

شناسایی کانال مدفون با استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه واهمامیختی

میثم زارعی^۱، امین روشندل کاهو^{۱*}، حمیدرضا سیاهکوهی^۲ و مهدی صادقی^۱

^۱دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

^۲موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۶/۲۸)

چکیده

چون محتوای بسامدی داده‌های لرزه‌ای با زمان تغییر می‌کند باید از تبدیل‌های زمان - بسامد برای بررسی آنها استفاده کرد. تبدیل‌های زمان - بسامد متداول هرکدام دارای نقاط ضعف و قوت هستند. یکی از تبدیل‌های زمان - بسامد متداول توزیع ویگنر - وایل است که دارای قدرت تفکیک زمانی و بسامدی زیادی است، ولی به سبب حضور جمله‌های متقاطع، امروزه کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین استفاده از تبدیل‌هایی که بتوانند علاوه بر حفظ نقاط قوت این روش‌ها، نقاط ضعف آنها را برطرف کنند، بسیار سودمند است.

طیف‌نگاشت تبدیل فوریه زمان کوتاه که مربع ضریب تبدیل فوریه زمان کوتاه است، نمونه هموار شده توزیع ویگنر - وایل است. طیف‌نگاشت تبدیل فوریه زمان کوتاه حاصل همامیخت دو بُعدی توزیع ویگنر - وایل سیگنال و توزیع ویگنر - وایل تابع پنجره است. در این مقاله روش طیف‌نگاشت تبدیل فوریه زمان کوتاه واهمامیختی عرضه می‌شود که با اعمال عملگر دو بُعدی واهمامیخت روی طیف‌نگار تبدیل فوریه زمان کوتاه به طور هم‌زمان باعث افزایش قدرت تفکیک در حوزه زمان - بسامد و کاهش جمله‌های تداخلی توزیع ویگنر - وایل می‌شود. در این مقاله، ابتدا قدرت تفکیک تبدیل فوریه زمان کوتاه واهمامیختی با تبدیلات زمان - بسامد مرسوم مقایسه شده و سپس کارایی نشانگرهای استخراج شده از این تبدیل برای شناسایی کانال‌های مدفون در داده‌های مصنوعی و واقعی سه بُعدی بررسی و با تبدیل فوریه زمان کوتاه مقایسه می‌شود. با توجه به رفتار دامنه امواج لرزه‌ای در داخل کانال، در مورد سرعت امواج لرزه‌ای در رسوبات پُرکننده کانال می‌توان اظهار نظر کرد. نتایج حاصل نشان‌دهنده برتری قابل قبول این تبدیل در مقایسه با تبدیل‌های زمان - بسامد متداول دیگر و کارایی نشانگرهای استفاده شده در شناسایی کانال‌های مدفون، است.

واژه‌های کلیدی: تبدیل‌های زمان - بسامد، طیف‌نگار، قدرت تفکیک، تبدیل فوریه زمان کوتاه واهمامیختی، واهمامیخت دو بُعدی، نشانگرهای لرزه‌ای، کانال‌های مدفون

Detection of buried channel using the deconvolutive short time Fourier transform

Meysam Zareie¹, Amin Roshandel^{1*}, Hamid Reza Siahkoochi² and Mehdi sadeghi¹

¹School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Iran

²Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 13 March 2012, accepted: 18 September 2012)

Summary

Time representation was the first way to describe a signal, and later on the frequency representation was introduced as another important way to describe a signal for its physical significance. Due to the non-stationary property of seismic data, time-frequency transform has to be used to analyze it. During the last decade, spectral decomposition techniques have proven to be an excellent tool to describe thin beds associated with channel sands, alluvial fans, and the like. However, with the traditional spectral decomposition method based on the short time Fourier Transform, it is difficult to acquire the accurate time-frequency spectrum for non-stationary seismic signals. Recently, the emergence of seismic attribute co-rendering, principal component analysis, cluster analysis, and neural networks has partially solved the problem, but the extraction of spectral attributes from spectral-decomposition tightly linked to the geology has more advantages over other approaches. Popular time-frequency methods have some disadvantages.

A good time resolution requires a short window and a good frequency resolution require a narrow-band filter, i.e. a long window, but unfortunately, these two cannot be simultaneously realized. The Wigner-Ville Distribution (WVD) of a signal is the Fourier Transform of the signal's time-dependent auto-correlation function, a quadratic expression which is bilinear in the signal. As a result, the cross-terms appear in the locations of the resulting time-frequency spectra that either interfere with the interpretation of auto-terms or for which we can provide no physical interpretation. Due to the existence of cross-terms, WVD is not often used. Reduction of the cross-terms is achieved by manipulating the ambiguity function as a mask that reduces the cross-terms while preserving the time and frequency resolution of WVD.

The short-time Fourier Transform (STFT) spectrogram, which is the squared modulus of the STFT, is a smoothed version of WVD. An STFT spectrogram is a 2-D convolution of the signal WVD and the utilized window function. In this paper, we introduce a Deconvolutive Short-Time Fourier Transform (DSTFT) spectrogram method, which improves the time-frequency resolution and reduces the cross-terms simultaneously by applying a 2-D deconvolution operation on the STFT spectrogram. Compared to the STFT spectrogram, the spectrogram obtained by this method shows a significant improvement in the time-frequency resolution. In this study, we extract two attributes namely the peak frequency and the peak amplitude, based on the Deconvolutive Short-Time Fourier Transform. The maximum frequency attribute is directly related to the thickness of the thin-bed, like channel, and the maximum amplitude attribute also responds to the thin-bed.

