



## به کارگیری روشهای زمان - فرکانس، در عیب یابی یاتاقان های غلتشی و بهینه سازی آنها با استفاده از ترکیب روش تصاویر

بهرنگ شرفی<sup>۱\*</sup>، میر سعید صافی زاده<sup>۲</sup>

۱-فارغ التحصیل کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک (ساخت و تولید) دانشگاه علم و صنعت تهران، ایران

۲-دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت تهران، ایران

[\\*behrang.sharafi@gmail.com](mailto:behrang.sharafi@gmail.com)

ارسال: دی ماه ۹۶ پذیرش: بهمن ماه ۹۶

### خلاصه

یکی از قدیمی ترین و موثرترین روش های موجود در بررسی سیگنال ها، روش های زمان - فرکانسی هستند. روش هایی با نام آنالیز فوریه کوتاه مدت (STFT)، توزیع ویگنر-ویل (wigner-ville) و توزیع ویگنر - ویل هموار شده (smoothed wigner-ville)، که هر کدام توانسته اند به گونه ای وضعیت سیگنال ها را نمایان کنند. یکی از مهمترین کاربردهای روش های زمان- فرکانس، تحلیل سیگنال حاصل از وضعیت اجزای ماشین است که سلامت یا عیوب موجود در این اجزا را آشکار می سازد. در این نوشتار سیگنال حاصل از یک یاتاقان غلتشی معیوب را دریافت نموده و حوزه فرکانسی عیوب آن را، که به عمد در یاتاقان ایجاد شده، محاسبه نموده ایم و با استفاده از نرم افزار MATLAB؛ سیگنال دریافتی را با توزیع های ذکر شده تحلیل کرده و مقایسه نموده ایم. تصاویر مدولاسیون دامنه فرکانس عیوب یاتاقان را ایجاد نموده و با روش ترکیب تصاویر؛ آنها را به گونه ای با هم ترکیب کرده ایم که خروجی بسیار مناسب تری را از نظر عدم وجود نویز و پارازیت های مزاحم، نسبت به نتایج حاصل از روش های زمان- فرکانس ذکر شده، دارد. در نهایت کوشش کرده ایم که با استفاده از روش های آماری و مقایسه ای؛ بهینه بودن نتایج بررسی انجام شده را از نظر کمی نیز نشان دهیم.

واژه های کلیدی: عیب یابی یاتاقان، آنالیز سیگنال، توزیع ویگنر - ویل، توزیع ویگنر - ویل هموار شده، تبدیل فوریه کوتاه مدت، آمیزش تصاویر.

### ۱. مقدمه

یاتاقان های غلتشی اجزایی از ماشین آلات هستند که دوران محورها را در وسایل ساده و نیز مکانیزم های پیچیده مهندسی فراهم می آورند. در مقایسه با انواع یاتاقان ها، یاتاقان های غلتشی مزایای بسیاری دارند. از جمله اینکه به دلیل کارکردن در شرایط با اصطکاک کم، برای استفاده در محورهای با سرعت بالا بسیار مناسبند. در ماشین آلات دوار، یاتاقان های غلتشی یکی از بحرانی ترین قطعات هستند. بسیاری از سایدگی ها و خرابی های و توقعات سیستم از یاتاقان های معیوب بر می خیزد. بنابراین فناوری های نوینی مورد نیاز است که بتوانند به گونه ای کارا و موثر وضعیت سلامتی یاتاقان ها را بررسی و تحت نظر بگیرند. این مطلب زمانی ضرورت و اهمیت بیشتری می یابد که توقعات ماشین آلات و هدر رفتن زمان کار ماشین و حتی خطرات جانی برای اپراتور، هزینه های بسیاری را وارد می سازد. از این لحاظ روش مناسب پایش وضعیت یاتاقان های غلتشی برای تخمین سلامتی آنها و اختطار پیش از شکست؛ یک ضرورت محسوب می گردد. در دنیا، روش های فراوانی برای آشکارسازی عیوب یاتاقان های غلتشی وجود دارد که شامل روش های عددی، از جمله تشدید در فرکانس بالا، روش محاسبه شتاب کلی، فاکتور

کرس (crest factor)، فاکتور  $k$  و همچنین روش های تحلیلی برای مانتورینگ و آنالیز سیگنال های حاصل از یاتاقان های معیوب؛ مانند روش طیف مستقیم، آشکارسازی آنولوپ و آنالیز سیگنال ها در حوضه های زمان، حوزه فرکانس و حوزه های زمان-فرکانس، هستند. در ایران نیز (بخصوص در سال های اخیر) تلاش های علمی فراوانی در زمینه عیب یابی یاتاقان های غلتشی صورت گرفته است که تمرکز اکثر آنها بر روش های آنالیز ارتعاشی، روش های آشکارسازی آنولوپ، تبدیل فوریه، روش های انرژی، تحلیل موجک گسسته و شبکه های مصنوعی است. اساساً به کارگیری روش های ذکر شده نیازمند داشتن اشراف بر امر تحلیل سیگنال ها است که کار نسبتاً دشوار و غیرملموسی است که همین امر باعث گردیده اکثر مطالعات انجام شده حول مباحث ذکر شده در کشور، با وجود اینکه تلاش های فراوان و ارزشمندی را در جان خود دارند، نتوانند به خوبی حق امر را ادا کنند. چیزی که ما را بر آن داشت تا تحلیل سخت و غیرملموس سیگنال ها را به حوزه تصاویر بکشانیم، تصویری که هزاران سال است با سکوت عمیق خود بیانگر اقیانوسی از نا گفته های بشری است.

در این مطالعه تمرکز بر روی روش های زمان-فرکانسی است چون با تحلیل سیگنال ها در این حوزه در مقایسه با روش های دیگر مزایای زیر را خواهیم داشت:

۱. می دانیم چه کسری از انرژی در یک رنج زمان-فرکانس معین وجود دارد.
۲. می دانیم سهم فرکانس، در یک زمان مشخص چقدر است.
۳. می توانیم مقادیر کلی و موضعی از تقسیمات، از قبیل فرکانس و گستره زمانی آن را محاسبه کنیم.
۴. ابزار قدرتمندی برای ایجاد سیگنال هایی با خصوصیات مطلوب داریم.
۵. می توانیم سیگنال هایی را ترکیب کنیم که خصوصیات زمان-فرکانسی مطلوب داشته باشد.

## ۲. روش های زمان-فرکانس آنالیز سیگنال

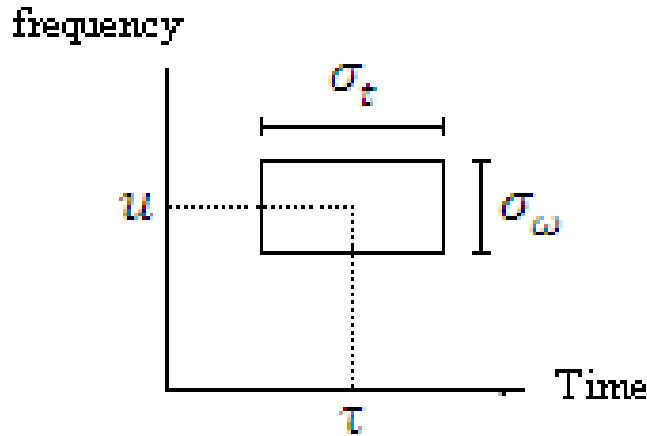
### ▪ آنالیز زمان-فرکانسی فوریه کوتاه مدت (STFT)

