نشریه علمی «مدیریت زنجیره تامین»
سال بیست و چهارم، شماره ۷۷، زمستان ۱۴۰۱؛ ص ۸- ۱

علمی ـ پژوهشی

شاخص‌های کاربردی پایش وضعیت از طریق آنالیز روغن جهت کاهش خرابی و افزایش راندمان ماشین‌آلات

امین اسکندرزاده ثابت[۱*]، حسین حبیبی[۲]، فرهاد نظری‌زاده[۳]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۲- دانشجوی دکتری آینده پژوهی، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه ایوانکی، ایوانکی، ایران، ۳- استادیار گروه فناوری و راهبرد، دانشکده مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، تهران، ایران
(دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۸)

چکیده

وجود یک سیستم مناسب برای نگهداری ماشین‌آلات، عامل بسیار مؤثری در عملکرد مناسب ماشین و کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات می‌باشد. نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت ماشین که در حقیقت کارآمدترین روش نگهداری و تعمیرات است با روش‌های مختلفی انجام می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها روش آنالیز روغن می‌باشد. در روش آنالیز روغن خصوصیات و مواد مختلف حاصل از فرسایش و تخریب روغن قسمت‌های مختلف ماشین‌آلات نظیر موتور، گیربکس، هیدرولیک و... موردبررسی قرار می‌گیرد. تجزیه‌وتحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف روغن بر پایه مقادیر مجاز ذرات فرسایشی و سایر ویژگی‌ها و محتویات موجود در روغن می‌باشد. اساس کار آنالیز روغن انعکاس وضعیت دقیق ماشین در حال کار، در یک دوره زمانی معین است. در این مقاله بر اساس مطالعات تئوری، میدانی و استفاده از اطلاعات بیش از ۳۰۰۰ ماشین‌آلات عمرانی محدوده‌هایی از شاخص‌های کاربردی نتایج آنالیز روغن جهت کاهش خرابی و افزایش راندمان ماشین‌آلات ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز روغن، شاخص، کاهش خرابی، راندمان ماشین‌آلات

۱- مقدمه

پایش وضعیت (Condition Monitoring) که به‌اختصار با CM نشان داده می‌شود، دربرگیرنده مجموعه عملیاتی است شامل دریافت، مطالعه و پردازش پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مربوط به تجهیزات از طریق ارتعاش، صدا، عملکرد، روانکاری، دما و... و بررسی تغییرات آن‌ها در طول زمان، با هدف بررسی و گزارش وضعیت ماشین‌آلات. پایش وضعیت یکی از اجزای اصلی عملیات نگهداری پیش‌بینانه است. ازآنجاکه اجرای پایش وضعیت با اهداف کاهش زمان توقف غیرمنتظره و تعمیرات، کاهش هزینه‌های تعمیرات و قطعات مصرفی، افزایش قابلیت اطمینان، بهره‌وری و کیفیت محصولات صورت می‌پذیرد، نوع تجهیزات مورداستفاده در جهت اجرای صحیح پایش وضعیت بسیار مهم است [۱].

تمرکز اصلی صنایع مختلف در جهت حداکثرسازی کارکرد ماشین‌آلات و حداقل‌سازی تعمیر و نگهداری و هزینه‌های اجرا است. برای رسیدن به این امر ایجاد یک برنامه منظم پایش وضعیت بسیار ضروری است، در اینجا روش‌های جامعی جهت پایش وضعیت ماشین‌آلات به کار گرفته شده است. آنالیز روغن یک روش بسیار خوبی جهت کنترل و علت‌یابی خرابی‌ها است [۴-۲].

آنالیز روغن روش جامعی است که به‌صورت مستقیم آسیب‌های سطوح را اندازه‌گیری می‌کند [۵]. با بررسی غلظت، اندازه، خواص شیمیایی، رنگ، شکل و خصوصیات سطح ذرات فرسایشی در نمونه روانکار جمع‌آوری‌شده اطلاعات باارزشی را می‌توان به دست آورد [۷-۶].

۲- روش‌های پایش وضعیت (CM)

روش‌های اشاره‌شده در زیر مهم‌ترین روش‌های پایش وضعیت (CM) مورداستفاده در حوزه ماشین‌آلات، تجهیزات و صنایع می‌باشند:

۲-۱- آنالیز ارتعاشات (Vibration Analysis)

در این روش ارتعاشات ماشین اندازه‌گیری شده و بر اساس آن وضعیت دستگاه سنجیده می‌شود و در صورت وجود عیب می‌توان عیب را تشخیص داد. این روش بیشتر برای ماشین‌آلات دوار بکار می‌رود. در این روش، به تحلیل اسپکترام فرکانسی و سیگنال زمانی پرداخته می‌شود. اندازه‌گیری ارتعاشات به‌وسیله حس‌گرهای جابجایی، سرعت و شتاب صورت می‌گیرد. عموماً در اندازه‌گیری فرکانس‌های زیر ۲۰ هرتز و اندازه‌گیری حرکت نسبی از حس‌گر جابجایی؛ در اندازه‌گیری فرکانس‌های بین ۲۰ تا ۲۰۰۰

* رایانامه نویسنده مسئول: amin.esk@gmail.com

هرتز از حس‌گر سرعت؛ و در اندازه‌گیری فرکانس‌های بالای ۲۰۰۰ هرتز از حس‌گر شتاب استفاده می‌گردد [۱، ۴ و ۵].

۲-۲- آکوستیک امیشن (Acoustic Emissions)

آکوستیک امیشن (AE) پدیده‌ای است که در اثر ایجاد و انتشار یک موج الاستیک در محدوده مافوق صوت (ZMH 1- ZHK 20) رخ می‌دهد. بر همین اساس، پایش وضعیت به روش آکوستیک امیشن شامل دریافت سیگنال‌های منتشرشده در تجهیزات توسط حس‌گرهای مخصوص و برقراری ارتباط بین سیگنال‌های دریافتی و تغییرات ایجادشده بر روی تجهیزات می‌باشد. این روش برای پایش وضعیت فرآیندهایی که در آن سیال با فشار بالا یا پدیده‌های فعال مکانیکی وجود دارد، مناسب می‌باشد. در این روش، سیگنال‌های فرکانس بالا توسط حس‌گرهای مخصوص ثبت‌شده و نتایج به‌صورت داده‌های عددی شامل پارامترهای دامنه و فرکانس سیگنال‌ها نمایش داده می‌شود. تغییرات این پارامترها در طول زمان به‌عنوان معیاری برای ارزیابی خرابی‌های احتمالی در تجهیزات مورد تحلیل قرار می‌گیرد [۱، ۴، ۵ و ۶].

