



اعمال روش SURE-LET یک‌بعدی با استفاده از موجک‌های مختلف به منظور تضعیف نوفه‌های تصادفی مقاطع لرزه‌ای

رضا لطیفی راد^۱، علیرضا گودرزی^{۲*} و محمد رضا سپهوند^۲

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان
۲- استادیار، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۲؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۲۰

* نویسنده مسئول مکاتبات: a.goudarzi@kgut.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

داده‌های لرزه‌ای بازتابی همواره شامل انواعی از نوفه از جمله نوفه‌های ناهمدوس (تصادفی) و همدوس می‌باشند. نسبت سیگنال به نوفه پایین؛ مراحل پردازش به خصوص برانبارش و مهاجرت را با مشکل مواجه می‌کند و در نهایت ممکن است منجر به یک تصویر غیر قابل تفسیر از ساختارهای زمین شود. از آنجا که فرض اساسی تبدیل فوریه پایا بودن سیگنال است، بنابراین برای سیگنال‌های ناپایا کاملاً کارا نیست. با توجه به این‌که تبدیل موجک، تابع را در حیطه زمان و فرکانس با استفاده از تابع موجک همزمان نشان می‌دهد؛ بنابراین بر محدودیت‌های تبدیل فوریه غلبه کرده است. در این مقاله تلاش شده است تا روش نوفه‌زدایی SURE-LET در حوزه تبدیل موجک گسسته متعامد کاهشی و با استفاده از موجک‌های مختلف، به منظور تضعیف نوفه‌های تصادفی اعمال شود. در روش SURE-LET از هرگونه فرضیه‌ی پیشین بر روی سیگنال‌های عاری از نوفه اجتناب می‌گردد. در واقع روش SURE-LET به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود: تضعیف‌کننده‌ی موجک که شامل بسط خطی توابع آستانه‌گذاری (LET) درون مقیاس است. سپس پارامترهای خطی برای به حداقل رساندن خطای ناریب اشتین (SURE)، بین داده‌های نوفه‌ای و عاری از نوفه، حل می‌شوند. با توجه به فرم درجه‌ی دوم برآورد MSE، پارامترها به راحتی با حل یک سیستم معادلات خطی، بهینه‌سازی می‌شوند. نتایج اعمال روش SURE-LET با موجک‌های مختلف نشان می‌دهد که موجک‌های سیملت و کوئفلت خروجی بهتری نسبت به سایر موجک‌ها دارند. با توجه به میزان حفظ سیگنال در کنار تضعیف نوفه برتری روش SURE-LET بر روش‌های آستانه‌گذاری نرم و واهمامیخت حوزه $f-x$ نشان داده شده است.

نوفه تصادفی
تبدیل موجک
آستانه‌گذاری
برآورد خطای ناریب اشتین
بسط خطی آستانه

معرفی می‌گردد. در نهایت روش SURE-LET با استفاده از موجک‌های مختلف بر داده مصنوعی و میدانی اعمال می‌گردد. مقایسه اعمال روش‌های آستانه‌گیری بر داده‌های رادار نفوذی به زمین^۴ (GPR) که مطابق انتظار و به تبع آن برای داده‌های لرزه‌ای نیز حاکم است؛ توسط اسکویی و همکاران (۲۰۱۵) ارائه شده است.

۲- تبدیل موجک گسسته کاهشی (DDWT)

مالات در سال ۱۹۸۹ تبدیل موجک گسسته کاهشی را ارائه داد. در این روش به منظور به دست آوردن ضرایب تبدیل موجک از دو فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر استفاده می‌شود (دابچی^۵، ۱۹۸۸)؛ به این صورت که بعد از اعمال در هر سطح تجزیه، تعداد نمونه‌ها کاهش می‌یابد (شکل ۱). با اعمال فیلتر بالاگذر h بر سیگنال گسسته (x) ، زیرباند جزئیات (d) ، که شامل اطلاعات فرکانس بالا است، ایجاد می‌شود (دابچی^۵، ۱۹۸۸):

$$y_a[n] = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} x[k]h[n-k] \quad (1)$$

با اعمال فیلتر پایین‌گذر g ، زیرباند کلیات (a) ، که شامل اطلاعات فرکانس پایین است، ایجاد می‌شود (دابچی^۵، ۱۹۸۸):

$$y_a[n] = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} x[k]g[n-k] \quad (2)$$

با اعمال تبدیل موجک گسسته بر زیرباند کلیات، زیرباند کلیات بار دیگر به دو بخش a و d تجزیه می‌گردد.

تبدیل‌های متعامد یک دسته مهم از تبدیل‌های خطی هستند. به طور کلی یک تبدیل خطی متعامد است؛ اگر $W^{-1} = W'$. که W ماتریس تبدیل و W' ترانزپوز آن است. اکنون دو خاصیت مهم تبدیل‌های متعامد که در نوفه‌زدایی کاربرد دارد را بررسی می‌کنیم.

الف) تبدیل‌های متعامد، فاصله اقلیدسی را حفظ می‌کنند. اگر T متعامد باشد، برای دو بردار x و y داریم (هاشمی^۶، ۲۰۱۰):

$$\|W(x-y)\| = \|x-y\| \quad (3)$$

این بدان معناست که فاصله بین دو بردار در حوزه تبدیل و حوزه اصلی، یکسان است. در نتیجه، یک کمیت را می‌توان به عنوان ارزیابی خطا بین سیگنال اصلی و سیگنال برآورد شده، در هر دو حوزه به دست آورد (لوزیر و همکاران، ۲۰۰۷).

ب) تبدیل متعامد یک نوفه سفید، سفید است. بردار تصادفی با میانگین صفر $\eta \in \mathbb{R}^N$ ، یک نوفه سفید است، اگر ماتریس خود همبستگی^۶ آن، $E[\eta\eta'] = \sigma_\eta^2 I_N$ باشد. از طرف دیگر اگر W متعامد باشد، $v = W\eta$ یک نوفه سفید است (هاشمی^۶، ۲۰۱۰)، زیرا:

$$E[vv'] = E[W\eta\eta'W'] = WE[\eta\eta']W' = \sigma_\eta^2 I_N \quad (4)$$

برداشت داده‌های لرزه‌ای با نسبت سیگنال به نوفه بالا هدف عملیات لرزه‌نگاری است. حضور نوفه در داده‌های لرزه‌نگاری امری اجتناب‌ناپذیر است (ایلماز، ۲۰۰۱). نوفه‌های لرزه‌ای به عنوان یک پدیده نامطلوب در داده‌های لرزه‌نگاری مشاهده می‌شوند. برای بهبود نسبت سیگنال به نوفه بالا، می‌توان از دو روش استفاده کرد: الف) تغییر پارامترهای عملیاتی لرزه‌نگاری و ب) پردازش داده‌ها به منظور کاهش نوفه. کاهش نوفه به منظور افزایش نسبت سیگنال به نوفه، در پردازش داده‌های لرزه‌ای بسیار مهم است. در این راستا، بیشتر روش‌ها داده‌ها را به حوزه دیگری انتقال می‌دهند؛ تا سیگنال و نوفه از هم قابل تفکیک باشند. سپس با اعمال روشی اقدام به تضعیف نوفه می‌نمایند. بنابراین یافتن یک حوزه تبدیلی که سیگنال و نوفه به خوبی از هم قابل تفکیک باشند، یکی از اهداف اصلی متخصصان است (البوس و همکاران، ۲۰۰۸). از جمله حوزه‌های تبدیلی به منظور تضعیف نوفه می‌توان به $k-l$ ، $f-k$ ، تبدیل کرولت و حوزه‌های تبدیل زمان-فرکانس $(f-t)$ مانند تبدیل موجک اشاره نمود. فیلترهای متعددی برای تضعیف نوفه تصادفی بکار رفته‌اند از جمله فیلتر پیشگو در حوزه $f-x$ (کانالز، ۱۹۸۴)، ضرایب همبستگی فیلترهای $f-x$ و $k-f$ (آلسدورف، ۱۹۹۷)، فیلتر پیشگو در حوزه تبدیل کسینوس گسسته (لو و همکاران، ۲۰۰۷)، تبدیل کرولت (نیلمانی و همکاران، ۲۰۰۸)، روش تبدیل موجک به منظور نوفه‌زدایی، با استفاده از روش WDGA (گودرزی و همکاران، ۲۰۱۳)، تضعیف نوفه اتفاقی در داده‌ای لرزه‌ای با استفاده از تجزیه مد تجربی (روشندل کاهو و نجاتی کلاته، ۱۳۹۰) و کاربرد تجزیه مقدار منفرد در تضعیف نوفه تصادفی در داده‌های مصنوعی و واقعی لرزه‌ای (مرتضوی و جواهریان، ۱۳۹۳).

برای رفع محدودیت‌های تبدیل فوریه، به خصوص به منظور رفع ناپایا بودن سیگنال، روش تبدیل فوریه‌ی زمان کوتاه^۱ (STFT) توسط گابور (۱۹۴۶) ارائه گردید. مورلت (۱۹۸۱) نشان داد که به علت متغیر بودن پهنای پنجره، تبدیل موجک می‌تواند توزیع زمانی فرکانس را نشان دهد. با ارائه‌ی تبدیل موجک، روش‌های نوفه‌زدایی مختلفی مبتنی بر آستانه‌گذاری^۲ ضرایب موجک پیشنهاد گردید. تئوری آستانه‌گذاری به منظور تضعیف نوفه در حوزه موجک به وسیله دونوهو و جانستون (۱۹۹۴) ارائه شده است. روش SURE-LET توسط لوزیر و همکاران (۲۰۰۷) به منظور نوفه‌زدایی تصاویر بکار رفت. در این مقاله روش SURE-LET در حوزه تبدیل موجک گسسته کاهشی و با استفاده از موجک‌های مختلف بر داده‌های مختلف اعمال می‌شود. بدین منظور ابتدا تبدیل موجک گسسته کاهشی^۳ معرفی می‌گردد. سپس موجک‌های مورد استفاده در این مقاله شرح داده خواهد شد. در بخش بعدی روش SURE-LET

⁴ - Ground Penetrating Radar

⁵ - Daubechies

⁶ - Autocorrelation

¹ - Short-Time Fourier Transform

² - Thresholding

³ - Decimated Discrete Wavelet Transform

شناخته می‌شود (دابیچی، ۱۹۹۲). خانواده موجک دابیچی را با dbN نمایش می‌دهند؛ که N نمایشگر مرتبه موجک بوده و از روی تعداد نقاط فیلتر به دست می‌آید. به این صورت که برای ساختن فیلترها به $2N$ نقطه نیاز است؛ که با حل شرایطی از قبیل تعامد توابع مقیاس با هم، شرط تعامد تابع مقیاس با تابع موجک، شرط همواری، شرط تعامد توابع موجک با هم و... به دست می‌آیند (گودرز، ۱۳۹۲). قابل ذکر است که $db1$ همان موجک هار است. موجک دابیچی ناهموار است. با این حال با افزایش مرتبه، موجک هموارتر شده و نظم، قاعده و تقارن بیشتری پیدا می‌کند. این موضوع را می‌توان در شکل ۶ مشاهده نمود. پهنای موجک وابسته به مرتبه آن است و برابر است با $2N-1$. موجک‌های دابیچی طویل بوده و تفکیک فرکانسی بهتری را فراهم می‌کنند. در حالی که تفکیک زمانی در آن‌ها کاهش می‌یابد. به غیر از موجک هار، سایر موجک‌های دابیچی فاز خطی ندارند. تعداد ممان‌های محوشدنی (ممان‌های صفر) در موجک دابیچی N است (فوگال، ۲۰۰۹).

این موجک‌ها دارای تقارن بیشتری نسبت به موجک‌های دابیچی می‌باشند (شکل ۶). با افزایش مرتبه، موجک متقارن‌تر می‌شود؛ در نتیجه فاز آن نیز خطی‌تر می‌گردد. موجکی متعامد بوده و دارای همان روابط متعامدی موجک دابیچی است. مشکل موجک‌های دابیچی در فشرده‌سازی ضرایب کلیات باعث به وجود آمدن موجک‌های کویفلت گردید. کویفمن^۷ برای حل این مشکل، پیشنهاد کرد تا تعداد ممان‌های محو برای تابع مقیاس موجک را افزایش دهند. به این ترتیب که تعداد نقاط ممان محو برای تابع کویفلت، $2N$ است (دابیچی، ۱۹۹۲). بنابراین برای ساختن فیلترها به $6N$ نقطه نیاز است. این موجک‌ها همانند موجک‌های سیملت، نسبت به موجک دابیچی از تقارن بهتری برخوردار می‌باشند. دیگر ویژگی مهم این موجک‌ها، سرعت بالای صفر شدن تابع مقیاس آن است. در واقع با میل نمودن t به سمت بی‌نهایت، تابع مقیاس موجک‌های کویفلت به سرعت به صفر میل می‌کنند؛ بنابراین برای فشرده‌سازی مناسب است.

