

مروری بر تکنیک‌های تحلیل سیگنال ارتعاشی جهت تشخیص عیوب در اجزای ماشین‌آلات صنعتی

محسن مردانی
استادیار
سازمان جهاد دانشگاهی صنعتی شریف
Mohsenmardani@gmail.com

حسام تراب زاده کاشی*
کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشکده فنی دانشگاه تهران
Hessamtorabzade@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۰۵

چکیده

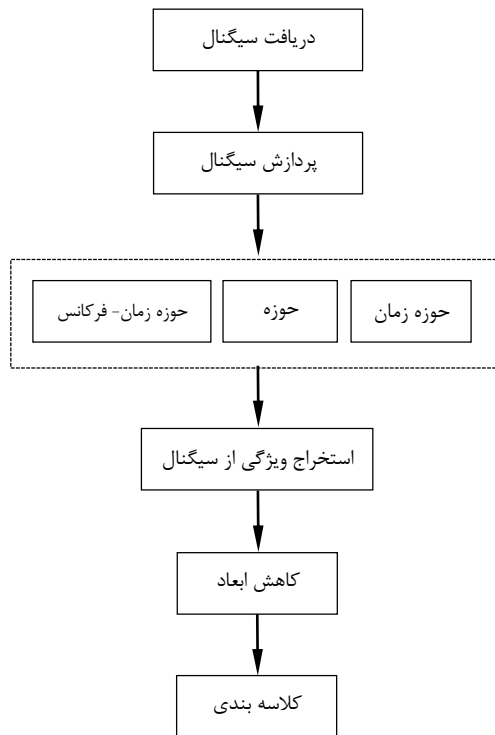
در سالیان اخیر تحلیل ارتعاشی به عنوان روشی کارآمد جهت پایش وضعیت ماشین‌آلات صنعتی معرفی شده است. ماشین‌آلات دوار در شرایط مختلف اعم از عملکرد سالم یا ناقص، سیگنال‌های ارتعاشی معینی را تولید خواهند کرد که با استفاده از تکنیک‌های مختلف پردازش می‌توان به شرایط کارکرد سیستم پی برد. در صورت بروز نقص در یک سیستم، این سیگنال‌های ارتعاشی وضعیت متفاوتی را به خود می‌گیرند و به منظور تشخیص عیوب و با توجه به شرایط نقص، از روش‌های تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی متفاوتی استفاده می‌گردد. آشنایی با این روش‌ها به تحلیلگر ارتعاشی کمک خواهد کرد تا هر یک از روش‌ها را در زمان و شرایط مناسب خود به کار گیرد تا با شفافیت بیشتر وضعیت عملکرد سیستم را مورد بررسی قرار دهد. در مقاله پیش رو طیف وسیعی از روش‌های تحلیل ارتعاشی در سه حوزه زمان، فرکانس و زمان - فرکانس طبقه بندی و معرفی شده است تا خوانندگان از آشنایی لازم بر انواع این تکنیک‌ها برخوردار شوند. روش‌های تحلیل ارتعاشی عمدتاً بر روی اجزای حساس و کلیدی ماشین‌آلات از جمله محور دوار، یاتاقان‌ها و چرخنده‌ها انجام می‌گیرد. در این مقاله روش تحلیل ارتعاشی مناسب جهت تشخیص عیوبی نظیر ایجاد و رشد ترک در چرخنده‌ها، عدم تنظیم محور دوار و سایش یاتاقان‌ها که عیوب متداولی هستند، مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: تحلیل ارتعاشی، پایش وضعیت، تشخیص عیوب، ماشین‌آلات صنعتی، اجزای دوار

۱. مقدمه

شبکه چرخنده‌ها، محور دوار و یاتاقان‌ها است که نسبت به موتور از فرکانس خروجی کمتری برخوردارند. تحلیل ارتعاشی جعبه دنده‌ها به صورت تجربی از دشواری‌های زیادی برخوردار است، چرا که باید از روش‌های مختلف پردازش سیگنال استفاده شود تا بتوان فرکانس‌های خروجی مربوط

بررسی کارکرد لحظه‌ای اجزاء ماشین‌های صنعتی، موجب افزایش امنیت و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن می‌شود. کنترل ارتعاشات برای تشخیص ارتعاشات غیرعادی حاصل از نواقص، یکی از روش‌های پایش وضعیت ماشین-آلات دوار است [۱]. لرزش در ماشین‌آلات شامل ارتعاش در



شکل ۱. دیاگرام روند عیب‌یابی ارتعاشی [۵]

تکنیک‌های تحلیل ارتعاشی با دو هدف اصلی توسعه یافتند: اولین هدف، جدا کردن سیگنال مربوط به اجزا مختلف ماشین از یکدیگر و دومین هدف، تشخیص موقعیت جزء مورد اشکال و تشخیص اجزای ناقص است. به طور کلی روند عیب‌یابی ارتعاشی را می‌توان در شکل ۱ مشاهده نمود.

این تکنیک‌های تشخیص که براساس ارتعاش پایه‌گذاری شده‌اند به دلیل سهولت اندازه‌گیری مطلوب‌ترین تکنیک‌های پایش وضعیت بوده‌اند. آنالیز ارتعاشی سابقاً در جهت تشخیص نواقص و شرایط بحرانی مورد استفاده بوده است در صورتی که امروزه آنالیز ارتعاشی برای پایش وضعیت و کاهش توالی‌های نقص دستگاه و استفاده موثرتر از منابع موجود مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه مقاله تعدادی از تکنیک‌های آنالیز ارتعاشی به صورت مدون و در قالب زیر مجموعه‌های حوزه زمان، حوزه فرکانس و حوزه زمان-فرکانس بیان می‌گردند.

به چرخنده، محور دوار و یاتاقان به درستی تفکیک و منشاء عیب موجود یافت شود [۲، ۳]. هریک از اجزا لرزش‌هایی را در فرکانس‌های خاص ایجاد می‌کند که مربوط به فرکانس چرخشی قطعات است. در مورد نقص قطعات، ارتعاشات ایجاد شده از قطعه ناقص متفاوت از لرزش عادی است. به منظور افزایش قابلیت تشخیص ارتعاشات به علت نقص در قطعات، آنالیز لرزش در دو مرحله انجام می‌گردد: ۱) کشف خصوصیات و ۲) ترکیب داده‌ها. در سطح کشف خصوصیات، ارتعاشات اولیه هریک از قطعات پردازش می‌شود تا خصوصیات مربوط به فرکانس‌های هریک از اجزا بدست آیند. بر این اساس، تلاشی در جهت تشخیص خصوصیات هریک از قطعات صورت گرفته است که می‌تواند نواقص ماشین صنعتی را بازتاب کند [۴]. در مرحله ترکیب داده‌ها، فراوانی خصوصیات بدست آمده از چندین شتاب‌سنج برای تعیین وجود ناهنجاری ارتعاشات و منشا آن مطالعه می‌گردند. تداخل ارتعاشات قطعات منجر به اشکال در تشخیص تغییرات ارتعاش حاصل از نقص در قطعات خواهد شد. آنالیز سیگنال ارتعاش کاربرد گسترده‌ای در تشخیص نقص ماشین‌آلات دوار داشته است [۴]. آشنایی با تکنیک‌های متفاوت تحلیل سیگنال ارتعاشی می‌تواند به تشخیص صحیح و آسانتر عیوب کمک شایانی نماید. از این رو در این مقاله سعی شده است که تکنیک‌های آنالیز ارتعاشات به صورت مدون معرفی شده و سپس کارایی آنها در تشخیص عیوب قطعات بحرانی در ماشین‌آلات مورد بررسی قرار گیرد.

۲. معرفی روش‌های تحلیل ارتعاشی

محققان در حال حاضر انواع تکنیک‌های تحلیل ارتعاشی را برای تشخیص نقص هریک از اجزای ماشین‌آلات دوار به صورت تفکیک شده مورد بررسی قرار می‌دهند.

