

تبدیل فوریه زمان کوتاه بر مبنای تنکی و کاربرد آن در تشخیص لایه‌های نازک

حمید ستاری^۱، علی غلامی^{۱*} و حمید رضا سیاه‌کوهی^۱

^۱ مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۲/۲)

چکیده

تجزیه طیفی نقش مهمی در پردازش و تفسیر سیگنال‌های لرزه‌ای دارد به طوری که از آن در حکم یکی از نشانگرهای پس از برانبارش در اکتشاف ذخایر هیدروکربنی استفاده‌های زیادی می‌شود. هرچه تفکیک‌پذیری تبدیل زمان بسامد مورد استفاده در تجزیه طیفی بیشتر باشد، نتایج به دست آمده مطلوب‌تر خواهد بود و به همین دلیل، محققان گوناگون در زمینه پردازش سیگنال همواره در پی عرضه تبدیل‌های بهتر یا بهینه‌سازی تبدیل‌های قبلی هستند. به دنبال الگوریتمی که غلامی و همکاران (۲۰۱۰) برای تجزیه سریع زمان بسامد بر مبنای تنکی عرضه کردند، در این مقاله یک قید تنکی دیگر برای بهینه‌سازی لحظه‌ای به آن اضافه شده است که سبب می‌شود نقشه زمان بسامد حاصل، قابلیت تطابق بیشتری با تغییرات محلی سیگنال داشته باشد. از تطابق ایجاد شده می‌توان در مقاصد تفسیری و پردازشی بهره گرفت. برای نشان دادن توانمندی این بهینه‌سازی، تبدیل حاصل برای تجزیه طیفی چندین داده مصنوعی و نیز یک نمونه داده واقعی با هدف تفکیک لایه‌های نازک مورد استفاده قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی لحظه‌ای، تجزیه زمان بسامد بر مبنای تنکی، لایه نازک

Sparsity based short-time Fourier transform and applications in thin bed characterization

Hamid Sattari¹, Ali Gholami^{1*} and Hamidreza Siahkoohi¹

¹Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 15 March 2012, accepted: 22 April 2013)

Summary

Time-frequency analysis plays an important role in seismic data processing and interpretations. In seismic exploration, the process is called spectral decomposition and refers to any method which produces a continuous time–frequency representation of the seismic trace. It is widely used as one of the most important post-stack attributes in hydrocarbon detection.

Since spectral decomposition is a non-unique process, a single seismic trace can produce various time-frequency representations. This can be done using a variety of time-frequency methods that generate a time-frequency map of a signal. These methods

*Corresponding author:

agholami@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

include the STFT (Short-Time Fourier Transform), ST (S-Transform), CWT (Continuous Wavelet Transform), WVD (Wigner-Vile Distribution), MPD (Matching Pursuit Decomposition) and etc. Each method has its own advantages and disadvantages and different applications require different methods, but the important point is that the more resolution has the time-frequency transform, the more reliable the results will be. Therefore, the researchers in the field of the signal processing are always seeking more robust transforms or optimization of the previous ones.

The short-time Fourier transform is an efficient tool to display the energy distribution of the real world signals over the time-frequency plane but due to the over completeness of Gabor functions, there are more than one set of time-frequency coefficients that represent the data. Therefore, it is a good approach to consider the decomposition as an inverse problem. By doing so, additional constraints can be applied to the decomposition to generate a time-frequency plane having desired properties. Decomposition with a sparsity constraint is a suitable strategy which enables selecting a small number of elementary functions such that a linear combination of them fit in the given data. Portiniaguine and Costagna (2004) compared the performance of the sparsity-based decomposition with that of the classical non-sparse approach for seismic data. Although the resolution of sparsity approach was much better, it computationally demanded much time and effort.

Thereafter, a fast algorithm for Sparse Time-Frequency Decomposition was presented by Gholami et.al (2010) based on the Bregman iteration (Goldstain and Osher, 2008) which provided the time-frequency representation of the signal with profoundly high resolution in a satisfactory calculation time. In this study, another sparsity constraint has been supplemented for instantaneous optimization. The extra sparsity constraint makes the time-frequency plane more adaptive to the local changes of the signal while it does not affect the speed of the fast sparse time-frequency algorithm significantly.

The final optimized transform is a good tool for decomposition of non-stationary seismic signals having dramatically different frequency components. Applications of the time-dependent optimization are developed to promote seismic data processing and interpretations. For example, by means of the high sensitivity of the resulted transform to seismic wavelet interference, it is shown that thin bed layers are characterized very easily. In order to highlight the efficiency of the proposed optimization, the final optimized fast-sparse time-frequency transform is used for decomposition of real and synthetic seismic data. This is while the interpretational purpose of thin bed detection is considered.

Keywords: Instantaneous optimization, sparsity based time-frequency decomposition, thin bed

۱ مقدمه

تجزیه طیفی می گویند که یک تجزیه زمان بسامد پیوسته از سیگنال لرزه ای استخراج می کند. از تجزیه طیفی به منزله یکی از نشانگرهای پس از برانبارش در اکتشاف ذخایر هیدروکربنی استفاده می شود. تجزیه طیفی فرایندی غیر یکتا است بنابراین از یک سیگنال لرزه ای می توان به کمک روش های متفاوت، چندین خروجی زمان بسامد استخراج کرد که هر یک از آنها در کاربردهای متفاوت

از تجزیه زمان بسامد در زمینه های متفاوت علوم از جمله ژئوفیزیک برای اهداف مهمی چون تشخیص لایه های نازک (پارتیکا و همکاران، ۱۹۹۹)، تعیین ویژگی های چینه شناسی (مارفورت و کرلین، ۲۰۰۱) و تشخیص منابع هیدروکربنی (کاستگنا و همکاران، ۲۰۰۳) استفاده های زیادی می شود. در لرزه شناسی اکتشافی به این فرایند

علاوه بر تفکیک پذیری عالی نسبت به سایر تبدیل‌های زمان‌بسامد، در زمان قابل قبولی محاسبه می‌شود. در این تبدیل، تجزیه زمان‌بسامد به شکل یک مسئله معکوس تعریف می‌شود که با انتخاب تعداد معدودی از تابع‌های اساسی به نحوی که یک ترکیب خطی از آنها سیگنال اولیه را بازسازی کند، حل شده است. حل این مسئله بر این اساس است که پاسخ معکوسی که دارای کمترین مقدار نرم l_1 باشد، عموماً تنک‌ترین پاسخ هم هست (دونوهو، ۲۰۰۶) به همین دلیل در این مقاله از این تبدیل در حکم تبدیل فوریه زمان کوتاه تنک یاد شده است.

در این مقاله با اضافه کردن یک قید تنکی دیگر سعی شده است که با حل مشکل ثابت بودن طول پنجره برای کل سیگنال لرزه‌ای که مشخصاً ناپایا است، تطابق تبدیل فوریه زمان کوتاه تنک عرضه شده غلامی و همکاران با تغییرات محلی سیگنال بالا برده شود و در نهایت دیده می‌شود که نتایج بهتری در اهداف تفسیری و پردازشی حاصل می‌شود.

