

## مقاله علمی - پژوهشی

# تعیین مقدار آب و شاخص TAN در روغن هیدرولیک دروگر نیشکر استافت ۷۰۰۰ با فناوری طیف‌سنجی مرئی

شیرین اسدیان<sup>۱</sup>، احمد بناکار<sup>۲\*</sup> و بهاره جمشیدی<sup>۳</sup>

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد؛ و دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
۳- دانشیار موسسه تحقیقات فنی مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۱۴

## چکیده

امروزه با توجه به ارزیابی‌ها و بالا بودن هزینه‌های تعمیر و نگهداری ماشین‌های برداشت نیشکر، نظارت بر روغن هیدرولیک دروگر نیشکر با استفاده از روش سریع‌تر و غیرمخرب برای تعیین آلودگی و همچنین شاخص TAN ضرورت دارد. در این پژوهش، توانایی روش طیف‌سنجی مرئی به منظور سنجش و پیش‌بینی غیرمخرب مقدار آب و شاخص TAN در نمونه‌های روغن هیدرولیک دروگر نیشکر استافت ۷۰۰۰ در ساعات‌های کارکرد متفاوت بررسی شد. برای این منظور، از نمونه‌ها در ناحیه طیفی ۷۸۰-۴۰۰ نانومتر طیف‌گیری شد. مدل‌های واسنجی چندمتغیره حداقل مربعات جزئی (PLS) بر پایه اندازه‌گیری‌های مرجع و اطلاعات طیف‌های پیش‌پردازش شده با ترکیب روش‌های مختلف پیش‌پردازش (میانگین‌گیری متحرک، هموارسازی ساویتزکی گولای، توزیع نرمال استاندارد و مشتق اول) برای سنجش و پیش‌بینی مقدار آب و شاخص TAN روغن هیدرولیک توسعه داده شدند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که از روش طیف‌سنجی مرئی می‌توان برای سنجش سریع و غیرمخرب مقدار آب و شاخص TAN در ساعات‌های مختلف کارکرد روغن هیدرولیک دروگر نیشکر استافت ۷۰۰۰ بهره برد. بهترین نتایج پیش‌بینی مقدار آب در روغن هیدرولیک با مدل PLS بر پایه روش پیش‌پردازش میانگین‌گیری متحرک (MA) به دست آمد ( $r_p=0.89$ ,  $RMSECV=1.86$ ,  $r_{cv}=0.96$ ) و  $RMSEP=3.18$  که دقت عالی ( $SDR=3.12$ ) داشت. از سوی دیگر، مدل PLS بر پایه ترکیب پیش‌پردازش‌های میانگین‌گیری متحرک و توزیع نرمال استاندارد ( $MA+SNV$ ) توانست شاخص TAN را با دقت عالی ( $SDR=3.1$ ) پیش‌بینی کند ( $r_p=0.89$ ,  $RMSECV=0.007$ ,  $r_{cv}=0.94$ ,  $RMSEP=0.010$ ). بنابراین، کاربرد فناوری طیف‌سنجی مرئی در کشت و صنعت‌ها به منظور پایش سریع کیفیت روغن هیدرولیک و با هدف کنترل آلودگی‌ها قابل توصیه است.

## واژه‌های کلیدی

آلودگی روغن هیدرولیک، رگرسیون حداقل مربعات جزئی، غیرمخرب

## مقدمه

شرکت استافت ماشینی است خودگردان با یک موتور احتراق داخلی به قدرت ۳۰۰ اسب بخار از نوع کامینز<sup>۱</sup> که توان تولیدی از آن تأمین می‌شود. انتقال قدرت از موتور به قسمت‌های مختلف حرکتی از

دروگرهای نیشکر یکی از مهم‌ترین دستگاه‌های فعال در بخش عظیمی از کشاورزی در خوزستان است. ماشین برداشت نیشکر مدل ۷۰۰۰ ساخت

<http://10.22092/AMSR.2023.362145.1450>

Email: [ah-banakar@modares.ac.ir](mailto:ah-banakar@modares.ac.ir)

\*نگارنده مسئول:

1- Cummins

اهمیت زیادی دارد. در برداشت مکانیزه نیشکر با افزایش ساعت کاری و عمر دروگر، میزان خرابی آن افزایش می‌یابد؛ بنابراین پرداختن به موقع تعمیرات اساسی سالانه در بالا بردن قابلیت اطمینان دروگر نیشکر نقش مهمی دارد. دروگر نیشکر یکی از انواع دروگری است که به تعداد فراوان در مزارع ایران یافت می‌شود و از جمله ماشین‌های صنعتی محسوب می‌شود که بخش عظیمی از عملکرد خود را مدیون وجود سامانه‌های هیدرولیکی است.

در صنعت معمولاً پارامترهای گرانیروی، TAN، مقدار آب، سطح اکسیداسیون و دما برای توصیف روغن به کار برده می‌شوند. (TAN) ۱، شاخصی از رشد تمایل اسیدی عمومی در نمونه روغن است و بیشتر در روغن‌های هیدرولیک، چرخ دنده و توربینی کاربرد دارد. این شاخص عمومی‌ترین حالت از شاخص عددی رفتار اسیدی روغن است و تصویر بسیار کلی از تمایل روغن به خوردگی اسیدی را نشان می‌دهد (Nematpour Malek Abad *et al.*, 2020). چندین وابستگی متقابل بین این پارامترها مانند سطح اکسیداسیون و اسیدیته و آلودگی آب در روغن وجود دارد و می‌توان گفت تشخیص اسیدیته و مقدار آب مهم‌ترین آنها هستند (Hamilton & Quail, 2011). آلودگی آب بیش از ۰/۲ درصد غیرمجاز تلقی می‌شود (Zhao, 2017). بسیاری از مشکلات سامانه‌های هیدرولیکی به سبب آلودگی روغن با آب بروز می‌کند. از اندازه‌گیری عدد اسیدی (TAN) در روغن به عنوان آزمایشی برای تعیین کمیت ترکیبات اسیدی استفاده می‌شود که شاخصی قابل اعتماد برای درجه خوردگی آنهاست (Rivera- Barrera *et al.*, 2019). TAN به طور مستقیم در کاربردهایی مانند چرخ‌دنده، سامانه‌های هیدرولیک و

طریق سیستم‌های هیدرولیکی صورت می‌گیرد (Behroozi-lar *et al.*, 2008). طی سالیان متمادی به موازات ساخت و تولید انواع ماشین‌ها و تجهیزات مکانیکی در کشاورزی و ارتقای فناوری، موضوع نگهداری و تعمیرات (نت) به عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل بهره‌برداری مورد توجه بوده است. با بهره‌گیری از روش‌های نوین نگهداری و تعمیرات، امکان بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌ها و کنترل پارامترهای مختلف، مانند روند استهلاک، کیفیت قطعات و مواد مصرفی و کیفیت تعمیرات، کاهش مصرف سوخت و انرژی، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، کاهش وقفه‌های زمانی در بهره‌برداری از ماشین‌ها و افزایش ایمنی همراه با صرفه‌جویی‌های مالی و افزایش بازده اقتصادی فراهم خواهد آمد (Masoudi, 2011). روغن هیدرولیک که یکی از ارکان حیاتی در ساختار ماشین‌های صنعتی از جمله دروگر نیشکر است، دارای تراکم‌پذیری و خواص سیالاتی مناسبی برای انتقال قدرت است و اصلی‌ترین کار کلیدی در سیستم هیدرولیک را بر عهده دارد (Shi *et al.*, 2019).