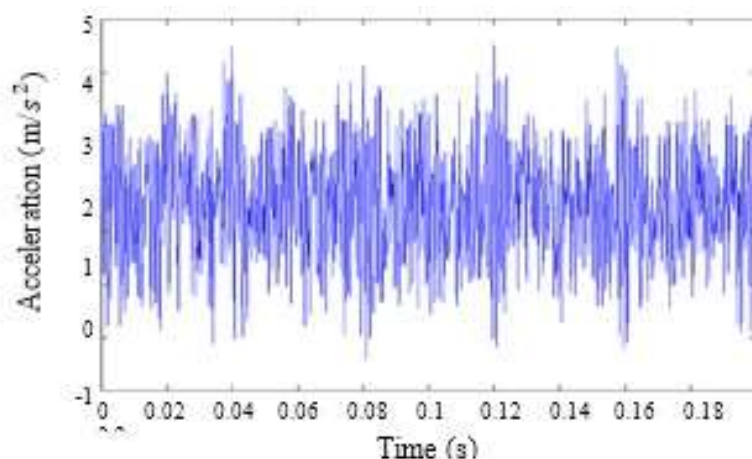
معیار^۵، جذر میانگین مربعات^۶ و فاکتور تیزی سیگنال^۷ اغلب در ارزیابی سیگنال زمان استفاده می‌گردند.

۲-۱- آنالیز حوزه زمان

روش‌های حوزه زمان سعی در آنالیز فراوانی و اطلاعات سیگنال زمان-ارتعاش دارند تا نقص سیستم چرخنده-محور-یاتاقان تعیین گردد. حوزه زمانی چشم‌اندازی است که حس طبیعی دارد و یک دیدگاه فیزیکی را در جهت ارتعاشی باز می‌کند که در آنالیز سیگنال‌های ضربه‌ای که بر اثر نواقص یاتاقان و چرخنده بوجود می‌آیند و ضربان کوتاه و موقت غیرپیوسته دارند، مفید است [۶].

۲-۱-۱ آنالیز موج زمان

قبل از وجود آنالیزگرهای طیفی^۱، تقریباً کل آنالیز ارتعاش در قلمرو زمانی انجام می‌شده است. با مطالعه موج قلمرو زمانی توسط تجهیزاتی همچون اوسیلوسکوپ^۲، اوسیلوگراف^۳ یا ویبروگراف^۴، اغلب ممکن بود که تغییرات علامت ارتعاش از طریق نواقص تعیین گردد. با این وجود، تشخیص نواقص یک مساله بسیار مشکل بود. ارتباط دادن یک تغییر به یک جزء خاص نیاز به محاسبه دستی نوسان دارد که بر اساس تفاوت زمانی مشاهده شده بین نقاط مشخص بدست می‌آید. آنالیز شکل موج می‌تواند در تشخیص ارتعاشات ناهمگام با سرعت شافت مفید باشد. یک شکل موج ارتعاشی واقعی در شکل ۲ برای جعبه دنده نشان داده می‌شود. این شکل موج رفتار غیرعادی چرخنده را بعد از فواصل مشخص با بزرگی زیاد نشان می‌دهد. انحراف



شکل ۲. یک طول موج واقعی از سیگنال لرزش دنده ناقص [۷]

۲-۱-۲ معرفی شاخص‌ها

جذر میانگین مربعات (RMS): یک کمیت آماری نیست و بنابراین ممکن است در تشخیص آسیب‌دیدگی سیستم‌های کاربردی پیوسته قابل اطمینان نباشد. ارزش RMS برای عملکردهای حالت پایدار مناسب‌تر است. جذر میانگین مربعات سیگنال ارتعاشی به عنوان دومین ممان آماری سیگنال تعریف می‌شود. جذر میانگین مربعات سیگنال به نوعی نشانگر سطح انرژی سیگنال است و جهت ردیابی سطح کلی نویز در سیگنال استفاده می‌شود. جذر میانگین مربعات سیگنال ارتعاشی در حوزه زمان از رابطه ۱ بدست می‌آید [۸].

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

در این رابطه x مقدار n امین نقطه عددی در قلمرو زمان است و N تعداد نقاط در قلمرو زمان هستند. RMS سیگنال معمولاً در بیان "حالت پایدار" یا فراوانی "پیوسته" یک سیگنال متغیر نسبت به زمان استفاده می‌گردد.

$$K = \frac{\sum (x - \bar{x})^4}{N \cdot \sigma^2} \quad (2)$$

x داده ها؛ $n=1,2,3,\dots,N$ تعداد کل نمونه داده‌ها و \bar{x} میانگین و σ انحراف معیار است. سطح کشیدگی یک سیگنال به حالتی مشابه با فاکتور تیزی سیگنال استفاده می‌گردد که معیاری از سیگنال ضربه‌ناک را مهیا می‌سازد [۱۱].

۲-۱-۳-۲. میزان انحراف^{۱۰} (عدم تقارن)

میزان انحراف معیاری از تقارن سیگنال یا به صورت دقیق‌تر عدم تقارن است. توزیع سری داده‌ها در صورتی متقارن است که سمت راست یا چپ نقطه مرکز یکسان باشد. معادله ۳ برای محاسبه مقدار تقارن استفاده می‌گردد [۱۲]. در این معادله $y(n)$ داده‌ها و μ میانگین آنها را نشان می‌دهند.

$$S = \frac{\sum_{n=1}^N [y(n) - \mu]^3}{N \times (\sigma)^3} \quad (3)$$

۲-۱-۴. میانگین‌گیری همزمان^{۱۱}

استوارت^[۱۳] نشان داد که با میانگین‌گیری همزمان، سیگنال ارتعاشی پیچیده در حوزه زمانی از یک سیستم انتقال قدرت را برای تخمین ارتعاش هریک از محورهای دوار و چرخنده‌های مربوط به آنها مورد استفاده قرار داد. میانگین‌گیری همزمان (TSA) یک فرایند متفاوت‌تر از میانگین‌گیری معمول طیفی است که در تبدیل فوریه سریع بدست می‌آید. اگرچه مفاهیم یکسانی دارند، در TSA سیگنال‌ها در حوزه زمانی به طول‌های مساوی تقسیم می‌شوند و به تعداد کافی از آنها میانگین‌گیری می‌شود تا نویزهای اتفاقی حذف شوند. سیگنال‌ها با استفاده از سنسوری که با سیگنال همگام شده است، نمونه‌برداری می‌شوند. فرآیند میانگین‌گیری به مرور نویزهای اتفاقی را حذف می‌کند، چرا که نویزهای اتفاقی با سنسور همسان نخواهند بود. تنها سیگنال‌هایی که با سنسور همگام هستند در محاسبات میانگین‌گیری باقی خواهند ماند. یکی از کاربردهای مهم میانگین‌گیری همزمان در آنالیز امواج ارتعاشی ماشین‌آلات صنعتی است که شامل سیستم انتقال قدرت چرخنده‌ای هستند. پس از تعداد کافی میانگین‌گیری،

اوج سیگنال^۸: اوج سیگنال به عنوان نصف اختلاف بین حداکثر و حداقل سیگنال ارتعاشی تعریف می‌شود. اوج سیگنال برای مشخص کردن سطح شوک‌های کوتاه مدت مناسب می‌باشد. معمولاً در مراحل اولیه خرابی، پالس‌های ارتعاشی با فرکانس بالا صادر می‌شود که این ارتعاشات انرژی بالایی دارند و با شاخص RMS شناسایی نمی‌شوند ولی توسط شاخص اوج سیگنال قابل تشخیص هستند [۹].

فاکتور تیزی سیگنال: به عنوان نسبت اوج به RMS سیگنال تعریف می‌گردد و تنها در حضور سیگنال با تغییر ناگهانی قابل اطمینان و بهره‌وری است، بدین ترتیب این شاخص جهت شناسایی ضربه و تغییر ناگهانی در سیگنال مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰].

۲-۱-۳. روش‌های آماری

آنالیز آماری را می‌توان بر اساس داده‌های حوزه زمانی انجام داد. پارامترهای استخراج شده آماری، معیایی دارند که از دقت عیب‌یابی می‌کاهند. روش‌های کلاسیک استخراج ویژگی‌های آماری در حوزه زمان سیگنال، جهت عیب‌یابی دقیق و شناسایی عیوب، کافی نیست و در بسیاری از مواقع ناکارآمد است. به طور مثال، با وجود آنکه با رشد عیب، مقدار کشیدگی^۹ سیگنال افزایش می‌یابد، ولی با افزایش بیش از حد عیب، RMS سیگنال ماهیت تصادفی به خود گرفته و مقدار آن کاهش می‌یابد. همچنین در جعبه دنده سالم مقدار پایین RMS مقدار بالای فاکتور تیزی سیگنال را می‌دهد که گمراه کننده خواهد بود. تشخیص شکستگی دنده‌های یک چرخنده که یک رفتار ضربه‌ای متناوب در سیگنال ارتعاشی دارد، با استفاده از این روش به سادگی قابل تشخیص نمی‌باشد و نیاز به عملیات پیش‌پردازش مناسب دارد [۱۱].

