

الله الرحمن الرحيم



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید

# طراحی و ساخت حسگر صنعتی داخل مدار پایش برخط کیفیت روغن با استفاده از روش خازنی

نگارنده:

عباس ضیائی

استاد راهنما:

دکتر سید وحید حسینی

مهر ۱۳۹۹

شماره: ۲۲/۱۹۹/۲۰  
تاریخ: ۱۹/۸/۹۹

باسمه تعالی



### فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای عباس ضیائی با شماره دانشجویی ۹۶۰۹۹۲۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید تحت عنوان طراحی و ساخت حسگر صنعتی داخل مدار پایش برخط کیفیت روغن با استفاده از روش خازنی که در تاریخ ۹۹/۰۷/۲۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

<input checked="" type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹	<input type="checkbox"/> ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۸
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹-۱۶	<input type="checkbox"/> د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹-۱۴
<input type="checkbox"/> ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
<input type="checkbox"/> نظری	<input checked="" type="checkbox"/> عملی

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	دکتر سید وحید حسینی	۱- استاد راهنمای اول
	استادیار	دکتر مصطفی نظری	۲- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر ناصرالدین سپهری	۳- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر هادی پروز	۴- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

۹۹/۸/۱۹



# تقدیم اثر

تقدیم به محضر ملکوتی قطب عالم امکان امام عصر (عج)، روحی و ارواحنا له الفداء

ہمو کہ باظہورش جہان را پر از قسط و عدل خواهد کرد.

تقدیم به پدر عزیزم و مادر مہربانم

کہ بخط عمشان را صرف رشد و بالندگی این فرزند سراپا تقصیر کردند.

# شکر و قدردانی

بادهما! حمد و سپاس تو راست که کنجینه علم و معرفت (قرآن کریم) را مقابل دیدگانم گشودی تا با سیر و تدبیر در آن به

سرپرستی علم و معرفت رهنمود کردم. به ثمر رسیدن این تحقیق حاصل لطف خداوند متعال، صبر و دعای خیر پدر و مادرم

و مساعدت استاد کرامت‌مندی جناب آقای دکتر سید وحید حسینی که استاد راهنمای این پایان نامه هستند، می باشد که در طول

تحصیل بی دریغ از دریای ژرف علم و اخلاقشان به من آموختند. از حمایت های شرکت دیناموتور برای در اختیار قرار دادن

تجهیزات و مساعدت های تحقیقاتی و مالی کمال شکر و قدردانی را دارم. هم چنین از کلیه دوستان عزیزم که در طول تحصیل

همواره مشوق من بوده اند نهایت شکر را دارم و برای آن ها آرزوی موفقیت در تمام عرصه ها را دارم.

# تعمیرنامه

اینجانب عباس ضیائی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه (( طراحی و ساخت حسگر صنعتی داخل مدار پایش برخط کیفیت روغن با استفاده از روش خازنی )) تحت راهنمایی دکتر سید وحید حسینی متعهد می‌شوم.

- 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 بوده اند 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 ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها 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

پایش وضعیت روغن از جمله روش‌های نوین نگهداری و تعمیرات موتورهای درونسوز می‌باشد. در سالیان اخیر با توسعه فناوری، حسگرهای برخط شناسایی مشخصه‌های روغن و یا کیفیت آن جای آنالیزهای متداول روغن به صورت برون خط را گرفته‌اند. در این میان حسگر برخط کیفیت روغن امکان استفاده بهینه از روغن، تشخیص به موقع خرابی و هم‌چنین جلوگیری از خرابی توسعه یافته را به کاربر می‌دهد که در این پایان‌نامه طراحی و ساخته شده است.

عملکرد حسگر برخط کیفیت روغن ارائه شده، براساس تغییرات ظرفیت خازنی و بهره گرفتن از روغن به عنوان دی الکتریک آن می‌باشد. پس از ساخت نمونه اولیه (طرح مفهومی)، عوامل مؤثر در ایجاد خطا در ظرفیت خازنی حسگر شناسایی شد. هم‌چنین به منظور رسیدن به عملکرد بهینه حسگر، از روش المان محدود جهت شبیه‌سازی عملکرد حسگر به همراه روش‌های طراحی آزمایشات استفاده شده است. حسگر مورد نظر پس از ساخت، به صورت برخط و برون خط مورد آزمایش قرار گرفت. براساس نتایج آزمون‌های برون خط مشخص شد که وجود بُرد حسگر همراه با موقعیت ثابت و نزدیک به حسگر ضروری است و در نتایج تأثیرگذار می‌باشد. قابلیت عملکرد حسگر به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که بتواند در موتورهای بنزینی تا دمای روغن ۱۵۰ درجه سانتیگراد کارآیی مناسب را داشته باشد. نتایج آزمون‌های برخط نشان داد که تنها دمای روغن می‌تواند خروجی حسگر را تا ۳/۳ درصد تحت تأثیر قرار دهد که به دلیل تجدیدپذیر بودن با استفاده از ضریب تصحیح دمایی این میزان خطا تا ۰/۳ درصد کاهش یافت. هم‌چنین حسگر مورد نظر قابلیت شناسایی آلودگی آب ۰/۰۲ درصد حجمی را دارد و نسبت به نمونه حسگر صنعتی مشابه عملکرد قابل قبولی دارد. نتایج حاکی از عملکرد خوب حسگر در تشخیص به موقع خرابی روغن می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** حسگر برخط، پایش وضعیت، کیفیت روغن، دمای روغن، ظرفیت خازن

# میش گفتار

روانکاری به عنوان تسهیل حرکت نسبی سطوح در تماس با یکدیگر توسط لایه روانکار تعریف می‌شود. مهمترین وظیفه هر روانکار کاهش اصطکاک و به حداقل رساندن سایش در اجزای مختلف ماشین است. تشکیل فیلم روانکار با ضخامت مناسب بین سطوح قطعاتی که در تماس با هم، حرکت نسبی دارند این مهم را تحقق می‌بخشد. روانکاری مناسب در یک ماشین وابسته به عواملی چون طراحی سیستم روانکاری، انتخاب صحیح نوع روانکار برای کاربرد مورد نظر و البته وضعیت کیفی روانکار مورد استفاده در طول زمان بهره‌وری از آن است. شرایط مناسب روانکاری در موتور محصول وضعیت مناسب مشخصه-های سیالی روغن موتور در جدا کردن سطوح، انتقال توان و جلوگیری از اتلاف انرژی از یک طرف و مشخصه‌های شیمیایی روغن جهت جلوگیری از سایش و خوردگی قطعات از طرف دیگر می‌باشد. خرابی و فرسودگی روغن روانکار با بررسی تغییرات مشخصه‌های کیفی روغن در طول کارکرد آن قابل ارزیابی است. از مهمترین این مشخصه‌ها گرانی، نقطه اشتعال، میزان مواد افزودنی، میزان اکسیداسیون، میزان مواد آلاینده مانند آب و سوخت می‌باشد.

# لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- ضیائی، ع؛ حسینی، س. و؛ قادری، س. ه؛ شبیه سازی ترمومکانیکی حسگر پایش آنلایین کیفیت روغن در شرایط کارکرد موتور- دومین همایش ملی موتورهای درونسوز، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بهمن ۹۷

۲- کسب مقام سوم در نخستین رویداد حمایت از پایان نامه های کاربردی، پارک علم و فناوری استان سمنان، بهمن ماه ۹۸

۳- ضیائی، ع؛ حسینی، س. و؛ تحلیل ترمومکانیکی حسگر پایش برخط کیفیت روغن بهینه شده در شرایط کارکرد موتور- مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه ها و شاره ها، در دست اقدام می باشد.

۴- ارسال اظهارنامه اختراع حسگر با عنوان حسگر برخط پایش کیفیت روغن خارج از مدار؛ در دست اقدام می باشد.

# فهرست مطالب

۵	فهرست جداول
ز	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	فصل ۱ مقدمه.....
۲	۱-۱- مقدمه‌ای بر روانکاری.....
۳	۱-۲- طرح مسأله.....
۵	۱-۳- اهداف پایش وضعیت.....
۶	۱-۴- انواع روش‌های پایش وضعیت.....
۸	۱-۴-۱- پایش وضعیت به شیوه آنالیز روغن.....
۱۰	۱-۴-۲- اهداف آنالیز روغن.....
۱۱	۱-۵- مکانیزم فرسودگی روغن موتور.....
۱۳	۱-۶- آلودگی‌ها.....
۱۳	۱-۶-۱- آلودگی آب.....
۱۳	۱-۶-۲- سوخت.....
۱۴	۱-۶-۳- گرد و غبار (سیلیس).....
۱۴	۱-۶-۴- فلزات سایشی.....
۱۵	۱-۷- معضل وجود روغن‌های با کیفیت پایین یا روغن‌های غیر استاندارد.....
۱۶	۱-۸- هدف از انجام تحقیق.....

## فصل ۲: پیشینه تحقیق

۱۷

فصل ۲ پیشینه تحقیق ..... ۱۸

۱-۲- مقدمه ..... ۱۸

۲-۲- سیر تحولی پایش وضعیت روغن ..... ۱۸

۲-۳- اهمیت پایش وضعیت در تحقیقات گذشته ..... ۲۴

۲-۴- حسگرها و سیستم‌های پایش وضعیت روغن ..... ۲۴

۲-۵- حسگرهای خازنی ..... ۳۱

## فصل ۳: طراحی حسگر خازنی

۳۷

فصل ۳ طراحی حسگر خازنی ..... ۳۸

۱-۳- مقدمه ..... ۳۸

۲-۳- اصول کارکرد حسگر خازنی ..... ۳۸

۳-۳- تئوری ساخت حسگر خازنی ..... ۴۲

۳-۴- طرح‌های اولیه ساخت حسگر ..... ۴۲

۳-۵- طرح نهایی جهت ساخت حسگر ..... ۴۶

۳-۶- شبیه‌سازی المان محدود عوامل ایجاد خطا ..... ۴۷

۳-۶-۱- بررسی اثر دما و فشار بر ظرفیت خازنی حسگر با استفاده از طراحی آزمایشات ..... ۵۰

۳-۷- شبیه‌سازی جریان سیال درون حسگر ..... ۵۱

۳-۷-۱- بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در سرعت جریان سیال ..... ۵۲

۳-۷-۲- تحلیل سرعت جریان سیال توسط نرم‌افزار ..... ۵۴

۳-۸- فرآیند ساخت حسگر ..... ۵۷

۳-۸-۱- مکانیک حسگر ..... ۵۷

۵۹.....۳-۸-۲- الکترونیک حسگر

## فصل ۴: طراحی آزمون‌ها ۶۵

۶۶..... فصل ۴ آزمون‌های حسگر کیفیت روغن

۶۶..... ۴-۱- آزمون‌های بدون بُرد حسگر برای شناسایی محدوده تغییرات

۶۷..... ۴-۱-۱- اندازه‌گیری ظرفیت خازنی نمونه‌های اولیه حسگر

۶۷..... ۴-۲- دستگاه اندازه‌گیری ظرفیت خازنی حسگر

۶۸..... ۴-۳- آزمون‌های برون‌خط برای محاسبه ظرفیت خازنی حسگر

۶۹..... ۴-۴- حسگر تن‌دلتا

۷۰..... ۴-۵- آزمون‌های برون‌خط صحنه‌گذاری عملکرد حسگر ظرفیت خازنی

۷۴..... ۴-۶- بررسی عملکرد و حساسیت حسگر ظرفیت خازنی نصب‌شده در مدار روغن

۷۴..... ۴-۶-۱- مدار روغن مورد استفاده در آزمون برخط

۷۸..... ۴-۶-۲- بررسی رفتار مکانیکی و آب‌بندی حسگر در شرایط کارکرد موتور

۷۹..... ۴-۶-۳- اثر فرکانس تحریک در اندازه‌گیری ظرفیت خازن

۸۰..... ۴-۶-۴- بررسی اثر سیم‌های رابط

۸۰..... ۴-۶-۵- تأثیر حباب‌های موجود در روغن

۸۱..... ۴-۶-۶- تأثیر زاویه قرارگیری حسگر در مدار روغن

۸۲..... ۴-۷- بررسی حساسیت حسگر به پارامترهای مختلف روغن

۸۲..... ۴-۷-۱- فشار روغن

۸۲..... ۴-۷-۲- دمای روغن

۸۳..... ۴-۷-۳- دبی روغن

۸۴..... ۴-۸- بررسی اثر تغییرات دی‌الکتریک روغن تحت تأثیر افزایش دمای روغن

- فصل ۵ فصل پنجم بررسی نتایج ..... ۸۶
- ۵-۱- بررسی نتایج طرح‌های اولیه حسگر ..... ۸۶
- ۵-۲- نتایج شبیه‌سازی عوامل خطا ..... ۸۸
- ۵-۲-۱- نتایج طراحی آزمایشات برای شبیه‌سازی المان محدود بدنه حسگر ..... ۹۰
- ۵-۳- نتایج شبیه‌سازی جریان سیال درون حسگر ..... ۹۳
- ۵-۳-۱- نتایج طراحی بهین ابعاد حسگر جهت جریان مطلوب سیال ..... ۹۵
- ۵-۴- نتایج آزمایش‌های برون‌خط حسگر خازنی کیفیت روغن ..... ۹۷
- ۵-۴-۱- تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و LF در طول کارکرد روغن در آزمون تأثیر روغن بر میزان سایش میل بادامک ..... ۹۸
- ۵-۴-۲- تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و LF در طول کارکرد روغن در آزمون رسوبات روغن ..... ۱۰۳
- ۵-۵- نتایج بررسی برخط حسگر کیفیت روغن در مدار روغن ..... ۱۰۶
- ۵-۵-۱- نتایج بدست آمده از رفتار مکانیکی حسگر و آب‌بندی قطعات در شرایط دمایی و فشاری کارکرد موتور ..... ۱۰۷
- ۵-۵-۲- نتایج بررسی اثر فرکانس تحریک در ظرفیت خازنی حسگر ..... ۱۰۹
- ۵-۵-۳- مطالعه تغییر دبی روغن بر نتایج حسگر کیفیت روغن ..... ۱۱۰
- ۵-۵-۴- مطالعه تأثیر تغییر فشار روغن عبوری بر عملکرد حسگر کیفیت روغن ..... ۱۱۱
- ۵-۵-۵- نتایج اثر دما بر ظرفیت خازنی حسگر و LF حسگر تن‌دلتا ..... ۱۱۲
- ۵-۵-۶- محاسبه ضریب تصحیح دمایی حسگر ظرفیت خازنی ..... ۱۱۴
- ۵-۵-۷- بررسی اثر دما بر ظرفیت خازنی حسگر در آزمون گذرا ..... ۱۱۹
- ۵-۵-۸- آزمون دوام حسگر در دمای ۱۴۰ درجه سانتیگراد روغن ..... ۱۲۰

۵-۵-۹ - آزمون بررسی سرعت پاسخ حسگر ..... ۱۲۱

۵-۶ - بررسی عملکرد حسگر در تشخیص آلودگی روغن موتور توسط آب ..... ۱۲۲

۱۲۵ **فصل ۶: جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادها**

فصل ۶ نتیجه گیری و پیشنهادها ..... ۱۲۶

۶-۱ - جمع بندی و نتیجه گیری ..... ۱۲۶

۶-۲ - پیشنهادها ..... ۱۲۹

۱۳۱ **پیوست ها**

۱۴۰ **مراجع**

# فهرست جداول

- جدول ۱-۱. طبقه بندی روش‌های مختلف پایش وضعیت [۱۵] ..... ۷
- جدول ۱-۲. تشریح وضعیت هفتگانه موتور ..... ۲۲
- جدول ۱-۳. ثوابت دی الکتریک مواد مختلف ..... ۴۱
- جدول ۲-۳. ظرفیت خازنی براساس طول و قطر استوانه‌ها ..... ۴۵
- جدول ۳-۳. مشخصات فیزیکی اجزای حسگر برخط کیفیت روغن ..... ۴۸
- جدول ۴-۳. محدوده تغییرات پارامترها در طراحی آزمایش‌ها [۶۳] ..... ۵۱
- جدول ۵-۳. متغیرهای طراحی در مسئله بهینه‌سازی ..... ۵۲
- جدول ۶-۳. پارامترهای بهینه شده براساس قید  $h$  ..... ۵۴
- جدول ۱-۴. مشخصات چند نمونه روغن مورد استفاده در موتور در آزمون‌های دوام ..... ۷۴
- جدول ۲-۴. محدوده تغییرات پارامترهای دما و فشار برای بررسی رفتار مکانیکی و آب‌بندی حسگر ..... ۷۹
- جدول ۱-۵. نتایج آزمایش نمونه‌های اولیه حسگر خازنی ساخته شده با روغن‌های با سابقه نامشخص ..... ۸۶
- جدول ۲-۵. مقایسه نتایج محاسباتی و آزمایشگاهی نمونه اولیه حسگر ..... ۸۹
- جدول ۳-۵. نتایج تجربی با استفاده از طراحی آزمایش ..... ۹۱
- جدول ۴-۵. تحلیل واریانس برای نسبت ظرفیت خازن ..... ۹۲

- جدول ۵-۵. نتایج روش طراحی آزمایش‌ها برای تحلیل ابعادی حسگر ..... ۹۶
- جدول ۵-۶. پارامترهای بهینه شده جهت تولید حسگر ..... ۹۶
- جدول ۵-۷. میزان تغییرات خروجی حسگرها در آزمون‌های برون خط ..... ۱۰۵
- جدول ۵-۸. اثر فرکانس تحریک برای چند نمونه روغن با سابقه نامشخص ..... ۱۰۹
- جدول ۵-۹. میزان آب اضافه شده به مخزن روغن در هر مرحله از زمان کارکرد مدار ..... ۱۲۳
- جدول ۶-۱. مشخصات کلی حسگر کیفیت روغن ..... ۱۲۸
- جدول ۶-۲. تعیین کیفیت روغن براساس درصد خرابی روغن ..... ۱۲۹

# فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. شماتیک انواع روش‌های تجزیه و تحلیل روغن [۱۵] ..... ۹
- شکل ۱-۲. روند فرسودگی روغن [۱۶] ..... ۱۲
- شکل ۱-۳. مثلث کیفی روغن [۲۷] ..... ۱۵
- شکل ۱-۲. شکل شماتیک حسگر وضعیت روغن ساخت شرکت Delphi [۳۲] ..... ۲۰
- شکل ۲-۲. نمودار وضعیت هفتگانه موتور [۳۶] ..... ۲۲
- شکل ۲-۳. چند نمونه از تصاویر ذرات سایشی بدست آمده از فروگرافی [۴۰] ..... ۲۶
- شکل ۲-۴. تصویر نوری از سایش روی بدنه سیلندر [۴۳] ..... ۲۸
- شکل ۲-۵. ساختار الگوریتم کمکی حسگر جهت پایش کیفیت روغن [۴۴] ..... ۲۹
- شکل ۲-۶. طراحی حسگر فیلم داغ [۴۶] ..... ۳۰
- شکل ۳-۱. الگوریتم طراحی و ساخت و صحنه گذاری عملکرد حسگر ..... ۳۹
- شکل ۳-۲. شماتیک خازن استوانه‌ای ..... ۴۰
- شکل ۳-۳. شماتیک برش خورده طرح اولیه حسگر ظرفیت خازنی ..... ۴۳
- شکل ۳-۴. شماتیک برش خورده طرح ثانویه حسگر ظرفیت خازنی ..... ۴۴
- شکل ۳-۵. نمونه اولیه ساخته شده از طرح ثانویه حسگر خازنی ..... ۴۵
- شکل ۳-۶. شماتیک برش خورده طرح تصحیح شده حسگر ظرفیت خازنی ..... ۴۶
- شکل ۳-۷. المان بندی یک چهارم قطعات حسگر در نرم افزار المان محدود با شرایط مرزی ..... ۴۸
- شکل ۳-۸. نحوه تقسیم بندی المان‌های متقابل روی سطوح استوانه‌ای ..... ۵۰

- شکل ۳-۹. نمایش پارامتر  $h$  در شماتیک برش خورده طرح حسگر ..... ۵۳
- شکل ۳-۱۰. شماتیک برش خورده طرح تحلیلی حسگر در نرم افزار انسیس ..... ۵۵
- شکل ۳-۱۱. شبکه بندی بخش ها توسط نرم افزار انسیس ..... ۵۶
- شکل ۳-۱۲. طرحواره برش خورده طرح نهایی حسگر جهت فرآیند ساخت ..... ۵۸
- شکل ۳-۱۳. طرح انفجاری قطعات مکانیکی حسگر ..... ۵۹
- شکل ۳-۱۴. بُرد خوانش ظرفیت خازنی حسگر تعبیه شده درون درپوش نگهدارنده ..... ۶۰
- شکل ۳-۱۵. حسگر دمای PT100 ..... ۶۱
- شکل ۳-۱۶. نمایی از کیت نمایش اطلاعات به همراه سیم‌های رابط ..... ۶۱
- شکل ۳-۱۷. حسگر ظرفیت خازنی پس از سرهم‌بندی نهایی ..... ۶۲
- شکل ۳-۱۸. نحوه اتصال حسگر ظرفیت خازنی به برد نمایش اطلاعات حسگر ..... ۶۳
- شکل ۴-۱. دستگاه اندازه‌گیری ظرفیت خازنی MS 5308 LCR TESTER ..... ۶۷
- شکل ۴-۲. نحوه اتصال حسگر به دستگاه اندازه‌گیری ظرفیت خازن ..... ۶۸
- شکل ۴-۳. حسگر کیفیت روغن ساخت شرکت تن‌دلتا انگلستان ..... ۶۹
- شکل ۴-۴. تصویری از اتاق آزمون ..... ۷۰
- شکل ۴-۵. پایش توان کارکرد موتور XU7 در ساعات مختلف آزمون رسوبات روغن ..... ۷۱
- شکل ۴-۶. تاریخچه فشار و دمای روغن در آزمون رسوبات روغن ..... ۷۲
- شکل ۴-۷. نمونه های روغن گرفته شده در آزمون رسوبات روغن در موتور ..... ۷۳
- شکل ۴-۸. شماتیک مدار روغن ..... ۷۵
- شکل ۴-۹. پمپ هیدرولیک مورد استفاده با حداکثر تحمل فشار ۲۰ بار ..... ۷۶
- شکل ۴-۱۰. گرمکن روغن ..... ۷۶

- شکل ۴-۱۱. مدار کنترل دمای روغن ..... ۷۶
- شکل ۴-۱۲. حسگر خازنی کیفیت روغن وصل شده به مدار روغن به صورت برخط ..... ۷۷
- شکل ۴-۱۳. نحوه اتصال حسگر ظرفیت خازنی را به دستگاه LCR Tester ..... ۷۸
- شکل ۴-۱۴. وابستگی ثابت دی الکتریک روغن به دما در فرکانس یک کیلوهرتز [۶۵] ..... ۸۴
- شکل ۵-۱. میزان جابجایی المان‌های حسگر پس از رسیدن به دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد و تحت فشار ۵ بار ..... ۸۹
- شکل ۵-۲. میزان تأثیر هر یک از پارامترها در خروجی ..... ۹۲
- شکل ۵-۳. کانتورهای سرعت جریان حسگر در ناحیه انتهایی آن ..... ۹۴
- شکل ۵-۴. نحوه قرارگیری حسگر در مسیر روغن ..... ۹۵
- شکل ۵-۵. نمایش پارامترهای محاسبه شده در شماتیک برشخورده طرح تحلیلی حسگر ..... ۹۷
- شکل ۵-۶. تغییرات ظرفیت خازنی حسگر بدون بُرد و LF در طول کارکرد موتور XU7 در آزمون سایش میل بادامک ..... ۹۹
- شکل ۵-۷. نتایج مقایسه‌ای حاصل از خروجی‌های حسگر ظرفیت خازنی (بدون کالیبراسیون دما) با حسگر تن‌دلتا در طول کارکرد موتور XU7 در آزمون سایش میل بادامک ..... ۱۰۰
- شکل ۵-۸. تغییرات ظرفیت خازنی حسگر بدون بُرد و LF در طول کارکرد موتور EF7 در آزمون سایش میل بادامک ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۹. تغییرات ظرفیت خازنی حسگر (بدون کالیبراسیون دما) و LF در طول کارکرد موتور EF7 در آزمون سایش میل بادامک ..... ۱۰۲
- شکل ۵-۱۰. تغییرات ظرفیت خازنی حسگر بدون بُرد و LF در طول کارکرد موتور XU7 در آزمون رسوبات روغن ..... ۱۰۳

- شکل ۵-۱۱. تغییرات ظرفیت خازنی حسگر (بدون کالیبراسیون دمایی) و LF در طول کارکرد موتور XU7 در آزمون رسوبات روغن ..... ۱۰۴
- شکل ۵-۱۲. میزان تغییرات خروجی حسگرها در آزمونهای برون خط ..... ۱۰۶
- شکل ۵-۱۳. تصاویر مختلف حسگر پس از اعمال شرایط دمایی و فشاری روغن ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۱۴. تأثیر تغییرات دبی بر روی نتایج خروجی حسگرها ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۵. اثر فشار بر تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و حسگر تن دلتا ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۶. اثر دما بر تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و خروجی های حسگر تن دلتا (روغن با سابقه نامشخص) ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۱۷. نمودار مقایسه‌ای اثر دما بر ظرفیت خازنی حسگر و خروجی حسگر تن دلتا (روغن نو) ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۱۸. نتایج حاصل از بررسی تکرارپذیر بودن رفتار حسگر تحت تأثیر تغییرات دمای روغن ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۱۹. مقایسه حد تغییرات ظرفیت خازنی حسگر پس از اعمال ضریب تصحیح دمایی و خروجی حسگر تن دلتا ..... ۱۱۷
- شکل ۵-۲۰. مقایسه حد تغییرات دمای حسگر pt100 پس از اعمال ضریب تصحیح دما و دمای حسگر تن دلتا ..... ۱۱۸
- شکل ۵-۲۱. عملکرد حسگر پس از اعمال ضریب تصحیح دمایی در آزمون گذرا ..... ۱۱۹
- شکل ۵-۲۲. عملکرد حسگر ظرفیت خازنی در آزمون دوام حسگر در دمای ۱۴۰ درجه سانتیگراد روغن با ضریب تصحیح دمایی ..... ۱۲۱
- شکل ۵-۲۳. نتایج مقایسه‌ای سرعت پاسخ حسگر ظرفیت خازنی و حسگر تن دلتا ..... ۱۲۲

شکل ۵-۲۴. نتایج مقایسه‌ای اثر افزایش آب در روغن توسط حسگر ظرفیت خازنی و حسگر

تن‌دلتا ..... ۱۲۴

## فهرست علائم

واحد	علامت	کمیت
f	C	ظرفیت خازن
c	Q	بار ذخیره شده روی صفحات خازن
v	V	ولتاژ اعمالی به صفحات
m	L	طول خازن
m	a	شعاع استوانه داخلی
m	b	شعاع استوانه خارجی
Pf/m	$\epsilon_0$	گذردهی خلاء
	$\epsilon$	گذردهی مطلق
	$\epsilon_r$	گذردهی نسبی
	K	ثابت دی الکتریک
LF		خروجی حسگر تن دلتا (TANDELTA)
bar	P	فشار روغن
°C	T	دمای روغن

# فصل ۱: مقدمه

## فصل ۱ مقدمه

### ۱-۱- مقدمه‌ای بر روانکاری

سابقه روانکاری<sup>۱</sup> در تجهیزات ساخت دست بشر به دوران پیدایش چرخ برمی‌گردد. هر چند که فناوری روانکاری به شکل پیشرفته با ظهور انقلاب صنعتی و اکتشاف و استخراج گسترده نفت در قرن نوزدهم توسعه یافته و مراحل تکامل را تا به امروز طی کرده است. در روانکاری‌های اولیه، روغن و چربی‌های حیوانی به‌عنوان روانکار برای روانکاری اتصال چرخ و محور ارابه‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفت (حدود سه‌هزار سال پیش) که در سال ۱۸۵۲ میلادی روغن‌های بر پایه نفت وارد بازار شدند. از آن تاریخ تا به امروز کاربرد روغن‌های نفتی جهت روانکاری در صنایع مختلف گسترش یافته و البته کیفیت و کارایی آن‌ها نیز به تدریج افزایش یافته است. اما به هر حال به دلیل شرایط کارکرد روغن‌های روانکار، این روغن‌ها دارای عمر محدود بوده و پس از مدتی به پایان عمر مفید خود رسیده و بایستی تعویض گردند. در دهه ۱۹۲۰ در صنعت خودرو، روغن موتورهای تولیدی حاوی مواد افزودنی نبودند و بایستی پس از ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ مایل کارکرد، تعویض می‌شدند [۱]. به تدریج مواد افزودنی مختلف جهت بهبود کارایی روغن روانکار و افزایش طول عمر مفید آن‌ها، به روغن‌ها اضافه شدند. اما مسأله‌ای که هم‌چنان پراهمیت جلوه می‌کرد، تعیین زمان مناسب تعویض روغن‌ها بود. روغن‌ها طبق پیشنهاد سازنده‌ی آن‌ها در دوره‌های از پیش تعیین‌شده تعویض می‌شدند و از آنجا که عمر روغن به عوامل بسیاری از جمله شرایط کارکرد موتور وابسته است، این بازه‌های از پیش تعیین‌شده نمی‌توانست کارایی مناسب را داشته باشد. بکارگیری بازه‌های زمانی از پیش تعیین‌شده تعویض روانکار به کمک روش‌های تخمین آماری عمر مفید روغن، در بسیاری از موارد موجب به هدر رفتن روغنی می‌شد که هنوز به انتهای عمر مفید خود نرسیده است. در برخی موارد نیز سبب استهلاک قطعات و بروز

---

<sup>۱</sup>Lubrication

عیوب مختلف در موتور که ناشی از کارکرد روغن فرسوده بود، می‌شد. ضمن اینکه این مشکل در کاربردهایی با مصرف روغن بالا و حساسیت کارکرد مانند صنایع هوایی و نیروگاهی بسیار زیان‌بارتر است.

## ۱-۲- طرح مسأله

تعیین زمان مناسب تعویض روانکار در تجهیزات صنعتی به‌ویژه موتورها همواره از چالش‌های عمده در بحث نگهداری تجهیزات صنعتی بوده است. همان‌طور که تحقیقات اخیر نشان داده، اجرای برنامه مناسب روانکاری و تعیین زمان مناسب تعویض روانکار نقش بسیار مهمی در بهینه کردن بازده عملکردی و کارایی تجهیزات، کاهش مصرف روانکار و افزایش عمر ماشین‌آلات داشته و در نتیجه به‌میزان قابل توجهی در کاهش هزینه‌های عملکردی، نگهداری و تعمیرات<sup>۱</sup>(نت)، مصرف سوخت و انرژی و همچنین کاهش آثار مخرب زیست محیطی ناشی از دفع روانکار می‌باشد [۲, ۳]. آمار جهانی حاکی از آن است که سالانه میلیون‌ها لیتر روغن روانکار به‌ویژه در صنایع حمل و نقل به‌علت تعویض زودهنگام به هدر می‌رود. از طرفی به‌علت نقش اساسی کیفیت روانکارها در جلوگیری از فرسایش قطعات ماشین‌ها، تعویض دیرهنگام روانکارها که ناشی از روش‌های غیر دقیق در تعیین زمان مناسب تعویض روغن و یا عدم وجود یک سامانه اندازه‌گیری دقیق وضعیت کیفی روغن است، می‌تواند سبب فرسایش و استهلاک زودرس قطعات موتور گردد. در بسیاری از موارد این امر ناشی از برنامه‌ها یا روش‌های نامناسب در تعیین زمان تعویض روغن می‌باشد. همچنین آمارها نشان می‌دهد که برای روانکاری بهتر تنها افزایش ۱ یا ۲ درصدی در هزینه می‌تواند حدود ۱۵٪ هزینه‌های اضافی خودرو را کاهش دهد. در اکثر موارد، هزینه تعمیرات قطعات مستهلک ناشی از استفاده روانکار نامناسب، بسیار بیشتر از هزینه استفاده از یک روانکار گران‌تر ولی بهتر است [۴].

از جمله روش‌های مرسوم پایش وضعیت در برنامه‌های نت می‌توان به استفاده از محدوده‌های زمانی (یا مسافت طی شده در مورد وسایل نقلیه) از پایش تعیین‌شده (که عمدتاً بر مبنای تخمین عمر روغن با

---

<sup>۱</sup>Maintenance

استفاده از روش‌های آماری می‌باشند)، و ارسای‌های چشمی روغن روانکار توسط شخص تعمیرکار و هم‌چنین روش‌های آنالیز آزمایشگاهی اشاره کرد. البته روش آنالیز آزمایشگاهی روغن به دلیل هزینه نسبی بالا، تأخیر زمانی و نیاز به اپراتور خبره از مرحله نمونه‌گیری تا تفسیر نتایج آنالیز روغن، در ارتباط با کاربردهای با میزان مصرفی کم و حساسیت کارکرد پایین، نظیر خودروها (که البته حدود نیمی از میزان مصرف روغن‌های روانکار در جهان را به خود اختصاص داده‌اند) به‌ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شرایط کارکرد موتور عوامل بسیاری بر روند فرسودگی روغن اثرگذار هستند که سبب می‌شوند عمر روغن تابعی غیرخطی از پارامترهای متعدد بوده و تعیین عمر مفید روغن در عمل دشوار شود. به‌طوری که تا به امروز راه‌حلی که به طرز رضایت‌بخشی بیانگر عمر روغن موتور کارکرده برحسب مشخصه‌های تأثیرگذار بر کیفیت روغن باشد، ارائه نگردیده است. این عوامل عبارتند از:

- نوع و عمر موتور
- شرایط کارکرد و مشخصه‌های عملکردی موتور (دما، بار و ...)
- شرایط آب و هوایی و محیط
- نفوذ آلودگی‌هایی هم‌چون سیلیس، دوده، آب، ضدیخ، سوخت و ...
- ذرات فلزی سایش‌یافته از سطوح در تماس، به‌ویژه آهن و مس

بنابراین روش‌های عمومی تخمین عمر روغن بسیار ناکارآمد بوده و تکیه به این روش‌ها زیان‌بار خواهد بود. پیشنهادی که در پایان‌نامه حاضر ارائه گردیده است، هوشمندسازی فرآیند تعیین وضعیت کیفی روغن روانکار براساس ارزیابی مستمر مشخصه‌های حیاتی آن است. با توجه به مطالب فوق طراحی، ساخت و بکارگیری سامانه‌ای که قابلیت ارزیابی مستمر وضعیت کیفی روغن روانکار طی یک فرآیند هوشمندانه را دارا باشد، منافع زیادی خواهد داشت. موضوعی که در این پایان‌نامه مورد توجه قرار گرفته است.

## ۱-۳- اهداف پایش وضعیت

به کارگیری سیستم پایش وضعیت دارای مزایای مشهودی است که به اختصار می توان آن‌ها را تحت عناوین

زیر برشمرده [۷, ۸]:

- ۱) کاهش سطح تعمیرات عمومی و جلوگیری از توسعه خرابی در سیستم
- ۲) کاهش تعداد خرابی‌های سنگین و پرهزینه
- ۳) کاهش مصرف قطعات انباری و هزینه‌های تعمیرات تکراری و متوالی و در نتیجه استفاده بهتر از قطعات یدکی و نیروی انسانی
- ۴) کاهش هزینه‌های ناشی از توقف دستگاه، ایجاد زمان توقف کم‌تر در مقابل تولید بیش‌تر و در نتیجه کاهش قیمت تمام شده محصول
- ۵) کاهش هزینه تولید به دلیل بالا بودن زمان کار ماشین‌ها، کاهش تعمیرات و توقف آن‌ها
- ۶) کاهش هزینه‌های انرژی مصرفی مانند برق، سوخت و ...
- ۷) افزایش عمر مفید دستگاه و جلوگیری از سرمایه‌گذاری سنگین جایگزینی
- ۸) افزایش امکان برنامه‌ریزی
- ۹) افزایش کارایی ماشین
- ۱۰) افزایش کمیت و کیفیت تولید و هم‌چنین جلوگیری از تولید ضایعات ناشی از خرابی ماشین‌ها
- ۱۱) بهبود ایمنی کار دستگاه
- ۱۲) امکان کنترل کیفیت تعمیرات
- ۱۳) آماده به کار بودن بیشتر ماشین به‌ویژه در مواقع حساس
- ۱۴) امکان کنترل کیفی مواد مصرفی هم‌چون روغن و فیلترها
- ۱۵) بهینه کردن توانایی‌های ماشین‌ها به‌منظور رسیدن به حداکثر تولید، کنترل فرسایش غیر عادی و کاهش خرابی‌های زودرس

۱۶) ایجاد نظم و ترتیب در تعمیرات و استاندارد کردن کارهای تعمیراتی و زمان‌سنجی فعالیت‌های نت

۱۷) جلوگیری از خطرات احتمالی با تهیه راهکارهای ایمنی و حفاظت فردی در اجرای عملیات

## ۱-۴- انواع روش‌های پایش وضعیت

امروزه در بسیاری از شرکت‌ها تلاش بر این است که اطلاعات جامع‌تری از تجهیزات را به‌صورت طبقه‌بندی شده در اختیار داشته باشند و با کنترل اطلاعات و شرایط لازم از به‌وجود آمدن توقف‌های غیرمنتظره جلوگیری کنند. روش‌های متعددی برای پایش وضعیت روانکاری تجهیزات وجود دارد از جمله روش‌های پایش وضعیت عبارتند از:

- تجزیه و تحلیل روغن<sup>۱</sup>
- تجزیه و تحلیل خوردگی<sup>۲</sup>
- تجزیه و تحلیل ارتعاشات<sup>۳</sup>
- تجزیه و تحلیل عملکرد<sup>۴</sup>
- تجزیه و تحلیل حرارت<sup>۵</sup>
- تجزیه و تحلیل چشمی<sup>۶</sup>

با توجه به نوع دستگاه و میزان دقت مورد نظر در برنامه نگهداری می‌توان یک یا ترکیبی از روش‌ها را به کار گرفت [۹-۱۴]. با این حال تا زمانی که این اثرات تشخیص داده شوند خطر تخریب شدید روانکاری

---

<sup>۱</sup>Oil Analysis

<sup>۲</sup>Wear Debris Analysis

<sup>۳</sup>Vibration Analysis

<sup>۴</sup>Performance Analysis

<sup>۵</sup>Thermography

<sup>۶</sup>Visual Inspection

و سایش زودرس وجود دارد. جدول ۱-۱ طبقه بندی شیوه‌های مختلف جمع‌آوری داده براساس روش - های مختلف پایش وضعیت را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱. طبقه بندی روش‌های مختلف پایش وضعیت [۱۳]

روش‌ها	شیوه اندازه‌گیری و جمع‌آوری داده
تجزیه و تحلیل روغن	<ul style="list-style-type: none"> <li>← ویسکوزیته</li> <li>← چگالی</li> <li>← گذردهی مختلط</li> <li>← محتوای اسیدی</li> <li>← - عدد اسیدی کل (TAN)</li> <li>← - عدد بازی کل (TBN)</li> <li>← - میزان اسیدی یا بازی بودن (PH)</li> <li>← آلودگی</li> <li>← ذرات فلزی</li> <li>← دوده</li> <li>← آب</li> <li>← سوخت</li> <li>← مایع خنک کننده گلیکول</li> </ul>
تجزیه و تحلیل خوردگی	<ul style="list-style-type: none"> <li>← اسپکتروگرافی</li> <li>← فروگرافی</li> <li>← تراشه مغناطیسی</li> <li>← آکوستیک/ اولتراسونیک</li> <li>← خازنی</li> <li>← القائی</li> </ul>
تجزیه و تحلیل ارتعاشی	<ul style="list-style-type: none"> <li>← مبدل‌های جابجایی</li> <li>← مبدل‌های سرعت</li> <li>← مبدل‌های شتاب</li> </ul>
تجزیه و تحلیل عملکرد	<ul style="list-style-type: none"> <li>← فشارها</li> <li>← نرخ جریان</li> <li>← مصرف سوخت</li> </ul>
تجزیه و تحلیل حرارتی	<ul style="list-style-type: none"> <li>← اندازه‌گیری تماسی</li> <li>← اندازه‌گیری غیر تماسی (Infrared)</li> </ul>
تجزیه و تحلیل چشمی	<ul style="list-style-type: none"> <li>← نفوذ مایع</li> <li>← رادیوگرافی</li> <li>← فیبرسکوپ</li> <li>← بورسکوپ</li> </ul>

در سال‌های اخیر نظارت بر وضعیت سلامت و پیش‌بینی خرابی روانکار به موضوعات قابل توجه در میان دانشگاه و صنعت تبدیل شده و تلاش ویژه‌ای برای پژوهش و توسعه سیستم تشخیص و پیش‌آگهی از پارامترهای عملکردی روغن صورت گرفته است.

## ۱- ۴- ۱ - پایش وضعیت به شیوه آنالیز روغن

نخستین روش‌های پایش وضعیت، شامل رویه‌های ساده‌ای مانند بوییدن روغن برای تشخیص بوی ترش اسید اضافی، بازرسی چشمی برای مشاهده علائم آشکار آلودگی و یا قرار دادن نمونه روی کاغذ جذب‌کننده برای کشف آلودگی‌ها و مشاهده کارآیی مواد افزودنی بود. با توسعه دانش و تحقیق در زمینه پایش وضعیت روانکارها، پیشرفت‌های زیادی به‌وجود آمد و آزمایش‌های بسیاری در جهت بررسی خواص روغن و شناسایی آلودگی‌ها تدوین شد [۱۴].

