

تصویرسازی لایه‌های نازک با استفاده از نشانگرهای به‌دست آمده از تجزیه طیفی به روش تبدیل فوریه زمان کوتاه

هدی آراسته^۱ و عبدالرحیم جواهریان^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران
^۲ استاد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران و استاد دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
(دریافت: ۸۶/۵/۲۳، پذیرش نهایی: ۸۸/۷/۵)

چکیده

تجزیه طیفی به تمامی روش‌هایی گویند که برای هر پنجره کوچک به مرکز یک نمونه زمانی از ردلرزه، طیف بسامدی (طیف دامنه، طیف فاز یا تغییرات فاز با بسامد و طیف انرژی) را می‌دهد. بنابراین حاصل کار تجزیه طیفی یک ردلرزه صفحه نمایش زمان-بسامد است. در این مقاله تجزیه طیفی به روش تبدیل فوریه زمان کوتاه در تصویرسازی لایه‌های نازک در مقاطع لرزه‌ای بررسی شده است. شیوه کار بدین صورت است که از صفحه نمایش زمان-بسامد مربوط به هر ردلرزه، نشانگرهای طیفی استخراج می‌شوند تا لایه نازک را تصویر کنند. نشانگرهای مورد بررسی در این تحقیق شامل بسامد قله، دامنه قله و تغییرات محلی فاز با بسامد هستند. الگوریتم روش تبدیل فوریه زمان کوتاه با نرم‌افزار MATLAB طراحی شده است. برای ارزیابی این روش در بررسی لایه‌های نازک، الگوریتم طراحی شده ابتدا روی یک مقطع مصنوعی و سپس روی قسمتی از یک مقطع لرزه‌ای واقعی با فاز صفر اعمال شد. نشانگرهای بسامد قله و دامنه قله در بازه بسامدی کوچک و نشانگر تغییرات محلی فاز با بسامد به ازای یک بسامد خاص نتیجه قابل قبولی عرضه کردند.

واژه‌های کلیدی: تجزیه طیفی، تبدیل فوریه زمان کوتاه، بسامد قله، دامنه قله، تغییرات محلی فاز با بسامد

Imaging thin beds using attributes achieved in spectral decomposition by short time Fourier transforms

Arasteh, H.¹ and Javaherian, A.²

¹ M. Sc. in Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran.

² Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran and presently at the Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 14 Aug 2007, Accepted: 27 Sep 2009)

Abstract

One of the most fundamental reservoir characteristics is the thickness. The analysis of thin bed tuning on seismic reflectivity has been studied extensively by Wides (1973) and Neidel and Poggiagliomi (1977), who discussed the limits of seismic resolution. During the past decade, the industry has developed a plethora of new attributes in studying thin beds by employing spectral decomposition (Peyton et al., 1998; Partyka et al., 1999), and attributes which are obtained from it (Marfurt and Kirlin, 2001). Spectral decomposition refers to all methods that generate frequency spectrums consisting of amplitude spectrum, phase spectrum, change of phase with frequency and power spectrum in windows with the center of each time sample of a trace. These methods are used in studying geological features, thin beds, hydrocarbon reservoirs and noise attenuation. The most important of these methods are short time Fourier transform (STFT), continuous wavelet transforms,

S-transform, Wigner-Ville distribution and matching pursuit decomposition. The result of a trace spectral decomposition is a time-frequency map.

In this paper, the STFT method is applied for imaging thin beds in 2D seismic sections. In this method, a short time window with constant size is multiplied by a trace for each of its time samples of it then Fourier transform is applied on it. So, there is a local frequency spectrum for each time sample. The main factor of this method to be considered is the effect of the existence of two boundaries of a thin layer inside a time window. This affects local frequency spectrum and changes it so that by choosing some quantities of local spectrum as attributes it is possible to image the thin bed. The spectral attributes that are studied are the peak frequency, peak amplitude and change of phase with frequency. Detectable layers are related to the size of the time window. In this paper, frequency spectrums of a bed response and their reflection with minimum and zero phase wavelets are considered. Then, the effect of changing of thickness on frequency spectrums is studied. For controlling the main factor of this method, STFT algorithm is applied on a synthetic seismic section. It is shown that with the peak frequency and the peak amplitude obtained from a small portion of each local amplitude spectrum, and local change of phase with frequency in a particular frequency a good conclusion can be obtained. After that the STFT algorithm is applied on a part of a real seismic section and the place of layers with thickness up to 10 ms, between 10 to 18 ms and more than 18 ms are defined. It should be noted that the main idea of detecting thin beds on seismic sections is deference of frequency spectrum of a bed and a boundary. It is necessary to use more than one attribute for achieving more accurate results. It is shown that in particular frequency portions, thin beds are detected better. The minimum thickness that can be detected by this method depends on the frequency content of the seismic wavelet and the time sampling interval. It should be considered that applying STFT in more stages and less difference of size of windows in alternative stages increases accuracy of estimated thickness ranges.

Key words: Spectral decomposition, Short time Fourier transform, Peak frequency, Peak amplitude, Local change of phase with frequency

۱ مقدمه

دهه گذشته، نشانگرهای لرزه‌ای به مقدار زیادی در به‌دست آوردن نشانگرهای جدید پیشرفت کرده‌اند. در بررسی لایه‌های نازک، این پیشرفت شامل، تجزیه طیفی (پیتون و همکاران، ۱۹۹۸؛ پارتیکا و همکاران، ۱۹۹۹) و نشانگرهای به‌دست آمده از آن است (مارفورت و کرلین، ۲۰۰۱). در واقع از اولین پایه‌گذاران تجزیه طیفی، پارتیکا و همکارانش بودند که در ۱۹۹۹ کاربرد تجزیه طیفی (spectral decomposition) به روش تبدیل فوریه زمان کوتاه (short time Fourier transform, STFT) را روی داده‌های لرزه‌ای پس از برانبارش (post stack) معرفی

تحلیل لایه‌های نازک در حد تیونینگ (tuning) روی مقاطع لرزه‌ای بازتابی را وایدز (۱۹۷۳) و نیدل و پوگیاگیلومی (۱۹۷۷) بررسی و در خصوص محدودیت‌های تفکیک لرزه‌ای بحث کرده‌اند. ربرتسون و نکامی (۱۹۸۴) چگونگی استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای معرفی شده تنر و همکاران (۱۹۷۹) را در تصویرکردن لایه‌های نازک نشان دادند. بادین (۱۹۸۶) نشانگرهای لحظه‌ای اصلی تنر و همکاران (۱۹۷۹) را تعدیل کرد تا نشانگرهای پاسخ را به‌دست آورد که ویژگی‌های موجک بازتاب یافته را در کل، متعادل‌تر بیان می‌کنند. در طول

شامل چهار لایه افقی با ضخامت‌های متفاوت اعمال می‌شوند.

۲ مبانی روش STFT

در محاسبات گسسته به شیوه پارتیکا و همکاران (۱۹۹۹)، یک پنجره زمانی با تعداد $2N+1$ نمونه از داده لرزه‌ای $d_j(t+n\Delta t)$ که در آن، $-N \leq n < +N$ و j شماره ردلرزه است، به اجزای فوریه آن تجزیه می‌شود. تبدیل فوریه گسسته زمان کوتاه با رابطه (۱) بیان می‌شود (مارفورت و کرلین، ۲۰۰۱).

$$w(f, t) = u(f, t) + i v(f, t) \quad (1)$$

که در آن،

$$u(f, t) = \sum_{n=-N}^{+N} c(f, n\Delta t) d(t+n\Delta t), \quad (2)$$

$$v(f, t) = \sum_{n=-N}^{+N} s(f, n\Delta t) d(t+n\Delta t), \quad (3)$$

$$c(f, t) = m(t) \cos(2\pi ft), \quad (4)$$

$$s(f, t) = m(t) \sin(2\pi ft), \quad (5)$$

که در آنها، $m(t)$ پنجره زمانی است. طیف‌های $c(f, t)$ و $s(f, t)$ نوارهای باریکی را با بسامد مرکزی f تشکیل می‌دهند که طولشان با طول پنجره تحلیل زمانی $m(t)$ تعیین می‌شود.

۳ پاسخ ضربه محیط دو لایه‌ای روی یک نیم‌فضا

شکل ۱ مقطعی شامل دو لایه روی یک نیم‌فضا را نشان می‌دهد که در آن بازتاب‌های حاصل از مرزهای بالایی و پایینی لایه دوم مدنظر است. پاسخ ضربه یا تابع گرین مرزهای بالا و پایین یک لایه در حوزه زمان $g(t)$ ، مطابق رابطه (۶) است (مارفورت و کرلین، ۲۰۰۱).

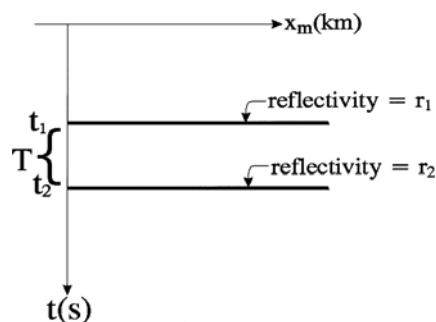
$$g(t, \theta) = r_1(\theta) \delta(t - t_1) + r_2(\theta) \delta(t - t_1 - T) \quad (6)$$

کردند. تجزیه طیفی این اجازه را به مفسر می‌دهد که اجزای بسامدی گسسته پهنای باند لرزه‌ای (طیف بسامدی محلی) را در تفسیر و درک جزئیات دقیق چینه‌شناسی زیر زمین به کار برد (چپرا و مارفورت، ۲۰۰۶). نشانگرهای مبتنی بر طیف بسامد، با برجسته‌سازی رخساره‌هایی که به سختی قابل تشخیص‌اند در تفسیر داده‌های لرزه‌ای مفید هستند. از آنجا که این نشانگرها از تحلیل یک طیف کامل بسامدی به‌دست می‌آیند، کمتر از پاسخ‌های به‌دست آمده در یک بسامد مشخص (بسامد پاسخ یا بسامد لحظه‌ای) متاثر از نوفه می‌شوند (هندرسن و همکاران، ۲۰۰۷).

از آنجا که لایه‌های نازک در مقاطع لرزه‌ای بازتابی مرسوم تفکیک نمی‌شوند، یکی از مهم‌ترین اهداف در صنعت این است که روشی به کار برده شود تا قدرت تشخیص آنها را بهبود بخشد. در این راستا تجزیه طیفی یکی از ابزارهایی است که می‌تواند دستیابی به این هدف را ممکن سازد. در اکتشاف لرزه‌ای، تجزیه طیفی به هر روشی که تحلیل زمان-بسامد پیوسته‌ای از ردلرزه (trace) فراهم می‌آورد باز می‌شود. بنابراین یک طیف بسامدی، خروجی هر پنجره به مرکزیت هر نمونه زمانی ردلرزه است (کاستاگنا و سان، ۲۰۰۶). روش‌های گوناگونی برای تجزیه طیفی وجود دارد که عمده‌ترین آنها عبارت‌اند از تبدیل فوریه زمان کوتاه (short time Fourier transform, STFT)، تبدیل موجک پیوسته (Fourier transform, STFT)، تبدیل (continuous wavelet transform, CWT)، تبدیل S توزیع ویگنر- ویلی و تجزیه با تعقیب تطابق (pursuit decomposition, MPD).

