

## حذف نویز از سیگنال‌های ارتعاشی ماشین‌های دوار به کمک تبدیل $S$ مبتنی بر پنجره‌ی کایزر

محمدابراهیم وزیری سرشک<sup>ا</sup>، حمید سعیدی سورک<sup>ب</sup>، مصطفی شاه نظری<sup>پ</sup>

ایران، یزد، صفائیه، بلوار دانشگاه، دانشگاه یزد، دانشکده‌ی مهندسی برق، کدپستی: ۸۹۱۵۸۱۸۴۱۱، دانشجوی دکتری

ایران، یزد، صفائیه، بلوار دانشگاه، دانشگاه یزد، دانشکده‌ی مهندسی برق، کدپستی: ۸۹۱۵۸۱۸۴۱۱، دانشیار

ایران، یزد، صفائیه، بلوار دانشگاه، دانشگاه یزد، دانشکده‌ی مهندسی برق، کدپستی: ۸۹۱۵۸۱۸۴۱۱، استادیار

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [saeedi@yazd.ac.ir](mailto:saeedi@yazd.ac.ir)

### چکیده

در این مقاله، روشی بر پایه‌ی تبدیل  $S$  مبتنی بر پنجره‌ی کایزر و آستانه‌گذاری نرم جهت حذف نویز سیگنال‌های ارتعاشی گرفته شده از ماشین‌های دوار ارائه شده است. تبدیل  $S$  مبتنی بر پنجره‌ی کایزر، روشی است که در آن، سیگنال، در گذر زمان، توسط پنجره‌ی متغیر کایزر، پنجره‌گذاری می‌گردد و سپس از حاصل، تبدیل فوری گرفته می‌شود. به این ترتیب، تبدیل سه بعدی  $S$  شامل سه بعد زمان، فرکانس و مقادیر تبدیل به دست می‌آید. پس از گرفتن تبدیل  $S$  از سیگنال، روش آستانه‌گذاری نرم جهت بی‌نویزسازی، بر تبدیل  $S$  اعمال می‌شود و نهایتاً سیگنال بی‌نویز شده با گرفتن عکس تبدیل، حاصل می‌گردد. همان طور که ذکر شد، محاسبه‌ی معکوس تبدیل  $S$  مبتنی بر پنجره‌ی کایزر جهت انجام عملیات بی‌نویزسازی سیگنال ضروری می‌باشد. شیوه‌ی محاسبه‌ی معکوس تبدیل مذکور، در پژوهش‌های پیشین مورد بررسی قرار نگرفته است؛ لذا یکی از محورهای این مقاله، محاسبه‌ی این معکوس می‌باشد. برای ارزیابی روش حذف نویز پیشنهادی، از همین روش به منظور حذف نویز سیگنال یاتاقان ماشین دوار و سپس عیب‌یابی یاتاقان استفاده شده است. در واقع، برای عیب‌یابی یاتاقان، دو شاخص کشیدگی و طیف پوش سیگنال بی‌نویز شده یاتاقان، به ترتیب جهت تشخیص حضور عیب و شناسایی نوع عیب، مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج نشان می‌دهند که روش پیشنهادی، به گونه‌ای نویز را حذف می‌کند که ضربه‌های موجود در سیگنال واضح‌تر شده و مقدار کشیدگی برای چنین حالتی افزایش می‌یابد که نشانگر حضور عیب است. همچنین با مشاهده‌ی فرکانس‌های مشخصه‌ی ظاهر شده در طیف پوش سیگنال بی‌نویز شده، می‌توان نوع عیب را به دقت تشخیص داد.

**کلمات کلیدی:** بی‌نویزسازی؛ تبدیل  $S$  مبتنی بر پنجره‌ی کایزر؛ تحلیل طیف پوش؛ عیب‌یابی.

ماشین‌های دوار از جمله متداول‌ترین و کاربردی‌ترین ادوات در صنعت به حساب می‌آیند. این تجهیزات شامل اجزای مکانیکی مانند یاتاقان‌ها، چرخ‌دنده‌ها و شفت‌ها می‌باشند که وقوع عیب و خرابی در اجزای مذکور می‌تواند باعث از کار افتادگی کل مجموعه‌ی ماشین دوار گردد. بنابراین، تشخیص سریع عیب<sup>۱</sup> در اجزای مورد اشاره، یکی از مباحث ضروری و مورد علاقه‌ی پژوهشگران می‌باشد. پی بردن به حضور و نوع عیب بر مبنای تحلیل دادگان ارتعاشی<sup>۲</sup> یکی از روش‌های مرسوم جهت پایش وضعیت ماشین‌های دوار است [۱]. برخی از ویژگی‌های کلیدی سیگنال در حوزه‌ی زمان و نیز در حوزه‌ی فرکانس می‌توانند در زمینه‌ی تشخیص حضور عیب و نیز نوع آن، کمک‌کننده باشند. یک ویژگی حوزه‌ی زمان، شاخص آماری کشیدگی<sup>۳</sup> است که در تشخیص حضور عیب در یاتاقان ماشین دوار می‌تواند مؤثر واقع شود. این شاخص برای یک ماشین با یاتاقان‌های سالم در حوالی عدد ۳ می‌باشد و در صورتی که عیبی در یاتاقان‌ها وجود داشته باشد؛ شاخص مذکور برای آن، بزرگتر از عدد ۳ خواهد شد. علت بزرگتر شدن شاخص از عدد ۳، حضور ضربه‌هایی در سیگنال استخراج شده از یاتاقان در هنگام حضور عیب می‌باشد. طیف پوش<sup>۴</sup> سیگنال‌های ارتعاشی، یک ویژگی و شاخص مربوط به حوزه‌ی فرکانس است که می‌تواند در تشخیص نوع عیب مورد استفاده قرار گیرد [۲].

