

## تحلیل و شبیه‌سازی حذف نویز با استفاده از تبدیل موجک به منظور آشکارسازی نقص در مواد

میثم بیات

استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران- ایران  
m\_bayat@ssau.ac.ir

**چکیده:** موج‌های انعکاس یافته از سیستم‌های فراصوتی که برای آشکارسازی نقص به کار می‌روند، اغلب به دلیل وجود نویز خراب می‌شوند. انعکاس‌های ناشی از ساختار ناهمگون معمولاً به عنوان نویز توزیع معکوس شناخته می‌شوند. برای حذف نویز روش‌های مختلفی وجود دارد. تبدیل موجک یکی از ابزارهای قدرتمند در حذف نویز است. سازگاری موجک‌های مادر با سیگنال‌های واقعی و پیچیدگی کم‌تر محاسبات باعث شده که تبدیل موجک به عنوان یک ابزار کارآمد مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله به بررسی روش حذف نویز در مبدل‌های فراصوتی، با استفاده از تبدیل موجک پرداخته شده است. نوآوری خاص این مقاله در به کارگیری تبدیل موجک به منظور حذف نویز در سامانه شناسایی نقص و انتخاب بهینه‌ترین الگوریتم برای این منظور بوده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، براساس دو معیار شایستگی ارایه شده در مقاله بهترین نتایج با استفاده از موجک مادر گسسته Meyer، آستانه‌گیری سخت و سطح آستانه مبتنی بر انحراف معیار استاندارد به دست می‌آید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد SNRE روش ارایه شده در این مقاله نسبت به روش‌های متداول کاهش نویز سیگنال فراصوتی، بسته به میزان درصد دامنه‌های خطای سیگنال بازگشتی، از ۱ تا ۲۵ دسی بل بهبود می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** تبدیل موجک، تبدیل موجک سریع، نویز، آستانه‌گیری سخت، آستانه‌گیری نرم.

تاریخ ارسال مقاله: ۹۹/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۸/۰۹

نام نویسنده مسئول: میثم بیات

## ۱- مقدمه

روش، برای تابع پنجره‌ای یک تابع اولیه به‌عنوان موجک مادر به‌کار می‌رود. سایر توابع پنجره‌ای با استفاده از مقیاس نمودن این موجک مادر و جابه‌جا نمودن سیگنال اصلی در محور زمان حاصل می‌شوند. ادامه کار مانند روش تبدیل فوریه پنجره زمانی است. به این تبدیل، تبدیل موجک می‌گویند. هنگامی که ابعاد پنجره کوچک‌تر باشد، موجک فشرده‌تر می‌گردد و آشکارسازی جزئیات مربوط به تابع اصلی نیز بهتر صورت می‌گیرد [۱۴]. در آنالیز فرکانس‌های پایین، تبدیل موجک به‌طور خود به خود از پنجره‌های عریض‌تر برای نمایش بهتر فرکانس استفاده می‌کند. در مورد فرکانس‌های بالا از پنجره‌های باریک‌تر برای نمایش بهتر زمانی استفاده می‌کند. بنابراین تبدیل موجک ابزار بسیار قدرتمند و مناسبی برای آنالیز پدیده‌های غیرایستا و متغیر زمانی است. این تبدیل ویژگی‌های تابع را هم در حوزه زمان و هم در حوزه فرکانس بیان می‌کند [۱۵]. در تبدیل موجک یا به اختصار  $WT^2$ ، هم قدرت تفکیک زمانی و هم قدرت تفکیک فرکانسی در نمودار زمان - فرکانس تغییر می‌کند، بدون این‌که اصل عدم قطعیت هایزنبرگ نقض شود. این روش در فرکانس‌های بالا، قدرت تفکیک زمانی خوب و قدرت تفکیک فرکانسی ضعیف و در فرکانس‌های پایین، قدرت تفکیک فرکانسی خوب و قدرت تفکیک زمانی ضعیف به‌دست می‌دهد [۱۶]. در تبدیل موجک گسسته، سیگنال از یک سری فیلترهای بالاگذر برای آنالیز فرکانس‌های بالا و از یک سری فیلترهای پایین‌گذر برای آنالیز فرکانس‌های پایین، عبور داده می‌شود. در نهایت گروهی از سیگنال‌ها وجود دارد که بیانگر سیگنال اولیه است. هر گروه سیگنال نشان دهنده باند فرکانسی متفاوتی است. در این حالت مشخص است کدام سیگنال به کدام باند فرکانسی مربوط است. اگر همه سیگنال‌ها باهم در یک گراف سه‌بعدی نمایش داده شوند، زمان را در یک محور، فرکانس را در محور دوم و دامنه را در محور سوم خواهیم داشت [۱۶].

آزمون غیرمخرب ( $NDT^3$ ) فراصوتی مبتنی بر انعکاس صدا برای آشکارسازی نقص در مواد مختلف به‌کار می‌رود [۱۷]. در مواد ناهمگون، مراکز بسیاری وجود دارند. این مراکز می‌توانند انعکاس‌هایی تولید کنند که به‌صورت تصادفی در زمان توزیع شده‌اند. این انعکاس‌ها معمولاً به‌عنوان نویز توزیع معکوس<sup>۴</sup> شناخته می‌شوند. روش‌های فیلتر کردن مبتنی بر موجک، عموماً به‌صورت غیرخطی بوده و رفتار این فیلترها به شدت وابسته به

الگوریتم‌های متعددی برای حذف نویز و تداخل در سیگنال‌های مختلف مطرح شده است. برخی از این الگوریتم‌ها بر مبنای کدگذاری سیگنال است [۲-۱]. در برخی از کاربردها از فیلترهای ترکیبی دیجیتال برای حذف نویز استفاده می‌شود [۳]. یک روش متداول دیگر برای کاهش نویز استفاده از فیلترهای تطبیقی است [۴-۶]. الگوریتم‌هایی نیز در حوزه زمان به‌منظور حذف نویز در سامانه‌های ناوبری مطرح شده است [۷-۹]. در برخی از کاربردها نیز اگر نویز غیرگوسی باشد از ضرایب کواریش برای تخمین و حذف نویز استفاده می‌شود [۱۰]. تبدیل فوریه زمان کوتاه یا به اختصار  $STFT^1$  یک روش متداول برای کاهش نویز در تصاویر است [۱۱]. در این روش، سیگنال با استفاده از پنجره‌های زمانی به بخش‌های کوچک تقسیم می‌گردد. در هر یک از این بخش‌ها می‌توان سیگنال را ثابت فرض کرد. سپس تبدیل فوریه در هر بازه (پنجره) به‌طور جداگانه اعمال و نتایج حاصل به ترتیب در کنار هم قرار داده می‌شوند. بنابراین به‌طور هم‌زمان اطلاعات زمانی - فرکانسی حاصل می‌گردد [۱۲]. اساس تبدیل فوریه با پنجره زمانی با فرض ایستا بودن هر بخش داخل پنجره است. بنابراین، باید پنجره‌ها به میزان کافی باریک باشند. این امر سبب می‌شود که اطلاعات زمانی مناسب ارایه گردند، اما در ارایه اطلاعات فرکانسی ضعیف عمل می‌کند. برای بیان دقیق فرکانس‌ها (جدا سازی فرکانس‌های نزدیک به یکدیگر) باید عرض پنجره‌ها بزرگ باشند. این امر سبب ارایه اطلاعات ضعیف زمانی می‌شود [۱۲]. مشکل اصلی تبدیل فوریه زمان کوتاه به دلیل اصل عدم قطعیت هایزنبرگ است. این اصل در مورد اطلاعات زمان فرکانس یک سیگنال نیز به‌کار می‌رود. بر طبق آن، اطلاعات فرکانسی و زمانی یک سیگنال در یک نقطه در نمودار زمان فرکانس، قابل دستیابی نیست. هر چه پهنا ی پنجره باریک‌تر باشد، قدرت تفکیک زمانی بهتر است و فرض ثابت سیگنال هم بهتر برقرار می‌شود، اما قدرت تفکیک فرکانسی بدتر خواهد شد. برعکس، پنجره پهن، قدرت تفکیک فرکانسی خوب و قدرت تفکیک زمانی ضعیف به‌دست می‌دهد. علاوه بر آن، پنجره‌های پهن ممکن است با شرط ثابت سیگنال متناقض باشند [۱۲-۱۱]. برای دستیابی هم‌زمان به اطلاعات مناسب از زمان و فرکانس و حل مشکلات اشاره شده، در سال ۱۹۸۰، مرلت و گروسمن روش استفاده از توابع پنجره‌ای با اندازه‌های مختلف را برای بررسی محدوده فرکانس متفاوت سیگنال پیشنهاد کردند [۱۳]. در این

