

## تضعیف نوفه‌های تصادفی مقاطع لرزه‌ای با استفاده از ترکیب تبدیل زمان - بسامد و تجزیه مُد تجربی

فرید کریمی<sup>۱</sup>، امین روشندل کاهو<sup>۱\*</sup>، حمیدرضا سیاه‌کوهی<sup>۲</sup> و علیرضا جواهری نیستانک<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

<sup>۲</sup>موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

<sup>۳</sup>شرکت ملی نفت ایران، مدیریت اکتشاف نفت، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۳/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۹/۲۶)

### چکیده

تصویرسازی لرزه‌ای به شدت به کیفیت داده‌های لرزه‌ای وابسته است. تفسیر ساختاری و چینه‌ای مقاطع لرزه‌ای که حاوی کمترین میزان نوفه تصادفی و همدوس هستند، به مراتب راحت‌تر است. نوفه‌های متعددی در مقاطع لرزه‌ای دیده می‌شود که دسته مهمی از آنها، نوفه‌های تصادفی‌اند. تضعیف این دسته از نوفه‌ها، به‌خصوص زمانی که نسبت سیگنال به نوفه کم باشد، بسیار دشوار است. تاکنون روش‌های گوناگونی برای تضعیف نوفه‌های تصادفی عرضه شده است که هرکدام مزایا و معایب مربوط به خود را دارد. در این مقاله سعی شده است که از روش جدیدی برای تضعیف نوفه‌های تصادفی در حوزه  $t-f-x$  استفاده شود. برای این کار با استفاده از تبدیل  $S$  تعمیم‌یافته مقطع لرزه‌ای از حوزه  $t-x$  به حوزه  $t-f-x$  انتقال داده می‌شود و سپس در این حوزه تجزیه مُد تجربی (Empirical Mode Decomposition, EMD) در راستای مکان برای یک زمان و بسامد خاص اعمال می‌شود. اولین تابع مُد ذاتی به دست آمده از روش تجزیه مُد تجربی، سریع‌ترین نوسانات را در داده‌ها نشان می‌دهد. به این معنی که بزرگ‌ترین مؤلفه‌های عدد موج (مربوط به نوفه) در اولین تابع مُد ذاتی موجود است. بنابراین برای افزایش نسبت سیگنال به نوفه می‌توان اولین تابع مُد ذاتی را از سیگنال اصلی کسر کرد. نوفه تصادفی شامل همه بسامدها است و برای این که بتوان نوفه تصادفی را در مقاطع لرزه‌ای تضعیف کرد، می‌توان برای هر بسامدی روش حذف اولین تابع مُد ذاتی را اعمال کرد. در روشی جدید با استفاده از الگوریتم مبتنی بر آستانه‌گذاری بازه‌ای روی تابع‌های مُد ذاتی که به نوفه تصادفی آلوده هستند پاک می‌شود و بعد از تضعیف نوفه مقاطع لرزه‌ای با استفاده از معکوس تبدیل  $S$  به حوزه  $t-x$  برگردانده می‌شوند. در این مقاله الگوریتم پیش‌گفته روی مقاطع لرزه‌ای مصنوعی و واقعی اعمال و با روش ترکیب تبدیل فوریه و تجزیه مُد تجربی مقایسه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نوفه‌های تصادفی، تبدیل  $S$  تعمیم‌یافته، تجزیه مُد تجربی، تابع‌های مُد ذاتی، آستانه‌گذاری بازه‌ای

## Seismic random noise attenuation by combining the time-frequency transform and empirical mode decomposition

Farid Karimi<sup>1</sup>, Amin Roshandel Kahoo<sup>1\*</sup>, Hamid Reza Siahkoochi<sup>2</sup> and Alireza Javaheri Neistanak<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, University of Shahrood, Shahrood, Iran

<sup>2</sup>Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup>National Iranian Oil Company, Exploration Directorate, Tehran, Iran

(Received: 15 June 2013, accepted: 17 December 2013)

## Summary

Seismic records are generally affected by various types of noise, such as ground rolls, multiples, random noise, reflection and reflected refraction from near surface structures. Random noise resulting from random oscillation during data acquisition is one of the most important and harmful noises that exist in seismic data over all times and frequencies. Much effort has been made to attenuate this type of noise from seismic data. The predictive filter is commonly used for random noise attenuation from seismic data. This filter can be used in various domains such as the f-x domain (Haris and White, 1997) and the discrete Cosine domain (Lu and Liu, 2007). Bekara and van der Ban (2009) attenuated the coherent and random noises using a combination of empirical mode decomposition (EMD) and Fourier transform.

EMD decomposes a time series into a finite set of signals called intrinsic mode functions (IMFs). They represent different oscillations embedded in the data. They are built to satisfy two conditions: (1) The number of extrema and the number of zero crossings must be equal or differ at most by one, and (2) at any point the mean value of the local maxima envelope and the local minima envelope must be zero.

Bekara and van der Ban (2009) transformed seismic section from the t-x domain to an f-x domain by Fourier transform. Then, they applied EMD to a constant-frequency slice in the f-x domain and removed the first IMF. In the FX-EMD method, the denoised seismic section can be obtained by reversing the EMD and Fourier transform, respectively.

The time–frequency transform of a signal shows a variation in the frequency contents of a signal with time. Ideally, the time-frequency representation only provides information about the frequency moments without mutual information about the adjacent instants. Stockwell (1996) introduced the S-transform which is a combination of short-time Fourier (STFT) and wavelet transforms. It uses a variable window length and the Fourier kernel. However, the S-transform suffers from a poor energy concentration in the time-frequency domain. It has a poor time resolution at lower frequencies and a poor frequency resolution at higher frequencies. Sahu et al. (2009) proposed a modified Gaussian window which scales with the frequency in an efficient way to obtain a better energy concentration of the S-transform.

Han-peng et al. (2011) used the time-frequency transform instead of Fourier transform (TFX-EMD) for considering the nonstationary property of the seismic data. They obtained the denoised seismic section by applying the EMD to a constant-frequency slice and removing the first IMF in t-f-x domain.

Due to the presence of random noise in the other IMFs, removing the first IMF is not always an appropriate approach. One of the best algorithms in EMD-based noise attenuation is the interval thresholding of the IMFs. The main idea of this algorithm is to determine an appropriate threshold value and to apply it to the considered IMFs.

In this study, we modified the TFX-EMD algorithm by changing the EMD denoising strategy. We used the interval thresholding of IMFs instead of removing the first IMF in the t-f-x domain. We evaluated the efficiency of our method on both synthetic and real seismic sections and compared the obtained results with those of the FX-EMD and traditional TFX-EMD methods. The comparison shows that the new EMD denoising strategy in the t-f-x domain can effectively suppress random noise and has a better performance than the other two approaches. Also, in our method, unlike the FX-EMD and traditional TFX-EMD, the steep events are preserved.

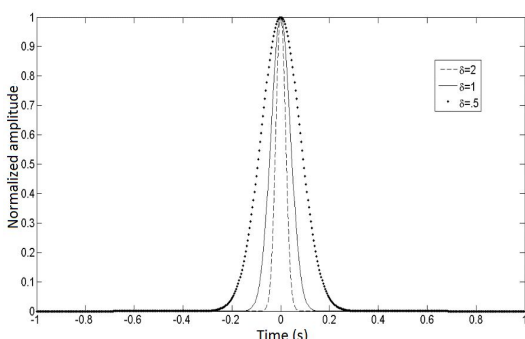
**Keywords:** Random noises, generalized S transform, empirical mode decomposition, intrinsic mode function, interval thresholding

