

استخراج چیرپلت مورلت سه بعدی بمنظور تشخیص عیوب سیستمهای چرخندهای

رضا تقی زاده^ا، میر محمد اتفاق^ب، رضا حسن نژاد قدیم^{ب*}

^ا ایران، تبریز، بلوار ۲۹ بهمن، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی مکانیک، کدپستی ۱۴۷۷۶-۵۱۶۶۶، دانشجوی دکتری.

^ب ایران، تبریز، بلوار ۲۹ بهمن، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی مکانیک، کدپستی ۱۴۷۷۶-۵۱۶۶۶، دانشیار.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hassannejhad@tabrizu.ac.ir

چکیده

سیگنال‌های ارتعاشی به عنوان ابزاری کلیدی در تشخیص عیب ماشین‌آلات دوار عمل می‌کنند و اطلاعات ارزشمندی در خصوص وضعیت سلامت و عملکرد اجزای مکانیکی ارائه می‌دهند. با وجود پیشرفت‌های موجود در روش‌های تحلیل زمان - فرکانسی، چالش‌های عمده‌ای همچون همپوشانی فرکانسی سیگنال‌ها و حضور نویز شدید در محیط‌های واقعی همچنان مانع تشخیص دقیق می‌شوند. در این پژوهش، روش نوینی تحت عنوان تبدیل چیرپلت مورلت استخراج شده همزمان سه بعدی معرفی شده است که سیگنال را در ابعاد زمان، فرکانس و نرخ تغییرات فرکانس (چیرپ ریت) تحلیل می‌کند. این رویکرد نه تنها مقاومت بالاتری نسبت به روش‌های موجود در برابر نویز نشان می‌دهد، بلکه قادر است اجزای فرکانسی با همپوشانی بالا، حتی سیگنال‌های دارای منحنی‌های متقاطع در صفحه زمان - فرکانس، را به طور کامل تفکیک نماید. مزایای مذکور در کنار قابلیت تحلیل سیگنال‌های غیرایستا، این روش را به گزینه‌ای ایده‌آل برای عیب‌یابی ماشین‌آلات دوار، به ویژه در مرحله راه‌اندازی تبدیل می‌کند؛ جایی که سرعت متغیر دوران منجر به غیرایستایی سیگنال و سرعت پایین‌تر از سرعت اسمی باعث نزدیکی فرکانس مولفه‌ها شده و نویز صنعتی غالب است. نتایج حاصل از پردازش سیگنال‌های شبیه‌سازی شده و سیگنال‌های واقعی اخذ شده از گیربکس دارای عیب چرخنده نشان‌دهنده عملکرد قابل توجه در تشخیص عیب می‌باشد.

کلمات کلیدی: همپوشانی فرکانسی؛ عیب‌یابی؛ استخراج همزمان سه بعدی؛ چیرپلت.

۱- مقدمه

سیگنال‌های ارتعاشی در تشخیص عیب ماشین‌آلات دوار نقش کلیدی ایفا می‌کنند و اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت سلامت و عملکرد اجزای مختلف ارائه می‌دهند. در شرایط عملیاتی واقعی، این سیگنال‌ها اغلب غیرایستا هستند و شامل مولفه‌های فرکانسی متغیر با زمان می‌شوند که ناشی از نوسانات بار، تغییرات سرعت چرخشی و تعاملات مکانیکی پیچیده است. علاوه بر این،

