

# استفاده از رفتار تناوبی - پایا برای تشخیص عیوب یاتاقان‌های غلتشی

Original Article

عباس روحانی بسطامی\* (استادیار)

یوسف خانوردی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی شهید عباسپور

یاتاقان‌های غلتشی یکی از اجزاء پرکاربرد در ماشین‌های دوارند. روش‌های گوناگونی در حوزه‌ی زمان، فرکانس و فرکانس - فرکانس برای تشخیص عیب در یاتاقان‌های غلتشی بیان شده است. در این مقاله، روشی در حوزه‌ی فرکانس - فرکانس با استفاده از مفهوم تناوبی - پایا، که منجر به محاسبه‌ی چگالی همبستگی طیفی می‌شود، برای تشخیص خرابی یاتاقان به کار گرفته شده است. محاسبه‌ی تابع چگالی همبستگی طیفی علاوه بر روش مستقیم فرکانسی با استفاده از تبدیل ویگنر ویل نیز بیان شده است. با استفاده از این روش نموداری سه‌بعدی، دارای دو فرکانس طیفی و دوره‌ی و دامنه ایجاد می‌شود. نتایج حاصل از به‌کارگیری این روش در مثالی عملی بررسی شده است. علی‌رغم پیچیدگی محاسباتی، این روش نسبت به روش‌های کلاسیک نظیر آنالیز آنولوپ، نیاز به تعیین باند فرکانسی برای فیلتر ندارد. همچنین اطلاعاتی مانند فرکانس دوره‌ی و فرکانس طیفی، از روی نمودار استخراج می‌شود.

واژگان کلیدی: یاتاقان غلتشی، عیب‌یابی، تناوبی - پایا، چگالی همبستگی طیفی.

## ۱. مقدمه

طبیعی خود ارتعاش می‌کند و این ارتعاشات معمولاً در فرکانس‌های بالا رخ می‌دهد. بعد از مدتی در سال ۱۹۷۰ اسمیت و ویچبراد<sup>[۲]</sup> از میانگین‌گیری سنکرون برای نشان‌دادن عیوب در یاتاقان و چرخ‌دنده‌ها استفاده کردند. در ادامه روش‌هایی در حوزه‌ی فرکانس بیان شد. رسم طیف آنولوپ در حوزه‌ی فرکانس یکی از روش‌های کارآمد است. در سال ۱۹۸۴ مک فادن و اسمیت<sup>[۳]</sup> مفاهیم پایه‌ی این روش را ارائه کردند.

روش دیگر برای پردازش سیگنال رسم نمودار در حوزه‌ی زمان - فرکانس با استفاده از تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه، تبدیل ویگنر ویل یا تبدیل موجک است. نیولند در سال ۱۹۹۴، با معرفی برخی از ویژگی‌های تبدیل موجک گسسته، آن را به عنوان ابزار قوی در پردازش سیگنال‌های ارتعاشی معرفی کرد.<sup>[۴]</sup> روش‌های حوزه‌ی زمان - فرکانس، حاوی اطلاعات در هر دو حوزه‌ی زمان و فرکانس در یک نمودار سه‌بعدی‌اند که باعث بررسی دقیق‌تر ویژگی‌های ارتعاشی همچون ضربه‌ها می‌شود.

یکی از روش‌ها برای آنالیز سیگنال‌های دوره‌ی متغیر با زمان، روش تناوبی - پایاست. الگوی تناوبی - پایا اولین بار در مهندسی ارتباطات توسط گاردنر مطرح و به کار گرفته شد.<sup>[۷]</sup> اولین نتایج کاربردی از آنالیز تناوبی - پایا در ماشین‌های دوار در سال ۱۹۹۸ توسط مک کورمیک و نندی بیان شد.<sup>[۸]</sup> رندال و همکاران در سال ۲۰۰۰ استفاده از این روش را در عیب‌یابی یاتاقان‌های غلتشی مطرح کرده و با انتگرال‌گیری نمودار همبستگی طیفی ارتباط آن را با روش آنولوپ بیان کردند.<sup>[۹]</sup> در سال ۲۰۰۳ لی و کیو به بیان روابط آماری تناوبی - پایا برای استفاده در سیگنال یاتاقان پرداختند؛<sup>[۱۰]</sup> آنان با استفاده از نمودار همبستگی طیفی برای

یاتاقان‌ها از اجزای مهم در ماشین‌های دوارند که تحت نیروی زیاد و سرعت نسبی بالایی قرار دارند و در نتیجه استعداد زیادی برای خرابی دارند. کارکرد مناسب بیشتر ماشین‌ها و دستگاه‌های صنعتی به حرکت هموار و یکنواخت یاتاقان‌ها بستگی دارد. در حال حاضر در بین روش‌های مختلف پایش وضعیت ماشین‌های دوار، آنالیز ارتعاشات به‌عنوان مؤثرترین و پرکاربردترین روش شناخته شده است. از این رو شیوه‌های پردازش ارتعاشات مختلفی در یاتاقان‌ها، با توجه به استفاده در ماشین‌های مختلف، مودهای شکست و نوع یاتاقان‌ها وجود دارد. وقتی یک سطح معیوب در یاتاقان غلتشی به سطح دیگر برخورد می‌کند، باعث ایجاد ضربه‌ی می‌شود که محرک فرکانس طبیعی یاتاقان و ماشین است و موجب افزایش دامنه‌ی ارتعاشات می‌شود. وقتی یاتاقان می‌چرخد، این پالس‌ها به صورت دوره‌ی در فرکانسی که توسط مکان عیب (رینگ داخلی، رینگ خارجی یا یکی از المان‌های گردشی) تعیین می‌شود، تکرار خواهد شد. روش‌های گوناگونی برای پردازش سیگنال ارتعاشات به منظور تشخیص خرابی یاتاقان ارائه شده است. روش‌های مقدماتی مانند کورتسیس<sup>۱</sup> و کرسست فاکتور<sup>۲</sup> در حوزه‌ی زمان مطرح شده است. این روش‌ها در ماشین‌های پیچیده کارایی کافی ندارند و بنابراین، روش‌های دقیق‌تری با قابلیت تشخیص بالاتر مورد نیاز است. در یکی از اولین بررسی‌ها درباره‌ی تشخیص خرابی یاتاقان<sup>[۱]</sup> بلدترن متوجه شد که در یاتاقان معیوب، بر اثر ضربه‌های داخلی، یاتاقان در فرکانس

