جایگاه آنالیزطیفی روانکارها در پایش وضعیت؛ بررسی آماری نتایج آنالیز طیفی روانکار جعبه‌دنده‌ی ماشین‌آلات سنگین

محمدرضا پوررمضان[۱*]، عباس روحانی[۲]، نعمت کرامت سیاوش[۳]، محمدزارعین[۴]

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. (mr.pourramezan@mail.um.ac.ir)
۲. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. (arohani@um.ac.ir)
۳. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. (n.keramat@modares.ac.ir)
۴. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. (m.zarein@modares.ac.ir)

چکیده

روانکارها به جهت تماسی که با سطح قطعات دارند، می‌توانند پایش وضعیت و عیب‌یابی محل دقیق فرسایش را سبب شوند چرا که اندک فرسایشی بر خصوصیات فیزیکی- شیمیایی روانکار تاثیر گذاشته و از طریق آنالیز طیفی روانکار قابل بررسی می باشد. ماهیت غیرخطی مسائل مربوط به آنالیز طیفی روانکارها باعث گردیده پژوهش‌های گسترده‌ای در این زمینه انجام گیرد. برخی از این پژوهش‌ها متمرکز بر استفاده از روش‌های محاسبات نرم در این عرصه بوده‌است. گروهی دیگر از پژوهش‌ها با هدف تحقیق و توسعه در زمینه‌ی روش‌های مکمل و یا جایگزین انجام گردیده‌است. در این پژوهش، تلاش شده‌است از طریق بررسی آماری ۱۳۱ نتیجه‌ی آنالیز طیفی روانکار جعبه‌دنده، شاخص‌های غیر موثر در تعیین نتیجه‌ی آنالیزطیفی روانکار شناسایی شده و از این طریق هزینه‌ی تمام شده را کاهش داده و موجب رغبت واحدهای نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات به انجام آنالیزطیفی روانکار گردد.

کلمات کلیدی:
آنالیزطیفی، روانکار، جعبه‌دنده، بررسی آماری

***محمدرضا پوررمضان،** mr.pourramezan@mail.um.ac.ir

جایگاه آنالیزطیفی روانکارها در پایش وضعیت؛ بررسی آماری نتایج آنالیز طیفی روانکار جعبه‌دنده‌ی ماشین‌آلات سنگین

مقدمه

روانکار به عنوان ماده‌ای، برای کنترل اصطکاک و سایش سطوح در تماس با اجسام در حال حرکت نسبی معرفی می‌گردد [10]**. روانکار در ماشین همانند خون در بدن انسان بوده و نشان دهنده وضعیت کارکرد ماشین نیز می باشد. بنا به ماهیت حوزه‌ی کاربردی، از روان‌کننده‌ها به منظور از بین بردن گرما و انتقال قدرت نیز استفاده می‌شود. به عنوان مثال، ماشین‌آلات کشاورزی به عنوان وسایل نقلیه خارج از جاده، ستون فقرات صنعت کشاورزی جهان می‌باشند؛ که به جهت تامین نیروی محرکه‌ی عملیات‌های گوناگون این صنعت کاربرد دارند**[9]**. قابلیت اطمینان تمام سیستم‌های هیدرولیک و انتقال در تراکتور به خصوصیات روغن روان‌کننده بستگی دارد. اگر روان‌کننده نتواند عملکردهای لازم را برآورده‌نماید؛ ممکن است، سایش و اختلال در عملکرد غیر طبیعی رخ دهد** [14].

براین اساس، به جهت پایداری کارکرد اینگونه تجهیزات، اجرا و برنامه‌ریزی فعالیت‌های نگهداری مبتنی بر شرایط فنی همچون تحلیل روغن [1]، ارتعاش سنجی[2]، ترموگرافی[3] و ... حائز اهمیت و ضرورت می‌باشد. چرا که سیستم‌های مکانیکی باید سطح بالایی از کیفیت را تضمین کنند [17]**. در بین روش‌های پایش وضعیت، آنالیز ارتعاشات بیشترین کارایی را جهت عیب‌یابی ماشین‌آلات دارد چرا که عمده‌ی نقص‌های ماشین‌آلات شامل مواردی است که بروز ارتعاش را به همراه دارد. با این وجود، آنالیز روغن از گستردگی و رواج قابل توجه‌ای برخوردار است چرا که صرفا از این روش می‌توان عناصر آلاینده‌ی موجود در روغن را شناسایی نمود و از این طریق محل دقیق نقص یا فرسودگی را شناسایی نمود** [2].