## ۱ مقدمه

داده‌های لرزه‌ای برداشت شده عموماً با نوفه همراه هستند. یکی از مهم‌ترین انواع نوفه‌ها، نوفه تصادفی است. چنانچه این نوفه‌ها تضعیف نشوند، در مراحل بعدی پردازش مشکلاتی را ایجاد می‌کنند. لذا مسئله تضعیف نوفه یکی از اساسی‌ترین و مهم‌ترین مراحل پردازش اطلاعات لرزه‌ای است. اما با وجود این همواره مقداری از نوفه‌ها به خصوص نوفه تصادفی در مقاطع نهایی لرزه‌ای، در آخرین مرحله پردازش باقی می‌مانند. روش‌های گوناگونی برای تضعیف نوفه‌های تصادفی معرفی شده است. فیلتر پیشگو روش متداول برای تضعیف این نوع از نوفه‌ها است. این فیلتر را می‌توان در حوزه‌های گوناگونی مانند حوزه  $f-x$  (هریس و وایت، ۱۹۹۷) و حوزه کسینوس گسسته (لو و لیو، ۲۰۰۷) به کار برد. تریکت (۲۰۰۸) با استفاده از فیلتر کادزو در حوزه  $f-xy$  به تضعیف نوفه‌های تصادفی پرداخت. در روشی دیگر، بکارا و وندریان (۲۰۰۹) با استفاده از تجزیه مُد تجربی، تابع‌های ذاتی مربوط به نوفه‌ها را حذف و از باقی‌مانده تابع‌های ذاتی که مربوط به سیگنال هستند برای بازسازی سیگنال بدون نوفه استفاده کردند. امینی (۱۳۹۰) با استفاده از ترکیب تبدیل فوریه و تجزیه مُد تجربی (EMD) در حوزه  $f-x$  توانست نوفه‌های تصادفی را در داده‌های لرزه‌ای تضعیف کند. در این روش ناپایایی داده‌های لرزه‌ای مورد توجه قرار نگرفته است. روش‌های نوفه‌زدایی بر مبنای تبدیل‌های زمان-بسامد و تبدیل موجک با در نظر گرفتن خاصیت ناپایایی داده‌های لرزه‌ای، امروزه برای تضعیف نوفه‌های تصادفی بسیار به کار برده می‌شوند (بوآشاش، ۲۰۰۳). با استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر آستانه‌گذاری بازه‌ای روی تابع‌های مُد ذاتی گوناگون، به تضعیف نوفه‌های تصادفی در داده‌های لرزه‌ای بازتابی در حوزه زمان - مکان پرداخته شده است (کوپسینیس و مک لاولین، ۲۰۰۸).

معمولاً برای اطلاع از محتوای بسامدی سیگنال از تبدیل فوریه استفاده می‌شود. در بسیاری از کارهای پردازشی با توجه به ناپایایی سیگنال و نوفه، لازم است علاوه بر اطلاع از محتوای بسامدی یک سیگنال، از توزیع زمانی مؤلفه‌های بسامدی آن نیز اطلاع داشت. اما تبدیل فوریه توصیفی از توزیع مؤلفه‌های بسامدی در زمان را به دست نمی‌دهد (مالات، ۱۹۹۹).

پردازش زمان-بسامد یکی از شاخه‌های پردازش سیگنال است که در چند دهه اخیر اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. تحلیل زمان-بسامد یک سیگنال ناپایا، تغییرات طیف سیگنال را با زمان نمایش می‌دهد. یک نمایش زمان-بسامد آرمانی فقط اطلاعات در مورد بسامد رخ دهنده در یک لحظه خاص را تدارک می‌بیند، بدون اینکه در مورد لحظه‌های مجاور، اطلاعاتی به دست بدهد (استنکوویچ، ۱۹۹۴؛ گروچینگ، ۲۰۰۱).



شکل ۱. پنجره گاوسی بهنجارشده برای مقادیر متفاوت  $\delta$  به ازای تک بسامد ۲۵ هرتز.

گابور (۱۹۴۶) با معرفی تبدیل فوریه پنجره‌ای یا به عبارت دیگر تبدیل فوریه زمان کوتاه، ایده جدیدی برای بررسی سیگنال‌ها در حوزه مشترک زمان و بسامد مطرح کرد. یکی از مشکلات این روش انتخاب طول مناسب برای پنجره است. زیرا این طول، تفکیک بسامدی سیگنال را کنترل می‌کند. از آنجاکه پنجره به کار رفته در محاسبه

بهبودیافته و تجزیه مُد تجربی، نوفه‌های تصادفی مقاطع لرزه‌ای تضعیف شوند.

## ۲ تبدیل S تعمیم‌یافته

تبدیل S یک سیگنال  $x(t)$  با رابطه (۱) نشان داده می‌شود (استاک‌ول و همکاران، ۱۹۹۶).

$$S_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) w(t - \tau, f) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (1)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{\sigma(f)\sqrt{2\pi}} e^{-(t-\tau)^2/2\sigma(f)^2} e^{-j2\pi f \tau} d\tau,$$

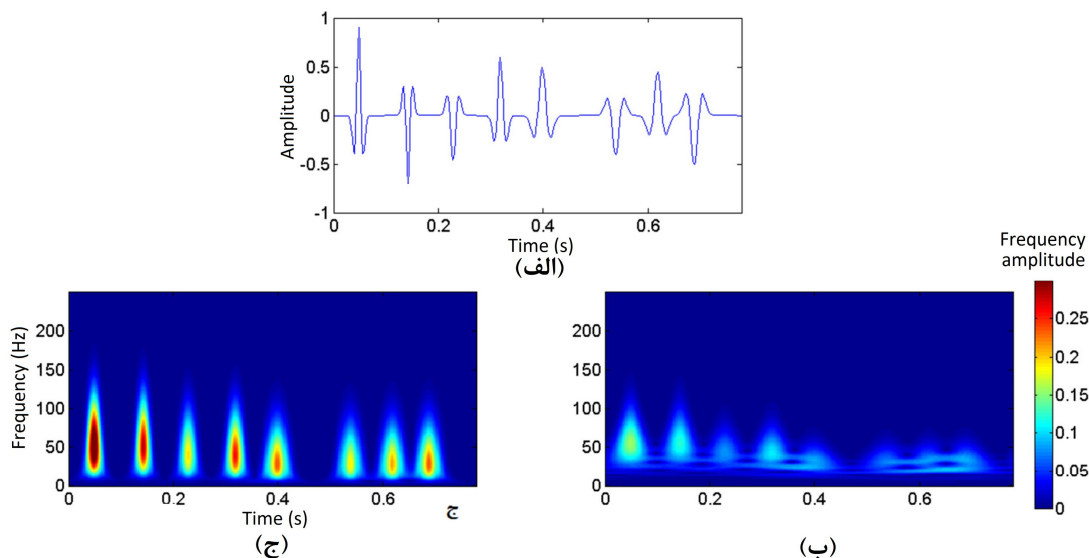
که  $w(t - \tau, f)$  پنجره گاوسی با مرکزیت  $\tau$  است و پهنای آن با بسامد  $f$  تغییر می‌کند. یکی از مزیت‌های تبدیل S نسبت به تبدیل فوریه زمان کوتاه این است که انحراف معیار  $\sigma$  تابعی از بسامد  $f$  است که به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$\sigma(f) = \frac{1}{|f|}. \quad (2)$$

به منظور افزایش تفکیک زمانی و بسامدی برای بسامدهای کم و زیاد، تبدیل‌های S تعمیم‌یافته‌ای معرفی شدند که هر کدام با استفاده از یک پارامتر اضافه نسبت به

تبدیل فوریه زمان کوتاه ثابت است، لذا برحسب سیگنال مورد تحلیل، بایستی نوعی سازش بین تفکیک زمانی و بسامدی قائل شد. زیرا نمی‌توان هم‌زمان تفکیک زمانی و بسامدی را افزایش داد (اوگر و همکاران، ۱۹۹۶). از اواسط دهه ۱۹۸۰ ابزار دیگری تحت عنوان تبدیل موجک برای نمایش زمان-بسامد که هدف آن، فائق آمدن بر مشکلات مربوط به قدرت تفکیک در تبدیل فوریه زمان کوتاه است، از سوی مورت معرفی شد. البته این تبدیل به طور مستقیم نمایش زمان-بسامد تولید نمی‌کند، بلکه نمایش سیگنال در حوزه زمان-مقیاس را تولید می‌کند که مقیاس و بسامد ارتباطی معکوس با یکدیگر دارند (روشندل، ۱۳۸۸). استاک‌ول و همکاران (۱۹۹۶) تبدیل S را به منظور تولید نمایش زمان-بسامد با استفاده از پنجره با طول متغیر پیشنهاد دادند.

