

تجزیه طیفی با قدرت تفکیک زیاد و کاربرد آن در آشکارسازی سایه‌های بسامد کم ناشی از مخازن گازی

امین روشندل کاهو^۱ و علی نجاتی کلاته^{۱*}

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۰/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۹/۳۰)

چکیده

به دلیل خاصیت نایب بودن داده‌های لرزه‌ای در اثر عبور از داخل زمین، از تبدیل‌های زمان - بسامد به‌طور گسترده‌ای در پردازش و تفسیر این داده‌ها استفاده می‌شود. روش‌های متفاوتی برای نمایش زمان - بسامد سیگنال‌ها معرفی شده است. هر یک از این روش‌ها دارای نقاط ضعف و قوت مخصوصی هستند. بنابراین استفاده از ابزارهایی که بتواند علاوه بر حفظ نقاط قوت این روش‌ها، نقاط ضعف آنها را برطرف کند، بسیار سودمند است.

در این مقاله از یک عملگر واهمامیخت دوبعدی مبتنی بر توزیع ویگنر - وایل برای واهمامیخت طیف‌نگاره تبدیل فوریه زمان کوتاه استفاده شده است و نمایش زمان - بسامد با قدرت تفکیک زیاد و بدون جملات متقاطع به دست آمده است. کارایی این روش تجزیه طیفی روی داده‌های مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج سایر روش‌های متداول مقایسه شد. همچنین از این روش برای آشکارسازی سایه‌های بسامد کم مربوط به مخازن گازی، در یکی از میادین گازی جنوب غربی ایران در مقایسه با تبدیل فوریه زمان کوتاه استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پیش‌گفته دارای قدرت تفکیک زیاد است.

واژه‌های کلیدی: تجزیه طیفی، واهمامیخت، توزیع ویگنر - وایل، تبدیل فوریه زمان کوتاه، سایه بسامد پایین

High resolution spectral decomposition and its application in the illumination of low-frequency shadows of a gas reservoir

Amin Roshandel Kahoo¹ and Ali Nejati Kalateh^{1*}

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

(Received: 12 January 2011, accepted: 21 December 2011)

Abstract

Because of the non-stationary property of seismic signals, time-frequency transforms have widely used in seismic data processing and interpretations. Spectral decomposition can reveal the characteristics that are not easily observed in the time representation or the frequency representation alone. Conventional spectral decompositions such as short-time Fourier transform (STFT) and Wigner-Ville distribution (WVD) have some restrictions,

*Corresponding author:

nejati@shahroodut.ac.ir

*نگارنده رابط:

such as Heisenberg uncertainty principle and cross terms. In this paper, we used the deconvolution of a short-time Fourier transform spectrogram to overcome the mentioned restrictions.

The resolution of a time–frequency representation using STFT is strongly dependent on the length of the window function. A short window length will result in a good time resolution but a poor frequency resolution; a long window length will result in a poor time resolution but a good frequency resolution.

No window function is used to calculate the WVD of signals. Therefore, WVD has a high resolution in time and frequency simultaneously. However, the existence of the cross–terms has limited the application of this distribution (Boashash, 2003). Auger et al. (1996) introduced the smoothed pseudo WVD (SPWVD) to eliminate these cross-terms. Smoothing the WVD leads to a tradeoff between the time–frequency resolution and cross-term elimination.

When the smoothing function is the WVD of the window function used in STFT, the SPWVD will become the STFT spectrogram (Qiang and Wen-kai, 2010). There are no cross-terms in the STFT spectrogram, and yet it has a low resolution both in time and frequency. Therefore, a 2D deconvolution operator can be used to generate a high time–frequency representation of the signal with no cross-terms. To perform the 2D deconvolution, we used the iterative Lucy–Richardson algorithm. The resulted spectrogram after 2D deconvolution is nominated as deconvolutive STFT or DSTFT.