We use instantaneous seismic attributes: maximum instantaneous frequencies and their associated amplitudes, as a tool to detect seismic geomorphologic bodies and to identify thin layers. Then we use attributes extracted by Deconvolutive Short Time Fourier Transform to detect the burial channel in both synthetic and real 3D seismic data. Usually, the center of the channel is recognized by the lower maximum frequency and when the thickness of the channel gets thinner away from the center of the channel, the maximum frequency increases correspondingly. Therefore, this attribute could clearly describe the distribution of channel both vertically and horizontally. Results of this study on the synthetic and real seismic data examples illustrate the good performance of the DSTFT spectrogram compared with other traditional time-frequency representations.

Key words: Time-frequency transform, spectrogram, resolution, deconvolutive short time Fourier transform, 2D convolution, seismic attributes, burial channels

۱ مقدمه

فوریه زمان کوتاه واهمامیختی (کیانگ و ون-کای، ۲۰۱۰) معرفی می‌شود که با حفظ قدرت تفکیک زیاد توزیع ویگنر - وایل، مشکل جمله‌های متقاطع را نیز برطرف کرده است و می‌تواند جایگزین مناسبی برای توزیع ویگنر - وایل و سایر تبدیل‌های زمان - بسامد باشد. مطابق این نظریه، طیف‌نگار تبدیل فوریه زمان کوتاه حاصل همایخت دو بُعدی توزیع ویگنر - وایل سیگنال و پنجره است.

یکی از کاربردهای مهم تبدیل‌های زمان-بسامد در تحقیقات لرزه‌شناسی اکتشافی، بررسی لایه‌های نازک و شناسایی آنها است. در این مقاله، از تبدیل فوریه زمان کوتاه واهمامیختی با قدرت تفکیک زیاد و خواص تداخلی امواج در لایه‌های نازک در شناسایی کانال‌های مدفون استفاده شده است.

۲ تبدیل فوریه زمان کوتاه

تبدیل فوریه زمان کوتاه روشی است که به صورت گسترده‌ای در بررسی سیگنال‌های غیرپایا استفاده می‌شود و مفهوم آن بسیار ساده و قدرتمند است. اساس این تبدیل برپایه استفاده از یک پنجره زمانی است. با استفاده از این تابع پنجره، سیگنال اصلی پنجره‌ای می‌شود و بررسی به بخش کوتاه شده سیگنال خلاصه می‌شود (کوهن، ۱۹۹۵). تبدیل فوریه زمان کوتاه برای سیگنال $x(t)$ به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود (اوگر و همکاران، ۱۹۹۶).

$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u)h^*(u-t)e^{-j2\pi fu} du, \quad (1)$$

که $h(t)$ پنجره تحلیل زمان کوتاه است و حول $x=0$ و $f=0$ جای‌گزیده است. چون $x(t)$ در پنجره $h^*(u-t)$ ضرب می‌شود به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای سیگنال به‌جز در همسایگی $u=t$ تضعیف می‌شود و در نتیجه تبدیل فوریه زمان کوتاه یک طیف محلی را از سیگنال $x(t)$ در همسایگی t به‌دست می‌دهد.

تجزیه طیفی به‌منزله ابزاری قوی، در پردازش و تفسیر داده‌های لرزه‌ای کاربرد وسیعی دارد. امروزه کاربرد تبدیل‌های زمان-بسامد با داشتن هم‌زمان اطلاعات زمانی و بسامدی داده‌های لرزه‌ای افزایش چشمگیری داشته است. روش‌های متفاوتی برای تجزیه طیفی مانند تبدیل فوریه زمان کوتاه (گابور، ۱۹۴۶)، توزیع ویگنر-وایل (ویگنر، ۱۹۳۲؛ وایل، ۱۹۴۸)، تبدیل موجک (مالات، ۲۰۰۹) و تبدیل S (استاک‌ول و همکاران، ۱۹۹۶) از سوی محققان عرضه شده است. از هرکدام از این تبدیل‌ها به‌صورت گسترده‌ای در لرزه‌شناسی استفاده می‌شود (ماتوس و همکاران، ۲۰۰۵؛ کستگنا و همکاران، ۲۰۰۳؛ سینها و همکاران، ۲۰۰۵؛ لیته و همکاران، ۲۰۰۸؛ عسکری و سیاه‌کوهی، ۲۰۰۸؛ روشندل کاهو و سیاه‌کوهی، ۱۳۸۸؛ روشندل کاهو و سیاه‌کوهی، ۱۳۸۹). هر یک از روش‌های فوق دارای مزایا و معایبی هستند که استفاده از این تبدیل‌ها را محدود می‌کند. توزیع ویگنر - وایل یکی از روش‌های نمایش زمان-بسامد متداول و درعین‌حال مهم است که در میان روش‌های متداول، بهترین قدرت تفکیک را دارد. اما به‌سبب وجود جمله‌های متقاطع و تداخل آن با جمله‌های خودهمبسته، نمی‌توان تفسیر درستی از طیف زمان-بسامد توزیع ویگنر - وایل داشت. تحقیقات و بررسی‌های گسترده‌ای برای رفع مشکل توزیع ویگنر - وایل عرضه شده است. توزیع شبه‌ویگنر - وایل (پاپاندرو-سوپاپولا، ۲۰۰۳) و توزیع شبه‌ویگنر - وایل هموار شده (پاپاندرو-سوپاپولا، ۲۰۰۳) دو روش متداولی هستند که برای رفع مشکل توزیع ویگنر - وایل معرفی شده‌اند. در این دو روش با استفاده از هموارسازی در راستای محورهای زمان و بسامد، جمله‌های متقاطع به‌سبب خاصیت نوسانی، تا حد زیادی تضعیف شده‌اند. با این حال در مقابل، قدرت تفکیک زیاد زمانی و بسامدی توزیع ویگنر - وایل را از دست داده‌اند. در این مقاله تبدیل

