



## استفاده از منطق فازی در عیب‌یابی هوشمند ماشین‌آلات دوار و بررسی اثر توابع عضویت مختلف

شهرام هادیان جزی<sup>۱\*</sup>، محمود آرین<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان  
<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد  
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۸/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲

### چکیده

این مقاله، به موضوع عیب‌یابی اتوماتیک ماشین‌های دوار با استفاده از داده‌های ارتعاشی نقاط مختلف این ماشین‌ها و به کمک یک پایگاه قوانین هوشمند فازی می‌پردازد. به این منظور، از یک چارت تعیین هویت ارتعاشات جدید استفاده شده است که در یکی از مراجع منتشر شده است. مشخصه این چارت جدید، در نظر گرفتن زاویه فاز ارتعاشات در عیب‌یابی است و شامل، مشخصه‌های فرکانسی، جهات غالب و زاویه فاز است و برای عیوبی مختلفی همچون، نابالانسی، ناهمراستایی، شافت خمیده و لقی مکانیکی تدوین شده است. سیستم فازی طراحی شده در این تحقیق، یک سیستم بسیار ساده است. این سیستم نیازی به آموزش‌های پیچیده ندارد، همانند آنچه برای شبکه‌های عصبی انجام می‌شود. از سیستم فازی طراحی شده برای عیب‌یابی چند ماشین دوار کارخانه ذوب‌آهن اصفهان مانند فن‌های مختلف مورد استفاده در این کارخانه استفاده شده است. همچنین تاثیر توابع عضویت مختلف همچون، غیرخطی گوسی، ناقوسی، S شکل و Z شکل در ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم فازی، مورد بررسی قرار گرفته، نتایج حاصل از آن با نتایج عیب‌یابی حاصل از شبکه‌های عصبی موجود در مراجع دیگر و نتایج عملی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد، سیستم فازی طراحی شده کارایی قابل قبولی برای تشخیص عیب دارد.

**کلمات کلیدی:** عیب‌یابی؛ ماشین‌آلات دوار؛ منطق فازی؛ تحلیل ارتعاشات.

## Smart Fault Diagnosis of Rotating Machines using Fuzzy Systems and Analysis of Effects of Different Membership Functions

S. Hadian Jazi<sup>1,\*</sup>, M. Arian<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

<sup>2</sup> MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran.

### Abstract

In this work, the automatic fault diagnosis of rotating machines is discussed using the vibrating data measured from different points of machines and a smart fuzzy knowledge-based system. To this end, a new vibrations' identification chart, recently published, is used. This chart, containing frequency characteristics and phase angle, is represented for some usual defects such as unbalancy, misalignment, bent shaft, and mechanical looseness. Designed fuzzy knowledge-based system has a very simple structure. It does not require any complicated training such as those used for neural network training. In order to evaluate the performance of the designed fuzzy system in actual applications, it is used for the fault diagnosis of some rotating machines in Isfahan Steel Company such as fans. The effects of different membership functions such as the non-linear Gaussian, bell-shaped, sigmoid, s-shape, and z-shape function for inputs and outputs of fuzzy rules database are studied and the results obtained are compared with those for some neural network-based fault diagnosis systems and experimental results. These results show that the designed smart fuzzy system has an acceptable performance in detecting faults.

**Keywords:** Fault Diagnosis; Rotating Machine; Fuzzy Logic; Vibration Analysis.

## ۱- مقدمه

نگهداری و حفظ ماشین‌آلات و پیش‌بینی عیوب ایجاد شده در آن‌ها، یکی از مهم‌ترین مباحث در صنایع گوناگون بوده، در کاهش هزینه‌ها و اقتصادی کردن کارخانه‌های صنعتی بسیار مهم است. مدت‌هاست که شرکت‌های زیادی در جستجوی تکنیک‌های تعمیر و نگهداری هستند تا به حداکثر کارایی ممکن دست یابند. در این راستا، استراتژی‌های متعددی به‌وجود آمده، تکنیک‌های تعمیر و نگهداری نیز با پیشرفت تکنولوژی الکترونیک و سیستم‌های اندازه‌گیری پایش وضعیت<sup>۱</sup>، توسعه یافته‌اند. در بین تکنیک‌های مختلف پایش وضعیت، تحلیل ارتعاشات از توانایی بالایی در تشخیص عیوب برخوردار است. با رشد هرگونه عیب مکانیکی در سیستم، خواص دینامیکی ماشین تغییر کرده، علاوه بر تغییر سطح ارتعاشات، خصوصیات طیف سیگنال ارتعاشی در حوزه زمان و فرکانس نیز تغییر خواهد کرد [۱]. تکنیک‌های مبتنی بر دانش<sup>۲</sup>، راهبرد مناسبی جهت سیر به تشخیص اتوماتیک عیوب هستند که از میان آن‌ها می‌توان به منطق فازی اشاره نمود که بر اساس تعریف مجموعه قوانین بنا شده است. این مجموعه قوانین، معمولاً از تجربیات خبره یا دانش قبلی سیستم استخراج می‌گردند. فرآیند تشخیص عیب بر اساس طبقه‌بندی عیوب خواهد بود، بنابراین سیستم‌های فازی به عنوان طبقه‌بندی‌گر به تشخیص عیوب بر اساس قوانین موجود عمل خواهند کرد. دقت این سیستم‌ها، وابسته به دقت در تدوین قوانین است [۲].

اولین راهکارها در مورد بررسی وضعیت ماشین‌آلات با استفاده از اندازه‌گیری‌های ارتعاشی توسط راتبون<sup>۳</sup>، مهندس ارشد ماشین‌آلات و توربین در نیویورک ارائه گردیده است. وی در سال ۱۹۳۹ در مقاله‌ای با عنوان تلورانس ارتعاش، روشی برای برآورد وضعیت ژنراتورهای توربین بخار، بر اساس جابجایی ارتعاشی در محدوده فرکانسی یک تا صد و بیست هرتز ارائه کرد [۱]. از نیمه دهه ۱۹۶۰ به بعد، حسگرهای غیر تماسی، با استفاده از مکانیزم جریان گردابی برای اندازه‌گیری حرکت شافت نسبت به محفظه یاتاقان، مورد

استفاده قرار گرفت. بنتلی<sup>۴</sup> و دان ویلهم<sup>۵</sup> در ظهور این روش، نقش مؤثری داشتند. در اواسط دهه ۱۹۷۰، اندازه‌گیری غیر تماسی و پایش پیوسته جابجایی شافت، تقریباً یک مقبولیت جهانی را به عنوان روش برتر برای پایش وضعیت مکانیکی توربوماشین‌های بزرگ با یاتاقان‌های لغزشی به‌دست آورد [۱]. از اواخر دهه ۱۹۷۰، تحلیل گره‌های تبدیل فوریه سریع<sup>۶</sup> بر پایه تکنولوژیی وارد بازار شد که توسط کولی و تاکی<sup>۷</sup> ارائه شده بود [۱]. در اواسط دهه ۱۹۹۰، با مطرح شدن قابلیت‌های مجموعه‌های فازی، در راستای بهبود نتایج حاصل از به‌کارگیری روش تحلیل خاکستری، از یک جبران‌کننده فازی و تحلیلگر ژنتیکی برای کاهش خطای سیستم خاکستری استفاده شد [۳]. وانگ و مک فادن<sup>۸</sup>، برای آنالیز سیگنال‌های ارتعاش چرخ‌دنده‌ها که یکی از مهم‌ترین اجزاء ماشین هستند، از شبکه عصبی و تبدیل موجک<sup>۹</sup> استفاده کردند و دریافتند که تبدیل موجک برای کشف انواع عیوب ایجاد شده در مراحل ابتدایی عیب مناسب است [۴].

