

تبدیل موجک و کاربردهای آن برای پایش وضعیت ارتعاشی تجهیزات دوار (روش‌ها، راه کارها و مثال‌های عملی)

حسین وروانی فراهانی*

دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه یزد

farahani@stu.yazd.ac.ir

حمید سعیدی سورک

عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی برق

دانشگاه یزد

saeedi@yazd.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۵/۰۸

چکیده

ماشین‌آلات دوار به‌عنوان نیروی محرکه صنعت، نقش مهمی در فرآیند تولید و نیز فرآیندهای جانبی آن دارند. لذا پایش وضعیت و تشخیص به‌موقع عیوب آنها به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان، بخش مهمی از برنامه‌های نگهداری و تعمیرات به‌شمار می‌رود. با توسعه دانش فنی در زمینه تکنیک‌های پردازش سیگنال، کارآیی برنامه پایش وضعیت ارتعاشات در حال افزایش است. روش‌های مرسوم مانند مطالعه مستقیم سیگنال زمانی و یا تبدیل فوریه آن، اگر چه مزایای زیادی دارند، اما دچار محدودیت‌هایی نیز هستند. امروزه روش‌های جدیدی مانند تبدیل موجک، برای پوشش این محدودیت‌ها و بازکردن افق‌های جدید در زمینه پایش وضعیت ارتعاشی مطرح شده‌اند. این مقاله با هدف شناسایی زمینه‌های کاربرد تبدیل موجک در پایش وضعیت ارتعاشی، تدوین شده است. در ابتدا، مقدمه‌ای بر تبدیل موجک بیان شده و سپس کاربردهای مختلف آن در پایش وضعیت ارتعاشی ماشین‌آلات دوار بررسی شده است. به‌علاوه برای درک بهتر، مثال‌های عملی متعددی نیز طرح شده و مورد بحث قرار گرفته است. در خلال این مثال‌ها نشان داده شده است که تبدیل موجک، ابزاری مؤثر برای ارتقاء برنامه پایش وضعیت ارتعاشی ماشین‌آلات دوار است.

واژگان کلیدی: حوزه زمان-فرکانس، تبدیل موجک، پایش وضعیت، سیگنال ارتعاشات، ماشین‌آلات دوار

۱. مقدمه

می‌شود. برای تشخیص به‌موقع این وضعیت و انجام اقدامات اصلاحی با هدف بازگشت به شرایط مطلوب، از روش‌های مختلف پایش وضعیت به‌ویژه ارتعاش‌سنجی^۱ و تحلیل سیگنال ارتعاشات استفاده می‌شود [۱]. به‌واسطه متفاوت بودن شرایط کاری انواع ماشین‌آلات، گستردگی و تنوع عیوب قابل وقوع در آنها و نیز اثرات ناشی

حفظ کارکرد پایدار و قابلیت اطمینان بالا، یکی از اهداف اصلی در برنامه‌های نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات دوار است. این درحالی است که کارکرد این دسته از تجهیزات، بر اثر استفاده روزمره و روند استهلاک عادی آنها و یا به‌واسطه بروز شرایط غیرعادی و تسریع در روند خرابی، دچار اختلال

از شدت عیب در مراحل مختلف، رخ دادن عیوب منجر به ایجاد شرایط ارتعاشی متنوع و پیچیده‌ای می‌شود. لذا برای بررسی دقیق وضعیت ارتعاشی ماشین و عیب‌یابی مؤثر، لازم است تا از تکنیک‌های مختلف تحلیل ارتعاشات استفاده شود. برخی از این تکنیک‌ها شامل تحلیل سیگنال ارتعاشات در حوزه زمان، تحلیل سیگنال ارتعاشات در حوزه فرکانس، تحلیل سیگنال در حوزه زمان-فرکانس^۲، بررسی زاویه فاز ارتعاشات، دمدولاسیون^۳ سیگنال ارتعاشات و ... می‌باشد که هر یک از این تکنیک‌ها، دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود است [۱].

امروزه علاوه بر استفاده از این تکنیک‌ها، روش‌های پردازشی جدیدی مانند تبدیل موجک نیز در حال رایج شدن است. قابلیت‌ها و توانمندی‌های تبدیل موجک در این زمینه به حدی است که طی سال‌های گذشته، مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. برای مرور کلی پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، مراجع [۲] و [۳] را ببینید.

در این مقاله سعی شده است تا ضمن مرور اجمالی روش‌های تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی، تبدیل موجک معرفی شده و مفاهیم پایه آن توضیح داده شود. همچنین سعی شده تا توانمندی‌های تبدیل موجک و روش‌های مختلف مبتنی بر آن در راستای پایش وضعیت ارتعاشی ماشین‌آلات دوار، نشان داده شود. لذا در بخش ۲ این مقاله، روش‌های تحلیل سیگنال ارتعاشات معرفی خواهند شد. در بخش ۳، مقدمه‌ای بر تبدیل موجک بیان می‌شود. بخش ۴ به روش‌های مختلف مبتنی بر تبدیل موجک در آنالیز ارتعاشات همراه با ارائه مثال‌های عملی اختصاص یافته است. در بخش ۵، برخی مفاهیم پایه در عیب‌یابی یا تاقان‌های غلتشی و چرخ‌دنده‌ها مرور شده و در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش ۶ آمده است.

۲. روش‌های تحلیل سیگنال ارتعاشات

به‌طور کلی یک سیگنال ارتعاشات می‌تواند در حوزه زمان، حوزه فرکانس و یا حوزه‌ی مشترک زمان-فرکانس مورد

مطالعه قرار گیرد [۱]. در ادامه هر یک از روش‌های فوق به اختصار معرفی خواهد شد.

۲-۱. بررسی در حوزه زمان

اساس تحلیل ارتعاشات ماشین‌آلات دوار با هدف پایش وضعیت و عیب‌یابی، بر اندازه‌گیری و ثبت سیگنال ارتعاشات به کمک سنسور ارتعاشات استوار است. سیگنالی که بدین طریق به دست می‌آید، سیگنال زمانی یا اصطلاحاً شکل موج ارتعاشات نامیده می‌شود. یکی از روش‌های مرسوم برای آنالیز، مطالعه مستقیم این سیگنال است. بررسی دامنه برای تعیین شدت عیب، بررسی مؤلفه‌های ارتعاشی غالب و تشخیص فرکانس وقوع آنها، بررسی پدیده‌های خاصی مانند ضربان^۴ و مدولاسیون، تشخیص بارهای ضربه‌ای، بررسی تقارن یا عدم تقارن سیگنال نسبت به محور دامنه و نیز نسبت به محور زمان از جمله روش‌های بررسی مستقیم سیگنال ارتعاشات در حوزه زمان به‌شمار می‌روند [۴]. این روش در شرایطی که یک عیب یا پدیده غالب در الگوی ارتعاشی وجود داشته باشد، روش مؤثری محسوب می‌شود. اما در صورتی که عیوب مختلفی به‌صورت هم‌زمان وجود داشته باشند و یا میزان نویز موجود در سیگنال بالا باشد، این روش کارایی خود را از دست داده و یا کارایی آن کم خواهد شد.

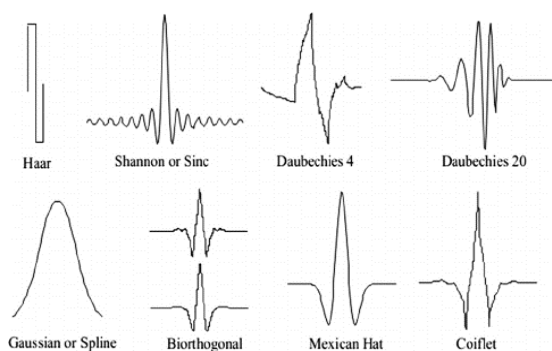
۲-۲. بررسی در حوزه فرکانس

با اعمال تبدیل فوریه بر روی سیگنال زمانی ارتعاشات، امکان بررسی آن در حوزه فرکانس فراهم می‌شود. تبدیل فوریه، میزان شباهت سیگنال را با مجموعه‌ای از خانواده توابع سینوسی و کسینوسی با فرکانس‌های مختلف، سنجیده و وزن هر یک از این توابع را در تشکیل سیگنال مورد نظر تعیین می‌کند. از این طریق، محتوای فرکانسی سیگنال شناسایی می‌شود. تبدیل فوریه پیوسته بر اساس رابطه‌ی ۱ به‌دست می‌آید [۱]:

این درحالی است که برای بررسی فرکانس‌های پایین، قدرت تفکیک بالاتری نسبت به فرکانس‌های بالاتر مورد نیاز است. همچنین در تبدیل ویگنر ویل برای سیگنال‌هایی که دارای بیش از یک مؤلفه‌ی فرکانسی هستند، مؤلفه‌های متقاطع^{۱۰} و غیرواقعی به سیگنال اضافه می‌شود که کار بررسی را دشوار می‌کند.

۳. مقدمه‌ای بر تبدیل موجک

تبدیل موجک^{۱۱}، یکی دیگر از روش‌های بررسی در حوزه‌ی مشترک زمان-فرکانس است. در این روش، به جای استفاده از توابع سینوسی و کسینوسی (مانند تبدیل فوریه)، از توابعی به نام موجک استفاده می‌شود. شکل ۱ چند نمونه از توابع موجک مختلف را در حوزه زمان نمایش می‌دهد.



شکل ۱. خانواده‌ای از موجک‌های مختلف در حوزه زمان [۵]

هنگام پیاده‌سازی تبدیل موجک، تابع موجک شکل خود را حفظ می‌کند اما در طول سیگنال، جابه‌جا شده و نیز در طی جابه‌جا شدن، فشرده و باز می‌شود و بدین ترتیب، کل سیگنال را در می‌نورد. این روش بر خلاف تبدیل فوریه زمان کوتاه، قادر است تا قدرت تفکیک متفاوتی را برای محدوده‌های فرکانس پایین و بالا ایجاد نماید [۲].

۳-۱. تبدیل موجک پیوسته و معکوس آن

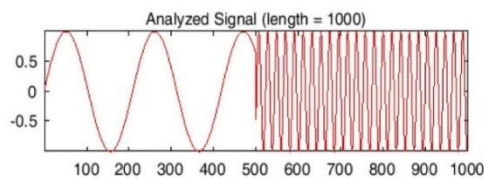
تبدیل موجک پیوسته سیگنال ارتعاشی $x(t)$ ، بر اساس رابطه ۲ به دست می‌آید [۲]:

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} G(t) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (۱)$$

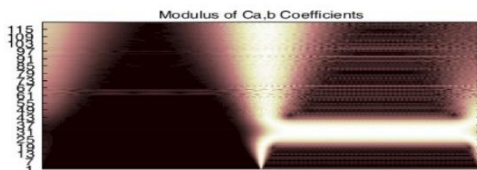
در این رابطه، $g(t)$ سیگنال ارتعاشات، f فرکانس و t زمان بوده و $G(f)$ به عنوان تبدیل فوریه سیگنال شناخته می‌شود. برای پیاده‌سازی تبدیل فوریه در عمل، از تبدیل فوریه گسسته^۵ استفاده می‌شود. شایان ذکر است بهترین الگوریتم برای پیاده‌سازی تبدیل فوریه گسسته، الگوریتم تبدیل فوریه سریع^۶ می‌باشد. شناسایی مؤلفه‌های فرکانسی موجود در سیگنال ارتعاشات و مقایسه آنها با مشخصه‌های فرکانسی عیوب مختلف، یکی از روش‌های مهم و رایج در پایش وضعیت ماشین‌آلات دوار است. تبدیل فوریه علی‌رغم مزایای زیاد، محدودیت‌هایی نیز دارد که مهم‌ترین آن، عدم تعیین زمان رخ دادن وقایع فرکانسی موجود در طیف سیگنال است.

