



## بهینه‌سازی طرح حسگر القایی شناسایی برخط ذرات آهن در روغن موتور

ابوالفضل طالبی<sup>۱</sup>، سید وحید حسینی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، [Talebi.abolfazl71@gmail.com](mailto:Talebi.abolfazl71@gmail.com)

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

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۱ دی ۱۳۹۷

پذیرش: ۱۷ فروردین ۱۳۹۸

کلیدواژه‌ها:

حسگر بر خط روغن

تشخیص ذرات آهن

حسگر القایی

بهینه‌سازی

موتورهای درونسوز

### چکیده

روغن یکی از اجزاء مهم موتورهای احتراق داخلی به شمار می‌آید که می‌تواند در مهار نرخ سایش سطوح در اجزای ثابت و متحرک، موثر باشد. یکی از اقداماتی که می‌توان در راستای بهینه‌سازی عملکرد موتورها انجام داد نظارت دقیق و لحظه‌ای بر ذرات ساییده شده در روغن می‌باشد. از روش‌های مختلفی برای شناسایی ذرات ساییده شده آهنی در روغن‌های روانکاری استفاده می‌شود که بیشتر این روش‌ها به صورت برون خطی صورت می‌گیرند. در این مطالعه دو حسگر برخط تشخیص ذرات سایشی آهنی به روش القایی طراحی، بهینه‌سازی و ساخته شده است و عملکرد آنها مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. حسگر شماره یک دارای دو سیم‌پیچ تحریک کننده و دو سیم‌پیچ حس کننده با قطر داخلی بزرگتر و حسگر شماره دو دارای دو سیم‌پیچ تحریک کننده و یک سیم‌پیچ حس کننده با قطر داخلی کوچکتر طراحی شده‌اند. با مشخص شدن بهینه قدرت تشخیص هر کدام از حسگرها، در نهایت حسگر بهینه با حساسیت بیشتر در شرایط کارکرد واقعی موتور تعیین گردید. در حسگر مذکور به علت قطر مجرای کوچکتر، در دبی مشخص روغن در موتورهای بنزینی سرعت ذرات افزایش می‌یابد که این امر موجب افزایش دقت و حساسیت حسگر می‌شود.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

## مقدمه

نظارت بر سلامت تجهیزات دوار از اهمیت خاصی برای نگهداری سامانه های مکانیکی مانند موتور جت، موتور خودرو و توربین های تولید برق برخوردار است. روغن های روانکار به عنوان یکی از مهم ترین اجزا در طول عملکرد موتور دچار تغییراتی در خواص فیزیکی و شیمیایی شان می شوند. وجود ذرات فلزی بیش از حد مجاز در روغن موتور نشان از شروع خرابی های زیاد از جمله خرابی های سایشی در تجهیز می باشد. همچنین وجود این ذرات باعث از کار افتادن موتور و خسارت به آن می شود. از این رو شناسایی ذرات ساییده شده از اجزای موتور برای جلوگیری از خرابی هایی که موجب صرف زمان و هزینه های زیاد برای تعمیر آن ها می شود بسیار مهم و ضروری می باشد. برای شناسایی این ذرات می توان از حسگرهای شناسایی ذرات فلزی استفاده نمود. شناسایی ذرات ساییده شده آهنی در اکثر فعالیت های معمول با استفاده از روش های برون خط و انجام آزمایش روی نمونه های گرفته شده در آزمایشگاه ها صورت می گرفت. با توجه به اهمیت موضوع نیاز به تشخیص زود هنگام این ذرات قبل از عبور از مقدار بحرانی می باشد. امروزه با استفاده از روش های جدید از جمله: القای مغناطیسی، لیزر، اشعه ایکس، اشعه مادون قرمز و ... می توان این ذرات را به صورت برخط شناسایی کرد. چمبرز و همکاران در سال ۱۹۸۸ برای نخستین بار حسگر القایی ساختند که در این حسگر ذرات آهنی با یک آهنربا جمع آوری شدند که ذرات جمع آوری شده بسامد عبوری از سیم پیچ حس کننده را دچار تغییر می کند. در این حسگر ذرات به صورت گروهی شناسایی می شوند [۱]. هامفری و همکاران در سال ۱۹۹۸ با استفاده از گذراندن اشعه ایکس<sup>۱</sup> از روغن توانستن ذرات را به صورت تجمعی و گروهی شناسایی کنند. این روش به نام طیف سنجی پراکندگی انرژی فلورانس اشعه ایکس<sup>۲</sup> معروف است [۲]. محصولات تجاری موجود در بازار برای EDXRF، از جمله سامانه FilterCHECK که توسط شرکت GasTOPS [۳] و طیف سنج های EDX6000B XRF توسط شرکت Skyray [۴] تولید شده اند. ادموند و همکاران در سال ۲۰۰۰ حسگری صوتی برای تشخیص ذرات فلزی طراحی کنند که با استفاده از امواج صوتی با بسامد بالا و تجزیه و تحلیل سیگنال های منعکس شده از روغن موجود در سامانه، ذرات فلزی را توانستن شناسایی کنند [۵]. یان و ژانگ در سال ۲۰۰۲ با استفاده از میدان مغناطیسی و میدان الکترونیکی و بررسی القای مغناطیسی ایجاد شده، یک حسگر طراحی نمودند و پارامترهای مهم آن را به وسیله نرم افزار انسیس<sup>۳</sup> مورد بررسی قرار دادند [۶]. شارما و گاندی در سال ۲۰۰۸ با توجه به تحقیقات خود اعلام کردند از روش طیف سنجی برنامه آنالیز روغن<sup>۴</sup> می توان برای شناسایی ذره فلزی ساییده شده و همچنین