The efficiency of this method is evaluated by applying on both synthetic and real seismic data. The results of synthetic example show that the deconvolutive short-time Fourier transform spectrogram (DSTFT) has the fine resolution as the Wigner–Ville distribution (WVD) has but with no cross-terms.

Castagna et al. (2003) used the spectral decomposition to detect the low-frequency shadows associated with hydrocarbons. In fact, these shadows are often related to an additional energy occurring at low frequencies, rather than the preferential attenuation of higher frequencies. One possible explanation is that these are locally converted shear waves that have traveled mostly as P-waves and thus arrive slightly after the true primary event.

We used a deconvolutive short-time Fourier transform spectrogram to illuminate the low-frequency shadow corresponding to a gas reservoir at one of the gas fields in the South West of Iran. The results of the real data example show that the DSTFT analysis has a much better resolution than the conventional spectral decomposition and can potentially be used to detect hydrocarbons from a gas reservoir directly using low-frequency shadows.

Keywords: Spectral decomposition, deconvolution, Wigner–Ville distribution, short-time Fourier transform, low-frequency shadow

۱ مقدمه

لرزه‌ای با زمان می‌شود. در بسیاری از کاربردهای پردازشی و تفسیری مانند واهمامیخت، تضعیف نوفه‌های لرزه‌ای، شناسایی مستقیم نواحی حاوی هیدروکربن، برآورد کیفی و کمی فاکتور کیفیت و تعیین انواع نشانگرهای لرزه‌ای، نمایش هم‌زمان اطلاعات زمانی و

امروزه تحلیل سری‌های زمانی دارای کاربرد فراوانی در پردازش و تفسیر داده‌های لرزه‌ای است. با توجه به اینکه زمین به هنگام انتشار امواج لرزه‌ای رفتاری چون فیلتر پایین‌گذر دارد، موجب تغییر محتوای بسامدی امواج

۲ طیف‌نگاره تبدیل فوریه زمان کوتاه

گابور (۱۹۴۶) با معرفی تبدیل فوریه پنجره‌ای، اولین قدم در راه استفاده از روش‌های زمان - بسامد را پیمود. وی از این ابزار قدرتمند به منظور اندازه‌گیری تغییرات بسامدی صداها استفاده کرد. در روش تبدیل فوریه پنجره‌ای که تبدیل فوریه زمان کوتاه نیز نامیده می‌شود، از یک پنجره حقیقی و متقارن $g(t) = g(-t)$ استفاده می‌شود. تبدیل فوریه زمان کوتاه برای $x(t)$ را می‌توان به صورت رابطه (۱) نشان داد:

$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u) g^*(\tau - t) e^{-i2\pi f \tau} du. \quad (1)$$

طیف‌نگاره تبدیل فوریه زمان کوتاه از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$SPEC(t, f) = |STFT(t, f)|^2. \quad (2)$$

پنجره‌ای کردن سیگنال در این تبدیل، براساس اصل عدم قطعیت هایزنبرگ موجب اعمال محدودیت در قدرت تفکیک صفحه زمان - بسامد می‌شود. کوچک بودن این پنجره سبب افزایش قدرت تفکیک در راستای زمان و کاهش قدرت تفکیک در راستای بسامد می‌شود و برعکس. از طرفی ابعاد جعبه هایزنبرگ در این تبدیل ثابت است (روشندل، ۱۳۸۸).

۳ توزیع ویگنر - وایل

یکی از توزیع‌های زمان - بسامد مهم، توزیع ویگنر - وایل است. یکی از مزایای توزیع ویگنر - وایل نسبت به سایر تبدیل‌های زمان - بسامد به دست آوردن توزیع چگالی انرژی در صفحه زمان - بسامد همراه با قدرت تفکیک بالا در راستای زمان و بسامد است. این توزیع برای سیگنال $x(t)$ به صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$WVD(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) e^{-i2\pi f \tau} d\tau. \quad (3)$$

بسامدی داده‌های لرزه‌ای ضرورت پیدا می‌کند. شیوه‌های مرسوم نمایش سیگنال‌ها در حوزه زمان و حوزه فوریه، علی‌رغم کاربردهای گسترده‌ای که دارند، نمی‌توانند به‌طور هم‌زمان اطلاعات زمانی و بسامدی را به صورت متمرکز نمایش دهند.