روغن می‌تواند پنج وظیفه روغن کاری، خنک‌کاری، حفاظت، آب‌بندی و فیلتراسیون را به خوبی انجام دهد. روغن هیدرولیک انرژی را منتقل می‌کند و اصطکاک بین قطعات را کاهش می‌دهد (Liu & Zhu, 2020). بررسی‌های مختلف نشان داده است که حدود ۷۵ درصد از عوامل خرابی سیستم‌های هیدرولیکی ماشین‌های برداشت ناشی از آلودگی روغن‌های مورد استفاده در آنهاست (Nematpour Malek Abad *et al.*, 2020). بدین علت و نیز به دلیل بالا بودن هزینه‌های نگهداری و تعمیر ماشین‌های برداشت نیشکر، مراقبت از روغن

1- Total Acid Number

ماشین‌های برداشت نیشکر صرفه‌جویی ایجاد می‌کند (Ahmed & Alam-Eldin, 2015). اخیراً پایش وضعیت کیفیت روغن در موتور بنزینی با استفاده از اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک روغن بررسی شده است. در این پژوهش، حسگر خازنی با ساختار شانه‌ای با امکان عبور روغن از وسط آن به گونه‌ای طراحی و ساخته شد که دارای قدرت تشخیص بالایی برای کاربرد موتوری بود. بر اساس نتایج اختلاط آب با روغن تا ۱/۵ درصد، باعث افزایش خطی ضریب دی‌الکتریک روغن و زاویه تناس شد. افزایش بیشتر درصد آب باعث افزایش غیرخطی ضریب دی‌الکتریک روغن شد (Ghasemi *et al.*, 2018). در پژوهشی دیگر، روش‌های مختلفی برای تجزیه و تحلیل آلودگی روغن گیربکس توربین‌های بادی به ذرات فلزی به کار گرفته و مشخص شد که روش‌های طیف‌سنجی فلورسانس و طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه، ویسکومترهای حالت جامد و طیف‌سنجی فتوآکوستیک با داده‌های چندمتغیره به ترتیب بهترین نتایج را به دست می‌آورند (Hamilton & Quail, 2011).

هدف از این پژوهش، کیفیت‌سنجی روغن هیدرولیک دروگر نیشکر بدون دخالت‌های آزمایشگاهی است. بر اساس مرور منابع، در هیچ پژوهشی برای کیفیت‌سنجی روغن هیدرولیک دروگر نیشکر استافت ۷۰۰۰ از طیف‌سنجی مرئی به واسطه اندازه‌گیری دو شاخص مهم و اساسی آب و عدد اسیدی (که مجموعاً ۷۰ درصد آلودگی‌ها را نشان می‌دهند) استفاده نشده است. بنابراین با توجه به مزایای فیلتراسیون روغن هیدرولیک، ارزیابی روغن هیدرولیک و بالا بودن هزینه‌های تعمیر و نگهداری ماشین‌های برداشت نیشکر، نظارت بر روغن

توربین‌ها استفاده و بر اساس مقدار پتاسیم هیدروکسید برای خنثی کردن اسید یک گرم از نمونه اندازه‌گیری می‌شود (Zhao, 2017). از این اطلاعات می‌توان برای پیش‌بینی عمر مفید قطعات استفاده کرد که در نتیجه زیان اقتصادی ناشی از خاموشی دستگاه را کاهش می‌دهد (Raposo *et al.*, 2019). پیشرفت علم و تکنولوژی، به ویژه تکنولوژی اطلاعات، روش‌های غیرمخرب<sup>۱</sup> را برای آنالیز مواد به وجود آورده است.

طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک<sup>۲</sup> (NIR)، یکی از روش‌های غیرمخرب پرکاربرد و سریع بر پایه اصول اپتیک است. این روش، برای کاربردهایی مانند اندازه‌گیری‌های عبور یا بازتاب نور بسیار مناسب است که به خوبی برای بسیاری از ترکیبات، بدون نیاز به آماده‌سازی نمونه، قابل استفاده خواهد بود. هم‌اکنون در صنعت، پایش روغن‌های هیدرولیک نسبت به آلودگی‌های آب و عدد اسیدی کل در دستگاه‌های دروگر نیشکر با آزمایش‌های کارل فیشر<sup>۳</sup> و دستگاه‌های تیتراسیون پتانسیومتری اجرا می‌شود که روش‌هایی گران‌قیمت و زمان‌بر هستند و به آزمایشگاه‌های تخصصی کنترل کیفیت و نیروی انسانی متخصص نیاز دارند. با توجه به آنچه گفته شد، نظارت بر کیفیت روغن هیدرولیک دروگر نیشکر استافت ۷۰۰۰ با استفاده از روش سریع‌تر و برخط طیف‌سنجی نوری برای تعیین آلودگی آب و همچنین شاخص TAN ضرورت دارد.

با بررسی فنی و اقتصادی نگهداری و تعمیرات ماشین‌های برداشت نیشکر استافت ۷۰۰۰ با استفاده از روش پایش خازنی وضعیت روغن مشخص شد که پایش و پالایش مجدد روغن موتور در دروگر نیشکر تا ۴۲ درصد در هزینه‌های تعمیر و نگهداری

1- Non-Destructive Methods

2- Near-infrared Spectroscopy

3- Karl Fischer

درجه سلسیوس ۱۱ سانتی استوک)، نقطه اشتعال ۲۱۸ درجه سلسیوس، نقطه ریزش ۳۰- درجه سلسیوس و چگالی در ۱۵ درجه سلسیوس ۸۷۸ کیلوگرم بر مترمکعب است. بعد از نمونه‌گیری، نیمی از نمونه‌های گرفته شده کدگذاری و به آزمایشگاه البرز تدبیر کاران در تهران منتقل شدند تا مقدار آب با روش کارل فیشر و شاخص TAN به روش تیتراسیون پتانسیومتری اندازه‌گیری شود.