شناسایی منبع شان استفاده کرد [۷]. فان و ژانگ در سال ۲۰۰۹ به بررسی ویژگی های مغناطیسی ذرات ساییده شده فرومغناطیسی در حسگر القایی پرداختند [۸]. فان و ژانگ در سال ۲۰۱۰ اثر پارامترهای مختلف از جمله سرعت و بسامد تحریک و ... را در حسگر القایی مورد مطالعه قرار دادند [۹]. شرکت آلمانی پروف تکنیک در سال ۲۰۱۱ توانست نمونه ی تجاری حسگر تشخیص ذرات که از روش مغناطیسی، ذرات را شناسایی می کرد وارد بازار کند [۱۰]. دو و ژه در سال ۲۰۱۲ با استفاده از یک حسگر که دارای چند کانال موازی بود توانستن ذرات فلزی را در روغن شناسایی کنند، ویژگی این حسگر به دلیل داشتن تعداد کانال های متعدد، پردازش مقدار زیادی از روغن بدون آن که در حساسیت شناسایی تغییری ایجاد کند، می باشد [۱۱]. در سال ۲۰۱۳ دیویس در تحقیقی که ارائه داد توانست حسگری را طراحی کند که با استفاده از پل مکسول وین تغییرات ظرفیت القایی در سیم پیچ را بر اثر عبور ذرات از آن ها شناسایی کند این حسگر توانایی شناسایی ذرات آهنی با قطر بزرگتر از ۷۵ میکرون و ذرات غیر آهنی با قطر بزرگتر از ۱۲۰ میکرون را به صورت برخط دارد [۱۲]. هویکین و همکاران در سال ۲۰۱۴ بر اساس اصل القای مغناطیسی حسگری طراحی کردند که شامل سه سیم پیچ بود که در آن یک سیم پیچ تشخیص دهنده در میان دو سیم پیچ تحریک کننده قرار می گرفت. این حسگر را با نرم افزار اُنسافت ماکسول<sup>۵</sup> شبیه سازی نموده اند و وضعیت ولتاژ خروجی را با استفاده از روابط ریاضی تشریح کردند [۱۳]. قاسمی و حسینی در سال ۲۰۱۶ حسگر آزمایشگاهی کیفیت روغن از روش خازنی ساختند که بر اساس آن امکان اندازه گیری میزان خرابی کلی روغن از جمله اکسایش و آلایندگی ها قابل شناسایی است. عملکرد این حسگر در آزمون دوام بصورت خارج از خط صحه گذاری شد [۱۴]. در سال ۲۰۱۸ طالبی و همکاران نمونه آزمایشگاهی حسگر القایی را طراحی و ساختند که توانست ذرات آهنی را با حساسیت بالا در محدوده های عملکردی استاندارد شناسایی کند [۱۵].

وضعیت ذرات ساییده شده بر اساس غلظت و قطر ذرات و روش تشخیص آن ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

در این مطالعه در جهت یافت حسگر بهینه، دو نمونه از حسگرهای القایی طراحی و ساخته شده است. همچنین عملکرد هر کدام از این حسگرها در شرایط کارکرد بهینه خود با استفاده از روش طراحی آزمایشها<sup>۶</sup> مورد مقایسه قرار گرفته اند، در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده حسگر بهینه معرفی خواهد شد. تابع هدف قدرت تشخیص ذرات آهنی ریز در روغن می باشد. با توجه به محدوده عملکردی استاندارد این حسگرها می بایست توانایی تشخیص ذرات بزرگتر از ۱۰۰ میکرومتر را داشته باشند.

<sup>4</sup> Spectrometric Oil Analysis Program

<sup>5</sup> Ansoft Maxwell

<sup>6</sup> Design Of Experiment (DOE)

<sup>1</sup> X-Ray

<sup>2</sup> Energy Dispersive X-Ray Fluorescence (EDXRF)

<sup>3</sup> Ansys

به دلیل حساسیت بالا و جلوگیری از خطاهای احتمالی از تفلون<sup>۱</sup> برای ساخت بدنه حسگرها استفاده شد. تفلون خاصیت غیرمغناطیسی دارد و قابلیت تحمل دما و فشارهای مورد نظر را نیز دارا می باشد. در شکل های ۳ و ۴ نمونه های ساخته شده به ترتیب حسگر شماره یک و حسگر شماره دو را می توان مشاهده نمود.



شکل ۳: نمونه ساخته شده حسگر شناسایی ذرات شماره یک



شکل ۴: نمونه ساخته شده حسگر شناسایی ذرات شماره دو

### ۲-۱- طراحی و ساخت مدارالکترونیکی

برای تقویت سیگنال های خروجی و تبدیل جریان مستقیم به جریان متناوب و همچنین از بین بردن خطاهای ناشی از دستگاه ها، یک مدار الکترونیکی طراحی و ساخته شد. این مدار می تواند از سیم پیچ ها محافظت کند [۱۵].

### ۳-۱- طراحی و ساخت مدارآزمون روغن

در این مطالعه برای بررسی عملکرد مکانیکی حسگرها در شرایط عملکردی موتور و انجام آزمون های متعدد و لزوم گردش روغن در حسگر، به یک مدار آزمون کنترلی روغن که بتواند دما، فشار و پارامترهای دیگر را به ما نشان بدهد نیاز داریم [۱۵]. مدار هیدرولیک طراحی شده دارای دبی ۱۶ لیتر در دقیقه می باشد. مدار کامل آزمون روغن در شکل ۵ نشان داده شده است. حسگرهای مورد نظر در این مدار تا دمای ۱۴۰ درجه سانتیگراد و فشار ۱۰ بار مورد آزمون قرار گرفته اند. بنابراین امکان استفاده از حسگر در مدار روغن موتورهای احتراق داخلی وجود خواهد داشت.

