاد یار	
۲- استاد راهنمای دوم	_____	_____	_____
۳- استاد مشاور	_____	_____	_____
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر سید هادی قادری	استاد یار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر مهدی وحدتی	استاد یار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر مهدی بامداد	استاد یار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تقدیم‌نامه

تقدیم به پدر و مادر عزیزم که رسم عشق را از آنان آموختم

تقدیم به همسفر زندگی، همسر عزیزم

و تقدیم به برادران و خواهر عزیزم

سپاس‌گزاری

از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر سید وحید حسینی که همواره با حمایت‌ها، راهنمایی‌ها و تلاش فراوان جهت هر چه بهتر شدن این پایان‌نامه از هیچ کوششی دریغ نکردند، کمال سپاس، احترام و قدردانی را دارم. از استادان گرانقدر دانشگاه‌های نوشیروانی و صنعتی شاهرود تشکر می‌کنم. از پرسنل عزیز شرکت دیناموتور که کمک فراوان علمی و تجهیزاتی برای پیشبرد اهداف این پایان‌نامه داشته‌اند، تشکر فراوان می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب اسماعیل قاسمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده‌ی مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه ((طراحی و ساخت حسگر آزمایشگاهی پایش وضعیت آنلاین روغن موتور بنزینی با روش اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک)) تحت راهنمایی دکتر سید وحید حسینی

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

بررسی وضعیت لحظه‌ای روغن موتور احتراق داخلی برای اطمینان از عملکرد مطلوب روانکار و سلامت موتور صورت می‌گیرد. تحقیق حاضر به طراحی و ساخت حسگر خازنی برای پایش آنلاین کیفیت روغن می‌پردازد. عوامل نويز بر عملکرد حسگر مانند دما، فشار و دبی روغن مورد بررسی قرار گرفت. اثر عوامل مختلف خرابی روغن مانند آلودگی آب، آلودگی سوخت و اکسیداسیون بر خروجی‌های حسگر در مدار هیدرولیک به صورت آنلاین مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. علاوه بر این حسگر در دو مرحله به صورت آفلاین و آنلاین داخل مدار مورد ارزیابی در آزمون دوام موتوری در شرایط کارکرد واقعی قرار گرفت.

هندسه الکترودهای این حسگر خازنی به شکلی طراحی شده که ظرفیت خازنی آن بالاتر رود که با افزایش ظرفیت خازنی آن تغییرات در روغن به شکل دقیق‌تری اندازه‌گیری شود و در صورت وجود حباب در روغن در اندازه‌گیری خللی وارد ننماید. روغن از داخل این حسگر خازنی عبور می‌کند که امکان پایش آنلاین اختلاف فشار روغن ورودی و خروجی از حسگر را به وجود می‌آورد و در صورت کنترل دبی روغن، می‌توان وضعیت گرانشی روغن را مورد پایش قرارداد. از مزایای این طرح سیلان بهتر روغن و عدم رسوب درون حسگر و در پی آن افزایش دقت در تشخیص خرابی روغن و تشخیص آلودگی بنزین در روغن می‌باشد. خروجی‌های حسگر، ظرفیت خازنی، زاویه تتا (نسبت بین بخش موهومی و بخش حقیقی گذردهی)، اختلاف فشار دو سر حسگر و دمای روغن هستند که عوامل مختلف خرابی روغن اثرات متفاوتی روی هر یک می‌گذارند. نتایج آزمایشات انجام شده بیانگر توانایی این حسگر در شناسایی خرابی‌های مختلف روغن مانند آلودگی آب، سوخت و اکسیداسیون می‌باشد، به طوری که می‌توان محدوده مشخص سلامت روغن برای خروجی‌های حسگر تعیین کرد. هزینه پایین تولید و امکان پردازش ساده و آنلاین اطلاعات خروجی حسگر و دقت بالا از ویژگی‌های این حسگر کیفیت روغن هست.

واژگان کلیدی:

پایش آنلاین وضعیت، کیفیت روغن، حسگر روغن، ضریب دی‌الکتریک، روغن موتور احتراق داخلی

دستاوردهای پایان نامه

۱. قاسمی، ا.؛ حسینی، س. و؛ شناسایی آلودگی آب، آلودگی سوخت و اکسیداسیون در روغن موتور بنزینی به صورت آنلاین از طریق حسگرخازنی پایش وضعیت روغن؛ چهارمین کنفرانس ملی و دومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک؛ تهران؛ ۱۳۹۵.
۲. ارسال اظهارنامه اختراع حسگر با عنوان حسگر آنلاین پایش کیفیت روغن خارج از مدار؛ در مرحله داوری قرار دارد.
۳. قاسمی، ا.؛ حسینی، س. و؛ پایش وضعیت روغن موتور tu5 با استفاده از حسگر خازنی کیفیت روغن؛ ارسال شده به مجله علمی پژوهشی تحقیقات موتور.

فهرست عنوان‌ها

تقدیم‌نامه	د
سپاسگزاری	ه
چکیده	ز
دستاوردهای پایان نامه	ح
فهرست عنوان‌ها	ط
فهرست شکل‌ها	م
فهرست جدول‌ها	ف
فهرست نشانه‌ها	ص
فصل ۱ مقدمه	۱
۱-۱ اهداف و مزایای پایش وضعیت	۱
۲-۱ پایش وضعیت به روش آنالیز روغن و کاربردهای آن	۲
۳-۱ کاربرد روغن در موتورهای احتراق داخلی	۳
۱-۳-۱ وظایف روغن	۳
۲-۳-۱ اثر خرابی روغن	۵
۳-۳-۱ عملکرد یاتاقان	۶
۴-۱ پارامترهای مهم خرابی روغن	۱۱
۱-۴-۱ آلودگی آب و تأثیر آن بر روی عملکرد روغن روانکار	۱۴
۲-۴-۱ اکسیداسیون و تأثیرات آن بر روی روغن روانکار	۱۵

۱۷-۴-۳ آلودگی ذرات و تأثیر آن بر عملکرد روغن:..... ۱۷

۱۷-۴-۴ آلودگی سوخت ۱۷

فصل ۲ روش ها و سیستمهای پایش وضعیت روغن..... ۲۱

۲-۱ انواع روش های پایش وضعیت روغن..... ۲۱

۲-۱-۱ تجزیه و تحلیل در خارج از محل..... ۲۱

۲-۱-۲ تجزیه و تحلیل با کیت های قابل حمل..... ۲۲

۲-۱-۳ تجزیه و تحلیل روغن به صورت آنلاین..... ۲۲

۲-۲ حسگرها و سیستم های نظارت بر پارامترهای عملکرد روغن..... ۲۳

۲-۲-۱ روش های فیزیکی..... ۲۳

۲-۲-۲ روش های شیمیایی..... ۲۶

۲-۲-۳ روش های نوری..... ۲۷

۲-۲-۴ گرانیروی میکروصوتی..... ۲۹

۲-۲-۵ روش های رسانایی..... ۲۹

۲-۲-۶ شیوه مغناطیسی..... ۳۱

۲-۲-۷ روش خازنی..... ۳۲

۲-۳ مزایای اصلی حسگر کیفیت روغن بر اساس ضریب دی الکتریک..... ۳۷

۲-۳-۲ مقایسه حسگرهای مختلف روش های خازنی و رسانایی..... ۳۹

فصل ۳ طراحی حسگر خازنی..... ۴۱

۳-۱ شیوه کارکرد حسگر خازنی..... ۴۱

۳-۲ امکان سنجی طرح ها برای حسگر خازنی..... ۴۶

۳-۳ محاسبات حسگر خازنی..... ۴۷

۳-۳-۱ محاسبات حسگر خازنی دیسکهای موازی:..... ۴۸

۳-۳-۲ محاسبات حسگر خازنی استوانه ای:..... ۴۸

۳-۳-۳ محاسبات حسگر خازنی طرح شانه ای (حسگر نهایی):..... ۵۰

۳-۴ طرح های اولیه حسگر..... ۵۰

۳-۵ طرح نهایی حسگر..... ۵۲

۵۶-۶ امکان سنجی ساخت و تولید.....

فصل ۴ شناسایی قابلیت‌ها و صحه گذاری حسگر آنلاین کیفیت روغن خارج از مدار ۵۹

۱-۴ آزمایش‌های بررسی طرح‌های اولیه حسگر ۵۹

۱-۱-۴ آزمایش حسگر صفحه موازی: ۶۰

۲-۱-۴ آزمایش حسگر استوانه‌ای: ۶۱

۳-۱-۴ دستگاه خوانش ظرفیت و مقاومت روغن ۶۱

۲-۴ تعیین ظرفیت خازنی حسگر شانهای کیفیت روغن با هوا و روغن ۶۲

۳-۴ آزمون‌های حسگر کیفیت روغن به صورت آفلاین ۶۳

۱-۳-۴ بررسی اثر آلودگی آب در روغن ۶۳

۲-۳-۴ بررسی کیفیت روغن در آزمون دوام موتوری ۶۴

۴-۴ بررسی عملکرد و حساسیت حسگر کیفیت روغن به صورت آنلاین در مدار هیدرولیک ۶۹

۱-۴-۴ تجهیزات مورد استفاده ۷۰

۲-۴-۴ پارامترهای نويز بر عملکرد حسگر ۷۵

۳-۴-۴ اثر تغییرات گرانشی روغن در عملکرد حسگر ۷۷

۴-۴-۴ بررسی عملکرد حسگر در صورت آلوده شدن روغن موتور ۷۸

۵-۴-۴ بررسی عملکرد حسگر در صورت اکسیداسیون روغن موتور ۷۹

۵-۴ صحه گذاری حسگر کیفیت روغن در آزمون دوام موتوری ۸۰

فصل ۵ بررسی نتایج ۸۵

۱-۵ نتایج بررسی طرح‌های اولیه حسگر ۸۵

۱-۱-۵ حسگر اولیه صفحه تخت موازی: ۸۵

۲-۱-۵ حسگر اولیه استوانه‌ای: ۸۶

۲-۵ نتایج آزمایش حسگر کیفیت روغن با هوا و روغن ۸۷

۳-۵ نتایج آزمایش‌های حسگر کیفیت روغن به صورت آفلاین ۸۷

۱-۳-۵ نتایج آزمایش‌های آلودگی آب ۸۷

۲-۳-۵ نتایج آزمایش آفلاین حسگر کیفیت روغن در آزمون دوام موتور TU3 ۸۹

۳-۳-۵ نتایج آزمایش آفلاین حسگر کیفیت روغن در آزمون دوام موتور TU5 ۹۴

۴-۵	نتایج بررسی عملکرد و حساسیت حسگر کیفیت روغن به صورت آنلاین در مدار
۹۷	هیدرولیک.....
۱-۴-۵	اثر دما بر عملکرد حسگر کیفیت.....
۹۷
۲-۴-۵	تأثیر تغییر دبی روغن بر حسگر کیفیت روغن.....
۱۰۳
۳-۴-۵	تأثیر تغییر فشار بر عملکرد حسگر کیفیت روغن.....
۱۰۶
۴-۴-۵	نتایج آلودگی بنزین در روغن.....
۱۰۹
۵-۴-۵	نتایج آزمایش آلودگی آب در روغن.....
۱۱۲
۶-۴-۵	نتایج آزمون اکسیداسیون در مدار هیدرولیک.....
۱۱۶
۵-۵	نتایج آزمایش صحه گذاری حسگر کیفیت روغن در آزمون دوام موتوری.....
۱۲۱
۱۳۱	فصل ۶ جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادها.....
۱-۶	جمع بندی و نتیجه گیری.....
۱۳۱
۲-۶	پیشنهادها.....
۱۳۶
۱۴۳	منبع ها.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- خرابی پیستون بر اثر ذرات سایشی در روغن [۳] ۶
- شکل ۲-۱- انواع روش‌های روغن‌کاری ۹
- شکل ۳-۱- یاتاقان ژورنال ۱۰
- شکل ۴-۱- خرابی یاتاقان بر اثر کمبود مایع روانکار [۳] ۱۱
- شکل ۵-۱- خرابی یاتاقان ثابت بر اثر سایش ذرات [۳] ۱۱
- شکل ۶-۱- رابطه بین ویژگی‌های اساسی خرابی، پارامترهای عملکردی و حسگرهای وضعیت روغن موجود [۵] ۱۲
- شکل ۱-۲- کیت آنالیز روغن ساخت شرکت kittiwake [۱۷] ۲۲
- شکل ۲-۲- گرانروی سنج حرکتی ساخت شرکت Cambridge Viscosity [۱۸] ۲۴
- شکل ۳-۲- حسگر نوری ساخته شده توسط کومار و موکرجی [۲۵] ۲۸
- شکل ۴-۲- حسگر روغن PBM [۳۰] ۳۰
- شکل ۵-۲- حسگر ذرات سایشی ساخت شرکت Kitiwake [۱۷] ۳۱
- شکل ۶-۲- حسگر شبکه خازنی ساخت راندنوی و کسوان [۳۱] ۳۲
- شکل ۷-۲- حسگر چند لایه ساخته شده توسط ترنر و آستین [۱۱] ۳۳
- شکل ۸-۲- نمونه حسگر EIS شرکت Poseidon System [۳۷] ۳۴
- شکل ۹-۲- حسگر کیفیت روغن شرکت کیتی ویک [۱۷] ۳۶
- شکل ۱۰-۲- حسگر کیفیت روغن شرکت TANDELTA [۳۹] ۳۶
- شکل ۱-۳- خازن با صفحات موازی ۴۲
- شکل ۲-۳- خازن استوانه‌ای ۴۲
- شکل ۳-۳- زاویه تنا نسبت بین بخش موهومی و بخش حقیقی گذردهی ۴۵
- شکل ۴-۳- طرح‌های اولیه حسگر ۴۷
- شکل ۵-۳- حسگر خازنی صفحه موازی با الکترودهای مختلف ۵۱
- شکل ۶-۳- حسگر خازنی استوانه‌ای ۵۱
- شکل ۷-۳- سطح مقطع هسته مرکزی حسگر ۵۳
- شکل ۸-۳- هسته مرکزی حسگر ۵۳
- شکل ۹-۳- حسگر خازنی ساخته شده ۵۵
- شکل ۱۰-۳- طرحواره نصب حسگر کیفیت روغن بر ماشین ۵۶
- شکل ۱۱-۳- هسته مرکزی حسگر ۵۷
- شکل ۱۲-۳- اجزای تشکیل دهنده حسگر ۵۷
- شکل ۱۳-۳- حسگر روغن ساخته شده ۵۸

- شکل ۱-۴-۱- فلوجارت مراحل آزمایش حسگر شانهای ۶۰
- شکل ۲-۴-۲- دستگاه اندازهگیری ظرفیت خازنی و مقاومت *LCR METER MASTECH* 5308
- شکل ۳-۴-۳- شرایط آزمایش حسگر خازنی شانهای کیفیت روغن به صورت تزریق دستی ۶۲
- شکل ۴-۴-۴- طرحواره اتصال حسگر خازنی به *LCR METER* ۶۳
- شکل ۵-۴-۵- آزمایش آلودگی آب به صورت آفلاین ۶۴
- شکل ۶-۴-۶- نمایی از آزمون دوام موتورها در اتاق آزمون دینامومتری با روغنهای مشخص ۶۵
- شکل ۷-۴-۷- نمودار تغییرات دمای روغن، دور موتور و توان گرفته شده از موتور در طول دوره ۱ ساعت ۶۶
- شکل ۸-۴-۸- پایش توان کارکرد موتور *TU5* در ساعات مختلف آزمون دوام در دور موتور ۶۶
- شکل ۹-۴-۹- تاریخچه دما و فشار روغن موتور در شرایط آزمون دوام موتوری ۶۷
- شکل ۱۰-۴-۱۰- تغییرات فشار محفظه لنگ در طول تست ۶۸
- شکل ۱۱-۴-۱۱- نمونه‌های روغن مورد آزمایش در ساعات‌های مختلف کارکرد در آزمونهای موتوری ... ۶۸
- شکل ۱۲-۴-۱۲- حسگر تجاری کیفیت روغن ساخت شرکت *TAN DELTA* ۷۰
- شکل ۱۳-۴-۱۳- مدار هیدرولیک برای آزمایش حسگرها ۷۱
- شکل ۱۴-۴-۱۴- پمپ هیدرولیک مورد استفاده با حداکثر تحمل فشار *BAR 20* ۷۲
- شکل ۱۵-۴-۱۵- گرمکن روغن مورد استفاده در مدار هیدرولیک ۷۲
- شکل ۱۶-۴-۱۶- مدار کنترل دمای روغن ۷۳
- شکل ۱۷-۴-۱۷- کنترلر دبی هوا برای کنترل هوای فشرده ورودی ۷۳
- شکل ۱۸-۴-۱۸- حسگر خازنی وصل شده به مدار هیدرولیک به صورت آنلاین ۷۴
- شکل ۱۹-۴-۱۹- نصب حسگر ساخته شده و *TAN DELTA* به طور همزمان در مدار هیدرولیک ... ۷۴
- شکل ۲۰-۴-۲۰- حسگر خازنی (محل اتصال دماسنج روی حسگر) ۷۶
- شکل ۲۱-۴-۲۱- حسگر کیفیت روغن آنلاین متصل در حال خوانش ظرفیت خازنی، زاویه تتا ۷۷
- شکل ۲۲-۴-۲۲- ثبت فشار ورودی و خروجی از حسگر ۷۸
- شکل ۲۳-۴-۲۳- سیم‌های مسی مورد استفاده برای تسریع فرایند اکسیداسیون روغن ۸۰
- شکل ۲۴-۴-۲۴- مدار سامانه پایش وضعیت کیفیت روغن موتور ۸۱
- شکل ۲۵-۴-۲۵- تابلو سامانه پایش وضعیت روغن نصب شده در اتاق آزمون موتوری ۸۲
- شکل ۲۶-۴-۲۶- داده برداری آنلاین حسگر *TAN DELTA* با نرم‌افزار مخصوص آن ۸۳
- شکل ۱-۵-۱- تغییر ظرفیت خازنی با افزایش آلودگی آب در روغن (آفلاین) ۸۸
- شکل ۲-۵-۲- نتایج آزمایش آلودگی آب با حسگر *TAN DELTA* (آفلاین) ۸۹
- شکل ۳-۵-۳- تغییرات ظرفیت خازنی و *LF* در طول کارکرد موتور *TU3* در آزمون دوام ۹۰
- شکل ۴-۵-۴- تغییرات ظرفیت خازنی در هر تعویض روغن در موتور *TU3* بر حسب ساعت کارکرد .. ۹۱
- شکل ۵-۵-۵- تغییرات مقاومت روغن و *LF* در طول کارکرد روغن در موتور *TU3* ۹۲

- شکل ۵-۶- تغییرات زاویه تتا و ظرفیت خازنی در طول کارکرد روغن در موتور TU3 ۹۲
- شکل ۵-۷- تغییرات زاویه تتا و LF در طول کارکرد روغن در موتور TU3 ۹۳
- شکل ۵-۸- تغییرات ظرفیت خازنی و LF در طول کارکرد روغن در موتور TU5 ۹۵
- شکل ۵-۹- تغییر ظرفیت خازنی حسگر در طول کارکرد روغن در موتور TU5 به تفکیک هر تعویض ۹۵
- شکل ۵-۱۰- تغییرات ظرفیت خازنی و زاویه تتا در طول کارکرد روغن در موتور TU5 ۹۶
- شکل ۵-۱۱- تغییرات زاویه تتا و LF در طول کارکرد روغن در موتور TU5 ۹۷
- شکل ۵-۱۲- اثر دما بر ظرفیت خازنی حسگر و LF حسگر TAN DELTA ۹۸
- شکل ۵-۱۳- اثر دما بر مقاومت الکتریکی روغن داخل حسگر و LF حسگر TAN DELTA ۱۰۰
- شکل ۵-۱۴- اثر دما بر ظرفیت خازنی و مقاومت الکتریکی روغن داخل حسگر ۱۰۱
- شکل ۵-۱۵- اثر دما بر زاویه تتا و LF ۱۰۲
- شکل ۵-۱۶- اثر دما بر فشار دوسر حسگر ۱۰۳
- شکل ۵-۱۷- تأثیر میزان باز بودن شیر (تغییر دبی) بر ظرفیت خازنی حسگر و LF ۱۰۴
- شکل ۵-۱۸- تأثیر تغییر دبی روغن بر مقاومت الکتریکی حسگر و LF ۱۰۵
- شکل ۵-۱۹- تأثیر تغییر دبی روغن بر زاویه تتا و LF ۱۰۵
- شکل ۵-۲۰- تأثیر تغییر دبی روغن بر اختلاف فشار دو سر حسگر ۱۰۶
- شکل ۵-۲۱- تأثیر تغییر فشار بر ظرفیت خازنی حسگر و LF ۱۰۷
- شکل ۵-۲۲- تأثیر تغییر فشار بر مقاومت الکتریکی روغن در حسگر و LF ۱۰۸
- شکل ۵-۲۳- تأثیر تغییر فشار بر زاویه تتا و LF ۱۰۸
- شکل ۵-۲۴- تغییر اختلاف فشار دو سر حسگر با تغییر فشار مدار هیدرولیک ۱۰۹
- شکل ۵-۲۵- اثر افزایش بنزین در روغن بر ظرفیت خازنی حسگر و LF حسگر TAN DELTA ۱۱۰
- شکل ۵-۲۶- اثر افزایش بنزین در روغن بر مقاومت الکتریکی روغن در حسگر و LF حسگر TAN DELTA ۱۱۰
- شکل ۵-۲۷- اثر افزایش بنزین در روغن بر زاویه تتا حسگر و LF حسگر TANDELTA ۱۱۱
- شکل ۵-۲۸- اثر افزایش بنزین در روغن بر اختلاف فشار دو سر حسگر ۱۱۲
- شکل ۵-۲۹- اثر افزایش آب در روغن بر ظرفیت خازنی حسگر ساخته شده و LF حسگر TAN DELTA ۱۱۴
- شکل ۵-۳۰- اثر افزایش آب در روغن بر مقاومت الکتریکی روغن در حسگر و LF ۱۱۴
- شکل ۵-۳۱- اثر افزایش آب در روغن بر تتا و LF ۱۱۵
- شکل ۵-۳۲- اثر آلودگی آب در روغن بر اختلاف فشار دو سر حسگر ۱۱۶
- شکل ۵-۳۳- تغییرات ظرفیت خازنی حسگر در آزمایش‌های اکسیداسیون ۱۱۷

- شکل ۵-۳۴- مقایسه تغییرات ظرفیت خازنی حسگر با LF در آزمایش اکسیداسیون ۱۱۸
- شکل ۵-۳۵- مقایسه ظرفیت خازنی حسگر با تغییرات زاویه تتا ۱۱۹
- شکل ۵-۳۶- مقایسه تغییرات زاویه تتا با LF در آزمایش اکسیداسیون ۱۲۰
- شکل ۵-۳۷- اثر تغییر دما در آزمایش اکسیداسیون ۱ ۱۲۰
- شکل ۵-۳۸- تغییر رنگ نمونه روغن پس از آزمایش‌های اکسیداسیون ۱۲۱
- شکل ۵-۳۹- تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و LF حسگر TAN DELTA در آزمایش دوام موتور TU5 ۱۲۲
- شکل ۵-۴۰- تغییرات مقاومت الکتریکی روغن در حسگر و LF حسگر TAN DELTA در آزمایش دوام موتور TU5 ۱۲۵
- شکل ۵-۴۱- تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و مقاومت الکتریکی در آزمایش دوام موتور TU5 .. ۱۲۶
- شکل ۵-۴۲- تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و زاویه تتا در آزمایش دوام موتور TU5 ۱۲۷
- شکل ۵-۴۳- تغییرات ظرفیت خازنی حسگر با تغییر دما در طول آزمایش دوام موتور TU5 ۱۲۸
- شکل ۵-۴۴- تغییرات تتا و LF در آزمایش دوام موتوری ۱۲۸

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- پارامترهای عملکرد، برنامه‌ها و معیار برای خرابی روغن روانکار [۵] ۱۳
- جدول ۱-۲- مقایسه حسگرهای مختلف روش خازنی و رسانایی [۴۷] ۴۰
- جدول ۱-۳- ضریب دی‌الکتریک مواد مختلف [۴۸] ۴۳
- جدول ۲-۳- محاسبات ظرفیت خازنی برای خازن با صفحات موازی ۴۸
- جدول ۳-۳- محاسبات حسگر خازنی استوانه‌ای ۴۹
- جدول ۴-۳- مشخصات حسگر خازنی طرح شانه‌ای با ابعاد هندسی مختلف ۵۰
- جدول ۱-۴- روغن‌های مورد آزمایش برای حسگر صفحه موازی ۶۱
- جدول ۲-۴- روغن‌های مورد آزمایش برای حسگر استوانه‌ای ۶۱
- جدول ۳-۴- مشخصات روغن استفاده شده در موتورها در حین آزمون دوام [۵۱] ۶۹
- جدول ۴-۴- شرایط سه آزمایش مختلف اکسیداسیون روغن ۷۹
- جدول ۱-۵- نتایج آزمایش حسگر اولیه صفحه موازی ۸۵
- جدول ۲-۵- نتایج آزمایش حسگر استوانه‌ای ۸۶
- جدول ۳-۵- محاسبات پیش‌بینی میزان ظرفیت خازنی روغن موتور بعد از سرریز روغن ۱۲۳
- جدول ۴-۵- اثر عوامل مختلف خرابی روغن بر خروجی‌های حسگر ۱۲۹
- جدول ۱-۶- تعیین کیفیت روغن براساس ظرفیت خازنی ۱۳۴

فهرست نشانه‌ها

Y	گذرایی	A	سطح مقطع خازن
ϵ_0	ثابت دی‌الکتریک خلأ	B_C	پذیرندگی
θ	زاویه تتا	C	ظرفیت خازنی
ω	بسامد زاویه‌ای	d	فاصله دو صفحه خازن
		f	فاراد
		F	فرکانس
		G	رسانایی الکتریکی
		K	ضریب دی‌الکتریک
		l	طول خازن
		LF	خروجی حسگر <i>TANDELTA</i> (loss factor)
		P	فشار روغن
		Q	فاکتور کیفیت
		R	مقاومت الکتریکی
		S	زیمنس
		T	دما

فصل ۱ مقدمه

نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیت^۱، مؤثرترین راهبرد موجود برای مدیریت دارایی‌های فیزیکی است که برای پیاده‌سازی این راهبرد از ابزار پایش وضعیت^۲ استفاده می‌شود. در پایش وضعیت تعمیر براساس وضعیت ماشینی که تحت مراقبت قرار دارد، انجام می‌شود. در این روش به جای تعمیرات ادواری، پایش وضعیت ماشین به صورت دوره‌ای انجام و تعمیرات تنها در زمانی که دستگاه احتیاج به تعمیر دارد، انجام می‌شود.

روش‌هایی همچون آنالیز ارتعاشات، آنالیز روغن و ذرات فرسایشی، ترموگرافی، آنالیز آلتراسونیک از جمله روش‌های پایش وضعیت می‌باشند. پایش وضعیت در صنایع زیر در سراسر کشور در حال اجرا است:

نیروگاه‌های بخار، گازی و آبی - صنایع نفت و گاز - صنایع فولاد - مجتمع پتروشیمی - صنایع چوب و کاغذ - کارخانه‌های سیمان - حمل و نقل - صنایع خودرو سازی - صنایع غذایی و فرآوری.

۱-۱ اهداف و مزایای پایش وضعیت

هر حرکتی در صنعت می‌بایست در جهت بهبود بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها باشد. اهم مزایای استفاده از پایش وضعیت به شرح زیر می‌باشد:

۱- کاهش توقف تجهیزات خصوصاً توقف‌های غیر منتظره (به دلیل اطلاع از وضعیت تجهیز و انجام تعمیر تنها در صورت بروز اشکال در دستگاه)

^۱ Condition based maintenance

^۲ Condition Monitoring

- ۲- کاهش هزینه تعمیر تجهیزات و مصرف قطعات یدکی (به دلیل جلوگیری از خرابی‌های ثانویه و عدم باز شدن دستگاه در موارد غیرضروری)
- ۳- کاهش زمان تعمیر تجهیزات (با برنامه‌ریزی، زمان تعمیر و نیاز به تعویض قطعات معیوب که از قبل آماده شده است، کاهش می‌یابد)
- ۴- افزایش کیفیت محصولات
- ۵- افزایش قابلیت اطمینان و طول عمر
- ۶- افزایش بهره‌وری (با کاهش فرصت‌ها و محصولات از دست رفته)
- ۷- بهبود دانش فنی در مجموعه

۱-۲ پایش وضعیت به روش آنالیز روغن و کاربردهای آن

در سامانه‌های مکانیکی که در آن از روغن به‌عنوان روانکار استفاده می‌شود، پایش وضعیت روغن قابلیت بالایی را در تشخیص عیوب مکانیکی به وجود می‌آورد و به عنوان ابزاری مؤثر، امکان بهینه‌سازی سامانه‌ها و نظارت‌های مختلفی نظیر بررسی روند استهلاک، کیفیت قطعات و مواد و چگونگی انجام تعمیرات را فراهم می‌سازد. تحلیل روغن یکی از روش‌های اصلی مراقبت وضعیت موتورهای احتراق داخلی به شمار می‌رود. اطلاعات به‌دست‌آمده از تحلیل روغن منجر به حداقل رساندن آسیب و خسارت‌های وارده به موتور، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری می‌شود. نظارت بر کیفیت روغن، آلودگی روغن و ارزیابی ذرات سایشی در موتورهای احتراق داخلی از اهداف اجرای پایش وضعیت روغن به شمار می‌رود. روغن یک منبع اطلاعاتی مهم برای تشخیص زودهنگام خرابی ماشین به حساب می‌آید و نقش آن همانند نقش خون در بدن انسان در حوزه تشخیص بیماری است. در صنایع مدرن، روغن نقش مهمی در نگهداری وضعیت ماشین‌آلات پیچیده مانند توربین‌های بادی دارد و در نتیجه حوزه پایش وضعیت روغن به شدت در حال رشد و ارتقا است.

در سال‌های اخیر، نظارت بر وضعیت سلامت و پیش‌بینی خرابی روانکار به موضوعات قابل توجه در میان دانشگاه و صنعت تبدیل شده است. تلاش ویژه‌ای برای پژوهش و توسعه سیستم تشخیص و پیش‌آگهی روغن شده است. پلی [۱] در تحقیقی نشان داد که هشدار بد عمل کردن و خرابی ماشین را پایش وضعیت روغن ۱۰ مرتبه سریع‌تر از پایش وضعیت ارتعاشی شناسایی کرده است. بسیاری از پژوهش‌های اخیر، هدف از نظارت بر روند خرابی روغن به صورت آنلاین برای ارائه هشدار زودهنگام خرابی ماشین را تمدید مدت زمان عملیات روغن به منظور کاهش دوره تعویض روغن و از همه مهم‌تر بهینه‌سازی برنامه نگهداری و تعمیرات و در پی آن کاهش هزینه نگهداری عنوان کرده‌اند.

تعمیرات غیرمنتظره اجزای محرک ماشین مانند چرخ‌دنده همواره با هزینه‌های بالا همراه است. به‌طور مثال هزینه نگهداری و تعمیرات یک موتور کشتی یا توربین بادی بیش از ۱۵۰۰۰۰ دلار می‌باشد. اگر در نظر گرفته شود که شکست‌های غیرمنتظره زیادی رخ دهد از دست دادن سرمایه قابل توجه خواهد بود. همچنین اجرای آنلاین پایش وضعیت روغن، هزینه تعویض غیرضروری روغن را کاهش می‌دهد. در برنامه نگهداری فعلی بسیاری از روان‌کارها قبل از پایان عمر خود تعویض می‌شود. در بسیاری از تجهیزات، بخش بزرگی از هزینه نگهداری و تعمیرات از نگهداری و تعمیرات بدون برنامه و ناگهانی می‌باشد. با این حال، با نگهداری به روش پایش وضعیت روغن به صورت آنلاین، می‌توان تعمیرات بدون برنامه‌ریزی را تا حد زیادی کاهش داد.

۳-۱ کاربرد روغن در موتورهای احتراق داخلی

۱-۳-۱ وظایف روغن

روغن از زمان شروع به کار موتور در معرض اکسیداسیون و تجزیه حرارتی قرار گرفته و روغن پایه آن آلوده شده و از کیفیت آن کاسته می‌شود و همچنین مواد افزودنی استاندارد آن نظیر مواد افزودنی پاک

کننده نیز، مصرف می‌شوند. در این حالت خاصیت روانکاری، پاک کنندگی و جذب ذرات معلق و ناخالصی‌ها، کاهش می‌یابد. به طور کلی وظایف روغن در موتور احتراق داخلی شامل موارد زیر می‌باشد [۲]:

۱- روانکاری و کاهش اصطکاک: اصلی‌ترین و مهم‌ترین وظیفه هر روغنی، روانکاری و کاهش اصطکاک می‌باشد که باعث بهبود راندمان موتور خواهد شد. تشکیل فیلم روغن با ضخامت مناسب، موجب کاهش سائیدگی قطعات مختلف تا کمترین حد ممکن می‌شود.

۲- انتقال حرارت: کمک به سیستم خنک کننده و خارج ساختن بخشی از حرارت ایجاد شده در اثر کارکرد موتور، بخصوص در قطعاتی که در تماس با گازهای احتراق هستند مانند پیستون، رینگ، استوانه، ساق سوپاپ و پرخوران.

۳- جلوگیری از زنگ زدگی و خوردگی: حفاظت سطوح قطعات فلزی در مقابل زنگ زدگی و خوردگی به علت فعل و انفعالات شیمیایی.

۴- پاک کنندگی و معلق سازی: تعلیق ذرات حاصل از سایش قطعات و ترکیبات ناشی از احتراق سوخت با هوا و پاک کردن سطوح تماسی.

۵- آب بندی سیستم: کمک به عمل آب بندی موتور با قرار گرفتن در فضای بین رینگ پیستون و سیلندر که موجب افزایش کارایی موتور خواهد شد.

۶- ضربه‌گیری: کاهش اثرات منفی ضربه‌های قطعات متحرک در حین کار به دلیل وجود ویسکوزیته مناسب.

۷- کاهش مصرف سوخت: در صورت استفاده از روغن با درجه مناسب، در لحظه استارت زمان رسیدن روانکار به قطعات موتور کاهش یافته که این امر در پایین آوردن میزان مصرف سوخت تأثیر زیادی دارد. موارد ذکر شده از مهم‌ترین وظایف یک روغن موتور مرغوب می‌باشد. یک روغن موتور مناسب، محصولی است که از روغن پایه مرغوب و مواد افزودنی لازم تولید گردد. مهم‌ترین مواد افزودنی که به روغن موتور اضافه می‌شوند عبارتند از:

- ۱- بالابرنده شاخص گرانروی
- ۲- پاک‌کننده‌ها و معلق‌کننده‌ها
- ۳- ترکیبات ضد اکسیداسیون
- ۴- بازدارنده‌های خوردگی و زنگ زدگی
- ۵- پائین آورنده اصطکاک و مواد ضدسایش
- ۶- پائین آورنده نقطه ریزش
- ۷- ضد کف

۱-۳-۲ اثر خرابی روغن

خرابی روغن باعث تغییر در گرانروی روغن، اکسیده شدن روغن، افزایش خاصیت اسیدی و خوردندگی روغن، افزایش فلزات آهنی و غیر آهنی در روغن، افزایش رسوب و لجن در مسیر روغن و به طور کلی خرابی روغن باعث از بین رفتن خاصیت محافظتی روغن می‌شود. خرابی روغن به این معنی است که روغن دیگر نمی‌تواند وظایفش را انجام دهد که نهایتاً منجر به سایش قطعات موتور با ذرات معلق در روغن، سایش اجزای موتور با برخورد مستقیم فلز با فلز، خوردگی اجزای مرتبط با روغن، نشستی محصولات احتراق به داخل روغن، انسداد مسیرهای روغن و خرابی پمپ روغن، یاتاقان زدن و خرابی‌های دیگر می‌شود.

اجزای اصلی مرتبط به روغن در موتور احتراق داخلی شامل یاتاقان‌ها، میل‌لنگ، پیستون، رینگ‌های پیستون و گژن پین، شاتون، استوانه، میل بادامک و مکانیزم سوپاپ‌ها و پرخوران می‌باشد. به طور یقین خرابی روغن می‌تواند سبب خرابی این قطعات و اجزای مرتبط با آن‌ها شود. خرابی روغن تأثیرات زیادی روی خرابی یاتاقان و پیستون دارد. در شکل ۱-۱ نمونه‌ای از خرابی پیستون بر اثر خرابی روغن نشان داده شده است [۳].



شکل ۱-۱ - خرابی پیستون بر اثر ذرات سایشی در روغن [۳]

۱-۳-۳ عملکرد یاتاقان

اجزای چرخشی موتورهای احتراق داخلی عموماً به یاتاقان‌های لغزشی مجهز هستند. موتورهای رفت و برگشتی با بارهای دوره‌ای حاصل از فشار متناوب گازهای احتراق در سیلندر، همراه هستند. یاتاقان‌های غلطشی که در آن بار توسط غلتک استوانه‌ای (یا ساچمه) به یک منطقه نسبتاً کوچک سطح حلقه انتقال می‌یابد نمی‌تواند با شرایط بارگذاری موتورهای احتراق داخلی پایدار بماند. تنها یاتاقان‌های لغزشی با ارائه توزیع بار اعمال شده به سرتاسر یک منطقه نسبتاً گسترده در موتورهای احتراق داخلی می‌تواند کار کند. وظایف یاتاقان در موتور شامل تنظیم لقی عمودی بین میل لنگ و سیلندر، کم کردن اصطکاک بین میل لنگ و سیلندر و جلوگیری از خوردگی آنها و کم کردن اصطکاک بین میل لنگ و شاتون و جلوگیری از خوردگی آنها می‌شود.

الف) یاتاقان‌های لغزشی استفاده شده در موتورهای احتراق داخلی:

یاتاقان ثابت میل لنگ^۱: یاتاقان اصلی، میل لنگ را پشتیبانی می کند و به چرخش آن تحت نیروهای اینرسی تولید شده توسط بخش هایی از شفت و نیروهای نوسانی انتقال یافته به وسیله شاتون کمک می کند. یاتاقان های ثابت در محل اتصال میل لنگ نصب می شود. یاتاقان ثابت شامل دو بخش است: بالا و پایین. قسمت بالایی یک یاتاقان ثابت معمولاً دارای شیار روغن در سطح داخلی است. یاتاقان ثابت دارای یک سوراخ برای عبور روغن به سوراخ تغذیه در میل لنگ می باشد. برخی از یاتاقان های ثابت ممکن است دارای جز یاتاقان طولی^۲ برای پوشش بارهای محوری و جلوگیری از حرکت در امتداد محور میل لنگ باشند. یاتاقان ثابت از این نوع را یاتاقان ثابت فلنج دار^۳ می گویند.

یاتاقان متحرک^۴: یاتاقان متحرک حرکت دوار پین میل لنگ در داخل شاتون را فراهم می کند؛ که بارهای سیکلی اعمال شده به پیستون را انتقال می دهد. یاتاقان متحرک در چشم بزرگ شاتون نصب شده است. یاتاقان شامل دو تکه (معمولاً قابل تعویض) می باشد.

یاتاقان میل بادامک^۵: میل بادامک را پشتیبانی کرده و حرکت چرخشی آن را فراهم می کند.

ب) انواع روش های روغن کاری:

اصطکاک لغزشی به طور قابل توجهی توسط اضافه کردن یک روان کننده بین سطوح سایشی کاهش می یابد. یاتاقان موتور به وسیله روغن موتور که به طور مداوم در مقادیر کافی به سطوح یاتاقان عرضه می شود، روغن کاری می شود. نسبت ضخامت فیلم روغن تحت فشار (h) به زبری سطح (Ra)، نوع رژیم روغن کاری را تعیین می کند [۴]:

روانکاری مرزی^۶ ($h < Ra$):

^۱ Main crankshaft bearings

^۲ Thrust bearing

^۳ Flange main bearings

^۴ Connecting rod bearings

^۵ Camshaft bearing

^۶ Boundary lubrication

یک تماس ثابت بین سطوح اصطکاک در نقاط بلند سطح (زبری‌های میکرو^۱) در روانکاری مرزی رخ می‌دهد. این رژیم اغلب نامطلوب است زیرا با ضریب اصطکاک بالا (از دست دادن انرژی)، افزایش سایش، امکان شوک یاتاقان و مواد ژورنال، توزیع غیر یکنواخت بار یاتاقان (پیک فشار موضعی) همراه است. در این رژیم انتقال حرارت بسیار مهم است و تولید ذرات سایشی زیاد خواهد بود. با روانکاری مرزی شکست‌های بسیار شدید یاتاقان موتور ایجاد می‌شود. به طور کلی در اصطکاک در سرعت کم (شروع به کار موتور و خاموش شدن) و بارهای بالا، شرایط برای روانکاری مرزی به وجود می‌آید. فشار شدید افزایش‌دهنده در روان‌ساز از ایجاد شرایط شوک ناشی از تماس مستقیم فلز با فلز بین قطعات در رژیم روانکاری مرزی، جلوگیری می‌کند. رژیم روانکاری ناحیه رینگ و پیستون در موتورها به صورت روانکاری مرزی است.

روانکاری ترکیبی^۲ ($h \sim Ra$):

یک تماس متناوب بین سطوح اصطکاک در چند نقطه بلند از سطح^۳ در روغن کاری ترکیبی رخ می‌دهد. روغن کاری ترکیبی حالت میانی بین روانکاری مرزی و هیدرودینامیک می‌باشد.

روانکاری هیدرودینامیک^۴ ($h > Ra$):

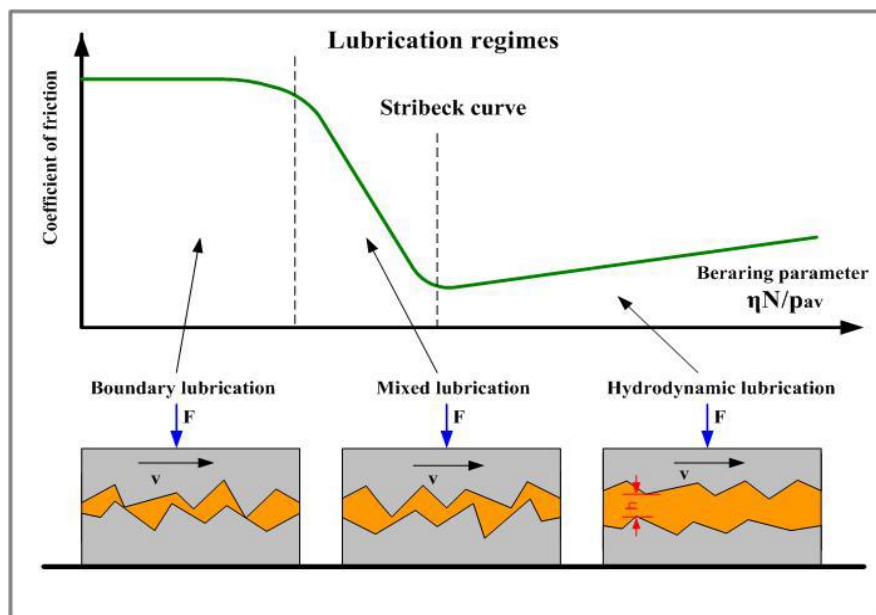
سرعت چرخش بالا همراه با بار یاتاقان کم در اصطکاک هیدرودینامیکی توسط فیلم روغن بین سطوح سایش انجام می‌شود. هیچ تماس بین سطوح در روانکاری هیدرودینامیک رخ نمی‌دهد. فیلم روغن سطوح یاتاقان و شفت را به علت نیرویی از هم جدا نگه می‌دارد که بلند کردن هیدرودینامیک نامیده می‌شود که این نیرو توسط فشار روان کننده از طریق فاصله همگرا بین ژورنال گریز از مرکز و یاتاقان تولید می‌شود. یاتاقان‌هایی که تحت شرایط روانکاری هیدرودینامیک کار می‌کنند یاتاقان ژورنال هیدرودینامیک نامیده می‌شوند.

¹ Micro asperities

² Mixed lubrication

³ microasperities

⁴ Hydrodynamic lubrication

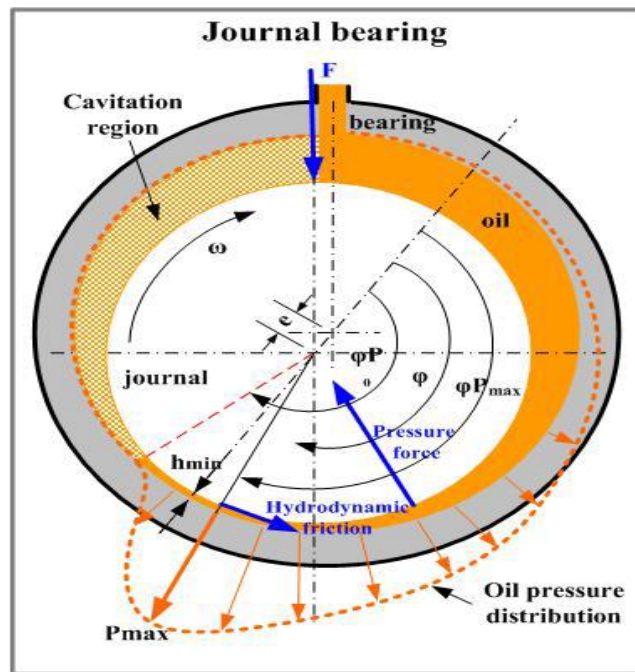


شکل ۲-۱ - انواع روش‌های روغن‌کاری

شکل ۲-۱ متمایز شده اند که رابطه بین ضریب اصطکاک و پارامتر یاتاقان (η^*N/P_{av}) مشخص شده است. (η - گرانروی دینامیک روان کننده، N - سرعت چرخش، P_{av} - میانگین فشار بر یاتاقان) پایداری روانسازهای مختلف را می‌توان توسط منحنی Stribeck نشان داد؛ افزایش دما به دلیل حرارت تولید شده توسط اصطکاک باعث کاهش گرانروی روان کننده و پارامتر یاتاقان می‌شود. با توجه به منحنی Stribeck کاهش پارامتر یاتاقان در روانکاری ترکیبی باعث افزایش ضریب اصطکاک به دنبال افزایش بیشتر دما و در نتیجه افزایش ضریب اصطکاک می‌شود، بنابراین روغن‌کاری ترکیبی ناپایدار است. افزایش پارامتر یاتاقان به دلیل افزایش درجه حرارت (گرانروی پایین‌تر) در رژیم روانکاری هیدرودینامیک سبب می‌شود که ضریب اصطکاک با کاهش ناشی از درجه حرارت پایین بیاید؛ سیستم خود را تصحیح کرده و به این دلیل، روانکاری هیدرودینامیک با ثبات است. در زمان کارکرد موتور، با قرارگیری موتور در شرایط مختلف، وضعیت رژیم روانکاری در بخش‌های مختلف هم می‌تواند تغییر کند. خرابی روغن هم می‌تواند در تغییر این رژیم روانکاری تأثیرگذار باشد.