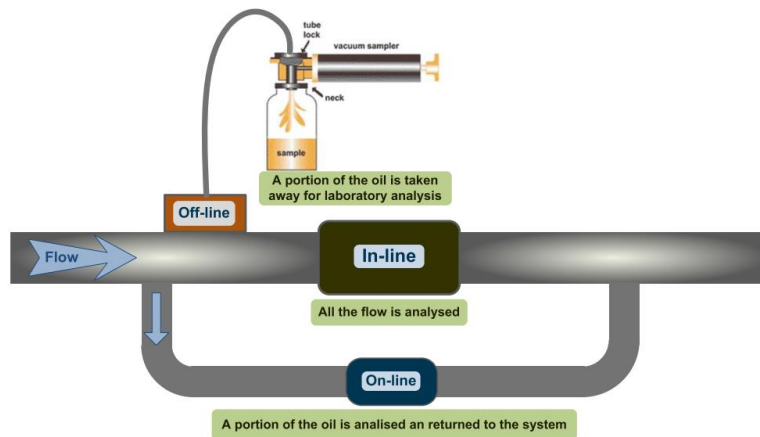
با پیشرفت صنایع مختلف و حساس‌تر شدن دستگاه‌های مورد استفاده، هم‌چنین افزایش داده‌های آنالیز روغن و در پی آن زمان‌بر شدن گزارش نتایج، به‌علاوه افزایش احتمال خطا در نتیجه تحلیل‌ها به علت خستگی یا عدم تمرکز شخص خبره نیاز به کمک گرفتن از سیستم‌های هوشمند و ابزارهای نوین جهت پایش وضعیت تجهیزات با ترکیب تجربه خبرگی تحلیل‌گران و متخصصان می‌باشد تا به‌وسیله این ابزارها بتوان دقت و سرعت عیب‌یابی سیستم‌ها را بالا برده و در هزینه‌های انبارداری قطعات مصرفی، تعویض زود هنگام روغن و تعمیرات غیر ضروری و ... صرفه‌جویی شود.

تجزیه و تحلیل روغن ابزاری است که می‌تواند برای کمک به بررسی وضعیت روانکاری تجهیزات مورد استفاده قرار گیرد. این کار همانند نمونه‌گیری از خون انسان است. نمونه روغن، همه آنچه که در داخل ماشین اتفاق می‌افتد را نمایانگر نمی‌سازد، اما می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در اختیار کاربر قرار دهد. اولین گام در استفاده از آنالیز روغن، نمونه‌گیری صحیح و به‌موقع است. بر روی هر نمونه، باید زمان، نوع و نام ماشین، نوع روغن و ساعت کارکرد، توسط یک برچسب مشخص شود. این نمونه‌ها به آزمایشگاه ارسال شده و با توجه به نوع روانکار، آزمایش‌های مورد نیاز بر روی آن انجام می‌شود. نتایج در برگه‌های آنالیز روغن ثبت شده و با استفاده از این اطلاعات، وضعیت روغن و دستگاه ارزیابی می‌گردد [۱۵]. نمونه‌برداری روغن، ممکن است به‌صورت موردی و اتفاقی و یا به‌صورت منظم و مستمر انجام شود.

به‌طور کلی، برای استفاده بهینه از روش آنالیز روغن، مراحل زیر باید طی شود:

- (۱) نمونه‌گیری صحیح و در زمان مناسب
- (۲) درخواست آزمون‌های متناسب با نوع روغن و شرایط دستگاه
- (۳) انجام آزمون‌ها با دقت کافی
- (۴) تفسیر و بررسی دقیق نتایج توسط متخصص
- (۵) ثبت دقیق نتایج آزمون‌ها، تهیه نمودارهای متناسب و نگهداری از آن‌ها در پرونده دستگاه
- (۶) جمع‌آوری اطلاعات از سایر روش‌ها و بررسی آن‌ها در کنار نتایج آنالیز روغن

بسته به کاربرد و اهمیت پارامتر انتخاب‌شده برای سلامت دستگاه، این پارامترها می‌توانند به‌طور مداوم یا دوره‌ای، به‌صورت آزمایشگاهی (خارج از محل)، با کیت‌های قابل حمل و حسگرهای برخط<sup>۱۳</sup> اندازه‌گیری شوند.



شکل ۱-۱. شماتیک انواع روش‌های تجزیه و تحلیل روغن [۱۳]

Off-line

In-line

On-line

در گذشته تمام نمونه‌برداری‌ها و تجزیه و تحلیل‌ها به صورت خارج از محل و توسط کیت‌های قابل حمل صورت می‌گرفت اما روند فعلی سیستم‌های پایش وضعیت به سمت اتوماسیون است.

از جمله آزمایشگاه‌های داخل کشور که توانایی انجام این‌گونه آزمون‌ها را دارند، می‌توان به آزمایشگاه پژوهشکده صنعت نفت، آزمایشگاه پژوهشکده شرکت نفت بهران، آزمایشگاه‌های پالایشگاه اصفهان و تهران و آزمایشگاه شرکت البرز تدبیرکاران اشاره کرد.

## ۱-۴-۲- اهداف آنالیز روغن

اهداف آنالیز روغن به طور کلی به چند دسته تقسیم‌بندی می‌شود؛

- کنترل مؤثر آلاینده‌های روغن
  - کنترل ماشین و بهبود نگهداری و تعمیرات پیش‌گویانه جهت کنترل بهتر توقف‌ها
  - کنترل شرایط روغن جهت بهینه نمودن تناوب‌های تعویض روغن [۱۶].
- هدف از پایش وضعیت روغن به صورت برخط تشخیص زودهنگام خرابی اجزای ماشین قبل از رسیدن به حالت بحرانی و کنترل وضعیت ماشین به صورت دائمی می‌باشد. هم‌چنین پایش وضعیت برخط روغن تعیین می‌کند که روغن به درجه‌ای از خرابی رسیده که دیگر نتواند کارآیی خود را داشته باشد [۱۷]. نتایج بدست آمده از تحقیقات نشان می‌دهد، با آنالیز روغن می‌توان عیوب مختلف نظیر خوردگی، مشکلات یاتاقان‌ها، فرسایش غیر عادی رینگ و پیستون موتورها، فرسایش غیرعادی شافت‌ها و دنده‌های گیربکس‌ها، پمپ‌های هیدرولیک و ... را تا ۹۰ درصد شناسایی و نسبت به رفع عوامل آن اقدام نمود. هم‌چنین به کمک این آزمایش‌ها می‌توان از صحت و سلامت روغن‌ها که نقش کلیدی در کارکرد ماشین‌آلات دارند، اطمینان حاصل نمود [۱۸].

مجموعه آزمون‌های آنالیز روغن برای نیل به اهداف زیر انجام می‌گیرد:

- تعیین خواص فیزیکی و شیمیایی روانکار مانند گرانروی، عدد اسیدی و بازی، پایداری اکسیداسیون و ...

آیا روغن هنوز خواص لازم برای کارکرد مناسب (روانکاری، انتقال حرارت، عایق الکتریکی و ...) را داراست یا خیر؟

- ارزیابی وضعیت سایش با مشخص نمودن غلظت و اندازه ذرات فلزی سایش‌یافته در روغن  
آیا فرسایش غیر عادی درون تجهیز وجود دارد یا خیر؟

- مشخص نمودن میزان مواد افزودنی باقیمانده

آیا روغن هنوز قابلیت پاک‌کنندگی، بازی و ... دارد یا خیر؟

- مشخص نمودن میزان مواد آلاینده راه‌یافته به روغن

آیا مقادیر آلودگی موجود در روغن در سطح مجاز قرار دارد یا خیر؟

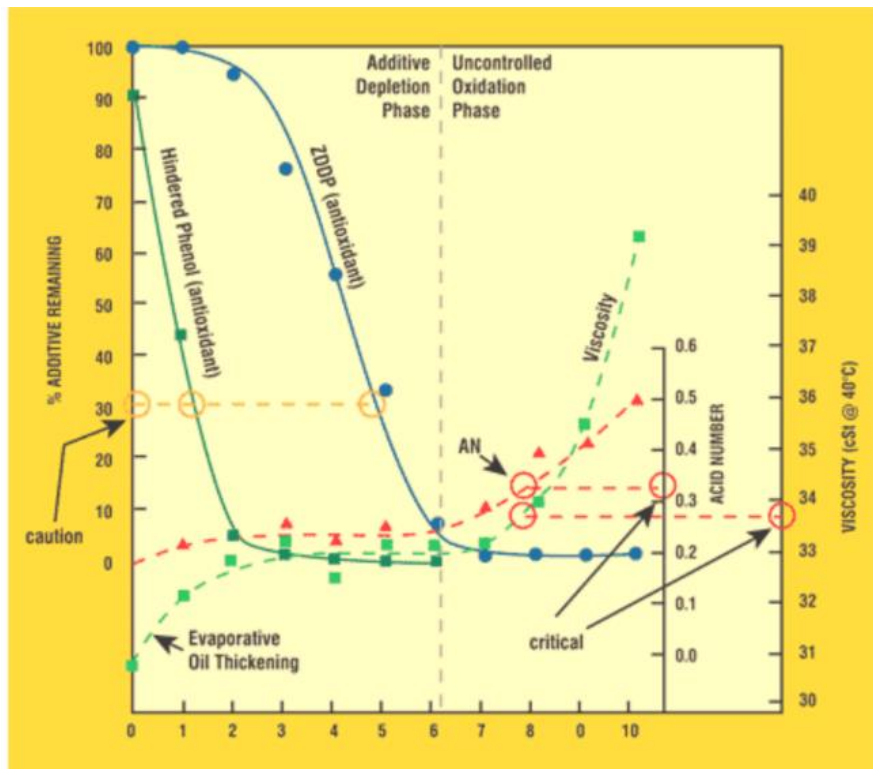
## ۱-۵- مکانیزم فرسودگی روغن موتور

مکانیزم فرسودگی و زوال روغن‌های روانکار به‌ویژه روغن موتور به‌طور کلی دارای پیچیدگی‌هایی از جهت فرآیندهای شیمیایی و تغییرات در مشخصه‌های کیفی روغن می‌باشد. به‌طوری‌که شرح کامل آن در اینجا نمی‌گنجد و البته خارج از اهداف پایان‌نامه می‌باشد. بنابراین به ذکر کلیات بسنده می‌شود و تغییرات مشخصه‌های کیفی روغن موتور طی روند فرسودگی و اثرات این تغییرات روی کیفیت روانکاری بررسی می‌گردد.

طبق بررسی‌های گسترده آزمایشگاهی انجام شده بر روی طیف گسترده‌ای از روغن موتورها، مکانیزم

فرسودگی و زوال این روانکارها را می‌توان شامل دو فاز دانست؛

در فاز اول مواد افزودنی روغن روانکار شامل مواد افزودنی بازدارنده اکسیداسیون و افزودنی‌های ضد سایش و ... طی واکنش‌های شیمیایی پیچیده در شرایط کاری سخت روغن موتور، مصرف شده و زمینه برای فرآیندهای مخرب نظیر اکسیداسیون روغن و سایش فراهم می‌گردد. در فاز دوم که روغن روانکار میزان زیادی از مواد افزودنی خود را از دست داده است، بیشتر در معرض عوامل مخرب قرار می‌گیرد، اکسیداسیون شدت گرفته و ترکیبات اسیدی خورنده تشکیل می‌شود. البته نتیجه این فرآیندها تغییرات عمده در مشخصه‌های روغن از جمله افزایش ویسکوزیته روغن و کاهش قلیایی شدن آن می‌باشد. این مراحل در شکل ۱-۲ نشان داده شده‌اند [۱۴].



شکل ۱-۲. روند فرسودگی روغن [۱۴]

## ۱-۶- آلودگی‌ها

در شرایط واقعی کارکرد موتور، آلودگی‌ها از منابع مختلف به جریان روغن روانکار نفوذ کرده و سبب تسریع فرآیند اکسیداسیون و فرسودگی روغن می‌شوند. این آلودگی‌ها به‌طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شود:

(۱) آلودگی‌هایی که از محیط به جریان روغن راه می‌یابند که شامل گرد و غبار (سیلیس)، آب و مواد خنک‌کننده (گلایکول‌ها)، دوده و محصولات احتراق و سوخت.

(۲) فلزات سایشی که بر اثر سایش قطعات به جریان روغن راه می‌یابند.

تأثیر این مواد آلاینده بر فرآیند اکسیداسیون و عمر روغن بسیار حائز اهمیت است. بنابراین جداگانه و به اختصار به بررسی برخی از آلودگی‌های مهم پرداخته می‌شود.

### ۱-۶-۱ - آلودگی آب

آب یکی از مخرب‌ترین آلودگی‌ها در روغن است که علاوه بر کاهش عمر روغن موجب خرابی قطعات می‌گردد. آب با تأثیر منفی بر مواد افزودنی، فرآیند اکسیداسیون را تسریع کرده و به‌علاوه قابلیت خوردگی اسیدهای معمولی موجود در روغن را افزایش می‌دهد. به‌علاوه آب عامل رسوب‌دهنده مواد افزودنی روغن بوده و همچنین به‌طور شیمیایی با برخی از این مواد وارد واکنش می‌شود. مقادیر کم آب در روغن موتور عادی است. ولی مقادیر زیاد آن نیازمند توجه می‌باشد. از پیامدهای نامطلوب آلودگی روغن با آب، تولید لجن و رسوب روی سطوح و افزایش گرانش می‌باشد [۱۹]. منشأ نفوذ آب به جریان روغن می‌تواند بخار آب موجود در محفظه داخلی سیستم، نشتی سیستم خنک‌کننده از طریق آب‌بندهای معیوب و یا ... باشد.

### ۱-۶-۲ - سوخت

سوخت، مولکول‌های آروماتیک اشباع نشده را به روغن موتور وارد می‌کند که تسریع‌کننده اکسیداسیون هستند. در اثر نفوذ سوخت به روغن، عدد بازی کاهش یافته و گرانش به‌شدت افت می‌کند که موجب

شکست و کاهش ضخامت فیلم روغن، ایجاد سایش در پیستون، رینگ‌ها و بوش سیلندر می‌گردد. رقیق شدن با سوخت می‌تواند در اثر استارت‌های متوالی موتور، کار در شرایط بار کم، نشستی یا معیوب بودن انژکتورها، رینگ‌ها یا واشرهای فرسوده و تایمینگ نامناسب به‌وقوع بپیوندد [۱۹].

### ۱- ۶- ۳- گرد و غبار (سیلیس)

سیلیس به عنوان یکی از عوامل اصلی آلودگی روغن سیستم‌های مکانیکی شناخته می‌شود. ذرات بسیار ریز سیلیس که به‌صورت گرد و غبار معلق در هوا در محیط پیرامون موتور به‌وفور حضور دارند، از طریق هوای ورودی، درزگیرها و دیگر منافذ وارد جریان روغن می‌گردد. افزایش بیش از حد میزان سیلیس در روغن سبب سایش اجزای مختلف می‌گردد که نتیجه آن افزایش میزان فلزات سایشی به‌ویژه آلومینیوم و کروم در جریان روغن است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که درصد قابل توجهی از فرسایش‌ها ناشی از نفوذ و حضور سیلیس در سیستم‌های مکانیکی است [۲۰, ۲۱].

### ۱- ۶- ۴- فلزات سایشی

روانکاری نامناسب به هر دلیل سبب شروع پدیده سایش در اجزای موتور می‌گردد. با شروع سایش، فلزات سایش‌یافته از سطوح اجزا به جریان روغن راه یافته و میزان عناصر فلزی بسته به منشأ سایش و ساختار اجزا افزایش می‌یابد. ذرات فلزی وارد شده به جریان روغن به‌ویژه ذرات مسی و آهنی به‌عنوان کاتالیزور واکنش اکسیداسیون عمل کرده و سرعت واکنش را افزایش می‌دهند. در ضمن با ورود این ذرات به جریان روغن، سایش تشدید می‌گردد و ممکن است منجر به صدمات جدی به موتور گردد [۲۲, ۲۳].

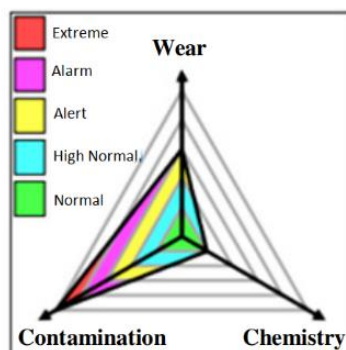
به‌ازای هر ۱۰ درجه سانتیگراد افزایش دما، عمر روغن روانکار براساس سرعت گرفتن فرآیند اکسیداسیون و از دست‌دادن مواد افزودنی، نصف می‌گردد. مشکلات معمولی که از اکسیداسیون بیش از حد روغن و مواد تولید شده از اکسیداسیون آن پیش می‌آید عبارتند از: تشکیل رسوبات لاک، خوردگی فلزی، افزایش

ویسکوزیته، گرفتگی فیلتر و تولید اسیدهای آلی. در صورتی که حرارت خیلی بالا باشد رسوبات کربنی در روغن نیز تشکیل خواهد شد [۲۴].

## ۱-۷- معضل وجود روغن‌های با کیفیت پایین یا روغن‌های غیر استاندارد

از آنجا که در بازار مصرف روغن‌های موتور با خطر وجود روغن‌های تقلبی با کیفیت پایین مواجه می‌باشد، در صورت استفاده ناآگاهانه از چنین روغن‌هایی، موتور ممکن است حتی در سراسر زمان کارکرد روغن دست‌خوش استهلاک و فرسایش واقع شود. بنابراین در چنین شرایطی اتکا به محدوده‌های متداول تعیین شده جهت کارکرد روغن به علت فقدان وجود یک سیستم سنجش کیفیت روغن می‌تواند بسیار زیان‌بار باشد.

تحقیقات نشان داده که برای ارزیابی مناسب وضعیت روغن اطلاع از وضعیت مشخصه‌های شیمیایی روغن، میزان مواد آلاینده و میزان ذرات سایشی ضروری است. این اطلاعات که نحوه ارزیابی نهایی آن‌ها جهت تعیین وضعیت عمومی روغن در مثلث کیفی روغن برای یک حالت خاص نشان داده شده است (شکل ۱-۳)، از آنالیز روغن استخراج می‌شوند. با ارزیابی مشخصه‌های مربوط به هر یک از اضلاع این مثلث، تشخیص وضعیت عمومی روغن امکان‌پذیر خواهد بود [۲۵].



شکل ۱-۳. مثلث کیفی روغن [۲۵]

## ۱-۸- هدف از انجام تحقیق

هدف اصلی از بیان همه این مطالب دست یافتن به معیاری برای ارزیابی کیفیت روغن و امکان سنجی ساخت یک سیستم برخط پایش وضعیت روغن، برای آگاهی از شرایط فعلی و پیش‌بینی طول عمر مفید باقی‌مانده با استفاده از تکنیک‌های خاص و انتخاب و ساخت حسگر مناسب می‌باشد.

رسیدن به این هدف، یعنی طراحی و توسعه یک سیستم پایش برخط وضعیت روغن، این امکان را به ما می‌دهد که میزان عمر مفید روغن را پیش‌بینی نموده و در نتیجه آن، به زمان مناسب برای بررسی و رسیدگی تعمیرات ماشین‌آلات و حذف بررسی‌های بی‌مورد و اضافی دست پیدا کرد. در محیط‌های صنعتی بررسی، نگهداری و تعمیرات تجهیزات اغلب با هزینه‌های زیادی همراه است. در چنین شرایطی استفاده از یک سیستم پایش برخط وضعیت روغن که باعث بهینه‌شدن زمان این بررسی‌ها شود، هزینه‌های تعویض روغن و تعمیرات را تا حد زیادی کاهش خواهد داد.

در این پایان‌نامه، براساس نتایج تحقیقات گسترده‌ای که روی انواع روش‌های پایش وضعیت روغن صورت گرفته، حسگر برخط خازنی با طراحی خاص، به عنوان ابزار توسعه و ساخت سیستم تشخیص وضعیت کیفی روغن و پیش‌بینی میزان عمر مفید باقی‌مانده روغن پیشنهاد شده است.

# فصل ۲: پیشینه تحقیق

## فصل ۲ پیشینه تحقیق

### ۲-۱- مقدمه

محققان بسیاری به تحقیق و بررسی در رابطه با شیوه‌های پایش وضعیت روغن موتور و بهبود عملکرد آن در روانکاری تجهیزات و ماشین‌آلات مختلف پرداخته‌اند. هدف از این فصل بررسی و طبقه‌بندی تعدادی از یافته‌های تحقیقات دیگر محققان در راستای کارهای انجام شده جهت پایش وضعیت تجهیزات در سطح دنیا و تعیین و شناسایی خلاءهای تحقیقاتی آنان می‌باشد.

### ۲-۲- سیر تحولی پایش وضعیت روغن

آنالیز روغن به شکل امروزی برای اولین بار در اوایل دهه ۱۹۴۰ در شرکت راه‌آهن غرب آمریکا روی نمونه‌های روغن گرفته شده از موتور دیزل لوکوموتیوها انجام گرفت. با انجام این آزمایش‌ها که با استفاده از تجهیزات ساده اسپکتروگرافی<sup>۱</sup> صورت می‌گرفت، به طرز موفقیت‌آمیزی وضعیت روغن موتور و عناصر فلزی موجود در نمونه روغن مورد بررسی قرار گرفت [۲۶، ۲۷].

به‌دنبال این موفقیت وزارت دفاع ایالات متحده و شرکت‌هایی نظیر رولز-رویس نیز آنالیز روغن را در دستور کار خود قرار دادند. در سال ۱۹۵۵ وزارت دفاع ایالات متحده تحقیقاتی اساسی برای تحلیل ذرات فلزات سایشی جهت بررسی سایش و پیش‌بینی عیوب اجزای هواپیما آغاز نمود. در دهه‌های بعد روش‌های آنالیز روغن توسعه یافت تا جایی که امروزه ده‌ها آزمون مختلف برای بررسی خواص کیفی روغن، ذرات

---

<sup>۱</sup>Spectrography

سایشی و مواد آلاینده، در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. رویه آزمایش‌های تحلیل روغن توسط سازمان‌های مانند SAE<sup>۲</sup>، ASTM<sup>۳</sup>، ISO<sup>۴</sup> ارائه شده است [۲۸].

گرچه آنالیز روغن روش کارآمدی است که علاوه بر نشان دادن وضعیت روغن، اطلاعات سودمندی از وضعیت سلامت اجزای مختلف ماشین و شرایط کلی کارکرد آن را ارائه می‌دهد، اما هزینه نسبی بالا و تأخیر زمانی از معایب آن است. این مسأله از یک طرف و نیاز به ضریب اطمینان بالا و مراقبت مداوم به‌ویژه در صنایع با حساسیت کارکرد بالا مانند صنایع هوایی و نیروگاهی موجب شد که در اوائل دهه ۱۹۹۰ تلاش برای ساخت و کاربرد حسگرها و وسایل همراه جهت ارزیابی وضعیت روغن به‌صورت برخط و مداوم آغاز شود [۲۹]. این تلاش‌ها با بررسی گسترده خواص روغن و انجام تست‌های فراوان سرانجام به بار نشست و در سال ۲۰۰۰ حسگر تعیین وضعیت کیفی روغن INTELLEK براساس اندازه‌گیری رسانایی الکتریکی روغن، توسط کمپانی Delphi ارائه شد. در این حسگر فاکتورهای تأثیرگذار بر کاهش کیفیت روغن از جمله دمای روغن، نوع روغن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. خروجی حسگر با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی آنالیز روغن در مورد سه خودرو متفاوت حاکی از آن بود که می‌توان تخریب روغن را به سه مرحله تقسیم کرد: خوب، افزایش سریع عدد اسیدی کل<sup>۴</sup> و افزایش سریع ویسکوزیته. نتایج نشان داد که تغییر ویسکوزیته، عدد اسیدی، میزان آب و آلودگی ضدیخ وابستگی‌هایی با خاصیت رسانایی الکتریکی روغن دارد [۳۰، ۳۱].

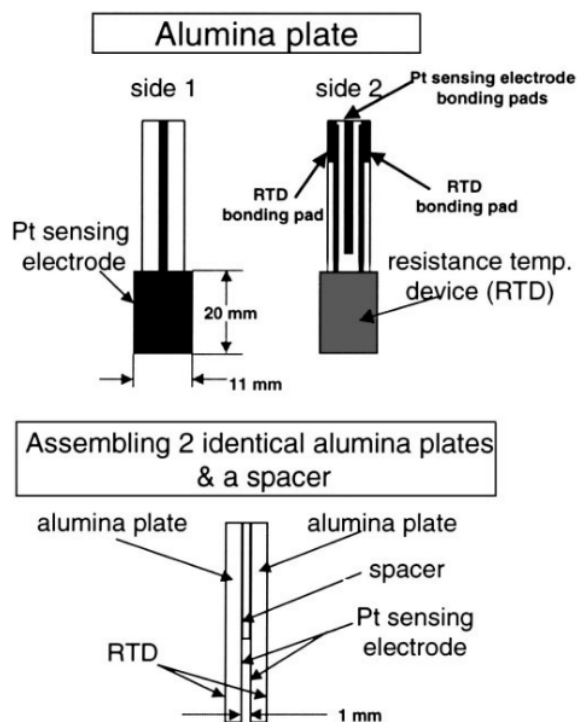
---

<sup>۱</sup>Society of Automotive Engineers

<sup>۲</sup>American Society of Testing and Materials

<sup>۳</sup>International Standard Organization

<sup>۴</sup>Total Acid Number (TAN)



شکل ۱-۲. شکل شماتیک حسگر وضعیت روغن ساخت شرکت Delphi [30]

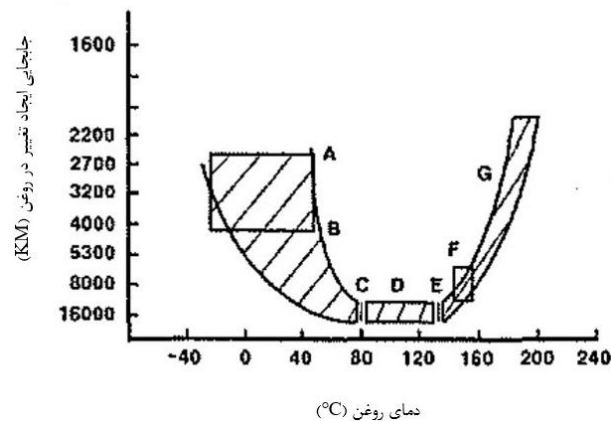
در دو دهه اخیر با پیشرفت‌های حاصل‌شده در تکنولوژی حسگرها و بررسی گسترده خواص روغن، حسگرهای ارزیابی خواص کیفی روغن نظیر ویسکوزیته و مواد آلاینده شامل ذرات فلزی و غیر فلزی، آب و ... روانه بازار شدند. به طوری که امروزه این حسگرها در گستره قیمت و دقت مناسب برای کاربردهای مختلف در دسترس هستند. چنین سیستم‌هایی با غلبه بر محدودیت‌های روش آزمایشگاهی (هزینه نسبی بالا، تأخیر زمانی و نیاز به کاربر خبره) به‌ویژه در ارتباط با تجهیزات صنعتی با حساسیت کارکرد، قابلیت اطمینان بالا و کاهش هزینه‌های خالص نگهداری و تعمیرات را به ارمغان خواهند آورد. در این میان آنالیز روغن همواره به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های پایش وضعیت و تشخیص عیوب تجهیزات صنعتی به‌ویژه موتورهای درونسوز مورد توجه محققان بوده است. در این خصوص وسایل اندازه‌گیری جهت پایش برخط کمیت‌هایی مانند: گرانش، عدد بازی یا اسیدی، ذرات آهنی و میزان آب به‌ویژه در دهه اخیر توسعه داده شده و در دسترس هستند [۳۲]. از آنجا که عمر روغن و کیفیت روانکاری به مشخصه‌های زیادی چون

ویسکوزیته روغن، عدد بازی، میزان مواد آلاینده نظیر سوخت و آب و میزان فلزات سایشی وابسته است، اتکا به سنجش یک خاصیت جهت تعیین کیفیت و عمر روغن به‌ویژه در سیستم‌های با حساسیت کارکرد و یا حجم روغن مصرفی بالا نمی‌تواند قابل اطمینان باشد. بلکه برای ارزیابی مناسب وضعیت روغن روانکار مورد استفاده در موتور، اطلاع از مشخصه‌های کیفی روغن موتور جهت روانکاری مناسب، میزان آلاینده‌ها و وضعیت سایش ضروری است. به همین جهت بکارگیری همزمان مجموعه‌ای از این حسگرها در واحدهای صنعتی در دستور کار قرار می‌گیرد [۳۳].

در سال ۱۹۹۸ یک شیوه متفاوت برای بررسی کردن کیفیت روغن موتور توسط شرکت خودروسازی جنرال موتورز ارائه شد. این سیستم در واقع هیچ یک از خصوصیات فیزیکی و کیفیت روغن را کنترل نمی‌کرد، بلکه یک مدل ریاضی بسیار پیچیده بود که به کمک رایانه خودرو<sup>۱</sup> با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته برحسب مشخصه‌های عملکردی موتور مانند دور موتور، دمای عملکردی، دمای روغن و عوامل دیگر، سرعت خرابی روغن موتور را استنتاج کرده و عمر مفید آن را پیش‌بینی می‌نمود. این مدل ریاضی حاصل تست‌های گسترده میدانی روی موتورهای مختلف و با شرایط کارکرد متفاوت برای پیش‌بینی الگوی فرسودگی بر مبنای شرایط کارکرد موتور بود. در آن سال این سیستم بر روی تعداد محدودی از خودروهای جنرال موتورز نصب شد. در سال‌های بعد با اصلاح و پیشرفت این سیستم و نیز رایانه‌های نصب شده روی خودروها، سرعت توسعه این سیستم افزایش یافت. امروزه این سیستم در بسیاری از خودروهای جنرال موتورز مورد استفاده قرار می‌گیرد. این راه‌حل در واقع تأثیر عامل شرایط رانندگی در پیش‌بینی عمر روغن موتور را محاسبه می‌کند.

---

<sup>۱</sup>Electronic Control Unit (ECU)



شکل ۲-۲. نمودار وضعیت هفت گانه موتور [34]

جدول ۱-۲. تشریح وضعیت هفت گانه موتور

شرح حالت	نماد	وضعیت
موتور در شرایط مطلوبی قرار دارد و می تواند کار خود را بدین ترتیب ادامه دهد.	A	عادی
تقریباً در حالت مرزی قرار دارد و در بیشتر مواقع قبل از انجام آنالیز روغن، موتور جهت رفع نقص به تعمیرگاه برده شده و عامل تأثیرگذار با سرویس رفع می شود.	B	مرزی قابل قبول
وضعیت موتور از حالت عادی خارج شده است.	C	مرزی
در این حالت یک عاملی سعی در تسریع سرعت فرسایش دارد.	D	مرزی سریع
کاربر اپراتور باید تا اعلام نتایج بعدی پایش با دقت زیاد مراقب وضعیت و عملکرد دستگاه باشد.	E	تحت مراقبت
کاربر باید با مشاهده برگه نتایج پایش روغن نسبت به شناسایی عوامل مؤثر بر خرابی روغن اقدامات لازم را انجام دهد.	F	نیاز به رسیدگی
موتور حالت طبیعی خود را از دست داده و باید فوراً اقدام به تصحیح عامل ایجاد این حالت شود و هم چنین موتور نباید در این حالت کار کند بلکه بایستی سریعاً متوقف گردد.	G	بحرانی

در این سیستم علی رغم سادگی و حذف پیچیدگی های مکانیکی، همچنان مشکل عدم تشخیص آلودگی ها پابرجاست. ضمن اینکه برای ایجاد ارتباط میان شرایط کارکرد موتور (مشخصه های عملکردی موتور) با شرایط مناسب کارکرد روانکار (مشخصه های فیزیکی و شیمیایی روغن)، تشخیص الگوی فرسودگی روغن برحسب مشخصه های عملکردی موتور و پیش بینی عمر باقیمانده روغن براساس این الگو، نیاز به

تست‌های میدانی گسترده روی طیف وسیعی از موتورها دارد. نیاز به رایانه در کنار موتور جهت پردازش اطلاعات ورودی، از دیگر محدودیت‌های این روش است [۳۴]. علاوه بر این، دقت این روش در مقایسه با روش مبتنی بر بررسی مستقیم خواص کیفی روغن جهت تعیین کیفیت روغن کمتر است. وجود این ضعف‌ها سبب شد که یک شیوه ترکیبی از بررسی شرایط رانندگی و استفاده از حسگرها توسط شرکت دایملر<sup>۱</sup> برای خودروهای مرسدس بنز مورد استفاده قرار گیرد. این سیستم زمان تعویض روغن را براساس اطلاعات مشخص شده رانندگی و کامل کردن آن با اطلاعات یک حسگر که به‌طور مداوم دما و ثابت دی‌الکتریک روغن موتور را اندازه می‌گرفت، تعیین می‌کرد [۳۵]. با این وجود برخی از محدودیت‌ها همچنان موجود است. ضمن این‌که این رویکرد در تشخیص سایش در اجزای موتور ضعیف بوده و در ارتباط با موتورهای سنگین با حجم روغن بالا، مانند موتورهای لوکوموتیو و یا دیزل‌های دریایی کارایی ندارد.

همان‌طور که گفته شد برای ارزیابی مناسب وضعیت روغن روانکار مورد استفاده در موتور، اطلاع از مشخصه‌های کیفی روغن موتور جهت روانکاری مناسب، میزان آلاینده‌ها و وضعیت سایش ضروری است. البته بسته به حساسیت کارکرد سیستم به تبع اطلاعات جامع‌تری نیاز است.

## ۲-۳- اهمیت پایش وضعیت در تحقیقات گذشته

شاید مهمترین دلیل برای توسعه و تعمیق برنامه‌های مراقبت وضعیت ماشین‌ها در بسیاری از تجهیزات نظامی و هوایی را بتوان در مسائل ایمنی و اقتصادی جستجو نمود. بنابراین عامل بکارگیری برنامه مراقبت وضعیت ماشین‌ها در سیستم هیدرولیک و موتورهای هواپیمای مسافربری از لحاظ ایمنی مهم می‌باشد. علاوه بر روش‌های مختلف نت، کنترل و عیب‌یابی این تجهیزات به کمک برنامه مراقبت وضعیت ماشین‌ها باعث کاهش حوادث ناگوار هوایی و کاهش هزینه راهبری ناوگان‌های هوایی می‌شود. بروز هرگونه عیب فنی هواپیما حین پرواز، باعث فاجعه‌های جبران‌ناپذیر جانی و مالی خواهد شد. هم‌چنین در بسیاری از تجهیزات، درصد بالای خرابی‌های سیستم‌های هیدرولیک از نوعی است که آلودگی روغن نقش مؤثری در ایجاد آن دارد. با اجرای برنامه مراقبت وضعیت ماشین‌ها، کنترل و شناسایی عیب و آلودگی روغن به آسانی امکان‌پذیر می‌باشد. در ضمن بوردن<sup>۱</sup> و همکاران در تحقیقی بر روی ماشین‌ها و تجهیزات نظامی مورد استفاده در ارتش و نیروهای نظامی آمریکا، زمان مناسب نگهداری و تعمیرات را از طریق آنالیز روغن ماشین‌ها با استفاده از حسگرهای مختلف بررسی کردند تا از طریق تشخیص آلودگی‌های موجود در روغن، عمر مفید روغن را محاسبه نمایند. این امر باعث کاهش هزینه‌های تعمیرات و قابلیت اطمینان مناسب برای ماشین‌ها و تجهیزات نظامی گردید [۳۶].

## ۲-۴- حسگرها و سیستم‌های پایش وضعیت روغن

به منظور مروری بر پیشینه پژوهش به‌عنوان یکی از شاخص‌های تعیین‌کننده لزوم تحقیق، در ابتدا باید گفت که رودریگو<sup>۲</sup> و همکاران ضمن تحقیقی، این‌گونه بیان کردند که دو نوع از نظارت بر وضعیت مداوم و دوره‌ای وجود دارد. در روش نظارت مداوم بر وضعیت، هشدار زمانی داده می‌شود که قسمتی از تجهیز دارای

---

<sup>۱</sup>Burden

<sup>۲</sup>Rodrigo

عیب شود. در این روش دو محدودیت گرانی و ایجاد آلودگی صوتی که می‌تواند گاهی در تشخیص عیوب اشکال ایجاد کند، وجود دارد. در روش دوره‌ای نظارت بر وضعیت، با استفاده از فیلتر و پردازش داده‌ها در تشخیص خرابی تجهیزات می‌توان دقیق‌تر عمل نمود. مشکل اصلی مربوط به نظارت بر وضعیت دوره‌ای، تعیین فواصل بازرسی می‌باشد. همچنین در این پژوهش با بررسی روش نگهداری برنامه‌ریزی شده براساس تجزیه و تحلیل می‌توان احتمال شکست سیستم و عواقب آن (مربوط به امنیت، اقتصاد و محیط زیست) را به حداقل رساند [۶].

احمدی و همکاران در تحقیقی به بررسی روش پایش وضعیت روغن برای کاهش هزینه‌ها و آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از زمان تعویض روغن موتور جرثقیل پرداختند. نتایج این آزمایش نشان داد که در صورت استفاده از تکنیک پایش وضعیت، روغن موتور این دستگاه می‌تواند زمان بیشتری را تحت شرایط مطلوب کار کند و با توجه به هزینه‌های زیاد تعویض این روغن‌ها، صرفه‌جویی سالانه‌ی قابل توجهی عائد استفاده‌کنندگان آن خواهد شد. بنابراین در این تحقیق مشاهده گردید که روغن موتور تحت شرایط دستگاه مورد مطالعه توانست تا ۱۷۰ ساعت بدون مشکل کار کند و تعویض آن در ۱۲۵ ساعت مقرون به صرفه نیست. میزان درصد تغییرات عناصر فرسایشی روغن برای همه‌ی عناصر کمتر از ۵۰ درصد بوده اما بعضی از عناصر مانند آهن و کروم در آستانه هشدار بود. در نهایت با بررسی پنج دسته از شاخص‌های روغن به دست آمده از آنالیز روغن می‌توان بیان نمود که روغن موتور دستگاه مورد مطالعه توانایی کار کردن تا ۱۷۰ ساعت را داشته و تعویض روغن آن در ۱۲۵ ساعت بهره‌وری را به همراه خواهد داشت [۳۷].

خلیلی و دانش به اتوماسیون تحلیل ذرات سایشی روغن جهت بازرسی فنی ماشین‌ها پرداختند. هدف، خودکار نمودن تحلیل روغن جهت آزمون غیرمخرب، پایش وضعیت و همچنین اطمینان از ایمنی، بازده، کیفیت و بهره‌وری عملکرد ماشین‌ها بود. آن‌ها به کمک تصاویر فروگرافی<sup>۱</sup> (AF) و عکس‌برداری لیزری<sup>۲</sup>

---

<sup>۱</sup>Analytical Ferrography

<sup>۲</sup>Partical Analysis

(PA) از ذرات سایشی درون روغن و با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر، نتایج آزمایش اسپکتروسکوپی و اطلاعات به دست آمده از پردازش رنگ ذرات در تصاویر فروگرافی، ذرات سایشی روغن را به صورت خودکار تحلیل کردند. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که ذرات سایشی و خواص شکلی و رنگ آن‌ها می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد نوع و مکانیزم سایش در اختیار کاربر قرار دهد. با استفاده از این روش غیرمخرب نیاز به باز و بسته کردن غیر ضروری قطعات ماشین‌ها جهت بازرسی فنی نیست [۳۸].



شکل ۲-۳. چند نمونه از تصاویر ذرات سایشی بدست آمده از فروگرافی [۳۸]

یادآو<sup>۱</sup> و همکاران از مسافت‌های مختلف طی شده توسط خودرو و نمونه‌های روغن موتور جهت تشخیص رابطه بین مسافت‌های طی شده و سطح افت خواص روغن و پایش موتور استفاده کردند. از آزمون‌های مختلف برای تعیین سطح افت خواص فیزیکی روغن موتور استفاده شد. هم‌چنین مطالعه مقایسه‌ای بین خواص روغن تازه و خواص روغن مورد استفاده انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که ویسکوزیته، عدد اسیدی کل، مقدار آب موجود در روغن با افزایش مسافت طی شده افزایش می‌یابد که باعث کاهش خاصیت

<sup>۱</sup>Yadav

ضدسایشی روغن و افزایش خوردگی می‌شد. به‌علاوه گرانیروی در مسافت‌های کوتاه، کاهش و در مسافت‌های طولانی افزایش می‌یابد [۳۹].