در این مقاله پس از مروری بر مبانی روش STFT، ابتدا به خواص و مفاهیم منجر به استفاده از این روش پرداخته می‌شود. در این راستا ابتدا پاسخ ضربه برای محیط دو لایه‌ای روی یک نیم‌فضا و سپس بازتاب برای این محیط مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از آن نشانگرهای طیفی لایه نازک معرفی و روی مقطع لرزه‌ای مصنوعی

میلی ثانیه در محدوده بسامدی صفر تا ۳۰۰ هرتز در شکل ۲ رسم شده است. این شکل ارتباط بین طیف دامنه پاسخ ضربه مرزهای بالا و پایین یک لایه با ضخامت زمانی دوطرفه آن را مشخص می کند. در این شکل ملاحظه می شود که طیف دامنه پاسخ ضربه مرزهای بالا و پایین یک لایه به صورت توالی از شکافها و قلهها است که با افزایش ضخامت لایه، تعداد قلهها یا شکافهای موجود در یک محدوده بسامدی افزایش یافته و در نتیجه مقدار بسامدها در محل هر قله یا شکاف کاهش می یابد. به منظور توضیح بیشتر، ملاحظه می شود در این شکل، طیف دامنه پاسخ ضربه دو مرز از یک لایه در محدوده بسامدی صفر تا ۳۰۰ هرتز برای ضخامت زمانی دو طرفه ۱۰ میلی ثانیه شامل سه قله بسامدی در بسامدهای ۵۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ هرتز است. در حالی که این طیف برای لایه ای با ضخامت زمانی دوطرفه ۲۰ میلی ثانیه در همین محدوده بسامدی شامل شش قله است که مثلاً بسامد در محل اولین قله برابر با ۲۵ هرتز است که نصف بسامد در محل اولین قله در طیف دامنه برای لایه با ضخامت زمانی دوطرفه ۱۰ میلی ثانیه است. این شکل نشان می دهد که ضخامت زمانی دوطرفه لایه، متناسب با عکس دوره بسامدی هر شکاف یا قله در طیف دامنه برحسب هرتز است و با $p_f = 1/T$ تعریف می شود که در آن، p_f دوره بسامدی تکرار شکافها یا قلهها در طیف دامنه، و T ضخامت زمانی دوطرفه لایه برحسب ثانیه است.



شکل ۱. مقطعی شامل دو لایه روی یک نیم فضا. مرز بالای لایه دوم در زمان t_1 با ضریب بازتاب $r_1(\theta)$ ، مرز پایین لایه دوم در زمان t_2 با ضریب بازتاب $r_2(\theta)$ و ضخامت زمانی رفت و برگشت لایه دوم $T = t_2 - t_1$ است (مارفورت و کرلین، ۲۰۰۱).

که در آن، $r_1(\theta)$ ضریب بازتاب وابسته به زاویه تابش از مرز بالایی لایه دوم، $r_2(\theta)$ ضریب بازتاب وابسته به زاویه تابش از مرز پایینی لایه دوم، t_1 زمان رفت و برگشت تا مرز بالایی لایه دوم، t_2 زمان رفت و برگشت از مرز پایینی لایه دوم، $T = t_2 - t_1$ ضخامت زمانی رفت و برگشت لایه نازک مدنظر و $\delta(t)$ تابع دلتای دیراک است. پاسخ ضربه مرزهای بالا و پایین یک لایه در حوزه بسامد $G(f, T)$ از رابطه (۷) به دست می آید (مارفورت و کرلین، ۲۰۰۱).

$$G(f, T) = r_1(\theta) \exp(-i2\pi f t_1) + r_2(\theta) \exp[-i2\pi f (t_1 + T)] \quad (7)$$

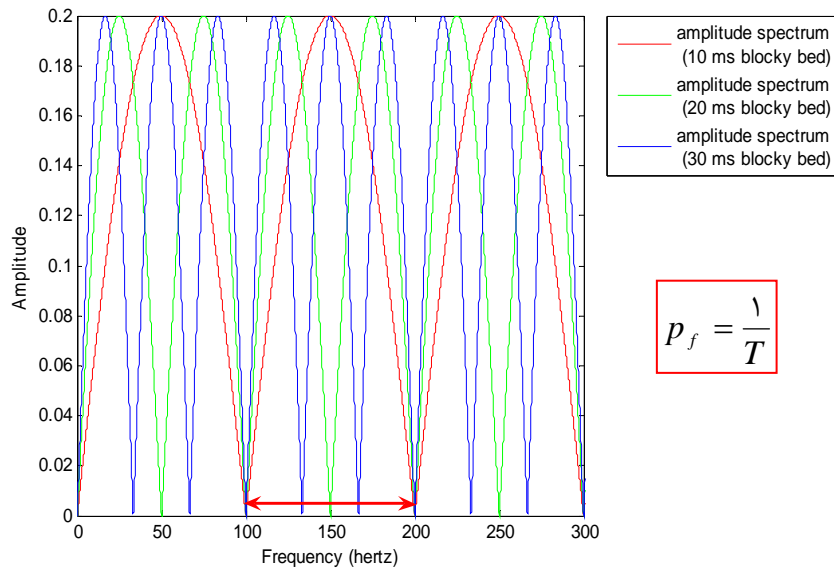
که در آن، f بسامد زمانی برحسب هرتز و T ضخامت زمانی دوطرفه لایه است.

۱-۳ طیف دامنه

طیف دامنه سری زمانی مورد بررسی با توجه به رابطه (۷) به صورت زیر تعریف می شود (لیو و مارفورت، ۲۰۰۶):

$$|G(f, T)| = \left[r_1^2(\theta) + r_2^2(\theta) + 2r_1(\theta)r_2(\theta) \cos(2\pi f T) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

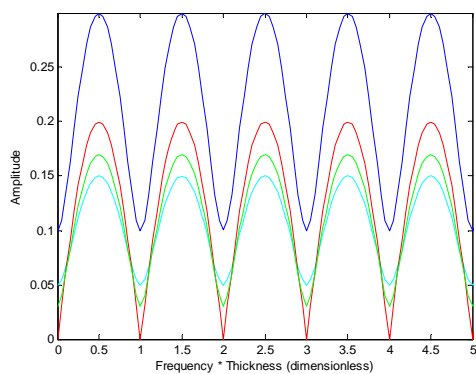
برای اطمینان از کار برنامه تدوین شده در نرم افزار MATLAB، طیف دامنه پاسخ ضربه مرزهای بالا و پایین لایه ای با ضرایب بازتاب r_1 و r_2 از مرزهای بالا و پایین برای سه ضخامت زمانی دوطرفه ۱۰، ۲۰ و ۳۰



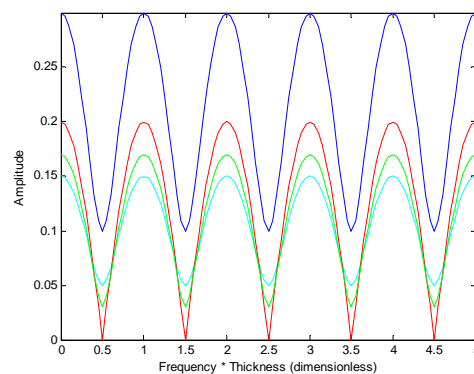
شکل ۲. طیف دامنه پاسخ ضربه دو مرز از یک لایه با ضرایب بازتاب $+0$ و -0 از مرزهای بالا و پایین برای سه ضخامت زمانی دوطرفه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌ثانیه در محدوده بسامدی صفر تا ۳۰۰ هرتز (برای نمونه دوره بسامدی تکرار شکاف در ضخامت زمانی دوطرفه ۱۰ میلی‌ثانیه، برابر با ۱۰۰ هرتز است) (آراسته، ۱۳۸۶).

مقدار در بسامدهای $f = (n+1/2)/T$ و دامنه‌های با بیشترین مقدار در بسامدهای $f = n/T$ رخ می‌دهند. شکل ۳-ب نشان می‌دهد برای $n = 0, 1, 2, \dots$ دامنه‌های با کمترین مقدار در بسامدهای $f = n/T$ و دامنه‌های با بیشترین مقدار در بسامدهای $f = (n+1/2)/T$ رخ می‌دهند.

به‌منظور بهتر روشن شدن ارتباط بسامد در محل قله‌ها و شکاف‌ها با ضخامت زمانی دوطرفه لایه، در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب به ترتیب طیف دامنه برای حالت‌های $r_1/r_2 > 0$ و $r_1/r_2 < 0$ برحسب حاصل ضرب بسامد در ضخامت زمانی دوطرفه لایه رسم شده‌اند. شکل ۳-الف نشان می‌دهد برای $n = 0, 1, 2, \dots$ دامنه‌های با کمترین



(ب)



(الف)

شکل ۳. طیف دامنه پاسخ ضربه دو مرز از یک لایه به‌منزله تابعی از بسامد نرمال شده fT برای نسبت‌های متفاوت r_1/r_2 (الف) آبی $+0$ و سبز -0 ، سرخ $+1$ ، نیلی $+2$ ، و (ب) آبی -0 و سبز -1 ، سرخ -1 ، نیلی -2 .