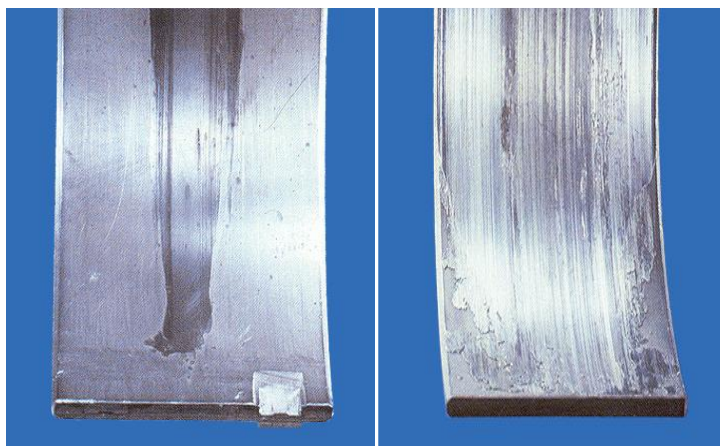
ج) یاتاقان ژورنال هیدرودینامیک

یاتاقان ژورنال هیدرودینامیک، یاتاقانی است که با روانکاری هیدرودینامیک کار می‌کند که سطح یاتاقان از سطح ژورنال با فیلم روانساز که با چرخش ژورنال ایجاد شده، از هم جدا می‌شود. بسیاری از یاتاقان‌های موتور یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیک در شرایط کارکرد عادی می‌باشند.

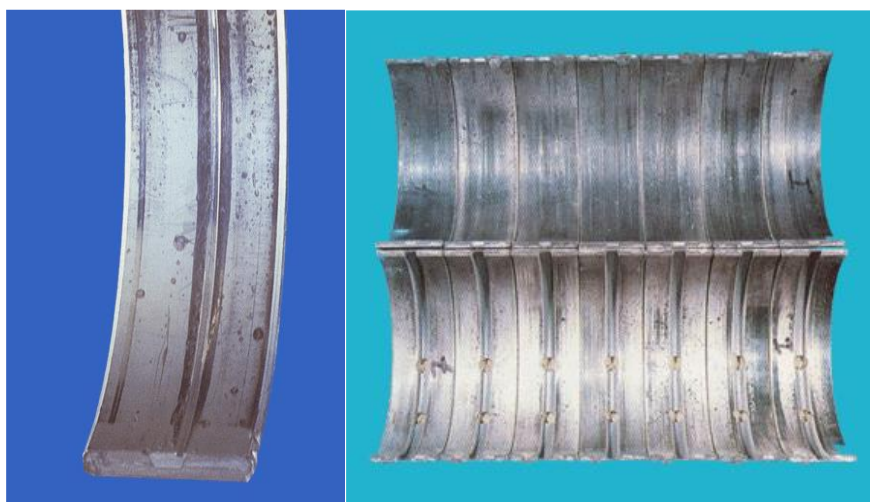


شکل ۳-۱- یاتاقان ژورنال

شکل ۳-۱ یاتاقان ژورنال هیدرودینامیک و یک ژورنال چرخنده در جهت عقربه‌های ساعت را نشان می‌دهد. چرخش ژورنال باعث پمپاژ روغن و جریان یافتن آن در اطراف یاتاقان در جهت چرخش می‌شود. اگر هیچ نیروی اعمال شده به ژورنال وجود نداشته باشد، موقعیت ژورنال متحدالمرکز با موقعیت یاتاقان باقی خواهد ماند. در صورتی که بر اثر خرابی روغن گرانیروی آن کاهش یابد با افزایش دما و افزایش بار، روانکاری از حالت هیدرودینامیک به حالت روانکاری ترکیبی یا مرزی تغییر می‌کند؛ که منجر به برخورد فلز با فلز، سایش و در نهایت یاتاقان زدن موتور می‌شود. علاوه بر تغییر گرانیروی خرابی‌های دیگر مثل ذرات سایشی و لجن هم باعث خرابی یاتاقان می‌شود. در شکل ۴-۱ خرابی یاتاقان بر اثر نرسیدن روغن کافی و در شکل ۵-۱ خرابی یاتاقان بر اثر ذرات سایشی نشان داده شده است [۳].



شکل ۴-۱- خرابی یاتاقان بر اثر کمبود مایع روانکار [۳]



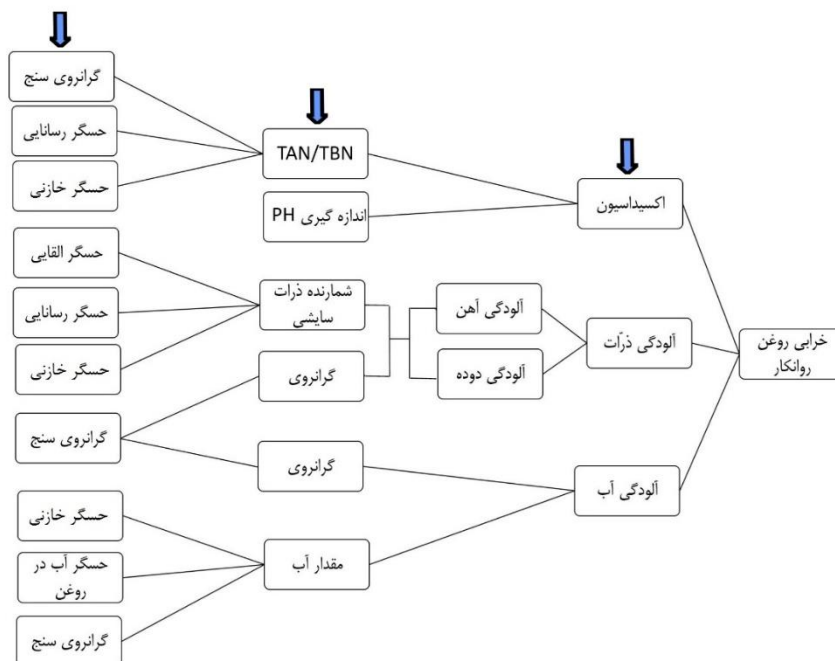
شکل ۵-۱- خرابی یاتاقان ثابت بر اثر سایش ذرات [۳]

۴-۱ پارامترهای مهم خرابی روغن

پارامترهایی که عملکرد روغن و یا سطح خرابی آن را توصیف می‌کند پارامترهای عملکردی نامیده می‌شود. این پارامترهای عبارتند از گرانروی، مقدار آب، عدد اسیدی و عدد بازی کل^۱، شمارش ذرات سایشی، مقدار PH و غیره. هر پارامتر عملکردی را می‌توان با برخی روش‌های سنجش، اندازه‌گیری کرد.

^۱ TAN or TBN: total acid/base number

رابطه بین ویژگی‌های اساسی خرابی، پارامترهای عملکردی و حسگرهای وضعیت روغن موجود در شکل ۶-۱ نشان داده شده است [۵].



شکل ۶-۱- رابطه بین ویژگی‌های اساسی خرابی، پارامترهای عملکردی و حسگرهای وضعیت روغن موجود [۵]

جدول ۱-۱ [۵] پارامترهای عملکرد برای انواع مختلف برنامه‌ها و معیار آن‌ها برای خرابی روغن را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، برای محتوای آب، درصد آلودگی آب در روغن را اندازه‌گیری می‌کنند. این پارامترها عملکردی برای بررسی گیربکس، سیستم‌های هیدرولیک، موتور، کمپرسور و توربین لازم و حیاتی است. محتوای آب می‌تواند توسط حسگر ظرفیت خازنی، حسگر گرانروی و حسگر آب در روغن اندازه‌گیری شود.

جدول ۱-۱- پارامترهای عملکرد، برنامه‌ها و معیار برای خرابی روغن روانکار [۵]

پارامتر عملکردی	عملکرد اندازه گیری	واحد	معیار خرابی	کاربردها					روش های اندازه گیری موجود
				چرخ دنده	سیستم های هیدرولیک	موتور	کمپرسور	توربین	
گرانروی (۴۰ °C)	آلودگی روانکار توسط روغن های دیگر / اکسیداسیون	Cst (mm ² /s)	≥ 55 ≤ 50	بله	بله	بله	بله	بله	گرانروی حرکتی
گرانروی (۱۰۰ °C)			≥ 10 ≤ 8						گرانروی میکرو صوتی
مقدار آب	درصد آب	%	≤ 2	بله	بله	بله	بله	بله	حسگر خازنی، گرانروی حرکتی، حسگر آب در روغن
TAN/TBN	عدد اسیدی یا بازی روانکار	mgKOH/gm	≥ 0.6 ≤ 0.05	بله	بله	بله	بله	بله	حسگر خازنی، گرانروی حرکتی، حسگر رسانایی
نقطه اشتعال	حضور محلول یا گاز در روان کننده	°C	≥ 220 ≤ 140	نه	بله	بله	نه	نه	دماسنج
تعداد ذرات سایشی	ذرات سایشی در میلیون	ppm	≤ 40	بله	بله	بله	بله	بله	حسگر خازنی، گرانروی حرکتی، حسگر رسانایی، حسگر القایی
شمارش ذرات	شمارش ذرات برای اندازه نمونه ۱۰۰CC	mg/L	≤ 200	نه	بله	نه	نه	بله	

۱-۴-۱ آلودگی آب و تأثیر آن بر روی عملکرد روغن روانکار

منبع آلودگی آب ممکن است شامل موارد زیر باشد که توسط شرکت کیتی ویک [۶] و بنر و همکاران [۷] گزارش شده است:

- (۱) نشت از کولر روغن، شارژ کولر هوا و کویل گرمایش بخار، تراکم رطوبت جوی
 - (۲) ضربه‌های گازی از فضا‌های احتراق موتور دیزل و یا رینگ کمپرسور
 - (۳) نشت در منافذ مخزن (به خصوص مواردی که در معرض آب و هوا قرار دارد)
 - (۴) نشت پوشش سدکننده از طریق ترک‌ها و آب‌بندها
 - (۵) آب یک محلول طبیعی از احتراق موتورهای بنزینی و دیزلی است و انبساط و انقباض هوا در محفظه باعث چگالش آب در هوا می‌شود.
 - (۶) آب‌بند در اطراف شفت‌های دوار اجازه ورود آب را می‌دهد.
 - (۷) ورود آب از چند راهه اگزوز آب خنک و یا مافلر اگزوز موتورهای دریایی
- زمانی که سرعت و درجه حرارت بالا باشد، مخلوط روغن و آب ترکیب تشکیل می‌دهد؛ که مانع از تشکیل یک فیلم روان کار مؤثر بین اجزای تماسی می‌شود. به طور کلی، محتوای بیش از حد آب منجر به روانکاری ناکافی و در پی آن سایش و خوردگی می‌شود که توسط کانتنر و همکاران [۸] گزارش شده است. سطح قابل قبول برای محتوای آب در روغن‌های موتور و چرخ‌دنده ۱ تا ۲ درصد می‌باشد که توسط ژاگوبی و ولکوپ در سال ۲۰۰۴ گزارش شده است [۹]. آلودگی آب می‌تواند تأثیرات زیر را بر خرابی روغن داشته باشد:

- (۱) به طور معمول با گذشت عمر روغن، گرانروی تغییر می‌کند. با این حال، اگر آلودگی آب وجود داشته باشد، نرخ تغییرات گرانروی به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد که باعث تضعیف عملکرد روغن خواهد شد.

۲) آب می‌تواند باعث جاننشینی روغن در تماس با سطوح، کاهش میزان روانکاری سطوح فعال شود که خود عاملی برای خرابی روغن است.

۳) آب آلاینده مهمی در بسیاری از سیستم‌های روانکار کننده به دلیل پتانسیل برای ایجاد خرابی از طریق تعداد زیادی مکانیسم‌ها است.

۴) آلودگی آب در مخازن ذخیره سازی روغن می‌تواند باعث رشد میکروبیولوژیکی، تشکیل مخمر، کپک‌ها و باکتری‌ها شود که فیلتر را مسدود کرده و خیلی سریع باعث زنگ زدن سیستم سوخت می‌شود (کیتی ویک ۲۰۱۱) [۶].

۵) آلودگی آب در روغن‌های موتور در طول ذخیره سازی و استفاده در شرایط دمای پایین باعث تشکیل رسوب می‌شود. این رسوبات که از قیر و مواد افزودنی تشکیل شده است، ثبات کلوئیدی روغن را مشخص می‌کند، کاهش غلظت مواد افزودنی باعث بد شدن خواص عملکرد روغن موتور می‌شود که توسط کرنیو و همکاران در سال ۲۰۰۶ گزارش شده است [۱۰].

۱-۴-۲ اکسیداسیون و تأثیرات آن بر روی روغن روانکار

روغن از هیدروکربن اکسیده با زنجیره بلند تشکیل شده است. روغن در یک موتور عملیاتی در معرض دمای بالای قرار دارد که آن را بیشتر در معرض حمله رادیکال‌های آزاد قرار می‌دهد. این بدان معنی می‌باشد که گروه‌های هیدروکسیل ممکن است در مکان‌های تصادفی در طول مولکول روغن با زنجیره بلند قرار گیرند. گروه‌های هیدروکسیل خواص روانکاری روغن را آسیب می‌زنند؛ بنابراین برای جلوگیری از این اتفاق آنتی اکسیدان اضافه می‌شود که رادیکال‌های آزاد را قبل از آسیب رساندن به روغن از بین ببرد. با این وجود، مقداری اکسیداسیون همیشه شکل می‌گیرد و به نظر می‌رسد که به عنوان نتیجه یک کربن کلوئیدی منجر به رنگ سیاه و رسوبات جامد می‌شود. ساختار خرابی دومی رخ می‌دهد که توسط ترنر و آستین یافت شده است [۱۱]. به عنوان مثال، در یک سطح یاتاقان نیروهای برشی بسیار وجود دارد و این می‌تواند اثر فیزیکی جدا شدن یک مولکول زنجیره بلند و تشکیل دو رادیکال باشد. این‌ها ممکن است یا با اکسیژن واکنش دهند که گروه‌های هیدروکسیل تشکیل می‌شود و یا با آنتی

اکسیدان هایی که به روغن اضافه شده، ترکیب شود. در هر صورت واکنش منجر به کاهش اجزای وزن مولکولی که در روغن ایجاد شده، می‌شود.

روند تخریب مواد شیمیایی از جمله بسیاری از واکنش دهند ها بسیار پیچیده است. خانواده واکنش‌ها و عکس‌العمل‌های اولیه برای خرابی روان کننده در قالب معادلات واکنش‌های شیمیایی توسط دیابی و همکاران شرح داده شده است [۱۲، ۱۳].

اثرات اکسیداسیون به علت واکنش شیمیایی و همچنین به عنوان محصولات احتراق، تولید ترکیبات بسیار اسیدی در داخل موتور می‌باشد. این ترکیبات اسیدی باعث خوردگی قطعات داخل موتور، رسوب، تغییر در گرانش، پوشش (لاک)، لجن و سایر محصولات نامحلول حاصل از اکسیداسیون می‌شود که می‌تواند باعث خرابی عملکرد و بقای موتور برای یک دوره زمانی شود. محصولات اکسیداسیون پایداری کمتری نسبت به ساختار مولکولی هیدروکربن پایه اصلی دارند و در اثر حمله ترکیبات اسیدی رسوب و لجن تولید می‌شود. وقتی یک موتور در یک چرخه گرمایش و سرمایش قرار می‌گیرد این لجن می‌تواند سخت شود و مشکلات دیگری مانند محدود کردن معابر و کاهش تلرانس اجزا بخصوص در ناحیه رینگ پیستون، ساق سوپاپ و پیستون پین به وجود آید. پوشش (لاک) می‌تواند به چیزهایی مانند پیستون و سوپاپ چسبیده شود. پوشش همچنین می‌تواند انتقال حرارت از پیستون به سیلندر را تحت تأثیر قرار دهد و در موارد شدیدتر می‌تواند موجب شوک پیستون در سیلندر شود. پیستون همچنین شیار گردش روغن را در خود دارد که می‌تواند بسته شود، که در این صورت باعث افزایش مصرف روغن و رسوب اضافی ایجاد شده روی رسوب قبلی می‌شود. رسوب در پیشانی و شیار پیستون در طی یک دوره زمانی می‌تواند باعث احتراق کوبنده و یا پیش احتراق شود که باعث افزایش نیاز به اکتان سوخت انفجار، ایجاد نویز و افزایش گازهای خروجی آگروز هیدروکربن و اثر مخرب کلی در موتورهای احتراق داخلی شود. رسوب‌ها همچنین باعث تنگ شدن مسیرها مانند پمپ روغن، فیلتر روغن و مسیرها می‌شود [۱۴].

۱-۴-۳ آلودگی ذرات و تأثیر آن بر عملکرد روغن:

عملکرد روغن اگر در دمای روغن پایین استفاده شود، نسبتاً پایدار باقی می ماند. در مواردی که روغن در دماهای بالا استفاده می شود، زوال روغن شروع می شود. به عنوان یک قاعده کلی، به ازای ۱۰ درجه افزایش دما میزان اکسیداسیون دو برابر می شود و به همین ترتیب شکل گیری محصولات اکسیداسیون بیشتر می شود. در ابتدا این ذرات اکسیداسیون، محصولات نرم و چسبنده هستند، هنگامی که این ذرات در تماس با مناطق با درجه حرارت بالا قرار می گیرد این منجر به تشکیل ذرات سخت و ساینده می شود. این ذرات در تماس با اجزای موتور، ذرات سایشی تولید می کند که باعث کاهش بیشتر کارایی سیستم می شود. بنابراین برای کنترل سایش و افزایش عملکرد، گرانبوی، آلاینده های نامحلول و پارامترهای عملکردی کمک کننده هستند؛ که توسط شارما و گاندی [۱۵] گزارش شده است.

در طول بهره برداری از یک سیستم روغن کاری، ذرات سایشی تولید می شود. این ذرات می تواند فیلتر را مسدود کند که حتی ممکن است فیلتر پاره شود و در نتیجه باعث افزایش سطح آلودگی به سطح هشداردهنده با امکان کاهش عملکرد و یا یک شکست فاجعه بار شود. همچنین، بستن فیلتر می تواند راه روغن را مسدود کند و باعث نرسیدن روغن در محل برخورد شود که حتی ممکن است باعث شوک یا خرابی فاجعه بار شود. شمارش ذرات را می توان برای تعیین سطح ذرات حاضر در سیستم استفاده کرد. روش طیفسنجی را می توان برای شناسایی ساختار عنصر فلزی و سطح آن و ارتباط آن با منبع خود، مورد استفاده قرار داد. همچنین آلودگی محیط در طول برنامه نگهداری و تعمیرات ناصحیح می تواند باعث افزایش آلودگی ذرات می شود به عنوان مثال تعویض یا اضافه کردن روغن، تعویض فیلتر هوای ورودی و یا تمیز کردن آن.

۱-۴-۴ آلودگی سوخت

وقتی سوخت از محفظه احتراق وارد کارتر می شود روی روغن و اجزای موتور اثر می گذارد. منشاء ورود سوخت،

احتراق ناقص، احتراق در حالت سرد موتور در دور درجا، وجود نسبت هوا به سوخت پایین، خرابی افشانه سوخت و یا خرابی پمپ سوخت در موتورهای دیزل است.

یکی از اثرات این اتفاق شستن روغن از اطراف سیلندر و پیستون است به طوری که پیستون بدون روغن کاری جابه‌جا می‌شود. در واقع فقدان روان کننده به این معنی است که سطوح فلزی در برابر یکدیگر جابه‌جا می‌شود؛ که این باعث برخورد مستقیم فلز با فلز و سایش می‌شود. و می‌تواند منجر به سایش شدید پیستون شود.

یکی دیگر از تأثیرات نشت سوخت در کارتر رقیق شدن روغن است. این نشت باعث کاهش گرانشی روانکار می‌شود به این معنی که ضخامت فیلم روغن کم شده و توانایی روغن برای مقاومت در برابر بارهای بالا که می‌تواند در نقاط خاص مانند یاتاقان‌های میله‌ای و نواحی میل‌لنگ به وجود آیند، کاهش می‌یابد. اگر گرانشی کم شود، این عامل باعث ایجاد تماس بین سطوح فلزی می‌شود و در نهایت منجر به سایش سریع اجزا می‌شود.

اثر سوم ورود سوخت به کارتر مربوط به سوخت‌های زیستی است. در حال حاضر هر دو سوخت دیزل و بنزین شامل سوخت‌های زیستی در فرمول خود (بیودیزل در سوخت دیزل و بیواتانول در سوخت بنزینی) هستند.

وقتی سوخت در معرض دمای بالا در کارتر قرار می‌گیرد قسمتی فسیلی سوخت تبخیر می‌شود، این باعث می‌شود که بیودیزل که گرانشی بالاتری دارد باقی بماند و سبب افزایش ضخامت لایه روانکاری و اصطکاک شود. با توجه به این اثر، گرانشی مخلوط روغن و مخلوط سوخت افزایش می‌یابد و سرعت سایش بر روی یاتاقان می‌تواند به میزان قابل توجهی افزایش یابد [۱۶].

آب‌بندی معیوب به دلیل اتصالات نامناسب، استفاده از آب‌بند خراب و آسیب دیده در طول ذخیره سازی و ناسازگاری آن با روغن، ممکن است این مشکل را به وجود آورد. به طور مثال آب‌بند، واشر و رینگ معیوب در موتورهای احتراق داخلی می‌تواند باعث ترکیب سوخت و مایع خنک کننده با روغن شود و

این باعث کاهش گرانروی می‌شود. در صورتی که مقدار آن از حد مشخص پایین‌تر رود ممکن است برخورد فلز با فلز و در نتیجه افزایش اصطکاک و سایش شود [۱۵].

فصل ۲ روش ها و سیستم‌های پایش وضعیت روغن

در این فصل روش های مختلف پایش وضعیت بر اساس زمان تشخیص خرابی (روش های آفلاین و آنلاین) و سپس حسگرها و روش هایی که تاکنون برای پایش وضعیت از طریق روغن استفاده شده است، معرفی می‌شود.

۱-۲ انواع روش‌های پایش وضعیت روغن

بر اساس استانداردهای موجود صنعتی، سه دسته‌بندی از آنالیز روغن به شرح زیر وجود دارد [۱]:

۱-۱-۲ تجزیه و تحلیل در خارج از محل

دسته اول تجزیه و تحلیل در خارج از محل می‌باشد. روغن نمونه‌برداری شده و برای تجزیه و تحلیل و پیشنهاد نگهداری و تعمیرات مناسب به آزمایشگاه فرستاده می‌شود. در این روش تجزیه و تحلیل نمونه روغن از چند هفته تا یک ماه تأخیر دارد که این تأخیر پیگیری شرایط واقعی و به‌روز از روغن در موتور را غیرممکن می‌کند. در صورت خراب بودن موتور یا روغن در طول جواب نمونه برداری با تأخیر، هزینه شکست ها و خرابی ها بالا خواهد بود.

در حال حاضر، بسیاری از صنایع از جمله پایش وضعیت موتورهای خاص و توربین های بادی عمدتاً با استفاده از دسته اول برای تجزیه و تحلیل روغن استفاده می‌کند. روغن این تجهیزات معمولاً در بازه ۳ الی ۱۲ ماهه نمونه برداری شده و به آزمایشگاه آنالیز روغن برای بازخورد شرایط روغن ارسال می‌شود. این آزمایشات دقت بالایی دارند ولی بسیار کند هستند و در حوزه شناسایی خرابی، مناسب عمل نمی‌کنند.

۲-۱-۲ تجزیه و تحلیل با کیت‌های قابل حمل

دسته دوم تجزیه و تحلیل روغن با کیت‌های قابل حمل است. در این روش مهندسان مجبورند هر بار از ماشین نمونه روغن بگیرند به طور مثال اگر روغن توربین بادی مورد بررسی باشد در این صورت باید از دکل بالا رفته و نمونه روغن تهیه کنند. نمونه روغن را در کیت قرار داده و در محل به صورت آنی اکتساب داده کنند. با این حال، این کیت آزمون معمولاً در اندازه‌های قابل حمل و کارکرد محدود است. شکل ۱-۲ نمونه‌ای از این کیت‌های قابل حمل ساخت شرکت kittiwake را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲ کیت آنالیز روغن ساخت شرکت kittiwake [۱۷]

۳-۱-۲ تجزیه و تحلیل روغن به صورت آنلاین

دسته سوم تجزیه و تحلیل روغن به صورت آنلاین است. اطلاعات وضعیت سلامت روغن از طریق حسگرها در سیستم گردش روغن جمع‌آوری شده و به صورت لحظه‌ای اطلاعات روغن موتور و در پی آن اطلاعات سلامت موتور بررسی و پایش می‌شود و در صورت لزوم به مراکز تشخیص از راه دور منتقل می‌شود. داده‌های جمع‌آوری شده توسط الگوریتم توسعه یافته تجزیه و تحلیل شده و پیشنهاد نگهداری و تعمیرات مناسب در زمان لحظه‌ای ارائه می‌شود.

هدف از پایش وضعیت روغن به صورت آنلاین و تشخیص خرابی این است که تعیین کند آیا روغن به درجه‌ای از خرابی رسیده است که نتواند عملکرد محافظتی خود را انجام دهد پایش آنلاین روغن هشدار زودهنگام قبل از شکست کامل در زمان آنی را فراهم می‌آورد. قابلیت آنلاین نظارت بر وضعیت روغن، اجازه می‌دهد تا پیش بینی عمر مفید باقی مانده روغن دقیق تر شود و برنامه نگهداری و تعمیرات بهینه‌تر و چابک‌تر را نتیجه دهد.

تعمیرات غیرمنتظره اجزای محرک ماشین مانند چرخ‌دنده همواره با هزینه‌های بالا همراه است و این حسگرها در این حوزه می‌توانند در کاهش هزینه تعمیرات تأثیر گذار باشند. اجرای آنلاین پایش وضعیت روغن، هزینه تعویض غیرضروری روغن را کاهش می‌دهد. در برنامه‌های نگهداری اکثر تجهیزات، روان کارها قبل از پایان عمر خود تعویض می‌شود.

۲-۲ حسگرها و سیستم‌های نظارت بر پارامترهای عملکرد روغن

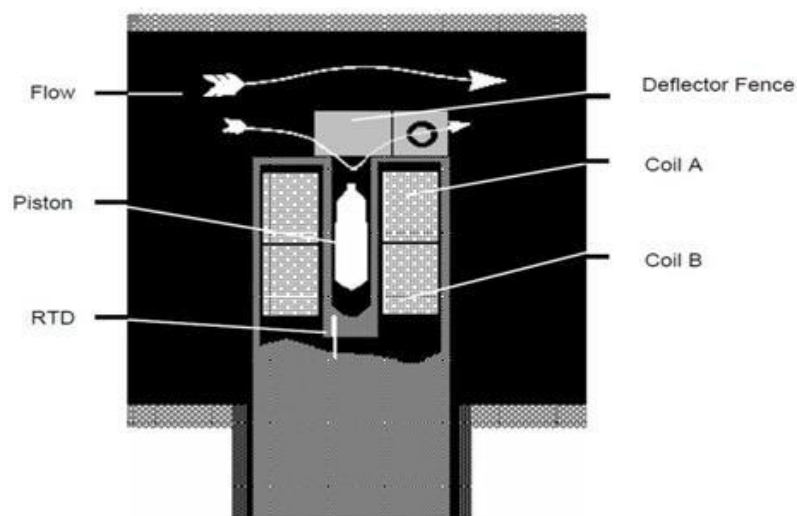
حسگرها و سیستم‌های پایش وضعیت روغن با توجه به روش کارکرد به دسته‌های فیزیکی، شیمیایی، نوری، گرانیوی میکروصوتی، رسانایی، مغناطیسی و خازنی تقسیم شده‌اند.

۱-۲-۲ روش‌های فیزیکی

روش‌های فیزیکی پایش وضعیت روغن به ۴ روش زیر دسته بندی شده‌اند:

۱-۱-۲-۲ روش‌های مبتنی بر الکترومغناطیس

تمام ویژگی‌های اساسی خرابی روغن بر گرانیوی مؤثر است. (گرانیوی حرکتی می‌تواند توسط یک گرانیوی حرکتی سنتی که آن را گرانیوی الکترومغناطیسی می‌نامند، بدست آید). شکل ۲-۲ طرحی از گرانیوی سنج الکترومغناطیس را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲- گرانروی سنج حرکتی ساخت شرکت Cambridge Viscosity [۱۸]

این نوع از حسگرهای گرانروی سنج شامل یک پیستون است که در روغن آزمون غوطه‌ور شده است و کوئل در داخل بدنه حسگر مغناطیسی پیستون را مجبور به عقب جلو رفتن در فاصله تعیین شده می‌کند. توسط انرژی متناوب کوئل با یک نیروی ثابت، مدت زمان یک دور حرکت پیستون اندازه‌گیری می‌شود. افزایش گرانروی با استفاده از زمان حرکت آهسته پیستون احساس می‌شود. زمان مورد نیاز برای پیستون برای تکمیل یک چرخه با دو راه (رفت و برگشت)، اندازه‌گیری دقیقی برای گرانروی است. دیواره انحرافی به طور مداوم برای انحراف (فرستادن) نمونه تازه به محفظه اندازه‌گیری، عمل می‌کند. چون اندازه‌گیری حرکت پیستون در دو جهت است، تغییرات به دلیل گرانش یا جریان نیروها از بین می‌رود. همچنین، به دلیل این که پیستون دارای جرم بسیار کمی است، نیروهای مغناطیسی تا حد زیادی هرگونه اختلالات به علت ارتعاش را دفع می‌کنند. بررسی اسمیتگال و مویر [۱۸] در موتورهای دیزل ثابت کرد که گرانروی حرکتی قادر به تشخیص ذرات دوده، آلودگی آب و اکسیداسیون روان کننده است. فرر و امرت [۱۹] از یک حسگر گرانروی بر اساس ارتعاش عنصر پیزوالکتریک برای پایش آنلاین روغن موتور استفاده کرده‌اند. گرانروی سنج حرکتی قادر به نظارت بر ویژگی‌های اساسی خرابی روغن به صورت آنلاین با پیچیدگی پردازش داده پایین و هزینه تعمیر و نگهداری کم هست.

۲-۱-۲-۲ روش های مبتنی بر مافوق صوت

صدا و ارتعاش برای بسیاری از برنامه‌های کاربردی نظارت بر سلامت استفاده می‌شود. در مورد نظارت بر وضعیت روغن اولین پژوهش با استفاده از فراصوت در سال ۱۹۸۰ انجام شده است. بهرا [۲۰] این روش را با یک سیستم دارای یک حسگر و گیرنده توسعه داده است. گیرنده طوری تنظیم است که تنها امواج فراصوت پراکنده شده توسط ذرات جامد روغن در مایع هیدرولیک تمیز را تشخیص می‌دهد. این روش قادر به نظارت بر سلامت آنلاین است. با این حال، هیچ سابقه‌ای برای استفاده از این روش برای نظارت بر روغن کاری سنگین مانند موتور یا روغن چرخ دنده گزارش نشده است.

۳-۱-۲-۲ روش های مبتنی بر هدایت حرارتی

یکی دیگر از روش‌های فیزیکی تشخیص زوال روانکار هدایت حرارتی است. کانتنر و همکاران [۸] گزارش دادند که آلودگی آب و خرابی فرآیندها در روغن معدنی منجر به افزایش هدایت حرارتی می‌شود، که این، پتانسیل حسگر هدایت حرارتی، در زمینه نظارت بر وضعیت روغن را نشان می‌دهد. میکرو حسگر با لایه داغ به صورت ویژه طراحی شده است، این حسگر با استفاده از یک لایه غیر هادی با ساختار مولیبدن در یک لایه شیشه‌ای با روش انتقال حرارت از طریق سیم داغ ساخته شده است. این نوع از حسگرها قادر به نظارت بر سلامت روغن در زمان لحظه‌ای هستند و ممکن است پتانسیل نظارت بر خرابی اکسیداسیون روغن را داشته باشند. استحکام و حساسیت تعادل ساختار حسگر ممکن است به تست‌های بیشتری به منظور بهبود دوام و اثرپذیری در محیط‌های صنعتی نیاز داشته باشد. طرحهای مدل های صنعتی این نوع حسگرها وجود ندارد.

۴-۱-۲-۲ روش‌های مبتنی بر فروگرافی

قطعات فرومغناطیس جمع آوری و به آزمایشگاه برای تجزیه و تحلیل فروگرافی بیشتر ارسال می‌شود. فروگرافی روش سنتی تشخیص معمولی برای تجزیه و تحلیل ذرات موجود در روغن است. این روش از

آزمایش توسط میکروسکوپ استفاده می‌کند و در دهه ۱۹۷۰ برای پیش بینی نگهداری و تعمیرات توسعه داده شده است، در ابتدا ذرات آهن در روانکارها تجزیه و تحلیل شده‌اند. لوی و الیاز [۲۱] از فروگرافی، طیف سنجی نشری اتمی، اسکن میکروسکوپ الکترونی و تجزیه و تحلیل کمی تصویر به منظور تشخیص انواع ذرات سایشی روغن‌ها استفاده کرده‌اند. این روش با موتور وانکل^۱ تست شده است. با این حال این روش قادر به نظارت بر سلامت روغن به صورت آنلاین نیست و نیاز به سطح بالایی از پردازش داده‌ها و تجهیزات تست پرهزینه دارد.

۲-۲-۲ روش‌های شیمیایی

روش‌های شیمیایی شامل دو روش اندازه‌گیری pH و نظارت آلاینده‌های فیلم نازک مطابق زیر دسته‌بندی می‌شود:

۱-۲-۲-۲ اندازه‌گیری PH

مان [۱۴] گزارش کرده است که اکسیداسیون به علت واکنش شیمیایی و همچنین به‌عنوان محصول تولیدشده توسط احتراق موتور باعث تولید ترکیبات اسیدی نسبتاً بالا در داخل موتور می‌شود. این ترکیبات باعث خوردگی قطعات داخل موتور، رسوب، تغییر گرانشی روغن و سایر محصولات اکسیداسیون نامحلول می‌شود که می‌تواند باعث عملکرد بد موتور در یک دوره زمانی شود. وجود این ترکیبات باعث تغییر pH روغن می‌شود. دونگ و همکاران [22] یک سنسور با روش اندازه‌گیری تعداد اسید کل با ریز پردازنده کنترلی طراحی کرده‌اند. روش سنجش آن‌ها نیازمند درجه بالایی از فیلتر پردازش سیگنال می‌باشد.

¹ Wankel

۲-۲-۲-۲ نظارت آلاینده های فیلم نازک

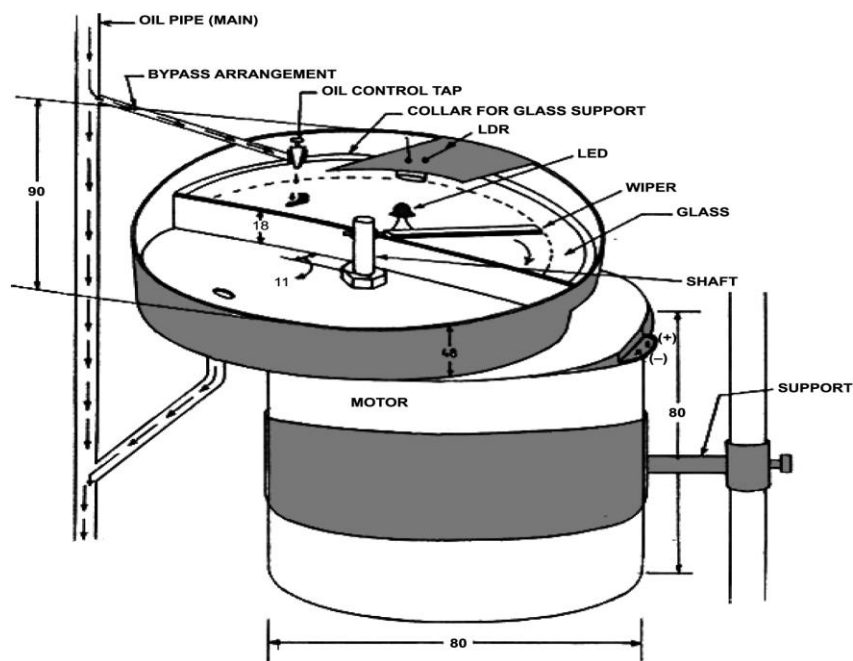
روش مانیتور آلاینده فیلم نازک از یک فیلم نازک فلزی که بخشی از یک مدار الکتریکی را تشکیل می‌دهد، در جریان روغن برای نظارت بر آلودگی ذرات، استفاده می‌شود که توسط هالدرمن گزارش شده است [۲۳]. این فیلم در جریان روغن قرار دارد و به طور مستمر توسط ذرات جامد در روغن، فرسایش می‌یابد. به عنوان نتیجه، مقاومت افزایش می‌یابد. این روش وابسته به اندازه و غلظت ذرات نیاز به نگهداری مکرر دارد.

۳-۲-۲ روش‌های نوری

روش‌های نوری به دو دسته بازتاب نوری و جذب مادون قرمز به شرح زیر دسته بندی شده است:

۱-۳-۲-۲ شفافیت یا بازتاب نوری

این روش ارتباط شفافیت نوری و یا نرخ بازتاب روغن با ویژگی‌های اساسی خرابی روغن است. حسگر کیفیت روغن با پراکندگی نور با تکیه بر روش‌های طیفسنجی مانند مادون قرمز، فلورسانس طیفسنجی رامان انجام می‌شود. نشانه‌های مؤثر از وضعیت روغن نیاز به یک فرایند کالیبراسیون با استفاده از طیف نمونه روغن مرجع و تجزیه و تحلیل داده‌های رگرسیون برای مجزا کردن نفوذ آلاینده در هر طیف انجام می‌شود. پیاده سازی تجاری آن از ساده‌ترین و کم هزینه‌ترین حسگر که تنها نظارت بر جذب نور در چند فرکانس را انجام می‌دهد تا پیچیده‌ترین آنها که طیفسنجی تداخل با وضوح بالا را پیاده سازی می‌کند، می‌تواند باشد [۲۴]. کومار و موکر جی [۲۵] یک حسگر نوری با مقاومت وابسته به نور (LDR) برای ضبط شفافیت روغن و سپس تبدیل آن به مقاومت ساخته است. این سیستم حسگر در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳- حسگر نوری ساخته شده توسط کومار و موکرجی [۲۵]

حسگر در یک موتور بنزینی شش سیلندر مورد آزمایش قرار گرفت. نویسندگان داده‌های مقاومت را با ساعات کار، گرانبوی و اکسیداسیون ارتباط داده‌اند و اثر بخشی حسگر طراحی شده، اثبات شده است. با توجه به مقاله، این حسگر نوری ویژگی‌های اصلی خرابی روغن را پوشش داده است و قابلیت تشخیص و پیش‌آگهی به صورت آنلاین را دارا می‌باشد.

۲-۳-۲-۲ جذب مادون قرمز

زمانی که روغن رو به زوال می‌رود ترکیب نیترات تولید می‌شود. این ترکیب تابش مادون قرمز (IR) با طول موج ۶/۱۳ میکرون را جذب می‌کند. اگستون [۲۶] نشان داد که این اثر در یک حسگر که جذب مادون قرمز در طول یک مسیر ثابت را اندازه‌گیری می‌کند با وضعیت روغن ارتباط دارد. اگرچه این حسگر قادر به نظارت آنلاین خرابی روغن است اما این سیستم سنجش نیاز به بهبود در آینده برای غلبه بر مشکلات تکرارپذیری و کاهش هزینه‌های تولید دارد.

۲-۲-۴ گرانروی میکروصوتی

یکی از روش‌های فیزیکی پایش روغن، بررسی عملکرد گرانروی روغن در شرایط کارکرد است. گرانروی یک شاخص مهم از وضعیت روغن است، زیرا در صورت وجود خرابی در روان کننده به طور ناگهانی تغییر می‌کند. چندین روش سنجش برای انجام اندازه‌گیری گرانروی وجود دارد. تغییر گرانروی، در بالاتر یا پایین‌تر از محدوده کارکرد معمولاً نشان می‌دهد که روغن خراب شده است. به این دلیل تمام ویژگی‌های اساسی خرابی روغن از جمله اکسیداسیون، آب، آلودگی ذرات و محلول سوخت می‌تواند توسط گرانروی شناسایی شود. گرانروی معمولاً به‌عنوان استاندارد برای سنجش خرابی روان کننده، به خاطر استقلال در شرایط عملیاتی مختلف، در نظر گرفته می‌شود.

آگوستن و همکاران [۲۴] از یک حسگر میکرو صوتی برای اندازه‌گیری گرانروی به روش الکتریکی برای کاربردهای مرتبط با خودرو استفاده کرده‌اند. این حسگر کوچک و دارای طول عمر طولانی است و می‌تواند در محیط‌های صنعتی مستقر شود. گرانروی میکرو صوتی می‌تواند ویژگی‌های اساسی خرابی روغن را به صورت آنلاین با فضای طراحی کارآمد اندازه‌گیری کند. با این حال، عدم وجود تست عملی از صنعت و مشکلات با روغن شامل اصلاح گرانروی ممکن است کاربرد آن در صنعت را محدود کند.

۲-۲-۵ روش‌های رسانایی

ساخت حسگر ویژه رسانایی الکتریکی روغن، از دیگر مواردی است که دانشمندان روی آن کار کرده‌اند. مون و همکاران [۲۷] گزارش کرده‌اند که با اندازه‌گیری رسانایی روغن توسط حسگر نانو لوله‌های کربنی^۱، میزان اکسیداسیون روغن را می‌توان تحت نظارت قرار داد. آن‌ها اطلاعات رسانایی نانو لوله‌های کربنی را با مقدار TAN از تست روغن ارتباط داده‌اند و نتایج نشان داده که حسگر نانولوله‌های کربنی در مورد خرابی اکسیداسیون مؤثر است. از آن جا که بسیاری از حسگرها با روش‌های شیمیایی مشکل

^۱ carbon nano tube

عمر نسبتاً کوتاه دارد و قادر به تشخیص آنلاین نیستند، این حسگر نانو لوله‌های کربنی هزینه نگهداری را کاهش می‌دهد و یک راه حل گرفتن داده به صورت لحظه ای ارائه می‌دهد. باسو و همکاران [۲۸] و لی و همکاران [۲۹] هر دو به این نتیجه رسیده‌اند که رسانایی با توجه به تغییرات فیزیکی و شیمیایی در مواد افزودنی روان کننده تغییر می‌کند. هر چند، این روش نیاز به دانش قبلی از فرمول روغن دارد و آن‌ها تنها در موتورهای بنزینی تست کرده‌اند، همچنین هیچ اثر حرارتی بررسی نشده بود. در حالی که حسگرهای هدایت الکتریکی قادر به تشخیص آنلاین است و نتایج در ارتباط با میزان اکسیداسیون خرابی روغن است، سخت افزار بیشتری برای پوشش ویژگی‌های اساسی روغن نیاز است.

هجز و همکاران [۳۰] فن آوری ماتریس مهره پلیمری^۱ را برای نظارت آنلاین بر مایع روغن کاری قطعات هواپیما توسعه داده‌اند (شکل ۲-۴). این روش از خواص الکتریکی یک ماتریس مهره پلیمری نامحلول برای اندازه‌گیری خرابی روغن استفاده کرده است. گروه یون از طریق کووالانسی با ماتریس هم‌مرز شده است. با اندازه‌گیری تأثیر اثر حلال پوشی بر ویژگی‌های الکتریکی (هدایت و قطبی) از ماتریس، نظارت بر زوال روغن به دست آمده است.



شکل ۲-۴ - حسگر روغن PBM [۳۰]

¹ Polymeric Bead Matrix

۲-۲-۶ شیوه مغناطیسی

هالدرمن [۲۳] از یک پلاگین مغناطیسی در جریان روغن استفاده کرد و اثرات وجود ذرات آهن در روغن را مشاهده کرد وقتی پلاگین را برداشت قطعات فرومغناطیسی جمع‌آوری شد. سپس قطعات تحت آزمایش برای تجزیه و تحلیل وضعیت قرار گرفت. تجزیه و تحلیل قطعه فرو مغناطیس معمولاً با میکروسکوپ پیچیده و وقت‌گیر است.

در حال حاضر، روش نظارت بر وضعیت روغن بر اساس مغناطیس برای تشخیص ذرات فلزی مانند ذرات آهنی که یکی از شایع‌ترین آثار آن سایش اجزا است، استفاده می‌شود. سیستم‌های نظارت خرده ذرات سایشی، توسط Poseidon system توسعه یافته‌اند (شکل ۲-۵)، همچنین حسگر حساس به آلودگی ذرات فلزی توسط شرکت Kittiwake ساخته شده است، با این حال، آلودگی ذرات تنها یکی از ۳ ویژگی اساسی تخریب روانکار است



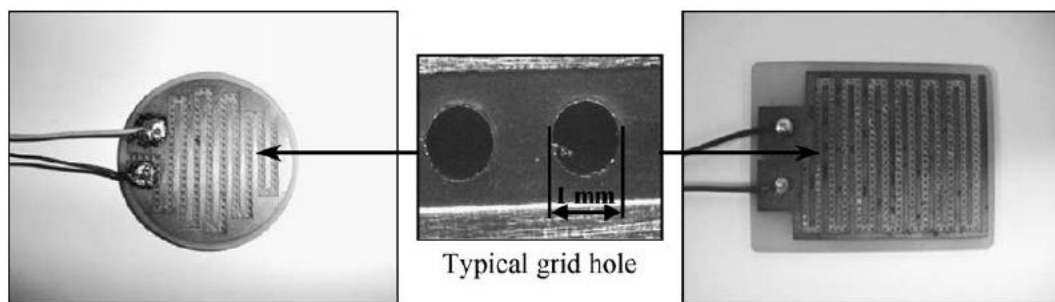
شکل ۲-۵- حسگر ذرات سایشی ساخت شرکت Kittiwake [۱۷]

۷-۲-۲ روش خازنی

روش خازنی، استفاده از روغن به عنوان دی‌الکتریک خازن است، روغن بین تیغه‌های خازن قرار می‌گیرد و اساس کار آن تغییر ضریب دی‌الکتریک روغن با تغییر کیفیت روغن روانکار می‌باشد.