۳-۲. بررسی در حوزه‌ی مشترک زمان-فرکانس

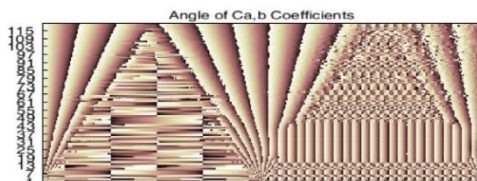
روش‌های بررسی مستقیم سیگنال زمانی ارتعاشات و یا تبدیل فوریه آن، دارای محدودیت‌هایی هستند. از جمله اینکه این روش‌ها برای بررسی ارتعاشات در حالت گذرا و یا بررسی ارتعاشات از نوع غیر ایستادن^۷ مناسب نیستند. علت این محدودیت این است که زمان وقایع مختلف در سیگنال ارتعاشات (برای مثال وقوع یک پدیده ضربه‌ای در یک لحظه مشخص در سیگنال)، در تبدیل فوریه قابل تشخیص نیست. یکی از روش‌های نسبتاً جدید برای مطالعه سیگنال ارتعاشات، مطالعه آن در حوزه‌ی مشترک زمان-فرکانس می‌باشد [۱]. روش‌های مختلفی مانند تبدیل فوریه زمان کوتاه^۸ و تبدیل ویگنر ویل^۹ برای این منظور به کار می‌روند. به کمک این روش‌ها می‌توان ارتعاشات گذرا و یا ارتعاشات غیرایستادن را نیز به خوبی بررسی کرد. البته این روش‌ها نیز دارای محدودیت‌هایی هستند. از جمله اینکه روش تبدیل فوریه زمان کوتاه، قدرت تفکیک یکسانی را در کل حوزه زمان و فرکانس فراهم می‌کند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲. یک سیگنال زمانی و منحنی‌های تبدیل موجک آن -
 (الف) سیگنال زمانی، (ب) منحنی مقدار مطلق دامنه (ج) منحنی
 نقشه فاز

نمونه‌ای از منحنی نقشه فاز و نیز منحنی مقدار مطلق دامنه^{۱۵}
 در شکل ۲ نمایش داده شده است. این منحنی به کمک نرم
 افزار متلب^{۱۶} رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود،
 در هردوی این منحنی‌ها، نقاطی که سیگنال دچار تغییر
 ناگهانی شده، به‌خوبی مشخص شده‌اند. این نقاط، با نام کلی
 نقاط منفرد^{۱۷} شناخته شده و معمولاً بخش مهمی از سیگنال
 محسوب می‌شوند که دارای اطلاعات با ارزشی هستند.

۲-۳. تبدیل موجک گسسته و معکوس آن

برای پیاده‌سازی تبدیل موجک گسسته، راه کارهای مختلفی
 وجود دارد که یکی از رایج‌ترین آنها، پیاده‌سازی به کمک
 تئوری تحلیل با تفکیک چندگانه^{۱۸} است [۷] و [۶]. در این
 روش، پیاده‌سازی تبدیل موجک گسسته به کمک یک سری
 عملیات متوالی صورت می‌پذیرد که هر مرحله از این عملیات،
 شامل فیلتر کردن سیگنال و نمونه‌کاهی^{۱۹} می‌باشد. در هر
 مرحله از فرآیند تبدیل موجک گسسته، محتوای سیگنال در

$$W_x(a, b; \psi) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

در این رابطه، a پارامتر مقیاس، b پارامتر جابجایی، $\psi(t)$
 تابع موجک مادر و علامت *، معرف مزدوج مختلط است.
 به عبارت دقیق‌تر، سه پارامتر مقیاس، جابه‌جایی و تابع موجک
 مادر، در نتیجه تبدیل موجک، مؤثر هستند. از آنجا که تبدیل
 موجک یک تبدیل خطی است، لذا معکوس پذیر می‌باشد.
 معکوس تبدیل موجک پیوسته بر اساس رابطه ۳ به‌دست
 می‌آید [۶]:

$$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_x(a, b; \psi) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) db \frac{da}{a^2} \quad (3)$$

C_ψ شرط مقبولیت^{۲۰} می‌باشد. منحنی اسکالوگرام^{۲۱} تبدیل
 موجک، یکی از روش‌های نشان دادن محتوای این تبدیل بر
 حسب پارامترهای جابه‌جایی و مقیاس است که مطابق رابطه
 ۴ بیان می‌شود [۲]:

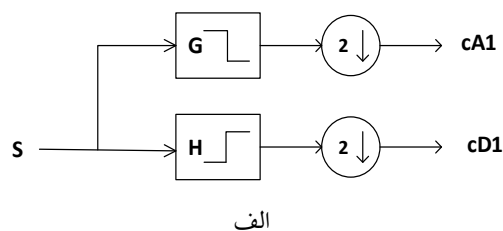
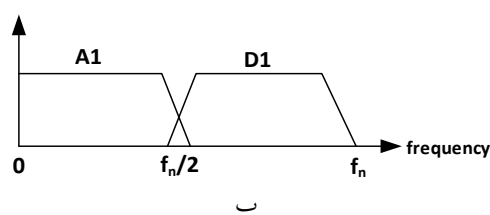
$$SG_x(a, b; \psi) = |W_x(a, b; \psi)|^2 \quad (4)$$

این منحنی، چگالی انرژی سیگنال را در صفحه مقیاس
 (فرکانس) بر حسب جابه‌جایی (زمان) نشان می‌دهد. منحنی
 نقشه فاز^{۲۲} تبدیل موجک نیز یکی دیگر از روش‌های نشان-
 دادن محتوای این تبدیل بر حسب پارامترهای جابجایی و
 مقیاس بوده و عبارت است از [۲]:

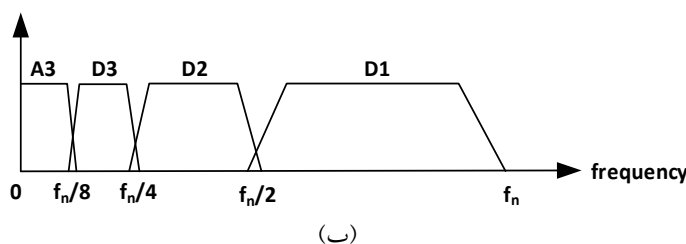
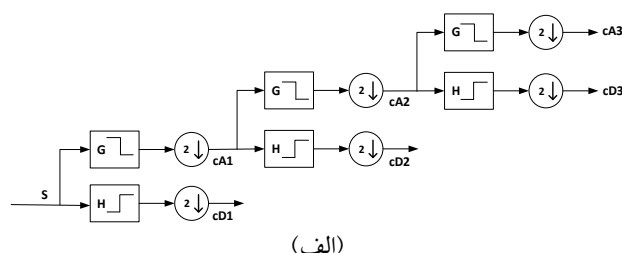
$$WP_x(a, b; \psi) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[W_x(a, b; \psi)]}{\text{Re}[W_x(a, b; \psi)]} \right) \quad (5)$$

و ضرائب تقريب، محتوای فرکانس پایین سیگنال را دربر دارند. شکل ۳-الف، فرایند تبدیل موجک گسسته را برای سطح اول از تجزیه سیگنال و شکل ۳-ب، باندهای فرکانسی مربوطه را نشان می‌دهد. منظور از f_n در این شکل، نصف فرکانس نمونه‌برداری سیگنال اولیه است. در [۷] نشان داده می‌شود که ادامه روند تجزیه سیگنال به سطوح بعدی، با فیلتر کردن ضرائب تقرب سطح اول تجزیه (اعمال فیلترهای پایین‌گذر و بالاگذر) و کاهش تعداد نمونه‌ها مطابق شکل ۴-الف صورت می‌پذیرد. این فرایند به‌طور مشابه و تا سطح دلخواه از تجزیه ادامه می‌یابد. شکل ۴-الف، فرایند تبدیل موجک گسسته را تا سه سطح تجزیه و شکل ۴-ب، باندهای فرکانسی مربوط به هر سطح از تجزیه را نشان می‌دهد.

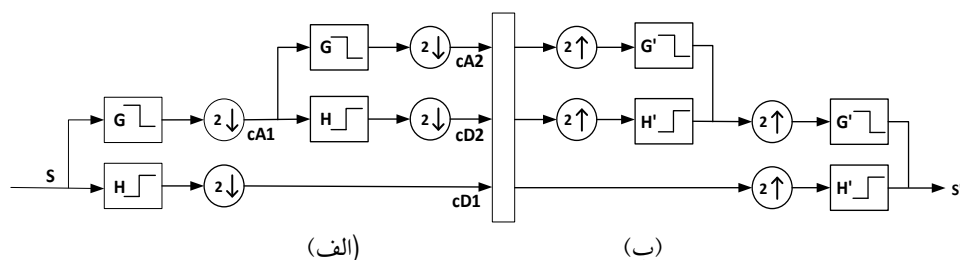
داخل دو زیرفضای متعامد تجزیه می‌شود. نشان داده می‌شود که در یک شاخه ابتدا یک فیلتر پایین‌گذر (G) بر روی سیگنال گسسته اثر کرده و سپس تعداد نمونه‌های سیگنال، به نصف کاهش می‌یابد. منظور از کاهش نمونه‌ها به نصف، این است که نمونه‌های سیگنال، یک در میان حذف شده و بقیه آنها حفظ می‌شوند. خروجی این مرحله، اصطلاحاً ضرائب تقرب سیگنال^{۲۰} در سطح اول تجزیه (ca1)، نامیده می‌شود. به‌طور موازی، یک فیلتر بالاگذر (H) بر روی سیگنال گسسته موجود اثر کرده و سپس تعداد نمونه‌های سیگنال، به نصف کاهش می‌یابد. خروجی این مرحله، اصطلاحاً ضرائب جزئیات^{۲۱} سیگنال در سطح اول تجزیه (cd1)، نامیده می‌شود. همان‌طور که از نوع فیلترهای اعمال شده مشخص است، ضرائب جزئیات، محتوای فرکانس بالا



شکل ۳. (الف) روال پیاده‌سازی تبدیل موجک به روش MRA (ب) تفکیک محتوای فرکانسی در دو باند [۷]



شکل ۴. (الف) فرایند تبدیل موجک گسسته سیگنال تا سه سطح تجزیه، (ب) تفکیک محتوای فرکانسی در چهار باند [۷]



شکل ۵. (الف) تبدیل موجک گسسته تا دو سطح تجزیه (ب) تبدیل موجک گسسته معکوس برای بازسازی سیگنال اولیه [۷]

متفاوت، شکل ۱، به صورت جداگانه به دست می آیند و ضرایب آنها موجود است.