در این پژوهش از دستگاه طیف‌سنج usb 2000 ساخت شرکت Ocean Optic استفاده شد. این اسپکترومتر بسیار کوچک، سبک و قابل حمل است که محدوده طیفی ۸۷۰-۲۰۰ نانومتر را پوشش می‌دهد. مجموعه این دستگاه به وزن ۱۹۰ گرم شامل یک طیف‌سنج با ابعاد ۳/۶۳×۱/۸۹×۴/۳ میلی‌متر و آشکارساز Sony ILX51B CCD است. سرعت برداشت هر منحنی طیفی ۰/۰۰۱ میلی‌ثانیه است. از یک حسگر فیبر نوری به همراه یک کابل با طول ۱/۲ متر استفاده شد که قابلیت انتقال اطلاعات به کامپیوتر را به منظور نمایش و ذخیره‌سازی طیف‌های به دست آمده در نرم‌افزار ocean view، از طریق پورت USB دارد. از یک کامپیوتر رومیزی برای نمایش و ذخیره داده‌های طیفی به کمک نرم‌افزار مخصوص داده‌های طیف‌سنجی استفاده شد. به منظور تولید نور مناسب، از منبع نور هالوژن - تنگستن مدل High Intensity Contact Probe (ASD, Inc. USA) A122300 با قابلیت اتصال به فیبر نوری بهره‌گیری شد. این منبع نور دارای توان خروجی ۶/۵ وات و ولتاژ DC ۱۸-۱۲ ولت است. شکل ۱ نمایی از سامانه طیف‌گیری را نشان می‌دهد.

هیدرولیک دروگر نیشکر استافت ۷۰۰۰ با استفاده از روش سریع و غیرمخرب ضرورت دارد. در این پژوهش، توانایی روش طیف‌سنجی مرئی برای این منظور و تعیین آلودگی و همچنین شاخص TAN بررسی شده است.

## مواد و روش‌ها

مواد اولیه اصلی مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل نمونه‌های روغن هیدرولیک گرفته شده از ۳ دروگر نیشکر واقع در کشت و صنعت امام خمینی (ره) بودند. لازم است یادآوری شود عمر دروگرهای نیشکر مورد مطالعه در این تحقیق یکسان و ۱۲ سال است. در این پژوهش، مقدار نمونه روغن و فواصل نمونه‌گیری به ترتیب ۵۰۰ سی‌سی و ۲۵۰ ساعت بود. نمونه‌گیری بهتر است هر ۲۵۰ ساعت روی دهد (Breitkreitz et al., 2003). نمونه‌گیری تا ۱۲۰۰ ساعت تکرار شد. برای نمونه‌گیری از لوازمی مانند پمپ نمونه‌گیری (پمپ مکش دستی)، تیوب پلی‌اتیلن (شیلنگ‌های با قطر خارجی یک‌چهارم و یا پنج شانزدهم اینچ) و کیف حمل نمونه استفاده شد.

تمامی ۷۵ نمونه روغن تهیه شده (از ۳ ماشین برداشت در ۵ ساعت کاری مختلف: ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰)، پس از کدبندی و شماره‌گذاری به همراه یک نمونه روغن نو و کارنکرده از نمونه روغن‌های هیدرولیک مورد آزمایش، به دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت‌مدرس برای طیف‌گیری در تهران ارسال شد. مشخصات کامل روغن هیدرولیک H68 (شرکت ایرانول) مورد استفاده در دروگرهای نیشکر (گرانروی ۱۰۰



شکل ۱- نمایی از سامانه طیف‌گیری

Fig. 1- A view of the spectroscopy system

پیش‌پردازش داده‌های طیفی پیش از توسعه مدل‌های رگرسیونی است (Wang *et al.*, 2019). روش میانگین‌گیری متحرک<sup>۱</sup> (MA) یکی از معمول‌ترین روش‌های هموارسازی و حذف نویزهای تصادفی موجود در طیف است. به گونه‌ای که با استفاده از یک فیلتر میانگین‌گیری متحرک (MA)، هر نقطه از طیف با میانگین یک همسایگی (نقطه‌های مجاور شامل خود نقطه) از آن جایگزین می‌شود. در این تحقیق، پس از تبدیل طیف‌ها به جذب، هموارسازی آنها با فیلتر میانگین‌گیری متحرک و عرض پنجره ۷ اجرا شد. هموارسازی ساویتزکی گولای<sup>۲</sup> (SG) شیوه‌ای دیگر از هموارسازی است که می‌تواند به طور مؤثری نویزهای تیز را بدون از بین رفتن اطلاعات طیفی برطرف کند. روش SG در این پژوهش، با در نظر گرفتن تعداد نقطه‌های همسایگی و درجه چندجمله‌ای به ترتیب برابر ۵ و ۳، برای هموارسازی طیف‌ها همچنین مقایسه با روش هموارسازی MA به کار

بر این اساس، از ۵ نمونه روغن هیدرولیک کاملاً متفاوت در هر ساعت مختلف کاری (۵ ساعت با تولرانس زمانی خیلی کم) از ۳ ماشین برداشت طیف‌سنجی شد. در واقع ۷۵ نمونه روغن هیدرولیک کارکرده مستقل طیف‌سنجی شد. از سوی دیگر، ۵ نمونه روغن هیدرولیک کارنکرده نیز طیف‌سنجی شد. برای طیف‌سنجی از هر نمونه، با تنظیمات طیف‌سنج، میانگین ۳۰ طیف گرفته محاسبه و به عنوان طیف معرف آن شناخته شد (Chira *et al.*, 2011). طیف‌های عبوری به دست آمده پس از حذف طول‌موج‌های ۲۰۰-۴۰۰ نانومتر (به دلیل وجود نویز زیاد در این ناحیه) در محدوده طیفی ۸۷۰-۴۰۰ نانومتر به طیف‌های جذبی تبدیل شدند.

#### پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌های طیفی به دست آمده از دستگاه طیف‌سنج علاوه بر دارا بودن اطلاعات نمونه، شامل اطلاعات ناخواسته پس‌زمینه و نویز است؛ بنابراین، برای تدوین مدل‌های رگرسیونی قابل اعتماد نیاز به

1- Moving Average

2- Savitzky-Golay

اصلی<sup>۲</sup> (PCA) است. رگرسیون حداقل مربعات جزئی<sup>۳</sup> (PLS) در ساختن مدل‌هایی برای پیش‌بینی متغیر پاسخ بسیار مفید است. در این روش انتخاب تعداد مناسب PCs یا LVs برای تدوین مدل واسنجی، تجربی است و باید به گونه‌ای انتخاب شود که از کم برآزش (ناتوانایی مدل در پیش‌بینی ویژگی‌های موردنظر) و بیش برآزش مدل جلوگیری شود.