تحلیلگران سیگنال، تاکنون سلاح موثر زیادی در اختیار داشته اند. شاید مهم ترین و شناخته شده ترین آنها آنالیز فوریه باشد. یک سیگنال می تواند بوسیله تبدیل فوریه در قلمرو فرکانسی یا در قلمرو زمانی، به صورت جداگانه، نمایش داده شود. در این حالت فرکانسی محض، توابع استفاده شده امواج باهارمونی ضعیفی هستند و کاملاً محدود به فرکانس بوده و هیچ تمرکزی روی زمان ندارند. در حالت نمایش در قلمرو زمانی هم هیچ اطلاعاتی در مورد فرکانس، نشان نمی دهد پس نیازمند حالتی هستیم که زمان و فرکانس را باهم داشته باشیم. با استفاده از معادلات ۱ و ۲ می توانیم سیگنال را در حوزه زمان-فرکانس، بیان کنیم. سیگنال  $f \in L^2(R)$  (یعنی انرژی محدود) با تبدیل فوریه  $F$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$\tau = \frac{1}{\|f\|^2} \int_{-\infty}^{+\infty} t |f(t)|^2 dt \quad \text{و} \quad u = \frac{1}{2\pi\|F\|^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega |F(\omega)|^2 d\omega \quad (1)$$

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{\|f\|^2} \int_{-\infty}^{+\infty} (t - \tau)^2 |f(t)|^2 dt \quad \text{و} \quad \sigma_\omega^2 = \frac{1}{2\pi\|F\|^2} \int_{-\infty}^{+\infty} (\omega - u)^2 |F(\omega)|^2 d\omega \quad (2)$$

در معادلات بالا  $\|F\|$  فرم دهنده  $L^2$  و  $u, \tau$  مرکز موضع سیگنال  $f$  در طرح زمان-فرکانس هستند. موضع  $f$  در طرح زمان-فرکانس، بوسیله یک مستطیل به مرکز  $(\tau, u)$  نمایش داده می شود که عرض آن  $\sigma_\omega$  و طول آن  $\sigma_t$  است [۱]. می توانیم این مستطیل را به صورت شکل شماره (۱) نشان دهیم.



شکل ۱- طرح زمان- فرکانس که به صورت تقریبی از موقعیت یک سیگنال، در قلمرو زمان - فرکانس سیگنال نشان داده شده است [۱].

اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، نامعادله ای شماره ۳ است که در زیر آمده است و فقط برای سیگنالهای گوسی تعریف می شود [۱]. این اصل، رابطه رزلوشن<sup>۱</sup> در زمان و فرکانس را از هر نمایش خطی سیگنال، محدود می کند و حجم فرکانسی در یک زمان مشخص، فقط می تواند با دقت محدود شناخته شود:

$$\sigma_t^2 \times \sigma_\omega^2 \geq \frac{1}{4} \quad (3)$$

آنالیز فوریه یک اشکال اساسی دارد. در تبدیل به قلمرو فرکانسی اطلاعات زمانی از بین می رود. وقتی به تبدیل فوریه از یک سیگنال نگاه می کنیم غیر ممکن است که بتوانیم بگوییم چه زمانی یک اتفاق ویژه صورت گرفته است. فقط در صورتی که خصوصیات سیگنال، زمان زیادی تغییر نکند، که سیگنال ساکن نام دارد، این اشکال زیاد مهم نیست. در حالت کلی سیگنال ها؛ شامل عدم سکون یا ویژگی های زود گذر بسیار زیادی هستند؛ مانند توده شدن<sup>۲</sup>، تمایل ها<sup>۳</sup>، تغییرات ناگهانی<sup>۴</sup> و شروع ها و پایان های وقایع، که این موارد اغلب در تحلیل سیگنال بسیار مهم هستند و آنالیز فوریه برای تعیین آنها مناسب نیست.

برای تصحیح این عیب، تبدیل فوریه را برای آنالیز بخش کوچکی از سیگنال؛ در یک زمان به کار می بریم که تکنیک پنجره سازی<sup>۵</sup> سیگنال نام دارد [۲]. این انطباق، آنالیز فوریه کوتاه مدت گابور یا (STFT) نام گرفت که سیگنال را در یک تابع دو بعدی از زمان و فرکانس ترسیم می کند. و یک میانگین توافقی بین زمان و فرکانس، بر اساس منظر یک سیگنال ارائه می دهد. شکل (۲). این روش، مقداری اطلاعات در مورد زمان و فرکانس؛ در زمان و فرکانس هایی که وقایع سیگنال اتفاق می افتد ارائه می دهد. که دقت لازمه در گرو اندازه پنجره مشخص شده است. زمانی این توافق (آنالیز فوریه کوتاه مدت) بین اطلاعات زمان و فرکانس می تواند مفید باشد که یک اندازه مشخص برای پنجره زمانی، انتخاب کنید و این پنجره برای همه فرکانس ها یکسان باشد. اغلب سیگنال ها به یک شیوه بسیار منعطف نیاز دارند که بتوانیم اندازه پنجره را برای تعیین دقیق بیشتر زمان یا فرکانس تغییر دهیم که این امر تا حدودی دشوار بوده و با وجود تمام روش هایی که برای تعیین این پنجره صورت

<sup>۱</sup> منظور از resolution درجه دقتی است که یک کمیت، اندازه گرفته می شود.

<sup>۲</sup> Drift

<sup>۳</sup> Trends

<sup>۴</sup> Abrupt change

<sup>۵</sup> Windowing

گرفته است، مانند تبدیل موجک<sup>۱</sup> و ... باز هم روش STFT نتوانسته است نمایش مناسب و سالمی را در ارایه سیگنال، با ما نشان دهد.



شکل ۲- تکنیک پنجره سازی سیگنال در آنالیز فوریه کوتاه مدت [۲].

▪ توزیع ویگنر-ویل

این توزیع به صورت زیر بیان می شود [3 - 4]:

$$w(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int s^* \left( t - \frac{1}{2}\tau \right) e^{-jt\omega} s \left( t + \frac{1}{2}\tau \right) d\tau \quad (4)$$

و بر حسب طیفی به صورت زیر است:

$$w(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int s^* \left( t + \frac{1}{2}\theta \right) e^{-jt\theta} s \left( t - \frac{1}{2}\theta \right) d\theta \quad (5)$$

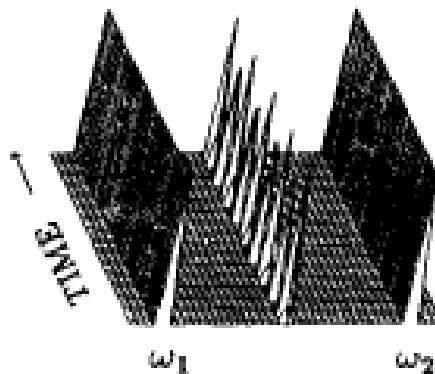
که  $w$  توزیع ویگنر،  $t$  زمان،  $\omega$  فرکانس،  $s$  سیگنال و  $\tau$  مولفه طولی ذکر شده در طرح زمان - فرکانس و  $j$  بردار واحد قائم است. برای اینکه بتوانیم مشکلات موجود در نمایش سیگنال ها را با توزیع ویگنر-ویل نشان دهیم، به ذکر یک مثال می پردازیم. مثال: سیگنالی با معادله زیر در توزیع ویگنر-ویل قرار داده و معادلات و نمودار حاصل را بررسی می کنیم [5].

$$s(t) = A_1 e^{j\omega_1 t} + A_2 e^{j\omega_2 t}. \quad (6)$$

پس توزیع ویگنر-ویل برابر خواهد بود با:

$$w(t, \omega) = A_1^2 \delta(\omega - \omega_1) + A_2^2 \delta(\omega - \omega_2) + 2A_1 A_2 \delta \left[ \omega - \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2) \right] \cos(\omega_2 - \omega_1)t \quad (7)$$

تصویر نمودار ترسیمی سیگنال ذکر شده در شکل شماره (۳) آمده است.