۲-۳- آنالیز روغن و ذرات فرسایشی (Lubricant Analysis)

در این روش روغن و ذرات موجود در روغن پارامترهایی هستند که پایش می‌شوند. می‌توان این روش را مشابه آزمایش خون دانست که پزشکان به این طریق به وضعیت سلامتی انسان پی می‌برند. به همین ترتیب در این روش با آزمایش روغن می‌توان وضعیت روغن را که نقشی حیاتی برای بسیاری از ماشین‌آلات دارد را پایش نمود. همچنین از جنس و شکل ذرات موجود در روغن می‌توان به عیب و علت ایجاد آن پی برد. به‌عنوان مثال در این روش می‌توان با اندازه‌گیری عناصر فرسایشی، آلودگی‌ها و... از خرابی اجزای مختلف موتور اعم از پیستون، میل‌لنگ، سیستم سوخت‌رسان، پارگی اتصالات و دیگر اجزای سیستم‌های هیدرولیک و انتقال قدرت مطلع شد [۱، ۴، ۵ و ۶].

۲-۴- ترموگرافی (Thermography)

ترموگرافی یکی از روش‌های پایش وضعیت می‌باشد که بر اساس اندازه‌گیری دمای تجهیزات استوار است. در این روش تغییرات دمای سطوح ماشین با استفاده از تجهیزات خاص (دوربین‌های مخصوص) در محدوده مادون‌قرمز ثبت و تحلیل می‌گردد. به‌طورکلی، جریان حرارت در نقاط مختلف ماشین‌آلات را که در اثر ازکارافتادگی قطعات و اتصالات رخ می‌دهد (به‌طور مثال در اتصالات الکتریکی) را می‌توان با این روش ردیابی کرده و عیوبات را تشخیص داد. ترموگرافی علاوه بر تجهیزات الکتریکی برای پایش وضعیت یاتاقان‌های سرعت‌بالا، کوپلینگ‌های سیالاتی، مخازن نگهداری و... مورداستفاده قرار می‌گیرد.[1,4,5,6]

۲-۵- مافوق صوت (Ultra Sonic)

در این تست، امواج فراصوت که دامنه آن‌ها بین ۰/۵ تا ۲۵ مگاهرتز هستند توسط یک مولد صوتی بر روی قطعه مورد آزمایش هدایت می‌شود. این امواج هنگامی‌که به ناپیوستگی‌ها و عیوب سطحی و زیرسطحی قطعه برخورد می‌کنند منعکس می‌شوند که توسط مولد صوتی این بازتاب‌ها دریافت گردیده و به پالس‌های الکتریکی تبدیل شده و در صفحه‌نمایش به‌صورت یک سیگنال ظاهر می‌گردد. اپراتور با بررسی این سیگنال‌ها می‌تواند به اطلاعات مختلفی از قبیل مکان، عمق، ابعاد و نوع عیب بر روی قطعه پی ببرد[1,4,7].

این آزمون می‌تواند عیوب را تا عمق ۵ متر در فولادها نشان دهد و درصد نفوذ و حساسیت آن در آشکارسازی عیوب صفحه‌ای و بحرانی نسبت به آزمون رادیوگرافی بالاتر است. از محدودیت‌های آن این است که کار با آن نیاز به تخصص و مهارت بالایی دارد، چه در انجام دادن آزمون بر روی سازه‌ها و چه در تفسیر و خواندن اطلاعات دریافتی توسط این آزمون. در این روش قطعات بسیار کوچک و نازک و قطعات ناهموار به‌سختی قابل تست شدن هستند و اگر ناپیوستگی و عیب کوچک و بسیار نزدیک به سطح باشد ممکن است تشخیص داده نشود. کاربرد این تست در تشخیص خرابی (به‌خصوص خرابی داخلی) تیغه و برج توربین بادی می‌باشد[1,4,7].

۲-۶- اندازه‌گیری کرنش (Strain measurement)

با استفاده از حس‌گرهای الکترونیکی می‌توان کرنش یا تغییرات نسبی طول یک جسم را اندازه‌گیری نمود، کرنش برابر با تغییرات طول یک ماده به حالت اولیه آن می‌باشد. کرنش‌سنج‌ها می‌توانند برای چهار گروه کلی محوری، برشی، خمشی و پیچشی به کار برده شوند. بااین‌وجود نوع محوری و خمشی متداول‌ترین نوع کرنش‌سنج‌ها می‌باشند. ابعاد کرنش‌سنج‌ها از چند میلی‌متر مربع تا چند سانتی‌متر مربع است و دارای مقاومتی از چند ده تا چند هزارم اهم می‌باشند. کاربرد کرنش‌سنج‌ها در توربین‌های بادی اندازه‌گیری کرنش مربوط به تیغه و روتورها می‌باشد[1,4,7,8,9].

۲-۷- اثرات الکتریکی (Electrical effects)

پایش وضعیت تجهیزات الکتریکی مانند ژنراتور، موتور و باتری‌ها غالباً از طریق اندازه‌گیری ولتاژ و جریان صورت می‌پذیرد. در شبکه‌های ولتاژ بزرگ و متوسط اندازه‌گیری دشارژ ولتاژ بسیار اهمیت دارد. تحلیل طیفی جریان استاتور ژنراتور می‌تواند برای تشخیص خرابی‌های نهفته در سیستم کابل رسانی بدون تأثیر بر

عملکرد توربین بسیار مفید باشد. مقاومت الکتریکی می‌تواند جهت ارزیابی ساختار اجزای خاصی از توربین بادی مورداستفاده قرار گیرد. تغییرات ناگهانی مقاومت الکتریکی جهت تشخیص خستگی، شکست و خردشدگی مورداستفاده قرار می‌گیرد. کاربرد این تست در برج، ژنراتور و تیغه‌های توربین می‌باشد [۱,۴,۷,۸,۹].

