



## ارزیابی عیوب پمپ هیدرولیک فرمان تراکتور MF399 با استفاده از تحلیل بسامدی سیگنال‌های ارتعاشی

بهرروز احمدی<sup>۱</sup> و داود محمدزمانی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۲

## چکیده:

استفاده از طیف بسامدی مربوط به ارتعاشات اجزاء ماشین‌ها به منظور تعیین میزان و محل عیب اجزاء یکی از روش‌های نوین در فرآیند اندازه‌گیری الکترونیکی ارتعاشات محسوب می‌شود. هدف از این پژوهش تعیین عیوب مربوط به اجزاء اصلی پمپ هیدرولیک فرمان دو طبقه‌ای تراکتور MF399 توسط تحلیل طیف بسامدی ارتعاشات بدست آمده توسط سامانه اندازه‌گیری الکترونیکی ارتعاشات بود. به منظور اندازه‌گیری ارتعاشات، یک میز آزمایشگاهی طراحی شد و اجزاء سامانه اندازه‌گیری، پمپ هیدرولیک فرمان تراکتور MF399 و الکتروموتور بر روی آن نصب شد. آزمون‌ها در سه سطح سرعت دورانی ۳۵۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ دور در دقیقه برای محور ورودی پمپ هیدرولیک در پمپ سالم و پمپ معیوب انجام گرفت. عیوب ایجاد شده بر روی دنده شامل خوردگی ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد بر روی چرخ‌دنده هرزگرد مربوط به طبقه اول و خوردگی چرخ‌دنده هرزگرد مربوط به طبقه دوم پمپ بود. داده‌برداری توسط دستگاه Vibrotest مدل VT60 انجام گرفت. نتایج تحلیل داده‌ها در حوزه بسامد و زمان نشان داد که در همه حالت‌های آزمون با پمپ سالم، با افزایش سرعت دورانی یا به عبارتی افزایش بسامد، میرایی ارتعاش پوسته طبقه اول پمپ کاهش یافت به گونه‌ای که با افزایش سرعت دورانی به ۱۰۰۰ دور در دقیقه، دامنه ارتعاشی به کمتر از ۰/۰۱ متر بر مجذور ثانیه کاهش یافت. نتایج تحلیل‌ها روند مشابهی را برای پوسته طبقه دوم پمپ نشان داد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش خوردگی در چرخ‌دنده‌ها از میزان صفر تا خوردگی ۱۰۰ درصد، دامنه ارتعاشی طیف کاهش یافت. لذا این معیار را می‌توان به عنوان یک الگو در تشخیص عیب خوردگی دندان‌های چرخ‌دنده‌های پمپ هیدرولیک مورد استفاده قرار داد.

## واژگان کلیدی: تحلیل بسامدی، ارتعاشات، عیب، پمپ هیدرولیک دنده‌ای

## مقدمه:

در محیط کاری مانند اغتشاش<sup>۱</sup> و بسیاری از عوامل دیگر، شناسایی و تعیین زود هنگام عیوب در پمپ‌های هیدرولیک را به کاری مشکل تبدیل نموده است. در گذشته از روش‌های مختلفی برای کنترل عیوب چرخ‌دنده‌های موجود در پمپ‌ها استفاده می‌شد. گوش کردن به صدای تولید شده از سامانه چرخ‌دنده توسط فرد مجرب و بازرسی چشمی دنده‌ها از جمله این روش‌ها می‌باشد. نیاز به مجرب بودن نیروی انسانی، خطاهای انسانی و متوقف شدن دستگاه در

با توجه به نقش حساس پمپ هیدرولیک فرمان در عملکرد تراکتور و خساراتی نظیر قفل فرمان که ممکن است در اثر از کار افتادگی آن به وجود آید، تعیین و تشخیص به موقع عیوب اجزاء آن از اهمیت فراوانی برخوردار است. از طرفی گوناگونی عیوب و شرایط کاری اغلب چرخ‌دنده‌ها که معمولاً در کنار سایر اجزا متحرک بکار می‌روند و نیز سازوکار پیچیده درگیری چرخ‌دنده‌ها، وجود عوامل مزاحم

<sup>۱</sup> - گروه مکانیک بیو سیستم، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تاکستان، تاکستان، ایران

\* نویسنده مسئول: dr.dmzamani@gmail.com



سالم معمولاً از خطاهای انتقال در چرخ‌دنده‌ها و تغییر سفتی درگیری با زمان ناشی می‌شوند که آن‌ها نیز به نوبه خود از انحرافات شکل دندان از پروفیل ایده‌آل به وجود می‌آیند. انحراف شکل دندان به تغییر شکل دندان تحت بار و خطاهای هندسی ساخت دندان به می‌گردد. تعداد جفت دندان‌های درگیر با هم روی سفتی درگیری دندان‌ها موثرند و با زیاد شدن آن‌ها سفتی درگیری افزایش می‌یابد. در طول روند درگیری بین دو چرخ‌دنده تعداد زوج دندان‌های در حال تماس با یکدیگر تغییر پیدا می‌کند و باعث به وجود آمدن تناوب در سرعت چرخش چرخ‌دنده می‌شود. علاوه بر این تغییر شکل دندان در اثر بارهای وارد شده باعث تغییر شکل دندان و تماس زود هنگام آن با دندان بعدی می‌گردد. این فرایند باعث به وجود آمدن ضربه‌ای می‌شود که در بسامد درگیری تکرار می‌شود. وجود عیب بر روی یک دنده با تقویت ارتعاش و تغییر فاز آن همراه می‌گردد. این تغییرات با توابع مدولاسیون دامنه و فاز مدل می‌شوند. اگر تنها یکی از چرخ‌دنده‌های درگیر معیوب باشد تناوب توابع مدولاسیون با تناوب چرخش چرخ‌دنده معیوب تعیین می‌گردد. در نتیجه می‌توان آن‌ها را به شکل هارمونیک‌های بسامد چرخش چرخ‌دنده مدل کرد. چرخ‌دنده‌های شکسته، ترک‌خورده و خراشیده شده تولید پالس ارتعاشی می‌کنند و این ارتعاش آسان‌تر از ارتعاشات دیگر توسط سامانه میرا می‌شوند. هنگام درگیری دو چرخ‌دنده، یک دندان در آستانه ورود به منطقه درگیری، دندان بعدی با دندان چرخ‌دنده دیگر در حال تماس و در نهایت دندان بعدی در حال خارج شدن از منطقه درگیری می‌باشد. هنگامی که دندان شکسته درست در منطقه درگیری دو چرخ‌دنده قرار گیرد، پالس تولید می‌شود. هنگامی که دندان شکسته از منطقه درگیری دو چرخ‌دنده خارج می‌شود و دندان سالم در منطقه درگیری حضور می‌یابد، ارتعاشات حاصل از دندان شکسته متوقف خواهد شد. خوردگی و کچلی‌هایی که در زیر دایره گام چرخ‌دنده به وجود می‌آیند، تولید سیگنال و ارتعاش می‌کنند. سیگنال‌های تولید شده به سبب کچلی ممکن است منحصر به فرد نبوده و در گستره وسیع بسامدی تولید شود. بسامدهایی که در پالس وجود دارد، اغلب باعث تحریک بسامدی می‌شود. احتمال حضور بیش از یک بسامد هم در سیگنال محتمل است. این پالس -ها به صورت دامنه و بسامدهای مدوله شده می‌باشند. بسامد