هوانگ و همکاران (۱۹۹۸) معتقد بودند که هر داده پیچیده‌ای را می‌توان به تابع‌های مُد ذاتی محدود شده تجزیه کرد و روش تجزیه مُد تجربی که روی داده‌های ناپایا و غیرخطی متمرکز است، پیشنهاد کردند. در این مقاله سعی شده است با استفاده از ترکیب تبدیل S



شکل ۲. سیگنال مصنوعی با صفحه زمان-بسامد (الف) سیگنال ناپایا مصنوعی موجک ریکر با بسامدهای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ هرتز؛ (ب) نمودار صفحه زمان-بسامد تبدیل S استاندارد مربوط به شکل ۲-الف؛ (ج) نمودار صفحه زمان-بسامد تبدیل S تعمیم‌یافته مربوط به شکل ۲-الف.

### ۳ الگوریتم تجزیه مُد تجربی یک‌بُعدی

تجزیه مُد تجربی که اولین بار از سوی هوانگ (۱۹۹۸) مطرح شد، روشی تجربی برای تجزیه یک سیگنال به تعدادی متناهی از تابع‌های نوسانی است که دارای تبدیل هیلبرت خوش رفتار هستند. این تابع‌های نوسانی، تابع‌های مُد ذاتی (IMF) Intrinsic Mode Functions نامیده می‌شوند. به علت توانایی EMD در نشان دادن تغییرات زمان کوتاه برحسب بسامد که از راه تحلیل طیفی فوریه قابل دسترسی نیست، می‌توان از آن برای تحلیل سیگنال‌های غیرخطی و ناپایا استفاده کرد. هدف اصلی EMD از تجزیه زمان کوتاه سیگنال‌ها، یافتن بسامد لحظه‌ای برای تحلیل زمان-بسامد سیگنال‌های ناپایا است. IMF تابعی است که باید دو شرط زیر را برآورده کند (هوانگ و همکاران، ۱۹۹۸):

- در همه مجموعه داده، تعداد فرین‌ها (اکستریم-ها) و تعداد عبور از صفر باید با هم برابر و یا حداکثر یک واحد اختلاف داشته باشند.
  - در هر نقطه، مقدار میانگین پوش تعریف شده با بیشینه‌های محلی و پوش تعریف شده با کمینه‌های محلی باید صفر باشد. به عبارت دیگر یک IMF باید تابعی متقارن حول صفر باشد.
- بر پایه دو شرط فوق، از فرایند غربال کردن برای محاسبه IMF‌های یک سیگنال به صورت زیر استفاده می‌شود (هوانگ و همکاران، ۱۹۹۸).

- ۱- تعیین همه فرین‌های محلی سیگنال  $X(t)$  (شامل بیشینه‌ها و کمینه‌های محلی سیگنال).
- ۲- درون‌یابی کمینه‌های نسبی و بیشینه‌های نسبی با استفاده از روش اسپلاین مکعبی برای به دست آوردن پوش پایینی سیگنال  $X_L(t)$  و پوش بالایی سیگنال  $X_U(t)$ .
- ۳- محاسبه پوش میانگین پوش‌های بالایی و پایینی سیگنال:

تبدیل S متداول، قدرت تفکیک را در راستای زمان و بسامد افزایش دادند. در این تبدیل S تعمیم‌یافته‌ای که در این مقاله از آن استفاده می‌شود، پارامتر اضافی  $\delta$  در تعریف انحراف معیار استفاده می‌شود و رابطه (۲) به صورت رابطه (۳) تغییر می‌کند (ساهو و همکاران، ۲۰۰۹).

$$\sigma(f) = \frac{\delta}{|f|} \quad (۳)$$

بنابراین تبدیل S تعمیم‌یافته به صورت رابطه (۴) خواهد بود.

$$S_x(t, f, \delta) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)|f|}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2\delta^2}} e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (۴)$$

$$w(\tau, f, \delta) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{\tau^2 f^2}{2\delta^2}}$$

اگر در رابطه (۳) مقدار  $\delta$  کوچک باشد، پنجره گاوسی پهن‌تر می‌شود. بنابراین وضوح بسامدی در بسامدهای زیاد کاهش می‌یابد. اگر  $\delta$  بزرگ باشد پنجره گاوسی باریک‌تر می‌شود که نتیجه آن کاهش وضوح زمانی در بسامدهای کم است. بنابراین مقادیر پارامتر  $\delta$  باید هوشمندانه تغییر یابد تا تفکیک بهتری در صفحه زمان-بسامد ایجاد شود. تغییرات پهنای تابع پنجره با مقادیر  $\delta$  به ازای بسامد ۲۵ هرتز در شکل ۱ نشان داده شده است. در این مقاله تغییرات پارامتر  $\delta$  با بسامد به صورت رابطه (۵) استفاده شده است (ساهو و همکاران، ۲۰۰۹).

$$\delta(f) \approx \alpha f, \quad (۵)$$

که  $\alpha$  شیب خط است و مثبت در نظر گرفته می‌شود. برای نشان دادن ویژگی‌های این تبدیل S تعمیم‌یافته روی یک سیگنال مصنوعی ناپایا با موجک‌های ریکر با بسامدهای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ هرتز تولید و طیف دامنه تبدیل S متداول و تعمیم‌یافته آن با یکدیگر مقایسه شد که نتایج در شکل ۲ نشان داده شده است.

پیش گفته نباشد، بایستی مراحل ۱ تا ۴ روی  $d(t)$  تکرار شود تا آن که شرط‌های پیش گفته در آن برقرار شود.

۵- پس از محاسبه تابع مُد ذاتی در ۴ مرحله قبل، به منظور محاسبه سایر تابع‌های مُد ذاتی سیگنال، بایستی تابع مُد ذاتی به دست آمده از سیگنال کسر شود و فرایند غربال روی سیگنال باقی‌مانده تکرار شود.

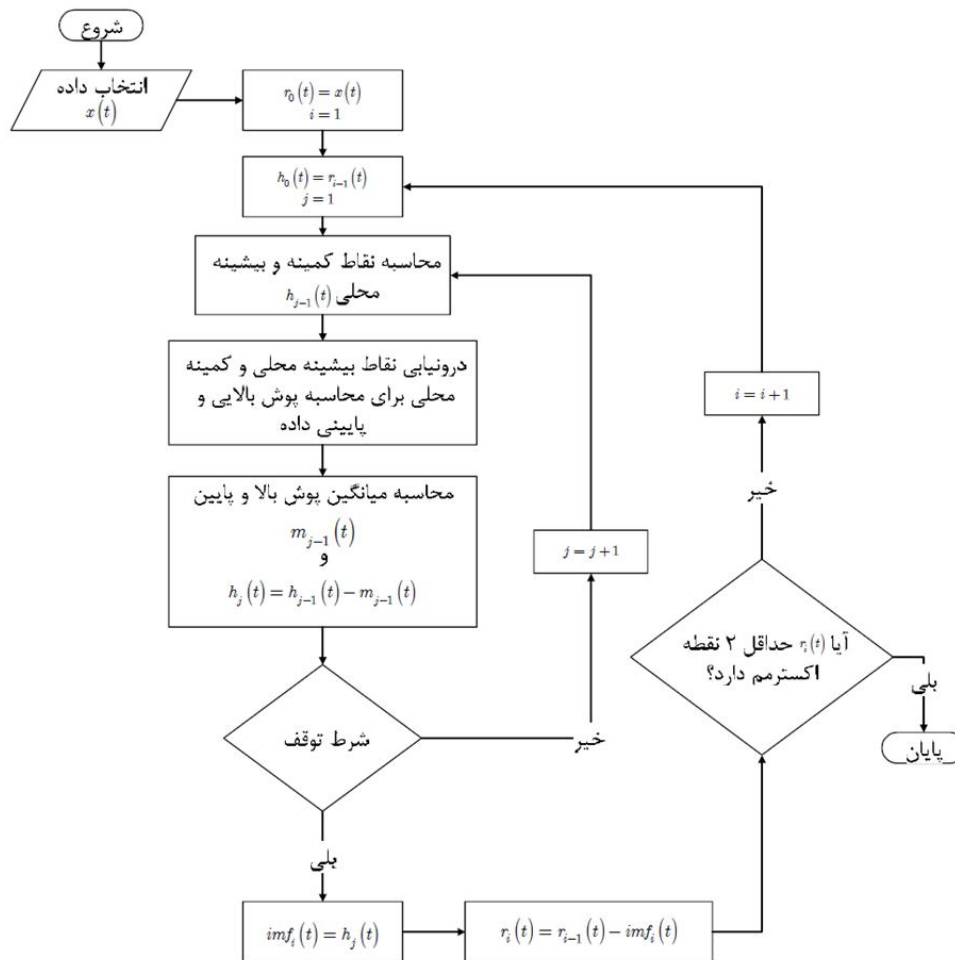
مراحل فوق تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که سیگنال باقی‌مانده دو شرط مربوط به تابع‌های مُد ذاتی را نداشته باشد.