با معرفی تبدیل‌های زمان - بسامد و نمایش سیگنال‌ها در حوزه‌ای که هم‌زمان اطلاعات زمانی و بسامدی به صورت متمرکز در اختیار است، پردازش سیگنال‌ها وارد مرحله جدیدی شد که کارایی آن را به مراتب افزایش داد. تبدیل‌هایی نظیر تبدیل فوریه زمان کوتاه (گابور، ۱۹۴۶)، توزیع ویگنر - وایل (ویگنر، ۱۹۳۲؛ وایل، ۱۹۴۸)، تبدیل موجک (مالات، ۱۹۹۹) و تبدیل S (استاک‌ول و همکاران، ۱۹۹۶) در چند دهه اخیر در زمینه‌های گوناگونی از علوم به خصوص لرزه‌شناسی، که با سیگنال‌ها و پردازش آنها سروکار داشته‌اند، به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند (ماتوس و همکاران، ۲۰۰۵؛ کستگنا و همکاران، ۲۰۰۳؛ سینها و همکاران، ۲۰۰۵؛ لیته و همکاران، ۲۰۰۸؛ عسکری و سیاه‌کوهی، ۲۰۰۸؛ فدی و کوارتا، ۱۹۹۸؛ مارتلت و همکاران، ۲۰۰۱؛ دی اولیویرا لیریو و همکاران، ۲۰۰۴؛ کوپر، ۲۰۰۶، روشندل کاهو و سیاه‌کوهی، ۲۰۰۹a؛ روشندل کاهو و سیاه‌کوهی، ۲۰۰۹b؛ سلاجقه و همکاران، ۲۰۱۰). هرکدام از تبدیل‌های زمان - بسامد مرسوم به دلایل گوناگون (مانند اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، وجود جملات اضافی به دلیل اصل برهم‌نهی درجه دو و مانند آن) دارای محدودیت‌ها و معایبی هستند که در بعضی موارد بر کارایی آنها اثر سوئی گذاشته است. از طرفی دیگر این تبدیل‌ها دارای نکات مثبتی نیز هستند که نمی‌توان از آنها صرف‌نظر کرد. لذا یافتن راه‌هایی که بتواند ضمن تضعیف نقاط ضعف تبدیل‌های زمان - بسامد مرسوم، نقاط قوت آنها را حفظ کند، انگیزه ما در این تحقیق بود که این امر در توسعه کاربرد آنها نیز بسیار مفید خواهد بود.

$$SPEC_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} WVD_g(\tau, u) WVD_x(t - \tau, f - u) d\tau du, \quad (6)$$

که $WVD_g(t, f)$ توزیع ویگنر - وایل پنجره، $WVD_x(t, f)$ توزیع ویگنر - وایل سیگنال هستند. رابطه (۶) در واقع تعریف هم‌میخت دو بُعدی است. به عبارت دیگر

$$SPEC_x = WVD_h ** WVD_x, \quad (7)$$

که $**$ نشان‌دهنده هم‌میخت دو بُعدی است (کیانگ و ون-کای، ۲۰۱۰).

طیف‌نگاره تبدیل فوریه زمان کوتاه شامل جملات متقاطع نیست ولی در مقابل قدرت تفکیک آن در راستای زمان و بسامد کم است. بنابراین با طراحی یک عملگر واهم‌میخت دو بُعدی براساس رابطه (۷) می‌توان توزیع ویگنر-وایل سیگنال را بدون جملات متقاطع و با قدرت تفکیک زیاد به دست آورد. برای به‌انجام رساندن واهم‌میخت الگوریتم تکراری لوسی - ریچاردسون به کار می‌رود که به صورت رابطه (۸) نوشته می‌شود.

$$WVD_x^{k+1} = WVD_x^k \left(WVD_g ** \frac{SPEC_x}{WVD_g ** WVD_x^k} \right), \quad (8)$$

$k+1$ شمارنده تکرار است. بعد از واهم‌میخت طیف نگاره به دست آمده، واهم‌میخت طیف‌نگاره تبدیل فوریه زمان کوتاه (DSTFT) نامیده می‌شود. نتیجه حاصل علاوه بر داشتن قدرت تفکیک مناسب، دیگر دارای جملات متقاطع نیست.