۲-۱-۳-۱. کشیدگی

این پارامتر نشانگر میزان صافی یا ناهمواری سیگنال ارتعاشی است. کشیدگی چهارمین ممان آماری نرمال سیگنال است که برای سیگنال‌های زمان پیوسته به صورت رابطه ۲ تعریف می‌گردد.

نقاط اوج طیف بدست آمده مربوط به هارمونیک‌های چرخنده دوار هستند. در صورتی که نقاط اوج غیرهمگام از نمودار طیفی میانگین حذف شده‌اند. دو نوع میانگین‌گیری سنکرون با زمان شامل: معادل‌گیری خطی همگام با زمان و معادل‌گیری نمایی همگام با زمان هستند.

FM0. ۱-۴-۱-۲

تغییرات عمده در نمونه با مقایسه ماکزیمم فاصله اوج تا اوج سیگنال به مجموع فرکانس‌های درگیری و هارمونیک آنها مشخص می‌گردند. از این پارامتر می‌توان در تشخیص وضعیت درگیری دنده‌ها استفاده کرد و به صورت رابطه ۴ آورده می‌شود [۱۳].

$$FM0 = \frac{PPx}{\sum_{n=0}^H P_n} \quad (۴)$$

که در رابطه ۴، PPx ماکزیمم فاصله اوج تا اوج سیگنال x ، P_n دامنه n امین هارمونیک و H تعداد کل هارمونیک هستند.

FM4. ۲-۴-۱-۲

پارامتر FM4 حالت توسعه یافته پارامتر FM0 است که جهت تشخیص تغییرات پاسخ ارتعاشی سیستم حاصل از عیب در یک دندانه از چرخنده معرفی شده است. این پارامتر با محاسبه اختلاف سیگنال‌ها (پارامتر d) انجام می‌شود. سپس کشیدگی نرمال d محاسبه می‌گردد. FM4 به صورت معادله ۵ داده می‌شود [۱۴].

$$FM4 = \frac{N \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^4}{\left[\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2 \right]^2} \quad (۵)$$

که \bar{d} میانگین اختلاف سیگنال است و N تعداد کل نقاط داده‌ها در سیگنال حوزه زمان است. FM4 یک کمیت بی‌بعد است. با نمایان شدن باندهای جانبی در سیگنال ارتعاشی، FM4 از این مقدار منحرف خواهد شد.

NA4. ۳-۴-۱-۲

پارامتر NA4 در سال ۱۹۹۳ توسط زاگرازیک^{۱۳} و همکاران در مرکز تحقیقات ناسا به عنوان یک شاخص نقص کلی توسعه یافت که نه تنها با آسیب دیدگی بلکه با رشد مداوم نقص واکنش می‌دهد [۱۵]. ابتدا سیگنال باقیمانده (r) محاسبه می‌شود. سپس کشیدگی شبه نرمال سیگنال باقیمانده با تقسیم چهارمین ممان سیگنال باقیمانده بر واریانس میانگین مربع زمان آن محاسبه شد. این واریانس میانگین سیگنال باقیمانده در هر سیگنال زمان است که در آن NA4 محاسبه می‌گردد. بدین ترتیب NA4 به صورت معادله ۶ محاسبه می‌گردد.

$$NA4 (M) = \frac{N \sum_{i=1}^N (r_j M - \bar{r} M)^4}{\left\{ \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N \left[\sum_{i=1}^N (r_{ij} - \bar{r}_j)^2 \right] \right\}^2} \quad (۶)$$

که \bar{r} متوسط سیگنال باقیمانده است و N تعداد کل نقاط داده‌ها در سیگنال زمان است. M بعنوان تعداد سیگنال زمان و j بعنوان شاخص سیگنال زمان مورد توجه است. NA4 همچون FM4 بی بعد است.

M6A. ۴-۴-۱-۲

M6A توسط مارتین در سال ۱۹۸۹ بعنوان شاخصی از آسیب‌دیدگی سطح قطعات دستگاه پیشنهاد شد [۱۶]. تئوری مورد نظر همان تئوری FM4 است. با این وجود انتظار می‌رود که M6A به اوج سیگنال به علت استفاده از ششمین ممان حساس‌تر باشد. عمدتاً این پارامتر جهت تشخیص عیوب سطحی در اجزای ماشین استفاده می‌شود. M6A به صورت معادله ۷ داده می‌شود.

$$M6A = \frac{N^2 \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^6}{\left[\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2 \right]^3} \quad (۷)$$

توجه کنید که در این مورد، ممان با توان سوم واریانس بی‌بعد می‌شود.

M8A. ۵-۴-۱-۲

پارامتر M8A، همچنین توسط مارتین در سال ۱۹۸۹ معرفی شد [۱۶] که نسبت به M6A به اوج سیگنال حساس تر است. M8A از هشتمین ممان توسط چهارمین توان واریانس طبق معادله ۸ زیر نرمال سازی می‌گردد.

$$M8A = \frac{N^3 \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^8}{[\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d}^2)]^4} \quad (8)$$

۲-۲. آنالیز حوزه فرکانس

روش‌های حوزه فرکانس شامل تبدیل سریع فوریه (FFT) و آنالیز کپستروم^{۱۵} و غیره می‌گردند. آنها از تفاوت تراکم طیفی سیگنال که به علت نقص در سیستم ایجاد می‌شود، جهت تشخیص آسیب‌دیدگی اجزای یک مجموعه استفاده می‌کنند. هر سیگنال حقیقی را می‌توان به ترکیبی از امواج سینوسی منحصر به فرد تقسیم کرد. هر موج سینوسی جدا شده از سیگنال ظاهراً به صورت یک خط عمودی در حوزه فرکانس می‌باشد. ارتفاع آن معرف بزرگی و موقعیت آن فرکانس را نشان می‌دهد. حوزه فرکانس نه تنها نواقص را در ماشین‌آلات چرخشی تعیین می‌کند، بلکه دلیل نقص را نیز مشخص می‌سازد.

۲-۲-۱. تبدیل سریع فوریه (FFT)

تبدیل سریع فوریه نمایش گسسته محدود فرکانسی است که اجزاء فرکانسی سیگنال ارتعاشی، با استفاده از این روش به راحتی نمایش داده می‌شود. واضح است که آنالیز فوریه، یک سیگنال را در حوزه‌ی زمان به حوزه فرکانس تبدیل می‌کند و اطلاعاتی را در خصوص اطلاعات زمانی نمی‌دهد و شناسایی زمان رخداد عیوب در سیگنال امکان پذیر نخواهد بود. حوزه فرکانس یک سیگنال را می‌توان با تبدیل فوریه طبق معادله ۹ بدست آورد [۱۷].

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (9)$$

که در آن $x(t)$ تابع اصلی در حوزه زمان، $X(f)$ تبدیل فوریه تابع زمانی، j ریشه مربع -1 است و e به نماد عدد نپر

اختصاص دارد، همچنین t نماد زمان، f نماد فرکانس است. محدودیت‌های ویژه در تبدیل داده‌های ارتعاشی از قلمرو زمان به قلمرو فرکانس وجود دارند. طریقه عملکرد تبدیل فوریه جهت تبدیل سیگنال از حوزه زمان به حوزه فرکانسی در شکل ۳ نشان داده شده است.