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۳/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱۱/۲، پذیرش ۱۳۹۶/۱۹/۱۱

DOI:10.24200/J40.2018.6398

به راحتی در طیف فرکانسی به دست آمده از تبدیل فوری قابل مشاهده اند. رفتار تناوبی - پایا، فرایندی است که در آن حالت پایا به صورت دوره‌ی تکرار می‌شود. در واقع در فرایند تناوبی - پایا دو دوره تناوب مطرح است که «فرکانس طیفی» و «فرکانس دوره‌ی» نامیده می‌شوند. روش‌های تحلیل فرایندهای پایا، به طور کلی برای مطالعه‌ی پدیده‌های تناوبی - پایا نامناسب اند؛ از این رو فرایندهای تناوبی - پایا بیان می‌شود. این موضوع مستلزم آن است که سیگنال تصادفی به صورت تناوبی - پایا مدل شود، در این صورت مشخصه‌های آماری به صورت متغیر در زمان با یک یا چند دوره تناوب است.

یک سیگنال گسسته  $x[n]$  تناوبی - پایا از مرتبه  $m$  است، اگر و تنها اگر یک تبدیل غیرخطی مرتبه‌ی  $m$  وجود داشته باشد که در آن دامنه‌ی متناهی از هارمونیک‌های سینوسی مشاهده شود. سیگنال گسسته‌ی  $y[m]$  دارای بخش‌هایی از موج سینوسی با دامنه‌ی محدود در فرکانس  $\alpha$  است اگر ضریب فوری‌ی  $M_y^\alpha = \langle y[m] e^{-\frac{jT\pi\alpha}{T_s}} m \rangle$  صفر نباشد؛ <> نشان‌گر انتگرال میانگین زمانی و  $f_s$  فرکانس نمونه‌برداری است. برای تعریف سیگنال تناوبی - پایا ابتدا سیگنال پایا معرفی می‌شود. یک سیگنال تصادفی نمی‌تواند به وسیله‌ی روابط ریاضی بیان شود و تنها راه برای تعریف آن استفاده از مشخصه‌های آماری آن است. برای یک سیگنال پایا مشخصه‌های آماری نسبت به زمان ثابت می‌ماند اما این مشخصه‌ها در سیستم‌های تناوبی - پایا حتی تحت شرایط عملکرد ثابت (سرعت، گشتاور و دما)، به صورت تناوبی تغییر می‌کنند.

## ۲.۲. تابع همبستگی و چگالی طیفی توان

قبل از پرداختن به روابط تناوبی - پایا، ابتدا دو مفهوم آماری تابع همبستگی و چگالی طیفی ذکر می‌شود.

### ۱.۲.۲. همبستگی<sup>۶</sup>

همبستگی سنجی از همانندی دو کمیت آماری است. هنگامی که تابع خودهمبستگی در سیگنال ارتعاشی به کار برده شود، یک تحلیل زمانی مفید برای آشکارسازی تناوب‌های پنهان موجود در سیگنال است. تابع خودهمبستگی برای یک فرایند تصادفی  $x(t)$  به صورت میانگین زمانی حاصل ضرب  $x(t)x(t+\tau)$  تعریف می‌شود.

$$R_x(\tau) = E[x(t)x(t+\tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^T x(t)x(t+\tau) dt \quad (1)$$

مقدار  $\tau$  در رابطه ۱ نشان‌گر تاخیر زمانی است.

### ۲.۲.۲. چگالی طیفی<sup>۷</sup>

تابع همبستگی اطلاعات مربوط به ویژگی‌های متغیر تصادفی را در حوزه‌ی زمان فراهم می‌کند. تابع چگالی طیفی اطلاعاتی همانند را در حوزه‌ی فرکانس به دست می‌دهد. در واقع تابع چگالی طیفی تبدیل فوری‌ی تابع همبستگی است. چون تابع نمونه‌برداری  $x(t)$  متناوب نیست، سری فوری‌ی گسسته‌ی آن را نمی‌توان نوشت. بنابراین نظریه‌ی کلاسیک تحلیل فوری‌ی برای یک نمونه تصادفی قابل استفاده نیست. این مشکل را می‌توان با تحلیل فوری‌ی تابع همبستگی  $R_x(\tau)$  حل کرد. فرکانس‌های ارائه شده در  $R_x(\tau)$  برحسب  $\tau$  نشان‌دهنده‌ی محتوای فرکانسی تابع نمونه‌گیری شده‌ی  $x(t)$  است. از این رو با استفاده از رابطه‌ی انتگرال فوری‌ی (رابطه‌ی ۲) نتیجه می‌شود:

$$S_x(\omega) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2)$$

تشخیص عیب شبیه‌سازی شده‌ی یاتاقان، نتایج حاصله را با روش انولوپ موجک<sup>۳</sup> مقایسه کردند. آنتونی در سال ۲۰۰۷ ابراهایی برای برداشت اطلاعات از نمودار همبستگی طیفی معرفی کرد.<sup>[۱۱]</sup> در این مقاله علاوه بر نمودار همبستگی طیفی و طیف مدولاسیون دوره‌ی، از نمودار وابستگی دوره‌ی<sup>۴</sup> نیز استفاده شده و نتایج حاصله با طیف انولوپ مجذور سیگنال مقایسه شده است. در سال ۲۰۱۳ جین‌ایلیا و همکاران در مقاله‌ی بی‌بیان این روش برای تشخیص عیوب گسترده در یاتاقان ساچمه‌ی پرداختند.<sup>[۱۲]</sup> در بیشتر مطالعات قبلی، تمرکز اصلی بر تشخیص عیوب موضعی بوده است در حالی که در نوشتار جین‌ایلیا عیوب گسترده -- نظیر عیوب ایجاد شده بر اثر رشد تدریجی، سایش سطوح یا فرایند تولید با کیفیت پایین -- مورد بحث قرار گرفته است. رشد عیوب گسترده که غالباً توسط روش‌های کلاسیک قابل تشخیص نیستند، با تعریف پارامتر وابستگی دوره‌ی<sup>۵</sup> به صورت واضح‌تری مشاهده شد. در سال ۲۰۱۵ محققین برای تعریف روش تناوبی - پایا، تابع همبستگی را به صورت تابعی از زاویه و تأخیر زمانی تعریف کردند و نتایج حاصل را با روش‌های قبلی در چند مثال بررسی کردند.<sup>[۱۳]</sup> در همین سال زیاد بودن حجم محاسبات مربوط به توابع دوره‌ی بررسی و اشاره می‌شود که سنگین بودن هزینه‌ی محاسباتی علت اصلی عدم استقبال از این روش‌ها در کاربردهای صنعتی است. و بنابراین روشی براساس طیف انولوپ برای نمایش محتوای فرکانس طیفی و فرکانس دوره‌ی سیگنال ارتعاشات ارائه می‌شود که از نظر محاسباتی کم حجم‌تر است.<sup>[۱۴]</sup>

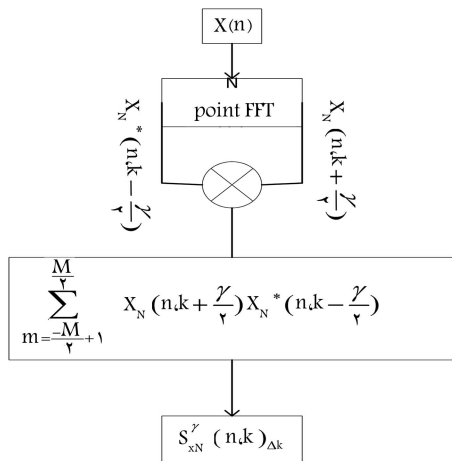
هدف از این مقاله محاسبه‌ی نمودارهای چگالی همبستگی طیفی با استفاده از تبدیل ویگنر - ویل است تا بتوان علاوه بر روش محاسبه‌ی مستقیم، نمودار همبستگی طیفی را به روشی دیگر نیز به دست آورد. با توجه به این که تبدیل ویگنر - ویل تبدیل شناخته‌شده‌ی است، استفاده از این روش در ایجاد شناخت عمیق‌تر از نمودارهای دوره‌ی کمک شایانی می‌کند و راه را برای استفاده‌ی گسترده‌تر از این روش هموار می‌سازد. مقایسه‌ی نتایج حاصل از این روش با نمودار به دست آمده از روش مستقیم نشان می‌دهد که این دو روش همخوانی خوبی دارند.

در این مقاله ابتدا شرح مختصری از مفهوم تناوبی - پایا داده می‌شود. سپس روابط استفاده شده به منظور عیب‌یابی با روش تناوبی - پایا آورده شده است. با استفاده از روابط به دست آمده، الگوریتم مورد نظر برای رسم تابع چگالی همبستگی طیفی برای دو مثال عملی در نرم‌افزار متلب اجرا شد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده‌ی تشخیص وجود عیب در رینگ داخلی برای مثال اول، و تشخیص عیب در رینگ خارجی برای مثال دوم است. همچنین نتایج دو مثال با روش شناخته شده‌ی طیف انولوپ مقایسه، و دقت بالاتر این روش‌ها در تشخیص عیب نشان داده شد.

## ۲. میانی نظری

### ۱.۲. رفتار تناوبی - پایا در ماشین‌های دوار

اکثر روش‌های موجود پردازش سیگنال برای تجزیه و تحلیل سیگنال در یک محیط مغشوش، مبتنی بر استفاده از مدل آماری پایاست. در تحلیل ارتعاشات مکانیکی ماشین‌های دوار، دوره‌ی تناوب ناشی از دوران محور، نیروی چرخنده، تسمه، زنجیر، یاتاقان، احتراق گاز در موتور احتراق داخلی، معکوس شدن نیرو در حرکت رفت و برگشتی، جریان سیال در پمپ‌ها، جریان آشفته‌ی اطراف پره فن و... مشاهده می‌شود. چنین پدیده‌هایی معمولاً اثر تناوبی در سیگنال‌های مکانیکی دارند، که



شکل ۱. الگوریتم اجرای روش هموارسازی فرکانس مستقیم.