هنگام کنترل آن، از جمله کاستی‌های مربوط به این روش -ها است. (Shakeri and Nawzad, 2004) پیشرفت-های اخیر در زمینه نرم‌افزارها و سخت‌افزارهای رایانه‌ای و اجزا جانبی آنها زمینه را برای انجام عملیات عیب‌یابی به کمک رایانه فراهم نموده است. بدین طریق امکان نظارت پیوسته بر عملکرد دستگاه مورد نظر وجود خواهد داشت و تشخیص و تعیین عیوب با دقت بالاتری انجام خواهد شد. مطالعات بسیاری در زمینه سامانه‌های پایش وضعیت به منظور کاهش زمان نگهداری و تعمیرات اجزا مکانیکی انجام شده است. پایش وضعیت در این زمینه به دو دسته تقسیم می‌شود: تشخیص عیب و تخمین عیب. در تشخیص عیب، آسیب وارد شده به طور دقیق مورد بررسی قرار گرفته و تعیین می‌گردد اما در تخمین عیب، معیوب بودن دستگاه و عمر باقیمانده آن تخمین زده می‌شود (Harry and Decker, 2003). در بین روش‌های مختلف شناسایی عیوب، شناسایی با استفاده از تحلیل بسامدی در مقایسه با تحلیل فراصوت، تحلیل روغن روانکاری، دمانگاری و پایش عملکرد از اهمیت خاصی برخوردار است. تحلیل بسامدی روشی تحلیلی است که غالباً برای شناسایی عیوب ماشین-های دوار در طول کارکرد عادی و راه‌اندازی آن‌ها در زمان توقف یا طی آزمون‌ها به کار می‌رود. در این روش ابتدا با استفاده از تجهیزات الکترونیکی، طیف بسامدی اندازه‌گیری و سپس پردازش می‌شود. دلیل این موضوع را می‌توان شناخت بهتر سازوکارهای ارتعاشی عملکرد چرخ‌دنده‌ها، امکان منسوب نمودن تغییرات در سیگنال‌های ارتعاشی به رفتار دینامیکی چرخ‌دنده‌ها و عیوب آن دانست. در این روش، ارتعاشات ناشی از درگیری چرخ‌دنده‌ها که به بدنه و سازه پوسته منتقل می‌شود، توسط یک حسگر ارتعاش سنج ثبت شده و توسط دستگاه‌های تحلیل‌ور و یا برنامه‌های رایانه‌ای مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. با توجه به این که حسگر به صورت مستقیم با سازه در تماس است؛ به جز لرزش‌های محیطی که از طریق شاسی به بدنه منتقل می‌شود و ارتعاشات سازه‌ای، عامل مزاحم دیگری (نویز) وجود نخواهد داشت. بنابراین با انتخاب محیط آزمون در محلی مناسب و طراحی مناسب شاسی می‌توان ارتعاشی با نسبت سیگنال به نویز مناسب از مجموعه‌های چرخ‌دنده‌ای برداشت نمود. (Shakeri and Nawzad, 2004) بسامدهای درگیری در یک چرخ‌دنده



ها و اثر منفی آن‌ها در شناسایی و تعیین عیوب در مراحل اولیه، حذف و جداسازی و یا کاهش اثر اغتشاش و ارتعاشات نامربوط به دستگاه امری مهم در تعیین و تشخیص به موقع عیب در حال رشد می‌باشد. علاوه بر تدابیری که بدین منظور در هنگام داده‌برداری اندیشیده می‌شود (مانند استفاده از فیلترهای پایین گذر، استفاده از لرزه‌گیر و ایجاد شاسی مناسب برای سازه)، با توجه به اینکه در هر حال مقداری اغتشاش و ارتعاش ناخواسته در سیگنال برداشته شده وجود خواهد داشت، با استفاده از روش‌های نرم‌افزاری و بکارگیری توابع خاص تا حد ممکن اثر اغتشاش کاسته می‌شود. یکی از این توابع، تابع تبدیل فوریه سریع (FFT) است. در تبدیل FFT، بخش کوچکی از موج زمانی که پنجره زمانی<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند؛ انتخاب شده، طیف بسامدی با استفاده از الگوریتم FFT محاسبه می‌گردد. در طول این فرآیند فرض می‌شود که سیگنال داخل این پنجره زمانی (مجموعه داده های زمانی)، سیگنال پیوسته متناوب است؛ یعنی در طول زمان مرتباً تکرار می‌گردد. با توجه به ساختار و وضعیت سیگنال پنجره زمانی، در لبه‌های پنجره زمانی اعوجاج مشاهده می‌شود که به صورت مولفه‌های ارتعاشی قابل رویت، نشان داده خواهند شد. این اعوجاج‌ها همواره زمانی که تعداد تناوب-های سیگنال در داخل پنجره زمانی عدد کاملی نباشند، روی می‌دهند. برای حذف این اعوجاج‌ها، پنجره زمانی در یک تابع پنجره‌ای ضرب می‌شود. اصولاً این عمل به خاطر تضعیف مقدار سیگنال در لبه‌های پنجره زمانی تا حد صفر انجام می‌گردد. بعد از بازسازی سیگنال توسط رایانه، همه این اعوجاج-ها حذف می‌شوند. روشن است که با این دستکاری، سیگنال اصلی ارتعاش ماشین مخدوش می‌گردد. برای اصلاح این نقیصه و حفظ مقادیر واقعی دامنه، بعد از تبدیل نتایج را در یک ضریب تصحیح ضرب می‌کنند. (Tamizi et.al, 2002)

مطالعات بسیاری در مورد تشخیص عیوب اجزاء ماشین با استفاده از تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی انجام شده است. در پژوهشی نشان دادند که تحلیل ارتعاشی مزایای زیادی در کارخانجات تولید ماشین‌ها به عنوان یک تکنیک تشخیص خواهد داشت. آنها نشان دادند که وقتی یک عیب در یاتاقان

موجود در پالس، غالباً یک یا چند بسامد تحریک شده است که سرچشمه تحریک، دندانه شکسته می‌باشد. این پالس‌ها به شکل مدوله شده (دامنه و بسامد) وجود دارند. دامنه پالس حاصل از دندانه شکسته در چرخ‌دنده به عواملی چون چگونگی و کیفیت انتقال ارتعاشات، میرایی سامانه، بارگذاری و شدت عیب بستگی دارد. در بعضی مواقع امکان عدم تولید پالس توسط دندانه شکسته در یک دور وجود دارد. این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که دندانه شکسته در منطقه درگیری حاضر شده ولی نیرو و گشتاور مناسب و کافی به آن اعمال نشود. در بعضی از تجهیزات دوار که سرعت دورانی پایینی دارند، عیب به وجود آمده بر روی چرخ‌دنده می‌تواند صدای برخورد سنگینی را به وجود آورد. این صدا ممکن است در هر دور از چرخش چرخ‌دنده معیوب تولید شود. (Tamizi et.al, 2002)