۲ روش تحقیق

آن دسته از نقشه‌های زمان‌بسامد که به نوع سیگنال و پنجره بستگی دارند، همیشه با مشکل تعادل بین تفکیک پذیری زمان و بسامد همراه هستند حتی تبدیل موجک پیوسته. توسعه یک نقشه زمان‌بسامد متعادل و غیروابسته به سیگنال، نیازمند یک پنجره مناسب یا یک تابع کرنل، بدون داشتن اطلاعات قبلی گسترده از سیگنال است (جانز و بارانیک، ۱۹۹۴). دو پارامتر مهم، تفکیک پذیری تبدیل فوریه زمان کوتاه را در راستای زمان و بسامد بهینه می‌کنند که عبارت‌اند از طول پنجره و آهنگ تغییرات بسامد سیگنال با زمان. به منظور رسیدن به هدف افزایش تطابق محلی، دو قید مهم را به شکل زیر تعریف می‌کنیم:

۱- در نقشه زمان‌بسامد حاصل کمترین تعداد عناصر

شایستگی دارند. روش‌های متعددی برای تجزیه طیفی وجود دارد از جمله: تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT)، تبدیل S، تبدیل موجک پیوسته، توزیع ویگنر- وایل، تجزیه تعقیب تطابق و مانند آن. اما آنچه در این بین اهمیت دارد این است که هر چه تبدیل مورد نظر تفکیک پذیری بیشتری داشته باشد نتایج به دست آمده در تجزیه طیفی قابل اعتمادتر خواهند بود.

تبدیل فوریه زمان کوتاه به منزله اولین تبدیل زمان‌بسامد را گابور (۱۹۴۶) معرفی کرد که علی‌رغم سادگی الگوریتم و سرعت و سهولت در استفاده، معایبی دارد که به موجب آن کمتر مورد استفاده می‌گیرد از جمله:

۱- به دلیل بیش کامل بودن تابع گابور که از آن در این الگوریتم استفاده می‌شود، بیش از یک دسته داده در حوزه زمان می‌شود به یک نقشه زمان‌بسامد نسبت داد.

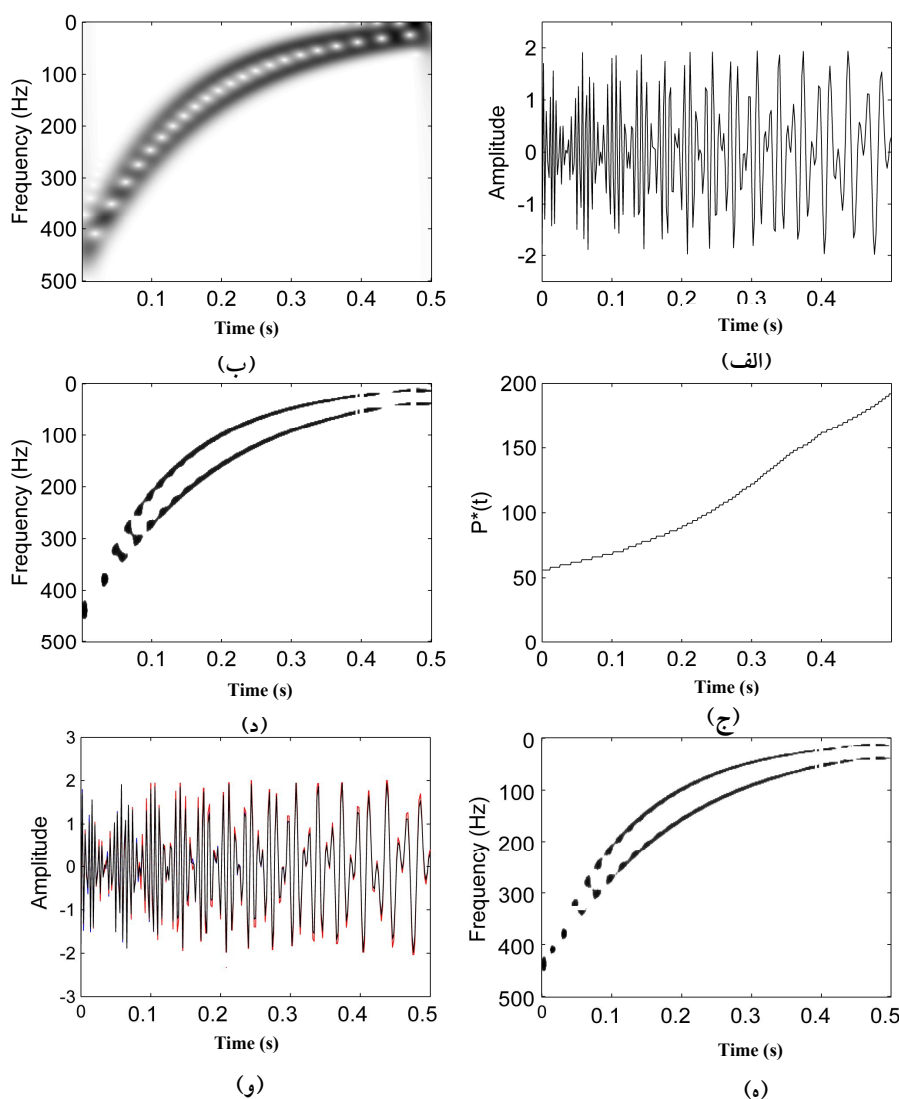
۲- تفکیک پذیری این تبدیل تحت تأثیر طول پنجره مورد استفاده در محاسبه آن قرار دارد. چون از یک پنجره با طول ثابت برای تجزیه طیفی کل سیگنال استفاده می‌شود، به محض انتخاب طول پنجره، تفکیک نمایی روش گابور به ازای طول پنجره ثابت یکسان خواهد شد که تفکیک پذیری مولفه‌های بسامدی متفاوتی را در پی دارد، به طوری که حتی با تعیین یک طول پنجره بهینه برای کل سیگنال، باز هم تفکیک پذیری نقشه زمان‌بسامد حاصل برای همه مولفه‌ها رضایت بخش نیست.

محققان گوناگونی برای کاهش این نواقص اقدام کرده‌اند. پارتیگین و کاستگنا (۲۰۰۴)، برای حل مشکل تفکیک پذیری، مقایسه‌ای بین تجزیه زمان‌بسامد با قید تنکی و حالت قدیمی غیر تنک آن عملی ساختند. گرچه در حالت تنک، تفکیک پذیری خوبی مشاهده می‌شد، اما بسیار زمان‌بر بود. به دنبال آن غلامی و همکاران (۲۰۱۰) الگوریتمی سریع به منظور تجزیه طیفی بر اساس الگوریتم تکراری برگمن (گلدستن و آشر، ۲۰۰۸)، با در نظر گرفتن الگوی توزیع تنک انرژی عرضه کردند. این تبدیل