### ۵.۲. برآورد تابع چگالی همبستگی طیفی

برای پیاده سازی تابع چگالی همبستگی طیفی از دو تبدیل فوریه سریع که براساس الگوریتم هموارسازی زمان هستند (هموار کردن یک مجموعه داده، با هدف ایجاد یک تابع تقریب برای استخراج الگوهای مهم در داده ها است)، استفاده می شود. در این مقاله ابتدا از روش هموارسازی فرکانس مستقیم<sup>۱</sup> برای به دست آوردن تابع چگالی همبستگی طیفی استفاده می شود.

در الگوریتم هموارسازی فرکانس مستقیم، ابتدا طیف هر کدام از داده ها گرفته می شود. سپس همبستگی طیفی روی هر کدام از طیف ها مستقیماً اعمال می شود (رابطه ۸). در شکل ۱ الگوریتم اجرای این روش نشان داده شده است.

$$S_{X_N}^{\gamma}(n, k)_{\Delta k} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_N(n, k + \frac{\gamma}{4}) X_N^*(n, k - \frac{\gamma}{4}) \quad (8)$$

که در آن  $X_N(n, k)$  تبدیل فوریه سیگنال  $x(n)$  در تابع پنجره است و طبق رابطه ۹ محاسبه می شود.

$$X_N(n, k) = \sum_{n=0}^{N-1} \omega(n)x(n)e^{-j2\pi kn/N} \quad (9)$$

در رابطه های ۸ و ۹،  $N$  تعداد نقاط FFT وابسته به مدت زمان سیگنال،  $\gamma$  فرکانس دوره ای،  $\omega(n)$  پنجره ای استفاده شده،  $k$  فرکانس طیفی و نماد \* بیانگر مزدوج مختلط است.

### ۳. آنالیز انولوپ و توزیع ویگنرویل

روش انولوپ یا روش زرنانوس فرکانس بالا (HFRT)<sup>۱۱</sup> روش توانمندی است برای تشخیص عیوب یا تاقان غلظتی در زمانی که مشخصه ی فرکانس های عیب در طیف فرکانسی قابل تشخیص نیست. روش انولوپ معمولاً با استفاده از دو روش تبدیل هیلبرت یا یکسوسازی انجام می شود. در این روش سیگنال به دست آمده از یک فیلتر میان گذر در نزدیکی فرکانس زرنانوس عبور می کند و نوسانات ناخواسته ی سیگنال از منابع دیگر حذف می شود. سپس سیگنال فیلتر شده یک سو می شود. طیف پوش سیگنال در محدوده ی فرکانس پایین برای کسب مشخصه های فرکانسی عیوب یا تاقان مورد تحلیل قرار می گیرد.

که در آن  $R_x(\tau)$  تابع همبستگی سیگنال  $x$ ، و  $S_x(\omega)$  تابع چگالی طیفی است.

### ۳.۲. روابط آماری فرایندهای تناوبی - پایا

فرایند  $x(t)$  تناوبی - پایا گفته می شود، اگر مشخصه های آماری آن به صورت تابعی تناوبی با دوره ی  $T$  باشد، پس مقدار میانگین و همبستگی، برای تمام مقادیر  $u$  و  $t$ ، طبق رابطه ی ۳ تعریف می شود:

$$m_x(t+T) = m_x(t) \\ R_x(t+T, u+T) = R_x(t, u) \quad (3)$$

با توجه به متقارن بودن تابع همبستگی در رابطه ی ۳، رابطه ی ۴ به دست می آید:

$$R_x(t+T + \frac{T}{4}, t+T - \frac{T}{4}) = R_x(t + \frac{T}{4}, t - \frac{T}{4}) \quad (4)$$

در زمان  $t$  برابر  $T$  به ازای هر مقدار  $\tau$  است. به دلیل دوره ای بودن تابع همبستگی، می توان برای آن سری فوریه نسبت به زمان  $t$  به صورت رابطه ۵ نوشت:

$$R_x(t + \frac{T}{4}, t - \frac{T}{4}) = \sum_{\alpha} R_x^{\alpha}(\tau) e^{i2\pi\alpha t} \quad (5)$$

برای به دست آوردن ضرایب فوریه  $R_x^{\alpha}(\tau)$  با توجه به رابطه ی ۶ داریم:

$$R_x^{\alpha}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{4}}^{\frac{T}{4}} R_x(t + \frac{T}{4}, t - \frac{T}{4}) e^{i2\pi\alpha t} dt \quad (6)$$

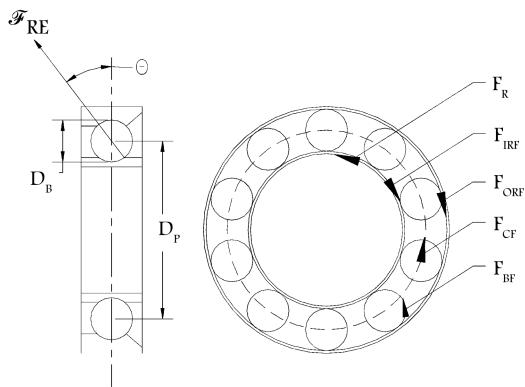
که در آن  $R_x^{\alpha}(\tau)$  ضرایب فوریه ی تابع همبستگی است و محدوده ی  $\alpha$  همه ی ضرایب صحیح از فرکانس  $\frac{1}{T}$  است. همچنین تابع  $R_x^{\alpha}(\tau)$  به عنوان تابع همبستگی دوره ای<sup>۸</sup> تعریف می شود.