۵ مقایسه واهم‌میخت طیف‌نگاره تبدیل فوریه

زمان کوتاه روی سیگنال مصنوعی

به منظور بررسی کارایی روش، روش پیش گفته روی سیگنال مصنوعی اعمال شد و با روش‌های متداول مقایسه شد. برای ساخت سیگنال مصنوعی از موجک مورلت

وجود جملات متقاطع یکی از عواملی است که سبب شده تا کاربرد توزیع ویگنر - وایل تا حدودی تحت تاثیر قرار گیرد و کمتر از آن استفاده شود. اگر $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$ باشد، آن‌گاه توزیع ویگنر - وایل سیگنال $x(t)$ را می‌توان به صورت رابطه (۴) نوشت.

$$WVD_x(t, f) = \underbrace{WVD_{x_1}(t, f) + WVD_{x_2}(t, f)}_{\text{auto-terms}} + \underbrace{WVD_{x_1, x_2}(t, f) + WVD_{x_2, x_1}(t, f)}_{\text{cross-terms}}, \quad (4)$$

که دو جمله آخر، توزیع متقاطع ویگنر-وایل دو سیگنال هستند و جملات متقاطع نامیده می‌شوند. منشا این جملات متقاطع را می‌توان اصل برهم‌نهی درجه دو دانست و این جملات دارای خاصیت نوسانی هستند (بوآشاش، ۲۰۰۳). یکی از روش‌های تضعیف جملات متقاطع، استفاده از هموارسازی است. توزیع شبه‌ویگنر - وایل هموار شده (آوگر و همکاران، ۱۹۹۶) در هر دو راستای محور بسامد و زمان هموارشدگی را عملی می‌سازد تا جملات متقاطع حذف شوند.

$$SPWVD_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(\tau, u) WVD_x(t - \tau, f - u) d\tau du, \quad (5)$$

که $\phi(\tau, u)$ تابع هموارسازی در دو راستای زمان و بسامد است. اگرچه این هموارشدگی باعث می‌شود که جملات متقاطع تضعیف شوند، اما در مقابل تمرکزهای اصلی انرژی نسبت به توزیع ویگنر - وایل گسترش می‌یابد و قدرت تفکیک کاهش می‌یابد.

۴ واهم‌میخت طیف‌نگاره تبدیل فوریه زمان کوتاه

در رابطه (۵) اگر تابع هموارسازی، توزیع ویگنر - وایل پنجره مورد استفاده در تبدیل فوریه زمان کوتاه در نظر گرفته شود، توزیع شبه‌ویگنر - وایل هموار شده به طیف‌نگاره تبدیل فوریه زمان کوتاه تبدیل می‌شود.

واهمامیخت طیف‌نگاره تبدیل فوریه زمان کوتاه روی داده لرزه‌ای مورد نظر اعمال شد. با توجه به محدوده بسامدی داده‌ها (بین ۱۵ تا ۷۵ هرتز) دو بسامد ۲۰ و ۵۵ هرتز برای تهیه مقاطع تک بسامد انتخاب شد. سپس مقاطع تک بسامد در آن بسامدها از نتایج تجزیه طیفی به دست آمده استخراج شد که در شکل ۵ نشان داده شده است. حضور ناهنجاری‌های بسامد کم (۲۰ هرتز) با دامنه زیاد و تضعیف آن در بسامد زیاد (۵۵ هرتز) که به پدیده سایه بسامد کم شناخته می‌شود، بیانگر حضور گاز است. محل پدیده سایه بسامد کم با مستطیل در شکل ۵ نشان داده شده است. از طرفی به وضوح قدرت تفکیک زیاد روش تجزیه طیفی واهمامیخت طیف‌نگاره تبدیل فوریه زمان کوتاه کاملاً در شکل ۵ مشهود است.