هیری<sup>۱</sup> و همکاران در مطالعه‌ای برای تعیین ویسکوزیته سینماتیک روغن موتور، پنجاه نمونه روغن با ویسکوزیته‌های مختلف را با استفاده از طیف‌سنجی مادون‌قرمز<sup>۲</sup> مورد ارزیابی قرار دادند. هدف، تهیه یک مدل کالیبراسیون برای پیش‌بینی ویسکوزیته روغن موتور، بدون انجام هیچ عمل پیش‌فرآوری و یا هرگونه دست‌کاری در نمونه بود. نتایج حاکی از آن بود که مدل پیشنهادی دارای ضریب همبستگی ۰/۹۹ و ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۴۹ است [۴۰].

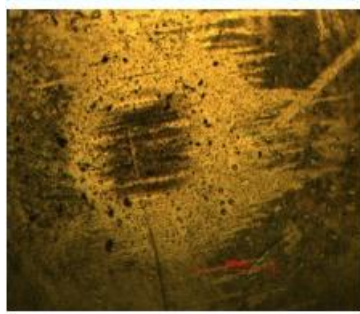
زنگ<sup>۳</sup> و همکاران خصوصیات تراپولوژیکی و ساختاری روغن را از نظر نظری و تجربی بررسی کردند. ویسکوزیته و ساختار روغن‌های در حال کار را در مسافت‌های مختلف با استفاده از ویسکومتر و طیف‌سنجی مادون‌قرمز ارزیابی کردند. هدف آن‌ها رسیدن به درک درستی از شدت خرابی روغن دنده بود. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که ویسکوزیته روغن‌های دنده با افزایش مسافت، افزایش یافته و ساختار میکروسکوپی روغن‌ها با افزایش مسافت تغییر پیدا می‌کند. همچنین خواص تراپولوژیکی آن‌ها زمانی تغییر پیدا می‌کند که ساختار میکروسکوپی روغن تغییر پیدا کند. علت شتاب گرفتن اکسیداسیون روغن‌های دنده به‌دلیل عمل کاتالیزوری آهنی است که در حین رانندگی و افزایش مسافت به روغن اضافه می‌گردد و باعث شدت گرفتن عمل اکسیداسیون می‌گردد. آن‌ها بیان نمودند که خواص تراپولوژیکی روغن‌های مورد بررسی به‌شدت به ساختار میکروسکوپی آن‌ها و به روند کاهش کیفیت روغن بستگی دارد [۴۱].

---

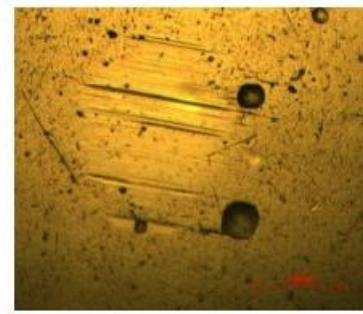
<sup>۱</sup>Hirri

<sup>۲</sup>Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

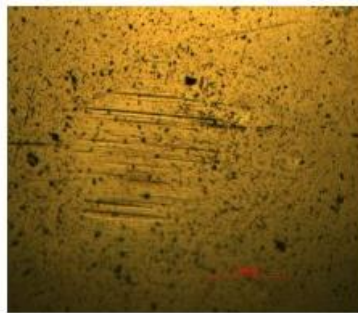
<sup>۳</sup>Zeng



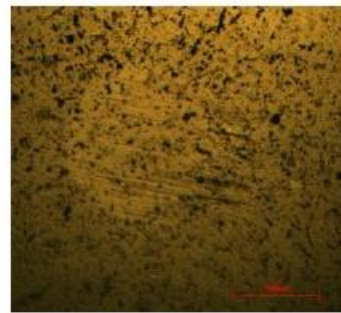
ب) روغن مورد استفاده با ۷۰۰۰ کیلومتر



الف) روغن تازه



د) روغن مورد استفاده با ۴۵۰۰۰ کیلومتر

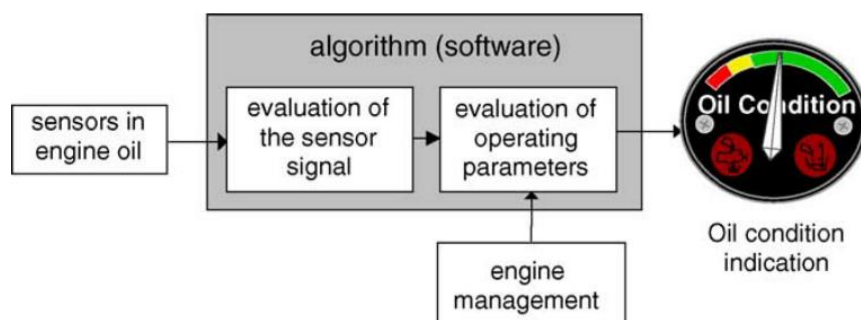


ج) روغن مورد استفاده با ۳۰۰۰۰ کیلومتر

شکل ۲-۴. تصویر نوری از سایش روی بدنه سیلندر [۴۱]

آگوستون<sup>۱</sup> و همکاران با حسگرهای ویسکوزیته، وضعیت روغن موتور را پایش کردند. ویسکوزیته روغن با استفاده از میکرو حسگرهای صوتی اندازه‌گیری شد. این حسگرها، که ساختار الگوریتم کمکی آن در شکل ۲-۵ آورده شده، در مقایسه با ویسکومترهای معمولی از دامنه‌های تشخیص بالایی برخوردار هستند. هم-چنین بیان کردند که روغن موتور حاوی مواد افزودنی با ویسکوزیته اصلاح شده توسط حسگر صوتی قابل اندازه‌گیری نیست [۴۲].

<sup>۱</sup>Agoston



شکل ۲-۵. ساختار الگوریتم کمکی حسگر جهت پایش کیفیت روغن [۴۲]

امرا و همکاران برای ارزیابی عملکرد زمان سرویس موتور، شاخص گرانی و عدد بازی کل را با استفاده از کالیبراسیون چندمتغیری براساس داده‌های طیف‌سنجی مادون قرمز را بدست آوردند. نتایج نشان داد که استفاده از پایش وضعیت براساس کالیبراسیون چندمتغیری، روشی بی نظیر در برآورد پارامترهای مهم روغن موتور بدون نیاز به اجرای آنالیزهای گران قیمت است. هم‌چنین نتایج بدست آمده از آن برای اهداف تعیین شده از دقت خوبی برخوردار می‌باشد [۴۳].

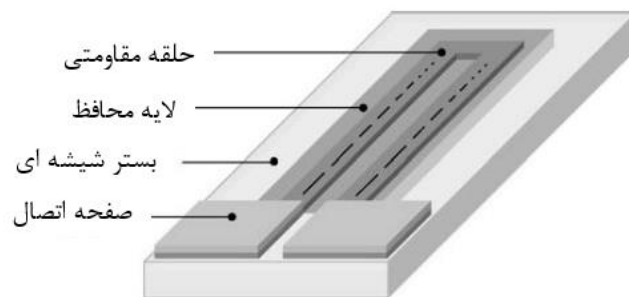
کانتنر و همکاران از یک حسگر هدایت حرارتی مینیاتوری برای نظارت بر آلودگی آب و فرآیندهای تخریب روغن معدنی و هم‌چنین تأثیر هر دو عامل آلودگی که منجر به افزایش هدایت حرارتی می‌شود استفاده کردند و پتانسیل این نوع حسگرها را در زمینه نظارت بر وضعیت روغن برای ارزیابی کارایی به صورت عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. برای این منظور از یک حسگر فیلم داغ<sup>۳</sup> با ساختار مولیبدن فیلم نازک مقاومتی استفاده کردند که عموماً از جنس پلاتین ساخته می‌شود. با عبور یک جریان الکتریکی گذرا، ورق فلزی و محیط اطراف آن گرم می‌شود و با ثبت پاسخ دمایی مربوط به آن، هدایت حرارتی سیال تعیین

<sup>۱</sup>Amer

<sup>۲</sup>Kuntner

<sup>۳</sup>Hot Film Sensor

می‌گردد.. نتایج نشان می‌دهد که پایش وضعیت با استفاده از حسگرهای مینیاتوری می‌تواند در سیستم‌های نظارت بر شرایط روغن مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی مشخص شد که با نازک‌تر کردن بدنه حسگر می‌توان حساسیت سنجش را بالا برد که البته باعث کاهش استحکام مکانیکی حسگر خواهد شد [۴۴].



شکل ۲-۶. طراحی حسگر فیلم داغ [۴۴]

متیو<sup>۱</sup> و همکاران یک حسگر ویسکوزیته دینامیکی با کارکرد دما بالا برای نظارت بر وضعیت روانکاری موتور ارائه کردند که برای اندازه‌گیری تغییرات در ضریب کیفیت از یک پرتو ارتعاشی پیزوالکتریک به دلیل میرایی چسبناک استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که این حسگر تغییرات در ویسکوزیته روانکار ناشی از ورود سوخت، به میزان ۱٪ را نیز تشخیص می‌دهد و قادر به تشخیص خرابی روغن موتورهای مختلف در محدوده دمایی ۲۵ تا ۶۰ درجه سانتیگراد می‌باشد که با استفاده از تیرهای پیزوالکتریک دما بالا، این محدوده برای کاربردهای موتور قابل افزایش خواهد بود [۴۵].

<sup>۱</sup>Matthew

## ۲- ۵- حسگرهای خازنی

زو<sup>۱</sup> و همکاران به پایش وضعیت روغن و ابزارهای تشخیصی و تکنیک‌های پیشگیری و سیستم‌های آن‌ها پرداختند. نتایج نشان داد که هدف نهایی از طراحی سیستم‌های سنجش، رسیدن به پایش وضعیت برخط روغن و پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده روغن می‌باشد. همچنین حسگر خازنی بهترین روش جهت پایش خرابی روغن است. ویسکوزیته سینماتیک یک پارامتر عملکردی خیلی مهم برای منعکس کردن روند تخریب روغن می‌باشد که از ثابت دی‌الکتریک می‌توان در پردازش روند پایش وضعیت برخط روغن استفاده کرد. البته ترکیب روش‌های مختلف تضمین‌کننده پایش وضعیت روغن خواهد بود [۴۶].

رادنوی<sup>۲</sup> و کلیسوان به مطالعه حسگرهای کم‌هزینه پایش وضعیت برای استفاده در آنالیز روغن پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تشخیص زودرس خرابی‌ها با استفاده از حسگرها باعث کاهش هزینه، تشخیص سریع عیوب و ارزیابی صحیح درباره نحوه کاهش کیفیت روغن در پایش می‌شود. حسگر توسعه‌یافته در این اندازه‌گیری، یک حسگر شبکه خازنی است که برای اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک تشکیل شده که می‌تواند تغییرات نسبی کیفیت روغن ناشی از آلاینده‌هایی مانند ذرات آهنی، آلودگی آب و ذرات اسید سولفوریک را با درجه اطمینان بالایی تشخیص دهد [۴۷].

دنیل<sup>۳</sup> و همکاران یک حسگر خازنی برای اندازه‌گیری سطح مایع ارائه دادند که کاملاً با تکنولوژی چاپ جوهر افشان ساخته شده بود و نشان دادند که اندازه‌گیری سطح مایع توسط این حسگر خطی است و هیچ‌گونه هیستریزیسی<sup>۴</sup> در نتایج وجود ندارد. علاوه بر این ساختار بسیار ساده دارد و هزینه تولید انبوه آن بسیار کم است [۴۸].

---

<sup>۱</sup>Zhu

<sup>۲</sup>Raadnui

<sup>۳</sup>Daniel

صالحی و همکاران یک مطالعه تجربی و عددی بر روی تنظیمات الکترودهای مختلف برای اندازه‌گیری جریان دو حالت روغن و آب در الگوها و طرح‌های مختلف انجام دادند که برای این منظور، از شبیه‌سازی المان محدود برای مقایسه تنظیمات الکترودها و مطالعه تجربی استفاده کردند. همچنین برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، یک حسگر خازنی برای اندازه‌گیری ظرفیت روغن و هوا درون یک لوله افقی، طراحی و مونتاژ شد که نتایج تجربی همگرایی خوبی با نتایج شبیه‌سازی داشت [۴۹].

گوان<sup>۱</sup> و همکاران در تحقیقی عملکرد حسگر ظرفیت خازنی و حسگر مادون قرمز در تشخیص زمان اکسیداسیون روغن موتور را از نظر کمی و کیفی مورد بررسی قرار دارند که نتایج حاصل از حسگر ظرفیت خازنی برای نظارت بر کیفیت روغن دقیق‌تر بود و دمای کارکرد تأثیر بیشتری بر داده‌های حسگر ظرفیت خازنی داشت. همچنین با استفاده از کالیبراسیون چند متغیره می‌توان مدل‌های تجزیه و تحلیل را برای نظارت بر درجه خرابی روغن ایجاد کرد [۱۰].

پرز<sup>۲</sup> و همکاران براساس یک نوسانگر حاشیه‌ای برای نظارت بر تلفات دی‌الکتریک در فرکانس‌های بالا (بزرگتر از یک مگاهرتز) یک حسگر کیفیت روغن طراحی کردند که با اندازه‌گیری ضریب گذردهی روان-کننده می‌توانست میزان تخریب روغن را مشخص کند. نتایج حاکی از آن بود که این حسگر بسیار کم هزینه، کارآمد می‌تواند برای یک روانکار خاص کالیبره شده و قابلیت تشخیص کیفیت روغن را فراهم آورد. این بدان معناست که این حسگر می‌تواند جایگزین خوبی برای بسیاری از حسگرهای وضعیت روغن گران-قیمت باشد [۵۰].

کلارک<sup>۳</sup> و همکاران حسگری برای اندازه‌گیری کیفیت روغن طراحی کردند که علاوه بر ثابت دی‌الکتریک، دمای روغن را در شرایط کارکرد واقعی موتور محاسبه می‌کند و از طریق آزمایش‌های تجربی همبستگی بین ثابت دی‌الکتریک روغن و ویسکوزیته سینماتیک آن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که

---

<sup>۱</sup>Guan

<sup>۲</sup>Perez

<sup>۳</sup>Clark

ثابت دی‌الکتریک با افزایش زمان کار موتور کاهش یافته و با افزودن روغن جدید افزایش می‌یابد و ویسکوزیته سینماتیک در طول زمان کار موتور افزایش یافته و با اضافه کردن روغن جدید کاهش می‌یابد. همچنین کاهش عدد بازی کل دلالت بر کاهش مواد افزودنی و کاهش ثابت دی‌الکتریک مربوط به مقدار کم دوده (۰/۱٪) موجود در نمونه روغن می‌باشد. علاوه بر این هیچ‌گونه آلودگی سوختی که دلالت بر افزایش ویسکوزیته داشته باشد شناسایی نشده است [۵۱].

یانگ<sup>۳</sup> و همکاران در تحقیقی نشان دادند که حسگر خازنی ساخته شده می‌تواند تغییرات کیفیت روغن را برای پنج نمونه روغن که حاوی مقادیر متفاوت پودر آهن می‌باشد را تشخیص دهد که برای تعیین زمان مناسب تعویض روغن و پیش‌بینی خرابی موتور مناسب است. منحنی مشخصه دمای حسگر طراحی شده که تقریباً خطی است برای جبران دما در کاربردهای عملی، ایده‌آل می‌باشد [۵۲].

ثن<sup>۳</sup> و همکاران حسگر خازنی ارائه کردند که الکترودهای آن مواد خوردگی‌پذیر شیمیایی بود که با از دست دادن مواد در اثر خوردگی و تغییر در ظرفیت خازنی حسگر می‌توان بر وضعیت روانکار نظارت کرد. نتایج نشان داد که افزایش عدد اسیدی کل، باعث افزایش خوردگی لایه خوردگی‌پذیر شده و باعث تغییر در ظرفیت خازنی حسگر می‌شود [۵۳].

زو و همکاران برای اولین بار در سال ۲۰۱۳ در تحقیقی از ثابت دی‌الکتریک و ویسکوزیته روغن برای نظارت بر وضعیت روغن و پیش‌بینی عمر مفید آن در توربین‌های بادی استفاده کردند که یک مطالعه شبیه‌سازی براساس مدل‌های تأیید شده آزمایشگاهی ارائه شد تا اثربخشی روش توسعه‌یافته را نشان دهد. نتایج حاکی از آن بود که هرگاه از یک حسگر استفاده شود، مقادیر به‌دست آمده از شبیه‌سازی دارای نوساناتی با مقادیر تجربی خواهد بود. اما در صورت استفاده از دو حسگر ویسکوزیته و ثابت دی‌الکتریک، خطای مقادیر بدست آمده از نتایج پیش‌بینی شده در ابتدا کاهش و دقت پیش‌بینی در کل فرآیند بهبود می‌یابد [۵۴].

---

<sup>۳</sup>Total Base Number (TBN)

<sup>۳</sup>Yang

<sup>۳</sup>Sen

آگاروال<sup>۱</sup> و همکاران یک مطالعه امکان‌سنجی در مورد استفاده از اصل ظرفیت خازنی برای تشخیص شرایط سایش غیرطبیعی در روغن‌های صنعتی انجام دادند. برای این کار سه نوع پیکربندی برای صفحات خازن شامل صفحات موازی، شانه‌ای مستطیلی و شانه‌ای دایره‌ای در نظر گرفته شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی نشان‌دهنده تناسب تغییرات ظرفیت خازن با غلظت ذرات سایش می‌باشد [۵۵].

خالد<sup>۲</sup> و همکاران یک حسگر خازنی برای اندازه‌گیری میزان خرابی روغن سرخ‌کردنی در چندین دوره زمانی گرمایشی، با اندازه‌گیری تغییرات ظرفیت الکتریکی آن طراحی کردند. در مجموع ۳۰ نمونه ۱۳۰ میلی‌لیتری از روغن پالم در دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد در مدت زمان ۳۰ ساعت گرم شد و برای هر بازه یک ساعته، یک نمونه از روغن پالم برای آزمایش گرفته می‌شد. نتایج اولیه نشان‌دهنده همبستگی معنی‌داری بین ظرفیت الکتریکی روغن و ویسکوزیته آن بود. هم‌چنین بیان داشتند که حسگر طراحی شده از پتانسیل خوبی از نظر طراحی ساده و ارزان جهت تعیین کیفیت روغن سرخ‌کردنی برخوردار است [۵۶].

شیند<sup>۳</sup> و همکاران برای جلوگیری از شکست موتور، حسگر ساده خازنی را جهت تعیین میزان خرابی روغن از طریق اندازه‌گیری ویسکوزیته آن به‌عنوان یک روش مقرون به‌صرفه برای تعیین کیفیت روغن ارائه دادند. در این تحقیق، روغن موتور کلاس SAE 15W40 که برای خودروهای سبک وزن، کامیون و اتومبیل سواری استفاده می‌شود مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج بدست آمده حاکی از همبستگی تغییرات ویسکوزیته روغن و ظرفیت خازنی می‌باشد که برای دیگر کلاس‌های روغن نیز قابلیت ارتقاء دارد [۵۷].

ریسوس<sup>۴</sup> و همکاران از یک حسگر خازنی برای اندازه‌گیری طول عمر مفید روغن در ترانسفورماتورهای الکتریکی طی یک دوره ۸۰۰ ساعته (دمای ۱۴۰ درجه سانتیگراد) آزمایش پیری مصنوعی روغن استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که رسانایی روغن برحسب زمان آزمایش به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد که

---

<sup>۱</sup>Agarwal

<sup>۲</sup>Khaled

<sup>۳</sup>Shinde

<sup>۴</sup>Risos

مربوط به عدد اسیدی کل<sup>۱</sup> می باشد که مناسب بودن سنسور انتخابی به عنوان ابزار نظارت بر وضعیت روغن در کنترل سلامت ترانسفورماتورها حائز اهمیت است [۵۸].

هان<sup>۲</sup> و همکاران برای نظارت بر سلامت موتور هواپیما، سنسور خازنی استوانه‌ای طراحی کردند. نتایج تجربی حاکی از آن بود که رابطه بین ظرفیت خازنی حسگر و آلودگی‌های روغن تقریباً خطی است و میزان خطاهای ناشی از دما و سرعت جریان روغن در ظرفیت خازنی توسط شبیه‌سازی و آزمایش شناسایی و روش جبران آن بیان شد. هم‌چنین آزمایشات تجربی نشان داد که حسگر خازنی توسعه‌یافته هم به اندازه و هم به تعداد ذرات آب و گرد و غبار موجود در روغن حساس می‌باشد [۵۹].

قاسمی و همکاران یک حسگر ظرفیت خازنی با الکترودهای شانه‌ای طراحی کردند که آلودگی آب، اکسیداسیون و سوخت را شناسایی کند. حسگر به یک مدار هیدرولیک متصل و ظرفیت خازنی روغن موتور بنزینی از طریق LCR Tester خوانده شده است. نتایج بدست آمده بیانگر توانایی این حسگر در شناسایی آلودگی آب و اکسیداسیون در روغن موتور و ضعف این حسگر در تشخیص آلودگی سوخت در روانکار می‌باشد. هم‌چنین تغییرات ضریب دی‌الکتریک با افزایش آب تا ۱/۵٪ به صورت خطی و افزایشی است و بیشتر از آن به صورت غیر خطی می‌باشد [۶۰].

---

<sup>۱</sup> Total Acid Number (TAN)

<sup>۲</sup>Han



# فصل ۳: طراحی سکر خازنی

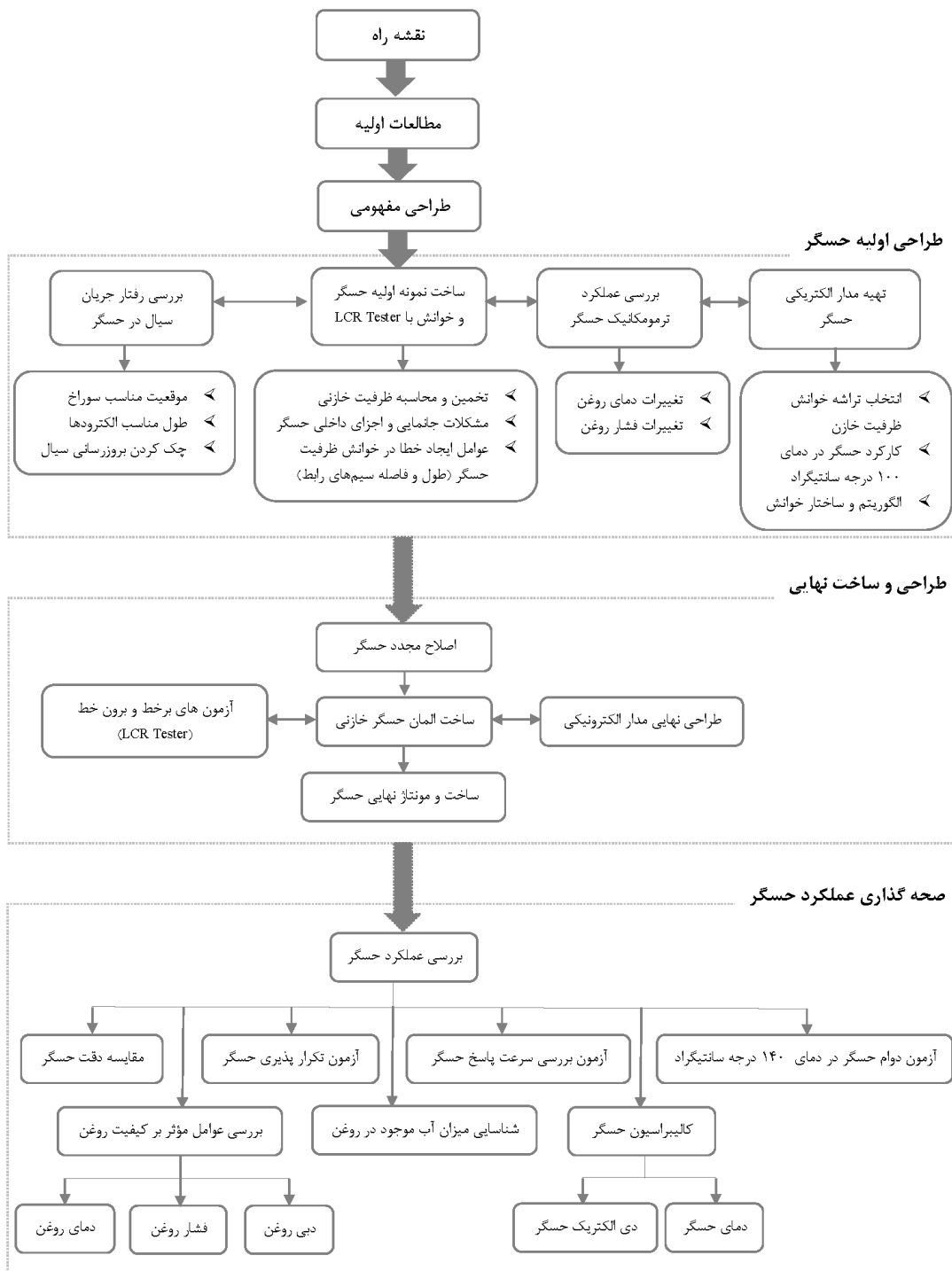
## فصل ۳ طراحی حسگر خازنی

### ۳-۱- مقدمه

حسگرهای کیفیت روغن با استفاده از خاصیت خازنی روغن، جزء تکنولوژی‌هایی است که ضمن هزینه تولید پایین، سطح زیادی از اطلاعات در زمینه پایش روغن در اختیار کاربر قرار می‌دهد. از این رو طرح انتخابی برای طراحی و ساخت در راستای کاربرد صنعتی پایش برخط وضعیت روغن که هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را تا حد زیادی کاهش می‌دهد حسگر ظرفیت خازنی استوانه‌ای می‌باشد.

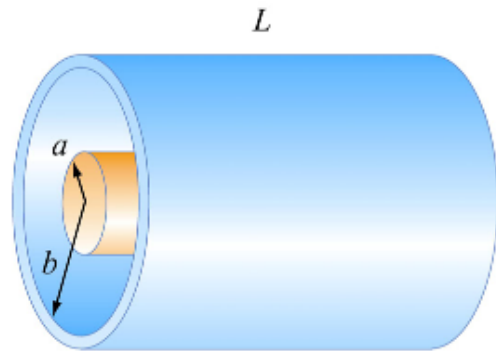
### ۳-۲- اصول کارکرد حسگر خازنی

حسگر کیفیت روغن، خازنی است که دی‌الکتریک آن، روغن عبوری از میان الکترودهای آن می‌باشد. تغییر در ضریب گذردهی خازن عمدتاً به‌دلیل فرآیند اکسیداسیون و تخریب مواد افزودنی است که در اثر آلودگی‌هایی از قبیل آب، ذرات دوده، محصولات احتراق، گلیکول، آهن و ذرات فلزی غیر مخرب تحت تأثیر قرار می‌گیرد. تخریب اکثر روغن‌ها به معنای تولید مولکول‌هایی است که قطبی‌تر از نمونه‌های قبلی است در حالی که روغن پایه متشکل از مولکول‌های بزرگ هیدروکربن است که به‌طور کلی ضعیف هستند. بنابراین اساس کار حسگر خازنی تغییرات ایجاد شده در ضریب دی‌الکتریک روغن عبوری از میان الکترودهای آن است. از طرفی با ثابت ماندن ضریب گذردهی خلأ و همچنین ابعاد هندسی الکترودهای خازن، تغییر در ضریب دی‌الکتریک باعث تغییر در ظرفیت خازنی حسگر می‌شود.



شکل ۳-۱. الگوریتم طراحی و ساخت و صحه گذاری عملکرد حسگر

همان طور که بیان شد خازن مورد مطالعه در این تحقیق خازن استوانه‌ای متشکل از دو لوله رسانا با قطر نابرابر هم‌مرکز شده می‌باشد. شکل ۲-۳ شماتیک خازن استوانه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳. شماتیک خازن استوانه‌ای

ظرفیت خازن استوانه‌ای برابر است با نسبت بار ذخیره شده روی صفحات خازن ( $Q$ ) برحسب کولمب<sup>۱</sup> به ولتاژ اعمال شده ( $V$ ) برحسب ولت<sup>۲</sup>:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (۱-۳)$$

یا به عبارتی ظرفیت خازنی، خازن استوانه‌ای برابر است با [۶۱]:

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

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 = k \epsilon_0 \quad (۳-۳)$$

در رابطه (۲-۳) که برای ظرفیت خازنی  $C$  برحسب فاراد (F) بیان شد،  $\epsilon$  گذردهی مطلق،  $L$  طول خازن استوانه‌ای و  $b$  شعاع استوانه خارجی خازن و  $a$  شعاع استوانه داخلی خازن و در رابطه (۳-۳) که برای

<sup>1</sup> Coulombs (c)

<sup>2</sup> Volts (v)

<sup>3</sup> Dielectric Constant

گذردهی ماده دی‌الکتریک بیان شده،  $\epsilon_0$  گذردهی خلأ که ثابت و برابر  $8.854187817 \times 10^{-12}$  (pF/m)،  $k$  ثابت دی‌الکتریک که برابر است با  $\epsilon_r$  گذردهی نسبی که کمیتی فیزیکی بدون بعد و معادل با نسبت گذردهی ماده دی‌الکتریک به گذردهی خلأ است. این نسبت اغلب به عنوان ثابت دی‌الکتریک ماده شناخته می‌شود. گذردهی نسبی برای خلأ یک است، اما برای سایر مواد دی‌الکتریک این مقدار بزرگتر از یک است و به فرکانس میدان الکتریکی بستگی دارد. مقدار این گذردهی نسبی با توجه به ثابت ماندن ولتاژ اعمالی به دو سر خازن به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$C = \frac{2\pi k \epsilon_0 L}{\ln(b/a)} = kC_0 \quad (4-3)$$

$$k = \frac{C}{C_0} \quad (5-3)$$

$C_0$  ظرفیت خازنی یک خازن در خلأ (بدون گذردهی نسبی) و  $C$  ظرفیت خازنی یک خازن پر شده با یک ماده با گذردهی نسبی ( $\epsilon_r$ ) می‌باشد.  $\epsilon_r$  به جنس ماده دی‌الکتریک بستگی دارد. برخی ثوابت دی‌الکتریک متداول در جدول ۱-۳ آورده شده است.

جدول ۱-۳. ثوابت دی‌الکتریک مواد مختلف

حالت	نوع	ثابت دی‌الکتریک ( $k$ )
جامد	تفلون	۲/۱۰
مایع	آب	۸۰
	روغن	۱/۸ ... ۲/۱
گاز	هوا	۱/۰۰۰۵۹

هم‌چنین اگر چند خازن استوانه‌ای به صورت موازی با قطر استوانه‌های متفاوت به هم متصل باشند ظرفیت معادل خازن را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$C_T = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n \frac{2\pi k \epsilon_0 L_i}{\ln(b_i/a_i)} \quad (6-3)$$

که با استفاده از فرمول (۱) ظرفیت معادل حسگر خازنی به دست می آید.

$$C_T = 2\pi\epsilon_0 \left( \frac{k_1 L_1}{\ln(b_1/a_1)} + \frac{k_2 L_2}{\ln(b_2/a_2)} + \dots \right) \quad (7-3)$$

### ۳-۳- تئوری ساخت حسگر خازنی

با توجه به سیر مطالعات انجام شده و بررسی مقالات مختلف و نتایج آن‌ها طرح اولیه برای ساخت حسگر ارائه گردید. این حسگر متشکل از دو استوانه هم‌مرکز به‌عنوان الکترودهای خازن و یک استوانه تغلونی برای هم‌بندی و ایجاد عایق در میان این دو استوانه رسانا می‌باشد. در ادامه سوراخ‌هایی در چهار طرف و پایین این حسگر، به‌گونه‌ای تعبیه شده که با قرار گرفتن این حسگر در مسیر روغن، روغن در تمام فضای خالی میان این دو استوانه جریان پیدا کند. طی چند مرحله ابعاد هندسی و همچنین مکانیزم ظاهری طرح برای افزایش دقت و از بین بردن پارامترهای ایجاد خطا در ظرفیت خازنی بهبود داده شده است. همچنین پارامترهای ایجاد خطا در ظرفیت خازنی شناسایی و توسط نرم افزار المان محدود آباکوس<sup>۱</sup> میزان تأثیرگذاری هر کدام از این پارامترها پیش‌بینی شده است. سپس برای بررسی جریان سیال در میان این دو استوانه و همچنین محاسبه زاویه قرارگیری سوراخ‌های حسگر با جهت جریان روغن تحلیل‌هایی در نرم افزار شبیه‌سازی انسیس<sup>۲</sup> صورت گرفته است.

### ۳-۴- طرح‌های اولیه ساخت حسگر

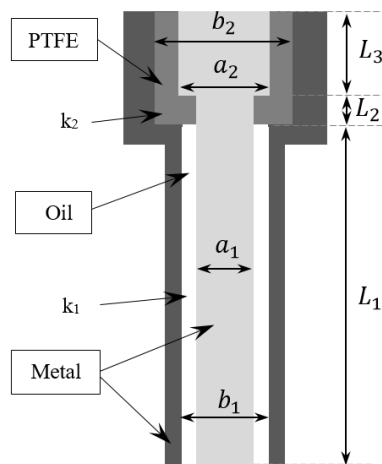
طرح کلی ساخت حسگر همان‌طور که در بخش‌های قبل به آن اشاره شد از دو استوانه هم‌مرکز با قطرهای مختلف که سیال مورد آزمایش با قرار گرفتن در میان این دو استوانه (الکترودهای خازن) دی‌الکتریک

---

<sup>۱</sup>Abaqus

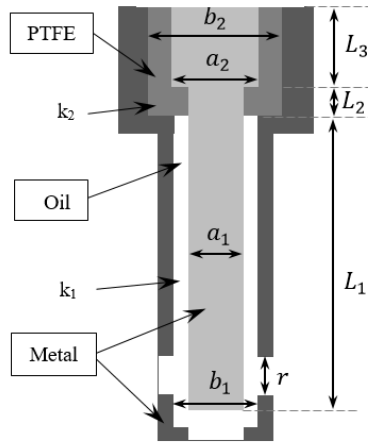
<sup>۲</sup>Ansys

خازن را تشکیل می‌دهد. ورود هر گونه آلودگی و یا کاهش مواد افزودنی باعث تغییر ثابت دی‌الکتریک و هم‌چنین تانژانت دلتا می‌شود که با اندازه‌گیری این پارامترها می‌توان بر وضعیت سلامت روغن موتور نظارت کرد. در شکل ۳-۳ طرح اولیه ساخت حسگر ظرفیت خازنی نشان داده شده است که سطح مقطع تمام قسمت‌ها دایره‌ای شکل در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۳. شماتیک برش خورده طرح اولیه حسگر ظرفیت خازنی

طرح اولیه حسگر خازنی با توجه به تراشکاری غیرپیچیده دارای مشکل عدم اطمینان از چرخش سیال در ناحیه بالای خازن به دلیل ورود روغن از قسمت زیرین حسگر می‌باشد. در ادامه برای کاهش خطای ذکر شده طرح ثانویه‌ای ارائه گردید (شکل ۴-۳). در این طرح با ایجاد سوراخ‌هایی در چهارطرف استوانه خارجی و هم‌چنین ایجاد یک پله در قسمت زیرین حسگر برای جلوگیری از خروج آنی سیال از این ناحیه، مشکل عدم اطمینان از چرخش سیال در ناحیه بالای خازن تا حد زیادی مرتفع گردید.



شکل ۳-۴. شماتیک برش خورده طرح ثانویه حسگر ظرفیت خازنی

برای محاسبه ظرفیت خازنی مطلوب برای حسگر خازنی می‌توان ظرفیت خازنی طرح ثانویه حسگر را با توجه به رابطه (۳-۶) و (۳-۷) از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 \quad (۳-۸)$$

$$C_T = 2\pi\epsilon_0 \left( \frac{k_1 L_1}{\ln(b_1/a_1)} + \frac{k_2 L_2}{\ln(b_2/a_1)} + \frac{k_2 L_3}{\ln(b_2/a_2)} \right) \quad (۳-۹)$$

$k_1$  و  $k_2$  به ترتیب ثابت‌های دی‌الکتریک روغن و تفلون هستند. ظرفیت‌های خازنی براساس طول و قطر استوانه‌ها در جدول ۳-۲ آمده است. براساس داده‌های این جدول ظرفیت مطلوب حسگر خازنی ساخته شده در آخرین ردیف جدول بیان شده است.

جدول ۳-۲. ظرفیت خازنی براساس طول و قطر استوانه‌ها

درصد مؤثر ظرفیت روغن	ظرفیت کل خازن (C <sub>T</sub> )	ثابت دی الکتریک نفنون (k <sub>2</sub> )	ثابت دی الکتریک روغن (k <sub>1</sub> )	قطر استوانه داخلی دوم (d <sub>2</sub> )	قطر استوانه داخلی اول (d <sub>1</sub> )	قطر استوانه خارجی دوم (b <sub>2</sub> )	قطر استوانه خارجی اول (b <sub>1</sub> )	طول استوانه سوم (L <sub>3</sub> )	طول استوانه دوم (L <sub>2</sub> )	طول استوانه اول (L <sub>1</sub> )	پارامتر
%	pf	-	-	m	m	m	m	m	m	m	واحد
۶۹	۵/۸۷۴	۲/۰۵	۲/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۱۷	۱
۷۱	۶/۳۵۳	۲/۰۵	۲/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۱۹	۲
۷۳	۶/۸۳۱	۲/۰۵	۲/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۲۱	۳
۷۵	۷/۳۰۹	۲/۰۵	۲/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۲۳	۴
۷۷	۷/۷۸۷	۲/۰۵	۲/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵	۵
۸۰	۹/۳۲۰	۲/۰۵	۲/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۵۵	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵	۶
۸۴	۱۱/۶۰۰	۲/۰۵	۲/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵	۷
۸۸	۱۵/۳۷۹	۲/۰۵	۲/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۶۵	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵	۸
۹۲	۲۲/۹۰۲	۲/۰۵	۲/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۷	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵	۹
۹۰	۱۸/۳۹۱	۲/۰۵	۲/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۶۷۵	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵	۱۰

برای اطمینان از ظرفیت بدست آمده در محاسبات نرم‌افزاری نمونه آزمایشگاهی این طرح ساخته شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۳-۵ نمونه اولیه ساخته شده از طرح ثانویه حسگر خازنی را نشان می‌دهد.

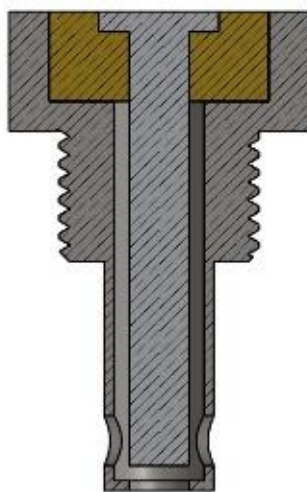


شکل ۳-۵. نمونه اولیه ساخته شده از طرح ثانویه حسگر خازنی

از مشکلات این طرح نیز می‌توان به عدم اطمینان جهت هم‌مرکز بودن دو استوانه داخلی و خارجی، تأثیر زیاد عایق بین دو استوانه بر ظرفیت خازنی حدود ۳۰ درصد بیان کرد. به همین علت، پیشنهاداتی جهت بهبود فرآیند ساخت و کاهش خطاهای ناشی از عوامل دیگر ارائه گردید که در پیوست ۱ به صورت مفصل بیان شده است.

### ۳-۵- طرح نهایی جهت ساخت حسگر

حسگر خازنی با طرح هندسه استوانه‌ای الکترودها به گونه‌ای طراحی شده که تنها قسمتی از روغن عبوری به داخل آن وارد شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد که حسگر روغن در هر لحظه بروزرسانی می‌شود. هندسه حسگر به گونه‌ای است که ظرفیت خازنی آن به حدی افزایش نمی‌یابد که تغییرات اندک کیفیت روغن به وضوح مشخص باشد. برای همین منظور از تجهیزات خاص جهت اندازه‌گیری ظرفیت خازن که دقت خوانش بالایی دارد استفاده می‌شود. از طرفی بایستی ضخامت عایق موجود میان دو استوانه را تا حد امکان افزایش داد تا بر روی نتایج خروجی اثرگذار نباشد.

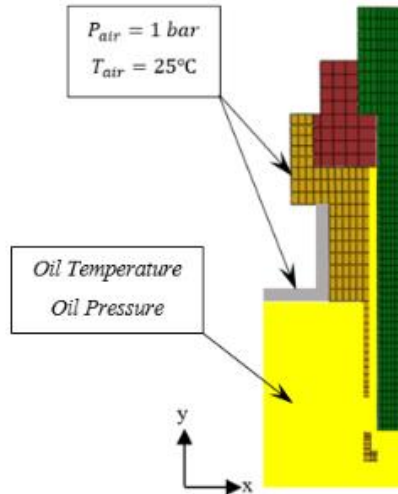


شکل ۳-۶. شماتیک برش خورده طرح تصحیح شده حسگر ظرفیت خازنی

طرح این حسگر می‌بایست به گونه‌ای باشد که در شرایط دما و فشار روغن درون موتور کارایی لازم را داشته باشد. از طرفی روغن با دما و فشار بالا وارد حسگر می‌شود و ممکن است باعث اعوجاج، پیچش و یا نزدیک شدن استوانه‌های حسگر به یکدیگر شده که این خود می‌تواند از عوامل ایجاد خطا در ظرفیت خازنی حسگر باشد. بنابراین می‌بایست تغییرات ناشی از دما و فشار روغن در محدوده کارکرد موتور که موجب تغییر در ظرفیت خازنی می‌شود را شناسایی کرده و از اثرات ناشی از این تغییرات در ظرفیت خازنی تا حد امکان کاست. به همین جهت برای جلوگیری از استفاده زیاد مواد اولیه و همچنین اطمینان از صحت اندازه‌گیری‌های بدست آمده عوامل ایجاد خطا در طرح نهایی توسط نرم‌افزار المان محدود لحاظ گردیده و میزان تأثیرگذاری هر یک از عوامل خطا بر روی نتایج ظرفیت خازنی حسگر بررسی خواهد شد.