$$m(t) = \frac{X_L(t) + X_U(t)}{2} \quad (6)$$

۴- کم کردن سیگنال میانگین پوش از سیگنال ورودی.

$$d(t) = X(t) - m(t) \quad (7)$$

مراحل ۱ تا ۴ یک تکرار از فرایند غربال کردن را نشان می‌دهد. چنانچه  $d(t)$  دارای دو شرط مربوط به تابع‌های مُد ذاتی باشد، درحکم یک تابع مُد ذاتی سیگنال در نظر گرفته می‌شود ( $IMF_i = d(t)$ ) و فرایند غربال کردن متوقف می‌شود. اما چنانچه  $d(t)$  دارای دو شرط



شکل ۳. نمودار گردش تجزیه یک سیگنال به مُدهای تجربی (تعمیم‌یافته از هوانگ و همکاران، ۱۹۹۸).

سیگنال مانند  $x(t)$  را می‌توان پس از تجزیه به مُدهای تجربی به صورت رابطه (۸) نمایش داد.

در این حالت سیگنال باقی‌مانده را درحکم باقی‌مانده ( $r_n$ ) در فرایند تجزیه مُد تجربی در نظر می‌گیرند. بنابراین یک

نوفه‌زدایی تابع‌های مُد ذاتی عرضه کردند. روش آستانه‌گذاری مستقیم نتایج چندان مناسبی تولید نمی‌کند. از طرفی روش آستانه‌گذاری بازه‌ای تکراری که نتایج نسبتاً بهتری نسبت به آستانه‌گذاری بازه‌ای تولید می‌کند، زمان اجرای بسیار زیادی دارد. لذا در این مقاله، به منظور حفظ نرمی داده‌ها و جلوگیری از ایجاد ناپیوستگی در آنها و همچنین بالا بردن سرعت اجرای برنامه، روش آستانه‌گذاری بازه‌ای (EMD-IT) مورد استفاده قرار گرفت. در این روش، بازه‌ای از تابع مُد ذاتی  $K_j^i$  که دارای یک فرین  $\xi_j^i$  باشد، در نظر گرفته می‌شود. حال آستانه‌گذاری بر مبنای مقدار تابع مُد ذاتی در محل فرین  $\xi_j^i$  درون بازه موردنظر اعمال می‌شود. به مانند سایر الگوریتم‌های آستانه‌گذاری، از دو نوع حد آستانه سخت و نرم می‌توان در این مورد استفاده کرد که به ترتیب می‌توان مطابق روابط (۱۰) و (۱۱) آنها را اعمال کرد (کوپسینیس و مک لاولین، ۲۰۰۸؛ روش‌نندل و نجاتی، ۱۳۹۱).

$$\overline{imf}_i(K_j^i) = \begin{cases} imf_i(K_j^i) & |imf_i(\xi_j^i)| > T_i \\ 0 & |imf_i(\xi_j^i)| \leq T_i \end{cases} \quad (10)$$

$$\overline{imf}_i(K_j^i) = \begin{cases} \text{sgn}(imf_i(K_j^i))(|imf_i(K_j^i)| - T_i) & |imf_i(\xi_j^i)| > T_i \\ 0 & |imf_i(\xi_j^i)| \leq T_i \end{cases} \quad (11)$$

که  $T_i$  حد آستانه و مقدار آن برای هر تابع مُد ذاتی به صورت رابطه (۱۲) است (کوپسینیس و مک لاولین، ۲۰۰۸).

$$T_i = C \sqrt{E_i 2 \ln N} \quad (12)$$

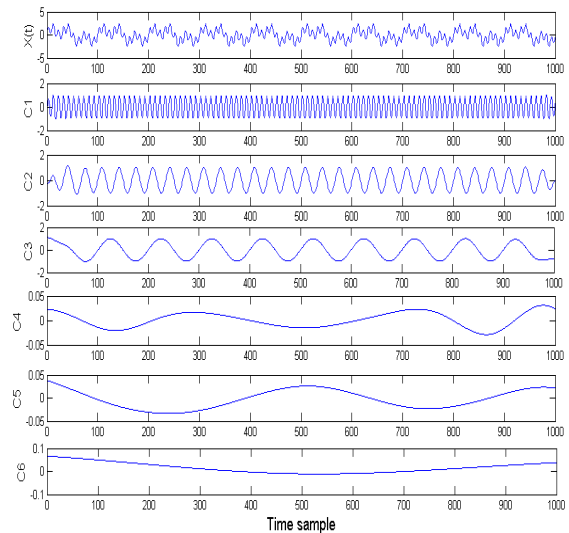
که  $C$  یک مقدار ثابت است و برابر با ۰.۷ در نظر گرفته می‌شود. انرژی  $imf_i$  ( $E_i$ ) را می‌توان مستقیماً براساس برآورد واریانس اولین  $imf$  از رابطه زیر مورد استفاده قرار داد (کوپسینیس و مک لاولین، ۲۰۰۹).

$$x(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i(t) + r_n(t), \quad (8)$$

در شکل ۳ نمودار گردشی تجزیه یک سیگنال به مُدهای تجربی آن نشان داده شده است.

برای نمایش عملکرد تجزیه مُد تجربی، سیگنالی از سه موج سینوسی با بسامدهای متفاوت، مطابق رابطه (۹) تولید شد. روش EMD این سیگنال را به پنج مؤلفه IMF تجزیه می‌کند که در شکل ۴ سیگنال به همراه تابع‌های مُد ذاتی و باقی‌مانده نشان داده شده است.

$$X(t) = \sin(2\pi 100t) + \sin(2\pi 300t) + \sin(2\pi 1000t), \quad (9)$$



شکل ۴. تجزیه مُد تجربی سیگنال سینوسی با بسامدهای ۱۰۰، ۳۰۰ و ۱۰۰۰ هرتز مطابق رابطه (۹) به پنج IMF.

#### ۴ آستانه‌گذاری بازه‌ای

ایده اولیه برای تضعیف نوفه با استفاده از روش تجزیه مُدهای تجربی از روش آستانه‌گذاری روی جزئیات به دست آمده از تبدیل موجک گسسته گرفته شده است. البته می‌توان با تغییراتی در نحوه اعمال حد آستانه، کارایی روش تضعیف نوفه با استفاده از تجزیه مُدهای تجربی را افزایش داد. کوپسینیس و مک لاولین (۲۰۰۸) سه روش آستانه‌گذاری مستقیم، بازه‌ای و بازه‌ای تکراری را برای

## ۴ روش کار

در این مقاله با استفاده از ترکیب تبدیل S تعمیم یافته و تجزیه مُد تجربی نوفه‌های تصادفی از داده‌های لرزه‌ای تضعیف می‌شود. اساس این روش بر مبنای تعریف نوفه تصادفی است که در همه زمان‌ها و بسامدها مشاهده می‌شود.