۷ نتیجه‌گیری

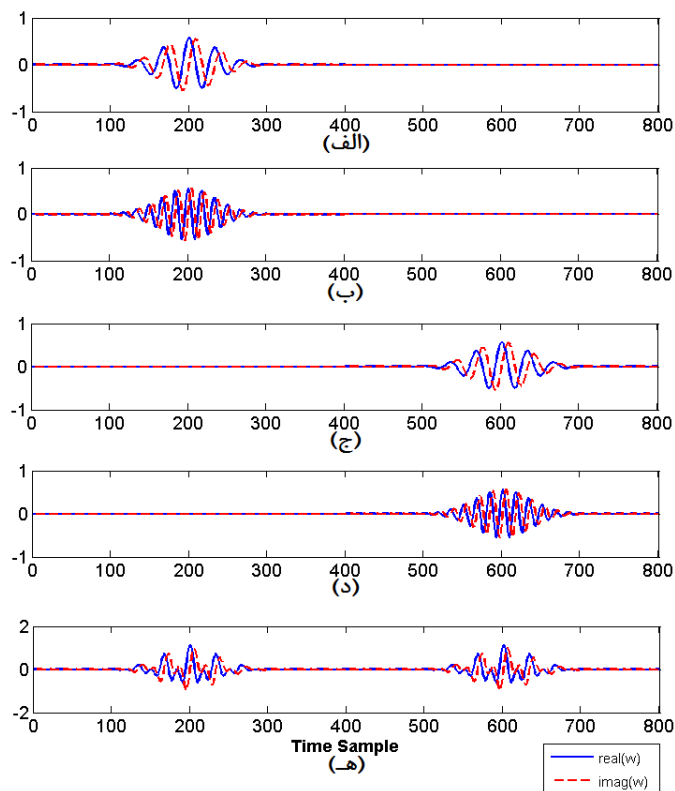
در این مقاله روش تجزیه طیفی بر مبنای واهمامیخت طیف‌نگاره تبدیل فوریه زمان کوتاه معرفی شده است. در این روش تجزیه طیفی علاوه بر قدرت تفکیک زیاد در راستای زمان و بسامد، دیگر اثری از جملات متقاطع که در توزیع ویگنر - وایل وجود دارند، دیده نمی‌شود. نتایج حاصل از اعمال این روش تجزیه طیفی و مقایسه آن با روش‌های متداول، خواص و فواید این روش جدید تجزیه طیفی را نسبت به سایر روش‌های تجزیه طیفی مانند تبدیل فوریه زمان کوتاه، توزیع ویگنر - وایل معمولی و نرم شده توزیع شبه‌ویگنر - وایل را نشان داده است. در این مقاله از این روش در شناسایی مستقیم هیدروکربور با استفاده از نشانگر سایه بسامدهای کم استفاده شده و نتایج آن با روش تبدیل فوریه زمان کوتاه مقایسه شده است. نشانگر استخراج شده از تجزیه طیفی با استفاده از روش واهمامیخت طیف‌نگاره تبدیل فوریه زمان کوتاه، دقت و قدرت تفکیک بیشتری نسبت به روش تجزیه طیفی تبدیل فوریه زمان کوتاه دارد.

مختلط استفاده شد. سیگنال مختلط حاصل از مجموع دو موجک مورلت مختلط با بسامدهای مرکزی متفاوت (۱۵ و ۳۰ هرتز) که هر کدام در دو زمان تکرار شده‌اند، تشکیل شده است که در شکل ۱ نشان داده شده است.