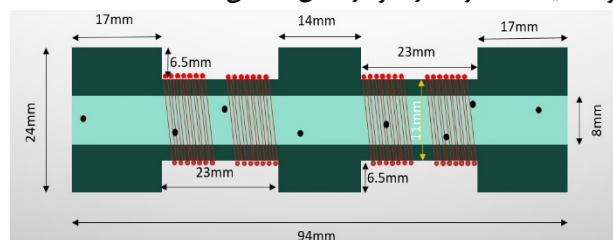
جدول ۱: وضعیت ذرات ساییده شده بر اساس غلظت و قطر ذرات

وضعیت ذرات	غلظت ذرات	قطر ذرات	روش شناسایی ذرات ساییده شده آهنی
عادی	پایین	پایین	تجهیز در حالت عادی به سر می برد و نیاز به تشخیص ذرات ساییده شده ندارد
غیر عادی	بالا	پایین	تشخیص با حسگرهای تشخیص تجمعی ذرات
غیر عادی	پایین	بالا	شناسایی با استفاده از حسگرهای تشخیص جداگانه ذرات
بحرانی	بالا	بالا	با هر دو روش قابل تشخیص می باشد

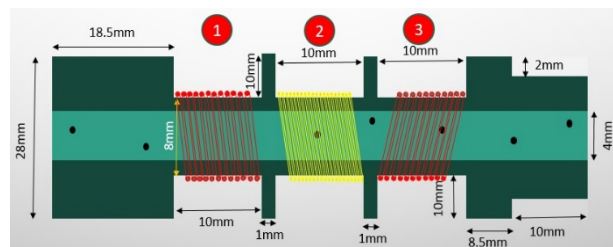
## ۱- طراحی و ساخت حسگرها و مدارآزمون

### ۱-۱- طراحی و ساخت حسگرها

پس از مطالعات و بررسی های صورت گرفته دو طرح متفاوت برای ساخت حسگرها ارائه گردید. اساس کار در حسگرها ایجاد ولتاژ تحریک در سیم پیچ های تحریک و بررسی تغییرات در ولتاژ خروجی و القای صورت گرفته در سیم پیچ های حس کننده می باشد. حسگر شماره یک دارای چهار سیم پیچ و حسگر شماره دو دارای سه سیم پیچ می باشند. در سیم پیچ ها از سیم های مسی روکش دار استفاده شده است. در حسگر شماره یک برای سیم پیچ های حس کننده از سیم با قطر ۰/۱ میلیمتری و برای سیم پیچ های تحریک کننده از سیم با قطر ۰/۲ میلیمتر استفاده شده است. در حسگر شماره دو از سیم با قطر ۰/۲ میلیمتری برای سیم پیچ های تحریک کننده و از سیم با قطر ۰/۱ میلیمتری برای سیم پیچ حس کننده استفاده شده است. شماتیک حسگر شماره یک در شکل ۱ و شماتیک حسگر شماره دو در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱: شماتیک حسگر شناسایی ذرات شماره یک



شکل ۲: شماتیک حسگر شناسایی ذرات شماره دو

<sup>1</sup> Poly Tetra Fluoro Ethylene (P.T.F.E)

## ۲- تعیین متغیرهای ورودی آزمون حسگرها

متغیرهای ورودی که عبارتند از: اختلاف ولتاژ کمینه تا بیشینه<sup>۱</sup> ورودی (VPPIn)، بسامد<sup>۲</sup>، نوع همبندی سیمپیچها، مقاومت ورودی<sup>۳</sup> (Rin) سیمپیچهای ورودی میباشند. فیزیک کارکرد حسگر اینگونه است که VPPIn هرچه بیشتر باشد نتایج بهتر قابل درک و استخراج میباشند [15]. آزمونهای انجام شده در هر دو حسگر با سیمهای آهنی استاندارد با قطرهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میکرونی انجام شدهاند.



شکل ۵: مدار کامل ساخته شده برای آزمون روغن حسگرها

جدول ۲: نتایج آزمون انجام شده برای سیمبندی که بصورت یک ورودی (دو سیمپیچ بصورت سری) و دو خروجی مجزا برای حسگر شماره یک

شماره آزمون	بسامد (kHz)	اندازه سیم (μm)	تغییرات VRMS -01 (V)	تغییرات VRMS -01 (V)
01	3	0	0	0
02	3	100	0.39	0.32
03	3	200	1.24	1.24
04	3	300	1.96	1.87
05	4	0	0	0
06	4	100	0.25	0.22
07	4	200	0.79	0.57
08	4	300	1.11	1.22
09	5	0	0	0
10	5	100	0.1	0.12
11	5	200	0.32	0.14
12	5	300	0.46	0.9
13	6	0	0	0
14	6	100	-0.29	-0.24
15	6	200	-0.59	-0.64
16	6	300	-0.35	-0.11
17	7	0	0	0
18	7	100	-0.36	-0.32
19	7	200	-0.69	-0.89
20	7	300	-0.49	-0.26

جدول ۳: مشخصات آزمون حسگر شماره دو [۱۵]

شماره آزمون	بسامد (kHz)	اندازه سیم (μm)	تغییرات VRMS (V)
1	2.5	0	0
2	2.5	100	0.6
3	2.5	200	2.1
4	2.5	300	3.26

تصاویر ضبط شده در اوسیلوسکوپ در شکل ۶ برای حالت‌های مختلف بدون بار و تحت میدان سیمهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میکرومتری در حسگر شماره دو می‌باشد نشان داده شده است.