### ۳-۶- شبیه‌سازی المان محدود عوامل ایجاد خطا

برای شبیه‌سازی فرآیند از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شد. هدف از شبیه‌سازی فرآیند، بررسی رفتار قطعات مختلف حسگر تحت تأثیر تغییرات دما و فشار روغن که از عوامل احتمالی ایجاد خطا در ظرفیت خازن در شرایط کارکرد موتور می‌باشد و می‌بایست تغییرات ظرفیت خازنی در محدوده مشخصی باقی بماند. بنابراین نیاز است که حسگر در شرایط کارکرد موتور مورد تجزیه و تحلیل عددی قرار بگیرد. با توجه به نسبت بالای طول به قطر استوانه‌های حسگر، مدل کرنش صفحه‌ای برای تحلیل عددی مورد استفاده قرار گرفت. در این مدل از تغییرات بسیار ناچیز در راستای طول حسگر چشم‌پوشی شده و مقطع حسگر در فواصل مکانی مختلف مورد تحلیل قرار می‌گیرد. با استفاده از المان محدود یک چهارم هندسه حسگر گسسته‌سازی شد. المان CPE20RT پیوسته کرنش صفحه‌ای خطی و از نوع کوپل دما-جابجایی می‌باشد که همگرایی شبکه‌بندی مورد استفاده در نرم‌افزار بررسی شد. در شکل ۳-۷ المان‌بندی قطعات مختلف حسگر اعم از هسته مرکزی و عایق تفلونی و استوانه خارجی به همراه شرایط مرزی نشان داده شده است.



شکل ۳-۷. المان بندی یک چهارم قطعات حسگر در نرم افزار المان محدود با شرایط مرزی

استوانه خارجی حسگر بر روی مسیر عبور روغن نصب می شود که در تمام جهات مقید می گردد. برای اعمال شرایط دمایی در ابتدا برای کل اجزای حسگر دمای اولیه ۲۵ درجه سانتیگراد که در یک گام دمای روغن عبوری موتور به مقدار مشخص افزایش می یابد و فشار در تمام مراحل انجام فرآیند ثابت در نظر گرفته می شود. خواص فیزیکی هر یک از اجزای حسگر برخط کیفیت روغن در جدول ۳-۳ ارائه شده است.

جدول ۳-۳. مشخصات فیزیکی اجزای حسگر برخط کیفیت روغن

فولاد زنگ نزن	تفلون	خاصیت
۷/۹	۲/۲	چگالی ( $\text{g/cm}^3$ )
۱۹۳	۰/۵	مدول یانگ (GPa)
۰/۲۹	۰/۴۶	نسبت پواسون
$۱۷^{-۶}$	$۱۰^{-۶}$	ضریب انبساط گرمایی ( $1/^\circ\text{C}$ )
۱۶/۲	۰/۲۴	رسانایی گرمایی ( $\text{W/m } ^\circ\text{C}$ )
۰/۵	۱/۴	گرمای ویژه ( $\text{J/ kg } ^\circ\text{C}$ )

در این بخش باید به این مسئله توجه کرد که واحد در نظر گرفته شده برای این مقادیر باید از یک سیستم اندازه‌گیری سازگار تبعیت کند. هم‌چنین به دلیل هم‌بندی حسگر و ثابت نگه داشتن قطعات حسگر درون هم، ضریب اصطکاک تأثیری ندارد.

برای بررسی اثر پارامترهای خطا روی ظرفیت خازنی از تغییرات فاصله بین الکترودهای استوانه‌ای خازن بهره گرفته و از تغییرات بسیار کم طول استوانه خازنی چشم‌پوشی می‌شود. به‌همین دلیل برای تحلیل ساده‌تر از نسبت زیر استفاده می‌شود.

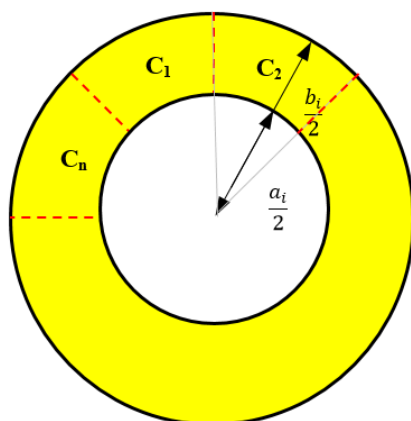
$$C \propto \frac{1}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (10-3)$$

پس

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\ln(b_0/a_0)}{\ln(b/a)} \quad (11-3)$$

در رابطه (۱۱-۳)،  $C_0$  ظرفیت خازنی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و فشار ۱ بار و  $C$  ظرفیت لحظه‌ای حسگر ظرفیت خازنی می‌باشد.

برای بدست آوردن ظرفیت خازنی لحظه‌ای توسط نرم‌افزار المان محدود، المان‌های موجود روی سطوح استوانه‌های خازنی بایستی به  $n$  قسمت مساوی تقسیم‌بندی شوند (شکل ۸-۳).



شکل ۳-۸. نحوه تقسیم بندی المان‌های متقابل روی سطوح استوانه‌ای

ظرفیت خازنی حاصل از این المان‌های مربعی که روبروی هم واقع شده‌اند به‌عنوان یک قسمت از ظرفیت خازنی کل حسگر در نظر گرفته می‌شود. پس ظرفیت خازنی به‌صورت انتگرالی در سطح تغییر شکل الکترودهای خازن و در راستای طول حسگر محاسبه می‌شود.

$$C_{Total} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{K_{oil} \epsilon_0 L_1}{\ln(b_n/a_n)} \quad (۱۲-۳)$$

### ۳-۶-۱- بررسی اثر دما و فشار بر ظرفیت خازنی حسگر با استفاده از طراحی

#### آزمایشات

در شرایط کارکرد واقعی موتور عواملی که می‌توانند باعث به‌وجود آوردن خطا در حسگر شوند، عبارتند از تغییرات دما و فشار روغن، که باید تأثیر این پارامترهای خطا در ظرفیت خازن مورد بررسی قرار بگیرد. براساس داده‌های تجربی، محدوده پارامترهای انتخاب شده ورودی طبق جدول ۳-۴ در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۳-۴. محدوده تغییرات پارامترها در طراحی آزمایش‌ها [۶۱]

سطح					پارامترها
۱/۶۸۲	۱	۰	-۱	-۱/۶۸۲	
۵/۶۲۱	۵	۳/۵	۲	۱/۳۷۹	فشار روغن (bar)
۱۱۲/۴۲۶	۱۰۰	۷۰	۴۰	۲۷/۵۷۴	دمای روغن (°C)

در طراحی آزمایش‌ها از روش سطح پاسخ<sup>۱</sup> استفاده شده است. این روش با استفاده از تخصیص پارامترهای ورودی در ۵ سطح، امکان ارائه کامل معادلات درجه دوم به همراه بررسی برهم‌کنش پارامترها را در اختیار قرار می‌دهد. تابع روش سطح پاسخ برای دو متغیر به صورت زیر است؛

$$Y = A_0 + A_1x_1^2 + A_2x_2^2 + A_3x_1 + A_4x_2 + A_5x_1x_2 + \varepsilon \quad (۳-۱۳)$$

که در این معادله  $Y$  به عنوان پاسخ و  $x_1, x_2$  به عنوان متغیرهای ورودی فرآیند،  $A_0$  ضریب ثابت،  $A_1$  و  $A_2$  ضرایب مرتبه دو،  $A_3$  و  $A_4$  ضرایب خطی و  $A_5$  ضریب تأثیر متقابل<sup>۲</sup> پارامترهای ورودی و  $\varepsilon$  به عنوان خطا در نظر گرفته می‌شود.

### ۳-۷- شبیه‌سازی جریان سیال درون حسگر

یکی از مسائلی که باعث افزایش خطای حسگر می‌شود عدم جابجایی سیال در نواحی انتهایی حسگر در تماس با روغن می‌باشد که برای این امر باید تا حد امکان سرعت سیال در این نواحی افزایش یابد. برای افزایش سرعت، ابعاد سوراخ‌های جانبی حسگر ( $r$ )، فاصله قرارگیری دو الکتروستوانه‌ای حسگر نسبت به هم و همچنین جهت قرارگیری سوراخ‌های جانبی با جهت جریان سیال ( $\theta$ ) حائز اهمیت است. در حقیقت، زمانی که حسگر در مسیر جریان سیال قرار می‌گیرد آیا دبی و سرعت جریان ورودی از ناحیه سوراخ‌های

<sup>۱</sup>Response Surface Method (RSM)

<sup>۲</sup>Interaction

جانبی که هم‌راستا با جهت جریان واقع شده است، به حد کافی زیاد است که سیالی که در ناحیه انتهایی قرار دارد جابجا شود؟ از دیگر عواملی که بر سرعت جریان در این ناحیه تأثیرگذار می‌باشد طول خازن ( $L$ ) درگیر در محاسبات است که اگر طول خازن از یک میزان مشخص، بیش‌تر باشد سیال در ناحیه انتهایی امکان جابجایی ندارد و اگر طول خازن از یک میزان کم‌تر باشد با وجود جریان خوب سیال، ظرفیت خازن مطلوب به دست نمی‌آید. همچنین اگر قطر استوانه داخلی ( $a$ ) از یک مقدار مشخص کم‌تر یا بیش‌تر باشد سبب عدم جریان سیال یا اعوجاج استوانه داخلی به دلیل فشار سیال و کاهش استحکام مکانیکی استوانه داخلی می‌شود. پس سرعت جریان سیال در حسگر ظرفیت خازنی را می‌توان با تعریف یک مسئله بهینه‌سازی<sup>۱</sup> تحلیل کرد.

### ۳- ۷- ۱- بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در سرعت جریان سیال

براساس مطالبی که مطرح شد برای تعریف یک مسئله بهینه‌سازی، یک سری متغیرهای طراحی وجود دارد که در جدول ۳-۵ به آن اشاره شده است.

جدول ۳-۵. متغیرهای طراحی در مسئله بهینه‌سازی

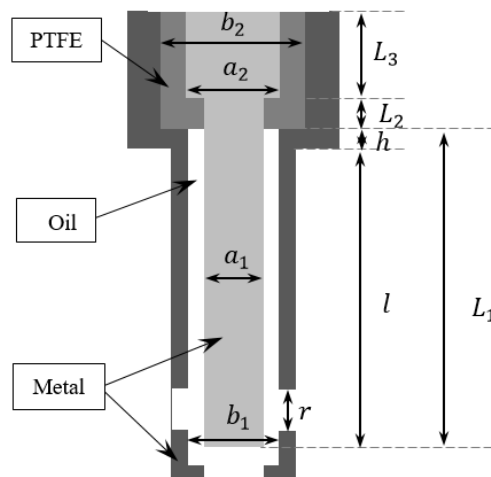
$\theta(deg)$	$r(m)$	$a(m)$	$L(m)$	پارامترها
۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۶۳۴	۰/۰۱۷	کمینه
۴۵	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۸	۰/۰۵۰	بیشینه

<sup>۱</sup>Optimization

تابع هدف<sup>۱</sup> در این مسئله بهینه‌سازی حساسیت حسگر می‌باشد که شامل درصد تأثیر ظرفیت خازنی روغن به ظرفیت خازنی کل حسگر و پاسخ فرکانسی حسگر یا سرعت متوسط ذرات سیال در ناحیه انتهایی حسگر ( $V_m$ ) می‌باشد.

$$f = \left( \frac{C_{oil}}{C_T} \times 100 \right) + V_m \quad (۱۴-۳)$$

یکی از پارامترهایی که در این مسئله بهینه‌سازی تأثیرگذار است ظرفیت خازنی روغن می‌باشد. از طرفی اگر ضخامت ناحیه زیر تفلون در استوانه خارجی ( $h$ ) از یک مقدار مشخص کمتر باشد سبب کاهش استحکام مکانیکی استوانه خارجی می‌گردد پس می‌توان از تغییرات ضخامت ناحیه زیر تفلون در استوانه خارجی که در ظرفیت خازنی روغن مؤثر می‌باشد توسط یک قید در این مسئله عنوان کرد. برای درک بیشتر مسئله پارامتر  $h$  در شماتیک برش خورده طرح حسگر نشان داده شده است.



شکل ۳-۹. نمایش پارامتر  $h$  در شماتیک برش خورده طرح حسگر

براساس بررسی‌های صورت گرفته ضخامت این ناحیه برای کاهش تأثیر عایق میان الکترودها در ظرفیت کل، بایستی از ۵ میلیمتر کمتر نباشد.

$$l = L_1 - h \quad (۱۵-۳)$$

از طرفی

$$h \geq 5 \quad (۱۶-۳)$$

طبق رابطه (۱۸-۳) و (۱۹-۳) نتیجه می‌شود که

$$L_1 - l \geq 5 \quad (۱۷-۳)$$

هم‌چنین ابعاد حسگر بایستی به گونه‌ای باشد که ظرفیت حسگر خازنی کل تقریباً ۱۷ پیکوفاراد باشد.

براساس روابط ذکر شده و داده‌های جدول ۳-۵ نتیجه می‌شود که

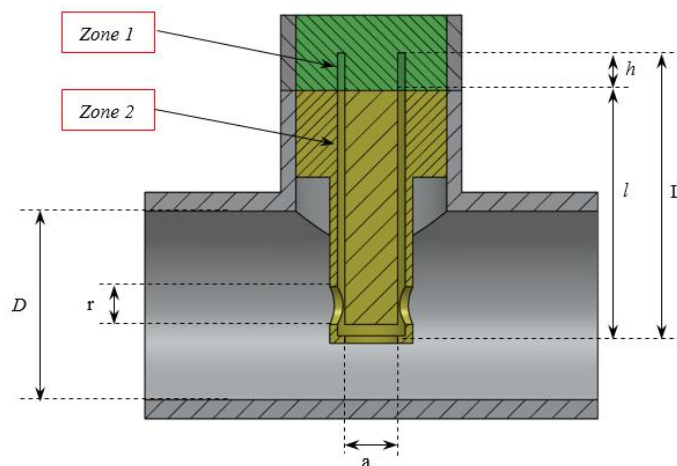
جدول ۳-۶. پارامترهای بهینه شده براساس قید  $h$

$\theta(deg)$	$r(m)$	$a(m)$	$L(m)$	پارامترها
۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۶۳۹۵	۰/۰۳۷	کمینه
۴۵	۰/۰۰۵۵	۰/۶۹۲۷۰۰	۰/۰۵۰	بیشینه

### ۳- ۷- ۲ - تحلیل سرعت جریان سیال توسط نرم‌افزار

اطلاعات دقیق در مورد یک فرآیند معمولاً توسط اندازه‌گیری عملی به دست می‌آید. نکته مهم و اشکال اساسی این روش این است که در بسیار از موارد ساخت نمونه آزمایشگاهی پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد. به همین دلیل با تحلیل نرم‌افزاری نمونه تا حد زیادی می‌توان رفتار سیال را شبیه‌سازی نمود. نتایج نهایی یک تحلیل نرم‌افزاری به مدل ریاضی و هم‌چنین روش مورد استفاده برای حل آن بستگی دارد. چه بسا با به کار بردن یک مدل ریاضی نامناسب، یک روش عددی ایده‌آل نتایج بی‌ارزشی تولید کند [۶۲].

برای انجام تحلیل سرعت جریان سیال ابتدا مدل حسگر مورد نظر و راهگاه‌های ورود روغن به داخل حسگر با استفاده از نرم‌افزار سالی‌دورک طراحی شد. سپس تحلیل سرعت جریان سیال درون حسگر توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی جریان انسیس صورت گرفت. ذکر این نکته ضروری است که به علت حجم سنگین محاسبات، برای تحلیل در نرم‌افزار مذکور از شماتیک برش خورده نشان داده شده در شکل ۳-۱۰ استفاده شده است. در این شماتیک سیال مورد بررسی به دو بخش مجزا جهت تحلیل سرعت متوسط ذرات در ناحیه انتهایی حسگر (Zone 1) تقسیم‌بندی شده است و قطر لوله‌ای که حسگر روی آن نصب شده و روغن از آن عبور می‌کند (D)، ۲۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است.



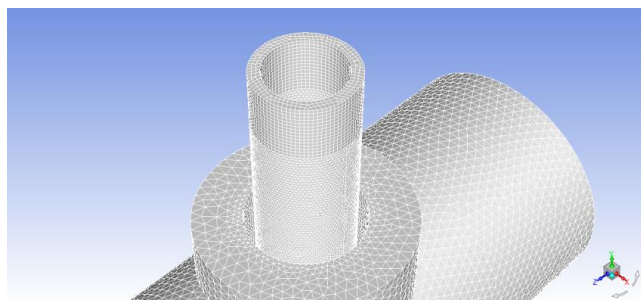
شکل ۳-۱۰. شماتیک برش خورده طرح تحلیلی حسگر در نرم‌افزار انسیس

همان‌طور که در شکل ۳-۱۰ مشاهده می‌شود طول قسمت اول (Zone 1) برابر  $h$  است و طول قسمت دوم (Zone 2) برابر  $l$  می‌باشد.

<sup>1</sup> Solid works

<sup>2</sup> Ansys fluent

به طور کلی یک شبکه بندی خوب و با کیفیت، یکی از مهم ترین مراحل تحلیل یک مدل می باشد که تأثیر مستقیم در به جواب رسیدن مدل تحلیلی و همچنین دقت انجام محاسبات و پاسخ نهایی تحلیل دارد. عوامل مختلفی در کیفیت یک المان بندی مناسب مؤثرند که از جمله به تعداد شبکه بندی المان ها در یک بخش و نوع شبکه بندی انتخاب شده از نظر شکل و سازماندهی می توان اشاره کرد. به همین جهت سعی شده که شبکه بندی المان ها در بخش اول (Zone 1) تا حد امکان مناسب باشد.



شکل ۳-۱۱. شبکه بندی بخش ها توسط نرم افزار انسیس

پس از اصلاح ساختاری شبکه بندی ها، برای حل جریان سیال از مدل حل دو معادله ای  $k - \epsilon$  استفاده شده است. دلیل انتخاب این روش، دقت مناسب در شبیه سازی اغتشاشات موجود در جریان سیال است. در قدم بعد می بایست نوع سطوح برای اعمال شرایط مرزی برای حل مسئله تعریف شود. در شرط مرزی ورودی از Velocity inlet استفاده شده است. در این شرط سرعت ورودی سیال را برابر ۵ متر بر ثانیه (m/s) و برای شرط مرزی خروجی از Pressure outlet بهره گرفته شده که فشار نسبی سیال در خروجی لوله تعبیه شده ۰/۶ مگا پاسکال (MPa) در نظر گرفته شده است. همچنین برای اعمال شرایط مرزی ویژگی سیال، چگالی روغن برابر ۸۱۳ کیلوگرم بر متر مکعب ( $\text{Kg/m}^3$ ) و ویسکوزیته آن ۰/۰۱۱۸۸ کیلوگرم بر متر در ثانیه ( $\text{Kg/m-s}$ ) در نظر گرفته شد [۶۱].

### ۳-۸- فرآیند ساخت حسگر

پس از تحلیل های انجام شده در بخش های قبل و صحنه گذاری طرح نهایی و هندسه کلی حسگر و همچنین تصحیح ابعادی آن، حسگر مورد نظر به همراه برد خوانش ظرفیت آن ساخته شد.

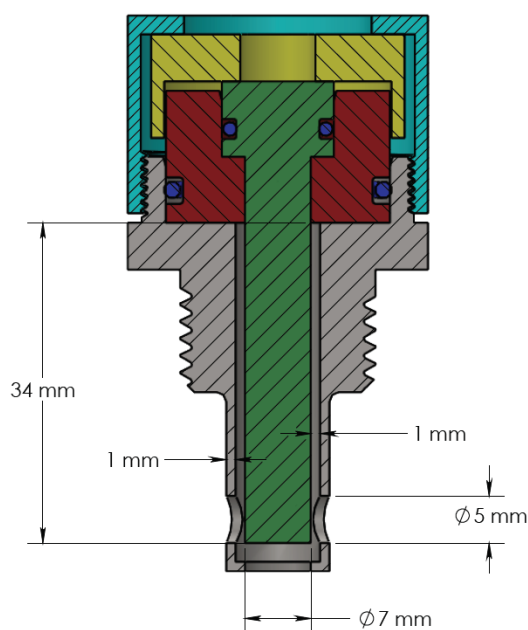
#### ۳-۸-۱- مکانیک حسگر

حسگر نهایی جهت فرآیند ساخت از سه بخش اصلی شامل الکترودهای استوانه ای از جنس فولاد زنگ نزن، عایق ها و پوسته نگهدارنده اجزای حسگر تشکیل شده است. ضخامت الکترودهای بیرونی یک میلی متر و شامل چهار سوراخ متقارن در دیواره جانبی استوانه جهت جریان مناسب روغن در تمام طول استوانه که در فاصله ای بهینه از سر آن تعبیه شده می باشد. قطر استوانه داخلی ۷ میلی متر در نظر گرفته شده است که توسط عایق تعبیه شده میان این دو الکترودها، در فاصله یک میلی متری درون الکترودهای بیرونی مقید شده است. این قطعات به صورت جذب درون هم قرار گرفته اند و برای آب بندی قطعات سرهم بندی شده از دو عدد اورینگ وایتون<sup>۲</sup> به دلیل وجود شرایط دمایی بالای ۱۰۰ درجه سانتیگراد درون موتورهای درونسوز استفاده شده است. شکل ۳-۱۲ طرحواره برش خورده طرح نهایی حسگر جهت فرآیند ساخت را نشان می دهد. لیست قطعات و نقشه تکمیلی حسگر به همراه جزئیات بیشتر هر یک از اجزای حسگر در پیوست ۲ آمده است.

---

<sup>۱</sup> Steel 304

<sup>۲</sup> Viton



شکل ۳-۱۲. طرحواره برش خورده طرح نهایی حسگر جهت فرآیند ساخت

همچنین برای مقاومت این قطعات سرهم بندی شده در برابر فشار روغن موجود درون این موتورها از یک قطعه نگهدارنده که توسط یک عایق از جنس PTFE، از هسته مرکزی حسگر جدا شده است. این عایق علاوه بر جداسازی دو هسته از همدیگر به دلیل ضخامت ۵ میلیمتری که براساس تحلیل‌های انجام شده برای آن در نظر گرفته شده، میزان تأثیرگذاری ظرفیت ایجاد شده توسط این قطعه نگهدارنده در ظرفیت کل خازن را بسیار ناچیز می‌کند. قطعات مختلف حسگر توسط رزوه‌هایی که در دو انتهای این درپوش نگهدارنده و الکتروود بیرونی تعبیه شده سرهم بندی می‌شود. علاوه بر این رزوه‌هایی در میانه استوانه بیرونی جهت اتصال بدنه حسگر به مسیر یا مخزن روغن در نظر گرفته شد. برای اتصال الکتروودها به دستگاه LCR Tester از اتصالات ثابت، به دلیل از بین بردن اثر سیم‌های رابط در ظرفیت خازنی کل استفاده شده است. اجزای تشکیل دهنده حسگر ظرفیت خازنی شامل الکتروودهای استوانه‌ای، عایق‌های PTFE، اورینگ‌های وایتون و درپوش نگهدارنده می‌باشد که در شکل ۳-۱۳ نمایش داده شده است.



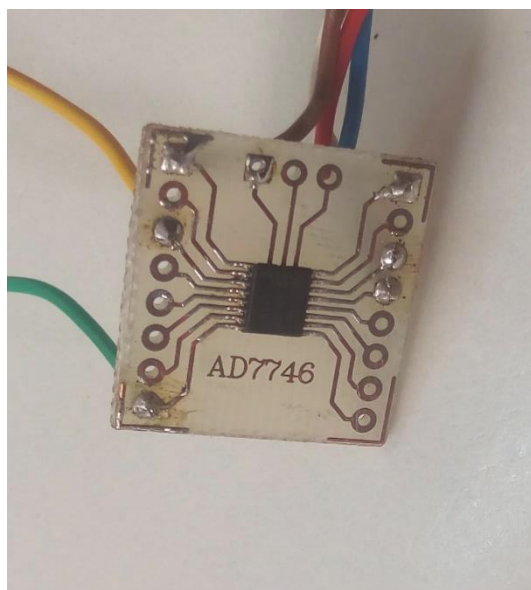
شکل ۳-۱۳. طرح انفجاری قطعات مکانیکی حسگر

### ۳- ۸- ۲- الکترونیک حسگر

بُرد خوانش ظرفیت خازنی حسگر برای جلوگیری از ایجاد خطا در خوانش اطلاعات خروجی و عدم تأثیرپذیری از طول سیم رابط بین الکترودها و این مدار، در فاصله نزدیک به الکترودها درون پوسته نگهدارنده که در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده، ثابت نگه داشته شده است. برای ساخت این بُرد و خوانش ظرفیت خازن در محدوده ۱۷ تا ۲۱ پیکوفاراد از یک مبدل دیجیتال ظرفیت خازنی مدل AD7746 بهره گرفته شد که امکان خوانش ظرفیت خازن را تا هزارم پیکوفاراد با دقت یک فانتوفاراد فراهم می‌آورد. جدول مشخصات این آی‌سی در پیوست ۳ آمده است.

---

<sup>۱</sup>Capacitance to Digital Convertor (CDC)

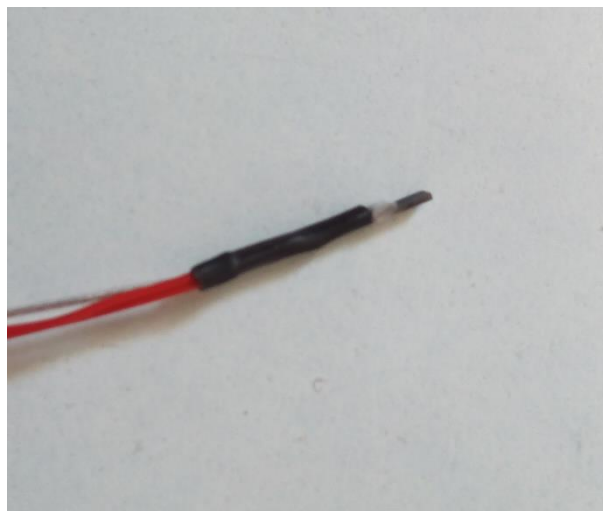


شکل ۳-۱۴. بُرد خوانش ظرفیت خازنی حسگر تعبیه شده درون درپوش نگهدارنده

این آی سی علاوه بر تبدیل ظرفیت خازنی به داده دیجیتال می تواند دمای محیط را با استفاده از یک حسگر جانبی ثبت نماید. شکل ۳-۱۵ حسگر دمای PT100 مورد استفاده در این طرح را نشان می دهد. اطلاعات خوانش شده توسط این مدار از طریق کانکتور پنج پین متصل به آن که روی پوسته محافظ مدار خوانش ظرفیت خازن تعبیه شده و توسط کابل به کیت نمایش اطلاعات که یک نمونه برد آردینو<sup>۱</sup> می باشد فرستاده می شود.

---

<sup>۱</sup>Arduino



شکل ۳-۱۵. حسگر دمای PT100

هم چنین از طریق پورت USB امکان نمایش و ذخیره سازی اطلاعات دریافتی در کیت نمایش اطلاعات توسط نرم افزار رابط کیت آردینو بر روی سیستم و پایش آنها فراهم آمده است. شکل ۳-۱۶ نمایی از کیت نمایش اطلاعات به همراه سیم های رابط نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۶. نمایی از کیت نمایش اطلاعات به همراه سیم های رابط

حسگر ظرفیت خازنی پس از اصلاحات صورت گرفته و ساخت برد خوانش ظرفیت خازن سرهم‌بندی شد. شکل ۱۷-۳ حسگر ظرفیت خازنی را پس از سرهم‌بندی نهایی نشان می‌دهد.



شکل ۱۷-۳. حسگر ظرفیت خازنی پس از سرهم‌بندی نهایی

حسگر ظرفیت خازنی پس از سرهم‌بندی توسط کانکتوری که در انتهای آن تعبیه شده بود به برد نمایش اطلاعات حسگر متصل گردید. شکل ۱۸-۳ نحوه اتصال حسگر ظرفیت خازنی به برد نمایش اطلاعات حسگر را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۸. نحوه اتصال حسگر ظرفیت خازنی به برد نمایش اطلاعات حسگر



# فصل ۲: طراحی آزمون ها

## فصل ۴ آزمون‌های حسگر کیفیت روغن

برای بررسی عملکرد حسگر کیفیت ساخته شده بایستی قابلیت‌های حسگر در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. به همین جهت آزمون‌هایی به صورت برون خط و برخط طراحی شده که در ادامه نحوه انجام هر کدام به تفصیل شرح داده می‌شود.

### ۴-۱- آزمون‌های بدون بُرد حسگر برای شناسایی محدوده تغییرات

برای ساخت بُردی که بتوان در شرایط واقعی کارکرد موتور از آن استفاده کرد بایستی محدوده تغییرات ظرفیت خازنی در آزمون‌های برون خط بدون بُرد اندازه‌گیری شده با دستگاه LCR Tester، شناسایی شود. همچنین بایستی دمای کارکرد روغن در آزمون‌های بدون بُرد برای تعیین محدوده دمایی کارکرد حسگر توسط مدار روغن طراحی شده، برای ارزیابی بازه دمایی ایمن جهت ساخت برد، بررسی گردد.

در این بخش روش اندازه‌گیری ظرفیت خازنی نمونه‌های اولیه حسگر ساخته شده براساس ابعادی که در فصل قبل به آن اشاره شد، تشریح شده است. نمونه حسگرهای ساخته شده با چند سری روغن مختلف در حالت برون خط مورد آزمایش قرار گرفتند. برای انجام آزمایش بر روی حسگر نهایی به صورت برون خط، از چند نمونه واقعی روغن‌های گرفته شده از کارتر موتور در ساعت‌های مختلف کارکرد موتور بهره گرفته شد و نتایج حاصل از انجام این آزمایشات با نتایج حاصل از حسگر تِن دِلتا مقایسه گردید. همچنین برای آزمون حسگر ظرفیت خازنی به صورت برخط و به دست آوردن خطاهای احتمالی در شرایط کارکرد واقعی موتور از یک مدار روغن جهت شبیه‌سازی کارکرد واقعی موتور استفاده شد.

#### ۴-۱-۱ - اندازه‌گیری ظرفیت خازنی نمونه‌های اولیه حسگر

در ابتدا برای صحت‌گذاری طرح کلی، چند نمونه از طرح‌های اولیه حسگر با ابعاد مشخص ساخته شد. نمونه‌های اولیه ساخته شده با چند سری روغن مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. با بررسی نتایج حاصل از انجام آزمایش این نمونه‌ها و همچنین محاسبات نرم‌افزاری، ابعاد و هندسه طرح نهایی استخراج گردید. سپس حسگر ظرفیت خازنی در ابعاد مشخص، طراحی و ساخته شد.

#### ۴-۲ - دستگاه اندازه‌گیری ظرفیت خازنی حسگر

از دستگاه MS 5308 LCR TESTER برای اندازه‌گیری ظرفیت خازنی حسگر ساخته شده استفاده شد (شکل ۴-۱). محدوده خوانش این دستگاه و میزان خطای اندازه‌گیری آن براساس کاتالوگ محصول که در پیوست آمده، می‌باشد. با استفاده از این دستگاه می‌توان علاوه بر خوانش ظرفیت خازنی، امپدانس مختلط خازن و مقادیر زاویه تتا را نیز محاسبه کرد.



شکل ۴-۱. دستگاه اندازه‌گیری ظرفیت خازنی MS 5308 LCR TESTER

## ۴-۳- آزمون‌های برون خط برای محاسبه ظرفیت خازنی حسگر

در آزمون‌های برون خط حسگر، از یک مخزن استوانه‌ای که به سر حسگر متصل شده، جهت رساندن و پُر کردن فضای محدود بین دو الکتروود استوانه‌ای حسگر (شکل ۴-۲) با روغن استفاده شد. البته بایستی روغن در این مخزن به مدت چند دقیقه بماند زیرا به دلیل فاصله بسیار کم بین دو استوانه، چگالی روغن و خاصیت چسبندگی آن، روغن تحت فشار اتمسفر با سرعت بسیار کمی در طول استوانه حرکت می‌کند و اگر روغن در کل فضای میان دو استوانه قرار نگیرد باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری مقدار ظرفیت خازنی می‌شود. هم‌چنین برای جلوگیری از ایجاد خطا در ظرفیت خازنی به دلیل اتصالات رسانای میان حسگر و دستگاه اندازه‌گیری ظرفیت خازنی از اتصالات ثابت استفاده گردید. با این کار یک اختلاف ثابت در ظرفیت خازنی خوانش شده ایجاد می‌گردد که در فرآیند کالیبراسیون قابل حذف می‌باشد.



شکل ۴-۲. نحوه اتصال حسگر به دستگاه اندازه‌گیری ظرفیت خازن در حالت خارج از مدار

با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده برای ظرفیت خازنی هوا و روغن نو با استفاده از حسگر ظرفیت خازنی که به ترتیب مقادیر ۱۰/۸۱ پیکوفاراد برای هوا و ۱۹/۸۱ پیکوفاراد برای روغن نو، می‌توان به این مهم دست

یافت که درصد تأثیرگذاری دی الکتریک روغن با توجه به دی الکتریک روغن نو [۶۰] ( $k=2/0.2$ ) در ظرفیت کل خازن برابر است

$$C_{new\ oil} = (19 \cdot 81 - 10 \cdot 81) \times 2 \cdot 02 = 18 \cdot 18 \quad (1-4)$$

$$\frac{C_{new\ oil}}{C_T} \times 100 = \frac{18 \cdot 18}{19 \cdot 81} \times 100 = 91 \cdot 77 \% \quad (2-4)$$

پس می‌توان نتیجه گرفت که عایق جداکننده دو استوانه خازن تنها ۸/۲۳ درصد در ظرفیت خازنی کل تأثیرگذار می‌باشد.

#### ۴-۴- حسگر تن‌دلتا

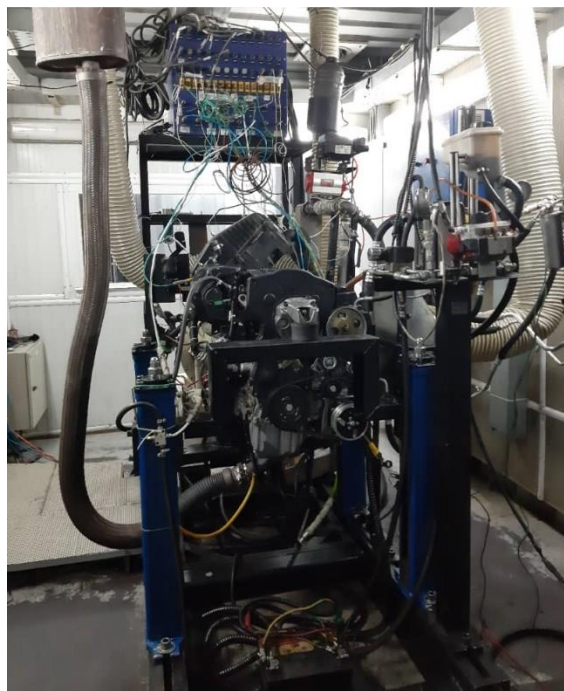
برای صحت‌گذاری عملکرد حسگر ظرفیت خازنی، حسگر تجاری کیفیت روغن ساخت شرکت تن‌دلتا کشور انگلستان تهیه شد (شکل ۳-۴). اساس کار این حسگر تغییرات ضریب دی‌الکتریک روغن می‌باشد. هدف، مقایسه نتایج بدست آمده از آزمون‌های برون‌خط و برخط حسگر ظرفیت خازنی و حسگر تن‌دلتا برای ارزیابی رفتار حسگر ساخته شده و کالیبراسیون آن می‌باشد. تأییدیه کالیبراسیون این حسگر برای شناسایی میزان خرابی روغن در پیوست ۴ آمده است.



شکل ۳-۴. حسگر کیفیت روغن ساخت شرکت تن‌دلتا انگلستان

## ۴-۵- آزمون‌های برون خط صحنه‌گذاری عملکرد حسگر ظرفیت خازنی

برای صحنه‌گذاری عملکرد حسگر ظرفیت خازنی و تعیین محدوده تغییرات ظرفیت خازنی حسگر، آزمون-هایی بر روی موتور XU7 انجام شده است. شکل ۴-۴ تصویری از تجهیزات و شرایط موجود در اتاق آزمون را نشان می‌دهد. در اتاق آزمون برای بررسی عملکرد روغن موتور در شرایط دمایی و فشاری مشخص، موتور توسط دینامومتر ادیکارنت<sup>۱</sup> (دستگاه اندازه‌گیری گشتاور پیچشی و قدرت موتور) تحت بارگذاری مشخص قرار می‌گیرد. طبق دستورالعمل‌های شرکت تولیدکننده روغن و با همکاری شرکت سازنده موتور، ساعت کارکرد قابل قبول روغن ۲۰۰ ساعت تعیین شده است که پس از این زمان، بایستی روغن به همراه فیلتر جهت جلوگیری از خرابی موتور تعویض گردد.

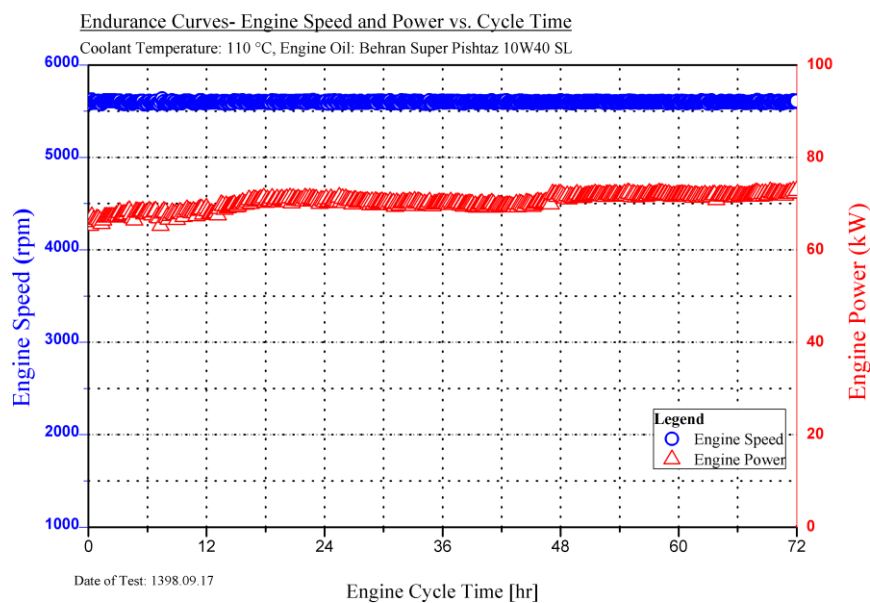


شکل ۴-۴. تصویری از اتاق آزمون

---

<sup>۱</sup>Eddy-Current-Dynamometer

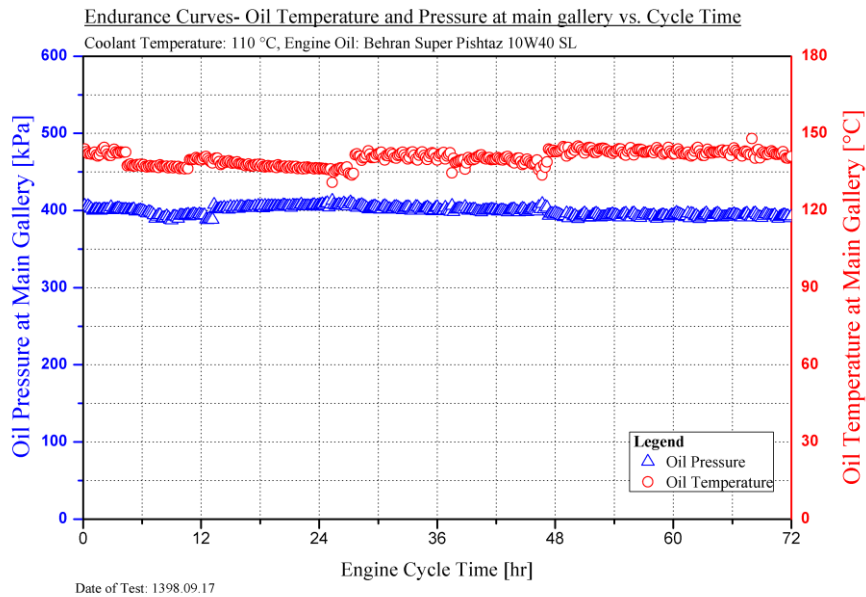
آزمون رسوبات روغن از جمله آزمون‌هایی است که بر روی موتورهای برای تعیین میزان اکسیداسیون موتور تحت شرایط سخت کارکرد موتور انجام می‌گیرد. نمودارهای توان گرفته شده از موتور و دور موتور در آزمون رسوبات روغن موتور XU7 در اتاق آزمون در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. همچنین بایستی دور موتور حدود ۵۰۰۰ دور بر دقیقه (rpm) و توان موتور حدود ۷۰ کیلو وات (kW) ثابت نگه داشته شود. زمان انجام این آزمون برای موتور XU7، براساس سفارش شرکت سازنده موتور ۷۲ ساعت در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۵. پایش توان کارکرد موتور XU7 در ساعات مختلف آزمون رسوبات روغن

دمای کارکرد روغن در این آزمون بایستی ثابت بماند که درجه حرارت روغن حدود  $140 \pm 3$  درجه سانتیگراد است. این دما بسته به موتور مورد استفاده و همچنین شرایط کارکرد آن می‌تواند کم یا زیاد شود که در تعیین میزان خرابی روغن می‌تواند تأثیرگذار باشد. تاریخچه دما و فشار روغن در شرایط آزمون رسوبات روغن در شکل ۴-۶ نشان داده شده که دما و فشار هر ۱۰ دقیقه ثبت گردیده است. در طول آزمون به دلیل

عدم تغییرات محسوس دمایی از ابتدای شروع آزمون رسوبات روغن در موتور فشار روغن تغییر چندانی نداشته و حدود ۴۰۰ کیلو پاسکال بوده است. در این آزمون دمای روغن در محدوده  $140 \pm 3$  درجه سانتیگراد تنظیم شده است.