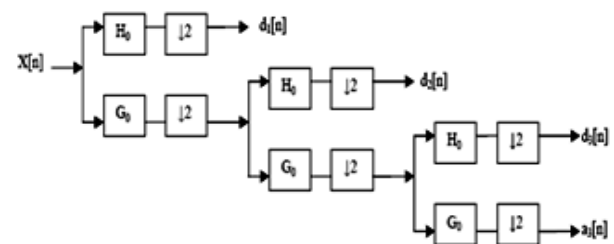
۴- روش SURE-LET

در روش SURE-LET، از هرگونه فرضیه پیشین بر سیگنال‌های عاری از نوفه اجتناب می‌گردد. این روش به وسیله محاسبه برآورد ناریب خطای میانگین مربعی بین سیگنال نوفه‌ای و سیگنال نوفه‌زدایی شده، امکان‌پذیر می‌گردد. روش‌های دیگری هم از SURE استفاده می‌کنند. برای مثال حساسیت تابع آستانه‌گذاری نرم به حد بالای آستانه، در کمینه‌سازی، نتایج مناسبی به بار نمی‌آورد. لوزیر و همکاران (۲۰۰۷) برای بهینه‌سازی SURE، اصل دیگری را به آن اضافه نمودند؛ به گونه‌ای که فرآیند تضعیف نوفه را به صورت یک ترکیب خطی عناصر نوفه‌زدایی (LET) بیان نمودند. در واقع آن‌ها با

این خاصیت برای تضعیف نوفه گاوسی سفید مهم است؛ زیرا اجازه می‌دهد تا نوفه را در حوزه تبدیل با همان آمار و ویژگی‌ها در نظر بگیریم (لوزیر و همکاران، ۲۰۰۸). با اعمال محدودیت‌های خاصی بر فیلترهای تبدیل موجک گسسته، می‌توان تبدیل موجک گسسته متعامد را به دست آورد. تبدیل موجک گسسته، متعامد است؛ اگر و فقط اگر تابع انتقال فیلتر شرایط زیر را داشته باشد (هاشمی، ۲۰۱۰):

$$H_0(z)H_0(z^{-1}) + H_0(-z)H_0(-z^{-1}) = 1 \quad (5)$$

$$H_1(z) = -z^{2k+1}H_0(-z-1) \quad (6)$$



شکل ۱: درخت تجزیه مالات، تجزیه تا سه سطح (تانسر، ۲۰۰۶).

۳- موجک

موجک‌های متعامد دارای ویژگی‌های رایج و مشترک زیر هستند (فوگال، ۲۰۰۹):

- این موجک‌ها شامل توابع مقیاس و موجک می‌باشند.
- توانایی کاربرد در DWT را دارند.
- فیلترهای موجک‌های متعامد هنگام استفاده در DDWT، قابلیت لغو دگرنامی حاصل از کاهش نمونه‌ها را دارند.

این موجک اولین و ساده‌ترین موجک اصلی (مادر) با دوره محدود، متعامد، دودویی و فشرده است. موجک مادر $(\Psi(t))$ و تابع مقیاس هار $(\Phi(t))$ با روابط زیر نشان داده می‌شود (تانسر، ۲۰۰۶).

$$\Psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 1/2, \\ -1 & 1/2 \leq t < 1, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$\Phi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 1, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

با توجه به روابط فوق، مشاهده می‌شود که موجک هار در هر تغییر مقیاس به اندازه‌ی ۱/۲ کاهش مقیاس می‌یابد؛ یا به عبارت دیگر باریک‌تر می‌شود. سپس هر موجک تغییر مقیاس یافته (باریک شده)، متناسب با عرض انتقال می‌یابد. همان‌طور که می‌بینیم موجک هار ناپیوسته است، بنابراین مشتق‌پذیر نیست. این محدودیت موجک هار است. دارای فاز خطی بوده و پادمتقارن هستند. به علت طول زمانی کوتاه، برای بررسی پدیده‌های زمان کوتاه و یافتن لبه‌ها مناسب می‌باشند.

این موجک توسط دابیچی ارائه شد، که با نام خودش نیز

⁷- Coifman

$$\sum_{k=1}^K \varphi_k(y) \varphi_k(y) a_k = \varphi_k(y) y - \sigma^2 \operatorname{div} \{ \varphi_k(y) \} \quad (14)$$

و یا به صورت ماتریسی (ژیو^۸ و همکاران، ۲۰۱۲):

$$\sum_{k=1}^K [M]_{k,i} a_k = [c]_i \rightarrow Ma = c \quad (15)$$

که $a = [a_1, \dots, a_K]^T$ و $c = [c_1, \dots, c_K]^T$ می‌باشند. در رابطه ۱۵ دسترسی به داده‌های نوفه‌ای (y) ، واریانس نوفه و توابع آستانه‌گذاری (φ_k) (که در ادامه معرفی می‌شود) ممکن است. بنابراین سیستم خطی فوق برای یافتن a از طریق رابطه زیر به راحتی قابل حل است (لوزیر و همکاران، ۲۰۱۰):

$$a = M^{-1}c \quad (16)$$

برای یافتن دیورژانس رابطه ۱۰ از مقاله بلو و لوزیر (۲۰۰۷) استفاده شد.

مباحث ریاضی بیشتر درباره این روش در پیوست آمده است.

۴-۲- انتخاب تابع آستانه

در قسمت قبل فرم کلی توابع نوفه‌زدایی و نحوه محاسبه آن ارائه شد (رابطه ۱۳). در این بخش باید توابع مناسب برای آستانه‌گذاری (φ) معرفی شوند. این تابع باید شرایط زیر را داشته باشند (بلو و لوزیر، ۲۰۰۷):

- مشتق‌پذیر: که شرط اساسی در انتخاب تابع مشتق‌پذیر $\theta(y)$ است

- رفتار خطی برای ضرایب بزرگ: وقتی یک ضریب بزرگ باشد، نیازی به تغییر آن نیست.

لوزیر و همکاران (۲۰۰۷)، این تابع را به شکل زیر انتخاب نمودند:

$$\theta_0(y; a) = \left(a_1 + a_2 e^{-\frac{y^2}{12\sigma^2}} \right) y \quad (17)$$

در این مقاله، روش SURE-LET مبتنی بر آستانه‌گذاری درون مقیاسی ارائه می‌شود. خروجی اجرای تبدیل موجک بر سیگنال را در بانک فیلتر به شکل LH (بالاگذر) و LL (پایین‌گذر) نمایش می‌دهند. اگر بین این فیلترهای پایین و بالاگذر تأخیر گروهی^۹ وجود نداشته باشد، هیچ انتقالی بین خصوصیات LL و LH روی نمی‌دهد. در حالت کلی تأخیر گروه روی می‌دهد. به همین منظور، فیلتر پیشگو y_p ارائه می‌گردد. به منظور یافتن فیلتر پیشگوی y_p ، باید فیلتر میان‌گذر (W_{LH}) ، بر زیرباند پایین‌گذر LL اعمال شود (لوزیر و همکاران، ۲۰۰۶) (شکل ۲).

لوزیر و همکاران (۲۰۰۷) برای ساختن فیلتر میان‌گذر (W_{LH}) ، دو فیلتر $H(z)$ و $G(z)$ را به عنوان جبران تأخیر گروه معرفی کردند؛ مشروط بر این که تأخیر گروه خارج قسمت فیلتر $\frac{H(z)}{G(z)}$ صفر باشد. برای مثال اگر و فقط اگر یک فیلتر متقارن (یا پادمقارن) به شکل

ترکیب دو اصل SURE و LET، الگوریتمی بنا نهادند که صرفاً با حل یک سیستم معادلات خطی، اقدام به تضعیف نوفه می‌نماید.

۴-۱- زمینه نظری

در روش SURE-LET، خطا با استفاده از خطای میانگین مربعی (MSE) محاسبه می‌شود (لوزیر و بلو، ۲۰۰۸).

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\hat{x}_n - x_n|^2 \quad (9)$$

یافتن یک برآورد خطی \hat{X} مطلوب از X هدف اصلی است. با توجه به این که دسترسی به داده اصلی و عاری از نوفه X غیرممکن است؛ بنابراین باید تابعی پیدا کرد که فقط وابسته به داده نوفه‌ای y باشد. لوزیر و همکاران (۲۰۰۶) این تابع را به شکل خطی $\hat{X} = \theta(y) = (\theta_n(y))_{n=1,2,\dots,N}$ تعریف کردند. این تابع باید شرایط زیر را داشته باشد (بلو و لوزیر، ۲۰۰۷):

$$\mathcal{E} \left\{ \left| \frac{\partial \theta_n(y)}{\partial y_n} \right| \right\} < \infty \quad \text{for } n=1, \dots, N \quad (10)$$

آنگاه با توجه به فرض نوفه گاوسی سفید مقدار مورد انتظار $\theta(y)x$ و $\theta(y)y - \sigma^2 \operatorname{div} \{ \theta(y) \}$ با هم برابر است (بلو و لوزیر، ۲۰۰۷):

$$\left\{ \sum_{n=1}^N \theta_n(y) x_n \right\} = \mathcal{E} \left\{ \sum_{n=1}^N \theta_n(y) y_n \right\} - \sigma^2 \mathcal{E} \left\{ \sum_{n=1}^N \frac{\partial \theta_n(y)}{\partial y_n} \right\} \quad (11)$$

در نتیجه برآورد خطای نارایب اشتین (SURE) به شکل زیر به دست می‌آید (بلو و لوزیر، ۲۰۰۷):

$$\epsilon = \frac{1}{N} \|\theta(y) - y\|^2 + \frac{2\sigma^2}{N} \operatorname{div} \{ \theta(y) \} - \sigma^2 \quad (12)$$

با توجه به رابطه فوق مشاهده می‌شود که در عمل به منظور برآورد خطای نارایب اشتین، فقط عبارتهایی برآورد می‌شوند که وابسته به تابع نوفه‌زدایی $\theta(y)$ و داده نوفه‌ای y باشند. چون در بحث حذف نوفه از سیگنال، با تعداد نمونه‌های بزرگی سر و کار داریم (N بزرگ است)، بنابراین ϵ دارای یک واریانس کوچک است (در حدود $1/N$). بنابراین این برآورد نزدیک به مقدار مورد انتظار است و MSE صحیح فرآیند حذف نوفه است. بنابراین به منظور برآورد SURE، فقط عبارتهایی که وابسته به تابع نوفه‌زدایی $F(y)$ و داده‌های نوفه‌ای y باشند، برآورد می‌شوند.

در روش SURE-LET، فرآیند نوفه‌زدایی $\theta(y)$ به صورت یک ترکیب خطی از توابع آستانه‌گذاری $\varphi_k(y)$ تعریف می‌گردد (لوزیر و همکاران، ۲۰۰۷):

$$\theta(y) = \sum_{k=1}^K a_k \varphi_k(y) \quad (13)$$

با توجه به این که SURE در رابطه ۱۳ به فرم درجه دوم است، بنابراین ضرایب a_k را برای $k = 1, 2, \dots, K$ می‌توان با سیستم معادلات خطی زیر نشان داد (لوزیر و همکاران، ۲۰۰۷):

⁸- Xue

⁹-Group delay

حد ممکن بدون آسیب زدن به سیگنال، نوفه‌ها تضعیف شوند. بدین منظور کمیتی‌های سیگنال حفظ شده (SP) و نوفه تضعیف شده (NR) برای بیان فرآیند نوفه‌زدایی مناسب می‌باشند.

$$SP = 100 \times \left(\frac{\sum(\hat{x}x)}{\sum(x^2)} \right) \quad (21)$$

$$NR = 100 \times \left(1 - \sqrt{\frac{\sum(x - \hat{x}/SP)^2}{\sum(\text{Noise})^2}} \right) \quad (22)$$

برای مقایسه بهتر، خروجی روش SURE-LET به منظور ارزیابی روش، مقطع لرزه‌ای مصنوعی دو بعدی با ۲۵۶ ردلرزه و با فاصله نمونه‌برداری ۰/۰۰۴ ثانیه و با استفاده از موجک ریکر با فرکانس مرکزی ۲۵ هرتز تولید شده است (شکل ۳-الف). مقطع یاد شده دارای پنج رویداد با شیب‌های مختلف است. با افزودن نوفه تصادفی، مقطع آغشته به نوفه با نسبت سیگنال به نوفه ۲/۵۳- دسی‌بل ایجاد می‌شود. نتایج برای موجک و کوئفلت، سیملت و دابیچی به ترتیب در جدول ۱، ۲ و ۳ به نمایش در آمده است. برای مدل ۱ موجک‌های کوئفلت، نتایج بسیار نزدیکی به هم دارند، با این وجود موجک coif4 دارای نتایج بهتری نسبت به سایر موجک‌های کوئفلت است. در شکل (۳-ج) خروجی روش ارائه شده با استفاده از موجک coif4 به نمایش در آمده است. در میان موجک‌های سیملت، موجک‌های سیملت مرتبه ۶ تا ۲۰ نتایج بالا و بسیار نزدیک به هم را دارند. با این حال موجک‌های sym8 و sym16 بهترین نتایج را دارند (جدول ۲). شکل (۳-ه) خروجی موجک sym16 را نشان می‌دهد. این موجک بهترین خروجی را در بین تمامی موجک‌ها دارد. موجک‌های دابیچی مرتبه ۴ تا ۱۸ نیز نتایج نزدیک به هم را دارند. در میان موجک‌های دابیچی موجک db10 بهترین خروجی را دارد (جدول ۳ و شکل ۳-ز). موجک har (db1) پایین‌ترین خروجی را در میان تمام موجک‌ها دارد. شکل (۳-ط) کیفیت پایین نوفه‌زدایی موجک har را نشان می‌دهد. در اکثر موارد، موجک سیملت و کوئفلت نتایج بهتری نسبت به موجک دابیچی می‌دهد. به خصوص برای کمیت نسبت سیگنال به نوفه، موجک سیملت و کوئفلت نسبت به موجک دابیچی، نتایج به مراتب بهتری را ارائه می‌دهند. برای مدل ۱ موجک sym16، دسی‌بل ۰/۵۳ و موجک coif4، دسی‌بل ۰/۷۵. دسی‌بل خروجی بهتری نسبت به موجک db10 دارند.