۳ توزیع ویگنر- وایل

یکی از مزایای توزیع ویگنر - وایل نسبت به تبدیل‌های زمان-بسامد متداول، به دست آوردن توزیع چگالی انرژی در صفحه زمان-بسامد بدون از دست دادن قدرت تفکیک در راستای زمان و بسامد است. توزیع چگالی انرژی در صفحه زمان-بسامد از همبستگی سیگنال $x(t)$ با نسخه انتقالی زمانی و بسامدی خود سیگنال به دست می‌آید. با وجود خواص برجسته این توزیع، کاربرد آن به سبب وجود مجموعه‌ای از جمله‌های تداخلی اضافی، محدود شده است. البته با استفاده از هموارسازی می‌توان این جمله‌ها را کاهش داد ولی در مقابل، قدرت تفکیک نیز کاهش می‌یابد (روشندل کاهو، ۱۳۸۸). توزیع ویگنر- وایل برای سیگنال $x(t)$ به صورت تبدیل فوری تابع خودهمبستگی مستقل از زمان که به اندازه τ اختلاف زمانی دارند تعریف می‌شود که در رابطه (۲) نشان داده شده است (رالسون و همکاران، ۲۰۰۷).

(۲)

$$WVD_x(t, f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) e^{-j2\pi f \tau} d\tau,$$

که $R(\tau) = x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2)$ تابع خودهمبستگی وابسته به زمان و x^* مزدوج مختلط است.

توزیع ویگنر- وایل به سبب اینکه در آن از تابع پنجره استفاده نشده است، دارای قدرت تفکیک زیادی در حوزه زمان-بسامد است. ولی کاربرد آن به سبب وجود جمله‌های متقاطع محدود شده است (دونگلی و همکاران، ۲۰۱۰). برای سیگنال $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$ توزیع ویگنر- وایل به صورت رابطه (۳) است.

$$WVD_x(t, f) = WVD_{x_1}(t, f) + WVD_{x_2}(t, f) + 2\text{Re}(WVD_{x_1 x_2}(t, f)), \quad (3)$$

در رابطه (۳) مشاهده می‌شود که علاوه بر جمله‌های خودهمبستگی، جمله تداخلی نیز وجود دارد که به سبب هم‌پوشانی این جمله‌ها در صفحه زمان - بسامد، تفسیر

مقطع حاصل از توزیع ویگنر- وایل سخت می‌شود. چنانچه در رابطه (۲) به جای استفاده از خود سیگنال از سیگنال پنجره‌ای استفاده شود، توزیع ویگنر- وایل به توزیع شبه‌ویگنر- وایل تبدیل می‌شود. استفاده از عملگر پنجره‌ای معادل هموارسازی در راستای بسامد در توزیع ویگنر- وایل است و مطابق رابطه زیر به دست می‌آید (اوگر و همکاران، ۱۹۹۶).

$$PWVD(t, f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) e^{-j2\pi f \tau} d\tau, \quad (4)$$

که $h(\tau)$ تابع هموارسازی است. در این روش آن دسته از جمله‌های متقاطع که دارای نوسان در راستای محور زمان هستند، باقی خواهند ماند.

چون جمله‌های تداخلی با بسامد زیادی نوسان می‌کنند، ساده‌ترین راه برای تضعیف این جمله‌ها، کاربرد یک فیلتر دو بُعدی پایین‌گذر است. در این روش همه جمله‌های متقاطع تضعیف می‌شوند. ولی با کاربست این فیلتر علاوه بر تضعیف جمله‌های تداخلی، به طور هم‌زمان از قدرت تفکیک توزیع ویگنر- وایل نیز کاسته می‌شود. این فیلتر دو بُعدی پایین‌گذر از یک تابع هموار ساز دو بُعدی زمانی و بسامدی، $\varphi(u, \tau)$ ، استفاده می‌کند و توزیع ویگنر- وایل سیگنال $x(t)$ توزیع شبه‌ویگنر- وایل هموار شده خوانده می‌شود و به صورت رابطه (۵) نشان داده می‌شود (اوگر و همکاران، ۱۹۹۶)

(۵)

$$SPWVD_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(u, \tau) WVD(t - u, f - \tau) du d\tau,$$

با کاربرد تابع هموارسازی مناسب توزیع شبه‌ویگنر- وایل هموار شده تعادلی را بین قدرت تفکیک و شدت هموارسازی جمله‌های تداخلی می‌توان ایجاد کرد. به عبارت دیگر هرچه شدت هموارسازی بیشتر باشد قدرت تفکیک بیشتر کاهش می‌یابد.

۴ تبدیل فوریه زمان کوتاه واهمامیختی

در تبدیل فوریه زمان کوتاه به سبب پنجره‌ای کردن سیگنال مورد بررسی، تعادلی بین قدرت تفکیک در حوزه زمان و بسامد که ناشی از اصل عدم قطعیت است، وجود دارد. تابع پنجره با طول زمانی کم باعث افزایش قدرت تفکیک در حوزه زمان و کاهش قدرت تفکیک در حوزه بسامد می‌شود. طیف‌نگار تبدیل فوریه زمان کوتاه به صورت مربع اندازه تبدیل فوریه زمان کوتاه تعریف می‌شود و نشان‌دهنده چگالی طیف انرژی است که مطابق رابطه (۵) نوشته می‌شود (کیانگ و ون-کای، ۲۰۰۹)

$$SPEC_x(t, f) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} x(u)h^*(u-t)e^{-j2\pi fu} du \right|^2, \quad (5)$$

همان‌طور که بیان شد، یکی از روش‌های کاهش جمله‌های متقاطع در توزیع ویگنر - وایل استفاده از یک