بسامد درگیری دندانه‌ها (GMF) از حاصل ضرب تعداد دندانه چرخ‌دنده (S) در بسامد دور آن (T) بر اساس رابطه ۱ محاسبه و تعیین می‌گردد. (Tamizi et.al, 2002)

$$(1) \text{GMF} = T \times S$$

که در آن حاصل ضرب تعداد دندانه‌های محرک در سرعت چرخشی آن با حاصل ضرب تعداد دندانه‌های متحرک در سرعت چرخشی آن با یکدیگر برابر می‌باشند. در چرخ‌دنده-های سائیده شده نیز بسامد GMF به همین روش محاسبه می‌گردد. البته در این چرخ‌دنده‌ها امکان حضور هارمونیک-های GMF نیز وجود دارد. هارمونیک‌های دوم و سوم بسیار مهم می‌باشند. به طور مثال اگر دومین هارمونیک GMF دارای دامنه بیشتری نسبت به خود GMF و هارمونیک سوم آن باشد؛ می‌تواند دلالت بر مشکلاتی از نوع موج‌دار بودن یکی از چرخ‌دنده‌ها باشد. در چنین مواردی چرخ‌دنده‌ها در هر دو طرف دندانه‌های خود با چرخ‌دنده دیگر در تماس هستند. این درگیری دوگانه دندانه‌ها، هارمونیک دوم را تولید می‌کند. اختلاف فاز هارمونیک دوم با GMF برابر با ۱۸۰ درجه بوده و در بسامدهای بالاتری نسبت به GMF ظاهر می‌شود.

معمولاً به علت وجود سطوح بالای اغتشاش و ارتعاشات ناخواسته در سیگنال ماشین‌های مختلف از جمله چرخ‌دنده

<sup>3</sup>-Time window- Gear Modulation Frequency

<sup>1</sup> Gear Modulation Frequency

<sup>2</sup>- Fast Fourier Transformation



طیف‌های بسامدی پرداختند. در این پژوهش برای دستیابی به نتایج از جمله شناسایی دقیق عیوب در یاتاقان‌های مورد مطالعه، طیف‌های بسامدی ارتعاش در دو حالت سالم و معیوب با هم مقایسه شد و بسامدهای منشا خرابی مشخص گردید. (Khadersa and Shivakumar, 2018) پژوهشی با عنوان تشخیص خرابی بر اساس کمی سازی میزان خطا برای الکترو پمپ انجام شد. در این پژوهش برای شناسایی دقیق عیوب با به کارگیری استانداردها در آنالیز ارتعاشات و بررسی شرایط کاری مختلف به تدوین جدول عیب‌یابی برای تجهیز مورد مطالعه پرداخته شد. (Lee, et.al, 2020) در برخی پژوهش‌ها از هوش مصنوعی نیز در تشخیص عیوب ماشین‌ها استفاده شده است. به عنوان نمونه در یک بررسی امکان بکارگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی در تشخیص خرابی پمپ‌های چرخ-دنده‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مطالعه شبکه عصبی PNN<sup>۱</sup> با استفاده از جعبه ابزار شبکه عصبی نرم‌افزار MATLAB شبیه سازی شد. نتایج این مطالعه نشان داد شبکه عصبی با اطمینان قابل قبولی مشکلات پمپ را تشخیص داده است. (Zuo et.al, 2014)

هدف این پژوهش، شناسایی عیوب پمپ هیدرولیک فرمان با استفاده از سیگنال‌های ارتعاشی بر اساس روش FFT بوده است.

### مواد و روش‌ها

به منظور انجام آزمون‌های عیب‌یابی و تهیه سیگنال‌های مورد نیاز به منظور مطالعه اثر عیوب بر سیگنال سامانه‌های چرخ‌دنده‌ای، یک میز کار آزمایشگاهی آماده شد. آن چه که در میز کار آزمایشگاهی مورد استفاده در عیب‌یابی دارای اهمیت است، طراحی مناسب سازه و اتصالات مجموعه است و این طراحی باید به گونه‌ای باشد که در حین کارکرد مجموعه، ارتعاشات اضافی و مزاحم در دستگاه مورد آزمون ایجاد نشود. بر این اساس یک مجموعه آزمایشی برای آزمون عیب‌یابی چرخ‌دنده‌ها در مجموعه آزمایشگاه‌های مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد واحد تاکستان، آماده و نصب گردید که در آن از یک موتور الکتریکی با توان سه اسب بخار به عنوان محرک، پمپ هیدرولیک فرمان تراکتور MF399، سازه‌های شاسی نگهدارنده و مجموعه کولپلینگ و میل به رابط به عنوان سامانه انتقال حرکت استفاده شد.

به حداکثر خود می‌رسد، سطوح دامنه با بسامد بالا اغلب کاهش می‌یابد و همچنین عمر یاتاقان‌ها را می‌توان توسط رفتار ارتعاش و زمان به کارگیری آن تخمین زد. (Orhan et.al, 2006) در پژوهشی پژوهشگران روش بسیار ساده‌ای برای بررسی شرایط کاری جعبه‌دنده‌های سیاره‌ای معرفی کردند. آنها مدعی شدند برای این کار کافی است سیگنال‌های ارتعاش ناشی از تحریکات خارجی (بارهای خارجی) اندازه‌گیری و طیف ساده متناسب با شرایط مختلف کاری در سرعت‌های دورانی مختلف محاسبه شوند.

(Bartelmus and Zimroz, 2009) در یک مطالعه دیگر داده‌های جریان استاتور به دست آمده از موتورهای القایی آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و علائم منحصر بفرد موتورهای سالم و ایمن را با هدف شناسایی خطا برای انجام شناسایی آنلاین مسائل خطای موتور مانند ایراد بلبرینگ مورد بررسی قرار داد. داده‌های جریان استاتور جمع‌آوری شده از موتورهای القایی با استفاده از تبدیل سریع فوریه (FFT) تحلیل شدند و نتایج FFT بوسیله روش تحلیل مولفه مستقل (ICA) برای به دست آوردن مولفه‌های مستقل و ویژگی‌های مربوط به علامت که ویژگی‌های FFT-ICA جریان‌های استاتور نامیده می‌شوند بیش‌تر مورد تحلیل قرار گرفتند. این بررسی دقت بالا، ساده بودن و قدرت طرح پیشنهادی شناسایی خطا را برای شناسایی خطای موتورهای القایی را نشان داد (Yang et.al, 2016). در پژوهشی با استفاده از جریان القایی استاتور در یک الکتروموتور محققین توانستند با به کارگیری تبدیل موج (meyer) به تشخیص عیب یاتاقان‌ها بپردازند. مزیت این روش تشخیص عیوب اولیه یاتاقان‌ها می‌باشد. (Zarei and Poshtan, 2007) تعدادی از پژوهشگران از توابع موج مبنا (مادر) برای تشخیص عیب خودکار چرخ‌دنده‌ها و یاتاقان‌ها بهره بردند. آنها از ۳۲۴ تابع موجود مبنا برای مقایسه آن با سیگنال‌های موج ناشی از نتایج آزمایشگاهی استفاده کردند و از میان تابع Daubechies44 (db44) بسیار شبیه به سیگنال‌های ارتعاش چرخ‌دنده و یاتاقان بود. آن‌ها همچنین نشان دادند که ممان مرکزی چهارم (CWC-SVS) منطبق با عیوب یاتاقان و چرخ‌دنده است. (Rafiee et.al, 2010) در پژوهشی دیگر به تحلیل ارتعاشی یاتاقان‌های غلتشی به کمک