پژوهشگران به دلیل طبیعت غیرخطی و فقدان جواب‌های تحلیلی از روش‌های فازی و شبکه های عصبی مصنوعی به عنوان ابزارهایی سودمند جهت تحلیل داده‌ها، در طراحی مدل‌های تحلیل وضعیت و عیب‌یابی تجهیزات صنعتی به عنوان هسته نرم‌افزاری سیستم‌های پایش مستقل از انسان گردیده‌است [13]**. گروهی از پژوهشگران جهت دستیابی به روند فرسایشی روغن‌موتور، اقدام به استفاده از ابزار محاسبات نرم نموده‌اند** [1,3-5]**. در پژوهشی، مدلی مبتنی بر ماشین‌بردار پشتیبان برای شناسایی و پیش بینی خرابی حاصل از سایش خارجی براساس اطلاعات حاصل از پایش وضعیت روغن ارائه شد. در این پژوهش از فرآیند حذف ویژگی بازگشتی (RFE) برای کاهش متغیرهای مستقل مدل استفاده شد. بهترین دقت تشخیص در این پژوهش برابر با ۹٤.۲۰ درصد شد. نتایج آن نشان داد که آهن ، آلومینیوم و سرب در تعیین وضعیت فرسایش موتور دیزل از اهمیت بیشتری برخوردار می باشند** [12]**. دسته ای از پژوهشگران اقدام به تعیین زمان بهینه تعویض و انجام آنالیز طیفی روغن‌موتور نمودند. نتایج آنها نشان داد که جهت تعویض یا انجام آنالیز طیفی روغن موتور باید به شرایط کارکرد ماشین‌آلات توجه کرد**[6,8]**. گروهی از پژوهشگران با هدف دستیابی به امکان پایش بلادرنگ، کاهش هزینه و نیز کاهش زمان صرف شده، به بررسی امکان بهره‌مندی از خواص دی‌الکتریک روانکارها جهت پایش وضعیت پرداختند** [6,7,15,16]**. قاسمی و همکاران (۱۳۹۷) به پایش وضعیت کیفی روغن در یک موتور بنزینی با استفاده از اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک روغن پرداختند. آنان به منظور دستیابی به وضعیت اکسیداسیون روغن، یک حسگر را با موفقیت طراحی کردند. در پژوهشی دیگر، عملکرد سنسور تعیین وضعیت**

[1] *Oil Analysis*
[2] *Vibration Analysis*
[3] *Thermography*

روغن به نام Tan Delta مورد ارزیابی قرار گرفت و به این نتیجه رسیدند که آن برای تعیین وضعیت کلی روغن می تواند مفید باشد [11].

هزینه بالای آنالیزطیفی روانکارها، زمانبر بودن آن [7] و نیز وابسته بودن نتیجه آن به تجربه فرد می تواند از جمله عوامل محدود کننده در استفاده از روش پایش وضعیت روانکار ماشین‌آلات باشد. لذا هدف از این پژوهش ارزیابی اهمیت و تاثیر فاکتورهای اندازه گیری شده توسط آنالیز طیفی در تشخیص وضیعت جعبه‌دنده به منظور کاهش هزینه های آزمایشگاهی از طریق حذف فاکتورهای کم اهمیت است.

مواد و روش ها

در این پژوهش، تعداد ۱۳۱ نتیجه آنالیز روانکار جعبه‌دنده مربوط به ماشین‌آلات شرکت تیراژ مورد بررسی قرار گرفت. تیراژ یک شرکت ساختمانی بین‌المللی است که در حوزه‌های مختلف جاده‌سازی، سد سازی، احداث راه‌آهن و ... فعالیت دارد. این شرکت دارای صدها ماشین سنگین راهسازی و کامیون و ... می‌باشد که واحد مدیریت ماشین‌آلات بطور مرتب با آنالیز روغن موتور، روغن سیستم انتقال قدرت و روغن هیدرولیک این ماشین‌آلات را پایش می‌نماید. پایش وضعیت روغن با وجود مزایای زیادی که دارد، با توجه به تکرر آن بسیار هزینه‌بر است. در تست‌های استلندارد این شرکت ۲۰ پارامتر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که هر کدام بسته به روش اندازه‌گیری هزینه منحصر به خود را دارد. فراوانی داده های مورد استفاده با در نظر داشتن دو وضعیت احتیاطی و نرمال به شرح جدول (۱) می‌باشد. باتوجه به فراوانی داده‌ها (جدول۱) در ادامه صرفا بررسی آماری شاخص‌های موثر در وضعیت فرسایش انجام گردید. برخی ویژگی‌های آمار توصیفی شاخص‌های موثر در ارزیابی وضعیت فرسایش روانکار جعبه‌دنده با استفاده از نرم افزار Minitab 19 بدست آمد.

