

# آشکارسازی و تحلیل سیگنال‌های آکوستیک تغییردهنده‌های تپ زیر بار ترانسفورماتورهای قدرت جهت تشخیص خطا

عادل یونسی، عباس غایبلو و حسن‌رضا میرزایی

برای پایداری و قابلیت اطمینان در شبکه‌های برق هستند. این تجهیزات علاوه بر قیمت اولیه بالا، هزینه تعمیر و نگهداری بالایی نیز دارند [۱]. نوآوری دکتر جانسون در سال ۱۹۲۶ در طراحی کلید برگرداننده<sup>۳</sup> و انتخاب‌کننده تپ<sup>۴</sup>، مبدأ پیدایش تغییردهنده‌های تپ قابل قطع زیر بار مقاومتی شد [۲].

با توجه به اهمیت بالای تغییردهنده‌های تپ قابل قطع زیر بار و نرخ خرابی بالای این تجهیزات به دلیل حرکت‌های مکانیکی نسبتاً شدید و ایجاد قوس الکتریکی با انرژی بالا، لازم است که صحت عملکرد آنها به‌صورت مداوم توسط روش‌هایی که در عملکرد عادی ترانسفورماتور خللی ایجاد نکنند، مورد ارزیابی برخط قرار گیرند. آشکارسازی سیگنال آکوستیک ناشی از عملکرد تغییردهنده تپ، یکی از روش‌های مهم در تشخیص عیوب آنهاست. این سیگنال‌های آکوستیک توسط یک سنسور شتاب‌سنج از مخزن ترانسفورماتور در حین تغییر تپ مورد آشکارسازی قرار می‌گیرند؛ سپس با استخراج ویژگی از این سیگنال‌های آکوستیک به تشخیص نوع و شدت عیب پرداخته می‌شود.

در مراجع مختلف، کارهای متعددی در زمینه تشخیص عیوب تغییردهنده‌های تپ انجام شده است. کانگ و بیرت ویستل [۳] در سال ۲۰۰۱ با تمرکز بر تبدیل موجک پیوسته به تشخیص عیوب تغییردهنده تپ پرداخته‌اند. مراحل اجرایی به‌ترتیب شامل استخراج پوش سیگنال آکوستیک، اعمال تبدیل موجک پیوسته روی آن، آستانه‌گذاری<sup>۵</sup> تبدیل موجک پیوسته<sup>۶</sup> (CWT) و ترسیم خط‌الرأس‌های<sup>۷</sup> نمودارهای دامنه CWT است. از این نمودارها شاخصه‌هایی مانند محل نقاط بیشینه و تعداد و اطلاعات زمانی آنها استخراج شده است. کانگ و بیرت ویستل [۴] در کار مشابهی در سال ۲۰۰۳ نتایج یک رشته مطالعه انجام‌شده جهت به‌دست آوردن یک سیستم مانیتورینگ کاربردی برای تعمیر و نگهداری تغییردهنده تپ را ارائه داده‌اند. مراحل تشخیص خطا نیز به‌ترتیب شامل نرمالیزه کردن، محاسبه پوش و سپس CWT است.

ریوس و بورگوس در سال ۲۰۰۹ از ۷۲ سیگنال آکوستیک دریافت‌شده از یک ترانسفورماتور با حدود ۲۸۰۰ عملکرد قبلی تغییردهنده تپ استفاده کرده‌اند [۵]. مراحل پردازش سیگنال شامل نرمالیزه کردن، هم‌زمان‌سازی، محاسبه پوش بر پایه تبدیل هیلبرت، آستانه‌گذاری، هموارسازی سیگنال پوش، تبدیل موجک با موجک‌های مادر مختلف و محاسبه شاخص‌ها است. همین نویسندگان در [۶] در سال ۲۰۱۰ از پوش سیگنال آکوستیک

چکیده: تغییردهنده‌های تپ قابل قطع زیر بار یکی از مهم‌ترین تجهیزات ترانسفورماتورهای قدرت محسوب می‌شوند. این تجهیزات به دلیل داشتن حرکت‌های مکانیکی شدید و ایجاد قوس الکتریکی با انرژی بالا، دارای نرخ خرابی بالایی نسبت به دیگر تجهیزات داخلی ترانسفورماتور هستند. ارزیابی برخط و دقیق صحت عملکرد عادی تغییردهنده‌های تپ توسط روش‌هایی که در عملکرد عادی ترانسفورماتور خللی ایجاد نکنند، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در این مقاله، روند تشخیص عیوب تغییردهنده‌های تپ با استفاده از ویژگی‌های استخراج‌شده از سیگنال‌های آکوستیک مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. این سیگنال‌ها توسط یک سنسور شتاب‌سنج از مخزن یک ترانسفورماتور قدرت و در حین تغییر تپ به‌صورت عملی آشکارسازی شده‌اند. در این مقاله علاوه بر بررسی ویژگی‌های معمول، دو ویژگی جدید شاخص زمان و شاخص فرکانس معرفی شده است. نهایتاً جهت انتخاب ویژگی‌های مناسب جهت تشخیص عیوب و ارائه روشی کارآمد جهت دسته‌بندی آنها، برخی از داده‌های عملی موجود با توجه به نتایج ارائه‌شده در مراجع به‌صورت تصادفی معیوب شده و توسط روش ماشین بردار پشتیبان، داده‌های سالم و معیوب به‌طور موفقیت‌آمیزی طبقه‌بندی شده‌اند.

کلیدواژه: ترانسفورماتور، تغییردهنده‌های تپ، تشخیص خطا، سیگنال آکوستیک بدنه، تبدیل موجک، ماشین بردار پشتیبان.

## ۱- مقدمه

ولتاژ شینه‌ها در شبکه‌های قدرت و توزیع باید در شرایط مختلف بار در محدوده مجاز نگه داشته شوند. تغییر نسبت تبدیل ترانسفورماتورها توسط تغییردهنده تپ<sup>۱</sup>، یکی از روش‌های معمول در تنظیم ولتاژ این شبکه‌ها است. تغییردهنده‌های تپ امروزی، کنترل ولتاژ را در محدوده  $\pm 15\%$  درصد و پله‌های ۱ تا ۲/۵ درصد مقدور می‌سازند.

تغییردهنده‌های تپ در دو نوع قابل قطع زیر بار<sup>۲</sup> (OLTC) و غیر قابل قطع زیر بار ساخته می‌شوند. تغییردهنده‌های تپ قابل قطع زیر بار از اجزای استراتژیک ترانسفورماتورهای قدرت بوده و از تجهیزات ضروری

این مقاله در تاریخ ۵ دی ماه ۱۴۰۲ دریافت و در تاریخ ۱۲ اردیبهشت ماه ۱۴۰۳ بازنگری شد.

عادل یونسی، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران،  
(email: adel.younesi@znu.ac.ir)

عباس غایبلو (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران،  
(email: a.ghayebloo@znu.ac.ir)

حسن‌رضا میرزایی، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران،  
(email: hr.mirzaei@znu.ac.ir)

3. Diverter Switch
4. Tap Selector
5. Threshold
6. Continuous Wavelet Transform
7. Ridge Plot

1. Tap Changer
2. Online Tap Changer

دریافتی را به روش طیف انرژی کوتاهمدت بررسی کرده‌اند و در چند مرجع جدید از روش‌های جدید واکاوی داده‌ها نظیر خوشه‌بندی<sup>۷</sup> فازی در [۱۶] در سال ۲۰۲۱ و ادغام داده<sup>۸</sup> در [۱۷] در سال ۲۰۲۳ جهت تشخیص تشخیص عیوب مکانیکی تغییردهنده تپ ترانسفورماتورهای قدرت استفاده شده است.

در این مقاله انواع روش‌های تشخیص عیوب تغییردهنده تپ از طریق آشکارسازی سیگنال آکوستیک ناشی از عملکرد آنها مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. سیگنال‌های آکوستیک توسط یک سنسور شتاب‌سنج از مخزن یک ترانسفورماتور قدرت واقعی در حین تغییر تپ مورد آشکارسازی قرار گرفته است. همچنین استخراج ویژگی از سیگنال آکوستیک در چهار دسته ویژگی‌های ظاهری حوزه زمان، ویژگی‌های تبدیل فوری در حوزه فرکانس، ویژگی‌های ظاهری پوش و ویژگی‌های تبدیل موجک، بررسی و کارایی آنها در تشخیص عیب مقایسه شده است. در این مقاله علاوه بر ویژگی‌های ذکر شده، دو ویژگی جدید با نام‌های شاخص زمان و شاخص فرکانس معرفی گردیده است. در نهایت پس از استخراج مقادیر ویژگی‌های مختلف برای انتخاب ویژگی‌های مناسب جهت تشخیص عیوب و ارائه روشی کارا برای دسته‌بندی آنها، برخی از داده‌های عملی موجود با توجه به نتایج عملی ارائه شده در مراجع معتبر به صورت تصادفی معیوب شده و توسط روش ماشین بردار پشتیبان<sup>۹</sup>، داده‌های سالم و معیوب به طور موفقیت‌آمیزی طبقه‌بندی شده‌اند. بنابراین به طور خلاصه از نوآوری‌های این مقاله می‌توان به اخذ داده‌های عملی و استخراج مقادیر ویژگی‌های پرتکرار حوزه زمان، فرکانس، پوش و ویولت سیگنال آکوستیک، پیشنهاد دو شاخص زمان و فرکانس برای کاربرد مد نظر و دسته‌بندی خطاها به روش بردار پشتیبان برای انتخاب ویژگی‌های مناسب جهت تشخیص عیوب اشاره کرد.