۲-۸- شاک پالس (Shock Pulse)

یاتاقان‌های غلتشی طول عمر محدود و مشخصی داشته و معمولاً پس از اتمام طول عمرشان باید تعویض شوند؛ اما در حین کار می‌توان آن‌ها را پایش نموده و با بررسی وضعیت ارتعاشی آن‌ها نسبت به ادامه کار یا تعویض آن تصمیم‌گیری کرد. تشخیص به‌موقع عیب یاتاقان در دستگاه‌های دوار می‌تواند از توقف ناگهانی و بدون برنامه‌ریزی جلوگیری کرده و برنامه‌ریزی و داشتن زمان کافی جهت سفارش یاتاقان جایگزین را امکان‌پذیر می‌نماید. عیوب یاتاقان‌ها معمولاً ناشی از جدا شدن موضعی مواد، ترک‌های ناشی از خستگی روی سطوح تماسی و خرد شدن یا ترک برداشتن اجزا غلتشی یعنی ساچمه‌ها و رولرها می‌باشد که در اثر روغن‌کاری ناقص و یا اعمال نیروهای اضافی روی آن‌ها می‌تواند اتفاق بیفتد. تکنیک تشخیص عیوب یاتاقان با دیگر عیوب ارتعاشی تفاوت دارد زیرا خرابی یاتاقان پالس‌های بسیار کم انرژی در فرکانس‌های بالا تولید می‌کند که عملاً این پالس‌ها در ارتعاشات ناشی از عیوب دیگر که عمدتاً مضاربی از دور ماشین هستند گم می‌شوند [۱,۹,۱۰,۱۱].

۲-۹- آنالیز کارایی (Performance Monitoring)

آنالیز کارایی یکی از تکنیک‌های مهم پایش وضعیت است که برای انواع مختلف تجهیزات به‌ویژه تجهیزاتی که در واحدهای فرآیندی به کار می‌روند و تجهیزاتی که آنالیزهای دیگر مانند ارتعاشات جوابگوی پایش کامل آن‌ها نیست کاربرد دارد.

جمع‌آوری اطلاعات اولیه (مانند دبی، فشار، دما، آمپر مصرفی و...) به کمک انواع گیج‌ها، نشانگرها، سنسورها و ترانسمیترها صورت می‌پذیرد. ارتباط بین پارامترهایی مثل قدرت، سرعت باد، زاویه تیغه و سرعت روتور جهت ارزیابی، پایش و تشخیص خرابی‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد. برخی از این وسایل اندازه‌گیری دارای نشان‌دهنده در محل هستند و اطلاعات برخی دیگر از طریق سیستم کنترل مرکزی قابل‌دستیابی است.

پارامترهای بیان‌کننده کارایی ماشین (نظیر راندمان، هد تولیدی و...) به کمک فرمول‌ها و روابط ریاضی و بر اساس اطلاعات اولیه محاسبه می‌شوند. با trend کردن مقادیر پارامترهای بیان‌کننده کارایی ماشین در طول عمر آن، هرگونه انحراف از وضعیت نرمال مشخص شده و می‌توان با انجام اقدام اصلاحی، وضعیت را نرمال نمود. این تکنیک به‌ویژه برای توربین‌ها، پمپ‌ها، فن‌ها، مبدل‌های حرارتی، بویلرها و... از اهمیت خاصی برخوردار است. کاربرد این تست در تیغه و ژنراتور توربین بادی می‌باشد [۱,۴,۵].

۲-۱۰- بازرسی رادیوگرافیک (Radiographic inspection)

در بازرسی رادیوگرافیک از اشعه ایکس برای پرتونگاری استفاده می‌شود. پرتو به جسم تابیده و به علت طول‌موج کم اشعه‌ها جذب قطعه می‌گردد. اگرچه این روش اطلاعات مفیدی را از اجزای سازه مورد بازدید فراهم می‌آورد اما استفاده از این روش به‌ندرت مورداستفاده قرار می‌گیرد. عکس‌برداری رادیوگرافی وابسته به سطوح مختلف از جذب فوتون‌هایی می‌باشد که از میان مواد عبور می‌کنند. جهت تشخیص خستگی‌های شدید، خردگی و شکاف‌های کمتر از $50\mu m$ از روش عکس‌برداری با اشعه ایکس استفاده می‌گردد. عکس‌برداری با این روش جهت تشخیص عیوب داخلی توربین‌های بادی مفید بوده و مزیت اصلی دقت آن می‌باشد. سیستم رادیوگرافی پرتابل به‌عنوان یک راه‌حل جهت تشخیص عیوب و کاهش هزینه بازرسی مطرح می‌گردد. هرچه طول‌موج کوتاه‌تر باشد قدرت نفوذ پرتو در داخل جسم بیشتر است. تمام تابش در جسم نفوذ نمی‌کند بلکه قسمتی از آن جذب می‌شود. مقدار جذب تابعی از چگالی و ضخامت جسم می‌باشد. کاربرد این روش در تشخیص عیوب تیغه‌های توربین از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد [۱,۴,۵,۶].