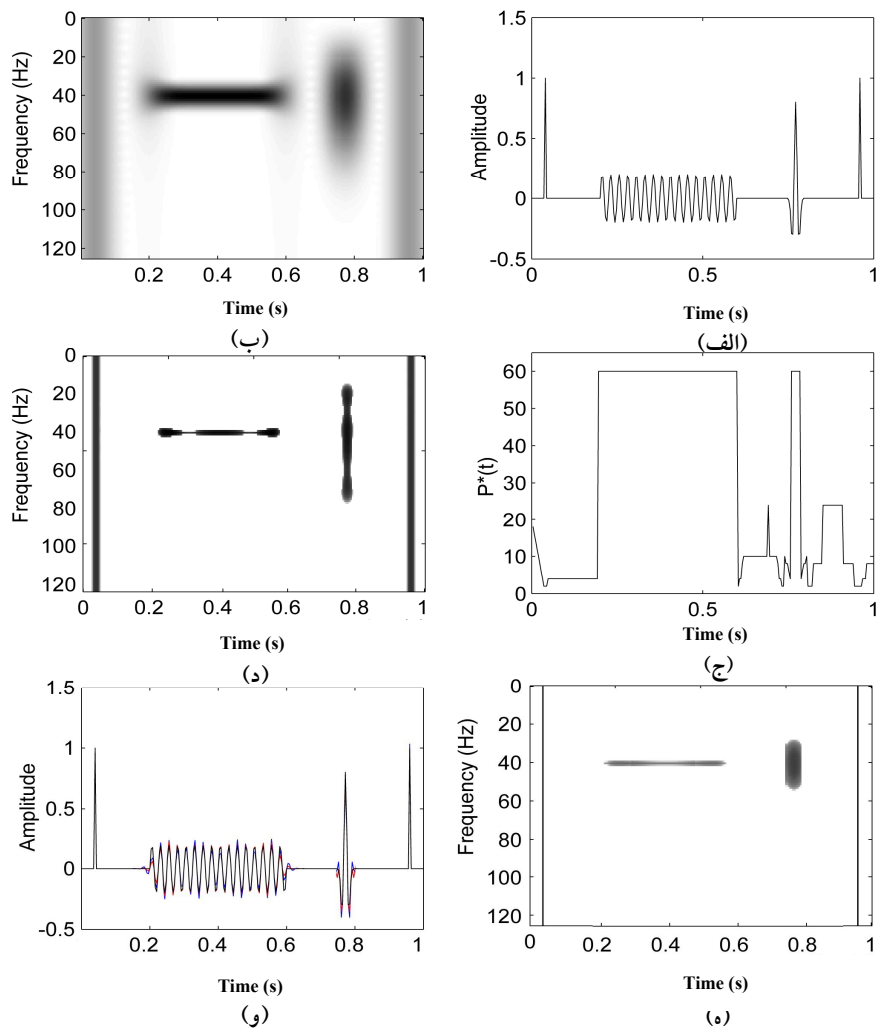
اثبات می‌شود که در بین یک خانواده از بردارها با انرژی ثابت، برداری که دارای حاصل تقسیم نرم l_2 به نرم l_4 کمتری است، دارای تمرکز بیشتر و به عبارتی تنک‌تر است و قید اول را تضمین می‌کند. برای اعمال قید دوم از حاصل برابری ضرایب زمان‌بسامد به دست آمده سیگنال با طول پنجره‌های متفاوت در حکم خانواده‌های برداری با انرژی نسبتاً ثابت استفاده می‌شود. به عبارتی چندین نقشه

غیر صفر موجود باشد، به عبارتی در هر لحظه طول پنجره‌ای انتخاب شود که نقشه زمان‌بسامد محلی حاصل از آن تا حد ممکن تنک (sparse) باشد.

۲- تبدیل معکوس نقشه حاصل سیگنال اولیه را بازسازی نماید. این قید به معنای آن است که حد ممکن تنکی تا آنجا تعریف شود که بازسازی سیگنال اولیه را دچار مشکل نکند.



شکل ۱. (الف) مجموع دو سیگنال چیرپ با محتوای بسامدی متفاوت، (ب) نقشه زمان‌بسامد با استفاده از تبدیل STFT معمولی، (ج) طول پنجره‌های بهینه با زمان با استفاده از الگوریتم معرفی شده، (د) نقشه زمان‌بسامد به دست آمده با استفاده از تبدیل STFT تنک پنجره ثابت، (ه) نقشه زمان‌بسامد با استفاده از تبدیل STFT تنک که به کمک طول پنجره‌های بهینه به دست آمده موجود در شکل ۱-ج بهینه شده و (و) سیگنال‌های بازسازی شده از نقشه زمان‌بسامد حاصل از تبدیل STFT معمولی (سیاه)، و حالت‌های پنجره ثابت (آبی) و پنجره بهینه (سرخ) تبدیل STFT تنک.



شکل ۲. (الف) سیگنال مرکب از ۲ اسپیک، یک موجک ریگر و یک مؤلفه سینوسی با بسامد ۴۰ هرتز، (ب) نقشه زمان بسامد با استفاده از تبدیل STFT معمولی، (ج) طول پنجره‌های بهینه با زمان با استفاده از الگوریتم معرفی شده، (د) نقشه زمان بسامد به دست آمده با استفاده از تبدیل STFT تنک پنجره ثابت، (ه) نقشه زمان بسامد با استفاده از تبدیل STFT تنک که به کمک طول پنجره‌های بهینه به دست آمده موجود در شکل ۲.ج بهینه شده و (و) سیگنال‌های بازسازی شده از نقشه زمان بسامد حاصل از تبدیل STFT معمولی (سیاه)، و از حالت‌های پنجره ثابت (آبی) و پنجره بهینه (سرخ) تبدیل STFT تنک.

حاصل تقسیم نسبت پیش گفته آن در هر لحظه کمینه می‌شود را بیابیم، بهترین طول پنجره که در هر لحظه حداکثر تنکی در صفحه زمان بسامد با شعاع تغییرات محلی به اندازه m را ایجاد می‌کند، به دست خواهد آمد. نوشتار ریاضی این الگوریتم به این صورت خواهد بود:

$$C(t, p) = \frac{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |D_p(\tau, \Omega) W(\tau - t)|^2 d\tau d\Omega \right)^2}{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |D_p(\tau, \Omega) W(\tau - t)|^4 d\tau d\Omega \right)}, \quad (1)$$

که $D_p(\tau, \Omega)$ نقشه زمان بسامد حاصل از تبدیل فوریه

زمان بسامد با طول پنجره‌های متفاوت از یک سیگنال تولید می‌شود بنابراین تبدیل معکوس آنها سیگنال اولیه را بازسازی می‌کند. در مرحله بعد آنها را در راستای بسامد برانبارش می‌کنیم تا به بردار تبدیل شوند و هر یک از این بردارها نماینده یک نقشه زمان بسامد از سیگنال با یک طول پنجره هستند. حال اگر یک پنجره مستطیلی به طول m از روی این بردارها عبور داده و در راستای زمان جابه‌جا شود و حاصل تقسیم نرم l_2 به نرم l_4 عناصر موجود در این پنجره را با هم جمع کنیم و از بین آنها برداری که

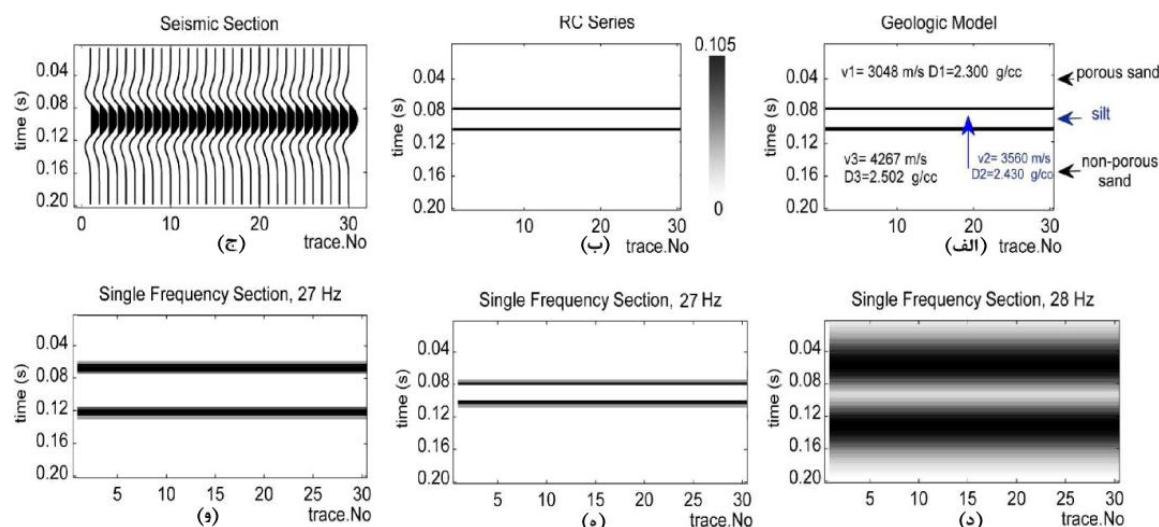
نتایج تنک تولید می‌کند و حداکثر انرژی سیگنال را در کوچک‌ترین ناحیه ممکن از زمان و بسامد قرار می‌دهد و بنابراین به یک نقشه متمرکز دست می‌یابد.