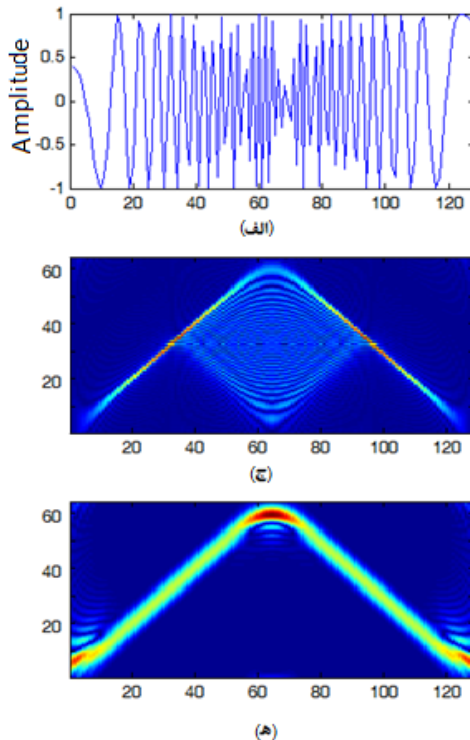
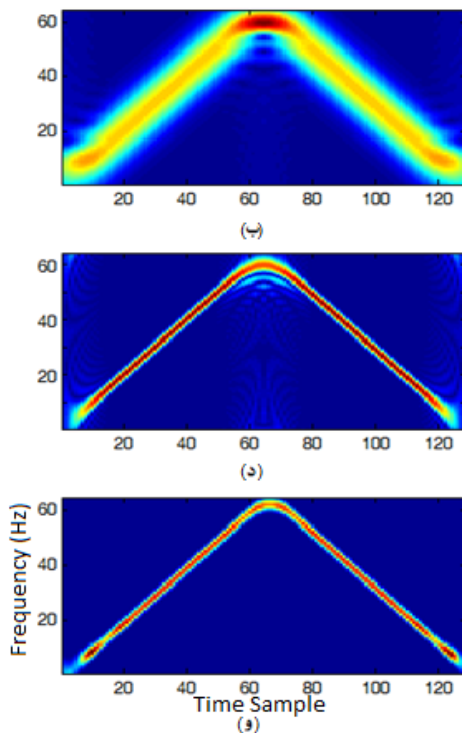
تابع هموارکننده دو بُعدی برای هموارسازی توزیع ویگنر - وایل است. می‌توان فیلتر پایین‌گذر را به صورت یک تابع گاوسی دو بُعدی جدایی‌پذیر مانند رابطه (۶) تعریف کرد

$$\varphi(u, \tau) = e^{-\alpha u^2 - \beta \tau^2}, \quad (6)$$

که $\alpha = \beta = 1$ است. در این صورت توزیع شبه‌ویگنر-وایل هموار شده سیگنال $x(t)$ همان طیف‌نگار تبدیل فوریه زمان کوتاه است. بنابراین می‌توان طیف‌نگار تبدیل فوریه زمان کوتاه را برای یک سیگنال مانند $x(t)$ ، به صورت یک همایخت دو بُعدی مطابق رابطه (۷) نوشت (کیانگ و ون-کای، ۲۰۰۹).

$$SPEC_x(t, f) = |STFT_x(t, f)|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} WVD_g(\tau, u) WVD_x(t - \tau, f - u) d\tau du, \quad (7)$$

که $WVD_g(t, f)$ توزیع ویگنر - وایل پنجره گاوسی،



شکل ۱. (الف) سیگنال و (ب) تبدیل فوریه زمان کوتاه، (ج) توزیع ویگنر- وایل، (د) توزیع شبه‌ویگنر- وایل، (ه) توزیع شبه‌ویگنر- وایل هموار شده و (و) تبدیل فوریه زمان کوتاه واهمامیختی مربوط به سیگنال.

شبه‌ویگنر-وایل و توزیع شبه‌ویگنر-وایل هموار شده برطرف شده اما در مقابل، قدرت تفکیک نیز کاهش یافته است. نکته قابل ذکر قدرت تفکیک بیشتر توزیع ویگنر-وایل از تبدیل فوریه زمان کوتاه است، این در حالی است که تبدیل فوریه زمان کوتاه واهمامیختی فاقد هرگونه جمله تداخلی است و قدرت تفکیک بالاتری را نسبت تبدیل‌های فوق به دست داده است.

۵ شناسایی کانال‌های مدفون

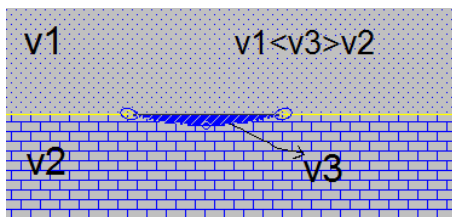
می‌توان کانال را مانند یک لایه نازک فرض کرد و در نتیجه پاسخ کانال را نسبت به امواج لرزه‌ای به صورت رابطه (۱۰) نوشت (هان و همکاران، ۲۰۱۱).

$$y(t) = r_1 f(t) + t_1 r_2 f(t + \tau), \quad (10)$$

که $f(t)$ موجک لرزه‌ای است که به کانال می‌رسد، r_1 ضریب بازتاب از سطح کانال، t_1 ضریب عبور از سطح کانال، r_2 ضریب بازتاب از کف کانال و τ ضخامت کانال است. طیف بازتابی از کانال به صورت رابطه (۱۱) است.

$$Y(j\omega) = (r_1 + t_1 r_2 e^{-j\omega\tau}) F(j\omega), \quad (11)$$

که $F(j\omega)$ تبدیل فوریه $f(t)$ است. در واقع لایه نازک یا همان کانال برای موج فرودی به کانال، نقش یک فیلتر را بازی می‌کند. اگر $r_1 = -r_2 = 1$ و ضریب عبور نزدیک به ۱ باشد به عبارت دیگر مطابق شکل ۲ سرعت در داخل کانال نسبت به لایه‌های بالایی و پایینی بیشتر باشد، آن‌گاه تابع تبدیل و طیف دامنه پاسخ ضربه واحد فیلتر پیش گفته را می‌توان به صورت رابطه (۱۲) نوشت (هان و همکاران، ۲۰۱۱):



شکل ۲. مدل زمین‌شناسی مربوط به حالت $r_1 = -r_2 = 1$.