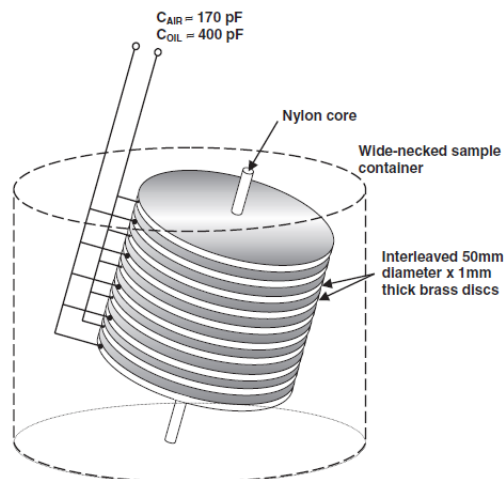
۱-۷-۲-۲ پیشینه تحقیق

تحقیقات متعددی با استفاده از خازن‌های ویژه برای اندازه‌گیری تغییرات ثابت دی‌الکتریک در روغن موردنظر به منظور نظارت بر خرابی روغن انجام شده است. در سال ۲۰۰۵ توسط چمیتگال و مایر [۱۸] ثابت شده که حسگر ظرفیت الکتریکی قادر به تشخیص اکسیداسیون روغن، آلودگی آب و تشخیص آلودگی ذرات است. رادنوی و کلیسوان [۳۱] از یک حسگر شبکه خازنی برای اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک در یک روغن با آلودگی مصنوعی استفاده کرده‌اند و سپس از روش‌های آماری برای ارزیابی تأثیر عملکرد پارامتر استفاده کرده‌اند. در این مقاله، از LCR METER استفاده شده است. شکل ۶-۲ حسگر شبکه خازنی استفاده شده توسط رادنوی و کسوان را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲- حسگر شبکه خازنی ساخت رادنوی و کسوان [۳۱]

ترنر و آستین [۱۱] ثابت دی‌الکتریک و حساسیت مغناطیسی را اندازه‌گیری کرده و سپس آن را به گرانروی با استفاده از خازن چندلایه مرتبط کرده‌اند که ساختار حسگر در شکل ۷-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۷- حسگر چند لایه ساخته شده توسط ترنر و آستین [۱۱]

آن‌ها ابتدا ظرفیت خازنی هوا را که در حدود ۱۷۰ پیکوفاراد در این حسگر است را اندازه‌گیری کرده‌اند. سپس در دمای ۱۹ درجه، حسگر در روغن برای اندازه‌گیری ظرفیت خازن غوطه‌ور شده و عملکرد آن بررسی شد.

علاوه بر این چو و پارک [۳۲] یک سیستم ساخته‌اند 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 می‌دهد.

جان و همکاران [۳۳] حسگر ثابت دی‌الکتریک را با یک روش تحلیلی به نام طیف‌سنجی دی‌الکتریک برای اندازه‌گیری میزان اکسیداسیون روغن ترکیب کرده‌اند. طیف‌سنجی دی‌الکتریک (DS) یک روش تحلیلی بر تعامل بین ماده دی‌الکتریک و انرژی الکترومغناطیسی در فرکانس رادیویی و محدوده ماکروویو است که یک روش تشخیص ساختاری قدرتمند برای ماده دی‌الکتریک است. این روش قادر به تشخیص مقدار اکسیداسیون (OD)، عدد اسیدی کل (TAN) و محتوای نامحلول (IC) است. این مقاله ثابت کرد که طیف‌سنجی دی‌الکتریک مؤثرترین روش برای استخراج مشخصه دی‌الکتریک از یک ماده دی‌الکتریک است؛ و می‌تواند به یک روش نظارت بر خرابی روغن توسعه یابد. نویسندگان معتقد بودند

که عمر مفید باقی مانده از روغن موتور می‌تواند بر مبنای آنالیز و یا در محل داده توسط طیف‌سنجی دی‌الکترونیک پیش بینی شود.

هر اندازه‌گیری از امپدانس پیچیده‌ی الکتروود در روغن شاخصی برای سنجش خرابی روغن است. در شیمی تحلیلی روش اندازه‌گیری امپدانس الکتروود به عنوان یک تابعی از فرکانس است که معمولاً به عنوان طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی^۱ نامیده می‌شود [۳۴]. بینگتون و همکاران نشان دادند که حسگر امپدانس الکتروشیمیایی برای تشخیص مواد شیمیایی و تغییر خاصیت مکانیکی روغن از جمله TAN، TBN، محتوای دوده، گرانروی و درجه نیتراسیون کاربرد دارد [۳۵، ۳۶].

حسگر تجاری EIS، شکل ۲-۸، نمونه‌ای از این روش است که توسط شرکت Poseidon System توسعه یافته است. همان طور که در نشان داده شده است. آن‌ها روشی به نام «طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی پهن باد AC» را توسعه داده‌اند. با استفاده از ارسال سیگنال ولتاژ پیچیده به مایع در یک الکتروود و دریافت توسط الکتروود دیگر، امپدانس در فرکانس‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. امپدانس اندازه‌گیری شده سپس به خواص مکانیکی و شیمیایی روغن ارتباط داده می‌شود. این حسگر، قابلیت اندازه‌گیری آب، سطح آلودگی دوده و همچنین کیفیت روغن را را دارا می‌باشد.



شکل ۲-۸- نمونه حسگر EIS شرکت Poseidon System [۳۷]

¹ Electrochemical Impedance Spectrometry

حسگرها بر اساس اندازه‌گیری ظرفیت خازنی و نوع خروجی به دو دسته تقسیم بندی می‌شوند. اول آن‌هایی هستند که تنها با تغییر در بخشی حقیقی از گذردهی کار می‌کنند و دوم که خروجی آن با نظارت بر گذردهی مختلط در ارتباط است. حسگرهایی که با گذردهی مختلط عمل می‌کنند، با ارائه خروجی مربوط به ظرفیت خازنی و اتلاف دی‌الکتریک نظارت را انجام می‌دهند. پارامتری که مربوط به این دو مقدار از گذردهی مختلط است ضریب تلفات ($\tan \delta$) است که نسبت بین بخش موهومی و بخش حقیقی است.

در سال ۲۰۰۲ کلیستر حسگری برای اندازه‌گیری کیفیت روغن بر اساس گذردهی روغن (ضریب دی‌الکتریک) شامل یک حسگر خازنی برای قرار گرفتن در معرض روغن و مدار نوسان‌ساز ساخته است؛ که از مدار اسیلاتور تشکیل شده است. دامنه خروجی وابسته به کاهش مقدار $\tan \delta$ روغن تغییر می‌کند؛ که پاسخ دامنه‌ی سیگنال خروجی به عنوان اندازه‌ای از کیفیت روغن است. $\tan \delta$ به صورت نسبت E''/E' است که در آن E'' قسمت موهومی از گذردهی مختلط است و E' بخش حقیقی است. هر نوع آلودگی روغن بر روی یک قسمت یا هر دو قسمت گذردهی روغن تأثیر می‌گذارد. گذردهی مختلط روغن‌های روانکاری با استفاده از روغن عمدتاً به دلیل روند اکسیداسیون و تخریب مواد افزودنی تغییر می‌کند. این فرآیند با حضور آلاینده مانند آب، ذرات دوده، محصولات احتراق اسیدی، گلیکول، ذرات آهنی و ذرات فلزی غیر آهنی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. خرابی بسیاری از روغن‌ها حاکی از مولکول‌هایی هستند که به طور کلی قطبی‌تر از قبل هستند. روغن‌های پایه شامل مولکول‌های هیدروکربن بزرگ است که به طور کلی قطبیدگی ضعیفی دارند، بنابراین وجود نتایج آلاینده‌ها در افزایش یک و یا هر دو بخش گذردهی مختلط روغن مؤثر است [۳۸].

چند حسگر تجاری موجود، توسط شرکت کیتی ویک توسعه یافته‌اند که قادر به تشخیص کیفیت روغن به صورت آنلاین از طریق تفسیر ویژگی‌های دی‌الکتریک هستند به عنوان مثال، حسگر وضعیت روغن آنلاین کیتی ویک (شکل ۲-۹) از ترکیب دی‌الکتریک و الگوریتم تفسیر هوشمند برای تشخیص اکسیداسیون روغن استفاده کرده است.

TAN یک پارامتر عملکرد برای توصیف اکسیداسیون روغن است؛ بنابراین، با استفاده از ارتباط اکسیداسیون روغن و تغییر خاصیت دی‌الکتریک، نظارت آنلاین اکسیداسیون روغن به دست آمده است؛ بنابراین به طور مشابه، بر مبنای نظری نظارت بر ویژگی دی‌الکتریک، حسگر کیفیت روغن که توسط TAN DELTA توسعه یافته (شکل ۲-۱۰)، قادر به شناسایی آنلاین آلودگی آب و اکسیداسیون می‌باشد.



شکل ۲-۹ - حسگر کیفیت روغن شرکت کیتی ویک [۱۷]



شکل ۲-۱۰ - حسگر کیفیت روغن شرکت TANDELTA [۳۹]

از آن جائیکه بسیاری از روش‌های پیشین پایش وضعیت روغن بر روی نظارت بر ویژگی‌های اصلی خرابی مثل اکسیداسیون و آلودگی دوده متمرکز و قادر به اکتساب داده به صورت آنلاین نبوده‌اند، به وسیله‌ی ارتباط اطلاعات تغییر ثابت دی‌الکتریک با استفاده از اطلاعات اساسی خرابی که از حسگر پایش وضعیت روغن به دست آمده، شناسایی خرابی روغن به صورت آنلاین می‌تواند انجام گیرد. عیب حسگر های دی‌الکتریک این است که بسیاری از آن‌ها نیاز به طراحی و ساخت ویژه دارند.

۲-۳ مزایای اصلی حسگر کیفیت روغن بر اساس ضریب دی‌الکتریک

به طور کلی مزایای اصلی حسگر کیفیت روغن را می‌توان چنین جمع‌بندی کرد:

- **کاهش سرویس ماشین آلات:** نظارت دقیق وضعیت روغن که باعث کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات می‌شود.
- **کاهش خرابی‌های ماشین:** وضعیت روغن یک شاخص عالی از مشکلاتی است که باعث اختلال غیرمنتظره عملکرد موتور می‌شود. شناسایی زودهنگام، تعمیرات را کاهش داده و موجب کاهش خرابی‌ها می‌شود.
- **افزایش عمر ماشین آلات یا موتور:** حفظ وضعیت مطلوب روغن می‌تواند به طور چشمگیری نرخ سایش تجهیزات را کاهش دهد و در نتیجه باعث افزایش عمر تجهیزات شود.
- **کاهش هزینه تعویض روغن:** در حال حاضر بیشتر روان‌کارها قبل از پایان عمر خود تعویض می‌شوند و این به معنی افزایش هزینه‌های تعویض روغن می‌باشد.
- **بهره‌وری بیشتر:** زمان کمتر نگهداری و تعمیرات، کاهش زمان کارکرد ماشین‌آلات به علت خرابی و عمر طولانی‌تر، به معنی بهره‌وری بیشتر از زمان است.
- **کاهش آلاینده‌گی محیط زیست:** تعویض زود و بی‌موقع روغن علاوه بر اتلاف باعث افزایش آلودگی محیط زیست و افزایش پس‌مانده‌های صنعتی می‌شود.

- پوشش اکثر ویژگی‌های خرابی روغن
- قابلیت نظارت آنلاین بر سلامت روغن
- پیچیدگی کم پردازش اطلاعات و هزینه نگهداری پایین

۲-۳-۱-۱ اختراعاتی ثبت شده حسگر خازنی

هاپکینز و همکاران [۴۰] وسیله‌ای ساخته‌اند در آن یک مدار پل برای اندازه‌گیری امپدانس AC یک بازوی پل مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ که شامل خازنی است که ظرفیت آن با تغییردی‌الکتریک در اثر خرابی روغن تغییر می‌کند. ثبت اختراع دیگری توسط هاپکینز و همکاران [۴۱] شرح استفاده از یک مدار پل یکسان در رابطه با ذخیره داده‌ها و امکانات محاسباتی هست.

میزر و همکاران [۴۲] یک سنسور خازنی صفحه‌ای موازی را طراحی کرده‌اند که برای نصب بین بلوک موتور و فیلتر مناسب می‌باشد، به طوری که تغییرات مقدار ظرفیت خازنی باعث تغییرات در فرکانس یک نوسان‌ساز مرتبط می‌شود.

اشمیت و همکاران [۴۳] از سنسور خازنی هم‌مرکز در امتداد محور خود برای ترکیبی از سوخت و الکل استفاده کرده‌اند. اندازه‌گیری ظرفیت سنسور وسیله‌ای فراهم می‌کند که با توجه به آن مقدار الکل در سوخت را مشخص کرد. همچنین اطلاعات مقایسه‌ای در مورد محتوای آب در روغن می‌دهد.

گُکس [۴۴] روشی برای اندازه‌گیری میزان آب و شوری (برش آب) یک جریان روغن را از طریق اندازه‌گیری دما، مقاومت و ثابت دی‌الکتریک توضیح می‌دهد، اما هیچ جزئیاتی در مورد تنظیم مکانیکی سنسور ارائه نمی‌دهد.

سا و همکاران [۴۵] یک وسیله‌ی آنلاین برای اندازه‌گیری رطوبت مواد، به عنوان مثال قرص‌های پلیمری، با استفاده از یک سنسور خازنی شامل سه سیلندر خازنی هم‌مرکز که از طریق آن مواد به طور محوری

عبور می‌کنند، ساخته‌اند. افت ظرفیت خازنی و دی‌الکتریک با استفاده از روش‌های شناخته شده مشخص شده است.

پریشات و همکاران [46] دستگاهی ارائه کرده‌اند که به منظور اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک و هدایت مواد مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. سنسور خازنی با استفاده از یک نوسانگر کریستال پایدار تحریک شده است، مدار پل برای اندازه‌گیری فاز و دامنه ولتاژ در طول سنسور طراحی شده است.

کلیستر [38] حسگری برای اندازه‌گیری کیفیت روغن بر اساس گذردهی (ضریب دی‌الکتریک) روغن شامل یک حسگر خازنی برای قرار گرفتن در معرض روغن و مدار نوسان ساز شامل حسگر ساخته است؛ که از مدار اسیلاتوری تشکیل شده است. دامنه خروجی وابسته به کاهش مقدار $\tan \delta$ روغن تغییر می‌کند.

در ثبت اختراع شماره ۳۰۴۷۴ در سازمان اسناد و املاک ایران؛ هاشمی و فرهودنیا مسیرهای شانه‌ای بر روی برد مدار چاپ کرده‌اند که روغن در بین آن‌ها قرار می‌گیرد. این روغن به عنوان دی‌الکتریک عمل کرده و اندازه خازنی این شانه‌ها را تغییر می‌دهد و با اندازه‌گیری ظرفیت این خازن می‌توان ضریب دی‌الکتریک روغن را اندازه‌گیری کرد. این حسگر روی مخزن روغن قرار می‌گیرد و از دقت عملکرد این حسگر اطلاعاتی منتشر نشده است.

۲-۳-۲ مقایسه حسگرهای مختلف روش‌های خازنی و رسانایی

در بخش‌های قبل روش‌های مختلف پایش وضعیت روغن مورد بررسی قرار گرفت. ژو روش‌های خازنی و رسانایی پایش وضعیت روغن را از لحاظ روش کارکرد، حسگرهای موجود، قابلیت آنلاین بودن، قابلیت پایش بینی خرابی روغن و نوع خرابی‌هایی که شناسایی می‌شود، حساسیت حسگر، پیچیدگی پردازش داده‌ها، تست در صنعت و هزینه‌های آن مورد بررسی قرار داده است. بررسی‌های آقای ژو [۴۷] در جدول ۲-۱ نشان داده شده است.

جدول ۱-۲ - مقایسه حسگرهای مختلف روش خازنی و رسانایی [۴۷]

روش یا پیش	نام حسگر	قابلیت آنلاین بودن	توانایی پیش بینی خرابی روغن	نوع خرابی‌های قابل شناسایی	حساسیت حسگر	پیچیدگی پردازش داده	تست در صنعت	هزینه ساخت	هزینه نگهداری
خازنی	Grid capacitance sensor	آنلاین	نه	آلودگی ذرات سایشی و آب، اکسیداسیون	بالا	کم	نه	کم	کم
	Inter-leveled disk capacitor	آنلاین				کم	نه	کم	کم
	Capacitive IDT (Inter-Digit Type) sensor	آنلاین				کم	بله	کم	بالا
	CSI oil view model 5500	آنلاین				کم	بله	کم	بالا
	Permittivity sensor	آنلاین	کم	نه	کم	کم	کم		
	Dielectric spectroscopy analyzer for Petroleum (DSAP)	آنلاین	بله	اکسیداسیون، آلودگی ذرات سایشی	متوسط	متوسط	نه	متوسط	کم
	TAN DELTA dielectric sensing	آنلاین		آلودگی آب، اکسیداسیون	کم	بله	متوسط	متوسط	
	thin film capacitance sensors	آنلاین	نه	آلودگی آب	کم	بله	متوسط	متوسط	
رسانایی	Multiwall carbon nano tube conductivity sensor	آنلاین	نه	اکسیداسیون، آلودگی ذرات سایشی	بالا	کم	نه	بالا	بالا
	Conductivity sensor	آنلاین		آلودگی ذرات سایشی	متوسط	کم	نه	متوسط	متوسط
	Diesel oil condition and level sensor	آنلاین		آلودگی ذرات سایشی	بالا	کم	بله	متوسط	متوسط
	Polymeric Bead Matrix (PBM)	آنلاین		آلودگی ذرات سایشی و آب، اکسیداسیون	بالا	متوسط	بله	متوسط	بالا

فصل ۳ طراحی حسگر خازنی

در این فصل روش کارکرد حسگر خازنی و روش کار آن برای پایش وضعیت روغن، انواع طرح های حسگر خازنی و محاسبات آن ها بررسی خواهد شد. با بررسی طرح های مختلف و با توجه محاسبات، طرح نهایی برای حسگر، اجزای آن، روش کارکرد و روش ساخت آن شرح داده شده است.

۱-۳ شیوه کارکرد حسگر خازنی

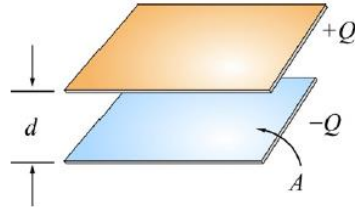
آلودگی روغن، ترکیبات اضافی و محصولات احتراق در آن بر روی گذردهی خازن تأثیر دارد. اساس کار حسگر خازنی تغییرات در ضریب دی‌الکتریک روغن عبوری از آن می‌باشد. تغییر کیفیت روغن سبب تغییر ضریب دی‌الکتریک آن می‌شود. با توجه به این که ابعاد هندسی و ضریب گذردهی خلأ ثابت می‌باشد، تغییر ضریب دی‌الکتریک باعث تغییر ظرفیت خازنی آن می‌شود.

خازن با صفحات موازی:

روش محاسبه ظرفیت خازن صفحه موازی در (۱-۳) بیان شده است:

$$c = \frac{k \epsilon_0 A}{d} \quad (1-3)$$

که c ظرفیت خازنی (برحسب فاراد F)، k ضریب دی‌الکتریک، ϵ_0 ضریب گذردهی الکترونیک خلأ، A مساحت صفحات خازن برحسب (m^2) و d فاصله بین دو صفحه بر حسب (m) می‌باشد. شکل ۱-۳ خازن با صفحات موازی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱- خازن با صفحات موازی

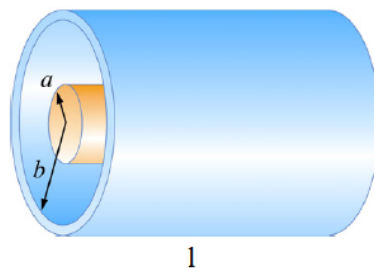
خازن استوانه‌ای:

روش محاسبه ظرفیت خازن استوانه‌ای در معادله (۳-۲) بیان شده است:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln(b/a)} \quad (۳-۲)$$

در این معادله l طول استوانه، a شعاع استوانه داخلی و b شعاع داخلی استوانه بزرگ‌تر می‌باشد. شکل

۳-۲ خازن استوانه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲- خازن استوانه‌ای

ظرفیت خازنی متناسب با جنس دی‌الکتریک استفاده شده است، ظرفیت خازنی یک خازن در خلأ به عنوان مرجع استفاده می‌شود بنابراین ضریب دی‌الکتریک خلأ برابر ۱ تعریف می‌شود و ضریب دی‌الکتریک مواد دیگر (k) به صورت معادله (۳-۴) محاسبه می‌شود [۴۸]. در این روش چون اندازه‌گیری به صورت مقایسه‌ای انجام می‌گیرد، تغییرات دراز مدت تأثیری در نتایج اندازه‌گیری ندارد.

$$c = \frac{k \epsilon_0 A}{d} = k c_0 \quad (3-3)$$

$$k = \frac{c}{c_0} \quad (4-3)$$

c_0 ظرفیت خازنی یک خازن در خلأ (بدون ماده دی‌الکتریک) و c ظرفیت خازنی یک خازن که بین صفحات

آن ماده دی‌الکتریک قرار گرفته می‌باشد. ضریب دی‌الکتریک روغن بسته به فرمول شیمیایی آن بین ۲ الی ۳ متغیر است. با توجه به مراجع مقدار ϵ_0 ثابت و برابر $8.854187817 \times 10^{-12}$ (pF/m) می‌باشد [۴۹]. ضریب دی‌الکتریک برخی مواد در جدول ۳-۱ نشان داده شده است.

جدول ۳-۱- ضریب دی‌الکتریک مواد مختلف [۴۸]

نوع دی‌الکتریک	ضریب دی‌الکتریک (K)
هوا	۱/۰۰۰۵۹
کاغذ	۳/۷
شیشه	۶-۴
آب	۸۰
روغن موتور	۲/۰۲

گذردهی مختلط یک خازن شامل دو بخش حقیقی و موهومی می‌باشد. بسته به هندسه الکتروود، گذردهی مختلط^۱ به طور مستقیم به امپدانس مختلط^۲ مربوط است. خازن در میدان الکتریکی متناوب، در برابر عبور جریان از خود مقاومتی نشان می‌دهد که بستگی به فرکانس میدان الکتریکی دارد. هر اندازه‌گیری از امپدانس مختلط الکتروود شاخصی برای سنجش خرابی روغن است.

با توجه به شکل ۳-۳، تانژانت زاویه θ نسبت بین بخش موهومی و بخش حقیقی گذردهی خازن است و با رابطه (۹-۳) تعریف می‌شود. در رابطه (۹-۳) رسانایی الکتریکی^۳ (G) بخش حقیقی گذردهی برحسب زیمنس^۴ است (محور افقی نمودار). بخش موهومی گذردهی در رابطه (۹-۳)، پذیرندگی^۵ (BC) بر حسب زیمنس می‌باشد (محور عمودی نمودار) [۵۰].

رسانایی الکتریکی با رابطه (۵-۳) بدست می‌آید، در این معادله R مقاومت الکتریکی برحسب اهم است. پذیرندگی با رابطه (۶-۳) بدست می‌آید. در این معادله ω بسامد زاویه‌ای برحسب رادیان بر ثانیه و C ظرفیت خازنی برحسب فاراد (f) است. Q فاکتور کیفیت نامیده می‌شود که نسبت بین پذیرندگی و رسانایی الکتریکی است و با رابطه (۷-۳) بدست می‌آید. Y گذرایی^۶ نامیده می‌شود واحد گذرایی در SI زیمنس است و با رابطه (۸-۳) بدست می‌آید.

¹ Complex capacitance

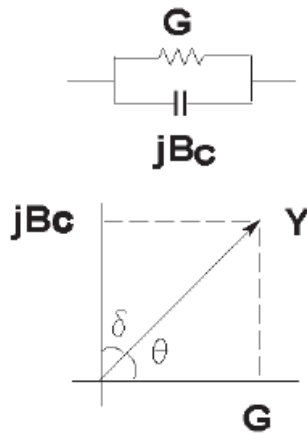
² Complex impedance

³ conductance

⁴ siemens

⁵ susceptance

⁶ admittance



شکل ۳-۳- زاویه تنا نسبت بین بخش موهومی و بخش حقیقی گذردهی

$$G = \frac{1}{R} \quad (۵-۳)$$

$$B_C = \omega C \quad (۶-۳)$$

$$Q = \frac{B_C}{G} \quad (۷-۳)$$

$$|Y| = \sqrt{(G^2 + B_C^2)} \quad (۸-۳)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{B_C}{G}\right) \quad (۹-۳)$$

هر نوع آلودگی روغن روی بخش حقیقی گذردهی یا بخش موهومی آن یا هر دو قسمت آن تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین علاوه بر ظرفیت خازنی، مقدار تغییرات θ هم می‌تواند مشخصه‌ای برای کیفیت روغن باشد.

۲-۳ امکان سنجی طرح‌ها برای حسگر خازنی

حسگر خازنی روغن، خازنی است که روغن از بین صفحات آن در جریان باشد. برای ساخت این حسگر طرح‌های هندسی مختلفی مورد بررسی قرار گرفت و مزایا و معایب هر کدام، امکان ساخت، امکان نصب و همگی جوانب آن بحث شد. ۶ طرح ابتدایی از حسگر که در شکل ۳-۴ رسم شده است، مورد بررسی قرار گرفتند. در نهایت سه طرح صفحه موازی، استوانه‌ای و مدل شانه‌ای (طرح بهینه و نهایی) برای ساخت انتخاب شد. علت انتخاب طرح صفحه موازی و استوانه‌ای هزینه پایین ساخت آن‌ها و انتخاب طرح شانه‌ای به علت افزایش دقت و امکان نصب تجهیزات جانبی مثل اندازه‌گیری فشار ورودی و خروجی حسگر بوده است. ابتدا محاسبات طرح‌های صفحه موازی و استوانه‌ای انجام شده و مورد آزمایش قرار گرفته است سپس با توجه به نتایج آزمایش‌های اولیه طرح بهینه و نهایی حسگر و محاسبات ابعاد هندسی مختلف آن انجام شده و مورد آزمایش‌های صحت سنجی قرار گرفته است.



شکل ۳-۴ - طرح‌های اولیه حسگر

۳-۳ محاسبات حسگر خازنی

محاسبات ظرفیت خازنی برای خازن‌های صفحه موازی، استوانه‌ای و شانه‌ای طبق معادله (۱-۳) و (۲-۳) انجام شده است.

۳-۳-۱ محاسبات حسگر خازنی دیسک‌های موازی:

برای تعیین اندازه مناسب الکترودهای حسگر صفحه موازی جدول ۳-۲ تشکیل شده است. در این جدول ظرفیت خازنی مورد انتظار برای حسگر خازنی با توجه به مساحت‌های مختلف صفحه خازن و فاصله بین دو صفحه با در اختیار داشتن ضریب دی‌الکتریک روغن بدست آمد. ظرفیت‌های خازنی محاسبه شده در جداول، به طراح کمک می‌کند که تشخیص دهد که آیا دستگاه‌های اندازه‌گیری ظرفیت خازنی قابلیت شناسایی تغییرات این مقدار را دارد یا خیر.

جدول ۳-۲- محاسبات ظرفیت خازنی برای خازن با صفحات موازی

شعاع صفحه r (m)	مساحت هر صفحه (A) (m ²)	فاصله بین صفحات d (m)	قابلیت‌گذردهی خلأ ϵ_0 f/m	ضریب دی‌الکتریک روغن K -	تعداد صفحات	ظرفیت خازنی C (pf)
0.03	0.0028	0.002	8.85E-12	2.1	2	52.54
0.03	0.0028	0.002	8.85E-12	2.1	3	78.82
0.03	0.0028	0.002	8.85E-12	2.1	4	105.09
0.04	0.0050	0.002	8.85E-12	2.1	1	46.7
0.04	0.0050	0.002	8.85E-12	2.1	2	93.41
0.04	0.0050	0.002	8.85E-12	2.1	3	140.12
0.04	0.0050	0.002	8.85E-12	2.1	4	186.83
0.05	0.0079	0.002	8.85E-12	2.1	1	72.98
0.05	0.0079	0.002	8.85E-12	2.1	2	145.96
0.05	0.0079	0.002	8.85E-12	2.1	3	218.94
0.05	0.0079	0.002	8.85E-12	2.1	4	291.93
0.03	0.0028	0.001	8.85E-12	2.1	1	52.54
0.03	0.0028	0.001	8.85E-12	2.1	2	105.09
0.03	0.0028	0.001	8.85E-12	2.1	3	157.64
0.03	0.0028	0.001	8.85E-12	2.1	4	210.19
0.04	0.0050	0.001	8.85E-12	2.1	1	93.41
0.04	0.0050	0.001	8.85E-12	2.1	2	186.83
0.04	0.0050	0.001	8.85E-12	2.1	3	280.25
0.04	0.0050	0.001	8.85E-12	2.1	4	373.67
0.05	0.0079	0.001	8.85E-12	2.1	1	145.96
0.05	0.0079	0.001	8.85E-12	2.1	2	291.93
0.05	0.0079	0.001	8.85E-12	2.1	3	437.89
0.05	0.0079	0.001	8.85E-12	2.1	4	583.86

۳-۳-۲ محاسبات حسگر خازنی استوانه‌ای:

محاسبات حسگر خازنی استوانه‌ای با توجه به مقادیر مختلف شعاع داخلی استوانه بیرونی و شعاع بیرونی استوانه مرکزی و اندازه استوانه‌ها در جدول ۳-۳ آمده است. در صورت نیاز به ظرفیت خازنی بیشتر تعدادی استوانه بر اساس طرح استوانه‌های مرکب به صورت خازنهای موازی در نظر گرفته شده است. برای بدست آوردن ظرفیت خازنی حسگر استوانه‌ای از معادله (۲-۳) استفاده شده است. شعاع هیدرولیکی، برابر شعاع سطح مقطع فرضی است که روغن از آن عبور می‌کند تا تخمینی از افت فشار در حسگر به دست آید

جدول ۳-۳- محاسبات حسگر خازنی استوانه‌ای

شعاع داخلی استوانه بزرگ b (m)	شعاع بیرونی استوانه a (m)	طول استوانه l (m)	سطح مؤثر عبور روغن (m ²)	شعاع هیدرولیکی (m)	قابلیت گذردهی خلأ ε ₀ f	ضریب دی‌الکتریک روغن K -	تعداد استوانه	ظرفیت خازنی c (pf)
0.004	0.003	0.02	2.199E-05	0.0026	8.85E-12	2.1	1	8.11
0.004	0.003	0.03	2.199E-05	0.0026	8.85E-12	2.1	1	12.17
0.004	0.003	0.03	4.398E-05	0.0037	8.85E-12	2.1	2	24.34
0.004	0.003	0.03	6.597E-05	0.0046	8.85E-12	2.1	3	36.51
0.004	0.0035	0.02	1.178E-05	0.0019	8.85E-12	2.1	1	17.48
0.005	0.0045	0.02	1.492E-05	0.0022	8.85E-12	2.1	1	22.15
0.006	0.0055	0.02	1.806E-05	0.0024	8.85E-12	2.1	1	26.82
0.0065	0.006	0.02	1.963E-05	0.0025	8.85E-12	2.1	1	29.16
0.004	0.0035	0.025	1.178E-05	0.0019	8.85E-12	2.1	1	21.85
0.004	0.0035	0.03	2.356E-05	0.0027	8.85E-12	2.1	2	52.44
0.004	0.0035	0.035	3.534E-05	0.0034	8.85E-12	2.1	3	91.77
0.0045	0.0035	0.025	2.513E-05	0.0028	8.85E-12	2.1	1	11.61
0.0045	0.0035	0.025	5.027E-05	0.0040	8.85E-12	2.1	2	23.22
0.0045	0.0035	0.03	7.540E-05	0.0049	8.85E-12	2.1	3	41.79
0.007	0.0065	0.02	2.121E-05	0.0026	8.85E-12	2.1	1	31.49
0.007	0.0065	0.02	4.241E-05	0.0037	8.85E-12	2.1	2	62.99
0.0066	0.00595	0.02	2.563E-05	0.0029	8.85E-12	2.1	1	22.51

۳-۳-۳ محاسبات حسگر خازنی طرح شانهای (حسگر نهایی):

برای محاسبه ظرفیت خازنی مورد انتظار برای حسگر خازنی شانهای از رابطه (۳-۱) استفاده شده است. ظرفیت خازنی مختلف بر اساس طول مسیر و فاصله بین صفحات متفاوت در جدول ۳-۴ آمده است. مشخصات حسگر خازنی ساخته شده در آخرین ردیف افقی آمده است.

جدول ۳-۴ - مشخصات حسگر خازنی طرح شانهای با ابعاد هندسی مختلف

ظرفیت خازنی	ضریب دی الکتریک روغن	قابلیت گذردهی خلأ ϵ_0	شعاع هیدرولیکی	سطح مؤثر عبور روغن	فاصله بین صفحات d	مساحت سطح خازن	طول استوانه l	طول مسیر
(pf)	-	f	(m)	(m ²)	(m)	(m ²)	(m)	(m)
1239.00	2.1	8.85E-12	4.37E-03	6.00E-05	0.0003	0.02	0.1	0.2
1548.75	2.1	8.85E-12	4.89E-03	7.50E-05	0.0003	0.025	0.1	0.25
1858.50	2.1	8.85E-12	5.35E-03	9.00E-05	0.0003	0.03	0.1	0.3
2168.25	2.1	8.85E-12	5.78E-03	1.05E-04	0.0003	0.035	0.1	0.35
2478.00	2.1	8.85E-12	6.18E-03	1.20E-04	0.0003	0.04	0.1	0.4
929.25	2.1	8.85E-12	5.05E-03	8.00E-05	0.0004	0.02	0.1	0.2
1161.56	2.1	8.85E-12	5.64E-03	1.00E-04	0.0004	0.025	0.1	0.25
1393.88	2.1	8.85E-12	6.18E-03	1.20E-04	0.0004	0.03	0.1	0.3
1626.19	2.1	8.85E-12	6.68E-03	1.40E-04	0.0004	0.035	0.1	0.35
1858.50	2.1	8.85E-12	7.14E-03	1.60E-04	0.0004	0.04	0.1	0.4
743.40	2.1	8.85E-12	6.77E-03	1.44E-04	0.0005	0.02	0.1	0.2
929.25	2.1	8.85E-12	6.77E-03	1.44E-04	0.0005	0.025	0.1	0.25
1115.10	2.1	8.85E-12	6.77E-03	1.44E-04	0.0005	0.03	0.1	0.3
1300.95	2.1	8.85E-12	6.77E-03	1.44E-04	0.0005	0.035	0.1	0.35
1486.80	2.1	8.85E-12	6.77E-03	1.44E-04	0.0005	0.04	0.1	0.4
1672.65	2.1	8.85E-12	6.77E-03	1.44E-04	0.0004	0.036	0.1	0.36

۳-۴ طرح‌های اولیه حسگر

حسگر خازنی صفحه موازی با ابعاد هندسی مختلف برای انجام آزمایش‌های اولیه ساخته شد. در این حسگر از تیغه‌های مسی با ابعاد مختلف مطابق شکل ۳-۵ استفاده شده است.



شکل ۳-۵- حسگر خازنی صفحه موازی با الکترودهای مختلف

آزمایش‌های اولیه با حسگر خازنی صفحه موازی انجام شده سپس حسگر خازنی استوانه‌ای مطابق شکل ۳-۶ ساخته شده و روغن با آلودگی‌های مختلف توسط این حسگر آزمایش شده است. سپس بر اساس نتایج این آزمایش‌های و بررسی حساسیت دستگاه‌های اندازه‌گیری ظرفیت خازنی موجود طرح نهایی حسگر طراحی و ساخته شد.

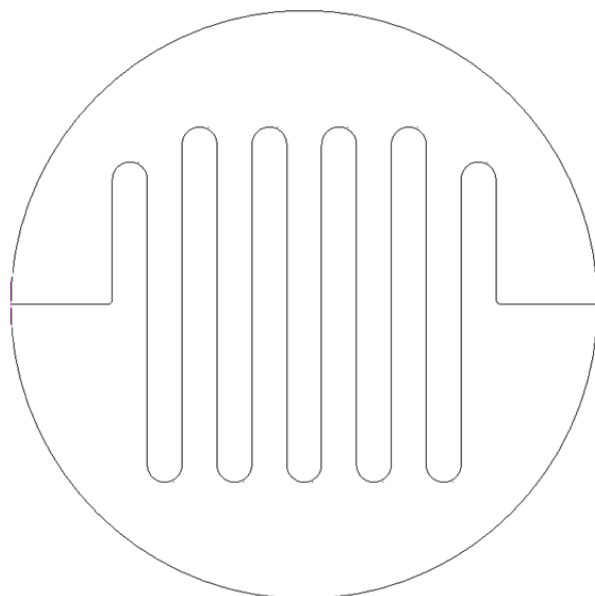


شکل ۳-۶- حسگر خازنی استوانه‌ای

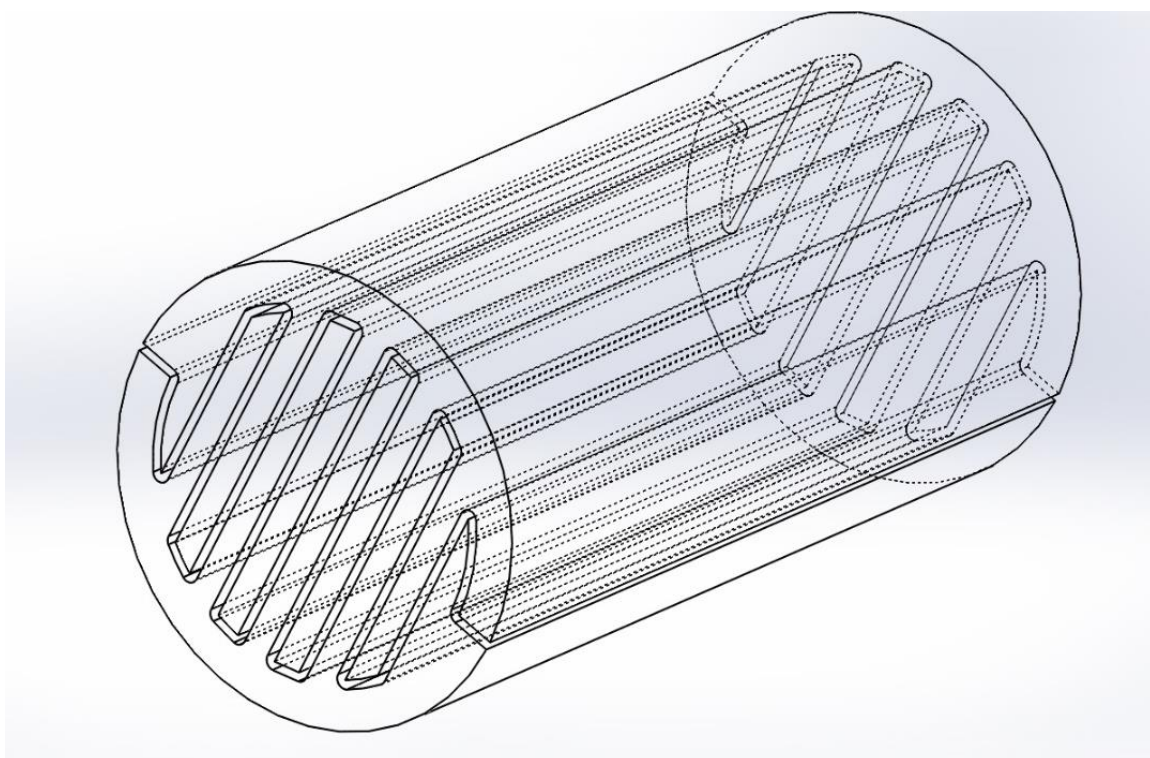
۳-۵ طرح نهایی حسگر

حسگر خازنی با طرح هندسی خاص الکترودها طراحی شده است که تمام روغن از داخل آن عبور می‌کند. حسگر به گونه‌ای طراحی شده است که ظرفیت خازنی آن به بالاترین مقدار ممکن برسد تا تغییرات روغن به وضوح مشخص باشد؛ بنابراین الکترودهای این خازن طوری طراحی شده که بیشترین مساحت ممکن برای صفحات خازن ایجاد شود. فاصله بین صفحات خازن $0/4$ میلیمتر است. حسگر از ۳ بخش اصلی شامل هسته مرکزی، پوسته حسگر و اجزای PTFE؛ به همراه اتصالات آب‌بند، پیچ‌های اتصال الکتریکی به الکترودهای خازن و لایه‌های عایق بین الکترودها تشکیل شده است. هسته مرکزی از جنس AL7072 می‌باشد که از دو قسمت جدا از هم که با استفاده از اجزای عایق به هم وصل می‌شوند، تشکیل شده است. سطح مقطع هسته مرکزی حسگر در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. هسته مرکزی حسگر در شکل ۳-۸ آمده است.

پوسته حسگر از جنس فولاد زنگ نزن ساخته شده است که هسته مرکزی درون آن قرار می‌گیرد. پوسته شامل محل اتصال ورودی و خروجی روغن و محل اتصال دماسنج می‌باشد (شکل ۳-۹). همچنین بر روی پوسته حسگر محل اتصال فشارسنج در ورودی و خروجی خازن تعبیه شده است. با توجه به این که روغن از داخل حسگر عبور می‌کند با اندازه‌گیری فشار ورودی و خروجی از حسگر در دبی ثابت، تغییرات گرانشی روغن را می‌توان نظارت کرد. دمای روغن از طریق دماسنج نصب شده روی آن، خوانش می‌شود. با داشتن دما می‌توان اثر دما را در محاسبات ظرفیت خازنی بت ضریب تصحیح اصلاح کرد. مدل سازی هندسی حسگر توسط نرم‌افزار SOLID WORK انجام شده است.

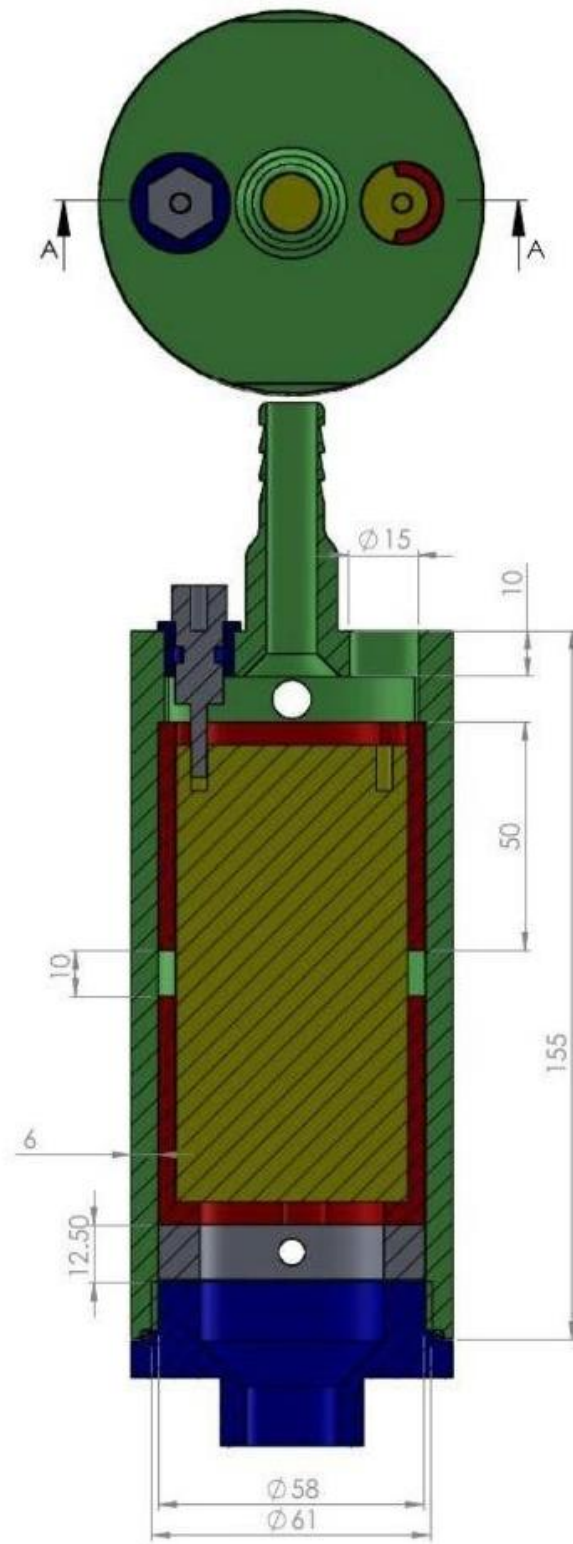


شکل ۷-۳- سطح مقطع هسته مرکزی حسگر



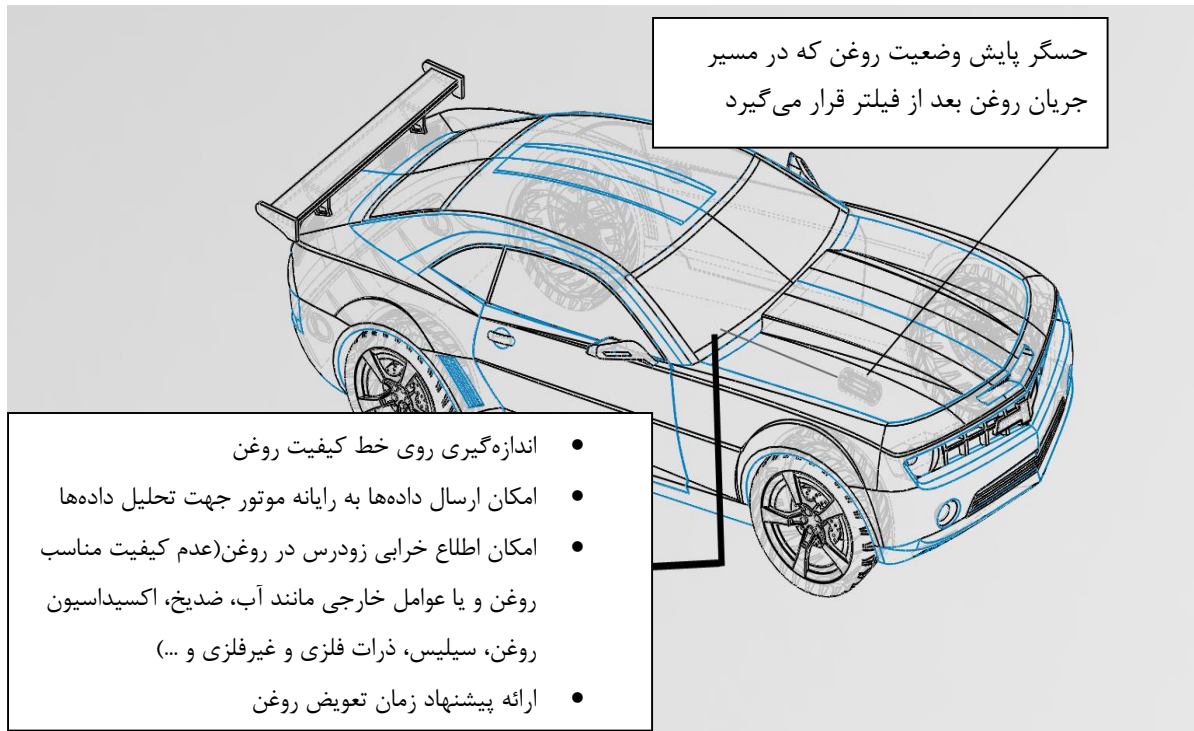
شکل ۱-۳- هسته مرکزی حسگر

شکل ۳-۹ طرحواره هندسی حسگر را نشان می‌دهد. بر این اساس هسته مرکزی حسگر در شکل ۳-۸ در داخل پوسته از جنس فولاد زنگ نزن به گونه‌ای قرار می‌گیرد که هیچگونه اتصالی با بدنه ندارد. این جداسازی توسط پوسته‌هایی از جنس PTFE به وجود آمده است. از طرفی دو بخش هسته مرکزی حسگر هم توسط عایقی به ضخامت ۰/۴ میلیمتر از هم جدا شده است. نوع همبندی در جهت عدم تغییر، بدون لقی و جذب بوده است. در انتها از قفل کن و درپوشی بر روی پوسته برای سرهم بندی هسته و پوسته حسگر، استفاده شده است. جهت خوانش ظرفیت خازنی، از دو پیچ عایق شده در پوسته بیرونی حسگر استفاده شده است که با گذر از پوسته PTFE داخلی، به دو الکتروود خازن پیچ می‌شوند.