جدول۱: فراوانی داده‌ها در وضعیت‌های سه‌گانه

وضعیت	ارزیابی آلودگی	ارزیابی فرسایش	ارزیابی کلی
نرمال	۱۱۹	۷۶	۶۳
احتیاطی	۱۲	۵۵	۶۸

بحث و بررسی

در این بخش باتوجه به آنچه در قسمت مواد و روش‌ها بیان شد به بحث و بررسی نتایج آنالیز طیفی روانکار جعبه‌دنده ماشین‌آلات شرکت تیراژ خواهیم پرداخت. در جدول۲، برخی ویژگی‌های آمار توصیفی شاخص های موثر در ارزیابی وضعیت فرسایش روانکار جعبه‌دنده آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، مقدار بالای ضریب تغییرات هر یک از شاخص ها نشان دهنده این موضوع است که وضعیت‌کاری جعبه‌دنده‌های مورد مطالعه از تنوع بالایی برخوردار است. مقدار آهن از مقدار کمینه برابر با ۳ تا ۱۰۸۱ ppm متغیر است. مقدار سرب از ۰ به عنوان کمینه تا ۷۳۲ ppm به عنوان بیشینه متفاوت بوده‌است. میزان مس اندازه‌گیری شده از ۰.۸۱ تا ۵۴۹ ppm به ترتیب به عنوان کمینه و بیشینه متغییر بوده‌است و این موضوع برای سایر شاخص ها نیز به وضوح دیده می‌شود.

اغلب برای تشخیص وضعیت روانکار تمام ویژگی‌های آن در آزمایشگاه اندازه گیری می شود. اما در صورتی‌که آن ویژگی ها نتواند تفاوت معنی‌داری را در وضعیت روانکار نشان دهد آنگاه می توان بیان کرد که نیازی به اندازه گیری آن‌ها نیست. ازآنجایی که هدف از این پژوهش نیز کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی آنالیزطیفی روانکارها از طریق شناسایی شاخص‌های کم اهمیت می باشد. لذا مقایسه میانگین‌ها مفید فایده است.

جدول۲: برخی ویژگی‌های آمار توصیفی شاخص‌های موثر در ارزیابی وضعیت فرسایش

شاخص	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
آهن (Fe)	PPM	۳	۱۰۸۱	۱٤٤.۹	۱۷۷	۱۲۲.۱
کروم (Cr)	PPM	۰	۱۰.۳۲	۱.۵۵۷	۱.۹۱۷	۱۲۳.۱٤
سرب (Pb)	PPM	۰	۷۳۲	۲۱.۱	۸۰.۸۸	۳۸۳.۳٤
مس (Cu)	PPM	۰.۸۱	٥٤۹	٥۹.۱۳	۹۱.٦٥	۱٥٤.۹۹
قلع (Sn)	PPM	۰	۱۷.۲۱	۱.۱٤٥	۲.۷۲	۲۳۷.٦
آلومینیوم (Al)	PPM	۰.٤٥	٦٤.۹	۹.٤۹٦	۱۱.۱۸۲	۱۱۷.۷٦
نیکل (Ni)	PPM	۰	۷۱.۹۷	٤.۳۷	۱۱.٦٤	۲٦٦
نقره (Ag)	PPM	۰	۳.۹۷	۰.۰۷۰٦	۰.۳۷٥۲	٥۳۱.۳۲
مولیبدنوم (Mo)	PPM	۰	٦۳.۱٦	۱۱.۰۲	۱۳.۹۷	۱۲٦.۷۷
تیتانیوم (Ti)	PPM	۰	۱.۰۲	۰.۰٤٥٤	۰.۱٤٤٥	۳۱۸.۰٥
ذرات درشت آهنی (PQ)	-	۲٦	۳٦۹٦	۲٤٥.۱	٤۲۷.٦	۱۷٤.٤٤
شاخص شدت فرسایش (TDPQ)	-	۰.۳	۹.٦	۱.٥۰۹۹	۱.۱۱٦۱	۷۳.۹۲

نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های روانکار به روش توکی در سطح معنی داری ۵ درصد بین دو کلاس وضعیتی نرمال، احتیاطی در جدول ۳ آورده شده است. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، جهت ارزیابی وضعیت فرسایش جعبه دنده بهتر است از شاخص‌های آهن، کروم، سرب، مس، قلع، آلومینیوم، نیکل، ذرات درشت آهنی و شاخص شدت فرسایش بهره‌گرفت زیرا میانگین آنها برای دو وضعیت نرمال و احتیاطی فرسایش با یکدیگر اختلاف معنی داری دارند و این مسئله می‌تواند به معنی امکان دسته بندی و طبقه بندی نتایج آنالیز روغن با این شاخص‌ها باشد. بعلاوه نتایج مقایسه میانگین برای شاخص‌های فرسایش نشان داد که شاخص‌های نقره، مولیبدنوم و تیتانیوم به دلیل آنکه فرسایش جعبه‌دنده را تنها در یک گروه معنی داری تقسیم کرده اند. این موضوع می تواند به معنی عدم

تاثیر این شاخص‌ها در طبقه بندی و دسته بندی نتایج آنالیز روغن باشد. لذا می‌توان بیان کرد که نیازی به اندازه گیری آن‌ها نیست.

جدول۳: نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های ارزیابی وضعیت روانکار جعبه دنده در دو وضعیت نرمال و احتیاطی برای فرسایش

شاخص	نرمال	احتیاطی
آهن (Fe)	^{a}۸۶.۹۳۱	^{b}۲۲۵.۰۵۰
کروم (Cr)	^{a}۱.۰۶۶۴۵	^{b}۲.۲۳۴۷۳
سرب (Pb)	^{a}۵.۳۹۴۱	^{b}۴۲.۸۰۰۰
مس (Cu)	^{a}۲۷.۸۸۲	^{b}۱۰۲.۳۱۳
قلع (Sn)	^{a}۰.۱۶۵۷۹	^{b}۲.۴۹۸۰۰
آلومینیوم (Al)	^{a}۵.۸۷۷۸	^{b}۱۴.۴۹۵۶
نیکل (Ni)	^{a}۱.۵۹۳۲۹	^{b}۸.۲۱۷۴۵
نقره (Ag)	^{a}۰.۰۵۲۶۳۱۶	^{a}۰.۰۹۵۴۵۴۵
مولیبدنوم (Mo)	^{a}۹.۵۳۷۱	^{a}۱۳.۰۷۰۲
تیتانیوم (Ti)	^{a}۰.۰۲۷۵۰۰۰	^{a}۰.۰۷۰۱۸۱۸
ذرات درشت آهنی (PQ)	^{a}۱۲۸.۵۲۶	^{b}۴۰۶.۲۱۸
شاخص شدت فرسایش (TDPQ)	^{a}۱.۳۰۱۳۲	^{b}۱.۷۹۸۱۸

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

همانطور که نتایج بررسی آماری نشان می‌دهد، سه شاخص نقره، مولیبدنوم و تیتانیوم نتوانسته‌است فرسایش جعبه‌دنده را به دو گروه معنی‌داری تقسیم نماید. لذا می‌توان بیان کرد که نیازی به اندازه گیری آن‌ها نیست. همچنین، نتایج تحقیقات پایش وضعیت ماشین‌های کشاورزی با استفاده از آنالیز روغن موتور نشان داده است؛ تعویض روغن در ۲۵۰ ساعت کارکرد قابل توجیه نمی‌باشد. در نهایت تعویض روغن موتور به شرایط کارکرد هر یک از ماشین‌آلات وابسته است [8]. در نتیجه به نظر می‌رسد، ضمن ضرورت تحقیق و توسعه در زمینه‌ی شیوه‌های جایگزین و یا مکمل برای آنالیز طیفی روانکارها، بهتر است بخش نگهداری و تعمیرات سازمان‌ها و شرکت‌هایی که اقدام به آنالیز طیفی روانکار برای ماشین آلات خود می‌نمایند. پس از چند دوره نمونه‌گیری و آنالیز طیفی بر اساس استانداردهای موجود

و گسترش یافته، اقدام به مطالعه‌ی آماری نتایج کسب‌شده در چند دوره‌ی متوالی نموده و شاخص‌های مورد نظر را منطبق بر شرایط کاری ماشین‌آلات خود خصوصی‌سازی نمایند.

قدردانی

به رسم ادب، از جناب آقای دکتر نعمت سیاوش کرامت به جهت فراهم نمودن بانک اطلاعات مربوط به آنالیز روانکار جعبه‌دنده ماشین‌آلات شرکت تیراژ تشکر می‌نمایم.