ماشین‌آلات دوار سیگنال‌های ارتعاشی چندجزئی با فرکانس‌های نزدیک به هم تولید می‌کنند که چالش‌های جدی در تحلیل زمان-فرکانس ایجاد می‌نماید [۲۱]. روش‌های زمان-فرکانسی ابزارهای رایجی برای پردازش این سیگنال‌ها هستند، اما محدودیت‌هایی مانند محاسبه دقیق تغییرات زمانی فرکانس، کاهش دقت در حضور نویز بالا و همپوشانی طیفی در سیگنال‌های چندجزئی با مولفه‌های نزدیک وجود دارد. تبدیل فوریه زمان کوتاه^۱ به عنوان روش پایه‌ای تحلیل زمان-فرکانس عمل می‌کند و با استفاده از پنجره لغزان، تبدیل فوریه محلی را محاسبه می‌نماید. با این حال، اندازه ثابت پنجره آن تعادل بین وضوح زمانی و فرکانسی را بر اساس اصل عدم قطعیت ایجاد می‌کند [۲]. این محدودیت در سیگنال‌های چندجزئی با تغییرات سریع فرکانسی مشکل‌ساز است؛ پنجره‌های باریک وضوح فرکانسی کافی برای جداسازی اجزا فراهم نمی‌کنند، در حالی که پنجره‌های پهن فرض شبه‌ایستایی داخل پنجره را نقض می‌کنند. توزیع ویگنر-ویل^۲ تمرکز بهینه زمان-فرکانسی برای سیگنال‌های تک‌جزئی ارائه می‌دهد و وضوح بالایی دارد، اما در سیگنال‌های چندجزئی، ترم‌های متقاطع مشکل‌ساز تولید می‌کند که تفسیر سیگنال را مختل می‌نماید [۴]. وقتی اجزای فرکانسی نزدیک هستند، این ترم‌ها با دامنه بالاتر، ویژگی‌های واقعی سیگنال را پنهان می‌سازند. تجزیه مد تجربی^۳ سیگنال‌ها را به طور تطبیقی به توابع مد ذاتی تجزیه می‌کند و برای تحلیل سیگنال‌های غیرایستای چندجزئی مناسب است. این روش داده‌محور بدون فرضیات پیشینی ویژگی‌های سیگنال را ثبت می‌کند، اما از اختلاط مد یعنی حالتیکه یک مد ذاتی حاوی چندین جزء و شکافت مد که در آن یک جزء در چندین مد ذاتی حضور دارد رنج می‌برد، که در اجزای با فرکانسهای نزدیک شدیدتر است [۵]. تجزیه مد متغیر^۴ جایگزین ریاضیاتی برای تجزیه مد تجربی است و سیگنال‌ها را به مدهای شبه‌متعام تجزیه می‌کند. این روش در سیگنال‌های غیرایستای نویزی عملکرد خوبی دارد، اما خروجی آن وابستگی شدید به پارامترها داشته و انتخاب نامناسب پارامترها می‌تواند منجر به اختلاط یا شکافت مد شده و جداسازی اجزای نزدیک را تحت تأثیر قرار دهد [۶]. تبدیل موجک^۵ تحلیل چندوضوحی با وضوح زمان-فرکانسی متغیر در مقیاس‌های مختلف ارائه می‌دهد و برای سیگنال‌های غیرایستا با اجزای گذرا و نوسانی مؤثر است. با این حال، وابستگی به موجک مادر و نمونه‌برداری مقیاس و پراکندگی انرژی برای الگوهای پیچیده، اثربخشی آن را در تشخیص دقیق محل فرکانس محدود می‌کند. تبدیل فشرده‌سازی همزمان^۶ صفحه زمان-فرکانس را با تمرکز انرژی اطراف قله‌های فرکانس آنی بهبود می‌بخشد و نمایش‌های واضح‌تری برای سیگنال‌های غیرایستای چندجزئی فراهم می‌کند. تبدیل استخراج همزمان^۷ مشابه فشرده‌سازی همزمان عمل می‌کند و محل فرکانس‌های آنی را پیش‌بینی می‌نماید، اما به جای فشرده‌سازی ضرایب، نقاط روی منحنی‌های فرکانسی را حفظ و دیگر نقاط را حذف می‌کند [۷]. این ویژگی تبدیل استخراج همزمان را نسبت به نویز مقاوم‌تر می‌سازد. با وجود افزایش وضوح در فشرده‌سازی همزمان و استخراج همزمان، هر دو روش در مواجهه با سیگنال‌های دارای همپوشانی فرکانسی، به ویژه اجزای متقاطع، منجر به ادغام قله‌ها و از دست رفتن اطلاعات اجزا می‌شوند. در نهایت، انتخاب روش مناسب بستگی به طبیعت سیگنال و سطح نویز دارد، اما چالش جداسازی اجزای نزدیک همچنان نیازمند پیشرفت‌های بیشتر است.

ملاحظه می‌گردد علی‌رغم توسعه متدهای تحلیل زمان-فرکانسی و بهبودهای صورت گرفته، تأثیر مخرب نویز و همپوشانی فرکانسها نیاز به بررسی بیشتر در این حوزه را ضروری‌تر می‌سازد. در پژوهش حاضر تبدیلی تحت عنوان تبدیل چیرپلت مورلت استخراج شده همزمان سه بعدی^۸ معرفی می‌گردد. این روش با کاهش تأثیر نویز و تفکیک اجزای فرکانسی در یک بعد بالاتر از فرکانس منجر به افزایش وضوح صفحات زمان-فرکانسی می‌گردد. خواص روش حاضر شامل مقاومت در برابر نویز، تفکیک اجزا با همپوشانی فرکانسی و توانایی تحلیل سیگنال‌های غیرایستا آنرا به گزینه‌ای مناسب در عیب‌یابی ماشین‌آلات دوار بویژه در مرحله راه‌اندازی آنها بدل می‌سازد چرا که سرعت دوران در این مرحله متغیر (در حال افزایش بوده) بوده که منجر به غیرایستایی سیگنال و