شکل ۳-۹- حسگر خازنی ساخته شده

موقعیت قرارگیری حسگر، قابلیت ها و واحد نمایش و کنترل در یک خودرو در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰- طرحواره نصب حسگر کیفیت روغن بر ماشین

۳-۶ امکان سنجی ساخت و تولید

برای ساخت هسته مرکزی حسگر از دستگاه wire cut استفاده شده است. پس از تهیه گرده آلومینیوم 7072 با استفاده از دستگاه تراش، قطعه آلومینیومی به قطر و اندازه مورد نظر رسیده است. طرح مسیر حرکت به دستگاه وایر کات داده شده و قطعه آلومینیومی به دو قسمت جدا از هم تبدیل شده است.

(شکل ۳-۱۱)



الف- خازن در حالت همبندی

ب- نمای قطب‌های خازن

شکل ۳-۱۱- هسته مرکزی حسگر

در شکل ۳-۱۲ حسگر به همراه اجزای تشکیل‌دهنده شامل پوسته، هسته مرکزی، PTFE، درپوش و پیچ‌های اتصال به همراه آب‌بندها برای عایق‌کاری نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۲- اجزای تشکیل‌دهنده حسگر

شکل ۳-۱۳ حسگر روغن را به صورت همبندی شده نهایی نشان می‌دهد. اتصالات هیدرولیک و حسگر-های دما و فشار به این حسگر اضافه شده و روغن از داخل خود حسگر عبور می‌کند.



شکل ۳-۱۳ - حسگر روغن ساخته شده

فصل ۴ شناسایی قابلیت‌ها و صحه گذاری حسگر آنلاین کیفیت روغن خارج از

مدار

در این فصل روش آزمایش حسگرهای اولیه و نوع آزمایش‌های این حسگرها و روش خوانش ظرفیت خازنی توسط LCR meter شرح داده شده است. در ادامه روش آزمایش‌های آفلاین حسگر نهایی کیفیت روغن و نوع خرابی‌های مورد آزمایش در حالت آفلاین بررسی شده است. سپس مدار هیدرولیک آزمایش-های آنلاین صحه گذاری حسگر و نوع آزمایش‌هایی که در این مدار انجام شده است، شرح داده شده است. برای آزمایش نهایی، حسگر به موتور TU5 وصل شده است تا شرایط واقعی کارکرد در موتور بررسی شود.

۴-۱ آزمایش‌های بررسی طرح‌های اولیه حسگر

قبل از ساخت حسگر نهایی آزمایش‌های اولیه روی حسگرهای صفحه موازی و استوانه‌ای انجام شد. نتایج اولیه بررسی و تحلیل شده، حساسیت دستگاه‌های خوانش مورد بررسی قرار گرفت و سپس حسگر شانه‌ای با قابلیت سنجش گذردهی و تغییرات گرانیروی روغن طراحی و ساخته شد. آزمایش‌های اصلی بر روی حسگر شانه‌ای با توجه به گام‌های اجرایی شکل ۴-۱ انجام شده است.



شکل ۱-۴- فلوچارت مراحل آزمایش حسگر شانه‌ای

۱-۱-۴ آزمایش حسگر صفحه موازی:

برای آزمایش حسگر صفحه موازی از سه روغن به مشخصات جدول ۱-۴ استفاده شده است. نمونه‌های روغن به صورت مصنوعی به درصدهای مختلف آب آلوده شده‌اند.

جدول ۴-۱ - روغن‌های مورد آزمایش برای حسگر صفحه موازی

درصد حجمی آب	نوع روغن
۰	بهران سوپر پیشتاز 20W50- نو
۵	بهران سوپر پیشتاز 20W50- نو
۱۰	بهران سوپر پیشتاز 20W50- نو

یک الکتروود حسگر به قطب منفی و الکتروود دیگر به قطب مثبت LCR METER وصل شده و حسگر در ظرف حاوی روغن غوطه‌ور شده است.

۴-۱-۲ آزمایش حسگر استوانه‌ای:

حسگر استوانه‌ای (شکل ۳-۴) با چند نمونه روغن با آلودگی‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. روغن بین فضای خالی استوانه و حفره تزریق شد. استوانه مرکزی به یک قطب LCR meter و بدنه به قطب دیگر آن وصل شد. جدول ۴-۲ نمونه روغن‌های مختلف برای این آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۲ روغن‌های مورد آزمایش برای حسگر استوانه‌ای

درصد حجمی آب	کارکرد	نوع روغن
۰	۰	بهران سوپر پیشتاز 10W40
	۲۰۰ ساعت در موتور TU5	بهران سوپر پیشتاز 10W40
۰	۰	بهران سوپر پیشتاز 20W50
۰	۷۰۰۰ کیلومتر در موتور دیزل	بهران سوپر پیشتاز 20W50
۱/۵	۷۰۰۰ کیلومتر در موتور دیزل	بهران سوپر پیشتاز 20W50

۴-۱-۳ دستگاه خوانش ظرفیت و مقاومت روغن

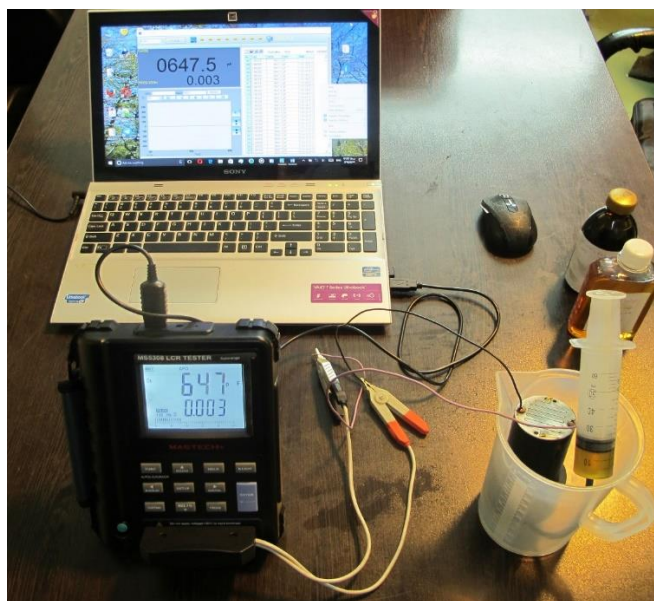
برای خوانش ظرفیت خازنی و مقاومت روغن از MS 5308 LCR TESTER استفاده شده است (شکل ۴-۲). محدوده خوانش و مقدار خطای این دستگاه بر اساس کاتالوگ محصول در پیوست ۲ آمده است.



شکل ۴-۲- دستگاه اندازه‌گیری ظرفیت خازنی و مقاومت LCR METER MASTECH 5308

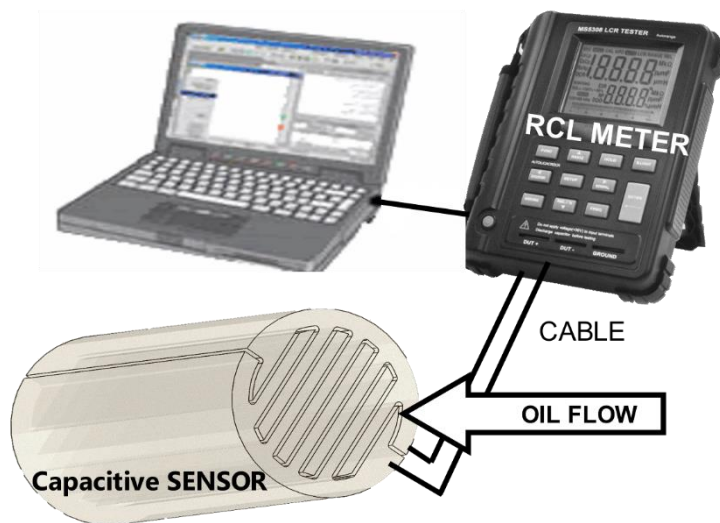
۴-۲ تعیین ظرفیت خازنی حسگر شانه‌ای کیفیت روغن با هوا و روغن

برای تست‌های آفلاین هسته مرکزی، حسگر خازنی به اتصالات هیدرولیک وصل شده و از طریق سرنگ روغن مطابق شکل ۴-۳ به داخل آن تزریق شده است.



شکل ۴-۳- شرایط آزمایش حسگر خازنی شانه‌ای کیفیت روغن به صورت تزریق دستی

دو طرف هسته توسط عایق تفلون از هم جدا شده و هر الکتروود به یک قطب LCR METER وصل شده است. شکل ۴-۴ طرحواره اتصال حسگر را به دستگاه اندازه‌گیری و رایانه نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴- طرحواره اتصال حسگر خازنی به LCR METER

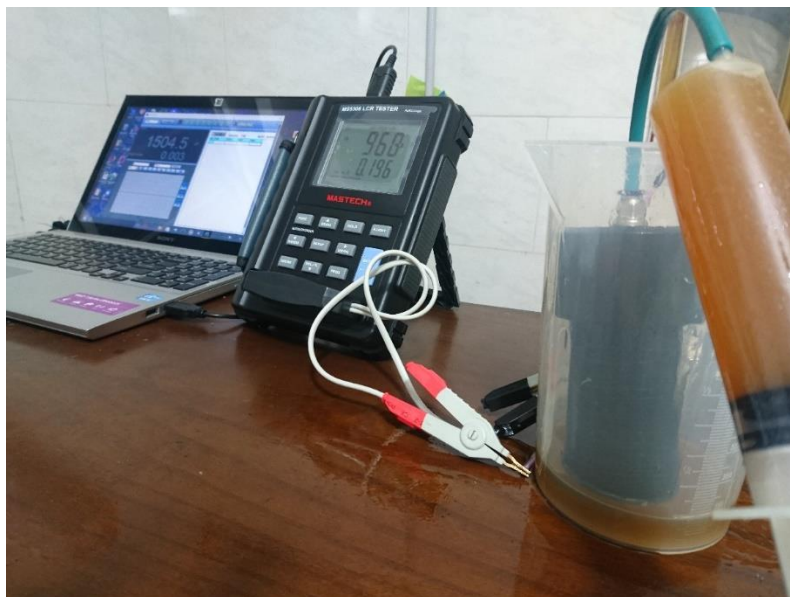
حسگر با هوا (بدون روغن) مورد آزمایش قرار گرفت که در فرکانس ۱۰۰ KHz ظرفیت خازنی آن برابر ۷۰۰ PF بوده است. سپس روغن نو به آن تزریق شد که ظرفیت خازنی آن ۱۴۱۲ PF بوده است. با داشتن ظرفیت خازنی روغن و ظرفیت خازنی هوا با توجه به معادله (۳-۴) ضریب دی‌الکتریک روغن نو برابر ۲/۰۲ بدست آمد.

۳-۴- آزمون‌های حسگر کیفیت روغن به صورت آفلاین

برای سنجش عملکرد حسگر آزمایش‌های اولیه به صورت آفلاین به شرح زیر انجام شده است:

۱-۳-۴ بررسی اثر آلودگی آب در روغن

در این مرحله روغن‌ها با آلودگی مصنوعی آب با درصدهای متفاوت در ظرف‌های جداگانه تهیه شده و به هسته حسگر به صورت دستی تزریق می‌شود. آزمایش آب در این مرحله به صورت آفلاین می‌باشد. روغن با آلودگی آب از ۰/۲۵ درصد تا ۲/۵ درصد حجمی مطابق شکل ۴-۵ مورد آزمایش قرار گرفت.



شکل ۴-۵- آزمایش آلودگی آب به صورت آفلاین

۴-۳-۲ بررسی کیفیت روغن در آزمون دوام موتوری

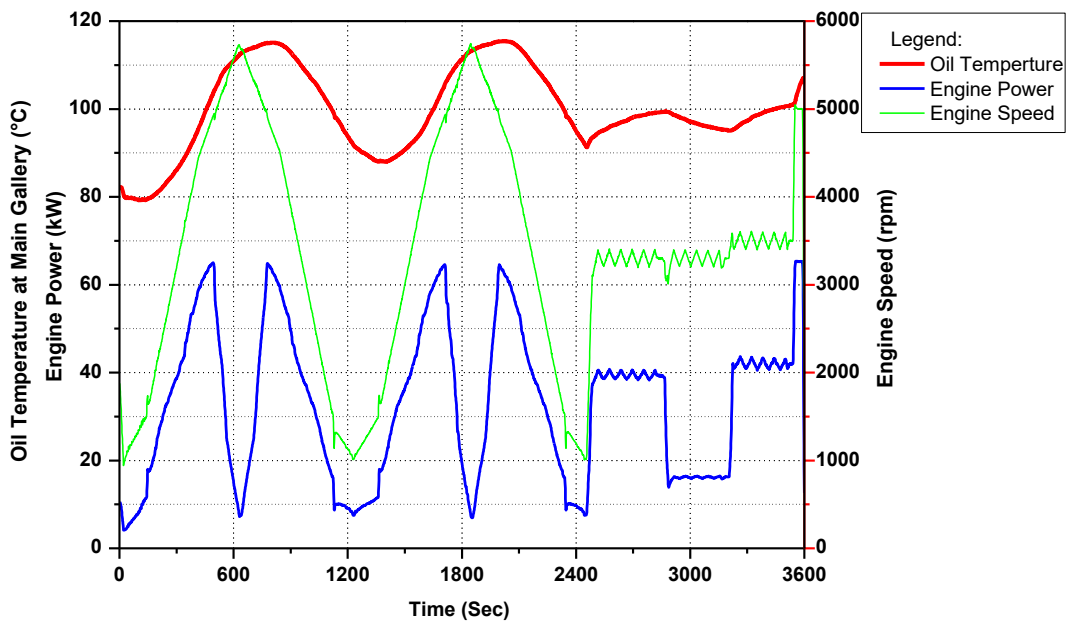
برای بررسی صحت حسگر در شرایط واقعی کارکرد روغن، آزمون دوامی بر روی موتورهای TU3 و TU5 انجام شده است که نمایی از شرایط کارکرد موتورها در شکل ۴-۶ مشخص است. در اتاق‌های آزمون، موتور با استفاده از دینامومتر ادیکارنت^۱ (دستگاه اندازه‌گیری قدرت و گشتاور موتور) تحت بارگذاری مشخصی قرار می‌گیرد و روغن موتور در شرایط دمایی و فشار خاص در موتور قرار می‌گیرد. بر اساس دستورالعمل‌های سازنده موتور که با همکاری روغن‌ساز بدست آمده است، ساعت کارکرد قابل قبول روغن ۲۰۰ ساعت می‌باشد و پس از آن، روغن می‌بایست به همراه فیلتر تعویض شود.

^۱ Eddy_Current_Dynamometr



شکل ۴-۶- نمایی از آزمون دوام موتورها در اتاق آزمون دینامومتری با روغن‌های مشخص

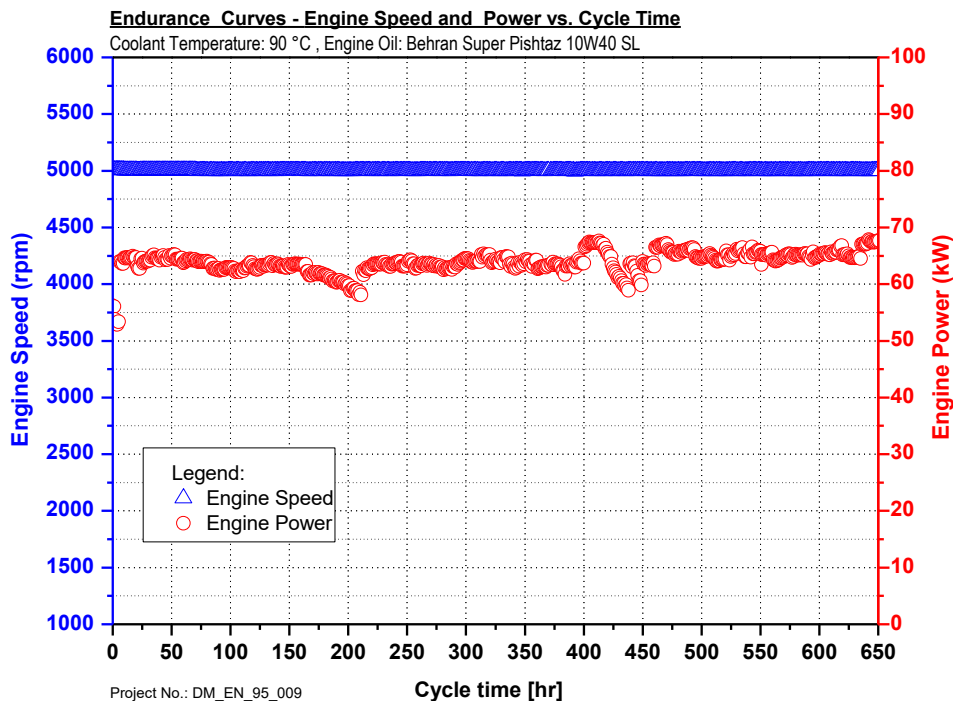
نمودار توان گرفته شده از موتور، دورموتور و دمای روغن در یک دوره یک ساعته از کارکرد موتور در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. بر این اساس، به عنوان مثال روغن در موتور TU5 در آزمون انجام شده، در محدوده‌ی دمایی ۸۰ الی ۱۱۵ درجه سانتیگراد تغییر می‌کرده است و متوسط درجه حرارت روغن در حدود 100°C بوده است. این دما در موتورهای متفاوت بر اساس شرایط کارکرد می‌تواند متغیر باشد و لذا در تعیین میزان خرابی روغن مؤثر خواهد بود. در هر سیکل کارکرد دور موتور بین rpm ۱۰۰۰ الی ۵۸۰۰ متغیر بوده است و توان موتور از ۷ kw الی ۶۵ kw تغییر کرده است.



شکل ۴-۷- نمودار تغییرات دمای روغن، دور موتور و توان گرفته شده از موتور در طول دوره ۱ ساعته

توان کارکرد موتور TU5 در طول نمونه‌برداری در شکل ۴-۸ نشان داده شده است که نشان می‌دهد

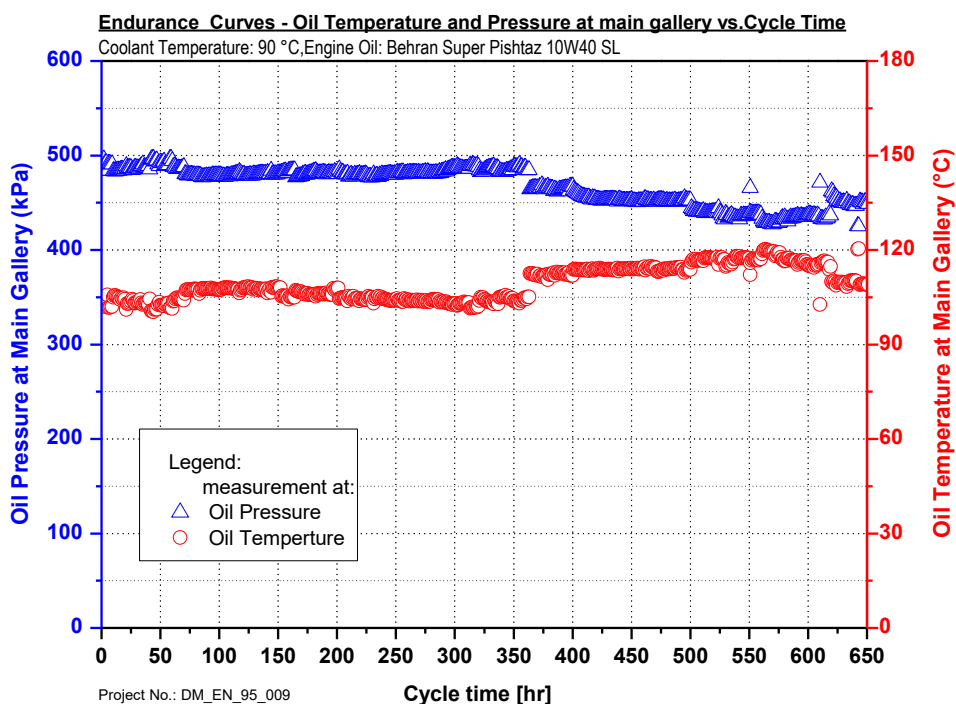
عملکرد موتور در طول این ساعات دچار افت و خرابی نشده است.



شکل ۴-۸- پایش توان کارکرد موتور TU5 در ساعات مختلف آزمون دوام در دور موتور

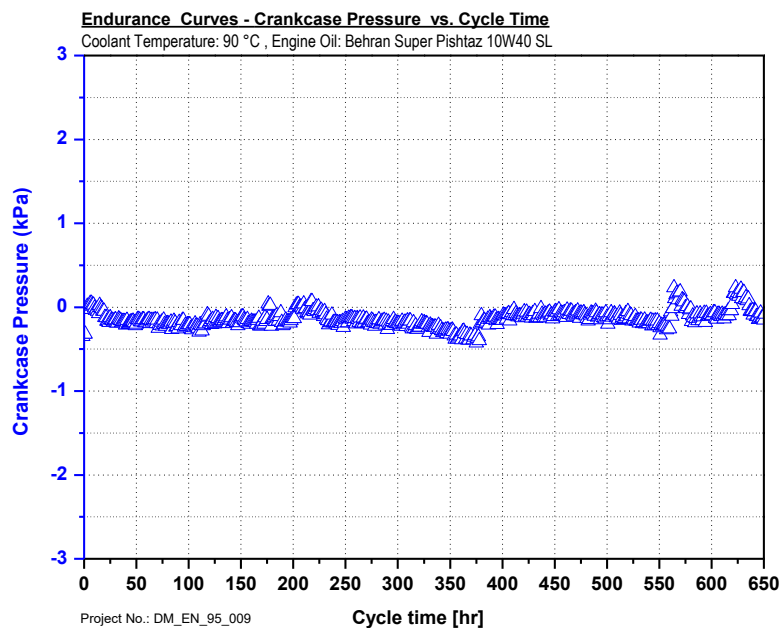
۵۰۰۰ rpm با روغن موتور

تاریخچه دما و فشار در شرایط آزمون دوام موتوری در شکل ۹-۴ نشان داده شده است. دما و فشار هر ۱ ساعت و در دور موتور ۵۰۰۰ ثبت شده است. در طول تست فشار روغن تقریباً ثابت و برابر ۴۶۰ (KPa) بوده است. فشار روغن در ابتدای تست به علت عدم تغییرات دمای روغن ثابت بوده و عملکرد موتور از نظر سایشی سالم و ثابت بوده است. در این تست سعی شده است دمای روغن در محدوده ۱۰۰ تا ۱۱۰ درجه سانتیگراد قرارگیرد. در انتهای آزمون به علت ایراد در سیستم خنک کاری پرش‌هایی در دمای روغن وجود دارد و دمای روغن افزایش یافته است. روغن موتور ۲۰۰ ساعت کار کرده و بعد از آن تعویض می‌شود. نمونه‌ها هر ۵۰ ساعت در طول این ۲۰۰ ساعت گرفته می‌شوند.



شکل ۹-۴- تاریخچه دما و فشار روغن موتور در شرایط آزمون دوام موتوری

نمودار فشار محفظه لنگ در طول آزمایش در شکل ۱۰-۴ نشان داده شده است. در صورت افزایش غیرعادی سایش و خرابی موتور فشار محفظه لنگ افزایش می‌یابد، در این آزمون فشار محفظه لنگ در ابتدا و انتهای آزمایش تقریباً ثابت است که بیانگر سلامت موتور در طول آزمایش می‌باشد.



شکل ۴-۱۰- تغییرات فشار محفظه لنگ در طول تست

نمونه‌های روغن که هر ۵۰ ساعت برداشته می‌شوند، با ثبت اطلاعات جانبی از جمله نوع روغن، ساعت کارکرد روغن، ساعت کارکرد موتور، نوع موتور و آزمون به همراه اپراتور، برداشته و ثبت می‌شود. شکل ۴-۱۱- نمایی از نمونه‌های روغن در آزمون‌های مختلف بر روی موتورهای مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۱- نمونه‌های روغن مورد آزمایش در ساعت‌های مختلف کارکرد در آزمون‌های موتوری

سپس این نمونه‌های روغن موتور برای آزمایش اندازه‌گیری ظرفیت خازنی آفلاین، از طریق مدار هیدرولیک به حسگر وصل شده و روغن از بین حسگر عبور داده می‌شود. ظرفیت خازنی روغن موتور بنزینی در فرکانس 100 KHz از طریق LCR meter خوانده شده است. برای انجام آزمایش از روغن بهران سوپر پیشتاز 10W40 استفاده شده است. مشخصات روغن استفاده شده بر اساس اطلاعات سازنده در جدول ۳-۴ موجود است.

جدول ۳-۴- مشخصات روغن استفاده شده در موتورها در حین آزمون دوام [۵۱]

مشخصات فیزیکی، شیمیایی	گرانروی C° ۱۰۰ cSt	شاخص گرانروی	حداقل نقطه اشتعال °C	حداکثر نقطه ریزش °C	دانسیته در C° ۱۵ Kg/m ³	قلیائیت کل mgKOH/g
روش آزمون	ASTM D-445	ASTM D-2270	ASTM D-92	ASTM D-97	ASTM D-1298	ASTM D-2896
بهران سوپر پیشتاز 10W40	15.5	160	224	-33	869	7.5

۴-۴ بررسی عملکرد و حساسیت حسگر کیفیت روغن به صورت آنلاین در مدار هیدرولیک

بعد از انجام آزمایش‌های آفلاین، حسگر در مدار هیدرولیک نصب و به صورت آنلاین داده برداری شده است. در این آزمایش‌ها اثر پارامترهای نویز بر عملکرد حسگر مانند دما، فشار و دبی روغن مورد آزمایش قرار گرفت. در مرحله بعد اثر آلودگی‌های آب و سوخت در روغن و اثر اکسیداسیون روغن بر خروجی‌های حسگر مورد آزمایش و ارزیابی قرار گرفته است. پارامترهای خروجی حسگر کیفیت روغن ساخته شده، ظرفیت خازنی، زاویه تنا و اختلاف فشار روغن می‌باشد. نهایتاً این حسگر در اتاق آزمون موتوری بصورت آنلاین خارج از مدار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۱-۴-۴ تجهیزات مورد استفاده

در این بخش مدار هیدرولیک و اجزای آن شرح داده شده است:

۱-۴-۴ حسگر TAN DELTA

حسگر کیفیت روغن تجاری شرکت TAN DELTA ساخت کشور انگلستان مطابق شکل ۱۲-۴ تهیه شده است. اساس کارکرد این روغن بر اساس تغییرات ضریب دی‌الکتریک می‌باشد. هدف از تهیه این حسگر بستن آن در مدارهای آنلاین روغن همزمان با حسگر ساخته شده و مقایسه نتایج دو حسگر می‌باشد. این حسگر تأیید کالیبراسیون برای شناسایی میزان خرابی روغن دارد (مستندات کالیبراسیون در پیوست ۳ آمده است). مقایسه نتایج این حسگر و حسگر ساخته شده می‌تواند عملکرد حسگر جدید را مورد سنجش و ارزیابی قرار دهد و به کالیبراسیون حسگر ساخته شده کمک کند.



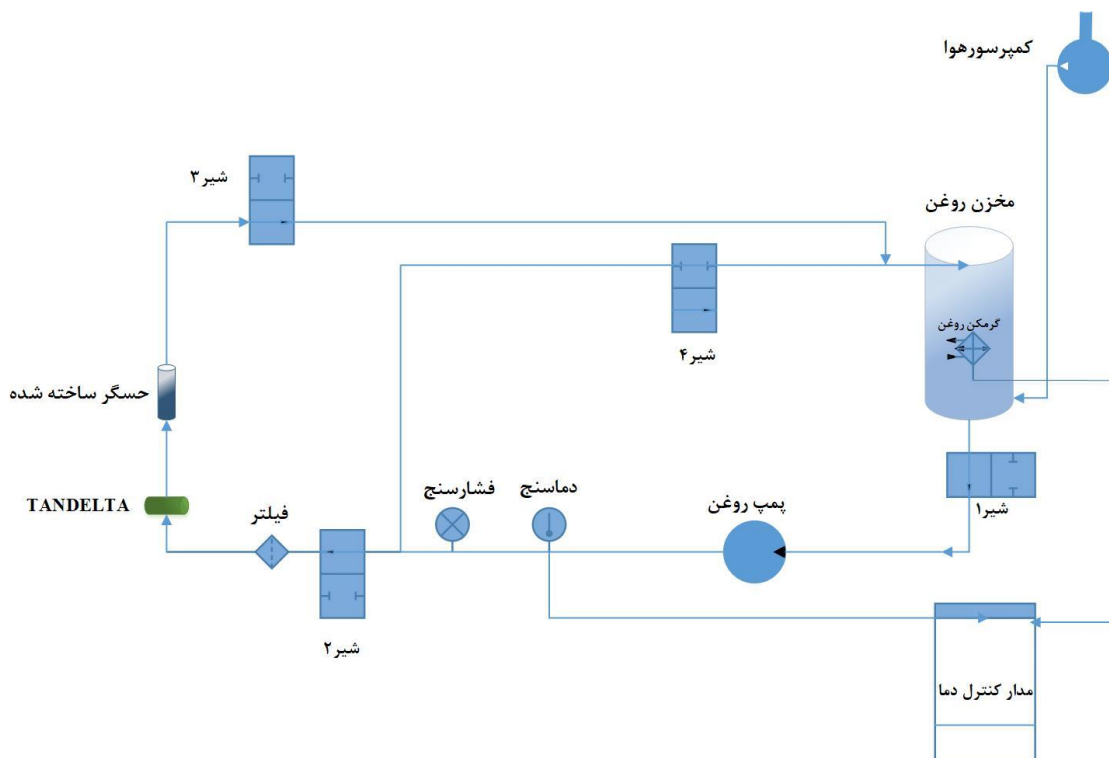
(ب) نحوه اتصال این حسگر به رایانه

الف- حسگر داخل مدار کیفیت روغن TAN DELTA

شکل ۱۲-۴- حسگر تجاری کیفیت روغن ساخت شرکت TAN DELTA

۲-۱-۴-۴ مدار هیدرولیک تست آنلاین حسگر

برای سنجش حسگر لازم است آن را در یک مدار هیدرولیک کنترل شده مورد ارزیابی و آزمایش قرار دهیم. این مدار امکان آزمایش‌هایی را می‌دهد که امکان انجام آن در موتور به علت صدمه زدن به خود موتور وجود ندارد از طرفی بسیاری از پارامترها در موتور قابل کنترل نمی‌باشد. امکان تغییر دبی، تغییر فشار روغن، آزمایش اکسیداسیون، آلوده کردن روغن به آب، آلودگی روغن به سوخت و آزمون حساسیت حسگر به دما در این مدار هیدرولیک وجود دارد. مدار هیدرولیک در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است. حسگر ساخته شده طبق فلوجارت شکل ۴-۱۱ مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۴-۱۳ - مدار هیدرولیک برای آزمایش حسگرها

در این مرحله حسگر ساخته شده به صورت کامل و همبندی نهایی درآمده است (در تست آفلاین و مقطعی هسته مرکزی حسگر شانه‌ای مورد آزمایش قرار می‌گرفت). حسگر دما و تغییرات فشار روی

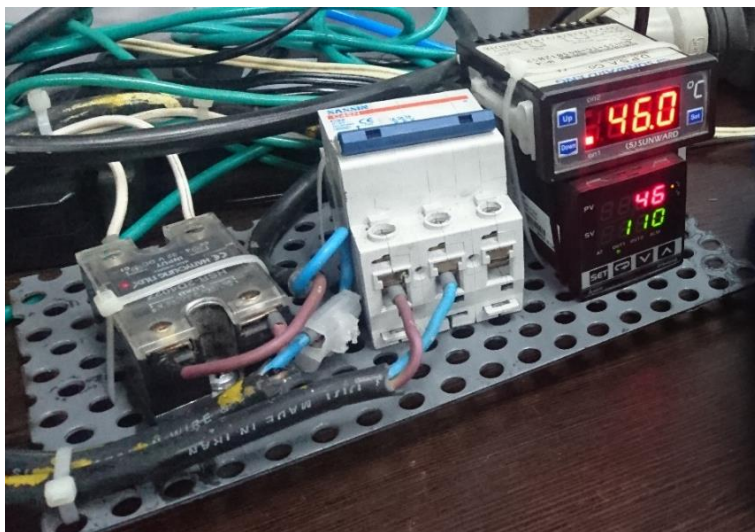
بدنه آن نصب شده و به صورت آنلاین داده برداری شده است. حسگر به یک مدار هیدرولیک شامل پمپ دنده‌ای مطابق شکل ۴-۱۴، مخزن روغن، فشارسنج، دماسنج، گرمکن روغن با توان ۱/۵ کیلووات مطابق شکل ۴-۱۵، مدار فرمان برق و مدار کنترل PID دما مطابق شکل ۴-۱۶، کنترلر دبی هوا مطابق شکل ۴-۱۷، شیرهای کنترل، لوله‌های دما بالا، فیلتر روغن و کمپرسور باد وصل شده است. حسگر تجاری آنالیز روغن TAN DELTA همزمان با حسگر ساخته شده به این مدار وصل می‌شود.



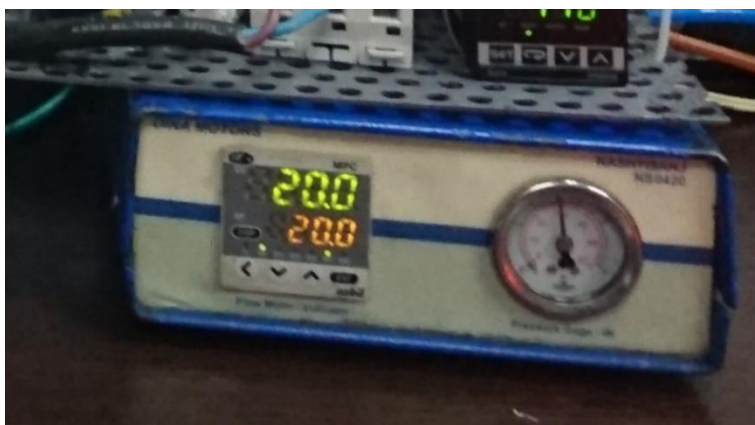
شکل ۴-۱۴- پمپ هیدرولیک مورد استفاده با حداکثر تحمل فشار ۲۰ BAR



شکل ۴-۱۵- گرمکن روغن مورد استفاده در مدار هیدرولیک

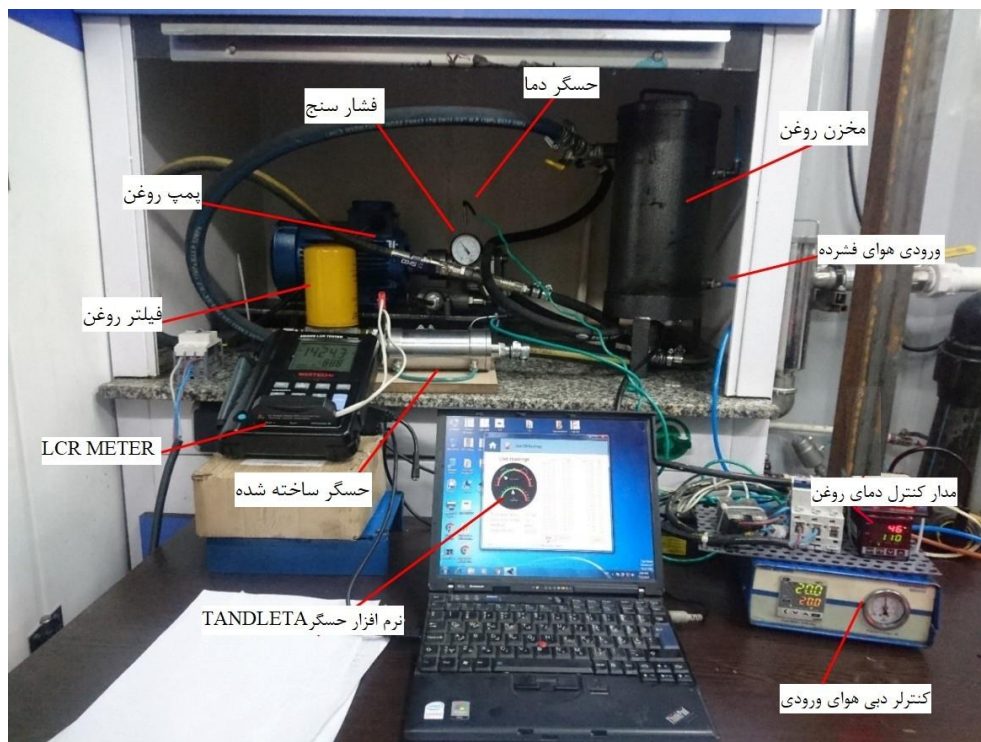


شکل ۴-۱۶- مدار کنترل دمای روغن



شکل ۴-۱۷- کنترلر دبی هوا برای کنترل هوای فشرده ورودی

شکل ۴-۱۸- مدار کامل هیدرولیک و شکل ۴-۱۹- حسگر ساخته شده در کنار حسگر TAN DELTA را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۸- حسگر خازنی وصل شده به مدار هیدرولیک به صورت آنلاین



شکل ۴-۱۹- نصب حسگر ساخته شده و TAN DELTA به طور همزمان در مدار هیدرولیک

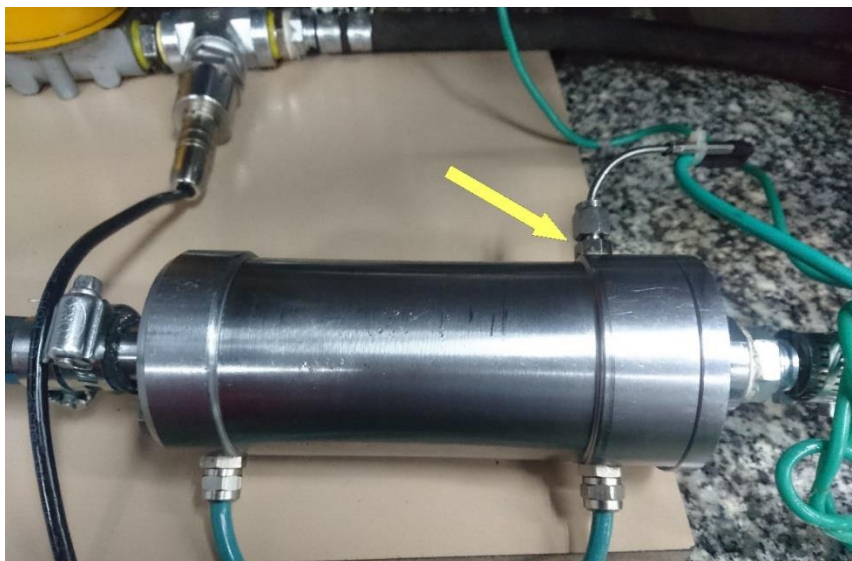
۲-۴-۴ پارامترهای نویز بر عملکرد حسگر

در این بخش عملکرد حسگر تحت اثر پارامترهای مختلف نویز مورد بررسی قرار می‌گیرد. خروجی‌های حسگر با خرابی‌های مختلف روغن تغییر می‌کند در صورتی که بر اثر عوامل نویز هم تغییر کند، تحلیل خروجی‌های آن همراه خطا خواهد بود. مشخص است در صورتی که خروجی‌های حسگر در اثر این عوامل تغییر کند باید نسبت به تصحیح اثر آن‌ها اقدام شود و یا محدوده دقت اعداد گزارش شود.

۱-۲-۴-۴ دمای روغن

دمای روغن موتور با توجه به نوع موتور، سیستم کنترل دمای موتور، اندازه رادیاتور و یا کولر روغن، قدرت فن، شرایط رانندگی، توان موتور و دمای محیط آن متفاوت خواهد بود. همچنین دمای روغن هنگام استارت موتور تا گرم شدن آن تغییر می‌کند. تغییرات دمای روغن موتور باعث تغییر ضریب دی‌الکتریک روغن، انبساط و انقباض اجزای مکانیک حسگر و تغییر فواصل آن‌ها و تغییرات در دقت قطعات الکترونیکی می‌شود. به این دلایل ضریب دی‌الکتریک و ظرفیت خازنی می‌تواند با تغییر دما تغییر کند و می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد.

برای این منظور یک گرمکن در مخزن روغن مطابق شکل ۴-۱۵ نصب شده است. این گرمکن روغن به یک مدار الکتریکی به همراه کنترلر PID دما مطابق شکل ۴-۱۶ متصل شده است. دماسنجی هم در مسیر روغن قرار دارد که به کنترلر دما وصل می‌شود و دما با دقت بالا در مخزن مدار روغن کنترل می‌شود. حداکثر خطای این کنترلر ۱ درجه سانتیگراد است. برای بررسی اثر دما چند سری روغن نو، روغن‌های اکسید شده و کارکرده مورد بررسی قرار گرفت. بدین صورت که کلیه عوامل مؤثر بر خروجی حسگر، موقعیت شیرها و کیفیت روغن ثابت بوده و دما از ۳۰ درجه سانتیگراد تا ۱۱۰ درجه تغییر داده شده و خروجی داده ثبت شده است. محل اتصال دماسنج به حسگر در شکل ۴-۲۰ نشان داده شده است؛ دمای روغن توسط دماسنجی در مسیر روغن و توسط دماسنجی روی حسگر کنترل می‌شود.



شکل ۴-۲۰- حسگر خازنی (محل اتصال دماسنج روی حسگر)

۴-۲-۲-۴ دبی روغن

حسگر ساخته شده در موتور یا مدارهای هیدرولیک با دبی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین لازم است تا تغییرات خروجی حسگر با تغییرات دبی مورد بررسی قرار گیرد. برای تغییر دبی در مدار هیدرولیک از تغییر در میزان باز بودن شیر کنارگذر (شیر شماره ۴) در مدار شکل ۴-۱۳ استفاده شده است. در صورتی که شیر کنارگذر کاملاً بسته باشد کل روغن از حسگر عبور می‌کند (حداکثر دبی). تغییرات خروجی حسگر با توجه به میزان باز بودن شیر کنارگذر ثبت شده است.