در ادامه و در بخش دوم به ساختمان کلی تغییردهنده تپ و بررسی نحوه عملکرد آن می‌پردازیم. در بخش سوم به تشریح مشخصات سیستم عملی و در بخش چهارم به نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف پردازش سیگنال پرداخته می‌شود. در بخش پنجم نیز نتایج دسته‌بندی داده‌ها به لحاظ سالم و معیوب بودن به روش ماشین بردار پشتیبان آمده و نهایتاً در بخش ششم جمع‌بندی مطالب ارائه شده است.

## ۲- ساختمان تغییردهنده تپ و نحوه عملکرد آن

تغییردهنده‌های تپ قابل قطع زیر بار در دو نوع کلید انتخاب‌کننده و یا انتخاب‌کننده تپ-کلید برگرداننده ارائه می‌شوند. در نوع کلید انتخاب‌کننده، دایورتر و انتخاب‌کننده تپ، یکجا در داخل مخزن تغییردهنده‌های تپ قرار دارند. این نوع از تغییردهنده‌های تپ برای ولتاژهای تا ۱۴۵ kV به صورت اتصال ستاره یا مثلث و جریان ۷۰۰ A طراحی شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل ۱-الف، نمونه‌ای از این نوع تغییردهنده تپ را نمایش می‌دهد. در نوع انتخاب‌کننده تپ-کلید-برگرداننده، بخش کلید برگرداننده در یک مخزن روغن جدا از مخزن اصلی ترانسفورماتور قرار دارد. در این نوع تغییردهنده تپ، تپ سلکتور از کلید برگرداننده کاملاً جدا بوده و در داخل روغن ترانسفورماتور می‌باشد. این نوع از تغییردهنده‌های تپ برای ولتاژهای تا ۴۲۰ kV و جریان‌های تا ۴۵۰۰ A مورد استفاده قرار می‌گیرند که شکل ۱-ب نمای کلی نمونه‌ای از آن را نشان می‌دهد.

حاصل از تبدیل هیلبرت و محاسبه تبدیل موجک آن برای تشخیص خطا در تپ‌سلکتور استفاده کرده‌اند. در این مقاله شاخص‌هایی مانند تعداد نقاط بیشینه ارتعاش، دامنه نقاط بیشینه ارتعاش، زمان بین نقاط بیشینه ارتعاش، باند فرکانسی نقاط بیشینه و ضرایب تقریب موجک برای تشخیص خطا استفاده شده است. عیب‌های مطالعه شده در این مرجع شامل شل شدن فنرها، شکست میله اتصالات الکتریکی<sup>۱</sup>، سایدگی اتصالات الکتریکی کلید انتخاب‌کننده<sup>۲</sup> و صدمه به اتصالات الکتریکی در اثر قوس هستند. در این مطالعه، حذف شدن برخی نقاط بیشینه آکوستیک و اختلاف زمانی بین نقاط بیشینه به عنوان مناسب‌ترین پارامترها برای تشخیص عیب، انتخاب شده‌اند. نویسندگان مذکور در [۷] در سال ۲۰۱۷ با مدل‌سازی المان محدود بخش متحرک کلید برگرداننده، فرکانس‌های طبیعی آن را استخراج و از آن برای تشخیص خطا استفاده کرده‌اند.

سئو [۸] در سال ۲۰۱۸ یک طرح عملی مبتنی بر اندازه‌گیری سیگنال ارتعاش ارائه می‌دهد که شامل تفسیر و مقایسه شکل موج سیگنال‌های ارتعاش است. در این مطالعه بر اساس ضریب همبستگی، رتبه اسپیرمن محاسبه شده و با ضریب همبستگی شکل موج‌های دیگر مقایسه می‌گردد. وی در سال ۲۰۱۸ در [۹]، یک روش پردازش سیگنال بر اساس فیلتر Savitzky-Golay ارائه داده است. همچنین در سال ۲۰۱۸، لو و همکاران [۱۰] تبدیل موجک سیگنال آکوستیک را استفاده کرده‌اند. نتایج ارائه شده نشان می‌دهند که میانگین انرژی تبدیل موجک را می‌توان به عنوان یک ویژگی جهت تشخیص عیوب استفاده کرد. لی و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۸ یک روش برای تجزیه و تحلیل سیگنال ارتعاش تغییردهنده تپ بر پایه تجزیه و تحلیل چند موجک GHM<sup>۳</sup> ارائه کرده‌اند. در این مقاله و بر اساس این روش تحلیل، خطاهای شل شدن فنر، فرسودگی فنر و شکستگی فنر با ایجاد این عیوب به صورت عملی تجزیه و تحلیل شده است. در این مقاله نتیجه‌گیری شده که بارزترین ویژگی برای خطاهای فنر، تغییر انرژی ضرایب موجک است که با گسترش خطاها به تدریج کاهش می‌یابد. همچنین آنتروپی و انحراف معیار به ترتیب روند تغییرات صعودی و نزولی از خود نشان می‌دهند.

یانگ و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۹ روش تجزیه حالت متغیر<sup>۴</sup> را برای تشخیص عیب مکانیکی در کلید برگرداننده بررسی نموده‌اند. در این روش، سیگنال ارتعاش تغییردهنده تپ به چندین سیگنال خطی، تقسیم و چند پارامتر شامل دامنه و فاصله زمانی هر نقطه بیشینه<sup>۵</sup> محاسبه می‌شود. سپس تجزیه و تحلیل آماری بر اساس سه عیب مصنوعی ایجاد شده انجام گردیده است. ونگ و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۹ ویژگی‌های بافتی سیگنال ارتعاش OLTC را با استفاده از یک الگوی باینری بهبودیافته محلی<sup>۶</sup> (LBP) استخراج کرده‌اند. همچنین ژکسین زنگ و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۲۰ جهت پردازش سیگنال تغییردهنده تپ، یک الگوریتم فیلتر وینر برای سیگنال ارتعاش OLTC پیشنهاد داده‌اند تا به طور تطبیقی نویز موجود در محل را کاهش دهند. در ادامه، روش استخراج پوش سیگنال ارتعاش و سیگنال جریان موتور درایو توسط آنها پیشنهاد شده است. همچنین در [۱۵] در سال ۲۰۲۲ نویسندگان تأثیر حساسیت سنسور، روش نصب و محل نصب بر روی سیگنال آکوستیک

1. Electrical Contacts
2. Selector Switch
3. GHM Multi-Wavelet Analysis
4. Variational Mode Decomposition
5. Peak
6. Local Binary Pattern

7. Clustering
8. Data Fusion
9. Support Vector Machine

### ۳-۳ تقویت کننده

تقویت کننده استفاده شده ساخت شرکت B&K دانمارک، دوکاناله، با محدوده دمای کارکرد از ۱۰- تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد و فرکانس کاری ۰/۱ Hz تا ۱۰۰ kHz است. بهره قابل تنظیم این تقویت کننده از ۰/۱ mV/pC تا ۱۰ mV/pC می‌باشد.

### ۳-۴ اسیلوسکوپ استفاده شده

در آزمون‌های عملی انجام شده از یک اسیلوسکوپ چهارکاناله با پهنای باند ۲۵ MHz و نرخ نمونه برداری ۱۰۰ MS/sec استفاده شده است.

### ۴- نتایج

در این بخش نتایج حاصل از تحلیل ۳۶ سیگنال ثبت شده در ۱۹ تپ (برای هر تغییر تپ دو سیگنال آکوستیک در جهت افزایش و کاهش تپ) ارائه خواهد شد. تحلیل‌ها در چهار حوزه زمان، فرکانس، پوش و تبدیل موجک گسسته روی داده‌ها، انجام و در هر حوزه، مقادیر ویژگی‌های منتخب گزارش شده است.

