

## تضعیف نوفه تصادفی با تبدیل موجک گسسته ضریب اتساع گویا

محمد ایرانی مهر<sup>۱</sup> و محمدعلی ریاحی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup>موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۶/۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۲۵)

### چکیده

هدف از اجرای عملیات ژئوفیزیکی تشخیص پدیده‌های زیر زمین با بیشترین دقت ممکن است. ثبت نوفه در برداشت داده‌های لرزه‌ای اجتناب‌ناپذیر است. نوفه‌های گوناگونی داده‌های لرزه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند، از مهم‌ترین آنها نوفه تصادفی است که از حرکت نوسانی بی‌نظم ذرات در هنگام داده‌برداری حاصل می‌شود. نوفه تصادفی در همه زمان‌ها و در همه بسامدها حضور دارد و کیفیت داده‌های لرزه‌ای را کاهش می‌دهد. به‌منظور رسیدن به تفسیر قابل‌اعتماد، ژئوفیزیک‌دانان سعی بر رسیدن به داده‌ای با کمترین نوفه تصادفی و هم‌دوس دارند. در سال‌های اخیر تبدیل موجک گسسته درحکم گزینه مناسبی در امر پردازش سیگنال معرفی شده است. در این تحقیق از تبدیل جدید موجک گسسته ضریب اتساع گویا، با قابلیت بهبود تفکیک‌پذیری زمانی- بسامدی برای تضعیف نوفه تصادفی استفاده شده است. تبدیل موجک ضریب اتساع گویا دارای قابلیت به‌دست آوردن محدوده‌ای از ضریب کیفیت‌ها است. در این تبدیل کاربر می‌تواند با تغییر چند متغیر به ضریب کیفیت مناسب برای پردازش داده دست یابد. این تبدیل با انتخاب ضریب کیفیت مناسب، با توجه به نوع داده، بهتر می‌تواند سیگنال را تجزیه کند و نسبت به تبدیل موجک گسسته معمولی با ضریب کیفیت ثابت، نتایج بهتری به‌دست آورد. در مرحله بعد با استفاده از آستانه‌گیری نرم یا سایر آستانه‌گیری‌های مجاز، امکان جداسازی نوفه از سیگنال میسر می‌شود. تبدیل موجک جدید روی داده مصنوعی با سطح نوفه‌های تصادفی متفاوت و همچنین داده واقعی از نوع داده دریایی با محتوای بسامدی زیاد اعمال شد و نتایج حاصل با نتایج تضعیف نوفه تصادفی با تبدیل موجک گسسته دوتایی مورد مقایسه قرار گرفت.

**واژه‌های کلیدی:** تبدیل موجک گسسته، تبدیل موجک اتساع گویا، تضعیف نوفه اتفاقی، آستانه‌گیری نرم، نمونه‌برداری گویا

### Random noise attenuation by rational-dilation wavelet transform

Mohammad Iranimehr<sup>1</sup> and Mohammad Ali Riahi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 31 August 2013, accepted: 16 September 2014)

#### Summary

The purpose of the geophysical activity is to recognize the underlying phenomena with a precision as high as possible. The record of noise in seismic data is inevitable. Different noises affect seismic data among which random noise is one of the most important ones, resulting from random oscillation of particles during the sampling. Random noise is present at all times and all frequencies; it decreases the seismic data quality. To achieve a trustworthy interpretation, geophysicists try to prepare data with the least random and coherent noise. There are many methods for analyzing seismic signals. In recent years, discrete wavelet transform has been introduced as a suitable choice in seismic signal

\*Corresponding author:

mariahi@ut.ac.ir

\*نگارنده رابط:

processing. Bayram and Selesnick (2009) developed a family of wavelets transforms, which have a wide range of the  $Q$ -factor (in bandpass filters,  $Q$ -factor is defined as wavelet centre frequency/bandwidth). This research has tested the rational dilation wavelet transform (RDWT) with enhanced time-frequency discrimination. In this research the rational dilation wavelet transform was used for random noise attenuation from synthetic and real seismic data. The capability to apply different  $Q$ -factors is the main advantage of the RDWT compared to the dyadic DWT. This transform overcame the limitation of conventional wavelet transform with a constant quality factor.

This method is robust in the task of de-noising with fewer signal distortion effects because of its ability to choose an appropriate  $Q$ -factor and the degree of over-completeness. These WTs provide a rich range of redundancy and  $Q$ -factors. Moreover, the RDWT used in this study is based on rational (non-dyadic) dilation and attains over-completeness by increasing sampling in both time and frequency (Bayram and Selesnick, 2009). The RMS error is a measurement of the differences between values of a trace after an RDWT inverse transform without any de-noising and the input trace shown in Table 1 of the present article.

The capability to apply different  $Q$ -factors let the user choose the appropriate  $Q$ -factor and desired frequency and time resolution. The user can choose appropriate  $Q$ -factor setting some parameters ( $p, q, s, j$ ), wherein ' $q/p$ ' is the dilation factor and ' $s$ ' is the sampling factor of the high-pass filter and the number of processing levels is determined by ' $j$ '. These parameters must be chosen such that the time frequency representation of each level of decomposition will be enhanced. In an earlier work, this method was used with the purpose of ground roll attenuation (Iranimehr et al., 2013).

Using the appropriate quality factor according to data type, the used wavelet will match well with the seismic signal and the signal obtains a large amount of wavelet coefficients but the undesirable random noise would attain small amount of wavelet coefficients.

In the next step, noise was separated from signal using soft thresholding or other authorized thresholding methods. The wavelet transform was applied to synthetic data with different noise levels and a real marine data with high frequency content and the results of the random noise attenuation were compared with the dyadic wavelet transform. Table 2 of the present article compares the results of random noise attenuation by dyadic discrete wavelet transform and rational dilation wavelet transform by different type threshold.