۲-۳ طیف تغییرات فاز با بسامد

در تحقیقات طیف بسامدی پاسخ ضربه مرزهای بالا و پایین یک لایه، همچنین می‌توان تغییرات فاز با بسامد را بررسی کرد (مارفورت و کرلین، ۲۰۰۱)؛

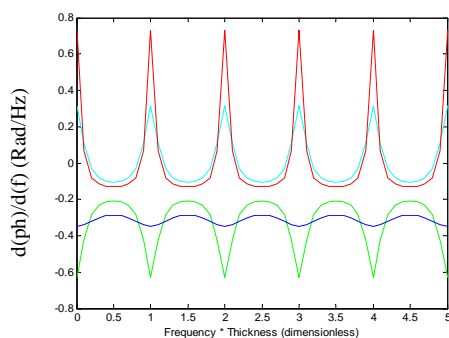
$$\frac{\partial \phi(f, T)}{\partial f} = -2\pi T \frac{r_1(\theta)r_2(\theta) \cos(2\pi fT) + r_2^2(\theta)}{2r_1(\theta)r_2(\theta) \cos(2\pi fT) + r_1^2(\theta) + r_2^2(\theta)} \quad (۹)$$

که در آن، $\phi(f, T)$ فاز متناسب با بسامد f و ضخامت زمانی رفت و برگشت T است. برای روشن شدن ارتباط بسامد در محل قله‌ها و شکاف‌ها با ضخامت زمانی دوطرفه لایه، در شکل‌های ۴-الف و ۴-ب به ترتیب طیف تغییرات فاز با بسامد برحسب حاصل ضرب بسامد در ضخامت زمانی دوطرفه لایه برای $r_1/r_2 > 0$ و $r_1/r_2 < 0$ محاسبه و رسم شده‌اند. شکل ۴-الف نشان می‌دهد برای حالت $0 < r_1/r_2 < 1$ ، در $n = 0, 1, 2, \dots$ بیشترین مقدار تغییرات فاز با بسامد، در بسامدهای $f = n/T$ و کمترین مقدار تغییرات فاز با بسامد، در بسامدهای $f = (n+1/2)/T$ رخ می‌دهند. درحالی‌که برای حالت $r_1/r_2 \geq 1$ بیشترین مقدار تغییرات فاز با بسامد در $f = (n+1/2)/T$ و کمترین مقدار تغییرات فاز با بسامد در $f = n/T$ رخ می‌دهند و مقدارشان منفی است. همچنین شکل ۴-ب نشان می‌دهد

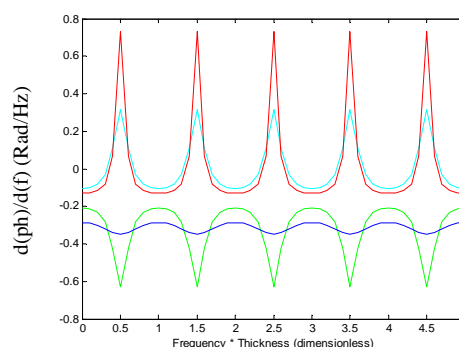
برای حالت $-1 < r_1/r_2 < 0$ ، بیشترین مقدار تغییرات فاز با بسامد در محل بسامدهای $f = (n+1/2)/T$ و کمترین مقدار تغییرات فاز با بسامد در محل بسامدهای $f = n/T$ رخ می‌دهند. درحالی‌که برای حالت $r_1/r_2 \leq -1$ مقادیر بیشینه تغییرات فاز با بسامد در $f = n/T$ و مقادیر کمینه آن در $f = (n+1/2)/T$ رخ داده و منفی‌اند.

۴ بازتاب از مرزهای بالا و پایین یک لایه

یک ردلرزه از هم‌میخت موجک لرزه‌ای در ضرایب بازتاب یا پاسخ زمین حاصل می‌شود. در یک پنجره زمانی از ردلرزه، طیف دامنه از حاصل ضرب طیف دامنه موجک در طیف دامنه ضرایب بازتاب موجود در آن پنجره به دست می‌آید. اگر پنجره زمانی به قدری کوچک باشد که تنها یک بازتاب را در برگیرد، طیف دامنه در این پنجره شبیه به طیف دامنه موجک ورودی است (طیف دامنه یک تابع ضربه DC است)، حال اگر مرز بالا و مرز پایین یک لایه در یک پنجره قرار گیرند، طیف دامنه آن، حاصل ضرب طیف دامنه موجک در طیف دامنه پاسخ ضربه مرزهای بالا و پایین یک لایه است که در بخش قبل بررسی شد. بنابراین شکل آن متاثر از شکل طیف دامنه پاسخ ضربه مرزهای بالا و پایین یک لایه است.



(ب)



(الف)

شکل ۴. طیف تغییرات فاز با بسامد برای پاسخ ضربه دو مرز از یک لایه به منزله تابعی از بسامد نرمال شده fT برای نسبت‌های متفاوت r_1/r_2 (الف) آبی

رنگ سبز +۰، سبز +۰، سرخ +۱، نیلی +۲، و (ب) آبی -۰، سبز -۰، سرخ -۱، نیلی -۲.

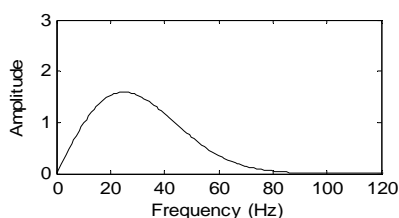
(بدون تداخل) هنوز بسامد قله متفاوت از بسامد غالب موجک ورودی است، گرچه تعداد قله‌ها و شکاف‌ها در طیف دامنه به علت افزایش ضخامت بیشتر شده‌اند (شکل‌های ۶-ح و ۷-ح). بنابراین تداخل عامل ایجاد تفاوت در طیف محلی نیست، بلکه حضور دو مرز از یک لایه در یک پنجره است که این تفاوت در طیف محلی را ایجاد می‌کند. از این رو ملاک تشخیص یک لایه انتخاب پنجره با طولی است که کل لایه را دربرگیرد. (۳) رابطه بین مقدار بسامدها در محل قله‌ها و شکاف‌های طیفی با ضخامت زمانی دوطرفه لایه، به سادگی رابطه آنها در طیف دامنه پاسخ ضربه مرزهای بالا و پایین یک لایه نیست. دلیل آن تاثیر طیف دامنه موجک ورودی است که در طیف دامنه پاسخ ضربه لایه ضرب می‌شود. (۴) در ضخامت‌های بسیار کم، طیف دامنه بازتاب‌های مربوط به مرزهای بالا و پایین یک لایه، تنها شامل یک قله طیفی است، بنابراین دوره تناوب دو قله یا شکاف طیفی در آن مشخص نمی‌شود (شکل‌های ۶-ب و ۷-ب). در ضخامت‌های بیشتر نیز دوره تناوب بین شکاف‌ها و قله‌های متوالی رابطه دقیقی با ضخامت زمانی لایه (همچون پاسخ ضربه مرزهای بالا و پایین یک لایه) ندارد که دلیلش همان اثر طیف دامنه موجک ورودی (همامیخت شده) است. در هر حال اینکه بتوان در مواردی به‌طور تقریبی از این ویژگی‌ها در تعیین ضخامت لایه نازک استفاده کرد، مفید است.

در مورد تغییرات فاز با بسامد (مشتق فاز نسبت به بسامد) می‌توان گفت؛ در یک پنجره زمانی از ردلرزه، طیف تغییرات فاز با بسامد، از حاصل جمع طیف تغییرات فاز با بسامد موجک و طیف تغییرات فاز با بسامد ضرایب بازتاب موجود در آن پنجره به‌دست می‌آید. بنابراین تحت تاثیر طیف تغییرات فاز با بسامد موجک ورودی قرار می‌گیرد. از این رو در حالتی که دو بازتاب در محدوده پنجره قرار گیرند، طیف محلی تغییرات فاز با

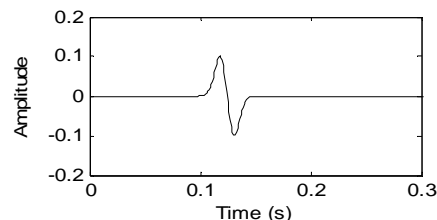
شکل ۵-الف، ردلرزه‌ای شامل یک بازتاب را نشان می‌دهد که حاصل همامیخت یک موجک ۲۵ هرتز با فاز حداقل در ضریب بازتاب برابر با $0+1$ است. شکل ۵-ب طیف دامنه این ردلرزه را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که مقدار بسامد غالب (قله) برابر با ۲۵ هرتز است که همان بسامد غالب موجک ورودی است. در شکل‌های ۶ و ۷ طیف دامنه برای ردلرزه‌هایی شامل لایه‌ای به ترتیب با نسبت ضرایب بازتاب برابر با $2+$ و $2-$ ، با ضخامت‌های به ترتیب ۵، ۱۵، ۳۰ و ۵۵ میلی‌ثانیه نشان داده شده‌اند. شایان ذکر است ردلرزه شکل ۶-الف از آن‌رو بسیار شبیه به شکل ۵-الف است که ضخامت لایه بسیار کم و نسبت ضرایب بازتاب نیز مثبت است. بنابراین طبیعی است که قرارگیری تقریبی دو موجک با قطبیدگی یکسان در شکل ۶-الف روی یکدیگر شکلی تقریباً شبیه به موجک شکل ۵-الف ولی با دامنه بیشتر بدهد. در این شکل‌ها چند نکته واضح‌اند که عبارت‌اند از؛ (۱) طیف دامنه بازتاب‌های مربوط به مرزهای بالا و پایین یک لایه متفاوت از طیف دامنه یک موجک است. در نتیجه بسامدی که بیشترین مقدار را در طیف دامنه بازتاب‌های مربوط به مرزهای بالا و پایین یک لایه دارد (بسامد قله) در بسیاری موارد، متفاوت از بسامد غالب موجک ورودی (یا یک مرز از لایه) است. این تفاوت منجر به این می‌شود که بتوان از این کمیّت در تشخیص لایه نازک استفاده کرد. به‌طوری که در محلی که در مقدار این کمیّت نسبت به سایر قسمت‌های مقطع تفاوت مشاهده می‌شود، لایه‌هایی قرار دارند که ضخامتشان به گونه‌ای است که درون پنجره زمانی به کار رفته قرار می‌گیرند. دامنه مربوط به بسامد قله، در محل لایه‌ای با نسبت ضرایب بازتاب معین، در صورتی که تغییر ضخامت آن در پنجره تحلیل زمانی کم باشد مقدار نسبتاً یکسان و متفاوتی از سایر قسمت‌ها می‌دهد. در این مقاله، از این ویژگی‌ها در تصویرکردن لایه‌های نازک استفاده شده است. (۲) برای لایه غیر نازک

پنجره زمانی قرار گرفته است و حالتی که یک لایه با ضخامت ۳۰ میلی‌ثانیه و نسبت ضرایب بازتاب ۲- در محدوده این پنجره قرار گرفته رسم شده است. با توجه به شکل طیف تغییرات فاز با بسامد پاسخ ضربه مرزهای بالا و پایین یک لایه که با طیف تغییرات فاز با بسامد موجک ورودی جمع می‌شود، ملاحظه می‌شود که طیف‌های نشان داده شده در این دو شکل با یکدیگر متفاوت‌اند و به ازای برخی مقادیر از بسامد، این تفاوت بیشتر است.