برای محاسبه جواب رابطه (۲) بر حسب متغیر p از یک رابطه بازگشتی استفاده می‌کنیم به طوری که تابع هدف برای همه ستون‌های موجود در پنجره (τW) در هر لحظه به صورت جداگانه کمینه می‌شود و بدین ترتیب، زمان محاسبات کمتر می‌شود. سرانجام اگر در الگوریتم عرضه شده غلامی و همکاران، به جای پنجره ثابت از این پنجره‌های بهینه با زمان استفاده شود، تطابق چشمگیری بین تجزیه زمان بسامد حاصل با سیگنال اولیه ایجاد می‌شود. در حالی که تأثیر زیادی روی زمان محاسبه آن نمی‌گذارد. در شکل‌های ۱ و ۲ نتایج تبدیل حاصل روی یک سیگنال چیرپ لگاریتمی و یک سیگنال حاوی مؤلفه‌های متفاوت بسامدی اعمال شده، که برای نشان دادن کارایی

زمان کوتاه سیگنال $f(t)$ با استفاده از پنجره‌ای به طول φ معرف جابه‌جایی (lag) و Ω بسامد زاویه‌ای، (τW) تابع پنجره یک‌بُعدی به مرکز $\tau = 0$ و طول m و $C(t, p)$ تابع هدف هستند. طول پنجره (τW) در نقشه زمان بسامد تأثیر گذار است و در محدوده‌ای بین یک و حداکثر مقدار انتخاب شده برای p در تبدیل فوریه‌های زمان کوتاه تولید شده برای سیگنال، متغیر است. اگر هدف تفکیک لایه نازک باشد، بهتر است طول این پنجره برابر یک انتخاب شود و برای کاربردهای دیگر نیز به ازای طول پنجره‌های بیشتر، نقشه زمان بسامد حاصل هموارتر خواهد بود. در نهایت $P^*(t)$ (طول پنجره بهینه در هر لحظه) را در حکم کمینه‌کننده $C(t, p)$ به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$P^*(t) = \arg \min_p C(t, p), \quad (2)$$

کمینه‌سازی نسبت نرم l_2 به نرم l_4 در روابط (۱) و (۲)



شکل ۳. (الف) مدل زمین‌شناسی ۳ لایه، (ب) سری ضرایب بازتاب با بزرگی برابر (۰.۱۰۵) و قطبش برابر برای رأس و قاعده لایه نازک، (ج) مقطع لرزه‌ای مصنوعی حاصل هم‌امیخت موجک ریکر ۱۵ هرتزی با سری ضرایب بازتاب، (د) مقطع تک‌بسامد ۲۸ هرتز با استفاده از تبدیل $STFT$ معمولی (ه) مقطع تک‌بسامد ۲۷ هرتز به کمک تبدیل $STFT$ تنک با طول پنجره‌های بهینه و (و) مقطع تک‌بسامد ۲۷ هرتز با استفاده از تبدیل $STFT$ تنک پنجره ثابت. بهترین نتیجه برای تفکیک لایه نازک از بین مقاطع تک‌بسامد هریک از تبدیل‌های مربوط انتخاب شده به همین دلیل بسامد آنها با هم متفاوت است. همان‌گونه که انتظار داشتیم، اثر تداخل موجک‌های بازتابی از بالا و پایین لایه نازک در مقاطع تک‌بسامد از بین رفته است اما آنچه واضح است، مشاهده می‌شود که در مقطع تک‌بسامد حاصل از تبدیل عرضه شده در شکل ۳-ه، رأس و قاعده لایه نازک موجود به‌نحو دقیق‌تری به مکان اصلی خودش بر حسب شماره نمونه (معادل افق زمانی) نسبت داده شده است که این امر ناشی از تفکیک‌پذیری و قابلیت تطابق زیاد این تبدیل است.

مشخص می‌شوند و لایه‌های ضخیم در بسامدهای کم، پارتیکا و همکاران (۱۹۹۹) عرضه کردند. در این راستا هرچه تبدیل مورد استفاده در تجزیه طیفی تفکیک پذیری و دقت بیشتری داشته باشد، اطلاعات به دست آمده در مورد ضخامت و تعیین افق زمانی این لایه‌ها روی تریس لرزه‌ای دقیق‌تر خواهد بود.

برای آشنایی بیشتر در این مورد، یک نمونه داده مصنوعی در شکل ۳ آورده شده است. این مدل مصنوعی با در نظر گرفتن خواص مدل تیپ چهار در مقاله چوانگ و لاوتن (۱۹۹۵)، تولید شده است، بنابراین ضرایب بازتاب رأس و قاعده آن دارای قطبش و بزرگی برابر هستند و ضخامت هم کوکی برای این مدل دقیقاً برابر یک چهارم طول موج عبوری است. در شکل ۳-الف و ۳-ب مشخصات سنگ شناسی و ضرایب بازتاب این مدل مصنوعی آورده شده است. پس از هم‌میخت موجک ریکر ۱۵ هرتزی با سری ضرایب بازتاب، در شکل ۳-ج دیده می‌شود که قاعده و رأس لایه نازک موجود در زمان‌های ۰.۰۸ و ۰.۱۰۴ ثانیه با هم تداخل کرده‌اند و این لایه به شکل یک افق دیده می‌شود. لازم به ذکر است که طول یک تناوب کامل موجک ریکر مربوطه با فاصله نمونه برداری چهار میلی‌ثانیه برابر ۳۶ نمونه و ضخامت لایه نازک مدل برابر شش نمونه است. در شکل‌های ۳-د، ۳-ه و ۳-و به ترتیب نزدیک‌ترین نتایج حاصل از مقاطع تک‌بسامد در مقایسه با سری ضرایب بازتاب برای هریک از تبدیل‌های فوریه زمان کوتاه، تبدیل فوریه زمان کوتاه تنک با پنجره‌های بهینه شده در این مقاله و تبدیل فوریه زمان کوتاه تنک با پنجره ثابت قابل مشاهده است.

با نظر به این شکل همان‌گونه که انتظار داشتیم، اثر تداخل موجک‌های بازتابی از بالا و پایین لایه نازک در مقاطع تک‌بسامد از بین رفته اما آنگونه که واضح است، مشاهده می‌شود که در مقطع تک‌بسامد حاصل از تبدیل تنک با پنجره‌های بهینه در شکل ۳-ه، رأس و قاعده لایه

بهرتر الگوریتم معرفی شده، با تبدیل فوریه زمان کوتاه معمولی و تبدیل فوریه زمان کوتاه تنک با پنجره ثابت مقایسه شده است. در قسمت بعد نیز نتایج حاصل از اعمال الگوریتم معرفی شده روی داده‌های مصنوعی دیگر و نیز داده واقعی، با هدف تشخیص لایه نازک عرضه شده است.