شکل ۳- تصویر نمودار مثال حل شده با توزیع ویگنر-ویل [5].

<sup>۱</sup> Wavelet transform

همانطوری که انتظار می رود، هیچ مقدار صفری در فرکانس  $\frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$  نداریم. این یک توضیح از تاثیر پدیده ای به نام کراس ترم است. نقطه  $\frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$  فقط و فقط نقطه ای است که یک روی هم افتادگی وجود دارد چون سیگنال در نقاط  $\omega_1$  و  $\omega_2$  تیز است. در مجموع، امواج سینوسی همیشه یک مقدار غیر واقعی از توزیع، در نقطه بین راهی و بین هر یک از دو فرکانس ارایه می دهند. پس برای تمامی امواج سینوسی، مقدار غیر واقعی خواهیم داشت که در شرایط غیر واقعی نیز نوسان می کنند. برای یافتن محدوده کراس ترم ها می توانیم معادله ویگنر-ویل را برابر با صفر قرار داده و محدوده فرکانس هایی را مشخص کنیم که در آنها کراس ترم های مزاحم اتفاق می افتد، ولی چیزی که باعث مزاحم خواندن کراس ترم ها شده این است که با وجودی که سیگنال در آنها صفر است [7-6]. ولی در نمایش سیگنال، فرکانس داریم که این خود عیب بزرگی را بر نمایش سیگنال ها با توزیع ویگنر-ویل بیان می دارد. این مشکلات تحلیلگران سیگنال را بر آن داشت تا راه حلی برای رفع نواقص موجود در توزیع ویگنر-ویل ارایه دهند که این راه حل، توزیع ویگنر-ویل هموار شده بود [8-10].

#### توزیع ویگنر-ویل هموار شده

انگیزه اصلی برای هموارسازی<sup>۱</sup> توزیع ویگنر-ویل این است که یک توزیع مثبت ساده حاصل شود. عقیده اصلی هموار سازی توزیع ویگنر، بوسیله یک حلقه مجدداست. معادله توزیع هموار شده به صورت زیر است.

$$w_s(t, \omega) = \int L(t - t', \omega - \omega') w(t', \omega') dt' d\omega' \quad (8)$$

که  $L$  تابع هموارسازی،  $t'$  و  $\omega'$  زمان و فرکانس جدید،  $w$  توزیع ویگنر و  $w_s$  توزیع هموار شده ویگنر است. با انتخاب خوش بینانه از  $L$  یک توزیع جدید با خصوصیات مطلوب تر نسبت به توزیع ویگنر-ویل حاصل می شود که بر ایند بهتری را در نمایش سیگنال و حذف نویزها و پارازیت های موجود در روش ویگنر-ویل، به ما ارایه می دهد. تنها راه برای بدست آوردن یک توزیع مثبت، قربانی کردن یا از دست دادن حاشیه ها است. رایج ترین تابع هموارسازی استفاده شده یک تابع گوسی به صورت زیر است.

$$L(t, \omega) = \frac{1}{\alpha\beta} e^{-t^2|\alpha-\omega^2|\beta} \quad \text{و} \quad \alpha\beta \geq 1 \quad (9)$$

که  $\beta$  و  $\alpha$  ضرایب ثابت و  $\theta$  عدد نپراست [9-10]. هموارسازی، باعث ازدست دادن اطلاعات فازی می گردد. اما درعین حال هموارسازی جزئی می تواند راه مناسبی باشد [11]. یکی از مهمترین مزایای هموارسازی توزیع ویگنر-ویل، کارایی آن در کاهش نویز و پارازیت سیگنال ها است. آنچه مشخص است اینکه نویز، یک بخش افزودنی و غیر قابل اغماض در سیگنال است و اگر تابع نویز را به صورت  $n(t)$  و تابع سیگنال را به صورت  $s(t)$  در نظر بگیریم همواره داریم:

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (10)$$

که  $x(t)$  تابع مجموع آنها است. ترم نویز، ثابت بوده و در بی نهایت هم صفر نخواهد شد. می توانیم تابع  $x(t)$  و  $n(t)$  را بوسیله یک تابع ثابت، به شکل  $v(t)$ ، وزن دهیم که در اینصورت  $y(t) = v(t)x(t) = v(t)[s(t) + n(t)]$  که  $y(t)$  تابع وزن دهی سیگنال و نویز است. توزیع ویگنر-ویل می تواند به صورت یک تابع ترکیبی بر حسب فرکانس، از توزیع  $v(t)$  با توزیع  $s(t) + n(t)$  نوشته شود. پس این توزیع از  $s(t) + n(t)$  می تواند شامل چهار ترم باشد که عبارتند از توزیع سیگنال، توزیع نویز و دو ترم موازی<sup>۲</sup> که بصورت خطی با نویز، قرار گرفته اند. اگر بخواهیم تشبیه مناسبی از آنالیز سیگنال ها با توزیع ویگنر-ویل ارایه دهیم، می توانیم بگوییم که در سخن گفتن، سکوت هایی وجود دارد که اهمیت زیادی دارند اما توزیع

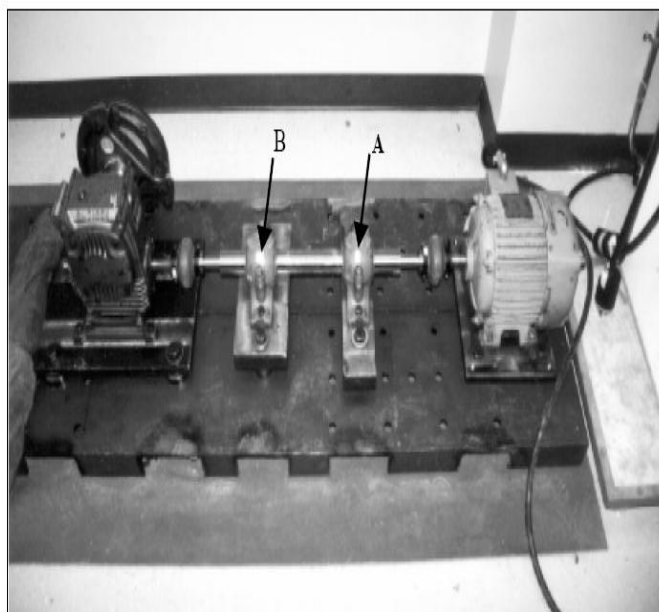
<sup>۱</sup> Smoothing

<sup>۲</sup> Cross term

ویگنر- ویل؛ آنها را پنهان می کند. این مقادیر بدلی می توانند با هموارسازی پاک شوند اما هموار سازی نیز تعدادی از خصوصیات مطلوب دیگر توزیع ویگنر- ویل را از بین می برد [12].