### ۴.۲. تابع چگالی همبستگی طیفی<sup>۹</sup>

سیگنال ها معمولاً ویژگی های متمایزی در حوزه ی فرکانس دارند که به راحتی در حوزه ی زمان دیده نمی شود. این ویژگی ها به طور کلی برای تشخیص سیگنال ها مورد استفاده واقع می شود. به عنوان مثال، تشخیص حضور یک سیگنال سینوسی، زمانی که تحت نویز قرار گرفته، تنها با نگاه در حوزه ی زمان بسیار دشوار است. در حالی که همان سیگنال را به آسانی می توان در حوزه ی فرکانس شناسایی کرد. به همین دلیل، برای تعیین آن در حوزه ی فرکانس میزان همبستگی بین سیگنال  $x(t)$  و شیفته یافته ی آن سودمند است. تابع چگالی طیفی همبستگی، به صورت تبدیل فوریه ی تابع همبستگی دوره ای تعریف می شود.

$$S_x^{\alpha}(f) = S_x(\alpha, f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x^{\alpha}(\tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad (7)$$

$S_x(\alpha, f)$  به عنوان تابع چگالی همبستگی طیفی شناخته می شود. رابطه ی ۷، شامل دو فرکانس با معنای فیزیکی متفاوت است. فرکانس  $f$  در ارتباط با تأخیر زمانی  $\tau$  را فرکانس طیفی سیگنال، و فرکانس  $\alpha$  در ارتباط با زمان  $t$  را فرکانس مدولاسیون یا فرکانس دوره ای می نامند. چون تابع همبستگی سیگنال تناوبی - پایا در زمان و تأخیر زمانی انتقال می یابد و نسبت به زمان متناوب است، تابع همبستگی طیفی نسبت به  $f$  پیوسته و نسبت به  $\alpha$  گسسته است.



شکل ۴. ابعاد مرتبط با فرکانس‌های گذر ساچمه در یاتاقان.



شکل ۵. تصویر یاتاقان‌های پمپ با علامت خرابی در رینگ داخلی.

بیان می‌شود: [۱۵]

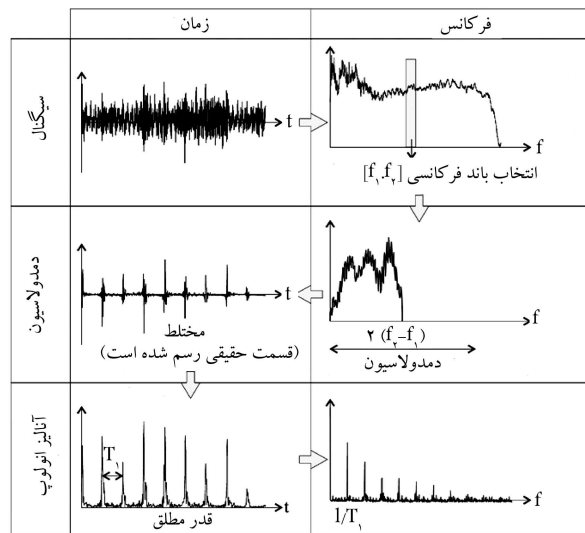
$$\begin{aligned}
 F_{CF} &= \frac{1}{\sqrt{2}} f_S \left( 1 - \frac{d_b \cos \alpha}{d_p} \right) \\
 F_{ORF} &= \frac{n_b}{\sqrt{2}} f_S \left( 1 - \frac{d_b \cos \alpha}{d_p} \right) \\
 F_{IRF} &= \frac{n_b}{\sqrt{2}} f_S \left( 1 + \frac{d_b \cos \alpha}{d_p} \right) \\
 F_{BF} &= \frac{d_p}{\sqrt{2} d_b} f_S \left( 1 - \frac{d_b \cos \alpha}{d_p} \right)
 \end{aligned} \quad (11)$$

که در آن،  $f_S$  فرکانس چرخش شفت،  $n_b$  تعداد رولرها،  $d_b$  قطر المان چرخشی،  $d_p$  قطر گام و  $\alpha$  به عنوان زاویه‌ی تماس معرفی می‌شود. با توجه به خصوصیات فرکانسی اجزای مختلف، در آنالیز طیفی می‌توان به نوع عیب در یاتاقان غلتشی پی برد.

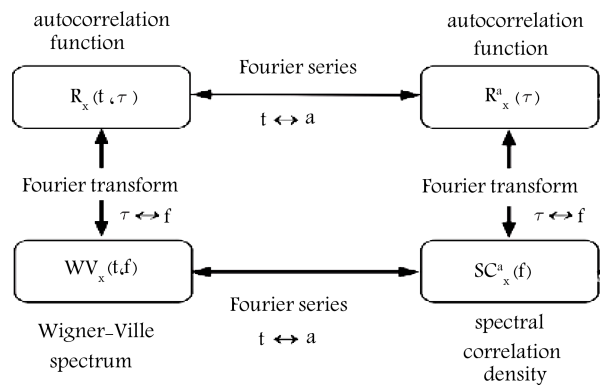
### ۵. بررسی مثال عملی

در این قسمت در دو مثال عملی، تابع چگالی همبستگی طیفی با دو روش مستقیم و تبدیل ویگنر-ویل محاسبه، و کارایی الگوریتم‌های استفاده‌شده در تشخیص عیوب بررسی می‌شود. مثال اول مربوط به ارتعاشات اندازه‌گیری شده‌ی یاتاقان یک پمپ صنعتی است. در شکل ۵ نمودار چگالی همبستگی طیفی برای سیگنال به دست آمده از ارتعاشات یاتاقان پمپ شماره ۳۳۰۸ پالایشگاه امام خمینی شازند رسم شده است. یاتاقان‌های پمپ از نوع E ۲۲۲۱۶ است. در این شکل، تصویر یاتاقان‌های این پمپ با علامت چند خرابی در محل تماس غلتک‌ها از هم در رینگ داخلی آورده شده است. مشخصات فرکانسی یاتاقان نیز در جدول ۱ ثبت شده است.