منابع

۱. **حسینی, س. و., صادقی, ع. (۱۳۹۵). مطالعه نوع و میزان خرابی موتور دیزل دریایی بر اساس پایش وضعیت روغن .اولین همایش پیشرانه های دریایی , سازمان صنایع دریایی ایران- دانشگاه صنعتی شریف.**

۲. **طاهری, ع. ر. (۱۳۸۸). مروری بر رایج‌ترین روش‌های نگهداری و تعمیرات و پایش وضعیت ماشین‌آلات. چهارمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب‌یابی ماشین‌آلات, ایران- دانشگاه صنعتی شریف.**

۳. **علیزاده, د., احمدی, ح. (۱۳۸۹). پایش وضعیت موتور دیزل با تحلیل روغن به روش منطق فازی. تحقیقات موتور, ۱۹, ۱۸-۱۹ .**

٤. **کوتاهی, ر., عباس, ر., طبسی زاده, م. (۱۳۹٦). پایش وضعیت موتور دیزل با استفاده از روش های مختلف آنالیز روغن . دومین همایش ملی فناوری های نوین برداشت و پس از برداشت محصولات کشاورزی, مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی.**

۵. **نیک نفس, ح., زارع پور, غ. ر. (۱۳۹۱). تحلیل وضعیت کیفی روغن موتور با استفاده از پایش وضعیت به روش منطق فازی. بیستمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک, ایران-دانشگاه شیراز .**

6. Abdul-Munaim, A. M. (2018). *Evaluation of Terahertz Technology to Determine Characteristics and Contaminants in Engine Oil*: Southern Illinois University at Carbondale.
7. Altıntaş, O., Aksoy, M., Ünal, E., Akgöl, O., & Karaaslan, M. (2019). Artificial neural network approach for locomotive maintenance by monitoring dielectric properties of engine lubricant. *Measurement, 145*, 678-686.
8. Bekana, D., Antoniev, A., Zach, M., & Mareček, J. (2015). Monitoring of agricultural machines with used engine oil analysis. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 63*(1), 15-22.
9. Gupta, S., Khosravy, M., Gupta, N., Darbari, H., & Patel, N. (2019). Hydraulic system onboard monitoring and fault diagnostic in agricultural machine. *Brazilian Archives of Biology and Technology, 62*.
10. Harris, T. A., & Kotzalas, M. N. (2006). *Essential concepts of bearing technology*: CRC press.
11. Koskinen, M. (2020). Study on oil quality sensor performance.
12. Li, L., Chang, W., Zhou, S., & Xiao, Y. (2017). *An identification and prediction model of wear-out fault based on oil monitoring data using PSO-SVM method.* Paper presented at the 2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS).
13. Macin, V., Tormos, B., Sala, A., & Ramirez, J. (2006). Fuzzy logic-based expert system for diesel engine oil analysis diagnosis. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 48*(8), 462-469.
14. Majdan, R., Tkáč, Z., Abrahám, R., Szabó, M., Halenár, M., Rášo, M., & Ševčík, P. (2016). Proposal for filtration system for biodegradable lubricants in agricultural tractors. *Agronomy Research, 14*(4), 1395-1405.

15. Murukesan, R. (2008). *Lube Oil Condition Monitoring System:-An Alternative Methodology* (0148-7191). Retrieved from
16. Shen, Y., Hu, T., & Wang, Y. (2019). *Estimation of Soot and Fuel Invasion in Diesel Engine Oils through a Combination of Dielectric Constant Sensor and Viscosity Sensor* (0148-7191). Retrieved from
17. Vališ, D., Gajewski, J., & Žák, L. (2019). Potential for using the ANN-FIS meta-model approach to assess levels of particulate contamination in oil used in mechanical systems. *Tribology International, 135*, 324-334.

Importance of spectral analysis of lubricants; Statistical analysis of the results of spectral analysis of gearbox lubricant of heavy machinery

Mohammad-Reza Pourramezan[1*], Abbas Rohani[1], Nemat Keramat Siavash[2], Mohammad Zarein[2]

1. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

Lubricants, due to their contact with the surface of the parts, can monitor the condition and specify the exact location of erosion, because a small amount of erosion affects the physicochemical properties of the lubricant and can be investigated through spectral analysis of the lubricant. The nonlinear nature of the issues related to spectral analysis of lubricants has led to extensive research in this field. Some of these studies have focused on the use of soft computing methods in this field. Another group of researches has been done with the aim of research and development in the field of complementary or alternative methods. In this study, an attempt has been made to identify ineffective indicators in determining the result of lubricant spectral analysis through statistical analysis of 131 results of spectral analysis of gearbox lubricant, thus reducing the cost and more making machine maintenance units willing to perform lubricant spectral analysis.

Key words: Spectral analysis, Lubricant, Gearbox, Statistical analysis

*Mohammad-Reza Pourramezan
E-mail: mr.pourramezan@mail.um.ac.ir