**Keywords:** Discrete wavelet transform, RDWT, random noise attenuation, soft thresholding, rational sampling.

## ۱ مقدمه

هدف از عملیات ژئوفیزیکی، تشخیص رخداد‌های زیرسطح زمین با بهترین دقت ممکن است. وجود نوفه در مقطع لرزه‌ای مسئله‌ای آزاردهنده است که دقت در اندازه‌گیری پاسخ فیزیکی رخدادها را کاهش می‌دهد. نوفه غیر همدوس که به آن نوفه تصادفی نیز می‌گویند، پدیده‌ای رایج در داده‌برداری لرزه‌ای در خشکی و دریا است. میزان نوفه تصادفی در هر لرزه ددلرزه متفاوت است

و قابل پیش‌بینی نیست. در تضعیف نوفه تصادفی هدف کاهش سطح نوفه است، به گونه‌ای که پیوستگی پدیده‌های همدوس افزایش یابد و پدیده‌های غیر واقعی در مقطع ایجاد نشود (ایلماز، ۲۰۰۱).

روش‌های متعددی برای جداسازی نوفه ناهمدوس از سیگنال لرزه‌ای وجود دارد. فیلترهای بر پایه برآورد از جمله فیلترهای رایج برای تضعیف نوفه‌های غیرهمدوس است (روشندل کاهو و نجاتی کلاته، ۱۳۸۹). تعداد زیادی

تضعیف نوفه تصادفی با آن در ادامه آمده است. داده واقعی مورد استفاده در این تحقیق از نوع داده دریایی به دست آمده از راه ثبت داده‌ها با دستگاه sub bottom profiler است. تاکنون از تبدیل موجک برای تضعیف نوفه تصادفی در این نوع داده استفاده نشده است.

نوفه‌های تصادفی به‌خاطر نبود تطابق از ردلرزه‌ای به ردلرزه دیگر در فرایند برانبارش تا حد زیادی تضعیف می‌شوند (ایلماز، ۲۰۰۱)، اما به‌خاطر نوع داده به دست آمده از راه ثبت داده‌ها با دستگاه sub bottom profiler و برداشت قائم، برانبارش برای این نوع داده‌ها میسر نیست.

## ۲ روش تبدیل موجک ضریب اتساع گویا (RDWT)

تفاوت عمده بین تبدیل فوریه و تبدیل موجک این است که تبدیل فوریه ابزاری برای تحلیل سیگنال‌های پایا است در حالی که تبدیل موجک سیگنال را هم‌زمان در زمان و بسامد نمایش می‌دهد (فوگال، ۲۰۰۹). تبدیل موجک سیگنال را با تابعی که دارای بازه زمانی و بسامدی محدودی است در زمان و بسامد تجزیه می‌کند. به‌خاطر انعطاف‌پذیری تبدیل موجک، انواع گوناگونی از تبدیل موجک معرفی شده است.

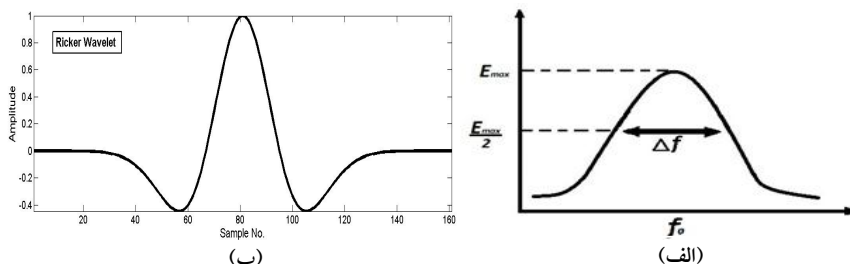
در این تحقیق از روش جدید تبدیل موجک ضریب اتساع گویا (RDWT) برای تضعیف نوفه تصادفی از مقطع لرزه‌ای استفاده شده است، برتری این روش بر تبدیل موجک گسسته دوتایی برخورداری این روش از Q-factor های متفاوت و بیش کامل بودن آن است.

از روش‌های تضعیف نوفه براساس تبدیل‌های زمان-بسامد هستند از جمله فیلتر برآورد به کار رفته کانالس (۱۹۸۴)، یا فیلتر غیرخطی پیش‌گو (گولونای، ۲۰۰۰).

تعداد دیگری از روش‌های تضعیف نوفه بر پایه تبدیل فوریه هستند. در این روش فرض می‌شود سیگنال پایا است، اما محتوای بسامدی سیگنال لرزه‌ای به علت پدیده‌هایی چون جذب و انتشار کروی، در زمان متغیر است. استفاده از تبدیل فوریه برای تضعیف نوفه باعث پدیده‌هایی چون افزودن نوفه به پس‌زمینه و دگرشکلی موجک می‌شود (ایلماز، ۲۰۰۱).

در سال‌های اخیر تبدیل موجک به‌منزله گزینه‌ای مناسب برای پردازش داده‌های لرزه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. تبدیل موجک به‌خاطر ماهیت زمان-بسامدی‌اش تا حد زیادی توانسته است بر محدودیت‌های تبدیل فوریه غلبه کند. در این مقاله از یک تبدیل موجک جدید به‌منظور بالا بردن توان تفکیک زمانی و بسامدی نسبت به تبدیل موجک دوتایی برای تضعیف نوفه تصادفی در داده لرزه‌ای استفاده شده است. به علت بیش کامل بودن، این تبدیل تا حد زیادی از پدیده دگرنامی جلوگیری می‌کند، به‌علاوه تبدیل موجک ضریب اتساع گویا قابلیت استفاده از ضریب‌های کیفیت (Quality factor) متفاوت دارد که بسته به نوع داده و نظر کاربر می‌تواند تفکیک بسامدی مطلوب را به دست دهد (Q-factor یا Quality factor). ضریب کیفیت در فیلترهای میان‌گذر نسبت بسامد میانی به عرض نوار است) (شکل ۱).

این روش روی داده مصنوعی و واقعی اعمال شد که نتایج



شکل ۱. (الف) ضریب کیفیت برای فیلترهای میان‌گذر، نسبت بسامد میانی به عرض نوار است. (ب) نمایش موجک ریکر در زمان.