### ۴-۱ نتایج تحلیل در حوزه زمان

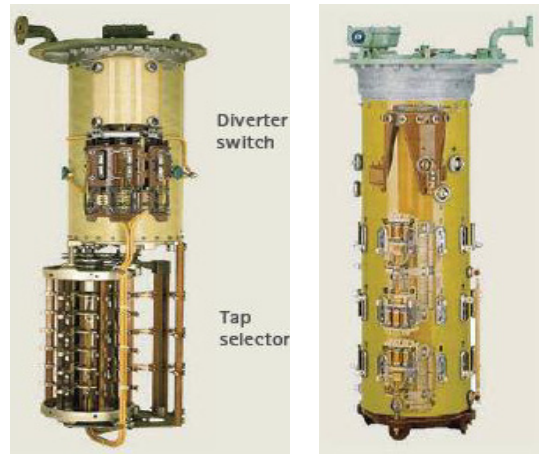
شکل ۴ یک نمونه سیگنال آکوستیک ثبت شده در حین تغییر تپ را نشان می‌دهد. با توجه به مراحل عملکرد تغییردهنده تپ می‌توان این سیگنال را به چهار بخش تقسیم بندی نمود:

بخش اول: در این بخش با عملکرد مکانیزم موتور- درایو OLTC، ذخیره سازی انرژی در مجموعه فتراها انجام می‌شود.  
بخش دوم: در این بخش، اتصال به تپ بعدی توسط انتخاب کننده تپ بدون عبور جریان الکتریکی انجام می‌شود.  
بخش سوم: انرژی شارژ شده در فنر، آزاد و با کلیدزنی سریع جریان بار در کلید برگرداننده، جریان به تپ جدید منتقل می‌شود.  
بخش چهارم: روند کامل شده و موتور درایو متوقف می‌گردد.

همان طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، سیگنال آکوستیک شامل تعدادی نقاط بیشینه است که می‌توان ویژگی‌های ظاهری آن از جمله دامنه و زمان بین این نقاط بیشینه را اندازه گیری کرد و نسبت به ایجاد یک پایگاه داده و مقایسه بین حالت‌های سالم و معیوب تغییردهنده تپ استفاده نمود. به دلیل اینکه فرایند تولید امواج آکوستیک تا حدودی ماهیت تصادفی دارد، دو سیگنال ضبط شده بین دو تپ مشابه برای یک ترانسفورماتور سالم نیز با وجود شباهت‌های بسیار، کاملاً یکسان نیستند و تفاوت‌هایی را می‌توان در دامنه‌های نقاط بیشینه سیگنال‌های آکوستیک مشاهده کرد. برای کاهش این تفاوت‌های غیرواقعی، معمولاً سیگنال‌ها را نرمالیزه می‌کنند. سیگنال نرمالیزه شده با استفاده از (۱) حاصل تقسیم سیگنال به مقدار مؤثر آن محاسبه می‌شود. از این رو لازم به ذکر است که در ادامه، همه سیگنال‌های ارائه شده، نرمالیزه شده و بدون واحد هستند

$$v_n(k) = \frac{v(k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N v(i)^2}} \quad (1)$$

در این رابطه  $v$  سیگنال ارتعاش،  $k$  و  $i$  شماره نمونه،  $N$  تعداد کل نمونه‌ها و  $v_n$  سیگنال نرمالیزه شده است. با توجه به اینکه تنش‌های مکانیکی و الکتریکی شدید در کلید برگرداننده رخ می‌دهد، نرخ خرابی آن نسبت به بخش انتخاب کننده تپ بسیار بالاتر است. بنابراین بخش سوم سیگنال آکوستیک که مربوط به عملکرد کلید برگرداننده است، مهم‌تر



(ب)

(الف)

شکل ۱: تغییردهنده تپ، (الف) نوع کلید انتخاب کننده و (ب) نوع انتخاب کننده تپ- کلید برگرداننده [۱۸].

تفاوت اصلی بین تغییردهنده تپ غیر قابل قطع زیر بار و تغییردهنده تپ قابل قطع زیر بار، وجود بخش کلید برگرداننده می‌باشد. کلید برگرداننده، کلیدی است که عمل کلیدزنی و قطع و وصل جریان را انجام می‌دهد. قبل از عملکرد کلید برگرداننده، عمل انتخاب تپ بعدی توسط انتخاب کننده تپ در طی یک فرایند آرام و بدون قطع جریان بار انجام می‌گیرد.

فرایند مکانیکی بسیار سریع تغییر تپ در کلید برگرداننده با استفاده از یک فنر که قبلاً توسط یک موتور شارژ شده است، در زمانی بسیار کوتاه (در حد چند ده میلی ثانیه) انجام می‌شود. جریان بار در هنگام اتصال کوتاه موقت دو تپ، توسط مقاومتهای انتقالی محدود می‌گردد. مراحل تغییر تپ در شکل ۲ نشان داده شده است.

### ۳- مشخصات سیستم آزمون عملی

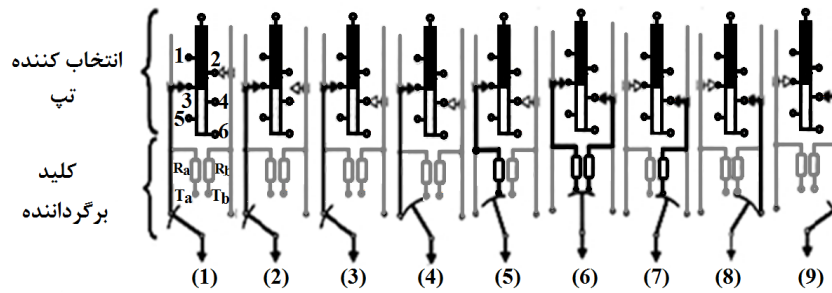
جهت اندازه گیری سیگنال‌های آکوستیک مخزن ترانسفورماتور در طی عملیات تغییر تپ، ابتدا آزمایش‌های اولیه برای پیدا کردن بهترین مکان نصب شتابسنج با نسبت سیگنال به نویز بالاتر انجام شده است. سپس ارتعاشات با استفاده از یک سنسور شتابسنج که در دیواره مخزن ترانسفورماتور و در روبه روی تغییردهنده تپ نصب شده است، آشکارسازی و پس از تقویت توسط تقویت کننده با اسیلوسکوپ ثبت می‌شوند. شکل ۳ شمای کلی سیستم آزمون عملی استفاده شده را نشان می‌دهد.

### ۳-۱ ترانسفورماتور و تغییردهنده تپ

ترانسفورماتور تحت آزمایش، یک ترانسفورماتور ۳ MVA با نسبت تبدیل ۶۳/۲۰ kV ساخت شرکت ایران ترانسفو و دارای یک تغییردهنده تپ قابل قطع با ۱۹ تپ است. تغییردهنده تپ، ساخت شرکت MR با شماره مدل MS III ۳۰۰۷-۷۲.۵/B ۱۰۰۹IW بوده و به دلیل نبودن ترانسفورماتور، تمام داده‌های برداشت شده برای حالت سالم هستند.

### ۳-۲ سنسور شتابسنج

سنسور شتابسنج استفاده شده از نوع پیزوالکتریک، ساخت شرکت B&K دانمارک با شماره مدل ۴۳۸۲ می‌باشد. ضریب حساسیت برابر ۳/۱۶ pC/g و محدوده فرکانس کاری آن یک ۰/۱ Hz تا ۸/۴ kHz با فرکانس رزونانس ۲۸ kHz است. این سنسور می‌تواند شتاب‌های آکوستیک سینوسی تا ۲۰۰۰ برابر شتاب گرانش (g) را اندازه گیری کند و در برابر شوک‌های لحظه‌ای تا ۵۰۰۰ برابر شتاب گرانش مقاوم است.



شکل ۲: مراحل تغییر تپ در OLTC نوع مقاومتی [۲].



شکل ۳: شمای کلی سیستم آزمون عملی شامل ترانسفورماتور قدرت، سنسور شتاب‌سنج، تقویت کننده و اسیلوسکوپ.

جدول ۱: دامنه نقاط بیشینه ۳۶ سیگنال آکوستیک.

دامنه نقاط بیشینه	بیشینه ۱	بیشینه ۲	بیشینه ۳	بیشینه ۴	بیشینه ۵	بیشینه ۶
میانگین	۰٫۰۲۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۲۰	۰٫۰۲۰
انحراف معیار	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۳	۰٫۰۲۲
درصد انحراف معیار	۱۵٫۸۸	۲۸٫۴۷	۲۹٫۲۳	۴۳٫۶۰	۱۹٫۳۸	۱۰۸٫۸۲

جدول ۲: زمان وقوع نقاط بیشینه ۳۶ سیگنال آکوستیک.

زمان وقوع	بیشینه ۱	بیشینه ۲	بیشینه ۳	بیشینه ۴	بیشینه ۵	بیشینه ۶
میانگین (ثانیه)	۴٫۱۷	۴٫۲۳	۴٫۲۶	۴٫۲۹	۴٫۳۲	۴٫۳۵
انحراف معیار	۰٫۰۲۳	۰٫۰۲۲	۰٫۰۲۷	۰٫۰۱۷	۰٫۰۲۵	۰٫۰۲۱
درصد انحراف معیار	۰٫۵۵	۰٫۵۲	۰٫۶۳	۰٫۳۹	۰٫۵۷	۰٫۴۸

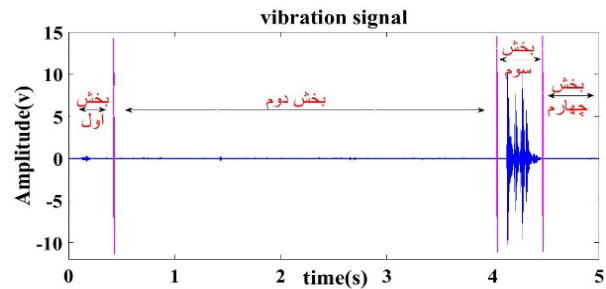
جدول ۳: اختلاف زمانی بین نقاط بیشینه ۳۶ سیگنال آکوستیک.