<sup>۱</sup> - Probability Neural Network



شکل ۲- پمپ هیدرولیک فرمان تراکتور MF399

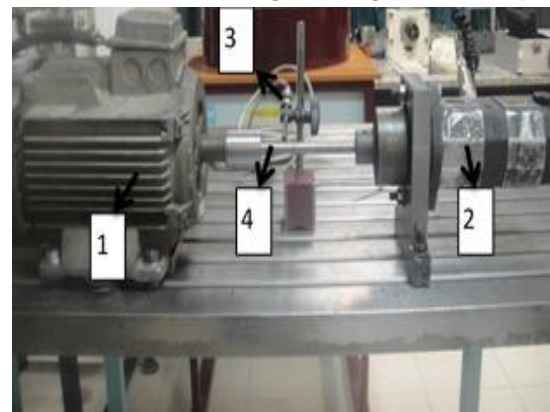


عملیات داده‌برداری در این پژوهش به وسیله یک حسگر شتاب-سنج پیزوالکترترونیکی و دستگاه ارتعاش‌سنج Vibrotest مدل VT60 انجام گرفت. (شکل ۳). مزیت عمده شتاب‌سنج‌های پیزوالکترترونیکی وسیع بودن محدوده بسامدی و دینامیکی آن‌ها در نصب و به کارگیری می‌باشند. این حسگر-ها ارتعاش وارد شده را به یک سیگنال الکتریکی پیوسته تبدیل می‌کنند. شتاب‌سنج به وسیله یک پایه مغناطیسی دائم به پوسته پمپ هیدرولیک متصل شد.

خروجی شتاب‌سنج به صورت سیگنال الکتریکی از طریق سیم و درگاه مربوطه به یکی از درگاه‌های دستگاه ارتعاش-سنج منتقل و پس از انجام عملیات گسسته‌سازی، از طریق PC CARD و Ram Reader وارد رایانه شد. سپس با استفاده از نرم افزار XMS<sup>۱</sup> داده‌ها به فرمت txt ذخیره می‌شود. عملیات پردازش و تحلیل سیگنال‌های ذخیره شده توسط نرم‌افزار MATLAB انجام شد. داده‌برداری در حالت بدون عیب و نیز در عیوب متفاوت در سه سطح سرعت دورانی و در سه تکرار انجام شد. به منظور اندازه-گیری سرعت دورانی محور پمپ، از یک دورسنج نوری استفاده شد (شکل ۱). انتخاب محل قرارگیری حسگر یکی از مهم‌ترین و موثرترین تصمیم‌ها بر روی کیفیت انجام تحقیقات عیب‌یابی می‌باشد. در صورتی که این انتخاب به درستی انجام شود؛ اثر بسیاری از قسمت‌های ناخواسته سیگنال کاهش یافته و قسمت‌های مربوط اجزاء تحت بررسی، برجسته‌تر می‌گردند. با استفاده از تجربه و آزمون و خطا می‌توان به مکان مناسبی برای حسگر دست یافت. (احمدی و همکاران، ۱۳۹۲) در این مطالعه پس از انجام تعدادی آزمون که با توجه به محل چرخ‌دنده معیوب انجام شد مکان مناسبی که در آن چرخ‌دنده معیوب نسبت به سایر اجزاء برجسته‌تر بود، تعیین گردید.

میز آزمایشگاهی ساخته شده در شکل ۱ نشان داده شده است. روش اندازه‌گیری داده‌ها به این صورت بود که پمپ هیدرولیک توسط الکتروموتور در سه سرعت دورانی ۳۵۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ دور در دقیقه به حرکت درآمده و در هر آزمون اطلاعاتی که به وسیله حسگر شتاب‌سنج به دستگاه ارتعاش‌سنج ارسال می‌شد جمع‌آوری و پس از انتقال داده‌ها از حوزه زمان به حوزه بسامد، تحلیل داده‌ها انجام شد. موتور الکتریکی به کاررفته یک موتور AC سه فاز با قدرت سه اسب بخار بود. سرعت دورانی موتور در شرایط بدون بار، برابر با ۱۴۸۰ دور در دقیقه بود. انتقال قدرت توسط سامانه کوپلینگ و میله رابط انجام گرفت. پمپ هیدرولیک فرمان مورد استفاده مربوط به تراکتور MF399 بود. این پمپ دارای دو چرخ دنده محرک مستقیم و دو چرخ دنده هرزگرد می‌باشد، در هر طبقه چرخ‌دنده هرزگرد با چرخ‌دنده محرک درگیر است و هر دو با هم می‌چرخند. در قسمت ورودی پمپ، دندانه‌های دو چرخ‌دنده از هم باز شده و یک مکش و انبساط حجمی به وجود می‌آورد که سبب می‌شود سیال در اثر فشار هوای مخزن سیال به درون پمپ رانده شود. این سیال سپس در فضای خالی بین دندانه‌های چرخ‌دنده‌ها و بدنه پمپ، به طرف دریچه خروجی هدایت می‌شود. برای انجام آزمون‌ها، دو چرخ‌دنده‌های هرزگرد مربوط به هر طبقه از پمپ مورد آزمایش قرار گرفت. شایان ذکر است تمام آزمون‌ها در حالت بدون بار بر روی پمپ انجام شد. شکل ۲ چرخ‌دنده‌ها و موقعیت آن‌ها در پمپ را نشان می‌دهد.