شکل (۴-الف) یک مقطع اعوجاجی مصنوعی دو بعدی با ۱۲۸ ردلرزه و با فاصله نمونه‌برداری ۰/۰۰۲ ثانیه را نشان می‌دهد. با افزودن نوفه تصادفی به مقطع عاری از نوفه، مقطع مصنوعی آغشته به نوفه با نسبت سیگنال به نوفه ۱/۱- دسی‌بل ایجاد می‌شود (شکل ۴-ب). برای مدل ۲، نتایج تمامی موجک‌ها به هم بسیار نزدیک است (جدول ۱، ۲ و ۳). موجک coif5 در میان موجک‌های کوئفلت، موجک sym9 و sym17 در بین موجک‌های سیملت و در نهایت

$R(z) = \pm R(z^{-1})$ وجود داشته باشد، آنگاه $H(z) = G(z)R(z)$. لوزیر و بلو (۲۰۰۸) نحوه ساخت فیلتر جبران تأخیر گروه^{۱۰} (GDC) را در بانک فیلتر متعامد به شکل زیر تعریف نمودند.

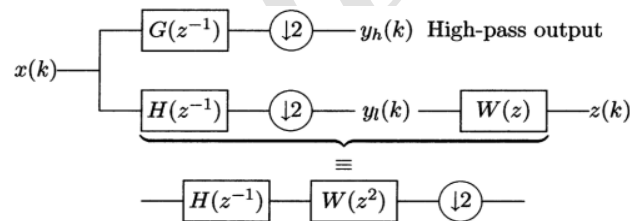
$$W(z^2) = G(z^{-1})G(-z^{-1})(1 + \epsilon z^2)R(z^2) \quad (18)$$

که در آن $\epsilon = \pm 1$ و $R(z) = R(z^{-1})$ است.

لوزیر و همکاران (۲۰۰۷) با ادغام فیلتر پیشگو در رابطه ۱۷، تابع آستانه‌گذاری درون مقیاس را با رابطه بعد نمایش دادند.

$$\theta(y, y_p; a, b) = e^{-\frac{y_p^2}{12\sigma^2}} \left(a_1 + a_2 e^{-\frac{y^2}{12\sigma^2}} \right) y + \left(1 - e^{-\frac{y_p^2}{12\sigma^2}} \right) \left(b_1 + b_2 e^{-\frac{y^2}{12\sigma^2}} \right) \quad (19)$$

که در این رابطه مقادیر a و b با روش ارائه شده در رابطه ۱۶ محاسبه می‌شوند.



شکل ۲: نحوه ساخت فیلتر پیشگو در یک جهت برای بانک فیلتر کاهشی (لوزیر و همکاران، ۲۰۰۶).

برای پیاده‌سازی روش‌ها پارامترهای واهمامیخت حوزه $f-x$ برای داده‌ها عبارت‌اند از: طول عملگر ۲۰، پارامتر منظم سازی ۰/۰۱، فرکانس کمینه ۱ هرتز و فرکانس‌های بیشینه برای داده‌های با نمونه‌برداری ۰/۰۰۴ ثانیه ۱۲۰ هرتز و ۰/۰۰۲ ثانیه ۲۲۰ هرتز و برای داده واقعی دریایی ۲۵۰۰۰ هرتز در نظر گرفته شد. پارامترهای ورودی برای روش SURE-LET عبارت‌اند از انحراف معیار نوفه که برای هر داده تخمین زده شد و همچنین تعیین نوع موجک و تعداد سطح تجزیه که ۴ در نظر گرفته شد.

۴-۳- اعمال روش SURE-LET بر مقطع‌های لرزه‌ای مصنوعی با موجک‌های مختلف

در این بخش روش SURE-LET و واهمامیخت حوزه $f-x$ بر مقطع‌های لرزه‌ای مصنوعی و با موجک‌های مختلف اعمال می‌شود. برای مقایسه نتایج از معیار SNR استفاده خواهد شد (پیپزوریکا و همکاران، ۲۰۰۷):

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\max(x^2)}{|\hat{x} - x|^2} \right) \quad (20)$$

برای افزایش نسبت سیگنال به نوفه، سعی بر آن است که تا

¹⁰- Group delay compensation (GDC)

لطیفی راد و همکاران، اعمال روش SURE-LET یک بعدی با استفاده از موجک‌های مختلف به منظور تضعیف نوفه‌های تصادفی مقاطع لرزه‌ای، صفحات ۱۴۴-۱۲۳.

را در بین تمامی موجک‌ها داراست؛ به طوری که ۱۵ دسی‌بل نسبت سیگنال به نوفه را افزایش می‌دهد. موجک db14 نیز بهترین خروجی را در بین خانواده موجک‌های دابیچی داراست. علت خروجی بهتر موجک سیملت و کویفلت به تقارن و هموار بودن بیشتر این موجک‌ها نسبت به موجک دابیچی برمی‌گردد (شکل ۶). با توجه به این که در ساخت مدل‌های مصنوعی از موجک ریکر استفاده شده است، موجک سیملت و کویفلت انتخاب خوبی برای استفاده در روش مورد نظر می‌باشند. همان‌طور که اشاره شد، این موجک‌ها دارای تقارن بیشتری نسبت به موجک دابیچی بوده و دارای شباهت بیشتری به موجک ریکر هستند (شکل ۶). نتایج روش واهمامیخت حوزه f-x در جدول ۴ ارائه شده است؛ که نتایج حاکی از ضعف روش مذکور است.

موجک db16 در بین موجک‌های دابیچی بهترین خروجی را دارند (جدول ۱، ۲ و ۳). مقاطع نوفه‌زدایی با این موجک‌ها در شکل ۴، نتایج کیفی نزدیک آن‌ها را به هم نشان می‌دهد. با این وجود خروجی کمی برای موجک sym9 و coif5 به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۶۸ دسی‌بل بیشتر از موجک db16 است. نتایج کمی و کیفی موجک‌ها برای این مدل نتایج مناسبی ندارد. شکل (۵-الف) یک مقطع مصنوعی پیچیده‌تری را نشان می‌دهد. با افزودن نوفه تصادفی به این مقطع، مقطع آغشته به نوفه با نسبت سیگنال به نوفه ۱/۵- دسی‌بل ایجاد می‌گردد (شکل ۵-ب). موجک‌های کویفلت مرتبه ۲ تا ۵ نتایج نزدیکی دارند. با این حال موجک کویفلت مرتبه ۴ بهترین خروجی را داراست (جدول ۱). در بین موجک‌های سیملت، موجک سیملت مرتبه ۱۹ بهترین خروجی

جدول ۱: نتایج اعمال روش SURE-LET با استفاده از موجک کویفلت با مرتبه متفاوت.

Wavelet	Model1 with SNRin = -2.53 db			Model2 with SNRin = -1.1 db			Model3 with SNRin = -1.5 db		
	SNRout (db)	SP (%)	NR (%)	SNRout (db)	SP (%)	NR (%)	SNRout (db)	SP (%)	NR (%)
Coif1	6.30	79.450	61.4	12.050	95.160	78.040	10.650	97.820	74.350
Coif2	6.94	85.120	63.250	13.290	96.390	80.180	12.1	98.380	77.880
Coif3	7.14	85.360	62.730	13.450	97.080	81.230	11.670	98.9	78.440
Coif4	7.23	86.680	65.260	13.570	96.8	81.270	12.740	98.960	79.7
Coif5	7.17	85.420	63.4	13.710	96.880	82.110	12.560	99.3	80.220

جدول ۲: نتایج اعمال روش SURE-LET با استفاده از موجک سیملت با مرتبه متفاوت.

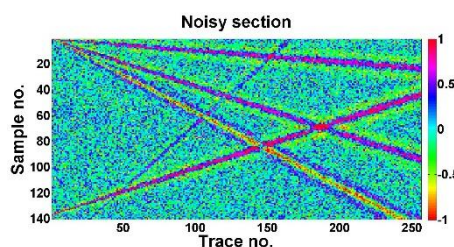
Wavelet	Model1 with SNRin = -2.53 db			Model2 with SNRin = -1.1 db			Model3 with SNRin = -1.5 db		
	SNRout (db)	SP (%)	NR (%)	SNRout (db)	SP (%)	NR (%)	SNRout (db)	SP (%)	NR (%)
sym1	4.90	74.370	57.150	9.90	91.530	70.160	8.55	93.030	68.020
sym2	6.08	77.380	61.630	12.2	94.740	78.250	10.890	96.330	76.110
sym3	6.45	77.880	62.480	12.4	94.880	78.860	11.660	96.630	78.180
sym4	6.39	78.490	64.610	12.690	95.930	81.160	11.8	97.710	79.770
sym5	6.81	78.810	64.090	13.320	96.080	81.120	12.520	97.570	80.9
sym6	7.04	78.930	64.460	13.550	96.340	81.080	12.080	97.640	80.980
sym7	6.71	78.130	63.010	13.660	95.840	81.770	12.320	98.490	80.940
sym8	7.01	78.720	64.670	13.570	96.290	81.490	12.3	97.970	81.260
sym9	7.01	78.780	63.9	13.910	96.450	81.740	12.580	98.3	81.810
sym10	7.06	77.980	63.610	13.450	96.180	81.9	12.430	98.460	81.870
sym11	6.99	78.340	63.220	13.910	96.290	81.780	12.580	97.780	81.960
sym12	6.46	78.390	64.330	13.820	96.460	82.470	12.650	98.4	81.9
sym13	6.70	78.580	63.770	13.870	96.180	82.2	12.660	98.420	82.510
sym14	7.10	79.020	64.240	13.750	96.710	82.020	12.480	98.330	82.640
sym15	6.93	78.420	62.680	13.890	96.450	82.110	13.010	98.350	82.340
sym16	6.90	78.420	64.210	13.520	96.310	81.680	13.4	98.210	82.560
sym17	6.80	78.270	63.520	14.430	96.540	82.680	13.440	98.560	82.7
sym18	6.99	78.050	63.070	13.990	96.450	82.120	12.9	98.150	82.630
sym19	6.79	78.050	63	14.260	97.3	85.140	13.499	98.160	82.640
sym20	6.66	78.460	63.560	14.410	96.620	82.920	13	98.560	83.110

جدول ۳: نتایج اعمال روش SURE-LET با استفاده از موجک دایچی با مرتبه متفاوت.

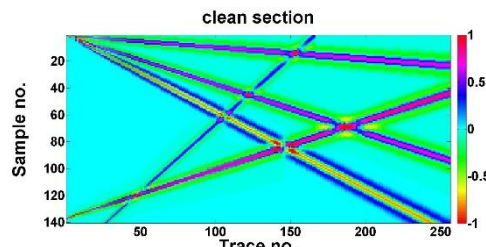
Wavelet	Model1 with SNRin = -2.53 db			Model2 with SNRin = -1.1 db			Model3 with SNRin = -1.5 db		
	SNRout (db)	SP (%)	NR (%)	SNRout (db)	SP (%)	NR (%)	SNRout (db)	SP (%)	NR (%)
db1	4.86	87.970	67.250	9.91	91.670	49.8	8.57	87.990	67.340
db2	5.77	90.180	71.260	11.770	95.760	64.010	10.890	90.620	74.990
db3	6.10	90.470	70.060	12.680	96.610	67.710	11.630	91.240	77.7
db4	6.13	90.950	71.340	13.070	96.330	69.270	11.920	91.360	78.830
db5	6.35	90.280	71.490	13.060	96.720	71.090	12.160	91.580	80.150
db6	6.20	90.460	70.430	13.460	96.570	71.990	12.4	92.190	80.220
db7	6.70	90.750	71.330	13.710	97.140	72.540	12.390	91.950	80.450
db8	6.44	90.720	71.8	13.670	96.950	72.710	12.390	92.280	80.380
db9	6.57	90.430	71.090	13.220	96.560	72.450	12.680	91.910	80.560
db10	6.39	91.390	71.890	13.450	96.570	72.450	12.580	92.070	81.6
db11	6.26	90.230	69.190	13.680	96.970	72.480	12.170	92.480	81.310
db12	6.47	89.6	68.660	13.930	96.850	72.310	12.6	92.370	81.2
db13	6.45	89.740	68.690	13.990	96.620	72.260	12.730	91.890	81.410
db14	6.15	89.550	69.270	13.570	96.650	72.210	13.789	93.230	81.180
db15	6.41	89.810	69.510	13.720	96.780	72.470	13.070	92.560	81.470
db16	6.15	89.560	69.190	13.020	94.030	72.840	12.610	92.620	81.570
db17	6.14	89.440	68.380	13.760	96.6	72.620	12.950	92.060	81.360
db18	6.50	89.5	68.620	13.680	96.830	71.740	12.850	92.520	81.710
db19	6.35	89.610	68.160	13.890	96.930	71.430	12.750	92.430	81.540
db20	6.19	89.630	67.570	13.840	96.750	71.520	12.850	92.340	81.5

جدول ۴: نتایج اعمال روش واهمامیخت f-x.