اختلاف زمانی نقاط بیشینه	۱-۲	۲-۳	۳-۴	۴-۵	۵-۶
میانگین (میلی ثانیه)	۶۱	۲۷	۳۳	۲۴	۲۹
انحراف معیار	۱۳	۱۲	۱۳	۱۲	۸
درصد انحراف معیار	۲۲٫۱۲	۴۵٫۴۹	۴۱٫۸۳	۵۰٫۷۱	۲۹٫۶۳

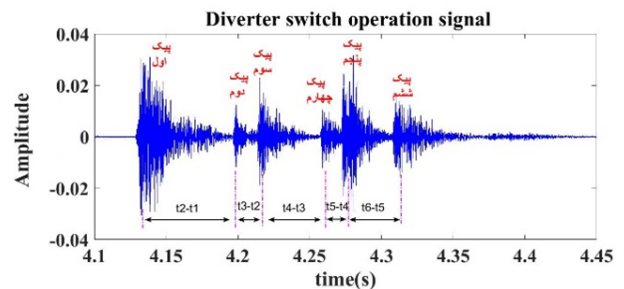
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v_n(i) - \mu)^2}{N}} \quad (۳)$$

$$\sigma(\%) = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 \quad (۴)$$

بدیهی است که ویژگی‌هایی مانند دامنه نقاط بیشینه ششم و چهارم و یا اختلاف زمانی بین نقاط بیشینه چهارم و پنجم یا اختلاف زمانی بین نقاط بیشینه دوم و سوم که دارای درصد انحراف معیار نسبتاً بالاتری هستند، نمی‌توانند ویژگی‌های مناسبی جهت تشخیص خطا باشند؛ زیرا



شکل ۴: یک نمونه سیگنال آکوستیک ناشی از تغییر تپ.

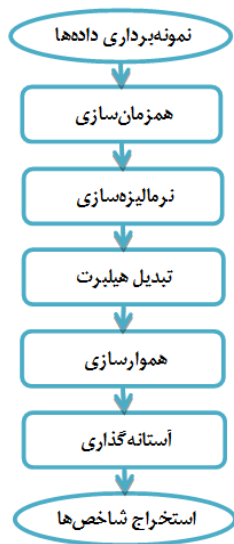


شکل ۵: بزرگ‌نمایی بخش سوم سیگنال آکوستیک نمونه.

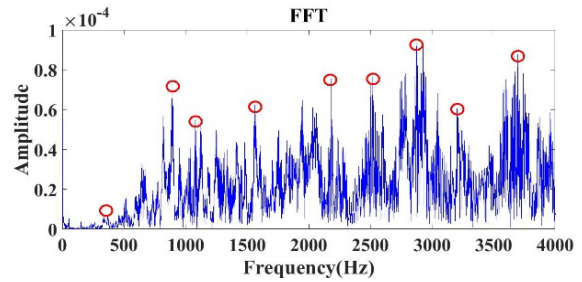
بوده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. این بخش از سیگنال به همراه ویژگی‌های حوزه زمان آن، پس از نرمالیزه کردن با وضوح بیشتر در شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول ۱ تا ۳ به ترتیب مقادیر میانگین، انحراف معیار و درصد انحراف معیار دامنه و زمان وقوع و اختلاف‌های زمانی بین نقاط بیشینه بخش سوم سیگنال‌های آکوستیک به دست آمده از ۳۶ آزمون عملی انجام شده را در حوزه زمان بعد از نرمالیزه کردن سیگنال نشان می‌دهند. این مقادیر به ترتیب از روابط استاندارد (۲) تا (۴) به دست آمده‌اند. در این روابط  $\mu$  میانگین سیگنال و  $\sigma$  انحراف معیار است

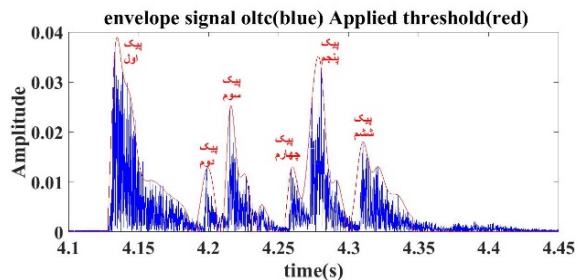
$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N v_n(i)}{N} \quad (۲)$$



شکل ۷: روندنمای مراحل تحلیل زمانی پوش.



شکل ۶: تبدیل فوریه اعمال شده به سیگنال آکوستیک نمونه.



شکل ۸: پوش سیگنال آکوستیک نمونه (نمودار آبی)، پس از هموارسازی و اعمال حد آستانه (نمودار خط چین قرمز).

این داده‌ها مربوط به ترانس سالم بوده و انتظار این است که پراکندگی داده‌ها زیاد نباشد. تنها در صورتی می‌توان از این ویژگی‌ها استفاده کرد که در صورت بروز خطا، مقادیر آنها تغییرات بسیار بالایی نسبت به حالت سالم داشته باشند.

## ۴-۲ نتایج تحلیل سیگنال در حوزه فرکانس

با اعمال تبدیل فوریه بر روی سیگنال‌های زمانی، امکان بررسی آن در حوزه فرکانس فراهم می‌شود. تبدیل فوریه، میزان شباهت سیگنال را با خانواده‌ای از توابع سینوسی و کسینوسی با فرکانس‌های مختلف سنجیده و وزن هر یک از این توابع را در تشکیل سیگنال مورد نظر تعیین می‌کند؛ بدین ترتیب، محتوای فرکانسی سیگنال شناسایی می‌شود. تبدیل فوریه سریع (FFT) از (۵) به دست می‌آید که در این رابطه،  $x_n$  نمونه  $n$  ام سیگنال ارتعاشی و  $X_k$  نمونه  $k$  ام تبدیل فوریه آن است

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j\pi k \frac{n}{N}}, \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (5)$$

که در آن  $N$  تعداد نمونه‌های سیگنال است. شکل ۶ نتیجه اعمال تبدیل فوریه سریع به یک سیگنال آکوستیک نمونه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است با توجه به پهنای باند سنسور که حدود ۸ kHz است، در این شکل فرکانس‌ها تا ۴ kHz نشان داده شده است.

در جدول ۴، فرکانس و دامنه متناظر با ۹ نقطه بیشینه با دامنه قابل ملاحظه‌تر که از اعمال تبدیل فوریه سریع بر روی ۳۶ سیگنال آکوستیک به دست آمده، آورده شده است. همان طور که در زیربخش قبل نیز ذکر گردید، ویژگی‌هایی مثل دامنه فرکانس اول که دارای درصد انحراف معیار بالایی هستند، نمی‌توانند ویژگی‌های مناسبی جهت تشخیص خطا باشند.

## ۴-۳ نتایج تحلیل زمانی پوش سیگنال

دسته سوم ویژگی‌های انتخاب شده، مشخصات ظاهری پوش است که توسط تبدیل هیلبرت محاسبه می‌گردد. این تبدیل، عملگری خطی است که بر تابعی همچون  $u(t)$  اعمال شده و به شکل  $x(t) + j\dot{x}(t)$  تعریف می‌گردد که بخش حقیقی آن، خود سیگنال اصلی و بخش موهومی، تبدیل هیلبرت آن است. الگوریتم این تبدیل شامل مراحل ذیل است [۱۹]:

- (۱) محاسبه FFT سیگنال
- (۲) تشکیل یک بردار وزنی با مقدار واحد برای درایه‌های اول و  $n/2 + 1$  ام، مقدار دو برای درایه‌های ۲ تا  $n/2$  ام و مقدار صفر برای درایه‌های  $n/2 + 2$  تا  $n$  ام که  $n$  تعداد نمونه‌هاست.
- (۳) ضرب FFT سیگنال به صورت درایه به درایه در بردار وزنی تشکیل شده در مرحله قبل