شکل ۴-۶. تاریخچه فشار و دمای روغن در آزمون رسوبات روغن

نمونه‌های روغن هر ۱۲ ساعت همراه با ثبت اطلاعات جانبی از جمله ساعت کارکرد روغن، نوع روغن، ساعت کارکرد موتور، نوع موتور و آزمون توسط اپراتور برداشته شده و ثبت می‌گردد.



شکل ۴-۷. نمونه های روغن گرفته شده در آزمون رسوبات روغن در یک دوره ۷۲ ساعته از کارکرد موتور

نمونه های روغن موتور گرفته شده طی آزمون رسوبات روغن برای انجام آزمون حسگر ظرفیت خازنی در حالت برون خط استفاده می گردد. ظرفیت خازنی حسگر در ابتدا قبل از سرهم بندی نهایی و اتصال بُرد الکترونیکی برای اطلاع از محدوده تغییرات ظرفیت خازنی با استفاده از دستگاه اندازه گیری ظرفیت خازنی در فرکانس 100 KHz محاسبه و ثبت گردید. در مرحله بعد بُرد خوانش ظرفیت خازنی حسگر به آن متصل و نتایج بدست آمده مورد بحث و بررسی قرار گرفت. روغن مورد استفاده در این آزمایش بهران سپاهان کلاس ۴ می باشد. مشخصات چند نمونه روغن مورد استفاده در موتور در آزمون های دوام به همراه اطلاعات سازنده در جدول ۴-۱ آمده است. علاوه بر این برای محاسبه محدوده تغییرات ظرفیت خازنی از نمونه های روغن گرفته شده در آزمون سایش میل بادامک که برای موتورهای EF7 و XU7 در مدت زمان ۱۰۰ ساعت تحت شرایط آزمون ذکر شده برای هر یک از موتورها در اتاق آزمون شرکت دیناموتور انجام شده بود نیز بهره گرفته شد.

جدول ۴-۱. مشخصات چند نمونه روغن مورد استفاده در موتور در آزمون‌های دوام

مشخصات فیزیکی و شیمیایی	گرانروی در ۱۰۰°C	شاخص گرانروی	حداقل نقطه اشتعال	حداکثر نقطه ریزش	دانسیته در ۱۵°C	قلیائیت کل
واحد	cSt		°C	°C	Kg/m <sup>3</sup>	mgKOH/g
استاندارد آزمون	ASTM D-445	ASTM D-2270	ASTM D-92	ASTM D-92	ASTM D-97	ASTM D-2896
بهران سوپر پیشتاز 10W40	۱۵/۳	۱۶۰	۲۲۰	-۳۳	۸۶۵	۸/۲
بهران سوپر پیشتاز 20W50	۱۹/۵	۱۲۵	۲۳۰	-۲۷	۸۸۸	۸/۲
سپاهان کلاس ۴ 10w40SJ	۱۵	۱۵۵	۲۳۰	-۳۳	۸۶۵	۹
شل هلیکس <sup>۱</sup> 5w30	۱۲/۲	۱۶۴	۲۱۵	-۳۹	۸۵۴	-

#### ۴-۶- بررسی عملکرد و حساسیت حسگر ظرفیت خازنی نصب شده در

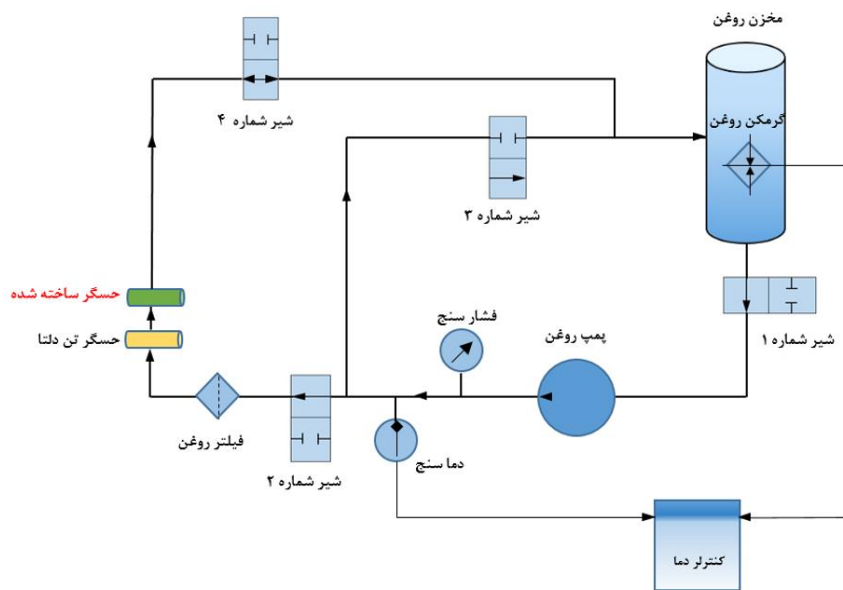
##### مدار روغن

پس از انجام آزمون‌های برون خط حسگر ظرفیت خازنی، برای بررسی رفتار و چگونگی تغییرات ظرفیت آن در برابر عوامل خطای احتمالی مانند فشار، دما و دبی روغن، روی مدار روغن طراحی شده نصب و به صورت برخط مورد آزمایش قرار گرفت. ظرفیت خازن، امپدانس مختلط خازن و اندازه زاویه تنا از جمله پارامترهای قابل ثبت برای حسگر مورد نظر هستند.

#### ۴-۶-۱- مدار روغن مورد استفاده در آزمون برخط

برای سنجش کارایی حسگر به یک مدار هیدرولیک جهت شبیه‌سازی خصوصیات ذاتی روغن تحت شرایط موجود در موتور نیاز است. زیرا بسیاری از پارامترها در موتور قابل کنترل نمی‌باشد و از این رو ممکن است

در انجام آزمون‌های اولیه به دلیل ندانستن تأثیرگذاری برخی از پارامترها در عملکرد موتور سبب صدمه‌زدن به موتور شود. همچنین فشار، دما و دبی روغن در موتور قابل کنترل نمی‌باشد، در نتیجه نمی‌توان تأثیر این پارامترها را در ظرفیت خازن برای شناسایی خطاهای ناشی از آن‌ها مشخص نمود. مدار روغن جهت بررسی پارامترهای تأثیرگذار در ظرفیت خازنی حسگر در شکل ۴-۸ نشان داده شده است.



شکل ۴-۸. شماتیک مدار روغن

حسگر ظرفیت خازنی بر روی یک مدار روغن شامل پمپ روغن با حداکثر فشار ۲۰ بار (شکل ۴-۹)، مخزن روغن، دماسنج، فشارسنج، گرمکن روغن با توان ۱/۵ کیلووات (شکل ۴-۱۰)، مدار کنترل دمای روغن (شکل ۴-۱۱)، شیرهای کنترل دبی جریان، لوله‌های دما بالا و فیلتر روغن نصب شده می‌باشد. همچنین برای بررسی صحت عملکرد حسگر ظرفیت خازنی، حسگر تجاری پایش کیفیت روغن تن دلتا همزمان با این حسگر بر روی مدار روغن نصب می‌شود.



شکل ۴-۹. پمپ هیدرولیک مورد استفاده با حداکثر تحمل فشار ۲۰ بار



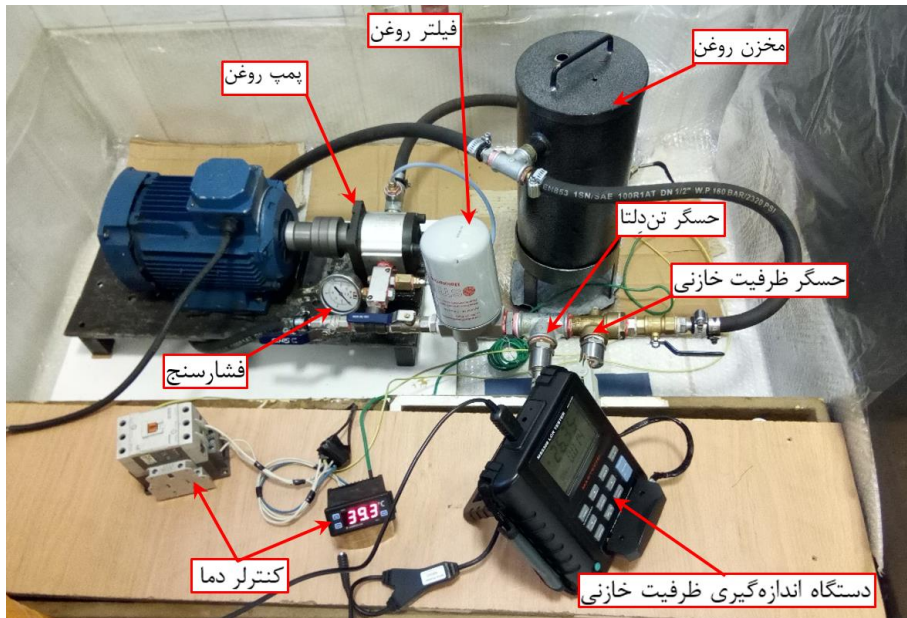
شکل ۴-۱۰. گرمکن روغن



شکل ۴-۱۱. مدار کنترل دمای روغن

مدار روغن مذکور پس از بررسی‌های مختلف و تهیه تجهیزات ذکر شده سرهم بندی شد. شکل ۴-۱۲ مدار روغن بیان شده در شکل ۴-۸ پس از پیاده سازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود روغن قبل از اینکه وارد حسگرها شود توسط فیلتری که پس از پمپ روغن قرار دارد تسویه می‌شود و از ورود ذرات بسیار درشت آلودگی به درون حسگرها جلوگیری می‌نماید. هم‌چنین برای کنترل فشار موجود

در مدار از یک فشارسنج عقب‌به‌ای بهره گرفته شد. دماسنج مورد استفاده در این مدار که برای کنترل دمای مخزن استفاده شده از سری K می‌باشد.



شکل ۴-۱۲. حسگر خازنی کیفیت روغن وصل شده به مدار روغن به صورت برخط

به دلیل تأثیرپذیری حسگر از طول سیم رابط تا حد امکان سعی شده که از اتصالات ثابت و بدون حرکت استفاده شود تا میزان خطای موجود در ظرفیت خازنی کل ثابت و قابل حذف باشد. شکل ۴-۱۳ نحوه اتصال حسگر ظرفیت خازنی را به دستگاه LCR Tester به صورت برخط به همراه نصب حسگر تجاری تن دلتا نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۳. نحوه اتصال حسگر ظرفیت خازنی را به دستگاه LCR Tester به صورت برخط به همراه نصب حسگر تجاری تن دلتا

#### ۴-۶-۲ - بررسی رفتار مکانیکی و آببندی حسگر در شرایط کارکرد موتور

رفتار مکانیکی حسگر و آببندی آن در شرایط کارکرد موتور از جمله پارامترهای مهمی است که بایستی در طراحی و ساخت حسگر خازنی به آن توجه شود. زیرا اگر بدنه حسگر از استحکام کافی در برابر شرایط دمایی و فشاری موجود در موتور برخوردار نباشد موجب اعوجاج و جابجایی حرارتی الکترودهای خازن ناشی از فشار و دمای روغن در موتور می‌گردد که می‌تواند اندازه‌گیری ظرفیت خازنی را تحت تأثیر خود قرار دهد. همچنین اگر طرح هندسی حسگر قابلیت اطمینان کافی جهت آببندی حسگر در برابر فشارها و دماهای مختلف از کارکرد موتور را نداشته باشد ممکن است که با نشت روغن به قسمت الکترونیکی آن، موجب ایجاد اختلال در اندازه‌گیری ظرفیت خازنی حسگر و یا حتی از کار افتادن آن گردد. بنابراین بایستی قبل از نهایی کردن طرح حسگر سنجش‌های تأثیرگذار در عملکرد حسگر مورد بررسی قرار گیرد و از عملکرد صحیح پارامترهای ذکر شده اطمینان حاصل شود. برای بررسی این پارامترها از مدار روغن توصیف شده در بخش‌های پیشین استفاده شده است. پس از نصب حسگر بر روی مدار روغن، دما و فشار روغن را تا ۳۰ درصد بیش‌تر از دما و فشار معمول روغن در موتور بالا برده و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است که

در بررسی‌های انجام‌شده نتایج قابل قبولی حاصل گردید. برای بررسی اثر پارامترهای دما و فشار محدوده تغییرات قابل اطمینان این پارامترها براساس تحلیل‌های صورت گرفته برای بررسی رفتار مکانیکی و آب-بندی حسگر تحت شرایط کارکرد موتور جدول ۴-۲ در بیان شده است.

جدول ۴-۲. محدوده تغییرات پارامترهای دما و فشار برای بررسی رفتار مکانیکی و آب‌بندی حسگر

پارامتر	دما (°C)	فشار (bar)
کمترین مقدار	۴۰	۰
بیشترین مقدار	۱۵۰	۸

#### ۴-۶-۳- اثر فرکانس تحریک در اندازه‌گیری ظرفیت خازن

از مطالعات الکتروشیمیایی و ثبت اختراعات اندازه‌گیری امپدانس روغن‌های روانکار انجام‌شده در تحقیقات گذشته [۱۲، ۱۳] می‌توان از نمودارهای نایکوئیست نتیجه گرفت که در فرکانس‌های پایین با تغییر بسیار کم دی‌الکتریک روغن، امپدانس به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. در مقابل اگر فرکانس کاری بالا باشد حساسیت کمتری در تشخیص تغییرات دی‌الکتریک وجود دارد. به همین منظور برای اندازه‌گیری امپدانس مختلط خازن بایستی فرکانسی را در نظر گرفت که علاوه بر اندازه‌گیری مناسب تغییرات امپدانس مختلط خازن، تغییرات ظرفیت خازنی حسگر از حساسیت قابل قبولی برخوردار باشد. در همین راستا آزمایشاتی صورت گرفت که در نتیجه فرکانس کاری بین ۳۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز برای انجام آزمون‌های شناسایی محدوده کارایی حسگر ظرفیت خازنی در نظر گرفته شد.

#### ۴-۶-۴ - بررسی اثر سیم‌های رابط

اساس کار خازن بدین صورت می‌باشد که از دو جسم رسانا به‌عنوان الکتروود و فضای بین این دو جسم را دی‌الکتریک خازن در نظر می‌گیرند. حال اگر بین پروپ‌های دستگاه اندازه‌گیری ظرفیت خازن و الکتروودهای خازن سیم رابطی وجود داشته باشد، این سیم‌های رابط باعث ایجاد یک ظرفیت اضافه در ظرفیت خازن اندازه‌گیری شده (براساس رابطه محاسبه ظرفیت خازنی) بسته به طول، قطر و فاصله آن‌ها از هم می‌شوند. همچنین اگر ابعاد و فاصله میان سیم‌ها ثابت نباشند این ظرفیت ثابت متغیر می‌شود. بنابراین برای اندازه‌گیری ظرفیت خازنی؛ اولاً ابعاد سیم‌ها ثابت باشد و ثانیاً باید تا حد امکان از اتصالات ثابت استفاده شود تا از ایجاد خطای احتمالی ناشی از تغییرات ابعادی و مکانی سیم‌ها جلوگیری نمود.

#### ۴-۶-۵ - تأثیر حباب‌های موجود در روغن

یکی از پدیده‌های رایج در مدار روغن، ترکیب روغن با هوا می‌باشد. افزایش دمای جریان روغن می‌تواند روند تشکیل حباب‌های گاز ناشی از تبخیر جزئی روغن را تسهیل کرده و به ناپایداری آن‌ها در برابر افت فشار نیز کمک کند. از طرفی در اثر عدم کارایی آب‌بندها و اتصالات خط مکش پمپ مدار هیدرولیک، به دلیل فشار روغن پایین‌تر از فشار اتمسفر، در صورت نشتی در این خط، روغن به بیرون نشت نخواهد کرد؛ بلکه این هوا خواهد بود که وارد مدار می‌شود. همچنین به ضعف عملکردی واشرهای درزگیر شفت در پمپ‌ها نیز می‌توان اشاره کرد. پس در روغن همیشه یک سری حباب‌های هوا وجود دارد. در صورتی که حباب‌ها در مسیر روغن وارد فضای میان دو استوانه حسگر شوند. با تغییر جنس دی‌الکتریک ظرفیت خازن اندازه‌گیری شده برای روغن نیز تغییر می‌کند و باعث ایجاد خطا در خوانش ظرفیت می‌گردد. طبق مطالعات انجام شده و نتایج تجربی به دست آمده از مدار روغن، برای از بین بردن خطای ناشی از حباب‌های ایجاد شده در روغن با افزایش فرکانس داده‌برداری حسگر به بالاتر از ۱۰ کیلوهرتز، تا حد زیادی از بروز خطاهای مذکور جلوگیری می‌شود.

## ۴-۶-۶- تأثیر زاویه قرارگیری حسگر در مدار روغن

برای بررسی این پارامتر دو نوع زاویه قرارگیری در نصب حسگر وجود دارد:

(۱) زاویه سوراخ‌های حسگر با جهت جریان سیال: سوراخ‌های تعبیه‌شده روی الکتروود خارجی حسگر ظرفیت خازنی با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم واقع شده‌اند. پس زمانی که در مسیر روغن قرار می‌گیرند کمترین و بیشترین زاویه‌ای که یکی از سوراخ‌ها با جهت جریان می‌تواند داشته باشد به ترتیب ۰ و ۴۵ درجه می‌باشد. از طرفی این سوراخ‌ها تعیین‌کننده کیفیت بروزرسانی داده‌های حسگر براساس سرعت انتقال سیال در دورترین منطقه از ناحیه ورود روغن به حسگر می‌باشد. برای انجام این تحلیل از قسمت فلونت نرم افزار انسیس استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که زاویه قرارگیری این سوراخ‌ها با جهت جریان سیال تأثیر محسوسی در بروزرسانی حسگر ندارد که می‌توان از این تأثیر چشم‌پوشی کرد.

(۲) جهت قرارگیری حسگر با نیروی گرانش زمین: حسگر در زمان اتصال به مدار روغن می‌تواند در سه جهت براساس نیروی گرانش زمین قرار گیرد. اگر حسگر روی قسمت بالایی مسیر انتقال روغن قرار گیرد ممکن است حباب تشکیل شده در روغن به انتهای محفظه بین دو الکتروود خازن رفته و به دلیل چگالی پایین تر هوا نسبت به روغن در آنجا بماند و باعث ایجاد خطای مداوم در اندازه‌گیری ظرفیت خازن خوانده شده گردد. علاوه بر این اگر حسگر روی قسمت پایینی مسیر انتقال روغن قرار گیرد ممکن است آلودگی‌های ناشی از عوامل مختلف از جمله لجن‌های تولید شده در طی فرآیند اکسیداسیون یا ذرات فلزی ریز سایشی در حین کارکرد موتور که در روغن حل شده به‌درون حسگر نفوذ کرده و در فضای انتهایی حسگر به دلیل وزن زیاد نسبت به روغن ته‌نشین شده و باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری شود. اما زمانی که حسگر به‌صورت عمود بر جهت نیروی گرانش قرار

می‌گیرد خطاهای ناشی از عوامل مذکور به کمترین میزان خود می‌رسد. پس بهینه‌ترین حالت جهت قرارگیری حسگر بر مسیر روغن به صورت افقی نسبت به سطح زمین می‌باشد.

#### ۴-۷- بررسی حساسیت حسگر به پارامترهای مختلف روغن

در این بخش تأثیر پارامترهای ایجاد خطا در اندازه‌گیری مقدار ظرفیت خازن که در بخش‌های قبل به آن اشاره شد مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورتی که مقدار ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده تحت تأثیر عوامل ایجاد خطا تغییر کند، داده‌های خروجی حسگر در شرایط مختلف همراه با خطا خواهد بود. به همین منظور عوامل احتمالی که باعث ایجاد تغییر در مقدار ظرفیت حسگر خازنی می‌شود بایستی شناسایی و از میزان تأثیرگذاری آن تا حد امکان کاسته و یا حذف شود و یا در غیر این صورت محدوده دقت اندازه‌گیری ظرفیت گزارش شود.

#### ۴-۷-۱- فشار روغن

برای بررسی میزان اثرگذاری فشار روغن در مقدار اعداد اندازه‌گیری شده حسگر خازنی از یک فشارسنج در مسیر روغن قبل از حسگرها و از شیر شماره ۴ برای تنظیم فشار (شکل ۴-۸) بعد از حسگرها استفاده می‌شود که با کنترل میزان باز یا بسته بودن شیر شماره ۴ می‌توان فشار روغن درون حسگر را کنترل نمود. برای انجام این آزمون بایستی دمای روغن ثابت نگه داشته شود. با ثبت تغییرات خروجی حسگر و تغییرات فشار، عملکرد حسگر ظرفیت خازنی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۷-۲- دمای روغن

دمای روغن موتور بسته به نوع موتور، اندازه رادیاتور و یا کولر روغن، سیستم کنترل دمای موتور، قدرت فن، توان موتور، شرایط رانندگی، شرایط محیطی قرارگیری در آن متفاوت خواهد بود. هم‌چنین بین دمای

روغن در زمان استارت موتور تا گرم شدن آن تفاوت وجود دارد. از طرفی گرم و سرد شدن روغن موتور باعث انقباض و انبساط قسمت‌های در تماس با روغن و تغییر در ضریب دی‌الکتریک روغن می‌شود که می‌تواند دقت اندازه‌گیری را تحت تأثیر قرار دهد.

برای کنترل دما از یک مدار کنترل دمای PID مطابق شکل ۴-۱۱ که شامل یک گرمکن نصب‌شده درون مخزن روغن برای تغییر دمای روغن و حسگر دما برای اندازه‌گیری دمای لحظه‌ای مخزن روغن با دقت بالا می‌باشد. حداکثر خطای این کنترلر PID، یک درجه سانتیگراد است. برای بررسی اثر دما بر روی ظرفیت خازنی حسگر، چند سری از انواع روغن‌های از جمله نو، کارکرده و ... استفاده شد. همه‌ی عوامل تأثیرگذار در ظرفیت خازن ثابت نگه داشته شده و تنها دمای روغن بین ۴۵ تا ۱۴۰ درجه تغییر داده شده و داده‌های خروجی ثبت گردید.

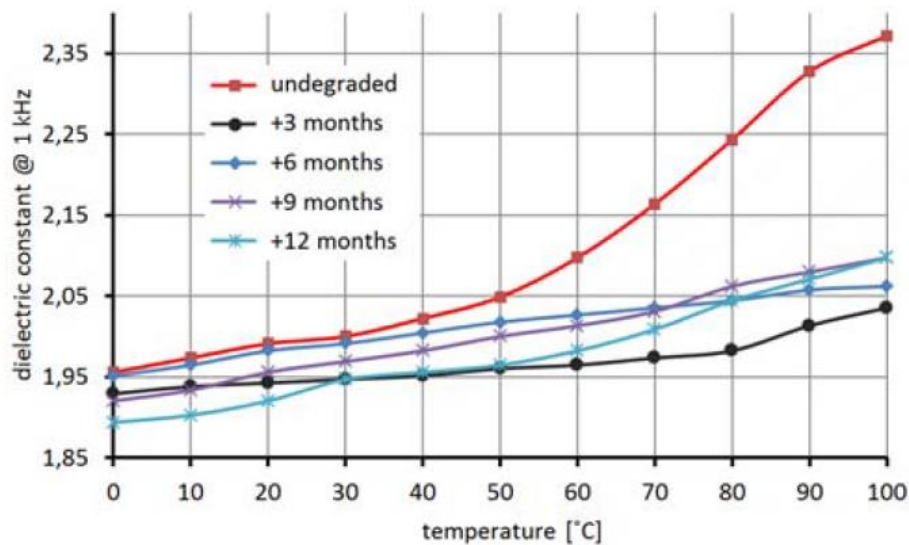
#### ۴-۷-۳ - دبی روغن

دبی روغن براساس مسیرهای خروجی روغن از پمپ روغن می‌تواند مختلف باشد. بر این اساس بایستی تأثیر تغییرات دبی روغن عبوری از محل نصب حسگر بر روی ظرفیت خازنی بررسی گردد. برای تغییر دبی در مدار روغن از تغییر در میزان باز یا بسته بودن شیر کنارگذر شماره ۴ و شیر شماره ۳ مشخص شده در شکل ۴-۸ استفاده شده است. در صورتی که شیر شماره ۴ کاملاً باز و شیر شماره ۳ بسته باشد دبی روغن عبوری از حسگر صفر می‌باشد. اما در صورتی که شیر شماره ۴ کاملاً بسته و شیر شماره ۳ کاملاً باز باشد دبی روغن عبوری از حسگر به بالاترین میزان خود می‌رسد.

## ۴-۸- بررسی اثر تغییرات دی الکتریک روغن تحت تأثیر افزایش دمای

### روغن

برای بررسی اثر تغییرات دی الکتریک روغن از نتایج بدست آمده در تحقیق کاردوس<sup>۱</sup> و همکاران استفاده شد. در این تحقیق از روغن 5W30 شل هلیکز استفاده شده است. آزمایشات برای یک نمونه خازن استوانه‌ای با ابعاد مشخص در دمای صفر تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد انجام شده است. برای بررسی خاصیت دی الکتریک روغن از رابطه  $\epsilon_r = C_x/C_0$  استفاده شده است که در این رابطه  $C_x$  ظرفیت لحظه‌ای حسگر و  $C_0$  ظرفیت خازن با دی الکتریک هوا است [۶۳]. براساس تحقیقات انجام شده، روغن مذکور ساختاری مشابه ساختار روغن بهران 10W40 سوپر پیشتاز نیمه سنتیک دارد.



شکل ۴-۱۴. وابستگی ثابت دی الکتریک نمونه‌های روغن به دما در فرکانس یک کیلوهرتز [۶۳]

# فصل ۵: بررسی نتایج

## فصل ۵ فصل پنجم بررسی نتایج

### ۵-۱- بررسی نتایج طرح‌های اولیه حسگر

نتایج آزمایش نمونه‌های اولیه حسگر خازنی ساخته شده با روغن‌های مختلف دارای سابقه نامشخص برای تعیین درصد هم‌خوانی محاسبات نرم‌افزاری ظرفیت خازنی حسگرها با نمونه‌های تولید شده و تکرارپذیری اعداد بدست آمده از آزمایشات تجربی حسگرها جهت شناسایی محدوده تغییرات ظرفیت خازنی حسگر نهایی در جدول ۵-۱ آمده است که ظرفیت‌های خازنی برای بررسی اثر فرکانسی در فرکانس‌های ۱، ۱۰ و ۱۰۰ کیلوهرتز اندازه‌گیری شده است.

جدول ۵-۱. نتایج آزمایش نمونه‌های اولیه حسگر خازنی ساخته شده با روغن‌های با سابقه نامشخص

پارامترها	فرکانس تحریک (kHz)	حسگر اولیه	حسگر ثانویه
نوع روغن	L (mm)	۳۸	۳۳
	a (mm)	۷/۵	۶/۲۵
	b (mm)	۹	۹
	r(mm)	۵	۵
تمیز سری اول	C <sub>air</sub> (pf)	۲۲/۲۳	۱۱/۶
	C1 (pf)	۳۸	۲۲
	C2 (pf)	۳۸/۵	۲۱/۶
	C3 (pf)	۳۸/۶۶	۲۱/۹
تمیز سری دوم	C <sub>air</sub> (pf)	۲۷/۴	۱۲/۱
	C1 (pf)	۳۸/۸	۲۲/۱
	C2 (pf)	۳۸/۱۸	۲۲/۳۶
	C3 (pf)	۳۸/۰۵	۲۲/۶۶
کارکرده سری اول	C <sub>air</sub> (pf)	۲۶/۹	۱۱/۹
	C1 (pf)	۴۲/۲	۲۴/۴
	C2 (pf)	۴۱/۶۵	۲۴/۳۸
	C3 (pf)	۴۱/۲۴	۲۴/۲۲
کارکرده سری دوم	C <sub>air</sub> (pf)	۳۲/۱۱	۱۱/۸
	C1 (pf)	۴۲/۲	۲۴/۲
	C2 (pf)	۴۱/۷	۲۳/۶۶
	C3 (pf)	۴۱/۷	۲۳/۷۳
کارکرده سری سوم	C <sub>air</sub> (pf)	۲۳/۶	۱۱/۹
	C1 (pf)	۴۰/۱	۲۲/۷
	C2 (pf)	۴۰/۲	۲۲/۸۵
	C3 (pf)	۳۹/۹۳	۲۲/۷۳

با دقت در جدول ۵-۱ خطاهای موجود دیده شده در ساخت نمونه‌های اولیه حسگر به قرار زیر می‌باشد؛

(۱) عدم تکرارپذیری ظرفیت خازنی هوا؛ این خطا ناشی از تمیز نبودن سطح الکترودهای حسگر بعد از هر مرحله آزمایش روغن‌های مختلف و تخلیه کامل ناحیه محدود شده بین دو الکتروده حسگر می‌باشد که استفاده از مواد اولیه ارزان و نامناسب جهت ساخت حسگر که منجر به کیفیت پایین سطوح الکترودها شده را می‌توان از دیگر دلایل وقوع این مشکل نام برد.

راه حل: تخلیه کامل حسگر از روغن بعد از هر بار استفاده در مرتفع شدن این مشکل کارساز می‌باشد. هم‌چنین استفاده از بنزین جهت تمیز کردن سطح الکترودهای حسگر و خشک کردن آن نیز می‌تواند تا حد زیادی در تکرارپذیری ظرفیت خازنی هوا مؤثر باشد.

(۲) یکسان نبودن ظرفیت خازنی در فرکانس‌های مختلف؛ با افزایش فرکانس تحریک خازن ظرفیت خازنی مرجع تغییر کرده و کاهش می‌یابد و بالعکس. از طرفی با افزایش فرکانس، حساسیت حسگر نسبت به تغییرات جنس دی‌الکتریک در ظرفیت خازنی حسگر کاسته می‌شود و حسگر نسبت به تغییرات کم واکنشی نشان نمی‌دهد. هم‌چنین با افزایش فرکانس تحریک حسگر خازنی، تأثیرپذیری حسگر از نویزهای اطراف کمتر می‌شود.

راه حل: فرکانس تحریک خازن را بایستی به گونه‌ای انتخاب کرد که علاوه بر حساسیت کافی حسگر نسبت به تغییرات جنس دی‌الکتریک روغن، از تأثیر نویزهای محیطی تا حد زیادی کاست.

(۳) هواگیری نامناسب؛ در صورت هواگیری نامناسب روغن در حسگر قسمتی از ناحیه محدود شده بین دو الکتروده استوانه‌ای حسگر توسط هوا (با ضریب دی‌الکتریک کمتر نسبت به روغن) اشغال می‌شود. به همین سبب تمام دی‌الکتریک حسگر را روغن تشکیل نداده و ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده صحیح نمی‌باشد.

راه حل: جهت هواگیری مناسب بایستی روغن به صورت آهسته درون مخزن کمکی آزمایشات برون-خط ریخته شود و چند دقیقه با چرخاندن مناسب حباب‌های موجود در قسمت انتهایی حسگر را خارج نمود تا از بروز خطا در اندازه‌گیری ظرفیت خازنی حسگر جلوگیری نمود.

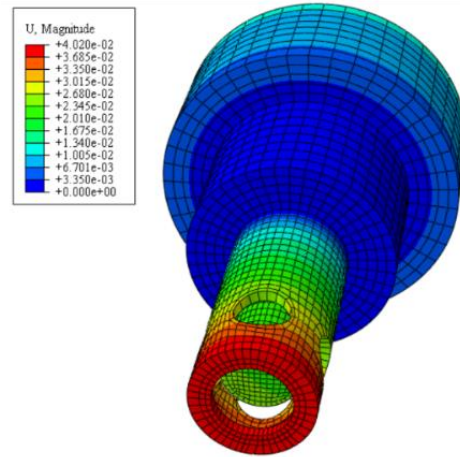
۴) عدم تمیزی روغن‌های تهیه شده از ناخالصی‌ها (مانند واسکازین)؛ از آنجایی که این روغن‌های کارکرده از تعویض روغنی‌های سطح شهر شاهرود تهیه شده و هیچ اطلاعی از ناخالصی‌های موجود در این روغن‌ها هنگام تعویض و انبار کردن آن‌ها موجود نمی‌باشد پس نمی‌توان به ظرفیت خازنی بدست آمده از این روغن‌ها اکتفا نمود.

راه حل: برای نمونه‌گیری روغن بهتر است از شیوه‌های متداول نمونه‌گیری روغن استفاده نمود تا بتوان از عدم وجود ناخالصی‌هایی شبیه واسکازین درون روغن نمونه‌گیری شده اطمینان حاصل نمود. ۵) عدم اثرگذاری ظرفیت ایجاد شده توسط لایه عایق بین الکترودها در ظرفیت خازنی کل در محاسبات انجام شده؛ یکی از اشتباهاتی که در ساخت نمونه اولیه حسگر خازنی رخ داده، عدم اثرگذاری ظرفیت ایجاد شده توسط لایه عایق در محاسبات نرم بود. به همین دلیل عددهای بدست آمده از محاسبات تجربی با ظرفیت خازنی مطلوب اختلاف زیادی دارد.

راه حل: بایستی در محاسبات نرم‌افزاری ظرفیت خازنی حسگر، ظرفیت ایجاد شده توسط لایه عایق را نیز لحاظ نمود تا از به وجود آمدن چنین خطاهایی در طرح‌های بعدی جلوگیری کرد.

## ۵-۲- نتایج شبیه‌سازی عوامل خطا

تحلیل آزمایش‌های طراحی شده با استفاده از حل گر آباکوس استاندارد انجام گرفت. به‌عنوان نمونه تغییرات جابجایی اجزای حسگر بعد از اعمال دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد و فشار ۵ بار<sup>۱</sup> در شکل ۵-۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود بیشترین جابجایی پس از اعمال دما و فشار مورد نظر، در المان‌های انتهایی استوانه‌ی خارجی حسگر اتفاق می‌افتد. بنابراین پیش‌بینی می‌شود بیشترین تأثیرات بر ظرفیت خازنی، در این ناحیه که در دورترین نقطه از محل بستن حسگر قرار دارد اتفاق می‌افتد.



شکل ۵-۱. میزان جابجایی المان‌های حسگر پس از رسیدن به دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد و تحت فشار ۵ بار

با دقت در شکل ۵-۱ می‌توان به این مهم دست یافت که جابجایی المان‌های انتهایی حسگر متقارن می‌باشد و تنها بر روی المان‌های الکتروود بیرونی بیشترین اثر را گذاشته است به طوری که بیشترین تغییر شکل برابر ۰/۰۴ میلی‌متر می‌باشد. پس انتظار می‌رود که اگر دما و فشار روغن بر روی خروجی حسگر تأثیر محسوسی داشته باشد می‌توان با افزایش ضخامت الکتروود بیرونی درگیر در ظرفیت خروجی حسگر این مشکل را مرتفع نمود. از طرفی افزایش ضخامت علاوه بر افزایش جرم حسگر ممکن است در ظرفیت کل آن تأثیرگذار باشد یا به نحوی مانع جریان مناسب روغن درون حسگر و بروزسانی داده‌ها گردد. براساس محاسبات انجام شده توسط نرم‌افزار آباکوس ظرفیت خازنی حسگر برخط پیش‌بینی شد و برای بررسی صحت نتایج به دست آمده با مقادیر ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده توسط نمونه اولیه حسگر ساخته شده در شرایط کارکرد واقعی موتور مقایسه گردید (جدول ۵-۲).

جدول ۵-۲. مقایسه نتایج محاسباتی و آزمایشگاهی نمونه اولیه حسگر

ظرفیت خازنی	محاسباتی (pf)	آزمایشگاهی (pf)
روغن نو	۲۰/۳۹	۲۰/۴۳
روغن خراب	۲۱/۳	۲۱/۰۳

بادقت در جدول ۵-۲ می‌توان دریافت که نتایج به‌دست آمده از محاسبات عددی ظرفیت خازنی روغن نو نسبت به نتایج آزمایشگاهی نمونه اولیه حسگر دارای خطای بسیار ناچیزی در حدود ۰/۲ می‌باشد که این خود می‌تواند ناشی از شرایط محیطی حسگر و همچنین عدم تمیزی سطح استوانه‌های حسگر و یا خطای کاربر باشد. اما تفاوت زیاد ظرفیت خازنی برای روغن خراب، خود حاکی از این است که روغن مورد آزمایش قبل از رسیدن به حد خرابی ایده‌آل خود تعویض شده است. همچنین با مقایسه اعداد به‌دست آمده از محاسبات عددی می‌توان به این مهم دست یافت که محدوده تغییرات ظرفیت ۴/۵ درصد از تغییرات کل ظرفیت خازنی حسگر را تشکیل می‌دهد.

## ۵-۲-۱- نتایج طراحی آزمایشات برای شبیه‌سازی المان محدود بدنه حسگر

این آزمایش با استفاده از روش طراحی کامپوزیت مرکزی<sup>۱</sup> برای انجام ۱۳ مرتبه آزمایش برای بررسی تاثیرات دو پارامتر دما و فشار روغن موتور طراحی شده است. نتایج عددی بدست آمده از روش طراحی آزمایش‌ها در جدول ۵-۳ نشان داده شده است. با دقت در این جدول می‌توان یافت که در آزمون شماره ۵ برای دمای ۲۷/۶ و فشار روغن ۳/۵ نسبت ظرفیت خازنی تقریباً یک بوده است و این حاکی از آن است که تغییرات بسیار کم دمایی تاثیری در تغییر ظرفیت خازن ندارد. همچنین با مقایسه آزمون شماره ۱ و ۲ که برای فشار یکسان روغن و دمای به ترتیب ۴۰ و ۱۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد بدلیل تغییرات زیاد دمایی نسبت به حالت اولیه خازن، موجب ایجاد خطای ۰/۲ درصدی در نسبت ظرفیت خازن شده است که این خطا می‌تواند تأثیر قابل توجهی در مقدار ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده حسگر داشته باشد. اما با مقایسه آزمون ۳ و ۴ می‌توان دریافت که در بدترین حالت تغییرات فشار روغن تأثیر قابل توجهی در تغییر نسبت ظرفیت خازنی ندارد و حداکثر خطای ایجاد شده تحت تأثیر تغییرات فشار روغن ۰/۰۱۷ درصد در

---

<sup>۱</sup>Central Composite Design (CCD)

<sup>۲</sup>Design of Experiment (DOE)

نسبت ظرفیت خازن است که می تواند ۰/۰۲۵ درصد در محدوده خوانش ظرفیت حسگر خطا ایجاد کند که در مقایسه با محدوده تغییرات ظرفیت حسگر قابل چشم پوشی بوده و می توان گفت که از خطای بسیار ناچیز رویت شده تحت تأثیر تغییرات فشار بر روی محدوده خوانش حسگر صرف نظر کرد.