^۱ Short Time Fourier Transform (STFT)^۲ Wigner – Ville Distribution (WVD)^۳ Empirical Mode Decomposition (EMD)^۴ Variational Mode Decomposition (VMD)^۵ Wavelet Transform (WT)^۶ Synchro-Squeezing Transform (SST)^۷ Synchro-Extracting Transform (SET)^۸ Three Dimension Synchro-Extracted Morlet Chirplet Transform (TDSEMCT)

سرعت پایین دوران نسبت به سرعت اسمی دستگاه باعث نزدیکی فرکانس مولفه‌ها به یکدیگر می‌شود. در این راستا ابتدا در بخش ۲ روش حاضر و ریاضیات حاکم بر آن تشریح می‌شود. سپس در بخش ۳ دو نوع سیگنال شبیه‌سازی شده و حقیقی توسط روش حاضر مورد تحلیل قرار می‌گیرد. نهایتاً در بخش ۴ نیز نتایج حاصل از بخش ۳ و بهبود حاصله در وضوح زمان - فرکانسی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۲- تبدیل چیرپلت مورلت استخراج شده همزمان سه بعدی

۱-۲ تبدیل چیرپلت مورلت سه بعدی

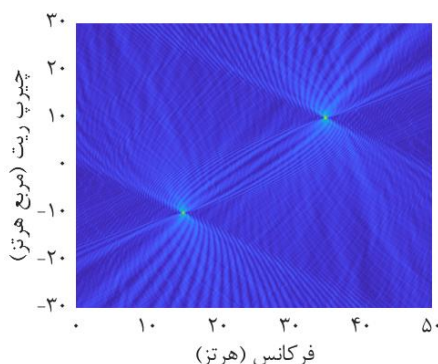
استخراج شکل تحلیلی سیگنالهای دریافتی از ماشین آلات دوار که سرعت آنها در حال تغییر است حاکی از آنست که این سیگنالها از بر هم نهی دو یا چند جزء با فرکانس‌های متغیر با زمان شامل هارمونیک‌هایی با مدولاسیون فرکانس و دامنه بصورت رابطه ۱ تشکیل می‌شوند:

$$x(t) = \sum_{k=1}^K x_k(t) = \sum_{k=1}^K A_k(t) e^{j\varphi_k(t)} \quad (1)$$

نظر به اینکه در ویولت مورلت مختلط انتقال یافته^۹ بر خلاف ویولت‌های متداول که دارای تابع مقیاس هستند، فرکانس مرکزی (متغیر مستقل فرکانس در صفحه زمان - فرکانس) و پهنای باند بصورت مجزا و به ترتیب توسط پارامترهای f_c و f_b قابل تنظیم هستند، تبدیل چیرپلت مورلت در قالب نسخه تعمیم یافته ویولت مورلت مطابق رابطه ۲ ارائه می‌گردد:

$$MCT(t, f_c, \beta) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\mu) \frac{f_b}{\sqrt{\pi}} \exp(-f_b^2(\mu-t)^2) \exp(-j2\pi f_c(\mu-t)) \exp(-j2\pi\beta(\mu-t)^2) d\mu \quad (2)$$

در این تبدیل سیگنالهای غیر ایستا علاوه بر دو بعد زمان و فرکانس در بعد سومی تحت عنوان چیرپ ریت نیز مورد بررسی قرار می‌گیرند. پارامتر چیرپ ریت β نمایانگر تغییرات زمانی فرکانس لحظه‌ای بوده و با مشتق زمانی دوم فاز لحظه‌ای اجزای سیگنال برابر است. با اعمال این تبدیل بر روی یک سیگنال دو جزئی، به ازای هر لحظه از زمان یک نمودار مشابه شکل ۱ حاصل می‌شود:



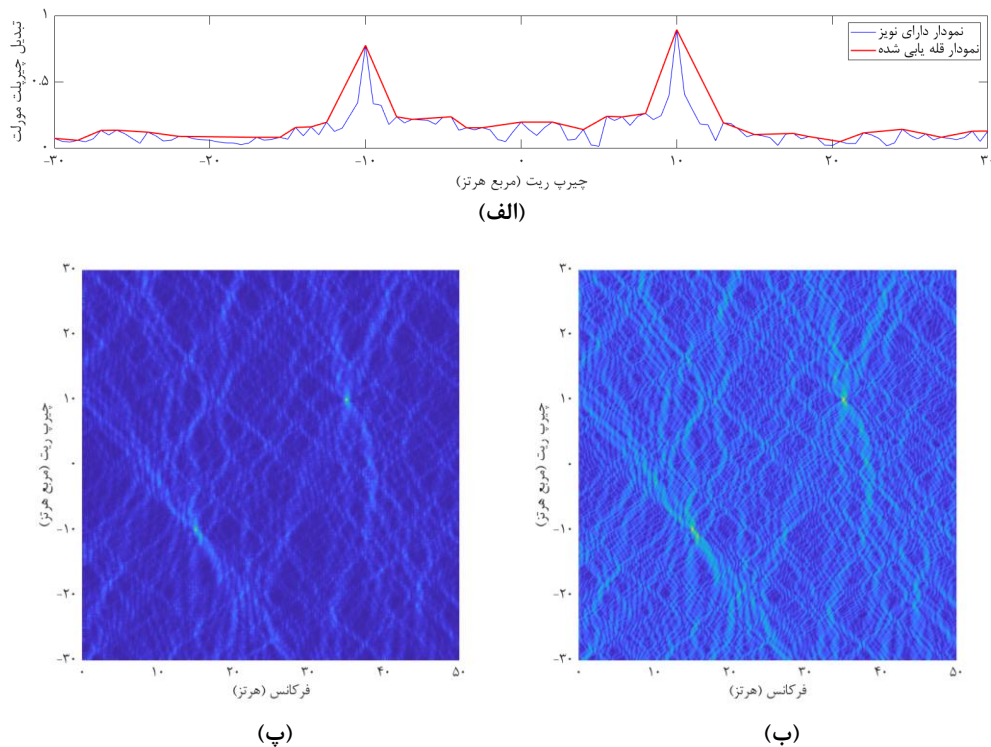
شکل ۱. تبدیل چیرپلت مورلت سیگنال دو جزئی در یک لحظه از زمان

۲-۲ قله‌یابی صفحات فرکانس - چیرپ ریت

حضور نویز در سیگنال و غیرخطی بودن تغییرات زمانی فرکانس در برخی سیگنالها باعث می‌شود علاوه بر قله‌های اصلی تعداد زیادی قله فرعی نیز در صفحه فرکانس - چیرپ ریت ظاهر گردد. در راستای حل این مشکل در هر دو راستای فرکانس و چیرپ ریت بیشینه‌های محلی انتخاب شده و مقادیر مربوط به دیگر نقاط از طریق میانبایی خطی بین قله‌های محلی برورسانی می‌گردند. نمودار

^۹ Complex Shifted Morlet Wavelet (CSMW)

قرمز رنگ شکل ۲ - الف این بروزرسانی را پس از یک مرحله فرآیند قله‌یابی (در جهت چیرپ ریت) و شکل‌های ۲ - ب و ۲ - پ تاثیر قله‌یابی بر نمودارهای فرکانس - چیرپ ریت را بنمایش می‌گذارد.



شکل ۲. تبدیل چیرپ ریت مورلت و نمایش سه بعدی آن (نسبت سیگنال به نویز ۱۰- دسی بل)

الف (قله‌یابی در جهت چیرپ ریت ب) صفحه فرکانس - چیرپ ریت قبل از قله‌یابی ب) صفحه فرکانس - چیرپ ریت پس از قله‌یابی

۲-۳ استخراج قله‌ها

در راستای استخراج محل دقیق قله‌ها در صفحات فرکانس - چیرپ ریت روابط ۳ و ۴ را داریم:

$$\text{Real} \left\{ \frac{\frac{\partial MCT(t, f_c, \beta)}{\partial f_c}}{MCT(t, f_c, \beta)} \right\} = \frac{-\pi f_b^2 (2\pi f_c - \dot{\phi}(t))}{f_b^4 + \frac{1}{4}(2\pi\beta - \ddot{\phi}(t))^2} = \frac{AA' + BB'}{A^2 + B^2} \quad (3)$$

و

$$\text{Imaginary} \left\{ \frac{1}{\frac{\partial}{\partial f_c} \left\{ \frac{\frac{\partial MCT(t, f_c, \beta)}{\partial f_c}}{MCT(t, f_c, \beta)} \right\}} \right\} = \frac{2\pi\beta - \ddot{\phi}(t)}{-4\pi^2} = \frac{2A'B' (AA'' - BB'' - A'^2 + B'^2) - (A'^2 - B'^2) (A''B + AB'' - 2A'B')}{(AA'' - BB'' - A'^2 + B'^2)^2 + (A''B + AB'' - 2A'B')^2} \quad (4)$$