از جمله اولین کاربردهای سیستم‌های فازی در عیب‌یابی ماشین‌آلات دوار، می‌توان به‌کاری اشاره کرد که توسط مکفسکی<sup>۱۰</sup> در سال ۱۹۹۸ برای عیب‌یابی یاتاقان‌های غلتشی انجام شد که روش منطق فازی را برای دسته‌بندی طیف فرکانسی عیوب مختلف المان یاتاقان غلتشی با سرعت پایین به‌کار برد. بدین منظور، با استفاده از مفاهیم آماری انحراف معیار و میانگین، فرکانس‌ها را برای محدوده‌های بالا و پایین توابع عضویت فازی محاسبه کرد و از دو تابع عضویت مثلثی و گوسی استفاده کرد و نتیجه گرفت که تابع گوسی پاسخ‌های دقیق‌تری را برای تشخیص عیوب یاتاقان می‌دهد [۵]. یانگ و شن<sup>۱۱</sup> در سال ۲۰۰۸ با استفاده از چارت تعیین هویت ارتعاشات SOHRE و سیستم فازی، اقدام به عیب‌یابی یک توربوژنراتور کردند. آنها برای این کار، از تغییر مقدار وزن‌های هر قاعده در سیستم فازی طراحی شده استفاده کردند و نشان دادند که در موارد عملی این سیستم نتایج

<sup>4</sup> Bently<sup>5</sup> Don Vilham<sup>6</sup> Fast Fourier Transform (FFT)<sup>7</sup> Cooley & Tukey<sup>8</sup> Wang & McFadden<sup>9</sup> Wavelet Transform<sup>10</sup> Mechefske<sup>11</sup> Yang & Shen<sup>1</sup> Condition Monitoring (CM)<sup>2</sup> Knowledge-Based<sup>3</sup> Ratboun

افزایش درک سبب می‌شود، به کمک منطق فازی پیچیده‌ترین سیستم‌ها، به ساده‌ترین و کارآمدترین بیان تبدیل شوند [۱۱].

اساس بیان سیستم‌ها در این منطق، بر پایگاه قوانین آن استوار است. این پایگاه قوانین به صورت مجموعه‌ای از جملات شرطی اگر-آنگاه فازی به فرم زیر نوشته می‌شود.

اگر <گزاره فازی ۱> آنگاه <گزاره فازی ۲>.

به گزاره فازی ۱، قسمت فرض و به گزاره فازی ۲، قسمت نتیجه گفته می‌شود.

به عبارت دیگر، روش بیان یک سیستم با استفاده از منطق فازی به یک مساله تصمیم‌گیری از روی ورودی‌ها تبدیل می‌شود و این تصمیم‌گیری، منتج به خروجی سیستم می‌شود.

از یک دیدگاه کلی مراحل تصمیم‌گیری به روش فازی، به پنج مرحله تقسیم می‌شود [۱۲]. ۱- فازی سازی داده‌های ورودی: در این مرحله از طریق توابع عضویت داده‌های عددی ورودی به داده‌های فازی تبدیل می‌شوند. ۲- اعمال عملگرهای فازی: در این قسمت، درستی هر یک از اجزای قسمت فرض تعیین می‌شود. ۳- اعمال روش استلزام: در این مرحله، نتیجه هر یک از گزاره‌های شرطی پایگاه قوانین تعیین می‌شود. ۴- تجمیع خروجی‌ها: در این مرحله، نتایج همه گزاره‌های شرطی با هم ترکیب شده، نتیجه‌گیری نهایی ارایه می‌شود. به عبارت دیگر، خروجی یا خروجی‌های سیستم در این مرحله به صورت فازی تعیین می‌شود. ۵- نافازی سازی خروجی: در این مرحله، خروجی‌های فازی به اعداد تبدیل شده، خروجی عددی سیستم تعیین می‌شود.

برای انجام هر یک از مراحل مذکور، روش‌های مختلفی وجود دارد. در این تحقیق از مدل پایگاه قوانین ممدانی، توابع مختلف عضویت برای فازی‌سازی، روش ضرب جبری برای اعمال عملگرهای فازی، روش استلزام حاصل‌ضرب ممدانی برای استلزام، به دلیل خواص یکنواخت‌تر آن و روش محاسبه مرکز سطح برای نافازی سازی استفاده شده است.

### ۳- طراحی سیستم هوشمند فازی

در این قسمت، مراحل مختلف طراحی یک سیستم فازی جهت تشخیص عیوب ماشین، مورد بررسی قرار می‌گیرد. ساختار کلی سیستم مورد نظر با توجه به کاربرد مورد نظر و خصوصیات مناسب سیستم فازی مدل ممدانی و توابع

قابل قبولی را ارائه می‌دهد [۶]. پیلی<sup>۱</sup> و همکارانش در ۲۰۱۵، به بررسی مساله تشخیص و رفع عیب سیستم‌های الکتریکی جریان مستقیم ولتاژ بالا به کمک منطق فازی پرداختند [۷]. آن‌ها سیستم فازی طراحی شده را در شبیه‌سازی‌های مختلف آزمایش کرده، نتایج قابل قبولی گرفتند. همچنین سلیمان<sup>۲</sup> و همکارانش در ۲۰۱۵، به طراحی طراحی کنترل کننده و همچنین یک سیستم تشخیص عیب بر پایه منطق فازی پرداختند که به کمک آن سیستم گرمایش یک محیط را تحت کنترل داشته باشند. سیستم تشخیص عیب آنها می‌توانست، عیوب موجود در دمنده هوا را تشخیص داده، به کمک سیستم کنترل آن را مدیریت کند [۸]. همچنین وانگ<sup>۳</sup> و همکارانش در همین سال، به بررسی مساله تشخیص عیب در سیستم‌های قدرت به کمک منطق فازی و شبکه عصبی پرداختند [۹].

کاری که در این مقاله انجام پذیرفته است، استخراج داده‌ها از سیگنال زمانی و طیف فرکانسی با توجه به چارت جدید تعیین هویت ارتعاشات معرفی شده در پیوست ۱ و استفاده از سیستم فازی جهت تشخیص عیوب ماشین‌آلات دوار و مقایسه نتایج آن با شبکه عصبی طراحی شده در مرجع [۱۰] و همچنین نتایج عملی است.

### ۲- منطق فازی

برای توصیف یک روز از روزهای سال از نظر ابری بودن هوا دو روش وجود دارد؛ روش اول آن است که گفته شود، این روز یا ابری هست یا ابری نیست. به عبارت دیگر، در توصیف ابری بودن به صورت صفر و یک یا اصطلاحاً دو ارزشی عمل شود. روش دوم آن است که بین این صفر و یک هم مد نظر قرار گیرد. به نوعی میزان ابری بودن نیز در نظر گرفته شود. به چنین توصیفی از روز ابری، توصیف فازی گفته می‌شود.

در منطق فازی از متغیرهای زبانی استفاده می‌شود؛ به عبارت دیگر، به جای آنکه روی اعداد به صورت مجزا بحث شود، روی کلمات بحث می‌شود. این موضوع باعث می‌شود، منطق فازی بیشتر به زبان گفتاری نزدیک شده، بنابراین درک بشر از موضوع را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد.

<sup>1</sup> Paily

<sup>2</sup> Sulaiman

<sup>3</sup> Wang

دارند؛ اما در عمل مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده، دارای چنین خاصیتی نیستند و بسته به شدت دامنه کل ارتعاشات و بزرگی نیروهای ایجاد شده، بزرگی مقادیر مذکور متفاوت خواهد بود؛ اما آنچه در عمل موجب تمایز عیوب از یکدیگر می‌شود، بزرگی نسبی دامنه‌ها است و مقادیر مطلق اندازه‌ها به تنهایی چیزی را روشن نمی‌کنند؛ بنابراین لازم است، داده‌های سطرهای مختلف چارت مذکور، نرمال‌سازی شوند. برای نرمال‌سازی فقط کافی است با تغییراتی که در ستون‌های فاز آن یعنی، بردن فازها از واحد درجه به مبنای ۱۰۰ (۱۸۰ درجه ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود)، این کار انجام شود. همان‌طور که نمونه‌های آموزشی سیستم قبل از آموزش به آن نرمال‌سازی می‌شوند، در مورد نمونه‌های اصلی و موقع شبیه‌سازی سیستم نیز لازم است، داده‌های ورودی قبل از شبیه‌سازی نرمال‌سازی شوند.