شکل ۱- میز کار آزمایشگاهی مورد استفاده (۱: الکتروموتور، ۲: پمپ هیدرولیک فرمان، ۳: دورسنج نوری ۴: میله رابطه و کوپلینگ)



<sup>1</sup>- Extended Monitoring Software



## مجله مهندسی زیست سامانه

بسامد شکل گرفته است. دامنه ارتعاش در این بسامد ۰/۰۱ متر بر مجذور ثانیه است. ولی در سایر بسامدها دامنه ارتعاش کمتر از ۰/۰۱ متر بر مجذور ثانیه است. همانگونه که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود طیف بسامدی حاصل از چرخش محور پمپ در سرعت دورانی ۳۵۰ دور در دقیقه در حالتی که شتاب سنج بر روی پوسته طبقه اول پمپ نصب شده باشد در پهنای بسامد ۲۰۰۰ هرتز اندازه‌گیری شده است. با توجه به تغییرات محدود شتاب ارتعاشی اجزا پوسته پمپ هیدرولیک، همانگونه ملاحظه می‌شود دامنه شتاب به بیشینه ۰/۰۱ متر بر مجذور ثانیه رسیده است. از آنجا که معیار تشخیص عیب در چرخ‌دنده‌ها نوعاً بر اساس تناوب و محل اوج بسامد-ها است لذا میزان دامنه (شتاب ارتعاشی) معیار قرار نگرفت. از طرفی یافتن هارمونیک‌های طیف بسامدی نیز در این مورد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

با افزایش سرعت دورانی به ۷۰۰ دور در دقیقه طیف بسامد ارتعاشات پوسته طبقه اول پمپ بر اساس نوسانات شکل ۶ اندازه‌گیری شد. بسامد درگیری (GMF) چرخ دنده‌ها (۱۴۰ هرتز)، در دومین هارمونیک طیف بسامد شکل گرفت که دامنه طیف در این بسامد کمتر از ۰/۰۱ متر بر مجذور ثانیه بود و این بدان معناست که با افزایش سرعت دورانی پمپ، دامنه ارتعاشات در بسامد درگیری چرخ دنده‌ها کاهش یافته است. اما همانگونه که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود در بسامدهایی با مضرب صحیح از بسامد درگیری چرخ دنده، هارمونیک‌ها از دامنه نوسانی بیشتری در مقایسه با شکل ۵ برخوردار هستند و این بدان معناست که با افزایش سرعت دورانی، میرایی در ارتعاشات چرخ-دنده‌ها کاهش یافته است. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌شود با افزایش بسامد میزان میرایی به مراتب کاهش بیشتری داشته است بدین مفهوم که با افزایش بسامد، میرایی ارتعاش پوسته پمپ کاهش داشته است.

شکل ۷ طیف بسامدی طبقه اول پمپ مورد بررسی در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه را نمایش می‌دهد. بسامد درگیری چرخ‌دنده در این حالت ۲۰۰ هرتز می‌باشد. در این بسامد دامنه ارتعاش طیف بسیار ناچیز بود. از طرفی همانگونه که در طیف ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت

شکل ۳- دستگاه ارتعاش سنج مورد استفاده به همراه

حسگر شتاب سنج پیزوالکترونیک



پس از داده‌برداری سیگنال‌های ارتعاشی پمپ هیدرولیک در حالت سالم، برای بررسی اثر عیوب بر سیگنال‌ها، عیوبی بر روی چرخ‌دنده‌های پمپ ایجاد شد و عملیات داده‌برداری انجام شد. در این مطالعه عیب کچلی (خوردگی) دندانه<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار گرفت. عیب مورد نظر روی چرخ‌دنده هرزگرد طبقه اول ایجاد گردید. این عیب توسط سنگ زنی دندانه ایجاد شد. شکل ۴ نمونه‌ای از عیب خوردگی ۲۵ درصد بر روی یک دندانه چرخ‌دنده را نشان می‌دهد.

شکل ۴- عیب خوردگی ایجاد شده بر روی یک دندانه از چرخ-

دنده پمپ



## نتایج و بحث

همانگونه که در بخش قبل اشاره شد در ابتدا پمپ هیدرولیک مورد نظر بدون هیچ‌گونه عیوب ساختاری و تعمدی مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت. آزمون‌ها با سه سرعت دورانی ۳۵۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ دور در دقیقه محور ورودی پمپ هیدرولیک انجام شد. بسامد درگیری GMF چرخ دنده‌ها در طبقه اول پمپ در سرعت دورانی ۳۵۰ دور در دقیقه با تعداد دندانه ۱۲ بدین صورت محاسبه شد:

$$GMF = T \times S = 12 \times 350 / 60 = 70 \text{ Hz}$$

همانگونه که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود در بسامد ۷۰ هرتز که معادل با بسامد درگیری چرخ‌دنده‌ها در سرعت دورانی ۳۵۰ دور در دقیقه است اولین هارمونیک طیف