- امکان بازسازی سیگنال براساس هر یک از ضرائب تجزیه سیگنال در سطوح مختلف (مانند $cA1$ ، $cD1$ ، $cD2$ و ...)، به صورت جداگانه نیز وجود دارد. یعنی به عنوان مثال برای بازسازی سیگنال صرفا براساس $cA1$ ، مقدار سایر ضرائب برابر با صفر قرار داده شده و سپس روند مندرج در شکل ۵-ب، طی می شود. سیگنالی که بدین ترتیب به دست می آید، صرفا محتوای فرکانسی مربوط به $cA1$ را در بر دارد. این موضوع در آنالیز ارتعاشات تجهیزات دوار کاربرد دارد که برای نمونه می توانید مثال دو در بخش ۴-۲ این مقاله را ببینید.

۳-۳. تبدیل بسته موجک

تبدیل بسته موجک در واقع گسترش منطقی تبدیل موجک گسسته است. در این روش، برخلاف روش مرسوم در تبدیل گسسته موجک، ضرائب جزئیات نیز مجددا تجزیه می شوند [۷]. شکل ۶، فرایند تجزیه سیگنال به کمک تبدیل بسته موجک را نشان می دهد. شایان ذکر است که هر یک از زیر فضاها در تبدیل بسته موجک، معادل یک باند مشخص در حوزه فرکانس است. به عبارت دیگر، با تجزیه یک سیگنال به کمک تبدیل بسته موجک، میزان انرژی آن در باندهای فرکانسی مختلف، مشخص می شود. از آنجایی که تبدیل بسته موجک، زیرفضاهای بیشتری نسبت به تبدیل گسسته

همان طور که ملاحظه می شود، با اعمال تبدیل موجک گسسته، محتوای فرکانسی سیگنال، به چندین باند مختلف تقسیم شده است. با انجام عملیات معکوس مشابه روند شکل ۴-الف، می توان سیگنال اولیه را بر اساس ضرائب تبدیل موجک گسسته، بازسازی کرد [۷]. این عملیات، تبدیل موجک گسسته معکوس به شمار می رود که روند آن، در شکل ۵ نمایش داده شده است. دقت نمایید که در روند معکوس تبدیل موجک گسسته، فیلترهای بالاگذر و پایین گذر متفاوتی استفاده می شود که در شکل فوق با H' و G' نشان داده شده اند. همچنین به جای کاهش نمونه های سیگنال، تعداد نمونه های سیگنال گسسته در هر مرحله به دو برابر افزایش می یابد. منظور از افزایش تعداد نمونه های سیگنال به دو برابر این است که به صورت یک در میان، بین نمونه های سیگنال گسسته، صفر قرار داده می شود. این کار بدین منظور است که تعداد نمونه های سیگنال بازسازی شده با سیگنال اولیه، برابر باشد. همان گونه که در شکل نشان داده شده است ابتدا سیگنال گسسته تا ۲ سطح تجزیه شده است شکل ۵-الف و ضرایب تجزیه سیگنال در زیرفضاهای متعامد، $cD1$ ، $cA2$ و $cD2$ می باشند. اکنون از روی این ضرایب تجزیه، می توان سیگنال را به طور کامل بازسازی کرد. شکل ۵-ب. در اینجا چند نکته مهم نیز باید ذکر شود که عبارتند از:

- مجموعه فیلترهای مورد استفاده در تبدیل موجک گسسته و تبدیل معکوس آن (یعنی فیلترهای H ، G ، H' و G')، اصطلاحا فیلترهای چهارگانه آیینه ای^{۲۲} نامیده می شوند. این فیلترها برای هر موجک مادر

که در آن با فرض حقیقی بودن ضرایب تجزیه موجک :

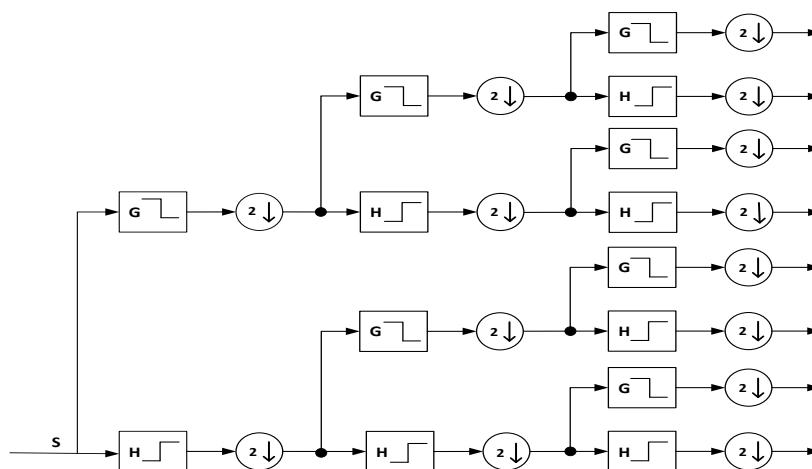
$$p[n] = \frac{a[n]^2}{||a||^2} \quad (7)$$

است که $a[n]$ بردار ضرائب تجزیه سیگنال در هر سطح تجزیه مورد نظر و $||a||$ نرم بردار فوق می باشد. بر این اساس، تجزیه هر گره والد (نقاطی که در شکل ۶ با دایره توپر مشخص شده اند) به شرطی انجام می شود که جمع آنتروپی دو گره فرزند آن، کمتر از آنتروپی والد باشد.

موجک دارد، لذا محتوای فرکانسی سیگنال را بهتر نشان می دهد. حتی می توان به کمک تبدیل بسته موجک، طیف فرکانسی سیگنال ارتعاشات را نیز تخمین زد [۷].

نکته مهم دیگری که در خصوص تبدیل بسته موجک وجود دارد، امکان تصمیم گیری در خصوص تجزیه و یا عدم تجزیه یک گره خاص بر اساس معیارهای بهینه سازی است. به عنوان مثال، معیار آنتروپی شانون^{۲۳} برای این کار استفاده می شود. مقدار آنتروپی هر گره بر اساس رابطه ۶ به دست می آید [۸]:

$$\text{Shanon Entropy} = - \sum_n p[n] \log(p[n]) \quad (6)$$



شکل ۶. فرآیند تجزیه سیگنال به کمک تبدیل بسته موجک [۷]

مطالعات و پژوهش های زیادی در این خصوص صورت پذیرفته است. پنگ و چو [۲] و نیز یانگ و دیگران [۳]، فعالیت های پژوهشی انجام شده طی سال های گذشته در این زمینه را بررسی کرده اند.

فهرست روش ها و ابزارهای مختلفی که در این راستا استفاده می شود، در جدول ۱ درج شده است. به دست آوردن اطلاعات مفید از سیگنال (استخراج ویژگی های^{۲۵} مشخصی از سیگنال)، حذف محتوای ناخواسته از سیگنال (نویززدایی) و تقویت محتوای مورد نظر در سیگنال (آنالیز نقاط منفرد)، تنها

درخت تجزیه ای که با اعمال این معیار به دست می آید، درخت تجزیه بهینه^{۲۴} نامیده می شود.

۴. استفاده از تبدیل موجک در آنالیز ارتعاشات

تا اینجا سعی شد تبدیل موجک و تبدیل بسته موجک به طور بسیار مختصر شرح داده شود. در ادامه بنا بر این است که کاربرد این تبدیل برای آنالیز ارتعاشات مورد بررسی قرار گیرد. سال های متعددی است که کاربرد تبدیل موجک برای آنالیز ارتعاشات، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته و

بخشی از قابلیت‌های تبدیل موجک در این زمینه هستند. در ادامه، هر یک از این روش‌ها به اجمال معرفی و سعی شده تا کارایی روش‌های مختلف با ذکر مثال‌های عملی نشان داده شود. بنای نویسندگان بر ارائه مثال‌های عملی متنوع بوده تا هرکدام، جنبه‌ای کاربردی از تبدیل موجک را نشان

دهد. اما بدیهی است با توجه به گستردگی زیاد این مبحث، امکان پوشش همه ویژگی‌ها و کاربردها نبوده و خواننده علاقمند، می‌بایست به مراجع مختلف در این زمینه، مراجعه نموده و یا در عمل از آن استفاده نمایند.

جدول ۱. روش‌ها و ابزارهای تحلیل سیگنال ارتعاشات به کمک تبدیل موجک

نام تکنیک	روش‌ها و ابزارهای تحلیلی
تبدیل موجک پیوسته	منحنی اسکالوگرام - منحنی نقشه فاز - شاخص‌های آماری مانند ممان خاکستری ^{۲۶} یا فرکانس میانگین و ... - آنالیز نقاط منفرد
تبدیل موجک گسسته - تبدیل بسته موجک	مقادیر ضرائب جزئیات و تقریب در سطوح مختلف تجزیه - الگوی توزیع خطای باقیمانده در روند محاسبه ضرائب - انرژی نودها در سطوح مختلف تجزیه - تخمین طیف فرکانسی ارتعاشات - نویززدایی از سیگنال
تبدیل موجک پیوسته و گسسته	استفاده از توابع موجک مختلف - طراحی تابع موجک جدید - ترکیب روش تبدیل موجک با سایر روش‌های تحلیل سیگنال

۴-۱. استفاده از تبدیل موجک پیوسته

تبدیل موجک پیوسته بر اساس رابطه ۲ به‌دست می‌آید. برای بررسی مستقیم سیگنال ارتعاشات با این روش، می‌توان از منحنی اسکالوگرام و یا منحنی نقشه فاز استفاده کرد که توسط روابط ۳ و ۴ معرفی شده‌اند. همچنین می‌توان یکسری شاخص‌های آماری مانند ممان خاکستری و یا فرکانس میانگین^{۲۷} از ضرائب این تبدیل استخراج کرده و از آنها به‌عنوان شاخص‌های وضعیت و ابزارهای عیب‌یابی استفاده نمود. به‌عنوان مثال، فرکانس میانگین از روی منحنی اسکالوگرام (چگالی انرژی) به‌دست می‌آید و مربوط به نقطه‌ای است که برای یک زمان مشخص، مرکز ثقل انرژی هر ناحیه از منحنی فوق است. فرکانس میانگین بر حسب زمان از رابطه ۸ به‌دست می‌آید [۹]:

$$\Omega_f(t) = M_1(t) / M_0(t) \quad (8)$$

در رابطه بالا $M_n(t)$ ممان فرکانسی مرتبه n بوده و از رابطه ۹ حاصل می‌شود [۹]:

$$M_n(t) = \int_0^{F_N} f^n |W_x(a, b; \psi)|^2 df \quad (9)$$

در این رابطه، $W_x(a, b; \psi)$ اندازه تبدیل موجک، f فرکانس، n مرتبه ممان فرکانسی و f^n نصف فرکانس نمونه برداری می‌باشد. فرکانس میانگین، نشان‌دهنده نوع عیبی است که در تجهیز دوار وجود دارد.