(۴) محاسبه عکس FFT و ارائه  $n$  داده اول به عنوان تبدیل هیلبرت. از آنجا که سیگنال ارتعاش شامل ماهیت بسیار متغیر است، نتیجه تبدیل هیلبرت یک سیگنال بسیار ناهموار است؛ بنابراین محاسبه ویژگی‌ها با مشکل مواجه می‌شود و بهتر است که تجزیه و تحلیل پوش تبدیل هیلبرت به عنوان پیش‌پردازش استخراج ویژگی‌های حوزه زمان و سایر تبدیلات مورد استفاده قرار گیرد. جهت هموارسازی و به حداقل رساندن تغییرات ناگهانی سیگنال، نمودار پوش را می‌توان در فواصل زمانی به مراتب بزرگ‌تر از تناوب نمونه‌برداری محاسبه کرد. برای هموارسازی نمودار حاصل از تبدیل هیلبرت، ابتدا به روش اسپلاین مکعبی در نقاط زمانی با فواصل بزرگ‌تر، درونیابی شده تا نوعی متوسط‌گیری نرم روی داده‌ها انجام گیرد و سپس پوش پیک‌های محلی نمودار حاصل محاسبه گردیده است. همچنین برای به دست آوردن یک تشخیص مناسب و حذف نویز زمینه، از یک مقدار حد آستانه پایین باید استفاده نمود. با توجه به سعی و خطای انجام شده، محاسبه پوش با فواصل ۱۰۰۰ برابری و سطح آستانه ۲۵ درصد مقدار مؤثر برای این نوع سیگنال مناسب است. آستانه‌گذاری به معنی صفر کردن مقدار نمونه‌هایی است که پس از مرحله هموارسازی از ۰.۲۵ مقدار مؤثر (ریشه متوسط توان دوم) کمتر باشند. شکل ۷ روندنمای تحلیل زمانی پوش و شکل ۸، پوش تبدیل هیلبرت یک سیگنال آکوستیک نمونه را پس از هموارسازی و اعمال حد آستانه نمایش می‌دهد.

جدول ۵ تا ۷ مقادیر زمان وقوع، دامنه و اختلاف زمانی نقاط بیشینه سیگنال بعد از نرمالیزه‌سازی، محاسبه پوش با استفاده از تبدیل هیلبرت، هموارسازی و اعمال حد آستانه را نشان می‌دهند.

## ۴-۴ نتایج تحلیل تبدیل موجک گسسته

برای پیاده‌سازی تبدیل موجک گسسته، راهکارهای مختلفی وجود دارد. یکی از رایج‌ترین آنها، پیاده‌سازی به کمک تئوری تفکیک چندانگانه



جدول ۴: فرکانس‌های شاخص و دامنه آنها.

f	میانگین فرکانس (هرتز)	انحراف معیار فرکانس	درصد انحراف معیار فرکانس	میانگین دامنه ( $10^{-5}$ )	انحراف معیار دامنه	درصد انحراف معیار دامنه
f1	۳۶۹	۹,۵۱	۲,۵	۴,۸۶	۳,۱۱	۶۴,۰۷
f2	۷۹۷	۱۲۷,۴	۱۵,۹	۵,۳۰	۱,۰۵	۱۹,۸۷
f3	۱۳۰۸	۱۴۰,۴	۱۰,۷	۵,۸۸	۰,۹۰	۱۵,۳۲
f4	۱۷۶۲	۱۳۵,۵	۷,۶	۶,۸۸	۱,۰۹	۱۵,۹۵
f5	۲۱۷۸	۱۰۵,۲	۴,۸	۸,۳۳	۱,۲۵	۱۵,۰۴
f6	۲۸۷۲	۲۴۶,۷	۹,۴	۸,۵۷	۱,۲۷	۱۴,۹۰
f7	۳۶۰۹	۶۳,۴	۳,۲	۹,۹۴	۲,۰۶	۲۰,۸۱
f8	۳۱۶۹	۸۲,۸	۲,۶	۷,۹۱	۱,۵۳	۱۹,۴۵
f9	۳۷۰۷	۱۷۱,۹	۴,۶	۸,۸۶	۰,۷۲	۸,۱۵

جدول ۵: زمان وقوع نقاط بیشینه آکوستیک بعد از تبدیل هیلبرت.

میانگین	انحراف معیار	درصد انحراف معیار
بیشینه اول	۴,۱۷	۰,۲۲
بیشینه دوم	۴,۲۱	۰,۲۳
بیشینه سوم	۴,۲۶	۰,۲۸
بیشینه چهارم	۴,۲۹	۰,۱۷
بیشینه پنجم	۴,۳۱	۰,۲۶
بیشینه ششم	۴,۳۴	۰,۲۳

جدول ۶: دامنه وقوع نقاط بیشینه آکوستیک بعد از تبدیل هیلبرت.

میانگین	انحراف معیار	درصد انحراف معیار
بیشینه اول	۰,۰۶۲	۰,۰۹۱
بیشینه دوم	۰,۰۱۴	۰,۰۰۴
بیشینه سوم	۰,۰۲۱	۰,۰۰۶
بیشینه چهارم	۰,۰۲۰	۰,۰۱۰
بیشینه پنجم	۰,۰۲۸	۰,۰۰۶
بیشینه ششم	۰,۰۲۱	۰,۰۲۲

جدول ۷: اختلاف زمانی نقاط بیشینه آکوستیک بعد از تبدیل هیلبرت.

اختلاف زمانی نقاط بیشینه	۱۲-۱۱	۱۳-۱۲	۱۴-۱۳	۱۵-۱۴	۱۶-۱۵
میانگین (میلی ثانیه)	۴۲	۴۲	۳۳	۲۲	۳۰
انحراف معیار	۲۰	۲۴	۱۴	۱۲	۷
درصد انحراف معیار	۴۹,۳	۵۴,۲	۴۲,۳	۵۳,۹	۲۵,۵

جدول ۸: انرژی، آنتروپی و انحراف معیار ضرایب تبدیل موجک.

خصوصیات	ضریب d1	ضریب d2	ضریب d3
انرژی ( $10^{-8}$ )	۰,۱۹۵	۱,۷۱۲	۳,۴۰۲
آنتروپی	۰,۰۰۴	۰,۰۴۶	۰,۱۰۵
انحراف معیار ( $10^{-4}$ )	۰,۵۸۵	۲,۲۴۹	۳,۰۷۸

برای محاسبه انرژی سیگنال از (۶) و برای محاسبه آنتروپی که معیاری عددی از میزان تصادفی بودن یا ابهام در مورد آن متغیر تصادفی است از (۷) استفاده شده است

$$E_x = \sum_{i=1}^N |x(i)|^2 \quad (6)$$

$$H_x = -\sum_{i=1}^N x(i) \times \log x(i) \quad (7)$$

که  $x(i)$  نمونه  $i$ ام سیگنال ارتعاشی است. در جدول ۸ انرژی، آنتروپی و انحراف معیار برای ضرایب جزئیات سه سطح تبدیل موجک گسسته محاسبه و آورده شده است.

#### ۴-۵ نتایج شاخص‌های زمان و فرکانس

با توجه به شباهت‌های ظاهری شکل موج تخلیه جزئی (PD) ترانسفورماتورهای قدرت با شکل موج پوش اول سیگنال لرزش تغییردهنده تپ می‌توان از دو شاخص استفاده شده در این مطالعات به نام شاخص زمان و شاخص فرکانس در تشخیص عیوب تغییردهنده تپ استفاده کرد. شاخص زمان ( $K_t$ ) طبق (۸) محاسبه می‌شود که در آن  $N$  تعداد نمونه‌ها،  $\tilde{s}(t_i)$  مقادیر سیگنال در لحظه  $t_i$  و  $t_i$  از (۹) قابل محاسبه است [۲۱]

$$K_t = \sqrt{\sum_{i=1}^N (t_i - t_i) \tilde{s}(t_i)^2} \quad (8)$$

(MRA) است. در این روش، هر مرحله شامل فیلتر و نمونه‌کاهی می‌باشد. در هر مرحله از این فرایند، محتوای سیگنال در دو زیرفضای متعامد تجزیه می‌شود. در یک زیرفضا ابتدا یک فیلتر پایین‌گذر (G) بر روی سیگنال گسسته اعمال شده و سپس تعداد نمونه‌های سیگنال به نصف کاهش می‌یابد. خروجی این مرحله، اصطلاحاً ضرایب تقریب سیگنال در سطح اول تجزیه (CA1) نامیده می‌شود. به‌طور موازی، یک فیلتر بالاگذر (H) به سیگنال گسسته موجود اعمال شده و سپس تعداد نمونه‌های سیگنال به نصف کاهش می‌یابد. خروجی این مرحله، اصطلاحاً ضرایب جزئیات سیگنال در سطح اول تجزیه (CD1) نامیده می‌شود. همان‌طور که از نوع فیلترهای اعمال شده مشخص است، ضرایب جزئیات، محتوای فرکانس بالا و ضرایب تقریب، محتوای فرکانس پایین سیگنال را شامل می‌شوند [۲۰]. جهت استخراج ویژگی‌های سیگنال آکوستیک توسط تبدیل موجک گسسته، مراحل زیر انجام شده است:

- ۱) نرمالیزه کردن سیگنال آکوستیک
  - ۲) دریافت پوش سیگنال توسط اعمال تبدیل هیلبرت
  - ۳) اعمال تبدیل موجک گسسته بر روی سیگنال پوش تا سه سطح و استخراج ویژگی‌هایی مانند انرژی، آنتروپی و انحراف معیار
- با توجه به آنکه در [۶]، موجک  $\text{bio}3.1$  به‌عنوان مناسب‌ترین سیگنال موجک مادر برای عیب‌یابی معرفی شده است، در این مقاله از این موجک استفاده گردیده است. در شکل ۹ نتیجه سه سطح تجزیه روی پوش سیگنال نرمالیزه شده نمونه آمده است.