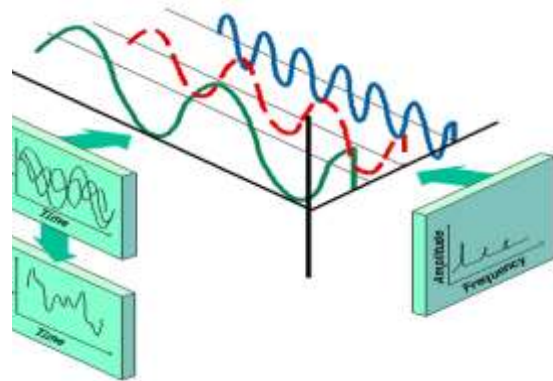
در FFT انواع اوج‌های کوتاه و بلند ارتعاشی مطابق با مشخصات فرکانسی، منشا نواقص را نشان می‌دهد. باید مشخص کرد که آیا فرکانس‌های هارمونیک تعیین شده از نقص بوجود آمده‌اند یا خیر [۱۸]:

- اگر اوج فرکانس اصلی مشاهده شده مربوط به عیب، در دو برابر آن فرکانس مجدداً ظاهر شود، احتمالاً این اوج سیگنال از عیبی در مجموعه نشات می‌گیرد.
- اگر اوج فرکانس اصلی مربوط به عیب ظاهر نشود ولی اوج فرکانس‌ها در دو، سه و یا چهار برابر فرکانس اصلی نقص ظاهر شود، این نیز نشانگر وجود نقص در سیستم است.

آنالیز طیفی پرکاربردترین تکنیک آنالیز ارتعاشی برای کنترل شرایط سیستم‌های انتقال است و ابزار ارزشمندی برای تشخیص نقص در ماشین‌های دوار بوده است. در ادامه مقاله برخی از پارامترهای استخراجی از نمودارهای FFT که در تشخیص عیوب ماشین‌های دوار کاربرد دارند، شرح داده خواهند شد.

دامنه فرکانس‌های شاخص تبدیل FFT: در تحلیل FFT آنچه نمایش داده می‌شود، فرکانس‌های مختلف با دامنه‌های متفاوت است که از اجزاء مختلف در ماشین ایجاد می‌شود. آنچه در عیب‌یابی مد نظر است فرکانس‌های شاخصی است که با شروع و رشد عیب، تغییر می‌کنند. با توجه به معرفی روش FFT در بخش قبل، می‌توان بعضی از مقادیر دامنه‌های فرکانس‌های شاخص را که قابلیت نمایش رخداد عیوب را دارند، به عنوان ویژگی در نظر گرفت. به طور مثال آسیب دندان چرخنده موجب افزایش دامنه باندهای جانبی می‌گردد. سیگنال ارتعاشی می‌تواند تقریبی از دامنه و فاز تابع نوسان ایجاد کند که با این تقریب‌زنی‌ها می‌توان آسیب‌دیدگی در جز مورد نظر را مشخص کرد [۱۹].

نسبت محدوده‌های فرکانسی: با توجه به اینکه با افزایش عیوب، محدوده فرکانسی بالا که شامل فرکانس‌های طبیعی سازه نیز می‌باشد، نسبت به محدوده فرکانسی پایین‌تر حساسیت بیشتری دارد، می‌توان از نسبت مساحت زیر نمودار دو محدوده فرکانسی (نسبت انرژی دو باند فرکانسی) به عنوان یک ویژگی فرکانسی در تشخیص افزایش عیب استفاده نمود شکل ۴.

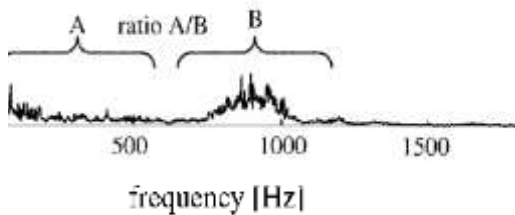


شکل ۳. تبدیل از حوزه زمان به حوزه فرکانسی (تبدیل سریع فوریه)

پس از اعمال تبدیل سریع فوریه بر روی سیگنال زمانی اولیه و انتقال به طیف فرکانسی در مقیاس لگاریتمی، با اعمال مجدد تبدیل سریع فوریه در واقع کپستروم سیگنال اولیه حاصل می‌شود که می‌توان طبق رابطه ۱۰ آن را بدست آورد.

$$C(\tau) = \text{FFT}^{-1}(\log(\text{FFT}(x))) \quad (10)$$

در این نوع تبدیل، ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال، به دامنه‌ی زمان بازگشت داده می‌شود و پیک‌هایی مطابق با تناوب فاصله‌های فرکانسی مشترک در طیف ارائه می‌شود. با استفاده از این تبدیل می‌توان هر سری هارمونیک موجود در طیف فرکانسی که منجر به پیچیدگی نمایش FFT می‌شود را تنها به صورت یک پیک قوی نمایش داد. شکل ۵ تفاوت بین حوزه زمان، نمودار فرکانسی و کپستروم حاصله از سیگنال ارتعاشی نشان داده شده است.



شکل ۴. نسبت دو باند فرکانسی به عنوان یک ویژگی استخراجی از سیگنال

عیب اساسی این روش عدم تشخیص دقیق عیوب با علائم گذرا از قبیل شکستگی است [۲۰].

آنالیز باند فرکانسی: اغلب، ظرفیت تشخیص نقص با استفاده از سطح کلی ارتعاش و یا معیارهای شکل موج را می‌توان با تقسیم سیگنال ارتعاشی به تعدادی باندهای فرکانس قبل از آنالیز بهبود بخشید. این کار می‌تواند با قرار دادن یک فیلتر آنالوگ بین سنسور ارتعاشی و دستگاه اندازه‌گیری انجام شود. استفاده از این نوع آنالیز بدین جهت سودمند است که ممکن است یک عیب در سیستم تغییر چندانی در سیگنال ارتعاشی ایجاد نکند (به علت انرژی بالاتر ارتعاشات غیرمرتبط با عیب) ولی در باندهای فرکانسی بتواند تغییر مشهودی ایجاد کند. برای یک جعبه‌دنده ساده، یک باند فرکانس ممکن است با ارتعاشات محور دوار و باند فرکانسی دیگر با دندانه‌های چرخنده و باند دیگر با تحریک تشدید ساختاری تعیین گردد که اینگونه کل قطعات جعبه دنده را پوشش می‌دهد [۲۱].

۲-۲-۲. تحلیل کپستروم

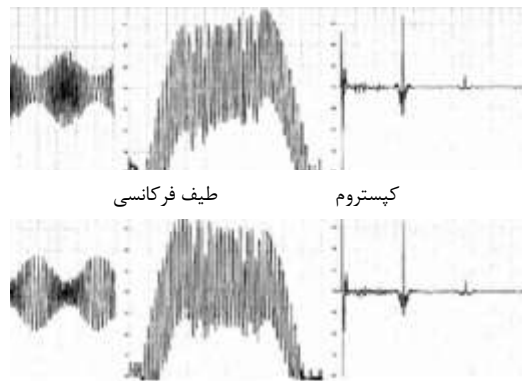
فاصله‌های بین این اوج‌ها که هر کدام متعلق به یک سری هارمونیک است جهت کشف سایش بیرینگ استفاده می‌شود. همچنین ابزار مفیدی جهت نمایش منفرد سری‌های هارمونیک مانند هارمونیک‌های دور محور دوران، درگیری چرخنده‌ها، فرکانس گذر ساچمه‌ها در بیرینگ‌ها و آنالیز انرژی هر خانواده باند جانبی محسوب می‌شود. شناسایی باندهای جانبی در عیب‌یابی چرخنده‌ها، پرها و بیرینگ‌ها کاربرد دارند. این نوع تبدیل نسبت به تغییرات بار و گشتاور و تغییر در روش انتقال نیرو بین شتاب‌سنج و منبع ارتعاش کمتر حساس هستند. جداسازی اثرات منابع و

مسیر انتقال ارتعاشات از کاربردهای دیگر این روش محسوب می‌شود [۵].

۲-۳. آنالیز حوزه زمان - فرکانس

در حوزه یک بعدی زمان یا فرکانس، هیچکدام به روشنی اطلاعات حوزه دیگر را نمایش نمی‌دهد. همچنین طیف یک سیگنال که از تابع حوزه زمان با کمک تکنیک تبدیل فوریه بدست می‌آید و بیانگر شدت و چگالی هر جزء فرکانسی از سیگنال است، اطلاعات دقیق و کافی را در خصوص سیگنال‌های گذرا حامل انرژی بالا در حوزه زمان نمی‌دهد. بنابراین بررسی دقیق‌تر انرژی سیگنال‌ها و بدست آوردن توصیف لحظه‌ای از انرژی و جواب دادن به برخی سئوالات در مورد توزیع انرژی مستلزم تحلیل زمان-فرکانس است. تعیین میزان انرژی در یک محدوده زمانی یا فرکانسی و یا بدست آوردن چگالی طیفی در یک محدوده زمانی مشخص بر اساس این روش امکان‌پذیر خواهد بود. از دیگر موارد کاربرد این روش بررسی فرآیندهای نا ایستا دارای گسست‌های متغیر با زمان است.