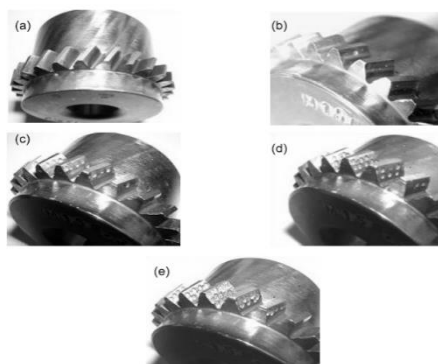
مثال یک: تشخیص زود هنگام آسیب در چرخ‌دنده

به کمک شاخص‌های آماری مبتنی بر اسکالوگرام

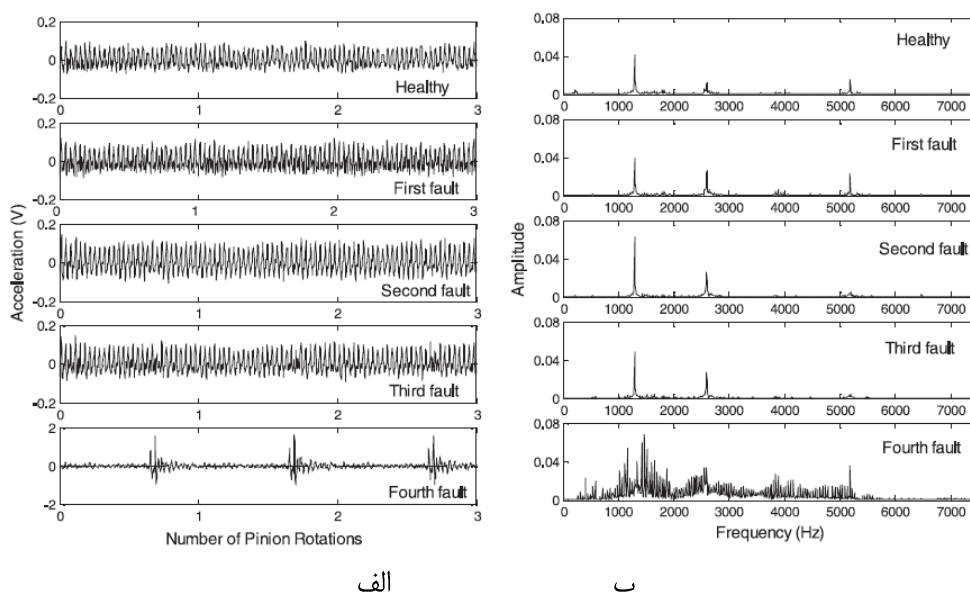
در این قسمت مثالی از تشخیص آسیب در چرخ‌دنده‌ها به کمک شاخص فرکانس میانگین مطرح می‌شود [۹]. برای بررسی کارایی این روش، آسیب سطحی دندانه گیربکس بر روی یک استند تست تجربی، مدل‌سازی شده است. تصویر چرخ‌دنده مورد نظر با شدت آسیب‌های مختلف در شکل ۷ آمده است. سیگنال‌های اولیه ارتعاشات مربوط به هر مرحله از خرابی و طیف فرکانسی مربوطه، در شکل ۸ درج شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با روش‌های مرسوم،

عیب را تنها می‌توان در مرحله بسیار پیشرفته خرابی تشخیص داد. شکل ۹ منحنی اسکالوگرام و منحنی تغییرات فرکانس میانگین را برای چرخ‌دنده سالم و نیز چرخ‌دنده معیوب در اولین مرحله از آسیب (حالت b در شکل ۷) نشان می‌دهد. فرکانس درگیری دندانه‌ها در این مثال، 1294Hz می‌باشد. آسیب سطحی بر روی چرخ‌دنده، به‌صورت فرورفتگی‌های تکرار شونده در منحنی تغییرات فرکانس میانگین، بروز پیدا می‌کند که در شکل ۹-ب با دایره

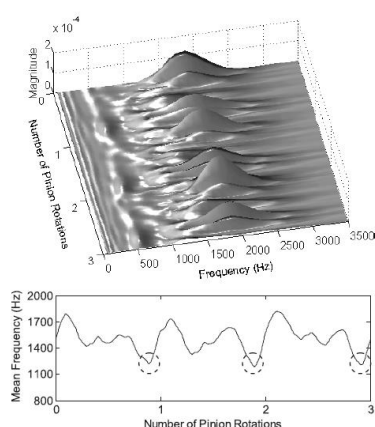
مشخص شده‌اند. موقعیت این فرورفتگی‌ها (مینیمم محلی) برابر با فرکانس درگیری دندانه‌ها می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این روش بررسی که به کمک تبدیل موجک صورت پذیرفته است، آسیب حتی در مراحل بسیار ابتدایی قابل تشخیص می‌باشد. منحنی اسکالوگرام و منحنی تغییرات فرکانس میانگین مربوط به خرابی‌های مراحل بعدی نیز در مقاله اصلی درج شده است [۹].



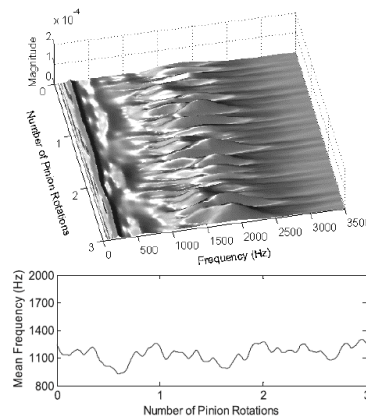
شکل ۷. چرخ دنده تحت تست با مراحل مختلف آسیب سطحی روی دندانه‌ها [۹]



شکل ۸. سیگنال‌های زمانی ارتعاشات (الف) و طیف‌های فرکانسی (ب) مربوط به چرخ دنده در مراحل مختلف آسیب [۹]



(ب)



(الف)

شکل ۹. منحنی اسکالوگرام و منحنی تغییرات فرکانس میانگین چرخ دنده سالم (الف) و چرخ دنده معیوب در مرحله اول خرابی (ب) [۹]

به عنوان شاخص های وضعیت و یا ابزارهای عیب یابی استفاده کرد.

مثال دو: تفکیک عیوب اجزاء مختلف یاتاقان غلتشی به کمک تبدیل موجک

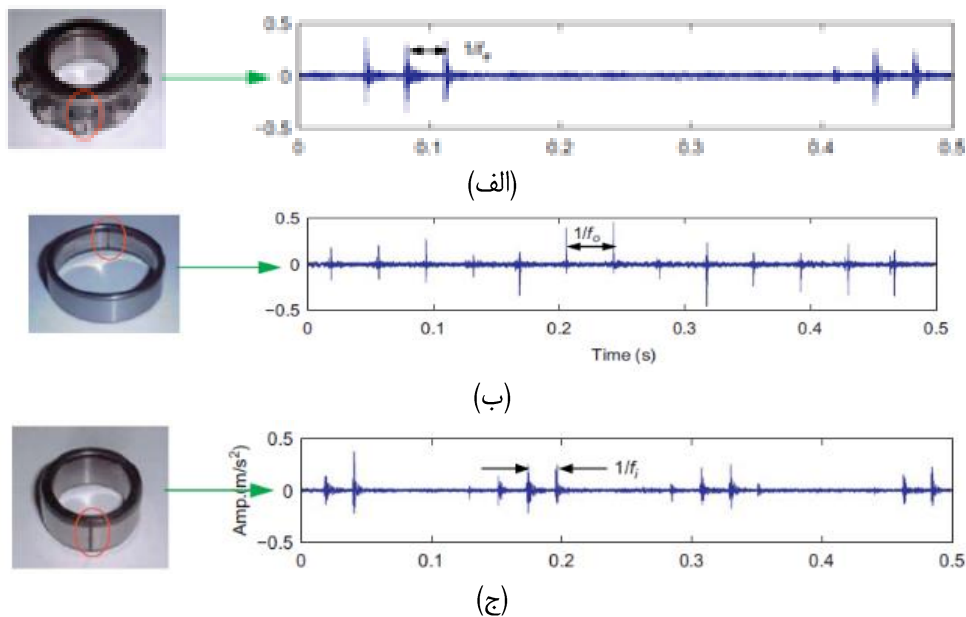
در این قسمت یک مثال از تفکیک عیوب اجزاء مختلف یاتاقان غلتشی مطرح می شود [۱۱]. همان طور که قبلا مطرح شد، خرابی در هر یک از اجزاء یاتاقان غلتشی، دارای مشخصه های فرکانسی خاصی است جدول ۲. به عنوان مثال، شکل ۱۰ تحریک این فرکانس ها را بر اثر خرابی جداگانه در غلتک ها (شکل الف)، رینگ داخلی (شکل ب) و رینگ خارجی (شکل ج)، نشان می دهد. در این شکل و نیز شکل های ۱۱ و ۱۲، f_o و f_i ، f_e به ترتیب بیانگر فرکانس خرابی غلتک ها، رینگ داخلی و رینگ خارجی یاتاقان هستند. نکته ای که در اینجا باید به آن اشاره کرد، این است که در صورت وقوع خرابی در هر یک از اجزاء فوق به صورت جداگانه، تشخیص عیب به طور نسبی آسان تر است، شکل ۱۰.

۴-۲. استفاده از تبدیل موجک گسسته و تبدیل

بسته موجک

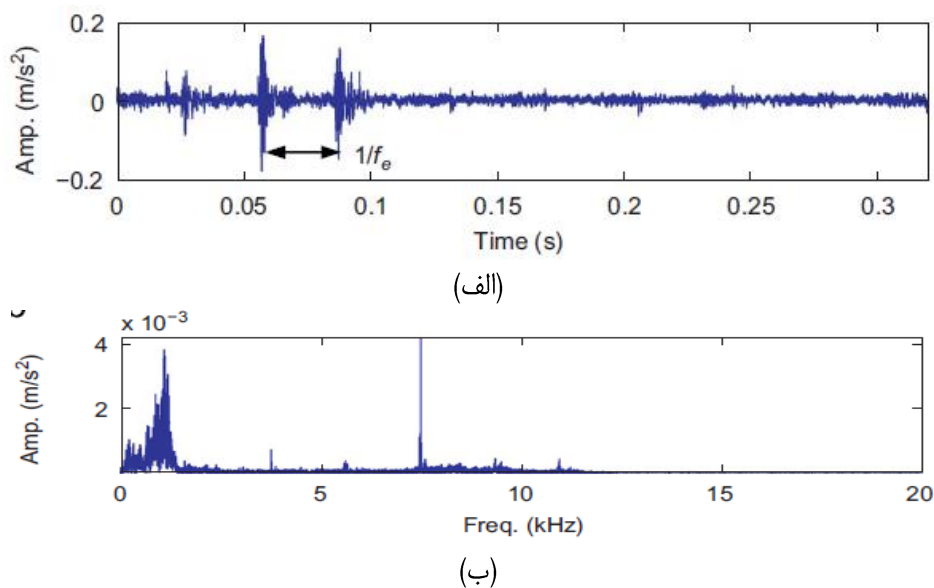
تبدیل موجک گسسته و معکوس آن بر اساس شکل های ۳ و ۴ و تبدیل بسته موجک بر اساس شکل ۶ پیاده سازی می شوند که نتیجه آن، یک سری ضرائب جزئیات و ضرائب تقریب از سیگنال در سطوح مختلف تجزیه است. هر یک از این سطوح تجزیه، بخشی از محتوای سیگنال در باندهای فرکانسی مختلف را در بردارند شکل ۴-ب. برای بررسی سیگنال به این روش، می توان از مواردی مانند:

- بازسازی سیگنال بر اساس هر یک از ضرائب جزئیات و تقریب در سطوح مختلف تجزیه به صورت جداگانه.
- مقادیر ضرائب جزئیات و ضرائب تقریب در سطوح مختلف تجزیه سیگنال.
- الگوی توزیع خطای باقیمانده در روند محاسبه ضرائب تجزیه سیگنال.
- انرژی نودها در سطوح مختلف سیگنال تجزیه شده.
- تخمین طیف^{۲۸} فرکانسی ارتعاشات.