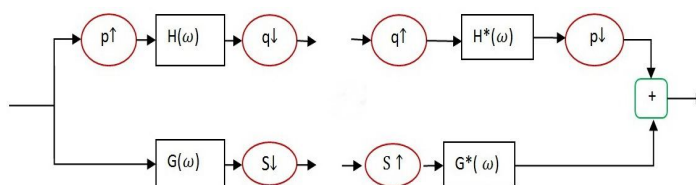
این مقاله خانواده‌ای از موجک‌های گسسته با بازه Q-factor محدودی را بر داده‌های لرزه‌ای به‌منظور تضعیف نوفه تصادفی اعمال می‌کند، که در مقایسه با تبدیل موجک دوتایی می‌تواند Q-factor بیشتر و تفکیک‌پذیری بسامدی بهتری ایجاد کند. در ضمن به‌خاطر بیش‌کامل بودن، این تبدیل تا حدودی از دگرنامی جلوگیری می‌کند، به‌علاوه می‌توان از بیش‌کامل بودن به اندازه نیاز استفاده کرد؛ این مسئله باعث افزایش سرعت پردازش می‌شود. RDWT بر مبنای حوزه زمان طراحی شده است و اجزای آن بر مبنای تبدیل فوریه سریع (FFT) است هرچند فیلترهای به کار رفته در RDWT، پاسخ ضربه محدود (FIR) نیستند، پاسخ فیلتر در حوزه زمان به سرعت تضعیف می‌شود و موجک به‌خوبی در زمان و بسامد محلی می‌شود. RDWT تقریباً نسبت به زمان ناوردا و به سادگی وارون‌پذیر است (بایرام و سلزینیک، ۲۰۰۹). شکل ۲، شبکه نمونه‌برداری گویا در زمان و بسامد را توسط تبدیل موجک RDWT نمایش می‌دهد. برای نمونه‌برداری گویا ابتدا سیگنال با متغیر p نمونه‌افزایی و در جاهای خالی صفر اضافه می‌شود. سپس فیلتر پایین‌گذر  $H(\omega)$  سیگنال را تجزیه می‌کند. در مرحله بعد سیگنال با q نمونه‌کاهی می‌شود. در قسمت بالاگذر، پس از تجزیه سیگنال با فیلتر بالاگذر  $G(\omega)$ ، سیگنال با متغیر s نمونه‌افزایی می‌شود. در این تبدیل کاربر با انتخاب متغیرهای  $p$ ،  $q$  و  $s$  مناسب، ضریب افزونگی و ضریب  $Q$  را تعیین می‌کند. انتخاب مناسب افزونگی،

این روش به‌خاطر توانایی در انتخاب درجه بیش‌کاملی و Q-factor مناسب بهتر می‌تواند سیگنال را تجزیه کند و به تضعیف نوفه پردازد و نیز صدمه کمتری به سیگنال اصلی وارد کند. برای محاسبه Q-factor از رابطه (۱) استفاده می‌شود:

$$Q = \frac{F_0}{BW}, BW = \frac{F_0}{Q}, \quad (1)$$

که  $Q$  کوتاه‌نوشت Q-factor،  $F_0$  نماد بسامد میانی موجک و  $BW$  عرض نوار موجک است (شکل ۱). با توجه به رابطه (۱) متوجه می‌شویم با تغییر Q-factor عرض نوار موجک تغییر می‌کند.

تبدیل موجک گسسته دوتایی یک روش ساده وارون‌پذیر، با ضریب کیفیت ثابت است و تبدیلی بسیار موثر برای نمایش تُنک از سیگنال‌های تکه‌ای هموار است. این ویژگی تبدیل موجک را یک ابزار مطلوب برای پردازش سیگنال و تصویر کرده است. با وجود این تأثیر تبدیل موجک دوتایی بر سیگنال‌هایی که رفتار نوسانی زیاد داشته باشند کمتر است (بایرام و سلزینیک، ۲۰۰۷). در موجک‌های دوتایی جابه‌جایی و کشیدگی با ضرایب ۲ رخ می‌دهد. بایرام و سلزینیک (۲۰۰۹) خانواده‌ای از موجک‌ها را که دارای محدوده بسامدی متنوعی از-Q-factor بود توسعه دادند که در مقایسه با موجک دوتایی می‌تواند تفکیک‌پذیری بسامدی بیشتری داشته باشد. RDWT بیش‌کاملی را از زیاد کردن نمونه‌ها در زمان و بسامد به‌دست می‌آورد و به‌علاوه می‌تواند محدوده غنی از بیش‌کاملی‌ها را فراهم سازد (بایرام و سلزینیک، ۲۰۰۹).



شکل ۱. نمودار نمونه‌برداری در زمان و بسامد در تبدیل RDWT. نمونه‌برداری گویا در فیلتر پایین‌گذر با نسبت  $q/p$  است.

انتخاب پارامترهای  $p, q, s$  و پس از تجزیه سیگنال، با کمک آستانه‌گیری مناسب می‌توان نوفه تصادفی را از سیگنال اصلی جدا کرد. بعد از جداسازی نوفه تصادفی در مرحله بازسازی، سیگنال فیلتر شده بازسازی می‌شود.

### ۳ داده‌ها

به منظور آزمودن توانایی این تبدیل در تضعیف نوفه تصادفی، ابتدا از این روش در داده مصنوعی استفاده شده است. این مقطع دارای پنج لایه با ضرایب بازتاب متفاوت است و از هم‌میخت موجک ریکر با بسامد میانه ۴ کیلو هرتز (شکل ۱.ب) با ضرایب بازتاب لایه‌های فرضی به وجود آمده است. در این مقطع ضریب بازتاب برای لایه‌های اول و سوم و پنجم مثبت و برای لایه‌های دوم و چهارم منفی است (شکل ۶-الف).

داده واقعی مورد استفاده، داده به دست آمده از دستگاه sub-bottom profiler است (شکل ۳). sub-bottom profiler وسیله داده برداری دریایی با عمق کم تا متوسط یا عمیق است (مرکلین و لوچنکو، ۲۰۰۵)، که روی یک کشتی نصب می‌شود. از امواج صوتی با بسامد زیاد (۴،۸،۱۲ kHz) استفاده می‌کند به همین علت تفکیک پذیری قائم خوبی دارد (مرکلین و لوچنکو، ۲۰۰۵)، و برای تشخیص لایه‌های نازک نزدیک به کف دریا یا لوله‌های کف آب یا تشخیص وجود گاز در گل‌ولای کف دریا یا کارهایی از این دست به کار

مانع از پدیده دگرگونی می‌شود و انتخاب ضریب  $Q$  مناسب تفکیک زمانی-بسامدی مناسب را فراهم می‌کند.  $p$  و  $q$  ضریب اتساع را تعیین می‌کنند (ضریب اتساع  $q/p$  است)،  $s$  ضریب نمونه برداری فیلتر بالاگذر است،  $z$  تعداد مراحل پردازش را مشخص می‌کند (بایرام و سلزنیک، ۲۰۰۹).