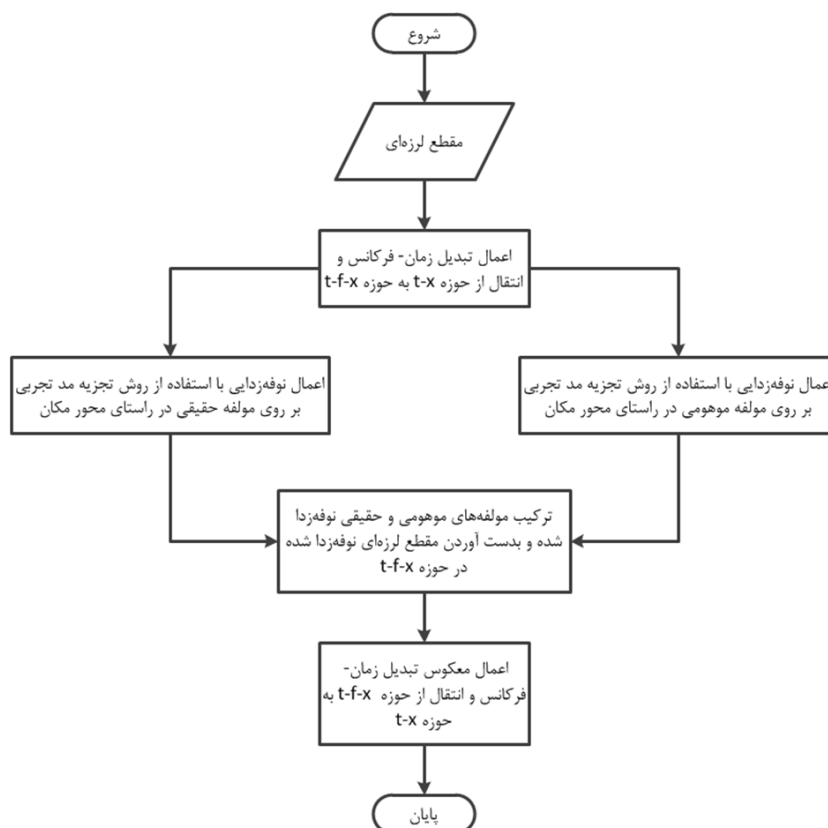
امینی (۱۳۹۰) فرایند نوفه‌زدایی را با استفاده از تجزیه مُد تجربی در همه بسامدها در حوزه f-x عملی ساخته است. به منظور بهبود نتایج فرایند نوفه‌زدایی در همه زمان‌ها و بسامدها، در این مقاله از حوزه t-f-x استفاده شده است. لازم به ذکر است که در این مقاله، نوفه‌زدایی با استفاده از تجزیه مُد تجربی به دو شیوه صورت پذیرفته است. در اولین شیوه تابع مُد ذاتی نخست که شامل

$$\hat{E}_i = \frac{E_1^2}{\beta} \rho^{-i}, \quad i = 2, 3, 4, \dots \quad (13)$$

که  $E_1^2$  انرژی اولین *imf* و  $\beta, \rho$  به تعداد تکرار غربال استفاده شده، وابسته است. فلاندرین و همکاران (۲۰۰۵) برای پارامترهای  $\beta, \rho$  به ترتیب مقادیر 2.01 و 0.719 پیشنهاد دادند. انرژی اولین *imf* را کوپسینیس و مک لاولین (۲۰۰۹) با رابطه (۱۴) به دست آوردند (مالات، ۱۹۹۹).

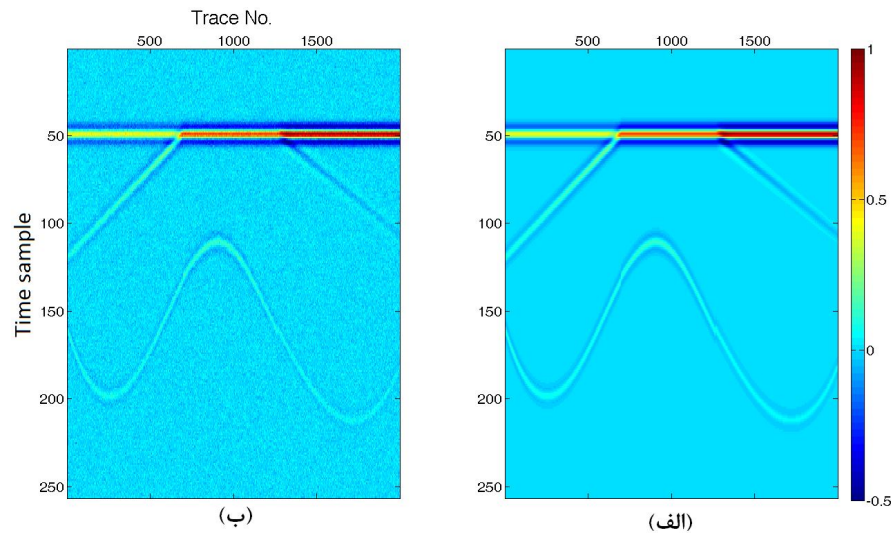
$$E_1 = \frac{\text{median}(|\text{imf}_1|)}{0.6745}. \quad (14)$$

ایسائویی و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که در تجزیه مُد تجربی، آستانه‌گذاری سخت، عملکرد بهتری نسبت به نوع نرم آن دارد. به همین علت در این مقاله از آستانه‌گذاری سخت استفاده شده است.



شکل ۵. نمودار گردش‌تضعیف نوفه تصادفی با استفاده از ترکیب تبدیل زمان - بسامد و تجزیه مُد تجربی.