### ۳. یافتن خصوصیات و موقعیت عیب یک یاتاقان معیوب با استفاده از روش زمان- فرکانس

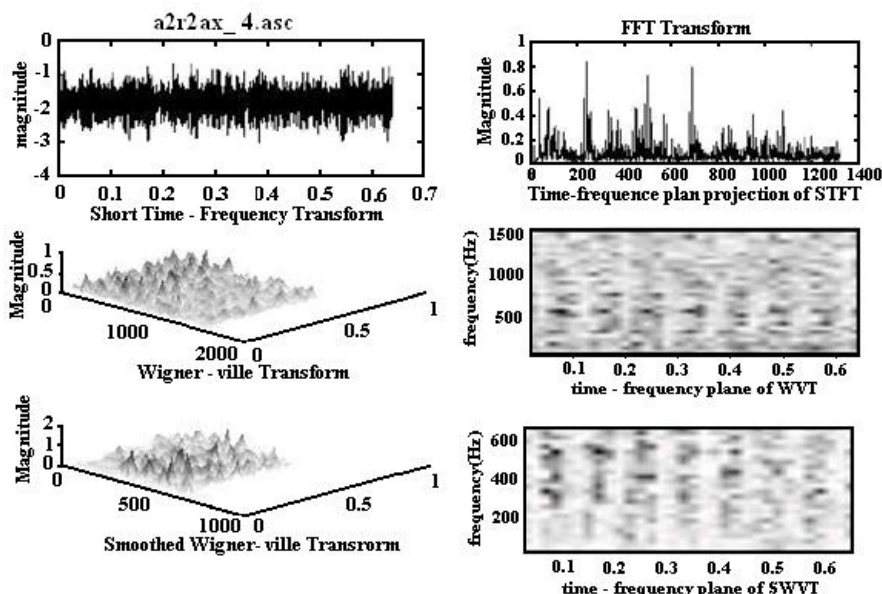
عیوب کوچکی در مسیر شیار داخلی ساچمه های یک یاتاقان غلتشی ایجاد کرده ایم. عیوب به وسیله خراش افتادن در مسیر گردش ساچمه ها بوسیله یک سنبه الکتریکی ایجاد گردیدند. برای گرفتن سیگنال یاتاقان معیوب، از نصب دو عدد یاتاقان بر روی یک شافت، که بر روی یک موتور dc و یک گیر بکس پله ای با نسبت ۱ به ۴۰ سوار شده است، بهره گرفته ایم که به یک سرعت سنج، جهت خواندن سیگنال یاتاقان معیوب، که در اینجا یاتاقان A می باشد، متصل شده است. شرایط را جهت دریافت یک سیگنال سالم چه از نظر محیطی و چه از نظر ساختاری، به گونه ای فراهم کرده ایم که هیچ گونه المان محیطی و ارتعاشی اضافه بر سلامت سیگنال دریافتی تاثیر منفی نگذارد. شکل ۴ مجموعه ایجاد شده برای انجام این تست روی یاتاقان معیوب A را نشان می دهد.



شکل ۴- چگونگی دریافت سیگنال یاتاقان معیوب A

در تحلیل سیگنال دریافتی، باید بدانیم که پالس ها و تحریکات، زمانی به وجود می آیند که المان غلتشی، بر روی عیب حرکت می کند. یاتاقان به این تحریکات، در فرکانس طبیعی سیستم پاسخ می دهد و این پاسخ به خاطر میرایی سیستم دفع می شود. این تحریکات و پاسخ آن هر زمانی که یکی از المانهای غلتشی از روی عیب عبور می کند تکرار می شود و به این ترتیب، فرکانس اصلی پاسخ با فرکانسی که از عبور المانهای غلتشی از روی عیب ایجاد می شود، یکسان است.

شکل (۵) سیگنال اندازه گیری شده روی یاتاقان معیوب را نشان می دهد. قله ها در طیف های سمت چپ نمایان کننده عیوب هستند. سیگنال اندازه گیری شده روی یاتاقان معیوب، همراه با طرح زمان- فرکانسی تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT)، توزیع ویگنر- ویل (WV) و توزیع ویگنر- ویل هموار شده (SWV) را در این شکل نشان داده ایم. در ادامه فرکانس عیب یاتاقان را محاسبه می کنیم، و خواهیم دید که محدوده فرکانسی عیب، به خوبی با نتایج به دست آمده از سیگنال دریافتی برای توزیع های مختلف ذکر شده در شکل ۵ سازگار خواهد بود.



شکل ۵- طیف مربوط به توزیع های تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT)، ویگنر-ویل (WV) و ویگنر-ویل هموار شده (SWV) برای یاتاقان معیوب

#### ۴. محاسبه فرکانس عیب، برای یاتاقان معیوب مورد نظر

از لحاظ تئوری، با توجه به مشخصات هندسی یاتاقان و سرعت دوران شفت می توان فرکانس عیب را تخمین زد. خصوصیات هندسی یاتاقان مورد آزمایش به صورت زیر است:

$$D = 69 \text{ mm} \quad \text{قطر کنس یاتاقان}$$

$$d = 10.32 \text{ mm} \quad \text{قطر ساچمه ها}$$

$$\alpha = 7.87 \quad \text{زاویه تماس به درجه}$$

$$N = 17 \quad \text{تعداد ساچمه ها در هر ردیف}$$

$$Fr = 12.2 \text{ Hz} \quad \text{فرکانس چرخشی یاتاقان}$$

در مسیرونی گردش ساچمه ها فرکانس برخورد عیب برابر است با:

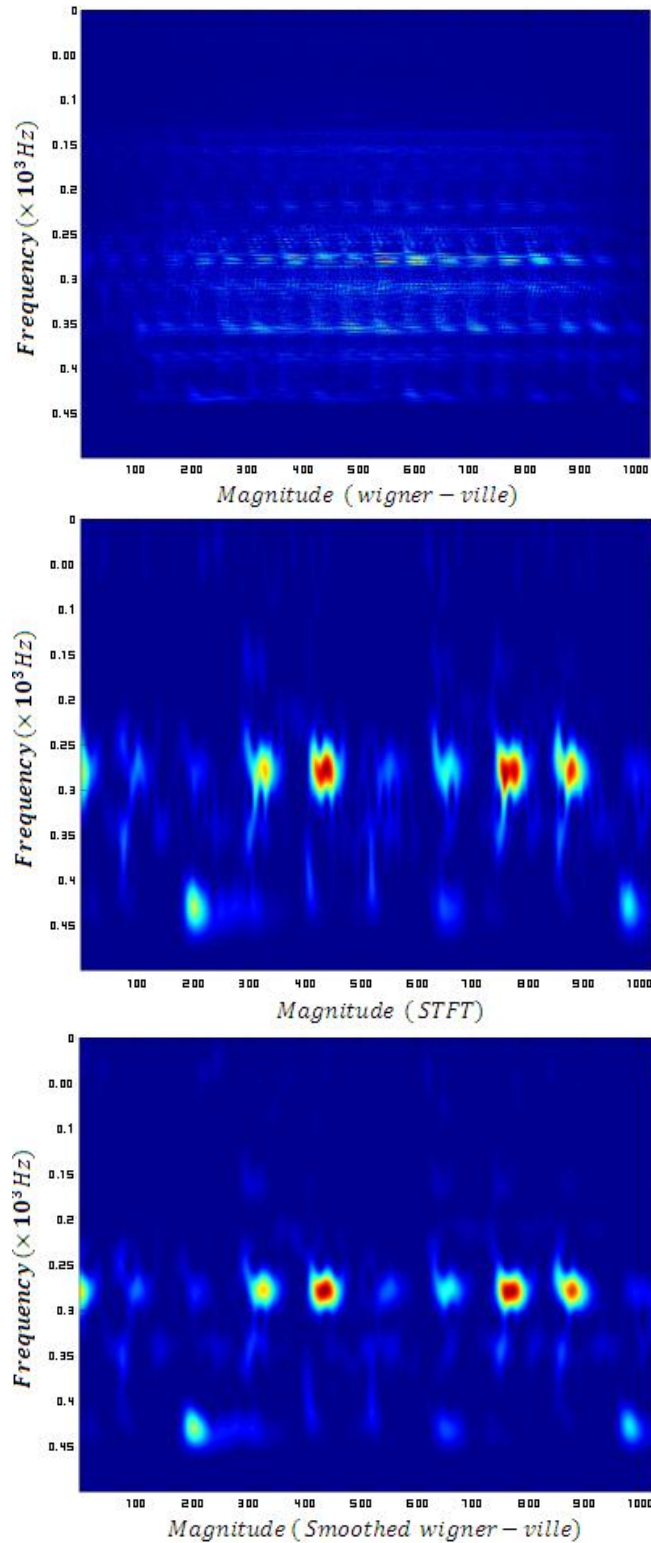
$$F_i = \frac{F_r N}{2} \left[ 1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right] \quad (7)$$