بسامد حاصل، متفاوت از حالتی است که فقط یک بازتاب در پنجره قرار گیرد. از این خاصیت می‌توان استفاده کرد و با زدن برش‌های تک بسامد از صفحه نمایش زمان-بسامد مربوط به هر ردلرزه در بسامدهای مناسب، محل لایه نازک با حداکثر ضخامت را که در محدوده پنجره زمانی منتخب قرار می‌گیرد، تشخیص داد. برای موجک با فاز حداقل، در شکل‌های ۸-الف و ۸-ب طیف تغییرات فاز با بسامد به ترتیب برای حالتی که فقط یک بازتاب متشکل از موجک ۲۵ هرتز با فاز حداقل در

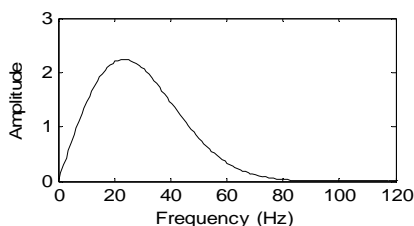


(ب)

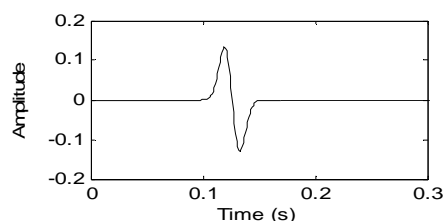


(الف)

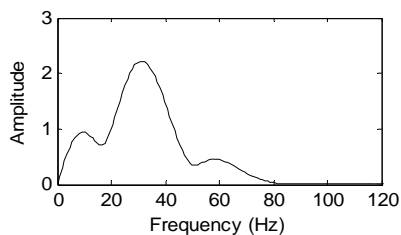
شکل ۵. (الف) ردلرزه‌ی شامل یک بازتاب که حاصل هم‌امیخت یک موجک ۲۵ هرتز با فاز حداقل در ضریب بازتاب برابر با +۰ است، (ب) طیف دامنه آن.



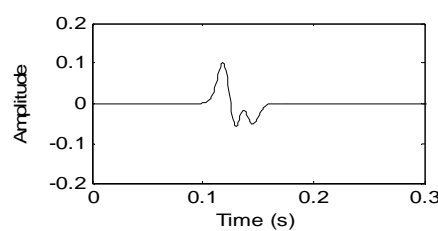
(ب)



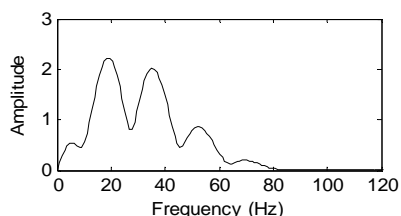
(الف)



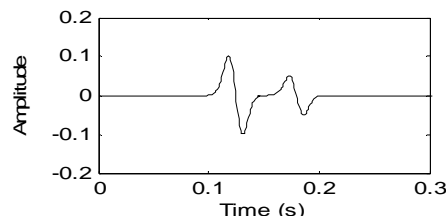
(د)



(ج)

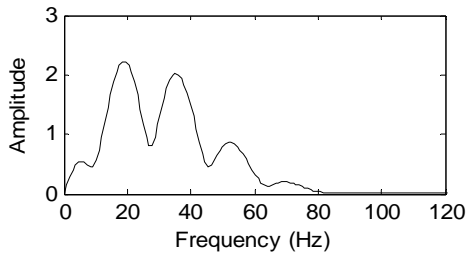


(و)



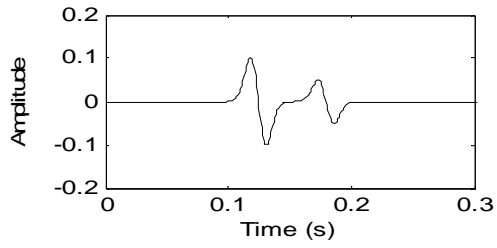
(ه)

شکل ۶. الف، ج، ه، ز- ردلرزه‌های شامل لایه‌ای با ضخامت زمانی دو طرفه به ترتیب ۵، ۱۵، ۳۰ و ۵۵ میلی‌ثانیه با نسبت ضرایب بازتاب برابر با +۲، ب، د، و، ح- به ترتیب طیف دامنه ردلرزه‌های الف، ج، ه، ز. موجک ۲۵ هرتز با فاز حداقل شکل ۵-الف است (قرارگیری تقریبی دو موجک با قطبیدگی یکسان در شکل ۶-الف روی یکدیگر شکلی را تقریباً شبیه به موجک شکل ۵-الف ولی با دامنه بیشتر می‌دهد).

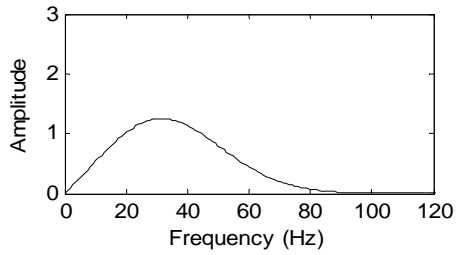


(ح)

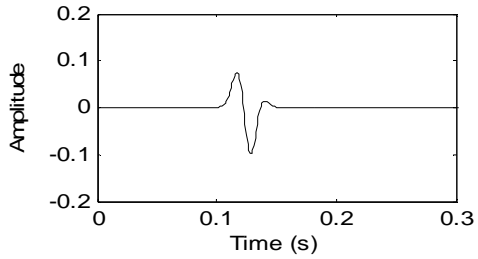
ادامه شکل ۶.



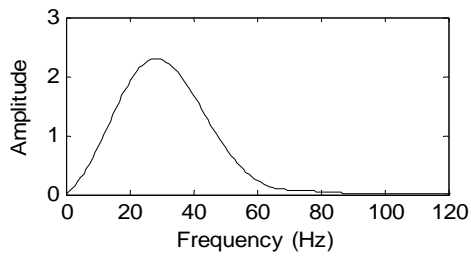
(ز)



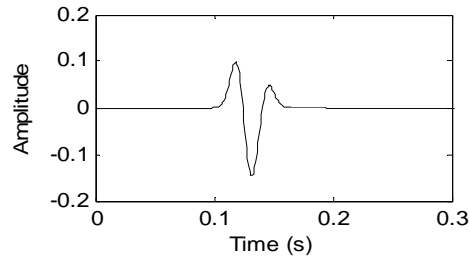
(ب)



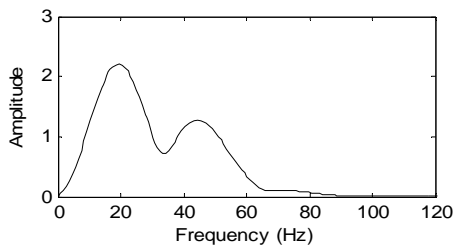
(الف)



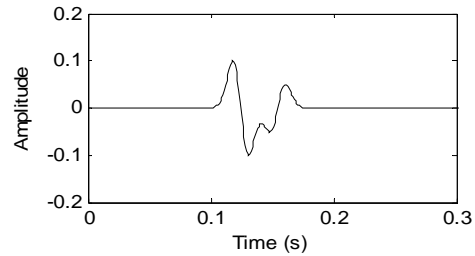
(د)



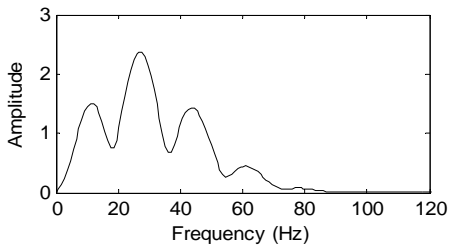
(ج)



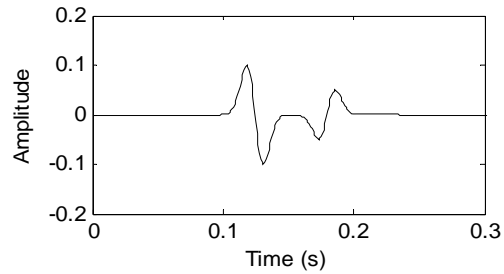
(و)



(ه)



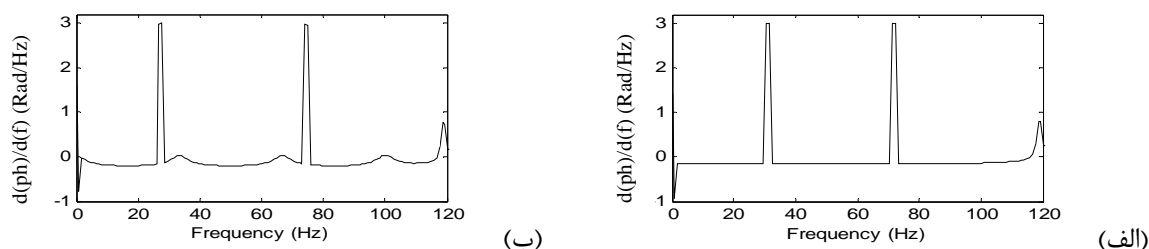
(ح)



(ز)

شکل ۷. (الف، ج، ه، ز) ردلرزه‌های شامل لایه‌ای با ضخامت زمانی دوطرفه به ترتیب ۵، ۱۵، ۳۰ و ۵۵ میلی‌ثانیه با نسبت ضرایب بازتاب برابر با ۲-، (ب، د، و،

ح) به ترتیب طیف دامنه ردلرزه‌های الف، ج، ه، ز. موجک ۲۵ هرتز با فاز حداقل شکل ۵- الف است.



شکل ۸. طیف تغییرات فاز با بسامد برحسب بسامد برای (الف) یک مرز از لایه و (ب) برای دو مرز از یک لایه با ضخامت زمانی دوطرفه ۳۰ میلی ثانیه و نسبت ضرایب بازتاب ۲- (موجک ۲۵ هرتز با فاز حداقل شکل ۵- الف است)

۵ نشانگرهای طیفی لایه نازک

حاصل اعمال تجزیه طیفی روی یک ردلرزه، صفحه نمایش زمان- بسامد است. بنابراین برای یک مقطع لرزه‌ای دو بُعدی پس از اعمال تجزیه طیفی، مکعبی از داده‌ها در سه بُعد زمان، بسامد و مسافت (شماره ردلرزه) به دست می‌آید. در بخش‌های قبل نشان داده شد که طیف بسامدی در پنجره‌ای شامل یک لایه، متفاوت از طیف بسامدی در پنجره‌ای شامل یک موجک تنها (یک مرز از لایه) و یا یک پنجره بزرگ از ردلرزه است. بنابراین با استخراج کمیته از صفحه زمان- بسامد مربوط به هر ردلرزه در همه لحظه‌ها (نمونه‌های زمانی) به منزله نشانگر، شاید بتوان حضور لایه نازک را با تغییر در آن کمیته یا نشانگر در محل لایه نازک مشخص کرد.

یکی از مفیدترین و ساده‌ترین نشانگرهای لرزه‌ای به دست آمده از مکعب تجزیه طیفی، بسامد قله است. بسامد قله یا مد، بسامدی است که بیشترین دامنه را دارد و از طیف دامنه محلی به دست آمده از رابطه (۱۰) استخراج می‌شود (مارفورت و کرلین، ۲۰۰۱).

$$a_j(f, t) = [u_j^2(f, t) + v_j^2(f, t)]^{1/2} \quad (10)$$

رابطه (۱۰) برای ردلرزه زام، طیف دامنه را در هر لحظه t می‌دهد. لایه‌های ضخیم‌تر ممکن است شامل چندین قله در طیف دامنه‌شان باشند که بسامد قله روی یکی از این قله‌ها می‌افتد.