ضریب  $Q$  نسبت بسامد مرکزی به عرض نوار است و در این تبدیل از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$Q = \frac{RF}{BW} = \sqrt{\frac{p}{q}} \frac{1}{1 - p/q} \quad (2)$$

مشاهده می‌شود که در این تبدیل ضریب  $Q$  مستقل از تعداد مراحل است. ضریب افزونگی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\text{Redundancy}(p, q, s) = \left[ \frac{1 - (p/q)^{j+1}}{s(1 - (p/q))} + \left(\frac{p}{q}\right)^{j+1} \right] \quad (3)$$

که در این تبدیل  $p, q, s$  مقادیر صحیح و مثبتی هستند و شرایط زیر را برآورده می‌کنند:

$$1 \leq \frac{p}{q} + \frac{1}{s}, q > p \geq 1 \quad (4)$$

به این دو شرط در تبدیل موجک RDWT شرایط بازسازی کامل گفته می‌شود. در صورتی که این دو شرط در انتخاب پارامترهای  $p, q, s$  رعایت نشوند، اختلاف زیادی بین سیگنال اولیه و نهایی به وجود می‌آید.

بعد از انتخاب ضریب کیفیت مناسب (به کمک



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۳. دستگاه SES، (الف) گیرنده و فرستنده دستگاه، (ب) دستگاه نمایش دهنده و ثبت کننده، (ج) گیرنده و فرستنده دستگاه روی کشتی نصب می‌شود.

ولی در کار با داده واقعی، چون هیچ اطلاعاتی از نوفه موجود در داده نداریم، برآورد انحراف معیار نوفه کمی مشکل تر است و باید آن را به صورت تقریبی برآورد کنیم. می‌دانیم در تبدیل موجک گسسته، در مرحله اول تجزیه دو دسته ضرایب موسوم به ضرایب تقریب (که از همامیخت سیگنال با فیلتر پایین‌گذر به دست می‌آید) و ضرایب جزئیات (که از همامیخت سیگنال با فیلتر بالاگذر به دست می‌آید) حاصل می‌شود. با توجه به اینکه نوفه دارای ماهیت بسامد زیاد است می‌توان به صورت تقریب ضرایب جزئیات در مرحله اول تجزیه سیگنال را مشابه نوفه در نظر گرفت (جانستون و سیلورمن، ۱۹۹۷). این موضوع را به بیان ریاضی می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sigma = \frac{\text{median}(|\omega_i|)}{0.6745} \quad (6)$$

که منظور از  $\sigma$  انحراف معیار نوفه و منظور از  $\omega_i$  ضرایب جزئیات است که باید از آنها میانگین‌گیری شود.

#### ۵ اعمال فیلتر RDWT روی داده مصنوعی و واقعی

در ابتدا به منظور یافتن متغیرهای استاندارد، مقادیر متفاوتی به پارامترهای  $p$ ،  $q$  و  $s$  نسبت داده شد و بدون هیچ گونه آستانه‌گیری، سیگنال تجزیه و بازسازی شد. مقدار خطای مقدار میانگین که با رابطه (۷) محاسبه می‌شود در جدول ۱ داده شده است.

می‌رود. این دستگاه از یک فرستنده و گیرنده در کنار هم بهره می‌گیرد. به خاطر ساختار آن، داده به دست آمده از آن با دورآفت صفر است. مانند رادار نفوذی زمین (GPR) داده‌برداری هم‌زمان با ارسال سیگنال صورت می‌گیرد. در داده‌های به دست آمده از این دستگاه نوفه‌های متفاوتی از جمله نوفه ناشی از صدای موتور کشتی، امواج آب و نوفه تصادفی حضور دارند. به علت وجود بسامد زیاد چشمه حضور نوفه‌های تصادفی تاثیر بیشتری دارد؛ این نوفه‌ها در قسمت‌های عمیق مقطع که با تضعیف شدید سیگنال همراه است، تاثیر بسزایی بر کیفیت داده دارند و عملاً پیگیری رویدادها و جدایش آنها از هم را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

#### ۴ آستانه‌گذاری

روش‌های گوناگونی را می‌توان برای انتخاب حد آستانه در نظر گرفت، اما در اغلب کاربردها روش پیشنهاد شده دانوهو و جانستون (۱۹۹۴) مورد استفاده قرار می‌گیرد که به صورت رابطه (۵) است:

$$T = \sigma \sqrt{2 \log(N)} \quad (5)$$

که  $T$  مقدار آستانه و  $\sigma$  انحراف معیار نوفه موجود در سیگنال و  $N$  طول سیگنال است.

هنگامی که با داده مصنوعی کار می‌کنیم، به علت اینکه نوفه را به صورت دستی به سیگنال اضافه می‌کنیم، مشکلی برای به دست آوردن انحراف معیار نوفه نداریم،

جدول ۱. مقایسه متفاوت برای پارامترهای  $p$ ،  $q$ ،  $s$  و خطای میانگین مربعی بین سیگنال اولیه و سیگنال بازسازی شده با تبدیل RDWT بدون هیچ گونه آستانه‌گیری.

$p$	$q$	$s$	RMS Error	Q-factor
1	4	1	$3.3 * e^{-17}$	0.667
1	2	1	$2.1 * e^{-17}$	1.4
3	5	1	$2.8 * e^{-17}$	1.9
2	3	1	$4.2 * e^{-17}$	2.44

و آستانه‌گیری‌های متفاوت آمده است. نتایج حاصل از تضعیف نوفه اتفاقی با آستانه‌گیری نرم از راه تبدیل موجک گسسته دوتایی نیز برای مقایسه در جدول ۲ آورده است.