$WVD_x(t, f)$ توزیع ویگنر-وایل سیگنال و $STFT_x(t, f)$ تبدیل فوریه زمان کوتاه سیگنال هستند. رابطه (۸) را می‌توان به صورت رابطه (۹) بازنویسی کرد.

$$SPEC_x = WVD_g ** WVD_x, \quad (8)$$

که $**$ نشان‌دهنده همایخت دو بُعدی است. طیف‌نگار تبدیل فوریه زمان کوتاه شامل جمله‌های متقاطع نیست ولی در مقابل قدرت تفکیک آن در راستای زمان و بسامد کم است. بنابراین با کاربست یک عملگر واهمامیخت دو بُعدی بر اساس رابطه (۸) روی طیف‌نگار تبدیل فوریه زمان کوتاه می‌توان توزیع ویگنر-وایل سیگنال را بدون جمله‌های متقاطع و با قدرت تفکیک زیاد به دست آورد. برای واهمامیخت دو بُعدی، الگوریتم تکراری لوسی - ریچاردسون (ریچاردسون، ۱۹۷۲؛ لوسی، ۱۹۷۴) مورد استفاده قرار می‌گیرد که به صورت رابطه (۹) نوشته می‌شود.

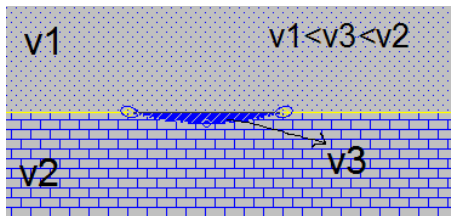
$$WVD_x^{k+1} = WVD_x^k \left(WVD_g ** \frac{SPEC_x}{WVD_g ** WVD_x^k} \right), \quad (9)$$

که $k+1$ شمارنده تکرار و $WVD_x^0 = SPEC_x$ است. طیف‌نگار به دست آمده بعد از تعداد معین تکرار، تبدیل فوریه زمان کوتاه واهمامیختی نامیده می‌شود (کیانگ و ون-کای، ۲۰۱۰).

در شکل ۱ سیگنالی مشکل از دو رویداد با بسامدهای متغیر نشان داده شده است که یک رویداد دارای روند افزایشی بسامد با زمان و دیگری دارای روند کاهشی بسامد با زمان است. تبدیل فوریه زمان کوتاه، توزیع ویگنر-وایل، توزیع شبه‌ویگنر-وایل، توزیع شبه‌ویگنر-وایل هموار شده و تبدیل فوریه زمان کوتاه واهمامیختی مربوط به آن نیز در شکل ۱ مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل پیدا است، وجود جمله تداخلی در توزیع ویگنر-وایل مانع از تفسیر مناسب از مقطع زمان-بسامد می‌شود، در حالی که این مشکل تا حدودی در توزیع

در این حالت چون دو موجکی که از لبه‌های کانال به گیرنده‌ها می‌رسند هم فاز هستند، تداخل سازنده رخ می‌دهد و در لبه‌های کانال بیشینه دامنه ایجاد می‌شود و با حرکت به سمت مرکز کانال اختلاف فاز بین دو موجک ایجاد شده و دامنه کاهش پیدا می‌کند. این کاهش با ضخامت کانال ارتباط مستقیم دارد و در حالت خاص چنانچه ضخامت کانال مضرب فردی از نصف طول موج باشد، اختلاف فاز به 180° درجه می‌رسد و در مرکز کانال حداقل دامنه به وجود می‌آید. با وجود این در این حالت نیز بسامد غالب با حرکت از لبه به سمت مرکز کانال کاهش می‌یابد.

در نتیجه می‌توان از نحوه تغییرات بسامد غالب لحظه‌ای برای شناسایی کانال‌های مدفون استفاده کرد و با توجه به تغییر رفتار دامنه بسامد غالب لحظه‌ای امواج لرزه‌ای در کانال درباره سرعت رسوبات پُرکننده کانال نسبت به لایه‌های بالایی و پایینی به اظهار نظر پرداخت.



شکل ۳. مدل زمین‌شناسی مربوط به حالت $r_1 = r_2 = 1$.

۶ کاربرد روی داده مصنوعی و واقعی لرزه‌ای

به منظور بررسی میزان کارایی روش معرفی شده در شناسایی کانال‌های مدفون، در یک مکعب مصنوعی از داده‌های لرزه‌ای سه‌بُعدی کانالی با شرایط $r_1 = r_2 = 1$ ایجاد شد. موجک استفاده شده در ساخت مکعب از نوع ریکر و بسامد غالب آن 40 Hz است. در شکل ۴ مکعب داده لرزه‌ای مصنوعی و بُرش افقی در نمونه ۵۳ نشان داده شده است. دو نشانگر بسامد لحظه‌ای

$$k(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{F(j\omega)} = (1 - e^{-j\omega\tau})$$

and

(۱۲)

$$|k(j\omega)| = [2 - 2\cos(\omega\tau)]^{1/2}$$

از رابطه (۱۲) می‌توان نشان داد که بیشینه دامنه در بسامدهای $\omega = 2\pi(n + 0.5)/\tau$ و اولین بیشینه در π/τ رخ می‌دهد. در نتیجه می‌توان از اولین بیشینه بسامد برای برآورد ضخامت لایه نازک استفاده کرد.