از آنجاکه ممکن است در برخی قسمت‌ها یک نشانگر در محل لایه نازک بی‌هنجاری نشان ندهد، استفاده از چندین نشانگر لازم است. از جمله دیگر نشانگرها، دامنه در محل قله طیف دامنه محلی است که در اصطلاح دامنه قله نامیده می‌شود. دامنه قله در ردلرزه زام در هر لحظه با رابطه (۱۱) معرفی می‌شود (مارفورت و کرلین، ۲۰۰۱).

$$a_j^{\text{peak}}(t) = a_j(f^{\text{peak}}, t) \quad (11)$$

نشانگر دیگری که از تحلیل زمان- بسامد می‌توان به دست آورد، تغییرات محلی فاز با بسامد است. مبنای استفاده از این نشانگر این است که طیف محلی تغییرات فاز با بسامد در پنجره زمانی شامل دو مرز از یک لایه، متفاوت از طیف محلی تغییرات فاز با بسامد در پنجره زمانی شامل یک مرز از لایه است. بنابراین، این نشانگر به ازای یک بسامد معین شاید بتواند لایه نازک با حداکثر ضخامت مورد نظر را تصویر کند که این امر در ادامه نشان داده می‌شود. طیف محلی تغییرات فاز با بسامد طبق رابطه (۱۲) به دست می‌آید (مارفورت و کرلین، ۲۰۰۱).

$$\frac{\partial \theta_j(f, t)}{\partial f} = \frac{\partial}{\partial f} \tan^{-1} \left[\frac{v_j(f, t)}{u_j(f, t)} \right] = \frac{u_j(f, t) \frac{\partial}{\partial f} v_j(f, t) - v_j(f, t) \frac{\partial}{\partial f} u_j(f, t)}{a_j(f, t)^2} \quad (12)$$

۶ مثال مصنوعی

از بحث‌های قبلی چنین نتیجه گرفته شد که در محلی که نشانگرهای طیفی نسبت به سایر قسمت‌ها تفاوت (بی‌هنجاری) نشان می‌دهند، لایه‌هایی با حداکثر ضخامت که درون پنجره زمانی قرار می‌گیرند (طول زمانی دو طرفه لایه برابر با طول زمانی پنجره است)، حضور دارند. مثلاً اگر طول پنجره زمانی به اندازه‌ای باشد که لایه‌های با ضخامت حداکثر $\lambda/4$ در محدوده آن قرار گیرند، در محل‌هایی که ضخامت لایه‌ها برابر با $\lambda/4$ و کمتر است، نشانگرهای طیفی تفاوت با سایر قسمت‌ها نشان می‌دهند و در قسمت‌هایی که ضخامت لایه بیش از این مقدار است، تفاوتی در مقدار این نشانگرها با سایر قسمت‌های مقطع مشاهده نمی‌شود. برای تعیین طول پنجره، از دوام زمانی غالب موجک منبع استفاده می‌شود. این دوام زمانی یا با استفاده از عکس بسامد غالب و یا با مشاهده دوام زمانی یک موجک در قسمت مناسبی از مقطع به‌دست می‌آید. برای مثال، در تشخیص لایه‌هایی با حداکثر ضخامت $\lambda/4$ ، طول پنجره به اندازه دوام زمانی موجک منبع به‌علاوه $1/2$ آن تعیین می‌شود.

به‌منظور اثبات صحت ایده به‌کاررفته در تصویرسازی لایه، برای نمونه، الگوریتم STFT در یک مرحله روی یک مقطع لرزه‌ای مصنوعی اعمال شد. در شکل ۹-الف مقطع ساخته شده با موجک ورودی ۳۰ هرتز (با دوام زمانی ۴۸ میلی‌ثانیه) با فاز صفر شامل چهار لایه افقی روی یک نیم‌فضا مشاهده می‌شود (فاصله نمونه‌برداری زمانی یک میلی‌ثانیه است). ضخامت زمانی دوطرفه لایه‌های دوم تا چهارم به ترتیب برابر با ۱۲ میلی‌ثانیه ($\lambda/8$)، ۴۸ میلی‌ثانیه ($\lambda/2$) و ۲۴ میلی‌ثانیه ($\lambda/4$) است. الگوریتم STFT با پنجره زمانی به طول ۶۵ نمونه زمانی (۶۴ میلی‌ثانیه) برای تشخیص لایه‌هایی با حداکثر ضخامت زمانی دوطرفه ۱۶ میلی‌ثانیه ($\lambda/6$) روی این مقطع اعمال شد. نشانگرهای بسامد قله و دامنه قله به ترتیب در

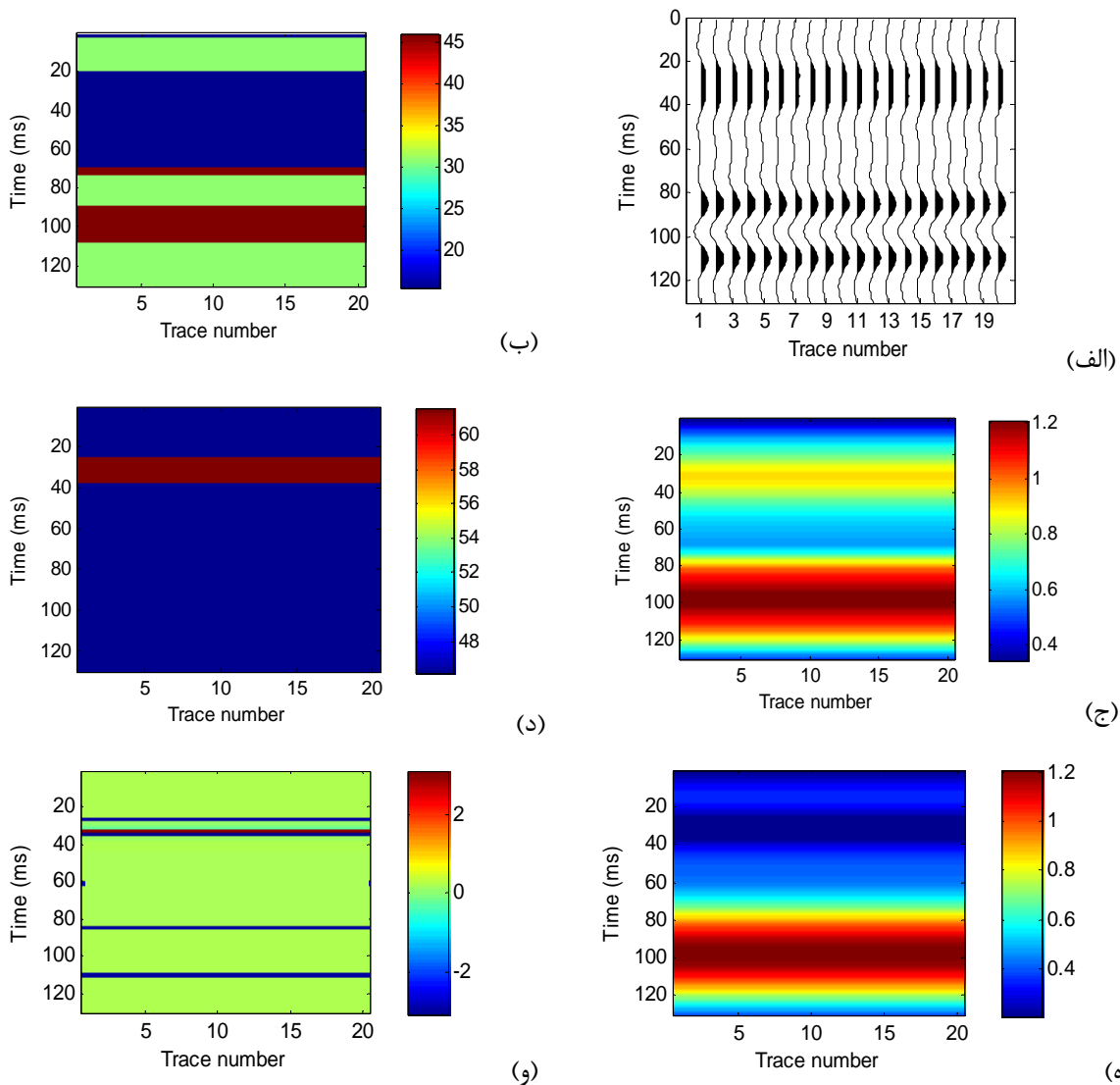
شکل‌های ۹-ب و ۹-ج نشان داده شده‌اند. نشانگر بسامد قله در محل لایه با ضخامت ۱۲ میلی‌ثانیه ($\lambda/8$) بی‌هنجاری نشان می‌دهد. اما محل لایه‌ای با این ضخامت هنوز به‌طور دقیق از نظر زمانی مشخص نشده است. این امر می‌تواند ناشی از تفکیک بسامدی کم در پنجره‌های زمانی کوچک باشد. نشانگر دامنه قله در محل لایه‌ای با این ضخامت مقدار ۰٫۹ را نشان می‌دهد. برای نمایش بهتر محل لایه با ضخامت مورد نظر، محاسبه این دو نشانگر در بازه‌های کوچک بسامدی به طول سه نمونه بسامدی صورت گرفت. در بازه بسامدی ۴۶ تا ۷۷ هرتز (نمونه بسامدی چهارم تا ششم) بهترین نتیجه حاصل شد که در شکل‌های ۹-د و ۹-ه، به ترتیب برای نشانگر بسامد قله و نشانگر دامنه قله نشان داده شده است. برای نشانگر تغییرات محلی فاز با بسامد بهترین نتیجه به ازای بسامد ۴۶ هرتز حاصل شد که در شکل ۹-و نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در محل لایه با ضخامت زمانی دوطرفه ۱۲ میلی‌ثانیه ($\lambda/8$)، این نشانگر مقدار متفاوتی را نشان می‌دهد. همچنین به ازای این برش بسامدی، مقدار تغییرات محلی فاز با بسامد برابر با ۳- روی مرز لایه‌ها قرار گرفته است.

۷ مثال واقعی

بنابر مباحث قبلی، شیوه کار در تصویرسازی لایه‌های نازک با سه نشانگر بسامد قله، دامنه قله و تغییرات محلی فاز با بسامد به ازای یک بسامد مشخص بدین شرح است؛ تجزیه طیفی در چندین مرحله و هر بار با پنجره‌ای با طول زمانی متفاوت از مرحله قبل صورت می‌گیرد (ابتدا با پنجره‌های کوچک و سپس بزرگ‌تر). در هر مرحله لایه‌های با حداکثر ضخامت که به‌طور کامل در آن پنجره قرار گیرند (لایه‌هایی که طول زمانی دوطرفه آنها برابر با طول پنجره است) بی‌هنجاری می‌دهند. بدین ترتیب می‌توان محدوده ضخامت لایه را در هر

ضخامتی نسبت داده شده به هر قسمت کوچک تر می شود و دقت کار در تعیین ضخامت لایه بالاتر می رود.