<sup>2</sup>-Peak

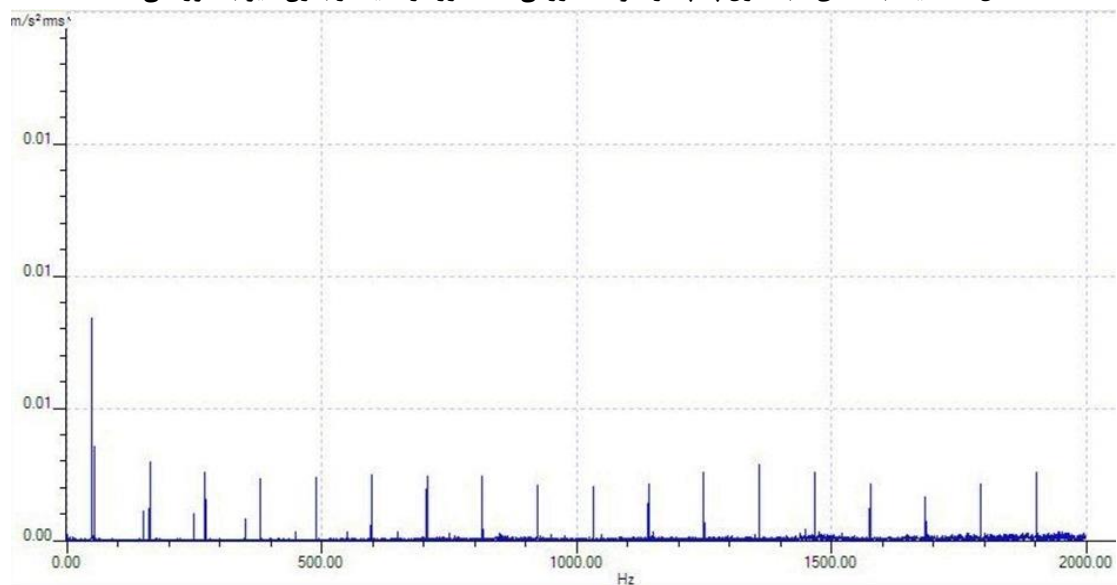
<sup>1</sup>-Pitting



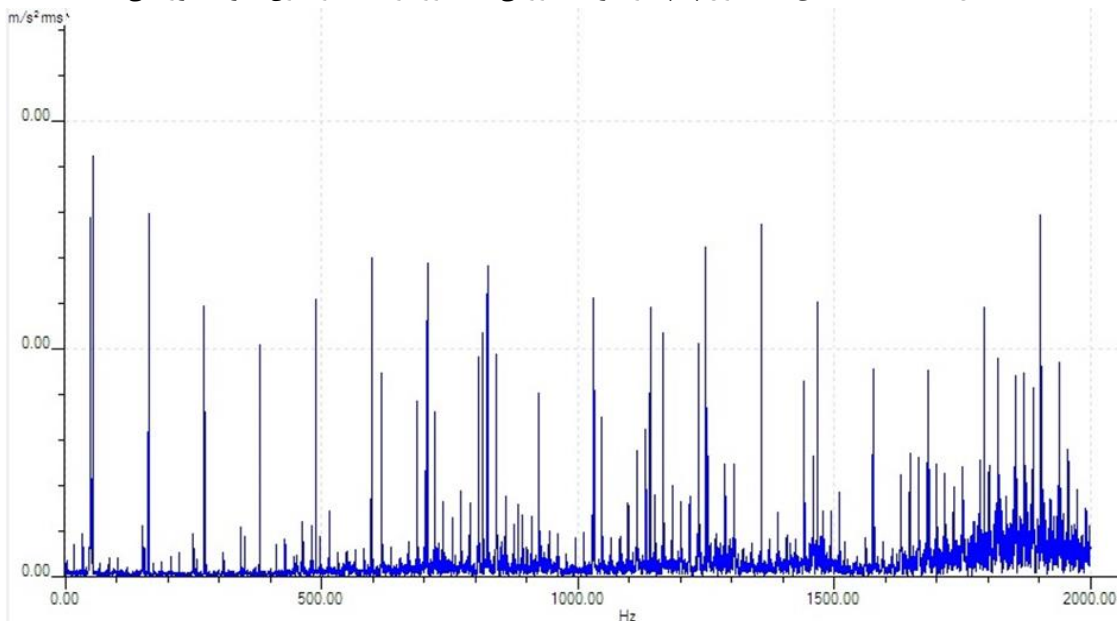
دور در دقیقه، باند سفید بالای محور بسامد افزایش یافت. این موضوع نشان می‌دهد که چرخ دنده طبقه اول پمپ دارای اندکی لقی و حتی سایش در دنده‌ها بود. گرچه میزان لقی و سایش اندک و قابل چشم‌پوشی است. نتایج تحلیل داده‌ها برای طبقه دوم پمپ، مشابه طبقه اول بود.

دورانی به ۱۰۰۰ دور در دقیقه، دامنه ارتعاشی به کمتر از ۰/۰۱ متر بر مجذور ثانیه کاهش یافته است. این بدان مفهوم است که با افزایش سرعت دورانی پمپ، دامنه ارتعاشی پوسته کاهش یافته است. گرچه میرایی به مراتب در مقایسه با سرعت دورانی ۳۵۰ و ۷۰۰ دور در دقیقه کاهش چشمگیری داشته است. نکته قابل توجه در طیف بسامدی شکل ۷ این است که با افزایش سرعت دورانی پمپ به ۱۰۰۰

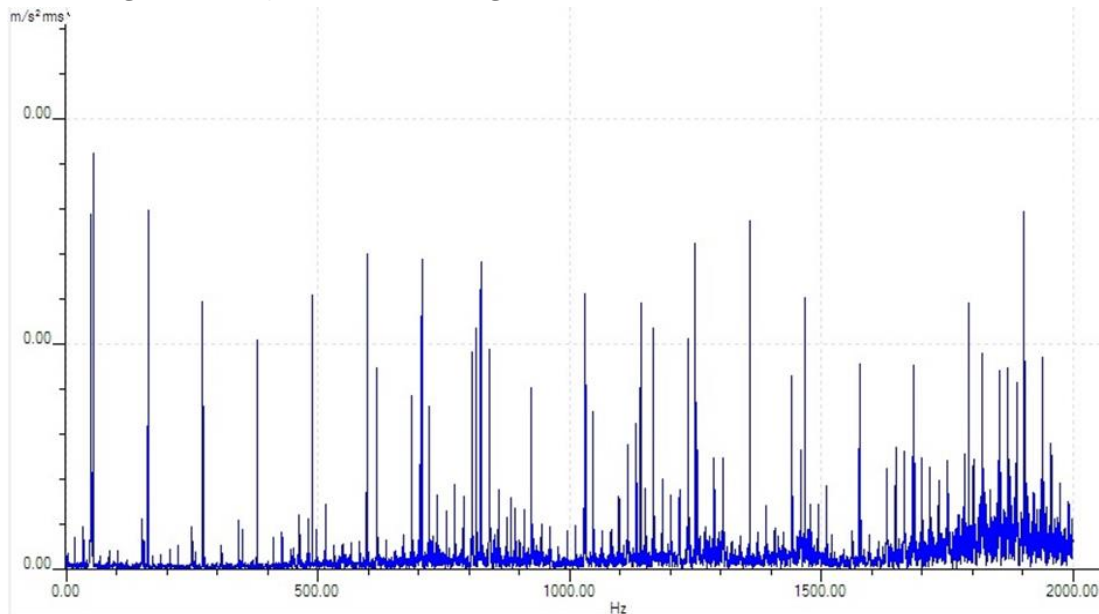
شکل ۵- طیف بسامدی طبقه اول پمپ در سرعت دورانی ۳۵۰ دور در دقیقه و بدون عیوب خوردگی



شکل ۶- طیف بسامدی طبقه اول پمپ در سرعت دورانی ۷۰۰ دور در دقیقه و بدون عیوب خوردگی



شکل ۷- طیف بسامدی طبقه اول پمپ در سرعت دورانی ۱۰۰ دور در دقیقه و بدون عیوب خوردگی



و هارمونیک‌های آن دیده نشد. روند تحلیل‌ها برای شکل ۱۰ نیز مشابه بود. با توجه به شکل ۵ باند سفید در حالت سالم در مقایسه با حالت خوردگی ۱۰۰ درصد بر روی چرخ-دنده هرزگرد طبقه اول در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه بیشتر است. از طرفی میرایی ارتعاشات در حالت سالم به مراتب کمتر از حالت معیوب است. اما در هر دو حالت هارمونیک‌ها در سمت چپ اوج‌ها واقع شده است.