شکل ۱۰. وجود عیب در اجزاء یاتاقان غلتشی در حالت وقوع جداگانه، الف - عیب بر روی غلتک‌ها، ب - عیب بر روی رینگ داخلی و ج - عیب بر روی رینگ خارجی [۱۱]

اما چنانچه عیب به‌طور هم‌زمان در بیش از یک جزء یاتاقان رخ دهد، تشخیص خرابی در هر کدام که شدت عیب کمتری داشته باشد، دشوارتر خواهد بود. برای مثال، شکل ۱۱،



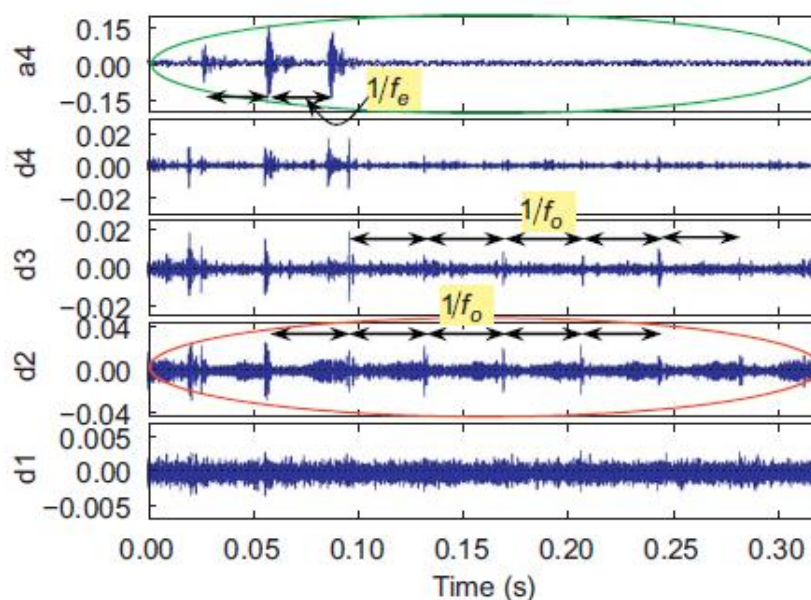
شکل ۱۱. منحنی‌های ارتعاشی مربوط به عیب ترکیبی خرابی رینگ خارجی و غلتک‌های یاتاقان (الف) سیگنال زمانی (ب) طیف فرکانسی [۱۱]

موجک و بازسازی سیگنال به کمک هر یک از ضرائب تجزیه به‌صورت جداگانه، خرابی در هر دو این اجزاء (رینگ خارجی و غلتک‌ها) به‌صورت کاملاً تفکیک شده مشاهده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در این مثال، تنها خرابی مربوط به غلتک‌های یاتاقان در سیگنال اولیه قابل تشخیص است. اما پس از تجزیه سیگنال به کمک تبدیل

بازسازی شده به کمک ضرائب جزئیات (d2 و d3) خرابی رینگ خارجی را نشان می‌دهند.

شکل ۱۲ را ببینید. در این مثال، سیگنال بازسازی شده به کمک ضرائب تقریب (a4)، خرابی غلتک‌ها و سیگنال‌های



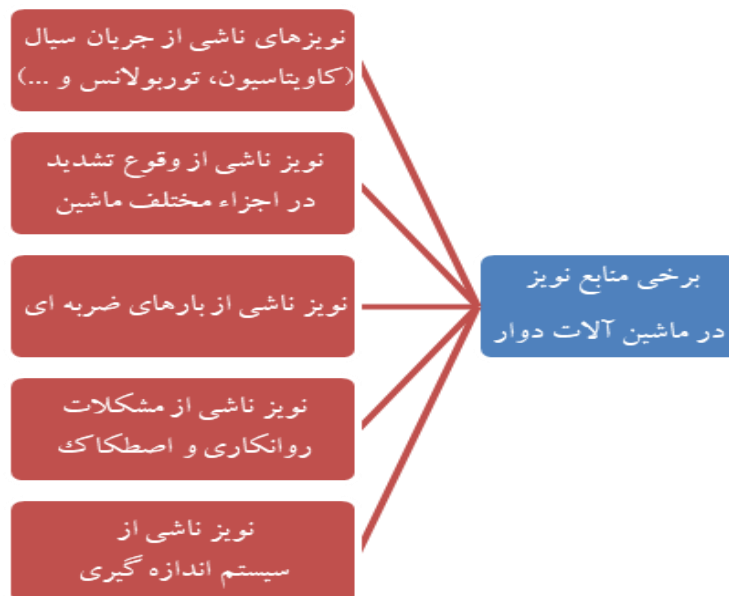
شکل ۱۲. تشخیص عیب ترکیبی خرابی رینگ خارجی و غلتک‌های باتاقان به کمک سیگنال‌های بازسازی شده بر اساس ضرائب تبدیل موجک در سطوح مختلف تجزیه [۱۱]

عموماً مشخصه‌هایی که وجود عیب را نشان می‌دهند، در سیگنال بازسازی شده پس از حذف نویز، با وضوح بیشتری قابل رؤیت خواهد بود. برخی منابع نویز در سیگنال ارتعاشات ماشین‌آلات دوار در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند. نویززدایی به کمک تبدیل موجک بر این اساس استوار است که انرژی سیگنال و انرژی نویز همراه با آن، هر یک به شکل متفاوتی در ضرائب تبدیل موجک ظاهر خواهند شد. لذا می‌توان با شناسایی آن دسته از ضرائب تبدیل موجک که به نویز مربوط می‌شود، مقادیر این ضرائب را کاهش داده و یا حتی برابر با صفر قرار داد. برای شناسایی ضرائب مربوط به نویز و نیز تعیین سطوح آستانه برای آنها، روش‌های مختلفی وجود دارد [۱۲] و [۱۱]. در این روش‌ها، ضرائب مربوط به نویز، شناسایی شده و آن دسته از ضرائب که از حد مشخصی کمتر باشند، صفر می‌شوند. به این کار اصطلاحاً آستانه‌گذاری^{۲۹} گفته می‌شود.

توانایی تبدیل موجک در تفکیک عیوب فوق، بدین علت است که ضرائب تبدیل موجک در سطوح مختلف تجزیه، متناظر با مؤلفه‌های فرکانسی مختلف موجود در سیگنال است، شکل ۴-ب. لذا سیگنالی که براساس هر یک از این ضرائب بازسازی می‌شود، مؤلفه‌های فرکانسی خاصی را دربر خواهد داشت که هر کدام می‌توانند مربوط به عیوب مختلفی از ماشین و یا اجزاء آن باشند.

۴-۳. نویززدایی از سیگنال به کمک تبدیل موجک

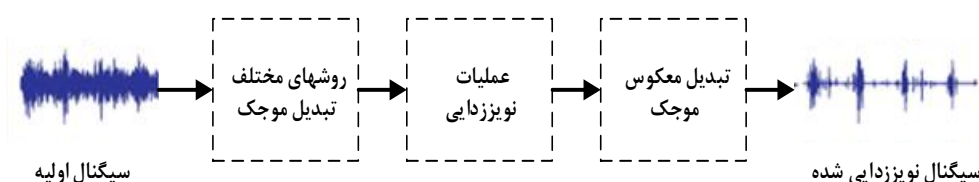
گاهی اوقات سیگنال ارتعاشات ثبت شده از ماشین‌آلات، دارای نویز زیادی است که کار تحلیل و عیب‌یابی را با مشکل مواجه می‌کند. تبدیل موجک، ابزار بسیار مؤثری برای نویززدایی از سیگنال ارتعاشات در این موارد است [۱۲] و [۱۰]. تبدیل موجک با استفاده از روش‌های مختلف، اقدام به نویززدایی و سپس بازسازی سیگنال ارتعاشات می‌نماید.



شکل ۱۳. برخی منابع نویز در ارتعاشات ماشین آلات دوار

روش نرم^{۳۰}، سخت^{۳۱} و یا ترکیبی از جمله این روش‌ها هستند. پس از ایجاد تغییرات در ضرائب تبدیل موجک، تبدیل معکوس موجک انجام شده و سیگنال ارتعاشات بازسازی می‌شود. سیگنالی که بدین ترتیب به دست می‌آید، نویز بسیار کمتری نسبت به سیگنال اولیه خواهد داشت (شکل ۱۴).

یکی از تفاوت‌های مهم در روش‌های مختلف نویززدایی، مربوط به این است که آیا برای ضرائب تجزیه موجک در سطوح مختلف، آستانه‌های یکسانی تعیین شود یا اینکه برای هر سطح تجزیه، آستانه متفاوتی با توجه به خصوصیات آماری آن سطح، تعیین شود. همچنین روش‌های مختلفی برای پیاده‌سازی آستانه‌گذاری وجود دارد که آستانه‌گذاری به

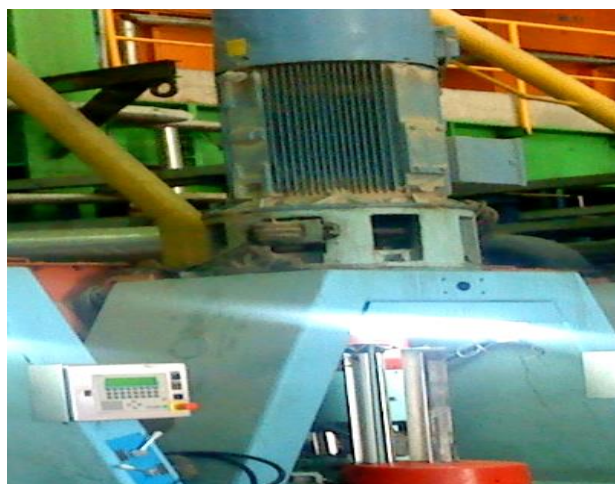


شکل ۱۴. فرایند نویززدایی به کمک تبدیل موجک [۱۱]

کلی کار بدین شکل است که ابتدا تبدیل موجک روی سیگنال ارتعاشات انجام می‌شود. سپس به کمک الگوریتم‌های خاص، مقادیر ضرائب تبدیل موجک آستانه‌گذاری شده و نهایتاً با اعمال تبدیل معکوس موجک، سیگنال ارتعاشات نویززدایی شده، بازسازی می‌شود. برای آشنایی بیشتر با جزئیات روش‌های مختلف نویززدایی، مراجع [۱۱] و [۱۲] را ببینید.