۲-۱۱- استاندارد (American Society for Testing and Materials)ASTM

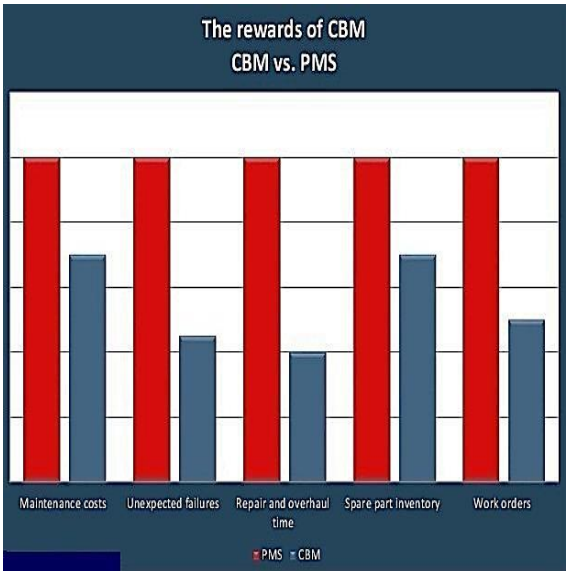
یک سازمان بین‌المللی توسعه استاندارد است. این سازمان استانداردهای فنی را به‌صورت داوطلبانه تعریف و به چاپ می‌رساند. این استانداردها گستره‌ی وسیعی از مواد تولیدات، سیستم‌ها و وسیله‌ها را شامل می‌شود. ASTM دارای بیش از ۱۲۰۰۰ استاندارد است که در ۷۷ جلد به‌صورت سالیانه چاپ و منتشر می‌شود [۱۲].

۳- استانداردها و شاخص‌های تعریف‌شده روانکار

استفاده از روانکارهای روغن سهم قابل‌توجهی از خرید سازمان‌های عمرانی را شامل می‌شود، ازآنجاکه این محصول در سلامت ماشین‌آلات و افزایش راندمان آن‌ها و همچنین اجرای هرچه‌بهتر پروژه اثرگذار است و اینکه در مواردی در سطوح کارگاهی در اجرای این امر کمبود اطلاعات تحلیلی وجود دارد (در واقع در بسیاری از موارد صرفاً به تحلیل آزمایشگاه اکتفا نموده و این در حالی است که اطلاعات آزمایشگاه‌ها دارای نواقص

عدیده‌ای هستند) بر آن شدیم تا با بررسی و به دست آوردن شاخص‌ها این مشکل را مرتفع نماییم، حال در زیر به نوع آزمایش‌ها و محدوده شاخص‌های دست‌یافته اشاره می‌نماییم.

در شکل (۱) به اطلاعات شرکت مشاور DNV اشاره می‌کنیم:



شکل (۱). اثرگذاری CM بر کاهش هزینه‌ها

همان‌طور که مشاهده می‌کنید در زمان اجرای CM در پروژه‌ای که صرفاً تحت پوشش نت پیشگیرانه بود (PM) هزینه‌های تعمیر و نگهداری ۳۰ درصد، خرابی‌های غیرمنتظره ۵۵ درصد، زمان بازسازی و تعمیرات ۶۰ درصد، درخواست قطعات یدکی ۳۰ درصد و حکم کار خرابی‌ها ۵۰ درصد کاهش داشته است [۱۳].

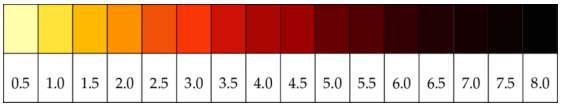
۳-۱- رنگ روغن (Colour)

در بیشتر روغن‌های تولیدی رنگ روغن ناشی از روغن پایه مصرفی و مواد افزودنی آن است و بسته به این‌که روغن پایه و مواد افزودنی چگونه و از کجا تأمین شده باشد رنگ روغن ممکن است از زرد بسیار کمرنگ تا قهوه‌ای تغییر کند. برای روغن‌های معدنی به علت وجود اختلاف در روغن‌های پایه در رنگ و یا تیرگی آن‌ها، تغییرات جزئی قابل‌مشاهده می‌باشد. به‌طورکلی رنگ روغن‌های معدنی با ناخالصی‌های ترکیبات گوگرد و آروماتیک در ارتباط می‌باشد. در روغن‌های پایه تیره‌تر، معمولاً این ناخالصی‌ها بیشتر رؤیت می‌شود. رنگ تیره، بیشتر در روغن‌های معدنی با ویسکوزیته بالاتر قابل‌مشاهده می‌باشد. بعضی افزودنی‌های خاص همچون آن‌هایی که دارای گوگرد می‌باشند در رنگ روغن تأثیرگذار می‌باشند. برای مثال مواد پاک‌کننده همچون کلسیم سولفانات‌ها رنگ روغن نهایی را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تیره‌تر می‌کند. با توجه به موارد ذکرشده رنگ‌بندی روغن‌ها مطابق جدول زیر دسته‌بندی می‌شوند [۱۶-۱۴] .

جدول (۱). شماره رنگ روغن

شماره رنگ
۰/۵ -۸

جدول (۱) مربوط به روغن‌های نو می‌باشد و ازآنجایی‌که نوع روغن پایه و افزودنی‌ها نقش قابل‌توجهی در رنگ روغن ایجاد می‌کنند در خصوص کنترل کیفی روغن نو می‌بایست به مشخصه فیزیکی ارائه شده توسط تولیدکننده روغن مراجعه نمود.



شکل (۲). طبقه‌بندی ظاهری رنگ‌ها

آزمایش رنگ روغن از طریق آزمایش استاندارد ASTM D1500 تعیین می‌شود.

۳-۲- نقطه اشتعال باز (Flash point open)

پایین‌ترین درجه حرارتی است (°C) که در این دما روغن موتور در ظرفی در باز به‌اندازه کافی به بخار تبدیل و با ترکیب آن با هوا یک مخلوط قابل اشتعال را به صورتی ایجاد می‌کند که با نزدیک شدن شعله به آن، روغن در یک لحظه مشتعل و سپس خاموش می‌گردد، تست مذکور بر اساس استانداردASTM D92 تعیین شده و برای روغن‌های نو مورداستفاده قرار می‌گیرد.

جدول (۲). حداقل مجاز نقطه اشتعال

حداقل مقدار نقطه اشتعال	درجه سانتی‌گراد	گرید ۴۰،۵۰	گرید xW40 xW50 20,30
۲۰۰	۲۲۰		

جدول (۲) به حداقل دمای روغن به تفکیک گرید اشاره نموده است، مقادیر کمتر قابل‌قبول نیست [14-17].