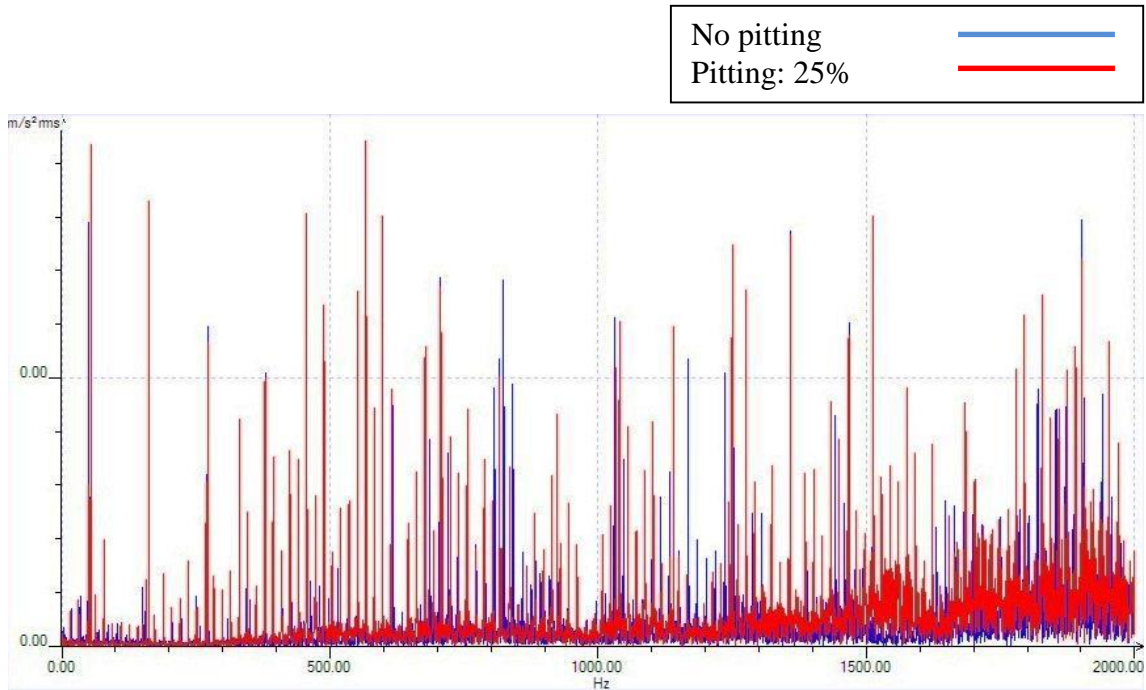
شکل ۸ طیف بسامد طبقه اول پمپ هیدرولیک فرمان را در حالتی که یکی از دندانه‌های چرخ دنده هرزگرد این طبقه به صورت دستی و تعمیدی دچار عیب کجلی به میزان ۲۵ درصد شده است را در مقایسه با حالت سالم نشان می‌دهد. همانگونه که قبلاً هم مشخص شد  $GMF$  در این حالت ۷۰ هرتز می‌باشد. در هر دو طیف بسامد (سالم و معیوب) در بسامد  $GMF$ ، دامنه ارتعاشی دارای بیشینه مقدار خود (۰/۰۱ متر بر مجذور ثانیه) است. دامنه ارتعاشی طیف اندازه‌گیری شده چرخ دنده با خوردگی ۲۵ درصد بر روی یکی از دندانه‌های چرخ دنده هرزگرد طبقه اول پمپ در تمام بسامدها کمتر از دامنه ارتعاش در حالت سالم است. لذا یکی از نتایج قابل ملاحظه تفاوت دامنه ارتعاشی پوسته در دو حالت سالم و معیوب بود.

شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز به ترتیب طیف فرکانسی پمپ هیدرولیک فرمان با خوردگی ۵۰ و ۱۰۰ درصد بر روی چرخ دنده هرزگرد طبقه اول در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه را در مقایسه با پمپ سالم نشان می‌دهند. همانگونه که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت دورانی از ۳۵۰ به ۷۰۰ دور در دقیقه، با خوردگی ۲۵ درصد بر روی چرخ دنده هرزگرد طبقه اول، دامنه هارمونیک‌ها افزایش یافت. در  $GMF$  معادل ۷۰ هرتز در سرعت دورانی ۳۵۰ دور در دقیقه و  $GMF$  معادل ۱۴۰ هرتز که در سرعت دورانی ۷۰۰ دور در دقیقه تفاوتی در بسامد، دامنه،