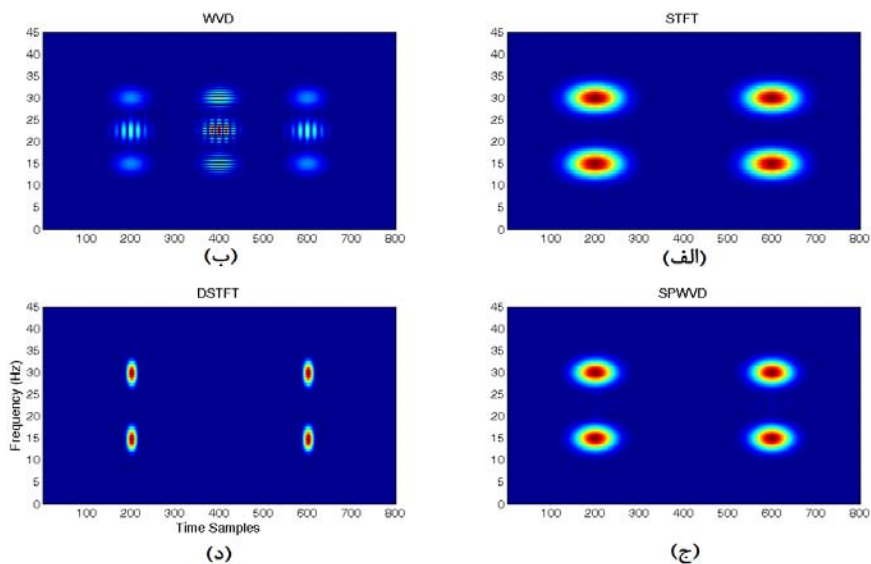
در شکل ۲ به ترتیب نمایش زمان - بسامد سیگنال با استفاده از روش‌های تبدیل فوریه زمان کوتاه، توزیع ویگنر - وایل، توزیع شبه‌ویگنر - وایل هموار شده و واهمامیخت طیف‌نگاره تبدیل فوریه زمان کوتاه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تبدیل فوریه زمان کوتاه قدرت تفکیک در دو راستای زمان و بسامد بسیار کم است. در توزیع ویگنر - وایل، قدرت تفکیک افزایش یافته است ولی در مقابل جملات متقاطع وجود دارند. در توزیع شبه‌ویگنر - وایل هموار شده، جملات متقاطع تضعیف شده‌اند ولی در اثر هموارسازی قدرت تفکیک آفت پیدا کرده است. باین حال در نمایش زمان - بسامد به روش واهمامیخت طیف‌نگاره تبدیل فوریه زمان کوتاه علاوه بر افزایش قدرت تفکیک، دیگر نشانی از جملات متقاطع نیست.

۶ کاربرد واهمامیخت طیف‌نگاره تبدیل فوریه

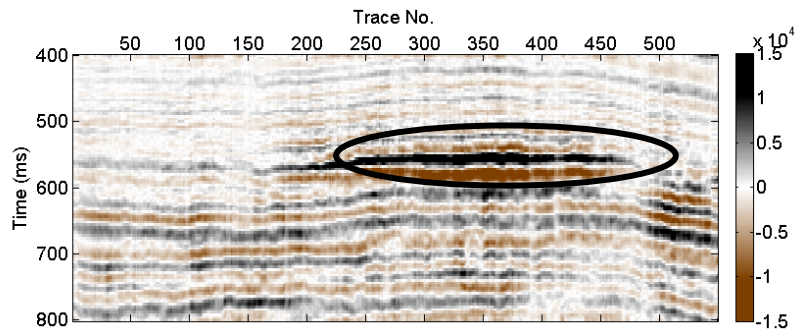
زمان کوتاه برای شناسایی مستقیم هیدروکربور به منظور بررسی کاربرد روش روی داده‌های واقعی، قسمتی از داده‌های لرزه‌ای مربوط به یک خط چشمه از برداشت لرزه‌ای سه‌بعدی در یکی از میدین گازی جنوب غربی ایران با فاصله نمونه‌برداری زمانی ۴ میلی‌ثانیه مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. لایه گازدار در این منطقه در افق ماسه‌سنگی غار قرار دارد که یکی از مولفه‌های سازند آسماری است و وجود چاه‌های تولیدی در این منطقه، حضور گاز در ناحیه مشخص شده با بیضی را تایید می‌کند (غلامی، ۱۳۸۹). در شکل ۴ طیف دامنه میانگین داده‌ها نشان داده شده است. تجزیه طیفی با دو روش تبدیل فوریه زمان کوتاه و