فرکانس عیب برای مقادیر داده شده برابر با ۲۸۳ هرتز بدست می آید. طیف فرکانسی سیگنال آزمایشی نشان داده شده در شکل ۵ نیز قله هایی را در حوالی فرکانس ۲۸۰ هرتز و هارمونیک های آنرا نشان می دهد که بیانگر سلامت سیگنال دریافتی از یاتاقان معیوب A است. عیب یاتاقان، روی شیار داخلی نه تنها فرکانس خاصی (۲۸۳ هرتز) را تحریک می کند بلکه باعث مدولاسیون دامنه در این فرکانس نیز خواهد شد. شکل ۶ تصاویر مدولاسیون دامنه را برای تبدیل های فوریه زمان کوتاه (STFT)، ویگنر-ویل و ویگنر-ویل هموار شده در فرکانس عیب، که توسط جعبه ابزار آنالیز سیگنال در نرم افزار MATLAB حاصل شده است را به خوبی نشان می دهد.

#### ۵. ترکیب و تحلیل داده های تصویری حاصل از سیگنال یاتاقان معیوب

همانطوری که از سه تصویر شکل ۶ بر می آید عیب مربوط به یاتاقان معیوب در هر سه تصویر موجود است ولی آنچه مشخص است این است که در بین روش های زمان فرکانس، روش ویگنر-ویل به علت وجود کراس ترم ها در سیگنال، نمی تواند نمایش مناسبی را از عیب ارائه دهد و این موضوع در آشفتگی قله ها در طیف مربوط به این توزیع در شکل ۵ واضح است. در مورد روش STFT نیز با وضوح بسیار مناسبی برای نمایش عیوب مواجه نیستیم ولی روش ویگنر-ویل هموار شده، سیگنال را تا

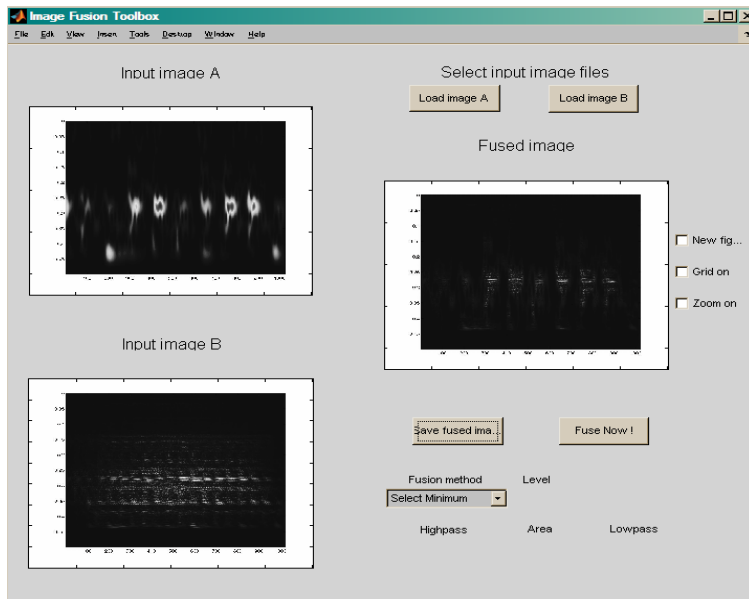
حدودی از هر دو روش دیگر بهتر نشان می دهد و بصورت راحت تری می توانیم نقاط عیوب را نمایان سازیم. طیف مربوط به این توزیع در شکل ۵ دارای قله های مجزاتر و واضح تری است. حال کاری که باید انجام دهیم استفاده از روش آمیزش تصاویر برای ترکیب تصاویر حاصل از توزیع های ذکر شده در شکل ۶، در جهت دستیابی به تصویری واضح تر و بهتر برای نمایش عیوب موجود در یاتاقان است که نه تنها نویز نمایش عیوب را کاهش دهد بلکه عیوب را بصورت مجزا و دقیق تر (با رزولوشن بالاتر) نمایش دهد.



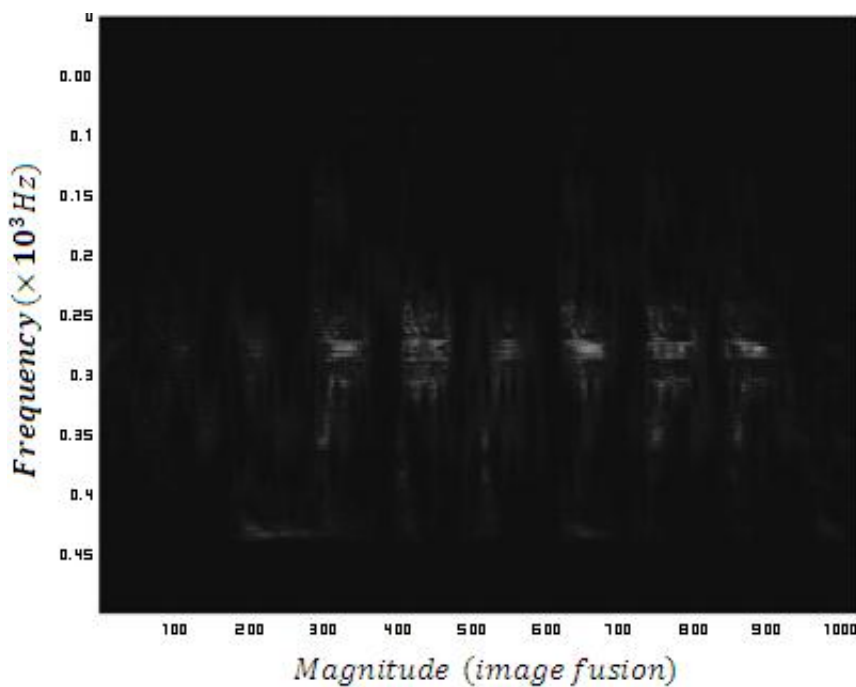
شکل ۶- تصاویر مدولاسیون دامنه برای تبدیل های فوریه زمان کوتاه (STFT)، ویگنر-ویل و ویگنر-ویل هموار شده در فرکانس عیب



از نرم افزار MATLAB image processing ، جعبه ابزار metapix را به عنوان ابزار آمیزش تصویر خود انتخاب کرده ایم چون در میان تمامی روش های آمیزش تصاویر مانند MATIFUS یا روش های برنامه نویسی، بهترین نتیجه را برای مقصد کاری ما نشان می داد و در نهایت به تنظیماتی در پنجره نرم افزاری آن رسیده ایم که بهترین برآیند را در آمیزش تصاویر مدولاسیون دامنه تبدیلات STFT و ویگنر-ویل، که در شکل 6 نشان دادیم، به ما ارایه داد. چون هدف یافتن تصویری است که نتیجه بهتری را نسبت به روش ویگنر-ویل هموار شده در زمینه حذف نویزها و پارازیت ها به ما ارایه دهد. ابتدا تصاویر مربوط به توزیع ویگنر-ویل و STFT را در Metapix فرخوانی می کنیم و با تنظیمات مناسب که در پنجره آمیزشی آن در شکل شماره ۷ نمایان است، آنها را با هم آمیزش می دهیم. نتیجه؛ تصویری بصورت شکل شماره ۸ است که نقاط مربوط به عیوب را در فرمت grayscale بصورت واضح تری نسبت به ویگنر-ویل، STFT و ویگنر-ویل هموار شده و در حدود همان فرکانس ۲۸۳ هرتز نشان می دهد.