با توجه به آنکه طیف آنها نیز وابسته به زمان است، بررسی تغییرات زمانی محتوای طیفی این فرآیندها حائز اهمیت است. سیستم‌های متغیر با زمان که تابع فرکانسی آنها وابسته به زمان است، نیز با استفاده از روش زمان-فرکانسی قابل تحلیل است [۵]. در ادامه شرح برخی از این روش‌ها بیان می‌گردد.



شکل ۵. نمایش سیگنال در حوزه زمان، نمایش طیف فرکانسی و نمایش کپستروم به ترتیب از سمت چپ [۵]

۲-۳-۱. تبدیل فوریه زمان کوتاه^{۱۶}

بسیاری از سیگنال‌ها در واقع نا ایستا هستند و ویژگی‌های آنها گذرا است، به شکلی که در یک بازه زمانی بسیار کوتاه رخ می‌دهند و شامل ویژگی‌های محلی خاص در سیگنال هستند. آنالیز فوریه قابلیت تشخیص دقیق این تغییرات جزئی و ناگهانی را ندارد. جهت رفع عیوب اینچنینی در تبدیل فوریه، روش تبدیل فوریه زمان کوتاه معرفی شد. در این تبدیل، سیگنال به یک تابع دوبعدی زمان و فرکانس نگاشت شده و اطلاعاتی را شامل اینکه در چه زمانی و در چه فرکانسی یک عیب در سیگنال رخ داده است را ارائه می‌کنند. با استفاده از معادله ۱۱ می‌توان تبدیل فوریه زمان کوتاه را محاسبه کرد [۲۲].

$$X_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega\tau} x(\tau)h(\tau-t)d\tau \quad (11)$$

اسپکتروگرام^{۱۷} به صورت مربع تبدیل فوریه زمان کوتاه محاسبه می‌شود. نمودار اسپکتروگرام مقادیر فرکانسی برحسب زمان را نشان می‌دهد. عیب این روش آن است که با ثابت ماندن پنجره زمانی در طول زمان تحلیل، دقت فرکانسی نیز ثابت خواهد ماند [۲۳]. شکل ۶ اسپکتروگرام یک سیگنال سینوسی به معادله $\sin(400\pi t^2)$ که در آن فرکانس نسبت به زمان به صورت خطی افزایش می‌یابد را نشان داده است.

۲-۳-۲. تبدیل موجک^{۱۸}

در تبدیل فوریه، یک سیگنال به صورت مجموع یک سری موج‌های سینوسی با فرکانس‌های مختلف بیان می‌شود ولی در تحلیل موجک، سیگنال معادل مجموع یک سری از موجک‌های بدست آمده از جابجا شدن و انبساط و انقباض یک موجک مادر است. برخلاف یک موج سینوسی که تابعی نامتناهی و کاملاً پیوسته و متناوب است، موجک یک

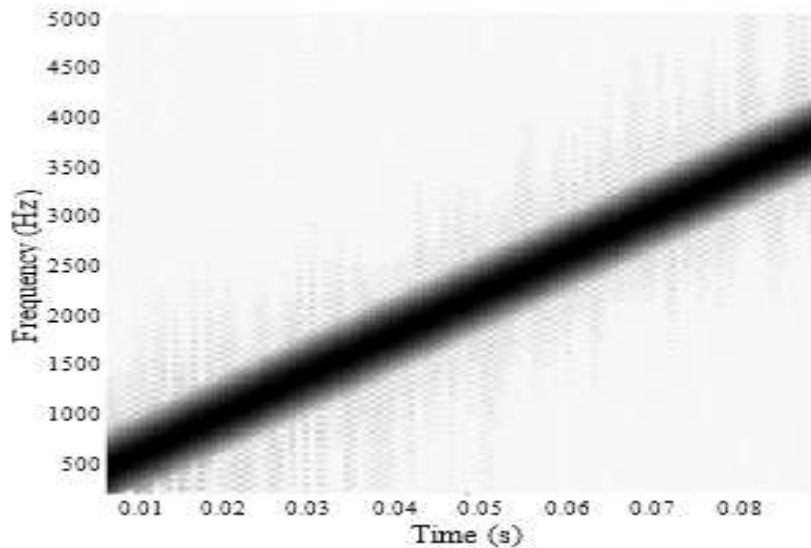
اجزای بحرانی ادوات دوار عنوان شوند، لذا جهت مطالعه عمیق پیرامون شیوه‌های مختلف تبدیل موجک توصیه می‌شود به مرجع [۲۵] مراجعه شود.

۳. کاربرد روش‌های تحلیل ارتعاشی

یکی از مدرن‌ترین تکنیک‌ها برای تشخیص عملکرد ماشین‌های صنعتی بر اساس آنالیز سیگنال‌های ارتعاش بدست آمده از سیستم مورد نظر هستند. هدف مشترک تشخیص وجود و نوع نقص در مراحل اولیه توسعه و کنترل تکامل آن به منظور برآورد عمر باقیمانده دستگاه و انتخاب یک طرح نگهداری مناسب است. در ادامه مقاله بررسی کاربردی روش‌های تحلیل ارتعاشی در اجزای مختلف ماشین اعم از چرخنده، محور دوار و یاتاقان‌ها آورده شده است.

سیگنال زمانی محدود با متوسط دامنه صفر و انرژی محدود است [۵]. دو نمونه موجک در شکل ۷ آورده شده است. در این نمودارها محور عمودی $\psi(t)$ تابع موجک مادر و محور افقی برحسب زمان t است.

تبدیل موجک در واقع تشابه سیگنال را با موجک انتخاب شده در ضرایب و موقعیت‌های مختلف، نشان داده و از این طریق سیگنال را توصیف می‌کند. شیوه‌های مختلف تبدیل موجک اعم از گسسته یا پیوسته در تحلیل فرکانس‌های ارتعاشی به کار می‌روند تا تغییرات فرکانسی ناشی از عیب سیستم به صورت محسوس تشخیص داده شوند. در این مقاله سعی شده است روش‌های مختلف تحلیل ارتعاشی صرفاً معرفی شوند و برخی از موارد کاربردی آنها در بررسی



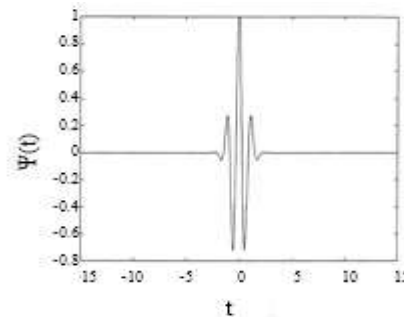
شکل ۶. اسپکتروگرام یک سیگنال سینوسی به معادله $\sin(400\pi t^2)$

۳-۱. چرخنده

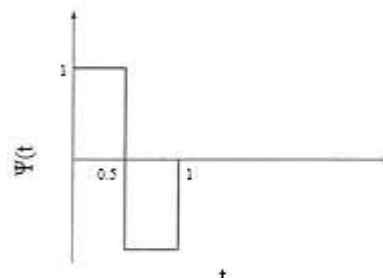
مهمترین فرکانس‌ها در طیف ارتعاش چرخنده شامل فرکانس درگیری چرخنده^{۱۹} و هارمونیک آن، به همراه باندهای جانبی به علت پدیده مدولاسیون (سوار شدن فرکانس عیب مانند شکستگی بر روی فرکانس درگیری چرخنده‌ها) هستند. افزایش تعداد و فراوانی باندهای جانبی ممکن است شرایط نقص را نشان دهد. فرکانس درگیری دو

چرخنده از حاصلضرب تعداد دندانه‌های چرخنده بزرگ (یا کوچک) در دور چرخنده بزرگ (یا کوچک) بدست می‌آید. دلایل اصلی نقص چرخنده شامل: (۱) خطای طراحی (۲) خطای کاربرد، (۳) خطای تولید هستند. خطای طراحی ممکن است به دلیل شکل هندسی نامناسب چرخنده، استفاده از مواد نادرست، کیفیت و روغنکاری نامطلوب و خصوصیات دیگر باشد. خطاهای کاربردی می‌توانند به علت مسائلی همچون ارتعاش، نصب و نگهداری باشند و اما خطاهای

تولید می‌توانند به شکل اشتباهات یا عدم توجه به دقت در ساخت یا روش عملیات حرارتی باشند [۵]. جهت بررسی سه عیب سایش، چرخنده با دندانهای نیمه شکسته، چرخنده با یک دندانهای شکسته پژوهشی انجام شده است [۲۶].