شکل ۴ نتایج حاصل از اعمال فیلتر RDWT را روی داده مصنوعی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود تبدیل RDWT، به‌خوبی فاز موجک ورودی را حفظ کرده است. در شکل ۴-الف، مقطع مصنوعی بدون نوفه نشان داده شده است، شکل ۴-ب، مقطع نوفه گاوسی سفید با نسبت سیگنال به نوفه ۲/۷ dB است، با توجه به شکل ۴-ج، مشاهده می‌شود تضعیف نوفه با تبدیل RDWT به خوبی سیگنال را حفظ و نوفه تصادفی را تا حد زیادی تضعیف کرده است شکل ۴-ج، نسبت سیگنال به نوفه ۱۷dB است. در شکل ۴-ت، نتایج حاصل از تضعیف نوفه تصادفی با تبدیل موجک گسسته دوتایی نمایش داده شده است. شکل ۴-ه، تفاوت مقطع ۴-ب و ۴-ج، را نمایش می‌دهد.

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1:N} (input - output)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

پس از مشاهده کارایی مناسب تبدیل موجک ضریب اتساع گویا و مقدار نشت قابل قبول، متغیرهای  $q$ ،  $p$  و  $s$  متناسب با ضریب‌های کیفیت مقطع مشخص شد (ایرانی مهر و همکاران، ۱۳۹۳).

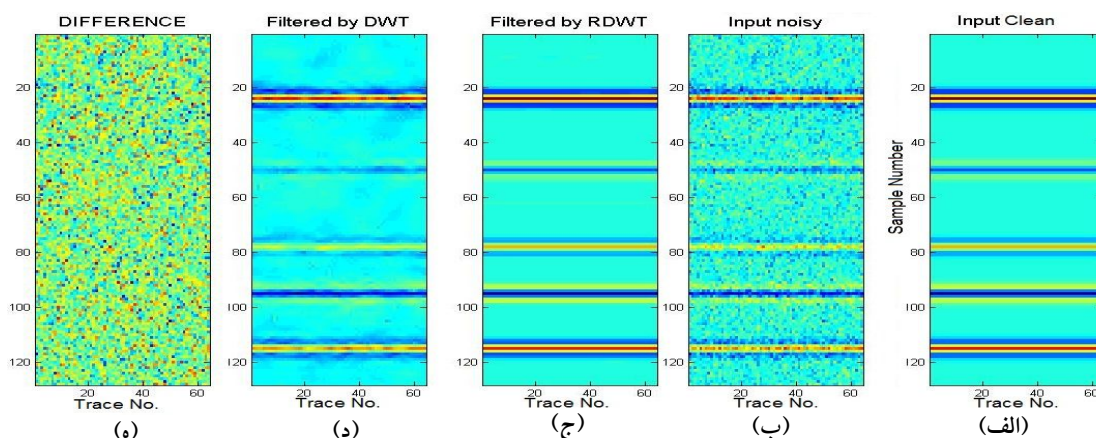
در مرحله بعد برای تجزیه سیگنال، نقشه Q-factor لحظه‌ای مقطع بررسی می‌شود. با ملاحظه نقشه Q-factor لحظه‌ای مقطع، از متغیرهای مناسب  $q$ ،  $p$  و  $s$  که بتوانند Q-factor نزدیک به مقطع بدهند استفاده می‌شود.

در این قسمت از فیلتر RDWT همراه با آستانه‌گیری نرم (دونوهو، ۱۹۹۵) و آستانه‌گیری سخت و آستانه‌گیری گاروت غیرمنفی (گائو، ۱۹۹۸)، برای جداسازی نوفه از سیگنال استفاده شده است. در جدول ۲ نتایج بهبود نسبت سیگنال به نوفه برای داده مصنوعی با سطوح متفاوت نوفه

جدول ۲. مقایسه نتایج تضعیف نوفه تصادفی از راه تبدیل موجک گسسته و تبدیل موجک ضریب اتساع گویا با آستانه‌گیری‌های متفاوت.

	SNR Input Trace dB	Improve SNR filtered by DWT Soft Thr.	Improve SNR filtered by RDWT Hard Thr.	Improve SNR filtered by RDWT Soft Thr.	Improve SNR filtered by RDWT N.n.garrote Thr.
۱	۱۶.۷۰۷۸	۲.۵۲۱۲	۱۶.۵۳۹۷	۱۱.۵۵۸۳	۱۱.۲۸۵۰
۲	۱۰.۶۸۷۲	۱.۹۲۳۵	۱۳.۶۳۶۴	۱۱.۸۵۱۲	۱۳.۸۸۳۲
۳	۷.۱۶۵۴	۱.۰۱۰	۱۱.۸۸۶۳	۱۱.۸۴۴۰	۱۵.۷۶۳۴
۴	۴.۶۶۶۶	۰.۱۶۳۰	۹.۵۰۴۶	۱۱.۵۳۷۳	۱۵.۱۸۶۵
۵	۲.۷۲۸۴	۰.۲۰۷۳	۹.۵۰۴۶	۱۱.۹۰۴۱	۱۵.۶۳۷
۶	۱.۱۴۴	۰.۱۸۸	۷.۱۶۱۳	۱۱.۹۸۲	۱۳.۷۸۲۸
۷	-۰.۱۹۴۱	۰.۰۴۱۷	۷.۰۹۸۴	۱۲.۰۲۹	۱۳.۵۵۲۲
۸	-۱.۳۵۴۰	۰.۳۹۱۴	۷.۱۸۴۹	۱۲.۰۸۵	۱۳.۵۱۷۱
۹	-۲.۳۷۷۰	۰.۸۳۵۶	۸.۲۸۴۲	۱۲.۱۴۱	۱۳.۴۴۰۷
۱۰	-۳.۲۹۲۲	۱.۲۴۸	۸.۳۴۹۰	۱۲.۱۵۴	۱۳.۳۸۴۶





شکل ۴. مقایسه مقاطع مصنوعی قبل و بعد از اعمال فیلتر RDWT: (الف) مقطع بدون نوفه. (ب) مقطع با نسبت سیگنال به نوفه ۲۰.۷ dB. (ج) مقطع پس از تضعیف نوفه با فیلتر RDWT نسبت سیگنال به نوفه ۱۸.۳ dB. (د) مقطع پس از تضعیف نوفه با فیلتر DWT. (ه) تفاوت مقطع‌های (ب) و (ج).