<sup>2</sup> Wavelet Transform<sup>3</sup> Non-Destructive Test<sup>4</sup> Back Scattering<sup>1</sup> Short Time Fourier Transform

انتقال یافته و مقیاس شده یک تابع (موجک مادر) با طول متناهی و نوسانی میرا هستند [۱۲]. تبدیل موجک به صورت یک میکروسکوپ ریاضی عمل می کند. این تبدیل با بزرگ‌نمایی سیگنال اجازه بررسی دقیق ساختار جزئی سیگنال را می دهد. با خارج شدن از حالت بزرگ‌نمایی می توان ویژگی های سیگنال در مقیاس بزرگ را مطالعه نمود.

## ۲-۱- انواع تبدیل موجک و سیگنال فراصوتی

معمول ترین تبدیل موجک‌ها عبارتند از تبدیل موجک پیوسته ( $CWT^7$ )، تبدیل موجک گسسته ( $DWT^8$ )، تبدیل سریع موجک ( $FWT^9$ )، تجزیه بسته های موجک ( $WPD^{10}$ )، تبدیل موجک گسسته ایستا ( $SWT^{11}$ ). تبدیل موجک یک نسخه اتلاف نشده از تبدیل DWT است. هدف اصلی، میانگین گیری از تعداد زیادی ضرایب جزئی است، که از تجزیه سیگنال ورودی و بدون نمونه برداری کاهشی به دست آمده اند. این روش می تواند به عنوان کاربرد پی در پی روش استاندارد DWT برای شیفتهای زمانی مختلف تفسیر شود. روش بسته های موجک ( $WP^{12}$ )، تعمیم یافته تجزیه موجک است، که محدوده بزرگ تری را برای امکان آنالیز سیگنال به دلیل قالب تجزیه کامل فراهم می کند. در روش بسته های موجک (WP)، یک سیگنال به تخمین ها و ضرایب جزئی تقسیم می شود، بنابراین نه تنها ضرایب جزئی، بلکه ضرایب تخمین نیز خود به دو سطح تخمین و جزئی تقسیم می شوند و این روند تکرار می شود. تمام ضرایب آستانه گیری می شوند. مراحل دیگر مشابه روش کاهش نویز مبتنی بر DWT است. سیگنال فراصوتی نمونه می تواند به فرم رابطه زیر نوشته شود:

$$x(t) = a(t) + n_1(t) + n_2(t) \quad (1)$$

که  $a(t)$  سیگنال انعکاسی دریافتی،  $n_1(t)$  نویز توزیع معکوس و  $n_2(t)$  نویز اولیه به وجود آمده با مدار الکترونیکی است. نویز توزیع معکوس و نویز حاصل از مدارهای الکترونیکی باید بدون کاهش و اثر گذاشتن بر روی سیگنال های انعکاسی مربوط به نقص ها حذف شوند [۱۳].

مقدار ورودی است. بنابراین مقیاسه روش های فیلتر کردن فقط از روی بهبود نسبت سیگنال به نویز (SNR) ممکن نخواهد بود [۱۳]. در این مقاله با اضافه کردن دامنه های مختلف خطای انعکاس، روش های مختلف کاهش نویز با استفاده از تبدیل موجک باهم مقایسه شده است. سپس روش موجک در کاهش نویز فراصوتی با استفاده از پارامترهای مختلف مانند تبدیل موجک مادر، قوانین آستانه گیری و سطوح آستانه مورد ارزیابی قرار گرفته است. به عنوان شایستگی فیلتر کردن، به ویژه برای سیگنال های فراصوتی، پارامتری به نام راندمان فیلترینگ تعریف شده که هر دو پارامترهای دامنه و اعوجاج های شکل را ارزیابی می کند. بر مبنای این شبیه سازی ها، بهترین نتایج با استفاده از موجک مادر گسسته Meyer، آستانه گیری سخت و سطح آستانه مبتنی بر انحراف معیار استاندارد به دست می آید.

در ادامه و در بخش ۲ به معرفی تبدیل موجک، انواع آن و مدل کلی سیگنال فراصوتی بازگشتی از مواد پرداخته شده است. در بخش ۳ اصول اولیه روش های حذف نویز با این تبدیل و نحوه تخمین آستانه بیان شده است. در بخش ۴ به شبیه سازی و تولید یک سیگنال فراصوتی پرداخته شده است. در بخش ۵ یک نمونه سیگنال فراصوتی انعکاسی از یک ماده ناهمگون ارائه شده است. در بخش ۶ نتایج حاصل از شبیه سازی روش های حذف نویز و مقایسه روش ها با یکدیگر و انتخاب روش بهینه به منظور شناسایی نقص در مواد آورده شده است. در پایان، نتیجه گیری از تحلیل های صورت گرفته انجام شده است.

## ۲- تبدیل موجک

موجک تابع مشخص مفروضی با میانگین صفر است و بسط بر حسب انتقال ها و تاخیرهای این تابع انجام می گیرد. بنابراین در حالت کلی، موجک ها بر مبنای دو عمل اصلی انتقال<sup>۵</sup> و تاخیر<sup>۶</sup> قرار دارند. برخلاف چند جمله ای های مثلثاتی، موجک ها در فضا به صورت موضعی بررسی می شوند. به این ترتیب ارتباط نزدیک تری بین بعضی توابع و ضرایب آن ها امکان پذیر می شود و پایداری عددی بیشتری در بازسازی و محاسبات فراهم می گردد. تبدیل موجک، تجزیه یک تابع بر مبنای توابع موجک است. در واقع موجک، دسته ای از توابع ریاضی است که برای تجزیه سیگنال پیوسته به مؤلفه های فرکانسی آن به کار می رود. در این حالت کیفیت تفکیک هر مؤلفه برابر با مقیاس آن است. موجک ها (که به عنوان موجک های دختر شناخته می شوند) نمونه های