۳-۳- نقطه اشتعال بسته (Flash point close)

این آزمایش برای روغن‌های کارکرده موتور از این نظر اهمیت دارد که مقدار آلودگی سوخت حل‌شده در روغن را مشخص می‌نماید. سوخت یا مواد شیمیایی حل‌شده، با کاهش گرانروی روغن، به‌شدت به کارایی روانکار آسیب رسانده و می‌تواند باعث آتش‌سوزی و خطر انفجار شود. مقادیر کمتر از ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد نشان‌دهنده وجود آلودگی سوخت در روغن موتور است، این تست بر اساس استاندارد ASTM D3828 تعیین می‌گردد [۱۷-۱۴].

۳-۴- سنجش تراکم ذرات فرسایشی (PQ)

با توجه به اینکه فلز آهن در ساختار اکثر ماشین‌آلات حضور دارد، لذا استفاده از روشی که بتواند تراکم ذرات درشت آهنی را در نمونه روغن مشخص نماید، در شناخت وضعیت فرسایش در ماشین‌آلات راهگشا خواهد بود. تکنیک PQ در واقع به‌عنوان یک روش برای اندازه‌گیری میزان ذرات فرسایشی آهنی در نمونه‌های روغن بکار برده می‌شود. این تکنیک برای اندازه‌گیری ذرات درشت فرسایشی با خاصیت آهن‌ربایی (آهنی آزاد) در روغن است.

جدول (۳). حداکثر مجاز PQ

نوع روغن	حداکثر مقدار PQ
دنده	۱۵۰
هیدرولیک	۲۰
موتور	۲۰

در جدول (۳) حداکثر مجاز PQ برای روغن‌های دنده، هیدرولیک و موتور کارکرده نشان داده شده و مقادیر بیشتر می‌بایست موردبررسی قرار گیرد [۱۸-۱۴].

۳-۵- گرانروی (Viscosity)

گرانروی میزان اصطکاک داخلی روانکار یا مقاومت در مقابل جریان است. گرانروی سینماتیک، اندازه‌گیری مقاومت یک سیال برای جریان یافتن، در شرایط نیروی ثقل است. این مقیاس با اندازه‌گیری زمان به ثانیه برای حرکت حجم مشخصی از سیال که تحت شرایط ثقل، فاصله تعیین‌شده‌ای را در لوله مویین کالیبره شده، طی نماید، صورت می‌گیرد، درحالی‌که فشار و دما به‌دقت کنترل شده است. گرانروی بر کار دستگاه، کاهش اصطکاک و ضخامت فیلم روغن یاتاقان‌ها اثر می‌گذارد. بنابراین، اندازه‌گیری و بررسی روند آن در برنامه آنالیز روغن بسیار حساس است. آزمایش گرانروی در دماهای ۴۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد با استاندارد ASTM D445 تعیین می‌شود.

شکل (۳). معادل‌یابی روغن‌ها

در شکل (۳) معادل روغن‌ها به تفکیک استانداردهای SAE، AGMA و ISO VG ارائه شده است. به‌عنوان مثال مقادیر قابل‌قبول گرانروی روغن با گرید 20W50 در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد محدوده ۲۱,۹-۱۶,۳ Cst (سانتی استوک) است [۱۸-۱۴].

۳-۶- گرانروی ظاهری در دمای منفی استارت موتور (CCS)

برای تعیین عملکرد عملیاتی روغن نو در دمای پایین، از آزمون شبیه‌ساز استارت سرد(Cold CrankingSimulator (CCS در درجه حرارت بین ۱۰- تا ۳۵- درجهٔ سانتی‌گراد بر اساس روش استاندارد ASTM D5293 استفاده می‌شود و مقدار گرانروی دینامیک با واحد زیر گزارش می‌گردد.

m.Pa.Sec (میلی پاسکال ثانیه)=cP (سانتی پوآز)

جدول (۴). حداکثر مجاز CCS

گرید روغن	حداکثر مقدار گرانروی دینامیک CCS در دمای پایین(mPa.s)
0W	6200 در دمای ۳۵-
5W	۶۶۰۰ در دمای ۳۰-
10W	۷۰۰۰ در دمای ۲۵-
15W	۷۰۰۰ در دمای ۲۰-
20W	۹۵۰۰ در دمای ۱۵-
25W	۱۳۰۰۰ در دمای ۱۰-

در جدول (۴) به‌عنوان مثال حداکثر گرانروی دینامیک CCS برای روغن 10W30 مقدار ۷۰۰۰ mPa.s بوده و مقادیر بیشتر قابل‌قبول نیست [۱۶-۱۴].

۳-۷- گرانروی ظاهری در دمای منفی پمپاژ روغن (MRV)

برای تعیین عملکرد عملیاتی روغن نو در دمای پایین، از آزمون گرانروی ظاهری در دمای منفی مربوط به پمپاژ روغن Mini-Rotary Viscometer) MRV) در درجه حرارت بین ۱۵- تا ۴۰- درجهٔ سانتی‌گراد بر اساس روش استاندارد ASTM D4684 استفاده می‌شود.

جدول (۵). حداکثر مجاز MRV

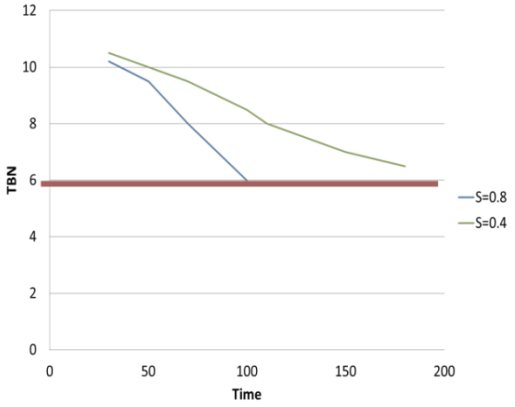
گرید روغن	حداکثر مقدار گرانروی دینامیک MRV در دمای پایین (mPa.s)
۰W	۶۰۰۰۰ در دمای ۴۰-
۵W	۶۰۰۰۰ در دمای ۳۵-
۱۰W	۶۰۰۰۰ در دمای ۳۰-
۱۵W	۶۰۰۰۰ در دمای ۲۵-
۲۰W	۶۰۰۰۰ در دمای ۲۰-
۲۵W	۶۰۰۰۰ در دمای ۱۵-

مطابق جدول (۵) به‌عنوان مثال حداکثر گرانروی دینامیک MRV برای روغن 10W30 مقدار 60000 mPa.s بوده و مقادیر بیشتر قابل‌قبول نیست [۱۷-۱۴].