جدول ۳-۵. نتایج تجربی با استفاده از طراحی آزمایش

شماره آزمون	فشار روغن (bar)	دمای روغن (°C)	C/C0
۱	۲	۴۰	۰/۹۹۹۳۲۱
۲	۲	۱۰۰	۰/۹۹۷۲۷۹
۳	۵	۴۰	۰/۹۹۹۳۱۰
۴	۵	۱۰۰	۰/۹۹۷۲۶۷
۵	۳/۵	۲۷/۶	۰/۹۹۹۷۳۹
۶	۳/۵	۱۱۲/۴	۰/۹۹۶۸۵۲
۷	۱/۴	۷۰	۰/۹۹۸۳۰۱
۸	۵/۶	۷۰	۰/۹۹۸۲۸۴
۹	۳/۵	۷۰	۰/۹۹۸۲۹۳
۱۰	۳/۵	۷۰	۰/۹۹۸۲۹۳
۱۱	۳/۵	۷۰	۰/۹۹۸۲۹۳
۱۲	۳/۵	۷۰	۰/۹۹۸۲۹۳
۱۳	۳/۵	۷۰	۰/۹۹۸۲۹۳

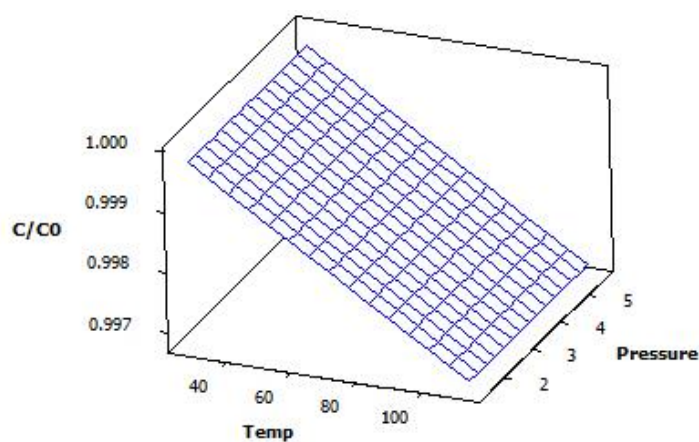
برای بررسی نتایج به دست آمده در جدول ۳-۵ از آزمون تحلیل واریانس نسبت ظرفیت خازن (جدول ۴-۵) برای به دست آوردن میزان تاثیرگذاری هر یک از پارامترهای خطا استفاده شد.

بر اساس جدول ۴-۵، اگر P کمتر از ۰/۰۵ باشد، با قابلیت اطمینان ۹۵ درصد می توان اثر آن پارامتر را تأثیرگذار در فرآیند در نظر گرفت. با دقت در داده های بیان شده در جدول و مقادیر ذکر شده برای P هم چنین می توان دریافت که پارامتر دما هم به صورت خطی و هم به صورت مرتبه دو و پارامتر فشار به صورت خطی تأثیرگذار است اما پارامتر مرتبه دو فشار در نتایج خروجی تأثیرگذار نیست. هم چنین اثرات دما و فشار مستقل از هم هستند. پس می توان بدلیل عدم تأثیرگذاری پارامتر مرتبه دو فشار و اثر متقابل دما و فشار، این دو پارامتر را از محاسبات حذف کرد.

جدول ۴-۵. تحلیل واریانس برای نسبت ظرفیت خازن

Source	DF	SS Seq	SS Adj	Adj MS	F	P
<b>Regression</b>	5	0.000008	0.000008	0.000002	19139	0.00
<b>Linear</b>	2	0.000008	0.000008	0.000004	47846	0.00
<b>Temp</b>	1	0.000008	0.000008	0.000008	95691	0.00
<b>Pressure</b>	1	0.000000	0.000000	0.000000	3103	0.00
<b>Square</b>	2	0.000000	0.000000	0.000000	66	0.00
<b>Temp*Temp</b>	1	0.000000	0.000000	0.000000	124	0.00
<b>Press*Press</b>	1	0	0	0	2	0.19
<b>Interaction</b>	1	0	0	0	3	0.13
<b>Temp*Press</b>	1	0	0	0	3	0.13
<b>Residual Error</b>	7	0	0	0		
<b>Lack-of-Fit</b>	3	0	0	0	*	*
<b>Pure Error</b>	4	0	0	0		
<b>Total</b>	12	0.000008				

در ادامه در شکل ۲-۵ میزان تأثیرات دما و فشار روغن بر نسبت ظرفیت خازنی حسگر نشان داده شده است.



شکل ۲-۵. میزان تأثیر هر یک از پارامترها در خروجی

با توجه به شکل ۲-۵ تأثیر تغییرات مثبت دمایی در پاسخ خروجی به مراتب بیش‌تر از تغییرات فشار می‌باشد. بدین صورت که هر چقدر دمای روغن بیش‌تر باشد نسبت ظرفیت خازنی افزایش می‌یابد و به عبارت دیگر فاصله بین صفحات کاهش می‌یابد و هر چه فشار تغییر کند تأثیری در این نسبت ندارد یا به عبارت دیگر تنها عامل مؤثر در تغییر ظرفیت خازنی حسگر تغییرات دمایی است.

مقدار ضرایب نسبت ظرفیت خازنی برای هر یک از پارامترهای محاسبه شده با برنامه مینی‌تب<sup>۱</sup> به صورت ذیل می‌باشد.

$$\frac{C}{C_0} = 1.00069 - 0.000034 \times T + 0.000003 \times P - 0.000000001 \times T^2 \quad (۱-۵)$$

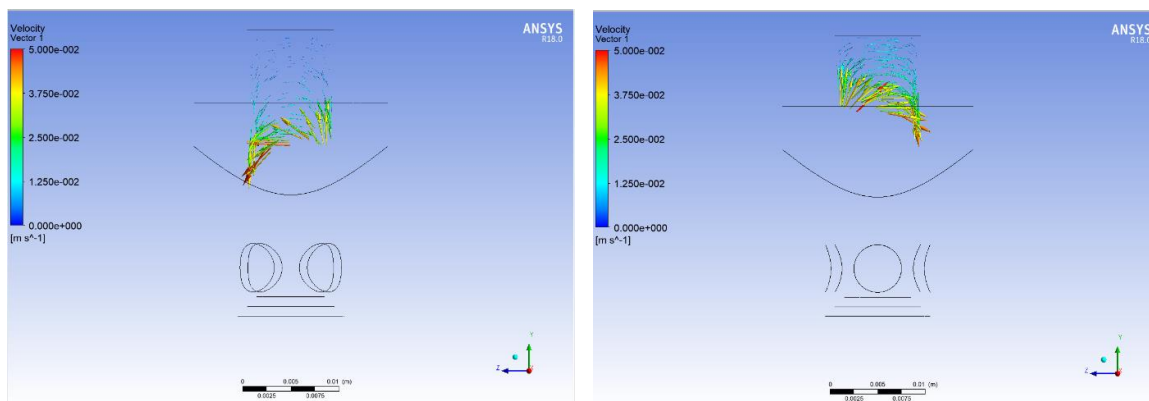
بر اساس ضرایب ذکر شده در معادله (۲-۵) می‌توان به این مهم دست یافت که بیشترین تأثیر در نسبت ظرفیت خازنی متعلق به ضریب خطی دما می‌باشد. با اعمال ضریب تصحیح دمایی ذکر شده در این معادله می‌توان تا ۹۶٪ اثرات ناشی از تغییرات دما بر روی ظرفیت خازنی را حذف کرد.

### ۳-۵- نتایج شبیه‌سازی جریان سیال درون حسگر

برای این تحلیل بدلیل بررسی ابعاد هندسی حسگر کمترین مجموعه ابعاد ذکر شده در جدول ۳-۶ برای مشاهده بهتر جریان سیال در نظر گرفته شد. براساس داده‌های این جدول دو نوع تحلیل به عنوان بیشترین و کمترین زاویه‌ای که سوراخ‌های جانبی حسگر می‌تواند با جهت جریان داشته باشد در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده از تحلیل سرعت جریان سیال در زوایای صفر و ۴۵ درجه سانتیگراد در کانتورهای شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود.

---

<sup>۱</sup>Minitab

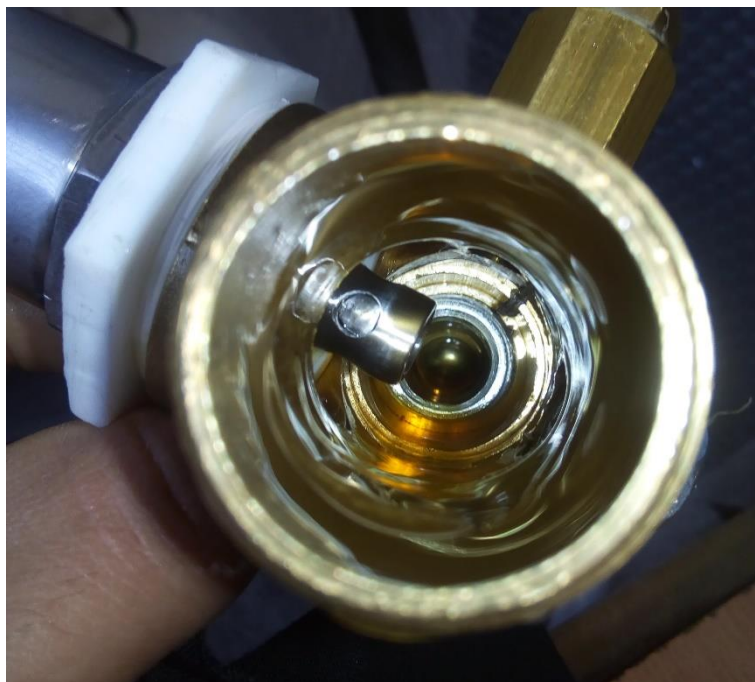


ب- در زاویه ۴۵ درجه با جهت جریان

الف- در زاویه صفر با جهت جریان

شکل ۳-۵. کانتورهای سرعت جریان حسگر در ناحیه انتهایی آن

همان‌طور که در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود سرعت جریان سیال هنگامی که سوراخ‌های جانبی در زاویه صفر درجه با جهت جریان قرار دارد (الف)، نسبت به زاویه ۴۵ درجه قرارگیری سوراخ‌ها با جهت جریان (ب) بیشتر می‌باشد. از دلایل افزایش سرعت سیال در حالت قرارگیری زاویه صفر سوراخ‌های جانبی حسگر با جهت جریان برخورد مستقیم سیال با جداره استوانه داخلی حسگر که یکی از عوامل حرکت جریان سیال به قسمت انتهایی حسگر است، می‌توان نام برد. اما سیال در حالت دوم به‌صورت مایل با جداره استوانه داخلی حسگر برخورد کرده و در نتیجه نیروی لازم جهت انتقال سیال به انتهای حسگر تأمین نمی‌گردد. پس می‌توان نتیجه گرفت که هر چه این زاویه به زاویه صفر نزدیک‌تر باشد سیال با سرعت بیشتری به انتهای حسگر انتقال پیدا کرده و داده‌های حسگر با سرعت بالاتری بروزرسانی می‌گردد و از امکان ایجاد خطا در ظرفیت خازنی با جابجایی سیال انتهای حسگر کاسته می‌شود. شکل ۴-۵ نمایی از نحوه قرارگیری حسگر در مسیر روغن را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۴. نحوه قرارگیری حسگر در مسیر روغن

### ۵-۳-۱ - نتایج طراحی بهین ابعاد حسگر جهت جریان مطلوب سیال

برای انجام این تحلیل روش طراحی آزمایش‌ها با توجه به داشتن دو متغیر طراحی و یک نتیجه با ۱۳ مرحله آزمایش در نظر گرفته شد. در این روش پارامتر هدفی که مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت سرعت متوسط سیال درون حسگر در Zone\_1 می باشد. ابعاد هندسی حسگری بهینه است که سرعت سیال در این ناحیه بیشینه باشد یا به عبارت دیگر زمان بروزسانی خروجی حسگر نسبت به تغییرات کیفی روغن کمتر باشد. نتایج بدست آمده از روش طراحی آزمایش‌ها با توجه به پارامترهای ورودی و تابع بهینه در جدول ۵-۵ آمده است.

با دقت در جدول ۵-۵ می توان به این مهم دست یافت که بیشینه سرعت سیال در Zone\_1 به گونه‌ای که ظرفیت خازنی مطلوب برای حسگر رخ دهد، در آزمایش شماره ۴ مشاهده می‌شود که ابعاد پارامترهای ورودی مقاربت خوبی با طرح پیشنهادی نهایی دارد. پس سرعت سیال در این ناحیه با قطر استوانه داخلی

و سوراخ های جانبی نسبت مستقیم دارد و با طول حسگر نسبت عکس دارد یعنی هر چه طول حسگر کوتاه تر شود سرعت سیال در این ناحیه نیز بیش تر می شود.

جدول ۵-۵. نتایج روش طراحی آزمایش ها برای تحلیل ابعادی حسگر جهت جریان مطلوب سیال

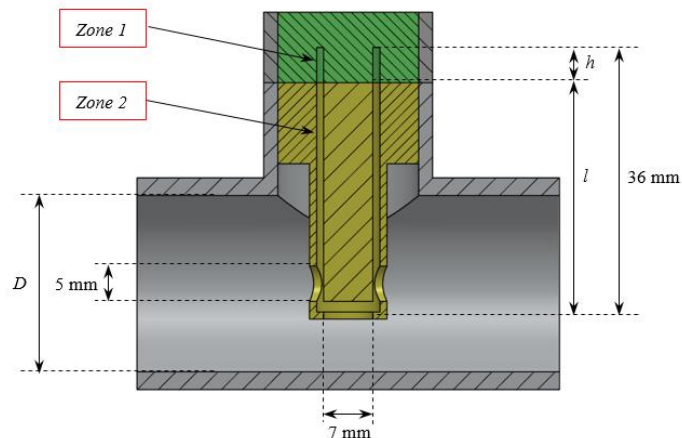
شماره آزمون	قطر سوراخ بغل (r) (mm)	قطر استوانه داخلی (a) (mm)	طول خازن (L1) (mm)	سرعت متوسط (mm/s)
۱	۳/۰۰	۶/۳۹۵	۴۹/۳۱	۰/۲۲۵۵۶۷
۲	۵/۵۰	۶/۳۹۵	۵۰/۰۰	۰/۲۴۶۶۶۳
۳	۳/۰۰	۶/۹۲۷	۳۷/۵۰	۰/۲۹۴۲۶۴
۴	۵/۵۰	۶/۹۲۷	۳۷/۶۲	۰/۹۳۱۰۲۷
۵	۲/۴۲	۶/۶۶۱	۴۳/۲۴	۰/۲۳۳۷۵۸
۶	۶/۰۲	۶/۶۶۱	۴۳/۸۷	۰/۲۵۴۳۵۶
۷	۴/۲۵	۶/۲۸۵	۵۲/۲۰	۰/۲۴۰۴۱۴
۸	۴/۲۵	۷/۰۳۷	۳۵/۱۵	۰/۸۴۴۲۷۶
۹	۴/۲۵	۶/۶۶۱	۴۳/۴۸	۰/۲۱۵۵۷۶
۱۰	۴/۲۵	۶/۶۶۱	۴۳/۴۸	۰/۲۱۵۵۷۶
۱۱	۴/۲۵	۶/۶۶۱	۴۳/۴۸	۰/۲۱۵۵۷۶
۱۲	۴/۲۵	۶/۶۶۱	۴۳/۴۸	۰/۲۱۵۵۷۶
۱۳	۴/۲۵	۶/۶۶۱	۴۳/۴۸	۰/۲۱۵۵۷۶

براساس تحلیل های انجام شده و پیچیدگی فرآیند تولید حسگر با این ابعاد، برای ماشینکاری آسان تر از داده های جدول ۵-۶ با وجود اختلاف بسیار ناچیزی با اندازه های بهینه شده استفاده شد.

جدول ۵-۶. پارامترهای بهینه شده جهت تولید حسگر

پارامترها	طول حسگر (L) (mm)	قطر استوانه داخلی (a) (mm)	قطر سوراخ بغل (r) (mm)
بهینه ترین مقدار	۳۶	۷	۵

براساس داده‌های ورودی بیان شده در جدول ۵-۶ متوسط سرعت ذرات سیال در Zone\_1 برابر ۱/۳۴۲۶ میلی‌متر بر ثانیه است که بهینه‌ترین حالت ممکن می‌باشد. شکل ۵-۵ پارامترهای محاسبه شده در شماتیک برش خورده طرح تحلیلی حسگر را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۵. نمایش پارامترهای محاسبه شده در شماتیک برش خورده طرح تحلیلی حسگر

## ۵-۴- نتایج آزمایش‌های برون خط حسگر خازنی کیفیت روغن

برای بررسی عملکرد حسگر و محاسبه دامنه تغییرات آن به صورت برون خط با استفاده از نمونه‌های واقعی گرفته شده از موتور طی آزمون سایش میل بادامک و رسوبات روغن موتور که شامل ظرفیت خازنی حسگر و خروجی حسگر تن‌دلتا می‌باشد، در این بخش شرح داده شده است؛

## ۵-۴-۱ - تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و LF در طول کارکرد روغن در آزمون

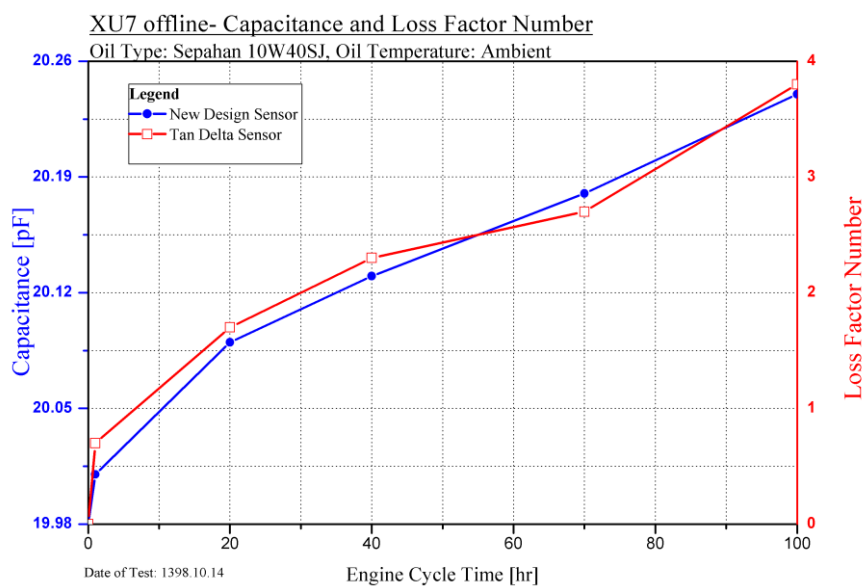
### تأثیر روغن بر میزان سایش میل بادامک<sup>۱</sup>

این آزمون بر روی دو نوع موتور XU7 و EF7 با ساعت کاری یکسان انجام شده است. نمونه‌های روغن کارکرده در مدت ۱۰۰ ساعت کارکرد روغن، به‌صورت دوره‌ای در دو مرحله شامل آزمون سرد و آزمون گرم که به ترتیب در ساعات ۱، ۲۰ و ۴۰ برای آزمون سرد و ۳۰ و ۶۰ از آزمون گرم که براساس بندهای ذکر شده در دستورالعمل شرکت درخواست کننده آزمون به مقدار ۱۰۰ سی‌سی از انتهای کارتر موتور در هر مرحله گرفته شده و توسط مخزن کمکی که برای آزمون‌های برون‌خط روغن در نظر گرفته شده بود مورد آزمایش قرار گرفت. روغن مورد استفاده در این آزمون سپاهان کلاس ۴ (10W40SJ) می‌باشد. نتایج مقایسه‌ای حاصل از خروجی‌های حسگر ظرفیت خازنی بدون بُرد با حسگر تن‌دلتا برای موتور XU7 در شکل ۵-۶ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۵-۶ ظرفیت خازنی و خروجی حسگر تن‌دلتا با افزایش ساعت کارکرد موتور افزایش می‌یابند. نتایج حاصل حاکی از همبستگی خوب نتایج بدست آمده با خروجی حسگر تن‌دلتا می‌باشد. اما شیب تغییرات ظرفیت خازنی در این آزمون نسبت به خروجی حسگر تن‌دلتا خطی‌تر می‌باشد یعنی به خط مستقیم نزدیک‌تر می‌باشد که این خود تحلیل داده‌های خروجی را آسان‌تر می‌کند.

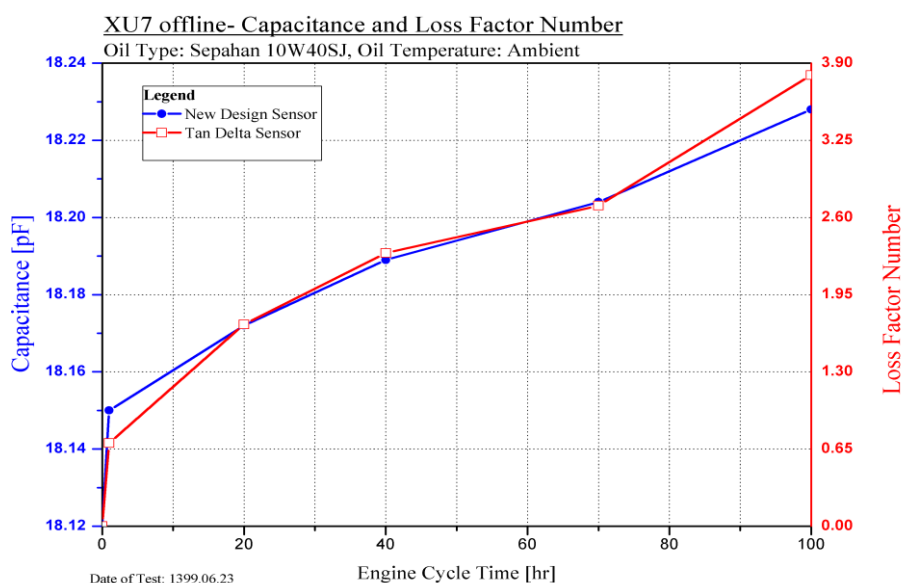
---

<sup>۱</sup>Valve Scuffing



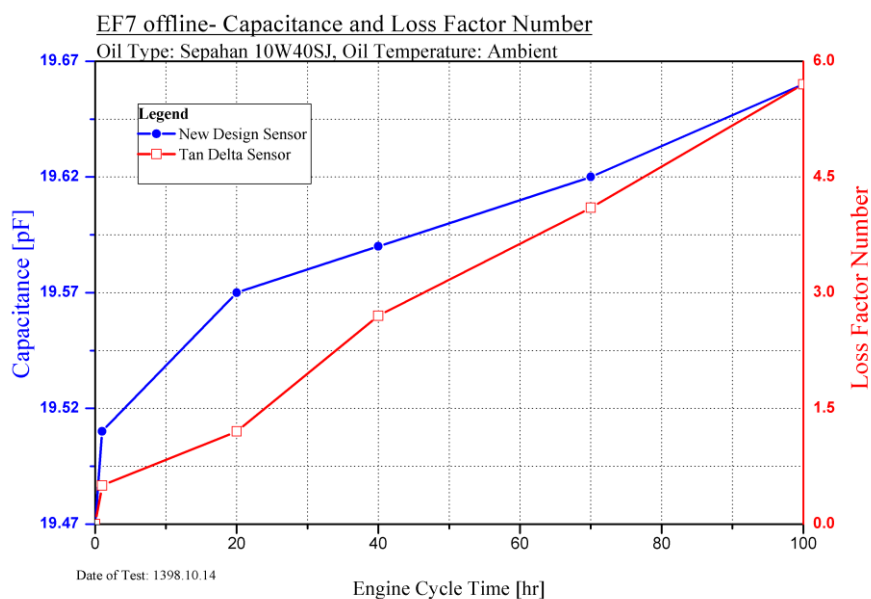
شکل ۵-۶. تغییرات ظرفیت خازنی حسگر بدون بُرد و LF در طول کارکرد موتور XU7 در آزمون سایش میل بادامک

نتایج خروجی حسگر نهایی شده با خروجی حسگر تن دلتا مقایسه گردید. شکل ۵-۷ نتایج مقایسه‌ای حاصل از خروجی‌های حسگر ظرفیت خازنی پس از سرهم‌بندی قطعات الکترونیک آن (بدون کالیبراسیون دما) با حسگر تن دلتا برای موتور XU7 در آزمون سایش میل بادامک را نشان می‌دهد. با دقت در شکل ۵-۶ ظرفیت خازنی حسگر و خروجی حسگر تن دلتا با افزایش ساعت کارکرد موتور افزایش می‌یابند. نتایج نشان می‌دهد که شیب تغییرات ظرفیت خازنی به خط مستقیم بسیار نزدیک می‌باشد. به همین دلیل تحلیل نتایج خروجی حاصل از این حسگر نسبت به نتایج خروجی حسگر تن دلتا ساده‌تر بوده و با اطمینان بیشتری می‌توان زمان خرابی روغن را پیش‌بینی نمود.



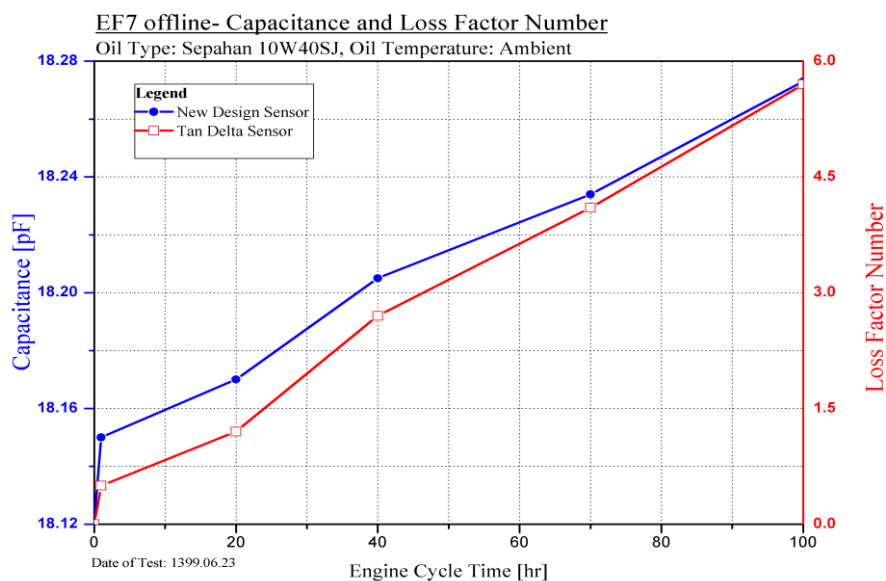
شکل ۵-۷. نتایج مقایسه‌ای حاصل از خروجی‌های حسگر ظرفیت خازنی (بدون کالیبراسیون دما) با حسگر تن‌دلتا در طول کارکرد موتور XU7 در آزمون سایش میل بادامک

در ادامه برای بررسی بهتر عملکرد حسگر در تشخیص میزان خرابی روغن در آزمون سایش میل بادامک، از نمونه‌های گرفته شده از کارتر موتور در طی آزمون سایش میل بادامک موتور EF7 استفاده گردید. نمونه‌های روغن در ساعات ۱، ۲۰، ۴۰، ۷۰، ۱۰۰ تحت شرایط ذکر شده برای موتور XU7 گرفته شد. روغن مورد استفاده در این آزمون سپاهان کلاس ۴ (10W40 SJ) می باشد. نتایج مقایسه‌ای حاصل از خروجی‌های حسگر ظرفیت خازنی بدون بُرد با حسگر تن‌دلتا برای موتور EF7 در شکل ۵-۸ نشان داده شده است.



شکل ۵-۸. تغییرات ظرفیت خازنی حسگر بدون بُرد و LF در طول کارکرد موتور EF7 در آزمون سایش میل بادامک

در نگاه اول با مقایسه دو نمودار شکل ۵-۶ و شکل ۵-۸ می توان به این مهم دست یافت که مقدار ظرفیت خازنی روغن نو (ظرفیت صفر) متفاوت است که این حاکی از عملکرد نامناسب حسگر ظرفیت خازنی بدون بُرد در تشخیص ظرفیت درست روغن و عدم تکرارپذیری ظرفیت صفر به دلیل اتصالات متحرک می باشد. اما شیب تغییرات ظرفیت خازنی در شکل ۵-۸ با شیب تغییرات خروجی حسگر تن دلتا همبستگی کمتری دارد که ممکن است در انجام آزمایش خطاهای مختلفی از جمله خطای انسانی، عدم تمیزی سطح الکترودها، هواگیری نامناسب و ... رخ داده باشد. هم چنین شکل ۵-۹ نتایج مقایسه ای حاصل از خروجی های حسگر ظرفیت خازنی نهایی (بدون کالیبراسیون دما) با حسگر تن دلتا برای موتور EF7 در آزمون سایش میل بادامک را نشان می دهد.



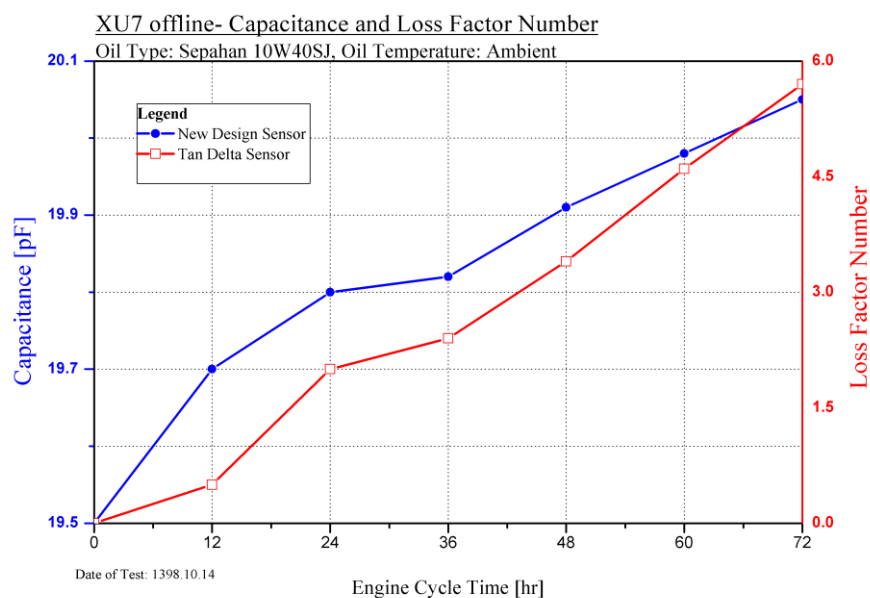
شکل ۹-۵. تغییرات ظرفیت خازنی حسگر نهایی (بدون کالیبراسیون دما) و LF در طول کارکرد موتور EF7 در آزمون سایش میل بادامک

با دقت در شکل ۹-۵ همان‌طور که انتظار می‌رفت منحنی ظرفیت خازنی حسگر و خروجی حسگر تن‌دلتا با افزایش ساعت کارکرد موتور شیب صعودی را طی می‌کند. نتایج نشان‌دهنده شیب تغییرات صعودی خطی برای ظرفیت خازنی می‌باشد. هم‌چنین با توجه به نقطه صفر ظرفیت خازنی (ظرفیت روغن نو) در شکل ۷-۵ و شکل ۹-۵ می‌توان به این مهم دست یافت که با تغییر اتصالات متحرک به اتصالات ثابت ظرفیت خازنی از قابلیت تکرارپذیری بالایی برخوردار می‌باشد. بنابراین می‌توان از این حسگر برای تشخیص انواع روغن‌های نو با تاریخچه مشخص و تفکیک آن‌ها استفاده کرد.

## ۵-۴-۲ - تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و LF در طول کارکرد روغن در آزمون

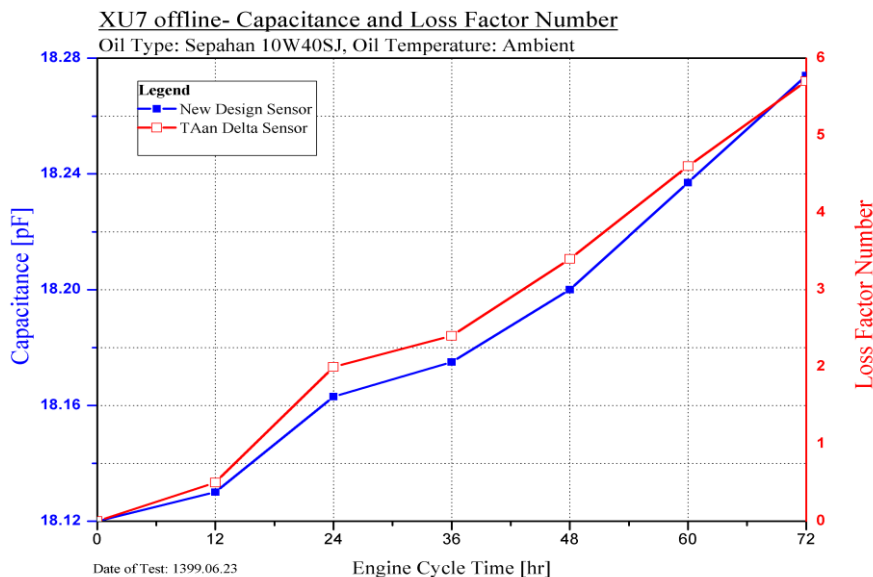
### رسوبات روغن

آزمون رسوبات روغن در موتور XU7 جهت شناسایی زمان شروع اکسیداسیون و میزان تأثیرگذاری اکسیداسیون بر عملکرد روغن و زمان خرابی آن می‌باشد. برای بررسی عملکرد روغن در آزمون رسوبات روغن نمونه‌های روغن کارکرده در مدت ۷۲ ساعت کارکرد روغن، به‌صورت دوره‌ای هر ۱۲ ساعت، براساس بندهای ذکر شده در دستورالعمل شرکت درخواست کننده آزمون به مقدار ۱۰۰ سی‌سی از انتهای کارتر موتور در هر مرحله گرفته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه‌های مختلف توسط حسگر ظرفیت خازنی و حسگر کمکی تن‌دلتا در شرایط محیطی یکسان مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از خروجی حسگر ظرفیت خازنی بدون بُرد و حسگر تن‌دلتا برای آزمون رسوبات روغن در موتور XU7 در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰. تغییرات ظرفیت خازنی حسگر بدون بُرد و LF در طول کارکرد موتور XU7 در آزمون رسوبات روغن

با دقت در شکل ۵-۱۰ می‌توان به این مهم دست یافت که نتایج به دست آمده همبستگی خوبی با خروجی‌های حسگر تن‌دلتا دارد. از طرفی وجود تغییرات غیرمعمول ظرفیت خازنی حسگر می‌تواند نشان‌دهنده خوبی برای شروع زمان اکسیداسیون در روغن موتور باشد. هم‌چنین شیب تغییرات بین ساعات ۲۴ تا ۳۶ نسبت به سایر نقاط کمتر است که با بررسی شرایط انجام آزمون مشخص شد که در ساعت ۳۰ مقداری روغن به موتور اضافه گردیده است. بیشترین محدوده تغییرات در ظرفیت خازنی در این آزمون برای ۷۲ ساعت کارکرد موتور برابر ۰/۵۵ پیکوفاراد می‌باشد که در آزمون سایش میل بادامک این مقدار در زمان مشابه بین ۰/۱۵ تا ۰/۲۰ پیکوفاراد به دلیل استفاده از روغن‌ها و موتورهای مختلف، متفاوت بود. پس می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر اکسیداسیون بر کاهش کیفیت روغن تقریباً دو برابر تأثیر سایش میل بادامک در کیفیت روغن می‌باشد. نتایج مقایسه‌ای حاصل از خروجی‌های حسگر ظرفیت خازنی پس از نهایی شدن مدار الکترونیکی آن با خروجی‌های حسگر تن‌دلتا برای موتور XU7 در آزمون سایش میل بادامک را نشان می‌دهد.



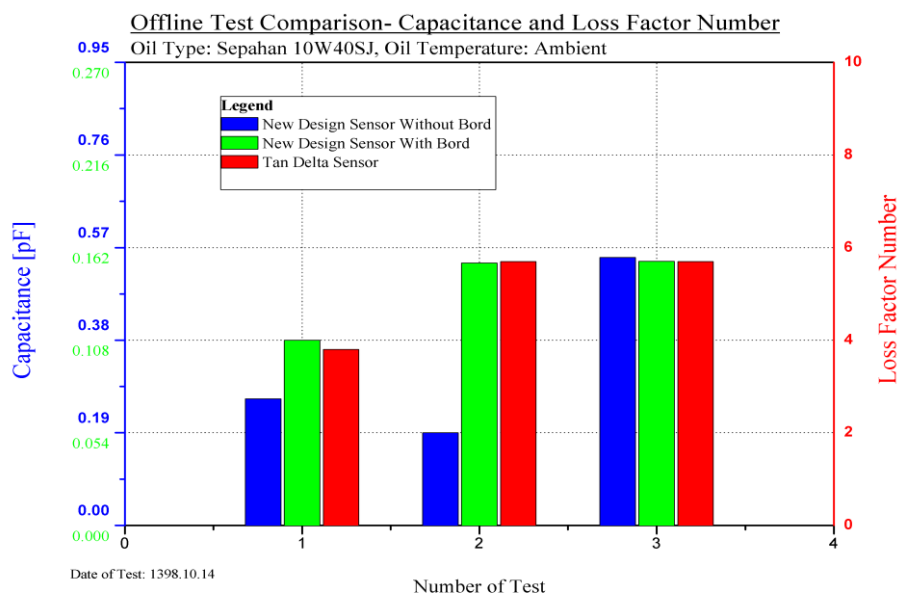
شکل ۵-۱۱. تغییرات ظرفیت خازنی حسگر (بدون کالیبراسیون دمایی) و LF در طول کارکرد موتور XU7 در آزمون رسوبات روغن

با توجه به شکل ۵-۱۱ خروجی حسگر ظرفیت خازنی نهایی و خروجی حسگر تن‌دلتا با افزایش ساعت کارکرد موتور افزایش می‌یابند. شیب تغییرات ظرفیت خازنی در این آزمون نسبت به خروجی حسگر تن‌دلتا همبستگی بسیار خوبی دارد که می‌تواند عملکرد صحیح حسگر در تشخیص خرابی روغن را نسبت به نمونه‌های مشابه حسگر تضمین کند. از طرفی داده‌های خروجی تقریباً با یک شیب یکنواخت نسبت به تغییرات کیفیت روغن افزایش یافته است که این خود تحلیل داده‌های خروجی را آسان‌تر نموده و پیش‌بینی زمان دقیق خرابی روغن را ساده‌تر می‌کند. میزان تغییرات خروجی حسگرها در آزمون‌های برون خط در جدول ۵-۷ آمده است.

جدول ۵-۷. میزان تغییرات خروجی حسگرها در آزمون‌های برون خط

آزمون رسوبات روغن XU7 (۳)	آزمون سایش میل بادامک EF7 (۲)	آزمون سایش میل بادامک XU7 (۱)	حسگر / آزمون
۵/۷	۵/۷	۳/۸	حسگر تن‌دلتا (%LF)
۰/۵۵	۰/۱۹	۰/۲۶	حسگر بدون بُرد (pf)
۰/۱۵۴	۰/۱۵۳	۰/۱۰۸	حسگر با بُرد (pf)

براساس جدول ۵-۷ خروجی حسگر ظرفیت خازنی با بُرد نسبت بسیار نزدیکی در هر سه آزمون انجام شده با خروجی حسگر تن‌دلتا دارد اما خروجی حسگر ظرفیت خازنی بدون بُرد در آزمون اول و سوم نسبت تقریباً نزدیکی با نتایج حسگر تن‌دلتا دارد اما در آزمون سایش میل بادامک EF7 هیچ نسبتی با خروجی دیگر حسگرها ندارد. شکل ۵-۱۲ میزان تغییرات خروجی حسگرها در آزمون‌های برون خط را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۲. میزان تغییرات خروجی حسگرها در آزمون‌های برون خط

با دقت در شکل ۵-۱۲ می‌توان با اطمینان بیان کرد که رفتار حسگر ظرفیت خازنی ساخته شده پس از سرهم‌بندی نهایی به طور کامل مشابه حسگر تن‌دل‌تا می‌باشد. اما در خروجی‌های این حسگر در حالت بدون بُرد خط‌هایی دیده می‌شود که ممکن است ناشی از تغییرات طول سیم‌های رابط، فاصله قرارگیری این سیم‌ها نسبت به هم و یا وجود اتصالات متحرک باشد.

## ۵-۵- نتایج بررسی برخط حسگر کیفیت روغن در مدار روغن

نتایج حاصل از بررسی برخط عوامل ایجاد خطا در ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده توسط حسگر خازنی با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری LCR Tester و بُرد خوانش ظرفیت خازنی تعبیه شده درون پوسته نگهدارنده حسگر در این بخش شرح داده شده است. نتایج حاصل از این آزمایشات با یکدیگر مقایسه گردید؛ هم‌چنین جهت صحت‌گذاری عملکرد حسگر از خروجی‌های حسگر تن‌دل‌تا نیز استفاده شده است.

## ۵-۵-۱- نتایج بدست آمده از رفتار مکانیکی حسگر و آببندی قطعات در شرایط

### دمایی و فشاری کارکرد موتور

با مشخص شدن محدوده تغییرات دما و فشار روغن و با استفاده از مدار روغن طراحی شده، حسگر به صورت برخط در چند مرحله مورد آزمایش قرار گرفت. پس از اتصال حسگر به مدار روغن در مرحله اول فشار روغن از صفر به ۵ بار رسید و در ادامه دمای روغن به صورت پله‌ای با پله ۵ واحدی تا رسیدن به دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد افزایش داده شد. در حین انجام آزمایش پس از افزایش دما به مقدار ۱۰ درجه سانتیگراد در هر مرحله آببندی حسگر به صورت چشمی مورد بررسی قرار گرفت. سپس فشار حسگر به ۸ بار رسانده شد. در ضمن فشار حسگر نیز در این مرحله به صورت واحد افزایش داده می‌شد و در هر مرحله آببندی قطعات بررسی می‌گردید. در انتها دمای روغن به میزان ۱۵۰ درجه به صورت پله‌ای افزایش داده شد. شرایط اعمالی به حسگر برای حصول اطمینان از رفتار مکانیکی و آببندی قطعات تحت شرایط ذکر شده طی چندین مرحله تکرار گردید. شکل ۵-۱۳ تصاویر مختلف حسگر پس از اعمال شرایط دمایی و فشاری روغن را نشان می‌دهد.