نمونه‌ها به دو دسته آموزش (۸۰ درصد) برای توسعه مدل‌های واسنجی، و دسته آزمون (۲۰ درصد) برای اعتبارسنجی بیرونی مدل‌های واسنجی توسعه یافته به منظور بررسی توانمندی و دقت مدل‌ها در پیش‌بینی مقدار آب و شاخص TAN نمونه‌های ناشناخته تقسیم شدند. مدل‌های رگرسیون PLS توسعه داده شده بر پایه ۸ ترکیب مختلف روش‌های پیش‌پردازش برای پیش‌بینی مقدار آب و شاخص TAN به روش اعتبارسنجی متقاطع<sup>۴</sup> انجام گرفت. در این راستا، خطای مدل‌ها به صورت ریشه میانگین مربعات خطای اعتبارسنجی متقاطع<sup>۵</sup> (RMSECV) و ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی<sup>۶</sup> (RMSEP) محاسبه شدند (Jamshidi, 2012). شاخص دیگری که برای ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی کننده در این پژوهش به کار گرفته شد، شاخص<sup>۷</sup> SDR است که به صورت نسبت انحراف استاندارد متغیر وابسته (ویژگی مورد نظر) به RMSEP تعریف می‌شود (Jamshidi, 2012). یک مقدار SDR بین ۱/۵ و ۲ به این معنی است که مدل می‌تواند مقدارهای پایین متغیر وابسته را از مقدارهای بالای آن متمایز کند. مقدار بین ۲ و ۲/۵

گرفته شد. روش توزیع نرمال استاندارد<sup>۱</sup> (SNV) برای حذف اثرهای جمعی و افزایش پخش نور، اندازه نمونه و تغییر فاصله نوری است. روش SNV در این پژوهش برای نرمال‌سازی طیف‌ها، پس از هموارسازی و حذف نویز طیف‌ها استفاده شد. در این پژوهش همچنین از روش مشتق اول (D1) بهره‌گیری شد که برای افزایش قدرت تفکیک طیفی، حذف پس‌زمینه و جابه‌جایی خط پایه به کار می‌رود، به گونه‌ای که در الگوریتم SG برای هموارسازی، تعداد نقطه‌های همسایگی و درجه چندجمله‌ای به ترتیب برابر با ۳ و ۲ در نظر گرفته شد.

#### ترکیب روش‌های پیش‌پردازش

در مرحله پیش‌پردازش طیف‌ها، از هشت ترکیب مختلف روش‌های ذکر شده در بالا بهره‌گیری و پس از اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیون توسعه یافته بر پایه این روش‌ها، بهترین شیوه ترکیبی برای پیش‌بینی مقدار آب و شاخص TAN تعیین شد که در بخش نتایج به آن پرداخته می‌شود. شیوه‌های ترکیبی استفاده شده در این پژوهش عبارت‌اند از: MA+SNV+D1, MA+D1, SG+D1, MA+SNV, MA, SG, SG+SNV, SG+SNV+D1.

#### مدل‌های رگرسیونی PLS

هدف از به کارگیری روش‌های مدل‌سازی رگرسیون چندمتغیره، ایجاد ارتباط بین ویژگی‌های کیفی اندازه‌گیری شده و داده‌های طیفی است. اولین مرحله از آنالیز داده‌های طیفی برای درک الگوهای احتمالی و داده‌های پرت، اغلب آنالیز مولفه‌های

1- Standard Normal Variate

3- Partial least Squares

5- Root Mean Square Error of Cross Validation

7- Standard Deviation Ratio

2- Principal Component Analysis

4- Full Cross Validation

6- Root Mean Square Error of Prediction

بین RMSECV و RMSEP نیز در مرحله بعد مدنظر قرار گرفت.

### نتایج و بحث

جدول ۱ داده‌های آماری (کمینه، بیشینه و انحراف معیار) پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه شامل مقدار آب و اسید در دسته‌های آموزش و آزمون را (پس از حذف داده‌های پرت) نشان می‌دهد.

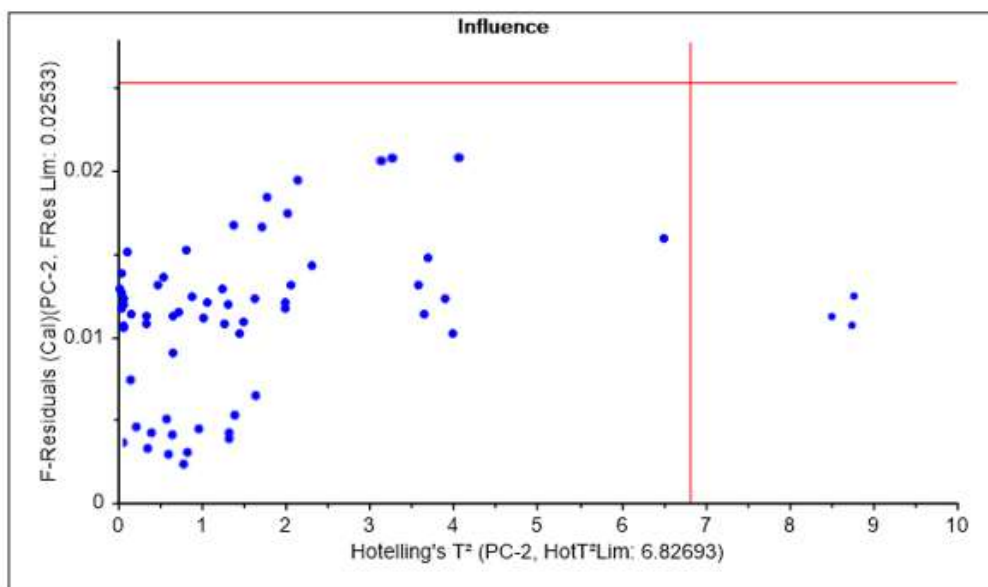
برای شاخص SDR نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های کمی با دقت کم امکان‌پذیر است. در حالی که مقدار SDR بین ۲/۵ و ۳ و بیش‌تر از ۳ به ترتیب بیانگر دقت‌های پیش‌بینی خوب و عالی مدل است (Jamshidi, 2012). در این پژوهش، مدل بهینه از بین مدل‌های تدوین شده برای پیش‌بینی مقدار آب و شاخص TAN بر پایه‌ی داشتن RMSEP و RMSECV کمتر،  $r_p$  و  $r_{cv}$  بیش‌تر انتخاب شد. کمتر بودن اختلاف

جدول ۱- داده‌های آماری نمونه‌های روغن هیدرولیک در طیف‌سنجی مرئی  
Table 1- Statistical data of hydraulic oil samples in Visible spectroscopy

دسته‌ی آزمون (۱۶ نمونه)			دسته‌ی آموزش (۶۱ نمونه)		
Test category (16 samples)			Train category (61 examples)		
انحراف استاندارد SD	بیشینه maximum	کمینه minimum	انحراف استاندارد SD	بیشینه maximum	کمینه minimum
9.95	74	38	9.95	74	38
0.031	0.52	0.40	0.031	0.52	0.40
					آب (ppm)
					اسید (mg KOH/g)

تعیین مقدار آب موجود در نمونه‌های روغن هیدرولیک نتایج اعتبارسنجی متقاطع و پیش‌بینی مدل PLS بر پایه‌ی ترکیب روش‌های مختلف پیش‌پردازش و طیف‌های ناحیه مرئی برای مقدار آب در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

شکل ۲ نمودار داده‌های پرت به روش PCA را نشان می‌دهد. طبق این نمودار ۳ داده پرت یافت شد (داده‌های خارج از محدوده) که برای بالا بردن دقت مدل‌های رگرسیونی این داده‌های پرت قبل از مدل‌سازی PLS حذف شدند.