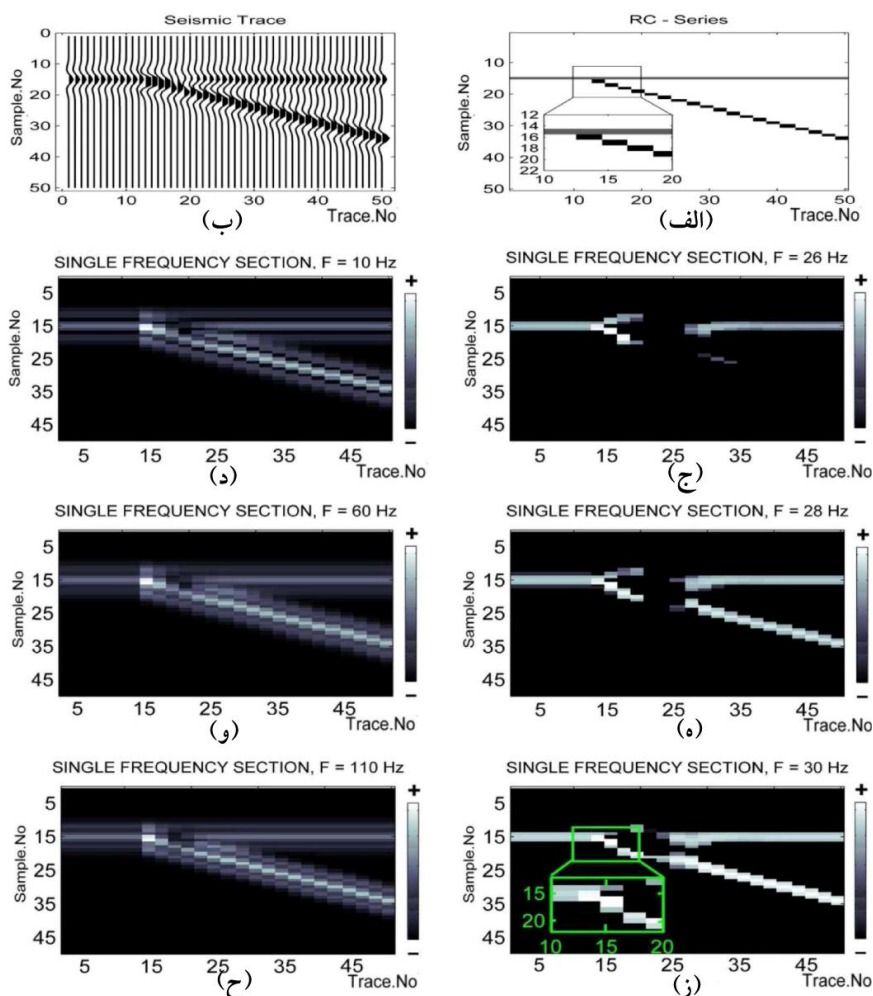
۳ اعمال نتایج روی داده واقعی و تشخیص لایه‌های نازک

تفکیک پذیری قائم داده‌های لرزه‌ای به دلیل ماهیت برداشت آنها وابسته به طول موج عبوری است. اگر ضخامت یک لایه از حدی خاص که به آن ضخامت هم کوکی (Thickness tuning) می‌گویند، کمتر باشد موجک‌های بازتاب‌کننده از رأس و قاعده این لایه با هم تداخل می‌کند و این لایه نازک در کل به شکل رأس لایه زیری یا قاعده لایه بالایی روی مقطع دیده می‌شود و در اثر تداخل، آن را از دست خواهیم داد. ضخامت هم کوکی معمولاً معادل یک چهارم طول موج تعریف می‌شود. پس هرچه طول موج بزرگ‌تر باشد لایه‌ها باید ضخامت بیشتری داشته باشند تا تداخل امواج بازتابی رخ ندهد (شریف و گیلدارت، ۱۹۹۵). یکی از روش‌هایی که می‌توان لایه‌های نازک‌تر از یک چهارم طول موج را تفکیک کرد، استفاده از تجزیه طیفی است. وایدس (۱۹۷۳) روشن ساخت که برای لایه‌های نازک‌تر از ضخامت هم کوکی دامنه لرزه‌ای به‌طور خطی با کاهش ضخامت افزایش می‌یابد. چوانگ و لاوتن (۱۹۹۵) این مفهوم را با استفاده از طیف بسامدی عمومیت بخشیدند و مشاهده کردند که بسامد قله به آرامی با کاهش ضخامت لایه افزایش می‌یابد و در نهایت این قانون معروف در تجزیه طیفی را که لایه‌های نازک در بسامدهای زیاد بهتر

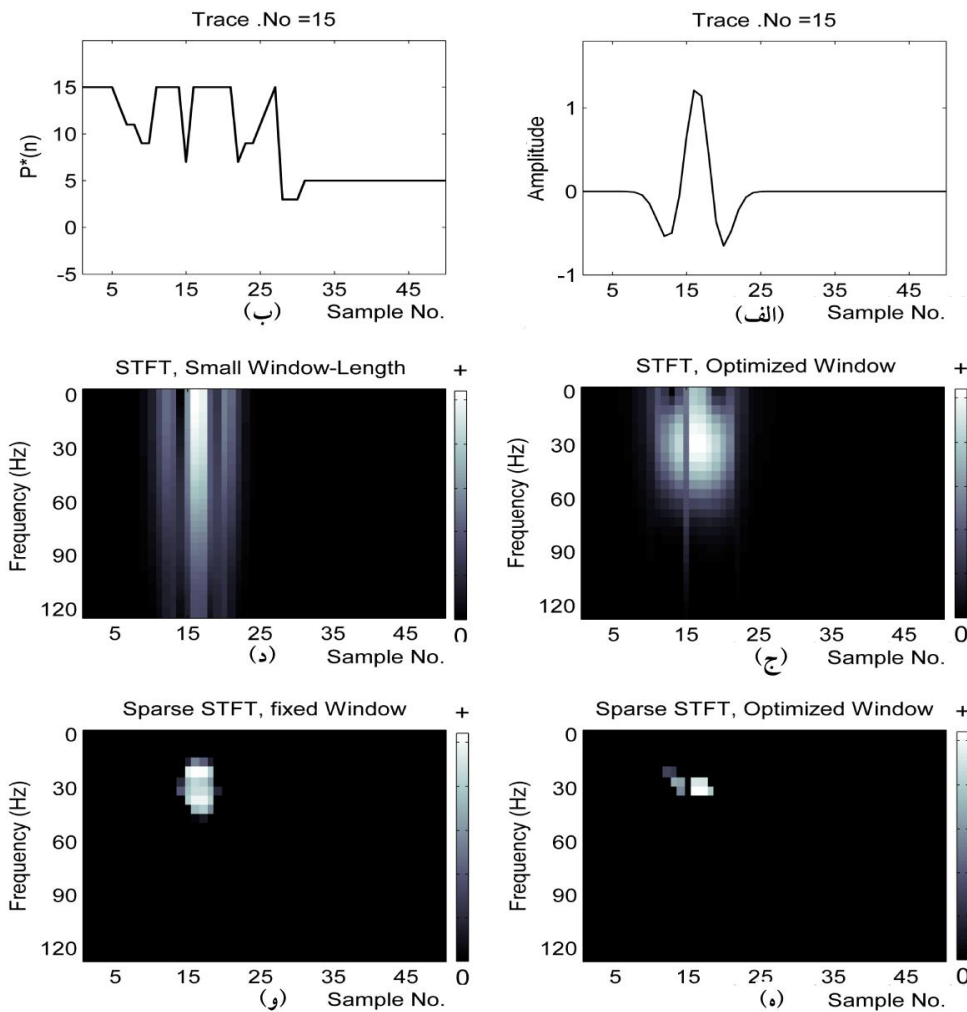
می‌توانند تله‌های نفتی خوبی ایجاد کنند و بنابراین در لرزه‌شناسی حائز اهمیت خاصی هستند. شماره‌ها در هنگام بالا آمدن در رأس گوه به دام می‌افتند ولی داده‌های لرزه‌ای به سبب تداخل اشاره شده در مورد لایه‌های نازک، فاقد اطلاعات دقیقی از این نواحی هستند.