مجموعه دادگان ارتعاشی، عمدتاً آغشته به نویزهایی با منابع تولید نامعلوم هستند. در حضور نویز، تشخیص شرایط فعلی حاکم بر ماشین دوار، مشکل است؛ چرا که شاخص‌های زمانی و فرکانسی، آغشته به نویز هستند و نمی‌توانند نماینده‌ی خوبی برای توصیف وضعیت ماشین باشند. به همین دلیل، فرآیند حذف نویز جهت دستیابی به سیگنال‌های ارتعاشی تمیزتر و استفاده از سیگنال تمیزتر به منظور پی بردن به شرایط حاکم بر ماشین لازم است.

تبدیل  $S$  یکی از روش‌های تحلیل سیگنال‌ها و حذف نویز از آنها می‌باشد. کاربرد تبدیل  $S$  در زمینه‌ی حذف نویز در حوزه‌های مختلفی به چشم می‌خورد که برخی از آنها در ادامه اشاره می‌گردد. هائو هوانگ و همکاران<sup>۵</sup>، از تبدیل  $S$  متعامد گسسته<sup>۶</sup> برای بی‌نویزسازی و فشرده‌سازی تصاویر پزشکی بهره بردند [۳]. آدیتی باجاج و سانجی کومار<sup>۷</sup>، از روشی قدرتمند بر مبنای تبدیل  $S$  کسری<sup>۸</sup> جهت نویززدایی از سیگنال‌های الکتروکاردیوگرام<sup>۹</sup> که در پیش‌بینی بیماری‌های زمینه‌ای قلبی، کاربردی است؛ استفاده کردند [۴]. استفانو پارولای<sup>۱۰</sup>، در زمینه‌ی بی‌نویزسازی لرزه‌نگارها، از تبدیل  $S$  بهره گرفت [۵]. جیلیانگ پی و جیانچون پنگ<sup>۱۱</sup>، از تبدیل  $S$  اصلاح شده برای نویززدایی از سیگنال‌های اغتشاشات کیفیت توان<sup>۱۲</sup> استفاده کردند [۶]. شودنگ ونگ و همکاران<sup>۱۳</sup>، از طریق نویززدایی به کمک تبدیل  $S$  تعمیم یافته با دقت چندگانه<sup>۱۴</sup>، توانستند به محل دقیق تخلیه‌ی جزئی<sup>۱۵</sup> در پست‌های شبکه‌ی قدرت پی ببرند [۷].

<sup>1</sup> Early fault detection

<sup>2</sup> Vibration data based

<sup>3</sup> Kurtosis

<sup>4</sup> Envelope Spectrum

<sup>5</sup> Hau Huang et al

<sup>6</sup> Discrete Orthonormal S-Transform

<sup>7</sup> Aditi Bajaj & Sanjay Kumar

<sup>8</sup> Fractional S-Transform

<sup>9</sup> Electrocardiogram

<sup>10</sup> Stefano Parolai

<sup>11</sup> Jiliang Yi & Jianchun Peng

<sup>12</sup> Power Quality disturbances

<sup>13</sup> Shudong Wang et al

<sup>14</sup> Multi-Resolution Generalized S-Transform

<sup>15</sup> Partial Discharge

برای حذف نویز از سیگنال‌ها، روش‌های زمان-فرکانس دیگری نیز وجود دارند که از آن جمله می‌توان به تبدیل موجک پیوسته (CWT)<sup>۱</sup> [۸]، تبدیل بسته موجک (WPT)<sup>۲</sup> [۹] و تبدیل فوریه‌ی زمان-کوتاه (STFT)<sup>۳</sup> [۱۰] اشاره کرد. بعلاوه روش تبدیل موجک تجربی (EWT)<sup>۴</sup> توسط نظامیوند و همکاران به منظور حذف نویز سیگنال‌های ارتعاشی یک ماشین دوار پیشنهاد شده است [۱۱].

در این مقاله، برای اولین بار از تبدیل  $S$  مبتنی بر پنجره‌ی کایزر<sup>۵</sup> برای بی‌نویزسازی سیگنال‌های ارتعاشی گرفته شده از یاتاقان‌های یک ماشین دوار استفاده شده است. برای این منظور ابتدا هر سیگنال ارتعاشی به کمک تبدیل، به حوزه‌ی زمان-فرکانس منتقل می‌شود. سپس به کمک آستانه‌گذاری نرم، نویززدایی انجام شده و در نهایت تبدیل بی‌نویز شده به حوزه‌ی زمان بازگردانده می‌شود. بازگشت سیگنال به حوزه‌ی زمان در گرو محاسبه‌ی معکوس تبدیل می‌باشد. یکی از رویکردهای مقاله‌ی پیش رو، به دست آوردن معکوس تبدیل است که مقالات پیشین این مورد را بررسی نکرده اند. برای تشخیص حضور عیب در سیگنال ارتعاشی از شاخص کشیدگی و جهت شناسایی نوع عیب از شاخص طیف پوش سیگنال بی‌نویز شده استفاده شده است.

دیگر بخش‌های مقاله‌ی حاضر، بدین صورت سامان یافته اند: در بخش دوم، تئوری تبدیل  $S$  مبتنی بر پنجره‌ی کایزر، تشریح و در بخش سوم، روش بی‌نویزسازی پیشنهادی ارائه گردیده است. مجموعه دادگان مورد بررسی در این مقاله، در بخش چهارم معرفی شده اند. نتایج کاربردی روش بی‌نویزسازی پیشنهادی برای تعیین عیوب رینگ‌های داخلی و خارجی یاتاقان در بخش پنجم مورد بررسی قرار گرفته اند و در نهایت مقاله، در بخش ششم نتیجه‌گیری شده است.