شکل ۲- نمودار داده‌های پرت به دست آمده از مدل‌سازی PCA  
Fig. 2- Plot of outlier data obtained from PCA modeling

جدول ۲- نتایج اعتبارسنجی متقاطع و پیش‌بینی مدل PLS بر پایه ترکیب روش‌های مختلف پیش‌پردازش و طیف‌های مرئی برای مقدار آب

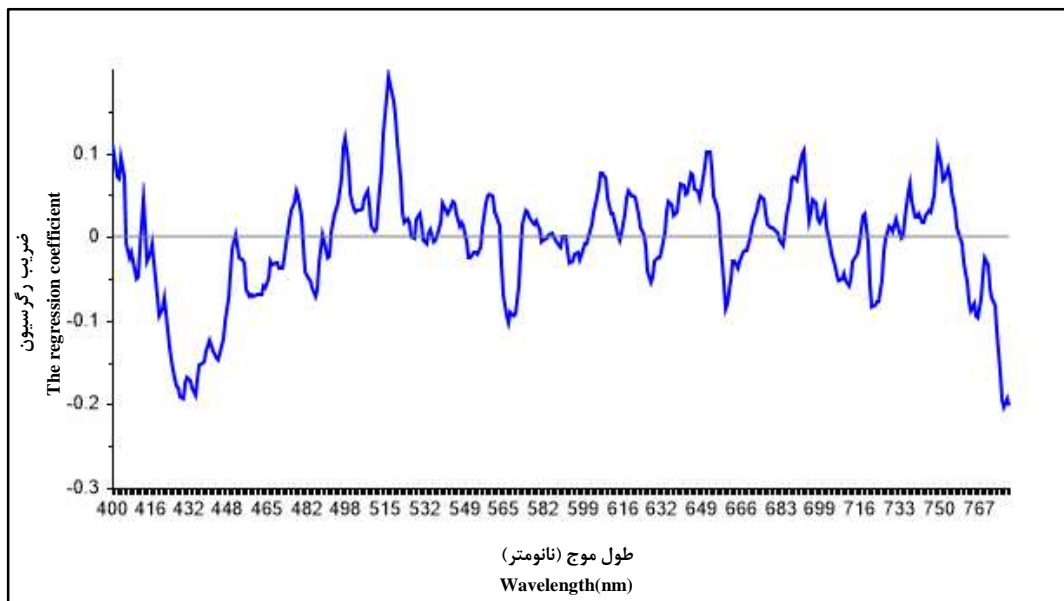
Table 2- Cross validation and prediction results of PLS model based on the combination of different pre-processing methods and visible spectra for water content

نسبت انحراف استاندارد SDR	ضریب همبستگی پیشگویی $r_p$	ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی RMSEP	ضریب همبستگی اعتبارسنجی متقاطع $r_{cv}$	ریشه میانگین مربعات خطای اعتبارسنجی متقاطع RMSECV	متغیرهای نهان LVs	پیش‌پردازش Preprocessing
2.82	0.87	3.52	0.88	3.26	13	MA+SNV
2.63	0.85	3.78	0.87	3.35	13	SG+SNV
3.12	0.89	3.18	0.96	1.86	14	MA
3.08	0.89	3.23	0.98	1.32	11	SG
2.10	0.76	4.73	0.99	0.72	6	MA+SNV+D <sub>1</sub>
1.37	0.45	7.22	0.99	0.72	13	SG+SNV+D <sub>1</sub>
1.89	0.71	5.25	0.98	1.32	13	MA+D <sub>1</sub>
1.26	0.35	7.86	0.98	1.19	6	SG+D <sub>1</sub>

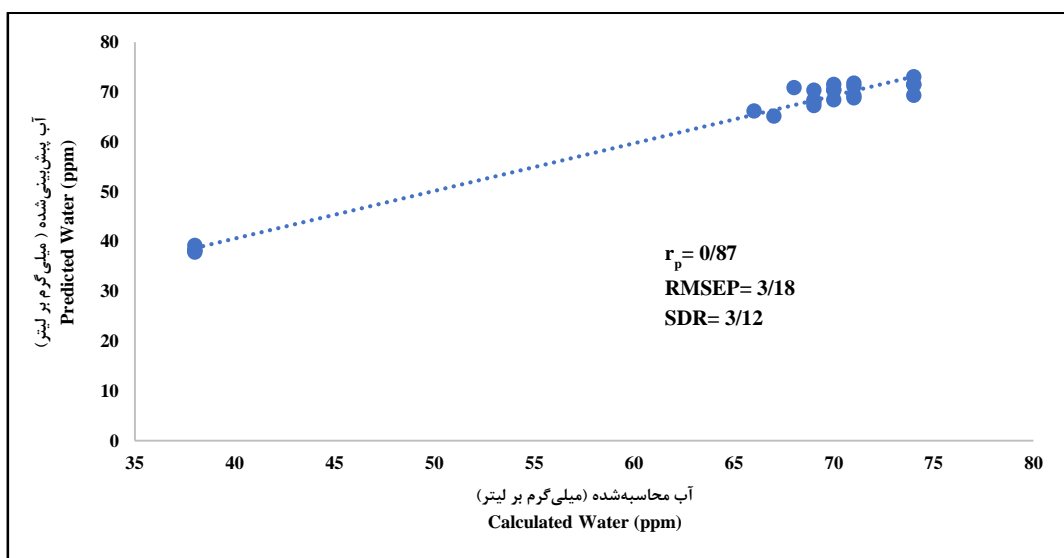
با توجه به جدول ۲ و مقدار شاخص SDR،  $r_{cv}$ ،  $r_p$  RMSECV و RMSEP مدل‌های توسعه‌یافته، نتایج پیش‌بینی مقدار آب با مدل PLS با روش پیش‌پردازش MA بهترین تشخیص را دارا بود به گونه‌ای که پیش‌پردازش MA، (RMSEP= 3.18،  $r_p$ = 0.89، RMSECV= 1.86،  $r_{cv}$ =0.96) با دقت



عالی (SDR=3.12) توانست مقدار آب را شناسایی و پیش‌بینی کند. این در حالی است که مقدار تشخیص و پیش‌بینی مقدار آب با مدل PLS و سایر روش‌های پیش‌پردازش نیز امکان‌پذیر بود. نتایج پیش‌بینی مقدار آب نمونه‌های روغن هیدرولیک (شامل منحنی ضریب‌های رگرسیون و نمودار مقادیرهای پیش‌بینی شده آب در مقابل مقادیرهای محاسبه شده آن) با بهترین مدل رگرسیون توسعه‌یافته (مدل PLS بر پایه پیش‌پردازش MA) به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳- منحنی ضریب‌های رگرسیون بهترین مدل توسعه‌یافته برای پیش‌بینی مقدار آب در نمونه‌های روغن هیدرولیک  
Fig. 3- Curve of regression coefficients of the best developed model for predicting the amount of water in hydraulic oil samples



شکل ۴- منحنی مقادیرهای پیش‌بینی شده آب در مقابل مقادیرهای تعیین شده آب نمونه‌های روغن هیدرولیک  
Fig. 4- The curve of the predicted values of water versus the determined values of hydraulic oil samples

داده‌هایی که کمترین مقادیر در نمودار هستند مربوط به نمونه‌های استفاده نشده هستند. که این نمودار اختلاف بارز مقادیر آب را در نمونه‌های استفاده نشده و نمونه‌های با ساعت کارکرد بالا نشان می‌دهد بدین مفهوم که حتی در ساعت‌های کاری ۲۵۰ ساعت مقدار آب به طرز چشمگیری افزایش داشته است.