در این حالت چون دو موجکی که به گیرنده‌ها می‌رسند دارای اختلاف فاز 180° درجه هستند، در لبه‌های کانال تداخل ویرانگر رخ می‌دهد و حداقل دامنه را می‌توان انتظار داشت. با حرکت به سمت مرکز کانال به سبب دور شدن از حالت تداخل ویرانگر، دامنه افزایش می‌یابد که این افزایش دامنه با ضخامت کانال ارتباط مستقیم دارد. در حالت خاص چنانچه در مرکز کانال اختلاف فاز مضرب صحیحی از طول موج باشد (دو موجک هم‌فاز باشند) تداخل سازنده رخ می‌دهد و بیشینه دامنه را در مرکز کانال خواهیم داشت. با وجود این به سبب افزایش طول زمانی موجک در اثر تداخل، بسامد غالب با حرکت از لبه به سمت مرکز کانال کاهش می‌یابد.

حال اگر $r_1 = r_2 = 1$ و ضریب عبور نزدیک به ۱ باشد، به عبارت دیگر مطابق شکل ۳ سرعت در داخل کانال نسبت به لایه بالایی بیشتر و نسبت به لایه پایینی کمتر باشد، آن‌گاه تابع تبدیل و طیف دامنه پاسخ ضربه واحد عملکرد فیلترگونه کانال را می‌توان به صورت رابطه (۱۳) نوشت:

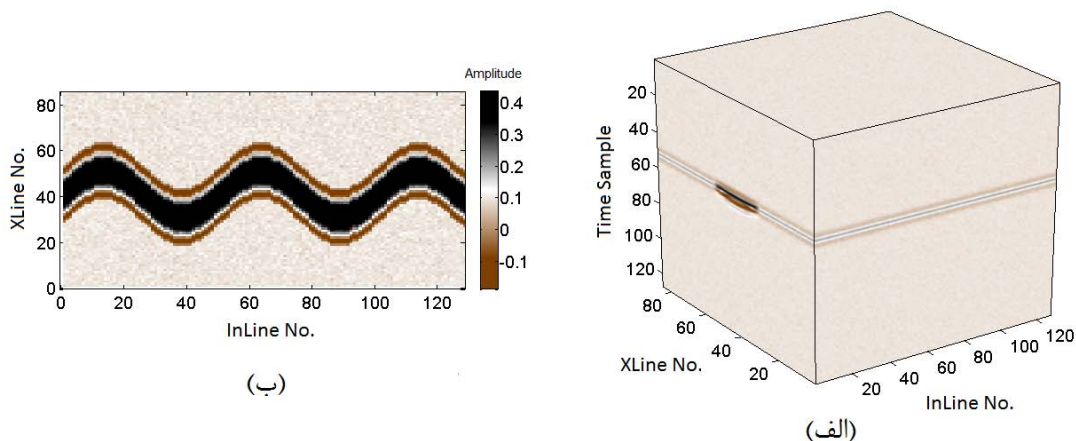
$$k(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{F(j\omega)} = (1 + e^{-j\omega\tau})$$

and

(۱۳)

$$|k(j\omega)| = [2 + 2\cos(\omega\tau)]^{1/2}$$

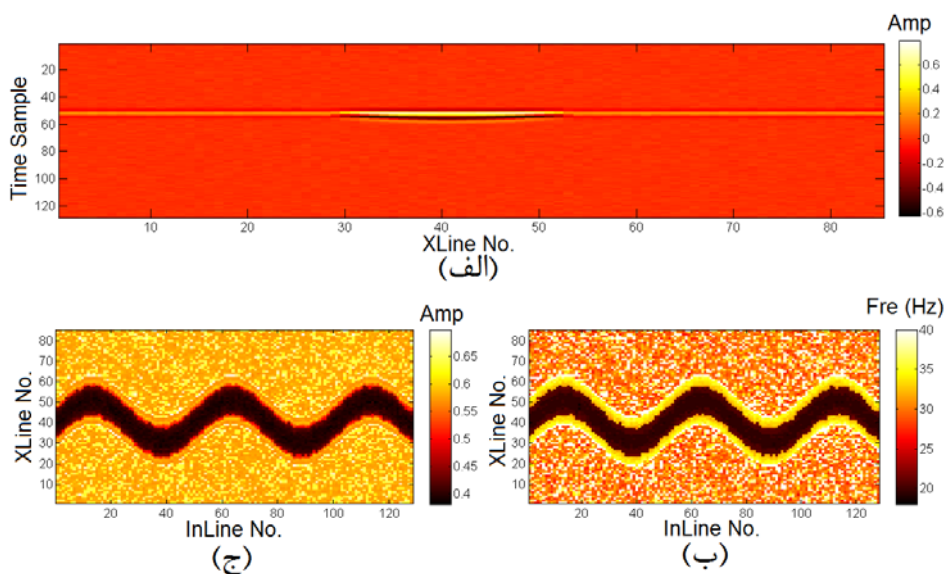
با استفاده از رابطه (۱۳) می‌توان نشان داد که کمینه‌های دامنه در بسامدهای $\omega = (2n + 1)\pi/\tau$ و اولین کمینه در π/τ رخ می‌دهد. در این حالت نیز می‌توان از اولین کمینه برای برآورد ضخامت لایه نازک بهره برد.



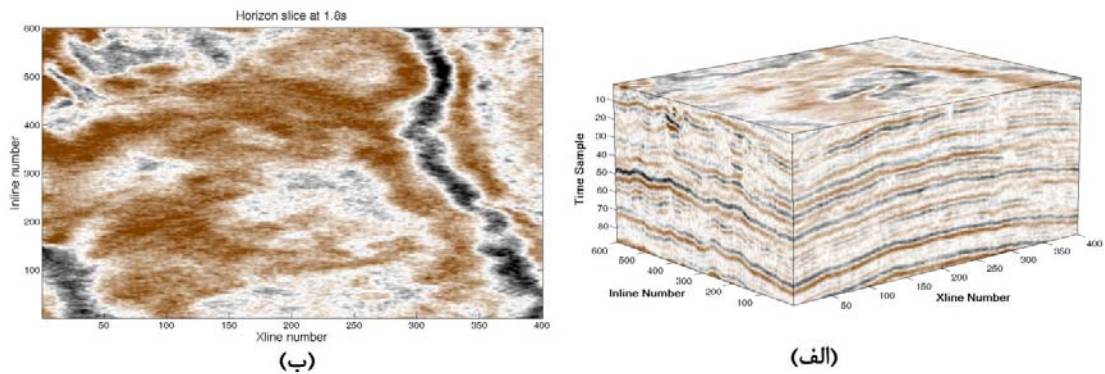
شکل ۴. (الف) مکعب داده لرزه‌ای مصنوعی با فاصله نمونه‌برداری ۲ میلی‌ثانیه و (ب) برش افقی در نمونه ۵۳.