۴-۲-۳-۴ فشار روغن

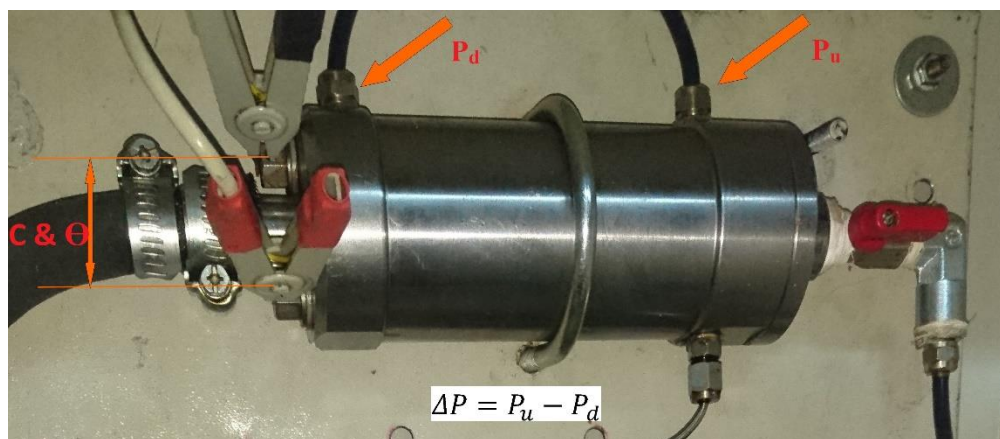
برای ثبت فشار در مدار هیدرولیک، از یک فشارسنج هیدرولیک در مسیر جریان روغن قبل از حسگرها استفاده شده است. حسگر ممکن است در سیستم‌هایی با فشارهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد و ضروری است که عملکرد آن در فشارهای مختلف ثابت باشد. برای تغییرات فشار روغن در مدار هیدرولیک (شکل ۴-۱۳)، از شیر کنترلی بعد از حسگرها استفاده شده است (شیر شماره ۳). با کم یا

زیاد کردن خروجی این شیر فشار روغن در حسگر تغییر می‌کند. با ثبت تغییرات فشار و تغییرات خروجی‌های حسگر، عملکرد حسگر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۴-۳-۴ اثر تغییرات گرانشی روغن در عملکرد حسگر

روغن از داخل حسگر عبور می‌کند، با این ویژگی اختلاف فشار روغن ورودی و خروجی از حسگر در دبی ثابت نشان دهنده تغییرات گرانشی است و اندازه‌گیری می‌شود. برای حذف اثر دما، دماسنج هم بر روی حسگر نصب شده است و دمای روغن کنترل می‌شود. تغییرات کیفیت روغن می‌تواند روی ضریب دی‌الکتریک، زاویه تتا و گرانشی اثر بگذارد که با بررسی تغییرات این سه پارامتر در دمای اندازه‌گیری شده، کیفیت روغن به صورت آنلاین بدست می‌آید.

بر روی پوسته حسگر محل اتصال فشارسنج در ورودی و خروجی خازن تعبیه شده است. در شکل ۴-۲۱ محل اتصال لوله‌های رابط به جعبه حساسه برای اندازه‌گیری فشار ورودی و خروجی روغن نشان داده شده است. لوله‌ها رابط برای اندازه‌گیری به جعبه حساسه وصل می‌شود.



شکل ۴-۲۱- حسگر کیفیت روغن آنلاین متصل در حال خوانش ظرفیت خازنی، زاویه تتا

و اختلاف فشار روغن

در شرایط دبی ثابت، در صورتی که در دمای مشخصی اختلاف فشار روغن دچار افت شده، این نشان دهنده کاهش گرانشی خواهد بود. این ویژگی برخی از کاستی‌های شناسایی کیفیت روغن از طریق

ظرفیت خازنی و زاویه تتا را پوشش می‌هد. خروجی جعبه حساسه (فشارهای ورودی و خروجی از حسگر) در اتاق کنترل و توسط نرم‌افزار موتور آزما ثبت و بررسی می‌شود (شکل ۴-۲۲)



الف) جعبه حساسه برای اندازه‌گیری فشار ورودی و ب) ثبت فشار ورودی و خروجی توسط نرم‌افزار موتور آزما خروجی حسگر

شکل ۴-۲۲- ثبت فشار ورودی و خروجی از حسگر

۴-۴-۴ بررسی عملکرد حسگر در صورت آلوده شدن روغن موتور

در این بخش از آزمایشات، توانایی حسگر برای شناسایی عوامل خرابی روغن شامل آلودگی سوخت، آلودگی آب و اکسیداسیون روغن بررسی شده است.

۴-۴-۴-۱ آلودگی سوخت

برای آزمایش روغن آلوده به سوخت و بررسی حسگرها، سوخت به میزان مورد نظر از طریق مخزن به مدار هیدرولیک به تدریج تزریق شده و خروجی حسگرها پس از آلوده شدن روغن ثبت شده است.

۴-۴-۴-۲ آلودگی آب

در یک موتور یا ماشینی که روغن در آن کاربرد دارد، احتمال اختلاط آب و روغن وجود دارد و در صورت ورود آب، روغن به سرعت دچار خرابی می‌شود. برای آزمایش آلودگی آب در روغن لازم است تا مقادیر مشخص آب به صورت مقطعی به مخزن روغن مدار هیدرولیک تزریق شود. پس از مخلوط شدن آب و

روغن و چندین مرتبه گردش کامل روغن در مدار، مقدار خروجی حسگرها ثبت می‌شود. آب از ۰ تا ۱/۳۵ درصد حجمی به صورت مقطعی به مدار روغن که در حال گردش در مدار و عبور از حسگرها می‌باشد تزریق می‌شود. خروجی حسگرهای TAN DELTA و حسگر ساخته شده در درصدهای مختلف آب در روغن ثبت شده است. پس از این آزمایشات فیلتر روغن تعویض شد.

۴-۴-۵ بررسی عملکرد حسگر در صورت اکسیداسیون روغن موتور

برای اکسیداسیون روغن استانداردهای مختلف ASTM تدوین شده است. از جمله استانداردهای ASTM D 4742, ASTM D 7320, ASTM D 7528, ASTM D 4636 مربوط به اکسیداسیون روغن می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های دمایی و در نظر گرفتن ظرفیت‌های دما و فشار قطعات و آب‌بندها برنامه‌ای برای اکسیداسیون روغن در مدار هیدرولیک طبق جدول ۴-۴ اعمال شده است. با توجه به محدودیت‌های مدار هیدرولیک و قطعات حسگر از استاندارد خاصی پیروی نشده است ولی سعی شده است ماهیت آزمون به استانداردهای ASTM و آزمون اختصاصی اکسیداسیون تحقیق پرز و هادفیلد [۵۲] نزدیک باشد.

جدول ۴-۴- شرایط سه آزمایش مختلف اکسیداسیون روغن

توضیحات	دبی هوای ورودی به روغن (lit/min)	مدت زمان آزمایش (hrs)	کاتالیزور	دمای روغن (°C)	شماره آزمایش
دمای روغن بین ۶۵ تا ۷۵ در این تست متغیر بوده است.	۲۰	۲۰۰	مس	۷۰	۱
کنترل دقیق دما	۲۰	۲۰۰	مس	۱۱۰	۲
کنترل دقیق دما- در طول آزمون به دلیل کاهش حجم روغن در مرحله روغن سریز شده است.	۲۰	۲۰۰	مس	۱۴۰	۳

روغن در هر آزمایش در مدار هیدرولیک پیوسته در جریان بوده و داده حسگرهای TAN DELTA و حسگر ساخته شده به صورت آنلاین ثبت شده است. برای کمک به اکسیداسیون سریعتر روغن لازم بوده تا هوا با دبی مشخص به مخزن روغن وارد شود؛ بنابراین در زیر مخزن روغن محل اتصال جریان هوا از کنترلر دبی هوا (شکل ۴-۱۷) تعبیه شده است. کمپرسور باد به کنترلر دبی هوا وصل شده است، کنترلر هوای فشرده شده با دبی مورد نظر را به مخزن روغن وارد می‌کند. برای تسریع اکسیداسیون روغن از سیم‌های مسی به عنوان کاتالیزور مطابق شکل ۴-۲۳ استفاده شده است.



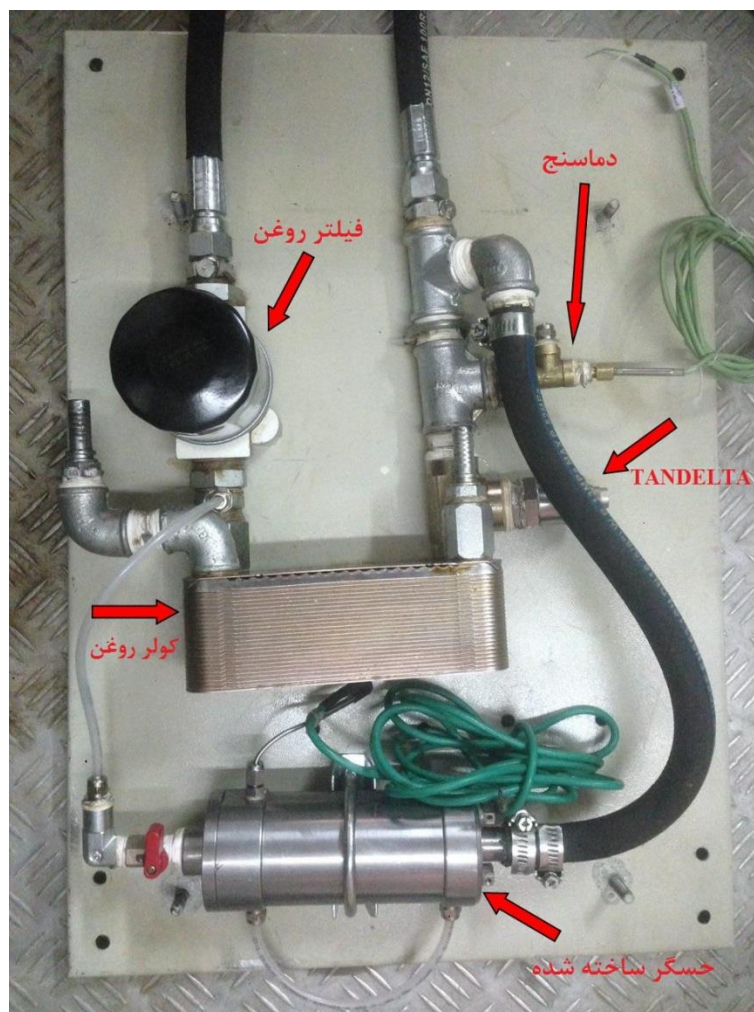
شکل ۴-۲۳- سیم‌های مسی مورد استفاده برای تسریع فرایند اکسیداسیون روغن

۴-۵ صحنه گذاری حسگر کیفیت روغن در آزمون دوام موتوری

آخرین مرحله ارزیابی حسگر کیفیت روغن، نصب آن در شرایط واقعی کارکرد روغن بر روی موتور TU5 در اتاق آزمون موتوری آزمایشگاه دیناموتور است. حسگر به صورت داخل مدار روغن به موتور وصل شده است ولی از طریق پمپ روغن موتور جریان درون آن برقرار می‌شود. در واقع حسگر ساخته نیاز به پمپ کمکی دارد و باید در یک مدار فرعی جریان روغن برقرار شود یعنی به صورت out of line طراحی شده است اما در این آزمایش حسگر به صورت in line نصب شده است و مستقیم از پمپ موتور تغذیه می‌شود. در صورتی که حسگر مستقیم در مدار روغن موتور قرار گیرد، به دلیل افت فشار ممکن است

موتور آسیب ببیند. حسگر TANDELTA به صورت in line طراحی شده و مستقیم در مسیر جریان روغن قرار می گیرد.

روغن موتور از حسگرها عبور کرده و به کارتر برمی گردد. حسگر تجاری TAN DELTA همزمان با حسگر آزمایشگاهی ساخته شده در مسیر روغن بعد از کولر روغن قرار گرفته است، برای کنترل دمای روغن در محدوده دلخواه از کولر روغن مجهز به PID استفاده شده است. شکل ۴-۲۴ حسگرها و کولر روغن و LCR METER را به صورت پکیج سامانه پایش وضعیت کیفیت روغن موتور نشان می دهد.



شکل ۴-۲۴-مدار سامانه پایش وضعیت کیفیت روغن موتور

شکل ۴-۲۵- الف تابلو سامانه پایش وضعیت روغن در اتاق آزمون موتوری نشان داده شده است. اطلاعات خروجی حسگر ساخته شده در پکیج توسط LCR METER خوانده می‌شود. نمای کلی اتاق آزمون و موقعیت موتور و سامانه پایش وضعیت روغن در شکل ۴-۲۵- ب نشان داده شده است.



ب) نمای کلی اتاق آزمون و موقعیت سامانه پایش وضعیت



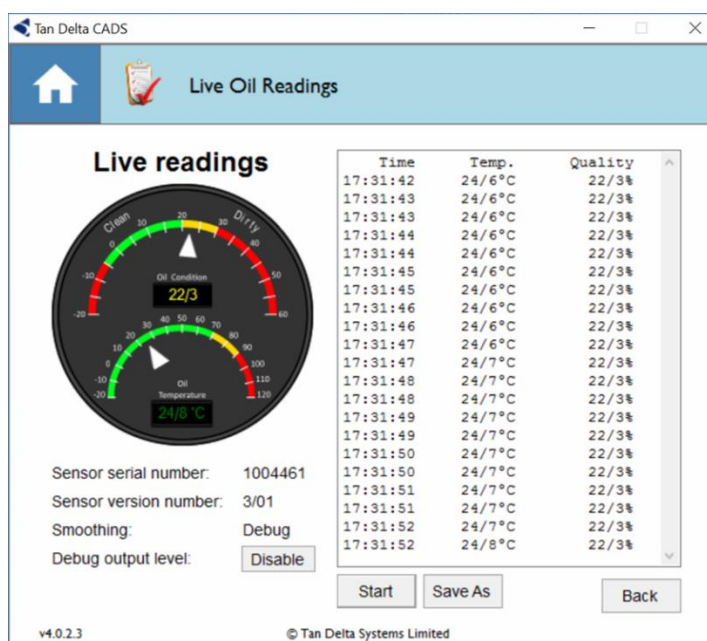
الف) تابلو سامانه پایش وضعیت روغن

شکل ۴-۲۵- تابلو سامانه پایش وضعیت روغن نصب شده در اتاق آزمون موتوری

در ابتدا سعی شده تا خروجی حسگر کیفیت روغن ساخته شده، از طریق سیم‌های رابط به اتاق کنترل انتقال یابد. بدین منظور آزمایشی ترتیب داده شده و حسگر با سیم رابط بلند و بدون سیم رابط در دماهای ۳۰ و ۶۰ درجه مورد آزمایش قرار گرفت. حسگر با سیم‌های رابط در کوره آزمایشگاهی قرار داده شده و در دمای ۶۰ درجه دیتا برداری شده است. در آزمایش بعدی حسگر بدون سیم در این دما مورد دیتا برداری قرار گرفت. پس از بررسی نتایج مشخص شده است تأثیر تغییرات دما روی افزایش ظرفیت خازنی بر روی حسگر با سیم‌های رابط بسیار بیشتر از افزایش ظرفیت خازنی حسگر بدون سیم است و در نتیجه افزایش ظرفیت ناشی از خرابی روغن قابل کنترل نیست. در نتیجه جهت حذف اثر

دمای سیم و خطاهایی که با افزایش طول سیم رابط بر روی حسگر خازنی رخ می‌دهد، اطلاعات حسگر در محل تابلو پایش وضعیت خوانده شده است.

حسگر TAN DELTA به جعبه حساسه^۱ وصل شده و در اتاق کنترل مطابق شکل ۴-۲۶ داده برداری شده است. روغن موتور در یک دوره ۲۰۰ ساعته مورد مطالعه قرار گرفت. داده‌ها در دور موتور 3400(rpm) ثبت شده است و در فصل نتایج ارائه خواهد شد.



شکل ۴-۲۶- داده برداری آنلاین حسگر TAN DELTA با نرم‌افزار مخصوص آن

¹ Transducer

فصل ۵ بررسی نتایج

۱-۵ نتایج بررسی طرح‌های اولیه حسگر

نتایج آزمایش حسگرهای اولیه صفحه موازی و حسگر استوانه‌ای در این بخش شرح داده شده است.

۱-۱-۵ حسگر اولیه صفحه تخت موازی:

با توجه به شکل ۳-۵، حسگرهای صفحه موازی شماره ۳ و ۴ به علت کوچک بودن اندازه صفحه و کم بودن ظرفیت خازنی قادر به شناسایی تغییرات روغن نبوده‌اند. نتایج آزمایش حسگرهای صفحه موازی شماره ۱ و ۲ در جدول ۱-۵ آمده است.

جدول ۱-۵- نتایج آزمایش حسگر اولیه صفحه موازی

ظرفیت خازنی حسگر ۱ (PF)	ظرفیت خازنی حسگر ۲ (PF)	در صد حجمی آب (%)	روغن
۲۴/۲	۲۰/۱	۰	بدون روغن (هوا)
۳۵/۹	۲۳/۲	۰	بهران سوپر بیشتاز 20W50(نو)
۳۷/۵	۲۳/۶	۵	بهران سوپر بیشتاز 20W50(نو)
۴۳/۱	۲۲/۳	۱۰	بهران سوپر بیشتاز 20W50(نو)

ظرفیت خازنی حسگرخازنی طرح ۲ و طرح ۱ به ترتیب برای روغن نو ۲۳/۲ و ۳۵/۹ اندازه‌گیری شده است. با افزودن ۰.۵٪ آب به روغن، حسگر شماره ۲ کمی افزایش و حسگر شماره ۱ افزایش یافت. ولی با افزایش بیشتر حجم آب، ظرفیت خازنی حسگر شماره ۲ کاهش و در حسگر شماره ۱ افزایش یافت. این نشان دهنده این موضوع بود که تغییرات ظرفیت خازنی به اندازه کافی جهت تشخیص بزرگ نیست. با توجه به نتایج آزمایش و مقدار خطای LCR METER در این محدوده، لازم است برای شناسایی بهتر خرابی روغن، ظرفیت خازنی حسگر بهینه شده بالاتر رود.

۵-۱-۲ حسگر اولیه استوانه‌ای:

نتایج آزمایش روغن‌های مختلف با حسگر استوانه‌ای در جدول ۲-۵ آمده است.

جدول ۲-۵ نتایج آزمایش حسگر استوانه‌ای

نوع روغن	در صد آب (%)	کارکرد در موتور ساعت/کیلومتر	ظرفیت خازنی (pf)	تفاوت با روغن نو (pf)
بدون روغن (هوا)	۰	۰	۲۵/۶۱	-
بهران سوپر پیشتاز 10W40	۰	۰	۵۰/۱۸	-
بهران سوپر پیشتاز 10W40	۰	۲۰۰ ساعت در موتور TU5	۵۰/۵۵	۰/۳۷
بهران سوپر پیشتاز 20W50	۰	۰	۴۸/۸۸	-
بهران سوپر پیشتاز 20W50	۰	۷۰۰۰ کیلومتر در موتور دیزل FAW	۵۱/۵۴	۲/۶۶
بهران سوپر پیشتاز 20W50	۱/۵	۷۰۰۰ کیلومتر در موتور دیزل FAW	۵۲/۴۵	۳/۵۷

عملکرد حسگر از طرح‌های صفحه‌ای بهتر است، ولی باز هم در شناسایی روغن خراب تفاوت ظرفیت خازنی، با روغن نو کوچک است. و خطا در سیستم خوانش ممکن است افزایش یابد. لذا در مرحله آینده طراحی حسگر، حسگر می‌بایست در محدوده بزرگ‌تری طراحی شود.

۵-۲ نتایج آزمایش حسگر کیفیت روغن با هوا و روغن

ظرفیت خازنی حسگر کیفیت روغن طرح نهایی، با هوا (بدون روغن) در فرکانس ۱۰۰ KHZ برابر ۱۰۰ pF بوده است. ظرفیت خازنی روغن نو برابر ۱۴۱۲ pF بوده است. این دو مقدار به عنوان مقادیر مبنا استفاده می‌شود. اگر مقدار ظرفیت خازنی روغن نو تغییر کند، نشان دهنده تغییر کیفیت روغن تازه یا تغییر در فواصل و ابعاد حسگر (با احتمال و اثر کمتر) می‌باشد. به طور مثال آزمایش‌های مختلف روی روغن تازه بهران سوپر پیشتاز 10W40 نشان دهنده حضور دو نوع مختلف از این روغن در بازار می‌باشد. به طوری که در برخی از نمونه‌های دریافتی از شرکت بهران ظرفیت خازنی روغن نو ۱۴۱۲ پیکوفاراد و در نمونه‌های متفرقه ۱۴۲۲ بوده است. این موضوع به اطلاع شرکت بهران رسانده شد که نشان دهنده وجود روغن‌های تقلبی یا با کیفیت متفاوت در بازار می‌باشد. با داشتن ظرفیت خازنی روغن و ظرفیت خازنی هوا با توجه به معادله (۳-۴) ضریب دی‌الکتریک روغن تازه برابر ۲/۰۲ در این آزمایش می‌باشد. مقدار ظرفیت خازنی حسگر بدون روغن به عنوان مبنایی برای آزمایش‌های دیگر است. به طوری که برای بدست آوردن ضریب دی‌الکتریک هر روغن با این حسگر با توجه به معادله (۳-۴) ظرفیت خازنی بدست آمده بر عدد ۷۰۰ تقسیم می‌شود. در ادامه این پایان نامه از ظرفیت خازنی برای مقایسه کیفیت روغن استفاده شده که معادل تغییر ضریب دی‌الکتریک خازن است.

۵-۳ نتایج آزمایش‌های حسگر کیفیت روغن به صورت آفلاین

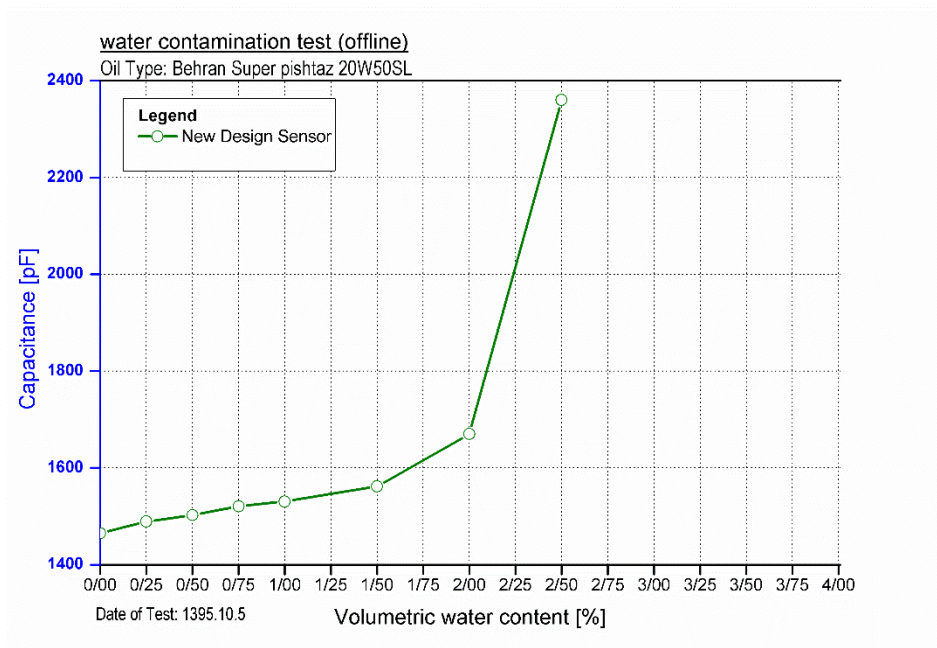
در این بخش نتایج آزمایش آفلاین حسگرها توسط روغن‌هایی با آلودگی مصنوعی آب و همچنین آزمایش آفلاین نمونه‌های گرفته شده از موتور TU3 و TU5 شرح داده شده است.

۵-۳-۱ نتایج آزمایش‌های آلودگی آب

نتایج آزمایش آلودگی آب در روغن با حسگر کیفیت روغن ساخته شده و حسگر TANDELTA بررسی شده است.

الف) نتایج آزمایش آلودگی آب با حسگر کیفیت روغن

نتایج آزمایش آفلاین آلودگی آب در شکل ۵-۱ آمده است. با توجه به روش آزمون آفلاین (شکل ۴-۳) روغن با آلودگی‌های مصنوعی مختلف از ۰/۲۵ تا ۲/۵ درصد مورد آزمایش قرار گرفت. ظرفیت خازنی توسط LCR METER و در فرکانس ۱۰۰ KHZ اندازه‌گیری شده است. روغن مورد استفاده بهران سوپر پیشتاز 20W50 و دمای آزمایش دمای محیط بوده است. با توجه به نمودار ظرفیت خازنی حسگر با افزایش آلودگی آب تا ۲ درصد به صورت خطی و برای بیش‌تر از این مقدار به صورت غیرخطی افزایش یافته است. مقدار افزایش ظرفیت خازنی در مقادیر بالای ۲ درصد زیاد و با شیب تند است. افزایش ناگهانی ظرفیت خازنی با شیب تند می‌تواند نشانه اختلاط آب و روغن در موتور باشد.

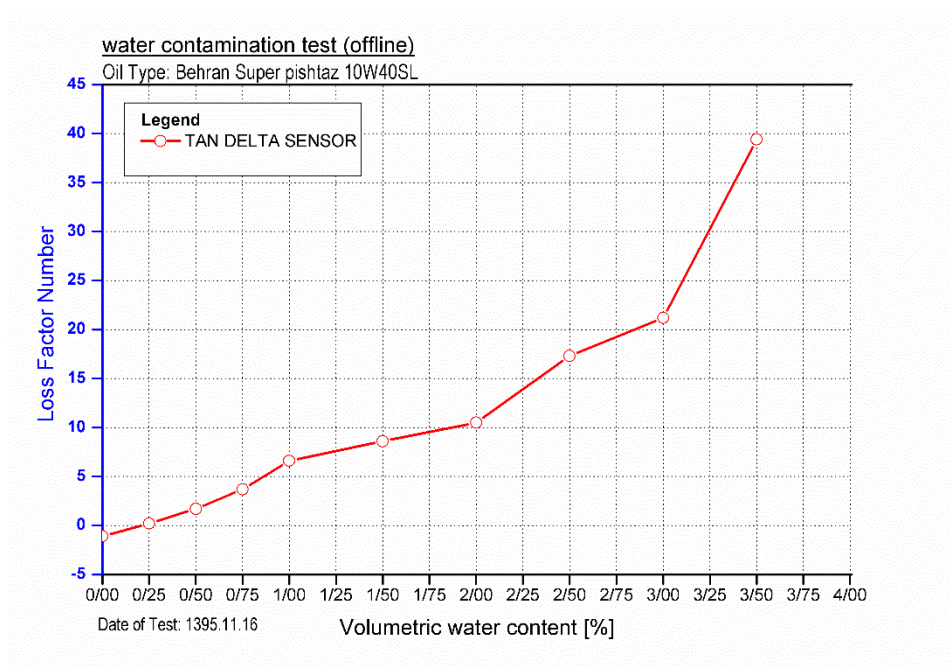


شکل ۵-۱ - تغییر ظرفیت خازنی با افزایش آلودگی آب در روغن (آفلاین)

ب) نتایج آزمایش آلودگی آب با حسگر TAN DELTA (آفلاین)

برای انجام این آزمایش مخزن روغن کوچکی ساخته شده و حسگر TAN DELTA به آن وصل شده است. روغن با درصدهای مختلف آلودگی آب در روغن، درون این مخزن ریخته شده و با حسگر TAN DELTA دیتا برداری شده است. داده‌های حسگر TANDELTA از طریق نرم‌افزار مخصوص آن که با

رایانه اجرا می‌شود، خوانده شده است. روغن مورد استفاده در این آزمایش بهران سوپر پیش‌تاز 10W40 است. محور عمودی نمودار شکل ۵-۲، خروجی مخصوص این حسگر Loss Factor است. این مقدار به اختصار LF نامیده می‌شود. این حسگر علاوه بر LF، دمای روغن را هم اندازه‌گیری کرده و در خروجی نمایش می‌دهد. محدوده LF روغن سالم یا خراب بر اساس کاتالوگ این محصول در پیوست آمده است. شرکت TAN DELTA محدوده سلامت روغن را بین ۲- الی ۲۰ از خروجی حسگر تعیین کرده است. با توجه به نمودار افزایش آلودگی آب با افزایش مقدار خروجی حسگر TAN DELTA همراه است. به طوری که خروجی حسگر (LF) تا مقدار ۲/۵ درصد آلودگی آب، با افزایش خطی همراه است و بیش‌تر از ۲/۵ درصد با شیب بیشتر افزایش می‌یابد.

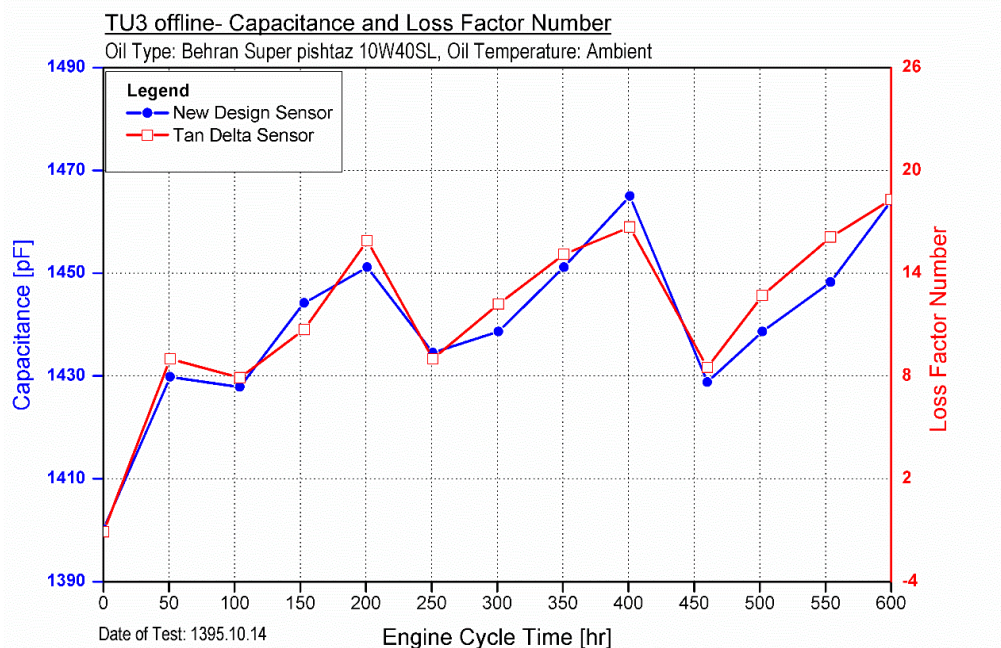


شکل ۵-۲- نتایج آزمایش آلودگی آب با حسگر TAN DELTA (آفلاین)

۵-۳-۲ نتایج آزمایش آفلاین حسگر کیفیت روغن در آزمون دوام موتور TU3
نتایج خروجی‌های حسگر کیفیت روغن شامل ظرفیت خازنی، مقاومت، تغییر زاویه تنا و خروجی حسگر TANDELTA، برای نمونه‌هایی که از موتور TU3 گرفته شده در این بخش شرح داده شده است.

الف) تغییرات ظرفیت خازنی روغن و LF در طول کارکرد روغن در موتور TU3

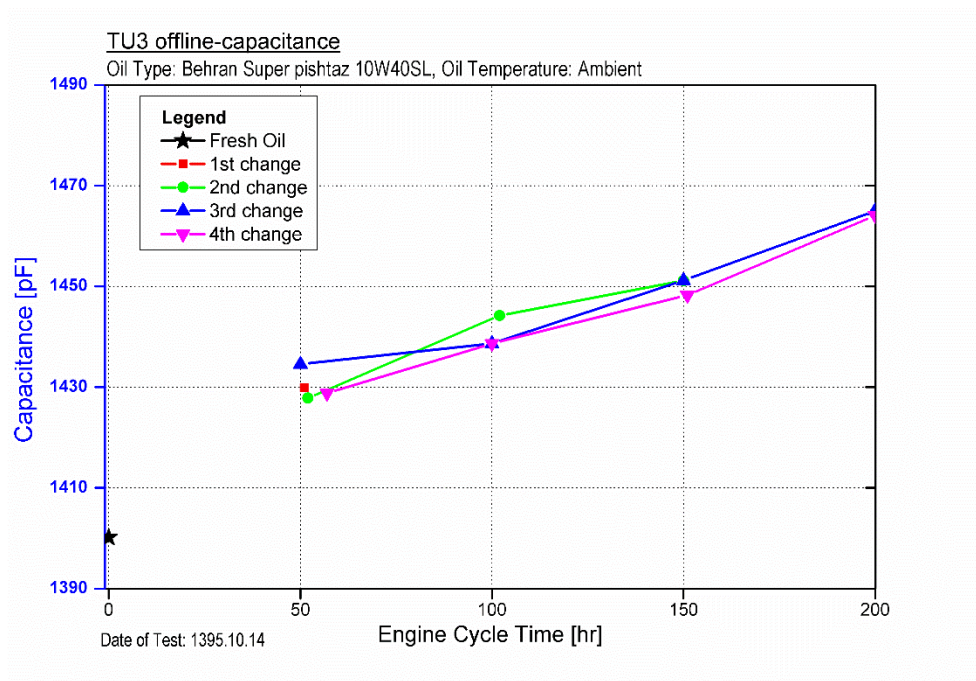
نمونه‌های روغن کارکرده گرفته شده از موتور TU3 با حسگرها مورد آزمایش قرار گرفت. هر ۵۰ ساعت مقدار ۲۰۰CC نمونه روغن از موتور گرفته شده و به حسگر خازنی تزریق شده است. برای مقایسه، این روغن‌ها به حسگر TAN DELTA هم تزریق شده و نتایج آن در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. روغن هر ۲۰۰ ساعت تعویض شده است بنابراین کاهش مقادیر خروجی بعد از هر ۲۰۰ ساعت به علت تعویض روغن است. همان طور که از نمودار شکل ۳-۵ مشخص است، ظرفیت خازنی حسگر ساخته شده و LF حسگر TAN DELTA با افزایش ساعت کارکرد در موتور TU3 افزایش می‌یابند. نتایج بدست آمده نشان دهنده انطباق خوب نتایج دو حسگر می‌باشد. حسگر ساخته شده در این مرحله به صورت پکیج بسته نشده است بنابراین حرکتهای جزئی بین دو تیغه حسگر ممکن است باعث تغییرات کوچکی در مقدار ظرفیت خازنی شود.



شکل ۳-۵- تغییرات ظرفیت خازنی و LF در طول کارکرد موتور TU3 در آزمون دوام

شکل ۴-۵ خروجی نمودار شکل ۳-۵ را در هر تعویض روغن (هر ۲۰۰ ساعت) به تفکیک نشان می‌دهد. خروجی شکل ۴-۵ نشان دهنده تغییرات ظرفیت خازنی حسگر در محدوده مشخصی در هر تعویض

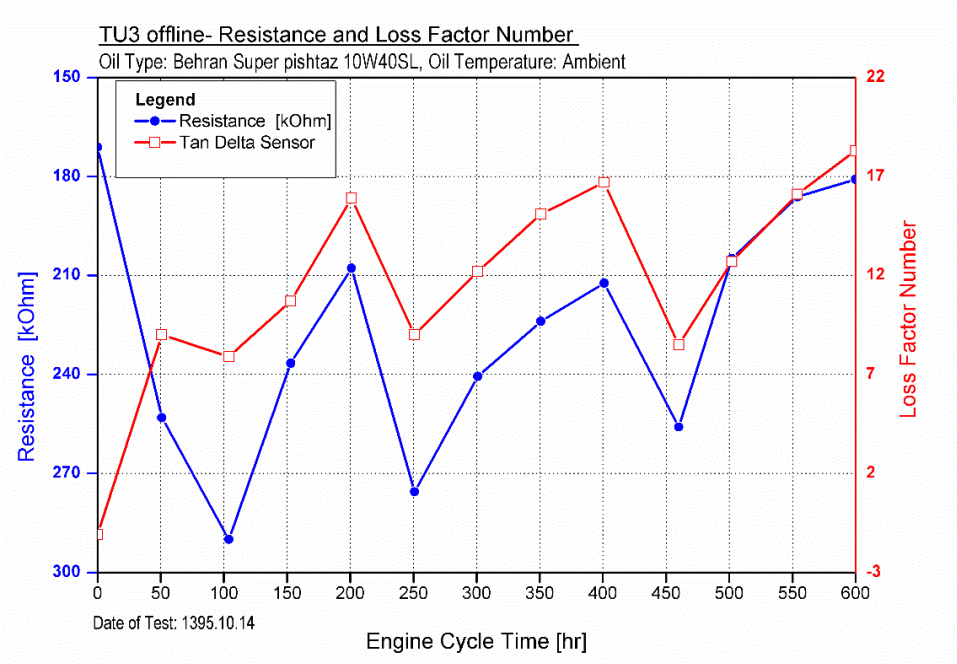
است. به طوری که می‌توان محدوده مشخصی از ظرفیت خازنی برای سلامت یا خرابی روغن تعیین کرد.



شکل ۴-۵ - تغییرات ظرفیت خازنی در هر تعویض روغن در موتور TU3 بر حسب ساعت کارکرد

ب) تغییرات مقاومت روغن و LF در طول کارکرد روغن در موتور TU3

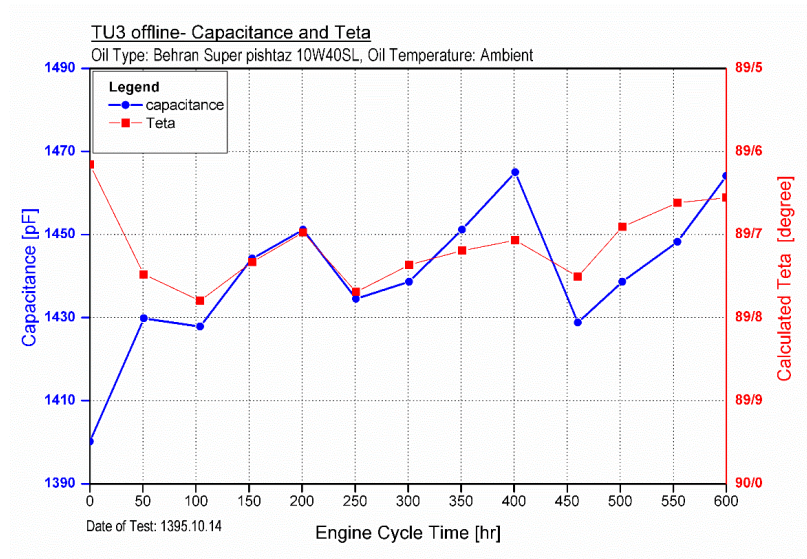
شکل ۵-۵ تغییر مقاومت روغن با افزایش ساعت کارکرد روغن در موتور TU3 را نشان می‌دهد، روغن بین دو تیغه رسانا (الکترودهای حسگر) جریان دارد با توجه به این که تیغه‌های فلزی مقاومت الکتریکی پایینی دارند با افزایش فرکانس LCR METER تا ۱۰۰ KHZ می‌توان مقاومت الکتریکی روغن را اندازه گرفت. تغییر خواص و کیفیت روغن منجر به تغییر در مقاومت الکتریکی روغن می‌شود؛ بنابراین خرابی روغن باعث تغییر در مقاومت روغن می‌شود. در این نمودار تغییر مقاومت روغن با خروجی حسگر TAN DELTA مقایسه شده است. نتایج بیانگر تغییر مقاومت الکتریکی روغن در محدوده مشخص از روغن تازه تا روغن خراب است. مقاومت روغن با افزایش کارکرد روغن در موتور TU3 تا ساعت ۵۰ افزایش و سپس کاهش یافته است.



شکل ۵-۵- تغییرات مقاومت روغن و LF در طول کارکرد روغن در موتور $TU3$

ج) تغییرات زاویه تتا و ظرفیت خازنی در طول کارکرد روغن در موتور $TU3$

زاویه تتا با توجه به معادله (۳-۹) در فصل ۳ تعریف شده است. در نمودار شکل ۵-۶ تغییر زاویه تتا با مقدار ظرفیت خازنی در طول کارکرد روغن در موتور $TU3$ مقایسه شده است.

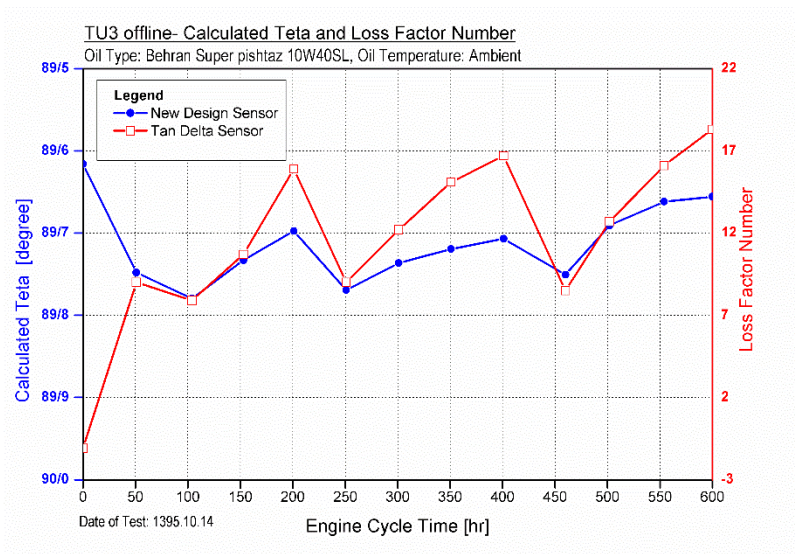


شکل ۵-۶- تغییرات زاویه تتا و ظرفیت خازنی در طول کارکرد روغن در موتور $TU3$

بر اساس نتایج، زاویه تتا در طول زمان کارکرد روغن در ساعات اولیه کارکرد روغن (۵۰ ساعت اول) افزایش سپس بتدریج کاهش می‌یابد. نرخ کاهش در هر ۲۰۰ ساعت کارکرد روغن در حدود ۰/۱ درجه می‌باشد.

د) تغییرات زاویه تتا و LF در طول کارکرد روغن در موتور TU3

در نمودار شکل ۵-۷ زاویه تتا که از دو خروجی حسگر (مقاومت الکتریکی و ظرفیت خازنی) بدست می‌آید با خروجی حسگر TAN DELTA مقایسه شده است. بر اساس مشاهدات زاویه تتا در ۵۰ ساعت اول کارکرد روغن افزایش می‌یابد. ولی به مرور زمان، با کارکرد روغن این میزان در طول ۲۰۰ ساعت کارکرد هر نمونه روغن به میزان ۰/۱ درجه کاهش می‌یابد. لازم به توضیح است که در این آزمایشات، حسگر در هر مرحله ۲۰۰ ساعته، باز و شستشو شده است، لذا در هنگام همبندی مجدد، احتمال تغییرات جزئی در فاصله بین صفحات وجود دارد که می‌تواند در اندازه‌گیری مرجع تأثیر گذار باشد. ولی در طول ۲۰۰ ساعت حسگر باز نشده است و نتایج تکرارپذیر در ساعات کارکرد مختلف روغن در نمودار مشاهده می‌شود و انطباق آن با نتایج حسگر TAN DELTA می‌تواند صحه‌ای بر عملکرد حسگر اولیه بدون پوشش خارجی باشد.



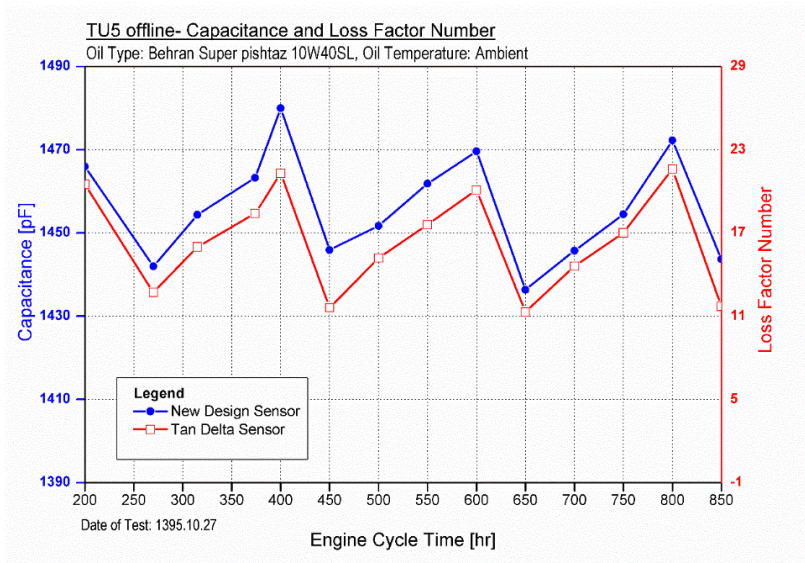
شکل ۵-۷- تغییرات زاویه تتا و LF در طول کارکرد روغن در موتور TU3

۵-۳-۳ نتایج آزمایش آفلاین حسگر کیفیت روغن در آزمون دوام موتور TU5

نتایج خروجی‌های حسگر کیفیت روغن شامل ظرفیت خازنی، مقاومت، تغییر زاویه تتا و خروجی حسگر TANDELTA برای نمونه‌هایی که از موتور TU5 در طول آزمون دوام گرفته شده در این بخش شرح داده شده است.

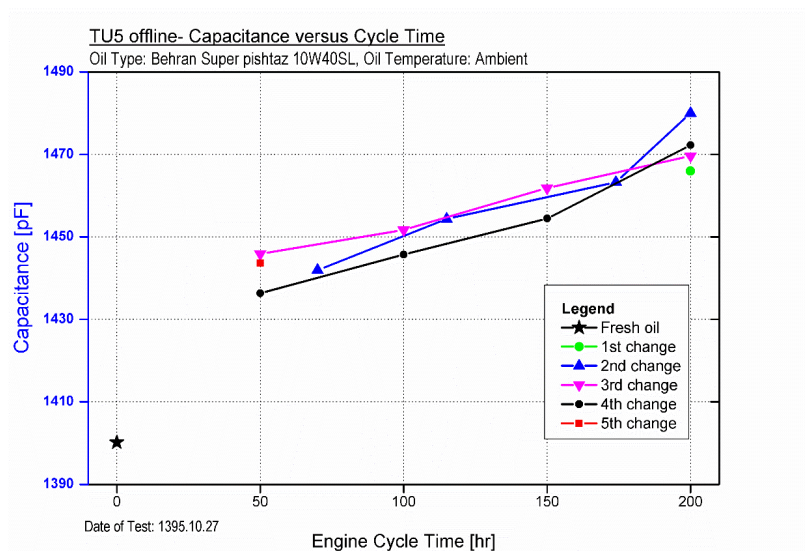
الف) تغییرات ظرفیت خازنی و LF در طول کارکرد روغن در موتور TU5

نمودار شکل ۵-۸ تغییر ظرفیت خازنی روغن با افزایش ساعت کارکرد روغن در موتور TU5 و همچنین خروجی حسگر TAN DELTA برای این روغن را نشان می‌دهد. ظرفیت خازنی با افزایش ساعت کارکرد در بازه مشخصی افزایش پیدا کرده است. نتایج حسگر TAN DELTA و ظرفیت خازنی حسگر ساخته شده انطباق بسیار خوبی باهم دارد. در این آزمون، چهار بار روغن موتور در ساعات ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ تعویض شده است. قابل مشاهده است که با هر بار تعویض روغن ظرفیت خازنی کاهش می‌یابد و سپس با اکسیده شدن روغن در موتور و اختلاط آن با سایر آلاینده‌ها ظرفیت خازنی روغن به مرور افزایش می‌یابد که این روند خرابی روغن، با حسگر TAN DELTA هم قابل مشاهده است. بر اساس نتایج، حسگر TAN DELAT با هر بار تعویض روغن رفتار نسبتاً تکرارپذیر را نشان می‌دهد در حالی که حسگر ساخته شده، دارای پرش‌هایی در نقاط متناظر از جمله در ساعات ۲۵۰، ۴۵۰، ۶۵۰ و ۸۵۰ می‌باشد. دلیل این تغییرات باز و بست حسگر است که می‌تواند بر ظرفیت خازنی حسگر اثرگذار باشد. این موضوع لزوم تهیه پوشش و همبندی حسگر را نشان می‌دهد که در مراحل بعدی این نقص برطرف شده است.