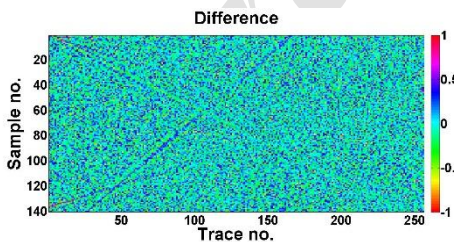
f-x decon	Model1 with SNRin = -2.53 db			Model2 with SNRin = -1.1 db			Model3 with SNRin = -1.5 db		
	SNRout (db)	SP (%)	NR (%)	SNRout (db)	SP (%)	NR (%)	SNRout (db)	SP (%)	NR (%)
f-x decon	1.87	50.5	18	10.4	87.7	65.4	7.27	79.8	65.6



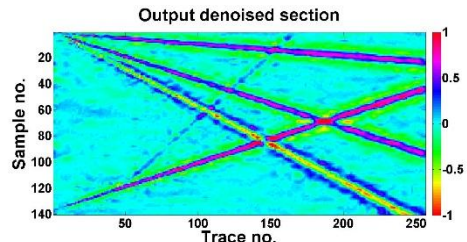
ب) Noisy section



الف) Clean section



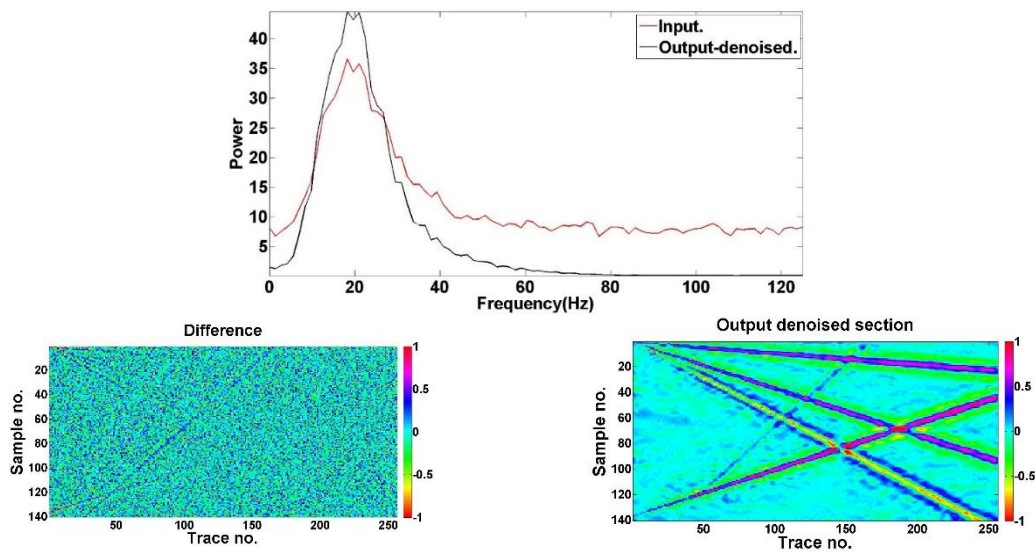
د) diff_coif4



ج) Denoised by coif4

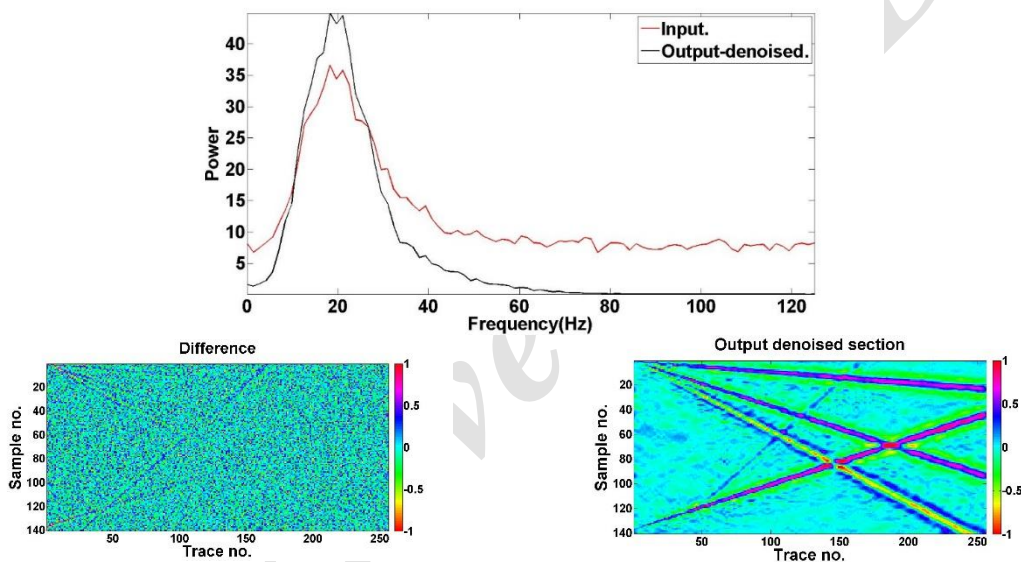
شکل ۳: مدل ۱ و خروجی روش SURE-LET با موجک‌های مختلف برای آن؛ طیف توان ورودی و خروجی هر کدام از روش‌ها در زیر آن شکل آمده است. الف) مقطع عاری از نوفه. ب) مقطع آغشته به نوفه با نسبت سیگنال به نوفه ۲/۵۳- دسی. بل. ج) خروجی SURE-LET با موجک coif4. د) تفاوت بین مقطع آغشته به نوفه و مقطع نوفه‌زدایی با موجک coif4. ه) خروجی SURE-LET با موجک sym16. و) تفاوت بین مقطع آغشته به نوفه و مقطع نوفه‌زدایی با موجک sym16. ز) خروجی SURE-LET با موجک db10. ح) تفاوت بین مقطع آغشته به نوفه و مقطع نوفه‌زدایی با موجک db10. ط) خروجی SURE-LET با موجک db1 (Haar). ی) تفاوت بین مقطع آغشته به نوفه و مقطع نوفه‌زدایی با موجک db1 (Haar). ک) خروجی روش واهمامیخت f-x، ل) تفاوت بین مقطع آغشته به نوفه و مقطع نوفه‌زدایی با روش واهمامیخت f-x.

لطیفی راد و همکاران، اعمال روش SURE-LET یک‌بعدی با استفاده از موجک‌های مختلف به منظور تضعیف نوفه‌های تصادفی مقاطع لرزه‌ای، صفحات ۱۴۴-۱۲۳.



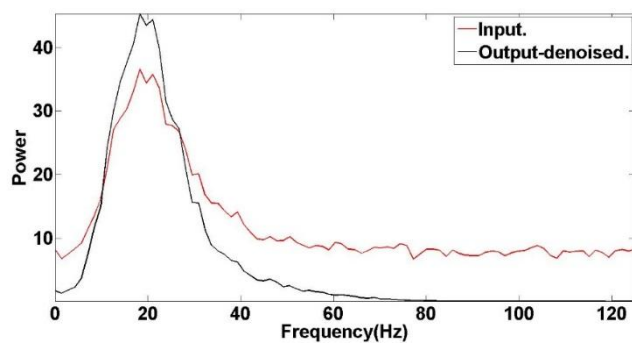
و) diff_sym16

ه) Denoised by sym16

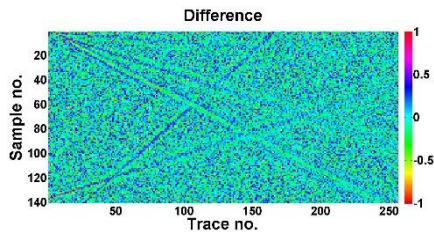


ح) diff_db10

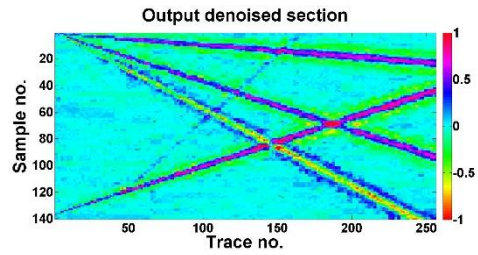
ز) Denoised by db10



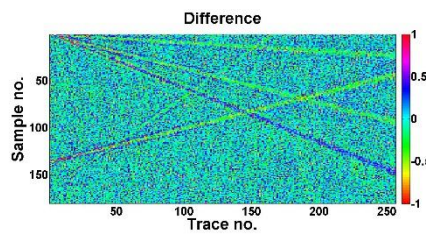
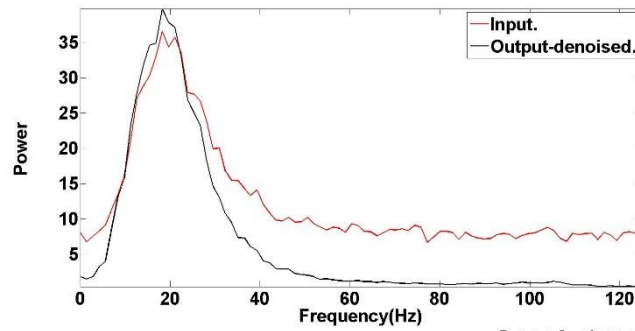
شکل ۳: ادامه.



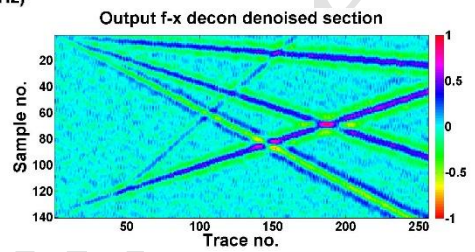
diff_db1 (ی)



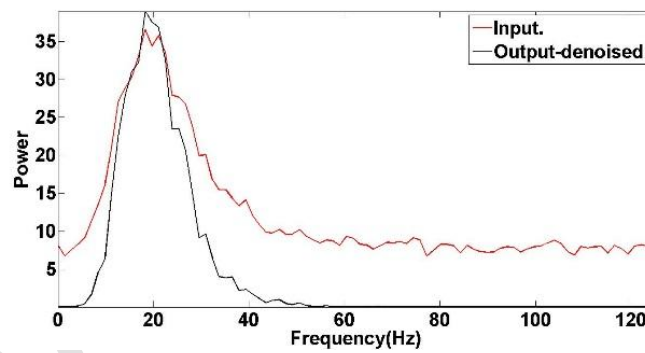
Denoised by db1 (ط)



diff-f-x decon (ل)

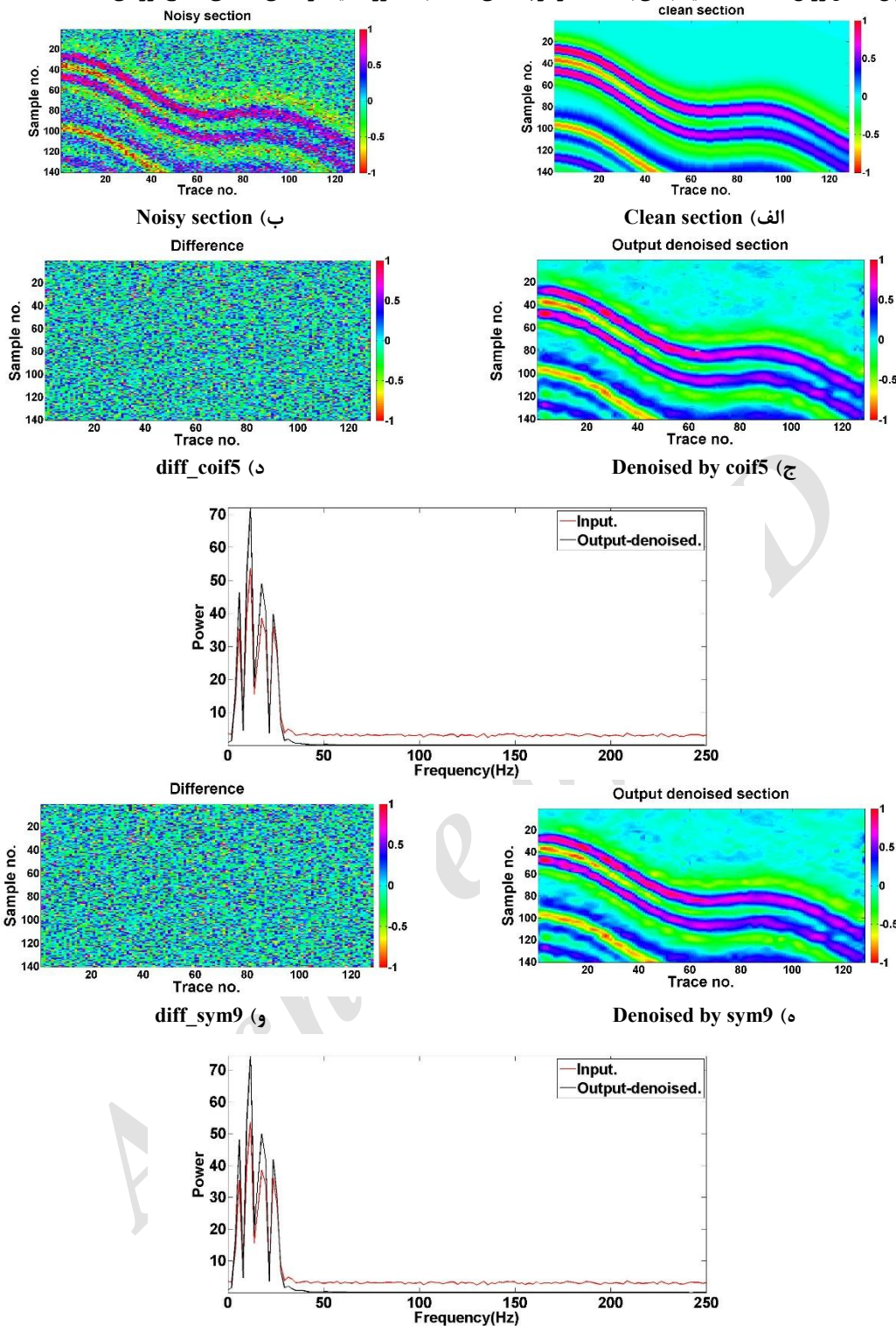


روش واهمامیخت f-x (ک)