شکل ۷- نحوه آمیزش تصاویر در نرم افزار metapix



شکل ۸- تصویر نهایی و بزرگ نمای شده بدست آمده از شکل ۷ در فرمت intensity

## ۶. اثبات بهینه بودن نتیجه بدست آمده

در نرم افزار MATLAB تصاویر به چهار دسته تصاویر دو دویی، تصاویر شدت، تصاویر رنگی و تصاویر شاخص تقسیم بندی می شوند. آنچه از این دسته بندی به کار ما می آید تصاویر شدت (intensity) است که فرمت آنها به صورت خاکستری است و آرایه های ماتریس شدت آن بین صفر و یک می باشند. در این روش یک ماتریس  $m \times n$  به تعداد پیکسل ها تشکیل می گردد که عناصر این ماتریس اعداد یک جعبه رنگ تک بعدی هستند. به عنوان مثال در حالت خاکستری عدد صفر، نشان دهنده رنگ سیاه و عدد یک نشان دهنده رنگ سفید است. اعداد بین صفر و یک تا دقت سه رقم اعشار به شدت رنگ های خاکستری اشاره می کند.

حال برای یافتن معیاری که نشان دهد تا چه حد در حذف نویزها و بهینه سازی ترم های اصلی موفق بوده ایم از دسته تصاویر شدت، استفاده می کنیم. چون آنچه باعث نمایش وضعیت تصاویر حاصل از سیگنال های دریافتی می گردد وضعیت شدت رنگ پیکسل هایی است که ماتریس تصاویر دریافتی را ایجاد کرده اند و چشم انسان از طریق مقایسه وضعیت شدت رنگ تصویر سیگنال، اقدام به آنالیز آن می کند. پس می توانیم با یک مقایسه دقیق از وضعیت شدت رنگ تصاویر حاصل از قرار دادن سیگنال یا تاقان معیوب در توزیع های ذکر شده و تصویر ترکیب شده بدست آمده، میزان بهینه بودن آنها را نسبت به یکدیگر بررسی کرد. هرچند از نظر مشاهده ای نیز تفاوت نتیجه بدست آمده از تصویر ترکیبی، شکل شماره ۸ و تصاویر شکل ۶، در توانایی نمایش عیوب و حذف نویزها و پارازیت های مزاحم آشکار است ولی منطق حکم می کند که با یک مقایسه آماری، میزان بهینه بودن روش ارائه شده را اثبات کنیم.

هدف ما داشتن تصاویر شدت است. باید تصاویر شکل ۶ و تصویر ترکیبی بدست آمده از metapix را به فرمت تصاویر شدت، تبدیل کنیم. یکی از کاربردی ترین روش های ایجاد این فرمت از تصاویر، استفاده از تابع "mat2gray" در بخش image processing نرم افزار MATLAB است که با برنامه ساده زیر برای تک تک تصاویر، اجرا می گردد. تصویر نمایش داده شده در شکل ۸ که تصویر ترکیبی بدست آمده را نشان می دهد، با استفاده از این تابع و با برنامه کوتاهی به صورت زیر، به فرمت شدت درآمده است.

```
>> A=imread('D:\image\wawwet image\select minimum.bmp');
>> B=mat2gray(A);
>> imview(B)
```

با معین نمودن یک حوزه مناسب در منطقه نمایش عیوب، در تصاویر می توانیم به خوبی کیفیت نمایش عیوب را در تمام تصاویر بررسی کرده و با هم مقایسه کنیم. محدوده هایی که در تصاویر، عیب را به بزرگترین پهنا و وسیع ترین حالت نمایش داده اند می توانند معیار مناسبی برای بررسی و مقایسه آماری تصاویر، باشند. هر چه منطقه مشخص شده دارای هندسه مرتب تر، عرض کمتر و مجموع شدت پیکسلی کمتری باشد، بهتر می تواند عیوب و حوزه مربوط به آنها را نشان دهد. مقایسه آماری تصاویر، در جدول شماره یک آورده شده است.

## ۷. تحلیل المان های مقایسه ای تصاویر

### ▪ پهنای منطقه نمایش عیب

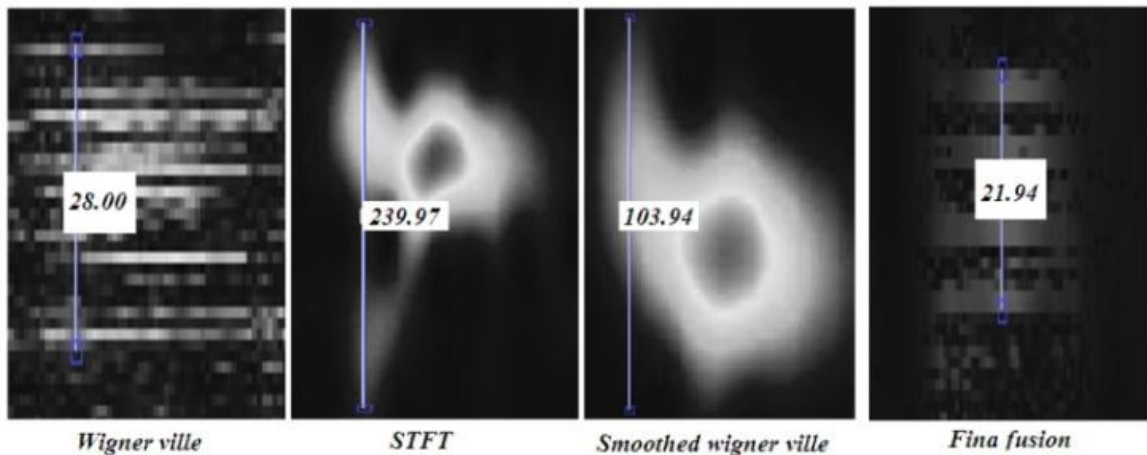
شکل شماره ۹، مناسب ترین محدوده انتخابی برای بررسی آماری تصاویر مورد بحث را نمایش می دهد. همان طوری که از این شکل مشاهده می کنیم، محدوده هایی که در تصاویر، پهنای بزرگ تری از عیب را مشخص می کنند با یکدیگر کاملاً متفاوت است. پهنای بزرگترین منطقه نمایش عیب در STFT، برابر با  $239/97$  پیکسل است که از همه بیشتر بوده ولی در ویگنر- ویل هموار شده به  $103/94$  کاهش یافته است. در ویگنر- ویل برابر با ۲۸ و در تصویر نهایی برابر با  $21/94$  پیکسل است که این مقادیر

بیانگر کوچک شدن محدوده نمایش عیب در تصویر نهایی بدست آمده است. کوچک شدن پهنای عیوب در صورت عدم پراکندگی و آشفتگی زیاد شدت رنگ، نشان محدود تر شدن و دقیق تر شدن نمایش عیوب خواهد بود.