ایران به کار برده شد. این داده دارای ۴۰۰ خط چشمه و ۶۰۰ خط گیرنده است. کانال در حدود زمان دو طرفه ۱/۸ ثانیه قرار دارد. در شکل ۶ مکعب داده لرزه‌ای و برش زمانی ۱/۸ ثانیه آن نشان داده شده است. نشانگرهای بسامد لحظه‌ای بیشینه و دامنه متناظر با آن برای داده پیش گفته، حاصل از تبدیل فوریه زمان کوتاه واهمامیختی و تبدیل فوریه زمان کوتاه محاسبه و در شکل ۷ نشان داده شده است.

بیشینه و دامنه متناظر آن برای این داده‌ها استخراج شد. در شکل ۵ برش قائم در خط گیرنده یک و دو نشانگر پیش گفته نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، بسامد لحظه‌ای بیشینه و دامنه متناظر با آن به هنگام حرکت از لبه به سمت مرکز کانال به سبب تداخل امواج در کانال کاهش می‌یابد. به منظور بررسی میزان کارایی روش معرفی شده در شناسایی کانال‌های مدفون، الگوریتم پیش گفته روی یک مکعب داده لرزه‌ای واقعی مربوط به یکی از میداین نفتی



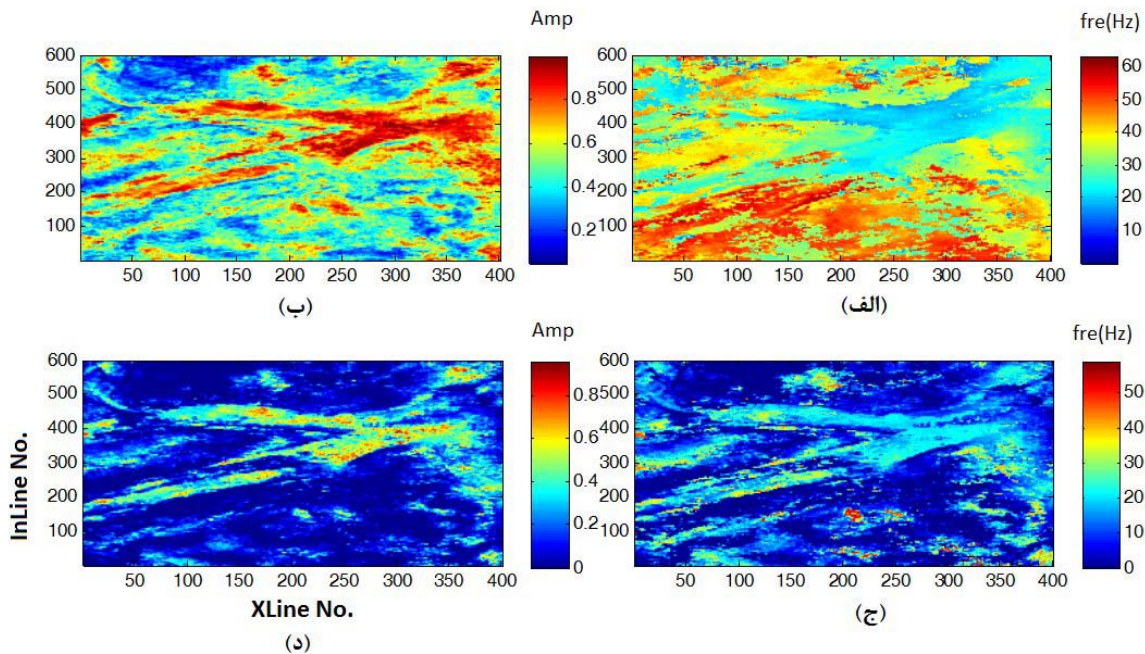
شکل ۵. (الف) مقطع دوبعدی از کانال در خط گیرنده یک، (ب) بسامد لحظه‌ای بیشینه و (ج) دامنه بسامد لحظه‌ای بیشینه.



شکل ۶. (الف) مکعب داده لرزه‌ای مربوط به یکی از میداین نفتی ایران و (ب) بُرش زمانی ۱/۸ ثانیه از آن.

کف کانال علامت‌های مخالف هم دارند و در نتیجه تداخل در لبه‌های کانال ویرانگر است و با حرکت به داخل کانال از حالت تداخل ویرانگر خارج، و منجر به افزایش دامنه می‌شود. در نتیجه می‌توان در مورد رسوباتی که کانال را پُر کرده‌اند به این نتیجه رسید که نسبت به لایه بالایی و پایینی، سرعت کمتری دارند.

همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود کانال دارای دو شاخه اصلی است. محدوده کانال‌ها در نتایج حاصل از تبدیل فوری زمان کوتاه واهمامیختی با قدرت تفکیک بیشتری نسبت به نتایج حاصل از تبدیل فوری زمان کوتاه مشخص شده است. در داخل کانال به علت تداخل امواج لرزه‌ای بسامد غالب کاهش و دامنه متناظر با آن افزایش پیدا کرده است و این یعنی امپدانس صوتی در سطح و



شکل ۷. (الف) بسامد لحظه‌ای بیشینه به دست آمده از تبدیل فوری زمان کوتاه، (ب) دامنه بسامد لحظه‌ای بیشینه به دست آمده از تبدیل فوری زمان کوتاه، (ج) بسامد لحظه‌ای بیشینه به دست آمده از تبدیل فوری زمان کوتاه واهمامیختی و (د) دامنه بسامد لحظه‌ای بیشینه به دست آمده از تبدیل فوری زمان کوتاه واهمامیختی.