جدول ۱۰: مقایسه دامنه نقاط بیشینه و مقادیر اختلاف زمانی بین آنها برای حالت سالم و عیب سایش اتصالات الکتریکی [۴].

شماره نقطه بیشینه	۱	۲	۳	۴
دامنه	۱۰/۰۳	۶/۳۰	۳۷/۸۷	۱۱/۲۸
تأخیر زمانی (ms)	۲۵	۳۰/۲	۲۷/۸	
دامنه	۸/۹	۴/۰۶	۳۹	۶/۳۰
تأخیر زمانی (ms)	۴۳/۹	۳۰		۱۵/۱

جدول ۱۱: مقایسه مقادیر دامنه نقاط بیشینه و اختلاف زمانی بین آنها برای حالت سالم و حالت عیب فرسودگی فنر [۴].

شماره نقطه بیشینه	۱	۲	۳	۴
دامنه	۳۰	۲۱	۱۱۹	۱۰۲
تأخیر زمانی (ms)	۱۹	۱۷/۷	۱۹/۳	
دامنه	۱۳/۴۰	۲۱/۵	۶۱/۵	۸۷
تأخیر زمانی (ms)	۲۵/۴	۳۸/۱	۲۹/۷	

## ۵-۱ انتخاب ویژگی‌های دارای داده معیوب در مراجع

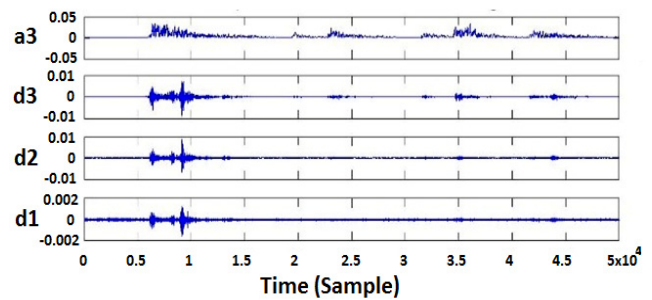
### جهت استفاده در معیوب‌سازی داده‌ها

با بررسی داده‌های ارائه‌شده در معدود مراجعی که به‌صورت عملی عیوب خاصی را در تغییردهنده تپ ایجاد کرده و تغییر ویژگی‌های مربوط را گزارش نموده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت عیوب روی برخی از ویژگی‌ها تأثیر بیشتر دارند و در برخی دیگر تغییر چندانی ایجاد نمی‌کند. بنابراین می‌توان از آن دسته از ویژگی‌های اعلام‌شده‌ای که در حالت عیب تغییر محسوسی نسبت به حالت سالم دارند، برای تشخیص عیب استفاده کرد. مطابق با داده‌های گزارش‌شده در [۴] برای عیب سایش اتصالات الکتریکی، مقادیر اختلاف زمانی بین نقاط بیشینه اول و دوم و بین نقاط بیشینه سوم و چهارم و همچنین مقادیر دامنه نقاط بیشینه دوم و چهارم تغییرات محسوسی داشته‌اند. جدول ۱۰ این داده‌ها را برای دو حالت سالم و سایش اتصالات الکتریکی نشان می‌دهد. طبق داده‌های گزارش‌شده در [۴] برای عیب فرسودگی فنر، مقدار اختلاف زمانی بین نقاط بیشینه دوم و سوم بیشترین افزایش را داشته و دامنه نقاط بیشینه اول و سوم کاهش قابل توجهی را تجربه کرده‌اند. کاهش دامنه نقاط بیشینه می‌تواند نشان از کاهش قدرت فنر در ذخیره انرژی و افزایش زمان بین دو نقطه بیشینه آکوستیک ناشی از تخلیه آهسته‌تر انرژی فنر باشد. در جدول ۱۱ میزان تغییرات آورده شده‌اند.

همچنین طبق جدول ۱۲ برای عیب شل‌شدن اتصالات الکتریکی، دامنه نقاط بیشینه اول، دوم و پنجم برای عیب صدمه‌دیدگی تپ، دامنه نقاط بیشینه اول، دوم و سوم و اختلاف زمانی بین نقاط بیشینه چهارم و پنجم و همچنین برای عیب سایش اتصالات الکتریکی دامنه نقاط بیشینه اول، دوم و اختلاف زمانی بین نقاط بیشینه چهارم و پنجم تغییرات محسوسی داشته‌اند که در این جدول مشخص شده‌اند.

### ۵-۲ تولید داده‌های معیوب

با توجه به حساسیت و گرانی تغییردهنده‌های تپ زیر بار، امکان ایجاد عیب مصنوعی بر روی آنها و ثبت داده‌های معیوب برای ایجاد پایگاه داده به‌راحتی امکان‌پذیر نیست. برای رفع این مشکل در این مقاله با اعمال تغییرات هدفمند روی داده‌های سالم موجود (مطابق با میزان تغییر ویژگی‌های ذکرشده برای عیوبی که در برخی از مراجع به‌صورت عملی ایجاد شده است)، داده‌های معیوب مجازی ایجاد شده و سپس داده‌های



شکل ۹: نتایج سه سطح تجزیه پوش سیگنال نرمالیزه‌شده.

جدول ۹: مقادیر شاخص‌های زمان و فرکانس.

شاخص زمان	تپ‌های افزایشی		تپ‌های کاهش	
	شاخص فرکانس	شاخص زمان	شاخص فرکانس	شاخص زمان
میانگین (ثانیه)	۰/۰۰۴۴	۴/۴۶	۰/۰۰۴۶	۴/۱۶
انحراف معیار	۰/۰۰۰۶	۰/۹۱۱	۰/۰۰۰۶	۰/۸
درصد انحراف معیار	۱۳/۱	۲۰/۴	۱۲/۳	۱۹/۲

$$t = \sum_{i=1}^N t_i \tilde{s}(t_i) \quad (9)$$

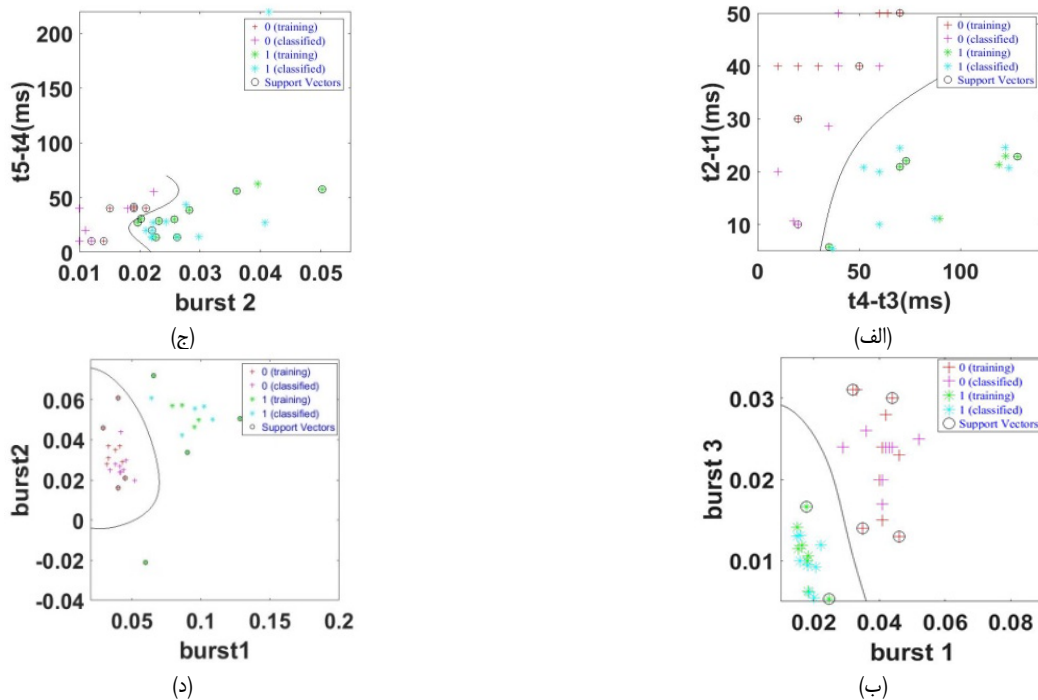
همچنین شاخص فرکانس ( $K_f$ ) از رابطه زیر به‌دست می‌آید که در آن نمونه‌های تبدیل فوریه بزرگ‌ترین پالس پوش سیگنال آکوستیک بعد از نرمالیزه‌سازی و  $f_i$  ها فرکانس نمونه‌های تبدیل فوریه است [۲۱]

$$K_f = \sqrt{\sum_{i=1}^N f_i |\tilde{s}(f_i)|^2} \quad (10)$$

برای سیگنال‌های برداشت‌شده در هر دو حالت افزایش و کاهش تپ، این مقادیر مورد محاسبه قرار گرفته و در جدول ۹، نتایج به‌دست‌آمده نشان داده شده است. با مقایسه داده‌های جدول مربوط مشاهده می‌شود که اولاً داده‌های به‌دست‌آمده برای تپ‌های افزایشی و کاهش بسیار نزدیک به هم بوده و ثانیاً میزان انحراف معیار محاسبه‌شده در بازه نسبتاً قابل قبولی قرار دارد.