## ۲- تبدیل $S$ مبتنی بر پنجره‌ی کایزر (KST)

### ۱-۲ KST در حالت پیوسته

تبدیل KST برای یک سیگنال حقیقی و دلخواه  $x(t)$  در حالت پیوسته عبارت است از [۱۲]:

$$KST(t, \Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) w_k(t - \tau, \Omega) e^{-j\Omega\tau} d\tau, \quad (1)$$

که در آن  $t$  زمان پیوسته،  $\Omega$  فرکانس زاویه‌ای پیوسته و  $w_k(t, \Omega)$  پنجره‌ی کایزر<sup>۶</sup> است. همچنین  $\tau$  متغیری است که عملیات انتگرال‌گیری نسبت به آن انجام می‌گیرد. پنجره‌ی کایزر  $w_k(t, \Omega)$  به صورت [۱۲]:

$$w_k(t, \Omega) = \frac{I_0\left(\alpha(\Omega) \sqrt{1 - \left(\frac{t}{T}\right)^2}\right)}{I_0(\alpha(\Omega))}, \quad |t| \leq T, \quad (2)$$

است که  $I_0(\cdot)$  تابع بسل مرتبه‌ی صفر نوع اول<sup>۷</sup>،  $\alpha(\Omega)$  تابع کنترلی پنجره‌ی کایزر و  $T$  نصف طول زمانی پنجره‌ی کایزر است. همچنین  $\alpha(\Omega)$  می‌تواند به صورت [۱۲]:

$$\alpha(\Omega) = \frac{\eta_1}{\eta_2 + \frac{\Omega}{2\pi}}, \quad (3)$$

<sup>1</sup> Continuous Wavelet Transform

<sup>2</sup> Wavelet Packet Transform

<sup>3</sup> Short-Time Fourier Transform

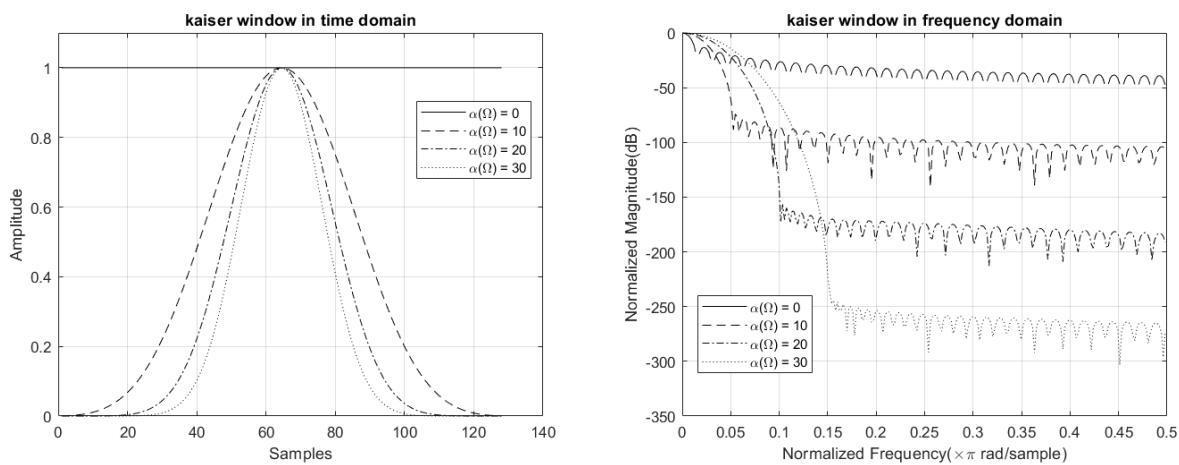
<sup>4</sup> Empirical Wavelet Transform

<sup>5</sup> Kaiser window-based S-Transform (KST)

<sup>6</sup> Kaiser window

<sup>7</sup> Zeroth-order Bessel function

نوشته شود که در آن  $\eta_1$  و  $\eta_2$  دو ثابت برای تنظیم تابع کنترلی پنجره‌ی کایزر هستند. در معادله‌ی (۳)، با تغییر  $\Omega$ ، تغییر خواهد کرد و این تغییر با توجه به معادله‌ی (۲) موجب تغییر شکل پنجره‌ی کایزر و به عبارت بهتر تغییر پهنای زمانی و فرکانسی آن می‌شود. این در حالی است که در  $STFT$ ، پهنای زمانی و فرکانسی پنجره با تغییر فرکانس، ثابت است. شکل (۱) پنجره‌ی کایزر را به ازای مقادیر مختلفی از  $\alpha(\Omega) = \{0, 10, 20, 30\}$  یعنی  $\alpha(\Omega)$  در حوزه‌ی زمان و فرکانس به نمایش می‌گذارد. همان طور که از شکل (۱) مشخص است، به ازای  $\alpha(\Omega) = 0$  پنجره‌ی کایزر همان پنجره‌ی مستطیلی است و پنجره‌ی مستطیلی، بهترین رزولوشن فرکانسی را دارد. با افزایش مقدار  $\alpha(\Omega)$  مدام پهنای زمانی پنجره کمتر و پهنای فرکانسی آن زیادتر می‌شود. به این معنا که از رزولوشن فرکانسی کاسته شده و به رزولوشن زمانی افزوده می‌شود. ویژگی مهمی که در مورد پنجره‌ی کایزر باید به آن توجه داشت، ویژگی تمرکز انرژی بهینه‌ی ذاتی آن به ازای مقادیر بزرگ  $\alpha(\Omega)$  است که موجب رزولوشن زمانی بهتر پنجره‌ی کایزر نسبت به سایر پنجره‌ها می‌شود. با توجه به معادله‌ی (۳) هر چه فرکانس افزایش یابد، مقدار  $\alpha(\Omega)$  کمتر شده و  $KST$  از رزولوشن زمانی بهتر در فرکانس‌های پایین به سمت رزولوشن فرکانسی بهتر در فرکانس‌های بالا میل می‌کند.



شکل ۱. پنجره‌ی کایزر به ازای مقادیر مختلف  $\alpha(\Omega) = \{0, 10, 20, 30\}$  در حوزه‌ی زمان و فرکانس.