با دقت در تصویر (ب) شکل ۵-۱۳ که با بزرگ‌نمایی نشان داده شده است هیچ‌گونه روغنی به درون محفظه نگهدارنده حسگر از طریق اورینگ‌های آببند با توجه به فشاری که از طریق پوسته نگهدارنده اجزای حسگر به نحوی که در فصل‌های قبل به آن اشاره شد- نفوذ نکرده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که قطعات حسگر مورد نظر تحت شرایط دمایی و فشاری هر نوع موتور درونسوز قابلیت آببندی لازم را دارا می‌باشد.



(الف) نمایی از اتصال حسگر به مدار روغن تحت دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد و فشار ۵ بار



(ب) نمایی از اجزای حسگر پس از اعمال شرایط آب‌بندی

شکل ۵-۱۳. تصاویر مختلف حسگر پس از اعمال شرایط دمایی و فشاری روغن

## ۵-۵-۲ - نتایج بررسی اثر فرکانس تحریک در ظرفیت خازنی حسگر

زمانی که حسگر در یک محیط صنعتی قرار می‌گیرد در فرکانس‌های پایین، تأثیر نویزهای ناشی از مدارهای الکتریکی اطراف در مقدار ظرفیت خازنی بسیار زیاد می‌باشد (حدود  $\pm 0/2$  پیکوفاراد). که برای از بین بردن این گونه تأثیرات ناشی از نویزهای محیط صنعتی فرکانس کاری حسگر نیز بایستی به گونه‌ای انتخاب شود که تا حد امکان از تأثیر نویزهای موجود بر مقدار ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده بکاهد. در جدول ۵-۸ اثر فرکانس تحریک برای چند نمونه روغن با سابقه نامشخص بیان شده است.

جدول ۵-۸. اثر فرکانس تحریک برای چند نمونه روغن با سابقه نامشخص

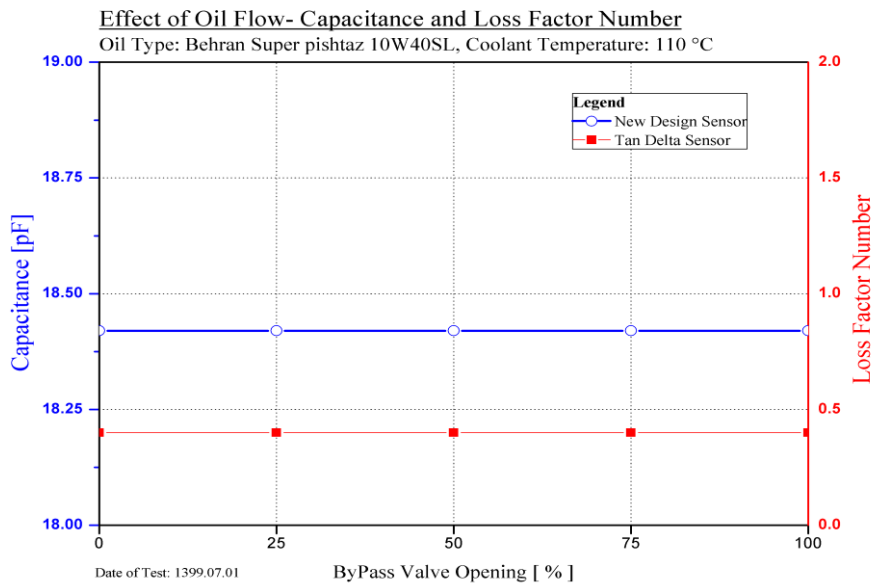
ظرفیت خازنی حسگر	فرکانس تحریک (KHz)	شماره نمونه روغن
۲۰/۴	۱	۱
$20/32 \pm 0/03$	۱۰	
۲۰/۲۳	۱۰۰	
۲۰/۲	۱	۲
$20/08 \pm 0/02$	۱۰	
۲۰/۰۳	۱۰۰	
۱۹/۹	۱	۳
$19/81 \pm 0/04$	۱۰	
۱۹/۷۴	۱۰۰	

با توجه به نتایج بیان شده از اندازه‌گیری ظرفیت خازنی برای نمونه‌های مختلف روغن در فرکانس‌های مشخص با افزایش فرکانس تحریک اعمالی مقدار ظرفیت اندازه‌گیری شده در مجموع کاهش یافته است. از طرفی محدوده تغییرات ظرفیت خازنی حسگر ساخته شده محدود بوده و در حد چند دهم پیکوفاراد تغییر می‌کند بنابراین بایستی از فرکانس تحریک یک کیلوهرتز به دلیل نمایش تغییرات در حد دهم پیکوفاراد صرف نظر کرد. از طرفی براساس نتایج حاصل از بررسی فرکانس تحریک ۱۰ کیلوهرتز اعداد مشاهده شده متغیر می‌باشد پس نتایج به دست آمده در این فرکانس قابل اطمینان نیست. بنابراین طبق آزمایشات انجام شده بر روی حسگر در مدار روغن و بررسی عوامل مختلف ایجاد خطای ناشی از مدارات الکتریکی (نویز)،

حداقل فرکانسی که بتوان خطای ذکر شده را در حد مطلوب کاهش داد و حسگر حساسیت خوبی در برابر تغییرات دی‌الکتریک داشته باشد ۱۰۰ کیلوهرتز تعیین گردید.

### ۵-۳- مطالعه تغییر دبی روغن بر نتایج حسگر کیفیت روغن

برای انجام این آزمایش خروجی حسگر برای دبی‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. برای تغییر دبی از تغییر میزان باز بودن شیر کنارگذر (شیر شماره ۳) در مدار شکل ۴-۸ استفاده شده است. آزمایش در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد انجام شده است. شکل ۵-۱۴ تأثیر تغییرات دبی بر روی نتایج خروجی حسگرها را نشان می‌دهد. محور افقی میزان باز بودن شیر شماره ۳ و محورهای عمودی نتایج بدست آمده از حسگرها را نمایش می‌دهد.

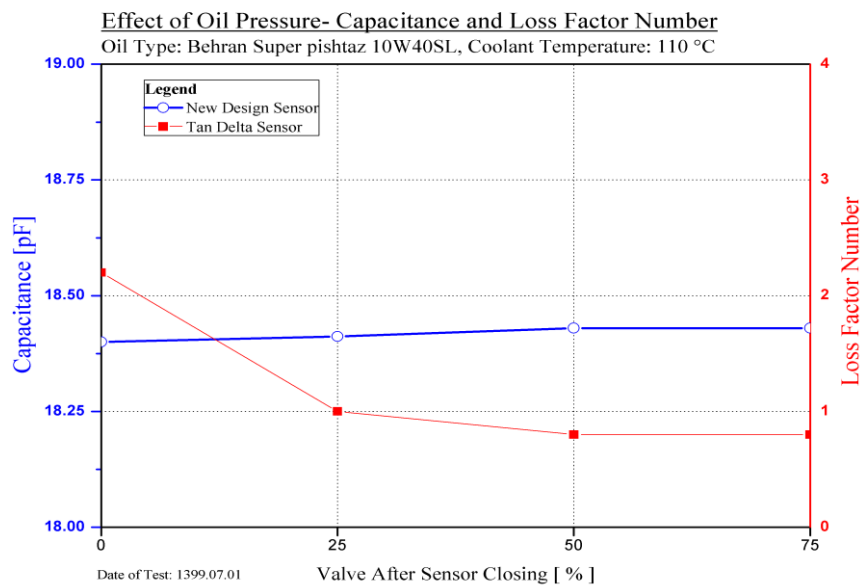


شکل ۵-۱۴. تأثیر تغییرات دبی بر روی نتایج خروجی حسگرها

با توجه به شکل تغییر دبی تأثیری در خروجی‌های حسگرها ندارد؛ به عبارت دیگر با تغییر دبی خروجی حسگرها ثابت می‌ماند و این بیانگر عدم تأثیرپذیری نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان خرابی روغن از تغییرات دبی روغن دارد.

## ۵-۴- مطالعه تأثیر تغییر فشار روغن عبوری بر عملکرد حسگر کیفیت روغن

تأثیر تغییر فشار روغن عبوری توسط شیر کنترل فشار (شیر شماره ۴) در مدار روغن (شکل ۴-۸) بر روی خروجی حسگر کیفیت روغن ساخته شده در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای تنظیم فشار از شیر کنترل فشار (شیر شماره ۳) استفاده می‌شود. زمانی که خروجی این شیر زیاد باشد فشار کاهش می‌یابد و بالعکس. شکل ۵-۱۵ اثر فشار بر تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و حسگر تن‌دل‌تا را نشان می‌دهد. محور افقی میزان باز بودن شیر کنترل فشار می‌باشد.



شکل ۵-۱۵. اثر فشار بر تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و حسگر تن‌دل‌تا

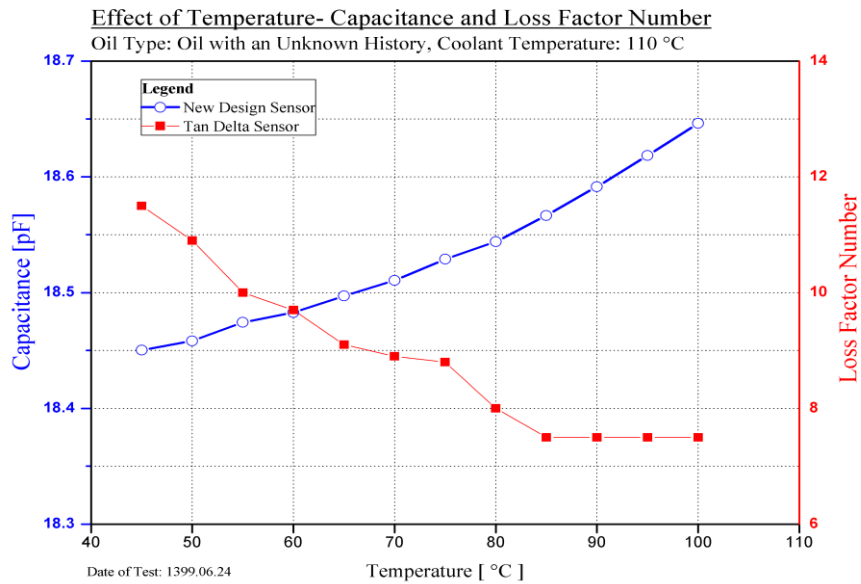
با توجه به نمودار تغییرات فشار روغن عبوری از الکترودهای حسگر تأثیر بسیار ناچیز خطی در خروجی حسگر داشته است. از طرفی تغییرات فشار روغن در موتور محدوده  $1 \pm 4$  قرار دارد، بنابراین فرقی نمی‌کند

که حسگر در چه فشاری و با چه تغییرات فشاری مورد استفاده قرار گیرد.

## ۵-۵-۵ - نتایج اثر دما بر ظرفیت خازنی حسگر و LF حسگر تن دلتا

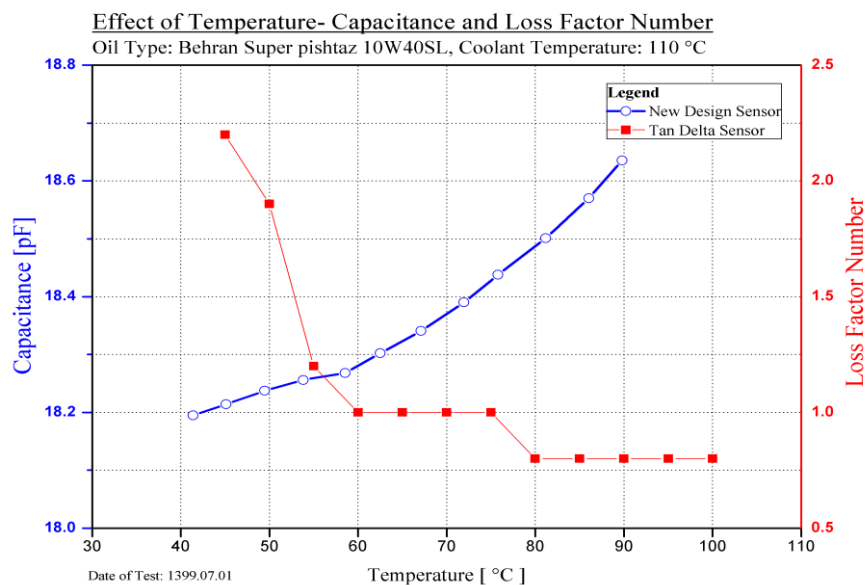
از عوامل ایجاد خطا بر ظرفیت خازنی حسگر می‌توان به تغییرات دما اشاره کرد. با تغییر دمای روغن، خروجی حسگر کیفیت روغن ممکن است تغییر کند. از طرفی بایستی میزان این تغییرات شناسایی شده و تا حد امکان از تأثیر آن بر نتایج نهایی کاست. هم‌چنین افزایش دما تحت فشار موجود در موتورهای احتراق داخلی ممکن است باعث تغییر ابعادی حسگر و یا تغییر فاصله قرارگیری دو الکتروستات‌های حسگر در برابر هم شود -از یک طرف به هم نزدیک و از طرف دیگر از هم دور شوند- که این می‌تواند از عوامل ایجاد خطا در اندازه‌گیری ظرفیت خازنی حسگر گردد.

رفتار حسگر در برابر تغییرات دمای روغن پس از سرهم‌بندی نهایی و از بین بردن خطای ناشی از طول سیم و فاصله متغییر دو سیم رابط از هم، مورد آزمایش قرار گرفت. شکل ۵-۱۶ اثر دما بر تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و حسگر تن دلتا با هم مقایسه شده است. با توجه به شکل حسگر ظرفیت خازنی رفتاری صعودی و تقریباً خطی با شیب یکنواخت از خود نشان داده است. از طرفی تاریخچه روغن مورد استفاده در این مدار نامشخص می‌باشد پس نمی‌توان با اطمینان کامل از صحت انجام این آزمون صحبت به میان آورد. به همین دلیل برای بررسی دقیق تر و برطرف نمودن خطاهای ذکر شده از روغن نو بهران سوپر پیش‌تاز نیمه سنتیک 10W40 بهره گرفته شد. در ضمن مدار روغن نیز با بنزین تنظیف گردید.



شکل ۵-۱۶. اثر دما بر تغییرات ظرفیت خازنی حسگر و خروجی های حسگر تن دلتا (روغن با سابقه نامشخص)

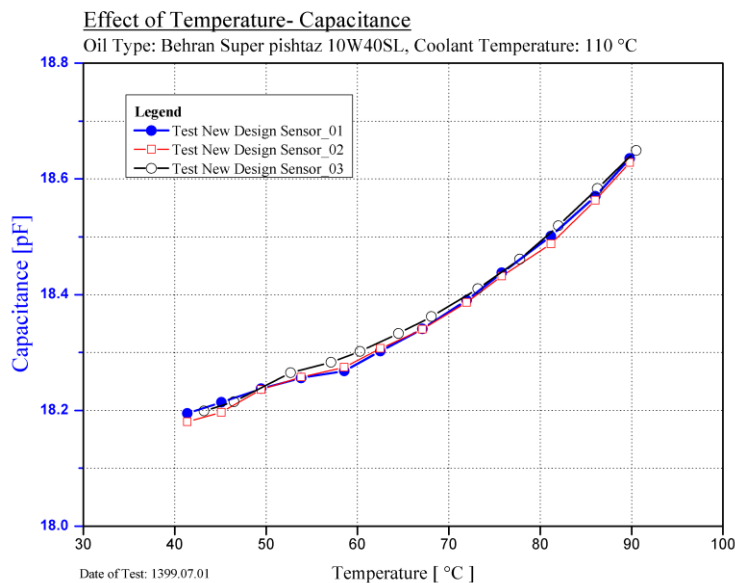
پس از تعویض روغن و نصب حسگر ظرفیت خازنی به همراه حسگر تن دلتا روی مسیر روغن آزمون ذکر شده تحت شرایط دمایی و فشاری یکسان برای بررسی رفتار حسگر تحت تأثیر عامل دمایی تکرار گردید. شکل ۵-۱۷ نمودار مقایسه‌ای اثر دما بر ظرفیت خازنی حسگر و خروجی‌های حسگر تن دلتا را برای روغن نو نشان می‌دهد. با دقت در شکل ۵-۱۷ می‌توان به این مهم دست یافت که ظرفیت خازنی حسگر در کل آزمون نسبت به حالت قبل کاهش یافته است و از طرفی شیب تغییرات ظرفیت خازنی حسگر برای روغن نو نسبت به روغن با سابقه نامشخص افزایش یافته است به گونه‌ای که ظرفیت خازن به ازای تغییرات دمایی ۶۰ درجه سانتیگراد به میزان یک پیکوفاراد افزایش پیدا کرده است.



شکل ۵-۱۷. نمودار مقایسه‌ای اثر دما بر ظرفیت خازنی حسگر و خروجی حسگر تن دلتا (روغن نو)

## ۵-۶ - محاسبه ضریب تصحیح دمایی حسگر ظرفیت خازنی

برای اطمینان از تجدیدپذیر بودن رفتار حسگر تحت تأثیر افزایش دما، آزمون ذکر شده در بخش قبل چندین بار دیگر تحت همان شرایط دمایی و فشاری بیان شده تکرار شد. شکل ۵-۱۸ نتایج حاصل از بررسی تکرارپذیر بودن رفتار حسگر تحت تأثیر افزایش دمای روغن را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵-۱۸ رفتار حسگر در برابر تغییرات دمایی چه در حالت افزایش دما و چه در حالت کاهش دما -آزمون شماره ۱ و ۳ در جهت افزایش دما و آزمون ۲ در جهت کاهش دما- بسیار تکرارپذیر می‌باشد. هم‌چنین می‌توان براساس اختلاف بسیار کم داده‌های خروجی در هر حالت به این مهم دست یافت که ضریب دی‌الکتریک روغن بعد از هر مرحله و براساس افزایش ساعت کارکرد روغن در مدار روغن تغییر یافته و به میزان چند دهم پیکوفاراد افزایش پیدا کرده است. به عبارت دیگر رفتار حسگر نسبت به افزایش دما تقریباً یکنواخت و صعودی می‌باشد که این رفتار می‌تواند تحلیل و تجزیه داده‌های خروجی را آسان‌تر نماید.



شکل ۵-۱۸. نتایج حاصل از بررسی تکرارپذیر بودن رفتار حسگر تحت تأثیر تغییرات دمای روغن

رفتار حسگر در برابر تغییرات دمایی چه در حالت افزایش دما و چه در حالت کاهش دما -آزمون شماره ۱ و ۳ در جهت افزایش دما و آزمون ۲ در جهت کاهش دما- بسیار تجدیدپذیر می‌باشد. هم‌چنین می‌توان براساس اختلاف بسیار کم داده‌های خروجی در هر حالت به این مهم دست یافت که ضریب دی‌الکتریک روغن بعد از هر مرحله و براساس افزایش ساعت کارکرد روغن در مدار روغن تغییر یافته و به میزان چند صدم پیکوفاراد افزایش پیدا کرده است. به عبارت دیگر رفتار حسگر نسبت به افزایش دما تقریباً یکنواخت و صعودی می‌باشد که این رفتار می‌تواند تحلیل و تجزیه داده‌های خروجی را آسان‌تر نماید.

برای رفع این مشکل چند راه حل وجود دارد؛

- (۱) از حسگر خازنی فقط در دمای مشخص استفاده شود. به‌عنوان مثال بایستی دمای تمام روغن‌های مورد آزمایش در یک دمای مشخص قرار گیرد و سپس ظرفیت خازنی آن محاسبه گردد تا بتوان خطای ایجاد شده ناشی از تغییرات دما در ظرفیت خازنی را حذف کرد.

(۲) استفاده از جدول‌هایی برای تحلیل محدوده خروجی حسگر کیفیت روغن در دماهای مختلف است.

به‌عنوان مثال به ازای هر ۵ درجه افزایش دما خروجی حسگر در چه محدوده‌ای قرار می‌گیرد.

(۳) استفاده از روابط ریاضی تصحیح اثر دما بر ظرفیت خازنی حسگر است که براساس نتایج تجربی

بدست می‌آید. در این رابطه دمای مرجع ظرفیت خازنی ۸۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده و

می‌توان با اندازه‌گیری دما توسط حسگر دمای تعبیه شده در حسگر، ظرفیت خازنی را توسط

رابطه ۳-۵ تصحیح نمود.

$$K_c(T) = 0.000157 \times (T - 80)^2 + 0.0143 \times (T - 80) + 0.1265 \quad (۳-۵)$$

$$R^2 = 0.9986$$

$$\text{Corrected Capacitance} = K_c(T) \times C \quad (۴-۵)$$

در این رابطه  $K_c$  ضریب تصحیح دمایی ظرفیت خازنی،  $T$  دمای اندازه‌گیری شده توسط حسگر PT100،

$R^2$  ضریب رگرسیون،  $C$  ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده حسگر می‌باشد.  $K_c$  برای حسگر بین ۰/۶۷۰-

تا ۰/۶۵۷ متغیر است. بنابراین در صورت استفاده از این رابطه، اثر دما بر روی میزان خطای ظرفیت

خازنی اندازه‌گیری شده را می‌توان به کمتر از ۰/۰۷ پیکوفاراد کاهش داد. از طرفی دمای مرجع ۸۰

درجه سانتیگراد است که ظرفیت خازنی بدست آمده مقدار معادل ظرفیت خازنی محاسبه شده در این

دما می‌باشد. بنابراین با داشتن محدوده‌های مجاز ظرفیت خازنی برای سلامت روغن در این دما،

می‌توان بر روند خرابی روغن نظارت داشت. شکل ۵-۱۹ مقایسه حد تغییرات ظرفیت خازنی حسگر را

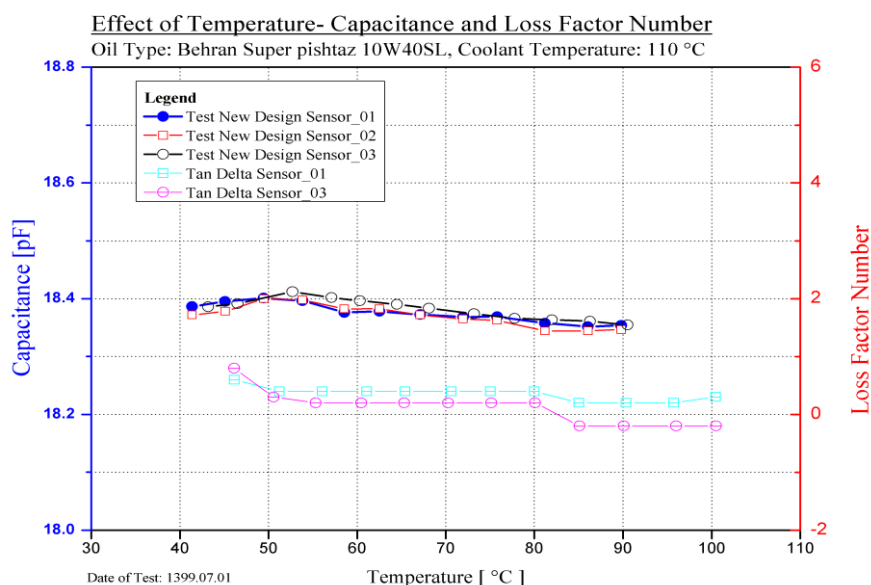
پس از اعمال ضریب تصحیح دمایی و خروجی حسگر تن‌دلتا را نشان می‌دهد. با دقت در شکل ۵-۱۹

پس از اعمال ضریب تصحیح دمایی آمده در معادله (۴-۵)، محدوده نتایج خروجی حسگر تحت تأثیر

تغییرات دمایی روغن که با توجه به شکل ۵-۱۸ تقریباً در محدوده ۰/۷ پیکوفاراد متغیر بود به کمتر

از ۰/۰۶ پیکوفاراد کاهش یافت و این خود بیانگر عملکرد بسیار مناسب ضریب تصحیح دمایی در از

بین بردن اثرات تغییر دما در نتایج خروجی می‌باشد.



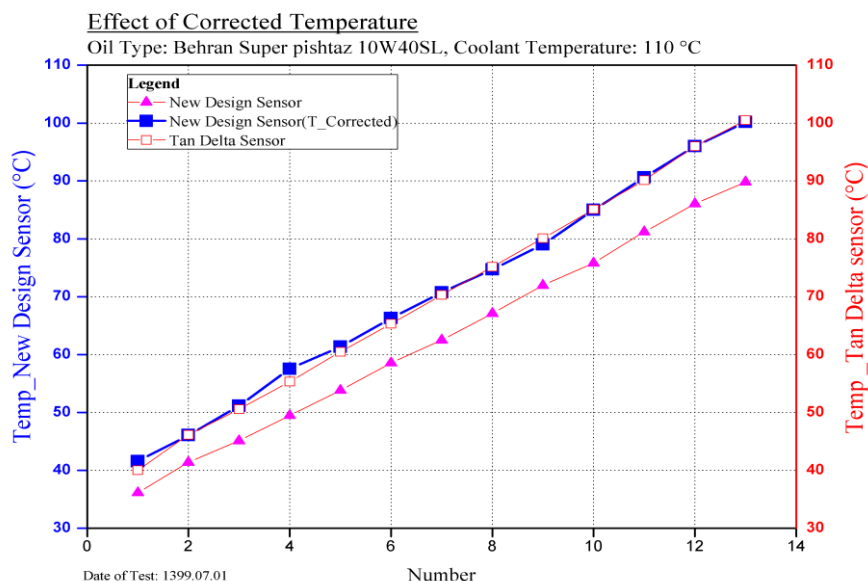
شکل ۵-۱۹. مقایسه حد تغییرات ظرفیت خازنی حسگر پس از اعمال ضریب تصحیح دمایی و خروجی حسگر تن دلتا

با دقت در شکل ۵-۱۹ پس از اعمال ضریب تصحیح دمایی آمده در معادله (۵-۴)، محدوده نتایج خروجی حسگر تحت تأثیر تغییرات دمایی روغن که با توجه به شکل ۵-۱۸ تقریباً در محدوده ۰/۷ پیکوفاراد متغیر بود به کمتر از ۰/۰۶ پیکوفاراد کاهش یافت و این خود بیانگر عملکرد بسیار مناسب ضریب تصحیح دمایی در بین بردن اثرات تغییر دما در نتایج خروجی می‌باشد. از طرفی دمای خوانش شده توسط حسگر ظرفیت خازنی در همه آزمون‌ها یک اختلاف ثابت با دمای خوانش شده توسط حسگر تن دلتا به دلیل ضخامت المان فلزی حسگر دارد به همین جهت برای تصحیح دما از استفاده رابطه (۵-۵) می‌شود.

$$T_c = 1.12 \times T - 0.4567 \quad (5-5)$$

$$R^2 = 0.9993$$

که در این رابطه  $T_c$  دمای تصحیح شده حسگر،  $T$  دمای اندازه‌گیری شده توسط حسگر PT100،  $R^2$  ضریب رگرسیون می‌باشد. بنابراین در صورت استفاده از این رابطه، اثر دما بر روی میزان خطای ظرفیت تقریباً برابر صفر می‌شود. شکل ۵-۲۰ مقایسه حد تغییرات دمای حسگر ظرفیت خازنی پس از اعمال ضریب تصحیح دمایی و دمای حسگر تن دلتا را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲۰. مقایسه حد تغییرات دمای حسگر pt100 پس از اعمال ضریب تصحیح دما و دمای حسگر تن دلتا

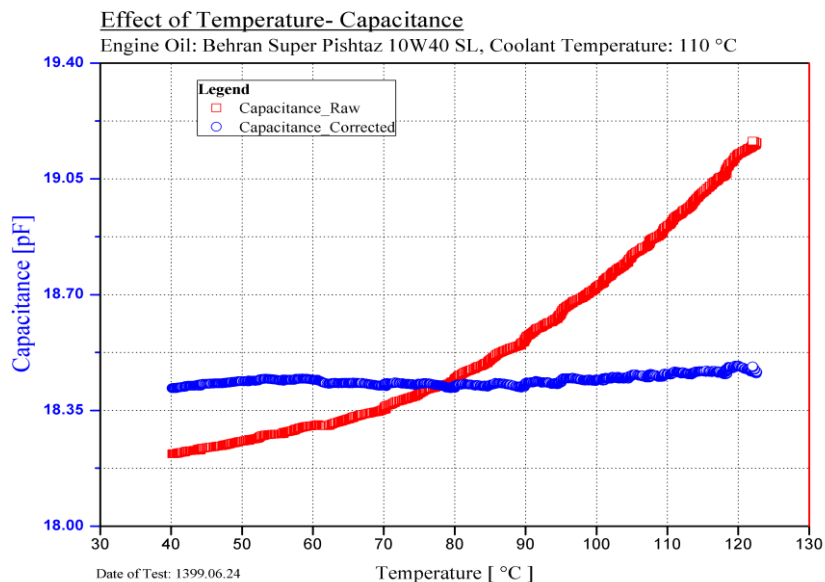
با دقت در شکل ۵-۲۰ می‌توان نتیجه گرفت که ضریب در نظر گرفته شده برای تصحیح دمای حسگر، همبستگی بسیار خوبی با دمای خوانش شده توسط حسگر تن دلتا دارد. پس از این ضریب می‌توان برای خوانش صحیح دما در این حسگر بهره برد.

همان‌طور که در فصل‌های قبل به آن اشاره شد اجزای حسگر تحت تأثیر دما و فشار موجود در موتور ممکن است دچار پیچش، اعوجاج و ... شوند. از طرفی با افزایش دمای روغن، ثابت دی‌الکتریک آن بسته به نوع روغن استفاده شده، تغییر می‌کند. از داده‌های نمودار شکل ۴-۱۴ که برای روغن شل‌هلیکز 5W30 که ساختاری شبیه روغن بهران سوپر پیشتاز نیمه سنتیک 10W40 دارد می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دمای ۴۰ تا ۱۰۰ درجه‌ای روغن در بهترین حالت با کارکرد ۳ ماهه، ۵/۱ درصد ثابت دی‌الکتریک روغن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. براساس نتایج بدست آمده از آزمون بررسی خروجی حسگر ظرفیت خازنی برای روغن بهران سوپر پیشتاز، تغییرات ۴۰ تا ۱۰۰ درجه‌ای دمای روغن، ۰/۶ پیکوفاراد ظرفیت خازن را تغییر می‌دهد که باعث تغییرات ۳/۳ درصدی ثابت دی‌الکتریک روغن می‌شود. از طرفی تغییر ثابت دی‌الکتریک تحت تأثیر دما از خصوصیات ذاتی خود روغن می‌باشد. هم‌چنین در تحلیل المان محدود حسگر در شرایط

کارکرد موتور (بخش ۵-۲)، افزایش دمای ۴۰ تا ۱۰۰ درجه‌ای روغن می‌تواند ۰/۲ درصد خروجی حسگر را تغییر دهد. پس می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دمای روغن از ۴۰ به ۱۰۰ درجه سانتیگراد، ۳/۵ درصد ثابت دی‌الکتریک روغن را تغییر می‌دهد و میزان خطای اجزای حسگر نسبت به ثابت دی‌الکتریک بسیار کم می‌باشد که در صورت استفاده از حسگر در دمای ثابت می‌توان این خطا را حذف نمود. از طرفی این خطا تکرارپذیر و از طریق فرآیند کالیبراسیون قابل حذف می‌باشد.

### ۵-۷ - بررسی اثر دما بر ظرفیت خازنی حسگر در آزمون گذرا

برای بررسی و ارزیابی نحوه عملکرد ضریب تصحیح دمایی محاسبه شده در نتایج خروجی، آزمونی گذرا طراحی شد. بدین گونه که در فواصل زمانی مشخص و طی مدت زمان یک ساعت دمای روغن تحت فشار ۵ بار، به صورت پله ۵ واحدی افزایش یافته و به دمای ۱۴۰ درجه سانتیگراد رسانده می‌شود. شکل ۵-۲۱ عملکرد حسگر کیفیت روغن را تحت شرایط ذکر شده در آزمون گذرا را نشان می‌دهد.



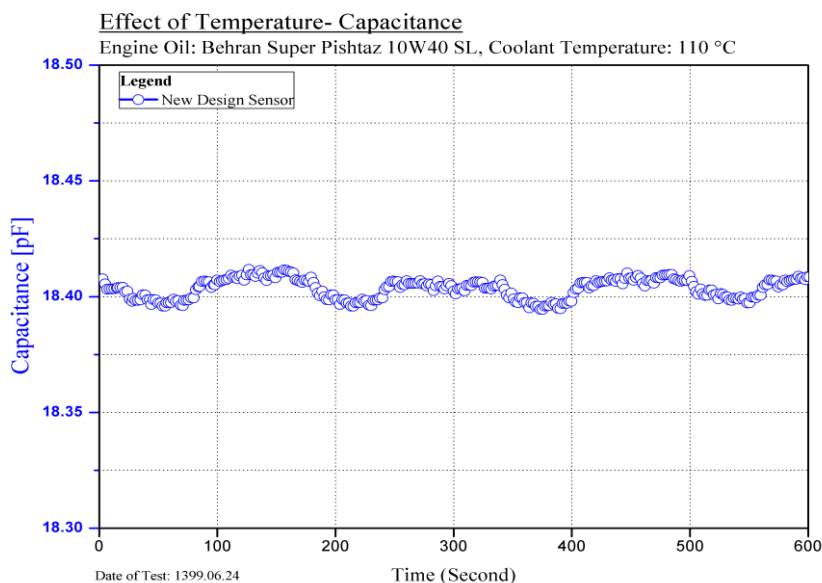
شکل ۵-۲۱. عملکرد حسگر پس از اعمال ضریب تصحیح دمایی در آزمون گذرا

با توجه به شکل ۵-۲۱ ضریب تصحیح دمایی توانسته به خوبی اثر تغییرات دمایی روغن را در نتایج خروجی حسگر حذف کند به طوری که پس از اعمال آن محدوده تغییرات ظرفیت خازنی حسگر که تقریباً یک واحد بوده به کمتر از ۰/۰۵ پیکوفاراد کاهش یافته است. پس می توان نتیجه گرفت که تغییرات دما پس از اعمال این ضریب تصحیح، در هر حالتی -حالت پایدار و حالت گذرا- در محدوده ۴۰ تا ۱۴۰ درجه ای دمایی مخزن روغن، حداکثر ۰/۳ درصد بر روی نتایج خروجی حسگر تأثیر گذار باشد که از این میزان ۰/۲ درصد مربوط به رفتار اجزای مکانیکی حسگر تحت تأثیر افزایش دما می باشد.

### ۵-۸-۵ - آزمون دوام حسگر در دمایی ۱۴۰ درجه سانتیگراد روغن

برای بررسی و ارزیابی عملکرد حسگر در دمایی ۱۴۰ درجه سانتیگراد، آزمونی طراحی شد که در آن ابتدا دمایی روغن را با پله ۵ واحدی افزایش داده و به دمایی مطلوب رسانده سپس فشار روغن را با پله واحد به ۵ بار رسانده و این شرایط به مدت ۶ ساعت ادامه پیدا کرد. شکل ۵-۲۲ نحوه عملکرد حسگر ظرفیت خازنی را در آزمون دوام در دمایی ۱۴۰ درجه سانتیگراد روغن برای مدت زمان ۱۰ دقیقه نشان می دهد.

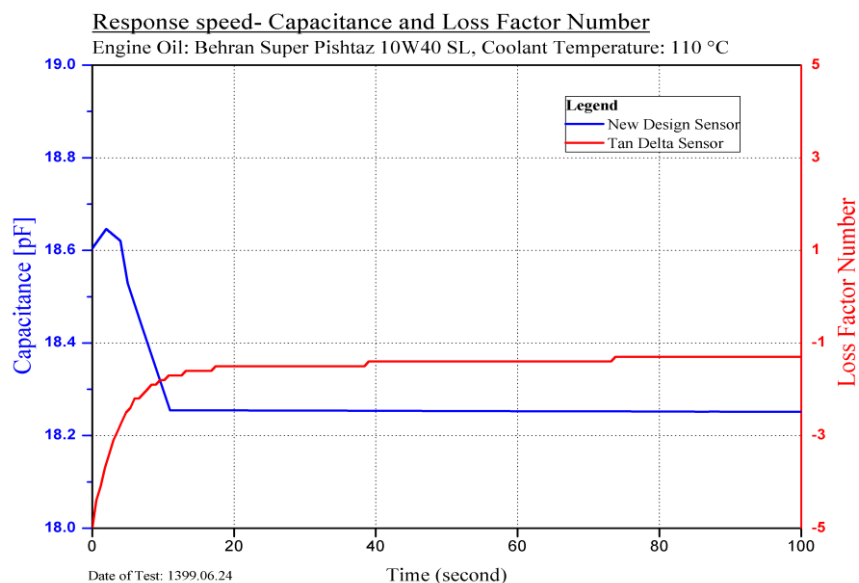
با توجه به داده های شکل ۵-۲۲ می توان به این نتیجه رسید که حسگر ساخته شده توانایی بسیار بالایی در خوانش ظرفیت خازن در دمایی ۱۴۰ درجه سانتیگراد را دارا می باشد. از طرفی پس از اعمال ضریب تصحیح دمایی، خروجی حسگر با توجه به محاسبات انجام شده تنها در محدوده  $\pm 0.01$  / ۱۸/۴۰ پیکوفاراد متغیر می باشد و این خود بیانگر عملکرد بسیار مناسب ضریب تصحیح دمایی در از بین بردن خطای ناشی از تغییرات دما در خروجی حسگر می باشد. همچنین پس از انجام این آزمون بُرد خوانش ظرفیت خازنی نسوخت، رفتاری تکرارپذیر و روغن به محفظه برد نفوذ نکرده بود.



شکل ۵-۲۲. عملکرد حسگر ظرفیت خازنی در آزمون دوام حسگر در دمای ۱۴۰ درجه سانتیگراد روغن با ضریب تصحیح دمایی

### ۵-۵-۹ - آزمون بررسی سرعت پاسخ حسگر

برای بررسی سرعت پاسخ حسگر، مدار روغن را در شرایط کارکرد موتور درونسوز قرار داده به طوری که دمای روغن ۴۰ درجه سانتیگراد و فشار روغن ۵ بار باشد. سپس حسگر ظرفیت خازنی و حسگر تن دلتا به صورت همزمان روشن می شود. مدت زمان سپری شده برای رسیدن هر کدام از حسگرها به شرایط پایدار (عدد ثابت) را سرعت پاسخ حسگر می نامند. شکل ۵-۲۳ نتایج مقایسه ای سرعت پاسخ حسگر ظرفیت خازنی و تن دلتا را نشان می دهد.



شکل ۵-۲۳. نتایج مقایسه‌ای سرعت پاسخ حسگر ظرفیت خازنی و حسگر تن‌دلتا

براساس شکل ۵-۲۳ می‌توان نتیجه گرفت که سرعت پاسخ حسگر ظرفیت خازنی نسبت به حسگر تن‌دلتا بیشتر می‌باشد و کمتر از ۲۰ ثانیه خروجی حسگر ظرفیت خازنی پایدار می‌شود. به عبارت دیگر زمان کمتری سپری می‌شود تا داده‌های خروجی حسگر ظرفیت خازنی به شرایط پایدار برسد.

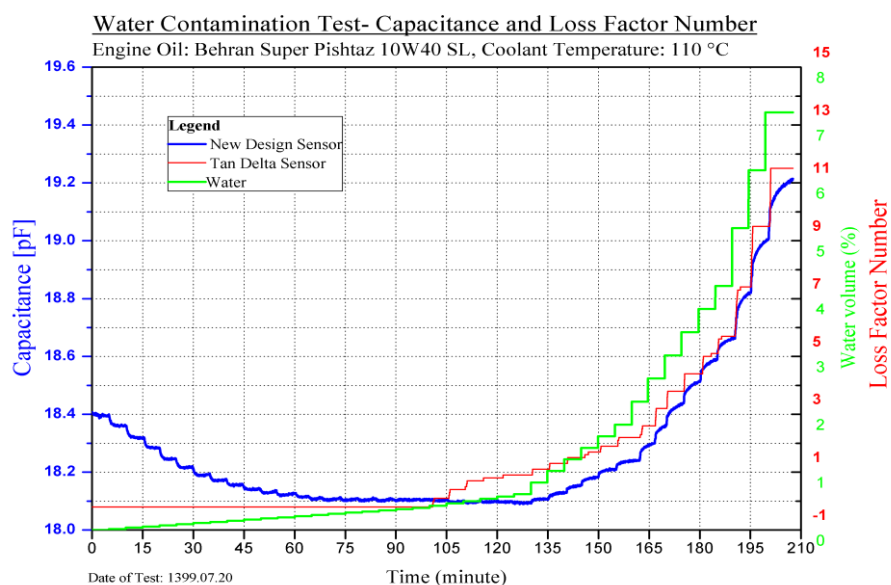
## ۵-۶- بررسی عملکرد حسگر در تشخیص آلودگی روغن موتور توسط آب

در یک سیستمی که روغن در آن به‌عنوان خنک‌کننده استفاده می‌شود، احتمال اختلاط روغن با آب وجود دارد که در صورت نفوذ آب به درون روغن، روغن به سرعت دچار خرابی می‌شود و اکثر خصوصیات ذاتی خود را از دست می‌دهد. در این تجهیزات، تشخیص زمان و مقدار آب نفوذی در روغن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. برای انجام آزمون آلودگی آب در روغن، آب به میزان مشخص در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای و از ۰ تا ۶/۰۳ درصد حجمی به مخزن روغن تزریق می‌شود. نتایج خروجی‌های حسگر ظرفیت خازنی و حسگر تن‌دلتا برای درصدهای مختلف آب تزریق شده به روغن ثبت شد. جدول ۵-۹ میزان آب اضافه شده به روغن را در هر مرحله نشان می‌دهد. براساس داده‌های جدول ۵-۹ آزمون آلودگی آب در

روغن برای ارزیابی حسگر در تشخیص این نوع آلودگی در روغن انجام شد. شکل ۵-۲۴ نتایج مقایسه‌ای اثر افزایش آب در روغن توسط حسگر ظرفیت خازنی و حسگر تن‌دلتا را نشان می‌دهد. روغن مورد استفاده در این آزمون روغن بهران سوپر پیش‌تاز نیمه سنتیک 10W40 می‌باشد و دمای انجام آزمون ۸۰ درجه سانتیگراد است.

جدول ۵-۹. میزان آب اضافه شده به مخزن روغن در هر مرحله از زمان کارکرد مدار

مرحله	درصد حجمی آب اضافه شده (%)	زمان سپری شده (Minute)	درصد حجمی آب موجود در مخزن (%)
۱	۰	۵	۰
۲	۰/۰۲	۱۰	۰/۰۲
۲	۰/۰۲	۱۵	۰/۰۴
...	...	...	...
۲۰	۰/۰۲	۱۰۰	۰/۳۸
۲۱	۰/۰۴	۱۰۵	۰/۴۲
...	...	...	...
۲۶	۰/۰۴	۱۳۰	۰/۶۲
۲۷	۰/۲	۱۳۵	۰/۸۲
...	...	...	...
۳۲	۰/۲	۱۶۰	۱/۸۲
۳۳	۰/۴	۱۶۵	۲/۲۲
...	...	...	...
۳۸	۰/۴	۱۹۰	۴/۲۲
۳۹	۱	۱۹۵	۵/۲۲
۴۰	۱	۲۰۰	۶/۲۲
۴۱	۱	۲۰۵	۷/۲۲



شکل ۵-۲۴. نتایج مقایسه‌ای اثر افزایش آب در روغن توسط حسگر ظرفیت خازنی و حسگر تن‌دلتا

با توجه به شکل ۵-۲۴ در وهله اول می‌توان با اطمینان نتیجه گرفت که حسگر ظرفیت خازنی ساخته شده می‌تواند کمترین درصدهای حجمی آب نفوذی به روغن را که در حد ۰/۰۲ درصد حجمی روغن می‌باشد را تشخیص دهد اما حسگر تن‌دلتا این قابلیت را دارا نمی‌باشد. این قابلیت تشخیص تا ۰/۳۸ درصد حجمی آب در روغن نیز ادامه دارد. این در حالی است که حسگر تن‌دلتا با اضافه شدن ۲۰ سی‌سی آب به مخزن روغن هیچ واکنشی نشان نداده است. از طرفی با افزایش میزان درصد حجمی آب درون روغن، از دقیقه ۱۰۰ به بعد نتایج خروجی حسگر تن‌دلتا افزایش یافته و تا انتهای آزمون به ۱۱/۵ درصد رسیده است. حسگر ظرفیت خازنی نیز پس از اضافه شدن اولین ۱۰ سی‌سی به مخزن روغن واکنش نشان داده و با همان شیب صعود حسگر تن‌دلتا، به مقدار ۱۹/۲۱ پیکوفاراد رسیده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که حسگر ظرفیت خازنی برخلاف حسگر تن‌دلتا هم میزان کم نفوذ آب در روغن و هم میزان زیاد آن را می‌تواند به خوبی شناسایی کند و از خرابی‌های توسعه یافته در موتور که بر اثر برهم‌کنش آب در روغن رخ می‌دهد، جلوگیری نماید.

# فصل ۶: جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادها

## فصل ۶ نتیجه‌گیری و پیشنهادات

### ۶-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب ارائه شده می‌توان موارد زیر را جزء قابلیت‌های اختصاصی حسگر کیفیت روغن

برشمرد:

- امکان پایش وضعیت کیفی روغن در لحظه
- پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده روغن
- کاربری آسان
- قابلیت استفاده به‌صورت خارج از مدار و برخط
- توانایی خوانش دمای روغن در لحظه
- حساسیت بسیار بالا نسبت به تغییرات کیفیت روغن
- حسگر طراحی شده قابلیت نصب بر روی اکثر موتورهای درونسوز به دلیل طراحی خاص بدنه آن را دارد.
- سنجش کیفیت روغن تا دمای ۱۴۰ درجه سانتیگراد که در نمونه‌های موجود در بازار این مقدار تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد می‌باشد.
- دقت بسیار بالای حسگر در اندازه‌گیری کیفیت روغن
- هزینه‌های تولید بسیار پایین حسگر نسبت به تهیه نمونه‌های خارجی در صورت وجود
- امکان تجاری سازی حسگر
- کاهش وابستگی کشور به صنایع دیگر کشورها در شرایط تحریم
- قابلیت شناسایی محدوده خرابی نمونه‌های داخلی روغن تولید شده که در نمونه‌های خارجی این حسگر این قابلیت وجود ندارد.

- قابلیت کارکرد تحت فشار روغن موجود در موتورهای درونسوز
- تشخیص روغن اصلی از دیگر نمونه های روغن موجود در بازار (روغن تقلبی) از ویژگی های منحصر به فرد این حسگر می باشد.
- عدم تأثیرپذیری خروجی حسگر از دما و فشار روغن
- در شبیه سازی عددی که برای تخمین مدل صفر بعدی ظرفیت خازنی مورد استفاده قرار گرفت، ظرفیت مطلوب ۱۵/۹۴ محاسبه گردید. از طرفی بعد از فرآیند ساخت حسگر و در عمل این ظرفیت برابر ۱۸/۲۲ اندازه گیری شد که در این محاسبات خطای ۱۴ درصدی دیده شد. از عوامل احتمالی خطا می توان به ساختار متفاوت عایق مورد استفاده و تلرانس های ساخت اشاره کرد.
- براساس تحلیل های انجام شده و نتایج آزمون های برون خط حسگر می توان به این مهم دست یافت که ۰/۲ درصد از تغییرات ظرفیت خازنی حسگر در قبال افزایش دمای ۱۴۰ درجه ای روغن مربوط به اجزای مکانیکی حسگر بوده که قابل چشم پوشی می باشد.
- تکرارپذیری حسگر قابل قبول بوده به طوری که در هر تکرار حداکثر خطای ظرفیت خازنی کمتر از ۰/۰۱ پیکوفاراد می باشد.
- تغییرات دبی روغن هیچ گونه تأثیری در نتایج خروجی حسگر نداشته است.
- به دلیل فاصله بسیار نزدیک برد خوانش ظرفیت خازن با الکترودهای حسگر سیم اتصال به الکترودها کمترین تأثیر ممکن در اندازه ظرفیت خازنی حسگر را دارند.
- دمای کاری برد خوانش ظرفیت خازنی [۱۲۵ -۲۰] درجه سانتیگراد می باشد.
- عایق PTFE موجود میان الکترودها کمترین تأثیر در مقدار ظرفیت خازنی حسگر را دارا می باشند به طوری که تنها ۷ درصد از ظرفیت کل را به خود اختصاص داده اند.

جدول ۶-۱. مشخصات کلی حسگر کیفیت روغن

Product DATA SHEET of Oil Condition Monitoring Of Oil Quality Sensor		
<b>Order Information</b>	Product Name	SHQS-01
<b>Physical</b>	Material	Stainless Steel AISI304
	Dimensions	90mm×37mm(L×W)
	Weight	280g
	Thread	1/2" BSPP Thread / M32 Hex thread
<b>Connections</b>		5 Pin Lumberg Male
<b>Electrical</b>	Power Supply	5V DC USB
<b>Data Output</b>	Digital Output	USB 2.0 & 3.0
<b>Oil Quality Detection Parameters</b>	Frequency	0.5 Hz
	Sensitivity	0.005 pf (% 1.0 Loss Factor of Quality (LFQ))
	Accuracy	±0.03pf (% 6.0 Loss Factor of Quality (LFQ))
	Elements	All wear and contamination elements
<b>Oil Type</b>	Configuration	Any synthetic or mineral oil-including fuel oils such as gasoline spark ignition engine
<b>Environmental</b>	sensor Temperature	-20°C (-4°F) to +120°C (+248°F)
	Fluid Temperature	-20°C (-4°F) to +150°C (+248°F)
	Recommended Temperature	Up to 100 °C
	Fluid Pressure	up to 10 bar (290psi)
	Water & Dust	Estimated: IP55

- براساس نتایج بدست آمده در آزمون های برون خط حسگر مشخص شد که محدوده تغییرات ظرفیت خازنی برای شناسایی خرابی روغن تکرار پذیر می باشد. پس می توان نتایج خروجی حسگر را برای روغن سپاهان 20W50 را برحسب درصد و با استفاده از محدوده خروجی حسگر تن دلتا به صورت جدول ۶-۲ بیان کرد. برای سایر نمونه های دیگر روغن ممکن است محدوده خروجی حسگر متفاوت باشد به همین جهت نیاز به کالیبراسیون مجدد دارد. تجزیه و تحلیل خروجی حسگر در دمای محیط صورت گرفته است.

## جدول ۶-۲. تعیین کیفیت روغن براساس خروجی حسگر

ظرفیت خازنی حسگر (Pf)	تحلیل خروجی
$C < 17.00$	خرابی عملکرد حسگر
$C = 17.00$	هوا
$17.00 < C < 18.00$	ماده با ضریب دی‌الکتریک متفاوت (غیر از روغن مرجع) و یا عملکرد حسگر همراه با هوا
$18.00 < C < 18.03$	روغن تازه
$18.03 < C < 18.18$	روغن سالم
$18.18 < C < 18.33$	ساعت های پایانی عمر روغن (روغن زودتر تعویض گردد)
$C > 18.33$	خرابی روغن (محدوده قرمز)

- تغییرات فشار نیز در حسگر نمی‌تواند باعث بوجود آمدن اختلاف در نتایج خروجی حسگر کیفیت روغن شود.
- تغییرات دما در روغن باعث ایجاد خطای تکرار پذیر در خروجی حسگر شده، لذا با استفاده از ضریب تصحیح دمایی این تغییرات بسیار ناچیز می‌شود.
- این حسگر قابلیت نمایش و ذخیره داده را بر روی رایانه را دارا می‌باشد.
- قابلیت ذخیره سازی اطلاعات حاصل از ارزیابی مستمر برای مدت طولانی
- پایش مستمر وضعیت روغن و نمایش میزان مطلق کیفیت روغن در لحظه

## ۶-۲- پیشنهادها

- ◀ رویکرد تحلیل کیفیت روغن برای کاربردهای دیگر روغن روانکار نظیر کاربردهای نیروگاهی، سیستم‌های هیدرولیک و ... بررسی شود.
- ◀ برای ارائه مدلی جامع از شرایط کارکرد روغن در اکثر موتورهای درونسوز، می‌توان با انجام تست های گسترده میدانی به ارزیابی وضعیت مشخصه های روغن، شرایط کارکرد موتور، مشخصه‌های عملکردی روغن از جمله دما و فشار و ... و نحوه تأثیرپذیری روغن از شرایط

مختلف رانندگی و کارکرد موتور پرداخت. بدین ترتیب شرایط بهینه کارکرد روغن و خطوط مبنای مشخصه های روغن برای کارکرد مناسب در موتور امکانپذیر خواهد بود. البته برای این کار به هزینه و صرف زمان بالایی نیاز خواهد بود.

◀ در صورت عملیاتی شدن طرح، پیش بینی وضعیت کیفیت روغن براساس نحوه کارکرد موتور و شرایط روغن قابل اجرا خواهد شد.

◀ با دستیابی به داده های منسجم حاصل از تست های گسترده میدانی روی موتورهای مختلف، با ارزیابی نحوه تغییرات کیفیت روغن و وابستگی آن به شرایط کارکرد موتور و استفاده از تئوری تشابه، دستیابی به عددی بی بعد به عنوان معیاری برای تشخیص خرابی روغن امکان پذیر خواهد بود.

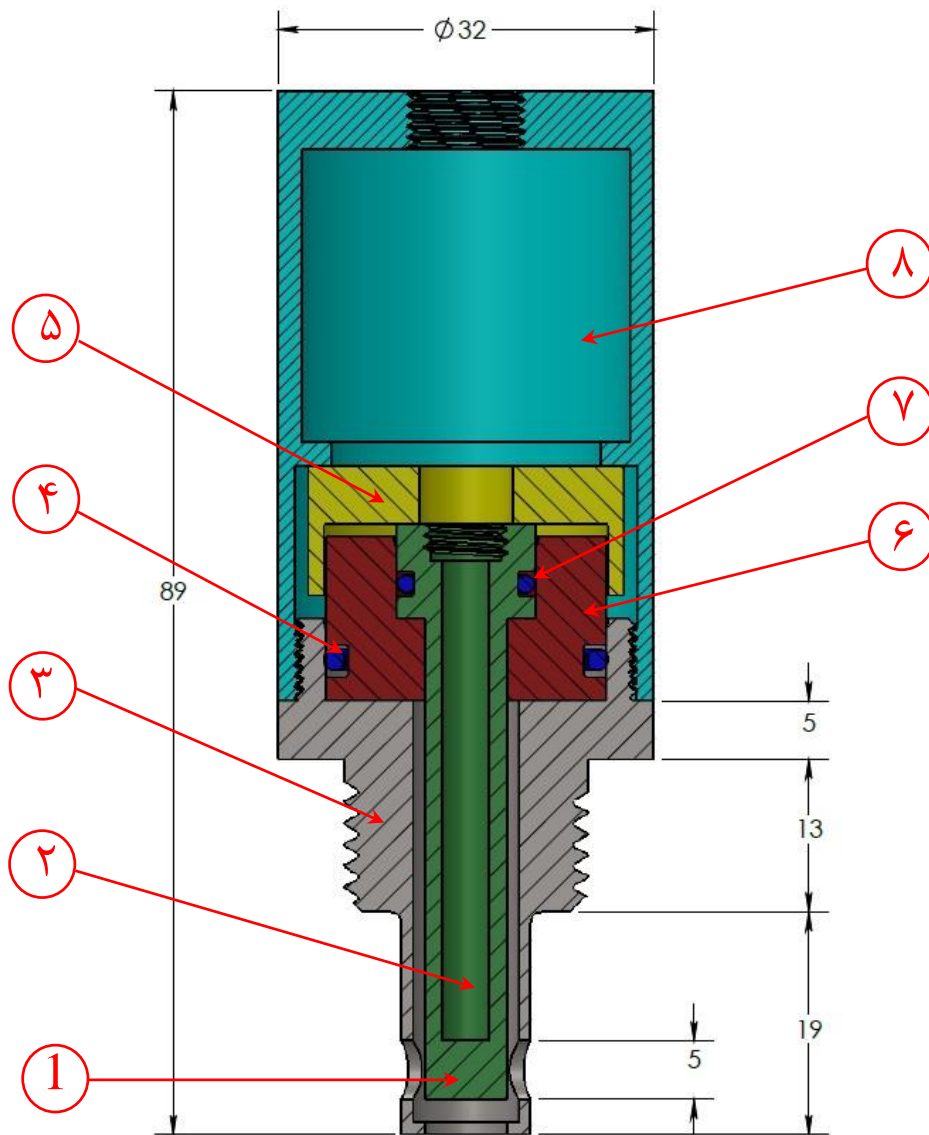
# پوسته

## پیوست ۱ مروری بر طرح های اولیه ارائه شده

ردیف	شماتیک طرح	مزایای طرح	مشکلات طرح	پیشنهادات
۱			<ul style="list-style-type: none"> <li>x ماشینکاری پیچیده</li> <li>x وزن زیاد</li> <li>x ضخامت بیش از اندازه محفظه تعبیه شده برای نصب قطعه الکترونیکی</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o بهبود آببندی بین دو استوانه داخلی و خارجی</li> <li>o کاهش ضخامت پوسته</li> <li>o مشکل اتصال الکترودها به برد الکترونیکی</li> </ul>
۲		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ماشین کاری ساده تر</li> <li>✓ آببندی بهتر در قسمت داخلی حسگر</li> <li>✓ کاهش وزن و ضخامت حسگر</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>x ماشینکاری پیچیده</li> <li>x وزن نسبتاً زیاد</li> <li>x زمان بر بودن ماشینکاری</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o اضافه کردن قسمت آببند جهت نصب حسگر بر روی تجهیزات</li> <li>o کاهش وزن حسگر</li> <li>o بهبود طراحی</li> </ul>
۳		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ نزدیک شدن شکل ظاهری طرح به طرح نهایی</li> <li>✓ تاثیر ناچیز عایق بین دو استوانه بر ظرفیت خازنی کل</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>x ماشینکاری پیچیده</li> <li>x عدم اطمینان جهت هم مرکز بودن دو استوانه داخلی و خارجی</li> <li>x عدم اطمینان استحکامی در ناحیه تعبیه شده برای عایق در استوانه خارجی</li> <li>x ریسک بالا از نظر زمان و هزینه تولید</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o بهبود عایق بین دو استوانه داخلی و خارجی جهت هم-مرکز شدن استوانه ها</li> <li>o ساده کردن طرح برای کاهش زمان و هزینه تولید</li> <li>o تصحیح ضریب استحکام قطعه</li> </ul>
۴		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ تصحیح اندازه های ابعادی رزوه برای نصب آببند حسگر</li> <li>✓ افزایش ضخامت نواحی اطراف عایق در استوانه بیرونی و افزایش ضریب استحکام قطعه</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>x ماشینکاری پیچیده</li> <li>x عدم اطمینان جهت هم مرکز بودن دو استوانه داخلی و خارجی</li> <li>x ریسک بالا از نظر زمان و هزینه تولید</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o بهبود عایق بین دو استوانه داخلی و خارجی جهت هم-مرکز شدن استوانه ها</li> <li>o ساده سازی طرح برای کاهش زمان و هزینه تولید</li> <li>o رعایت ابعاد استاندارد در نمونه های ساده شده جهت کاربری آسان</li> </ul>

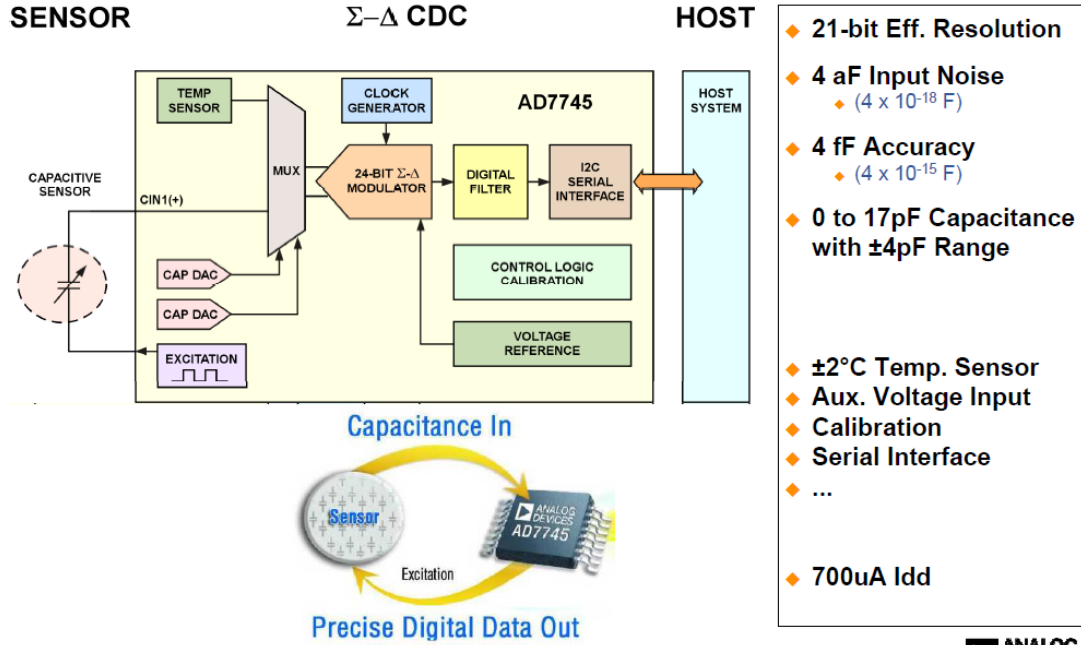
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ از بین بردن قسمت آببند جهت تولید آسان‌تر نمونه اولیه</li> <li>○ بهبود عایق بین دو استوانه داخلی و خارجی جهت هم-مرکز شدن استوانه‌ها</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× ماشینکاری نسبتاً پیچیده در قسمت آببند حسگر</li> <li>× داشتن رزوه اضافی در قسمت اتصال هر دو استوانه به عایق</li> <li>× عدم اطمینان جهت هم مرکز بودن دو استوانه داخلی و خارجی</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ماشینکاری کمتر نسبت به طرح قبلی با حذف محفظه قطعه الکترونیکی</li> <li>✓ کاهش تأثیر ظرفیت ناشی از عایق بر روی ظرفیت خازنی کل با افزایش ضخامت عایق</li> </ul>		۵
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ افزایش ضخامت عایق جهت ماشینکاری راحت‌تر</li> <li>○ بهبود عایق بین دو استوانه داخلی و خارجی</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× داشتن رزوه اضافی در قسمت اتصال هر دو استوانه به عایق</li> <li>× ماشینکاری مشکل برای ضخامت ناچیز عایق جهت هم‌مرکز کردن دو استوانه</li> <li>× تأثیر زیاد عایق بین دو استوانه در ظرفیت خازنی کل</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ ماشینکاری کمتر نسبت به طرح قبلی با حذف قسمت آببند حسگر</li> <li>✓ مقید کردن نسبی دو استوانه جهت هم مرکز شدن</li> </ul>		۶
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ بهبود عایق بین دو استوانه داخلی و خارجی برای کاهش تأثیرات آن در ظرفیت کل</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>× رزولوشن کم ظرفیت خازنی نسبت به تغییرات دی‌الکتریک روغنی</li> <li>× ماشینکاری نسبتاً پیچیده با توجه به طرح قبلی</li> <li>× تأثیر بسیار زیاد عایق بین دو استوانه بر ظرفیت خازنی (تقریباً ۹ پیکوفاراد)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ قابلیت اطمینان بالا جهت هم‌مرکز شدن دو استوانه داخلی و خارجی</li> </ul>		۷
		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ قابلیت اطمینان بالا جهت هم مرکز شدن دو استوانه داخلی و خارجی</li> <li>✓ از بین بردن تأثیر عایق بر ظرفیت خازنی کل با افزایش ضخامت عایق جهت شعاعی</li> <li>✓ رزولوشن بالا جهت خوانش ظرفیت خازنی</li> <li>✓ خوانش ظرفیت خازن در محدوده مطلوب</li> <li>✓ ماشینکاری آسان‌تر</li> </ul>		۸

پیوست ۲ لیست قطعات حسگر



شماره	نام قطعه
۱	الکتروود درونی حسگر
۲	مکان جانمایی حسگر دما
۳	الکتروود بیرونی حسگر
۴	اورینگ میانی الکتروود بیرونی و عایق میانی
۵	عایق جداکننده الکتروود میانی و پوسته نگهدارنده
۶	عایق میان الکتروودهای حسگر
۷	اورینگ میانی الکتروود درونی و عایق میانی
۸	پوسته نگهدارنده

## $\Sigma$ - $\Delta$ CDC – High Performance System On Chip



<b>Oil Quality Sensor (OQSx) Calibration Certificate</b>		
<b>Product Code:</b>	OQSx-1-AA-02-5	
<b>Calibration Details</b>		
Serial Number:	1003799	
Oil Type:	Shell Helix 15W40	
Calibrated By:	R. Davison	
Calibration Date:	28/02/2017	
Calibrated at:	Tan Delta Systems Ltd, UK	
<b>Calibration</b>		
Zero Calibration Fluid	-0.2% to +0.2% @ +30°C (+86°F)	
Span Calibration Fluid	+19.8% to +20.2% @ +30°C (+86°F)	
<b>Calibration Voltage</b>		
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 ۵ جدول مشخصات حسگر تن دلتا

Product DATA SHEET of TAN DELTA Oil Condition Monitoring Of Oil Quality Sensor			
<b>Order Information</b>	Product Name	Oil Quality sensor (OQSx)	
	Product Code	OQSx-1-AA-02-5	
<b>Physical</b>	Material	Stainless Steel AISI304	
	Dimensions	90mm×37mm(L×W)	
	Weight	160g	
	Thread	1/2" BSPP Thread / M32 Hex thread	
	seal	DIN 3869 Viton Seal [Alternative seals and threads available upon request]	
<b>Connections</b>		6 Pin Lumberg Male (IEC 61076-2-106) [Alternative seals and threads available upon request]	
<b>Electrical</b>	Power Supply	9-30V DC	
	Power Consumption	Average 0.4w continuous 30mA	
<b>Data Output/Input</b>	Analogue Output	2×4-20mA (current syncing, passive input)	
	Digital Output	1×RS485:9600 baud half duplex, Modbus protocol supported on RS485, CANbus: CANopen protocol supported on RS485	
<b>Oil Quality Detection Parameters</b>	Frequency	15 per second	
	Sensitivity	Certified better than 15ppm sensitivity	
	Accuracy	±1%	
	Elements	All wear and contamination elements	
<b>Oil Type</b>	Configuration	Any synthetic or mineral oil-including fuel oils such as diesel and bio-diesel	
<b>Environmental</b>	sensor Temperature	-20°C (-4°F) to +120°C (+248°F)	
	Fluid Temperature	-20°C (-4°F) to +120°C (+248°F)	
	External Pressure	0 bar (0psi) to 20 bar (290psi)	
	Fluid Pressure	up to 20 bar (290psi)	
	Water & Dust	IP67 when connected	
	Shock & Vibration		BS EN 60068-2-30 [Test Db - Cyclic Humidity]
			BS EN 60068-2-6 [Test Fc - Sine Vibration]
			BS EN 60068-2-27 [Test Ea - Mechanical Shock]
EMC		EN 61000-6-4:2007 [Generic Emissions Standard for Industrial Environments]	
		EN 61000-6-4:2005 [Generic Immunity Standard for Industrial Environments]	

پیوست ۶ محدوده‌های خروجی حسگر TANDELTA

Oil Quality	Loss Factor	
Description	min	max
Maximum		$\geq 33.75$
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	$\leq 20.00$	

## پیوست ۷ محدوده اندازه‌گیری دستگاه *LCR Tester 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	1μH	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

## مرجع

- [1] T. Mang and W. Dresel. (2001) "Lubricants and lubrications", Germany: Wiley, Weinheim.
- [2] M. J. Michael and J. Neale. (2001) "Lubrication and reliability handbook", Butterworth-Heinemann.
- [3] R. M. Gresham and G. E. Totten. (2009) "Society of Tribologists and Lubrication Engineers", Lubrication and maintenance of industrial machinery : best practices and reliability. CRC Press.
- [4] شهیدی پور. ر. (۱۳۸۴) " کتاب جامع صنعت روانکار ایران " تهران، ایران، شرکت بازار پژوهان نوآور.
- [5] موحدی. م.، رضایی. و. و یزدانی. ا. (۱۳۸۴) "پایش وضعیت (CM) تحولی در کاهش هزینه صنعت " مجله مدیریت توسعه و تحول.
- [6] R. J. P. Ferreira, A. T. de Almeida, and C. A. V. Cavalcante. (2009) "A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis", Reliability Engineering & System Safety, vol. 94, no. 5, pp. 905–912.
- [7] B. Gwashavanhu, P. S. Heyns, and A. J. Oberholster. (2019) "Shape principal component analysis as a targetless photogrammetric technique for condition monitoring of rotating machines", Measurement, vol. 132, pp. 408–422.
- [8] V. N. Kostyukov, A. V. Kostyukov, and C. H. Boychenko. (2016) "Intelligent Machinery Condition Monitoring based on Adaptive Measurements", Procedia Engineering, vol. 152, pp. 527–530.
- [9] S. Mohamed. (2017) " Condition monitoring of engine lubrication oil of military vehicles: a machine learning approach", AIAC 2017: Proceedings of the 17th Australian International Aerospace Congress, pp. 1–7.
- [10] L. Guan, X. L. Feng, Z. C. Li, and G. M. Lin. (2009) "Determination of octane numbers for clean gasoline using dielectric spectroscopy", Fuel, vol. 88, no. 8, pp. 1453–1459.

- [11] حسینی. س. س. (۱۳۸۴) "برنامه ریزی سیستماتیک نظام نگهداری و تعمیرات در بخش صنایع و خدمات" انتشارات سازمان مدیریت صنعتی.
- [12] اسماعیل زاده. س. (۱۳۸۰) "تکنولوژی های نگهداری و تعمیرات و آنالیز ارتعاشی" انتشارات دانشگاه گیلان.
- [13] A. T. Pérez. (2011) "Tribological assessment of oil condition sensors for marine launching equipment".
- [14] S. Q. A. Rizvi, Ed. (2009) "A Comprehensive Review of Lubricant Chemistry, Technology, Selection, and Design. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International.
- [15] حیدری. س.، عابدی. م.، قنبرزاده. ع. (۱۳۸۸) "نگهداری و مراقبت از تجهیزات از طریق آنالیز روغن" دانشگاه صنعتی شریف، انجمن نگهداری و تعمیرات.
- [16] مسعودی. ع. ر. (۱۳۸۱) "استراتژی پیش اقدام و کنترل فرسایش سیستم های مکانیکی در ایران" سلسه مقالات فناوری گروه تحقیقات آزمایشگاه شرکت البرز تدبیر خوزستان.
- [17] J. M. Wakiru, L. Pintelon, P. N. Muchiri, and P. K. Chemweno. (2019) "A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support", Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 118, pp. 108–132.
- [18] عزیزیان. ح. ر. (۱۳۷۳) "نگهداری و تعمیرات قابل پیش بینی به کمک روش مراقبت وضعیت در جعبه دنده ها" اولین کنگره ملی نگهداری و تعمیرات.
- [19] J. Fitch. (2007) "Four lethal diesel engine oil contaminants".
- [20] M. Barnes. (2002) "silicon doesn't always mean dirt", practicing oil analysis.
- [21] J. Evans. (1998) "High silicon in engine oil analysis", practicing oil analysis, 1998. .
- [22] E. . Booser. (1983) "CRC Handbook of lubrication (Theory and practice of tribology). CRC Press.
- [23] Z. Pawlak. (2003) "tribochemistry of lubricating oils", elsevier.
- [24] Khonsari.m. (2003) "Predicting Lube Life - Heat and Contaminants are the Biggest Enemies of Bearing Grease and Oil", Machinery Lubrication.
- [25] M. Mayworm. (2004) "Revitalized Oil Analysis Program Produces Impressive Results", practicing oil analysis.
- [26] R. M. Mortier, M. F. (Malcolm F. . Fox, and S. T. Orszulik. (2010) "Chemistry and technology of lubricants", Springer.

- [27] J. Poly. (2007) "the history of oil analysis", practicing oil analysis.
- [28] G. E. Totten, S. R. Westbrook, and R. J. Shah. (2003) "Fuels and lubricants handbook : technology, properties, performance, and testing", ASTM International.
- [29] S. . Byington. (2000) "Advances in real time oil analysis", practicing oil analysis.
- [30] S. S. Wang. (2001) "Road tests of oil condition sensor and sensing technique", Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 73, no. 2–3, pp. 106–111.
- [31] S. S. Wang. (2002) "Engine oil condition sensor: method for establishing correlation with total acid number", Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 86, no. 2–3, pp. 122–126.
- [32] M. Johnson and M. Spurlock. (2009) "Strategic oil analysis: Selecting alarms, setting limits", Tribology & Lubrication Technology, vol. 65, no. 11, p. 18.
- [33] A. Dorinson and K. C. Ludema, (1985) "Mechanics and chemistry in lubrication", Elsevier.
- [34] S. E. Schwartz and D. J. Smolenski. (1987) "Development of an Automatic Engine Oil-Change Indicator System".
- [35] Sebastian Blanco. (2019) "Mercedes-Benz's new oil sensor can keep you driving safely on old oil longer | Autoblog", 2008. [Online]. Available: <https://www.autoblog.com/2008/03/12/mercedes-benz-new-oil-sensor-can-keep-you-driving-safely-on-old/>. [Accessed: 26-Sep-2019].
- [36] Judy Burden, R. McWhorter, and Dawn M. Gratz. (2004) "Embedded oil analysis sensor implementation joint effort by common embedded diagnostics (CED) and army oil analysis program (AOAP)", in Proceedings AUTOTESTCON, pp. 546–549.
- [37] احمدی. ح. و بلوکی. م. ص. (۱۳۸۷) "مقایسه و انتخاب بهترین زمان تعویض برای روغن موتور جرنقیل ترانستینر RTG با روش پایش وضعیت روغن" سومین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات دانشگاه صنعتی شریف.
- [38] خلیلی. م. و دانش. م. "اتوماسیون تحلیل ذرات سایشی روغن جهت بازرسی فنی ماشینها" دومین کنفرانس بین المللی بازرسی فنی و آزمون غیرمخرب، تهران، دانشگاه تربیت مدرس.
- [39] G. Yadav, S. Tiwari, R. Jatola, and M. L. Jain. (2017) "Experimental Investigation of Lubricating Properties of Engine Oil", The lubricant oil reflects the performance of engine through its properties, while condition of lubricant oil can affect the

- performance of engine as well. This interrelationship between engine performance and engine lubricant is an important diagnosis, vol. 7, no. 4, pp. 10306–10308.
- [40] A. Hirri, S. Tagourmate, A. Benamar, F. Kzaiber, and A. Oussama. (2017) “Prediction of Kinematic Viscosity in Motor Oil Using FTIR coupled with Partial Least Squares Regression”, *International Journal of Chemical, Material and Environmental Research*, vol. 4, no. 1, pp. 102–107.
- [41] Q. Zeng, G. Dong, Y. Yang, and T. Wu. (2016) “Performance Deterioration Analysis of the Used Gear Oil”, *Advances in Chemical Engineering and Science*, vol. 06, no. 02, pp. 67–75.
- [42] A. Agoston, C. Ötsch, and B. Jakoby. (2005) “Viscosity sensors for engine oil condition monitoring—Application and interpretation of results”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 121, no. 2, pp. 327–332.
- [43] M. A. Al-Ghouti, Y. S. Al-Degs, and M. Amer. (2010) “Application of chemometrics and FTIR for determination of viscosity index and base number of motor oils”, *Talanta*, vol. 81, no. 3, pp. 1096–1101.
- [44] J. Kuntner, R. Chabicovsky, and B. Jakoby. (2005) “Sensing the thermal conductivity of deteriorated mineral oils using a hot-film microsensor”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 123–124, pp. 397–402.
- [45] M. D. Brouwer, L. A. Gupta, F. Sadeghi, D. Peroulis, and D. Adams. (2012) “High temperature dynamic viscosity sensor for engine oil applications”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 173, no. 1, pp. 102–107.
- [46] J. Zhu, D. He, and E. Bechhoefer. (2013) “Survey of Lubrication Oil Condition Monitoring, Diagnostics, and Prognostics Techniques and Systems”, *Journal of Chemical Science and Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 100–115..
- [47] S. Raadnui and S. Kleesuwan. (2005) “Low-cost condition monitoring sensor for used oil analysis”, *Wear*, vol. 259, no. 7–12, pp. 1502–1506.
- [48] D. Paczesny, G. Tarapata, M. Michał, and R. Jachowicz. (2015) “The Capacitive Sensor for Liquid Level Measurement Made with Ink-jet Printing Technology”, *Procedia Engineering*, vol. 120, pp. 731–735.
- [49] S. M. Salehi, H. Karimi, R. Moosavi, and A. A. Dastranj. (2017) “Different configurations of capacitance sensor for gas/oil two phase flow measurement: An experimental and numerical study”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol.

82, pp. 349–358.

- [50] A. T. Pérez and M. Hadfield. (2011) “Low-cost oil quality sensor based on changes in complex permittivity”, *Sensors*, vol. 11, no. 11, pp. 10675–10690.
- [51] R. J. Clark and W. M. University. (2011) “ON-BOARD MONITORING OF ENGINE OIL”, Thesis Cambridge University Press, pp. 1–30.
- [52] Yang Dingxin, Hu Zheng, and Xiao Jianwei. (2011) “Research on capacitive sensor for online oil monitoring”, 2011 Prognostics and System Health Management Conference. IEEE, pp. 1–4.
- [53] S. Sen, C. Schneidhofer, and N. Dörr. (2012) “Online Monitoring of the Oil Acidification using a Chemical Sensor Measuring Corrosiveness”, *Procedia Engineering*, vol. 47, pp. 466–469.
- [54] J. Zhu, J. M. Yoon, D. He, Y. Qu, and E. Bechhoefer. (2013) “Lubrication Oil Condition Monitoring and Remaining Useful Life Prediction with Particle Filtering”, *International Journal of Prognostics and Health Management*, vol. 4, pp. 1–15.
- [55] P. Agarwal, R. Minasamudram, and P. Venkateswaran. (2013) “Simulation of a Capacitive Sensor for Wear Metal Analysis of Industrial Oils”, in Excerpt from the Proceedings of the 2013 COMSOL Conference in Bangalore India.
- [56] A. Y. Khaled, S. A. Aziz, and F. Z. Rokhani. (2015) “Capacitive sensor probe to assess frying oil degradation”, *Information Processing in Agriculture*, vol. 2, no. 2, pp. 142–148.
- [57] H. Shinde and A. Bewoor. (2018) “Capacitive sensor for engine oil deterioration measurement”, in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1943, no. 1, p. 020099.
- [58] A. Risos and G. Gouws. (2019) “In-situ aging monitoring of transformer oil via the relative permittivity and DC conductivity using novel interdigitated dielectrometry sensors (IDS)”, *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 287, pp. 602–610.
- [59] Z. Han, Y. Wang, T. Gao, and X. Qing. (2018) “In-situ capacitive sensor for monitoring debris of lubricant oil”, *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 70, no. 7, pp. 1310–1319.

[60] قاسمی. ا. و حسینی. س. و. (۱۳۹۵) "شناسایی اکسیداسیون آلودگی آب، و سوخت در روغن موتور بنزینی به صورت آنالین از طریق حسگرخازنی پایش وضعیت روغن" چهارمین کنفرانس ملی و دومین کنفرانس بین المللی پژوهش هایی کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، تهران، دانشگاه صنعتی مالک

اشتر.

[61] قاسمی. ا. و حسینی. س. و. (۱۳۹۶) "طراحی و ساخت حسگر آزمایشگاهی پایش وضعیت آنلاین روغن

موتور بنزینی با روش اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک" دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[62] user guide Manul, ANSYS Fluent 12.

[63] S. KARDOŠ and A. PIETRIKOVÁ. (2016) "Evaluation of Motor Oil Characteristics and Degradation Factors for Possibilities of Continuous Diagnostics", Acta Electrotechnica et Informatica, vol. 16, no. 2, pp. 20–24.

# Abstract

Oil condition monitoring is one of the main methods to maintain of internal combustion engines. In recent years, to identify oil characteristics or oil quality, online sensors have replaced conventional offline oil analyzers. Online oil quality sensor can provide optimally usage of oil, rapid detection of failure and prediction of oil life which designed and manufactured in this dissertation.

The principle of the oil quality sensor is based on measurement of oil dielectric capacitance. The sensor was designed to operate in spark ignition engines with oil temperature up to 150 °C. At first, a prototype (conceptual design) of sensor was made to identify effective parameters on accuracy of capacitance measurement. Also, in order to achieve optimal sensor performance, a finite element method used to simulate sensor performance along with design of experiment (DOE) methods. After parts manufacturing, the sensor was tested using offline method. Based on offline test results, it was determined that the presence of a sensor board with a fixed position close to the sensor was necessary and affected on results. So electrical board was assembled for online tests. Online tests result show that only the oil temperature can effect on sensor output up to 3.3%, which can reduce this error to 0.3% using temperature correction factor. In addition, the sensor can detect minimum amount of water pollution, which is 0.02% by volume of oil that is acceptable compared to another industrial sensor. The results show that sensor performance in detection of oil failure is rapid enough.

**Keywords:** Online Sensor, Condition Monitoring, Oil Quality, Dielectric Capacity, Oil Temperature.



Shahrood University of  
Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Manufacturing and Production Engineering

# **Design and Manufacturing of Industrial Online Oil Condition Monitoring Inline Sensor Using Capacitance Method**

By:

Abbas Ziaei

Supervisor:

Dr. Seyed Vahid Hosseini

October 2020