در شکل ۶ قسمت الف حسگر در حالت بدون سیم را نشان می‌دهد. شکل موجها در این مرحله از حالت سینوسی خارج نشده و به صورت منظم می‌باشند. قسمت ب حسگر را در حالتی که سیم ۱۰۰ میکرومتری در آن وجود دارد نشان می‌دهد. همانطور که مشخص شده است شکل موج خروجی حسگر دارای اختلالاتی شده است که نشان از قرار داشتن سیم ۱۰۰ میکرومتری در آن است.

در قسمت‌های ج و د خارج شدن موجهای خروجی از حالت سینوسی بیشتر شده است. همچنین مقادیر ولتاژ نیز افزایش یافته است و نشان می‌دهد با افزایش قطر سیم آهنی داخل حسگر، در موج خروجی تغییرات بیشتری ایجاد می‌شود.

## ۳- بررسی نتایج

۳-۱- آزمون برون خط حسگر شماره یک

پس از آزمایش‌های اولیه، با استفاده از طراحی آزمایشات، آزمونها بر روی حسگر شماره یک صورت پذیرفت. طراحی آزمایشات به صورت فاکتوریال کامل<sup>۴</sup> برای چهار نوع سیمبندی انجام شده است. در آزمایشات مقدار نوسانات<sup>۵</sup> VRMS<sup>۶</sup> به عنوان خروجی حسگر در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از آزمایشات متعدد نشان داد بهترین نوع سیمبندی بصورتی است که یک ورودی (دو سیمپیچ خارجی بصورت سری) و دو خروجی مجزا داشته باشیم. آزمایشات در محدوده بسامد ورودی ۳ تا ۸ کیلو هرتز انجام شده است.

نتایج آزمون انجام شده برای سیمبندی که بصورت یک ورودی (دو سیمپیچ بصورت سری) و دو خروجی مجزا است، در جدول ۲ نشان داده شده است.

۳-۲- آزمون برون خط حسگر شماره دو

برای حسگر شماره دو پس از انجام آزمونهای تجربی متعدد و بررسی‌های انجام شده به وسیله روش طراحی آزمایشات شرایط بهینه برای متغیرهای ورودی تعیین گردید. نتایج و شرایط انجام آزمون نهایی در حسگر شماره دو که دارای یک ورودی و یک خروجی می‌باشد در جدول ۳ بیان شده است [۱۵].

<sup>4</sup> Full Factorial

<sup>5</sup> Variation

<sup>6</sup> Voltage Root Mean Square Outlet

<sup>1</sup> Voltage Peak to Peak

<sup>2</sup> Frequency

<sup>3</sup> Input Resistance

۳-۳- بررسی شرایط مکانیکی حسگرها و مقایسه آنها در آزمون‌های برون خط حسگرها، هر یک از حسگرها در حالت بهین مورد آزمون قرار داده شدند. در این مرحله باتوجه به عبور ذرات از حسگرها، رفتار هر کدام از آنها در شرایط واقعی کارکرد موتور بررسی خواهد شد. برای حسگرهای در خط مسئله میزان سیال عبوری و همچنین سرعت جریان روغن بسیار مهم و حیاتی می‌باشد. براساس رابطه ۱، ولتاژ خروجی حسگر با افزایش شعاع ذرات و سرعت جریان، افزایش پیدا می‌کند.

$$E_{max} = K \frac{\mu_m r_a^3 \theta}{2r^2 + 1.236 \mu_m r_a^2} \quad (1)$$

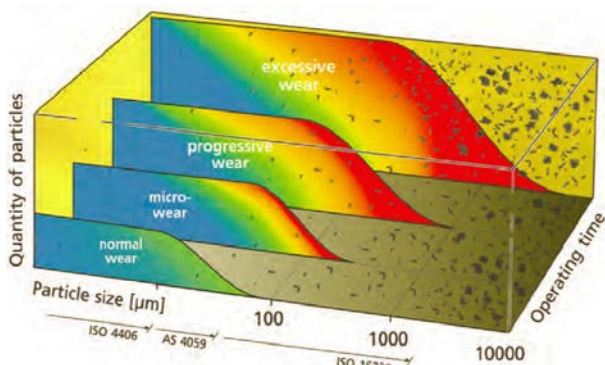
E ولتاژ خروجی حسگر،  $r_a$  شعاع ذرات فلزی،  $\theta$  جریان ویسکوزیته،  $\mu_m$  نفوذپذیری مغناطیسی و  $r$  شعاع مجرای روغن می‌باشد. مقدار  $\mu$  برای ذرات آهنی ۴۰۰۰ می‌باشد.

آلودگی روغن با ذرات آهنی طبق استاندارد ISO 16232 مطابق جدول ۴ در کلاس‌های مختلف طبقه‌بندی می‌شوند. در این استاندارد بر اساس محدوده سایز ذرات کلاس آنها مشخص شده است.