## ۲-۲ معکوس $KST$ در حالت پیوسته

با الهام گرفتن از روش به دست آوردن معکوس  $STFT$  می‌توان به معکوس  $KST$  نیز دست یافت. در گام اول، با گرفتن معکوس تبدیل فوریه از معادله‌ی (۱)، معادله‌ی (۴) حاصل می‌گردد:

$$x(\tau) w_k(t - \tau, \Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} KST(t, \Omega) e^{j\Omega\tau} d\Omega. \quad (4)$$

حال، در معادله‌ی (۴) متغیر  $\tau$  برابر با  $t$  قرار داده می‌شود:

$$x(t) w_k(0, \Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} KST(t, \Omega) e^{j\Omega t} d\Omega. \quad (5)$$

همان طور که از معادله‌ی (۲) مشخص است، با قرار دادن  $t = 0$  در آن،  $w_k(0, \Omega)$  برابر با ۱ خواهد شد. لذا با توجه به رابطه‌ی (۵)، رابطه‌ی مربوط به معکوس  $KST$  در حالت پیوسته مطابق معادله‌ی (۶) است:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} KST(t, \Omega) e^{j\Omega t} d\Omega. \quad (6)$$

### ۳-۲ KST در حالت گسسته

برای گسسته‌سازی  $KST$  بایستی معادله‌ی (۱) در حالت گسسته بیان شود. در معادله‌ی مورد اشاره، ابتدا زمان و سپس فرکانس، گسسته می‌شوند. گسسته‌سازی زمان، مفهوم نمونه‌برداری از سیگنال پیوسته را در درون خود دارد. لذا باید متغیر  $t$  به متغیر  $nT_s$  تبدیل شود که در آن  $n$  شمارنده‌ی زمان و  $T_s$  زمان نمونه‌برداری است. با انجام عملیات نمونه‌برداری، تبدیل فوریه‌ی سیگنال با تناوب  $2\pi$  تکرار می‌شود. همچنین با گسسته‌سازی زمان، انتگرال به سیگما تبدیل می‌گردد. لذا، می‌توان معادله‌ی (۱) را به معادله‌ی (۷) تبدیل کرد که  $KST$  در حالت زمان-گسسته را به نمایش می‌گذارد:

$$KST(n, \omega) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} x(m) w_k(n-m, \omega) e^{-j\omega m}, \quad (7)$$

که  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای زمان-گسسته و  $m$  متغیر مربوط به سیگما است. حال متغیر  $\omega$  که بازه‌ی صفر تا  $2\pi$  را پوشش می‌دهد؛ گسسته می‌شود. برای انجام این کار، متغیر  $\omega$  به متغیر  $2\pi k/N_{df}$  تبدیل می‌شود که در آن  $k$  شمارنده‌ی فرکانس و  $N_{df}$  تعداد نقاط تبدیل فوریه‌ی گسسته می‌باشد. بنابراین، می‌توان معادله‌ی (۷) را به صورت معادله‌ی (۸) بازنویسی کرد که نماینده‌ی  $KST$  در حالت گسسته است:

$$KST(n, k) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} x(m) w_k(n-m, k) e^{-j\frac{2\pi}{N_{df}}km}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N_{df} - 1. \quad (8)$$

برای پیاده‌سازی  $KST$  می‌توان مستقیماً از معادله‌ی (۸) استفاده کرد یا اینکه جهت تسریع و تسهیل امر پیاده‌سازی، از روش‌های دیگری بهره گرفت. به عنوان مثال، با توجه به تعریف کانولوشن، می‌توان معادله‌ی (۸) را به شکل معادله‌ی (۹) نوشت و آن را به منظور پیاده‌سازی، مورد استفاده قرار داد:

$$KST(n, k) = \left( x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N_{df}}kn} \right) * w_k(n, k), \quad (9)$$

که  $*$  نماد کانولوشن است. در راستای بیان روشی دیگر جهت پیاده‌سازی  $KST$ ، می‌توان از دو طرف رابطه‌ی (۹) نسبت به متغیر  $n$  تبدیل فوریه‌ی گسسته گرفت؛ یعنی [۱۲]:

$$\psi(\zeta, k) = X\left(\zeta + \frac{2\pi}{N_{df}}k\right) W_k(\zeta, k), \quad (10)$$

که در آن  $\zeta$  فرکانس زاویه‌ای گسسته‌ی متناظر با متغیر  $n$ ،  $\psi(\zeta, k)$  تبدیل فوریه‌ی  $KST(n, k)$ ،  $X(\zeta)$  تبدیل فوریه‌ی سیگنال  $x(n)$  و  $W_k(\zeta, k)$  تبدیل فوریه‌ی پنجره‌ی  $w_k(n, k)$  است. طبق معادله‌ی (۱۰)، می‌توان به ازای یک مقدار خاص از  $k$ ، تبدیل فوریه‌ی  $KST$  را به دست آورد و در نهایت طبق معادله‌ی (۱۱) از حاصل، معکوس تبدیل فوریه گرفت و به مقادیر  $KST$  به ازای آن مقدار خاص از  $k$  و مقادیر مختلف  $n$  رسید:

$$KST(n, k) = F^{-1}\{\psi(\zeta, k)\}, \quad (11)$$

که  $F^{-1}\{\cdot\}$  به عنوان نمادی برای گرفتن معکوس تبدیل فوریه است. اگر برای تمام مقادیر  $k$  این عمل انجام گیرد؛ ماتریس  $KST$  قابل حصول می‌باشد. فرآیند پیاده‌سازی  $KST$  به کمک تبدیل فوریه، می‌تواند با استفاده از روش‌های سریع ماتریسی نیز انجام شود. [۱۲]

در پیاده‌سازی  $KST$  به روش کانولوشن، زمان شبیه‌سازی نسبت به روش تبدیل فوریه، زیادتر است ولی نتیجه‌ی حاصل از آن دقیق‌تر می‌باشد. به عبارت بهتر، در روش تبدیل فوریه، درون صفحه‌ی زمان-فرکانس یک سری اجزای اضافی گمراه‌کننده ایجاد می‌شود که تشخیص رخداد‌های زمانی و فرکانسی را اندکی مشکل می‌سازد. لذا، در این پژوهش از روش کانولوشن برای پیاده‌سازی  $KST$  استفاده شده است.