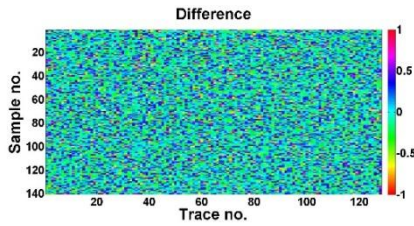


شکل ۳: ادامه.

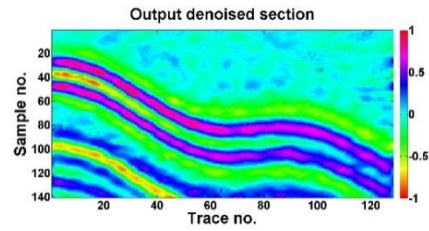
لطیفی راد و همکاران، اعمال روش SURE-LET یک‌بعدی با استفاده از موجک‌های مختلف به منظور تضعیف نوفه‌های تصادفی مقاطع لرزه‌ای، صفحات ۱۴۴-۱۲۳.



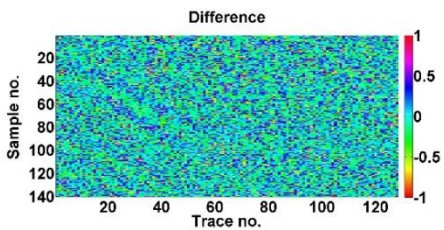
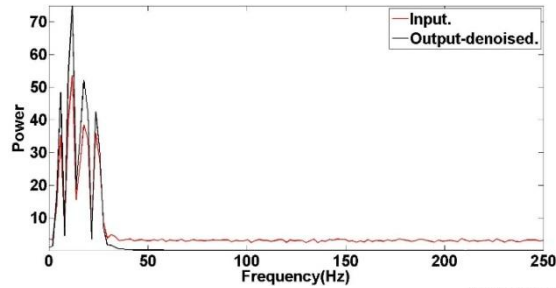
شکل ۴: مدل ۲ و خروجی روش SURE-LET با موجک‌های مختلف برای آن؛ طیف توان ورودی و خروجی هر کدام از روش-ها در زیر آن شکل آمده است. الف) مقطع عاری از نوفه. ب) مقطع آغشته به نوفه با نسبت سیگنال به نوفه ۱/۱- (دسی.بل. ج) خروجی SURE-LET با موجک *coif5*. د) تفاوت بین مقطع آغشته به نوفه و مقطع نوفه‌زدایی با موجک *coif5*. ه) خروجی SURE-LET با موجک *sym9*. و) تفاوت بین مقطع آغشته به نوفه و مقطع نوفه‌زدایی با موجک *sym9*. ز) خروجی SURE-LET با موجک *db16*. ح) تفاوت بین مقطع آغشته به نوفه و مقطع نوفه‌زدایی با موجک *db16*. ط) خروجی SURE-LET با موجک *db1* (Haar). ی) تفاوت بین مقطع آغشته به نوفه و مقطع نوفه‌زدایی با موجک *db1* (Haar). ک) خروجی روش واهامیخت *f-x*. ل) تفاوت بین مقطع آغشته به نوفه و مقطع نوفه‌زدایی با روش واهامیخت *f-x*.



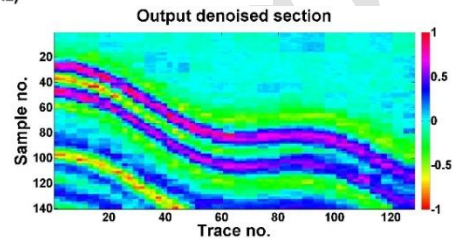
diff_db16 (ح)



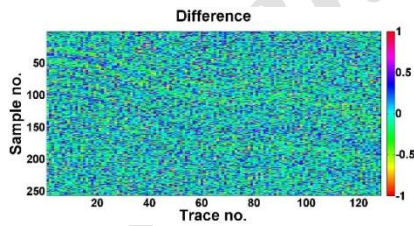
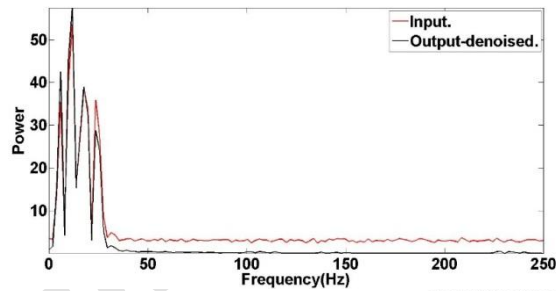
Denoised by db16 (ز)



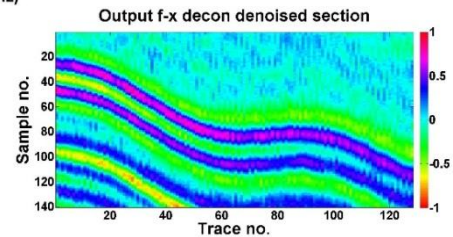
diff_db1 (ی)



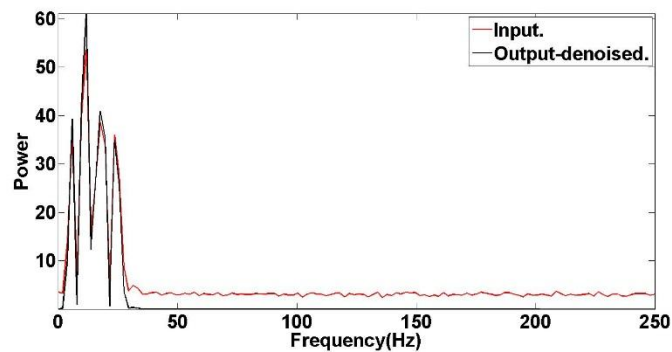
Denoised by db1 (ط)



diff-f-x decon (ل)

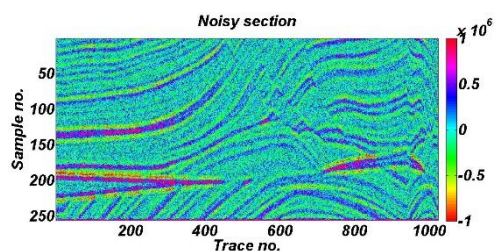


f-x روش واهمامیخت (ک)

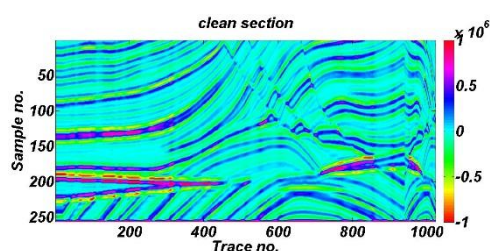


شکل ۴: ادامه.

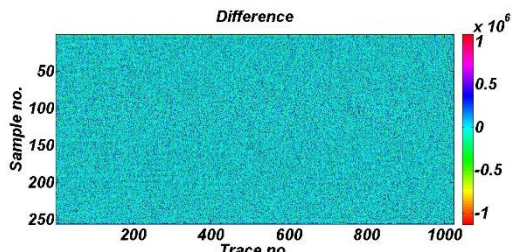
لطیفی راد و همکاران، اعمال روش SURE-LET یک‌بعدی با استفاده از موجک‌های مختلف به منظور تضعیف نوفه‌های تصادفی مقاطع لرزه‌ای، صفحات ۱۴۴-۱۲۳.



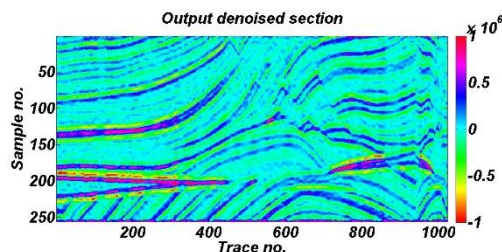
Noisy section (ب)



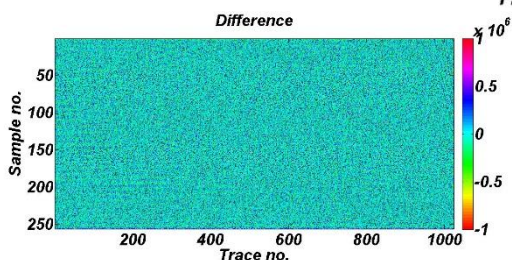
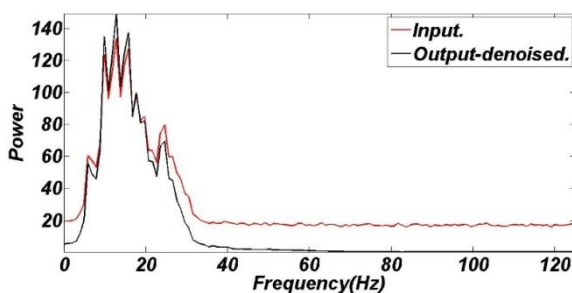
Clean section (الف)



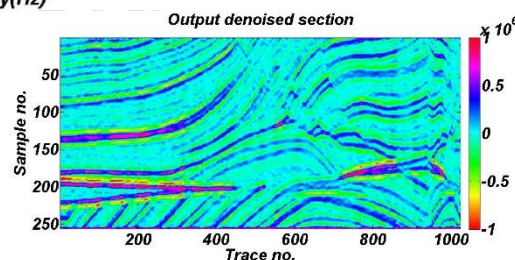
diff_coif4 (د)



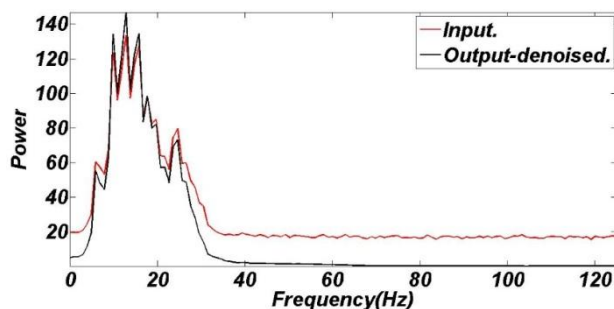
Denoised by coif4 (ج)



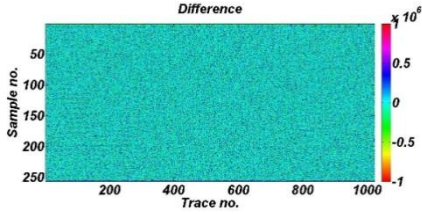
diff_sym19 (و)



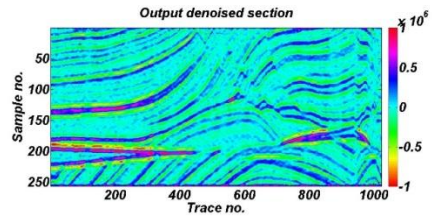
Denoised by sym19 (ه)



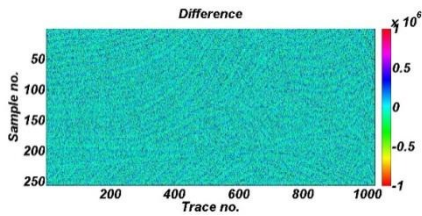
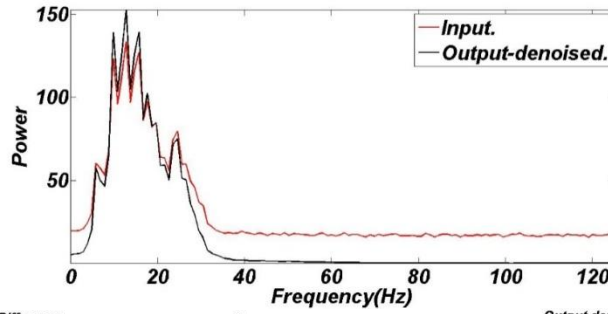
شکل ۵: مدل ۳ و خروجی روش SURE-LET با موجک‌های مختلف برای آن؛ طیف توان ورودی و خروجی هر کدام از روش‌ها در زیر آن شکل آمده است. الف) مقطع عاری از نوفه. ب) مقطع آغشته به نوفه با نسبت سیگنال به نوفه ۱/۵- (دسی‌بل. ج) خروجی SURE-LET با موجک coif4. د) تفاوت بین مقطع آغشته به نوفه و مقطع نوفه‌زدایی با موجک coif4. ه) خروجی SURE-LET با موجک sym19. و) تفاوت بین مقطع آغشته به نوفه و مقطع نوفه‌زدایی با موجک sym19. ز) خروجی SURE-LET با موجک db14. ح) تفاوت بین مقطع آغشته به نوفه و مقطع نوفه‌زدایی با موجک db14. ط) خروجی SURE-LET با موجک db14 (Haar). ی) تفاوت بین مقطع آغشته به نوفه و مقطع نوفه‌زدایی با موجک db1 (Haar). ک) خروجی روش واهمامیخت f-x؛ ل) تفاوت بین مقطع آغشته به نوفه و مقطع نوفه‌زدایی با روش واهمامیخت f-x.