مثال سه: نویززدایی به کمک تبدیل موجک

همان‌طور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، گاهی اوقات سیگنال ارتعاشات به نحوی با نویز آغشته می‌شود که تشخیص علائم عیب به کمک آن دشوار می‌شود. در این قسمت، مثالی از نویززدایی سیگنال با هدف تشخیص عیب یاتاقان مطرح می‌شود. شکل ۱۴ شماتیکی از فرایند نویززدایی به کمک تبدیل موجک را نشان می‌دهد. روال



شکل ۱۵. شماتیک تجهیز مورد نظر در مثال سه

این مثال مربوط به نویززدایی از سیگنال ارتعاشات یک موتور الکتریکی با توان ۲۳۰ کیلووات است که سانتریفوژ شکر خام را می‌گرداند. سانتریفوژهای شکر خام، از تجهیزات حیاتی در کارخانجات تولید شکر محسوب می‌شوند. شکل ۱۵، تصویر تجهیز مورد نظر و شکل ۱۶-الف، سیگنال ارتعاشات ثبت شده را نشان می‌دهد. به علت غلبه نویز، علائم ناشی از خرابی یاتاقان در سیگنال اولیه ارتعاشات، به دشواری دیده می‌شود (شکل ۱۶-الف).

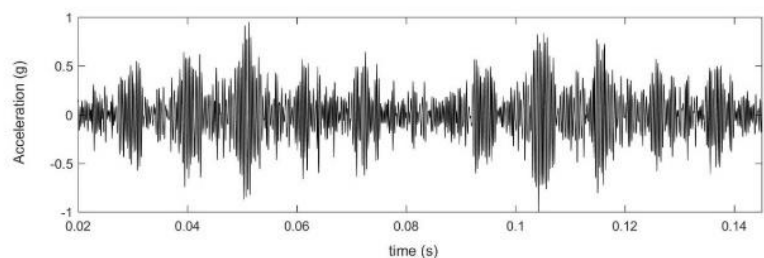
اما پس از نویززدایی، این علائم که به صورت پالس می‌باشد، به‌خوبی آشکار شده‌اند (شکل ۱۶-ب). نویززدایی به کمک تبدیل بسته موجک و با استفاده از موجک کویفلت^{۳۲} مرتبه ۳ صورت پذیرفته است. برای این کار از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. جدول ۲، اطلاعات مربوط به فرکانس‌های خرابی اجزاء یاتاقان موتور مورد نظر را نشان می‌دهد. کد یاتاقان استفاده شده، ۶۲۲۰ و سرعت دورانی موتور، ۹۴۸ دور بر دقیقه است.

جدول ۲. فرکانس‌های خرابی اجزاء یاتاقان مربوط به مثال سه

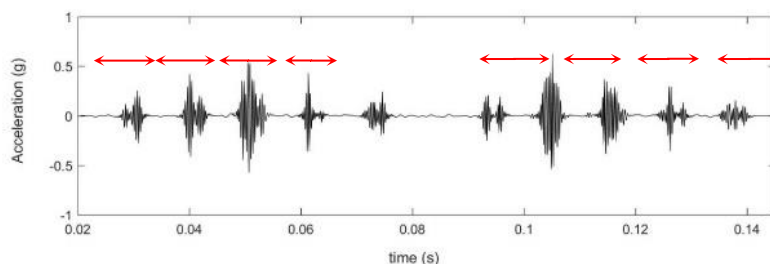
فرکانس عبور ساچمه از رینگ بیرونی	فرکانس عبور ساچمه از رینگ داخلی	فرکانس گردش ساچمه	فرکانس گردش قفسه
۶۴/۷ Hz	۹۳/۳ Hz	۴۲/۱ Hz	۶/۴۷ Hz

فاصله بین پالس‌های موجود در شکل ۱۶-ب، برابر با 0.0108 ثانیه (معادل 92.8 Hz) می‌باشد که مربوط به آسیب در رینگ داخلی یاتاقان است. اختلاف جزئی بین

فرکانس محاسبه شده جدول ۲ و فرکانس مشاهده شده در داده‌های ارتعاشی، به‌خاطر قدرت تفکیک^{۳۳} سیگنال ارتعاشات ثبت شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۶. سیگنال ارتعاشات اولیه دارای نویز (الف) و سیگنال نویززدایی شده بر اساس تبدیل بسته موجک (ب)

۴-۴. آنالیز نقاط منفرد^{۳۴} به کمک تبدیل موجک

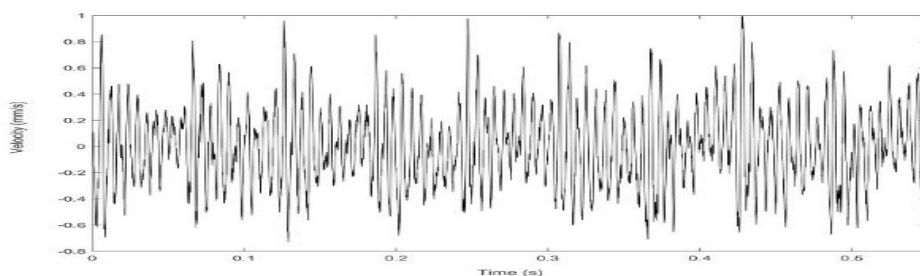
بسیاری از عیوب در ماشین آلات دوار، منجر به ایجاد پالس‌ها، تغییرات ناگهانی و یا به‌طور کلی، نقاط منفردی در سیگنال ارتعاشات می‌شوند که تشخیص این نقاط، یکی از کاربردهای مهم تبدیل موجک در آنالیز ارتعاشات به‌شمار می‌رود. گاهی اوقات به‌واسطه وجود نویز و یا ضعیف بودن مقدار دامنه، این پالس‌ها و ناپیوستگی‌ها، در سیگنال زمانی دیده نشده و یا به‌سختی قابل تشخیص هستند. این درحالی است که منحنی‌هایی که از تبدیل موجک به‌دست می‌آیند، این نوسانات را به خوبی نشان می‌دهند. به این موضوع، تشخیص نقاط منفرد گفته می‌شود. نمای لپشیتز^{۳۵} از جمله مفاهیمی است که برای تعیین چگونگی رفتار توابع مختلف از لحاظ میزان همواری^{۳۶} به‌کار گرفته می‌شود.

نقاط منفرد سیگنال نیز جزو نقاطی هستند که سیگنال در آن نقاط، به نوعی ناهموار محسوب می‌شود. استفاده هم‌زمان از مفهوم نمای لپشیتز و تبدیل موجک برای تشخیص نقاط منفرد سیگنال کاربرد دارد [۱۴]. در این روش، ابتدا مقدار ماکزیمم دامنه تبدیل موجک^{۳۷} در سطوح مختلف تجزیه به‌دست می‌آید.

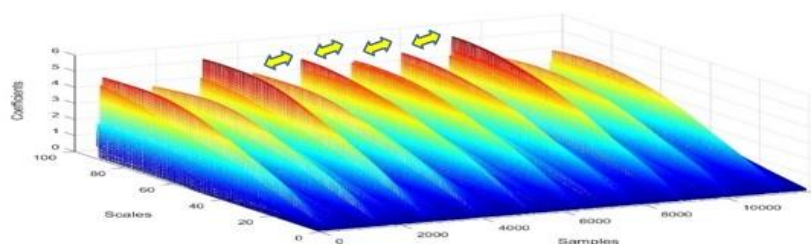
سپس سایر مقادیر دامنه غیر از مواردی که ماکزیمم هستند برابر با صفر قرار داده می‌شود. در ادامه، یک مقدار مرزی برای دامنه تبدیل موجک تعیین شده و همه دامنه‌هایی که از مقدار فوق کمتر باشند نیز برابر با صفر قرار داده می‌شوند. بدین ترتیب، تنها مقادیر ماکزیمم دامنه تبدیل موجک باقی می‌مانند که مربوط به نقاط منفرد سیگنال هستند. نهایتاً تبدیل معکوس موجک انجام شده و سیگنال بدین شکل بازسازی می‌شود [۱۳] و [۱۴]. این روش را می‌توان حالت خاصی از نویززدایی نیز به‌شمار آورد.

مثال چهار: خرابی چرخ دنده

در این قسمت، یک مثال از تشخیص خرابی چرخ دنده به کمک منحنی اسکالوگرام مطرح می‌شود. شکل ۱۷، سیگنال ارتعاشات ثبت شده را نشان می‌دهد که مربوط به یاتاقان ورودی گیربکس آسیاب مواد در یک کارخانه سیمان می‌باشد. آسیاب مواد، یکی از ماشین‌آلات حیاتی در خط تولید سیمان محسوب می‌شود. منحنی اسکالوگرام این سیگنال، در شکل ۱۸ نشان داده شده است. فواصل زمانی نشان داده شده در شکل ۱۸، متناسب با فرکانس دوران محوری است که چرخ دنده بر روی آن نصب است.



شکل ۱۷. سیگنال ارتعاشات ثبت شده (مثال چهار)



شکل ۱۸. منحنی اسکالوگرام سیگنال شکل ۱۷

نامناسب، یک پالس در سیگنال ارتعاشات ایجاد می‌شود. به ازای هر دور چرخ‌دنده آسیب دیده، این اتفاق فقط یک بار رخ می‌دهد. در این مثال، سرعت دورانی محوری که چرخ دنده آسیب دیده روی آن نصب است، برابر با ۹۹۴ دور بر دقیقه بوده و فواصل زمانی نشان داده شده در شکل ۱۸ نیز دقیقاً معادل با این فرکانس است.

چرخ‌دنده معیوب مربوط به این مثال، در شکل ۱۹ نشان داده شده است. مقایسه شکل‌های ۱۷ و ۱۸ به خوبی نشان می‌دهد که تبدیل موجک، چگونه منجر به آشکار و بارزتر شدن شاخصه‌ای نشان‌دهنده عیب (در این مثال پالس‌های موجود در سیگنال) می‌شود. توضیح اینکه هر بار که محل شکستگی دندان به چرخ دنده مجاور تماس پیدا می‌کند، به علت درگیری



شکل ۱۹. تصویر چرخ دنده مورد نظر در مثال چهار و محل آسیب دیده (شکستگی نوک دندان)

۴-۵. به کارگیری توابع موجک مختلف

و بهینه سازی پارامترهای تابع موجک

یکی از نکات مهم در استفاده از تبدیل موجک برای پایش وضعیت ارتعاشی، انتخاب تابع موجک مناسب و نیز بهینه سازی پارامترهای تابع موجک انتخاب شده است. اهمیت این موضوع بدین دلیل است که تا کنون ده ها تابع موجک با ویژگی های متفاوت معرفی شده و هر یک، کارایی خاص خود را دارد. بررسی کارایی و مناسب بودن این موجک ها برای کاربردهای مختلف آنالیز ارتعاشات از جمله پایش وضعیت و عیب یابی تجهیزات دوار، خود یک موضوع پژوهشی جداگانه و مبسوط است.