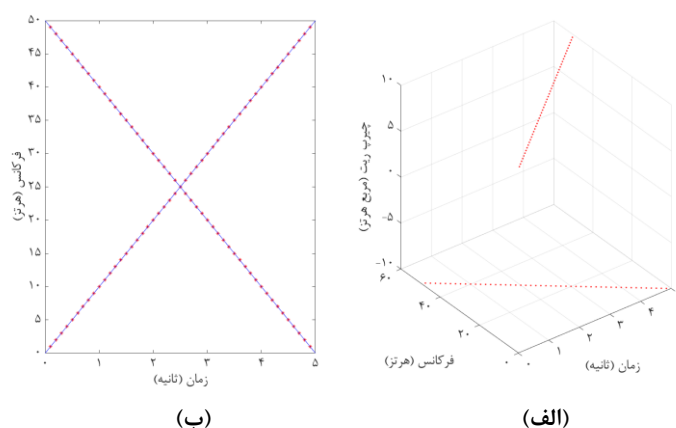
در این روابط A برابر جز حقیقی و B برابر جزء موهومی تبدیل چیرپلٹ مورلت هستند نمایه‌های ' و " به ترتیب نمایانگر مشتق اول و دوم نسبت به f_c هستند. در هر نقطه از تبدیل که طرف راست روابط ۳ و ۴ نزدیکتر به صفر باشند، $2\pi f_c$ به $\dot{\phi}(t)$ ، $2\pi\beta$ به $\ddot{\phi}(t)$ و به تبع آن نقطه مربوطه به محل تمرکز انرژی (قله صفحه فرکانس - چیرپ ریت) نزدیکتر خواهد بود. به منظور استخراج نقاط مذکور پارامترهای استخراج τ_ω و τ_β و توابع H_ω و H_β بصورت زیر تعریف می‌شوند و نامساوی‌های مربوطه شرط استخراج نقاط بعنوان قله خواهند بود:

$$H_\omega(t, f_c, \beta) = \frac{\exp(|AA' + BB'|)}{\exp(|A^2 + B^2|)} < \tau_\omega \quad (5)$$

9

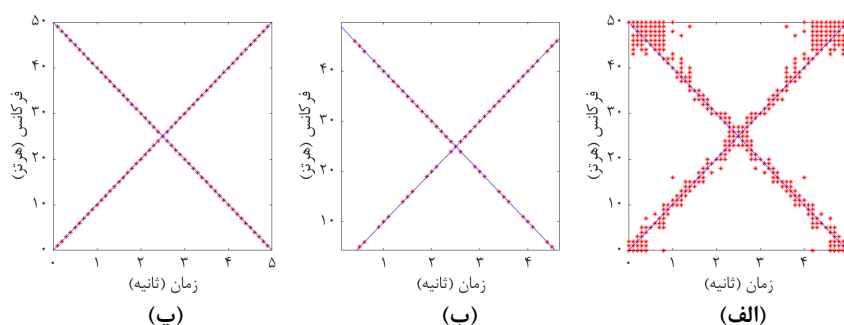
$$H_\beta(t, f_c, \beta) = \frac{\exp\left(\left|2A'B'(AA'' - BB'' - A'^2 + B'^2) - (A'^2 - B'^2)(A''B + AB'' - 2A'B')\right|\right)}{\exp\left(\left|(AA'' - BB'' - A'^2 + B'^2)^2 + (A''B + AB'' - 2A'B')^2\right|\right)} < \tau_\beta \quad (6)$$

نهایتاً با در دست داشتن مختصات مربوط به نقاط استخراج شده از صفحات فرکانس - چیرپ ریت (نقاطی از فضای زمان - فرکانس - چیرپ ریت که مقدار آن غیر صفر است) مطابق شکل ۳ محل این نقاط در فضای زمان - فرکانس - چیرپ ریت انتخاب می‌گردد:



شکل ۳. نقاط استخراج شده فضای زمان - فرکانس - چیرپ ریت و مقایسه با آنالیز ایده‌آل (منحنی آبی)

در روند استخراج دو پارامتر τ_ω و τ_β بعنوان آستانه‌های استخراج تاثیر بسزایی در دقت نقاط استخراج شده خواهند داشت. شکل ۴ تاثیر این پارامترهای بر نقاط استخراج شده را نمایش می‌دهد:



شکل ۴. استخراج تحت پارامترهای آستانه مختلف

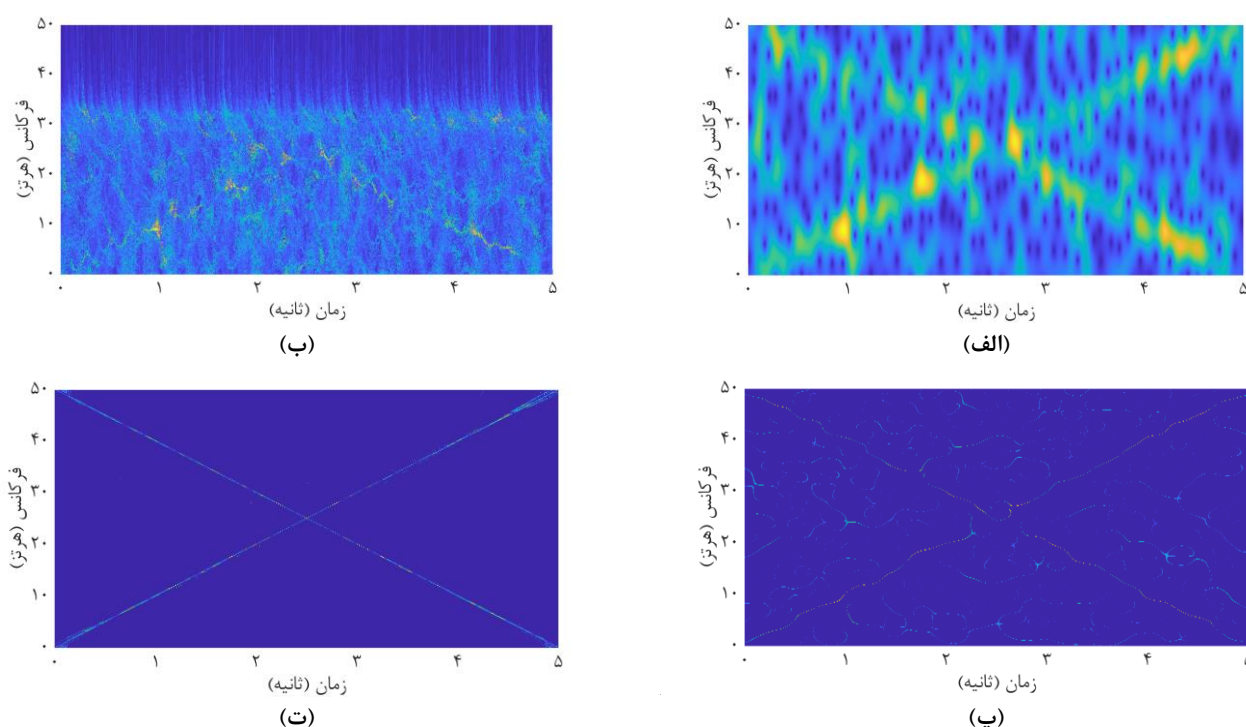
الف) $\tau_\omega = 0.9999$ و $\tau_\beta = 1/1$ ب) $\tau_\omega = 0.98$ و $\tau_\beta = 0.9994$ پ) $\tau_\omega = 0.99$ و $\tau_\beta = 1$

ملاحظه می‌شود با کاهش مقادیر مربوط به آستانه‌ها (سختگیری شرایط استخراج) دقت نقاط استخراج شده بالا رفته اما تعداد زیادی از نقاط حذف می‌شوند. نهایتاً با اجرای یک فرآیند بهینه‌سازی بر روی مقادیر مربوط به آستانه‌ها کمترین خطای ممکن در محلیابی فرکانس لحظه‌ای اجزای سیگنال حاصل می‌شود.

۳- پردازش سیگنالها

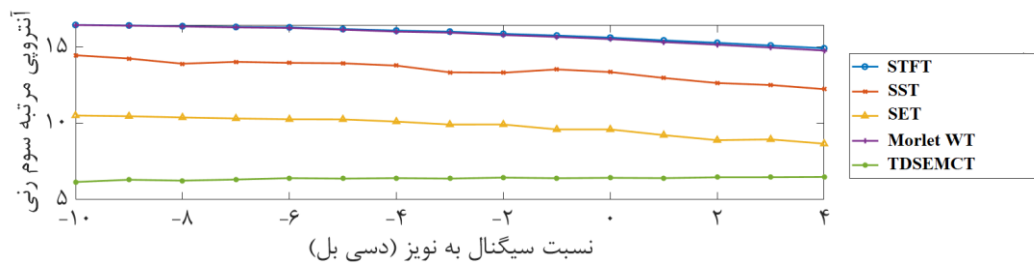
۳-۱ سیگنال شبیه‌سازی شده

سیگنال $x(t) = e^{j(2\pi)5t^2} + e^{j(2\pi)(-5t^2+50t)}$ که دارای تغییرات خطی فرکانس اجزا در برابر زمان هستند، در طول مدت صفر تا ۵ ثانیه و با فرکانس داده‌برداری ۱۰۰۰ هرتز مد نظر قرار می‌گیرد. شکل ۵ منحنی‌های زمان - فرکانسی ایده‌آل این سیگنالها و نتایج حاصل از روشهای متداول آنالیز زمان - فرکانسی و روش پیشنهاد شده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.