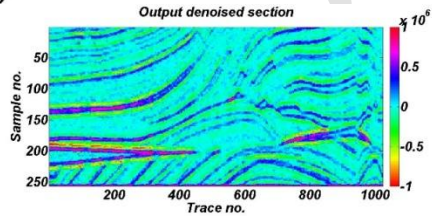
diff_db14 (ح)



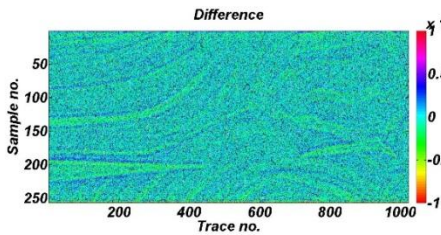
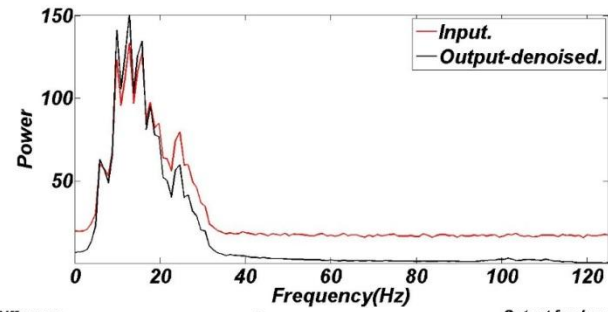
Denoised by db14 (ز)



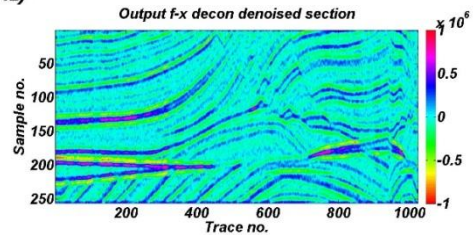
diff_db1 (ی)



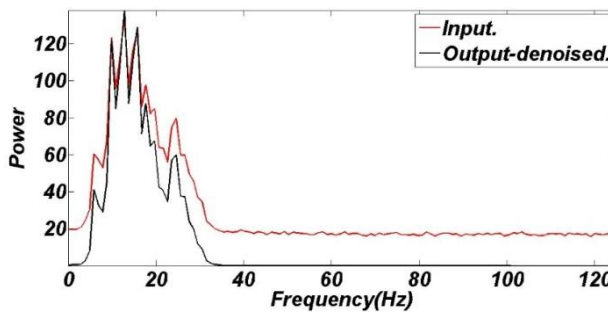
Denoised by db1 (ط)



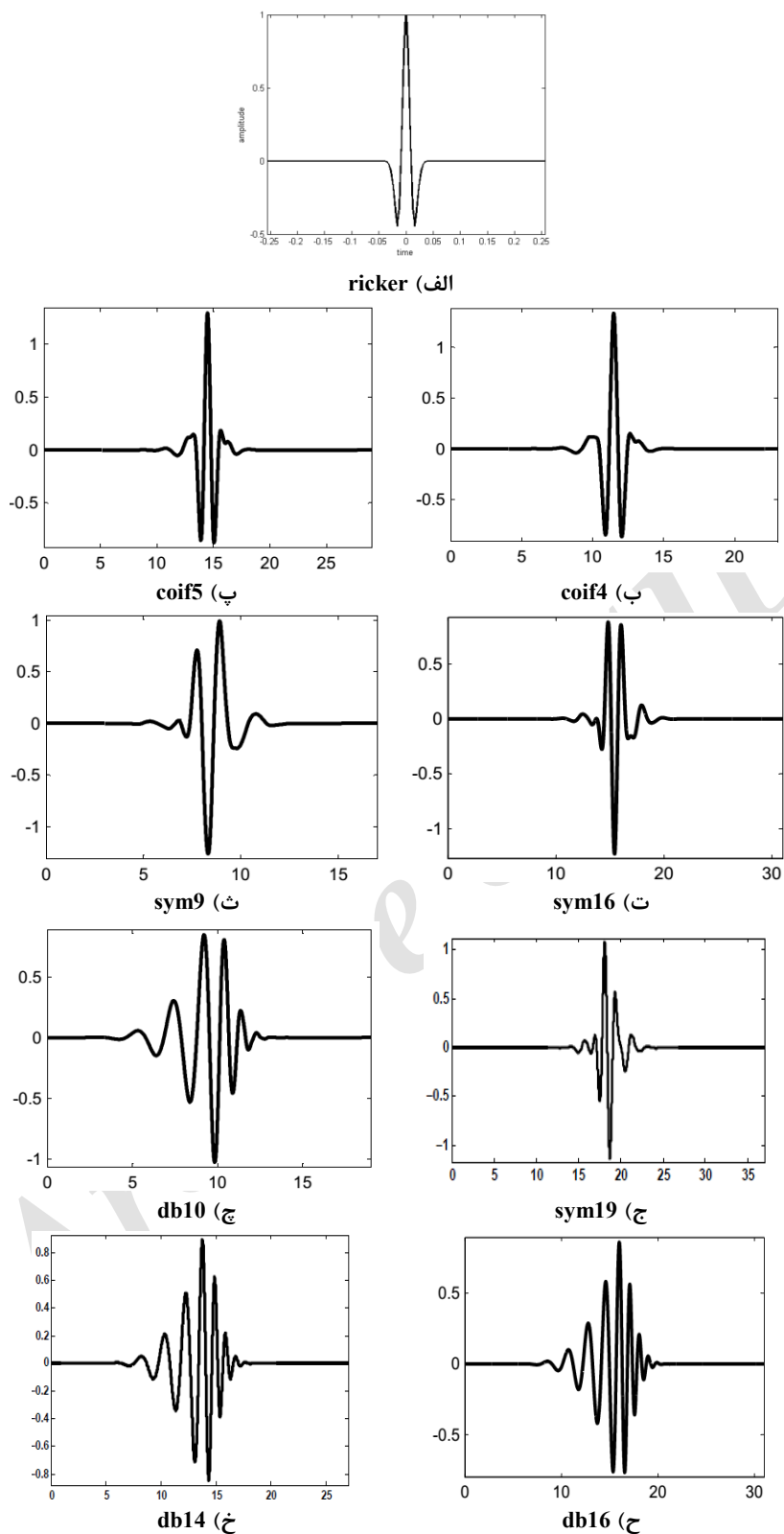
diff-f-x decon (ل)



f-x روش واهمامیخت (ک)



شکل ۵: ادامه.



شکل ۶: بهترین خروجی روش SURE-LET با موجک‌ها؛ الف) موجک ریکر. ب) coif4 برای مدل ۱ و ۳. پ) coif5 برای مدل ۲. ت) sym16 برای مدل ۱. ث) sym9 برای مدل ۲. ج) sym19 برای مدل ۳. چ) db10 برای مدل ۱. ح) db16 برای مدل ۲. خ) db14 برای مدل ۳. شباهت موجک سیملت و کوئفلت به موجک ریکر. تقارن و همواری بیشتر موجک‌های سیملت و کوئفلت نسبت به موجک دابیچی کاملاً مشهود است.

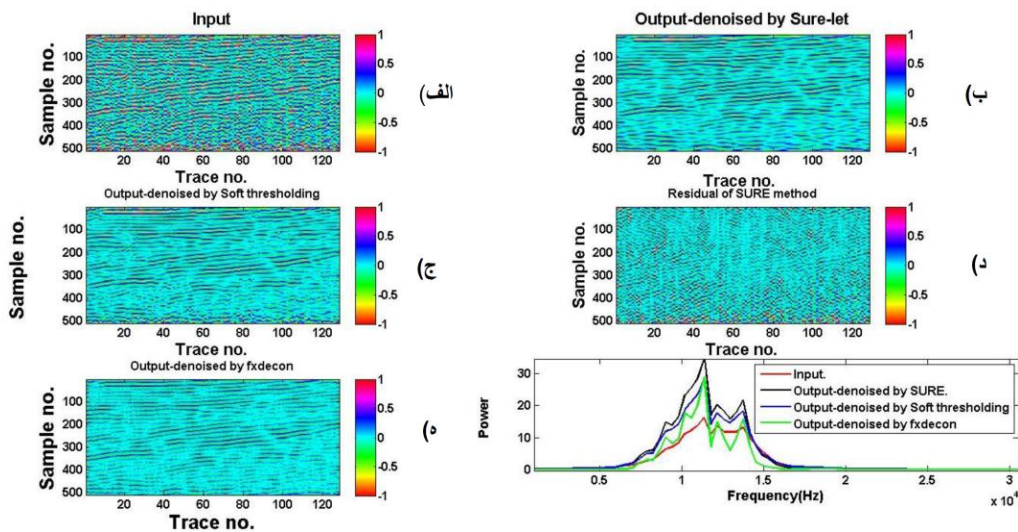
۴-۴- اعمال روش بر روی داده‌های حقیقی

آستانه‌گذاری نرم بر داده‌های لرزه‌ای خشکی، قسمتی از مقطع لرزه‌ای انتخاب شده است (شکل ۸). این بخش‌ها، دارای نوفه بسیاری بوده و رویدادهای لرزه‌ای در آن‌ها دارای کیفیت پایینی هستند. با بررسی این مقطع‌های کوچک، مشاهده می‌شود که روش SURE-LET به صورت مطلوبی نوفه تصادفی را از روی مقطع تضعیف نموده است. در حالی که روش آستانه‌گذاری نرم، در این خصوص چندان موفق نبوده است. در واقع وجود برخی نوفه‌های تصادفی در روی مقطع خروجی روش آستانه‌گذاری نرم، موجب پنهان ماندن برخی از رویدادهای لرزه‌ای شده است. علت این موضوع استفاده از یک حد آستانه ثابت در روش آستانه‌گذاری نرم برای تمام ضرایب جزئیات است. در واقع بسیاری از نوفه‌هایی که دارای ضرایب بزرگ‌تر از این حد آستانه هستند، حذف نمی‌شوند. از طرف دیگر انتخاب آستانه بزرگ‌تر منجر به از بین رفتن سیگنال نیز می‌شود. این محدودیت در انتخاب حد آستانه برای روش آستانه‌گذاری نرم، باعث ضعیف بودن نتایج نسبت به روش SURE-LET شده است. در حالی که در روش SURE-LET فرآیند تضعیف نوفه، در هر مقیاسی اعمال می‌شود. در نتیجه برای هر مقیاسی، توابع آستانه‌گذاری اعمال می‌شود. همین انتخاب باعث افزایش قدرت نوفه‌زدایی روش SURE-LET می‌گردد. روش واهمامیخت $f-x$ از روش‌های اعمال شده بر داده واقعی ضعیف-تر عمل کرده است (شکل‌های ۷ و ۸-۵)؛ دلیل این عملکرد فیلتر $f-x$ را می‌توان در نقطه ضعف‌های اساسی روش فوریه مرسوم بیان نمود. از طرفی پاسخ ضربه واحد فیلتر $f-x$ و روش ارائه شده در این مقاله در شکل ۹ ارائه شده است؛ که توصیف کننده اعوجاج ناشی از روش $f-x$ است. لازم به ذکر است که زمان اجرای الگوریتم ارائه شده ۳ برابر بیشتر از روش‌های مرسوم $f-x$ و آستانه‌گذاری است.