### ۳-۳- تعیین ساختار کلی سیستم فازی

بررسی چارت پیوست ۱ نشان می‌دهد، ارتباط خطی خاصی بین ورودی‌ها و خروجی سیستم وجود ندارد. از این‌رو در تعیین توابع عضویت برای سیستم، انتخاب توابع عضویت خطی مانند، مثلثی و دوزنقه‌ای، احتمالاً نتایج مناسبی به‌دست نخواهد داد. در مورد این مسائل، به نظر می‌رسد توابع عضویت غیرخطی همچون گوسی، ناقوسی، سیگموئیدی و... عملکرد بهتری دارند. به‌منظور طراحی سیستم فازی برای چارت پیوست ۱، از توابع عضویت؛ مثلثی، گوسی، ضرب سیگموئیدی و ناقوسی برای ورودی‌ها و برای خروجی‌ها از توابع عضویت (Z-S شکل) استفاده می‌شود.

ساختار کلی سیستم فازی برای چارت پیوست ۱، شامل ۱۱ متغیر زبانی برای ورودی‌ها است. همچنین برای متغیر زبانی اول، ۶ تابع عضویت، متغیرهای زبانی دوم و پنجم هر کدام ۵ تابع عضویت، متغیرهای زبانی سوم، چهارم، ششم، هشتم و نهم، هر کدام ۳ تابع عضویت، متغیر زبانی هفتم ۴ تابع عضویت و متغیرهای زبانی دهم و یازدهم، هر کدام ۲ تابع عضویت در محدوده [۰ ۱۰۰] اختصاص داده می‌شود. برای هر کدام از خروجی‌ها نیز، یک متغیر زبانی با ۲ تابع عضویت (یکی برای صفر و دیگری برای یک) در محدوده [۰ ۱] تعریف می‌شود. با توجه به این‌که ورودی سیستم فازی یک ماتریس [۸×۱۱] است، پایگاه قواعدی که برای

عضویت گوسی، سیگموئیدی و ناقوسی انتخاب می‌شود. مبنای داده‌های به‌کار گرفته شده در این سیستم چارت موجود در پیوست ۱ است.

### ۳-۱- تعیین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم و کدگذاری آنها

با مراجعه به چارت پیوست ۱ مشاهده می‌شود، برای شناسایی هر عیب، یازده ستون داده‌های ورودی در نظر گرفته شده است. ستون اول تا چهارم، بیانگر شدت دامنه ارتعاشات در نواحی مهم فرکانسی (فرکانس‌های غالب) با اعدادی در محدوده ۰ تا ۱۰۰ است. در ستون‌های پنجم تا هشتم شدت دامنه در جهات افقی، عمودی و محوری در محدوده ۰ تا ۱۰۰ قرار گرفته است و ستون‌های نهم تا یازدهم، زوایای فاز را با اعدادی در محدوده ۰ تا ۱۸۰ بیان می‌کند. با مشخص کردن داده‌های ۱۱ گانه بالا به عنوان ورودی‌های سیستم فازی، احتمال وجود هر یک از معایب موجود در حوزه تعریف شده (سطرهای هشت گانه چارت پیوست ۱)، به عنوان خروجی سیستم تعریف می‌شود. برای اعمال خروجی‌های مذکور به سیستم فازی، عیب‌یابی به هر یک از خروجی‌های سیستم برداری مستقل منتسب می‌شود تا مفاهیم متفاوت، مستقل از هم به سیستم تفهیم شود. به‌این‌ترتیب در لایه خروجی سیستم به تعداد خروجی‌های مستقل، متغیر زبانی وجود خواهد داشت و هر متغیر زبانی با دو تابع عضویت، یکی برای صفر (با تابع عضویت Z شکل) و دیگری برای یک (با تابع عضویت S شکل)، بیان می‌شود. در این روش با وجود آنکه ساختار سیستم پیچیده‌تر و حجم محاسبات بیشتر می‌شود، اما خصوصیات تربیتی سیستم، همچون قابلیت تعمیم و همگرایی، بهتر می‌شود. به‌طور مثال، در مورد سیستم به‌کار رفته برای تفهیم خصوصیات چارت پیوست ۱، هشت نوع متغیر زبانی خروجی وجود خواهد داشت. مزیت مهم دیگر این روش، کدگذاری آن است که با مستقل از هم تعریف کردن خروجی‌های سیستم، امکان ردیابی و شناسایی خروجی‌های ترکیبی فراهم می‌شود.

### ۳-۲- نرمال‌سازی داده‌های ورودی و خروجی

با مراجعه به چارت پیوست ۱ ملاحظه می‌شود که داده‌های ستون‌های مختلف این چارت از نظر بزرگی اندازه دارای مقادیر خاصی هستند. این اعداد در محدوده ۰ تا ۱۸۰ قرار

۲- برای محاسبه شدت دامنه سرعت ارتعاشات کل در جهات افقی، عمودی و محوری (۳ ستون جهات‌های غالب)، از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$DVA = \frac{(RMS_{hor} \hat{i} + RMS_{ver} \hat{j} + RMS_{axl} \hat{k})}{RMS_{hor} + RMS_{ver} + RMS_{axl}} \quad (2)$$

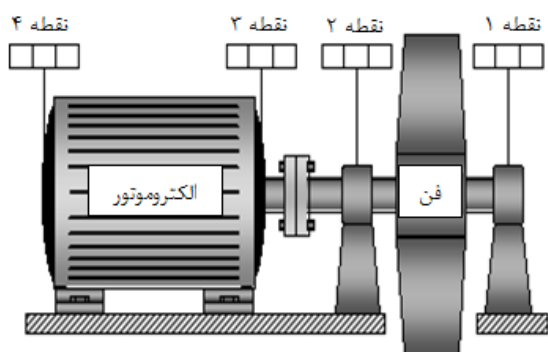
در رابطه (۲)، بردارهای پایه  $\hat{i}$ ،  $\hat{j}$  و  $\hat{k}$  بیانگر جهات افقی، عمودی و محوری هستند و  $RMS_{hor}$ ، ریشه میانگین مربعات دامنه ارتعاشات در جهت افقی،  $RMS_{ver}$ ، ریشه میانگین مربعات دامنه ارتعاشات در جهت عمودی،  $RMS_{axl}$ ، ریشه میانگین مربعات دامنه ارتعاشات در جهت محوری است.

۳- اطلاعات مربوط به زوایای فاز با اندازه‌گیری زاویه فاز در نقاط مشخص شده در چارت پیوست ۱ به‌دست می‌آیند و مقادیر به‌دست آمده بر ۱۸۰ تقسیم می‌شوند.

مثال ۱ - فن ۱ کِشنده طرح توسعه آگلومراسیون ذوب- آهن اصفهان

در مثال ۱، علت افزایش ارتعاشات فن ۱ کِشنده طرح توسعه آگلومراسیون ذوب آهن اصفهان که به‌وسیله یک الکتروموتور با دور کارکرد ۱۵۰۰ RPM به حرکت در می‌آید، مورد بررسی قرار می‌گیرد. شماتیک مجموعه فن در شکل ۱ و منحنی‌های طیف فرکانسی سرعت ارتعاشات مربوط به نقطه ۱، در شکل‌های ۲ تا ۴ ملاحظه می‌شود.

لازم به ذکر است، نمودارهای طیف فرکانسی با استفاده یک تحلیل گر FFT با سیستم‌های اندازه‌گیری قابل حمل مدل ۲۵۱۵ و نرم‌افزار کاربردی ۷۶۱۶ ساخت شرکت "B&K" از کشور دانمارک تهیه شده است.



شکل ۱- طرح شماتیک فن ۱ کِشنده

سیستم فازی استفاده می‌شود، یک ماتریس  $[8 \times 21]$  خواهد بود (چون در حالت کلی اگر  $m$  ورودی و  $n$  تا خروجی وجود داشته باشد، پایگاه قواعد یک سیستم فازی را می‌توان بصورت یک ماتریسی با  $m+n+2$  ستون نوشت که  $m$  ستون اول، اندیس مربوط به توابع عضویت ورودی سیستم،  $n$  ستون بعدی اندیس مربوط به توابع عضویت خروجی سیستم،  $m+n+1$  وزن‌های مربوط به قواعد است و ستون  $m+n+2$  مربوط به عملیات منطقی مورد استفاده در قاعده است). با توجه به قابلیت‌های محاسباتی آرایه‌ای خوب و توابع کتابخانه‌ای مناسب نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup>، از این نرم‌افزار برای عیب‌یابی ماشین‌آلات استفاده می‌شود.