ه، ردلرزه (د) پس از تضعیف نوفه تصادفی با تبدیل DWT، و شکل ۶-ج ردلرزه (د) پس از تضعیف نوفه تصادفی با تبدیل RDWT، را نشان می‌دهد. نسبت سیگنال به نوفه در شکل ۶-ج، ۱۸.۳ dB است.

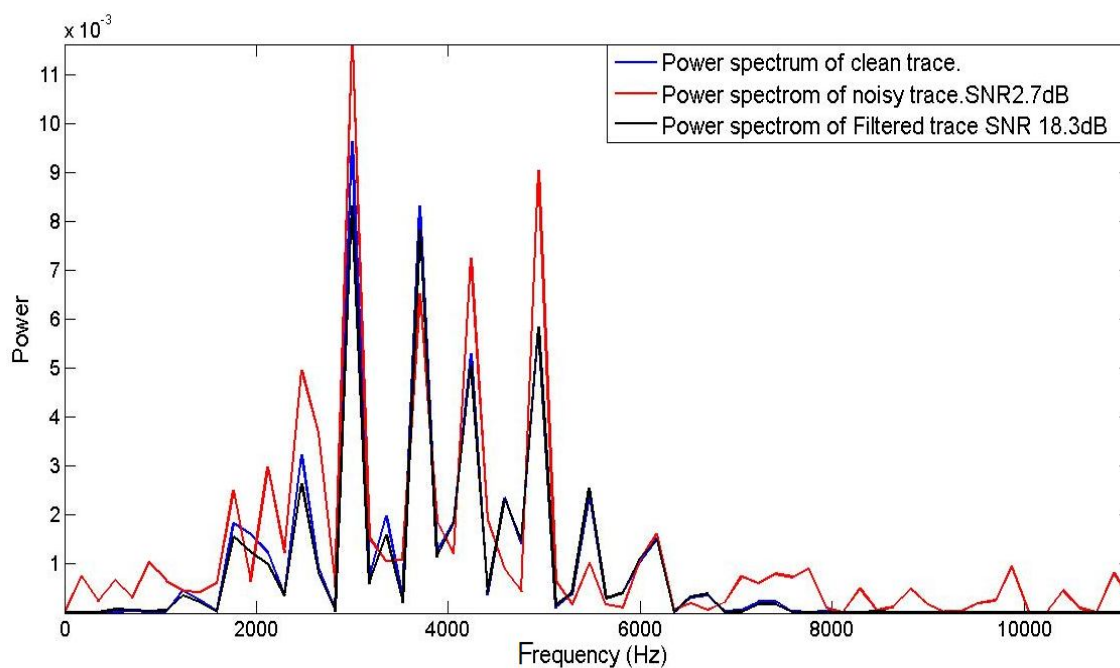
با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که جداسازی نوفه تصادفی از سیگنال در جاهایی که ضریب بازتاب کوچک است بسیار دشوار است، اما تبدیل RDWT به خوبی توانسته در نواحی با ضریب بازتاب کم، سیگنال را از نوفه جدا کند. لازم به ذکر است در بعضی نمونه‌ها (نمونه ۱۵ تا ۲۰) تبدیل نتوانسته به خوبی نوفه تصادفی را تضعیف کند.

پس از اجرای موفقیت‌آمیز این روش روی داده مصنوعی، برای نشان دادن موثر بودن آن، این روش روی داده واقعی امتحان شد. داده واقعی مورد استفاده از نوع دریایی و محتوای بسامدی آن بزرگ است (۲ kHz-۲۰ kHz) بنا بر این دامنه موج به سرعت تضعیف می‌شود. در این تحقیق، برای استفاده از تبدیل RDWT در تضعیف نوفه تصادفی از داده مصنوعی، با توجه به جدول ۱، متغیرهای مناسب به صورت  $q=2, p=1, s=1$  و Q-factor متناظر آن  $1/4$  به دست آمد. سپس با استفاده از این پارامترها و استفاده از آستانه‌گیری گاروت غیرمنفی

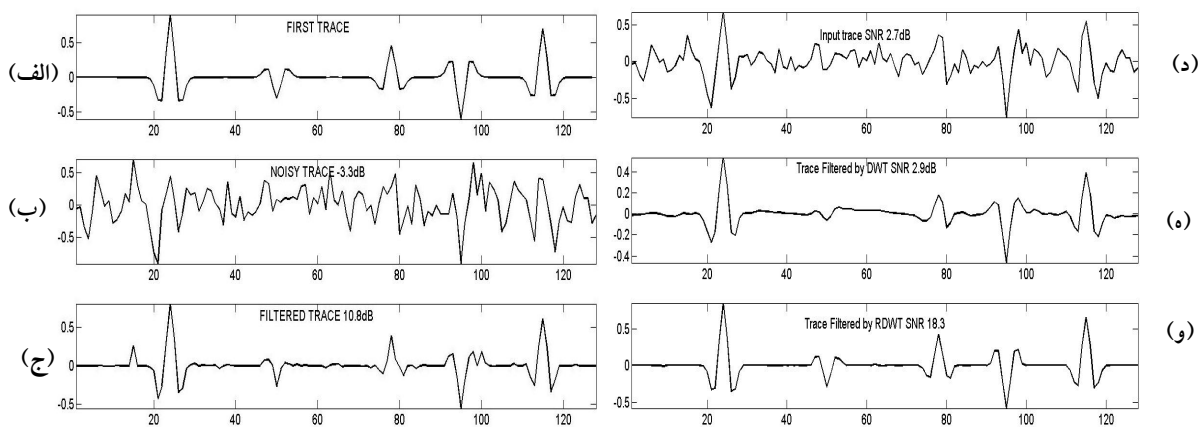
شکل ۵، طیف توان ردلرزه مصنوعی شماره ۲۰ که بسامد مرکزی آن ۴ kHz است را نمایش می‌دهد. طیف توان این ردلرزه بدون نوفه تصادفی و نیز حاوی نوفه تصادفی و پس از تضعیف نوفه تصادفی با تبدیل RDWT نمایش داده شده است، با توجه به نمودار مشاهده می‌شود نوفه تصادفی در همه بسامدها وجود دارد و تبدیل به خوبی سیگنال را از نوفه جدا کرده است. در بسامد ۴ kHz که بسامد میانی موجک ریکر سازنده مقطع نیز هست، مطابقت خوبی بین سیگنال ورودی و خروجی دیده می‌شود.