همچنین در برخی کاربردها باید تابع موجک جدید و مناسب برای آن کاربرد، طراحی کرد که در این راستا، موضوع موجک های چندگانه^{۳۸} نیز مطرح می شود. امکان طراحی موجک جدید، دامنه کار پژوهشی در این زمینه را بسیار گسترده می کند و مزیت مهمی برای تبدیل موجک است. به عنوان نمونه، دیوید نیولند، موجک جدید تحت عنوان موجک هارمونیک^{۳۹} را معرفی کرده که دارای ویژگی های خاصی بوده و برای کاربردهای آنالیز ارتعاشات طراحی شده است [۱۵] و [۱۶].

۴-۶. ترکیب روش تبدیل موجک با سایر

روش های تحلیل

شایان ذکر است در برخی کاربردها، لازم است تا به طور همزمان از تبدیل موجک و سایر روش های آنالیز استفاده شود. یکی از مثال های بارز در این زمینه، استفاده همزمان از تبدیل موجک و روش های محاسبه پوش^{۴۰} سیگنال مانند تبدیل هیلبرت است.

استفاده از روش ردیابی مضارب سرعت دورانی^{۴۱} به طور همزمان با تبدیل موجک برای بررسی ارتعاشات در ماشین های با سرعت دورانی متغیر قابل توصیه است.

همچنین استفاده از روش های مختلف بهینه سازی مانند الگوریتم ژنتیک، الگوریتم لانه مورچه گان و ... برای بهینه سازی پارامترهای تابع موجک و نیز معیارهای آنتروپی (مانند آنتروپی شانون و رنی^{۴۲}) برای انتخاب سطح بهینه تجزیه در تبدیل موجک و نیز تبدیل بسته موجک رایج است.

مثال پنج: استفاده همزمان از تبدیل موجک،

تبدیل هیلبرت (تحلیل پوش^{۴۳}) و تحلیل از طریق

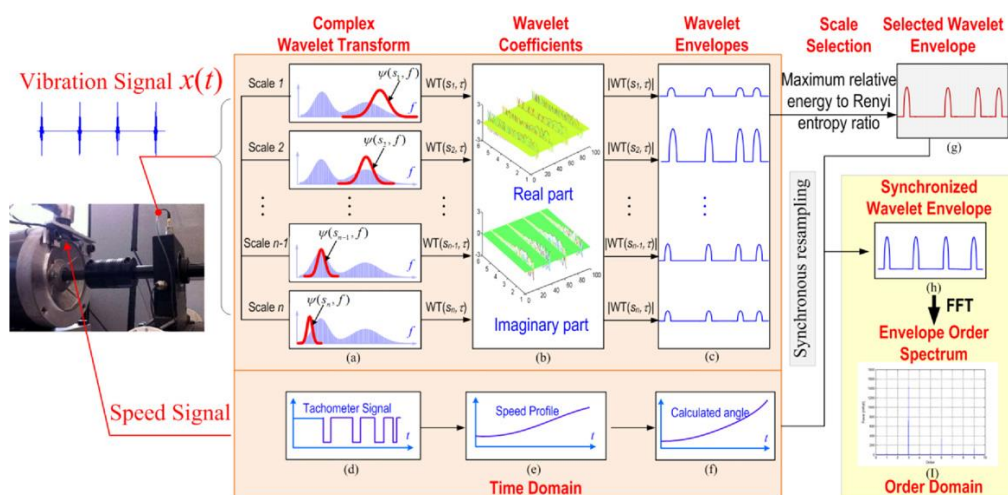
ردیابی مضارب سرعت دورانی برای عیب یابی

یاتاقان های غلتشی در ماشین های دور متغیر

در این قسمت یک مثال از استفاده همزمان تبدیل موجک، تبدیل هیلبرت (تحلیل پوش) و تحلیل از طریق ردیابی مضارب سرعت دورانی برای پایش و عیب یابی یاتاقان های غلتشی مطرح می شود [۱۷]. رخ دادن آسیب فیزیکی در اجزاء یاتاقان غلتشی، منجر به ایجاد پالس هنگام عبور ساچمه ها از روی ناحیه آسیب دیده می شود. این موضوع علاوه بر ایجاد مؤلفه های فرکانسی متناظر با جزء آسیب دیده یاتاقان، منجر به تحریک فرکانس طبیعی اجزاء یاتاقان و سایر قطعات مجاور یاتاقان (مانند نشیمنگاه آن) و مدوله شدن فرکانس طبیعی تحریک شده با فرکانس خرابی اجزاء می شود. منحنی پوش برای تفکیک فرکانس های خرابی اجزاء یاتاقان از سایر مؤلفه های فرکانسی از جمله فرکانس های طبیعی تحریک شده به کار می رود. از طرفی در مورد ماشین آلات دوار با سرعت دورانی متغیر (مانند توربین های بادی) استفاده از روش های مرسوم تحلیل کارایی نداشته و باید حتما از روش هایی مانند ردیابی مضارب سرعت دورانی استفاده کرد. در این روش، نمونه برداری از سیگنال ارتعاشات با نرخ های نمونه برداری متفاوت و متناظر با سرعت دورانی در هر لحظه صورت می پذیرد. لذا علاوه بر سیگنال ارتعاشات، سیگنال نشان دهنده دور ماشین در هر لحظه (سیگنال تاکو) نیز باید ثبت شود.

منحنی‌های فرکانسی که از این طریق به‌دست خواهد آمد، برحسب مضرب سرعت دورانی (به جای فرکانس در حالت معمول) نمایش داده می‌شوند.

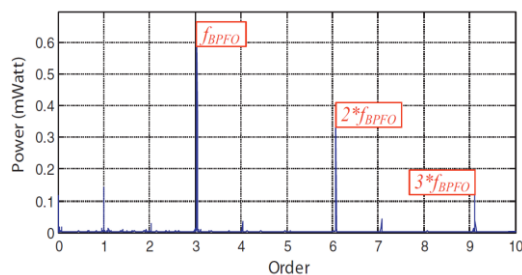
شماتیک روند داده‌برداری و محاسبات در روش مورد استفاده که ترکیبی از روش‌های فوق و تبدیل موجک است، در شکل ۲۰ نمایش داده شده است. برای آشنایی با جزئیات روند محاسبات درج شده در شکل ۲۰، مرجع [۱۷] را ببینید.



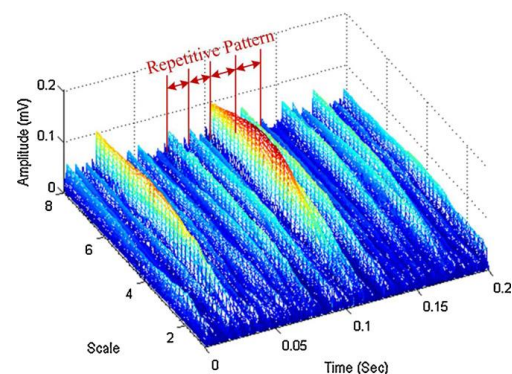
شکل ۲۰. شماتیک روند داده‌برداری و محاسبات برای عیب یابی یاتاقان غلتشی در ماشین دور متغیر [۱۷]

شایان ذکر است در این روش، از معیار آنتروپی رنی جهت انتخاب مقیاس بهینه برای انتخاب منحنی پوش مناسب استفاده شده است. در مرجع [۱۷] روش فوق بر روی مثال‌های متعددی اعمال شده است که کارایی آن را نشان می‌دهد. از جمله این موارد، آسیب رینگ بیرونی یک یاتاقان است. منحنی اسکالوگرام مربوط به این موردکاوی و منحنی پوش آن که بر اساس شماتیک مندرج در شکل ۲۰ حاصل

شده، در شکل ۲۱ آمده است. مؤلفه‌های ارتعاشی مربوط به فرکانس رینگ بیرونی یاتاقان، در هر دو بخش شکل ۲۱ به‌طور کاملاً واضح دیده می‌شوند. دقت شود که به‌واسطه استفاده از تحلیل ردیابی مضارب سرعت دورانی، محور افقی طیف فرکانسی (شکل ۲۱-ب)، بر اساس مضارب سرعت دورانی^{۴۴} نمایش داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۲۱. منحنی اسکالوگرام (الف) و منحنی پوش بهینه شده مربوط به یک یاتاقان دارای عیب بر روی رینگ بیرونی (ب) [۱۷]

۵. مروری بر برخی مفاهیم پایه در عیب‌یابی

یاتاقان‌های غلتشی و چرخ دنده‌ها:

از آنجایی که طی مباحث این مقاله، به عیب‌یابی یاتاقان‌های غلتشی و چرخ‌دنده‌ها اشاره شده است، لازم است تا در این بخش، نکاتی در این زمینه ارائه شود.

یاتاقان‌ها، یکی از اجزاء مهم ماشین‌آلات دوار می‌باشند که ضمن کنترل و تعیین موقعیت جزء گردان یا روتور، کلیه نیروهای استاتیکی و دینامیکی موجود در ماشین نیز از طریق آنها تحمل می‌شود. انواع مختلفی از یاتاقان‌ها تا کنون در ماشین‌آلات به کار گرفته شده‌اند. در این میان، یاتاقان‌های غلتشی با توجه به ویژگی‌های خاص آنها، در زمره

پرمصرف‌ترین انواع یاتاقان‌ها بوده و برای انواع ماشین‌آلات دوار به کار می‌روند. یکی از ویژگی‌های مهم یاتاقان‌های غلتشی در مقایسه با نوع لغزشی، امکان‌پذیری پایش وضعیت اجزاء و تعیین عمر باقیمانده آنهاست.

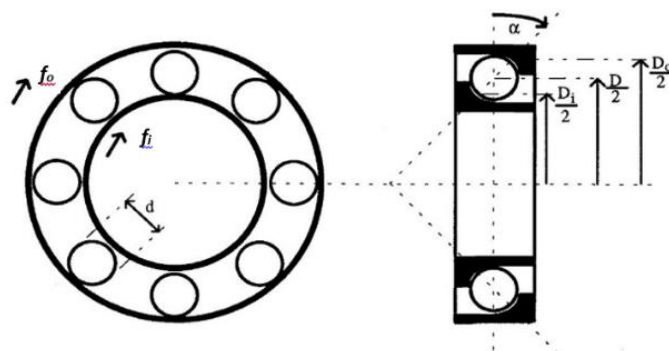
در واقع بسیاری از حالت‌های خرابی این دسته از یاتاقان‌ها، به صورت تدریجی و همراه با ایجاد نشانه‌های قابل آشکارسازی در هر مرحله از خرابی، رخ می‌دهند. یکی از نشانه‌های مهم برای عیب‌یابی یاتاقان‌های غلتشی، فرکانس‌های خرابی اجزاء مختلف است که نحوه محاسبه آنها در جدول ۳ آمده است [۱۸]. شکل ۲۲، شماتیک یک یاتاقان غلتشی و نمادهای به کار رفته در روابط مندرج در جدول ۳ را نشان می‌دهد.