شکل ۵-۸- تغییرات ظرفیت خازنی و LF در طول کارکرد روغن در موتور TU5

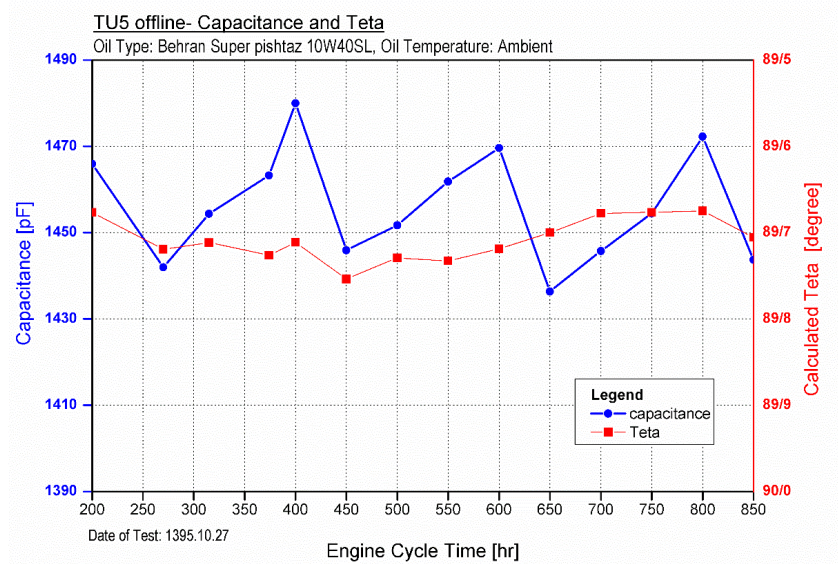
ظرفیت خازنی حسگر ساخته شده به تفکیک هر تعویض روغن در موتور TU5 در شکل ۵-۹ آمده است. نمودار بیانگر محدوده مشخص تغییر ظرفیت خازنی در هر تعویض است به طوری که خروج از این محدوده می‌تواند بیانگر خرابی غیر متعارف روغن باشد. بر این اساس، در موتور مذکور با درجه حرارت مشخص روغن و محدوده توان مشخص، روغن حدود ۸۰ پیکو فاراد در ۲۰۰ ساعت کارکرد روغن دچار تغییرات ظرفیت خازنی می‌شود.



شکل ۵-۹- تغییر ظرفیت خازنی حسگر در طول کارکرد روغن در موتور TU5 به تفکیک هر تعویض

ب) تغییرات ظرفیت خازنی و زاویه تتا در طول کارکرد روغن در موتور TU5

در شکل ۵-۱۰ ظرفیت خازنی با زاویه تتا مقایسه شده است.

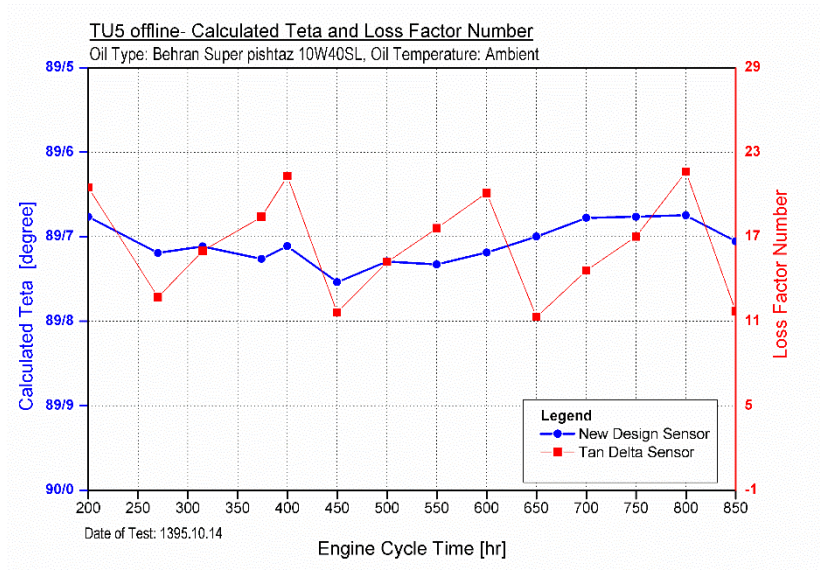


شکل ۵-۱۰ - تغییرات ظرفیت خازنی و زاویه تتا در طول کارکرد روغن در موتور TU5

بر اساس نتایج، همانند موتور TU5 با کارکرد بیشتر زاویه تتا در طول ۲۰۰ ساعت کارکرد به میزان اندکی کاهش می‌یابد.

ج) تغییرات زاویه تتا و LF در طول کارکرد روغن در موتور TU5

تغییرات زاویه تتا حسگر ساخته شده با LF در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است. بر اساس نتایج شکل ۵-۱۱، زاویه تتا و LF هر دو یک نوع تغییر را در روغن نشان می‌دهند ولی به نظر می‌رسد که ظرفیت خازنی با LF در مقایسه با زاویه تتا انطباق مناسب‌تری دارد، لذا انتخاب ظرفیت خازنی به عنوان مهم‌ترین مشخصه حسگر می‌تواند خروجی‌های دقیق‌تری را به کاربر در زمینه خرابی روغن اعلام نماید.



شکل ۵-۱۱- تغییرات زاویه تتا و LF در طول کارکرد روغن در موتور $TU5$

۴-۵ نتایج بررسی عملکرد و حساسیت حسگر کیفیت روغن به صورت آنلاین در مدار هیدرولیک

نتایج آزمایش آنلاین عوامل نویز بر حسگر شامل دما، فشار و دبی روغن و عوامل خرابی روغن شامل آلودگی سوخت، آلودگی آب و اکسیداسیون روغن از طریق مدار هیدرولیک در این بخش ارائه شده است.

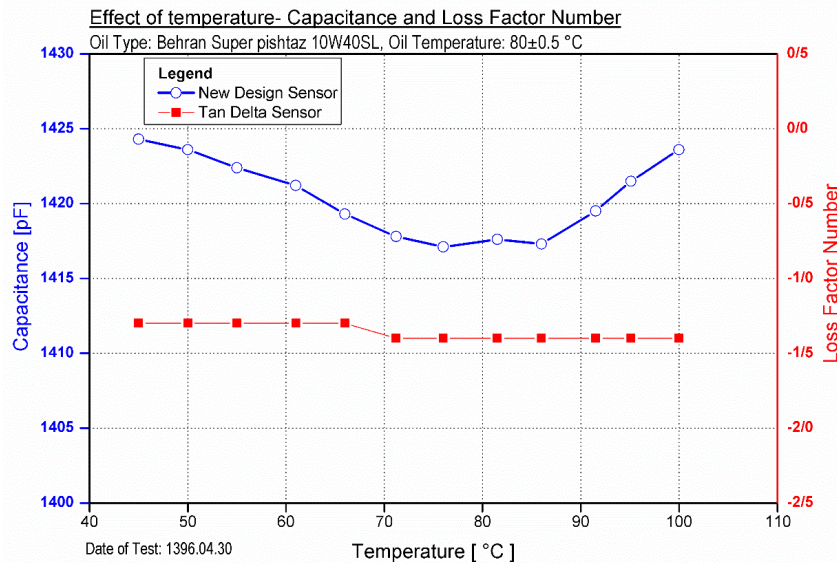
۴-۵-۱ اثر دما بر عملکرد حسگر کیفیت

اثر دما بر خروجی‌های مختلف حسگر کیفیت روغن و حسگر TANDELTA بررسی شده است.

الف) اثر دما بر ظرفیت خازنی حسگر و LF حسگر TAN DELTA

از مؤلفه‌های مهم تأثیرگذار بر حسگر، دمای روغن است. با تغییر دمای روغن، ظرفیت خازنی آن هم می‌تواند تغییراتی داشته باشد که باید تأثیر آن مورد بررسی قرار گرفته شود. از طرف دیگر، افزایش دما می‌تواند در حسگر باعث تغییرات ابعادی به دلیل انبساط حرارتی شود که این هم می‌تواند ظرفیت خازن مورد نظر را تغییر دهد.

نمودار شکل ۵-۱۲ اثر دما بر ظرفیت خازنی حسگر را نشان می‌دهد. تغییر ظرفیت خازنی با تغییر خروجی حسگر TANDELTA مقایسه شده است. این حسگر قابلیت حذف اثر دما را با ضریب تصحیح به وجود آورده است. ظرفیت خازنی حسگر ساخته شده با افزایش دما تا محدوده ۷۵ الی ۸۵ درجه سانتیگراد کاهش و برای مقادیر بیشتر از آن افزایش یافته است.



شکل ۵-۱۲- اثر دما بر ظرفیت خازنی حسگر و LF حسگر TAN DELTA

کل میزان تغییرات ظرفیت خازنی به علت تغییرات دما به اندازه ۷ پیکو فاراد است. این در حالی است که روغن در موتور در محدوده ۸۰ پیکو فاراد تغییر ظرفیت خازنی دارد. بنابراین ۴ روش می‌توان در نظر گرفت؛ راه اول قبول این میزان خطا در حسگر مورد نظر است که روش علمی به نظر نمی‌رسد. راه دوم استفاده از حسگر در دمای مشخص است، به عنوان مثال می‌توان نتایج خروجی حسگر را فقط در دمای مشخص ثبت کرد که اثر این خطا را حذف خواهد کرد. راه سوم تشکیل جدول‌هایی برای تحلیل محدوده خروجی حسگر در دماهای مختلف (به ازای هر ۵ درجه افزایش دما محدوده های خروجی حسگر تعیین شود) است. راه چهارم استفاده از رابطه ریاضی تصحیح ظرفیت خازنی بر اساس نتایج آزمایشات تجربی، است. در این رابطه دمای مرجع ظرفیت خازنی ۸۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته

شده است. و می توان با ثبت دما (توسط حسگر دمای نصب شده) ظرفیت خازنی را بصورت رابطه (۵-۲) تصحیح کرد.

$$K_C(T) = (-0.000153 T^3 + 0.027387 T^2 - 1.440629 T + 1018)/1000 \quad (۱-۵)$$

$$R^2 = 0.979$$

$$\text{Corrected Capacitance} = K_C(T) * C \quad (۲-۵)$$

K_C ضریب تصحیح ظرفیت خازنی ، T دمای اندازه گیری، R^2 ضریب رگرسیون^۱ و C ظرفیت خازنی خوانده شده، است. ضریب تصحیح K_C درجه سوم همبستگی خوبی با نتایج تجربی دارد. K_C برای این آزمایش بین ۰/۹۹۴ الی ۱ تغییر کرده است بنابراین در صورت استفاده از این رابطه، اثر دما بر روی میزان خطای اندازه گیری ظرفیت خازنی را می توان به کمتر از ۱ پیکوفاراد کاهش داد. با توجه به این که دمای ۸۰ درجه سانتیگراد مرجع است، ظرفیت خازنی تصحیح شده مقدار معادل آن در این دما می باشد. بنابراین با داشتن محدوده های مجاز ظرفیت خازنی برای سلامت روغن در این دما، می توان بر روند خرابی روغن نظارت کرد.

ب) اثر دما بر مقاومت الکتریکی روغن داخل حسگر و LF حسگر TAN DELTA

نمودار شکل ۵-۱۳ تغییرات مقاومت روغن با تغییرات دما را نشان می دهد. تغییرات مقاومت الکتریکی با تغییرات LF مقایسه شده است. به طور کلی افزایش دما بر روی مقاومت الکتریکی مواد تأثیر اساسی دارد. تأثیر دما روی مقاومت روغن تأثیر محسوسی داشته است به طوری که تقریباً به صورت خطی از ۷۰ کیلو اهم به ۱۵ کیلو اهم کاهش پیدا کرده است. یکی از نشانه های خرابی روغن تغییر در مقاومت

^۱ ضریب تعیین، نسبت کل تغییر متغیر وابسته حول میانگین خود بوسیله تغییر متغیرهای مستقل در رگرسیون را نشان می دهد

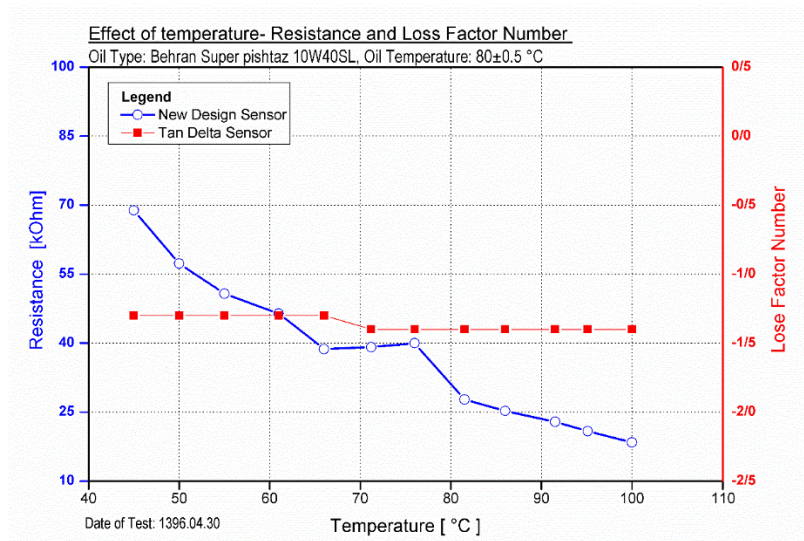
الکتریکی آن است حال اگر دما هم تغییر کند، مقاومت روغن به علت تأثیر دما هم تغییر می کند؛ بنابراین می توان اثر دما بر مقاومت الکتریکی را با استفاده از رابطه (۵-۴) تصحیح کرد:

$$K_R(T) = (0.278096T^2 - 21.234364T + 838.506923)/1000 \quad (۳-۵)$$

$$R^2 = 0.978$$

$$\text{Corrected resistance} = K_R(T) * R \quad (۴-۵)$$

K_R ضریب تصحیح مقاومت الکتریکی، T دمای اندازه گیری و R مقاومت الکتریکی خوانده شده است. K_R برای این آزمایش بین ۰/۴۴ الی ۱/۴۹ تغییر کرده است بنابراین در صورت استفاده از ضریب تصحیح مقاومت، حداکثر خطای مقاومت در اثر دما، $8 \text{ K}\Omega$ است.

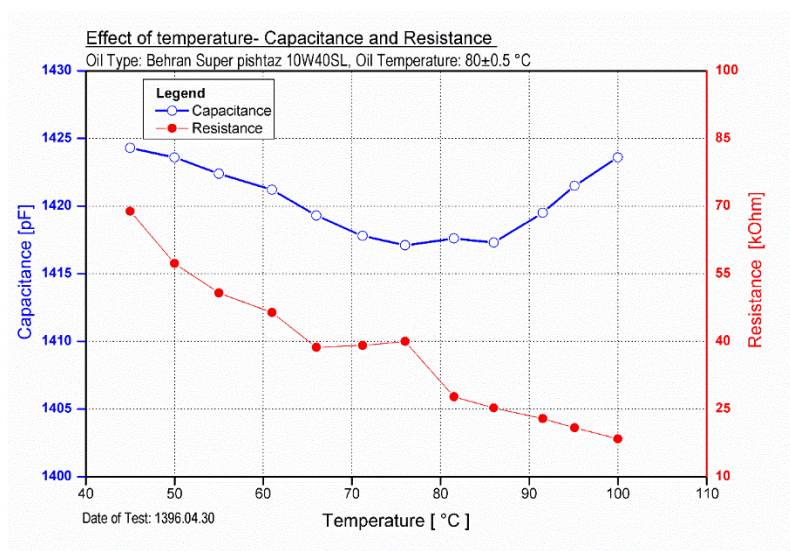


شکل ۵-۱۳ - اثر دما بر مقاومت الکتریکی روغن داخل حسگر و LF حسگر $TAN DELTA$

ج) اثر دما بر ظرفیت خازنی و مقاومت الکتریکی روغن داخل حسگر

در نمودار شکل ۵-۱۴ دو خروجی حسگر شامل ظرفیت خازنی و مقاومت الکتریکی روغن با افزایش دما تا دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد مقایسه شده اند. ظرفیت خازنی روغن در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد برابر ۱۴۲۴ پیکو فاراد بوده است که تا دمای ۷۶ درجه سیر نزولی داشته و به ۱۴۱۷ پیکو فاراد رسیده است. با افزایش دما ظرفیت خازن به ۱۴۲۳ پیکو فاراد رسیده است. در صورت عدم تصحیح اثر دما، درجه

حرارت در بیشترین حالت تنها به اندازه ۰/۵ درصد می‌تواند باعث بوجود آمدن خطا در خوانش ظرفیت خازنی شود. تغییر مقاومت نزولی و بسیار بیشتر از تغییر ظرفیت خازنی بوده است. به طوری که از ۶۹ کیلو اهم در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد به ۱۹ کیلو اهم در دمای ۱۰۰ درجه رسیده است؛ بنابراین حذف این اثر دما برای حسگر باید در دستور کار قرار گیرد. در صورت عدم حذف این اثر دما، در بیشترین حالت می‌تواند تا ۶۵٪ خطا در سیستم اندازه‌گیری به وجود آید. این بدین معنی است که اولویت خروجی حسگر می‌بایست ظرفیت خازنی باشد که به مراتب دقت بالاتری دارد و از تغییر مقاومت جهت پیش بینی نوع خرابی و یا خرابی شدید روغن استفاده شود.



شکل ۵-۱۴- اثر دما بر ظرفیت خازنی و مقاومت الکتریکی روغن داخل حسگر

د) اثر دما بر زاویه تتا و LF

در شکل ۵-۱۵ تغییرات زاویه تتا با افزایش دما نشان داده شده است. تغییرات دما باعث تغییر در خروجی‌های حسگر و تغییر تتا می‌شود بنابراین رابطه‌ای برای حذف اثر دما ضروری است. این رابطه در قالب ضریب تصحیح مطابق رابطه (۵-۶) بدست آمده است.

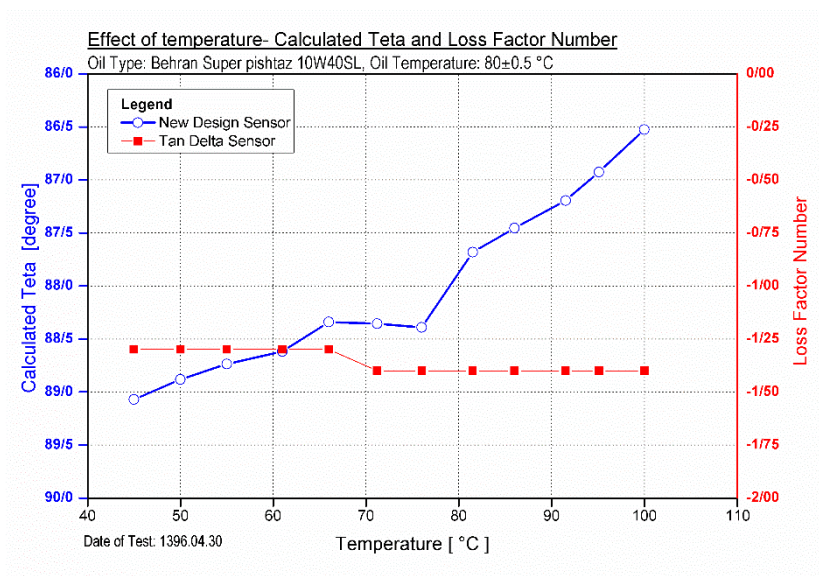
$$K_{\text{teta}}(T) = (0.007394T^2 - 0.571451T + 996)/1000 \quad (5-5)$$

$$R^2 = 0.97$$

$$\text{Corrected teta} = K_{\text{teta}} (T) * \text{teta} \quad (6-5)$$

K_{teta} ضریب تصحیح زاویه تتا و T دمای اندازه‌گیری است. برای این آزمایش بین ۰/۹۸۵ الی ۱/۰۱۳ تغییر کرده است بنابراین در صورت استفاده از ضریب تصحیح تتا، حداکثر خطای تتا در اثر دما، ۰/۴۵ درجه است.

از آنجا که ظرفیت خازنی تغییر زیادی با دما نداشته است و مقاومت الکتریکی به شدت با دما کاهش یافته است، زاویه تتا هم به شدت کاهش یافته است. بر این اساس بازهم می‌توان به این نتیجه رسید که اولویت تصمیم‌گیری در زمینه خرابی روغن ابتدا بر اساس ظرفیت خازنی و سپس بر اساس مقاومت الکتریکی و یا زاویه تتا خواهد بود.

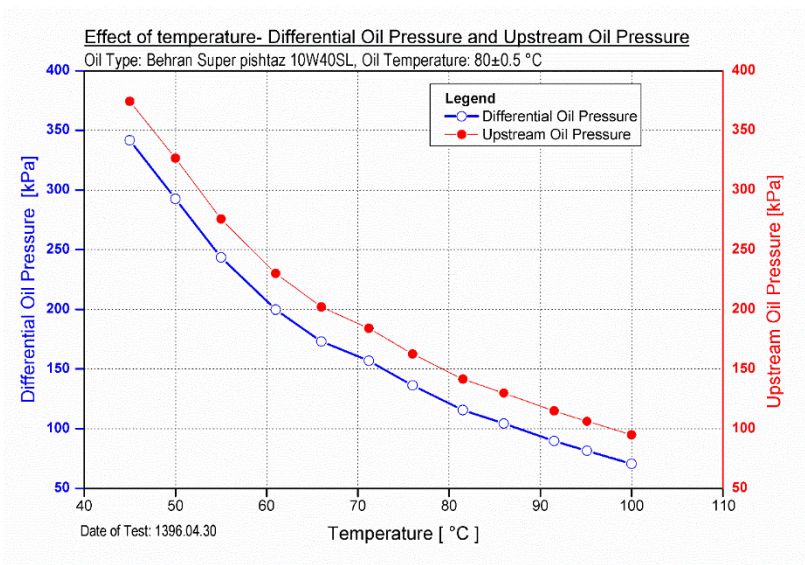


شکل ۵-۱۵- اثر دما بر زاویه تتا و LF

ه) اثر دما بر اختلاف فشار دوسر حسگر

نمودار شکل ۵-۱۶ تغییر فشار دو سر حسگر و فشار بالادست حسگر را با تغییر دما نشان می‌دهد. همان طور که در بخش (۴-۴-۳) توضیح داده شده از ویژگی‌های خاص این حسگر اندازه‌گیری اختلاف فشار دو سر حسگر است. تغییر دما باعث کاهش گرانیروی می‌شود بنابراین اختلاف فشار قبل و بعد از حسگر

کم می‌شود. کاهش گرانروی روغن به علت آلودگی‌های مختلف هم به وجود می‌آید در صورتی که دما کنترل شود، در دبی ثابت تغییرات گرانروی نشانه خرابی روغن است.



شکل ۵-۱۶- اثر دما بر فشار دوسر حسگر

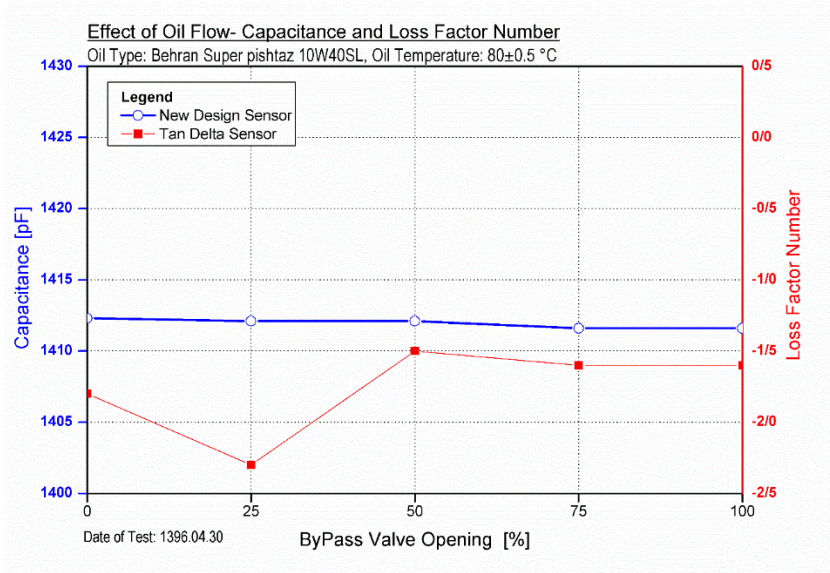
۵-۴-۲ تأثیر تغییر دبی روغن بر حسگر کیفیت روغن

تأثیر تغییر دبی بر عملکرد حسگر در این بخش بررسی شده است.

الف) تأثیر تغییر دبی روغن بر ظرفیت خازنی حسگر و LF حسگر TAN DELTA

برای آزمایش تأثیر دبی، حسگر با دبی‌های مختلف روغن مورد آزمایش قرار گرفت. برای تغییر دبی از تغییر میزان باز بودن شیر کنارگذر (شیر شماره ۴ در مدار شکل ۴-۱۳) استفاده شده است. دمای آزمایش ۸۰ درجه سانتیگراد بوده است. نمودار شکل ۵-۱۷ تأثیر تغییر دبی روی ظرفیت خازنی را نشان می‌دهد که با حسگر TAN DELTA مقایسه شده است. محور افقی میزان باز بودن شیر شماره ۴ را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، تغییر دبی تأثیر بخصوصی در ظرفیت خازنی حسگر ندارد؛ اما تغییر دبی باعث تغییرات اندکی در خروجی حسگر TAN DELTA شده است. علت این است که زمانی که دبی روغن حداکثر است، تولید حباب در روغن بشدت افزایش می‌یابد. وجود حباب در خازن کوچک TAN DELTA باعث به وجود آمدن خطای بزرگ می‌شود و این حسگر دچار خطا و نوسان می‌شود.

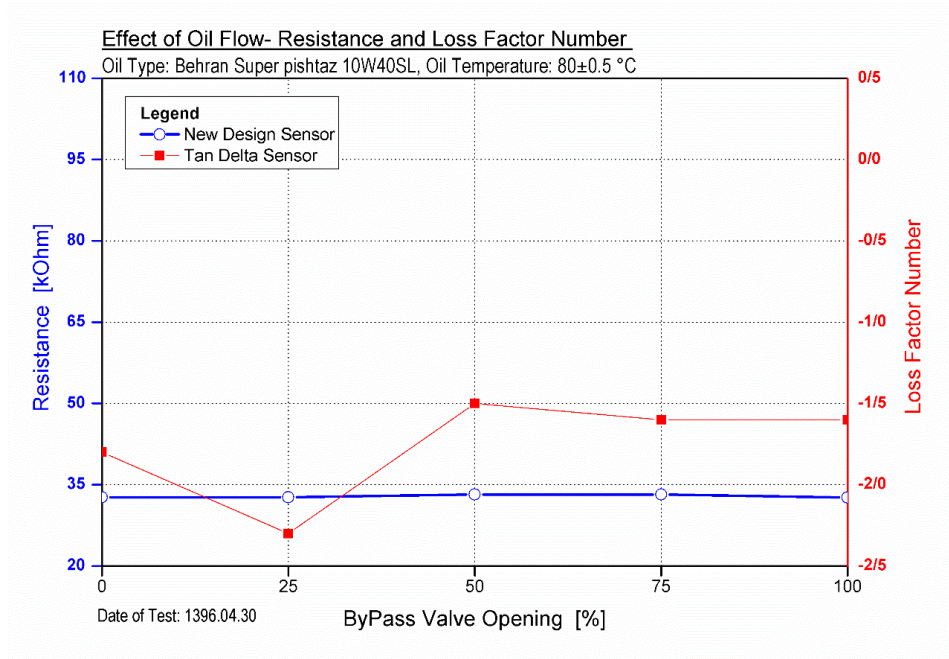
حال اینکه در حسگر ساخته شده روغن می‌بایست به طور کامل از داخل حسگر عبور کند و از آنجا که مساحت خازن حسگر بزرگ طراحی شده است، اثر وجود حباب در روغن که در موتور بسیار زیاد است، تأثیر ناچیزی بر عملکرد روغن خواهد داشت و حسگر دارای داده دقیق‌تر و تکرار پذیرتری خواهد بود.



شکل ۵-۱۷ - تأثیر میزان باز بودن شیر (تغییر دبی) بر ظرفیت خازنی حسگر و LF

ب) تأثیر تغییر دبی روغن بر مقاومت الکتریکی حسگر و LF

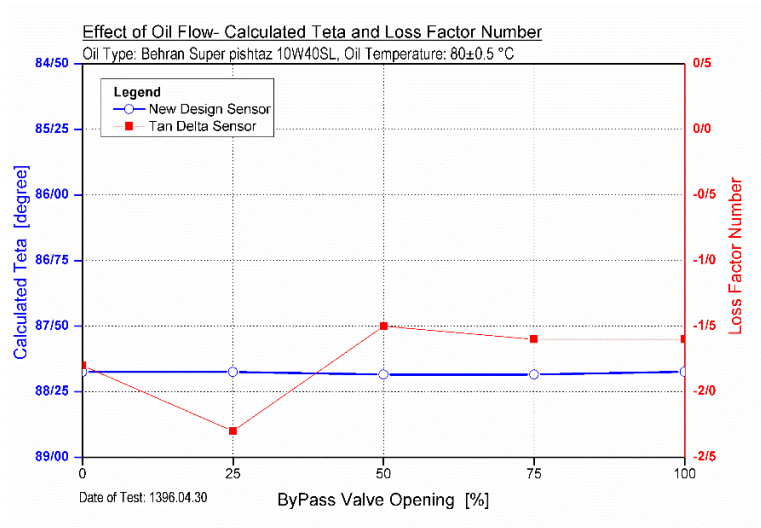
شکل ۵-۱۸ تغییرات مقاومت روغن داخل حسگر با تغییرات دبی نشان داده شده و با حسگر TAN DELTA مقایسه شده است. واضح است که مقاومت روغن با تغییر دبی روغن، تغییر نمی‌کند.



شکل ۵-۱۸- تأثیر تغییر دبی روغن بر مقاومت الکتریکی حسگر و LF

ج) تأثیر تغییر دبی روغن بر زاویه تتا و LF

در نمودار شکل ۵-۱۹ تأثیر تغییر دبی بر تتا نشان داده شده و با LF مقایسه شده است. تغییر دبی تأثیری روی تتا ندارد.

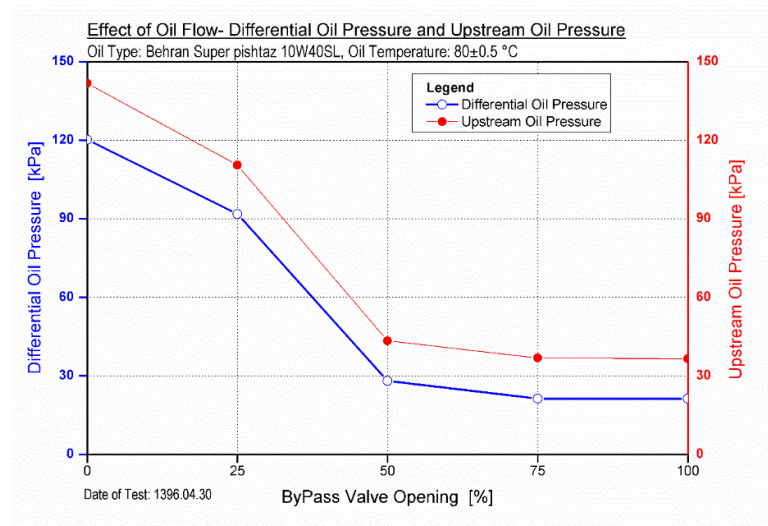


شکل ۵-۱۹- تأثیر تغییر دبی روغن بر زاویه تتا و LF

د) تأثیر تغییر دبی روغن بر اختلاف فشار دو سر حسگر

در نمودار شکل ۵-۲۰ اختلاف فشار قبل و بعد از حسگر و فشار بالادست (فشار قبل حسگر) با هم مقایسه شده است. هر چه دبی روغن افزایش یابد فشار بالادست و اختلاف فشار روغن عبوری از حسگر

زیادتر می‌شود. اگر دبی ثابت باشد تغییر اختلاف فشار می‌تواند نشانه تغییر گرانروی روغن باشد. در این جا تغییر اختلاف فشار به علت تغییر دبی است.



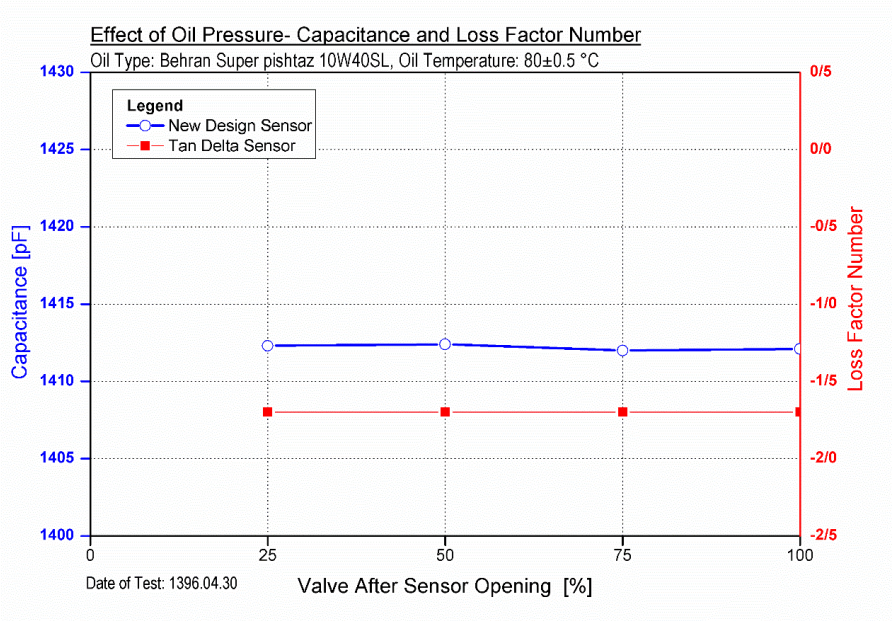
شکل ۵-۲۰- تأثیر تغییر دبی روغن بر اختلاف فشار دو سر حسگر

۵-۴-۳ تأثیر تغییر فشار بر عملکرد حسگر کیفیت روغن

تأثیر تغییرات فشار در مدار هیدرولیک بر خروجی‌های حسگر کیفیت روغن در این بخش بررسی شده است.

الف) تأثیر تغییر فشار بر ظرفیت خازنی حسگر و LF

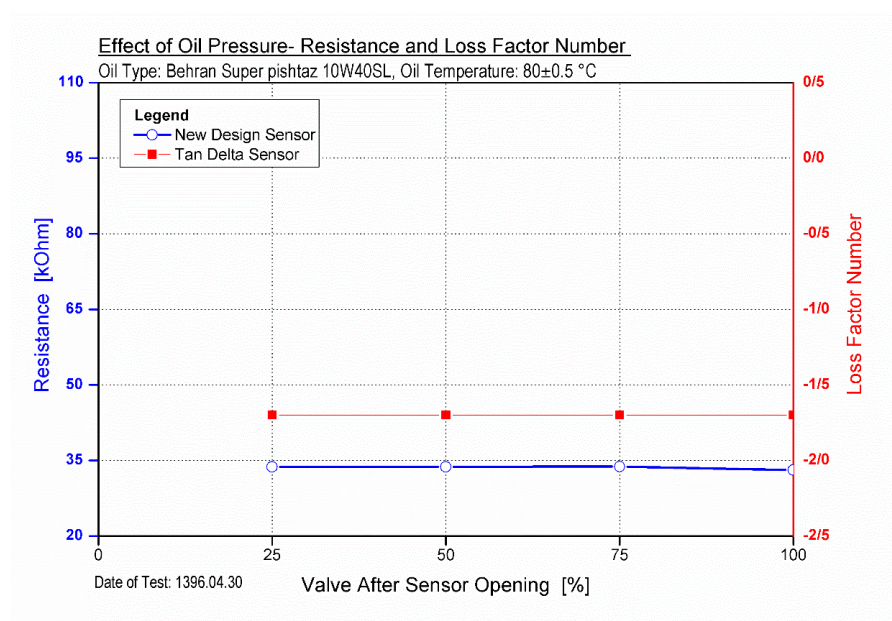
برای تغییر فشار از شیر هیدرولیک بعد از حسگر استفاده شده است (شیر شماره ۳ در مدار شکل ۴-۱۳)، در صورتی که خروجی این شیر کم شود فشار در حسگر افزایش می‌یابد. محور افقی نمودار شکل ۵-۲۱ میزان باز بودن این شیر را نشان می‌دهد. از نمودار مشخص است که تغییر فشار روغن تأثیری در ظرفیت خازنی حسگر ساخته شده و LF حسگر TAN DELTA ندارد؛ بنابراین فرقی نمی‌کند حسگر در چه فشاری و با چه تغییرات فشاری استفاده شود.



شکل ۵-۲۱- تأثیر تغییر فشار بر ظرفیت خازنی حسگر و LF

ب) تأثیر تغییر فشار بر مقاومت الکتریکی روغن در حسگر و LF با توجه به نمودار شکل ۵-۲۲ تغییر فشار هیچ تأثیری بر مقاومت الکتریکی روغن داخل حسگر ندارد. عدم تغییر ظرفیت خازنی و مقاومت الکتریکی روغن ثابت کارکرد حسگر در فشارهای مختلف را نشان

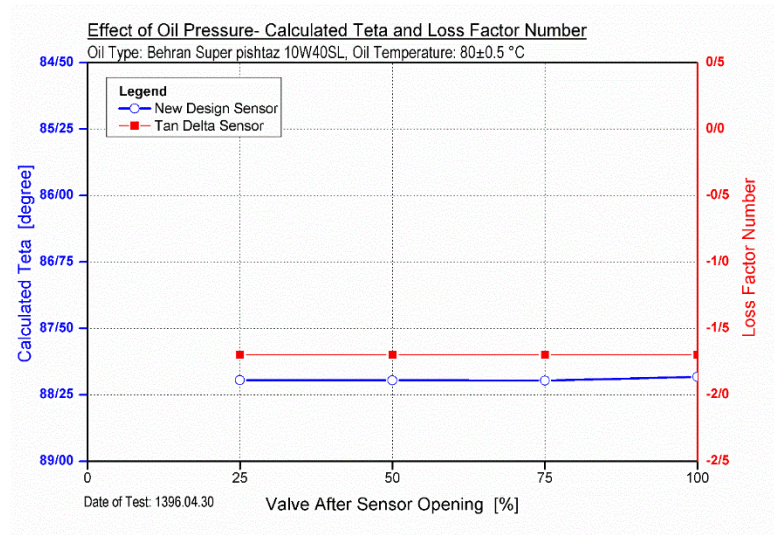
می دهد.



شکل ۲۳-۵ تأثیر تغییر فشار بر مقاومت الکتریکی روغن در حسگر و LF

ج) تأثیر تغییر فشار بر زاویه تتا و LF

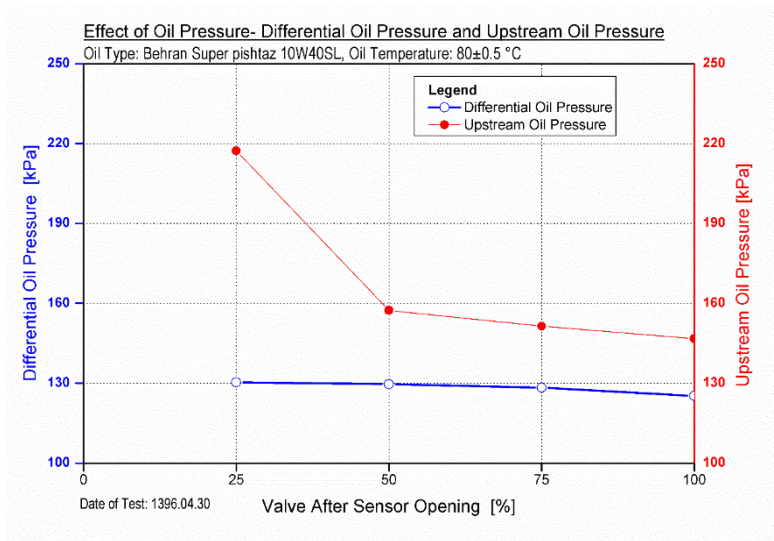
تغییرات تتا حسگر ساخته شده و LF حسگر TAN DELTA با تغییر فشار روغن در شکل ۲۳-۵ نشان داده شده است.



شکل ۲۳-۵ - تأثیر تغییر فشار بر زاویه تتا و LF

د) تغییر اختلاف فشار دو سر حسگر با تغییر فشار مدار هیدرولیک

در نمودار شکل ۲۴-۵ تغییر اختلاف فشار دو سر حسگر با تغییر خروجی شیر ۳ در مدار هیدرولیک نشان داده شده است (تغییر خروجی شیر ۳ باعث افزایش فشار مدار می شود). این اختلاف فشار با فشار قبل از حسگر مقایسه شده است. براساس نتایج، این آزمایش توانسته است که اثر فشار روغن را در بازه ۲۵۰-۱۵۰ KPa مطالعه کند.



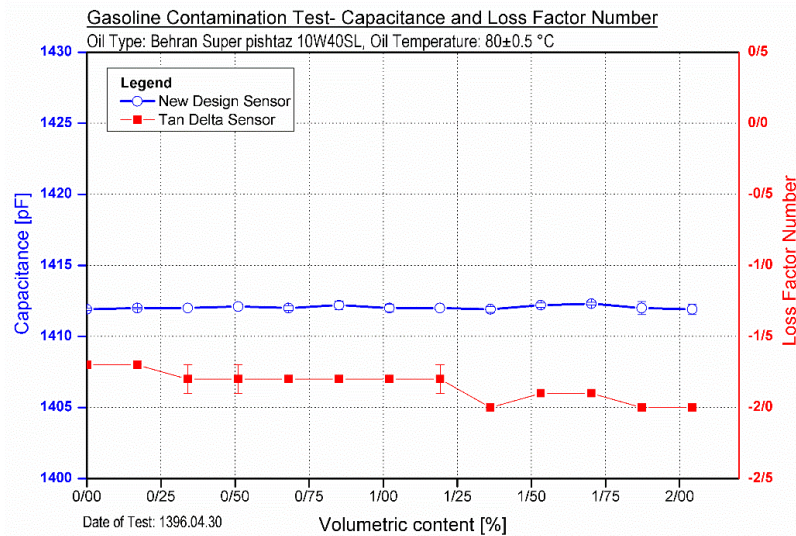
شکل ۵-۲۴- تغییر اختلاف فشار دو سر حسگر با تغییر فشار مدار هیدرولیک

۴-۴-۵ نتایج آلودگی بنزین در روغن

نتایج افزایش مقدار بنزین در روغن بر خروجی‌های حسگر کیفیت روغن به صورت آنلاین در مدار هیدرولیک در این بخش بررسی شده است.

الف) اثر افزایش بنزین در روغن بر ظرفیت خازنی حسگر و LF حسگر TANDELTA نمودار شکل ۵-۲۵ تغییر ظرفیت خازنی حسگر با تغییر درصد بنزین در روغن را نشان می‌دهد. برای هرآزمون مشخص روغن، ۳ بار دیتا برداری صورت گرفته و محدوده‌های عمودی مشخص شده روی نقاط در نمودار بیان‌گر انحراف استاندارد خروجی حسگرها برای درصد آلودگی است. مشخص است که آلودگی سوخت تأثیرات زیاد و محسوسی روی ظرفیت خازنی و همچنین خروجی حسگر TANDELTA ندارد؛ بنابراین می‌توان گفت از طریق ظرفیت خازنی نمی‌توان آلودگی سوخت را تشخیص داد. با توجه به این‌که با افزایش سوخت گرانی روغن کاهش یافته، روغن رو به خرابی رفته است اما ظرفیت خازنی حسگر این خرابی را تشخیص نداده است. حسگر TANDELTA هم تغییرات بسیار اندکی نسبت به افزایش بنزین در روغن نشان داده است و خروجی آن در بازه روغن کاملاً سالم قرار دارد. به علت این که ضریب دی‌الکتریک بنزین و روغن تقریباً بهم نزدیک است حسگر قادر به تشخیص آلودگی بنزین و

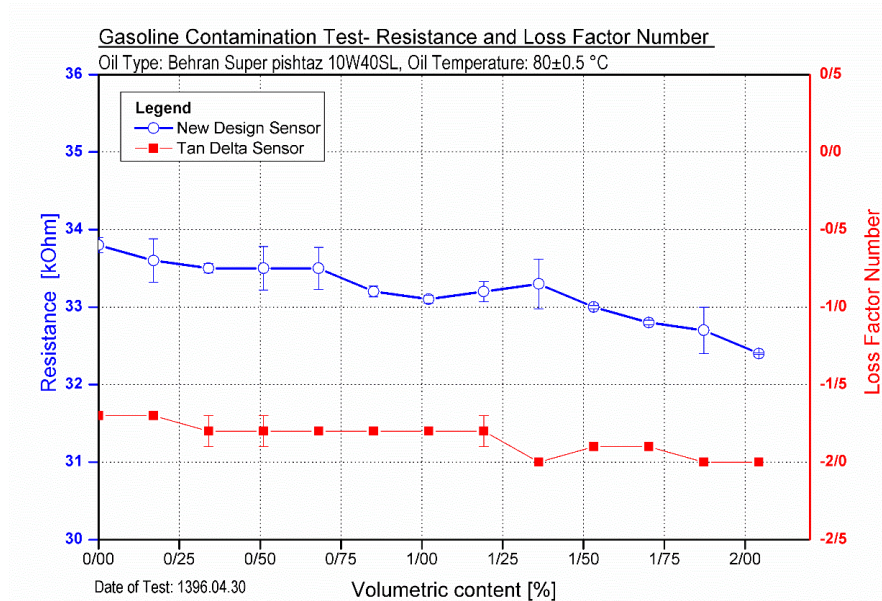
کاهش گرانیوی نیست. برای تشخیص بنزین در حسگر ساخته شده از اختلاف فشار دو سر حسگر استفاده شده است.