#### ۴- نتایج عملی

در این قسمت با استفاده از امکانات نرم‌افزار متلب، چند مورد عملی از عیب‌یابی ماشین‌آلات واقعی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای استفاده از چارت پیوست ۱ در سیستم فازی به‌منظور عیب‌یابی، باید شدت ارتعاشات در نواحی فرکانسی، جهات مناسب و نقاط مناسب محاسبه شود. اطلاعات مورد نیاز برای عیب‌یابی با استفاده از نرم‌افزار متلب، مطابق روند زیر محاسبه شده است. برای چهار ستون اول، چارت پیوست ۱ مطابق روش زیر عمل می‌شود:

۱- مقادیر دامنه سرعت ارتعاشات در فرکانس‌های غالب (۴ ستون مورد بررسی) بر مقدار حداکثر ریشه میانگین مربعات<sup>۲</sup> (RMS) دامنه سرعت ارتعاشات در جهت غالب برای هر نقطه، تقسیم می‌شوند و نتایج حاصله نرمال‌سازی (با تقسیم بر مجموع چهار ستون) می‌شوند.

ریشه میانگین مربعات برای یک سیگنال ارتعاشی، یک مشخصه تحلیل زمانی است که به نوعی بیانگر میزان انرژی موجود در سیگنال است. این مشخصه برای دنبال کردن وضعیت رشد عیوب کارایی دارد. برای محاسبه این کمیت، از رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $x_i$  بیانگر سری زمانی سیگنال و  $n$  طول آن است [۲].

<sup>۱</sup> MATLAB

<sup>۲</sup> Root Mean Squar (RMS)

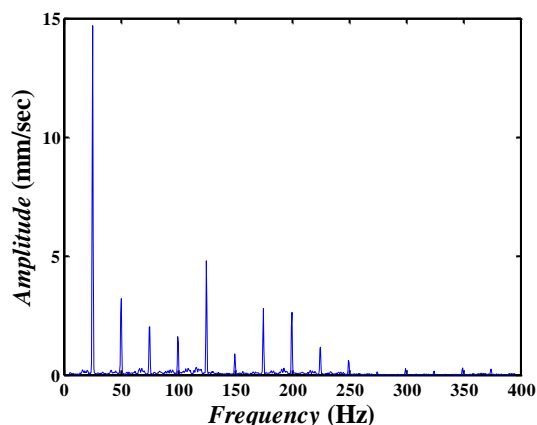
## جدول ۱- مقادیر RMS دامنه سرعت خطی سیگنال زمانی

برای نقطه ۱ فن کِشنده			
جهت عمودی (mm/s)	جهت افقی (mm/s)	جهت محوری (mm/s)	
۶/۱۰	۲۱/۳۵	۴/۷۷۹	نقطه ۱

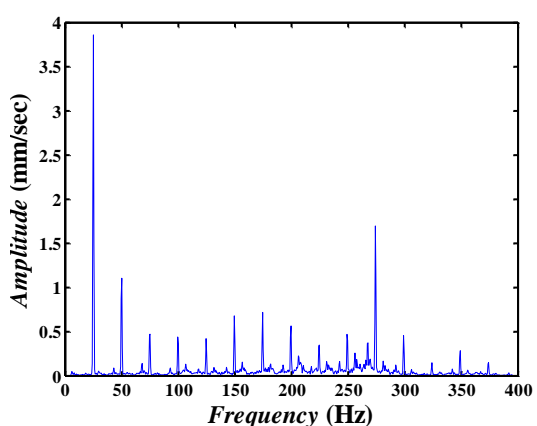
در جدول ۲، اطلاعات مورد نیاز برای عیب‌یابی نقطه ۱ فن مورد بررسی آمده است. در سطر اول جدول ۲، ستون‌های اول تا چهارم، مقادیر دامنه سرعت ارتعاشات در فرکانس‌های غالب با توجه به جهت افقی (به دلیل حداکثر بودن مقدار RMS در این جهت)، ستون‌های پنجم تا هفتم، مقادیر RMS دامنه سرعت ارتعاشات سیگنال زمانی در جهات افقی، عمودی و محوری و ستون‌های هشتم تا یازدهم، مقادیر زاویه‌های فاز هستند. سطر دوم این جدول، مطابق روندی بدست می‌آید که در ابتدای این بخش بیان شد. (قابل ذکر است که در سطر دوم جدول مذکور، مقادیر ستون‌های اول تا چهارم، از تقسیم دامنه سرعت ارتعاشات در نواحی فرکانسی مشخص شده، بر مقدار حداکثر ریشه میانگین مربعات در جهت افقی، عمودی یا محوری به دست آمده‌اند. در این مثال، چون جهت افقی، جهت غالب است، بر این مقدار تقسیم شده‌اند. به دلیل این‌که در چارت پیوست ۱، در هر سطر مجموع ستون‌های اول تا چهارم یا پنجم تا هفتم باید بر حسب درصد برابر ۱۰۰ باشد، در سطر دوم جدول ۲ نیز باید مقادیر ستون‌های ذکر شده بر حسب درصد برابر ۱۰۰ باشد. برای بقیه مثال‌ها نیز، از این روند استفاده شده است.

نتایج عیب‌یابی سیستم فازی و شبکه عصبی طراحی شده در مرجع [۱۰] برای نقطه ۱ فن ذکر شده با استفاده از سطر دوم جدول ۲ و چارت پیوست ۱، در جدول ۳ آمده است.

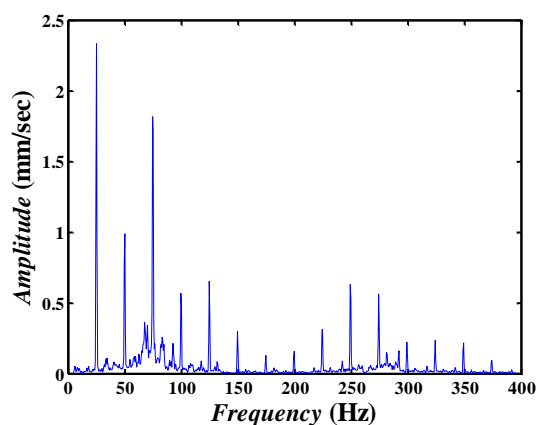
با توجه به جدول ۳، سیستم فازی برای نقطه ۱، عیب نابالانسی استاتیکی با احتمال ۹۴/۴۵ درصد را با استفاده از توابع عضویت؛ مثلثی، گوسی، ضرب سیگموئیدی و ناقوسی و بقیه عیوب را با احتمال ۵/۵۵ درصد تشخیص داده است و شبکه عصبی، این عیب را با احتمال ۹۹/۴۸ درصد تشخیص داده است. در عمل نیز عیب نابالانسی استاتیکی تشخیص داده شد. با بررسی نتایج جدول ۳ ملاحظه می‌شود که توابع عضویت مثلثی، گوسی و سیگموئیدی و ناقوسی برای این مثال، عیب را به درستی تشخیص می‌دهند.



شکل ۲- طیف فرکانسی نقطه ۱ فن کِشنده در جهت افقی



شکل ۳- طیف فرکانسی نقطه ۱ فن کِشنده در جهت عمودی



شکل ۴- طیف فرکانسی نقطه ۱ فن کِشنده در جهت محوری

مقادیر ریشه میانگین مربعات دامنه سرعت ارتعاشات سیگنال زمانی برای نقطه ۱ فن مورد بررسی، در جهت‌های افقی، عمودی و محوری در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۲ مشخصات طیف فرکانسی ارتعاشات فن یک کِشنده در نقطه ۱

مشخصه ارتعاشی فن مورد بررسی	فرکانس‌های غالب				جهت غالب			زوایای فاز			
	۱×RPM	۲×RPM	۳×RPM	n×RPM	جهت افقی	جهت عمودی	جهت محوری	زاویه فاز ۱	زاویه فاز ۲	زاویه فاز ۳	زاویه فاز ۴
مقادیر خام	۱۴/۷۱	۳/۲۱۴	۲/۰۳۴	۱/۳۹	۲۱/۳۵	۶/۱	۴/۷۷۹	۸۵	۴	۰	۰
مقادیر بر حسب درصد	۶۸/۹	۱۵/۰۵	۹/۵۳	۶/۵۲	۶۶/۲۴	۱۸/۹۳	۱۴/۸۳	۴۷/۲۲	۲/۲۲	۰	۰