<sup>7</sup> Continuous Wavelet Transform

<sup>8</sup> Discrete Wavelet Transform

<sup>9</sup> Fast Wavelet Transform

<sup>10</sup> Wavelet Packet Decomposition

<sup>11</sup> Stationary Wavelet Transform

<sup>12</sup> Wavelet Packet Method

<sup>5</sup> Translation

<sup>6</sup> Dilatation

## ۲-۲- روش‌های حذف نویز با تبدیل موجک

تبدیل موجک می‌تواند به‌عنوان یک روش فیلتر کردن موثر، برای گروه سیگنال‌هایی که دارای تعداد کمی ضرایب موجک غیرصفر برای گروه مشخصی از موجک‌ها هستند، استفاده شود. حذف نویز و فیلتر کردن استاندارد، بر روی هر دو پارامتر دامنه و فرکانس سیگنال تاثیرگذار است. فرآیند حذف نویز شامل سه مرحله است. در مرحله اول تبدیل اعمال می‌شود. در این مرحله تجزیه سیگنال ورودی نویزی به  $N$  سطح از تقریب، با استفاده از تبدیل موجک انتخاب شده انجام می‌شود. سپس از فیلتر میان‌گذر برای به‌دست آوردن تقریب و ضرایب جزئی استفاده می‌گردد. مرحله دوم آستانه‌گیری از ضرایب جزئی است. در نهایت بازسازی سیگنال با استفاده از تقریب‌ها و ضرایب (عوامل) جزئی با تبدیل معکوس انجام می‌شود [۱۵].

شیوه‌های حذف و کاهش نویز اساساً به نوع و روش تبدیل مورد استفاده و نحوه تضعیف ضرایب وابسته است. در حالت کلی دو نوع روش حذف نویز خطی و غیرخطی برای سیگنال‌ها وجود دارد. حذف نویز با روش خطی مستقل از اندازه ضرایب سیگنال است. لذا خود ضریب در محاسبات وارد نمی‌شود. روش‌های حذف نویز خطی بر پایه این تخمین استوار است که، نمی‌توان نویز را در ضرایب مربوط به مقیاس بزرگ یافت. در واقع نویز از ضرایب موجکی که در مقیاس با وضوح پایینی حضور دارند، به‌دست می‌آید. بنابراین، حذف نویز خطی برای سیگنالی که تبدیل موجک به آن اعمال شده است با صفر قرار دادن تمامی ضرایب با اندازه کوچک‌تر از یک مقدار آستانه مشخص انجام می‌شود. حذف نویز غیرخطی بر این پایه استوار است که نویز، به‌خصوص نویز سفید، در تمامی ضرایب یافت می‌شود. بنابراین اساس حذف نویز غیرخطی مقدار خود ضرایب است. حذف نویز غیرخطی به دو صورت آستانه‌گذاری نرم و آستانه‌گذاری سخت انجام می‌شود. در آستانه‌گذاری سخت تمام ضرایبی که پایین‌تر از آستانه باشند، برابر صفر قرار داده می‌شوند. آستانه‌گذاری نرم علاوه بر این کار، سایر ضرایب را نیز به این مقدار آستانه تضعیف می‌کند [۱۶].

حذف کامل نویز از سیگنال فراصوتی غیرممکن است. بهترین روش کاهش نویز این است که اطلاعات مفید تا حد ممکن حفظ شوند. هدف از کاهش نویز با تبدیل موجک، به‌دست آوردن سیگنال مشابه سیگنال اصلی و کاهش اثرات سیگنال‌های نویز است. در حذف نویز و بازسازی سیگنال دو نکته اساسی وجود دارد [۱۴].

۱- انتخاب بهینه فیلتر موجک: در کاهش نویز با استفاده از تبدیل موجک، انتخاب موجک مادر مناسب از اهمیت ویژه‌ای

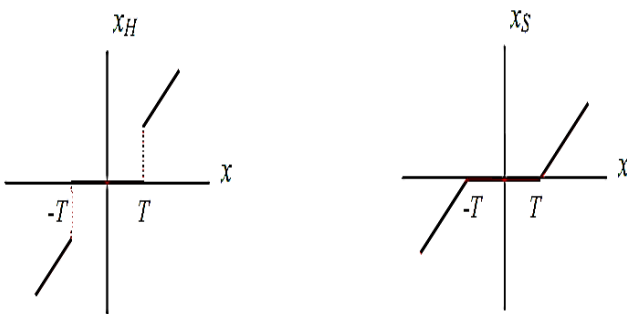
برخوردار است. شکل موجک مادر باید بسیار شبیه به موج انعکاسی باشد. سیگنال باید ویژگی‌های تقارن، تعامد و امکان‌پذیری برای تبدیل موجک گسسته را داشته باشد. موجک مادر Haar، موجک گسسته Meyer، موجک Daubechie و موجک Coiflet امتحان شده‌اند. بهترین نتایج با موجک گسسته Meyer به‌دست آمده است. انتخاب فیلترهای موجک، یک عامل تعیین‌کننده در رسیدن به بازسازی کامل سیگنال اصلی است. در حقیقت انتخاب فیلتر، تعیین‌کننده امکان بازسازی کامل و تعیین‌کننده قالب تابع موجک است.

۲- انتخاب نوع آستانه و شیوه آستانه‌گذاری: انتخاب مقدار و نوع آستانه از درجه اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. انتخاب آستانه خیلی کوچک موجب باقی ماندن نویز در سیگنال می‌شود. اگر مقدار آستانه خیلی بزرگ انتخاب شود، ممکن است اطلاعات مفید سیگنال نیز از بین برود. رابطه ۲ شیوه آستانه‌گیری سخت و رابطه ۳ شیوه آستانه‌گیری نرم را نشان می‌دهد.

$$X_H = \begin{cases} 0 & |x| \leq T \\ x & x > T \end{cases} \quad (2)$$

$$X_S = \begin{cases} 0 & |x| \leq T \\ x - T & x > T \\ x + T & x < -T \end{cases} \quad (3)$$

شکل (۱) شیوه آستانه‌گیری سخت و نرم را نشان می‌دهد.



شکل (۱): آستانه‌گیری سخت ( $X_H$ ) و آستانه‌گیری نرم ( $X_S$ )

جدایی بین سیگنال و نویز در فضای موجک، نیازمند آستانه‌گذاری ضرایب موجک است. در واقع سیگنالی که دارای ساختار شکل موج معینی است بر روی تعداد محدودی از ضرایب در فضای موجک متمرکز می‌شود. در حالی که نویز که دارای ساختار تصادفی است، بر روی تعداد بسیار بیشتری از ضرایب موجک پخش می‌شود.

$$\text{Threshold} = k \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Dc_i - \bar{Dc})^2} \quad (9)$$

در این رابطه  $k$  ضریب متناسب با بالاترین درجه فاکتورهای سیگنال فیلتر شده است.  $Dc$  برداری از ضرایب جزئی در هر سطح و  $N$  طول هر سری از ضرایب جزئی است.