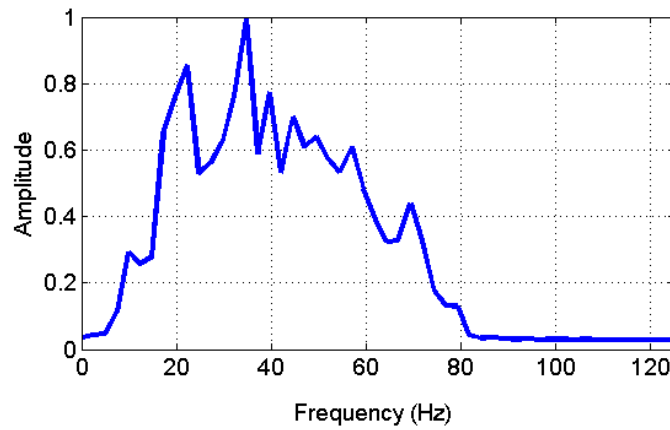
شکل ۱. (الف) تا (د) دو موجک مورلت مختلط با بسامدهای ۱۵ و ۳۰ هرتز که در دو زمان تکرار شده‌اند و (ه) مجموع چهار موجک پیش‌گفته. در این شکل قسمت حقیقی موجک با خط توپُر و قسمت موهومی با خط چین نشان داده شده است.



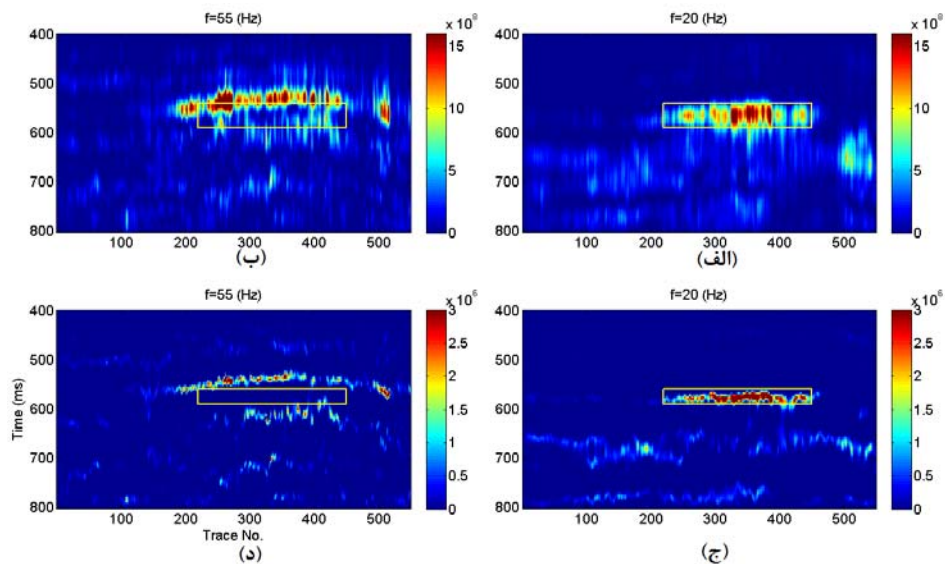
شکل ۲. نمایش زمان - بسامد سیگنال شکل ۱- (د) با استفاده از روش‌های (الف) تبدیل فوریه زمان کوتاه، (ب) توزیع ویگنر - وایل، (ج) توزیع شبه‌ویگنر - وایل هموار شده و (د) واهمامیخت طیف‌نگاره تبدیل فوریه زمان کوتاه.