جدول ۳. روابط لازم برای محاسبه فرکانس‌های خرابی اجزاء یاتاقان غلتشی [۱۸]

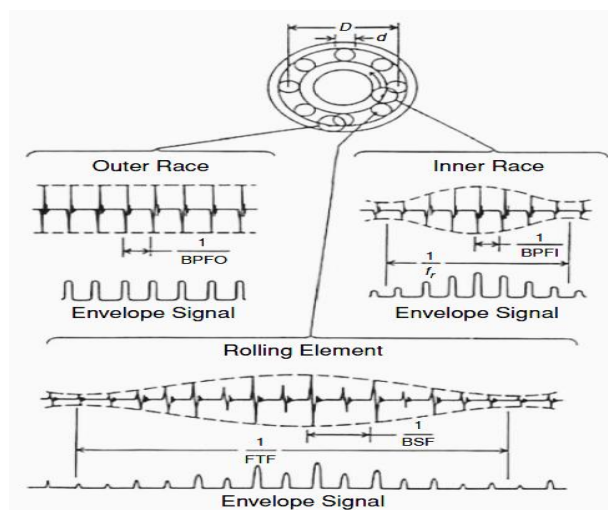
فرکانس (بر حسب هرتز)	رابطه‌ها
فرکانس عبور ساچمه از رینگ بیرونی ^{۴۵} (BPFO)	$f_{bpfo} = \frac{Z(f_o - f_i)(1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha))}{2}$
فرکانس عبور ساچمه از رینگ داخلی ^{۴۶} (BPFI)	$f_{bpfi} = \frac{Z(f_o - f_i)(1 + \frac{d}{D} \cos(\alpha))}{2}$
فرکانس گردش ساچمه یا غلتک ^{۴۷} (BSF)	$f_{bsf} = \frac{f_o - f_i}{2} \frac{D}{d} (1 - (\frac{d}{D} \cos(\alpha))^2)$
فرکانس گردش قفسه (Cage یا FTF ^{۴۸})	$f_c = \frac{f_i(1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha))}{2} + \frac{f_o(1 + \frac{d}{D} \cos(\alpha))}{2}$

در جدول ۳ و نیز شکل ۲۲، Z ، تعداد ساچمه‌ها یا غلتک‌ها، d قطر ساچمه یا غلتک، f_i فرکانس دوران رینگ داخلی، f_o فرکانس دوران رینگ خارجی، D ، قطر گام یاتاقان و α زاویه تماس^{۴۹} می‌باشند در صورت آسیب دیدن هر یک از

اجزاء یاتاقان، فرکانس متناسب با آن، در سیگنال ارتعاش قابل ردیابی خواهد بود. این موضوع به صورت شماتیک در شکل ۲۳ نشان داده شده است.



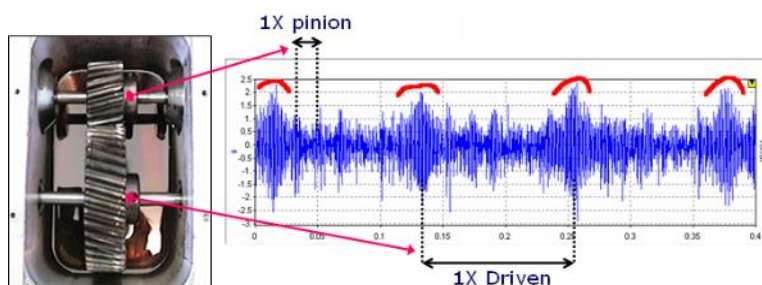
شکل ۲۲. شماتیک یک یاتاقان غلتشی و نمادهای به کار رفته در روابط جدول سه [۱۸]



شکل ۲۳. تشخیص عیب در یاتاقانهای غلتشی به کمک سیگنال ارتعاشات [۱]

عبارتند از: فرکانس دوران محور چرخ دنده ورودی (پینیون)، فرکانس دوران محور چرخ دنده خروجی (مترک) و فرکانس درگیری دندانه‌ها^{۵۰}. فرکانس درگیری دندانه‌ها از حاصل ضرب تعداد دندانه هر چرخ دنده در فرکانس دوران آن به دست می‌آید.

چرخ دنده‌ها نیز از اجزاء مهم ماشین آلات دوار به شمار می‌روند که لازم است تا پایش سلامتی آنها در برنامه کاری باشد. این دسته از اجزاء ماشین نیز در صورت آسیب دیدن، مشخصه‌های فرکانسی خاصی را در سیگنال ارتعاشات ایجاد می‌کنند، شکل ۲۴. برخی فرکانس‌های مهم در این رابطه



شکل ۲۴. دو چرخ دنده در گیر در یک گیربکس و سیگنال زمانی ارتعاشات ثبت شده

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، مقدمه‌ای در زمینه روش‌های پردازش سیگنال ارتعاشات و با تأکید بر تبدیل موجک ارائه شد. همچنین ضمن بررسی و دسته‌بندی کاربردهای تبدیل موجک برای آنالیز ارتعاشات، روش‌های قابل استفاده در این راستا نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس برای نشان دادن نحوه انجام کار و نتایج قابل حصول، مثال‌های مختلفی از به‌کارگیری روش‌های مختلف تبدیل موجک برای پایش وضعیت ارتعاشات ارائه گردید. در خلال این مثال‌ها نشان داده شد که تبدیل موجک، دستاوردهای مهمی را برای ارتقاء برنامه پایش وضعیت ارتعاشی دربر دارد. به‌طور خاص این تبدیل برای

نويززدایی از سيگنال ارتعاشات و تشخيص محل و ماهيت نقاط منفرد (ضربه، پالس و ...) در سيگنال ارتعاشات و در نتيجه کمک به آشکارسازی عیوب، بسیار مناسب است. استفاده ترکیبی از تبدیل موجک و سایر روش‌های پردازش سیگنال، کارایی آن را افزایش می‌دهد. همچنین نشان داده شد که انعطاف‌پذیری این تبدیل و پارامترهای متعدد آن، زمینه را برای استفاده بهینه از آن فراهم می‌سازد. بدیهی است این نوشتار صرفاً یک مقدمه کوتاه بر مبحث بسیار وسیع و گسترده کاربرد تبدیل موجک در آنالیز سیگنال ارتعاشی است.

۷. مأخذ

- [1] Randall, Robert Bond. *Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications*. John Wiley & Sons, 2011.
- [2] Peng, Z. K., and F. L. Chu. "Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography." *Mechanical systems and signal processing*, Vol.18, no.2, 2004, pp.199-221.
- [3] Yan, Ruqiang, Robert X. GAO, and Xuefeng Chen. "Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications." *Signal processing* 96, 2014, pp.1-15.
- [4] Dunton, Timothy A. "An introduction to time waveform analysis." *Universal Technologies, Inc*, 1999.
- [5] Fugal, D. Lee. "Wavelets "Beyond Comparison" Worldwide Satellite Magazine May 2009, PP.35-41.
- [6] Mallat, S. G. "A Theory of Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation." *IEEE Trans: Pattern Anal. Machine Learning*, Vol.11, 1989, PP.674-693.
- [7] Mallat, Stephane. "A Wavelet Tour o Signal Processing", 3rd Edition, Academic Press, 2009
- [8] Jensen, A. & A.la Cour-Harbo. "Ripples in Mathematics, the Discrete Wavelet Transform." Springer, 2001.
- [9] Özturk, H., M. Sabuncu, I. Yesilyurt. "Early Detection of Pitting Damage in Gears using Mean Frequency of Scalogram." *Journal of Vibration and Control*, Vol.14, No.4, 2008, PP.469-484.
- [10] Lia, Zhen , Z. Heb, Y. Zia, H. Jiang, "Rotating machinery fault diagnosis using signal-adapted lifting scheme." *Mechanical Systems and Signal Processing* 22, 2008, PP.542-556.
- [11] Wang, Y., Z. Wang, Y. Zi, He. "Enhancement of Signal Denoising and Multiple Fault Signatures Detecting In Rotating Machinery Using Dual-Tree Complex Wavelet Transform." *Mechanical Systems and Signal Processing* 24, 2010, PP.119-137.
- [12] Krim, H., D. Tucker, Stephane Mallat & D. Donoho, "On Denoising and Best Signal Representation." *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.45, No.7, November 1999.
- [13] Sun, Q., Y. Tang, "Singularity Analysis Using Continuous Wavelet Transform for Bearing Fault Diagnosis" *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.16, No.6, 2002, PP.1025-1041.
- [14] Stephane Mallat, W. L. Hwang. "Singularity Detection and Processing with Wavelet." *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 38, No. 2, March 1992.
- [15] Newland, D.E., "Wavelet Analysis of Vibration, Part 1: Theory." *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol.116, October 1994, PP.409-416.

- [16] Newland, D. E., "Wavelet Analysis of Vibration, Part 2: Wavelet maps" *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol.116, October 1994, PP.416-425.
- [17] J. Wang, R. X., GAO, R. Yan, "A hybrid approach to bearing defect diagnosis in rotary machines" *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 5, 2012, PP.357-365.
- [18] Howard, Ian, "A Review of Rolling Element Bearing Vibration Detection, Diagnosis and Prognosis - DSTO-RR-0013." *Aeronautical and Maritime Research Laboratory Airframes and Engines Division* – 1994.

پی نوشت

1. Vibration Monitoring
2. Time-frequency analysis
3. Demodulation
4. Beat
5. Discrete Fourier Transform
6. Fast Fourier Transform (FFT)
7. Non-stationary
8. Short Time Fourier Transform
9. Wigner Weyl Transform
10. Cross Terms
11. Wavelet Transform
12. Admissible Condition
13. Scalogram
14. Phase Map
15. Modulus
16. MATLAB
17. Singular Points
18. Multi Resolution Analysis (MRA)
19. Downsampling
20. Detail Coefficient
21. Approximation Coefficient
22. Quadrature Mirror Filters (QMF)
23. Shannon Entropy
24. Best Tree
25. Features
26. Grey Moment
27. Mean Frequency
28. Spectral Estimation
29. Thresholding
30. Soft Thresholding
31. Soft Thresholding
32. Coiflet Wavelet
33. Resolution
34. Singularity Analysis
35. Lipschitz Exponent
36. Regularity
37. Modulus Maxima
38. Multiwavelet
39. Harmonic Wavelet
40. Envelope
41. Hilbert Transform
42. Renyi Entropy
43. Envelope Analysis
44. Order
45. Ball Pass Frequency of Outer Race (BPFO)
46. Ball Pass Frequency of Inner Race (BPFI)
47. Ball Spin Frequency (BSF)
48. Fundamental Train Frequency (= Cage frequency)
49. Contact angle
50. Gear Mesh Frequency