در شکل‌های ۴-الف و ۴-ب سری ضرایب بازتاب و مقطع لرزه‌ای یک مدل گوه مصنوعی مشاهده می‌شود. طبق مشاهدات وایدس و پارتیکا، افزایش دامنه بسامد قله

نازک موجود به نحو دقیق‌تری به مکان اصلی خودش برحسب شماره نمونه (معادل افق زمانی) نسبت داده شده است که این امر معلول تفکیک‌پذیری زیاد این تبدیل است. برای ایجاد شباهت بیشتر بین داده‌های مصنوعی تولید شده و داده واقعی، در شکل ۴ از یک مدل گوه مصنوعی استفاده شده است؛ چرا که لایه‌های نازک عموماً به شکل گوه در مقاطع لرزه‌ای واقعی ظاهر می‌شوند. گوه‌ها به لحاظ شکل ساختاری ویژه‌ای که دارند



شکل ۴. الف) سری ضرایب بازتاب مدل گوه. در مستطیل بزرگ‌نمایی شده، بازشدگی گوه از ردلرزه ۱۱۵م، در افق زمانی معادل شماره نمونه ۱۵ به میزان ۱ نمونه قابل مشاهده است. ب) مقطع لرزه‌ای حاصل از هم‌مییخت موجک ریکر ۳۰ هرتزی با سری ضرایب بازتاب. شکل‌های (ج)، (د) و (ه) مقاطع تک‌بسامد حاصل از تبدیل بهینه شده هستند. در قسمت بزرگ‌نمایی شده در شکل (ز) ملاحظه می‌شود که مقطع تک‌بسامد، انطباق خوبی با سری ضرایب بازتاب دارد و در ردلرزه شماره ۱۵، بازشدگی رأس گوه به میزان ۱ نمونه قابل رؤیت است. از طرفی، افق رخداد گوه را نیز به مکان دقیق خودش در مقطع سری ضرایب بازتاب (شماره نمونه ۱۱۵م) نسبت داده است. شکل‌های (د)، (و) و (ح) مقاطع تک‌بسامد حاصل از تبدیل STFT معمولی با طول پنجره کم هستند و مشاهده می‌شود که تفاوتی بین مقاطع تک‌بسامد با بسامدهای متفاوت در آن دیده نمی‌شود.



شکل ۵. (الف) سیگنال مربوط به رد لرزه شماره ۱۵ مدل گوه شکل ۴. با توجه به شکل ۴-الف مشخص است که موجک‌های تداخل کننده در شماره نمونه ۱۵ روی محور زمان تنها به میزان یک نمونه با هم فاصله دارند. (ب) طول پنجره‌های بهینه با زمان. (ج) نقشه زمان بسامد با استفاده از تبدیل $STFT$ که با طول پنجره‌های موجود در شکل ۵-الف بهینه شده است، (د) نقشه زمان بسامد با استفاده از تبدیل $STFT$ پنجره ثابت با طول پنجره کوچک که گرچه توانسته در نزدیکی نمونه شماره ۱۵ تفکیک ایجاد کند اما اطلاعات بسامدی را از دست داده و به جای بسامد ۳۰ هرتز تقریباً در همه بسامدها این تفکیک رخ داده و نیز یک تفکیک دیگر در موقعیت نمونه شماره ۲۰ ایجاد کرده است و سبب می‌شود بازتابنده‌های مضاعف به شکل شیب در بالا و پایین بازتابنده‌های اصلی (شکل ۴) به وجود بیاید. (ه) نقشه زمان بسامد با استفاده از تبدیل $STFT$ تنک و طول پنجره‌های بهینه با زمان، (و) نقشه زمان بسامد با استفاده از تبدیل $STFT$ تنک غیر بهینه که گرچه تفکیک پذیری زیادی دارد، اما قابلیت تطابق آن با تغییرات محلی سیگنال از حالت بهینه‌اش در شکل ۵-ه کمتر است. بنابراین بهینه‌سازی عرضه شده حساسیت تبدیل زمان بسامد مربوط را به کوچک‌ترین تغییرات محلی سیگنال به حدی بالا برده که نه تنها به کمک آن می‌توان تداخل را از بین برد بلکه خود، سبب افزایش تفکیک پذیری نیز شده است.

قله بسامد (Peak frequency movement) می‌گویند (لیو و مارفورت ۲۰۰۶) که با تعقیب آن می‌توان محل بازشدگی رأس گوه را در مقاطع بسامد زیاد تشخیص داد که در این مقاله برای تفکیک لایه نازک موجود در داده

جهت رأس گوه است و جابه‌جایی آن در مقاطع بسامد زیاد نشان‌دهنده نازک شدگی بازهم بیشتر لایه و رسیدن به محل جدایش رأس گوه در حوزه زمان بسامد است که در حوزه زمان قابل مشاهده نیست. به این پدیده، حرکت

نازک در محل بازشدگی رأس گوه به میزان ۱ نمونه و طول یک تناوب کامل موجک ریکر ۳۰ هرتزی با فاصله نمونه برداری چهار میلی ثانیه، برابر ۱۶ نمونه است. با توجه به نتایج این شکل مشاهده می شود که تجزیه طیفی حاصل از تبدیل بهینه شده بسیار رضایت بخش است تا جایی که قادر است لایه ای به ضخامت یک شانزدهم تناوب را تفکیک کند. برای بررسی نقش بهینه سازی طول پنجره های اضافه شده به الگوریتم غلامی و همکاران در شکل ۵ مقایسه ای بین تجزیه طیفی ردلرزه شماره ۱۵ این مدل گوه با استفاده از حالت بهینه و غیر بهینه این الگوریتم، حالت پنجره بهینه تبدیل فوری زمان کوتاه (استفاده از پنجره های بهینه لحظه ای در تبدیل فوری زمان کوتاه معمولی) و نیز تبدیل فوری زمان کوتاه معمولی با پنجره زمانی کوچک آورده شده است.