قسمت با مقایسه نتایج با مرحله قبل تعیین کرد. هرچه تفاوت طول پنجره در مراحل گوناگون کمتر باشد و در نتیجه تعداد مراحل بیشتر شوند، محدوده



شکل ۹. (الف) مقطع لرزه‌ای با موجک ۳۰ هرتز با فاز صفر شامل چهار لایه روی یک نیم‌فضا. ضخامت زمانی دوطرفه لایه‌های دوم تا چهارم به ترتیب برابر با ۱۲ میلی‌ثانیه ($\lambda/8$)، ۴۸ میلی‌ثانیه ($\lambda/2$) و ۲۴ میلی‌ثانیه ($\lambda/4$) است. (ب) نشانگر بسامد قله. در محل تقریبی لایه با ضخامت $\lambda/8$ مقدار این نشانگر برابر با ۱۵ هرتز است. (ج) نشانگر دامنه قله. در محل لایه با ضخامت $\lambda/8$ مقدار این نشانگر برابر با ۰٫۹ است. (د) نشانگر بسامد قله در بازه بسامدی ۴۶ تا ۷۷ هرتز. محل لایه با ضخامت $\lambda/8$ با مقدار مشخص شده است. (ه) نشانگر دامنه قله در بازه بسامدی ۴۶ تا ۷۷ هرتز. محل لایه با ضخامت $\lambda/8$ با مقدار دامنه برابر با ۰٫۲ مشخص شده است. (و) نشانگر تغییرات فاز با بسامد به ازای بسامد ۴۶ هرتز. این نشانگر در محل لایه با ضخامت $\lambda/8$ مقدار متفاوتی نشان می‌دهد. همچنین تغییرات فاز با بسامد برابر با ۳- بر روی مرز لایه‌ها قرار دارد.

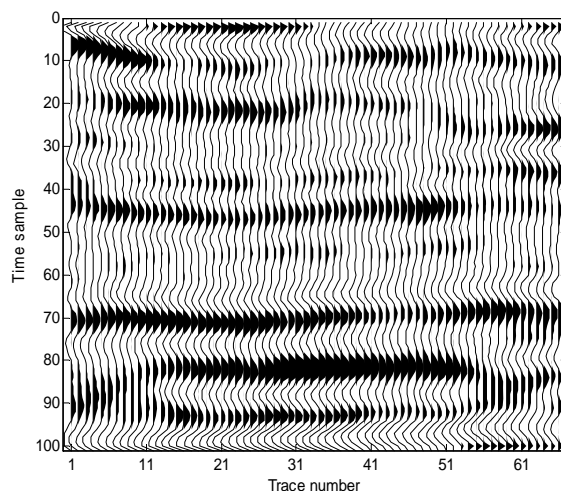
از نظر تطابق بهتر بی‌هنجاری‌های مشاهده شده با محل لایه‌های نازک، بهترین نتیجه حاصل شد. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب نشانگرهای بسامد قله و دامنه قله در بازه بسامدی کوچک از طیف دامنه نشان داده شده‌اند. نشانگر بسامد قله در محل‌هایی با بیشترین مقدار و نشانگر دامنه قله در محل‌هایی با کمترین مقدار نسبت به زمینه، محل لایه‌های نازک با حداکثر ضخامت $\lambda/6$ (ضخامت زمانی دوطرفه 0.10 ر ثانیه) را مشخص می‌کنند. برای نشانگر تغییرات محلی فاز با بسامد، به ازای بسامد 65 هرتز، بهترین نتیجه حاصل شد که در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همچنین مقدار تغییرات محلی فاز با بسامد برابر با $2-$ ، به ازای این بسامد در محل بازتاب‌ها از مرز لایه‌ها (قله موجک‌ها) قرار دارد. در این نشانگر محل لایه‌های نازک با حداکثر ضخامت $\lambda/6$ (ضخامت زمانی دوطرفه 0.10 ر ثانیه) با رنگ‌های زرد روشن و سرخ پررنگ مشخص شده است.

در مرحله دیگر، برای تشخیص محل لایه‌هایی با حداکثر ضخامت زمانی دوطرفه 0.18 ر ثانیه یا در حدود $\lambda/4$ الگوریتم STFT با پنجره‌ای به طول 27 نمونه زمانی روی مقطع شکل ۱۰ اعمال شد. نتیجه استخراج نشانگرهای بسامد قله و دامنه قله در بازه بسامدی 56 تا 93 هرتز (نمونه بسامدی چهارم تا ششم) به ترتیب در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان می‌دهد در محل‌های بیشتری برای هر دو نشانگر بی‌هنجاری مشاهده می‌شود. در محل‌هایی که نشانگرهای طیفی به‌دست آمده در دو مرحله اعمال الگوریتم با طول‌های متفاوت برای پنجره اختلاف دارند (در مرحله اول بی‌هنجاری مشاهده نشده و در مرحله دوم مشاهده می‌شود)، ضخامت لایه بین $\lambda/6$ و $\lambda/4$ است. مثلاً با مقایسه دو شکل ۱۳ و ۱۶، در محدوده‌ای بین ردلرزه‌های شماره 20 تا 30 و نمونه زمانی شماره 57 ، لایه‌ای با این محدوده ضخامت وجود دارد. در این مرحله برای نشانگر تغییرات محلی فاز با بسامد، به

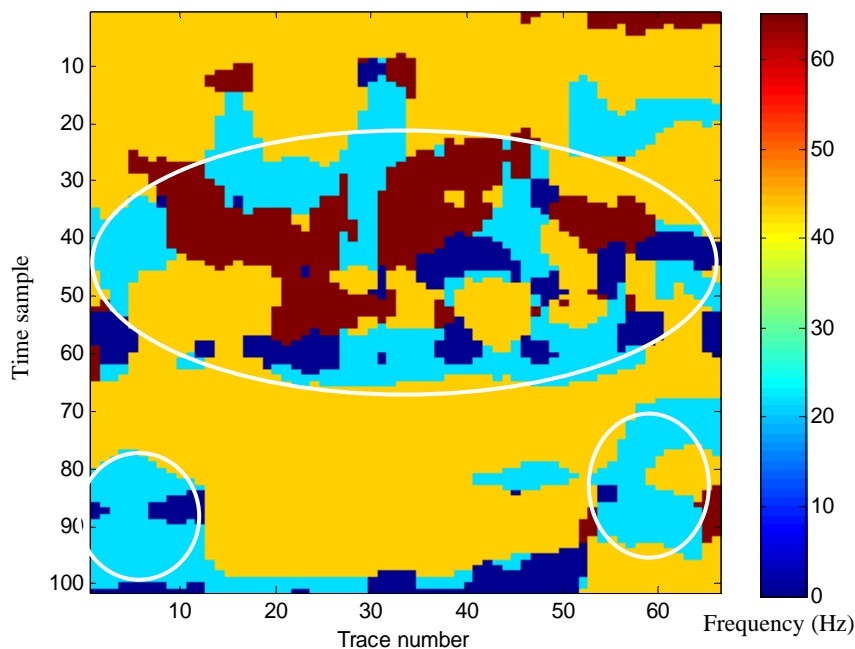
در اینجا الگوریتم STFT روی یک سری از داده‌های واقعی اعمال شد که قسمتی از یک مقطع لرزه‌ای (شکل ۱۰) با موجک منبع با فاز صفر است که از روی فایلی به نام L100MIG.sgy از نرم‌افزار Winpicks برداشته شده است. فاصله نمونه‌برداری 2 میلی‌ثانیه است. با میانگین‌گیری از بسامد غالب به‌دست آمده از طیف دامنه مربوط به هر ردلرزه، میانگین بسامد غالب موجک منبع در این قسمت از مقطع حدود 33 هرتز محاسبه شد و دوام زمانی آن از روی محل مناسبی در این قسمت از مقطع حدود 18 نمونه زمانی (0.34 ر ثانیه) اندازه‌گیری شد که با عکس میانگین بسامد غالب به‌دست آمده مطابقت دارد. برای نمونه، تشخیص سه محدوده ضخامت با اعمال الگوریتم STFT در دو مرحله با دو طول متفاوت برای پنجره مد نظر قرار گرفته است. ابتدا پنجره‌ای با طول 23 نمونه زمانی برای تشخیص محل لایه‌هایی با حداکثر ضخامت در حدود $\lambda/6$ (ضخامت زمانی دوطرفه 0.10 ر ثانیه) انتخاب شد. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشانگرهای بسامد قله و دامنه قله نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، در محل لایه‌های نازک نشانگر بسامد قله متفاوت از مقدار بسامد غالب مقطع است (با توجه به طول کم پنجره و تفکیک کم بسامدی، در محل‌هایی غیر از لایه نازک، بسامد غالب حدود 45 هرتز ملاحظه می‌شود). نشانگر دامنه قله نیز در محل لایه نازک بی‌هنجاری کم‌دامنه‌ای را نشان می‌دهد. با وجود مقادیر متفاوت این نشانگرها متناسب با ضخامت‌های متفاوت، بررسی این مقاطع شاید مشکل به نظر برسد. همچنین به دلیل تفکیک بسامدی کم، محل دقیق لایه‌های با حداکثر این ضخامت مشخص نیست. بنابراین برای تشخیص آسان و صحیح‌تر، گرفتن بیشینه‌های طیفی از طیف دامنه محلی در بازه‌های کوچک بسامدی به طول سه نمونه بسامدی صورت گرفت. بدین ترتیب با آزمون و خطا، در بازه بسامدی 65 تا 109 هرتز (نمونه بسامدی چهارم تا ششم)،

ثانیه) با رنگ‌های زرد روشن و نارنجی پررنگ تا سرخ مشخص است. در محل‌هایی که نشانگرهای طیفی در مرحله دوم بی‌هنجاری نمی‌دهند، لایه‌هایی با ضخامت بیش از $\lambda/4$ وجود دارند. مانند محدوده بین ردلرزه‌های شماره ۱۰ تا ۵۵ در نمونه زمانی حدود ۸۸