## ۵- استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای دسته‌بندی داده‌ها جهت تشخیص عیوب

مسئله دسته‌بندی، یکی از مسائل اساسی در یادگیری ماشین می‌باشد و موضوعات بسیاری را می‌توان به‌صورت یک مسئله دسته‌بندی مطرح کرد و حل نمود. یکی از روش‌هایی که در حال حاضر به‌صورت گسترده‌ای برای حل مسئله دسته‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) است که در دو فاز آموزش و ارزیابی اجرا می‌گردد. این روش نسبت به شبکه‌های عصبی، دارای تئوری قوی‌تری است و برای ذخیره مدل، فضای حافظه کمتری نیاز دارد و همچنین به نتایج دقیق‌تر که با یک تفسیر هندسی همراه است، دست پیدا می‌کند. در این روش و در حالت دوبعدی که دسته‌بندی خطی داده‌ها نامیده می‌شود، سعی می‌گردد که خط جداسازی بین داده‌های دو دسته به‌گونه‌ای انتخاب شود که فاصله و یا به عبارتی حاشیه اطمینان بیشتری نسبت به نزدیک‌ترین داده در هر دو دسته داشته باشد. حل معادلات برای پیدا کردن خط بهینه به وسیله روش‌های برنامه‌ریزی متعامد (QP) صورت می‌گیرد [۲۲].



شکل ۱۰: نتایج دسته‌بندی داده‌های سالم و معیوب، (الف) عیب سایش با ویژگی‌های ۱۲-۱۳ و ۱۴-۱۳، (ب) عیب فرسودگی فنر با ویژگی‌های دامنه نقطه بیشینه اول و سوم، (ج) عیب صدمه دیدگی اتصالات الکتریکی با ویژگی‌های دامنه نقطه بیشینه دوم و ۱۴-۱۵ و (د) عیب شل شدن اتصالات الکتریکی با ویژگی‌های دامنه نقطه بیشینه اول و دوم.

جدول ۱۲: مقادیر اختلاف زمانی بین نقاط بیشینه و دامنه آنها با اعمال سه عیب مختلف [۱۲].

وضعیت	دامنه (ولت)						اختلاف زمانی (ms)
	بیشینه ۱	بیشینه ۲	بیشینه ۳	بیشینه ۴	بیشینه ۵	۱۲-۱۳	
میانگین	۱,۶۷۳	۰,۷۹۱	۲,۳۷۷	۲,۴۰۲	۱,۸۵۸	۸,۸۴۵	۱۴-۱۵
انحراف معیار	۰,۱۵۱	۰,۰۷۷	۰,۳۵۸	۰,۵۰۴	۰,۳۳۰	۱,۱۷۹	۱۴-۱۳
انحراف معیار/ میانگین	۹,۰۰۵	۹,۸۵	۱۵,۸۰	۲۱	۱۷,۷۶	۱۳,۳۲	۱۳-۱۲
میانگین	۴,۰۳۲	۱,۴۴۴	۲,۰۵۸	۲,۰۶۲	۳,۳۱۳	۹,۴۴۴	۱۲-۱۱
انحراف معیار	۰,۳۶۱	۰,۳۲۹	۰,۴۸۱	۰,۲۶۹	۰,۵۸۲	۱,۷۹۸	۱۳-۱۲
انحراف معیار/ میانگین	۸,۹۶	۲۲,۸۱	۲۳,۳۸	۱۳,۰۸	۱۷,۵۷	۱۸,۹۴	۱۲-۱۱
میانگین	۳,۶۱۳	۱,۴۶۹	۴,۱۴۰	۱,۸۲۵	۱,۹۸۴	۸,۲۱۹	۱۲-۱۱
انحراف معیار	۰,۳۱۰	۰,۲۲۴	۰,۸۱۲	۰,۲۰۴	۰,۲۸۴	۰,۶۶۶	۱۲-۱۱
انحراف معیار/ میانگین	۸,۵۹	۱۵,۲۷	۱۹,۶۲	۱۱,۱۹	۱۴,۳۴	۸,۱۰	۱۲-۱۱
میانگین	۲,۸۴۷	۱,۲۱۱	۲,۰۰۹	۱,۸۲۵	۲,۰۶۷	۷,۵۲۰	۱۲-۱۱
انحراف معیار	۰,۴۲۰	۰,۲۰۹	۰,۴۱۴	۰,۲۷۷	۰,۴۰۴	۰,۹۳۵	۱۲-۱۱
انحراف معیار/ میانگین	۱۴,۷۷	۱۷,۳۱	۲۰,۶۳	۱۵,۲۱	۱۹,۵۳	۱۲,۴۳	۱۲-۱۱

(۳) نهایتاً داده‌های معیوب ساخته شده و داده‌های دست‌نخورده با هم ترکیب گردیده و در یک بردار قرار داده می‌شوند تا روش SVM بر روی آنها اعمال گردد

$$coef = \frac{A_f \times (1 + \sigma_f)}{A_h \times (1 + \sigma_h)} \quad (11)$$

در این رابطه  $A_f$  دامنه ویژگی در حالت خطا،  $\sigma_f$  انحراف معیار ویژگی مورد نظر در حالت خطا،  $A_h$  دامنه ویژگی در حالت سالم و  $\sigma_h$  انحراف معیار ویژگی در حالت سالم است.

### ۳-۵ نتایج حاصل از دسته‌بندی عیوب با روش ماشین بردار پشتیبان

در ادامه، نتایج حاصل از دسته‌بندی عیوب با توجه به ویژگی‌های منتخب که توسط روش SVM تفکیک شده، آمده است. در شکل ۱۰

سالم و معیوب توسط روش ماشین بردار پشتیبان، جداسازی و کارکرد این روش در تشخیص داده‌های سالم و معیوب ارزیابی شده است.

برای معیوب‌سازی تصادفی داده‌های سالم موجود، ابتدا ۳۶ سیگنال حاصل از آزمون‌های عملی، اعداد تصادفی صفر یا یک برای چهار گروه عیب انتخابی (سایش اتصالات الکتریکی، فرسودگی فنر، صدمه دیدگی اتصالات الکتریکی تپ و شل شدن اتصالات الکتریکی تپ) ایجاد شده تا داده‌هایی که می‌خواهیم معیوب شوند به صورت تصادفی انتخاب گردند. سپس با استفاده از داده‌های مذکور در جداول ۹ تا ۱۲، معیوب‌سازی تصادفی داده‌ها در مراحل به صورت زیر صورت گرفته است:

(۱) مقدار ویژگی سیگنالی که عدد تصادفی مربوطه صفر باشد در مقدار ضرب معیوب‌ساز محاسبه شده از (۱۱) ضرب می‌گردد تا به تعبیری معیوب شود.

(۲) مقدار ویژگی سیگنالی که عدد تصادفی مربوطه یک بود، در یک ضرب می‌گردد؛ یعنی داده سالم باقی می‌ماند.



- [10] Z. Liu, et al., "Fault diagnosis of OLTC based on time-frequency image analysis of vibration signal," in *Proc. Condition Monitoring and Diagnosis, CMD'18*, 6 pp., Perth, Australia, 23-26 Sept. 2018.
- [11] X. Li, T. Gao, Z. Zhang, and J. Zhang, "Mechanical features extraction of on-load tap changer based on multi-wavelet transform," in *Proc. IEEE Int. Conf. on High Voltage Engineering and Application, ICHVE'18*, 4 pp., Athens, Greece, 10-13 Sept. 2018.
- [12] R. Yang, D. Zhang, and Z. Lin, "Vibration analysis using variational mode decomposition for mechanical fault diagnosis in the diverter switch of on load tap changer," in *Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, ISGT-Europe'19*, 5 pp., Bucharest, Romania, 29 Sept.-2 Oct. 2019.
- [13] F. Wang, D. Zhou, and S. Zhang, "Mechanical condition monitoring of on-load tap changer based on textural feature of recurrence plots of vibration signal," in *Proc. 5th Int. Conf. on Electric Power Equipment-Switching Technology, ICEPE-ST'19*, pp. 560-564, Kitakyushu, Japan, 13-16 Oct. 2019.
- [14] Z. Zhang, W. Chen, J. Lei, and H. Gu, "Vibration signal processing and state analysis technology for on-load tap-changer," in *Proc. Int. Conf. on Diagnostics in Electrical Engineering, Diagnostika'20*, 4 pp., Pilsen, Czech Republic, 1-4 Sept. 2020.
- [15] J. G. Bi, et al., "Influence factors of acoustic fingerprint detection of m-type on-load tap changer," in *Proc. IEEE 5th Int. Electrical and Energy Conf., CIEEC'22*, pp. 3564-3568, Nangjing, China, 27-29 May. 2022.
- [16] H. Li, L. Dou, S. Li, Y. Kang, X. Yang, and H. Dong, "Abnormal state detection of OLTC based on improved fuzzy c-means clustering," *Chinese J. of Electrical Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 129-141, Mar. 2023.
- [17] X. Liang, Y. Wang, and H. Gu, "A mechanical fault diagnosis model of on-load tap changer based on same-source heterogeneous data fusion," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, 9 pp., Article ID: 3519709, 2021.