۳-۸- عدد قلیاییت (TBN)

این آزمایش شدت قلیاییت روغن‌موتورها را مشخص می‌کند. روغن‌های موتور دارای مواد افزودنی تأمین‌کننده ذخیره قلیاییت، برای خنثی‌سازی اسیدی است که در جریان احتراق تولید می‌شود. وقتی این ذخیره پایان یابد، روغن می‌تواند به‌شدت خردگی ایجاد نماید. این تست بر اساس استانداردهای ASTM D974, ASTM D2896, ASTM D4739 تعیین می‌گردد. کاهش TBN روغن موتور به کمتر از ۶۰ درصد مقدار اولیه محدوده‌ی بحرانی بوده و روغن می‌بایست تعویض گردد. به‌عنوان مثال زمانی که TBN یک روغن موتور نو با گرید 15W40 مقدار $11\frac{mg\ KOH}{g}$ است، TBN روغن کارکرده نباید از ۶/۶ کمتر گردد.

مقدار گوگرد موجود در سوخت از اهمیت بالایی برخوردار بوده و مطابق شکل ۴ طی تحقیقات انجام‌شده اگر محتوای گوگرد سوخت از ۰/۵٪ به ۱٪ افزایش یابد فرسایش ۴ برابر افزایش خواهد شد و میزان TBN افت قابل‌توجهی خواهد یافت [14-17].



شکل (۴). تأثیر میزان گوگرد بر افت خاصیت قلیایی

۳-۹- نقطه ریزش روانکار(Pour point)

بسیاری از انواع ماشین‌آلات در شرایط سرد استارت زده می‌شوند و توانائی یک روانکار در جریان یافتن و روانکاری مناسب در زمان استارت (دقیقاً بلافاصله پس از استارت)، یک فاکتور مهم در انتخاب روانکار است. وقتی یک روانکار به‌اندازه کافی سرد است، به نقطه‌ای خواهد رسید که تحت آن شرایط روغن با نیروی ثقل خود دیگر جریان نخواهد یافت. در این دما، روغن وظیفه اصلی خود را انجام نخواهد داد. در واقع نقطه ریزش پایین‌ترین دمایی است که جریان روانکار می‌تواند ادامه یابد. این تست بر اساس استاندارد ASTM D97 تعیین می‌گردد.

جدول (۶). حداکثر مجاز Pour point

حداکثر مقدار نقطه ریزش	درجه سانتی‌گراد	گرید ۵۰،۴۰	گرید 25Wx 20,30	گرید 15Wx 20Wx	گرید Wx۰ 5Wx 10Wx
	-۹	-۱۸	-۲۴	-۳۰	

در جدول (۶) به حداکثر مقادیر نقطه ریزش روغن نو اشاره شده است و مقادیر بیشتر قابل‌قبول نیست[14-17].

۳-۱۰- خردگی مس (Copper corrosion)

با این تست معیاری از میزان خورندگی روغن در برابر فلز مس به دست می‌آید، این آزمایش عموماً جهت روغن‌های توربین، کمپرسور و هیدرولیک استفاده می‌شود. این تست بر اساس استاندارد ASTM D130 تعیین می‌گردد. حداکثر مقدار مجاز روغن نو در این تست 1b است [۱۴,۱۵].

۳-۱۱- فراریت روغن (Noack)

هدف از انجام این آزمون اندازه‌گیری اتلاف تبخیر روغن‌های روانکار نو بالأخص روغن‌های موتور است.

جدول (۷). حداکثر مجاز فراریت روغن موتور

حداکثر مقدار فراریت روغن	درصد وزنی	گرید ۴۰،۵۰	گرید 25Wx 20,30	گرید 20Wx	بقیه گریدها
	۵	۶	۱۰	۱۵	

مطابق جدول (۷)، به‌عنوان مثال حداکثر فراریت روغن 20W40 مقدار ۱۰ درصد بوده و مقادیر بیشتر غیرقابل‌قبول است [۱۶-۱۴].

۳-۱۲- شمارش ذرات (Particle counter)

در این روش، تعداد ذرات موجود در نمونه روغن، در اندازه‌های مشخص، برحسب حجم سیال (معمولاً برحسب ml ۱ یا ml ۱۰۰) ارائه می‌شود. استانداردهای این روش ISO ۴۴۰۶ و NAS ۱۶۳۸ هستند.

مطابق جدول ۸ محدوده قابل‌قبول PC به تفکیک نوع سیال ارائه شده است [۱۷-۱۴].

جدول (۸). محدوده قابل‌قبول PC

نوع سیال	محدوده قابل‌قبول بر اساس روش ISO 4406	محدوده قابل‌قبول بر اساس روش NAS1638
روغن هیدرولیک نو	.../۱۷/۱۴	۸
روغن توربین و کمپرسور نو	.../۱۷/۱۴	۸
سوخت	.../۱۸/۱۵	۹

تست شمارش ذرات برای روغن‌های دنده و موتور، مرسوم نمی‌باشد. علاوه بر موارد مورداشاره در این مقاله سطح تمیزی بر اساس مشخصات تجهیز (کتابچه نگهداری و تعمیرات) و همچنین توافق با تأمین‌کننده محصول بررسی می‌گردد.

۳-۱۳- آلودگی سوخت در روغن

با مخلوط شدن مقادیر کم سوخت در روغن موتور، گرانروی آن به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. پس از انجام تست نقطه اشتعال بسته و مشخص شدن وجود سوخت در روغن، از تست Fuel Dilution برای تعیین درصد حجمی سوخت موجود در روغن استفاده می‌گردد. مقادیر بزرگ‌تر از یک درصد حجمی سوخت، هشدار بوده و روغن می‌بایست تعویض گردد.