در شکل ۶ ردلرزه شماره ۲۰ انتخاب، و نتایج اعمال فیلتر RDWT بر آن نشان داده شده است. در شکل ۶-ب سمت راست ردلرزه ۲۰م همراه با نوفه تصادفی سفید، با نسبت سیگنال به نوفه ۳.۳ dB نمایش داده شده است. شکل ۶-ج ردلرزه (۶-ب) را پس از تضعیف نوفه با تبدیل RDWT، نشان می‌دهد. در ردلرزه بازسازی شده، نسبت سیگنال به نوفه ۱۰.۱۸ dB است. بازسازی ردلرزه از راه تبدیل به کار رفته به خوبی توانسته نوفه تصادفی را تضعیف کند، بدون اینکه به سیگنال صدمه‌ای وارد شود. در شکل ۶-ت، ردلرزه (الف) همراه با نوفه تصادفی سفید و نسبت سیگنال به نوفه ۲.۷ dB مشاهده می‌شود. شکل ۶-ه





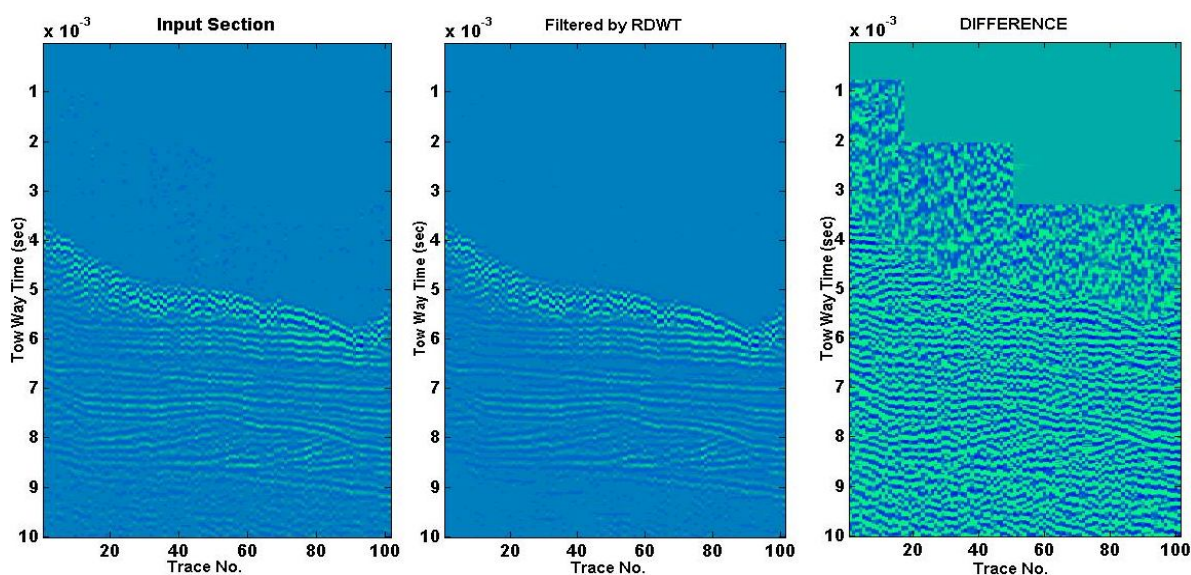
شکل ۵. طیف توان ردلرزه ۲۰ آم شکل ۴ نمودار آبی رنگ طیف توان ردلرزه شماره ۲۰ بدون نوفه تصادفی. نمودار سرخ رنگ طیف توان همان ردلرزه، همراه با نوفه تصادفی و نسبت سیگنال به نوفه ۲/۷ dB. نمودار سیاه رنگ طیف توان ردلرزه فیلتر شده با تبدیل موجک ضرب اتساع گویا را نشان می دهد.



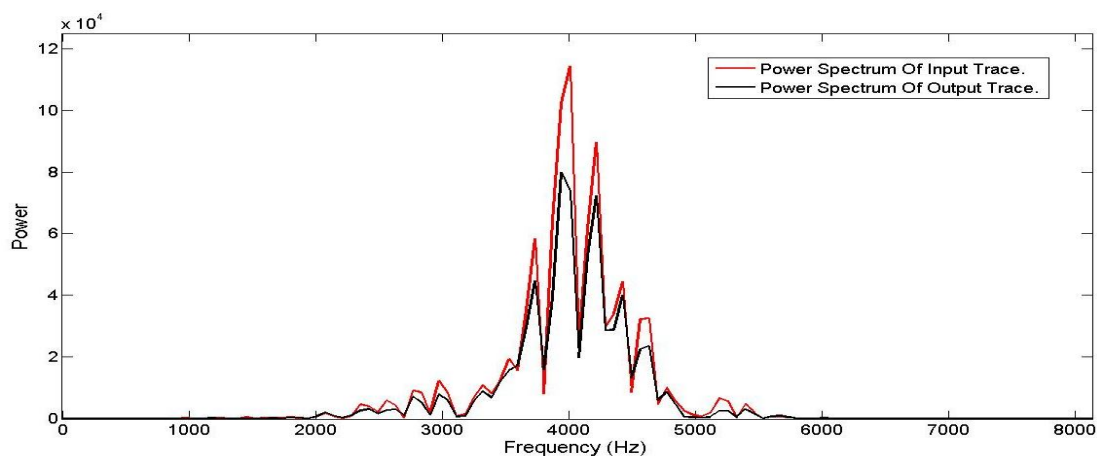
شکل ۶. سمت چپ، مقایسه ردلرزه مصنوعی شماره ۲۰. (الف) قبل از افزودن نوفه. (ب) ردلرزه (الف) همراه با نوفه تصادفی سفید، نسبت سیگنال به نوفه ۳/۳ dB. (ج) ردلرزه (ب) پس از تضعیف نوفه با تبدیل RDWT، نسبت سیگنال به نوفه ۱۰/۸ dB. (ت) ردلرزه (الف) همراه با نوفه تصادفی سفید نسبت سیگنال به نوفه ۲/۷ dB. (ث) ردلرزه (د) پس از تضعیف نوفه تصادفی با تبدیل DWT. (و) ردلرزه (د) پس از تضعیف نوفه تصادفی با تبدیل RDWT، نسبت سیگنال به نوفه ۱۸/۳ dB.