Morlet



Haar

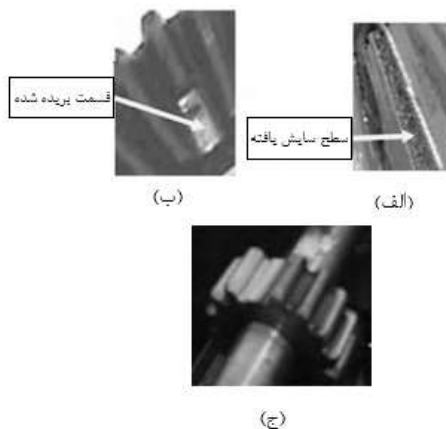
شکل ۷. دو نمونه تابع موجک [۲۴]

همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است عیوب مورد بررسی بر روی چرخنده کوچک اعمال شده‌اند، زیرا چرخنده کوچک به دلیل تعداد دندانهای کمتری که دارد، تعداد دور بیشتری را نسبت به چرخنده‌ی بزرگتر طی می‌کند، از این رو احتمال پیدایش عیوب خستگی، سایش و شکستگی در این چرخنده بیشتر است [۲۷].

نتایج نشان داده است که در مورد نقص سایش دندان تحلیل ارتعاشی FFT، در مورد نقص دندان نیمه شکسته و کامل شکسته تحلیل در حوزه زمانی به صورت مناسب‌تر قادر به تشخیص عیوب هستند [۲۶]. توجه شود که با شروع سایش در دندان چرخنده، صدای آنها به صورت پیوسته افزایش می‌یابد (دامنه ارتعاش زیاد می‌شود) تا جاییکه ترک‌ها شروع

به رشد خواهند کرد که خرابی بحرانی شکل می‌گیرد. بنابراین در حین داده‌برداری ارتعاشی از یک جفت چرخنده، توجه به تغییر ناگهانی دامنه ارتعاشات بسیار امری مهم است [۲۸].

یکی دیگر از عیوب چرخنده‌ها که می‌توان با استفاده از تحلیل ارتعاشی بررسی کرد، نحوه تشکیل و رشد ترک در دندانها می‌باشد که این امر با تغییر سفتی درگیری دو چرخنده همراه است. الگوی رشد ترک، تاثیر بسزایی در تغییرات پاسخ فرکانسی دارد. به طور مثال اگر ترک در عرض دندان و با عمق یکسان شروع به رشد کند، شاخص‌های آماری RMS و کشیدگی می‌توانند روند رشد را به خوبی نشان دهند [۲۹].



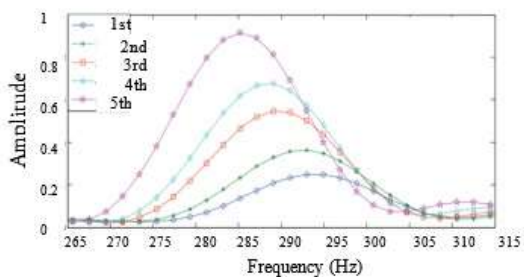
شکل ۸. الف- تصویری از دندانهای سایش یافته ب- دندانهای

نیمه شکسته ج- چرخنده با یک دندانهای شکسته [۲۶]

وانگ^{۲۰} با معرفی روشی ترکیبی توانست دامنه و فاز سیگنال ارتعاشی در فرکانس درگیری چرخنده برای هر دندان درگیر به صورت مجزا بدست آورد و از این مشخصه برای تشخیص ترک استفاده نماید. در شکل ۹ فاز فرکانس درگیری چرخنده برای هر دندان در دو حالت سالم و همراه با ترک نمایش داده شده است. در چرخنده سالم فاز سیگنال ارتعاشی حالتی هموار دارد، در صورتی که چرخنده معیوب دارای نموداری با نقاط شکستگی متعدد است. با این روش ابداعی بسیاری از ابهامات ناشی از مدولاسیون برطرف شده است [۳۰].

عنوان یکی از عوامل مخرب در ماشین‌های صنعتی است که می‌تواند باعث خرابی اجزای جانبی محور نظیر موتور و یاتاقان‌ها شود. نابالانسی جرمی باعث ایجاد اوج در نمودار FFT می‌شود که فرکانس آن دقیقاً برابر فرکانس دوران محور است و دامنه آن متناسب با مقدار نابالانسی است [۲۸].

محورهای دوار معمولاً تحت بار دینامیکی قرار می‌گیرند و از این لحاظ رشد ترک در محور می‌تواند عامل مخربی محسوب شود. این نوع خرابی در ماشین‌های صنعتی باعث صرف هزینه زیادی جهت تعمیر می‌شود، از این رو معرفی روشی مناسب جهت پایش وضعیت محور و بررسی رشد ترک بسیار ضروری است. تحقیقات نشان داده است که با رشد ترک در محور ضمن انتقال اوج سیگنال ارتعاشی به سمت فرکانس‌های پایین‌تر، دامنه سیگنال ارتعاشی نیز افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۱۰ آورده شده است در مراحل رشد ترک (مرحله اول تا پنجم) و در بازه فرکانسی بین ۲۶۵ تا ۳۱۵ هرگز تغییرات عنوان شده کاملاً مشهود است. بنابراین با استفاده از نمودار فرکانسی می‌توان به خوبی روند رشد ترک را در محورهای دوار زیر نظر داشت [۳۳].



شکل ۱۰. نمودار فرکانس ارتعاشی محور دوار در مراحل مختلف رشد ترک [۳۳]

۳-۳. یاتاقان‌ها

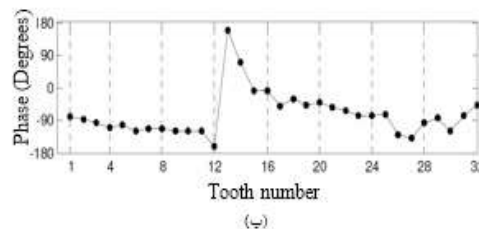
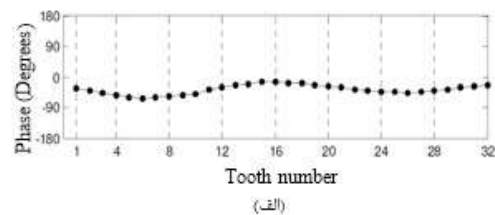
از آنجا که یاتاقان‌ها مراکز تحمل بار در ماشین‌ها هستند، از آسیب‌پذیرترین قطعات محسوب می‌شوند. اکثر تحلیل‌های ارتعاشی به منظور کنترل و زیرنظر داشتن وضعیت یاتاقان‌ها انجام می‌گیرد. تحلیل ارتعاشی به عنوان روشی قابل اعتماد و مطمئن جهت پایش وضعیت یاتاقان‌ها نزد بازرسان صنعتی

تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد که به کارگیری شاخص‌های میانگیری همزمان در یک الگوریتم شبکه عصبی می‌تواند با دقت نسبتاً خوبی ساینز ترک و مکان آن را تخمین بزند [۳۱].

۲-۳. محورهای دوار

یکی از عیوب متداول در محورهای خمیدگی محور است که می‌تواند موقتی یا دائمی باشد. خمیدگی موقت محور می‌تواند یک عیب گذرا بر اثر سایش محور رخ دهد. دلیل دیگر خمیدگی محور تغییرات حرارتی است که ممکن است بر اثر فرآیند ناصحیح راه‌اندازی سیستم، فقدان روانکار و اشتباهات نصب ایجاد شود.

بررسی اوج به اوج سیگنال ارتعاشی در سرعت دوران کم یکی از شاخص‌های بسیار مفید در تشخیص خمیدگی محورها محسوب می‌شود. اختلاف زاویه فاز سیگنال ارتعاشی در نقاط روبروی دو طرف محور دوار یکی دیگر از نشانه‌های وجود خمیدگی در محور دوار محسوب می‌شود [۳۲].



شکل ۹. فاز سیگنال ارتعاشی در فرکانس درگیری چرخنده‌ها.