[۱۸] م. حسین‌خانلو و س. علی‌محمدی، "عیب‌یابی تپ سلکتور تپ‌چنجرهای قابل قطع زیر بار با استفاده از آنالیز گازهای محلول در روغن به‌همراه مطالعه موردی،" *مجموعه مقالات سومین دوره کنفرانس بین‌المللی ترانسفورماتور*، ۵ صص.، تهران، ایران، ۱۷-۱۶-۱۳۹۵ شهریور.

[19] S. L. Marple, "Computing the discrete-time analytic signal via FFT," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 47, no. 9, pp. 2600-2603, Sep. 1999.

[۲۰] ح. وروانی فراهانی و ح. سعیدی سورک، "تبدیل موجک و کاربردهای آن برای پایش وضعیت ارتعاشی تجهیزات دوار (روش‌ها، راهکارها و مثال‌های عملی)،" *نشریه علمی ترویجی صوت و ارتعاش*، سال ۵، شماره ۱۱، صص. ۷۶-۵۵، بهار و تابستان ۱۳۹۶.

[21] A. Akbari, H. R. Mirzaei, M. Mazhabjafari, and A. Mazhabjafari, "New Informative Features of Partial Discharges and Limitations of Conventional Measuring Devices," in *Proc. 15th Int. Symp. on High Voltage Engineering, ISH'07*, 5 pp., Ljubljana, Slovenia, 27-31 Aug. 2007.

[22] ع. م. زارع و ا. نصیری، *ارزیابی امنیت استاتیکی سیستم قدرت به کمک ماشین بردار پشتیبان*، دانشگاه کازرون، کازرون، صص. ۴۲-۴۴-۴۵، ۱۳۸۶.

**عادل یونسی** در سال ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر و در سال ۱۴۰۰ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق را از دانشگاه زنجان دریافت نمود. نام‌برده هم‌اکنون در برق منطقه‌ای زنجان مشغول به کار است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان طراحی سیستم‌های فتوولتائیک، طراحی و تحلیل ماشین‌های الکتریکی و نیز محدود کننده‌های جریان خطای اتصال کوتاه در شبکه‌های قدرت می‌باشند.

**عباس غایب‌لو** در سال ۱۳۸۳ مدرک کارشناسی خود را از دانشگاه صنعتی سهند، در سال ۱۳۸۷ مدرک کارشناسی ارشد خود را از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و در سال ۱۳۹۲ مدرک دکتری خود را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی در رشته مهندسی برق دریافت نمود. ایشان از سال ۱۳۹۲ به عنوان عضو هیأت علمی در دانشگاه زنجان مشغول به کار است و سرپرست آزمایشگاه پژوهشی الکترونیک صنعتی دانشگاه زنجان را به عهده دارد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده شامل طراحی، تحلیل و کنترل ماشین‌های الکتریکی، خودروهای برقی و هیبرید، شناسایی سیستم و ابزار دقیق و اتوماسیون است.

محورهای افقی و عمودی، دو ویژگی منتخب جهت تشخیص معیوب‌بودن یا سالم‌بودن تغییردهنده تپ است. همچنین داده‌های معیوب استفاده‌شده برای آموزش، داده‌های معیوب استفاده‌شده برای صحت‌سنجی، داده‌های سالم استفاده‌شده برای آموزش و داده‌های سالم استفاده‌شده برای صحت‌سنجی با چهار نماد طبق راهنمای شکل‌ها مشخص شده است.

زمانی می‌توان گفت که یک مجموعه از نقاط به‌صورت بهینه به‌وسیله یک خط یا صفحه جداکننده، جداسازی شده‌اند که اولاً بدون اشتباه در دسته‌های مربوطه قرار گیرند و ثانیاً فاصله بین نزدیک‌ترین نقاط تا صفحه جداکننده بیشینه باشد. با بررسی شکل ۹ به‌وضوح می‌توان مشاهده نمود که بردار پشتیبان توانسته است به‌درستی داده‌های ناسالم را از داده‌های سالم جداسازی نماید.

## ۶- نتیجه‌گیری

روش تحلیل سیگنال آکوستیک مخزن ترانسفورماتور جهت شناسایی خطاهای تغییردهنده تپ، روشی نو و با قابلیت اجرا با هزینه پایین است که قابلیت توسعه و استفاده به‌صورت برخط و بدون اختلال در عملکرد عادی ترانسفورماتور را دارد. در این مقاله نشان داده شد با وجود این که سیگنال آکوستیک به‌دست‌آمده از تغییردهنده تپ، بیش از حد متغیر می‌باشد، تجزیه و تحلیل آن یک روش امیدوارکننده برای ارزیابی وضعیت OLTC است. در این مقاله پس از استخراج و محاسبه ویژگی‌های مختلف در حوزه‌های زمان، فرکانس، پوش و موجک برای سیگنال‌های واقعی و معیوب‌سازی مجازی بخشی از داده‌ها از روش بردار پشتیبان برای دسته‌بندی داده‌ها سالم و معیوب استفاده گردید و نشان داده شد که این روش به‌صورت موفقیت‌آمیزی توانایی تفکیک داده‌ها با آموزش توسط بخشی از داده‌ها را دارد.

## مراجع

- [1] M. Foata, R. Beauchemin, and C. Rajotte, "On-line testing of on-load tap changers with a portable acoustic system," in *Proc. IEEE 9th Int. Conf. on Transmission and Distribution Construction*, pp. 293-295, Montreal, Canada, 8-12 Oct. 2000.
- [۲] ا. کرامر، ع. خلیق، م. صدیقی‌زاده و م. وکیلان، *تپ‌چنجرهای زیر بار برای ترانسفورماتورهای قدرت (اصول عملکرد، کاربردها و انتخاب)*، شرکت برق منطقه‌ای خوزستان، ۱۳۸۵.
- [3] P. Kang and D. Birtwhistle, "Condition assessment of power transformer on-load tap changer using wavelet analysis," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 16, no. 3, pp. 394-400, Aug. 2001.
- [4] P. Kang and D. Birtwhistle, "Condition assessment of power transformer on-load tap changer using wavelet analysis and self-organizing: field evaluation," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 18, no. 1, pp. 78-84, Jan. 2003.
- [5] E. Rivas and J. C. Burgos, "Condition assessment of power vibration analysis using wavelet transform," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 24, no. 2, pp. 687-694, Apr. 2009.
- [6] E. Rivas and J. Carlos Burgos, "Vibration analysis using envelope wavelet for detecting faults in the tap selector," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 25, no. 3, pp. 1629-1636, Jul. 2010.
- [7] E. Rivas, J. Ignacio Rodriguez, and C. Hernandez, "Analysis of the vibration modes in the diverter switch of load tap changer," *Contemporary Engineering Sciences*, vol. 10, no. 20, pp. 973-986, 2017.
- [8] J. Seo, "A practical scheme for vibration signal measurement-based power transformer on-load tap changer condition monitoring," in *Proc. Condition Monitoring and Diagnosis (CMD'18)*, 4 pp., Perth, Australia, 23-26 Sept. 2018.
- [9] J. Seo, H. Ma, and T. K. Saha, "Analysis of vibration signal for power transformer on-load tap changer (OLTC) condition monitoring," in *Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting, PESGM'18*, 5 pp., Portland, OR, USA, 5-10 Aug. 2018.

**حسن‌رضا میرزائی** در سال ۱۳۸۴ مدرک کارشناسی خود را از دانشگاه زنجان، در سال ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی ارشد و در سال ۱۳۹۲ مدرک دکتری خود را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی در رشته مهندسی برق دریافت نمود. ایشان از سال ۱۳۹۲ به عنوان عضو هیأت علمی در دانشگاه زنجان مشغول به کار است و سرپرست آزمایشگاه پژوهشی عایق و فشار قوی دانشگاه زنجان را به عهده دارد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده شامل طراحی، مدلسازی و تحلیل ماشین‌های الکتریکی و ترانسفورماتورهای قدرت و تحلیل رفتار گذرای کلیدهای قدرت است.