### ۳- مدل نویز و تولید سیگنال فراصوتی

سیگنال فراصوتی بازتاب شده از ماده ناقص، شامل انعکاس‌های به وجود آمده توسط ناهمواری در ماده با ساختار ناهمگون است. این انعکاس‌ها، نویز توزیع معکوس نامیده می‌شوند. منبع دوم نویز در سیگنال فراصوتی، نویز حاصل از مدار الکترونیکی است. نویز توزیع معکوس تولید شده در مدل مورد بررسی مبتنی بر مدل ساده درهم‌ریختگی (کلاتر) است. فرض می‌شود که نویز حاصل، جمع آثار سیگنال‌های به دست آمده از ناهمواری‌های ماده باشد. با فرض ناحیه رابلی ( $D \gg \lambda$ ) که  $\lambda$  طول موج و  $D$  قطر برجستگی موجود در ماده است) پاسخ فرکانسی ماده می‌تواند با رابطه زیر توصیف شود [۱۰].

$$H_m(\omega) = \sum_{k=1}^{K_t} \beta_k \frac{\omega^2}{x_k} \exp(-\alpha_s 2x_k \omega^4) \exp\left(-i\omega \frac{2x_k}{c_1}\right) \quad (10)$$

در این رابطه  $\alpha_s$  ضریب تلفات ماده،  $c_1$  سرعت موج‌های طولی،  $x_k$  مکان مربوط به ناهمواری‌ها و  $\beta_k$  یک بردار تصادفی وابسته به حجم نقص است. سیگنال نویز توزیع شده در حوزه فرکانس با رابطه زیر بیان شود [۱۳].

$$H_n(\omega) = H_t(\omega) H_r(\omega) H_m(\omega) \quad (11)$$

عبارت  $H_t(\omega)$  دوبار اتفاق می‌افتد، زیرا مبدل فراصوتی در این جا هم به عنوان فرستنده و هم به عنوان گیرنده عمل می‌کند. این مدل برای تولید نویز توزیع معکوس استفاده می‌شود. نویز تولید شده در شکل (۲) قسمت الف و طیف فرکانسی مربوطه در شکل (۲) قسمت ب نشان داده شده است. سیگنال فراصوتی اندازه‌گیری شده همچنین شامل یک منبع دوم برای نویز است که ناشی از مدار الکترونیکی است.

### ۳-۲- فیلتر کردن مبتنی بر تبدیل موجک گسسته

تبدیل موجک پیوسته با تغییر مقیاس پنجره تحلیل‌گر، شیفت پنجره در زمان، ضرب کردن در سیگنال و انتگرال‌گیری در کل زمان‌ها محاسبه می‌شود. تبدیل موجک پیوسته با رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵].

$$\text{CWT}_\tau^\Psi(x, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \Psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (4)$$

$x(t)$  سیگنال ورودی،  $s$  مقیاس،  $\tau$  انتقال و  $\Psi(t)$  تابع تبدیل موجک مادر است. موجک مادر با رابطه زیر به دست می‌آید

$$\Psi_{\tau, s} = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (5)$$

ضرایب DWT معمولاً با نمونه‌گیری از CWT در یک شبکه دوتایی و با در نظر گرفتن پارامترهای  $\tau = n \cdot 2^m$  و  $s = 2^m$  به دست می‌آیند. تعریف موجک مادر در DWT به صورت رابطه زیر است.

$$\Psi_{m, n}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \Psi\left(\frac{t - n2^m}{2^m}\right) \quad (6)$$

تبدیل موجک گسسته، سیگنال را به اطلاعات جزئی و کلی تجزیه می‌کند. تبدیل موجک گسسته با استفاده از فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر و بر مبنای روابط زیر انجام می‌شود [۱۴].

$$y_{\text{high}}(k) = \sum_n x(n) \cdot g(2k - n) \quad (7)$$

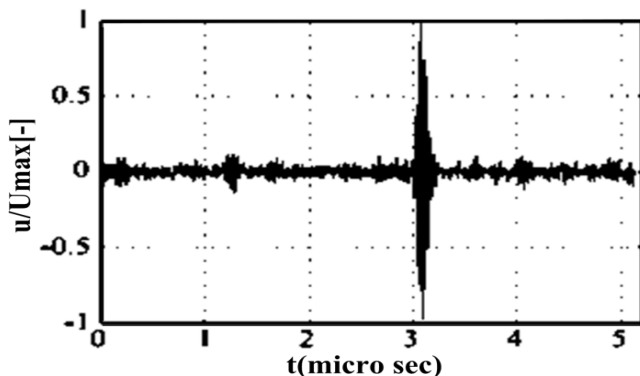
$$y_{\text{low}}(k) = \sum_n x(n) \cdot h(2k - n) \quad (8)$$

در این رابطه  $Y_{\text{high}}(k)$  و  $Y_{\text{low}}(k)$  خروجی‌های فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر به ترتیب با پاسخ ضربه  $g$  و  $h$  و پس از نمونه‌برداری کاهشی با مقیاس ۲ می‌باشند. این عملیات برای تجزیه بیشتر سیگنال‌های حاصل از فیلترهای پایین‌گذر تکرار می‌شود. با شروع از تقریب‌ها و ضرایب جزئی، تبدیل موجک وارون گسسته، سیگنال را با وارد کردن صفرها و کانوالو کردن نتایج با فیلترهای بازسازی کننده، بازسازی می‌کند. فیلتر کردن استاندارد، بر روی پارامترهای دامنه و فرکانس سیگنال تاثیر می‌گذارد. با توجه به موارد اشاره شده، در تجزیه سیگنال با استفاده از تبدیل موجک، انتخاب موجک مادر مناسب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شکل موجک مادر باید بسیار شبیه به موج انعکاسی باشد. مقدار آستانه در هر سطح تجزیه از روی ضرایب جزئی محاسبه می‌شود. این مقدار برای آستانه‌گیری در همان سطح به کار می‌رود. آستانه‌گیری محلی در هر سطح تجزیه با رابطه زیر به دست می‌آید.

برای ساختن یک سیگنال فراصوتی، باید انعکاس دیواره زیرین و انعکاس خطا را به نویز فراصوتی اضافه نمود. پاسخ فرکانسی یک سیگنال ضربه که دوبار از مبدل عبور کرده و در داخل ماده‌ای با ضخامت  $2d_{cr}$  پخش شده است، با رابطه زیر به دست آید [۱۵].

$$S(\omega) = \exp(-\alpha_s 2d_{cr} \omega^4) \exp\left(-j2 \frac{d_{cr}}{c_1}\right) H_t(\omega) H_r(\omega) \quad (12)$$

نمونه سیگنال فراصوتی شبیه‌سازی شده در ماده‌ای با ساختار ناهمگون و در یک محل خالص، در شکل (۴) نشان داده شده است. این شکل فقط، انعکاس‌هایی که به وسیله بازتاب از شکاف‌های موجود در ماده به وجود آمده است را نشان می‌دهد.