۴-۲ معکوس  $KST$  در حالت گسسته

به منظور گسسته‌سازی معکوس  $KST$  باید معادله‌ی (۶) در حالت گسسته نوشته شود. مشابه قسمت قبل، در این قسمت نیز ابتدا زمان و سپس فرکانس گسسته می‌شوند. با گسسته‌سازی زمان یا به عبارت بهتر نمونه‌برداری از سیگنال، معادله‌ی (۶) به صورت معادله‌ی (۱۲) قابل باز نویسی است که در آن با توجه به تناوب  $2\pi$  تبدیل فوریه، بازه‌ی انتگرال از صفر تا  $2\pi$  خواهد بود:

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} KST(n, \omega) e^{j\omega n} d\omega. \quad (12)$$

حال، فرکانس موجود در معادله‌ی (۱۲)، گسسته می‌شود. باید توجه داشت که ثابت  $2\pi$  در حالت گسسته- زمان معادل با  $N_{df}$  در عملیات گسسته‌سازی فرکانس است. با گسسته‌سازی فرکانس، در رابطه‌ی (۱۲)، معادله‌ی (۱۳) حاصل می‌گردد که بیانگر معکوس  $KST$  در حالت گسسته است و معادله‌ی مورد اشاره به راحتی قابل پیاده‌سازی می‌باشد:

$$x(n) = \frac{1}{N_{df}} \sum_{k=0}^{N_{df}-1} KST(n, k) e^{j \frac{2\pi-k}{N_{df}} n}. \quad (13)$$

۳- روش نویززدایی با استفاده از  $KST$ 

از آنجا که حضور نویز درون یک سیگنال موجب می‌شود که ویژگی‌های مستخرج از سیگنال نویزی، اطلاعات کافی را در مورد یک رخداد درون سیگنال، به دست ندهند؛ نویززدایی حائز اهمیت است. با توجه به اینکه  $KST$  معکوس‌پذیر بوده و بنابر قضیه‌ی پارسوال<sup>۱</sup>، بخش نویزی سیگنال در تمام صفحه‌ی زمان- فرکانس پخش شده و دامنه‌ی آن کاهش پیدا می‌کند؛ می‌توان از  $KST$  جهت بی‌نویزسازی سیگنال استفاده کرد. در این راستا بایستی ابتدا سیگنال آغشته به نویز به کمک  $KST$  به حوزه‌ی زمان- فرکانس منتقل شود. سپس با اعمال یک آستانه‌گذاری، بخش نویزی سیگنال تا حد خوبی کاهش داده شود. در نهایت معکوس  $KST$  مورد استفاده قرار گیرد تا سیگنال با نویز کمتر در حوزه‌ی زمان حاصل گردد.

سیگنال گسسته‌ی آغشته به نویز  $x_{noisy}(n)$  را می‌توان به شکل جمع برداری سیگنال گسسته‌ی بدون نویز  $x(n)$  و نویز گسسته شده‌ی  $v(n)$  مطابق رابطه‌ی (۱۴):

$$x_{noisy}(n) = x(n) + v(n), \quad (14)$$

نمایش داد که در آن، هر سه سیگنال  $x_{noisy}(n)$ ،  $x(n)$  و  $v(n)$ ، دارای طول یکسان  $N_{signal}$  هستند. از دو طرف معادله‌ی (۱۴)،  $KST$  گرفته می‌شود و معادله‌ی (۱۵) به دست می‌آید:

$$KST_{noisy}(n, k) = KST(n, k) + KST_{noise}(n, k), \quad (15)$$

که  $KST_{noisy}(n, k)$ ،  $KST(n, k)$  و  $KST_{noise}(n, k)$  به ترتیب  $KST$  سیگنال‌های  $x_{noisy}(n)$ ،  $x(n)$  و  $v(n)$  می‌باشند. با توجه به اینکه نویز سوار بر سیگنال، از نوع گوسی سفید فرض می‌شود، بنابر قضیه‌ی پارسوال،  $KST_{noise}(n, k)$  در تمام صفحه‌ی زمان- فرکانس پخش شده و دامنه‌ی آن نسبت به دامنه‌ی  $KST(n, k)$  بسیار کمتر خواهد شد. در این حالت می‌توان با آستانه‌گذاری<sup>۲</sup> روی دامنه‌ی  $KST_{noisy}(n, k)$  حجم زیادی از نویز را حذف و سیگنال نویزی را تمیزتر کرد. منظور از آستانه‌گذاری، این است که یک مقدار آستانه، مد نظر قرار گیرد و مقادیر دامنه‌های کمتر از آن آستانه، صفر شده (یا به عبارتی نویز، حذف شده) و مقادیر دامنه‌های

<sup>1</sup> Parseval's theorem

<sup>2</sup> Thresholding

بزرگتر از آن یا مساوی با آن حفظ شوند. آستانه‌گذاری می‌تواند به دو صورت آستانه‌گذاری نرم<sup>۱</sup> و آستانه‌گذاری سخت<sup>۲</sup> انجام گیرد ولی از آنجا که آستانه‌گذاری نرم، نویززدایی بهتری نسبت به آستانه‌گذاری سخت دارد؛ در این پژوهش نیز از آستانه‌گذاری نرم، جهت حذف نویز استفاده می‌شود و رابطه‌ی حاکم بر آن، به صورت [۳]:

$$KST_{denoised}(n, k) = \begin{cases} 0 & ; \quad abs(KST_{noisy}(n, k)) < \lambda \\ \frac{abs(KST_{noisy}(n, k)) - \lambda}{abs(KST_{noisy}(n, k))} \times KST_{noisy}(n, k) & ; \quad otherwise \end{cases}, \quad (16)$$

است که در آن  $KST_{denoised}(n, k)$  نماینده‌ی  $KST$  گسسته‌ی سیگنال بی‌نویز شده،  $KST_{noisy}(n, k)$  بیانگر  $KST$  گسسته‌ی سیگنال دارای نویز و  $\lambda$  سطح آستانه‌ی اعمالی جهت حذف نویز است.