جدول ۳- نتایج عیب‌یابی فن یک کِشنده با استفاده از چارت پیوست ۱

عیوب قابل تشخیص	مثلثی	گوسی و ضرب سیگموئیدی	ناقوسی	شبکه عصبی [۱۰]
نابالانسی استاتیکی	۹۴/۴۵	۹۴/۴۵	۹۴/۴۵	۹۹/۴۸
نابالانسی کوپلی	۵/۵۵	۵/۵۵	۵/۵۵	۰
نابالانسی	۵/۵۵	۵/۵۵	۵/۵۵	۰/۳
ناهمراستایی زاویه‌ای	۵/۵۵	۵/۵۵	۵/۵۵	۰/۳۸
ناهمراستایی موازی	۵/۵۵	۵/۵۵	۵/۵۵	۰/۱۳
ناهمراستایی ترکیبی	۵/۵۵	۵/۵۵	۵/۵۵	۰
شافت خمیده	۵/۵۵	۵/۵۵	۵/۵۵	۰/۲۲
لقی مکانیکی	۵/۵۵	۵/۵۵	۵/۵۵	۰/۲۴

### مثال ۲- فن ۲ طرح توسعه آگلومراسیون ذوب‌آهن اصفهان

در مثال ۲، بازرسی دوره‌ای مربوط به فن ۲ طرح توسعه آگلومراسیون ذوب آهن مورد بررسی قرار می‌گیرد که موتور آن با سرعت ۱۵۰۰ RPM دوران می‌کند. طرح شماتیک دستگاه در شکل ۵ و منحنی‌های طیف فرکانسی ارتعاشات نقطه ۲، در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده است. مقادیر ریشه میانگین مربعات دامنه سرعت ارتعاشات سیگنال زمانی برای نقطه ۲ فن مورد بررسی در جهت‌های افقی، عمودی و محوری در جدول ۴ آورده شده است. در جدول ۵، اطلاعات مورد نیاز برای عیب‌یابی نقطه ۲ فن مورد بررسی آمده است. در سطر اول جدول ۵، ستون‌های اول تا چهارم، مقادیر دامنه سرعت ارتعاشات در فرکانس‌های غالب با توجه به جهت افقی (به دلیل حداکثر بودن مقدار RMS در این جهت) بدست آمده‌اند. قابل ذکر است که در سطر دوم جدول مذکور، مقادیر ستون‌های اول تا چهارم، از

تقسیم دامنه سرعت ارتعاشات در نواحی فرکانسی مشخص شده، بر مقدار حداکثر ریشه میانگین مربعات در جهت افقی به دست آمده‌اند.

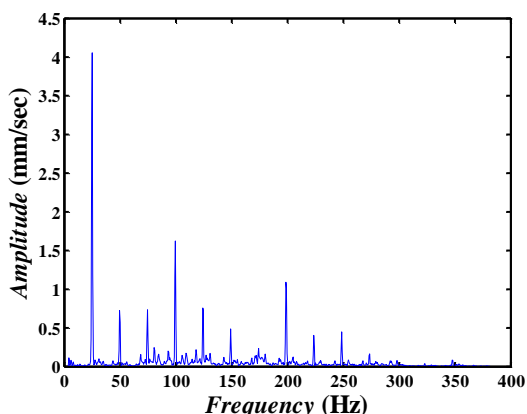
نتایج عیب‌یابی سیستم فازی و شبکه عصبی طراحی شده در مرجع [۱۰] برای نقطه ۲ فن ذکر شده با استفاده از سطر دوم جدول ۵ و چارت پیوست ۱، در جدول ۶ آمده است. با توجه به جدول ۶، سیستم فازی برای نقطه ۲، عیب شافت خمیده با احتمال ۵۰، ۹۴/۴۵ و ۹۳/۴۶ درصد را به ترتیب با استفاده از توابع عضویت؛ مثلثی، گوسی، ضرب سیگموئیدی و ناقوسی تشخیص داده است و شبکه عصبی این عیب را با احتمال ۹۹/۲۸ درصد تشخیص داده است. در عمل نیز، عیب شافت خمیده تشخیص داده شد.

با بررسی نتایج جدول ۶ ملاحظه می‌شود که توابع عضویت گوسی، سیگموئیدی و ناقوسی برای این مثال، عیب را به درستی تشخیص می‌دهند؛ ولی تابع عضویت مثلثی همه عیوب را با احتمال ۵۰ درصد تشخیص داده است.

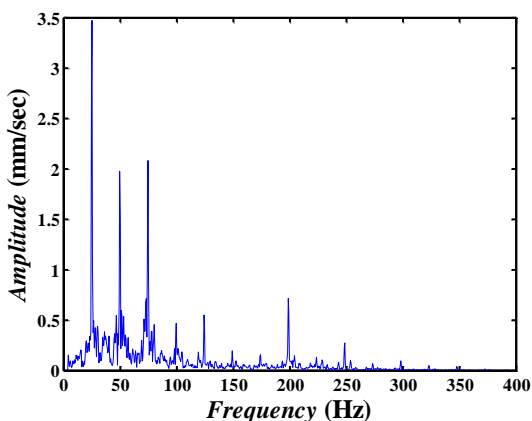
جدول ۴- مقادیر RMS دامنه سرعت خطی سیگنال

زمانی برای نقطه ۲ فن ۲

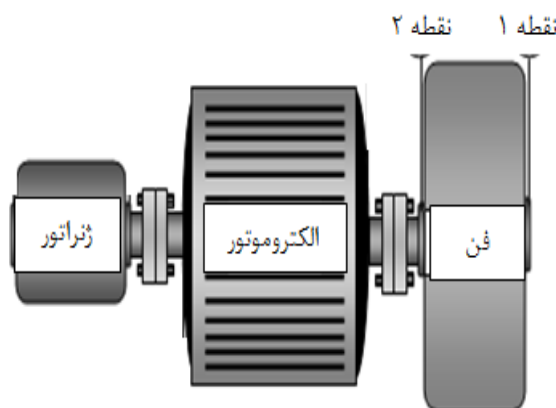
جهت افقی (mm/s)	جهت عمودی (mm/s)	جهت محوری (mm/s)	نقطه ۲
۸/۸۶	۶/۳۶	۶/۸۷	



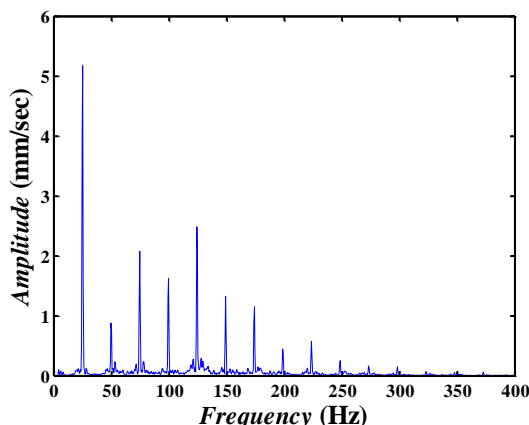
شکل ۷- طیف فرکانسی نقطه ۲ فن ۲ در جهت عمودی



شکل ۸- طیف فرکانسی نقطه ۲ فن ۲ در جهت محوری



شکل ۵- طرح شماتیک فن ۲ طرح توسعه آگلومراسیون



شکل ۶- طیف فرکانسی نقطه ۲ فن ۲ در جهت افقی

مثال ۳- فن ۱۰۱ طرح توسعه آگلومراسیون ذوب آهن در این مثال، علت افزایش ارتعاشات فن ۱۰۱ طرح توسعه آگلومراسیون ذوب آهن اصفهان که به وسیله یک الکتروموتور با دور کارکرد ۱۵۰۰ RPM به حرکت در می‌آید، مورد بررسی قرار می‌گیرد. طرح شماتیک مجموعه فن، در شکل ۹ و منحنی‌های طیف فرکانسی سرعت ارتعاشات مربوط به نقطه ۲، در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ ملاحظه می‌شود.