جدول ۱- نتایج محاسبات آماری برای همه توزیع ها و تصویر ترکیبی بدست آمده

درصد بهینه شدن حوزه نمایش عیب با		درصد بهینه شدن عرض عیوب با		پهنای بزرگترین عیب (پیکسل)	شدت پیکسلها در محدوده عیوب	فرمت	ابعاد	تصویر
swv	fusion	swv	fusion					
-۱۸۸/۴۴	۷۰/۱۷	-۲۷۱/۴۲	۲۱/۴۲	۲۸	۲۸۹۹/۵۳	jpeg	۱۲۰۰×۹۰۰	wv
۲۳/۰۷	۹۲/۰۴	۵۶/۶۶	۹۰/۸۳	۲۳۹/۹۷ ≈ ۲۴۰	۱۰۸۷۲/۴۱	jpeg	۱۲۰۰×۹۰۰	stft
---	۸۹/۶۶	---	۷۸/۸۴	۱۰۳/۹۴ ≈ ۱۰۴	۸۳۶۳/۴۲	jpeg	۱۲۰۰×۹۰۰	swv
-۸۶۷/۱۳	---	-۳۷۲/۷۲	---	۲۱/۹۴ ≈ ۲۲	۸۶۴/۷۶	jpeg	۱۲۰۰×۹۰۰	fusion

هرچند در ویگنر-ویل با پهنای کمتری نسبت به ویگنر-ویل هموار شده و STFT مواجه هستیم ولی پهنای عیب در آن به علت پراکندگی و آشفتگی نمایش عیب ایجاد شده است. اگر این پهنای مانند STFT و ویگنر-ویل هموار شده با نمایشی منسجم و واضح همراه بود باید در بهینه بودن ویگنر-ویل هموار شده نسبت به ویگنر-ویل، شک می کردیم. به علاوه اینکه پهنای نمایش عیوب به تنهایی نمی تواند معیار کاملی برای بررسی وضوح عیوب باشد.



شکل ۹- مناسب ترین محدوده انتخابی برای بررسی آماری تصاویر

#### ■ ابعاد تصاویر

ابعاد تصاویر باید در همه موارد برابر باشد چون در غیر این صورت تعداد پیکسل ها در هر تصویری که بیشتر باشد به همان مقدار در مجموع، شدت برآیند پیکسل ها را افزایش می دهد. اگر اندازه تصاویر برابر نباشد بی شک با آشفتگی محاسبات مواجه خواهیم شد و ممکن است نتایج غیر علمی بدست آید که با ماهیت توزیع ها هماهنگ نباشد. به منظور داشتن تصاویر برابر، می توانیم از تابع "imresize" و فرم های متعدد اجرای این تابع، در نرم افزار MATLAB استفاده کنیم.

ابعاد تمامی تصاویر برای همه موارد  $1200 \times 900$  پیکسل انتخاب شده است. توجه شود که اندازه ابعاد تصاویر بیانگر تعداد پیکسل های موجود در ماتریس تصاویر است که نباید مقداری برای آن برگزینیم که رزولوشن تصویر پایین بیاید. با وجود اینکه هرچه ابعاد تصویر بزرگتر باشد، محاسبه مجموع شدت پیکسلی آن سخت تر است، ولی با وضوح و نمایش مناسب تری مواجه خواهیم بود.

### ▪ فرمت

فرمت ذخیره شدن تمامی تصاویر jpeg است. می توانیم در هنگام حاصل شدن تصویر از جعبه ابزارها، آنرا با هر فرمتی که بخواهیم ذخیره کنیم. به علاوه معمولاً نرم افزار MATLAB با این فرمت ذخیره می کند.

### ▪ شدت پیکسل ها در محدوده مشخص شده برای عیب

این اعداد در جدول، با جمع بستن شدت تک تک پیکسل ها در محدوده تصویری تعیین شده نمایش عیب، برای هر یک از توزیع ها و با وجود صرف زمان طولانی، به صورت جداگانه صورت گرفته است. منظور از جمع بستن شدت تک تک پیکسل ها، جمع بستن تمامی درایه های ماتریس شدت، برای مناطق انتخابی در تصویر شماره ۹ است تا با این کار، صحت برتری تصویر ترکیبی را نسبت به تصاویر حاصل از STFT، ویگنر- ویل و ویگنر- ویل هموار شده از نظر عددی، به اثبات برسانیم. در تصویر شماره ۱۰ یک نمونه از این ماتریس، نشان داده شده است. در محدوده های انتخابی برای مقایسه تصاویر می توانستیم با به کار گیری روش های دیگری چون محاسبه سطوح یا روش های میان یابی، یک عدد تقریبی بدست آوریم، ولی حسن صرف این زمان این است که اعداد نهایی بدست آمده از حاصل جمع پیکسل های داخل هر محدوده، دقیق خواهد بود. نتایج نشان می دهد که پس از جمع بستن تمامی درایه های ماتریس شدت، برای تک تک تصاویر، این عدد برای توزیع ویگنر- ویل برابر با  $2899/53$ ، برای STFT، برابر با  $10872/41$ ، برای ویگنر- ویل هموار شده برابر با  $8363/42$  و برای تصویر ترکیبی حاصل شده  $864/76$  حاصل شده است. کوچک تر بودن این عدد برای تصویر نهایی بدست آمده از ترکیب تصاویر، نشان دهنده بهینه شدن نمایش عیوب در آن و تاییدی بر بهتر شدن نمایش عیوب موجود در یاتاقان، فارغ از نویزها و پارازیت های مزاحمی است که منطقه عیب را از نظر مشاهده ای آشفته و وسیع می کنند.

0.13	0.33	0.29	0.27	0.26	0.27	0.16	0.14	0.12	0.13	0.08	0.08	0.13	0.13
0.14	0.43	0.42	0.45	0.49	0.49	0.48	0.31	0.29	0.27	0.30	0.12	0.13	0.13
0.15	0.45	0.43	0.45	0.51	0.51	0.51	0.33	0.31	0.27	0.29	0.10	0.09	0.13
0.15	0.46	0.44	0.46	0.53	0.53	0.51	0.36	0.34	0.29	0.32	0.13	0.14	0.13
0.16	0.46	0.48	0.50	0.66	0.69	0.70	0.54	0.48	0.52	0.47	0.15	0.13	0.13
0.16	0.45	0.48	0.51	0.68	0.72	0.69	0.54	0.50	0.53	0.49	0.17	0.16	0.13
0.17	0.44	0.47	0.49	0.67	0.70	0.65	0.55	0.51	0.53	0.49	0.18	0.16	0.13
0.13	0.34	0.36	0.39	0.60	0.62	0.67	0.61	0.58	0.58	0.55	0.23	0.20	0.20
0.13	0.30	0.31	0.34	0.59	0.61	0.59	0.58	0.57	0.56	0.55	0.23	0.20	0.20
0.09	0.15	0.17	0.21	0.44	0.44	0.47	0.50	0.50	0.48	0.48	0.20	0.16	0.16
0.09	0.11	0.13	0.15	0.39	0.39	0.43	0.50	0.50	0.47	0.46	0.20	0.16	0.16