به علاوه، سطح آستانه‌ی  $\lambda$  را می‌توان از طریق معادله‌ی (۱۷) تعیین کرد [۳]:

$$\lambda = \sigma^2 \sqrt{2 \times \ln(N_{signal})}, \quad (17)$$

که  $\sigma^2$  واریانس نویز و  $\ln(\cdot)$  تابع لگاریتم طبیعی است. شایان ذکر است واریانس نویز از طریق گرفتن میانگین از نمونه‌های  $KST_{noisy}(n, k)$  در قسمتی از آن که تنها نویز وجود دارد (مثلاً انتهای باند)؛ تخمین زده می‌شود.

#### ۴ - مجموعه داده‌های ارتعاشی

مجموعه داده‌گان مورد استفاده در مقاله‌ی حاضر، از وب سایت  $CWRU$ <sup>۳</sup> گرفته شده است [۱۳]. این مجموعه داده‌ها همان سیگنال‌های اندازه‌گیری شده توسط شتاب‌سنج‌هایی است که به واسطه‌ی پایه‌های مغناطیسی به محفظه‌ی یک موتور القایی ۲ اسب بخار متصل شده‌اند. فرکانس نمونه‌برداری این شتاب‌سنج‌ها ۱۲ کیلوهرتز بوده است. ضمناً مجموعه‌ی موتور شامل یک مدار الکتریکی جهت کنترل سرعت موتور القایی می‌باشد تا بتوان داده‌ها را در سرعت‌های ۱۷۹۷ و ۱۷۳۰ دور بر دقیقه جمع‌آوری کرد. عیوب ایجاد شده در رینگ‌های داخلی و خارجی یاتاقان‌های ماشین، با روش‌های ماشین‌کاری الکتریکی ایجاد شده‌اند. این عیوب‌ها در عمق ۰/۰۱۱ اینچ و با دو قطر ۰/۰۰۷ و ۰/۰۲۱ اینچ در رینگ‌های داخلی و خارجی یاتاقان‌ها تعبیه شده‌اند. در تعیین نوع عیب به کمک طیف پوش، ظهور فرکانس‌های مشخصه‌ی عیب در رینگ‌های داخلی و خارجی کمک‌کننده خواهد بود. فرکانس مشخصه‌ی عیب در رینگ خارجی و داخلی به ترتیب در معادلات (۱۸) و (۱۹) آمده‌اند [۱۴]:

$$BPFO = \frac{n_b}{2} f_r \left( 1 - \frac{d}{D} \cos(\alpha) \right), \quad (18)$$

$$BPFI = \frac{n_b}{2} f_r \left( 1 + \frac{d}{D} \cos(\alpha) \right), \quad (19)$$

که  $D$  قطر گام (میلی‌متر)،  $d$  قطر ساچمه (میلی‌متر)،  $n_b$  تعداد المان غلتشی،  $\alpha$  زاویه‌ی تماس (رادیان) و  $f_r$  سرعت موتور (هرتز) است. مشخصات سیگنال‌های مورد استفاده در این مقاله شامل نوع عیب، اندازه‌ی عیب، سرعت چرخش موتور، فرکانس مشخصه‌ی عیب و انحراف معیار نویز اضافه شده به هر سیگنال در جدول (۱) آمده‌اند. لازم به ذکر است که سیگنال گرفته شده از سایت، به خودی خود نویزی می‌باشد ولی برای نشان دادن قدرت روش نویززدایی پیشنهادی، نویز بیشتری به سیگنال افزوده شده است.

<sup>1</sup> Soft thresholding

<sup>2</sup> Hard thresholding

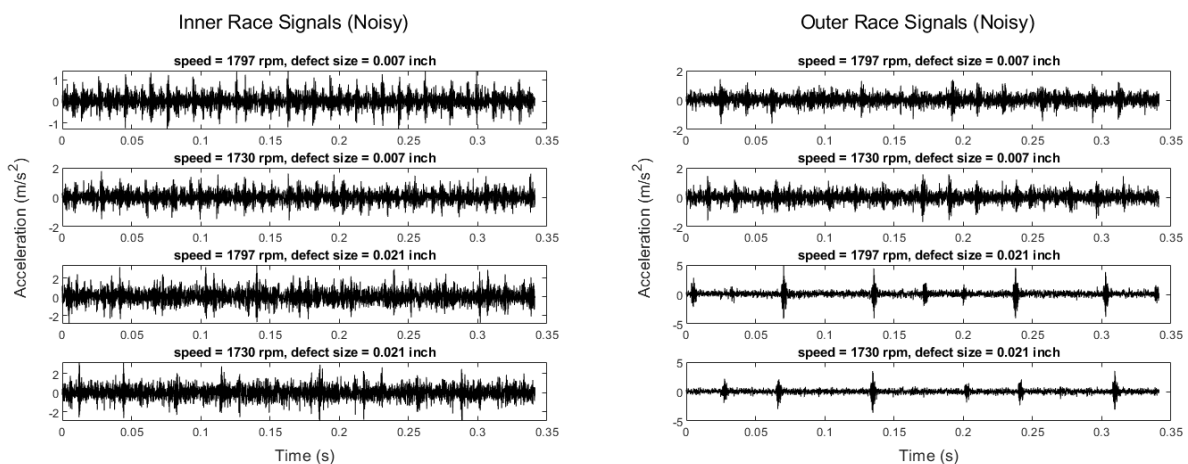
<sup>3</sup> Case Western Reserve University