شکل ۵-۲۵- اثر افزایش بنزین در روغن بر ظرفیت خازنی حسگر و LF حسگر TAN DELTA

(ب) اثر افزایش بنزین در روغن بر مقاومت الکتریکی روغن در حسگر و LF حسگر TAN DELTA

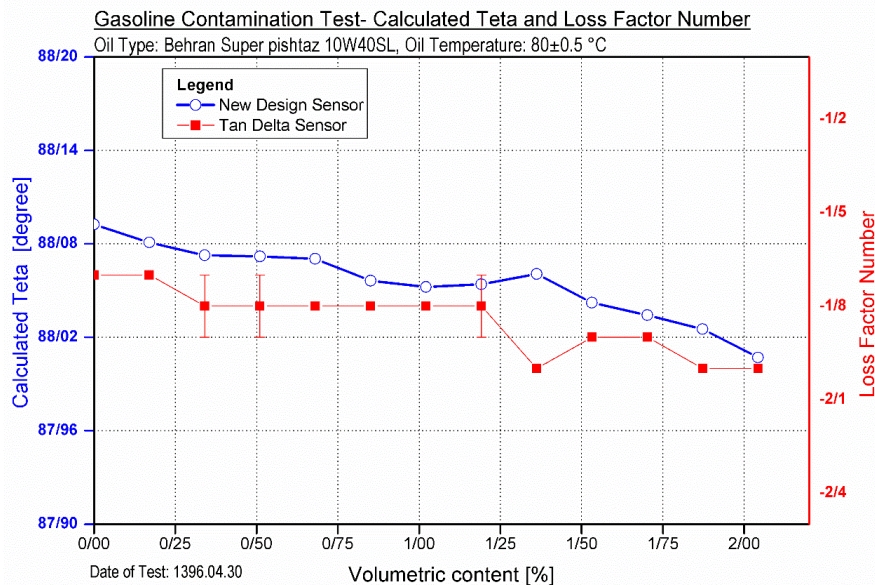
نمودار شکل ۵-۲۶ تغییر مقاومت روغن با افزایش میزان سوخت را نشان می‌دهد. افزایش درصد سوخت باعث کاهش مقاومت الکتریکی روغن از ۳۳/۸ کیلو اهم به ۳۲/۴ کیلو اهم شده است.



شکل ۵-۲۶- اثر افزایش بنزین در روغن بر مقاومت الکتریکی روغن در حسگر و LF حسگر TAN DELTA

ج) اثر افزایش بنزین در روغن بر زاویه تتا حسگر و LF حسگر TANDELTA

شکل ۵-۲۷ مقدار تغییر زاویه تتا با افزایش سوخت را نشان می‌دهد؛ که با توجه به تغییر مقاومت، تغییرات اندکی را نشان می‌دهد. تغییرات حسگر TANDELTA با تغییرات زاویه تتا مقایسه شده است. که تقریباً یک رفتار را نشان می‌دهند.



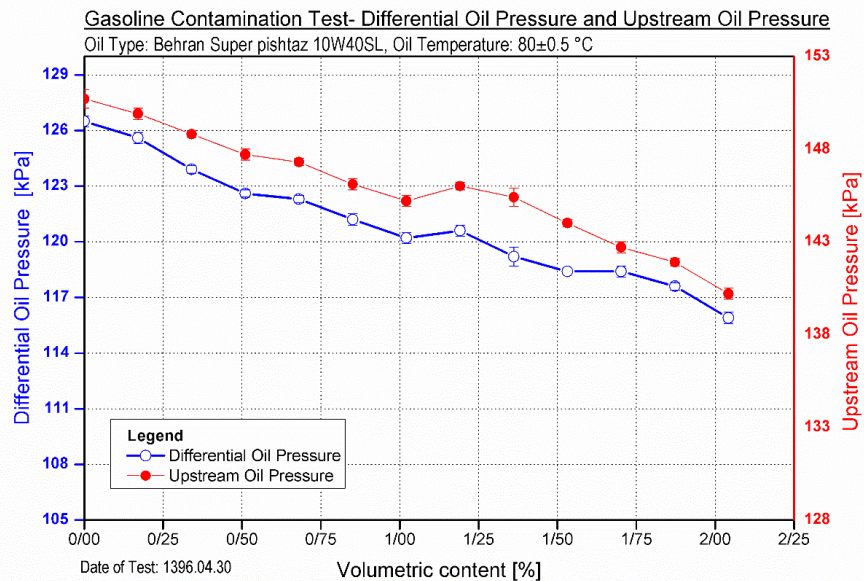
شکل ۵-۲۷- اثر افزایش بنزین در روغن بر زاویه تتا حسگر و LF حسگر TANDELTA

د) اثر افزایش بنزین در روغن بر اختلاف فشار دو سر حسگر

از نتایج قبلی چنین بر آمده است که حسگر بر پایه ضریب دی‌الکتریک قادر به تشخیص افزایش سوخت در روغن نیست. در صورتی که افزایش سوخت از عوامل مهم خرابی روغن است، افزایش سوخت باعث کاهش گرانشی روغن و برخورد فلز با فلز یا تاقان‌ها و اجزای موتور می‌گردد. از مزایای این حسگر ساخته شده تشخیص این آلودگی با اندازه‌گیری اختلاف فشار دو سر حسگر است. چون روغن از داخل خود حسگر عبور می‌کند امکان این اندازه‌گیری وجود دارد.

با توجه به شکل ۵-۲۸، اختلاف فشار دو سر حسگر با افزایش مقدار بنزین و در پی آن کاهش گرانشی، کاهش یافته است. همچنین روی نمودار فشار بالادست حسگر هم به تنهایی رسم شده که رفتاری شبیه

اختلاف فشار دو سر حسگر دارد. به دلیل این که فشار پایین دست حسگر با کاهش گرانیوی تغییر چندانی نمی‌کند بیشترین تغییر فشار بالادست حسگر است. از نتایج برآمده است که حسگر خازنی با اضافه شدن این ویژگی قادر به تشخیص آلودگی سوخت خواهد بود در صورتی که حسگر TANDELTA این خرابی را بدرستی شناسایی نکرده است.



شکل ۵-۲۸- اثر افزایش بنزین در روغن بر اختلاف فشار دو سر حسگر

۵-۴-۵ نتایج آزمایش آلودگی آب در روغن

نتایج افزایش مقدار آب در روغن بر خروجی‌های حسگر کیفیت روغن به صورت آنلاین در مدار هیدرولیک در این بخش بررسی شده است.

الف) اثر افزایش آب در روغن بر ظرفیت خازنی حسگر ساخته شده و LF

حسگر TANDELTA

نمودار شکل ۵-۲۹ نتایج تغییر ظرفیت خازنی حسگر با افزایش مقدار آب در روغن را نشان می‌دهد. روغن مورد آزمایش بهران سوپر پیشتاز 10W40 و دمای آزمایش ۸۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. مقدار ظرفیت خازنی تا ۱/۳۵ درصد آلودگی آب افزایش می‌یابد. مشخص است که نتایج حسگر ساخته شده با نتایج حسگر TANDELTA انطباق و هماهنگی دارد. تنها ۱/۳۵٪ آب در روغن باعث افزایش ظرفیت

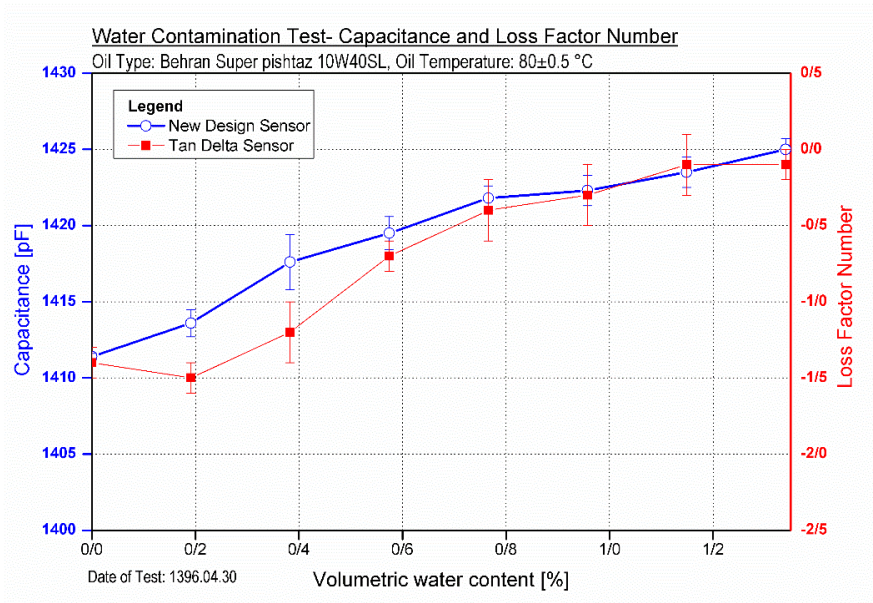
خازنی به میزان ۱۴pF در روغن می‌شود که به خوبی قابل شناسایی و اعلام است. این میزان آب معادل ورود ۵۰-۶۰CC آب به روغن در موتور خودرو است و حسگر در لحظات اولیه خرابی می‌تواند از خرابی موتور جلوگیری کند.

ژاکوبی و ولکوپ [۹] از ترکیب حسگر گذردهی (ظرفیت خازن) با گرانیوی سنج صوتی به منظور تشخیص آب در روغن استفاده کرده‌اند. رابطه^۱ MG به عنوان یک ابزار مناسب برای پیش بینی اندازه اثر شناخته شده است. از آن جا که گذردهی نسبی روغن ($k_{r,o}=2-3$) کاملاً متفاوت با آب ($k_{r,w}=80$) است. تأثیر آلودگی آب بر روی گذردهی مخلوط را می‌توان به صورت رابطه (۷-۵) نشان داد.

$$k_{r,m} = (1 - f)k_{r,o} + fk_{r,w} \quad (7-5)$$

که در آن $k_{r,m}$ مخفف گذردهی مخلوط و f درصد حجمی آب است. حسگر گذردهی نشانه روشنی از مقدار آب موجود در روغن را نشان می‌دهد که مقدار گذردهی دقیق روغن از روغن آلوده با آب متمایز است. نتایج بدست آمده از آزمایشات آلودگی روغن به آب توسط حسگر کیفیت روغن ساخته شده بیانگر تغییر ضریب دی الکتریک روغن به صورت خطی تا ۱/۳۵ درصد آلودگی آب بوده است که به طور تقریبی از رابطه (۷-۵) پیروی می‌کند.

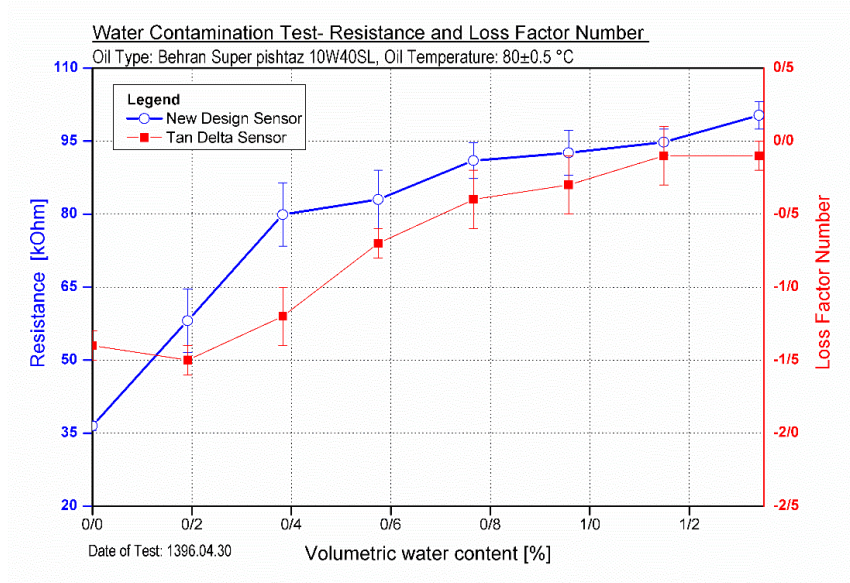
^۱ Maxwell-Garnett



شکل ۵-۲۹- اثر افزایش آب در روغن بر ظرفیت خازنی حسگر ساخته شده و LF حسگر TAN DELTA

ب) اثر افزایش آب در روغن بر مقاومت الکتریکی روغن در حسگر و LF

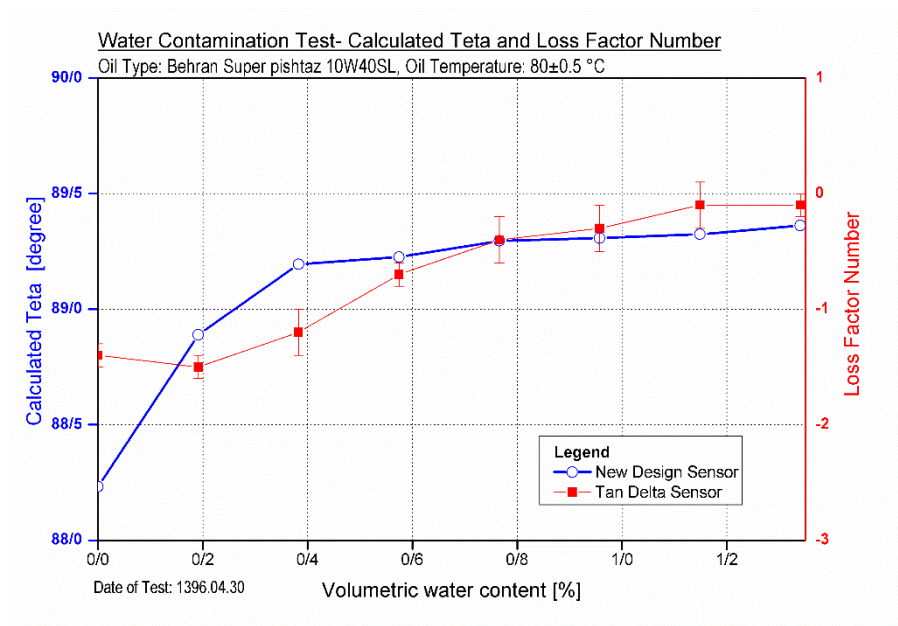
تغییرات مقاومت الکتریکی روغن با افزایش مقدار آب در شکل ۵-۳۰ نشان داده شده است. مقاومت آب با افزایش مقدار آب تا ۱/۳۵ درصد افزایش یافته است. این میزان آلودگی آب باعث شده است که مقاومت الکتریکی از $35\text{ K}\Omega$ به $98\text{ K}\Omega$ افزایش یابد که افزایش ۲۸۰٪ مقاومت الکتریکی را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۳۰- اثر افزایش آب در روغن بر مقاومت الکتریکی روغن در حسگر و LF

ج) اثر افزایش آب در روغن بر تتا و LF

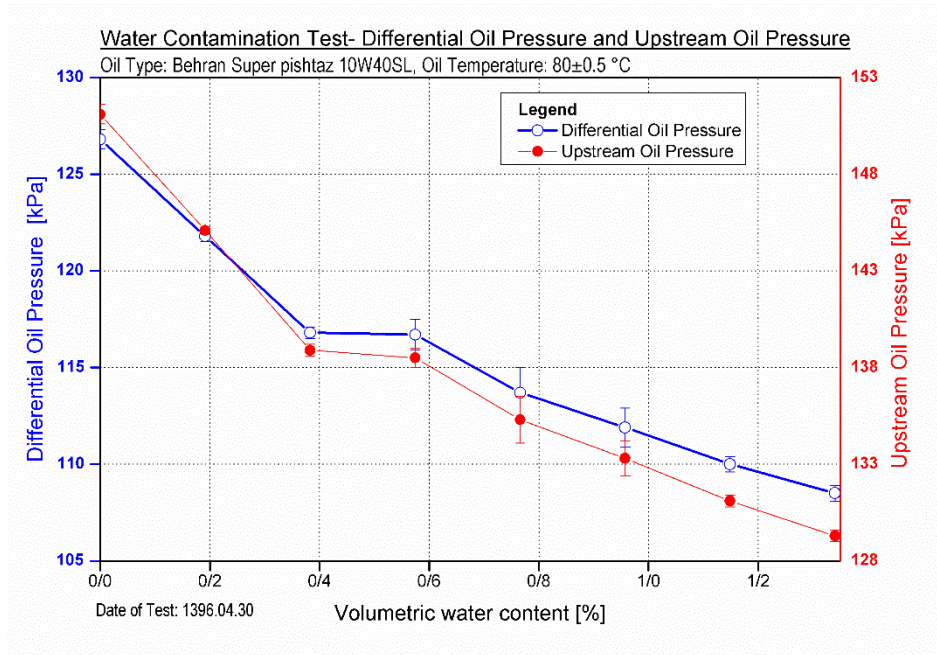
زاویه تتا با افزایش آلودگی آب تا ۱/۳۵ درصد افزایش یافته است (شکل ۵-۳۱). از آنجا که هم ظرفیت خازنی و هم مقاومت الکتریکی هر دو با آلودگی آب افزایش یافته است، زاویه تتا تغییر یافته است ولی رشد آن محدودتر و در حد ۱/۲ درجه بوده است، که نسبتاً با نتایج حسگر TAN DELTA سازگار است.



شکل ۵-۳۱- اثر افزایش آب در روغن بر تتا و LF

د) اثر آلودگی آب در روغن بر اختلاف فشار دو سر حسگر

در بخش آلودگی سوخت شرح داده شده است که تغییرات گرانروی با استفاده از اختلاف فشار دو سر حسگر قابل تشخیص است. با توجه به نمودار شکل ۵-۳۲ اختلاف فشار دو سر حسگر تا ۱/۳۵ درصد آلودگی آب کاهش یافته است که بیانگر کاهش گرانروی روغن با افزایش آب تا ۱/۳۵ درصد حجمی است. قابل توجه است که تغییرات اختلاف فشار با تغییرات ظرفیت خازنی، مقاومت الکتریکی روغن و خروجی حسگر TANDELTA انطباق خوبی دارد. مقدار کاهش اختلاف فشار نسبی دو سر حسگر KPa ۱۸ معادل ۱۴٪ نسبت به حالت بدون آب با وجود ۱/۳۵٪ آب می‌باشد.



شکل ۵-۳۲- اثر آلودگی آب در روغن بر اختلاف فشار دو سر حسگر

۵-۴-۶ نتایج آزمون اکسیداسیون در مدار هیدرولیک

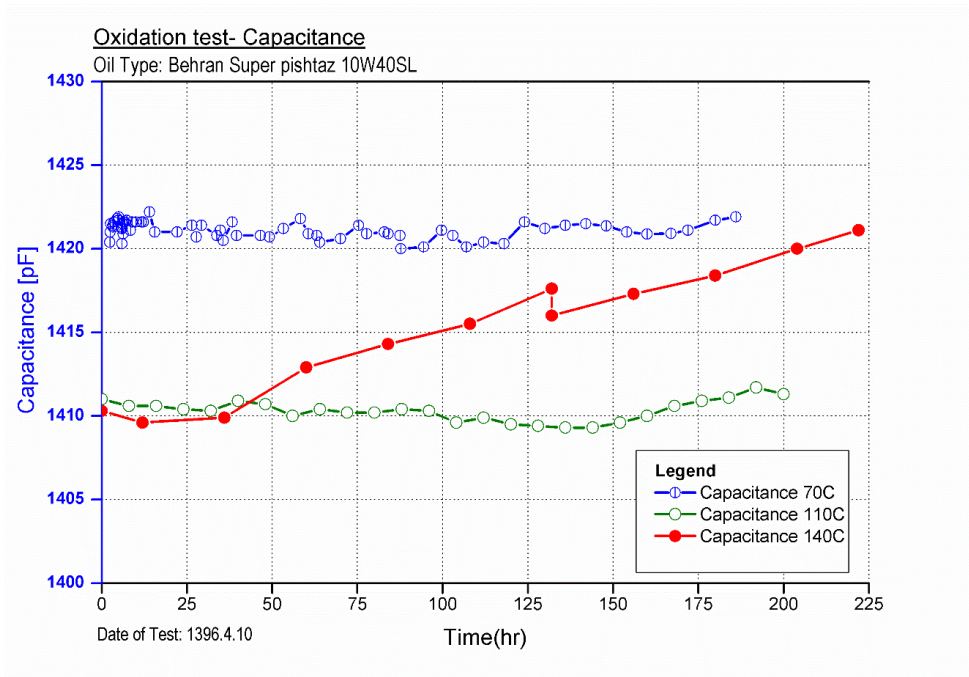
نتایج اثر اکسیداسیون روغن بر خروجی‌های حسگر کیفیت روغن به صورت آنالین در مدار هیدرولیک در این بخش بررسی شده است.

الف) تغییرات ظرفیت خازنی حسگر در آزمایش اکسیداسیون

در شکل ۵-۳۳ نتایج سه آزمایش اکسیداسیون با شرایط داده شده در جدول ۴-۴ نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده خراب نشدن روغن در آزمایش اول است که علت آن دمای پایین روغن در این آزمایش است. نویز موجود در نتایج آزمایش ۱ به علت تغییرات دما در این مرحله است، در آزمایش ۱ دما به طور کامل کنترل نشده و بین ۶۵ تا ۷۵ درجه متغیر بوده است. ظرفیت خازنی در آزمایش ۱ تغییر نکرده و تغییرات اندک به علت تغییرات دما است بنابراین در آزمایش ۱ روغن کاملاً سالم مانده و حسگر هم سلامت روغن را نشان می‌دهد.

در آزمایش ۲ که دمای روغن در ۱۱۰ درجه سانتیگراد کنترل شده است، ظرفیت خازنی روغن تا ساعت ۱۶۰ آزمایش تغییر چندانی نشان نداده است که حاکی از سلامت روغن تا این ساعت است اما بعد از این ساعت ظرفیت خازنی روغن شروع به تغییرات اندکی می‌کند که نشان دهنده شروع تغییر کیفیت روغن است. ولی میزان خرابی بسیار اندک و هنوز روغن سالم است. در آزمایش ۲ و ۳ اکسیداسیون خروجی‌ها حسگرها در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد خوانده شده است.

در آزمایش ۳ دمای روغن در دمای ۱۴۰ درجه سانتیگراد کنترل شده است. در این آزمایش افزایش ظرفیت خازنی روغن با افزایش ساعت اکسیداسیون قابل توجه است. به علت دمای بالای آزمایش ۳، روغن از ساعت ۲۰ آزمایش شروع به تغییر کیفیت کرده و تا ساعت ۲۲۰ به اندازه ۱۲ PF ظرفیت خازنی افزایش یافته است. در ساعت ۱۳۰ روغن به اندازه ۴۰۰CC سریز شده است. حجم اولیه روغن ۵ لیتر بوده است. نمودار در این ساعت سریز روغن را به خوبی نشان می‌دهد. این یکی از مزایای حسگرهای آنلاین است که می‌تواند زمان تعویض و یا سریز روغن را نشان دهد.

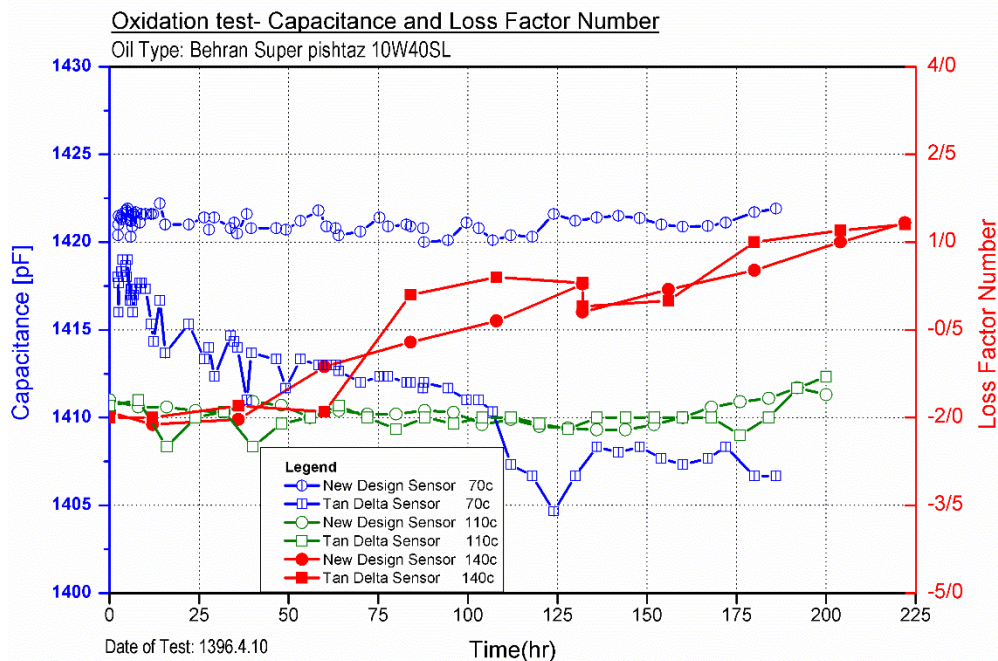


شکل ۵-۳۳- تغییرات ظرفیت خازنی حسگر در آزمایش‌های اکسیداسیون

ب) مقایسه تغییرات ظرفیت خازنی حسگر با LF در آزمایش اکسیداسیون

در شکل ۵-۳۴ تغییرات ظرفیت خازنی حسگر در آزمایش اکسیداسیون با خروجی حسگر TANDELTA که همزمان با حسگر ساخته شده در مدار وصل بوده، مقایسه شده است. در آزمایش ۲ و ۳ نتایج دو حسگر انطباق خوبی باهم دارند. در آزمایش ۱ به علت کنترل کم این آزمایش نتایج با هم انطباق ندارد. به نظر می‌رسد با توجه به بزرگی حسگر ساخته شده، نتایج ظرفیت خازنی حسگر ساخته شده رفتار دقیق‌تری را نسبت به حسگر

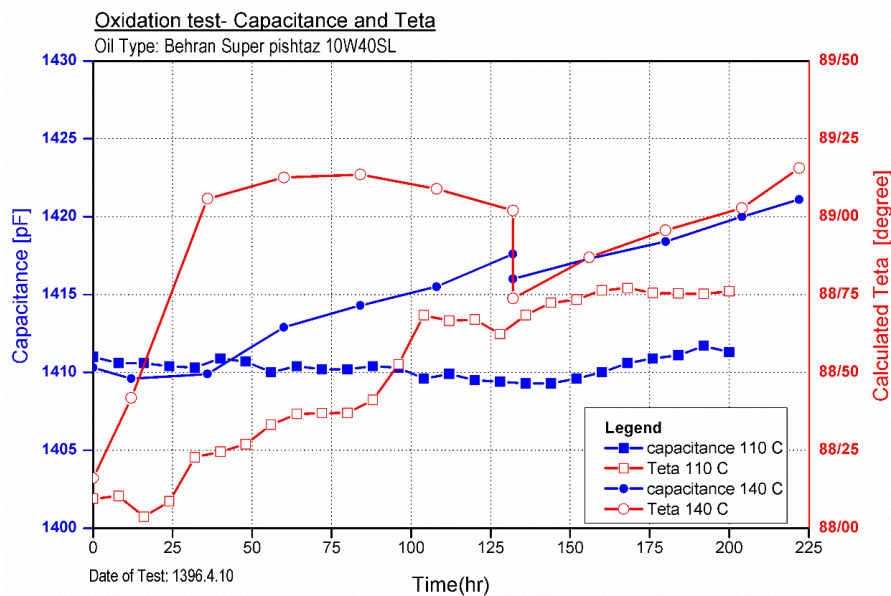
TAN DELTA نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در آزمون اول اکسیداسیون در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد روغن از مجاری فروش رسمی شرکت سازنده روغن تأمین نشده است. این روغن دارای رنگ متفاوت و ظرفیت خازنی متفاوت است. لذا حسگر مورد نظر می‌تواند قابلیت‌های خوبی را در شناسایی روغن بخصوص در داخل خط تولید روغن و یا بازرسی روغن‌ها ایفا کند.



شکل ۵-۳۴- مقایسه تغییرات ظرفیت خازنی حسگر با LF در آزمایش اکسیداسیون

ج) مقایسه ظرفیت خازنی حسگر با تغییرات زاویه تتا در آزمایش اکسیداسیون

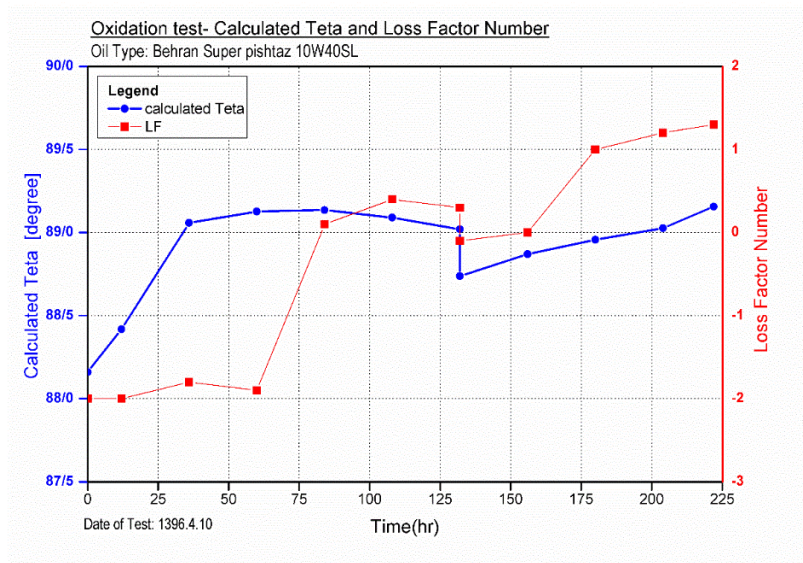
ظرفیت خازنی حسگر در آزمایش ۲ و ۳ اکسیداسیون با تغییرات زاویه تتا مقایسه شده است (شکل ۵-۳۵). برای آزمایش ۲ اکسیداسیون تغییرات تتا محسوس تر از تغییرات ظرفیت خازنی است که دلیل آن تغییرات بیشتر مقاومت الکتریکی در آزمایش ۲ نسبت به ظرفیت خازنی است. در ۲۰۰ ساعت آزمون اکسیداسیون، زاویه تتا در آزمایش ۲ اکسیداسیون (دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد)، ۰/۷۵ درجه افزایش یافت و در آزمایش ۳ اکسیداسیون با روغن ۱۴۰ درجه سانتیگراد، زاویه تتا ۱/۲ درجه افزایش یافته است. البته همانگونه که در شکل هم مشخص است، رفتار ظرفیت خازنی روغن به مراتب با واقعیت و پیش بینی میزان خرابی نزدیک تر است.



شکل ۵-۳۵- مقایسه ظرفیت خازنی حسگر با تغییرات زاویه تتا

د) مقایسه تغییرات زاویه تتا با LF در آزمایش اکسیداسیون

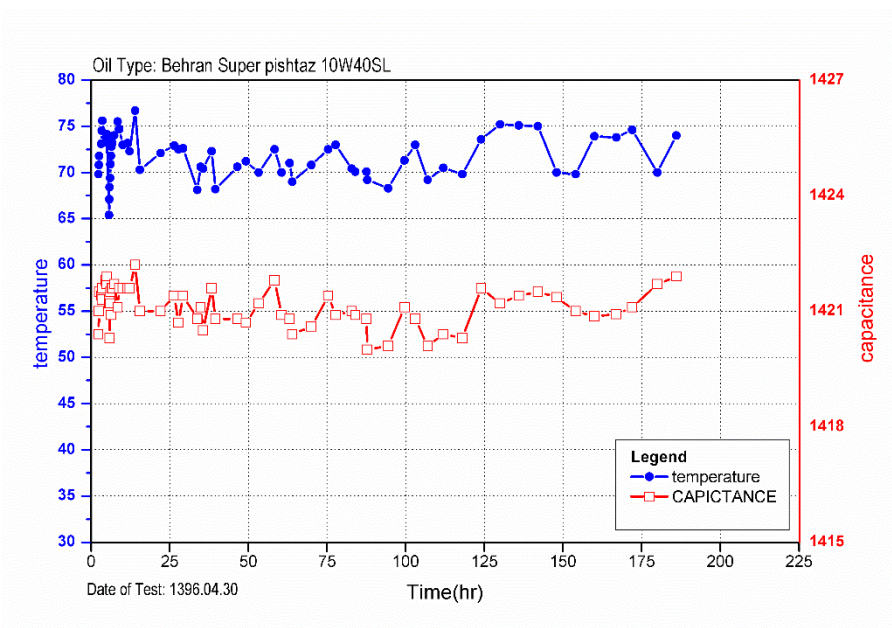
در شکل ۵-۳۶ تغییرات زاویه تتا با LF حسگر TANDELTA مقایسه شده است. زاویه تتا به صورت صعودی افزایش یافته است. (علت پرش نمودار در ساعت ۱۳۰ سرریز روغن است)



شکل ۵-۳۶- مقایسه تغییرات زاویه تتا با LF در آزمایش اکسیداسیون

ه) اثر تغییر دما در آزمایش اکسیداسیون

در آزمایش ۲ و ۳ دما کنترل شده بوده است؛ اما با توجه به این که در آزمایش ۱ دما بین ۶۵ تا ۷۵ درجه تغییر داشته است، ظرفیت خازنی با تغییرات دما در این آزمایش مقایسه شده است. (شکل ۵-۳۷) در این دما روغن خراب نشده است بنابراین تغییرات خروجی حسگر ناشی از تغییرات دما می‌باشد.



شکل ۵-۳۷- اثر تغییر دما در آزمایش اکسیداسیون ۱

در شکل ۵-۳۸ تغییر رنگ نمونه روغن پس از آزمایش‌های اکسیداسیون نشان داده شده است.



شکل ۵-۳۸- تغییر رنگ نمونه روغن پس از آزمایش‌های اکسیداسیون

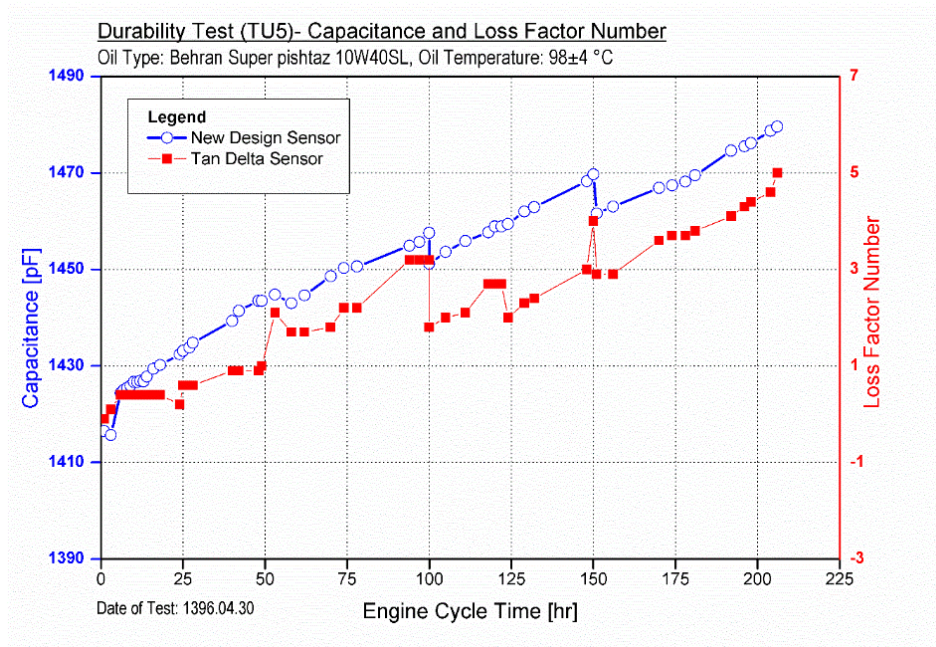
براساس نتایج رنگ روغن در آزمایش اول در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد تغییر نکرده است. در آزمون دوم رنگ روغن کمی تیره‌تر شده است ولی هنوز تا میزان خرابی روغن فاصله زیادی وجود دارد. در آزمایش سوم، فرایند اکسیداسیون کاملاً در روغن تأثیر گذاشته است و رنگ روغن سیاه شده است که این موضوع با نتایج اندازه‌گیری ظرفیت خازنی انطباق خوبی دارد.

۵-۵ نتایج آزمایش صحه گذاری حسگر کیفیت روغن در آزمون دوام موتوری

حسگر کیفیت روغن ساخته شده و حسگر TAN DELTA توسط سامانه پایش کیفیت روغن، به مدار روانکاری موتور TU5 در آزمون دوام وصل شده و به صورت آنلاین دیتا برداری صورت می‌گیرد. نتایج آزمایش نصب حسگر بر روی موتور TU5 برای بررسی عملکرد آن در آزمون دوام موتوری در این بخش بررسی شده است.

الف) تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و LF حسگر TAN DELTA در آزمایش دوام موتور TU5

نمودار شکل ۵-۳۹ تغییرات ظرفیت خازنی و تغییرات LF حسگر TANDELTA با افزایش ساعت کارکرد روغن در موتور نشان داده شده است.



شکل ۵-۳۹- تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و LF حسگر TAN DELTA در آزمایش دوام موتور TU5

ظرفیت خازنی از ۱۴۱۲ پیکوفاراد برای روغن تازه تا ۱۴۸۰ برای روغن ۲۰۰ ساعت کارکرده، تغییر کرده است. این تغییر به صورت صعودی بوده و روند منظمی را طی کرده است، به طوری که می توان برای روغن محدوده سلامت تعیین کرد. در نمودار، ۳ پرش در ساعت های ۵۵، ۱۰۰، ۱۵۰ مشاهده می شود که ناشی از سریز روغن است. در این ساعات به ترتیب ۷۳۰ gr، ۶۳۴ gr و ۶۸۵ gr گرم روغن سریز شده است.

میزان خرابی در حسگر ساخته شده با دمای روغن ۱۰۰ درجه سانتیگراد، ۶۸ PF اندازه گیری شده است که البته به صورت تجمعی ۲۰۴۹ گرم روغن در این بازه زمانی کارکرد سریز شده است. این در حالی است که میزان تغییرات ظرفیت خازنی در آزمون اکسیداسیون برای دمای ۱۱۰° C و ۱۴۰° C به ترتیب ۲ پیکوفاراد و ۱۲ پیکوفاراد افزایش یافته است. این بدین معنی است که میزان خرابی در موتور در مقایسه با اکسیداسیون روغن بشدت بیشتر است. دلیل این موضوع این است که اگر چه دمای روغن در گالری ۱۰۰ درجه سانتیگراد می باشد ولی بخشی از روغن بصورت محلی بشدت دچار گرمایش و در

معرض اکسیداسیون قرار می‌گیرند. به عنوان مثال در ناحیه پیستون و رینگ پیستون درجه حرارت قطعات داغ به حدود ۳۰۰ درجه سانتیگراد می‌رسد که این حرارت توسط روغن جذب و دفع می‌شود. از طرفی در ناحیه اطراف رینگ ها، فشار گازهای حاصل از احتراق موتور که دمای بسیار بالایی بیش از ۸۰۰ درجه سانتیگراد دارند از دهانه رینگ به محفظه کارتل نفوذ می‌کند. این گازهای داغ در مجاورت روغن شرایط اکسیداسیون شدیدی را برای موتور به وجود می‌آورند. در آزمون دوام انجام شده، نشستی از مدار آب و آلاینده‌گی روغن به آب مشاهده نشده است. ولی امکان نفوذ مقداری سوخت به داخل روغن وجود داشته است. وجود ذرات خارجی و آلاینده‌گی‌های دیگر هم می‌تواند در افزایش چشم‌گیر ظرفیت خازنی مؤثر باشد.

با توجه به محاسبات جدول ۳-۵ برای سریز در ساعات ۵۵ و ۱۰۰ و ۱۵۰ می‌توان نشان داد حسگر قادر است مقدار وزن روغن سرریز شده را پیش بینی کند و یا اگر وزن روغن سرریز را وجود داشته باشد، می‌تواند نوع روغن سرریز شده را مشخص کند (در ساعت ۵۰ میزان ظرفیت خازنی روغن بعد از سرریز ثبت نشده است). همان طور که از نتایج جدول مشخص است، در صورتی که ظرفیت خازنی قبل و بعد از تعویض توسط حسگر ثبت شود می‌توان با خطای بسیار کمی میزان روغن سرریز شده را تشخیص داد.

جدول ۳-۵ محاسبات پیش بینی میزان ظرفیت خازنی روغن موتور بعد از سرریز روغن

150	100	55	(hr)	ساعت آزمون
510	459	555	(gr)	میزان مصرف روغن
175	175	175	(gr)	میزان برداشت روغن نمونه گیری
685	634	730	(gr)	جمع میزان سرریز روغن (Ma)
1416	1416	1416	(pf)	ظرفیت خازنی روغن نو (Ca)
3315	3366	3270	(gr)	وزن حدودی روغن موجود (Mo)
1469.7	1457.6	1447	(pf)	ظرفیت خازنی روغن کارکرده (Co)
1460.5	1451.0	1441.3	(pf)	پیش بینی ظرفیت خازنی (Cpredicted)
1461.6	1451.2	-	(pf)	ظرفیت خازنی اندازه گیری شده (Cmeasured)
1.1	0.2	-	(pf)	تفاوت پیش بینی و اندازه گیری ظرفیت خازنی
0.075%	0.013%	-	(%)	درصد خطا

پیش بینی ظرفیت خازنی روغن موتور بعد از سرریز از رابطه (۸-۵) بدست می آید:

$$C \text{ predicted} = \frac{M_a C_a + M_o C_o}{M_a + M_o} \quad (۸-۵)$$

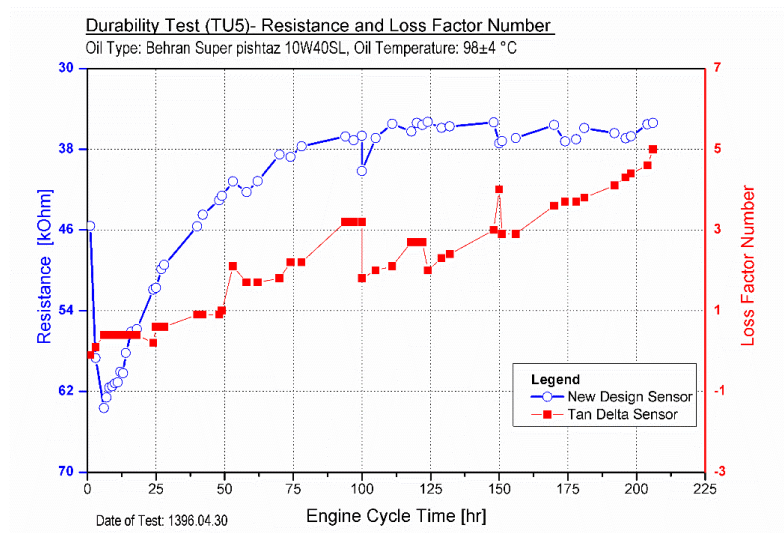
این تغییر در کیفیت روغن به علت سرریز توسط حسگر تشخیص داده شده است. روغن در دمای ۹۸ درجه سانتیگراد با خطای ۴ درجه کنترل شده است. برخی نوسانات ظرفیت خازنی به علت تغییرات دمایی اندک می باشد. خروجی حسگر TANDELTA نیز انطباق خوبی با نتایج حسگر ساخته شده داشته و تغییر کیفیت روغن و خرابی آن را هماهنگ با حسگر ساخته شده نشان می دهد. روغن در حال خراب شدن با مولکول های قطبی حساسیت الکتریکی بزرگتری نسبت به روغن موتور غیر معیوب با مولکول های غیر قطبی دارد. از طرفی به علت تأثیر ذرات فلز و یون های فلزی که با خوردگی و سایش افزایش یافته، امکان افزایش ظرفیت خازنی در روغن وجود خواهد داشت. بر این اساس می توان تعیین کرد هر چه روغن موتور بیشتر خراب شود گذردهی روغن موتور افزایش می یابد.