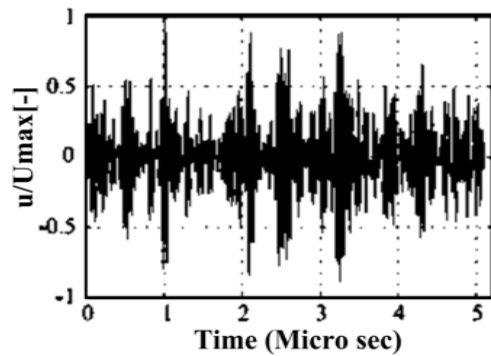


شکل (۴): سیگنال فراصوتی شبیه‌سازی شده با نویز توزیع معکوس و سیگنال دیواره پستی

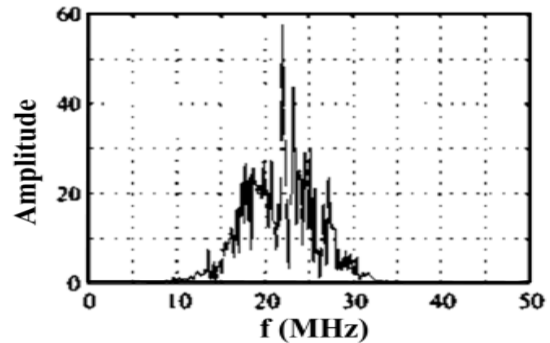
#### ۴- نتایج شبیه‌سازی کارآیی روش‌های کاهش نویز

از مدل سیگنال فراصوتی شبیه‌سازی شده در بخش ۳ مقاله، برای مقایسه روش‌های کاهش نویز مبتنی بر تبدیل موجک استفاده می‌شود. در این مقاله با اضافه کردن دامنه‌های مختلف خطای انعکاس، روش‌های مختلف کاهش نویز با استفاده از تبدیل موجک باهم مقایسه شده است. سپس روش موجک مورد استفاده در کاهش نویز فراصوتی با استفاده از پارامترهای مختلف مانند تبدیل موجک مادر، قوانین آستانه‌گیری و سطوح آستانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای مقایسه از موجک‌های مادر مختلفی از قبیل گروه Daubechies از مرتبه ۴ (db4) و مرتبه ۶ (db6)، Symlet از مرتبه ۶ (sym6) و Haar و موجک گسسته Meyer (dmey) استفاده شده است. سطوح بالاتر تجزیه، کاهش نویز را بهبود نمی‌دهد.

در قانون آستانه‌گیری، روش‌های مختلفی برای کاهش نویز پیشنهاد شده‌اند. متداول‌ترین روش‌های آستانه‌گیری، آستانه‌گیری نرم و سخت می‌باشند. علاوه بر این، روش‌های توافقی و سفارشی نیز وجود دارد، که بر معایب روش‌های آستانه‌گیری



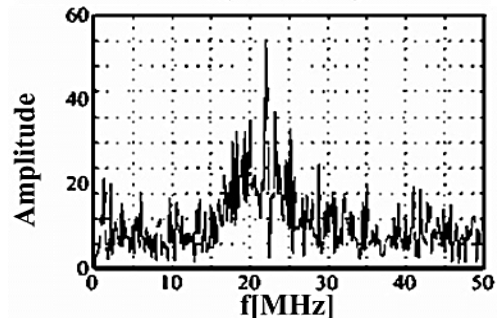
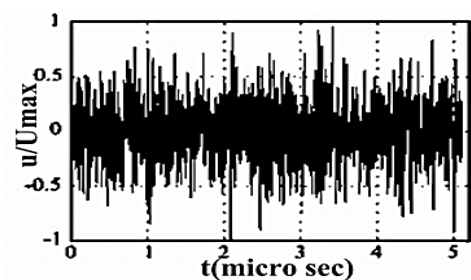
(الف)



(ب)

شکل (۲): (الف) نویز توزیع معکوس (ب) پاسخ فرکانسی

نویز الکترونیکی می‌تواند به صورت نویز سفید و با استفاده از توزیع دامنه گوسی تقریب زده شود. برای ساختن یک سیگنال فراصوتی حقیقی، نویزهای توزیع معکوس و نویز الکترونیکی به سیگنال مورد بررسی اضافه می‌شوند. در قسمت (الف) شکل (۳) نویز فراصوتی نمونه و در قسمت (ب) طیف فرکانسی مربوطه نشان داده شده است.



شکل (۳): نویز فراصوتی نمونه سمت چپ و پاسخ فرکانسی در سمت راست

با دامنه  $A \alpha$  که مقداری برابر با ۱ تا ۱۰٪ دامنه سیگنال برگشتی اولیه دارد، به سیگنال شبیه‌سازی اضافه می‌شود. کارایی کاهش نویز به وسیله دو پارامتر ارزیابی می‌شود. پارامتر اول وابسته به بهبود نسبت سیگنال به نویز بوده و با رابطه زیر به دست می‌آید.

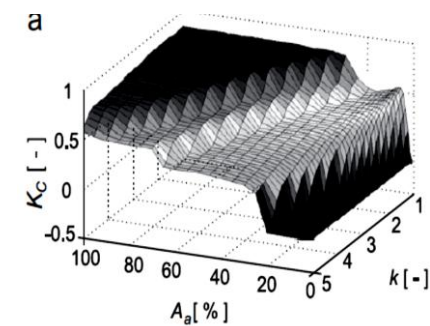
$$SNRE = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (17)$$

در این رابطه  $P_1$  توان مربوط به نویز شبیه‌سازی شده و  $P_2$  توان نویز پس از انجام عملیات کاهش نویز است. پارامتر دیگر انعکاس خطا را بر مبنای کاهش دامنه و تحریف شکل ارزیابی می‌کند. این پارامتر می‌تواند به صورت رابطه زیر نوشته شود.

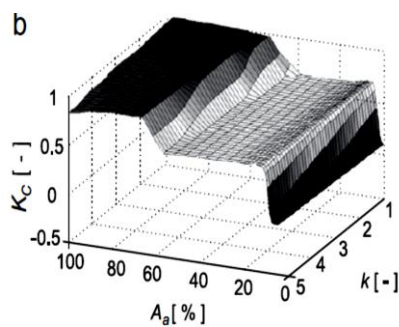
$$K_C = R_{A_o A_d}(0) \left( 1 - \frac{A_o - A_d}{A_o} \right) \quad (18)$$

در این رابطه  $R$  همبستگی،  $A_o$  و  $A_d$  دامنه‌های پیشینه انعکاس خطا، قبل و بعد از انجام عملیات کاهش نویز می‌باشند. در این مقاله ترکیب‌های مختلفی با سطوح آستانه مختلف، قوانین آستانه‌گیری و موجک‌های مادر گوناگون انجام شده است. بر مبنای این شبیه‌سازی‌ها، بهترین نتایج با استفاده از موجک مادر گسسته Meyer، آستانه‌گیری سخت و سطح آستانه مبتنی بر انحراف معیار استاندارد به دست می‌آید.

شکل‌های (۵) و (۶)، وابستگی پارامترهای SNRE و  $K_C$  را به دامنه‌های انعکاس خطا  $A_a$  و ضریب  $k$  در آستانه‌گیری سخت نشان می‌دهند.