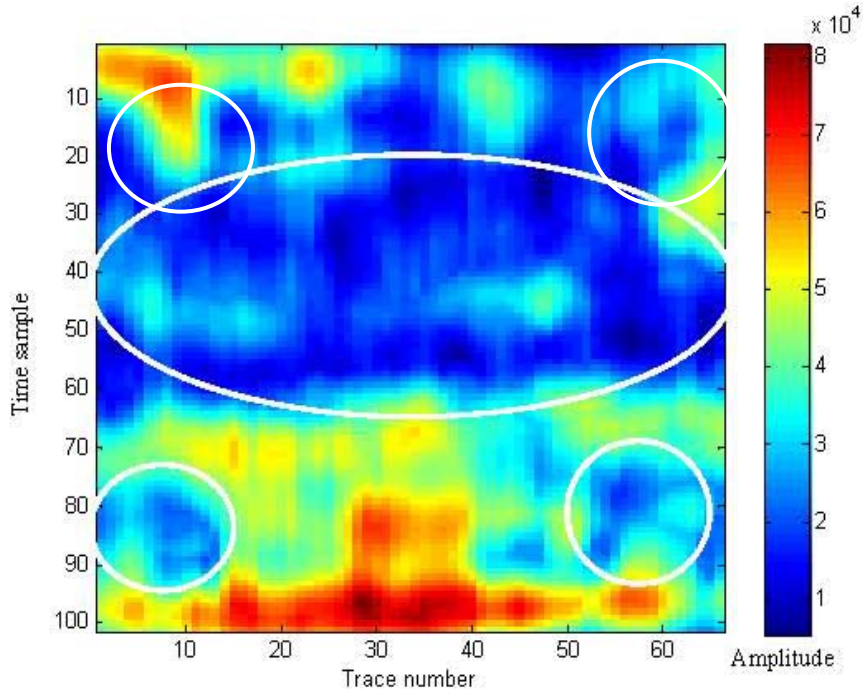
ازای بسامد ۵۶ هرتز بهترین نتیجه حاصل شد که در شکل ۱۸ نشان داده شده است. در این شکل نیز مقدار تغییرات محلی فاز با بسامد برابر با ۲- تقریباً در محل بازتاب‌ها از مرز لایه‌ها قرار دارد. همچنین محل لایه‌های نازک با حداکثر ضخامت $\lambda/4$ (ضخامت زمانی دو طرفه ۰/۰۱۸



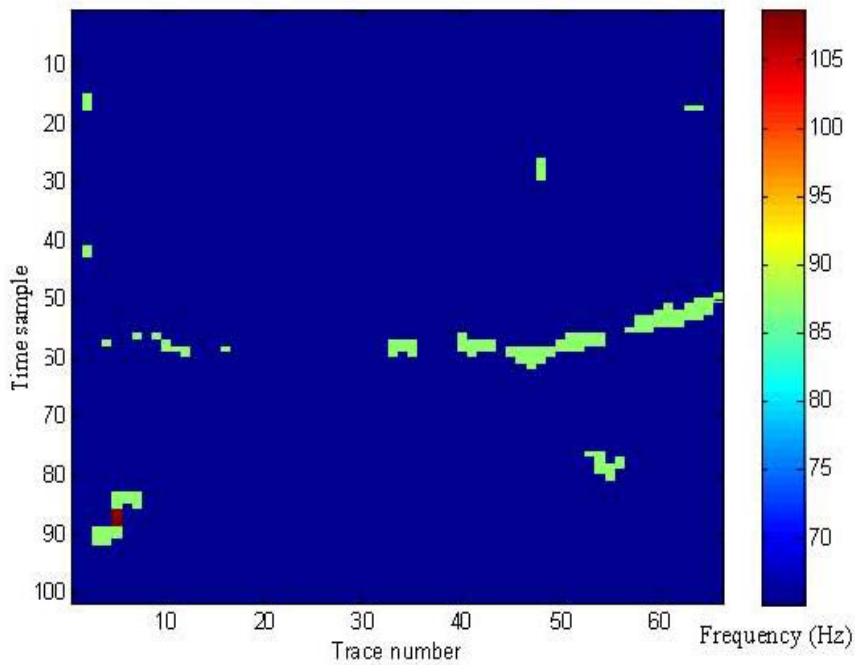
شکل ۱۰. قسمتی از یک مقطع لرزه‌ای واقعی با فاز صفر برداشته شده از نرم‌افزار Winpicks شامل لایه‌های نازک (فاصله نمونه‌برداری ۲ میلی‌ثانیه است).



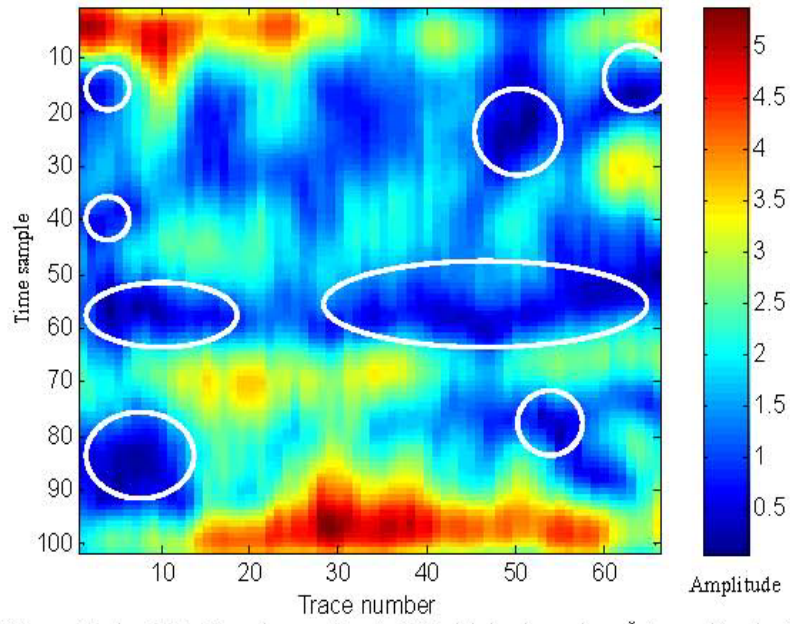
شکل ۱۱. نشانگر بسامد قله مربوط به مقطع نشان داده شده در شکل ۱۰ با استفاده از پنجره‌ای با طول ۲۳ نمونه زمانی. در محل لایه‌های نازک که محدوده آنها با بیضی سفیدرنگ نشان داده شده است، بسامد قله متفاوت از مقدار بسامد غالب مقطع است (با توجه به طول کم پنجره و تفکیک کم بسامدی، در محل‌هایی غیر از لایه نازک فرکانس غالب حدود ۴۵ هرتز ملاحظه می‌شود) اما محل لایه‌هایی با حداکثر ضخامت $\lambda/6$ (ضخامت زمانی دوطرفه ۰/۰۱۰ ثانیه) هنوز کاملاً واضح نیستند.



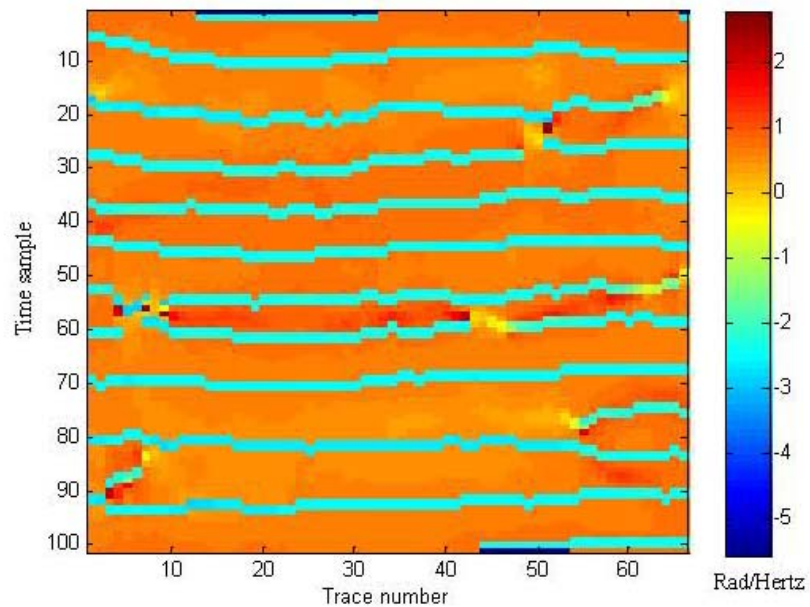
شکل ۱۲. نشانگر دامنه قله مربوط به مقطع نشان داده شده در شکل ۱۰ با استفاده از پنجره‌ای با طول ۲۳ نمونه زمانی. در محل لایه‌های نازک که محدوده آنها با بیضی سفید نشان داده شده است این نشانگر بی‌هنجاری کم‌دامنه‌ای را نشان می‌دهد. اما هنوز محل لایه‌های نازک با حداکثر ضخامت $\lambda/6$ (ضخامت زمانی دو طرفه 0.10×0.10 ثانیه) به طور کامل مشخص نیست.



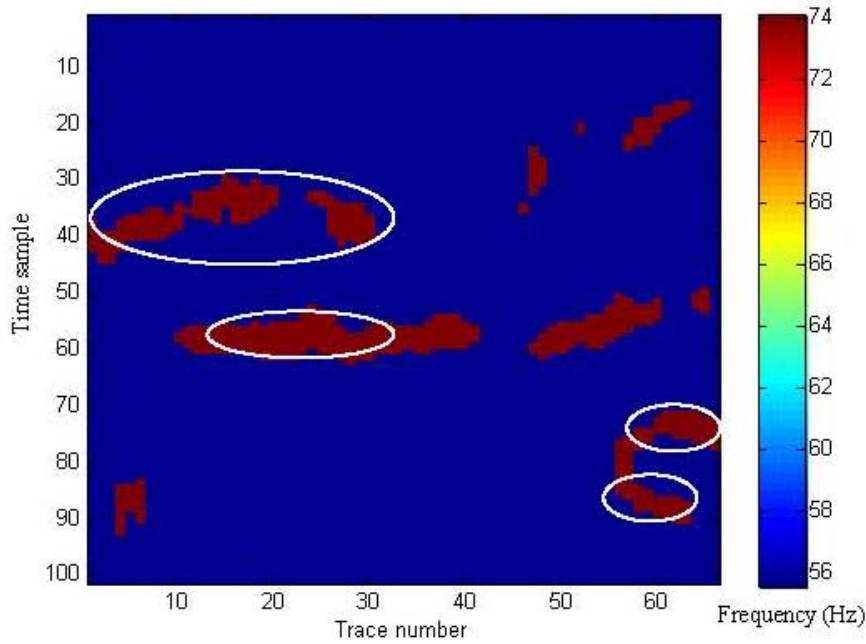
شکل ۱۳. نشانگر بسامد قله به‌دست آمده با پنجره‌ای با طول ۲۳ نمونه زمانی مربوط به مقطع نشان داده شده در شکل ۱۰ در بازه بسامدی ۶۵ تا ۱۰۹ هرتز. در محل‌هایی که این نشانگر بیشترین مقدار را نشان می‌دهد، لایه‌های نازک با حداکثر ضخامت $\lambda/6$ (ضخامت زمانی دو طرفه 0.10×0.10 ثانیه) وجود دارند.