شکل ۳. قسمتی از داده‌های لرزه‌ای مربوط به یک خط‌چشمه در یکی از میدان‌های گازی جنوب غربی ایران. بیضی محل حضور گاز حاصل از داده‌های چاه را نشان می‌دهد.



شکل ۴. طیف دامنه میانگین داده‌های لرزه‌ای در شکل ۳.



شکل ۵. مقاطع تک‌بسامد از مقطع شکل ۳. مقاطع تک‌بسامد (الف) ۲۰ هرتز و (ب) ۵۵ هرتز با استفاده از تبدیل فوریه زمان‌کوتاه و (ج) ۲۰ هرتز و (د) ۵۵ هرتز با استفاده از واهمامیخت طیف‌نگاره تبدیل فوریه زمان‌کوتاه. مستطیل در هر روش محل پدیده سایه بسامد کم را نشان می‌دهد.

- data: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **387**, 1439-1445.
- Mallat, S., 1999, *A wavelet tour of signal processing*, 2nd edition, Elsevier, USA.
- Martelet, G., SAILHAC, P., MOREAU, F., DIAMENT, M., 2001, Characterization of geological boundaries using 1-D wavelet transform on gravity data: theory and applications to the Himalayas: *Geophysics*, **66**, 1116-1129.
- Matos, M. C., P. Osorio, E. C. Mundim, 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.
- Roshandel Kahoo, A., and Siahkoohi, H. R., 2009(a), Random noise suppression from seismic data using time-frequency peak filtering: 71st EAGE meeting, Amsterdam, Extended Abstracts.
- Roshandel Kahoo, A., and Siahkoohi, H. R., 2009(b), Gas detection from AVO analysis in time-frequency domain: 71st EAGE meeting, Amsterdam, Extended Abstracts.
- Salajegheh, F., Roshandel Kahoo, A., and Siahkoohi, H. R., 2010, Interpretation of 2-D gravity data using 2-D Continuous wavelet transform: 72st EAGE meeting, Barcelona, Extended Abstracts.
- 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.
- Stockwell, R. G., Mansinha, L., and Lowe, R. P., 1996, Localization of the complex spectrum: The S transform: *IEEE Trans. Signal Processing*, **44**, 998-1001.
- Ville, J., 1948, Theorie et applications de la notion de signal analytique: *Cables et Transm.*, **2A(1)**, 61-74.
- Wigner, E. P., 1932, On the quantum correlation for thermodynamic equilibrium: *Phys. Rev.*, **40**, 749-759.
- منابع
 روشنندل، ا.، ۱۳۸۸، بهبود تبدیل‌های زمان-فرکانس (بسامد) در مطالعه داده‌های لرزه‌ای، پایان‌نامه دکتری، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- غلامی، ا.، ۱۳۸۹، بررسی کاربرد تبدیل موجک پیوسته زمان-فرکانس (بسامد) بر روی داده‌های لرزه‌ای یکی از مخازن هیدروکربنی ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- Askari, R., and Siahkoohi, H. R., 2008, Ground roll attenuation using the S and x-f-k transforms: *Geophysical Prospecting*, **56**, 105-114.
- Auger, F., Flandrin, P., Goncalves, P., and Lemoine, O., 1996, Time-frequency toolbox for use with MATLAB, CNRS, France.
- Boashash, B., 2003, *Time frequency signal analysis: A comprehensive reference*, Elsevier, Oxford, UK.
- 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.
- Cooper, G. R. J., 2006, Interpreting potential field data using continuous wavelet transforms of their horizontal derivatives: *Computers & Geosciences*, **32**, 984-992.
- De Oliveira Lyrio, J. C. S., Tenorio, L., and Li, Y., 2004, Efficient automatic denoising of gravity gradiometry data: *Geophysics*, **69**, 772-782.
- Fedi, M., Quarta, T., 1998, Wavelet analysis for the regional residual and local separation of potential field anomalies: *Geophysical Prospecting*, **46**, 507-525.
- 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