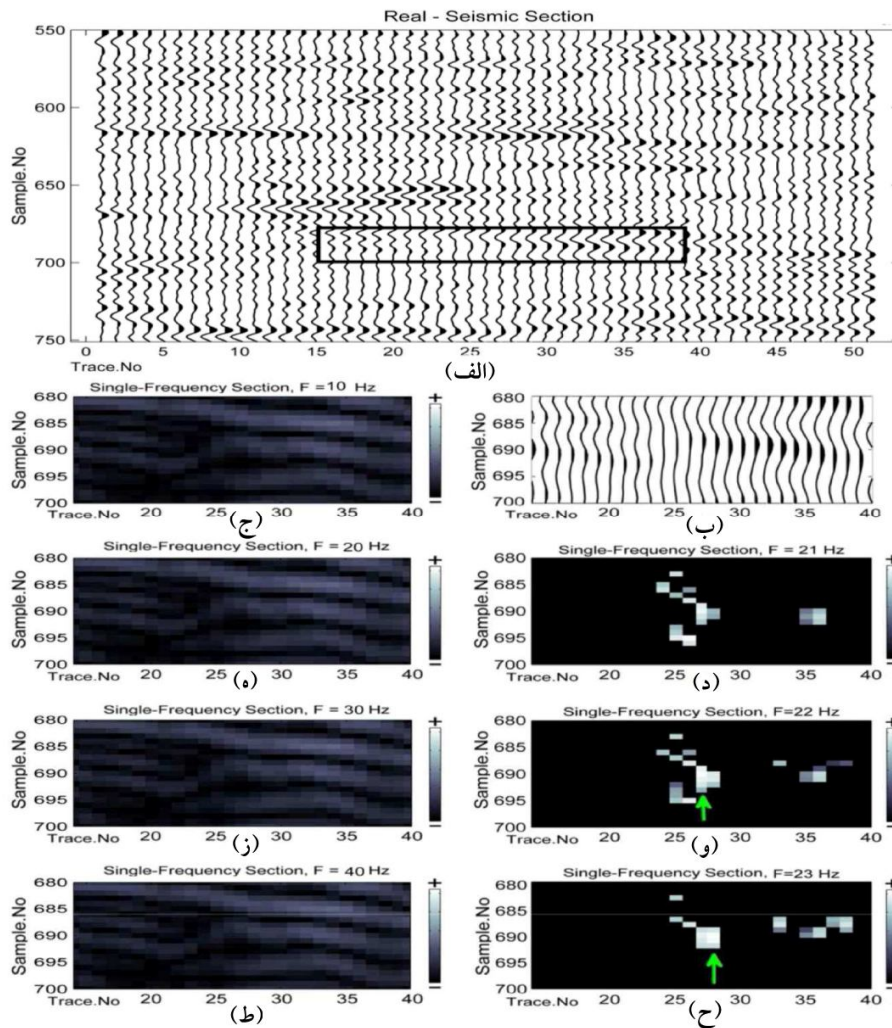
از این مقایسه نتیجه گرفته می شود که بهینه سازی معرفی شده، قابلیت تطابق تبدیل زمان بسامد با تغییرات محلی سیگنال را به طرز کارآمدی افزایش داده است، به نحوی که حتی با استفاده از پنجره های بهینه در تبدیل فوری زمان کوتاه معمولی (شکل ۵-ج) که تفکیک پذیری خیلی کمی نسبت به تبدیل فوری زمان کوتاه تنک دارد، تطابق مورد انتظار حاصل شده و برای موجک تداخل کرده دو قله بسامدی با دامنه های متفاوت در صفحه زمان بسامد ایجاد شده است. این در حالی است که در تبدیل فوری زمان کوتاه تنک غیر بهینه موجود در شکل ۵-و، گرچه تفکیک پذیری خود تبدیل بسیار شایان توجه است، اما قابلیت تطابق آن با تغییرات محلی سیگنال از حالت بهینه اش در شکل ۵-ه کمتر است. بنابراین بهینه سازی عرضه شده حساسیت تبدیل زمان بسامد مربوط را نسبت به کوچک ترین تغییرات محلی سیگنال، به حدی افزایش داده است که نه تنها به کمک آن می توان تداخل را از بین برد بلکه خود سبب افزایش تفکیک پذیری نیز شده است. با نظر به شکل ۵-د می توان به مبهم بودن دامنه

واقعی به دلیل پیچیدگی زیاد از این واقعیت کمک گرفته- ایم (شکل ۶) اما با توجه به مقاطع تک بسامد مربوط به تبدیل تنک بهینه شده که در شکل های ۴-ج، ۴-ه و ۴-ز قابل مشاهده هستند درمی یابیم که نه تنها نیازی به تعقیب بسامد قله نیست، بلکه استفاده از این تبدیل که دارای تفکیک پذیری و قابلیت تطابق زیاد است، سبب شده لایه نازک در رأس گوه به خوبی در مقاطع تک بسامد (با بسامد حول بسامد مرکزی) مشاهده شود، به طوری که در مقطع تک بسامد ۳۰ هرتز در شکل ۴-ز، موقعیت رأس گوه با سری ضرایب بازتاب مدل (که در کاربردهای عملی برای ما مجهول است) منطبق است. (قسمت های بزرگ نمایی شده درون مستطیل های موجود در شکل های ۴-الف و ۴-ز). یک ایده آن است که برای افزایش تطابق و تشخیص بهتر لایه نازک با استفاده از تبدیل فوری زمان کوتاه معمولی از یک پنجره زمانی کوچک استفاده شود که در ستون سمت چپ شکل ۴ نتایج آن مشاهده می شود. چنانچه در این شکل ها مشاهده می شود، گرچه یک مقدار بیشینه در محل رأس گوه در همه بسامدها موجود است ولی چنانچه خواهیم دید (شکل ۶) نمی توان آن را در داده واقعی، به منزله نشانگر لایه نازک تعبیر کرد. زیرا در داده واقعی، مقدار بیشینه در هر نقطه به دلایل متفاوتی، نظیر تداخل های متفاوت، ممکن است رخ دهد. استفاده از تبدیل فوری زمان کوتاه معمولی با طول پنجره کوچک گرچه قابلیت تطابق زمانی را افزایش می دهد، اما با توجه به اصل عدم قطعیت هایزنبورگ از دقت اطلاعات بسامدی می کاهد و چنانچه در ستون سمت چپ شکل ۴ دیده می شود تصاویر مبهمی در محل بازتابنده ها تولید می کند. در مقابل نتایج استفاده از روش عرضه شده در این مقاله، به کمک تبدیل بهینه شده تنک (شکل ۴-ز) با دقت بهتری توانسته به سری ضرایب بازتاب در حوزه بسامد دست یابد.

نکته مهم در مورد این مدل آن است که ضخامت لایه

می‌شود که سبب می‌شود چندین بازتابنده شیب در بالا و پایین بازتابنده اصلی (ستون سمت چپ شکل ۴) با توجه به مدل سری ضرایب بازتاب ایجاد کند. از طرفی به دلیل

بازتابنده‌ها در حوزه زمان بسامد به هنگام استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه با پنجره زمانی کوچک پی برد. با وجود اینکه تبدیل فوریه زمان کوتاه معمولی توانسته است در محل مورد انتظار بین انرژی بازتابنده‌های متداخل، تفکیک ایجاد کند اما یک روند اضافی غیر واقعی نیز دیده



شکل ۶. داده لرزه‌ای واقعی که در آن محور افقی معرف شماره ردلرزه و محور عمودی معرف شماره نمونه معادل افق زمانی رخدادها است. (ب) قسمت درون مستطیل موجود در شکل الف بزرگ‌نمایی شده که در آن یک گوه واقعی رؤیت می‌شود. سایر شکل‌های ستون سمت راست (د)، (و) و (ح)، مقاطع تک‌بسامد مربوط به تجزیه طیفی به کمک تبدیل بهینه شده هستند. نه تنها در مقاطع متفاوت، روند گوه‌شکل بازتابنده‌ها در حوزه بسامد قابل رؤیت است، بلکه از لحاظ موقعیت زمانی و مکانی نیز موقعیت آن در مقاطع تک‌بسامد به مکان مورد انتظار نسبت داده شده است (با توجه به ردلرزه‌های قبل از شماره ۲۵ که هنوز تداخل نکرده‌اند). با تعقیب افزایش دامنه بسامد قله که با کاهش ضخامت در مقاطع بسامد بیشتر به سمت لایه نازک‌تر حرکت می‌کند می‌توان به راحتی محل اصلی رأس گوه که به دلیل تداخل در حوزه زمان قابل دسترسی نبود را ردیابی کرد (پیکان‌های سبز). در این مورد تعقیب دامنه بسامد قله قابل اعتماد است زیرا کاملاً متمرکز است و جابه‌جایی آن در مقاطع بسامد بیشتر، روند منظمی را دنبال می‌کند. همه شکل‌های ستون سمت چپ نیز مربوط به مقاطع تک‌بسامد حاصل از تبدیل STFT معمولی با طول پنجره ۲ نمونه هستند که به دلیل تفکیک‌پذیری کم، این تبدیل سبب شده که انرژی بازتابنده‌ها در حوزه زمان بسامد مضاعف شود و در کل این روش کارایی خود را از دست داده است.