جدول ۱. مشخصات سیگنال‌های مورد استفاده

نوع عیب	اندازه‌ی عیب (اینچ)	سرعت چرخش موتور (دور بر دقیقه)	فرکانس مشخصه‌ی عیب (هرتز)	انحراف معیار نویز اضافه شده به سیگنال
رینگ داخلی	۰/۰۰۷	۱۷۹۷	۱۶۲/۱۸	۰/۱۵
		۱۷۳۰	۱۵۶/۱۳	۰/۲۵
	۰/۰۲۱	۱۷۹۷	۱۶۲/۱۸	۰/۵
		۱۷۳۰	۱۵۶/۱۳	۰/۵
رینگ خارجی	۰/۰۰۷	۱۷۹۷	۱۰۷/۳۶	۰/۲۵
		۱۷۳۰	۱۰۳/۳۶	۰/۲۵
	۰/۰۲۱	۱۷۹۷	۱۰۷/۳۶	۰/۳
		۱۷۳۰	۱۰۳/۳۶	۰/۲۵

## ۵- نتایج

سیگنال‌های نویزی مربوط به رینگ داخلی و خارجی معیوب با اندازه‌ی عیب‌های ۰/۰۰۷ و ۰/۰۲۱ اینچ در دو سرعت ۱۷۹۷ و ۱۷۳۰ دور بر دقیقه در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. در جدول (۲)، مقادیر شاخص کشیدگی سیگنال‌های دارای نویز و بی‌نویز شده توسط روش *KST* برای رینگ‌های داخلی و خارجی معیوب ارائه گردیده‌اند. همان‌طور که از جدول (۲) قابل مشاهده است، مقادیر شاخص کشیدگی برای سیگنال بی‌نویز شده بسیار بالاتر از همین مقادیر برای سیگنال دارای نویز می‌باشد که این مورد به خوبی حضور عیب در سیگنال‌ها را هشدار می‌دهد. سیگنال‌های بی‌نویز شده‌ی مربوط به رینگ داخلی و خارجی معیوب در شکل (۳) به نمایش گذاشته شده‌اند. با توجه به شکل مذکور، پس از نویزدایی، تنها ضربه‌های موجود در سیگنال، باقی‌مانده و موجب افزایش شاخص کشیدگی می‌شوند. طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده برای رینگ‌های داخلی و خارجی در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. در این طیف‌های پوش، در محل فرکانس مشخصه‌ی عیب، دو برابر آن، سه برابر آن و ... پیک‌هایی دیده می‌شود که با خط‌چین مشخص شده‌اند. این فرکانس‌ها نوع عیب یا تاقان را به وضوح مشخص می‌کنند. نتایج روش پیشنهادی در این پژوهش با نتایج موجود در مرجع [۱۱] از لحاظ شاخص‌های کشیدگی و طیف پوش قابل مقایسه بوده و در هر دو مطالعه این موارد، به خوبی نشانگر حضور و نوع عیب می‌باشند.