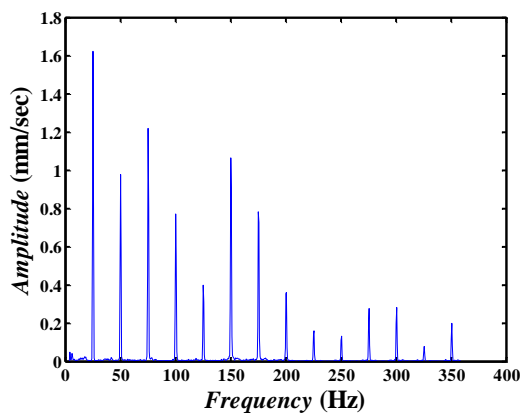
جدول ۵- مشخصات طیف فرکانسی ارتعاشات فن ۲ آگلومراسیون در نقطه ۲

مشخصه ارتعاشی فن مورد بررسی	فرکانس‌های غالب				جهت غالب			زوایای فاز		مقادیر خام	
	۱×RPM	۲×RPM	۳×RPM	n×RPM	جهت افقی	جهت عمودی	جهت محوری	زاویه فاز ۱	زاویه فاز ۲		زاویه فاز ۳
مقادیر خام	۵/۱۷۶	۰/۸۸۲	۲/۰۸۱	۱/۷۷	۸/۸۶	۶/۳۶	۶/۸۷	۹۱/۸	۰	۱۶۹/۲	۰
مقادیر برحسب درصد	۵۲/۲۳	۸/۸۹	۲۱	۱۷/۸۸	۴۰/۱۱	۲۸/۷۹	۳۱/۱	۵۱	۰	۹۴	۰

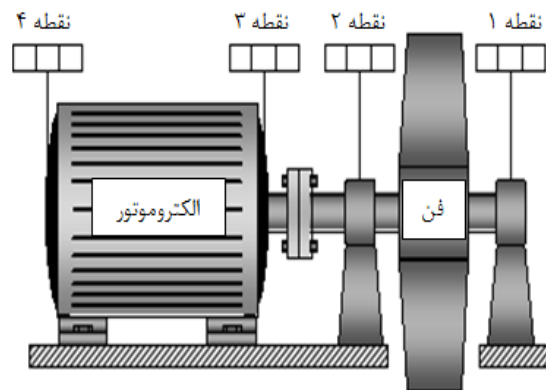


جدول ۶- نتایج عیب‌یابی فن ۲ با استفاده از چارت پیوست ۱

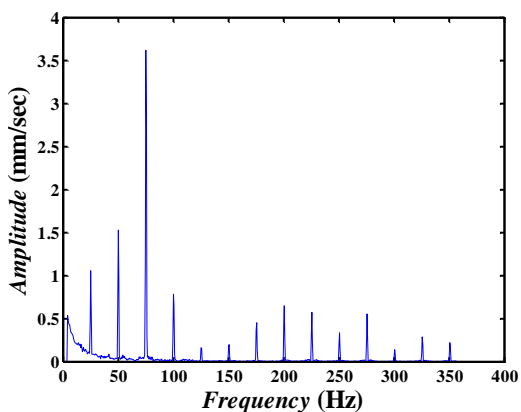
عیوب قابل تشخیص	مثلی	گوسی و ضرب سیگموئیدی	ناقوسی	شبکه عصبی [۱۰]
نابالانسی استاتیکی	۵۰	۵/۵۵	۵/۵۹	۰/۵۲
نابالانسی کوپلی	۵۰	۵/۵۵	۵/۵۸	۰/۰۱
نابالانسی	۵۰	۵/۵۵	۵/۵۹	۰/۰۱
ناهمراستایی زاویه‌ای	۵۰	۵/۵۵	۶/۵۴	۰/۴۶
ناهمراستایی موازی	۵۰	۵/۵۵	۵/۵۸	۰
ناهمراستایی ترکیبی	۵۰	۵/۵۵	۵/۵۸	۰/۳۲
شافت خمیده	۵۰	۹۴/۴۵	۹۳/۴۶	۹۹/۲۸
لقی مکانیکی	۵۰	۵/۵۵	۵/۵۸	۰



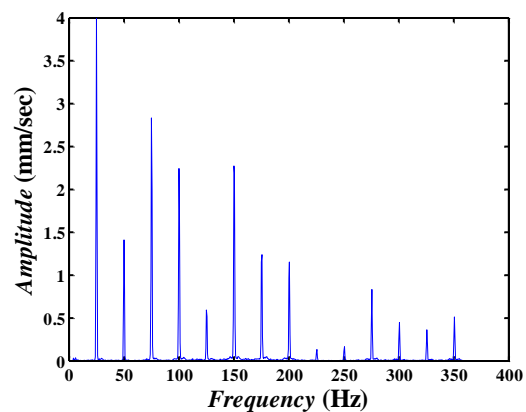
شکل ۱۱- طیف فرکانسی نقطه ۲ فن ۱۰۱ در جهت عمودی



شکل ۹- طرح شماتیک فن ۱۰۱ طرح توسعه آگلومراسیون



شکل ۱۲- طیف فرکانسی نقطه ۲ فن ۱۰۱ در جهت محوری



شکل ۱۰- طیف فرکانسی نقطه ۲ فن ۱۰۱ در جهت افقی

## جدول ۷- مقادیر RMS دامنه سرعت خطی سیگنال زمانی

برای نقطه ۲ فن ۱۰۱			
جهت افقی (mm/s)	جهت عمودی (mm/s)	جهت محوری (mm/s)	
۸/۸۶	۶/۳۶	۶/۸۷	نقطه ۲

در جدول ۸، اطلاعات مورد نیاز برای عیب‌یابی نقطه ۲ فن مورد بررسی آمده است. در سطر اول این جدول، ستون‌های اول تا چهارم، مقادیر دامنه سرعت ارتعاشات در فرکانس‌های غالب با توجه به جهت افقی (به دلیل حداکثر بودن مقدار RMS در این جهت) بدست آمده‌اند. قابل ذکر است که در سطر دوم جدول مذکور، مقادیر ستون‌های اول تا چهارم، از تقسیم دامنه سرعت ارتعاشات در نواحی فرکانسی مشخص شده، بر مقدار حداکثر ریشه میانگین مربعات در جهت افقی به دست آمده‌اند.

نتایج عیب‌یابی سیستم فازی و شبکه عصبی طراحی شده در مرجع [۱۰] برای نقطه ۲ فن ذکر شده با استفاده از سطر دوم جدول ۸ و چارت پیوست ۱، در جدول ۹ آمده است.

با توجه به جدول ۹، سیستم فازی برای نقطه ۲، عیب ناهم‌راستایی ترکیبی با احتمال ۵۰، ۹۴/۴۵ و ۹۴/۴۴ درصد را به ترتیب با استفاده از توابع عضویت؛ مثلثی، گوسی و ضرب سیگموئیدی و ناقوسی تشخیص داده است و شبکه عصبی، این عیب را با احتمال ۹۹/۴۱ درصد تشخیص داده است. در عمل نیز، عیب ناهم‌راستایی ترکیبی تشخیص داده شد.

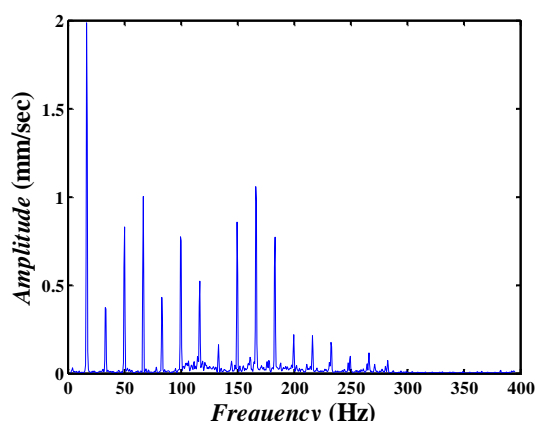
با بررسی نتایج جدول ۹، ملاحظه می‌شود که توابع عضویت گوسی، سیگموئیدی و ناقوسی برای این مثال، عیب را به درستی تشخیص می‌دهند؛ ولی تابع عضویت مثلثی همه عیوب را با احتمال ۵۰ درصد تشخیص داده است.