(الف)



(ب)

شکل (۵): ارزیابی کاهش نویز DWT با  $K_C$ ، با استفاده از قانون آستانه‌گیری سخت - (الف) و (ب) MEAN+STD

سخت و نرم غلبه کرده‌اند. روش توافقی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{T}_{ij}^C = \begin{cases} 0 & |T_{ij}| < T \\ \text{sign}(T_{ij})(|T_{ij}| - \alpha T) & |T_{ij}| \geq T \end{cases} \quad (13)$$

بنابراین زمانی که اختلاف با ثابت  $\alpha$  به وجود آید، مصالح‌های بین آستانه‌گیری نرم و سخت به وجود خواهد آمد. اگر  $\alpha = 0$  باشد، معادله بیان‌گر روش آستانه‌گیری سخت و اگر  $\alpha = 1$  بیان‌گر روش آستانه‌گیری نرم خواهد بود. روش سفارشی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{T}_{ij}^{cu} = \begin{cases} T_{ij} - \text{sign}(T_{ij})(1 - \alpha)T & |T_{ij}| > T \\ 0 & |T_{ij}| \leq \tau \\ \alpha T \left( \frac{|T_{ij}| - \tau}{T - \tau} \right)^2 \left\{ (\alpha - 3) \left( \frac{|T_{ij}| - \tau}{T - \tau} \right) + 4 - \alpha \right\} & \text{other} \end{cases} \quad (14)$$

آستانه‌گیری نرم برای یک سیگنال فراصوتی مناسب نیست. زیرا علاوه بر نویز، دامنه انعکاس خطا نیز به دلیل کاهش ضرایب غیر صفر باقی‌مانده و صفر شدن آن‌ها کاهش می‌یابد. دامنه انعکاس خطا معمولاً برای اندازه‌گیری اندازه نقص استفاده می‌شود. در نتیجه کاهش دامنه مطلوب نمی‌باشد. در شبیه‌سازی انجام شده، فقط آستانه‌گیری سخت، توافقی و مشترک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. زمانی که قانون آستانه‌گیری انتخاب می‌شود، سطح آستانه در نهایت باید مشخص شود. روش‌های استاندارد، نتایج موثری را برای سیگنال فراصوتی نمونه تولید نمی‌کنند. وابسته به توزیع دامنه، یک سیگنال نمونه می‌تواند با استفاده از توزیع دنباله heavy tail مدل شود [۱۴]. تخمین‌گر سطح آستانه موثر برای این نوع سیگنال‌ها می‌تواند بر مبنای انحراف معیار  $\sigma$  (STD) انجام شود.

$$\hat{T}_{ij}^{std} = k\sigma = k \sqrt{\frac{1}{N_i - 1} \sum_{j=1}^{N_i} (T_{ij} - \bar{T})^2} \quad (15)$$

و یا انحراف معیار استاندارد با مقدار میانگین (MEAN+STD) باشد.

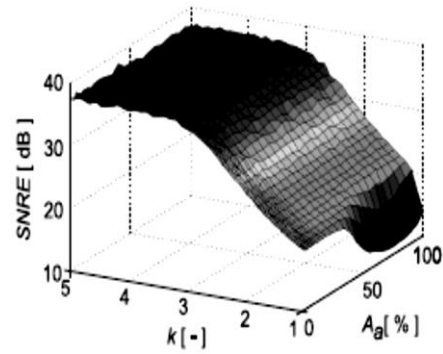
$$\hat{T}_{ij}^{ms} = \sqrt{(\mu_i + k\sigma_i)} \quad (16)$$

در این رابطه،  $N$  طول مربوط به هر سری از ضرایب جزئی  $J$  در سطح  $i$ ، ضریب وابسته به بیشترین مقدار سیگنال و  $\mu_i$  مقدار میانگین است. رابطه بین پارامترهای  $\alpha$ ،  $k$  و  $\tau$  به وسیله شبیه‌سازی مطالعه می‌شود. سطح تجزیه به صورت آزمایشی بر روی ۴ تنظیم می‌شود. در این بررسی سیگنال انعکاس، خطایی

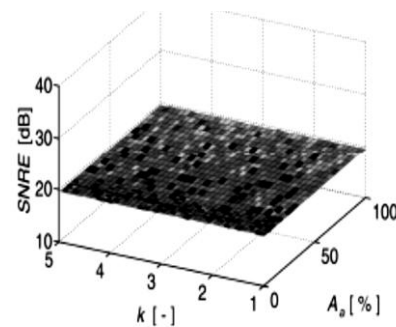
جدول (۲): کارایی آستانه‌گیری سخت برای تخمین‌گر سطح آستانه

Mother Wavelet	db2	db4	db6	dmey
max. Kc[-]	۰/۹۶۰	۰/۹۷۰	۰/۹۶۰	۰/۹۸۰
SNRE[dB]	۲۴/۷۰	۲۴/۵۸	۱۹/۳۱	۱۹/۷۲
min. Aa[%]	۱۳	۹	۲۰	۲۰
min. k[-]	۱/۳	۴/۵۰	۱/۴۱	۱/۴۱

نتایج دقیق‌تر و جزئی‌تری از روش کاهش نویز با استفاده از تبدیل موجک در شکل (۷) نشان داده شده است. مقادیر SNRE برای روش SWT بیشتر از روش‌های DWT و WP است اما در مورد SWT، دامنه‌های انعکاس خطا و دیوار پستی حتی برای دامنه‌های بسیار بزرگ تغییر شکل می‌یابند. این امر یک پدیده نامطلوب است که به دلیل طبیعت غیرخطی کاهش نویز با روش تبدیل موجک رخ می‌دهد.

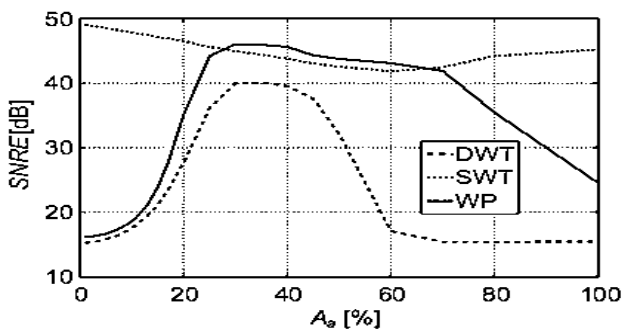


(الف)

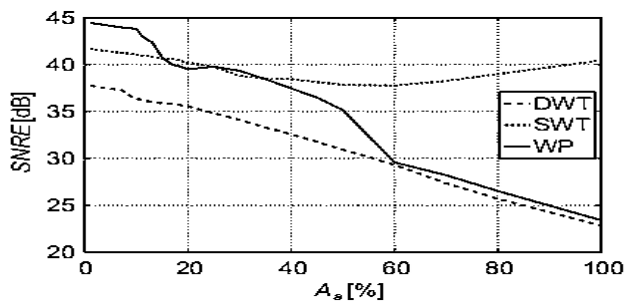


(ب)

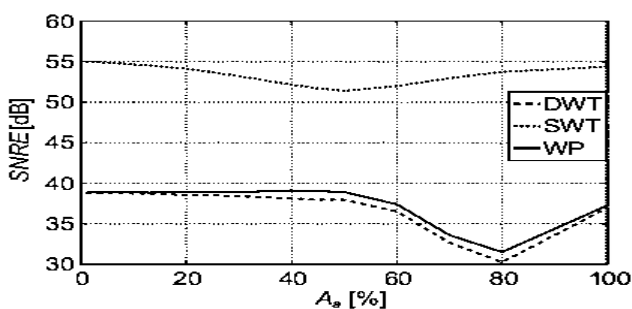
شکل (۶): ارزیابی کاهش نویز DWT با SNRE، با استفاده از قانون آستانه‌گیری سخت - الف. STD و ب. MEAN+STD.