آزمایش آلودگی سوخت از طریق آزمایش استاندارد ASTM D3524 تعیین می‌شود [16-14].

۳-۱۴- پایداری برشی

درصد افت گرانروی در ۱۰۰ ℃ برای روغن‌های نو حاوی مواد افزودنی پلیمری، توسط دستگاه اینجکتر (Injector) دیزلی طی ۳۰ سیکل گردش روغن، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. افت گرانروی بستگی به تخریب مواد پلیمری روغن در اثر عبور از نازل دارد.

درصد افت گرانروی روغن تحت آزمایش به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$V_l = \frac{(V_u - V_s)}{V_u} \times 100$$

V_l= درصد افت گرانروی

V_u=گرانروی سینماتیک روغن قبل از آزمایش در 100℃

V_s= گرانروی سینماتیک روغن بعد از آزمایش در 100℃

درصد افت گرانروی پایین‌تر نشان‌دهنده مرغوبیت روغن بوده و روغنی که گرانروی آن پس از آزمایش در محدوده گرانروی قبل از آزمایش باشد مرغوب می‌باشد. تست پایداری برشی از طریق آزمایش استاندارد ASTM D6278 تعیین می‌شود [۱۶-۱۳].

۳-۱۵- ویسکوزیته HTHS

ویسکوزیته در دمای بالا (۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) و سرعت برشی زیاد، یک ویژگی مهم روغن نو موتور مالتی گرید محسوب شده و می‌تواند منجر به کاهش مصرف سوخت و محافظت بهتر از موتور گردد. روغن‌های با ویسکوزیته HTHS پائین باعث بهبود مصرف سوخت و روغن‌های با ویسکوزیته HTHS بالاتر باعث حفاظت بهتر قطعات موتور (Ring-Liner) در برابر سایش می‌شوند. با توجه به اهمیت کاهش مصرف سوخت و استفاده از روغن‌های با ویسکوزیته HTHS پائین (کمتر از ۳/۵ سانتی پواز)، ممکن است تولیدکنندگان موتور به‌منظور کنترل سایش و دوام موتور مجبور به طراحی مجدد موتورها شوند. زمانی که روغن در دما و سرعت برشی بالا قرار گیرد ساختار پلیمر در جهت تنش ایجادشده به‌صورت برگشت‌پذیر تغییر کرده و منجر به کاهش موقتی ویسکوزیته می‌شود، کاهش بیش‌ازحد ویسکوزیته منجر به سایش شدید قطعات خواهد شد، بنابراین کیفیت پلیمر و تعادل دقیق در هنگام فرموله کردن روغن موتور مالتی گرید نو بسیار حائز اهمیت می‌باشد. استانداردهای ASTM D4683 و ASTM D4741 روش‌های اندازه‌گیری ویسکوزیته HTHS در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. حداقل مقدار مجاز ویسکوزیته HTHS مطابق جدول زیر می‌باشد [۱۶-۱۲].

جدول (۹). حداقل مقادیر مجاز HTHS

درجه گرانروی	حداقل گرانروی دینامیکی در 150℃ با سرعت برشی بالا
۲۰	۲/۶
۳۰	۲/۹
۴۰	۳,۵ (درجه‌های 0w40,5w40,10w40)
۴۰	۳,۷ (درجه‌های 15w40,20w40 و 25w40)
۵۰	۳/۷
۶۰	۳/۷

۳-۱۶- آنالیز عنصری

آنالیز عنصری (Elemental Analysis)، آزمایشی است که به روش‌های مختلف و به کمک دستگاه‌های پیشرفته صورت گرفته و از طریق آن، کلیه عناصر موجود در روغن شناسایی‌شده و مقدار آن‌ها برحسب ppm به دست می‌آید.

این آزمایش به دو روش الکترود دیسکی چرخان (ASTM D 5185) و پلاسمای کوپل شده القایی (ASTM D 6595) انجام می‌شود. روش الکترود دیسکی چرخان (RDE) قادر به تشخیص ذرات با اندازه‌های کمتر از ۸µm بوده و روش پلاسمای کوپل شده القایی (ICP) ذرات کوچک‌تر از ۳µm را شناسایی می‌کند. لازم به ذکر است هر دو روش مذکور برای سنجش ذرات درشت‌تر از این مقادیر، ناتوان هستند [۱۴-۸].

سه گروه از عناصر مختلف که بدین طریق شناسایی می‌شوند عبارت‌اند از:

- ذرات فرسایشی (Fe, Al, Cd, Cr, Cu, Ni, ...)
- مواد افزودنی یا ادیتیوها (Ba, Ca, Mg, P, Zn, ...)
- آلودگی‌های موجود در روغن (Si, Pb, K, ...)

۳-۱۷- آلودگی آب در روغن

آلودگی آب در روغن، یکی از مهم‌ترین آلوده‌کننده‌های هر سیستمی می‌باشد، در حقیقت بدون وجود آلودگی آب در روغن، عمر روانکارها به چندین برابر افزایش می‌یابد.

ابتدایی و ساده‌ترین روش اندازه‌گیری آب در روغن تست Crackle می‌باشد که اگر آب در روغن وجود داشته باشد به‌صورت حباب (در اندازه مختلف) درآمده و از روغن خارج می‌گردد به این منظور از دستگاه Hot Plate استفاده می‌شود. امروزه روش‌های آزمایشگاهی جدیدتری جهت اندازه‌گیری آب در روغن همچون کارل فیشر استاندارد ASTM D6304، Water & Sediment استاندارد ASTM D2273 و Water Distillation استاندارد ASTM D96 مورداستفاده قرار می‌گیرد [۱۲-۸].