ارتعاشات پمپ با سنسور شتاب‌سنج IMI ۶۰۳C۰۱ و دستگاه آنالیزر STD۳۳۰۰ در محدوده‌ی فرکانسی ۱۰ - ۸۰۰۰ هرتز اندازه‌گیری شده است. در شکل ۶ سیگنال شتاب یاتاقان پمپ در راستای افقی نشان داده شده است؛ فرکانس نمونه برداری ۲۰۴۸۰ هرتز است.



شکل ۲. مراحل اجرای روش آنولوپ.



شکل ۳. ارتباط ویگنر ویل و تابع همبستگی طیفی.

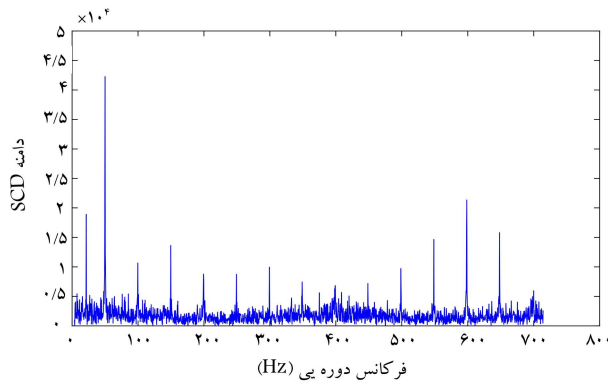
«توزیع ویگنر ویل» ابزاری است برای تحلیل در حوزه‌ی زمان - فرکانس، که به صورت رابطه‌ی ۱۰ بیان می‌شود. بر این اساس تابع ویگنر ویل به صورت تبدیل فوریه‌ی تابع همبستگی نسبت به تأخیر زمانی  $\tau$  تعریف می‌شود (شکل ۲).

$$w_{xx}(t, f) = \int_{t-\frac{\tau}{\sqrt{2}}}^{t+\frac{\tau}{\sqrt{2}}} x(t + \frac{\tau}{\sqrt{2}}) \cdot x^*(t - \frac{\tau}{\sqrt{2}}) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad (10)$$

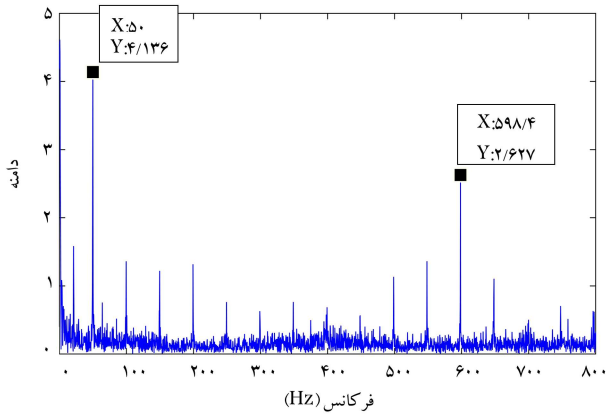
رابطه‌ی ۱۰ تابعی متناوب نسبت به زمان است. از این رو با گرفتن تبدیل فوریه نسبت به زمان از تابع ویگنر ویل تابع چگالی همبستگی طیفی به دست می‌آید. این موضوع در شکل ۳ نشان داده شده، و از آن برای محاسبه‌ی تابع چگالی همبستگی طیفی استفاده شده است.

### ۴. مشخصه‌های فرکانسی عیوب در یاتاقان

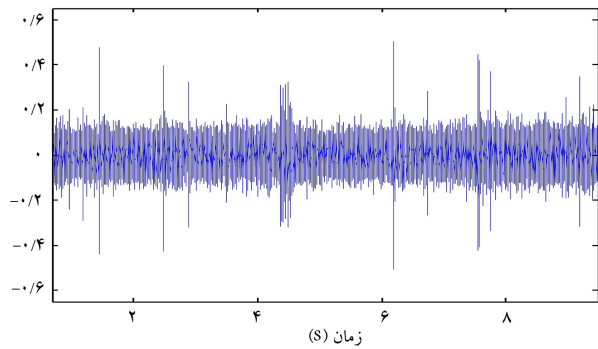
تمرکز در پایش وضعیت یاتاقان غلتشی روی چهار فرکانس گذر ساچمه است. این فرکانس‌ها عبارت‌اند از: فرکانس عیب روی رینگ بیرونی  $^{12} (FOR)$ ، فرکانس عیب روی رینگ داخلی  $^{13} (FIR)$ ، فرکانس عیب رولر  $^{14} (BBF)$  و فرکانس عیب قفسه  $^{15} (FCR)$ . در شکل ۴ ابعاد و مشخصه‌های فرکانسی نشان داده شده است. همچنین برای یک یاتاقان با رینگ خارجی ثابت این فرکانس‌ها به صورت رابطه‌ی ۱۱



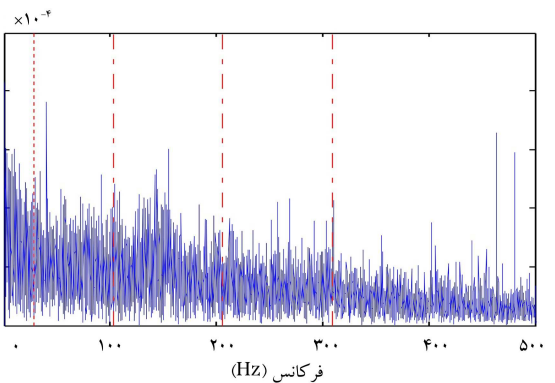
شکل ۸. انتگرال نمودار شکل ۷.