- Castagna, J. P., Sun, S., and Siegfried, R. W., 2003, Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons: *The Leading Edge*, **22**, 120-127.
- Cohen, L., 1995, *Time-frequency analysis: Hunter college and Graduate Center of The City University of New York*.
- Gabor, D., 1946, Theory of communication: *Journal of the Institution of Electrical Engineering*, **93**, 429-457.
- Leite, F. E. A., Montagne, R., Corso, G., Vasconcelos, G. L., and Lucena, L. S., 2008, Optimal wavelet filter for suppression of coherent noise with an application to seismic data: *Physica A*, **387**, 1439-1445.
- Lucy, L. B., 1974, An iterative technique for the rectification of observed distributions: *Astron. J.*, **79**, 745-754.
- Mallat, S., 2009, *A wavelet tour of signal processing*, 3th edition, Elsevier.
- Matos, M. C., Osorio, P., Mundim, E. C., and Moraces, M., 2005, Characterization of thin beds through joint time-frequency analysis applied to a turbidite reservoir in Campos Basin, Brazil: 75th SEG meeting, Houston, Expanded Abstracts, 1429-1432.
- Qiang, Z., and Wen-kai, L., 2010, Spectral decomposition using deconvolutive short time Fourier transform spectrogram: 80th SEG meeting, Denver, Expanded Abstracts, 1581-1585.
- Ralston, M., Li-Chun, K., Hui-Ping, X., and Di-Sheng, Y., 2007, General method to reduce cross-term interference in the Wigner-Ville decomposition: 77th SEG meeting, San Antonio, Expanded Abstracts, 870-874.
- Richardson, W. H., 1972, Bayesian-based iterative method of image restoration: *J. Opt. Soci. America*, **62**, 55-59.
- Sinha, S., Routh, P. S., Anno, P. D., and Castagna, J. P., 2005, Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform: *Geophysics*, **70**, P19-P25.
- Ville, J., 1948, Theorie et applications de la notion de signal analytique: *Cables et Transm.*, **2A**(1), 61-74.
- Wen-kai, L. and Qiang, Z., 2009, Deconvolutive short-time Fourier transform spectrogram, *IEEE SIGNAL PROCESSING LETTERS*, **16**, 576-579.
- Wigner, E. P., 1932, On the quantum correlation for thermodynamic equilibrium: *Phys. Rev.*, **40**, 749-759.
- Williams, W. J., 1996, Reduced interference

۷ نتیجه گیری

در این مقاله تبدیل فوریه زمان کوتاه واهمامیختی معرفی شد که در مقایسه با تبدیل‌های زمان-بسامد مرسوم از قدرت تفکیک بیشتری برخوردار بود و توانست نقاط ضعف تبدیل فوریه زمان کوتاه و خانواده ویگنر-وایل را مرتفع کند. از دو نشانگر بسامد لحظه‌ای بیشینه و دامنه متناظر با آن که در حوزه زمان - بسامد با استفاده از نتایج تبدیل فوریه زمان کوتاه واهمامیختی استخراج شد، برای شناسایی کانال‌های مدفون استفاده شد که نشان‌دهنده کارایی این نشانگرها و تبدیل فوق، در شناسایی این کانال‌ها بود. همچنین روشن شد که می‌توان با توجه به رفتار دامنه امواج لرزه‌ای در داخل کانال و محتوای بسامدی داده‌ها نسبت به رسوباتی که کانال را پُر کرده‌اند، اظهار نظر کرد و الگویی برای تغییر سرعت امواج لرزه‌ای در محدوده کانال با استفاده از بسامد غالب و دامنه آن به‌دست داد.

منابع

- روشندل کاهو، ا.، ۱۳۸۸، بهبود تبدیل‌های زمان-بسامد در مطالعه داده‌های لرزه‌ای، رساله دکتری، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- روشندل کاهو، ا.، و سیاه‌کوهی، ح. ر.، ۱۳۸۸، تعیین فاکتور کیفیت با استفاده از تبدیل‌های زمان-مقیاس و زمان-بسامد، *مجله ژئوفیزیک ایران*، **۳**، ۱۹-۲۳.
- روشندل کاهو، ا.، و سیاه‌کوهی، ح. ر.، ۱۳۸۹، شناسایی مستقیم منابع هیدروکربنی به‌روش تعیین فاکتور کیفیت با استفاده از محاسبه چگالی انرژی در حوزه زمان-مقیاس، *مجله فیزیک زمین و فضا*، **۳۶**، ۷۵-۸۷.
- Askari, R., and Siahkoochi, H. R., 2008, Ground roll attenuation using the S and x-f-k transforms: *Geophysical Prospecting*, **56**, 105-114.
- Auger, F., Flandrin, P., Gonçalvès, P., and Lemoine, O., 1996, *Time-frequency toolbox*, CNRS (France), Rice University (USA).

- smoothed pseudo Wigner–Ville distribution: *Journal of Applied Geophysics*, **68**, 386–393.
- Yandong, L., Jinsong, L., and Xiaodong, Z., 2010, Channel system characterization using Wigner-Ville distribution-based spectral decomposition: 80th SEG meeting, Denver, Expanded Abstracts, 1418–1422.
- distributions: biological applications and interpretations: *Proceedings of the IEEE*, **84**, 1264–1280.
- Xiaoyang, W., and Tianyou, L., 2009, Spectral decomposition of seismic data with reassigned