### تعیین مقدار اسید موجود در نمونه‌های روغن هیدرولیک

نتایج اعتبارسنجی متقاطع و پیش‌بینی مدل PLS بر پایه ترکیب روش‌های مختلف پیش‌پردازش و طیف‌های مرئی برای مقدار اسید در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

بر اساس منحنی ضریب‌های رگرسیون مدل‌سازی، تقریباً همه طول موج‌های محدوده طیفی در پیش‌بینی مقدار آب دخالت دارند. به گونه‌ای که طول موج‌های ۵۱۰-۴۳۰ نانومتر و ۵۶۰ نانومتر (در محدوده جذب رنگ‌دانه‌ها)، طول موج‌های ۶۱۰-۷۵۰ نانومتر (در محدوده اورتون پنجم CH<sub>3</sub>، اورتون چهارم ROH و اورتون پنجم ARCH) (Cen *et al.*, 2007) سهم بیشتری در مدل‌سازی برای پیش‌بینی آب داشته‌اند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی از الگوریتم ژنتیک برای استخراج تأثیرگذارترین طول موج‌ها استفاده شود. شکل ۴، معادله خط رگرسیونی را نشان می‌دهد که مدل قادر است با دقت ۹۶ درصد مقادیر آب را پیش‌بینی کند.

جدول ۳- نتایج اعتبارسنجی متقاطع و پیش‌بینی مدل PLS بر پایه ترکیب روش‌های مختلف پیش‌پردازش و طیف‌های مرئی برای مقدار اسید

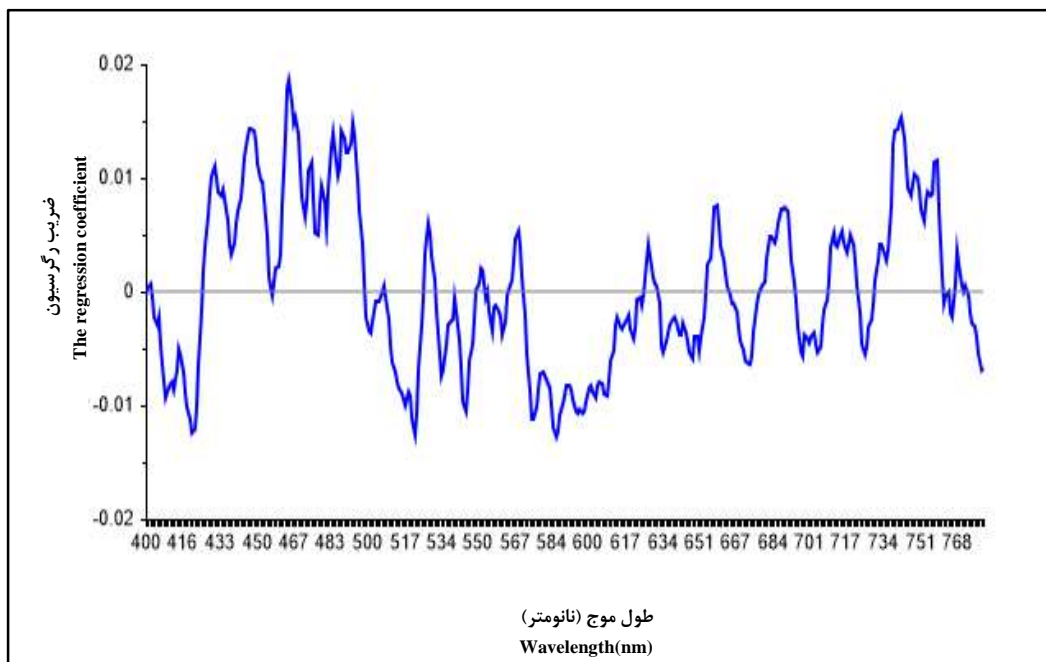
Table 3- Cross validation and prediction results of PLS model based on the combination of different pre-processing methods and visible spectra for the acid content

نسبت انحراف استاندارد SDR	ضریب همبستگی پیشگویی $r_p$	ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی RMSEP	ضریب همبستگی اعتبارسنجی متقاطع $r_{cv}$	ریشه میانگین مربعات خطای اعتبارسنجی متقاطع RMSECV	متغیرهای نهان LVs	پیش‌پردازش Preprocessing
3.10	0.89	0.010	0.94	0.007	13	MA+SNV
3.10	0.89	0.010	0.93	0.007	13	SG+SNV
3.10	0.89	0.010	0.90	0.009	14	MA
3.10	0.88	0.010	0.90	0.009	11	SG
1.63	0.62	0.019	0.98	0.004	6	MA+SNV+D <sub>1</sub>
1.34	0.44	0.023	0.86	0.011	13	SG+SNV+D <sub>1</sub>
1.55	0.60	0.020	0.99	0.002	13	MA+D <sub>1</sub>
1.29	0.40	0.024	0.89	0.010	6	SG+D <sub>1</sub>

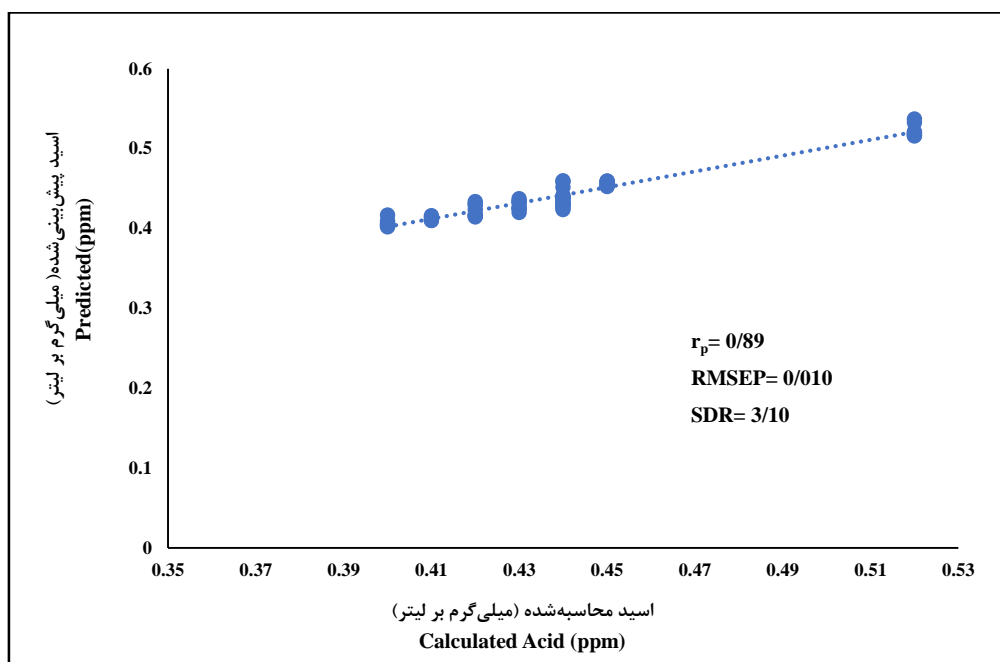
با توجه به جدول ۳ و مقدار شاخص SDR،  $r_{cv}$  و نتایج پیش‌بینی مقدار اسید با مدل PLS با روش پیش‌پردازش MA+SNV بهترین تشخیص را دارا  $r_p$  و RMSECV و RMSEP مدل‌های تدوین شده،