ب) تغییرات مقاومت الکتریکی روغن در حسگر و LF حسگر TAN DELTA در آزمایش

دوام موتور TU5

در نمودار شکل ۵-۴۰ تغییرات مقاومت روغن و تغییرات LF حسگر TANDELTA نشان داده شده است. در ابتدای کارکرد روغن مقاومت الکتریکی آن با شیب تند افزایش یافته (نمونه این کاهش در ساعات اولیه در آزمایش های آفلاین هم مشاهده شده است) سپس بعد از گذشت ۵ ساعت شروع به کاهش می کند. این در صورتی است که در برخی آلودگی ها این تغییر مقاومت افزایشی بوده است؛ بنابراین با تحلیل تغییرات خروجی های حسگر نسبت به آلودگی های مختلف، اکسیداسیون و تست دوام

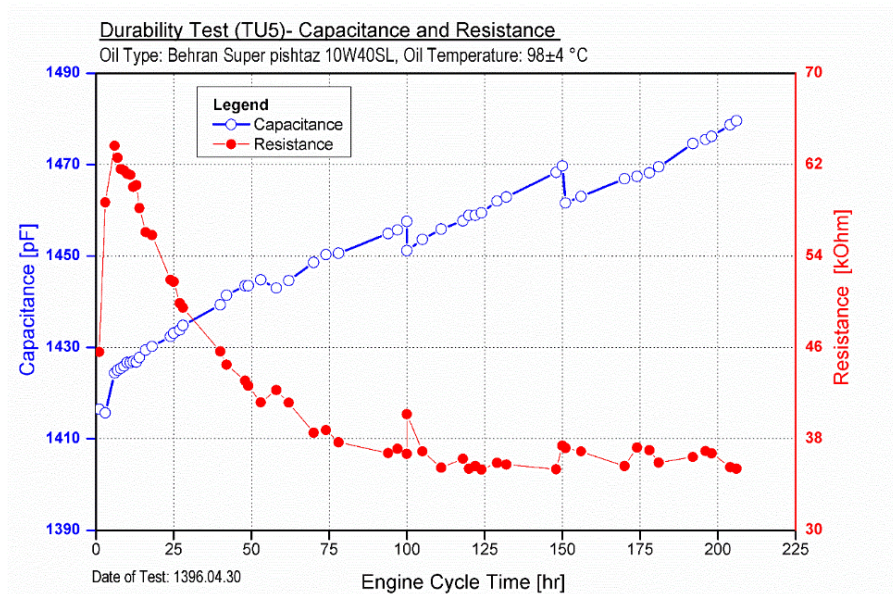
موتوری می‌توان نوع آلودگی یا خرابی را تشخیص داد. در ساعت‌های سریز روغن، تغییر مقاومت در حسگر مشخص است.



شکل ۵-۴۰- تغییرات مقاومت الکتریکی روغن در حسگر و LF حسگر TAN DELTA در آزمایش دوام موتور TU5

ج) تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و مقاومت الکتریکی در آزمایش دوام موتور TU5

در شکل ۵-۴۱ ظرفیت خازنی و مقاومت الکتریکی روغن در حسگر ساخته شده با افزایش ساعت کارکرد روغن در موتور TU5 با هم مقایسه شده است. در حالی که ظرفیت خازنی روند افزایش را طی می‌کند، مقاومت الکتریکی در ابتدا افزایش با شیب تند و سپس کاهش نشان می‌دهد. روغن در ساعت کارکرد بالاتر از ۱۰۰، کاهش مقاومت الکتریکی با شیب کمتری نسبت به ساعت‌های اولیه دارد.

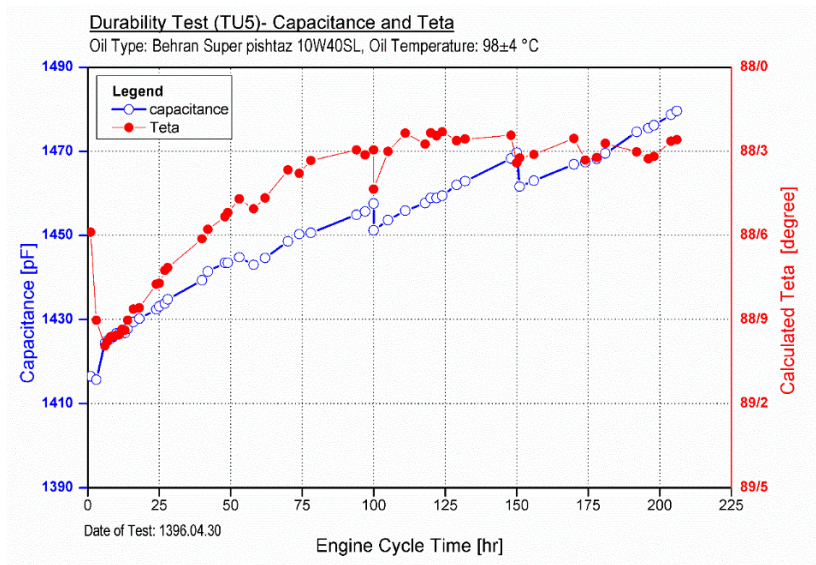


شکل ۵-۴۱- تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و مقاومت الکتریکی در آزمایش دوام موتور TU5

بر اساس نتایج در ۲۰۰ ساعت کارکرد موتوری در آزمون دوام با در نظر گرفتن ۲۰۴۹ گرم روغن سریز، ظرفیت خازنی ۶۸ پیکوفاراد افزایش و مقاومت پس از گذشت ۵ ساعت حدود ۲۸ kΩ کاهش یافته است.

تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و زاویه تتا در آزمایش دوام موتور TU5

در نمودار شکل ۵-۴۲ ظرفیت خازنی حسگر و زاویه تتا با هم مقایسه شده‌اند. تغییرات ظرفیت خازنی به طور پیوسته افزایشی بوده (در نقاط سریز روغن پرش به خوبی دیده می‌شود) اما تغییرات تتا ابتدا افزایشی و سپس کاهش‌ی بوده است.

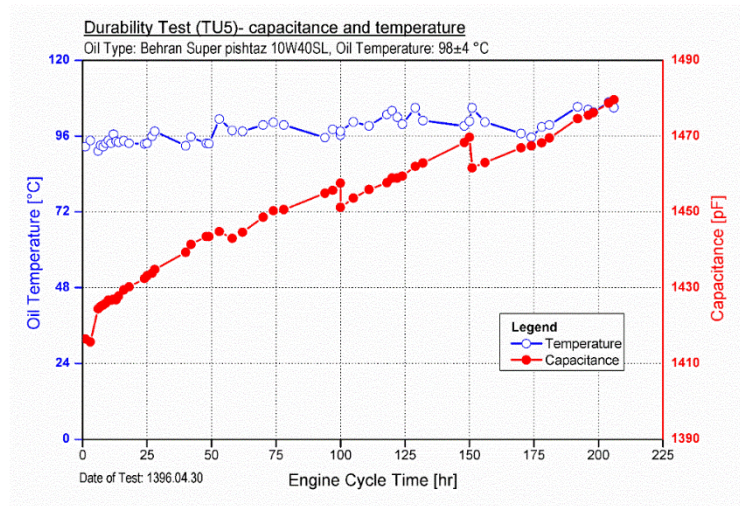


شکل ۵-۴۲- تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و زاویه تتا در آزمایش دوام موتور TU5

بر اساس نتایج در بیش از ۵ ساعت کارکرد روغن، زاویه تتا حدود ۰/۷ درجه افزایش یافته است که نسبتاً رفتار متناوبی را با حسگر TAN DELTA نشان می‌دهد.

د) تغییرات ظرفیت خازنی حسگر با تغییر دما در طول آزمایش دوام موتور TU5

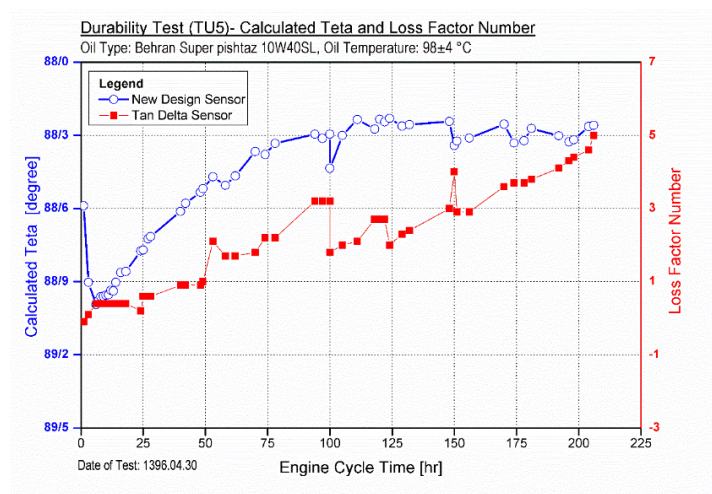
دمای روغن در موتور در محدوده 98 ± 4 درجه سانتیگراد کنترل شده است. برای بررسی نوسانات ظرفیت خازنی حاصل از تغییرات دما لازم است این تغییرات کم دما و اثر آن بر ظرفیت خازنی در طول تست در موتور بررسی شود. مشاهده می‌شود که در ساعاتی که دما اندکی تغییر داشته ظرفیت خازنی به مقدار کمی تغییر کرده است (شکل ۵-۴۳). البته از آنجا که شیب خرابی روغن در موتور بسیار شدید است این میزان خطا در بررسی نتایج و تصمیم‌گیری در مورد وضعیت روغن خللی بوجود نمی‌آورد.



شکل ۵-۴- تغییرات ظرفیت خازنی حسگر با تغییر دما در طول آزمایش دوام موتور TU5

ه) تغییرات تنا و LF در آزمایش دوام موتور TU5

در شکل ۵-۴ تغییرات تنا با خروجی حسگر TANDELTA مقایسه شده است. بر اساس نتایج مقدار تنا ۵ ساعت پس از کارکرد روغن، حدود ۰/۷ درجه تا ساعت ۱۰۰ آزمون دوام کاهش یافته است و پس از آن نسبتاً ثابت مانده است. این در حالی است که روغن کماکان در حال تخریب و کاهش کیفیت است که حسگر TAN DELTA هم این موضوع را نشان می‌دهد. لذا بر اساس نتایج آزمون موتوری هم می‌توان به این نتیجه رسید که اولویت تصمیم‌گیری در میزان خرابی روغن ابتدا بر پایه ظرفیت خازنی و سپس بر پایه زاویه تنا می‌باشد.



شکل ۵-۴- تغییرات تنا و LF در آزمایش دوام موتوری

برای بررسی اثر عوامل مختلف خرابی روغن و پیش‌بینی نوع خرابی روغن، نتایج آزمایش‌ها به طور کلی در جدول ۴-۵ به عنوان راهنمای حسگر کیفیت روغن جمع‌بندی شده است.

جدول ۴-۵ اثر عوامل مختلف خرابی روغن بر خروجی‌های حسگر

	ظرفیت خازنی (C)	مقاومت (R)		زاویه تتا (θ)		اختلاف فشار ΔP
آلودگی آب	$\uparrow 10.4 \frac{\text{pf}}{\text{vol}\%}$	$\uparrow 120 \frac{\text{k}\Omega}{\text{vol}\%}$	$0 < \text{vol}\% < 0.37\%$	$\uparrow 2.66 \frac{\text{deg}}{\text{vol}\%}$	$0 < \text{vol}\% < 0.37\%$	$\downarrow 13.33 \frac{\text{kpa}}{\text{vol}\%}$
		$\uparrow 20 \frac{\text{k}\Omega}{\text{vol}\%}$	$0.37 < \text{vol}\% < 1.35$	$\uparrow 0.2 \frac{\text{deg}}{\text{vol}\%}$	$0.37 < \text{vol}\% < 1.35$	
آلودگی سوخت	→	$\downarrow 0.62 \frac{\text{k}\Omega}{\text{vol}\%}$		$\downarrow 0.04 \frac{\text{deg}}{\text{vol}\%}$		$\downarrow 5.12 \frac{\text{kpa}}{\text{vol}\%}$
اکسیداسیون در دمای 110°C	$\uparrow 0.015 \frac{\text{pf}}{\text{hr}}$	$\uparrow 0.085 \frac{\text{k}\Omega}{\text{hr}}$		$\uparrow 0.0046 \frac{\text{deg}}{\text{hr}}$	0-140 hr	-
				→	140-200 hr	
اکسیداسیون در دمای 140°C	$\uparrow 0.05 \frac{\text{pf}}{\text{hr}}$	$\uparrow 0.245 \frac{\text{k}\Omega}{\text{hr}}$		$\uparrow 0.025 \frac{\text{deg}}{\text{hr}}$	0-40 hr	-
				→	40-200 hr	
دوام آزمون موتوری	$\uparrow 0.32 \frac{\text{pf}}{\text{hr}}$	$\uparrow 3.6 \frac{\text{k}\Omega}{\text{hr}}$	0-5 hr	$\uparrow 0.08 \frac{\text{deg}}{\text{hr}}$	0-5 hr	-
		$\downarrow 0.25 \frac{\text{k}\Omega}{\text{hr}}$	5-110 hr	$\downarrow 0.0075 \frac{\text{deg}}{\text{hr}}$	5-110 hr	
		→	110-200hr	→	110-200hr	

فصل ۶ جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات

در این فصل نتایج بدست آمده از پژوهش ارائه شده، در ابتدا جمع بندی و سپس پیشنهادات در جهت فعالیت های تحقیقاتی دیگر ارائه می شود.

۱-۶ جمع بندی و نتیجه گیری

قابلیت های حسگر کیفیت روغن شامل موارد زیر می باشد:

- کاهش سرویس ماشین آلات: نظارت دقیق وضعیت روغن که باعث کاهش هزینه های نگهداری و تعمیرات می شود.

- کاهش خرابی های ماشین: وضعیت روغن یک شاخص عالی از مشکلاتی است که باعث اختلال غیرمنتظره عملکرد موتور می شود. شناسایی زودهنگام، تعمیرات را کاهش داده و موجب کاهش خرابی ها می شود.

- افزایش عمر ماشین آلات یا موتور: حفظ وضعیت مطلوب روغن می تواند به طور چشمگیری نرخ سایش تجهیزات را کاهش دهد و در نتیجه باعث افزایش عمر تجهیزات شود.

- کاهش هزینه تعویض روغن: در حال حاضر بیشتر روان کارها قبل از پایان عمر خود تعویض می شوند و این به معنی افزایش هزینه های تعویض روغن می باشد.

- بهره‌وری بیشتر: زمان کمتر نگهداری و تعمیرات، کاهش زمان کارکرد ماشین‌آلات به علت خرابی و عمر طولانی تر، به معنی بهره‌وری بیشتر از زمان است.
- کاهش آلاینده‌گی محیط زیست: تعویض زود و بی‌موقع روغن علاوه بر اتلاف باعث افزایش آلودگی محیط زیست و افزایش پس مانده‌های صنعتی می‌شود.
- علاوه بر این قابلیت‌ها حسگر کیفیت روغن ساخته شده قابلیت‌های زیر را دارا می‌باشد:
- دقت و حساسیت بالا جهت کار برای خط تولید روغن (امکان تشخیص کیفیت روغن به صورت آنلاین در خطوط تولید روغن توسط حسگر کیفیت روغن ساخته شده امکان پذیر است).
- امکان پایش وضعیت همزمان گرانروی روغن
- قابلیت تشخیص میزان روغن اضافه و یا نوع روغن
- بررسی ایرادات احتمالی بر اساس جدول خرابی
- امکان نصب خارج و داخل مدار
- اندازه‌گیری همزمان فشار روغن
- امکان گیراندازی براده‌های بزرگتر از ۴۰۰ میکرومتر جهت جلوگیری از خرابی یاتاقان (در این صورت حسگر باید مجدد شستشه شود)
- حسگر ساخته شده جزو آسانترین و ارزانترین حسگرهای پایش وضعیت روغن است که علاوه بر خروجی‌های کافی، امکان پیاده سازی در قوای محرکه موتوری را دارا می‌باشد.
- حسگر ساخته شده به صورت خارج از خط^۱ طراحی شده است. خروجی حسگرهای کیفیت روغن بر اساس ضریب دی الکتریک، تغییر مقدار ظرفیت خازنی می‌باشد. خروجی‌های این حسگر علاوه بر ظرفیت خازنی، تتا و اختلاف فشار روغن عبوری از حسگر می‌باشد. با این حساب می‌توان علاوه بر تشخیص کیفیت روغن، تا حدودی نوع خرابی را هم پیش‌بینی کرد. از طرفی

¹ Out of line

با استفاده از اختلاف فشار روغن دو سر حسگر، امکان پایش تغییرات گرانیروی روغن که یکی از پارامترهای بسیار مهم در روغن است، را هم به کاربر داد.

- فرکانس بهینه برای اندازه‌گیری ظرفیت خازنی و زاویه تتا 100 KHz می‌باشد.
- پس از آزمون‌های آفلاین مشخص شد که پوسته حسگری لازم است تا تغییرات در حسگر وجود نداشته باشد بنابراین حسگر پس از آزمون‌های آفلاین به صورت هم بندی درآمده و سپس در تابلو پایش کیفیت روغن ساخته شده، نصب شد.
- نتایج بیانگر توانایی حسگر در تعیین کیفیت روغن و شناسایی آلودگی‌های آب و آلودگی سوخت و خرابی ناشی از اکسیداسیون است.
- نتایج آزمون‌های اکسیداسیون نشان می‌دهد که روغن موتور در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد دچار خرابی و اکسیداسیون در ۲۰۰ ساعت کارکرد نمی‌شود. در صورتی که این دما به ۱۱۰ درجه سانتیگراد افزایش یابد روغن بسیار اندک و با شیب بسیار کم دچار خرابی می‌شود. روغن در دمای ۱۴۰ درجه سانتیگراد علاوه بر بخار شدن، دچار اکسیداسیون قابل توجهی می‌شود که توسط حسگر ساخته شده و حسگر TAN DELTA قابل شناسایی بود.
- تشخیص روغن اصلی از روغن متفرقه از ویژگی‌های خاص این حسگر است. لذا حسگر مورد نظر می‌تواند قابلیت‌های خوبی را در شناسایی روغن بخصوص در داخل خط تولید روغن و یا بازرسی روغن‌ها ایفا کند.
- خروجی‌های مستقل حسگر شامل ظرفیت خازنی، زاویه تتا و اختلاف فشار دو سر حسگر است. علاوه بر این خروجی‌ها دماسنج هم روی حسگر نصب می‌شود. ظرفیت خازنی به عنوان خروجی اصلی حسگر است که کیفیت روغن توسط آن مشخص می‌شود. خروجی‌های دیگر به عنوان پارامترهای کمکی برای تعیین کیفیت روغن و تعیین نوع خرابی روغن است.
- براساس نتایج مشخص شده که محدوده خروجی ظرفیت خازنی برای خرابی روغن مشخص و تکرار پذیر است، جدول ۶-۱ برای تعیین کیفیت روغن براساس ظرفیت خازنی تشکیل شده

است. جدول ۶-۱ برای روغن بهران سوپر پیشتاز 10w40 تشکیل شده و برای روغن های دیگر محدوده خروجی حسگر می تواند تفاوت کند و نیاز به کالیبراسیون مجدد دارد. تفسیر خروجی حسگر در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد انجام شده و برای دماهای متفاوت باید ضریب تصحیح دما اعمال شود.

جدول ۶-۱ تعیین کیفیت روغن براساس ظرفیت خازنی

ظرفیت خازنی (pf)	تحلیل خروجی
$c < 650$	خرابی عملکرد حسگر
$650 < c < 750$	هوا
$750 < c < 1410$	ماده ای با ضریب دی الکتریک متفاوت (غیراز روغن مرجع) و یا عملکرد حسگر همراه با هوا
$1410 < c < 1425$	روغن تازه
$1425 < c < 1480$	روغن سالم
$1480 < c < 1490$	ساعت های پایانی عمر روغن (محدوده نارنجی)، روغن زودتر تعویض گردد
$1490 < c$	خرابی روغن (محدوده قرمز)

- در صورتی که ظرفیت خازنی ثابت و تغییرات تتا بسیار ناچیز باشد و اختلاف فشار دو سر حسگر روند کاهشی داشته باشد، روغن به بنزین آلوده شده است. حسگر بر اساس ظرفیت خازنی به تنهایی قادر به تشخیص آلودگی بنزین نیست اما بررسی تغییرات گرانیوی با کنترل اختلاف فشار دو سر حسگر، شناسایی بنزین در روغن را امکان پذیر می کند. لازم به ذکر است که حسگر صنعتی TAN DELTA هم امکان شناسایی بنزین در روغن را نداشته است و نحوه طراحی حسگر مورد مطالعه امکان پایش آلودگی بنزین در روغن را به وجود آورده است.
- در صورتی که شیب تغییرات ظرفیت خازنی بالا و افزایشی (در یک ساعت کارکرد روغن بالاتراز $1 \frac{pf}{hr}$)، تغییرات تتا افزایشی با شیب کم بوده (میزان تغییر تتا بالاتر از خرابی های دیگر است) و تغییرات اختلاف فشار دو سر حسگر کاهشی با شیب بالا باشد، روغن به آب آلوده شده است.

وجود مقدار کم آب در روغن باعث اکسیده شدن سطوح سایشی و افزایش شدید نرخ سایش در موتور می‌شود. در صورتی که حجم آب افزایش یابد این خرابی می‌تواند باعث اضمحلال روغن، پاره شدن فیلم یاتاقانی و در نهایت یاتاقان زدن موتور شود.

- نتایج نشان دهنده انطباق بالای تغییرات ظرفیت خازنی حسگر با تغییرات خروجی حسگر کیفیت روغن TANDELTA است. با توجه به کالیبره بودن حسگر TANDELTA، می‌توان صحت عملکرد حسگر را تأیید کرد. حسگر آزمایشگاهی ساخته شده به دلیل ظرفیت بالای خازنی و امکان عبور روغن از داخل حسگر به مراتب دقت بالاتری را در شناسایی ظرفیت خازنی روغن نسبت به حسگر صنعتی TAN DELTA دارا می‌باشد.
- تکرارپذیری داده های حسگر قابل قبول بوده به طوری که در هر تکرار داده، حداکثر خطای ظرفیت خازنی ۱ پیکوفاراد است.
- تغییرات دبی روغن تأثیری در شناسایی ظرفیت خازنی و زاویه تتا ندارد و نمی‌تواند باعث به وجود آمدن خطا در حسگر شود.
- تغییرات فشار روغن در حسگر نمی‌تواند باعث بوجود آمدن خطا در شناسایی ظرفیت خازنی و زاویه تتا در حسگر کیفیت روغن شود.
- حسگر کیفیت روغن ساخته شده می‌تواند زمان تعویض و یا سریز روغن را همراه با میزان یا نوع روغن نشان دهد.
- تغییرات دمای روغن باعث تغییر ظرفیت خازنی، مقاومت الکتریکی و زاویه تتا می‌شود که رفتار تکرار پذیری را طی می‌کند. اثر دما روی ظرفیت خازنی ناچیز است ولی بر روی مقاومت الکتریکی و یا زاویه تتا زیاد می‌باشد. برای حذف اثر دما ضریب تصحیح اثر دما برای هر یک از این خروجی‌ها بدست آمد. در صورت استفاده از روابط ضریب تصحیح دمای روغن خطای ناشی از تغییر دما بر خوانش ظرفیت خازنی 1pF ، برای مقاومت $8\text{ k}\Omega$ و برای زاویه تتا 0.45° درجه می‌باشد.

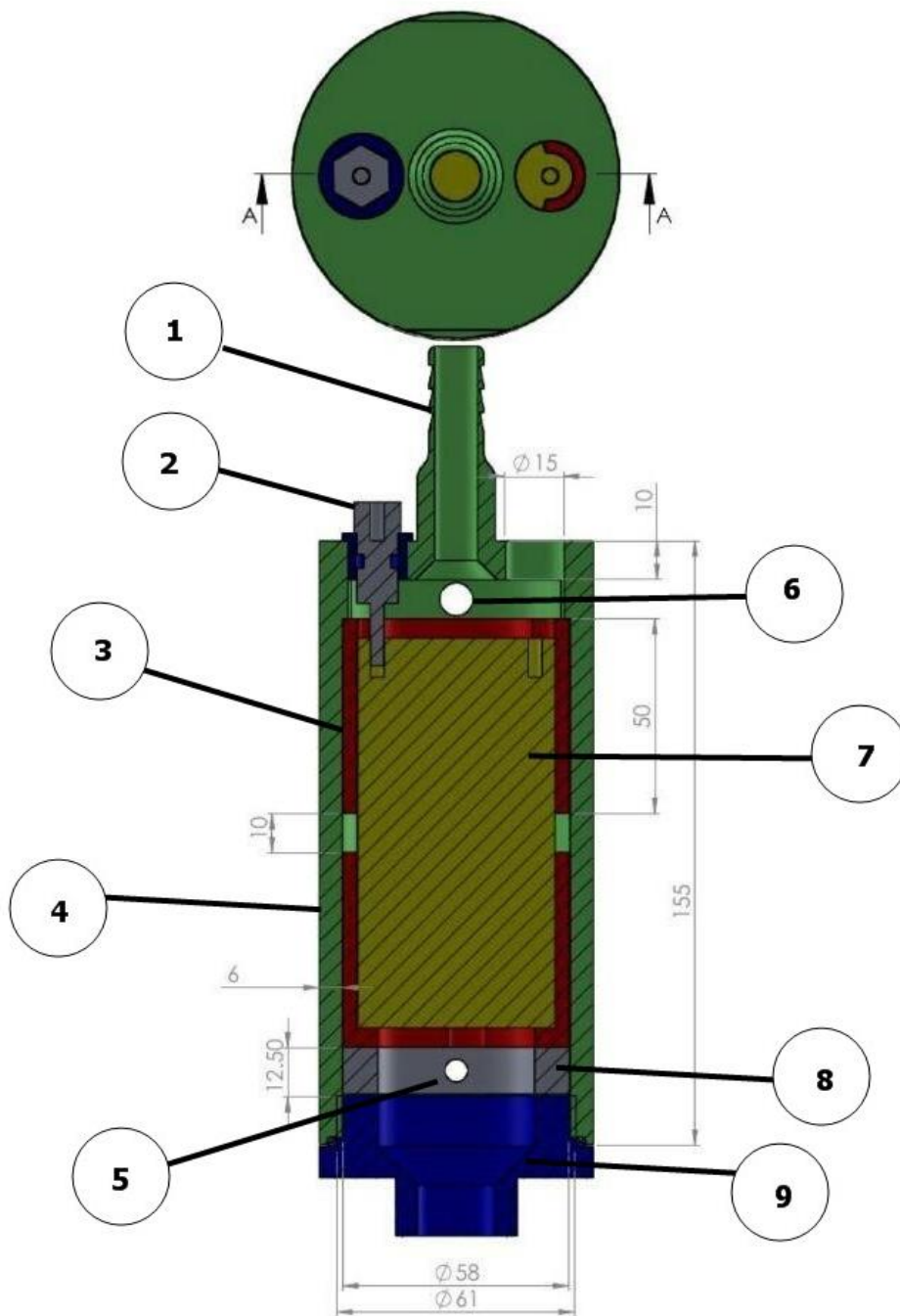
- بهترین حالت استفاده از حسگر ساخته شده بصورت خارج از مدار به همراه سیستم کنترل دمای روغن در شرایط دبی ثابت است. در صورتی که دما و دبی ثابت شود، علاوه بر حذف خطاهای ناشی از تغییرات دما، امکان پایش دقیق گرانشی روغن هم بوجود خواهد آمد. که در بهره برداری های صنعتی از جمله نیروگاه ها، موتورهای سنگین صنایع ریلی، دریایی و همچنین آزمایشگاه ها و یا خطوط تولید روغن ارزشمند خواهد بود.

۲-۶ پیشنهادها

- پیشنهاد می شود اثر آلودگی ذرات آهنی و غیر آهنی بر خروجی های حسگر کیفیت روغن بررسی شود.
- پیشنهاد می شود سایز کوچک تر حسگر کیفیت روغن برای استفاده تجاری ساخته شود.
- با توجه به این که حسگر ساخته شده آنلاین و خارج خط است، پیشنهاد می شود حسگر دی الکتریک آنلاین روی خط ساخته شود.
- پیشنهاد می شود در رساله ای بین رشته ای با تمرکز بر ساخت برد الکترونیک حسگر تعریف شود تا حسگر از LCR meter بی نیاز شود و امکان ارسال خروجی های صنعتی را داشته باشد.
- پیشنهاد می شود آزمایش های با فرکانس های مختلف و بیش از ۱۰۰ کیلوهرتز هم انجام پذیرد
- در حسگر ساخته شده از آلومینیوم برای ساخت هسته مرکزی استفاده شده است، پیشنهاد می شود از فلزات دیگر مانند مس و فولاد ضدزنگ هم به عنوان جنس تیغه های هسته استفاده شود و مورد آزمایش قرار گیرد.
- بررسی اثر آلودگی های دیگر در روغن از جمله آلودگی های محیطی مانند سیلیس و یا محیط بازی و اسیدی بر روی حسگر کیفیت روغن انجام پذیرد.

پیوست‌ها:

پیوست ۱ - لیست قطعات حسگر



لیست قطعات حسگر

نام قطعه	شماره قطعه
سر شیلنگی	۱
پیچ اتصال به همراه آب بند	۲
PTFE	۳
پوسته حسگر	۴
محل اتصال دماسنج	۵
محل اتصال فشارسنج	۶
هسته حسگر(الکترودهای شانه‌ای)	۷
PTFE	۸
درپوش	۹

پیوست ۲- محدوده خوانش و مقدار خطای LCR METER MASTECH 5308

Resistance Measurement				Capacitance Measurement				Inductance Measurement			
Frequency	Range	Resolution	Accuracy	Frequency	Range	Resolution	Accuracy	Frequency	Range	Resolution	Accuracy
100Hz/120Hz	200.00Ω	0.01Ω	1.0%+5d	100Hz/120Hz	20.000nF	1pF	1.0%+5d	100Hz/120Hz	20.000mH	1uH	1.0%+5d
100Hz/120Hz	2.0000KΩ	0.1Ω	0.3%+5d	100Hz/120Hz	200.00nF	0.01nF	0.5%+5d	100Hz/120Hz	200.00mH	0.01mH	0.5%+5d
100Hz/120Hz	20.000KΩ	1Ω	0.3%+5d	100Hz/120Hz	2000.0nF	0.1nF	0.5%+5d	100Hz/120Hz	2000.0mH	0.1mH	0.5%+5d
100Hz/120Hz	200.00KΩ	0.01kΩ	0.5%+5d	100Hz/120Hz	20.000uF	1nF	0.5%+5d	100Hz/120Hz	20.000H	1mH	0.5%+5d
100Hz/120Hz	2.0000MΩ	0.1kΩ	1.0%+5d	100Hz/120Hz	200.00uF	0.01uF	1.0%+5d	100Hz/120Hz	200.00H	0.01H	1.0%+5d
100Hz/120Hz	20.000MΩ	1kΩ	1.0%+5d	100Hz/120Hz	2000.0uF	0.1uF	2.0%+5d	100Hz/120Hz	2000.0H	0.1H	1.0%+5d
100Hz/120Hz	200.00MΩ	0.1MΩ	2.0%+5d	100Hz/120Hz	20.00mF	0.1mF	2.0%+5d	100Hz/120Hz	20.000kH	1H	2.0%+5d
1kHz	20.000Ω	0.001Ω	1.0%+5d	1kHz	2000.0pF	0.1pF	1.0%+5d	1kHz	2000.0uH	0.1uH	1.0%+5d
1kHz	200.00Ω	0.01Ω	0.3%+5d	1kHz	20.000nF	1pF	1.0%+5d	1kHz	20.000mH	1uH	0.5%+5d
1kHz	2.0000KΩ	0.1Ω	0.3%+5d	1kHz	200.00nF	0.01nF	0.5%+5d	1kHz	200.00mH	0.01mH	0.5%+5d
1kHz	20.000KΩ	1Ω	0.3%+5d	1kHz	2000.0nF	0.1nF	0.5%+5d	1kHz	2000.0mH	0.1mH	1.0%+5d
1kHz	200.00KΩ	0.01kΩ	0.5%+5d	1kHz	20.000uF	1nF	0.5%+5d	1kHz	20.000H	1mH	1.0%+5d
1kHz	2.0000MΩ	0.1kΩ	1.0%+5d	1kHz	200.00uF	0.01uF	1.0%+5d	1kHz	200.00H	0.01H	2.0%+5d
1kHz	20.000MΩ	1kΩ	2.0%+5d	1kHz	2000.0uF	0.1uF	1.0%+5d	1kHz	2000.0H	0.1H	5.0%+5d
1kHz	200.0MΩ	0.1MΩ	5.0%+5d	10kHz	200.00 pF	0.01pF	1.0%+5d	10kHz	200.00 uH	0.01uH	1.0%+5d
10kHz	20.000Ω	0.001Ω	1.0%+5d	10kHz	2000.0pF	0.1pF	1.0%+5d	10kHz	2000.0uH	0.1uH	0.5%+5d
10kHz	200.00Ω	0.01Ω	0.5%+5d	10kHz	20.000nF	1pF	1.0%+5d	10kHz	20.000mH	1uH	0.5%+5d
10kHz	2.0000KΩ	0.1Ω	0.3%+5d	10kHz	200.00nF	0.01nF	1.5%+5d	10kHz	200.00mH	0.01mH	1.5%+5d
10kHz	20.000KΩ	1Ω	0.5%+5d	10kHz	2000.0nF	0.1nF	2.0%+5d	10kHz	2000.0mH	0.1mH	2.0%+5d
10kHz	200.00KΩ	0.01kΩ	1.0%+5d	100kHz	200.00 pF	0.01pF	2.0%+5d	10kHz	20.000H	0.001H	5.0%+5d
100kHz	20.000Ω	0.001Ω	1.0%+5d	100kHz	2000.0pF	0.1pF	1.0%+5d	100kHz	20.000uH	0.001uH	1.0%+5d
100kHz	200.00Ω	0.01Ω	1.0%+5d	100kHz	20.000nF	1pF	2.0%+5d	100kHz	200.00uH	0.01uH	2.0%+5d
100kHz	2.0000KΩ	0.1Ω	1.0%+5d	100kHz	200.00nF	0.01nF	5.0%+5d	100kHz	2000.0uH	0.1uH	2.0%+5d
100kHz	20.000KΩ	1Ω	2.0%+5d					100kHz	20.000mH	1uH	2.0%+5d
								100kHz	200.00mH	0.01mH	5.0%+5d

پیوست ۳- تأییدیه کالیبراسیون حسگر TAN DELTA

**Oil Quality Sensor (OQSx)
Calibration Certificate**

TANDELTA

Product Code: OQSx-1-AA-02-5

Calibration Details

Serial Number: 1003799
Oil Type: Shell Helix 15W40

Calibrated By: R. Davison
Calibration Date: 28/02/2017
Calibrated at Tan Delta Systems Ltd, UK

Calibration
Zero Calibration Fluid -0.2% to +0.2% @ +30°C (+86°F)
Span Calibration Fluid +19.8% to +20.2% @ +30°C (+86°F)

Calibration Voltage
Current Loop (Zero) 7.96mA to 8.04mA @ +30°C (+86°F)
Current Loop (Span) 11.96mA to 12.04mA @ +30°C (+86°F)

Tan Delta hereby certifies that the stated product has been tested using Tan Delta Equipment and that the instrument complies with the manufacturer's specifications.


Mr Shaun Stancliffe, Operations Manager, dated 21st September 2015.

Tan Delta Systems Ltd AMP Technology Centre Brunel Way Rotherham S60 5WG UK
T: +44 (0) 845 094 8710 E: info@tandeltasystems.com W: www.tandeltasystems.com

پیوست ۴- محدوده‌های خروجی حسگر TANDLEA

Oil Quality Description	Loss Factor	
	min	max
Maximum		≥ 33.75
Severe	32.50	33.74
	31.25	32.49
	30.00	31.24
Significant	28.75	29.99
	27.50	28.74
	26.25	27.49
	25.00	26.24
Moderate	22.50	24.99
	20.00	22.49
	17.50	19.99
	15.00	17.49
Mild	12.50	14.99
	10.00	12.49
	7.50	9.99
	5.00	7.49
Good	2.50	4.99
	0.00	2.49
	-2.50	-0.01
	-5.00	-2.51
Low	-7.50	-5.01
	-10.00	-7.51
Error/In Air	-12.50	-10.01
	-15.00	-12.51
	-17.50	-15.01
	-20.00	-17.51
Fault	≤ 20.00	

- [١] J. Poley, "The metamorphosis of oil analysis," in Machinery Failure Prevention Technology (MFPT) Conference, Condition Based Maintenance Section 1, Conference Proceedings, Dayton, Ohio, 2012.
- [٢] D. M. Pirro, M. Webster, and E. Daschner, Lubrication Fundamentals, Revised and Expanded: CRC Press, 2016.
- [٣] toromontcat co. [Online]. Available: www.toromontcat.com/pdf/OilEngine.pdf
- [٤] D. Kopeliovich, "Geometry and dimensional tolerances of engine bearings," Engine professional, AERA, pp. 70-76, 2011.
- [٥] J. Zhu, D. He, and E. Bechhoefer, "Survey of lubrication oil condition monitoring, diagnostics, and prognostics techniques and systems," Journal of Chemical Science and Technology, vol. 2, pp. 100-115, 2013.
- [٦] Kittiwake co, "Monitoring Water in Lubricant Oil - maintain Equipment & Reduce Downtime, Critical Things to Monitor, Water in Lube Oil," 2011.
- [٧] J. J. Benner, F. Sadeghi, M. R. Hoepflich, and M. C. Frank, "Lubricating properties of water in oil emulsions," Journal of tribology, vol. 128, pp. ٢٠٠٦, ٣١١-٢٩٦ .
- [٨] J. Kuntner, R. Chabicovsky, and B. Jakoby, "Oil condition monitoring using a thermal conductivity sensor," in Proc. GMe Forum (Vienna, USA), 2005, pp. 203-209.
- [٩] B. Jakoby and M. J. Vellekoop, "Physical sensors for water-in-oil emulsions," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 110, pp. 28-32, 2004.
- [١٠] S. Korneev, V. Dudkin, and A. Kolunin, "Water contamination and colloidal stability of motor oils," Chemistry and technology of fuels and oils, vol. 42, pp. 273-275, 2006.
- [١١] J. Turner and L. Austin, "Electrical techniques for monitoring the condition of lubrication oil," Measurement science and technology, vol. 14, p. 1794, 2003.
- [١٢] M. Diaby, M. Sablier, A. Le Negrate, and M. El Fassi, "Kinetic study of the thermo-oxidative degradation of squalane (C30H62) Modeling the base oil of engine lubricants," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 132, p. 032805, 2010.
- [١٣] M. Diaby, M. Sablier, A. Le Negrate, M. El Fassi, and J. Bocquet, "Understanding carbonaceous deposit formation resulting from engine oil degradation," Carbon, vol. 47, pp. 355-366, 2009.

- [14] D. Mann, "Motor oils and engine lubrication," Motor Oil Engineers, LLC, Detroit, p. 832, 2007.
- [15] B. Sharma and O. Gandhi, "Performance evaluation and analysis of lubricating oil using parameter profile approach," *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 60, pp. 131-137, 2008.
- [16] TOTAL company. Available: <http://www.lubricants.total.com/news/fuel-dilution-of-engine-oil-causes-and-effects.html>
- [17] Kittiwake co. Available: <http://www.kittiwake.com>
- [18] J. Schmitgal and S. Moyer, "Evaluation of sensors for on-board diesel oil condition monitoring of US Army ground equipment," SAE Technical Paper 0148-7191, 2005.
- [19] P. E. Frere and S. W. Emmert, "An On-Line Oil Viscosity Sensor," SAE Technical Paper 0148-7191, 1997.
- [20] BHRA, "Condition Monitoring Supplement," Cranfield, Bedfordshire: BHRA1988.
- [21] O. Levi and N. Eliaz, "Failure analysis and condition monitoring of an open-loop oil system using ferrography," *Tribology Letters*, vol. 36, pp. 17-29, 2009.
- [22] S. S. Wang, "Engine oil condition sensor: method for establishing correlation with total acid number," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 86, pp. 122-126, 2002.
- [23] J. D. Halderman *Automotive Technology*. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [24] A. Agoston, C. Ötsch, and B. Jakoby, "Viscosity sensors for engine oil condition monitoring Application and interpretation of results," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 121, pp. 327-332, 2005.
- [25] S. Kumar, P. Mukherjee, and N. Mishra, "Online condition monitoring of engine oil," *Industrial lubrication and tribology*, vol. 57, pp. 260-267, 2005.
- [26] A. Agoston, C. Schneidhofer, N. Dörr, and B. Jakoby, "A concept of an infrared sensor system for oil condition monitoring," *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 125, pp. 71-75, 2008.
- [27] S.-I. Moon, K.-K. Paek, Y.-H. Lee, J.-K. Kim, S.-W. Kim, and B.-K. Ju, "Multiwall carbon nanotube sensor for monitoring engine oil degradation," *Electrochemical and solid-state letters*, vol. 9, pp. H78-H80, 2006.
- [28] A. Basu, A. Berndorfer, C. Buelna, J. Campbell, K. Ismail, Y. Lin, et al., "'Smart sensing' of Oil Degradation and Oil Level Measurements in Gasoline Engines," SAE Technical Paper 0148-7191, 20. . .

- [٢٩] H.-S. Lee, S. S. Wang, D. J. Smolenski, M. B. Viola, and E. E. Klusendorf, "In situ monitoring of high-temperature degraded engine oil condition with microsensors," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 20, pp. 49-54, 1994.
- [٣٠] J. Hedges, P. Voelker, R. McCoy, and C. Ladd, "An in-line method for measuring oxidation in gear oils and hydraulic fluids," *Tribology transactions*, vol. 49, pp. 215-217, 2006.
- [٣١] S. Raadnui and S. Kleesuwan, "Low-cost condition monitoring sensor for used oil analysis ", *Wear*, vol. 259, pp. 1502-1506, 2005.
- [٣٢] J. Cho and S. Park, "Capacitive sensor for automotive engine oil degradation using wireless network," in *Advanced Packaging Materials: Microtech, 2010. APM'10. International Symposium on*, 2010, pp. 88-91.
- [٣٣] L. Guan, X. Feng, G. Xiong, and J. Xie, "Application of dielectric spectroscopy for engine lubricating oil degradation monitoring," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 168, pp. 22-29, 2011.
- [٣٤] J. R. Macdonald, "Impedance spectroscopy," *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 20, pp. 289-305, May 01 1992.
- [٣٥] C. Byington, C. Palmer, G. Argenna, and N. Mackos, "An integrated, real-time oil quality monitor and debris measurement capability for drive train and engine systems," in *Proceedings*, 2010, pp. ١٣-١١ .
- [٣٦] C. S. Byington, N. A. Mackos, G. Argenna, A. Palladino, J. Reimann, and J. Schmitigal, "Application of symbolic regression to electrochemical impedance spectroscopy data for lubricating oil health evaluation," *ARMY TANK AUTOMOTIVE RESEARCH DEVELOPMENT AND ENGINEERING CENTER WARREN MI2012*.
- [٣٧] poseidonsys co. Available: <https://www.poseidonsys.com>
- [٣٨] C. J. Collister, "Electrical measurement of oil quality," U.S. Patent 6,459,995., 2002.
- [٣٩] TANDELTA. Available: <http://www.tandeltasystems.com>
- [٤٠] E. L. Hopkins and L. K. Irwin, "Instrument for capacitively testing the condition of lubricating oil," ed: U.S. Patent No. 3,182,255., 1965.
- [٤١] E. L. Hopkins and J. L. Wedel, "Fluid condition monitoring system," ed: U.S. Patent No. 4,064,455., 1977.
- [٤٢] A. H. Meitzler and G. S. Saloka, "Method and apparatus for sensing the condition of lubricating oil in an internal combustion engine," ed: U.S. Patent No. 4,733,556., 1988.
- [٤٣] G. Schmitz and B. Reggelin, "Method of analyzing the alcohol content and/or the calorific value of fuels," ed: U.S. Patent No. 5,134,381., 1992.

- [۴۴] P. T. Cox, "Dielectric cross-plot water cut monitoring apparatus and method," ed: U.S. Patent No. 5,272,444., 1993.
- [۴۵] N. P. Suh, F. A. Waldman, R. E. Von Turkovich, D .M. Chin, and T. H. Lee, "Moisture measurement device," ed: U.S. Patent No. 4,932,243., 1990.
- [۴۶] F. K. Preikschat, "Electrical impedance measuring apparatus for providing separate measurements of the conductivity and dielectric coefficient of various materials," ed: U.S. Patent No. 4,181,881., 1980.
- [۴۷] J. Zhu, "Online industrial lubrication oil health condition monitoring, diagnosis and prognostics," University of Illinois at Chicago, 2013.
- [۴۸] MIT university. [Online]. Available:
web.mit.edu/viz/EM/visualizations/coursenotes/modules/guide05
- [۴۹] International Electrotechnical Commission. [Online]. Available:
<http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=121-11-03>
- [۵۰] K. Okada and T. Sekino, "Impedance Measurement Handbook; Agilent Technologies: Santa Clara, CA, USA," ed.
- [۵۱] Available: www.behranoil.com/fa/product/2219. بهران-سوپر-پیشتانز.html
- [۵۲] A. T. Pérez and M. Hadfield, "Low-cost oil quality sensor based on changes in complex permittivity," Sensors, vol. 11, pp. 10675-10690, 2011

Abstract

Checking the instantaneous state carry out for the internal combustion engine oil to ensure the lubricant's protective function and engine health. The purpose of present study is design and manufacturing capacitive sensor for online oil quality monitoring sensor. Noise factors such as temperature, pressure and oil discharge were investigated on sensor performance. The effects of various oil deterioration factors such as water pollution, fuel contamination and oxidation on the sensor outputs in the hydraulic circuit were online. In addition, the sensor was evaluated in real operating conditions in both investigated Inside the circuit online and offline durability tests.

The geometry of the electrodes of this capacitive sensor is designed to increase its capacitive capacitance, which by increase of capacitive capacitance the oil changes measuring more precise manner and the presence of bubbles in the oil not affecting in the measurement. The oil passes through this capacitive sensor, which allows online monitoring of the oil pressure difference between the input and output, and, in the case of oil discharge control, oil viscosity can be monitored. The advantages of this design are better oil flow, lack of deposition within the sensor and consequently increased accuracy in detecting oil defects and detecting gasoline contamination in the oil. Sensor outputs, capacitive capacitance, theta angle (the ratio between the imaginary part and the actual part of permittivity), the difference in pressure between the two sides sensor and the oil temperature, that the different causes of oil degradation have different effects on each one. The results of the tests indicate that the sensor is capable of detecting various oil defects such as water pollution, fuel pollution, and oxidation, so that a specific range of sensor outputs for oil health can be determined. The low cost of production and the simple and online processing of sensor data output and high accuracy are the oil quality sensor features.

Keywords: Online Condition Monitoring, Oil Quality, Oil Sensor, Dielectric Constant, Spark Ignition Engine Oil



Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc Thesis in Manufacturing and Production Engineering

**Design and Construction of Online Oil Condition Monitoring
Laboratory Sensor for Spark Ignition Engine Using Dielectric
Constant Measurement Method**

**by:
Esmail Qasemi**

**Supervisor:
Dr. Seyed Vahid Hosseini**

January 2018