موقعیت زمانی و مکانی نیز موقعیت آن در مقاطع تک‌بسامد به مکان مورد انتظار نسبت داده شده است (با توجه به ردلرزه‌های قبل از شماره ۲۵ که هنوز تداخل نکرده‌اند). با تعقیب افزایش دامنه بسامد قله که با کاهش ضخامت در مقاطع بسامد بیشتر به سمت لایه نازک‌تر حرکت می‌کند می‌توان به راحتی محل اصلی رأس گوه را که به دلیل تداخل در حوزه زمان قابل دسترسی نبود، ردیابی کرد (پیکان‌های سبز). در این مورد تعقیب بیشینه دامنه بسامد قله، قابل اعتماد است زیرا کاملاً متمرکز است و جابه‌جایی آن در مقاطع بسامد بیشتر، روند منظمی دارد.

۴ نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی ساده برای بهینه‌سازی لحظه‌ای تبدیل فوریه زمان کوتاه تنک نرم l_1 ، به کمک یک قید تنکی مضاعف عرضه شد که به سبب آن، افزایش مفید در حساسیت تجزیه زمان بسامد در برابر تغییرات لحظه‌ای سیگنال به وجود آمد. از مدل‌های مصنوعی و داده واقعی نتیجه گرفته می‌شود که افزایش قابلیت تطابق تبدیل زمان بسامد نقش مؤثری در تفکیک لایه‌های نازک دارد. همچنین در مقایسه‌ای که با حالت غیر بهینه همین تبدیل صورت گرفت، دیده شد که فقط تفکیک پذیری زیاد تبدیل مربوط برای تفکیک لایه‌ای به ضخامت کمتر از ضخامت هم‌کوکی کافی نیست و به این بهینه‌سازی نیاز است (شکل ۵). همچنین با مقایسه نقشه‌های زمان بسامد به دست آمده در مثال‌های گوناگون دیده شد که علاوه بر افزایش قابلیت تطابق تبدیل زمان بسامد با تغییرات ناگهانی سیگنال، تفکیک پذیری آن نیز نسبت به حالت غیر بهینه به وضوح افزایش یافته است.

با توجه به کارایی تبدیل بهینه شده می‌توان از آن برای سایر بررسی‌های تفسیری و پردازشی از قبیل تحلیل دامنه برحسب دورافت در حوزه بسامد به منظور تشخیص مخازن گازی لایه نازک، تضعیف نوفه در حوزه زمان بسامد و

تحت تأثیر قرار دادن قدرت تفکیک در راستای بسامد، در همه بسامدها انرژی این بازتابنده‌ها موجود است. چنین پدیده‌ای در تجزیه طیفی مطلوب نیست زیرا سایر کاربردهای تجزیه طیفی را تحت شعاع قرار می‌دهد برای مثال محو شدن انرژی بازتابنده‌های مرتبط با مخازن گازی در مقاطع تک‌بسامد با بسامد زیاد (سینها و همکاران، ۲۰۰۶) که می‌تواند در اکتشاف مستقیم ذخایر هیدروکربنی مورد استفاده قرار گیرد را دچار مشکل می‌کند.

در مدل‌های مصنوعی دیده شد که افزایش قابلیت تطابق تبدیل زمان بسامد نقش مؤثری در تفکیک لایه‌های نازک دارد و نیز دیده شد که هرچه تفکیک پذیری بیشتر باشد، مقاطع تک‌بسامد شباهت بیشتری به سری ضرایب بازتاب خواهند داشت. اکنون صحت این نتایج را در تفکیک لایه نازک یک مقطع لرزه‌ای واقعی در شکل ۶ بررسی می‌کنیم. در شکل ۶-الف یک نمونه داده واقعی پس از برابارش با ۲۰۰ نمونه در راستای زمان و ۵۱ ردلرزه آورده شده که در شکل ۶-ب یک قسمت از این مقطع که حاوی بازتابنده‌های لرزه‌ای به شکل گوه است انتخاب و بزرگ‌نمایی شده است. همان‌گونه که در مقاطع تک‌بسامد ستون سمت چپ که مربوط به تجزیه طیفی با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه معمولی با طول پنجره زمانی کوچک است دیده می‌شود، به دلیل اثر تداخل مضاعف لایه‌های بالایی و پایینی و بازتابنده‌های شبح، مجدداً چندین بازتابنده در قسمت انتخاب شده دیده می‌شود که نتیجه‌گیری را دچار مشکل می‌کند و چنانچه در مورد مدل گوه مصنوعی نتیجه شد، اگر تبدیل مربوط، تفکیک پذیری زیادی نداشته باشد، این روش به کلی فاقد کارایی است. اما در مقاطع تک‌بسامد حاصل از تجزیه طیفی به کمک تبدیل بهینه شده (ستون سمت راست شکل ۶) نه تنها در مقاطع گوناگون، روند گوه‌شکل بازتابنده‌ها در حوزه بسامد قابل رؤیت است، بلکه از لحاظ

- Goldstein T., and Osher, S., 2009, The split Bregman method for L1 regularized problems: *SIAM J. Imaging Sci.*, **2**(2), 323–343.
- liu, J., and Marfurt, K., 2006, Thin bed thickness prediction using instantaneous frequency: 76th SEG meeting, New Orleans, Expanded Abstracts, 968–972.
- Jones, D., and Baraniuk, G., 1994, A simple scheme for adapting time-frequency representation: *IEEE Trans.*, **42**(12), 3530-3535.
- Marfurt, K. J., and Kirlin, R. L., 2001, Narrow-band spectral analysis and thin-bed tuning: *Geophysics*, **66**, 1274-1283.
- Portniaguine, O., and Castagna, J. P., 2004, Inverse spectral decomposition: 74th SEG Meeting, Denver, Expanded Abstracts, 1786-1789.
- Partyka, G., Gridley, J., and Lopez, J., 1999, Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization: *The Leading Edge*, **18**(3), 353- 360.
- Sheriff, R., and Geldart, I., 1995, *Exploration Seismology*: Cambridge University Press.
- Sinha, S., Routh, P. S., Anno, P. D., and Castagna, J. P., 2005, Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform: *Geophysics*, **70**, 19-25.
- Widess, M. B., 1973, How thin is a thin bed: *Geophysics*, **38**, 1176-1180
- مانند آن استفاده کرد و با مقایسه‌ای با روش‌های غیر بهینه مرسوم، ارزش این قبیل بهینه‌سازی‌ها را مورد ارزیابی قرار داد.

منابع

- Castagna, J., and Sun, S., 2006, Comparison of spectral decomposition methods: *First Break*, **24**, 75-79.
- Castagna, J., Sun, S., and Siegfried, R., 2003, Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons: *The Leading Edge*, **22**, 120-127.
- Chuang, H., Lawton, D., 1995, Frequency characteristics of seismic reflections of thin beds: *Journal of Exploration Geophysics*, **31**, 32- 37.
- Donoho, D. L., 2006, For most large underdetermined systems of linear equations, the minimal l1 solution is also the sparsest solution: *Communications on Pure and Applied Mathematics*, **59**, 907 - 934.
- Gholami, A., Amini, N., Siahkoobi, H. R., and Edalat, A., 2010, Fast-sparse time-frequency decomposition: 72nd EAEG meeting, Madrid, Extended Abstracts.