نتایج پیش‌بینی مقدار اسید نمونه‌های روغن هیدرولیک (شامل منحنی ضریب‌های رگرسیون و نمودار مقدارهای پیش‌بینی شده اسید در مقابل مقدارهای محاسبه شده آن) با بهترین مدل رگرسیون تدوین شده به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

بود به گونه‌ای که (RMSEP= 0.010,  $r_p= 0.89$ , RMSECV= 0.007,  $rcv=0.94$ ) توانست مقدار اسید را شناسایی و پیش‌بینی کند. این در حالی است که مقدار تشخیص و پیش‌بینی مقدار اسید با مدل PLS و سایر روش‌های پیش‌پردازش نیز امکان‌پذیر بود.



شکل ۵- منحنی ضریب‌های رگرسیون بهترین مدل تدوین شده برای پیش‌بینی مقدار اسید در نمونه‌های روغن هیدرولیک  
Fig. 5- Curve of regression coefficients of the best developed model for predicting the amount of acid in hydraulic oil samples



شکل ۶- منحنی مقادارهای پیش‌بینی شده اسید در مقابل مقادارهای تعیین شده نمونه‌های روغن هیدرولیک

Fig. 6- The curve of the predicted values of acid versus the determined values of hydraulic oil samples

تعیین مقدار اسید در روغن‌های صنعتی پیش از این در دو پژوهش طیف‌سنجی ارزیابی شده است: ۱- تعیین TAN در روغن موتور هواپیماهایی که موتورهای پیستونی ثابت دارند و ۲- پیش‌بینی TAN در نفت خام.

در هر دو روش، از طیف‌سنجی FT-IR بهره گرفته شده است و هر دو در بازه طیف‌سنجی  $4000-400 \text{ cm}^{-1}$  بوده‌اند. هرچند در هر دو روش پیش‌بینی شاخص TAN با دقت زیاد و قابل قبولی ارائه شد، اما مزیت پژوهش پیش‌رو نسبت به دو پژوهش دیگر را می‌توان بهره‌گیری از بازه طیفی مرئی و دستیابی به دقت بالا عنوان کرد که در پژوهش‌های پیشین بدان دست پیدا کرده بودند (De Rivas *et al.*, 2017; Rivera-barrera *et al.*, 2019).

تشخیص آب در روغن‌های صنعتی و بازه مرئی تا کنون صورت نگرفته است. در پژوهش‌های پیشین برای تعیین مقدار دقیق آب موجود در روغن‌های

بر اساس منحنی ضریب‌های رگرسیون مدل‌سازی، تقریباً همه طول‌موج‌های محدوده طیفی در پیش‌گویی مقدار اسید دخالت داشتند. به گونه‌ای که طول موج‌های ۴۸۰-۴۲۰ نانومتر، ۵۲۰ نانومتر و ۵۶۰ نانومتر (در محدوده جذب رنگ‌دانه‌ها)، طول موج‌های ۶۵۵-۷۰۰ نانومتر (در محدوده اورتون سوم ARCH) (Mikheev *et al.*, 2017) و طول موج‌های ۷۶۰-۷۵۵ نانومتر (در محدوده اورتون دوم CH و CH<sub>2</sub>) (Heise *et al.*, 2021) سهم بیشتری در مدل‌سازی برای پیش‌بینی اسید داشته‌اند.

اندازه‌گیری‌های مرجع نشان می‌دهد که اختلاف مقادیر اسید کارکرد کمتر از ۱۰۰۰ ساعت ناچیز است، ولی بلافاصله بعد از ۱۰۰۰ ساعت یعنی نمونه‌هایی که در ۱۲۰۰ ساعت گرفته شده‌اند، اختلاف چشمگیری از لحاظ مقدار اسید با دیگر نمونه‌ها دارند. می‌توان نتیجه گرفت که بعد از ۱۰۰۰ ساعت مقدار اسید روند افزایشی بیشتری نسبت به ساعت کارکردهای قبلی دارد.

دهد و پیش‌بینی کند و برای اسید پیش‌پردازش (RMSEP= 0.010,  $rp= 0.89$ , MA+SNV, RMSECV= 0.007,  $rcv=0.94$ ) عالی (SDR=3.1) توانست مقدار اسید را تشخیص دهد و پیش‌بینی کند. بنابراین، به منظور جلوگیری از عیوب احتمالی نظارت بر روغن هیدرولیک دروگر نیشکر استافت ۷۰۰۰، استفاده از روش سریع و برخط طیف‌سنجی مرئی برای تعیین آلودگی آب و شاخص TAN قابل توصیه است. پیشنهاد می‌شود توانایی طیف‌سنجی مرئی برای شناسایی سایر آلودگی‌ها از جمله تعیین عدد بازی، شناسایی عناصر فلزی، ذرات درشت آهنی، دوده و اکسیداسیون در روغن هیدرولیک دروگر نیشکر استافت ۷۰۰۰ و سایر روغن‌های صنعتی سنجیده شود.

صنعتی از روش حسگر خازنی استفاده شده است که در این روش هم مقدار دقیق آب قابل اندازه‌گیری نیست و تنها احتمال بود یا نبود آب در روغن وجود دارد (Ghasemi *et al.*, 2018).