برای بررسی کارایی روش روی داده‌های حقیقی، بخشی از دو مقطع دوبعدی لرزه‌ای خشکی و دریایی که به ترتیب دارای فرکانس‌های نمونه‌برداری ۲۵۰ و ۶۰۰۰ هرتز است، انتخاب می‌شود (شکل‌های ۷ و ۸). داده‌های دریایی با استفاده از دستگاه Sub bottom profiling به دست آمده است. در این دستگاه فرستنده و گیرنده در کنار هم قرار می‌گیرند؛ در نتیجه نمونه‌برداری با دورافت صفر انجام می‌شود (مرکلین و لوچنکو، ۲۰۰۵). بنابراین به منظور تضعیف نوفه‌های تصادفی نمی‌توان از برابزش داده‌ها استفاده نمود. روش‌های VisuShrink (دونوهو و جان استون، ۱۹۹۴)، SureShrink (دونوهو و جان استون، ۱۹۹۵) و BayesShrink (چانگ و همکاران، ۲۰۰۰) از جمله روش‌هایی هستند که از تابع آستانه‌گذاری نرم استفاده می‌کنند.

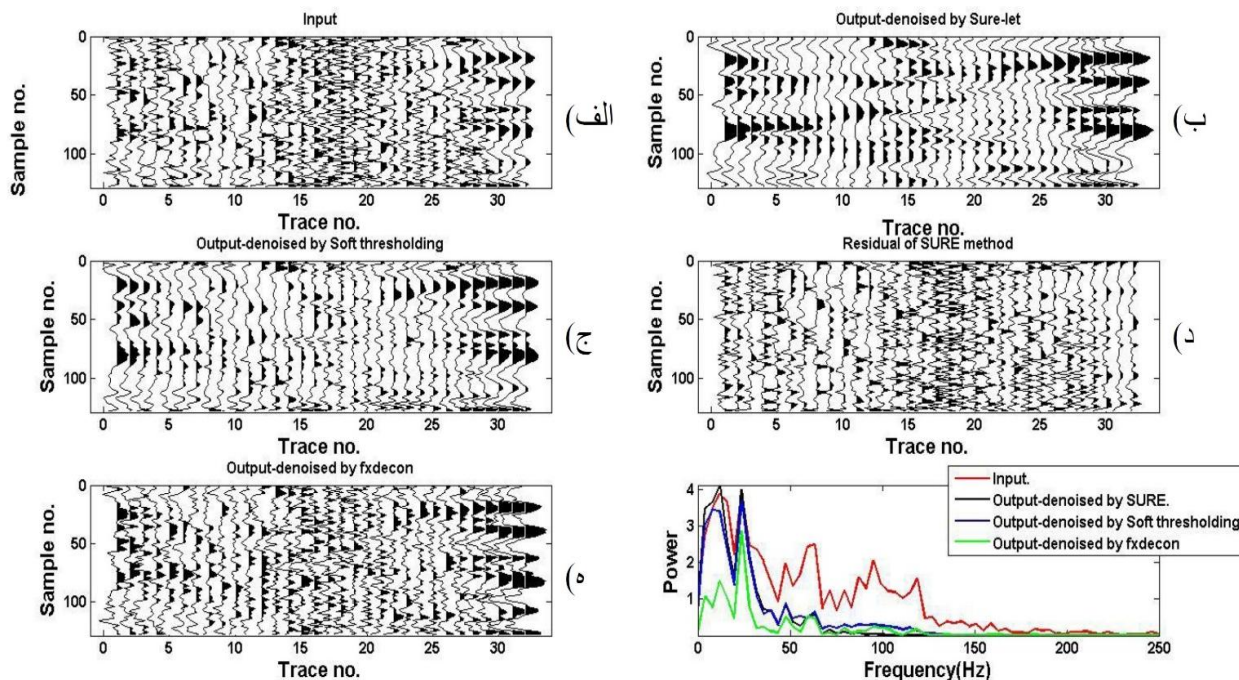
با اعمال روش مورد نظر بر مقطع حقیقی مشاهده می‌گردد که روش SURE-LET به خوبی نوفه‌های تصادفی را از روی داده‌های لرزه‌ای حقیقی تضعیف نموده است (شکل ۷-ب). در حالی که روش آستانه‌گذاری نرم به صورت مطلوبی این عمل را انجام نداده است (شکل ۷-ج). برخی رویدادهای لرزه‌ای پنهان در مقطع اصلی، در خروجی روش SURE-LET آشکار می‌شود. در حالی که در خروجی روش آستانه‌گذاری نرم، این رویدادها قابل مشاهده نمی‌باشند. در واقع تضعیف مطلوب نوفه‌های تصادفی موجب آشکار شدن این رویدادهای پنهان در مقطع اصلی شده است (شکل ۷-ب). برخی از این رویدادهای کوچک در شکل (۷-ب) با مستطیل به نمایش در آمده است.

برای مقایسه نتایج مقطع خروجی روش SURE-LET و

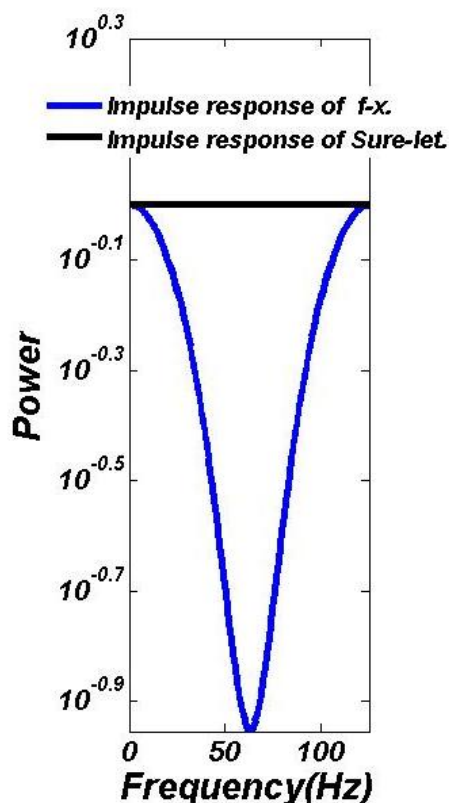


شکل ۷: (الف) مقطع حقیقی، داده‌های Sub bottom profiling. (ب) مقطع نوفه‌زدایی شده روش SURE-LET. آشکار شدن رویدادهای لرزه‌ای کوچک و پنهان در مقطع اصلی با استفاده از روش SURE-LET در محیط‌های بسیار نوفه‌ای، (ج) مقطع نوفه‌زدایی شده با روش آستانه‌گذاری، (د) تفاضل بین روش SURE-LET و مقطع اصلی، (ه) مقطع نوفه‌زدایی شده روش واهمامیخت $f-x$. طیف توان ورودی و خروجی هر کدام از روها در پایین شکل‌ها آمده است.

لطیفی راد و همکاران، اعمال روش SURE-LET یک بعدی با استفاده از موجک‌های مختلف به منظور تضعیف نوفه‌های تصادفی مقاطع لرزه‌ای، صفحات ۱۴۴-۱۲۳.



شکل ۸: (الف) مقطع حقیقی لرزه‌ای دوبعدی. (ب) مقطع نوفه‌زدایی شده روش SURE-LET. آشکار شدن رویدادهای لرزه‌ای کوچک و پنهان در مقطع اصلی با استفاده از روش SURE-LET در محیط‌های بسیار نوفه‌ای، (ج) مقطع نوفه‌زدایی شده با روش آستانه‌گذاری، (د) تفاضل بین روش SURE-LET و مقطع اصلی، (ه) مقطع نوفه‌زدایی شده روش واهمامیخت f-x. طیف توان ورودی و خروجی هر کدام از روش‌ها در پایین شکل‌ها آمده است.



شکل ۹: پاسخ ضربه واحد فیلتر f-x و روش ارائه شده در این مقاله که توصیف کننده اعوجاج ناشی از روش f-x است.

unknown smoothness via wavelet shrinkage, J. Amer. Stat. Assoc., 90 (432), 1200-1224.

Donoho, D.L. and Johnstone, I.M., 1994, Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage, Biometrika, 8, 425-455.

Elboth, T., Geoteam, F., Hayat Qaisrani, H. and Hertweck, T., 2008, De-noising seismic data in the time-frequency domain, SEG Las Vegas 2008 Annual Meeting.

Fugal, D.L., 2009, conceptual wavelets in digital signal processing.

Gabor, D., 1946, Theory of communication, J. IEEE (London), 93(3), 429-457.

Goudarzi, A.R., Riahi, M.A., 2013, TQWT and WDGA: Innovative methods for ground roll attenuation, Journal of Geophysics and Engineering, 47 (14), dx.doi.org/10.1088/1742-2132/10/6/065007.

Hashemi Amroabadi, S.M., 2010, Data Denoising In Analog and Digital Domains, A thesis presented to Ryerson University.

Lu, W. and Liu, J., 2007, Random noise suppression based on discrete cosine transform, SEG/San Antonio Annual Meeting, 2668-2672.

Luisier, F., Blu, T. and Unser, M., 2006, SURE-BASED wavelet thresholding integrating inter-scale dependencies, IEEE, ICIP 2006, 1-4244-0481-9/06/\$20.00 C2006.

Luisier, F. and Blu, T., 2008, SURE-LET multichannel image denoising: Inter-scale orthonormal wavelet thresholding, IEEE Transactions on Image Processing, 17 (4), 482-492.

Luisier, F., Blu, T. and Unser, M., 2007, A New SURE Approach to Image Denoising: Interscale Orthonormal Wavelet Thresholding, IEEE Transactions on Image Processing, 16, 593-606.

Luisier, F., Blu, T. and Unser, M., 2010, SURE-LET for orthonormal wavelet-domain video denoising, IEEE transactions on circuits and systems for video technology, 20 (6), 913-919.

Mallat, S.G., 1989, A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation, IEEE Transactions on pattern analysis & machine intelligence, 11, 674-693.

Morlet, J.P., 1981, Sampling theory and wave propagation: 51st Annual International Meeting, SEG, Session S15.1, 3068-3112.

Neelamani, R., Baumstein, A.I., Gillard, D.G., Hadidi, M.T. and Soroka, W.L., 2008, Coherent and

۵- نتیجه‌گیری

همان‌طور که مشاهده شد با توجه به نتایج کمی و کیفی و طیف توان در تمامی مثال‌ها، روش SURE-LET نتایج مطلوبی در تضعیف نوفه تصادفی ارائه نمود. روش SURE-LET با کمترین آسیب به سیگنال (کمیت بالای SP)، نوفه تصادفی را به صورت قابل ملاحظه‌ای تضعیف می‌نماید. مقایسه خروجی این روش با استفاده از موجک‌های مختلف، نشان می‌دهد که موجک‌های کویفلت و سیملت نسبت به دابیچی انتخاب مناسب‌تری می‌باشند. در میان موجک‌های کویفلت، موجک $coif4$ و $coif5$ بهترین خروجی را دارند. موجک‌های سیملت مرتبه ۶ تا ۲۰ نیز انتخاب خوبی برای نوفه‌زدایی می‌باشند. به خصوص موجک سیملت مرتبه ۱۶،۹ و ۱۹ دارای خروجی بهتری نسبت به تمامی موجک‌ها هستند. اعمال روش مورد نظر با موجک‌ها نتایج مطلوبی ندارد. روش واهمامیخت $f-x$ در مقایسه با سایر روش‌های بحث شده نتایج ضعیف‌تری را نشان داد.

۶- منابع

روشندل کاهو، ا. و نجاتی کلاته، ع.، ۱۳۹۰، تضعیف نوفه اتفاقی در داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تجزیه مد تجربی، مجله ژئوفیزیک ایران، ۵ (۲)، ۶۱-۶۸.

گودرزی، ع.، ۱۳۹۲، تضعیف امواج زمین‌غلت و نوفه‌های اتفاقی با استفاده از برخی تکنیک‌های تجزیه و تحلیل چندگانه تفکیک‌پذیر، رساله دکتری، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

مرتضوی، س. ا. و جواهریان، ع.، ۱۳۹۳، کاربرد تجزیه مقدار منفرد در تضعیف نوفه تصادفی در داده‌های مصنوعی و واقعی لرزه‌ای، مجله ژئوفیزیک ایران، ۲۴ (۸۰)، ۱۲۳-۱۳۴.

Alsdorf, D., 1997, Noise Reduction In Seismic Data Using Fourier Correlation Coefficient Filtering, Geophysics, 62 (5), 1617-1627.

Blu, T. and Luisier, F., 2007, The SURE-LET approach to image denoising, IEEE Trans. Image Process, 16 (11), 2778-2786.

Canales, L.L., 1984, Random noise reduction: Presented at the 54th Annual International Meeting, SEG.

Chang, S.G., Vetterli, M. and Yu, B., 2000, Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression, IEEE Trans. Image Process, 9 (9), 1135-1151.

Daubechies, I., 1988, Orthonormal basis of compactly supported wavelet: Commun, Pure Appl. Math, 41, 909-996.

Daubechies, I., 1992, Ten Lectures on Wavelets, SIAM, Pennsylvania.