برداری با آهنگ نمونه برداری ۱۰ میکروثانیه (یا بسامد ۱۰۰ کیلو هرتز) بوده است که به راحتی مانع از پدیده دگرنامی در محدوده سیگنال ارسالی از دستگاه (۴kHz) در هنگام داده برداری می‌شود. با توجه به اینکه بسامد اصلی موجک ارسال شده توسط دستگاه در این داده برداری ۴ kHz بوده است تطابق خوبی، بین طیف ردلرزه ورودی و ردلرزه خروجی در این محدوده بسامدی مشاهده می‌شود.

مناسب برای نوع داده و محیط داده برداری به تضعیف نوفه تصادفی از داده دریایی اقدام شد. شکل ۷ مقطع را قبل و بعد از اعمال تبدیل RDWT و نیز تفاوت مقطع فیلتر شده و مقطع اولیه را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که سطح نوفه در مقطع کاهش یافته و پیوستگی رویدادها بهبود یافته است. در شکل ۸، طیف توان ردلرزه ۲۰م قبل و بعد از اعمال تبدیل نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود نوفه تصادفی در همه بسامدها وجود دارد و تبدیل به خوبی سیگنال را از نوفه جدا کرده است. لازم به ذکر است که این نمونه



شکل ۷. داده واقعی. (الف) مقطع زمانی، داده دریایی با دورآفت صفر. (ب) مقطع لرزه‌ای پس از اعمال تبدیل RDWT. (ج) تفاوت مقطع الف و ب.



شکل ۸. طیف توان ردلرزه ۲۰م داده واقعی: نمودار سرخ طیف توان داده ورودی. نمودار سیاه رنگ، طیف توان پس از اعمال تبدیل RDWT را نشان می‌دهد.

## ۶ نتیجه گیری

در این تحقیق از تبدیل RDWT برای تضعیف نوفه اتفاقی داده‌های لرزه‌ای استفاده شد. RDWT به علت نمونه‌برداری گویا در زمان و بسامد، تفکیک زمانی و بسامدی را بهبود بخشید. در این تبدیل با آستانه‌گذاری گاروت غیرمنفی روی ضرایب موجک ردلرزه، نوفه تصادفی ردلرزه تضعیف شد. توانایی این تبدیل با اعمال آن بر داده‌های مصنوعی و واقعی مورد بررسی قرار گرفت و اعمال این تبدیل روی داده مصنوعی با مقادیر متفاوت نوفه به کار گرفته شد و نتایج با ردلرزه بدون نوفه مقایسه شد. با اعمال این تبدیل، نتایج قابل‌قبولی در تضعیف نوفه تصادفی از داده لرزه‌ای به دست آمد. میزان تفاوت بین ردلرزه اولیه و ردلرزه به دست آمده بعد از اعمال این تبدیل، از دیدگاه حفظ سیگنال بسیار ناچیز است و ردلرزه شکل اولیه خود را ضمن تضعیف نوفه، حفظ کرده است. اعمال این تبدیل بر داده دریایی نشان‌دهنده مفید بودن این تبدیل برای تضعیف نوفه تصادفی از این نوع داده لرزه‌ای است.

## تشکر و قدردانی

نگارندگان این تحقیق از همکاری سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، واحد زمین‌شناسی دریایی و سرکار خانم بهشاد و مهندس مهدی چاکری تقدیر و تشکر به عمل می‌آورند.

## منابع

- روشندل کاهو، ا. و نجاتی کلاته، ع.، ۱۳۹۰، تضعیف نوفه‌های اتفاقی در داده‌های لرزه‌ای با استفاده از تجزیه مُد تجربی: مجله ژئوفیزیک ایران، ۵، (۶۱-۶۸).
- Bayram, I., and Selesnick, I. W., 2007, Design of orthonormal and overcomplete wavelet transforms based on rational sampling factors: Proc. SPIE 6763, Wavelet Applications in Industrial Processing V, 67630H .
- Bayram, I., and Selesnick, I. W., 2009, Frequency-domain design of overcomplete rational-dilation wavelet transforms: IEEE Trans. Signal Process, **57**(8), 2957–2972.
- Canales, L. L., 1984, Random noise reduction: SEG Technical Program Expanded Abstracts, **3**, 525–527.
- Donoho, D. L., 1995, Denoising by soft-thresholding: IEEE Transactions Information Theory, **41**(3), 613–627.
- Donoho, D. L., Johnstone, I. M., 1994, Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage: Biometrika, **81**, 425–455.
- Fugal, L. D., 2009, Conceptual wavelets in digital signal processing, Space & Signals Technologies LLC.
- Gao, H. Y., 1998, Wavelet shrinkage denoising using the non-negative garrote: J. Comput. Graph. Statist, **7**, 469–488.
- Gulunay, N., Magesan M., and Baldock S., 2001, Spatial prediction filters for attenuation of seismic interference noise, CGG: Americas Inc.
- Johnstone, I. M., and Silverman, B. W., 1997, Wavelet threshold estimators for data with correlated noise: J. R. Statist. Soc. B **59**, 319–51.
- Merklin, L., and Levchenko, O., 2005, Seismic Engineering Survey in the Caspian Sea for Oil and Gas Companies, 2nd Workshop “Seabed Acoustics” in Rostock-Warnemünde.
- Yilmaz, O., 2001, Seismic Data Analysis, second edition: Society of Exploration Geophysicists.