شکل ۹. طیف انولوپ ارتعاشات پمپ ۳۳۰۸ پالایشگاه سازند.



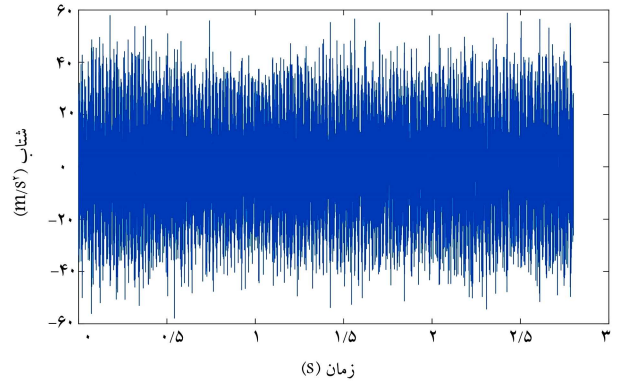
شکل ۱۰. سیگنال شتاب یاتاقان E ۲۲۲۱۶ [۱۶]



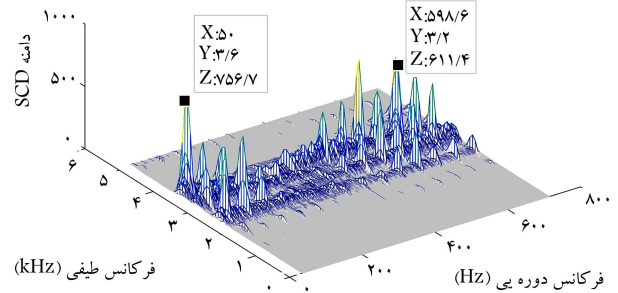
شکل ۱۱. طیف انولوپ شتاب یاتاقان E ۲۲۲۱۶ [۱۶]

جدول ۱. مشخصات فرکانسی یاتاقان E ۲۲۲۱۶.

مقدار فرکانس (Hz)	مشخصه فرکانسی
۵۰	فرکانس دورانی رینگ داخلی
۰	فرکانس دورانی رینگ خارجی
۲۱٫۵	فرکانس دورانی رولر و کیچ
۵۹۷٫۵	فرکانس عیب در رینگ داخلی
۴۵۲٫۵	فرکانس عیب در رینگ خارجی



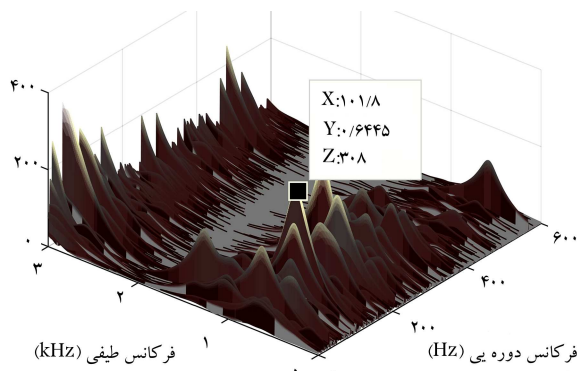
شکل ۶. سیگنال ارتعاشی پمپ ۳۳۰۸ پالایشگاه سازند.



شکل ۷. نمودار چگالی همبستگی طیفی.

با توجه به سیگنال به دست آمده، نمودار چگالی همبستگی طیفی در نرم افزار متلب با پیاده سازی الگوریتم چگالی همبستگی طیفی، مطابق شکل ۷ ترسیم می شود. چنان که مشاهده می شود، ناحیه ی رزونانسی در محدوده ی فرکانسی ۲/۴ کیلو هرتز و فرکانس دوره یی در ۵۹۸ هرتز مطابق با فرکانس خرابی رینگ داخلی وجود دارد. علاوه بر آن باندهای جانبی با فرکانس چرخش رینگ داخلی و خود فرکانس چرخش رینگ داخلی نیز در نمودار دیده می شود. برای درک بهتر اطلاعات از نمودار همبستگی شکل ۷ در تمام فرکانس ها انتگرال گیری شده است (شکل ۸). در این شکل مشخصه های فرکانسی بهتر دیده می شود. برای مقایسه ی این روش با روش انولوپ، طیف انولوپ آن نیز ترسیم شده است. از مقایسه ی شکل ۹ با شکل ۸، شاهد ارتباط بین این دو روش و نیز صحت نتایج حاصله خواهیم بود. مثال بعدی به بررسی سیگنال یاتاقان، داده ثبت شده شماره ۲۰۰ دانشگاه Case Western می پردازد. این داده با فرکانس نمونه برداری ۱۲ کیلو هرتز به دست آمده است. این مورد دارای عیب با قطر ۱۴/۰ اینچ در رینگ خارجی است. سرعت چرخش شفت حدود ۱۷۳۰ rpm است. مشخصه های فرکانسی این یاتاقان در جدول ۲ ثبت شده است.