Donoho, D.L. and Johnstone, I.M., 1995, Adapting to

- لطیفی راد و همکاران، اعمال روش SURE-LET یک بعدی با استفاده از موجک‌های مختلف به منظور تضعیف نوفه‌های تصادفی مقاطع لرزه‌ای، صفحات ۱۴۴-۱۲۳.
- Tuncer, G., 2006, A Java Toolbox For Wavelet Based Image Denoising, Thesis submitted to middle east technical university.
- Xue, F., Luisier, F. and Blu, T., 2012, SURE-LET image deconvolution using multiple wiener filters, IEEE, ICIP 2012, 978-1-4673-2533-2112/\$26.00 ©2012.
- Yilmaz, Ö., 2001, Seismic data processing, SEG.
- random noise attenuation using the curvelet transform, The Leading Edge, 27, 240-248.
- Oskooi, B., Julayusefi, M. and Goudarzi, A., 2015, GPR noise reduction based on wavelet thresholdings, Arabian Journal of Geosciences, 8 (5), 2937-2951.
- Sheriff, R.E. and Geldart, L.P., 1995, Exploration Seismology, Cambridge university press.

Archive of SID

پیوست

یافتن یک برآورد خطی \hat{X} مطلوب از $X = \{x_n\}_{n=1,2,\dots,N}$ هدف اصلی است. با توجه به این موضوع که دسترسی به داده اصلی و عاری از نوفه x ممکن نیست؛ بنابراین باید تابعی یافت که فقط وابسته به داده نوفه‌ای y باشد. به طوری که با کمک این تابع و بدون نیاز به داده اصلی و عاری از نوفه x ، برآورد \hat{x} به دست آید. لوزیر و همکاران (۲۰۰۶) این تابع را به شکل $\hat{X} = (\theta_n(y))_{n=1,2,\dots,N}$ تعریف کردند، به شکلی که در هر زیرباند اقدام به برآورد \hat{x} می‌نماید. تابع فوق طوری انتخاب می‌شود که کمیت خطای میانگین مربعی زیر را به حداقل برساند.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\hat{x}_n - x_n|^2 \quad (\text{پ-۱})$$

و یا

$$MSE = \frac{1}{N} \|\hat{X}_n - X_n\|^2$$

و یا

$$MSE = \langle |\theta(y) - x|^2 \rangle = \langle \theta(y)^2 \rangle - 2\langle x\theta(y) \rangle + \langle x^2 \rangle$$

با توجه به عدم دسترسی به سیگنال اصلی X ، نمی‌توان کمیت $\frac{1}{N} \|\hat{X}_n - X_n\|^2$ را محاسبه نمود. با این حال در ادامه مشاهده می‌شود که با توجه به لم اشتین، بدون هیچ فرضی بر داده عاری از نوفه، مقدار کمیت فوق با استفاده از یک برآورد ناریب که فقط تابعی از y است، جایگزین می‌شود. این شامل یک نتیجه مهم می‌شود: برخلاف آنچه در اکثر روش‌ها انجام می‌شود، سیگنال عاری از نوفه به عنوان یک فرآیند آماری در SURE-LET مدل سازی نشده است، بلکه تصادفی بودن سیگنال دریافتی حاصل از نوفه تصادفی است. این موضوع تفاوت عمده این روش با سایر روش‌ها است.

با توجه به این که نوفه دارای فرایند تصادفی است، عملگر مورد انتظار ریاضیاتی $\mathcal{E}\{\}$ را برای تخمین نتایج به دست آمده بعد از پردازش داده‌های نوفه‌ای y مورد استفاده قرار می‌گیرد. قابل ذکر است که با توجه به این که داده عاری از نوفه x به عنوان یک فرآیند تصادفی مدل سازی نمی‌شود، بنابراین مقدار مورد انتظار آن برابر خودش است یا $\mathcal{E}\{x\} = x$. بر اساس لم زیر، که حالتی از نسخه لم اشتین (۱۹۸۱) است، نشان داده خواهد شد که چگونه عبارتی شامل داده‌های ناشناخته X به وسیله سایر داده‌ها، جایگزین می‌شود. لم ۱: تابع مشتق پذیر $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ به شکل زیر انتخاب می‌شود.

$$\mathcal{E} \left\{ \left| \frac{\partial \theta_n(y)}{\partial y_n} \right| \right\} < \infty \quad \text{for } n = 1, \dots, N$$

آنگاه با توجه به فرض نوفه گاوسی سفید مقدار مورد انتظار $\theta(y)x$ و $\theta(y)y - \sigma^2 \text{div}\{\theta(y)\}$ با هم برابر است:

$$\mathcal{E} \left\{ \sum_{n=1}^N \theta_n(y) x_n \right\} = \mathcal{E} \left\{ \sum_{n=1}^N \theta_n(y) y_n \right\} - \sigma^2 \mathcal{E} \left\{ \sum_{n=1}^N \frac{\partial \theta_n(y)}{\partial y_n} \right\} \quad (\text{پ-۲})$$

اکنون با اعمال لم ۱ اشتین به عبارت خطای میانگین مربعی، برآورد خطای ناریب اشتین محاسبه خواهد شد. نظریه ۱: تحت همان فرض لم ۱، متغیر تصادفی ϵ یک برآوردگر ناریب خطای میانگین مربعی است.

$$\epsilon = \frac{1}{N} \|\theta(y) - y\|^2 + \frac{2\sigma^2}{N} \text{div}\{\theta(y)\} - \sigma^2$$

و یا

$$\epsilon = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\{ (\theta(y_n) - y_n)^2 + 2\sigma^2 \frac{\partial \theta_n(y)}{\partial y_n} \right\} - \sigma^2$$

اثبات:

$$\mathcal{E}(\epsilon) = \mathcal{E}\{\langle |\theta(y) - x|^2 \rangle\} = \mathcal{E}\{\langle \theta(y) - x \rangle^2\} = \mathcal{E}\{\theta^2(y_n)\} - 2\mathcal{E}\{x_n \theta(y_n)\} + \mathcal{E}\{x_n^2\}$$

با جایگذاری نتیجه لم ۱ داریم:

$$\mathcal{E}(\epsilon) = \mathcal{E}\{\langle |\theta(y) - x|^2 \rangle\} \quad (\text{پ-۳})$$

$$= \mathcal{E} \{ \langle \theta^2(y) \rangle \} - 2\mathcal{E} \{ \langle y\theta(y) \rangle \} + 2\sigma^2 \mathcal{E} \left\{ \left\langle \frac{\partial \theta(y)}{\partial y} \right\rangle \right\} + \mathcal{E} \{ \langle x^2 \rangle \}$$

طبق رابطه فوق مشاهده می‌شود که به منظور برآورد خطای میانگین مربعی، عبارتی که شامل داده‌های ناشناخته X است، به وسیله سایر داده‌های شناخته شده، جایگزین می‌گردد. تنها پارامتر وابسته به داده عاری از نوفه، $\mathcal{E} \{ \langle x^2 \rangle \}$ است. با توجه به این موضوع که نوفه گاوسی سفید دارای میانگین صفر است، آنگاه می‌توان عبارت $\mathcal{E} \{ \langle y^2 \rangle \} - N\sigma^2$ را جایگزین عبارت $\mathcal{E} \{ \langle x^2 \rangle \}$ نمود. با جایگذاری این رابطه در رابطه فوق خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}(\epsilon) &= \mathcal{E} \{ \langle |\theta(y) - x|^2 \rangle \} \\ &= \mathcal{E} \{ \langle \theta^2(y) \rangle \} - 2\mathcal{E} \{ \langle y\theta(y) \rangle \} + 2\sigma^2 \mathcal{E} \left\{ \left\langle \frac{\partial \theta(y)}{\partial y} \right\rangle \right\} + \mathcal{E} \{ \langle y^2 \rangle \} - N\sigma^2 \\ &= \mathcal{E} \{ \langle \theta^2(y) \rangle - 2\langle y\theta(y) \rangle + \langle y^2 \rangle \} + 2\sigma^2 \mathcal{E} \left\{ \left\langle \frac{\partial \theta(y)}{\partial y} \right\rangle \right\} - N\sigma^2 \\ &= \mathcal{E} \left\{ \frac{1}{N} \|\theta(y) - y\|^2 \right\} + 2\mathcal{E} \left\{ \frac{\sigma^2}{N} \text{div} \{ \theta(y) \} \right\} - \sigma^2 \end{aligned}$$

بنابراین:

$$\epsilon = \frac{1}{N} \|\theta(y) - y\|^2 + \frac{2\sigma^2}{N} \text{div} \{ \theta(y) \} - \sigma^2$$

و یا

$$\epsilon = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\{ (\theta(y_n) - y_n)^2 + 2\sigma^2 \frac{\partial \theta_n(y)}{\partial y_n} \right\} - \sigma^2 \quad (\text{پ-۴})$$

با توجه به رابطه فوق مشاهده می‌شود که در عمل به منظور برآورد خطای نارایب اشتین، فقط عبارتهایی برآورد می‌شوند که وابسته به تابع نوفه‌زدایی $\theta(y)$ و داده نوفه‌ای y باشند. چون در بحث حذف نوفه سیگنال، با تعداد نمونه‌های بزرگی سروکار داریم (N بزرگ است)، بنابراین ϵ دارای یک واریانس کوچک است (در حدود $1/N$). بنابراین این برآورد نزدیک به مقدار مورد انتظار است و MSE صحیح فرآیند حذف نوفه است.



One-dimensional SURE-LET method using various wavelets for random noise attenuation of seismic data

Reza Latifirad¹, Alireza Goudarzi^{2*} and Mohammad Reza Sepahvand²

1- M.Sc. Graduated, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Received: 11 June 2016; Accepted: 11 October 2016

Corresponding author: a.goudarzi@kgut.ac.ir

Keywords

Seismic Random Noise
Wavelet Transform
Thresholding
Stein's Unbiased Risk Estimate (SURE)
Linear Expansion of Thresholding (LET)

Extended Abstract

Summary

In seismic data processing, the processing steps are completely affected by the data quality. Reflection seismic data are often affected by various noises including random and coherent noises. Low signal to noise ratio can produce problems for stacking and migration steps, which ultimately leads to poor interpretation. There are many methods that can be used for noise removal or attenuation of seismic data. The basic assumption of the Fourier transform is that it considers stationary signal, thus, for non-stationary signals, it is not

always applicable. Based on this fact that the wavelet transform decomposes a function by translation and stretching, it can provide time-scale representation of a signal. In this paper, we have used SURE-LET method for noise removal in the wavelet transform domain. In the SURE-LET method, any assumptions of noise free signals are avoided.

Introduction

The purpose of seismic data acquisition is to acquire data with the lowest possible noise level. The presence of noise in seismic data is inevitable (Yilmaz, 2001). To improve the signal-to-noise ratio, we can use two approaches: first, changing the seismic energy source or receiver array design and second, processing the seismic data for noise reduction. Considering the source of energy is absorbed by the earth, the increase of seismic energy sources or weighted receiver arrays is limited (Sheriff and Geldart, 1995). Therefore, reduction the noise in order to increase the signal to noise ratio of seismic data is very important.

Morlet (1981) showed that by changing the width of the window, wavelet transform could provide better time-frequency distribution. By wavelet transform, various denoising methods based on thresholding of wavelet coefficients have been proposed. Donoho and Johnstone (1994) presented thresholding theory. Chang et al. (2000) presented Bayes shrink method to remove noise. The sensitivity of the soft thresholding function (to the upper limit of the threshold) for the minimization, does not give suitable results. Luisier et al. (2007), to optimize Stein's Unbiased Risk Estimate (SURE), used another principle, such that the noise attenuation to be expressed as a linear expansion of thresholding (LET) functions. In fact, by combining the SURE and LET and solving a system of linear equations, the noise is attenuated. SURE is an unbiased statistical estimate of the mean squared error (MSE) between an original unknown signal and a processed version of its noisy observation. This estimate depends only on the observed data and does not require any prior assumption on the noise-free signal (Luisier et al., 2010). Blu and Luisier (2007) presented SURE-LET method based on pointwise thresholding function for image denoising. Luisier et al (2010) used SURE-LET method for orthonormal wavelet domain video denoising.

Methodology and Approaches

Wavelet-based noise removal techniques including assumptions for the data are as follow (Luisier et al., 2007):

1. The statistical description of the distribution coefficients
2. A non-linear estimation of statistical parameters,
3. Finding the best noise attenuation algorithms for a variety of statistics

For example, Chang et al. (2000), in The Bayes shrink approach, modeled wavelet coefficients of each sub-band with a general Gaussian distribution (GGD). Then the threshold is obtained for each sub-band for the Bayesian framework. For the SURE-LET method, the previous assumption of the noise-free signals is avoided. This method acts by

calculating the unbiased estimates of the mean square error between the signal and denoised signal. There are other methods using SURE approach. For example, the sensitivity of the soft thresholding function to the upper limit of the threshold, in the minimization, does not give suitable results. Luisier et al. (2007) to optimize SURE, used another principle so that the noise attenuation as a linear combination of denoising elements (LET) was expressed. In fact, by combining the SURE and LET and solving a system of linear equations, the noise is attenuated.

Results and Conclusions

The SURE-LET method comprises of two main sections: noise attenuator that consists of the interscale LET, and then, the linear parameters for minimizing of SURE between noisy and noise-free signals. Regarding secondary order estimation (MSE), the parameters are improved easily by solving a LET. The results of this study shows that Symlets and Coiflets provide better results using SURE-LET method for denoising non-stationary seismic signals.

Archive of SID