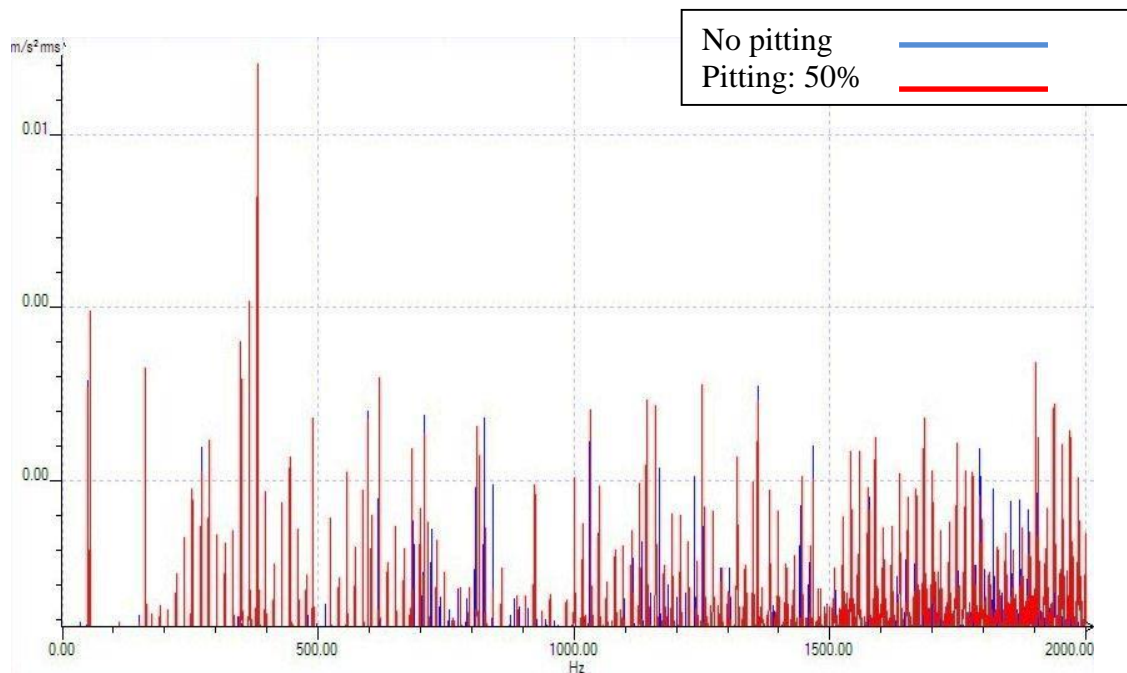


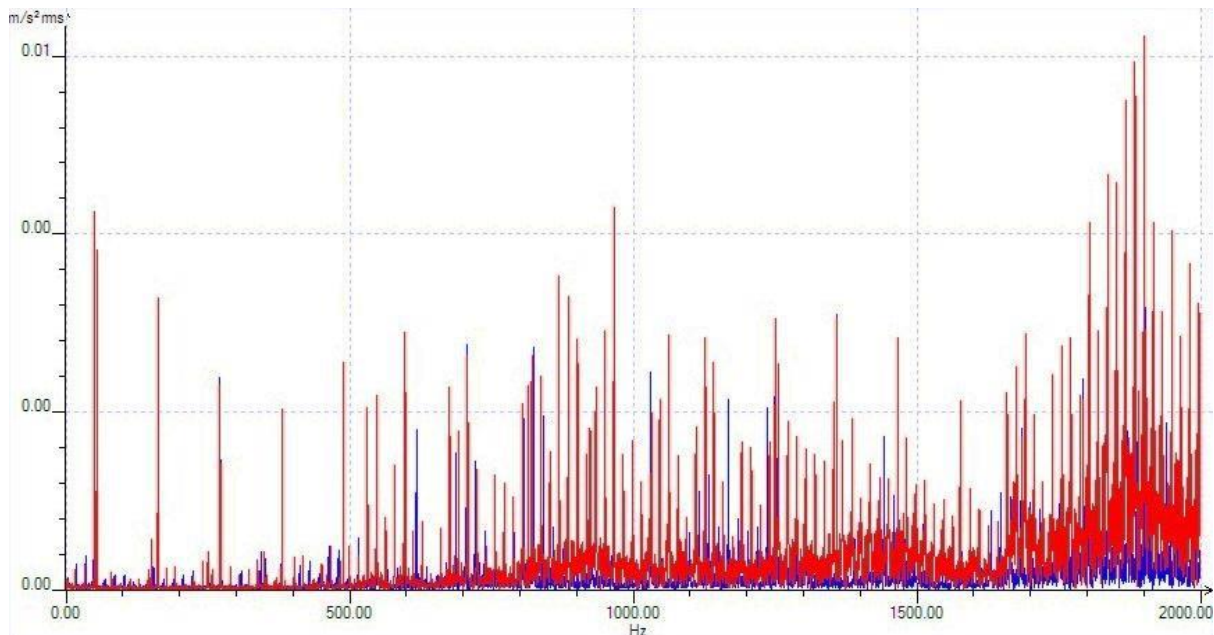


شکل ۸- مقایسه طیف فرکانسی پمپ هیدرولیک فرمان با خوردگی ۲۵ درصد بر روی چرخ‌دنده هرزگرد طبقه اول در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه



شکل ۹- مقایسه طیف فرکانسی پمپ هیدرولیک فرمان با خوردگی ۵۰ درصد بر روی چرخ‌دنده هرزگرد طبقه اول در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه





## References

- Bartelmus, W. & Zimroz, R. (2009). A new feature for monitoring the condition of gearboxes in non-stationary operating conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.23, p:1528-1534 .
- Harry, j., Decker, U.S. (2003). Effects on Diagnostic Parameters After Removing Additional Synchronous Gear Meshes, Army Research laboratory, Cleveland, ohio N-ASA.
- Khadersab, A., Shivakumar, S. (2018). Vibration analysis techniques for rotating machinery and its effect on bearing faults. *Procedia Manufacturing*. Vol. 20. P:247-252 .
- Lee, J., Park, B., Lee, C. (2020). Fault diagnosis based on the quantification of the fault features in a rotary machine. *Applied Soft Computing*. 97:106726.
- Orhan, S., Akturk, N., & Celik, V. (2006). Vibration monitoring for defect diagnosis of rolling element bearings as a predictive maintenance tool: Comprehensive case studies. *NDT&E International*. Vol.39, p: 293-298
- Rafiee, J., Rafiee, M.A and Tse, P.W. (2010). Application of mother wavelet functions for automatic gear and bearing fault diagnosis. *Expert Systems with Applications*. Vol. 37. p. 4568–4579 .
- Shakeri, M. & Nawzad, M. (2004). Remote Troubleshooting of Vibrating Machines, 4th Specialized Conference on Status and Troubleshooting of Iranian Machinery, Tehran, Sharif University of Technology
- Tamizi, H., Rezaei, V. & Khosravi, M.E. (2002). *Troubleshooting Rotary Machines*, Press Sanko Publications. First Edition .
- Yang, T., Pen, H., Wang, Z. & Chang, C.S. (2016).

## نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل طیف‌های انتشار یافته توسط ارتعاشات پوسته پمپ هیدرولیک تراکتور MF399 می‌توان نتیجه گرفت که در حالت سالم با افزایش سرعت دورانی پمپ، دامنه ارتعاشات در بسامد درگیری چرخ‌دنده‌ها کاهش می‌یابد. از طرفی دامنه ارتعاشی طیف اندازه‌گیری شده چرخ‌دنده‌ی دارای خوردگی بر روی یکی از دندانه‌های چرخ‌دنده هرزگرد طبقه اول پمپ در تمام بسامدها کمتر از دامنه ارتعاش در حالت سالم بود. لذا با بررسی دامنه ارتعاش پوسته پمپ می‌توان به نوع و میزان آسیب در آن پی برد. از الگوی به دست آمده در این تحلیل می‌توان برای توسعه الگوریتم‌های تشخیص عیب استفاده کرد و بررسی تداخل اثر اغتشاش‌ها و عیوب دیگر بر اثر انتخاب شده برای تشخیص عیب را با اضافه نمودن اثر جدید و بررسی مجدد تحلیل انتشار عیب انجام داد. اگرچه بکارگیری روش‌های هوشمند در تشخیص عیوب مانند بکارگیری طبقه‌بندی کننده‌های عصبی و فازی در مراحل بعدی این پژوهش قرار دارد.



Feature Knowledge Based Fault Detection of Induction Motors through the Analysis of Stator Current Data. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement .Vol. 65, Issue. 3

- Zarei, J. & Poshtan, J. (2007). Bearing fault detection using wavelet packet transform of induction motor stator current. Tribology International. Vol.40. p: 763-769.

- Zuo, G. L., Lai, S. D. and Cheng, Y. (2014). Study on the fault diagnosis of gear pump based on PNN neural network. Advanced Materials Research. Vol. 1044, pp. 873-876.

## Evaluation of MF399 tractor steering hydraulic pump defects using frequency analysis of vibration signals

Behrooz Ahmadi<sup>1</sup> and Davood Mohammadzamani<sup>2\*</sup>

<sup>1-2-</sup> Dep.Of Biosystems Engineering, Islamic Azad University, Takestan Branch, Takestan, Iran

\*Corresponding author: dr.dmzamani@gmail.com

*Received: 20 May 2018*

*Accept: 20 July 2018*

### Abstract

Using the frequency spectrum related to the vibrations of machine components to determine the amount and location of component defects is one of the new methods in the process of electronic vibration measurement. The purpose of this study was to determine the defects related to the main components of the hydraulic pump of the two-stage tractor MF399 by analyzing the frequency spectrum of vibrations obtained by the electronic vibration measurement system. In order to measure the vibrations, a laboratory table was designed and the components of the measuring system, the hydraulic pump of the MF399 tractor and the electric motor were installed on it. Tests were performed at three speed levels of 350, 700 and 1000 rpm for the input shaft of the hydraulic pump in a healthy pump and a defective pump. Defects on the gear included 25, 50 and 100% pitting on the first floor of the idler gear and pitting of the idler gear on the second floor of the pump. Data collection was performed by Vibrotest model VT60. The results of data analysis in the field of frequency and time showed that in all test modes with a healthy pump, with increasing rotational speed or in other words, increasing the frequency, the vibration damping of the first floor of the pump decreased so that with increasing rotational speed to 1000 RPM, the vibration amplitude decreased to less than 0.01 m.s<sup>-2</sup>. The results showed a similar trend for the second floor shell of the pump. The results also showed that with increasing pitting in the gears from zero to 100% pitting, the vibration amplitude of the spectrum decreased. Therefore, this criterion can be used as a model in diagnosing defective teeth of hydraulic pump gears.

**Keywords:** Frequency analysis, Vibrations, Defect, Gear hydraulic pump