شکل ۵. آنالیز زمان فرکانسی سیگنال با تغییرات خطی فرکانس مولفه‌ها (نسبت سیگنال به نویز ۱۰- دسی بل)
الف) فوریه زمان کوتاه ب) فشرده‌سازی همزمان پ) استخراج همزمان ت) چیرپلت مورلت استخراج شده همزمان سه‌بعدی

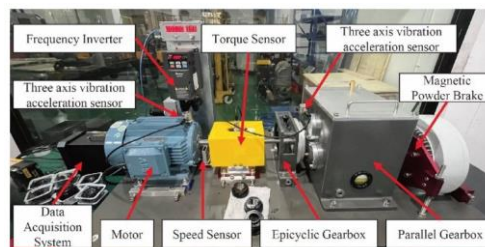
ملاحظه می‌شود تبدیل ارائه شده بر خلاف دیگر آنالیزهای زمان - فرکانسی علاوه بر مقاومت قابل قبول در برابر نویز، با توجه به اینکه اقدام به پردازش اجزای سیگنال در بعد سوم (چیرپلت) نیز می‌کند قادر به تفکیک اجزای دارای طیف فرکانسی نزدیک و حتی برابر، عبارتی تقاطع نمودارها در صفحه زمان - فرکانس می‌باشد. ارجحیت روش حاضر بر دیگر روشهای آنالیز زمان - فرکانسی از طریق نمودار آنتروپی رنی مطابق شکل ۶ نیز قابل استنتاج است.



شکل ۶. آنتروپی مرتبه سوم رنی در شدت نویزهای مختلف

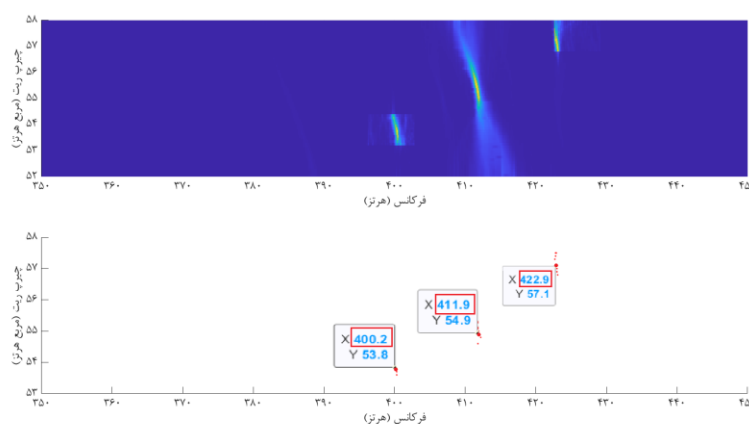
۲-۳ سیگنال گیربکس با چرخنده معیوب

بمنظور بررسی عملکرد روش حاضر از داده‌های مربوط به عیوب مختلف یک گیربکس [۸] استفاده می‌شود. مطابق شکل ۷ این مجموعه شامل یک گیربکس موازی دو مرحله‌ای، موتور سه فاز آسنکرون، ترمز پودر مغناطیسی، سنسور گشتاور و سنسورهای اندازه‌گیری شتاب می‌باشد.

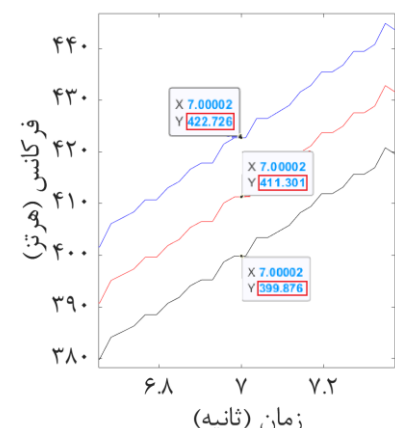


شکل ۷. مجموعه تست گیربکس با چرخنده معیوب [۸]