## جدول ۸- مشخصات طیف فرکانسی ارتعاشات فن ۱۰۱ آگلومراسیون در نقطه ۲

زوایای فاز		جهت غالب			فرکانس‌های غالب				مشخصه ارتعاشی فن مورد بررسی		
زاویه فاز ۳	زاویه فاز ۴	زاویه ۱	زاویه ۲	جهت افقی	جهت عمودی	جهت محوری	۱×RPM	۲×RPM		۳×RPM	n×RPM
۰	۱۷۴/۶	۱۷۳/۹	۱۶۲	۵/۸۴	۳/۶۲۲	۸/۲۴	۱/۶۵	۲/۸۳۳	۱/۴۱۱	۴	مقادیر خام
۰	۹۷	۹۶/۶	۹۰	۳۳	۲۰/۴۶	۴۶/۵۴	۱۶/۶۶	۲۸/۶۴	۱۴/۲۶	۴۰/۴۴	مقادیر برحسب درصد

## جدول ۹- نتایج عیب‌یابی فن ۱۰۱ با استفاده از چارت پیوست ۱

شبکه عصبی [۱۰]	ناقوسی	گوسی و ضرب سیگموئیدی	مثلثی	عیوب قابل تشخیص
۰	۵/۵۶	۵/۵۵	۵۰	نابالانسی استاتیکی
۰/۰۱	۵/۵۶	۵/۵۵	۵۰	نابالانسی کوپلی
۰/۰۲	۵/۵۶	۵/۵۵	۵۰	نابالانسی
۰/۲۷	۵/۵۶	۵/۵۵	۵۰	ناهم‌راستایی زاویه‌ای
۰/۵۳	۵/۵۶	۵/۵۵	۵۰	ناهم‌راستایی موازی
۹۹/۴۱	۹۴/۴۴	۹۴/۴۵	۵۰	ناهم‌راستایی ترکیبی
۰/۰۱	۵/۵۶	۵/۵۵	۵۰	شافت خمیده
۰/۰۵	۵/۵۶	۵/۵۵	۵۰	لقی مکانیکی



شکل ۱۶- طیف فرکانسی نقطه ۴ فن D۲ در جهت محوری

مقادیر ریشه میانگین مربعات دامنه سرعت ارتعاشات سیگنال زمانی برای نقطه ۴ فن مورد بررسی در جهت‌های افقی، عمودی و محوری، در جدول ۱۰ آورده شده است.

جدول ۱۰- مقادیر RMS دامنه سرعت خطی سیگنال زمانی

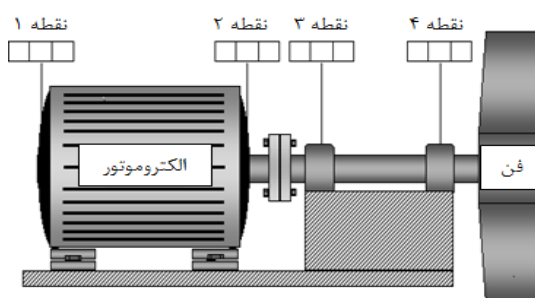
برای نقطه ۴ فن D۲

جهت محوری (mm/s)	جهت عمودی (mm/s)	جهت افقی (mm/s)	نقطه ۴
۴/۰۵	۶/۱۲	۱۲/۵۹	

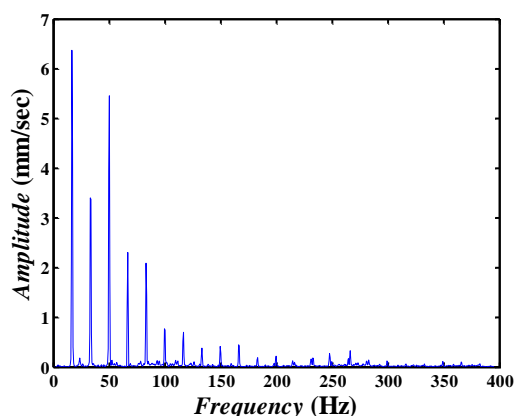
در جدول ۱۱، اطلاعات مورد نیاز برای عیب‌یابی نقطه ۴ فن مورد بررسی آمده است. در سطر اول این جدول، ستون‌های اول تا چهارم، مقادیر دامنه سرعت ارتعاشات در فرکانس‌های غالب با توجه به جهت افقی (به دلیل حداکثر بودن مقدار RMS در این جهت) بدست آمده‌اند. قابل ذکر است که در سطر دوم جدول مذکور، مقادیر ستون‌های اول تا چهارم، از تقسیم دامنه سرعت ارتعاشات در نواحی فرکانسی مشخص شده، بر مقدار حداکثر ریشه میانگین مربعات در جهت افقی به دست آمده‌اند.

نتایج عیب‌یابی سیستم فازی و شبکه عصبی طراحی شده در مرجع [۱۰] برای نقطه ۴ فن ذکر شده با استفاده از سطر دوم جدول ۱۱ و چارت پیوست ۱، در جدول ۱۲ آمده است. با توجه به جدول ۱۲، سیستم فازی برای نقطه ۴، عیب لقی مکانیکی با احتمال ۵۰، ۹۴/۴۵ و ۹۴/۴۰ درصد را به ترتیب با استفاده از توابع عضویت؛ مثلثی، گوسی و ضرب سیگموئیدی و ناقوسی تشخیص داده است و شبکه عصبی،

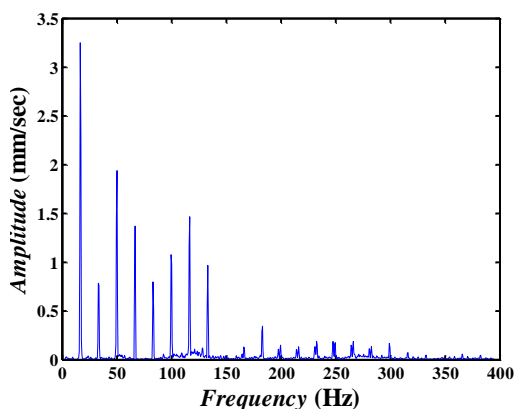
مثال ۴- فن D۲ نسوز طرح توسعه آگلومراسیون در مثال ۴، علت افزایش ارتعاشات فن D۲ نسوز طرح توسعه آگلومراسیون ذوب آهن اصفهان که به وسیله یک الکتروموتور با دور کارکرد ۹۹۰ RPM به حرکت در می‌آید، مورد بررسی قرار می‌گیرد. طرح شماتیک مجموعه فن در شکل ۱۳ و منحنی‌های طیف فرکانسی سرعت ارتعاشات مربوط به نقطه ۴ فن مذکور، در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ ملاحظه می‌شود.



شکل ۱۳- طرح شماتیک فن D۲ نسوز



شکل ۱۴- طیف فرکانسی نقطه ۴ فن D۲ در جهت افقی



شکل ۱۵- طیف فرکانسی نقطه ۴ فن D۲ در جهت عمودی

این عیب را با احتمال ۹۹/۶۲ درصد تشخیص داده است. در عمل نیز عیب لقی مکانیکی تشخیص داده شد. با بررسی نتایج جدول ۱۲ ملاحظه می‌شود که توابع عضویت

گوسی، سیگموئیدی و ناقوسی برای این مثال، عیب را به‌درستی تشخیص می‌دهند؛ ولی تابع عضویت مثلثی همه عیوب را با احتمال ۵۰ درصد تشخیص داده است.

جدول ۱۱- مشخصات طیف فرکانسی ارتعاشات فن D2 آگلومراسیون در نقطه ۴

زوایای فاز		جهت غالب			فرکانس‌های غالب				مشخصه ارتعاشی فن مورد بررسی		
زاویه فاز ۴	زاویه فاز ۳	زاویه فاز ۲	زاویه فاز ۱	جهت عمودی	جهت محوری	جهت افقی	n×RPM	۳×RPM		۲×RPM	۱×RPM
۱۷۴/۶	۰	۵/۴	۹	۴/۰۵	۶/۱۲	۱۲/۵۹	۱/۵۰۴	۲/۳۰۷	۵/۴۵۸	۶/۳۷۶	مقادیر خام
۹۷	۰	۳	۵	۱۷/۷۹	۲۶/۸۹	۵۵/۳۲	۹/۶۱	۱۴/۷۵	۳۴/۸۶	۴۰/۷۵	مقادیر برحسب درصد

جدول ۱۲- نتایج عیب‌یابی فن D2 با استفاده از چارت پیوست ۱

شبکه عصبی [۱۰]	ناقوسی	گوسی و ضرب سیگموئیدی	مثلثی	عیوب قابل تشخیص
۰/۲۸	۵/۶	۵/۵۵	۵۰	نابالانسی استاتیکی
۰/۰۵	۵/۶	۵/۵۵	۵۰	نابالانسی کوپلی
۰/۰۲۸	۵/۶	۵/۵۵	۵۰	نابالانسی
۰/۰۱	۵/۵۹	۵/۵۵	۵۰	ناهمراستایی زاویه‌ای
۰/۰۵	۵/۶	۵/۵۵	۵۰	ناهمراستایی موازی
۰	۵/۵۹	۵/۵۵	۵۰	ناهمراستایی ترکیبی
۰/۳۱	۵/۵۹	۵/۵۵	۵۰	شافت خمیده
۹۹/۶۲	۹۴/۴۰	۹۴/۴۵	۵۰	لقی مکانیکی

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی عیب‌یابی هوشمند ماشین‌های دوار به کمک منطق فازی پرداخته شد. این کار با استفاده از چارت جدیدی صورت گرفت که برای هویت ارتعاشات ماشین‌های دوار در یکی از مراجع ارائه شده بود. این چارت جدید، زاویه فاز را نیز علاوه بر محتوای فرکانسی در نظر می‌گیرد.