جدول ۴: کلاس‌بندی ذرات براساس استاندارد ISO 16232

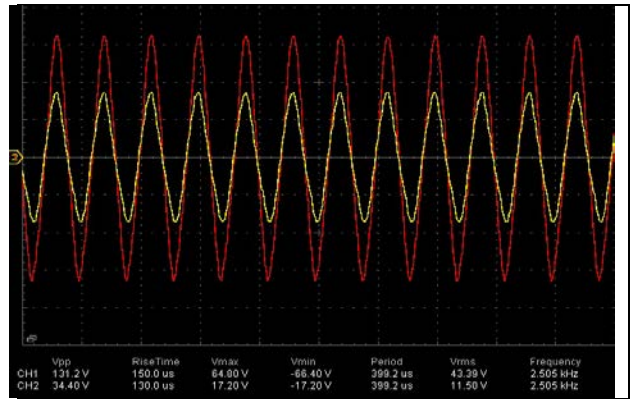
اندازه ( $\mu\text{m}$ )	کلاس
۵-۱۵	B
۱۵-۲۵	C
۲۵-۵۰	D
۵۰-۱۰۰	E
۱۰۰-۱۵۰	F
۱۵۰-۲۰۰	G
۲۰۰-۴۰۰	H
۴۰۰-۶۰۰	I
۶۰۰-۱۰۰۰	J
> ۱۰۰۰	K

مرز خرابی‌ها در طول کارکرد موتورها در شکل ۷ با شماره ۲ مشخص شده است که در این مرحله ذرات در محدوده قطر ۱۰۰ تا ۱۵۰ میکرون قرار دارند.

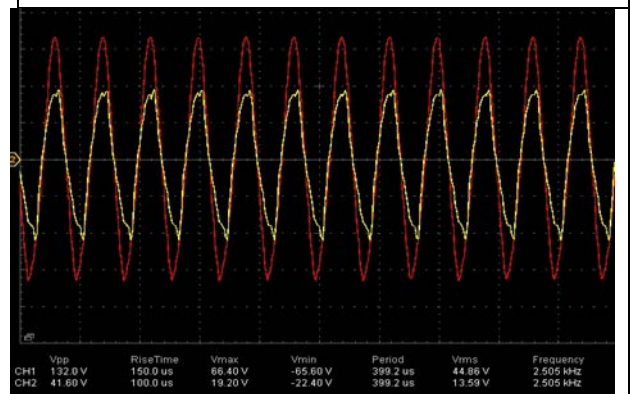


شکل ۷: نرخ توزیع و اندازه ذرات ساییده آهن در روغن در زمان عملکرد

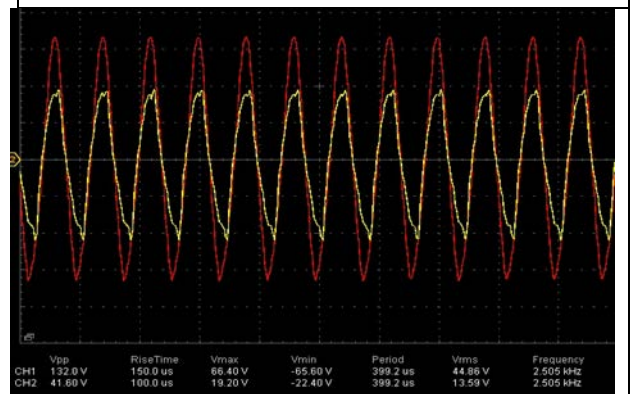
قدرت تشخیص حسگرها و میزان ولتاژ ایجاد شده با سرعت روغن براساس رابطه ۱، ارتباط مستقیم دارد. می‌توان بر اساس خواص روغن



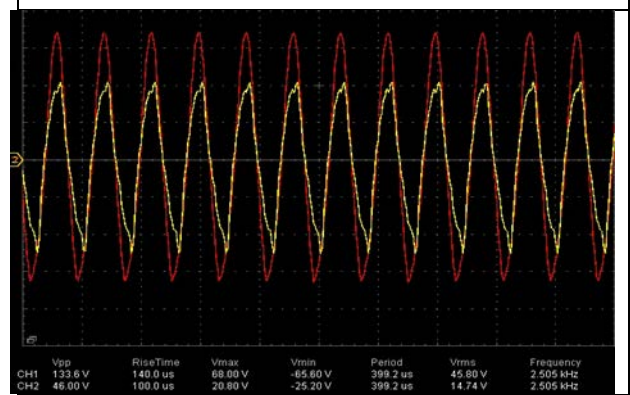
الف: ولتاژهای ورودی و خروجی حسگر در حالت بدون بار



ب: ولتاژهای ورودی و خروجی حسگر با سیم ۱۰۰ میکرومتری



ج: ولتاژهای ورودی و خروجی حسگر با سیم ۲۰۰ میکرومتری



ج: ولتاژهای ورودی و خروجی حسگر با سیم ۳۰۰ میکرومتری

شکل ۶: شکل موج ولتاژ ورودی و خروجی حسگر شماره دو در حالت‌های مختلف

دو تبدیل می‌شود که این امر باعث خطا در خوانش حسگر خواهد شد. این مسئله در حسگر شماره یک به دلیل افت فشار کم و جریان لایه‌ای روغن در خوانش حسگر خطای کمتری ایجاد می‌کند. اگر حسگرها به صورت انشعابی نصب گردند، فقط بخشی از روغن از حسگرها عبور کرده و افت فشار کاهش می‌یابد. همچنین جریان لایه‌ای از حسگرها عبور می‌کند و ایجاد خطا در خوانش حسگرها نمی‌کند. تغییرات سرعت روغن در موتورهای بنزینی زیاد است که در این حالت حسگرها می‌توانند فقط در دور موتورهای بالا خوانش دقیق داشته باشند.

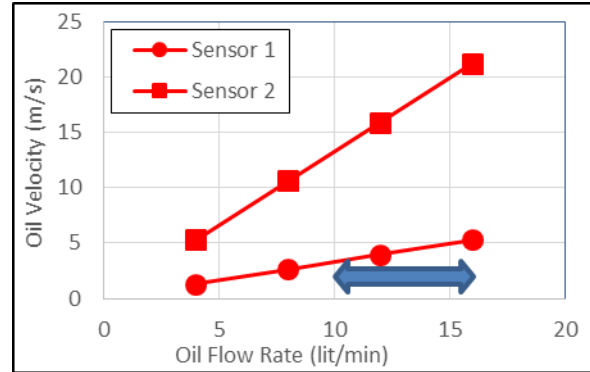
حسگر شماره یک به دلیل قابلیت عبور روغن بیشتر و دارا بودن جریان خطی در دبی‌های بالاتر، قابلیت استفاده داخل مدار را می‌تواند داشته باشد اما با توجه به سرعت ایجاد شده در آن، دارای حساسیت کمتری نسبت به حسگر شماره دو است. جریان روغن در حسگر شماره دو در دبی بیش از ۱۶ لیتر در دقیقه در دماهای بالاتر از ۷۰ درجه سانتیگراد از حالت لایه‌ای به حالت جریان آشفته تبدیل می‌شود. با توجه به نمودار شکل ۹، مدار هیدرولیک طراحی شده مناسب برای آزمایش حسگرها می‌باشد. با توجه به نمودار شکل ۹، مدار هیدرولیک طراحی شده مناسب برای آزمایش حسگرها می‌باشد.

پس از انجام آزمون‌های اولیه و برون خط و در نهایت مشخص شدن محدوده‌های عملکردی و بهینه‌سازی متغیرهای ورودی، می‌توان آزمون‌های برخط که در شرایطی شبیه به شرایط واقعی موتور می‌باشد را بر روی حسگر انجام داد. بر اساس رابطه ۱ می‌توان میزان حساسیت حسگرها را در آزمون‌های برخط محاسبه نمود. جدول ۵ مشخصات محاسبات انجام شده را نشان می‌دهد.

جدول ۵: محاسبات مقدار ولتاژ E بر اساس رابطه ۱

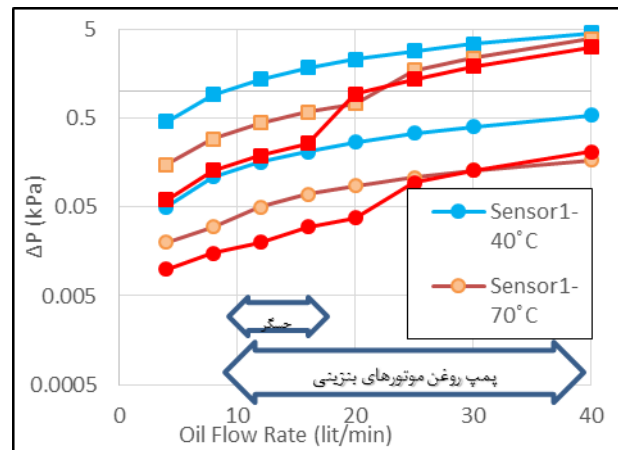
$E$ (mV)	$V$ (mm/s)	$\mu$	$r$ (mm)	$D$	$\lambda$	$\lambda_3$
4.85E+01	3.00E+03	4000	8.00E-03	2.00E-02	C	1
1.94E+02	1.20E+04	4000	8.00E-03	2.00E-02	C	1
1.82E+02	3.00E+03	4000	8.00E-03	7.50E-02	E	1
7.28E+02	1.20E+04	4000	8.00E-03	7.50E-02	E	1
3.03E+02	3.00E+03	4000	8.00E-03	1.25E-01	F	1
1.21E+03	1.20E+04	4000	8.00E-03	1.25E-01	F	1
4.25E+02	3.00E+03	4000	8.00E-03	1.75E-01	G	1
1.70E+03	1.20E+04	4000	8.00E-03	1.75E-01	G	1
7.28E+02	3.00E+03	4000	8.00E-03	3.00E-01	H	1
2.91E+03	1.20E+04	4000	8.00E-03	3.00E-01	H	1
8.90E+01	5.50E+03	4000	4.00E-03	2.00E-02	C	2
3.56E+02	2.20E+04	4000	4.00E-03	2.00E-02	C	2
3.34E+02	5.50E+03	4000	4.00E-03	7.50E-02	E	2
1.33E+03	2.20E+04	4000	4.00E-03	7.50E-02	E	2
5.56E+02	5.50E+03	4000	4.00E-03	1.25E-01	F	2
2.22E+03	2.20E+04	4000	4.00E-03	1.25E-01	F	2
7.79E+02	5.50E+03	4000	4.00E-03	1.75E-01	G	2
3.11E+03	2.20E+04	4000	4.00E-03	1.75E-01	G	2
1.33E+03	5.50E+03	4000	4.00E-03	3.00E-01	H	2

10W40 میزان تغییرات سرعت را بر اساس افزایش دبی روغن در حسگرهای ساخته شده محاسبه نمود. شکل ۸ تغییرات سرعت بر اثر افزایش دبی روغن در حسگرها را نشان می‌دهد. با توجه به مشخصات مدار هیدرولیکی و دبی آن، سرعت مورد نیاز روغن در حسگرهای طراحی شده در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: تغییرات سرعت بر اثر افزایش دبی روغن

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در حسگر شماره دو، بر اثر افزایش دبی روغن، سرعت روغن بطور چشم‌گیری افزایش یافته است. برای دبی ۱۶ لیتر در دقیقه سرعت روغن در حسگر شماره دو، بیش از ۴ برابر سرعت روغن در حسگر شماره یک افزایش یافته است. این مسئله باعث افزایش قدرت تشخیص حسگر خواهد شد. از طرفی افزایش سرعت در حسگر می‌تواند بر افت فشار و تغییر رژیم جریان روغن در حسگر مؤثر باشد. در نتیجه در ادامه میزان افت فشار روغن در حسگرها مورد بررسی قرار داده شد تا شرایط نهایی کارکرد حسگرها مشخص شود. در شکل ۹ تغییرات افت فشار بر اثر افزایش دبی را نشان می‌دهد.



شکل ۹: میزان افت فشار بر اثر تغییرات دبی روغن

بر اساس شکل ۹ دبی روغن در موتورهای بنزینی در محدوده ۸ تا ۴۰ لیتر در دقیقه می‌باشد. در این محدوده از دبی روغن همان‌طور که در شکل ۸ قابل مشاهده است، افت فشار برای حسگر شماره یک، کم و برای حسگر شماره دو بسیار زیاد است. افت فشار زیاد در حسگر شماره دو باعث آسیب رساندن به مدار هیدرولیک روغن می‌شود. همچنین جریان روغن از حالت لایه‌ای به حالت جریان آشفته در حسگر شماره

#### ۴- نتیجه گیری

با توجه به مطالب بیان شده می‌توان اهمیت نظارت لحظه‌ای بر شرایط روغن موتورهای درونسوز و قطعات تجهیز را بیان نمود. که با پیشرفت صنعت، تعمیر و نگهداری یک بخش مهم و حیاتی برای جلوگیری از خطرات احتمالی و خسارت‌های سنگین می‌باشد.

با بررسی نتایج حاصل آزمون‌های برون خط حسگرها که با استفاده از روش طراحی آزمایشات بهینه‌سازی شدند، می‌توان نتیجه گرفت که در حالت کلی حسگر شماره دو دارای حساسیت بالاتری نسبت به حسگر شماره یک می‌باشد. همچنین نتایج محاسبات صورت گرفته از شرایط مکانیکی حسگرها نیز می‌تواند در شرایط نزدیکتری به شرایط واقعی کارکرد موتور با حساسیت بالاتر نسبت به حسگر شماره یک ذرات ساییده شده آهنی را به صورت دقیق‌تر و حساسیت بالاتر شناسایی کند. همچنین می‌توان نتیجه گرفت سرعت، قطر و مقدار ذرات موجود در روغن می‌تواند عامل مهمی در افزایش خاصیت مغناطیسی باشند که می‌بایست در نتایج آزمون‌های برخط مورد بررسی قرار گیرد. آزمون‌های برخط می‌تواند قدرت تشخیص حسگرها را به صورت حقیقی مورد بررسی قرار دهد. براساس آزمون‌های برون خط و محاسبات انجام شده حسگرها توانایی تشخیص ذرات بزرگتر از ۱۰۰ میکرون را که مرز شروع خرابی‌ها را نشان می‌دهد را دارند. آزمون برخط حسگرها و بررسی نتایج آن‌ها از فعالیت‌های آینده می‌تواند باشد.

#### تشکر و قدردانی

از آزمایشگاه دیناموتور برای در اختیار قرار دادن تجهیزات و کمک‌های علمی و همچنین مالی کمال تشکر و قدردانی را داریم.

#### مراجع و منابع

[1] K. W. Chambers, M. C. Arneson, and C. A. Waggoner, An on-line ferromagnetic wear debris sensor for machinery condition monitoring and failure detection, *Wear*, vol. 128, no. 3, pp. 325-337, 1988.

[2] G. R. Humphrey, R. Whitlock, Capt. D. Little, and Sgt. R. Godin, Energy dispersive x-ray fluorescence evaluation of debris from F-18 engine oil filters, Joint Oil Analysis Program Pensacola FI Technical Support Center, 19980624-061, 1998.

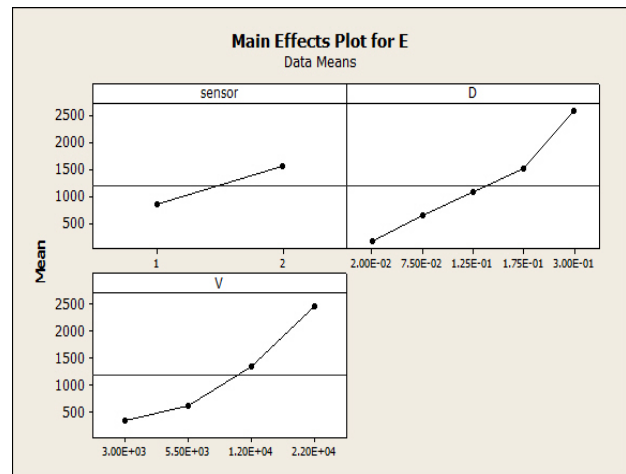
[3] GasTOPS Ltd. Documentation, FilterCHECK At-Line Filter Debris Analysis FC400 System, C004626, Rev. 0, www.gastops.com. Last Accessed on: 15 May 2013.

[4] Skyray Instrument Inc. Documentation, EDX6000B XRF Spectrometer, www.skyrayinstrument.com, Last Accessed on: 15 May 2013.

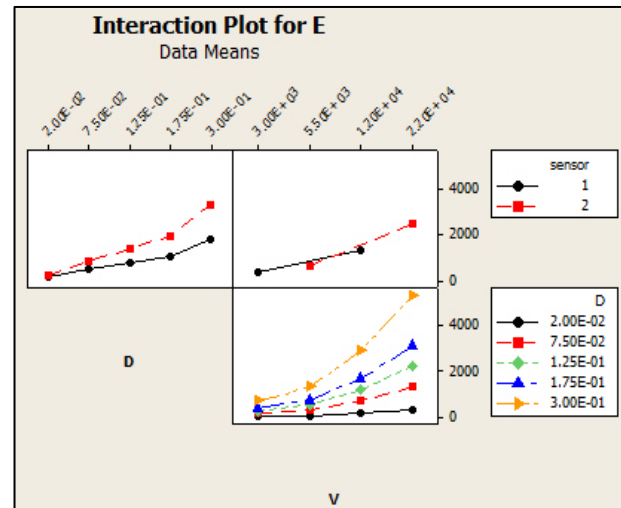
[5] Edmonds J., Resner M. S., Shkarlet K., Detection of precursor wear debris in lubrication systems, *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, p.p 18-25, 2000.