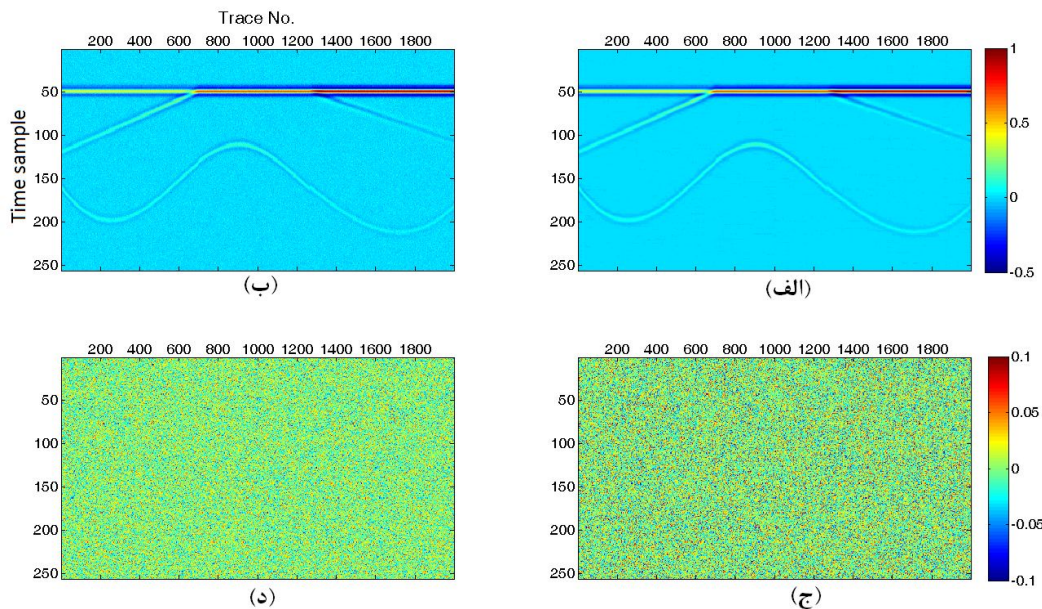




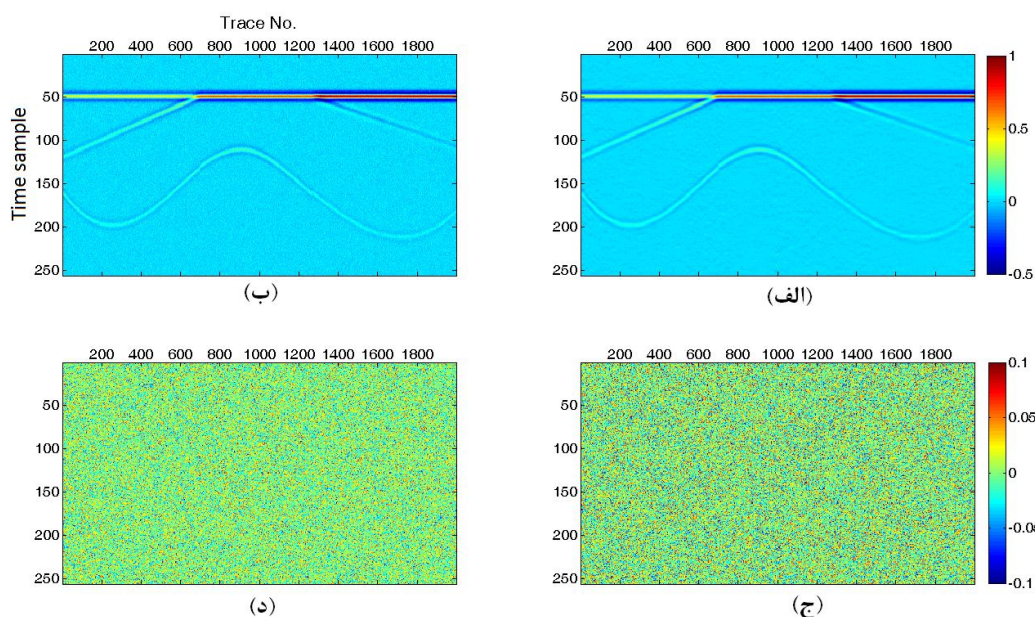
شکل ۶. داده لرزه‌ای مصنوعی (الف) بدون نوفه تصادفی و (ب) همرا نوفه تصادفی با نسبت سیگنال به نوفه ۸ دسی‌بل.

استفاده کرده‌اند و استفاده از شیوه دوم، اولین بار در تحقیق حاضر به انجام رسیده است. با توجه به اینکه داده‌ها در هر دو حوزه  $t-f-x$  و  $f-x$  حالت متفاوت دارند، لذا نوفه‌زدایی با استفاده از تجزیه مُد تجربی به صورت جداگانه روی مؤلفه‌های حقیقی و موهومی صورت می‌پذیرد

محدوده بسامد زیاد است، به منزله نوفه حذف می‌شود (هن- پنگ و همکاران، ۲۰۱۱). در روش دوم از آستانه‌گذاری بازه‌ای برای تضعیف نوفه تصادفی از تابع‌های مُد ذاتی استفاده می‌شود. همچنین لازم به ذکر است که در همه کارهای صورت گرفته (بکارا و وندربان، ۲۰۰۹؛ هن- پنگ و همکاران، ۲۰۱۱) فقط از شیوه اول



شکل ۷. نتایج نوفه‌زدایی با استفاده از الگوریتم ترکیب تبدیل زمان-بسامد و تجزیه مُد تجربی با (الف) آستانه‌گذاری بازه‌ای تابع‌های مُد ذاتی و (ب) حذف اولین تابع مُد ذاتی. (ج) تفاوت بین داده لرزه‌ای مصنوعی حاوی نوفه با نتیجه (الف) و (د) تفاوت بین داده لرزه‌ای مصنوعی حاوی نوفه با نتیجه (ب).



شکل ۸. نتایج نوفه‌زدایی با استفاده از الگوریتم ترکیب تبدیل فوریه و تجزیه مُد تجربی با (الف) آستانه‌گذاری بازه‌ای تابع‌های مُد ذاتی و (ب) حذف اولین تابع مُد ذاتی. (ج) تفاوت بین داده لرزه‌ای مصنوعی حاوی نوفه با نتیجه (الف) و (د) تفاوت بین داده لرزه‌ای مصنوعی حاوی نوفه با نتیجه (ب).

به منظور ارزیابی کارایی روش پیش گفته، مقطع لرزه‌ای مطابق شکل ۶ (الف) تولید و با نوفه تصادفی به نسبت سیگنال به نوفه ۸ دسی‌بل آغشته شد که در شکل ۶ (ب) نشان داده شده است. در محاسبه نسبت سیگنال به نوفه از رابطه (۱۵) استفاده شده است (پروکیس و مانولاکیس، ۲۰۰۷). در این رابطه، منظور از سیگنال، همان مقطع لرزه‌ای بدون نوفه است و نوفه موجود در مخرج رابطه از تفاضل میان مقطع نوفه‌زدا شده با مقطع بدون نوفه حاصل شده است.

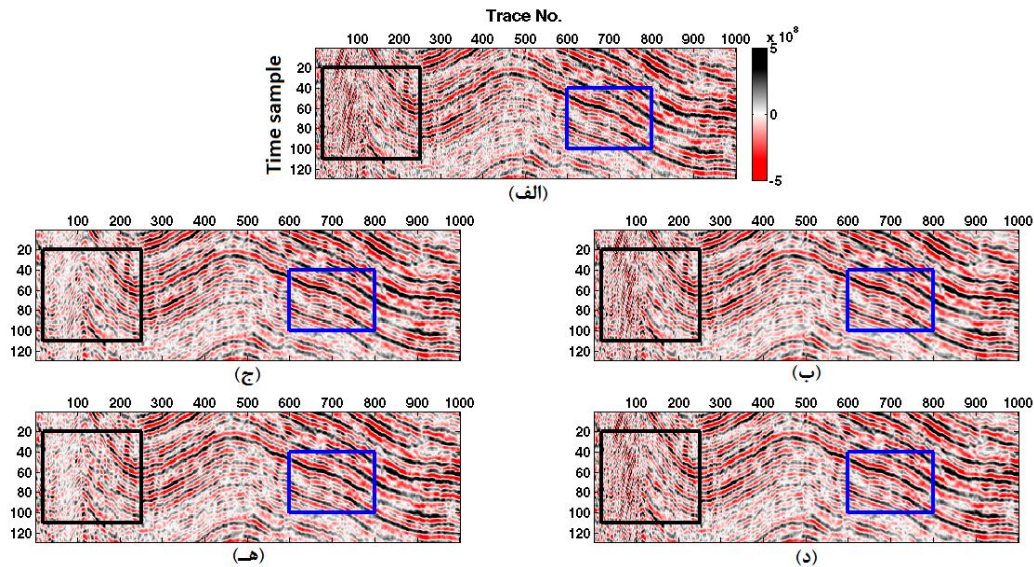
$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{\text{Energy of Signal}}{\text{Energy of Noise}} \right) \quad (15)$$

الگوریتم معرفی شده در این مقاله با دو روش حذف اولین تابع مُد ذاتی و آستانه‌گذاری بازه‌ای تابع‌های مُد ذاتی روی مقطع لرزه‌ای مصنوعی نوفه‌دار اعمال شد. نتایج به دست آمده در شکل ۷ نشان داده شده است. به وضوح قابل مشاهده است که روش آستانه‌گذاری بازه‌ای از روش حذف اولین تابع مُد ذاتی، نوفه تصادفی بیشتری را تضعیف کرده است.

و سپس با جمع تابع‌های مُد ذاتی باقی مانده و نوفه‌زدایی شده، مؤلفه‌های حقیقی و موهومی جدیدی به دست می‌آید. با برگردان این مؤلفه‌ها به حوزه  $t-x$  مقطع لرزه‌ای نوفه‌زدایی شده به دست می‌آید. در شکل ۵ نمودار گردشی الگوریتم معرفی شده در این مقاله نشان داده شده است.

جدول ۱. مقایسه نسبت سیگنال به نوفه.