در شکل ۱۰ سیگنال زمانی این یاتاقان و در شکل ۱۱ طیف انولوپ آن نشان



شکل ۱۲. نمودار چگالی همبستگی طیفی.

دوره‌یی بودن پدیده و فرکانس بیان‌کننده‌ی فرکانس طیفی. از روی فرکانس دوره‌یی می‌توان در صورت وجود عیب به مشخصه‌ی فرکانسی عیب پی برد. همچنین از محدوده‌ی فرکانس طیفی می‌توان به صورت یک فیلتر میان‌گذر استفاده کرد. مزیت این روش نسبت به روش انولوپ عدم نیاز به دانستن محدوده‌ی رزونانس است. همچنین در یک مثال عملی مزیت این روش نسبت به روش انولوپ در تشخیص عیوب مشخص شد. یک روش جایگزین برای محاسبه‌ی چگالی همبستگی طیفی با کمک تبدیل ویگنر - ویل نیز پیاده‌سازی، و نتایج در یک مثال واقعی بررسی شد.

جدول ۲. مشخصات فرکانسی یاتاقان E ۲۲۱۶.

مقدار فرکانس (Hz)	مشخصه فرکانسی
۲۸٫۸	فرکانس دورانی رینگ داخلی
۰	فرکانس دورانی رینگ خارجی
۱۱٫۵	فرکانس دورانی رولر و کیچ
۱۵۶	فرکانس عیب در رینگ داخلی
۱۰۳	فرکانس عیب در رینگ خارجی

داده شده است. با توجه به شکل ۱۱ تشخیص فرکانس عیب از روی طیف انولوپ مشکل است. برای کارآمدی روش تناوبی - پایا نمودار همبستگی طیفی با استفاده از تابع ویگنر ویل در شکل ۱۲ رسم شده است. در این شکل عیب رینگ خارجی در نمودار همبستگی طیفی مشخص شده است.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله روش تناوبی - پایا برای پردازش سیگنال ارتعاشات یاتاقان غلتشی بررسی شد. نمودار چگالی همبستگی طیفی دارای دو فرکانس است: فرکانس بیان‌گر

## پانویس‌ها

1. Kurtosis
2. Crest Factor
3. wavelet envelope
4. cyclic coherence
5. integrated cyclic coherence
6. correlation
7. spectral density
8. cyclic correlation
9. spectral correlation density function
10. direct frequency-smoothing method
11. high-frequency resonance technique
12. outer ring frequency
13. inner ring frequency
14. bearing frequency
15. cage frequency

## منابع (References)

1. Balderston, H.L. "The detection of incipient failure in bearings", *Mater Evaluation*, **27**(6), pp. 121-128 (1969).
2. Smith, K. and Weichbrodt, B. "Signature analysis-non-intrusive techniques for incipient failure identification application to bearings and gears", *ASTM/IES/AIAA Space Simulation Conference*, pp. 407-448 (14-16 September 1970).

3. McFadden, P. and Smith, J. "Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing", *Journal of Sound and Vibration*, **96**(1), pp. 69-82 (1984).
4. McFadden, P. and Smith, J. "Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance techniquea review", *Tribology international*, **17**(1), pp. 3-10 (1984).
5. Newland, D.E. "Wavelet analysis of vibration: Part 1 - theory", *Journal of Vibration and Acoustics*, **116**(4), pp. 409-416 (1994).
6. Newland, D.E. "Wavelet analysis of vibration: Part 2 - wavelet maps", *Journal of Vibration and Acoustics*, **116**(4), pp. 417-425 (1994).
7. Bennett, W. "Statistics of regenerative digital transmission", *Bell System Technical Journal*, **37**(6), pp. 1501-1542 (1958).
8. McCormick, A. and Nandi, A. "Cyclostationarity in rotating machine vibrations", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **12**(2), pp. 225-242 (1998).
9. Randall, R.B., Antoni, J. and Chobsaard, S. "A comparison of cyclostationary and envelope analysis in the diagnostics of rolling element bearings", in *Proceeding of IEEE*, pp. 3882-3885 (2000).
10. Li, L. and Qu, L. "Cyclic statistics in rolling bearing diagnosis", *Journal of Sound and Vibration*, **267**(2), pp. 253-265 (2003).

11. Antoni, J. "Cyclic spectral analysis of rolling-element bearing signals: Facts and fictions", *Journal of Sound and Vibration*, **304**(3-5), pp. 497-529 (2007).
12. D'Elia, G., Delvecchio, S., Cocconcelli, M. and Dalpiaz, G. "Application of cyclostationary indicators for the diagnostics of distributed faults in ball bearings", *ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, pp. V008T13A002-V008T13A002 (2013).
13. Abboud, D., Antoni, J., Eltabach, M. and Sieg-Zieba, S. "Angle/time cyclostationarity for the analysis of rolling element bearing vibrations", *Measurement*, **75**, pp. 29-39 (2015).
14. Borghesani, P. "The envelope-based cyclic periodogram", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **58**, pp. 245-270 (2015).
15. Randall, R.B., and Antoni, J. "Rolling element bearing diagnostics-A tutorial", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **25**, pp. 458-520 (2011).
16. Smith, W.A. and Randall, R.B. "Rolling element bearing diagnostics using the case western reserve university data: A benchmark study", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **64-65**, pp. 100-131 (2015).