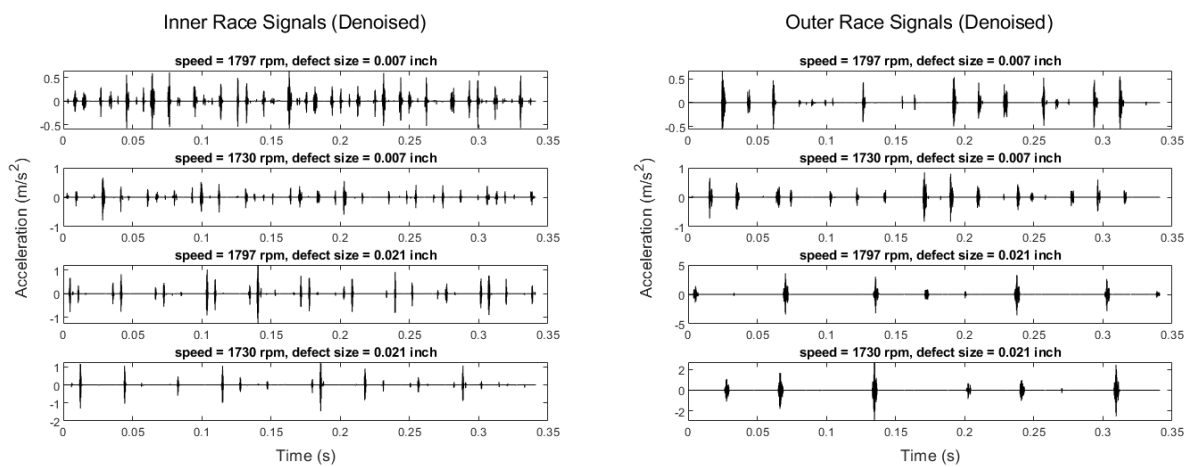


شکل ۲. سیگنال‌های دارای نویز مربوط به رینگ داخلی و خارجی معیوب

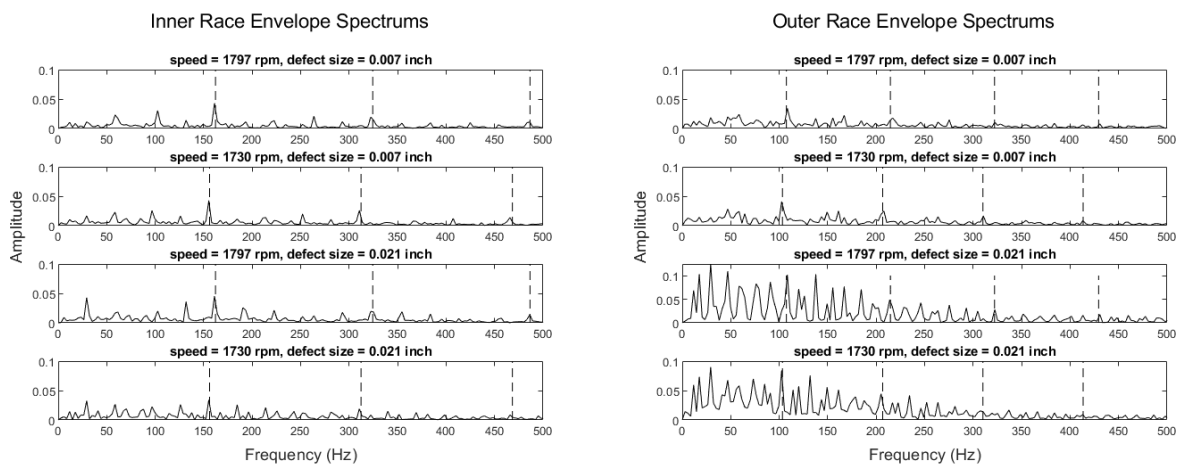


جدول ۲. مقادیر شاخص کشیدگی سیگنال‌های دارای نویز و بی‌نویز شده مربوط به رینگ‌های داخلی و خارجی معیوب

نوع عیب	اندازه‌ی عیب (اینچ)	سرعت چرخش موتور (دور بر دقیقه)	شاخص کشیدگی برای سیگنال دارای نویز	شاخص کشیدگی برای سیگنال بی‌نویز شده
رینگ داخلی	۰/۰۰۷	۱۷۹۷	۴/۵۰۸۰	۲۶/۳۴۵۷
		۱۷۳۰	۳/۸۹۱۷	۴۲/۸۵۴۰
	۰/۰۲۱	۱۷۹۷	۳/۸۹۱۸	۴۷/۹۲۸۴
		۱۷۳۰	۴/۱۶۴۲	۸۰/۵۶۳۹
رینگ خارجی	۰/۰۰۷	۱۷۹۷	۴/۱۲۵۰	۴۴/۹۶۰۲
		۱۷۳۰	۴/۲۷۳۴	۵۰/۰۵۹۲
	۰/۰۲۱	۱۷۹۷	۱۸/۲۲۱۷	۷۹/۳۸۰۷
		۱۷۳۰	۱۵/۴۹۵۰	۸۵/۶۱۲۷



شکل ۳. سیگنال‌های بی‌نویز شده‌ی مربوط به رینگ داخلی و خارجی معیوب



شکل ۴. طیف پوش سیگنال‌های بی‌نویز شده‌ی مربوط به رینگ داخلی و خارجی معیوب

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی برای حذف نویز سیگنال‌های ارتعاشی گرفته شده از یاتاقان‌های یک ماشین القایی ارائه شده است. نحوه‌ی انجام کار به این صورت است که ابتدا سیگنال ارتعاشی دارای نویز، به کمک تبدیل  $KST$  به فضای زمان-فرکانس منتقل می‌گردد. سپس در آن فضا به واسطه‌ی آستانه‌گذاری نرم، بخش دارای نویز تبدیل، از بین رفته و در نهایت به حوزه‌ی زمان بازگردانده می‌شود تا سیگنال بی‌نویز شده حاصل گردد. روش محاسبه‌ی معکوس تبدیل  $KST$  که از نیازمندی‌های نویززدایی است؛ یکی از رویکردهای این مقاله می‌باشد. در نهایت برای تشخیص حضور و نوع عیب موجود در یاتاقان‌های ماشین، به ترتیب از شاخص‌های کشیدگی و طیف پوش سیگنال بی‌نویز شده استفاده شده است.

## مراجع

1. D. He, X. Wang, S. Li, J. Lin, and M. Zhao, "Identification of multiple faults in rotating machinery based on minimum entropy deconvolution combined with spectral kurtosis", *Mechanical Systems and Signal Processing*, (2016).
2. P. McFadden and J. Smith, "Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique — a review", *Tribology International*, 3-10 (1984).
3. H. Huang, F. Sun, P. Babyn, Z. Zhou, and L. Wang, "Medical Image Denoising and Compressing Using Discrete Orthonormal S-transform", *Proceedings of the 2015 International Conference on Electrical, Computer Engineering and Electronics*, (2015).
4. A. Bajaj and S. Kumar, "A robust approach to denoise ECG signals based on fractional Stockwell transform", *Biomedical Signal Processing and Control*, (2020).
5. S. Parolai, "Denoising of Seismograms Using the S Transform", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 226-234 (2009).
6. J. Yi and J. Peng, "Power quality disturbances denoising using modified S-transform", *2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, (2009).
7. S. Wang, Y. He, B. Yin, W. Zeng, C. Li, and S. Ning, "Multi-Resolution Generalized S-Transform Denoising for Precise Localization of Partial Discharge in Substations", *IEEE Sensors Journal*, 4966-4980 (2021).
8. P. Kankar, S. C. Sharma, and S. Harsha, "Fault diagnosis of ball bearings using continuous wavelet transform", *Applied Soft Computing*, 2300-2312 (2011).
9. Q. Liu, F. Chen, Z. Zhou, and Q. Wei, "Fault Diagnosis of Rolling Bearing Based on Wavelet Package Transform and Ensemble Empirical Mode Decomposition", *Advances in Mechanical Engineering*, (2013).
10. J. Antoni, "Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 108-124 (2007).
11. S. N. Chegini, A. Bagheri, and F. Najafi, "Application of a new EWT-based denoising technique in bearing fault diagnosis", *Measurement*, 275-297 (2019).
12. C. Liang, Z. Teng, J. Li, W. Yao, S. Hu, Y. Yang, Q. He, "A Kaiser Window-Based S-Transform for Time-Frequency Analysis of Power Quality Signals", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 965-975 (2022).
13. Bearing Data Center-Case Western Reserve University. <http://cseggroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/welcome-case-western-reserve-university-bearing-data-center-website>
14. R. Abdelkader, A. Kaddour, and Z. Derouiche, "Enhancement of rolling bearing fault diagnosis based on improvement of empirical mode decomposition denoising method", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 3099-3117 (2018).