روش	نسبت سیگنال به نوفه (دسی‌بل)
داده اولیه	۸
روش $t-f-x$ و آستانه‌گذاری بازه‌ای	۲۵/۱۲
روش $t-f-x$ و حذف اولین تابع مُد ذاتی	۱۲/۳۴
روش $f-x$ و آستانه‌گذاری بازه‌ای	۲۰/۳۵
روش $f-x$ و حذف اولین تابع مُد ذاتی	۱۱/۶۹

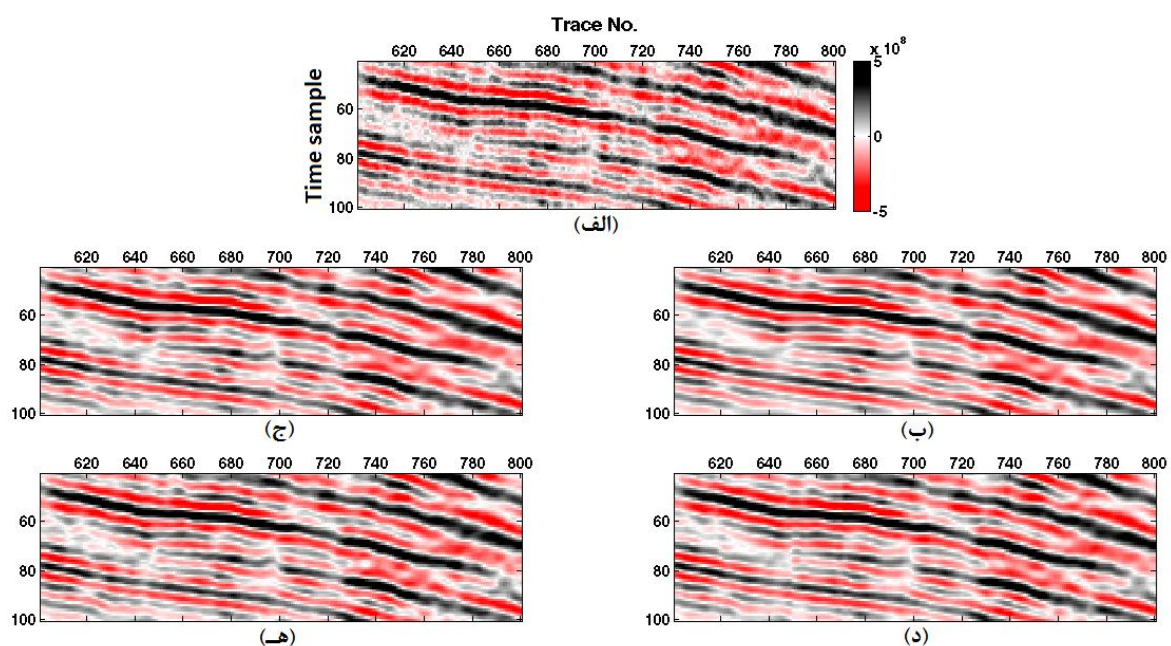


شکل ۹. (الف) داده لرزه‌ای واقعی مورد استفاده مربوط به یکی از میدان‌های نفتی جنوب غرب ایران و حاصل نوفه‌زدایی آن با روش (ب) تبدیل زمان - بسامد و آستانه‌گذاری بازه‌ای تابع‌های مُد ذاتی، (ج) تبدیل زمان - بسامد و حذف اولین تابع‌های مُد ذاتی، (د) تبدیل فوریه و آستانه‌گذاری بازه‌ای تابع‌های مُد ذاتی و (هـ) تبدیل فوریه و حذف اولین تابع‌های مُد ذاتی.

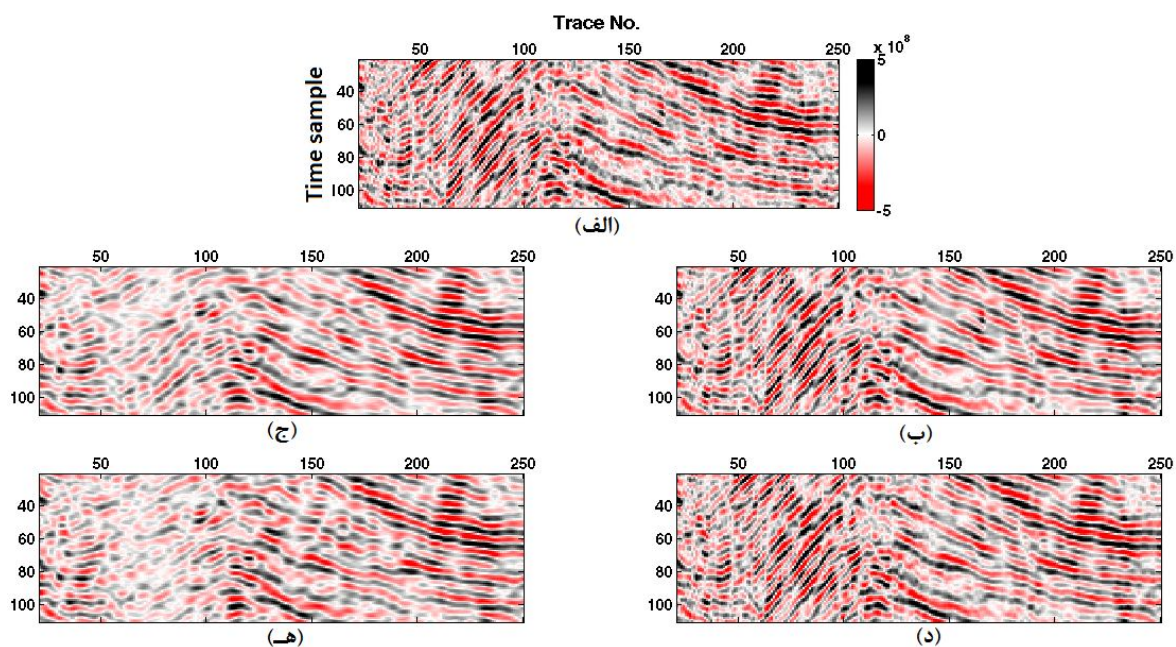
۴ روش پیش‌گفته روی این مقطع لرزه‌ای اعمال شد که نتایج آن در شکل ۹ نشان داده شده است. برای مقایسه بهتر دو بخش از مقطع لرزه‌ای انتخاب شد که با مستطیل‌های آبی و سیاه در روی شکل ۹ نشان داده شده‌اند. بزرگ‌نمایی این دو مستطیل به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. در شکل ۱۲ نیز اختلاف نتایج حاصل از نوفه‌زدایی با داده اولیه به نمایش در آمده است که در واقع نوفه تصادفی تضعیف شده از مقطع لرزه‌ای است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش‌های مبتنی بر آستانه‌گذاری بازه‌ای نوفه تصادفی بیشتری را تضعیف کرده و آسیبی به رویدادهای شیب‌دار مقطع وارد نساخته است. اما روش‌های مبتنی بر حذف اولین تابع مُد ذاتی علاوه بر اینکه نوفه تصادفی کمتری نسبت به روش آستانه‌گذاری بازه‌ای تضعیف کرده‌اند، به رویدادهای شیب‌دار مقطع لرزه‌ای آسیب وارد نساخته‌اند. رویدادهایی با شیب زیاد دارای عدد موج ظاهری بزرگی هستند و در تابع مُد ذاتی اول حضور خواهند داشت. لذا

در شکل ۸ نتایج مربوط به حوزه  $f-x$  با همان دو شیوه پیش‌گفته نشان داده شده است. در این روش نیز می‌توان مشاهده کرد که روش آستانه‌گذاری بازه‌ای از روش حذف اولین تابع مُد ذاتی عملکرد بهتری داشته است. دلیل این بهبود را می‌توان به این عامل نسبت داد که نوفه تصادفی می‌تواند در تابع‌های مُد ذاتی متفاوتی حضور داشته باشد و حذف اولین تابع مُد ذاتی نمی‌تواند همه نوفه‌های تصادفی را تضعیف کند. برای مقایسه کمی نتایج به دست آمده از ۴ روش فوق نسبت‌های سیگنال به نوفه مقطع لرزه‌ای نوفه‌زدا شده با یکدیگر در جدول ۱ مقایسه شده‌اند. با مقایسه این نتایج مشاهده می‌شود که استفاده از روش آستانه‌گذاری بازه‌ای در حوزه  $t-f-x$  بهترین عملکرد را نسبت به سایر روش‌ها داشته است.