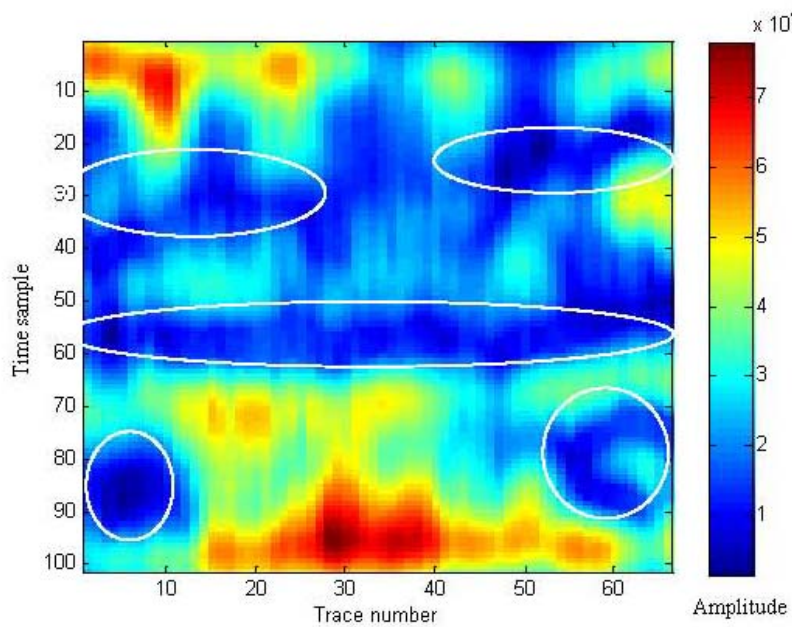
شکل ۱۴. نشانگر دامنه قله به دست آمده با پنجره‌ای با طول ۲۳ نمونه زمانی مربوط به مقطع نشان داده شده در شکل ۱۰ در بازه بسامدی ۶۵ تا ۱۰۹ هرتز. این نشانگر در محل‌هایی با کمترین مقدار نسبت به زمینه که با بیضی سفید رنگ نشان داده شده‌اند، محل لایه‌های نازک با حداکثر ضخامت $\lambda/6$ (ضخامت زمانی دوطرفه 0.10 ثانیه) را مشخص می‌کند.



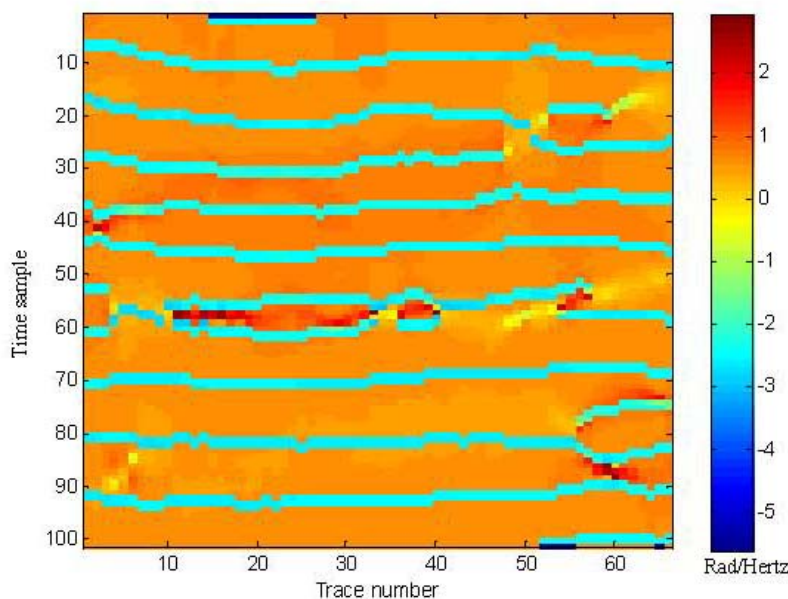
شکل ۱۵. نشانگر تغییرات محلی فاز با بسامد به دست آمده با پنجره‌ای با طول ۲۳ نمونه زمانی مربوط به مقطع نشان داده شده در شکل ۱۰ به ازای بسامد ۶۵ هرتز. مقدار تغییرات محلی فاز با بسامد برابر با $2-$ ، در محل بازتاب‌ها از مرز لایه‌ها (قله موج‌ها) قرار دارند. همچنین محل لایه‌های نازک با حداکثر ضخامت $\lambda/6$ (ضخامت زمانی دوطرفه 0.10 ثانیه) با رنگ‌های زرد روشن و سرخ پررنگ مشخص شده است.



شکل ۱۶. نشانگر بسامد قله به‌دست آمده با پنجره‌ای با طول ۲۷ نمونه زمانی مربوط به مقطع نشان داده شده در شکل ۱۰ در بازه بسامدی ۵۶ تا ۹۳ هرتز. در محل‌هایی که این نشانگر بیشترین مقدار را نشان می‌دهد، لایه‌های نازک با حداکثر ضخامت $\lambda/4$ (ضخامت زمانی دوطرفه ۰٫۱۸ ثانیه) وجود دارند. قسمت‌هایی که با بیضی سفیدرنگ نشان داده شده‌اند به‌نظر می‌رسد که محل حضور لایه‌هایی با ضخامت بین $\lambda/6$ تا $\lambda/4$ باشند.



شکل ۱۷. نشانگر دامنه قله به‌دست آمده با پنجره به طول ۲۷ نمونه زمانی مربوط به مقطع نشان داده شده در شکل ۱۰ در بازه فرکانسی ۵۶ تا ۹۳ هرتز. این نشانگر در محل‌هایی با کمترین مقدار نسبت به زمینه که با بیضی سفید رنگ مشخص شده‌اند، محل لایه‌های نازک با حداکثر ضخامت $\lambda/4$ (ضخامت زمانی دو طرفه ۰٫۱۸ ثانیه) را مشخص می‌کند.



شکل ۱۸. نشانگر تغییرات محلی فاز با بسامد به دست آمده با پنجره‌ای با طول ۲۷ نمونه زمانی مربوط به مقطع نشان داده شده در شکل ۱۰ به ازای بسامد ۵۶ هرتز. مقدار تغییرات محلی فاز با بسامد برابر با ۲-، تقریباً در محل بازتاب‌ها از مرز لایه‌ها قرار دارد. همچنین محل لایه‌های نازک با حداکثر ضخامت $\lambda/4$ (ضخامت زمانی دوطرفه ۱۸ ر ۰ ثانیه) با رنگ‌های زرد روشن و نارنجی پررنگ تا سرخ مشخص شده‌اند.

۸ نتیجه‌گیری

نازک بی‌هنجاری (مقدار متفاوت) نشان نمی‌دهد و یا به دلیل تفکیک بسامدی کم، تفاوت مشخص می‌شود. بنابراین استفاده هم‌زمان از چندین نشانگر لازم است.

۳- با محاسبه بسامد قله و دامنه قله در بازه‌های بسامدی کوچک از طیف دامنه محلی به دست آمده در یک پنجره زمانی، تاثیر عواملی همچون تفکیک بسامدی کم در نمایش طیف دامنه محلی در پنجره‌های کوچک و در نتیجه حضور بی‌هنجاری‌های ناخواسته کم‌رنگ‌تر می‌شود. همچنین اثر تغییر ضخامت روی مقدار نشانگرهای طیفی که تشخیص و تفکیک را مشکل می‌کند، تا حدودی برطرف و این باعث می‌شود که در بازه‌های بسامدی خاص تعیین شده با آزمون و خطا، لایه‌های نازک بهتر تصویر شوند.

۴- در زمینه محدودیت‌های این روش می‌توان گفت که از آنجا که با کاهش طول پنجره، از قدرت تفکیک بسامدی کاسته می‌شود، امکان اینکه لایه‌های بسیار نازک تصویر

با استفاده از تجزیه طیفی به روش تبدیل فوریه زمان کوتاه و نشانگرهای طیفی به دست آمده از آن در تصویرسازی لایه‌های نازک، نتایج زیر حاصل شد:

۱- با هم‌میخت موجک لرزه‌ای در پاسخ ضربه مرزهای بالا و پایین یک لایه که ایجاد بازتاب از یک لایه را می‌کند، دیگر رابطه چندان دقیقی بین ضخامت زمانی لایه و دوره تناوب قله‌ها و شکاف‌ها در طیف بسامدی و نیز روابط دقیقی بین بسامد در محل قله‌ها و شکاف‌های طیفی با ضخامت زمانی دو طرفه لایه وجود ندارند. بنابراین خاصیت یا ایده اصلی به کار رفته در تصویر کردن لایه‌های نازک با استفاده از نشانگرهای طیفی، تنها تفاوت طیف بسامدی (طیف دامنه و طیف تغییرات فاز با بسامد) دو مرز از یک لایه نسبت به طیف بسامدی یک واقعه (یک مرز از لایه) است.

۲- در برخی ضخامت‌ها، یک نشانگر خاص در محل لایه

- D seismic techniques: A case history using spectral decomposition and coherency: *The Leading Edge*, **17**, 1294-1298.
- Robertson, J. D. and Nogami, H. H., 1984, Complex seismic trace analysis of thin beds: *Geophysics*, **49**, 344-352.
- Taner, M. T., Koehler, F. and Sheriff, R. E., 1979, Complex seismic trace analysis: *Geophysics*, **44**, 1041-1063.
- Widess, M. B., 1973, How thin is a thin bed: *Geophysics*, **38**, 1176-1180.

نشوند وجود دارد. بنابراین کمترین ضخامت قابل تشخیص بستگی به بسامد غالب موجک منبع لرزه‌ای و فاصله نمونه‌برداری زمانی دارد. به‌علاوه، با در نظر گرفتن نایب بودن امواج لرزه‌ای از آنجاکه در این روش طول پنجره متناسب با میانگین دوام زمانی موجک منبع لرزه‌ای انتخاب می‌شود، امکان خطا وجود دارد.

منابع

- آراسته، ه.، ۱۳۸۶، تحلیل زمان-فرکانس طیفی و لایه‌های نازک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک (گرایش لرزه‌شناسی)، دانشگاه تهران، مؤسسه ژئوفیزیک.
- Bodine, J. H., 1986, Waveform analysis with seismic attributes: *Oil & Gas J.*, **84**, 59-63.
- Castagna, J. P. and Sun, S., 2006, Comparison of spectral decomposition methods: *First Break*, **24**, 75-79.
- Chopra, S. and Marfurt, K., 2006, Seismic attributes—a promising aid for geologic prediction: Paper presented at 68th conference of EAGE, 12-15 June, Vienna.
- Henderson, J., Purves, S. J. and Leppard, C., 2007, Automated delineation of geological elements from 3D seismic data through analysis of multichannel, volumetric spectral decomposition data: *First Break*, **25**, 87-93.
- Liu, J. and Marfurt, K. J., 2006, Thin bed thickness prediction using peak instantaneous frequency: Paper presented at 76th annual meeting of the Society of Exploration Geophysicists, 1-6 October, New Orleans, Louisiana.
- Marfurt, K. J. and Kirilin, R. L., 2001, Narrow-band spectral analysis and thin bed tuning: *Geophysics*, **66**, 1274-1283.
- Neidell, N. S. and Poggiagliomi, E., 1977, Stratigraphic modeling and interpretation-Geophysical principles and techniques, in Peyton, C. E., Ed., *Seismic stratigraphy applications to hydrocarbon exploration: AAPG Memoir*, **26**, 389-416.
- Partyka, G., Gridley, J. and Lopes, J., 1999, Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization: *The Leading Edge*, **18**, 353-360.
- Peyton, L., Bottjer, R. and Partyka, G., 1998, Interpretation of incised valleys using new 3-