الف) چرخنده سالم ب) چرخنده با ترک [۳۰]

نابالانسی جرمی یکی دیگر از عیوب در محورها است که ممکن است به علت ماشین‌کاری نامناسب، ناهمگنی ماده اولیه یا عملیات نگهداری بوجود آید. نابالانسی جرمی به

مورد قبول واقع شده است. خرابی در یاتاقان‌ها به علت عیوبی نظیر لقی بیش از حد، سایش غلتک‌ها و وجود ترک در هریک از اجزای یاتاقان رخ می‌دهد. شرایط محیطی نظیر آلودگی و رطوبت، تنش بیش از حد مجاز، عدم روان‌سازی مناسب باعث ایجاد و تشدید چنین عیوبی می‌شوند. تحلیلگر ارتعاشی علاوه بر تعیین عیوب در یاتاقان‌ها، باید بتواند برای این خرابی‌ها الگویی بدست آورد و دلایل منطقی برای ایجاد آنها ارائه کند [۲۸].

یاتاقان‌های غلتکی ارتعاشی با فرکانس معین ایجاد می‌کنند که دامنه این ارتعاشات بیانگر وضعیت آنهاست. این نوع یاتاقان‌ها چهار فرکانس ارتعاشی ایجاد می‌کنند که عبارتند از:

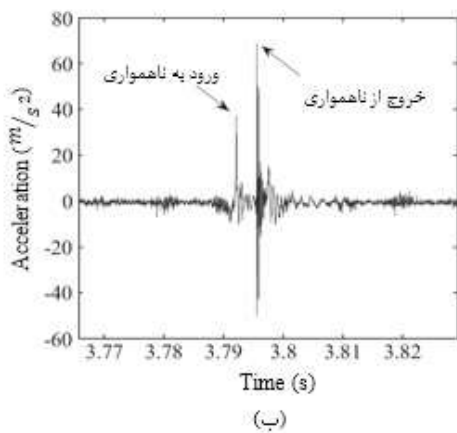
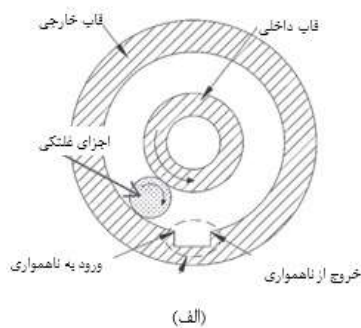
- ۱- فرکانس اصلی
- ۲- فرکانس چرخش ساچمه‌ها
- ۳- فرکانس حلقه خارجی
- ۴- فرکانس حلقه داخلی

روابط تئوری جهت محاسبه این فرکانس‌ها وجود دارد که تحلیلگر ارتعاشی با مقایسه بین این مقادیر و مقادیر اندازه‌گیری شده در حین کار، به وجود عیب در سیستم پی خواهد برد [۳۴].

یکی از عیوب شایع در یاتاقان‌های غلتکی ناهموار شدن^{۲۲} مسیر حرکت ساچمه‌ها می‌باشد که عموماً به علت بار اعمالی بیش از حد بر روی یاتاقان رخ می‌دهد. نمودار زمان-فرکانس می‌تواند اطلاعات مفیدی اعم از مکان و اندازه این نوع عیب در اختیار قرار دهد. در زمان ورود و خروج ساچمه‌ها به ناهمواری‌ها، سیگنال ارتعاشی دچار تغییراتی می‌شود که با بررسی این تغییرات می‌توان به مکان و شدت عیب ناهمواری پی برد. شکل ۱۱-الف شماتیک عیب ناهمواری را در یاتاقان‌های غلتکی بر روی قاب خارجی نشان می‌دهد. از طرفی دیگر شکل ۱۱-ب پاسخ ارتعاشی یاتاقان با عیب ناهمواری را در حوزه زمان نشان می‌دهد. همانطور که بر روی این نمودار مشخص است ورود به ناحیه ناهمواری تغییراتی با فرکانس نسبتاً پایین در نمودار ایجاد کرده ولی

خروج از این ناحیه فرکانس ارتعاشی بالاتری خواهد داشت [۳۵].

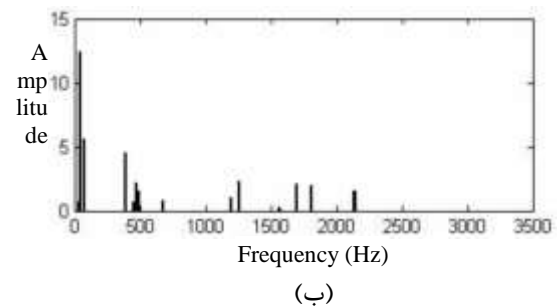
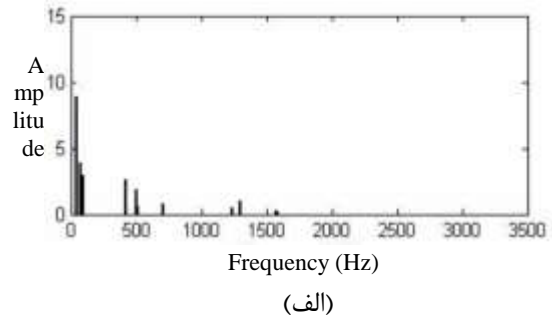
یکی از عیوب دیگر که در یاتاقان‌های غلتکی رخ می‌دهد و می‌تواند باعث شکست خستگی در آنها شود، سایش در قاب‌های خارجی و داخلی است. سایش ایجاد شده در یاتاقان‌ها با پایش وضعیت از طریق آنالیز ارتعاشی قابل تشخیص می‌باشد. وجود پالس‌های ضربه‌ای در نمودار ارتعاشی یاتاقان می‌تواند نشانگر وجود سایش باشد که با افزایش سایش، شدت و تعداد پالس‌های ضربه‌ای افزایش خواهد یافت [۳۶].



شکل ۱۱. الف) شماتیک عیب ناهمواری در یاتاقان غلتکی. ب) پاسخ فرکانسی در حوزه زمان برای یاتاقان معیوب [۳۸]

تشخیص نقص اجزای بحرانی دارند. به کارگیری تکنیک مناسب جهت تشخیص عیوب مختلف به اختصار در ذیل آورده شده است:

- **چرخنده‌ها:** تحلیل ارتعاشی FFT به عنوان روشی مناسب جهت تشخیص سایش دندانه به کار می‌رود. وجود پالس‌های ضربه‌ای در نمودار ارتعاشی یاتاقان می‌تواند نشانگر وجود سایش باشد که با افزایش سایش، شدت و تعداد پالس‌های ضربه‌ای افزایش می‌یابد. تحلیل در حوزه زمانی در مورد نقص دندانه نیمه شکسته و کامل شکسته قادر به تشخیص عیوب هستند. ترک در چرخنده‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری RMS و کشیدگی قابل رویت و شناسایی هستند.



شکل ۱۲. نمودار فرکانسی ارتعاشات یاتاقان لغزشی الف)

حالت سالم. ب) حالت معیوب [۳۷]

- **محورهای دوار:** بررسی اوج به اوج سیگنال ارتعاشی در سرعت دوران کم و اختلاف فاز در نقاط روبروی محور دوار از شاخص‌های بسیار مفید در تشخیص خمیدگی محورها محسوب می‌شوند. با رشد ترک در محور دوار، ضمن انتقال اوج سیگنال ارتعاشی به سمت فرکانس‌های پایین‌تر، دامنه سیگنال ارتعاشی نیز افزایش می‌یابد. نابالانسی جرمی باعث ایجاد اوج در نمودار FFT می‌شود که فرکانس آن دقیقاً برابر فرکانس دوران محور است و دامنه آن متناسب با مقدار نابالانسی است.

تکنیک‌های ارتعاشی جهت تشخیص یاتاقان‌های لغزشی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطالعات نشان می‌دهد که یکی از مفیدترین تکنیک‌های ارتعاشی در تشخیص یاتاقان معیوب غلتشی استفاده از نمودار FFT است. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، دامنه ارتعاشی یاتاقان‌های لغزشی در حالت معیوب به صورت محسوس از حالت سالم بیشتر است [۳۷].