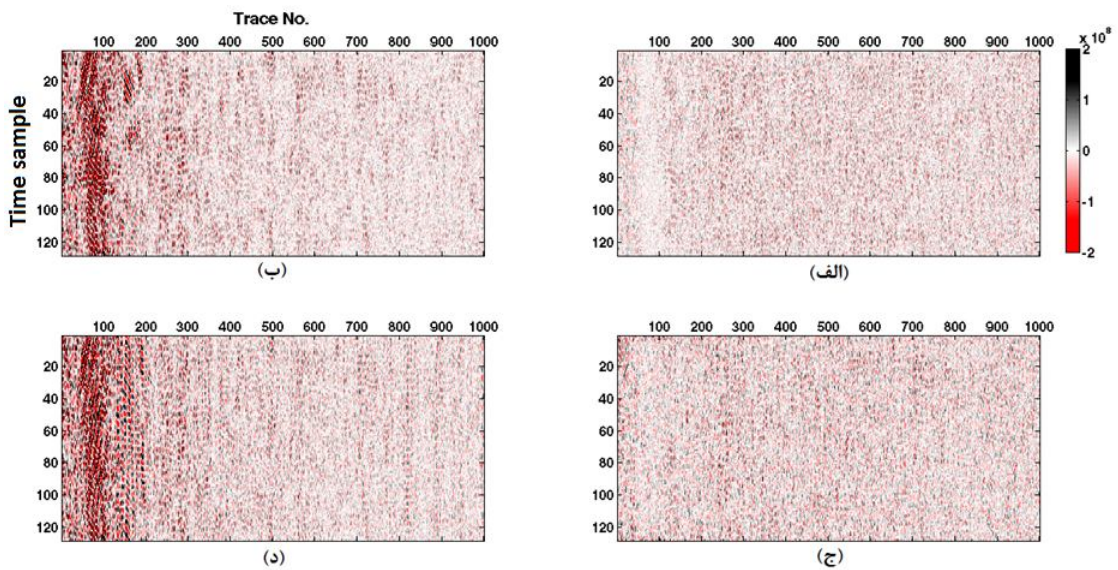
برای ارزیابی کارایی روش روی داده واقعی، بخشی از یک مقطع لرزه‌ای مربوط به یکی از میدان‌های نفتی جنوب غرب ایران که دارای ۱۰۰۰ ردلرزه و ۱۲۸ نمونه زمانی در هر ردلرزه با فاصله نمونه‌برداری ۲ میلی‌ثانیه انتخاب شد.



شکل ۱۰. (الف) بزرگ‌نمایی بخش مستطیل آبی در شکل ۹ از داده لرزه‌ای واقعی مورد استفاده و حاصل نوفه‌زدایی آن با روش (ب) تبدیل زمان - بسامد و آستانه‌گذاری بازه‌ای تابع‌های مُد ذاتی، (ج) تبدیل زمان - بسامد و حذف اولین تابع‌های مُد ذاتی، (د) تبدیل فوریه و آستانه‌گذاری بازه‌ای تابع‌های مُد ذاتی و (ه) تبدیل فوریه و حذف اولین تابع‌های مُد ذاتی.



شکل ۱۱. (الف) بزرگ‌نمایی بخش مستطیل سیاه در شکل ۹ از داده لرزه‌ای واقعی مورد استفاده و حاصل نوفه‌زدایی آن با روش (ب) تبدیل زمان - بسامد و آستانه‌گذاری بازه‌ای تابع‌های مُد ذاتی، (ج) تبدیل زمان - بسامد و حذف اولین تابع‌های مُد ذاتی، (د) تبدیل فوریه و آستانه‌گذاری بازه‌ای تابع‌های مُد ذاتی و (ه) تبدیل فوریه و حذف اولین تابع‌های مُد ذاتی.



شکل ۱۲. (الف) تفاوت بین داده لرزه‌ای واقعی با نتیجه شکل ۹- (الف)، (ب) تفاوت بین داده لرزه‌ای واقعی با نتیجه شکل ۹- (ب)، (ج) تفاوت بین داده لرزه‌ای واقعی با نتیجه شکل ۹- (ج) و (د) تفاوت بین داده لرزه‌ای واقعی با نتیجه شکل ۹- (د).

#### منابع

- امینی، ا.، ۱۳۹۰، بهبود تضعیف نوفه‌های لرزه‌ای اتفاقی توسط تلفیق دو روش فیلتر کردن بسامد- مکان و تجزیه مُد تجربی: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.
- روشندل کاهو، ا.، ۱۳۸۸، بهبود تبدیل‌های زمان- بسامد در مطالعه داده‌های لرزه‌ای: رساله دکتری، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.
- 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.
- Auger, F., Flandrin, P., Goncalves, P., and Lemoine, O., 1996, Time-frequency toolbox for use with MATLAB: CNRS, France.
- Bekara, M., and van der Baan, M., 2009, Random and coherent noise attenuation by empirical mode decomposition: *Geophysics*, 74(5), V89-V98.
- Boashash, B., 2003, *Time Frequency Signal Analysis: A Comprehensive Reference*, Elsevier.
- Gabor, D., 1946, *Theory of communication: J. IEEE (London)*, 93(III), 429-457.

حذف اولین تابع مُد ذاتی به رویدادهایی با شیب زیاد آسیب وارد می‌کند.

#### ۴ نتیجه‌گیری

در این مقاله، تضعیف نوفه‌های تصادفی با استفاده از ترکیب تبدیل S تعمیم‌یافته و تجزیه مُد تجربی صورت گرفته است. برای نوفه‌زدایی با استفاده از روش تجزیه مُد تجربی از دو شیوه حذف اولین تابع مُد ذاتی و آستانه‌گذاری بازه‌ای روی تابع‌های مُد ذاتی استفاده شده است. در این مقاله هر دو روش فوق روی مقطع لرزه‌ای در حوزه  $t-f-x$  اعمال و با نتایج آن در حوزه  $f-x$  مقایسه شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که اعمال روش آستانه‌گذاری بازه‌ای در هر دو حوزه  $t-f-x$  و  $f-x$  باعث بهبود چشم‌گیر نتایج شده است. همچنین با اعمال یک روش خاص نوفه‌زدایی تجزیه مُد تجربی، می‌توان مشاهده کرد که نتایج حوزه  $t-f-x$  دارای کیفیت بهتری نسبت به حوزه  $f-x$  است.

- Lu, w., and Liu, J. L., 2007, Random noise suppression based on discrete cosine transform, 77<sup>th</sup> Annual International Meeting, SEG, Extended Abstracts, 2668-2672.
- Mallat, S., 1999, A wavelet tour of signal processing: 2nd edition, Elsevier.
- Flandrin, P., Rilling, G., and Gonçalves, P., 2005, EMD equivalent filter banks, from interpretation to applications (in N. E. Huang and S. Shen, Hilbert-Huang Transform and its Applications), World Scientific Publishing Company, first edition.
- Proakis, J. G., and Manolakis, D. G., 2007, Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, and Applications, Pearson Prentice Hall.
- Sahu, S. S, Panda, G., George, N. V., 2009, An improved S-transform for time-frequency analysis, Advance Computing Conference, IEEE International, 315-319.
- Stankovic, L., 1994, An analysis of some time-frequency and time-scale distributions: Ann Telecommun., **49**, 505-517.
- Stockwell, R. G., Mansinha, L., and Lowe, R., 1996, Localization of the complex spectrum: The S-transform, IEEE Trans. Signal Process., **44**, 998-1001.
- Trickett, S., 2008, F-xy Cadzow noise suppression, 78<sup>th</sup> Annual International Meeting, SEG, Extended Abstracts, 2586-2590.
- Grochenig, K., 2001, Foundations of Time-Frequency Analysis: Boston, Birkhauser.
- Haris, P. E., and White, R. E., 1997, Improving the performance of f-x prediction filtering at low signal-to-noise ratio: Geophysical Prospecting, **45**, 269-302.
- Han-Peng, C., Zhen-Hua, H., and De-Ji, H., 2011, Seismic data denoising based on mixed time-frequency methods: J. Appl. Geophys., **8**, 319-327.
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. L., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N. C., Tung C. C., and Liu, H. H., 1998, The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis: Proc. Roy. Soc. London A, **454**, 903-99.
- Issaoui, H., Bouzid, A., and Ellouze, N., 2012, Comparison between soft and hard thresholding on selected intrinsic mode selection, 6th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications, 712-715.
- Kopsinis, Y., and McLaughlin, S., 2008, Empirical mode decomposition based softthresholding: 16th Eur. Signal Process. Conf. (EUSIPCO), 42-47.
- Kopsinis, Y., and McLaughlin, S., 2009, Development of EMD-based denoising methods inspired by wavelet thresholding: IEEE Trans. Signal Processing, **57**, 1351-1362.