از بین عیوب ارائه شده در دیتاست شامل افتادگی دندانه، شکستگی دندانه، ترک دندانه، کندگی دندانه و سایش دندانه که هر کدام در سه سطح شدید، متوسط و ضعیف دسته‌بندی شده‌اند، از عیب "سایش دندانه - سطح متوسط" استفاده می‌شود. نظر به اینکه وجود عیب در چرخنده موجب ظهور باندهای فرکانسی جانبی در پیرامون فرکانس درگیری و به فاصله ضرایب صحیح فرکانس دورانی می‌گردد و با توجه به نحوه تغییرات سرعت دورانی، شکل ۸ تغییرات ایده‌آل زمانی فرکانس درگیری و باندهای جانبی ناشی از عیب و فرکانسهای شناسایی شده توسط تبدیل چیرپلت مورلت استخراج شده همزمان سه‌بعدی را نمایش می‌گذارد:



(ب)



(الف)

شکل ۸. فرکانس درگیری چرخنده و باندهای جانبی ناشی از عیب
(الف) فرکانسهای ایده‌آل (ب) چیرپلت مورلت استخراج شده همزمان سه‌بعدی

بمنظور بررسی دقیقتر عملکرد تبدیل حاضر بر روی سیگنال موجود پاسخ فرکانسی در یک لحظه خاص (ثانیه هفتم - پیش از رسیدن سرعت دوران به حد اسمی) مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطابق نتایج حاصله (شکل ۸ - ب) روش حاضر برخلاف دیگر روشهای آنالیز زمان فرکانسی علی‌رغم نویز حاکم بر سیگنال و نزدیکی محتوای فرکانسی اجزا با دقت قابل قبولی نسبت به تفکیک فرکانسها در صفحه فرکانس - چیرپ ریت اقدام کرده و فرکانسهای عیب ساییدگی چرخنده بعنوان ضعیف‌ترین عیب دیتاست موجود را به وضوح مشخص می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

روش حاضر علاوه بر حساسیت کم در برابر سطح نویزهای مختلف، از طریق تحلیل سیگنال در بعدی فراتر از فضای زمان - فرکانس تحت عنوان چیرپ ریت در صورت وجود اختلاف در نرخ تغییرات زمانی فرکانس (چیرپ ریت) اجزا قابلیت این را دارد که سیگنالهایی که اجزای آنها فرکانسهای دارای همپوشانی و حتی در لحظاتی برابر هم داشته باشند (تقاطع در صفحه زمان - فرکانس) را بطور کامل از یکدیگر تفکیک نماید. خواص مذکور در کنار تطابق‌پذیری این روش با شرایط مختلف سیگنالهای غیرایستا از طریق تنظیم پارامترهای مربوط به استخراج و پهنای باند مولت باعث می‌شود این روش در شرایطی که به دلیل سرعت دورانی پایین در شروع به کار تجهیز، پدیده همپوشانی فرکانسی و غلبه هارمونیکهای فرکانس درگیری بر فرکانسهای جانبی ناشی از عیب رخ می‌دهد عملکرد بهتری نسبت به دیگر روشهای آنالیز زمان فرکانسی داشته باشد.

مراجع

1. Yi C, Qin Y, Huang T, Yan X, "Time-frequency representation of adjacent multi-component signals driven by IVKF-MPRTF and its application for mechanical equipment fault diagnosis", *Structural Health Monitoring*, (2024).
2. Karkafi, Fadi, et al, "Enhanced diagnostics empowered by improved mechanical vibration component extraction in nonstationary regimes", *PHM Society European Conference*. Vol. 8. No. 1. (2024).
3. Li, Zhen, et al. "Time-synchroextracting general chirplet transform for seismic time-frequency analysis." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 58.12, 8626-8636 (2020).
4. Zhu, Xiangxiang, Zhuosheng Zhang, and Jinghuai Gao, "Three-dimension extracting transform", *Signal Processing* 179 - 107830 (2021).
5. Zhou, Yixin, Zepeng Ma, and Lei Fu, "A review of key signal processing techniques for structural health monitoring: Highlighting non-parametric time-frequency analysis, adaptive decomposition, and deconvolution." *Algorithms* 18.6 - 318 (2025).
6. Sao, K., & Chilukuri, M. V. "Joint time-frequency analysis of time-varying signals for condition monitoring", *AIP Conference Proceedings*, 2681(1) – 020045 (2024).
7. Zhao, Dezun, and Long Ge, "Three-dimension extracting scaling chirplet transform", *Measurement Science and Technology* 36.6 - 066109 (2025).
8. Chen, Shijin, et al. "Multi-mode fault diagnosis datasets of gearbox under variable working conditions." *Data in brief* 54 - 110453 (2024).