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله تکنیک‌های تحلیل ارتعاشی جهت پایش وضعیت اجزای بحرانی ماشین‌های دوار معرفی شده است. تحلیل گران ارتعاشی با توجه به جزء مورد نظر و عیب موجود، تکنیک مناسب را انتخاب کرده تا به نحو احسن پایش وضعیت صورت گیرد. تکنیک‌های حوزه زمانی و شاخص‌ها (RMS، اوج سیگنال و فاکتور تیزی سیگنال) قادر به پیش‌بینی وقوع عیب نیستند، در حالیکه نقش مفیدی در

۵. مأخذ

- [1] E. Mucchi, A. Vecchio, "Acoustical signature analysis of a helicopter cabin in steady-state and run up operational conditions", *Measurement*, Vol.43, No.2, Issu.2, 2010, pp.283-293.
- [2] Falk, H., M. Rudolf, J. Peter, H. Frank, B. Adeline, "Helicopter Interior Noise Reduction by Using Active Gearbox Struts", *12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference)*, Eds.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [3] Randall, R. B., "Detection and diagnosis of incipient bearing failure in helicopter gearboxes", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 11, No. 2, 2004, pp.177-190.
- [4] McFadden, P. D., J. D. Smith, "Effect of transmission path on measured gear vibration", *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, Vol.108, No.3, 1986, pp.377-378.
- [5] فاتحی، م.، "عیب یابی هوشمند گیربکس هلیکوپتر مبتنی بر آنالیز ارتعاشات"، پروژه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۹.
- [6] McFadden, P. D., "A revised model for the extraction of periodic waveforms by time domain averaging", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.1, No.1, 1987, pp.83-95.
- [7] Li, H., Y. Zhang, H. Zheng, "Application of Hermitian wavelet to crack fault detection in gearbox", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.25, No.4, 2011, pp.1353-1363
- [8] Thompson, J. P., J. W. Quinn, "Fourth specialists meeting on reactor noise a signal processing method for improved loose parts detection and diagnosis", *Progress in Nuclear Energy*, Vol.15, 1985, pp.561-568.
- [9] Igba, J., K. Alemzadeh, C. Durugbo, E. T. Eiriksson, "Analysing RMS and peak values of vibration signals for condition monitoring of wind turbine gearboxes", *Renewable Energy*, Vol.91, 2016, pp.90-106.
- [10] Tandon, N., "A comparison of some vibration parameters for the condition monitoring of rolling element bearings", *Measurement*, Vol.12, No.3, 1994, pp.285-289.
- [11] Fei, S.-w., "Kurtosis forecasting of bearing vibration signal based on the hybrid model of empirical mode decomposition and RVM with artificial bee colony algorithm", *Expert Systems with Applications*, Vol.42, No.11, 2015, pp.5011-5018.
- [12] Goyal, D. B., S. Pabla, "The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health monitoring: A review", *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2015, pp.1-10
- [13] Stewart, R. M., "Some Useful Data Analysis Techniques for Gearbox Diagnostics", University of Southampton, 1977.
- [14] Mathew, J., R. J. Alfredson, "The condition monitoring of rolling element bearings using vibration analysis", *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, Vol.106, No.3, 1984, pp.447-453.
- [15] Zakrajsek, J.J., D.P. Townsend, H. J. Decker, "An Analysis of Gear Fault Detection Methods as Applied to Pitting Fatigue Failure Data", NASA and the US Army Aviation Systems Command, 1993.
- [16] Martin, H. R., F. Ismail, A. Sakuta, "Algorithms for statistical moment evaluation for machine health monitoring", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.6, No.4, 1992, pp.317-327.
- [17] Cooley, J. W., J. W. Tukey, "an algorithm for the machine calculation of complex fourier series", *Mathematics of Computation*, Vol.19, No.90, 1965, pp.297-301.
- [18] Ben-Daya, M., S. O. Duffuaa, A. Raouf, J. Knezevic, D. Ait-Kadi, "Handbook of Maintenance Management and Engineering": Springer London, 2009.
- [19] McFadden, P. D., "Detecting fatigue cracks in gears by amplitude and phase demodulation of the meshing vibration", *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, Vol.108, No.2, 1986, pp.165-170.
- [20] Shiroishi, J., S. L. Y. Li, S. Danyluk, T. Kurfess, "Vibration analysis for Bearing outer race condition diagnostics", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, Vol.21, 1999, pp.484-492.
- [21] Pattabiraman, T.R, K. Srinivasan, K. Malarmohan, "Assessment of sideband energy ratio technique in detection of wind turbine gear defects", *Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.2, 2015, pp.1-11.

- [22] Jin, Y., Z.-y. Hao, X. Zheng, "Comparison of different techniques for time-frequency analysis of internal combustion engine vibration signals", *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, Vol.12, No.7, 2011, pp.519-531
- [23] Yan, R., R. X. Gao, "Multi-scale enveloping spectrogram for vibration analysis in bearing defect diagnosis", *Tribology International*, Vol.42, No.2, 2009 pp.293-302.
- [24] Author Eds., "Wavelets: a Tutorial in Theory and Applications", Academic Press Professional, Inc., 1992.
- [25] Wang, W. J., "Wavelet Transform in Vibration Analysis for Mechanical Fault Diagnosis", *Shock and Vibration*, Vol.3, No.1, 1996.
- [۲۶] خدایی، م، م. رفیعیان، "شناسایی عیوب جعبه دنده به کمک آنالیز سیگنال ارتعاشی"، پنجمین کنفرانس پایش وضعیت و عیب یابی، ۱۳۸۹.
- [27] Wang, W., "An evaluation of some emerging techniques for gear fault detection", *Structural Health Monitoring*, Vol.2, No.3, 2003, pp.225-242.
- [۲۸] وک، و، "ارتعاشات ماشین های صنعتی"، انتشارات دانشگاه یزد، ۴۶۸ صفحه. مترجمین: منصور رفیعیان و حمیدرضا عزیزیان، ۱۳۹۰.
- [29] Mohammed, Omar, D. M. Rantatalo, J.-O. Aidanpää, U. Kumar, "Vibration signal analysis for gear fault diagnosis with various crack progression scenarios", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.41, No.1-2, 2013, pp.176-195
- [30] Wang, K., "Phase Information at Tooth Mesh Frequency for Gear Crack Diagnosis", in *Proceeding of*, 2712-2717.
- [31] Sukhwan, C., C. J. Li, "Estimation of gear tooth transverse crack size from vibration by fusing selected gear condition indices", *Measurement Science and Technology*, Vol.17, No.9, 2006, pp.2395.
- [۳۲] کاظمی، غ. آنالیز ارتعاشات و تریبولوژی، ۱۳۸۷.
- [33] Girondin, V., H. Morel, J.-P. Cassar, K. M. Pekpe, "Vibration-based fault detection of meshing shafts", *IFAC-PapersOnLine*, Vol.48, No.21, 2015, pp.560-565.
- [34] Mobley, R. K. "Chapter 15 - Failure-Mode Analysis, in: *Vibration Fundamentals*", Eds., pp. 138-180, Woburn: Newnes, 1999.
- [35] Moazen Ahmadi, A. C., Q. Howard, D. Petersen, "The path of rolling elements in defective bearings: Observations, analysis and methods to estimate spall size", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.366, 2016, pp.277-292.
- [36] Koulocheris, D., Stathis, A., Atsas, A., "Wear and multiple fault diagnosis on rolling bearings using vibration signal analysis", *International Journal of Engineering Science Invention*, Vol.3, No.4, 2014, pp.11-19.
- [37] Moosavian, A., H. Ahmadi, and A. Tabatabaefar. "Journal-Bearing Fault Detection Based on Vibration Analysis Using Feature Selection and Classification Techniques." *Elixir Control Eng* Vol.49, 2012, pp.9690-9693.
- [38] Sawalhi, N., R. B. Randall, "Vibration response of spalled rolling element bearings: Observations, simulations and signal processing techniques to track the spall size", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.25, No.3, 2011, pp.846-870.

پی نوشت:

1. Spectral analyzers
2. Oscilloscope
3. Oscillograph
4. Vibrograph
5. Standard Deviation
6. Root Mean Square (RMS)
7. Crest Factor
8. Peak
9. Kurtosis

-
10. Skewness
 11. Time synchronous Averaging (TSA)
 12. Stewart
 13. Zakrajsek
 14. Fast Fourier Transform
 15. Cepstrum
 16. Short time Fourier transform(STFT)
 17. Spectrogram
 18. Wavelet Transform (WT)
 19. Gear Mesh Frequency (GMF)
 20. Wang
 21. Shaft
 22. Spalling