الف: db4



ب: db6

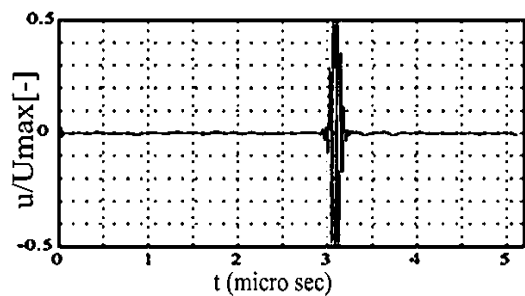


ارزیابی دقیق‌تر قانون‌های آستانه‌گیری و موجک مادر برای هر دو سطح آستانه‌گیری، STD و MEAN+STD در جدول‌های (۱)، (۲) و (۳) نشان داده شده است. همان‌گونه که در جدول‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است، کمترین دامنه انعکاس خطا که می‌تواند به صورت موثر آشکار شود برابر ۵٪ است. بنابراین انعکاس خطا در حالت کلی بدون تغییر باقی می‌ماند ( $k_c=0.980$ ).

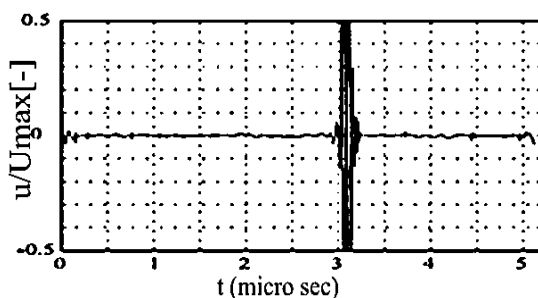
جدول (۱): کارایی آستانه‌گیری سخت برای تخمین‌گر سطح آستانه STD

Mother Wavelet	db2	db4	db6	dmey
max. Kc[-]	۰/۹۹۰	۰/۹۸۰	۰/۹۷۵	۰/۹۸۰
SNRE[dB]	۲۵/۹۰	۳۷/۷۰	۳۵/۱۵	۳۷/۵۰
min. Aa[%]	۹	۷	۹	۵
min. k[-]	۱/۳۱	۲	۱/۲	۱/۴

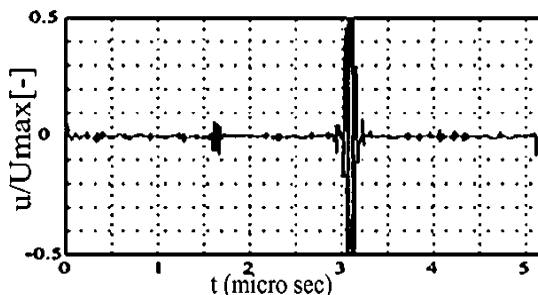




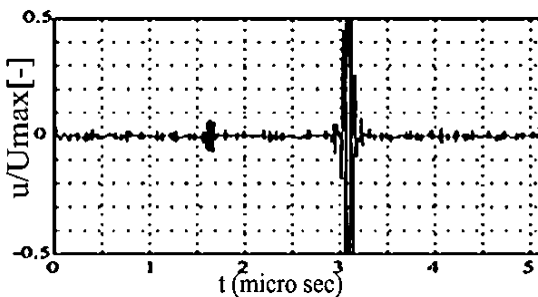
الف



ب



ج

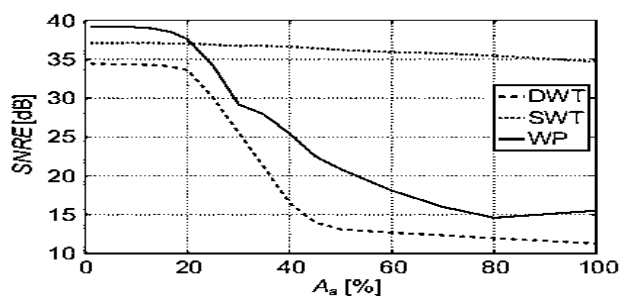


د

شکل (۸): سیگنال فراصوتی فیلتر شده با خطای انعکاس ۱۰٪ الف: SWT و haar ب: WP و db6 ج: WP و Dmey د: Dmey و db6

شکل (۸) نشان می‌دهد که با سیگنال برگشتی ۱۰٪ از انعکاس دیوار پشتی در موجک مادر haar و db6 امکان آشکارسازی خطا وجود ندارد. در شکل (۹)، یک سیگنال فراصوتی نشان داده شده است. این سیگنال به گونه‌ای شبیه‌سازی شده است که شبیه به داده‌های بازتابی یک نمونه ماده ناهمگون اندازه‌گیری شده است. این سیگنال با استفاده از

ج: haar



د: dmey

شکل (۷): برای دامنه‌های انعکاس خطای متفاوت- الف: db4، ب: db6، ج: dmey و د: haar

حفظ و نگهداری دامنه، یک نیاز ضروری برای پردازش سیگنال‌های فراصوتی است. زیرا دامنه سیگنال برگشتی از نقص، اندازه نقص موجود را تعیین می‌کند. نقص، اصلی‌ترین دلیل برای استفاده از روش‌های کاهش نویز است و روش‌های مختلف کاهش نویز برای پیدا کردن این‌که کدام روش برای آشکار کردن کوچک‌ترین دامنه سیگنال برگشتی از نقص مناسب است، باهم مقایسه می‌شوند. جدول (۳) کمترین دامنه‌های سیگنال برگشتی لازم را برای کاهش نویز موفق و آشکارسازی نقص نشان می‌دهد.

جدول (۳): کمترین دامنه‌های سیگنال برگشتی لازم برای آشکارسازی نقص

Mother Wavelet/Method	DWT[%]	WP[%]	SWT[%]
Haar	۵	۱۰	۱۴
db4	۸	۵	۱۴
db6	۱۰	۱۱	۱۶
Dmey	۵	۸	۱۴

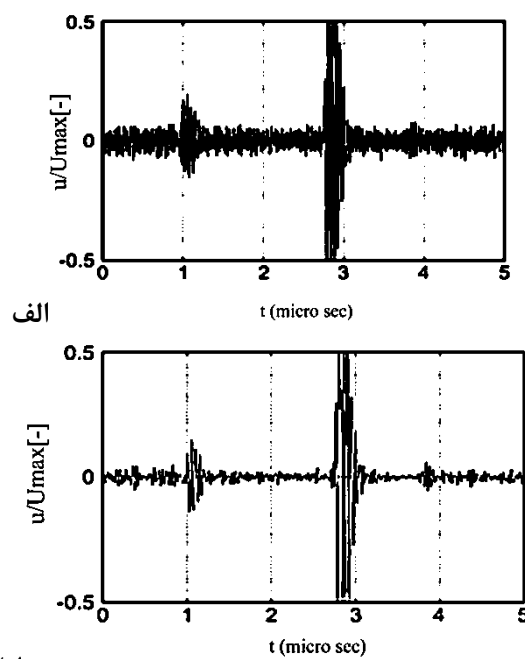
نتایج نشان می‌دهد که بهترین نتیجه‌ها با استفاده از موجک مادر Meyer به دست می‌آیند که توانایی آشکارسازی موفق ۵٪ دامنه سیگنال برگشتی از نقص موجود در ماده را دارد. زمانی که آشکارسازی سیگنال برگشتی محل نقص با روش WP در نظر باشد، موجک مادر Meyer بهترین روش برای کاهش نویز است. در این حالت SNRE بین ۱۵ تا ۴۰ دسی‌بل است. SNRE مربوط به روش‌های متداول آستانه‌گیری معمولاً دارای مقدار بیشینه‌ای برابر با ۳.۲ dB است. مثال‌هایی از روش‌های مختلف کاهش نویز با کاربرد موجک‌های مادر مختلف با سیگنال برگشتی ۱۰٪ در شکل (۸) نشان داده شده است.