شکل ۱۰- نمونه ای از پنجره مربوط به نمایش اعداد ماتریس شدت

### ▪ درصد بهینه شدن پهنای نمایش عیب

به راحتی و با یک تناسب ساده، میزان بهینه شدن نمایش عیب را در نتایج بدست آمده در تصویر ترکیبی محاسبه کرده ایم. تمرکز ما بر روی مقایسه تصویر ترکیبی و تصویر توزیع ویگنر- ویل هموار شده با بقیه حالت های ذکر شده است. چون توزیع ویگنر- ویل هموار شده آخرین توزیع مناسبی است که از دید کارشناسان، در این زمینه ارایه گردیده است. داده های جدول نشان می دهد که توزیع ویگنر- ویل هموار شده از نظر پهنای نمایش عیب یاتاقان معیوب مورد آزمایش، در مقایسه با ویگنر- ویل، وضعیت مناسبی ندارد چون عدد  $271/42$ ، نشان می دهد که حوزه نمایش عیب در آن نسبت به ویگنر ویل، بسیار پهن تر شده است ولی نسبت به STFT به اندازه  $56/66$  درصد، پهنای نمایش عیب را کاهش داده است. نکته مورد توجه، مقایسه پهنای نمایش عیب، در توزیع ویگنر- ویل هموار شده با تصویر ترکیبی است که مقدار  $372/72$ ، نشان می دهد که تصویر

ترکیبی بدست آمده از نظر پهنای نمایش عیب، در مقایسه با ویگنر - ویل هموار شده بسیار مناسب تر است. از طرفی در ستون مقایسه پهنای نمایش عیب، در تصویر ترکیبی با سایر تصاویر می بینیم که پهنای نمایش عیب، در تصویر ترکیبی، ۲۱/۴۲ درصد نسبت به ویگنر - ویل، ۹۰/۸۳ درصد نسبت به STFT و ۷۸/۸۴ درصد نسبت به ویگنر - ویل هموار شده بهتر شده است.

#### ▪ درصد بهینه شدن کل حوزه نمایش عیب

با توجه به داده های بدست آمده در جدول، مشاهده می کنیم که حوزه نمایش عیب در ویگنر - ویل هموار شده نسبت به ویگنر - ویل ۱۸۸/۴۴-، درصد، نسبت به STFT، ۲۳/۰۷، درصد و نسبت به تصویر ترکیبی ۸۶۷/۱۳-، درصد بهینه شده است که نکته قابل توجه در این ارقام، اختلاف بسیار زیاد آن با تصویر ترکیبی بدست آمده است که میزان بهینه شدن حوزه نمایش عیب و حذف نویزها و پارازیت های مزاحم را در تصویر ترکیبی بیان می کند. جدول نشان می دهد که ویگنر - ویل هموار شده، نسبت به ویگنر - ویل، از نظر نمایش عیوب چندان موفق نبوده است ولی نسبت به STFT وضعیت مناسب تری دارد. در ستون مقایسه تصویر ترکیبی با سه مورد دیگر می بینیم که حوزه نمایش عیب در تصویر ترکیبی بدست آمده، نسبت به ویگنر - ویل ۷۰/۱۷ درصد، نسبت به STFT، ۹۲/۰۴ درصد و نسبت به ویگنر - ویل هموار شده ۸۹/۶۶ درصد بهینه شده است که برتری قاطع تصویر ترکیبی را از نظر نمایش عیوب و حذف نویزها و پارازیت های مزاحم به ما نشان می دهد.

#### ۸. نتیجه گیری

با توجه به بررسی هایی که در طول مقاله، برای عیب یابی یاتاقان های غلتشی، از طریق سیگنال دریافتی آنها انجام دادیم؛ می توانیم بگوییم که روش عیب یابی ذکر شده فقط به یاتاقان های غلتشی معیوب محدود نمی گردد و به راحتی می توانیم این روش را برای سایر اجزای ماشین، نیز به کار ببریم. آنچه گفته شد نشان می دهد که روش عیب یابی، بر اساس تحلیل سیگنال جز معیوب و با کمک روش های زمان-فرکانسی تبدیل فوریه کوتاه مدت، روش ویگنر- ویل و روش ویگنر- ویل هموار شده، موفقیت زیادی در بر داشته است ولی هر کدام از این روش ها به نحوی در نمایش محدوده عیب سیگنال، مشکلات و معضلاتی دارند که منجر به وجود نویزها و پارازیت های فراوانی در نمایش سیگنال آنها می گردد. کوششی که برای کاهش معضلات موجود در سیگنال دریافتی، صورت گرفته است بر پایه روش هموارسازی توزیع ویگنر استوار بود، ولی توزیه ویگنر- ویل هموار شده نیز نمی تواند، به دلایل ذکر شده در طول مقاله، نمایش چندان موفقیت آمیزی را ارائه دهد. کاری که ما انجام دادیم بر این تفکر پایدار بود که بتوانیم برابندی را از توزیع های STFT و ویگنر- ویل ایجاد کنیم، که شرایط مناسب تری نسبت به توزیه ویگنر- ویل هموار شده داشته باشد که بر اساس آنچه گفته شد روش عیب یابی یاتاقان غلتشی مورد آزمایش، بر اساس ترکیب تصاویر حاصل از روش های زمان-فرکانسی STFT و ویگنر - ویل، می تواند نمایش بسیار مناسب تری را نسبت به هر کدام از تک تک روش های STFT، ویگنر- ویل و حتی روش ویگنر- ویل هموار شده ارائه دهد. امید است روش بیان شده بتواند اندک چراغی را در زمینه ذکر شده در پیش روی انسان روشن نماید.

#### ۹. مراجع

- [1] Gabor, D. Theory of communication. Journal of IEE 93 (1946), 429-457.
- [2] MATLAB , help . Wavelet transform Short-Time fourier transform,2009
- [3] D. Gabor, "Theory of communication," J.EE (London), vol. 93, pp. 429-457, 1946.
- [4] E. F. Valez and R. G. Absher, "Transient analysis of speech signals using the Wigner time-frequency representation," in Proc. IEEEICASSP89, 1989 (to be published).
- [5] Piella, G., and Heijmans, H. J. A. M. An adaptive Adaptive Wavelets and their Applications to Image Fusion and Compression .In Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (Thessaloniki, Greece, October7-10 2001).

- [6] "Wigner distribution for finite duration or band-limited signals and limiting cases," *EEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-35, pp. 796-806, 1987.
- [7] (a), "A note on 'Wigner distribution for finite duration or band-limited signals and limiting cases'," *EEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-36, pp. 927- 929, 1988; (b) author's reply, *ibid*.
- [8] F. Bopp, "La mécanique quantique est-elle une mécanique statistique classique particulière?," *Ann. Inst. H. Poincaré*, vol. 15, pp. 81-112, 1956.
- [9] "A non-negative quantum mechanical distribution function," *Physica*, vol. 83A, pp. 210-212, 1976.
- [10] N.C.DeBruijn, "Uncertainty principles in Fourier analysis," in *Inequalities*, Shisha, Ed. New York, NY: Academic Press, 1967, pp. 57-71.
- [11] H. Garudadri, M. P. Beddoes, A.-P. Benguerel, and J. H. V. Gilbert, "On computing the smoothed Wigner distribution," in *Proc. IEEEICASSP 87*, pp. 1521-1524, 1987.
- [12] "Wigner distribution function: relation to short-term spectral estimation, smoothing, and performance in noise," Naval Underwater Systems Center, NUSC Tech. Rep. 8225, Feb. 16, 1988.