تحلیل نتایج حاصل از جدول ۶ در شکل ۱۰ نشان داده شده و عملکرد هر دو حسگر را مورد مقایسه قرار گرفته شده است.

همان‌طور که در نمودارهای الف، ب و ج شکل ۱۰ قابل مشاهده است متغیرهای سرعت روغن و قطر ذرات در آزمون‌های برخط بسیار مهم هستند که رابطه مستقیم با مقدار ولتاژ E دارند. بنابراین در آزمون‌های برخط نیز حساسیت حسگر شماره دو بیشتر از حسگر شماره یک می‌باشد. در شکل ۱۱ می‌توان اثر سرعت روغن و قطر ذره را بر روی ولتاژ ایجاد شده در حسگر مشاهده نمود. هرچه ولتاژ ایجاد شده بیشتر شود قدرت تشخیص حسگر نیز بالا می‌رود.



شکل ۱۰: مقایسه میزان حساسیت حسگرهای ساخته شده بر اساس رابطه ۱



شکل ۱۱: مقایسه میزان حساسیت حسگرهای ساخته شده بر اساس رابطه ۱

با توجه به مطالبی بیان شده و بررسی نتایج حاصل از بهینه‌سازی و استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها (DOE) برای آزمون هر دو حسگر می‌توان حسگر بهین را حسگر شماره دو معرفی نمود. حسگر شماره دو به دلیل قطر مجرای روغن کوچکتر و عبور سیال با سرعت بیشتر نسبت به حسگر شماره یک می‌تواند دارای دقت و حساسیت بالاتری باشد.

processing Tribology International, Vol. 53, pp. 28-34, 2012.

[12] Davis, J. P., Electronic Interface for an Inductive Wear Debris Sensor for Detection of Ferrous and Non-Ferrous Particles, Master's Thesis, University of Akron, 2013.

[13] Huiqin Zhan, Yang Song, Hui Zhao, Jun Gu, Hongyu Yang, Shuo Li, Study of the Sensor for On-line Lubricating Oil Debris Monitoring, Sensors & Transducers, Vol. 175, Issue 7, pp. 214-219, 2014.

[14] Ghasemi E, Hosseini S. V., Identify water contamination, oxidation and fuel in gasoline engine oil with online oil condition monitoring capacitive sensor, Electrical, Mechanical & Engineering Held by Malek-Ashtar University of Technology, Vol. 16-10109010921, February, 17, 2017.

[15] Talebi A, Hosseini S. V., Namiaaei T., Design and Manufacture of Prototype Online Sensor for Identification of Ferrous Metals Particles in Engine Oil, 10<sup>th</sup> International Conference of Internal Combustion and Oil, Tehran, 2017.

[6] Yan H. Z., Zhang Y. J., The Design of an On-line Monitoring Sensor of Wear Metal Particles and the Analysis of Its Characteristic, Chinese Journal of Sensors and Actuators, Vol. 4, pp. 333-338, 2002

[7] Sharma, B.C., and Gandhi, O.P., Performance Evaluation and Analysis of Lubricating Oil Using Parameter Profile Approach, Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 60, No. 3, pp. 131- 137, 2008.

[8] Fan H. B., Zhang Y. T., Li Z. N., Ren G. Q., Study on Magnetic Characteristic of Ferromagnetic Wear Debris in Inductive Wear Debris Sensor, Tribology International, Vol. 29, No. 5, pp. 452-457, 2009.

[9] Fan H. B., Zhang Y. T., Ren G. Q., Li Z. N., Experimental Study of an On-line Monitoring Sensor for Wear Particles in Oil, Tribology International, Vol. 30, No. 4, pp. 338-343, 2010.

[10] PRÜFTECHNIK, Condition Monitoring GmbH, Oskar-Messter-Strabe 19-21, 85737 Ismaning, Germany, www. pruftechnik.com, July 2011.

[11] Du L., Zhe J., Parallel sensing of metallic wear debris in lubricants using under sampling data



## Optimization of Online induction Sensor for Ferrous Metals Particles Identification in Engine Oil

A. Talebi<sup>1</sup>, S. V. Hosseini<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, [Talebi.abolfazl71@gmail.com](mailto:Talebi.abolfazl71@gmail.com)

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

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

*Article history:*  
Received: 11 January 2019  
Accepted: 6 April 2019

*Keywords:*  
Online Oil Sensor  
Detect Ferrous Particles  
Inductive Sensor  
Optimization  
IC Engine

### ABSTRACT

Engine oil is one of most important parameters in internal combustion engine that plays effective role in component wear. One of the ways to optimize the performance of the IC engines is online monitoring of wear particle in engine oil. There are different ways to identifying these particles, most of which are offline. Nowadays online oil monitoring sensors are quickly developed. In this study two online inductive sensors have been designed and tested to optimize and compare these sensors. Sensor No. 1 has two triggers and two sensing coils, and sensor No. 2 has two triggers and one sensing coil. After determining the optimal input variables, the sensors were tested. The outputs of each of the sensors were examined and compared. By detecting the best power of detecting each sensors, an optimal sensor with higher sensitivity was determined. Sensor No. 1 has lower pressure drop and sensitivity than sensor number two. In sensor No. 2, the fluid is faster due to the smaller diameter of the duct, which increases the accuracy and sensitivity of this sensor.