به‌صورت تجربی مشخص گردیده است، محدوده‌های زیر برای روغن نو و کارکرده محدوده هشدار بوده و می‌بایست وضعیت روغن و تجهیز موردبررسی قرار گیرد:

- بیش از ۰/۱ درصد وزنی در روغن‌های گردشی دنده
- بیش از ۰/۵ درصد وزنی در روغن‌های هیدرولیک، کمپرسور، توربین
- بیش از ۰/۲ درصد وزنی در روغن موتور دیزل

۴- نتیجه‌گیری

امروزه اجرای آنالیز روغن در کشورهای توسعه‌یافته یک امر جدایی‌ناپذیر از حوزه نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات گردیده است، این حوزه در سطح کشورمان نیز نسبت به گذشته توسعه‌هایی داشته است اما به دلیل آنکه تحقیقات کاربردی در این خصوص به‌صورت جامع ارائه انجام نگردیده است بعضاً موردتوجه کافی قرار نمی‌گیرد، یکی از این موارد نبود شاخص‌های مناسب برای تفسیر نتایج است که کاربر CM نمی‌تواند به‌خوبی نتایج را تحلیل نموده و شرایط ماشین‌آلات را پایش کند. به‌عنوان مثال یک پارت روغن نو جهت خریداری احتیاج به تعدادی آزمایش دارد در صورت عدم تطابق خروجی آنالیز روغن با شاخص‌های ذکرشده در این مقاله این موضوع مطرح می‌شود که روغن خریداری شده بازیافتی یا نامرغوب است بنابراین از هزینه‌های زیادی که عدم رعایت این مهم بر سازمان ماشین‌آلات تحمیل می‌نماید جلوگیری می‌گردد، این در حالی است که در صورت اجرای کلیه موارد و رعایت شاخص‌های ارائه شده در این مقاله هزینه‌های نگهداری و تعمیرات حداقل با کاهش ۴۰ درصدی مواجه خواهد شد.

۵- مراجع

[1] Eskandarzadeh Sabet,A.,& Torkaman K .(2020) Implementing Condition Monitoring In Wind Turbines To Reduce Maintenance Costs Using SCADA Data Analysis Method .Engineering And Quality Management.(In Persian)

[2] On-Site Oil Analysis,.(2020). "Is It A Replacement For Lab Analysis?" ,Https://Www.Machinerylubrication.Com/Read/982/On site-Oil-Analysis-Lab

[3] Yan, S., Biao, M. A., Wang, X., Chen, J., & Zheng, C. (2020). Maintenance Policy For Oil-Lubricated Systems With Oil Analysis Data Polityka Utrzymania Ruchu Układów Smarowanych Olejem W Oparciu O Dane Z Analizy Oleju. Eksploatacja I Niezawodnosc, 22(3), 455.

[4] Harwood, J., & Aparicio, R. (Eds.). (2000). Handbook Of Olive Oil: Analysis And Properties (P. 620). Gaithersburg, MD: Aspen.

[5] Pedregal, D. J., García, F. P., & Roberts, C. (2009). An Algorithmic Approach For Maintenance Management Based On Advanced State Space Systems And Harmonic Regressions. Annals Of Operations Research, 166(1), 109-124.

[6] J. C. Fitch, D. D. Troyer, (1999).Oil Analysis Basics, Noria Corporation.

[7] Degaspari, J. (1999). Recording Oil's Vital Signs. Mechanical Engineering, 121(05), 54-56.[3] Rao, B.

[8] K. N. (1993). Profitable Condition Monitoring & Diagnostic Engineering Management. In Profitable Condition Monitoring (Pp. 37-44). Springer, Dordrecht.

[9] Troyer, D. (1998). Why Oil Analysis Should Be Performed On Site. Noria Corporation, Oil Analysis. Com.

[10] Joyce, C. S. (1996). U.S. Patent No. 5,537,336. Washington, DC: U.S. Patent And Trademark Office.

[11] Harwood, J., & Aparicio, R. (Eds.). (2000). Handbook Of Olive Oil: Analysis And Properties (P. 620). Gaithersburg, MD: Aspen.

[12] ASTM International, (2020). "What Is ASTM" ,Https://Fa.Wikipedia.Org.

[13]] Https://Www.Dnv.Com.

[14]] Rao, B. K. N. (Ed.). (2012). Profitable Condition Monitoring. Springer Science & Business Media.

[15] Lukas, M., & Anderson, D. P. (1998). Laboratory Used Oil Analysis Methods. Tribology & Lubrication Technology, 54(11), 19.

[16] Http://Standard.Isiri.Gov.Ir.

[17] Mohammed, M. (2021). "Application And Evaluation Of Multi-Sensor Fusion Technology In Diesel Engine Oil Analysis"–A Review (Doctoral Dissertation, Politecnico Di Torino).

[18] Malaguti, R., Lourenço, N., & Silva, C. (2021, September). Wear And Tear: A Data Driven Analysis Of The Operating Condition Of Lubricant Oils. In IFIP International Conference On Advances In Production Management Systems (Pp. 217-225). Springer, Cham.

Iranian Journal of Supply Chain Management

Vol. 24, No. 77, Winter, 2023

Functional Indicators of Condition Monitoring Through Oil Analysis to Reduce Breakdowns and Increase Machinery Efficiency

Amin Eskandarzadeh Sabet*, Hossein Habibi, Farhad Nazarizadeh

*Phd student Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering , Semnan University, Semnan, Iran

(Received: 21/02/2022; Accepted: 19/12/2022)

Abstract

The existence of a proper system for machine maintenance is an effective factor in the proper operation of the machine and reduction in maintenance costs. Condition-based maintenance, which is actually the most efficient method of maintenance, is done with different methods, the most important of which is the oil analysis method. In the oil analysis method, the properties and different materials resulting from the erosion and degradation of the oil of different parts of machines such as engine, gearbox, hydraulics, etc. are examined. The analysis of the results of different oil tests is based on the allowed amounts of erosion particles and other characteristics and components in the oil. The basis of the oil analysis is to represent the exact state of the active machine in a certain period of time. In this paper, with the approach of theoretical and field studies and using the information of more than 3000 construction machines, some ranges of functional indicators of the results of oil analysis are presented to reduce breakdowns and increase the efficiency of machines.

Keywords: Oil Analysis, Indicator, Breakdown Reduction, Machinery Efficiency

*Corresponding Author E-mail: amin.esk@gmail.com