### نتیجه‌گیری

تفسیر و بررسی طیف‌های مرئی نمونه‌های روغن هیدرولیک نشان داد که از روش طیف‌سنجی مرئی می‌توان برای تشخیص و پیش‌بینی مقدار آب و اسید بهره برد. نتایج آنالیزهای کمی حاکی از آن است که ترکیب روش‌های پیش‌پردازش مختلف با مدل‌سازی PLS می‌تواند مقدار آب را تشخیص دهد، به گونه‌ای که پیش‌پردازش MA (RMSEP= 3.18,  $rp= 0.89$ , RMSECV= 1.86,  $rcv=0.96$ ) عالی (SDR=3.12) توانست مقدار آب را تشخیص

### مراجع

- Ahmed, A. E., & Alam-Eldin, A. O. M. (2015). An assessment of mechanical vs manual harvesting of the sugarcane in Sudan – The case of Sennar Sugar Factory. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 14(2), 160–166. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.10.005>.
- Behroozi-Lar, M. Mobli, h& Jafari, A. (2008). *Machines for harvesting agricultural products*. Payam Noor University Pub. (in Persian)
- Breitkreitz, M. C., Raimundo, I. M., Rohwedder, J. J. R., Pasquini, C., Dantas Filho, H. A., José, G. E., & Araújo, M. C. U. (2003). Determination of total sulfur in diesel fuel employing NIR spectroscopy and multivariate calibration. *Analyst*, 128(9), 1204–1207. <https://doi.org/10.1039/b305265f>.
- Cen, H., He, Y., & Huang, M. (2007). Combination and comparison of multivariate analysis for the identification of orange varieties using visible and near infrared reflectance spectroscopy. *European Food Research and Technology*, 225(5–6), 699–705. <https://doi.org/10.1007/s00217-006-0470-2>.
- Chira, N. A., Todasca, M. C., Nicolescu, A., Rosu, A., Nicolae, M., & Rosca, S. I. (2011). Evaluation of the computational methods for determining vegetable oils composition using <sup>1</sup>H-NMR spectroscopy. *Revista de Chimie*, 62(1), 42–46.

- De Rivas, B. L., Vivancos, J. L., Ordieres-Meré, J., & Capuz-Rizo, S. F. (2017). Determination of the total acid number (TAN) of used mineral oils in aviation engines by FTIR using regression models. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 160, 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2016.10.015>.
- Ghasemi, E., Hosseini, V., & Yazdanparast K. (2018). Oil quality monitoring in gasoline spark ignition engine using oil dielectric coefficient measurement. *Engine Research Quarterly*, 53, 54-45. (in Persian)
- Hamilton, A., & Quail, F. (2011). Detailed state of the art review for the different online/inline oil analysis techniques in context of wind turbine gearboxes. *Journal of Tribology*, 133(4), 1–18. <https://doi.org/10.1115/1.4004903>.
- Heise, H. M., Delbeck, S., & Marbach, R. (2021). Noninvasive monitoring of glucose using near-infrared reflection spectroscopy of skin-constraints and effective novel strategy in multivariate calibration. *Biosensors*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/bios11030064>.
- Jamshidi, B. (2012). Non-destructive taste characterization and classification of oranges using Vis/NIR spectroscopy (*Ph. D. Thesis*), Mechanics of Agricultural Machines, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (in Persian)
- Liu, W. W., & Zhu, Y. (2020). Development and application of analytical detection techniques for droplet-based microfluidics -A review. *Analytica Chimica Acta*, 1113, 66–84. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2020.03.011>.
- Masoudi, A. (2011). *An introduction to oil analysis*. Alborz Tadbir Karan Technical and Engineering Company, Tehran, Iran. (in Persian)
- Mikheev, Y. A., Guseva, L. N., & Ershov, Y. A. (2017). Structure of matter and quantum chemistry UV–Vis spectra and structure of acid-base forms of dimethylamino - and aminoazobenzene. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 91(4), 715–726. <https://doi.org/10.1134/S0036024417040161>.
- Nematpour Malek Abad, H., Sheikhdavoodi, M. J., Hazbavi, I., & Marzban, A. (2020). Optimization of refinement operations of sugarcane harvester hydraulic oil. *Journal of Agricultural Machinery*, 10(1), 59–72. <https://doi.org/10.22067/jam.v10i1.75912>.
- Raposo, H., Farinha, J. T., Fonseca, I., & Galar, D. (2019). Predicting condition based on oil analysis – A case study. *Tribology International*, 135(January), 65–74. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.041>.
- Rivera-barrera, D., Rueda-chacón, H., & Molina V, D. (2019). Talanta Prediction of the total acid number (TAN) of colombian crude oils via ATR - FTIR spectroscopy and chemometric methods. *Talanta*, 206(July), 120186. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120186>.
- Shi, H., Zhang, H., Ma, L., & Zeng, L. (2019). A multi-function sensor for online detection of contaminants in hydraulic oil. *Tribology International*, 138(April), 196–203.

<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.05.025>.

Wang, K., Huggins, D. R., & Tao, H. (2019). Rapid mapping of winter wheat yield, protein, and nitrogen uptake using remote and proximal sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 82, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101921>.

Zhao, Y. (2017). *Predictive equipment maintenance oil analysis (Handbook)*. Third Ed. Spectro Scientific Pub. Available at: <https://www.spartancontrols.com>.



## Research Paper

# Determining the Amount of Water and the TAN Index of Hydraulic oil by Visible Sproscopy in a Austoft 7000 Sugarcane Harvester

Sh. Asadian, A. Banakar\* and B. Jamshidi

\*Corresponding Author: Associate Professor, Department of Biosystem Engineering School of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: [ah-banakar@modares.ac.ir](mailto:ah-banakar@modares.ac.ir)

Received: 29 April 2023, Accepted: 4 July 2023

[http://doi: 10.22092/AMSR.2023.362145.1450](http://doi:10.22092/AMSR.2023.362145.1450)

### Abstract

Nowadays, due to the evaluation and high costs of maintenance and repair of sugarcane harvesting machines, it is necessary to monitor sugarcane harvester hydraulic oil using a faster and non-destructive method to determine contamination and TAN index. In this research, the ability of the visible spectroscopy method to non-destructively measure and predict the water content and TAN index in harvester Austoft 7000 hydraulic oil samples at different operating hours was investigated. For this purpose, spectra were taken from the samples in the spectral region of 400-780 nm. Multivariate Partial Least Squares (PLS) regression models were developed based on reference measurements and pre-processed spectra information by combining different pre-processing (Moving Average, Savitzky-Golay, Standard normal variate and First Derivative) methods to measure and to predict the water content and TAN index of hydraulic oil. The results showed that the visible spectroscopy method could be used for quick and non-destructive measurement of water content and TAN index at different operating hours of harvester Austoft 7000 hydraulic oil. The best prediction results of water content in hydraulic oil were obtained with PLS model based on moving average (MA) preprocessing method ( $r_{cv}=0.96$ ,  $RMSECV=1.86$ ,  $r_p=0.89$  and  $RMSEP=3.18$ ), which had excellent accuracy ( $SDR=3.12$ ). On the other hand, the PLS model based on the combination of moving average preprocessing and standard normal distribution (MA+SNV) was able to predict the TAN index with excellent accuracy ( $SDR=3.1$ ) ( $r_{cv}=0.94$ ,  $RMSECV=0.007$ ,  $r_p=0.89$  and  $RMSEP=0.010$ ). Therefore, the application of visible spectroscopy technology in agriculture and industries can be recommended for rapid monitoring of hydraulic oil quality and with the aim of controlling pollution.

**Keywords:** Contamination of Hydraulic Oil, Non-Destructive, Partial Least Squares Regression



© 2022 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)