لازم نمی‌باشند. تبدیل موجک یکی از روش‌های مناسب برای حذف نویز در سیگنال‌های فراصوتی است. انتخاب صحیح و بهینه فیلتر موجک، انتخاب نوع آستانه‌گیری و انتخاب روش تخمین مقدار آستانه، باعث کارایی بیشتر روش کاهش نویز خواهد بود. تبدیل موجک، مشابه تحلیل همبستگی است. زمانی که سیگنال ورودی متناسب با شکل موجک مادر باشد، نتیجه به‌صورت بیشینه خواهد بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده، از بین توابع موجک ممکن، تبدیل موجک Meyer بهترین تخمین را برای یک انعکاس فراصوتی فراهم می‌کند. در نتیجه کاهش نویز با استفاده از این روش منجر به بهینه‌ترین حالت کاهش نویز می‌شود. تاثیر عمده در کاهش نویز کلی ناشی از تخمین‌گر آستانه است. سیگنال‌های فراصوتی، شامل یک سری باریک از سیگنال‌هایی است که توزیع دامنه‌شان از قبل معلوم است. تخمین‌گرهای مرسوم که مبتنی بر داده‌های قبلی است بهتر از تخمین‌گرهایی که برای سیگنال‌های مشترک بسط داده شده‌اند، عمل می‌کنند.

## مراجع

- [1] Bayat, M.; Madani, M.H. "Loran Phase Code Revisited for Continuous Wave Interference Cancellation"; J. IET Sci. Measurement & Tech. 2016, 11, 322-330.
- [2] Bayat, M.; Madani, M.H. "Analysis of Cross-Rate Interference Cancellation by Use of a Novel Phase Code Interval in Loran Navigation System"; J. Institute of Navigation. 2017, 64, 365-376.
- [3] Bayat, M.; Madani, M.H. "Analysis and Simulation of a Hybrid Filter to Cancel Cross Rate Interference in Loran System"; J. Advanced Defence Sci. & Tech. 2017, 4, 51-60.
- [4] Bayat, M.; Madani, M.H. "Design and Simulation of a linear adaptive system to remove the CWI in Loran navigation system receivers"; J. Advanced Defence Sci. & Tech. 2018, 5, 50-62.
- [5] Christian, Sc.; Fredric, L. "Low-Complexity Adaptive Filtering Implementation for Acoustic Echo Cancellation"; J. IEEE, 2006, 5, 154-181.
- [6] Bayat, M.; Mazloum, J. "Design and Simulation of a Linear Adaptive System to Eliminate the Effect of Single-frequency Jammer in Warplane Data Link"; J. Aeronautical Eng. 2016, 18, 51-59.
- [7] Bayat, M.; Madani, M.H. "A New Algorithm For Synchronous Continuous wave interference Cancellation In Loran Navigation System"; J. Elec. Cyber. 2016, 9, 12-26.
- [8] Bayat, M.; Madani, M.H. "Navigation Accuracy Improvement Using a New Integrated Algorithm of TOA/TDOA in Ground-based Loran Systems"; J. Aeronautical Eng. 2015, 16, 37-60.

روش کاهش نویز WP و موجک مادر Meyer، آستانه‌گیری سخت و سطح آستانه‌گیری مبتنی بر انحراف معیار استاندارد فیلتر شده است. نویز الکترونیکی و توزیع معکوس، بدون تغییر در دامنه سیگنال برگشتی به صورت موثری کاهش یافته و محل نقص را آشکار می‌کند.



شکل (۹): الف: سیگنال فراصوتی حقیقی از ماده ناهمگون ب: سیگنال فراصوتی حقیقی فیلتر شده

عملکرد تبدیل موجک، مشابه تحلیل همبستگی است. اگر سیگنال ورودی متناسب با شکل موجک مادر باشد، نتیجه به‌صورت بیشینه خواهد شد. از بین توابع موجک ممکن، تبدیل موجک Meyer بهترین تخمین را برای یک انعکاس فراصوتی فراهم می‌کند. تاثیر عمده در کاهش نویز کلی، ناشی از تخمین‌گر آستانه است.

## ۵- نتیجه

یکی از معایب روش آزمون فراصوتی این است که، سیگنال‌های نمونه به‌دست آمده از این روش آلوده به نویز است. نویز باعث پوشیده شدن قسمت‌هایی از سیگنال می‌شود. این امر ممکن است به اشتباه بیان‌گر وجود نقص یا خطایی در قطعه باشد. لذا برای داشتن درک صحیحی از سیگنال به‌دست آمده و تحلیل درست نتایج، نیازمند حذف نویز در این سیگنال‌ها خواهیم بود. بسیاری از روش‌هایی که برای حذف نویز استفاده می‌شوند چون اطلاعات مفید خود سیگنال را نیز از بین می‌برند، دارای کارایی

- [9] Bayat, M.; Madani, M.H. "A Combined Improved Algorithm to Estimating The Delay of Sky waves In Loran c Receiver"; J. Elect . Cyber . 2014, 4, 54-81.
- [10] Bayat, M.; Kadivar, A.; Radmanesh, H. "A New Algorithm Based on Signal Parametric Models for Estimating the Spectral of Non-Gaussian Noisy Signal"; J. Tabriz Electrical Eng (TJEE). 2018, 47, 51-63.
- [11] Graps, A. "An introduction to wavelets"; J. IEEE Comput Sci and Eng. 1995, 2, 50-61.
- [12] Matz, V.; Kreidl, M.; Šmíd, R. "Signal Separation in Ultrasonic Non-Destructive Testing"; J. Acta Polytechnica. 2007, 47, 81-94.
- [13] Fugal, D. L. "Conceptual Wavelet in Digital Signal Processing"; J. Space & Signals Tech. 2006, 41, 60-73.
- [14] Matz, V.; Kreidl, M.; Šmíd, R. "Signal-to-Noise Ratio Improvement based on the Discrete Wavelet Transform in Ultrasonic Defectos copy"; J. Acta Polytechnica. 2004, 44, 25-32.
- [15] Ghiseok, K.; Seungik, B.; Jongmin, P.; Kyung.Young, J. "Analysis of transmitted ultrasound signals through apples at different storage times using the continuous wavelet transformation"; J. Precision Eng & Manufacturing. 2012, 13, 1949–1954.
- [16] Xianfeng, F.; Ming, J. Z.; Xiaodong, W. "Identification of weak ultrasonic signals in testing of metallic materials using wavelet transform"; J. Smart. Mater. Struct. 2006, 15, 1531–1539.
- [17] Song, Sh. p.; Que, P.w. "Wavelet based noise suppression technique and its application to ultrasonic flaw detection"; J. Ultrasonics. 2006, 46, 188–193.
- [18] M. A. Rodriguez, J.L. SAN EMETERIO, E. PARDO, A. RAMOS, "Ultrasonic Grain Noise Reduction using Wavelet Processing. An Analysis of Threshold Selection Rules", Ultrasonics, 42 (2004), pp. 847-851.