سیستم هوشمند ارائه شده بر اساس منطق فازی در این تحقیق، در حقیقت یک پایگاه قوانین بسیار ساده است. به این صورت که هر سطر از چارت هویت ارتعاشات، پیوست ۱، همان‌گونه که خوانده می‌شود، به یک گزاره شرطی تبدیل می‌شود. به این ترتیب پایگاه قوانین، فقط دارای ۸ دستور ساده است که برای تهیه آنها فقط از تجربه چارت هویت ارتعاشات استفاده شده، نیازی به تجربه افراد مجرب دیگر و

یا استفاده از الگوریتم‌هایی نظیر الگوریتم ژنتیک برای تهیه آن نیست. ضمن آنکه برخلاف شبکه‌های عصبی، نیاز به آموزش‌های مختلف و بعضاً پیچیده نیز ندارد. در این تحقیق، همچنین از توابع عضویت مختلفی همچون مثلثی، سیگموئیدی، گوسی، ناقوسی برای ورودی‌ها و خروجی‌ها استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد، توابع عضویت غیرخطی، نتایج بهتری نسبت به توابع عضویت خطی نظیر مثلثی ارائه می‌دهند که این می‌تواند ناشی از ماهیت غیرخطی رابطه ورودی و خروجی باشد. سیستم فازی طراحی شده برای چهار ماشین مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. این ماشین‌ها، جزء تجهیزات خطوط تولید شرکت ذوب‌آهن اصفهان بودند. سیستم هوشمند توانست چهار عیب نابالانسی استاتیکی، شافت خمیده، ناهمراستایی ترکیبی و لقی مکانیکی را در این چهار ماشین تشخیص دهد. تحلیل‌های کارشناسان ذوب آهن

طراحی شده با وجود سادگی زیادی که دارد، قدرت تشخیص صحیح عیوب را دارا است و می‌توان از آن برای تشخیص عیب برخط استفاده کرد. البته واضح است، ارتقا قابلیت اطمینان این سیستم هوشمند و به صورت کلی هر سیستم هوشمند دیگری، نیاز به آزمایش‌های متعدد و به کارگیری برخط آن دارد. همچنین برای این کار می‌توان از ترکیب آن با دیگر سیستم‌های هوشمند نیز استفاده کرد.

در بررسی عیوب این ماشین‌ها، دقیقاً منطبق بر تشخیص سیستم هوشمند طراحی شده بود و پس از باز کردن ماشین‌ها نیز، این عیوب به صورت قطعی تایید شدند. ضمن آنکه نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از سیستم هوشمند مبتنی بر شبکه عصبی ارایه شده در مرجع [۱۰] مقایسه شد. این مقایسه نشان می‌دهد در هر چهار مورد، عیب تشخیص داده شده یکی هستند. نتایج حاصل نشان داد، سیستم

## ۶- پیوست ۱

### چارت جدید تعیین هویت ارتعاشات مکانیکی [۱۰]

فرکانس‌های غالب	جهت غالب	زوایای فاز													
عیوب و مشخصه ارتعاشی آنها	جهت عمودی	جهت عمودی	جهت افقی	n×RPM	۳×RPM	۲×RPM	۱×RPM					اختلاف فاز یاتاقان با شاسی (زاویه فاز ۴)	اختلاف فاز محوری دو یاتاقان (زاویه فاز ۳)	اختلاف فاز افقی یا عمودی دو یاتاقان (زاویه فاز ۲)	اختلاف فاز افقی - عمودی یک یاتاقان (زاویه فاز ۱)
نابالانسی استاتیکی	۶۵	۱۸	۱۰	۷	۷۰	۲۰	۱۰	۹۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
نابالانسی کوپلی	۶۵	۱۸	۱۰	۷	۷۰	۲۰	۱۰	۹۰	۰	۰	۱۸۰	۰	۰	۰	۰
نابالانسی	۶۵	۱۸	۱۰	۷	۷۰	۲۰	۱۰	۹۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ناهمراستایی زاویه‌ای	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	۳۰	۲۰	۵۰	۰ تا ۱۸۰	۰	۱۸۰	۰	۰	۰	۰	۰
ناهمراستایی موازی	۲۰	۴۰	۳۰	۱۰	۴۰	۳۰	۳۰	۱۸۰ تا ۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۰	۰	۰	۰	۰
ناهمراستایی ترکیبی	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	۳۰	۲۰	۵۰	۱۸۰ تا ۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۰	۰	۰	۰	۰
شافت خمیده	۷۰	۱۰	۱۰	۱۰	۶۰	۲۰	۲۰	۹۰	۱۸۰	۱۸۰	۰	۰	۰	۰	۰
لقی مکانیکی	۳۰	۲۰	۲۰	۳۰	۵۰	۴۰	۱۰	۰	۱۸۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

## ۷- مراجع

- [1] ضیایی‌راد س، نوریان س (۱۳۸۱) کاربرد ارتعاشات در پایش وضعیت و عیب‌یابی ماشین‌آلات دوار. موسسه علمی دانش پژوهان برین، اصفهان.
- [2] ستوده م، جورابیان م (۱۳۹۱) مانیتورینگ و عیب‌یابی ماشین‌های دوار بر اساس طیف توان بوسیله منطق فازی. پانزدهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی برق کاشان، ایران: ۶-۱
- [3] Huang YP, Wang SF (1997) The identification of fuzzy grey prediction system by genetic algorithms. Int J Syst Sci 28(1): 15-24.
- [4] Wang WJ, McFadden PD (1996) Application of wavelets to gearbox vibration signals for fault detection. J Sound Vibration 192(5): 927-939.
- [5] Mechefske CK (1998) Objective machinery fault diagnosis using fuzzy logic. Mech Syst Signal Pr 12(6): 855-862.
- [6] Yang M, Shen Q (2008) Fuzzy diagnosis of turbomachines. Int J Know-Based Intell Eng Syst 12(2): 137-146.
- [7] Paily B, Kumaravel S, Basu M, Conlon M (2015) Fault analysis of VSC HVDC systems using fuzzy logic. Proc. IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES). India: 1-5.

- [۱۱] معصومی غ، صالحی ع، میمندپور ب (۱۳۸۸) کاربرد منطق فازی در فرآیندهای تصمیم‌گیری واحد پایش وضعیت و تعمیرات دستگاه‌ها. چهارمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب‌یابی ماشین‌آلات. ایران، تهران: ۸۹۴-۹۰۲.
- [۱۲] کیا م (۱۳۸۹) Matlab منطق فازی در کیان رایانه سبز، تهران.
- [8] Sulaiman NA, Othman MF, Abdullah H (2015) Fuzzy Logic Control and Fault Detection in Centralized Chilled Water System. Proc. IEEE Symposium Series on Computational Intelligence. South Africa: 8-13.
- [9] Wang T, Zhang G, Zhao J, He Z, Wang J, Perez-Jimenez MJ (2015) Fault Diagnosis of Electric Power Systems Based on Fuzzy Reasoning Spiking Neural P Systems. 30(3): 1182-1194 .
- [۱۰] اسماعیلی م (۱۳۹۳) ارزیابی چارت جدید تعیین هویت ارتعاشات برای ماشین‌آلات دوار. تز کارشناسی ارشد دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد.