

نشانگر لرزه‌ای تک بسامدی در حوزه زمان- بسامد

احسان ذبیحی نائینی^۱ و حمیدرضا سیاهکوهی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ استادیار گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۴۶۸، پذیرش نهایی: ۸۶۱۰۲۵)

چکیده

تجزیه طیفی ابزاری قدرتمند برای تحلیل داده‌های لرزه‌ای است. تبدیل فوری امکان بررسی محتوای بسامدی سیگنال را فراهم می‌کند. اما برای سیگنال‌های غیر ایستا، از جمله سیگنال لرزه‌ای، که محتوای بسامدی آنها با زمان تغییر می‌کند تبدیل یک‌بعدی به فضای بسامد برای پاره‌ای از اهداف پردازشی کافی نیست. قبلاً انتقال ردلرزه به فضای زمان و بسامد را با استفاده از تبدیل فوری روی پنجره‌های کوچکی به دست می‌آوردند. این روش تحت عنوان تبدیل فوری زمان کوتاه شناخته می‌شد. قدرت تفکیک زمان- بسامدی در روش تبدیل فوری زمان کوتاه با انتخاب طول پنجره محدود می‌شد. بعدها مشکل پنجره کردن در تحلیل زمان- بسامد با استفاده از تبدیل موجک پیوسته برطرف شد. تبدیل موجک پیوسته از خاصیت تغییر مقیاس و جابه‌جایی موجک استفاده می‌کند و نقشه زمان- مقیاس سیگنال مورد نظر را تهیه می‌کند. مقیاس به‌نوعی نشانگر مؤلفه بسامدی است. تبدیل مقیاس به بسامد منجر به نقشه زمان- بسامد می‌شود که قابل مقایسه با نقشه زمان- بسامد حاصل از تبدیل فوری زمان کوتاه است. مقاطع لرزه‌ای تک بسامد که با استفاده از روش‌های تحلیل زمان- بسامد مقاطع لرزه‌ای تولید می‌شوند، در این مقاله از آنها در حکم نشانگر لرزه‌ای برای آشکارسازی سایه‌های کم بسامد ناشی از مخازن هیدروکربور و تجزیه و تحلیل لایه‌های نازک با ضخامت نزدیک به حد تیونینگ استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: تبدیل موجک پیوسته، حوزه زمان- بسامد، نشانگر لرزه‌ای، تبدیل فوری زمان کوتاه، لایه نازک، سایه

بسامد کم

Time-Frequency based single-frequency seismic attribute

Zabihi Naeini, E¹. and Siahkoochi, H. R².

¹M.Sc. student of Geophysics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²Assistant professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 30 Aug 2005, Accepted: 15 Jan 2008)

Abstract

Spectral decomposition is a powerful tool for analysis of seismic data. Fourier transform determines the frequency contents of a signal. But for analysis of non-stationary signals, 1-D transform to frequency domain is not sufficient. In early years, transforming of seismic traces into time and frequency domain was done via windowed Fourier transform, called a Short Time Fourier Transform (STFT). In this method the resolution of the results in time-frequency domain was controlled by the width of the selected window. Continuous Wavelet transform (CWT) was a remedy to solve this problem by using the scaleable wavelets. The scale in CWT can be related to the frequency bandwidth of the

wavelet. By converting the scale to frequency one can get the time-frequency map which is comparable to the time-frequency map obtained from STFT.

In this study, we applied CWT on a seismic section and extracted a single frequency seismic section from the resultant cube. The extracted sections were used as a seismic attribute to detect low frequency shadow of the hydrocarbon reserves over the study area as well as to analyze the existing thin layers on a synthetic seismic section.

Time-Frequency Analysis Methods, (a) STFT: The instantaneous frequency has often been considered as a way to introduce frequency dependence on time. If the signal is not narrow-band, however, the instantaneous frequency averages different spectral component in time. To become accurate in time, we therefore need a two dimensional time-frequency representation of the signal composed of spectral characteristics depending on time. By assuming that the signal is stationary when seen through a window of limited extent and moving the window along the signal in time, the Fourier transform of the windowed signals yields the Short Time Fourier Transform which is a two dimensional function in time-frequency domain.

(b) CWT: STFT requires a fixed time support. In practice, seismic data are non-stationary and using the STFT may not produce very reliable time-frequency map. Fixed window length and hence, fixed time-frequency resolution is a fundamental difficulty with the STFT for analyzing a non-stationary signal.

Continuous wavelet transform was introduced by Morlet et al. (1982). In CWT, time-frequency atoms are chosen in such a way that its time support changes for different frequencies honoring Heisenberg's uncertainty principle (Mallat, 1999; Daubechies, 1992). In this study we used Morlet wavelet that provides an easy interpretation from scale to frequency (Torrence and Compo, 1998).

Single Frequency Seismic Section, Application 1: In this study we used a seismic section over one of the reservoirs in the South-West of Iran, where the reservoir interval is in sandstone in the Asmari Formation. Productivity is proven, and especially on its middle and upper part contains hydrocarbons.

Mapping of a seismic trace into the time-frequency domain produces a two dimensional data set by adding a frequency axis. In a similar way a two dimensional seismic section will generate a 3D data cube in which the third axis is frequency up to the Nyquist frequency. Sections of single frequency extracted from the cube are called single frequency seismic section (SFS). Comparison of different SFSs can be utilized to detect low frequency shadows caused by the presence of the hydrocarbon reservoirs. This method can potentially be utilized as a tool for direct hydrocarbon detection (Zabihi, 2006). We compared the single frequency seismic section of the STFT and CWT and discussed the differences between the results of the two methods. In a single frequency seismic section at frequency 15 Hz we found a low frequency anomaly below the reservoir which is a known phenomena. This anomaly disappeared at higher frequency single frequency seismic sections.

Application 2: Another application is thin layer analysis in a time-frequency domain. The idea is that tuning thickness is dependent on the dominant frequency of the seismic data. We were used a wedge model to produce a synthetic section with tuning effect. By producing the SFS and using the higher frequency slices we were able to increase the resolution and separate the top and bottom of the edge model. Comparing STFT and CWT again showed the better performance of CWT.

Conclusion: Time-frequency resolution of CWT and STFT to extract the single frequency seismic section is compared. Better performance by CWT is due to the optimal time-frequency resolution and there is no need to select the window length which is a trial and error job in STFT.

As a result, the low frequency shadow below the reservoir proved to be a direct hydrocarbon indicator and the single frequency section introduced in this paper can be used for the analysis of this event. Also another useful application of thin layer analysis has been introduced and the usefulness has been proved.

Key words: CWT, Time-frequency domain, Seismic attribute, STFT, Thin layer, Low frequency shadow

۱ مقدمه

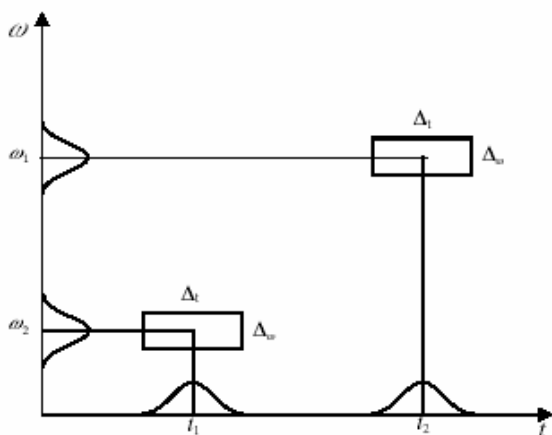
زمانی و بسامدی در حوزه زمان- بسامد لطمه نخورد، ضروری می‌نماید. در عمل، انتخاب طول پنجره بهینه به دلیل طبیعت غیر ایستای سیگنال‌ها با مشکل مواجه می‌شود (چاکرابتی و اوکایا، ۱۹۹۵). روش دیگر تحلیل سیگنال با استفاده از توابع پایه متمرکز است که دارای طول پنجره تطبیقی هستند. موجک با داشتن خواص مقیاس شونده و انتقال، چنین امکانی را برای ما فراهم می‌کند و غالباً از آن عنوان تبدیل موجک پیوسته یاد می‌کنند (مورلت و همکاران، ۱۹۸۲؛ گوپیلاد و همکاران، ۱۹۸۵؛ مالات، ۱۹۹۹؛ مرتینز، ۱۹۹۸). مقیاس به طول مؤثر پنجره گفته می‌شود و انتقال موجک در امتداد محور زمان نقشه زمان- مقیاس یا مقیاس‌نما را تولید می‌کند (ریول و وترلی، ۱۹۹۱). از آنجا که مقیاس با پهنای باند بسامدی موجک متناظر است (ابری و همکاران، ۱۹۹۳)، می‌توان مقیاس‌نما را به نقشه زمان- بسامد معادل تبدیل کرد (تورنسی و کمپو، ۱۹۹۸؛ چاکرابتی و اوکایا، ۱۹۹۵).

۲ تبدیل فوریه زمان کوتاه

در بسیاری از کاربردها، به خصوص سیگنال‌های غیر ایستا که محتوای بسامدی محلی اطلاعات بیشتری نسبت به محتوای بسامدی کلی دارند، تحلیل زمان- بسامد برای مطالعه خواص متفاوت سیگنال ضروری است. بسامد لحظه‌ای غالباً برای معرفی وابستگی بسامد به زمان به کار می‌رود. اما اگر سیگنال از نوع باند باریک نباشد، بسامد

در پردازش و تفسیر داده‌های لرزه‌ای، به کارگیری طیف زمان- بسامد داده‌های لرزه‌ای کاربردهای سودمندی به دنبال داشته است که در این مقاله به نمونه‌هایی از آنها اشاره می‌شود. پدیده‌های زمین‌شناسی عامل تولید بسیاری از بی‌هنجاری‌های بسامدی در داده‌های لرزه‌ای هستند که از آن جمله می‌توان به تضعیف، جذب، سایه‌های بسامد کم مخازن هیدروکربور و تیونینگ اشاره کرد (تر و شریف، ۱۹۷۷؛ چن و سیدنی، ۱۹۹۷؛ بارنس، ۱۹۹۳؛ وانگ، ۲۰۰۴). بعضی عوامل ژئوفیزیکی بی‌هنجاری‌های بسامدی عبارت‌اند از: کشیدگی برونراند نرمال، واهمامیخت و تحلیل سرعت نادرست (بارنس، ۱۹۹۲؛ ایلماز، ۲۰۰۱).

نمایش دوبعدی سیگنال در حوزه زمان- بسامد را غالباً با عنوان نقشه زمان- بسامد می‌شناسند. عموماً نقشه زمان- بسامد از تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) یا تبدیل فوریه پنجره‌ای به دست می‌آید. STFT، سیگنال را روی پنجره‌های زمانی خاصی مورد تحلیل قرار می‌دهد (مالات، ۱۹۹۹؛ مرتینز، ۱۹۹۸). در هر پنجره زمانی طیف دامنه و فاز در هر بسامد محاسبه و برحسب زمان، که عمدتاً مرکز پنجره است، رسم می‌شود. یکی از مشکلات این روش انتخاب طول مناسب برای پنجره است، چون که قدرت تفکیک بسامدی سیگنال را کنترل می‌کند. برای مثال، اگر طول پنجره خیلی کوچک باشد قدرت تفکیک زمانی در مقایسه با قدرت تفکیک بسامدی بهتر خواهد بود. بنابراین انتخاب طول بهینه پنجره به نحوی که قدرت تفکیک



شکل ۱. نمایش اجمالی اصل عدم قطعیت در صفحه زمان- بسامد تبدیل فوریه زمان کوتاه. جعبه عدم قطعیت هایزبرگ در کل صفحه ثابت است.

همان‌طور که از تعریف تبدیل فوریه زمان کوتاه مشخص است حاصل این تبدیل یک تابع مختلط شامل اطلاعات فاز و دامنه است. هر دو این اطلاعات برای بازسازی سیگنال ضروری هستند و گاهی از اطلاعات فاز برای تحلیل‌های خاص استفاده می‌شود. اما اغلب مربع دامنه که توزیع چگالی انرژی را به دست می‌دهد ترجیح داده می‌شود و از آن با عنوان طیف‌نما، $|Wf(\omega, \tau)|^2$ نام برده می‌شود (ریول و فلاندرین، ۱۹۹۲).

۳ تبدیل موجک پیوسته

تبدیل موجک را مورلت و همکاران در ابتدای دهه ۱۹۸۰ معرفی کردند. این تبدیل برای ارزیابی داده‌های زلزله به کار رفت (مورلت و همکاران، ۱۹۸۲). از آن زمان تاکنون انواع متفاوتی از تبدیلات موجک توسعه یافته‌اند و کاربردهای بسیار دیگری برای آنها پیدا شده است.

برای غلبه بر محدودیت قدرت تفکیک تبدیل فوریه زمان کوتاه می‌توان تصور کرد که قدرت تفکیک Δt و $\Delta \omega$ در صفحه زمان- بسامد تغییر می‌کنند تا یک تحلیل با قدرت تفکیک چندگانه به دست آید. از دیدگاه بانک

لحظه‌ای از اجزای متفاوت طیف در زمان میانگین می‌گیرد (ریول و وترلی، ۱۹۹۱). نکته مهم در تحلیل زمان- بسامد این است که هر دو تحلیل در حوزه‌های زمان و بسامد ترکیب می‌شوند؛ به این ترتیب که در حوزه زمان سیگنال پنجره می‌شود (بخش کوچکی از سیگنال برداشته می‌شود) و سپس تبدیل فوریه روی بخش پنجره شده اعمال می‌شود تا اطلاعات زمان- بسامد محلی به دست آیند. تحلیل زمان- بسامد از این دیدگاه را تبدیل فوریه زمان کوتاه گویند و نقشه زمان- بسامد حاصل طیف‌نما نامیده می‌شود (ریول و فلاندرین، ۱۹۹۲؛ ریول و وترلی؛ ۱۹۹۱).

با ضرب تابع پنجره متقارن $\varphi(t) \in L^2(\mathbb{R})$ به مرکز τ در بازه $[-1, 1]$ در سیگنال، مقادیر سیگنال خارج از بازه $[-1, 1]$ صفر می‌شود. تبدیل فوریه زمان کوتاه به صورت زیر داده می‌شود (مرتینز، ۱۹۹۸)

$$Wf(\omega, \tau) = \langle x(t), \varphi(t - \tau)e^{j\omega t} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\varphi(t - \tau)} e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

موقعیت پنجره زمان- بسامد با پارامترهای ω و τ معین می‌شود. در آنالیز زمان- بسامد می‌خواهیم که در حد امکان به قدرت تفکیک زمان- بسامدی زیادی برسیم، به عبارت دیگر می‌خواهیم پنجره زمان- بسامد در حد امکان کوچک باشد. اما از طرفی اصل عدم قطعیت هایزبرگ یک کران را برای سطح پنجره لازم می‌دارد (ذبیحی، ۱۳۸۴)

$$\Delta t \Delta \omega \geq \frac{1}{2} \quad (2)$$

نکته مهم اینکه، به محض انتخاب تابع پنجره برای تبدیل فوریه زمان کوتاه، قدرت تفکیک زمان- بسامد در کل صفحه زمان- بسامد ثابت می‌ماند. این مطلب به‌طور اجمالی (شماتیک) در شکل ۱ نشان داده شده است.

که توزیع انرژی سیگنال را در صفحه زمان- بسامد نمایش می‌دهد. تعریف مشابهی نیز در مورد موجک صادق است و مقیاس‌نما را به صورت مربع دامنه CWT تعریف می‌کند (ریول و وترلی، ۱۹۹۱).

برای تولید نقشه زمان- بسامد از رابطه زیر استفاده می‌کنیم (ذبیحی، ۱۳۸۴)

$$X(\omega, \tau) = \frac{1}{c} \int_{-\infty}^{\infty} \text{CWT}_x(\tau, a) e^{-j\omega\tau} H(a\omega) \frac{da}{a^{3/2}} \quad (5)$$

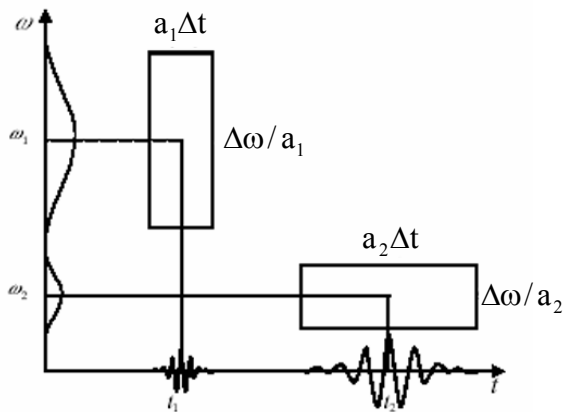
که در آن $H(a\omega)$ تبدیل فوریه مقیاس داده شده موجک است.

در شکل (۳-ب) و (۳-ج) طیف توان زمان- بسامد یک سیگنال غیر ایستا با استفاده از هر دو روش نشان داده شده است (در همه شکل‌ها دامنه‌ها به یک نرمالیزه می‌شوند تا مقایسه ملموس‌تر شود و رنگ سرخ نشان‌دهنده بیشینه دامنه است). سیگنال پیش گفته از دو باند بسامدی تشکیل شده که محتوای بسامدی آنها به‌طور نمایی با زمان افزایش می‌یابد. طیف توان زمان- بسامد نشان‌دهنده توزیع انرژی در صفحه زمان- بسامد است. شکل (۳-ب) از روش تبدیل فوریه زمان کوتاه و شکل (۳-ج) از روش تبدیل موجک پیوسته که هیچ نیازی به تعیین طول پنجره ندارد، به‌دست آمده است. با مقایسه قدرت تفکیک زمان- بسامد در هر دو مورد، دیده می‌شود که تبدیل فوریه زمان کوتاه به دلیل پهنای زیاد پنجره قادر نیست بسامدهای زیاد را در زمان از هم جدا کند. انتخاب طول پنجره کوتاه‌تر با بالا بردن قدرت تفکیک زمانی، قدرت تفکیک بسامدی را از ما می‌گیرد. بنابراین، تحلیل یک سیگنال غیر ایستا با استفاده از روش تبدیل فوریه زمان کوتاه، از نظر عملی مشکل انتخاب طول پنجره مناسب را دارد. از طرفی نبود نیاز به انتخاب طول پنجره به همراه قدرت تفکیک بهینه، از مزایای اصلی انتخاب تبدیل موجک پیوسته به‌مثابه تحلیل کننده

فیلتر قدرت تفکیک زمانی باید با بسامد مرکزی فیلترهای تحلیل‌کننده افزایش یابد. بنابراین می‌توان $\Delta\omega$ را به صورت زیر نوشت (ریول و وترلی، ۱۹۹۱)

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = c \quad (3)$$

در صورتی که رابطه (۳) برقرار باشد، می‌بینیم که $\Delta\omega$ و در نتیجه Δt با بسامد مرکزی فیلتر تغییر می‌کنند و البته اصل عدم قطعیت نیز رعایت می‌شود ولی در این حالت قدرت تفکیک زمانی در بسامدهای زیاد و قدرت تفکیک بسامدی در بسامدهای کم، خوب است (شکل ۲).



شکل ۲. نمودار اجمالی عدم قطعیت زمان- بسامدی در تبدیل موجک پیوسته. شکل جعبه عدم قطعیت هاینبرگ در هر زمان و بسامد خاص تغییر می‌کند.

تبدیل موجک پیوسته دقیقاً از همین ایده تبعیت می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\text{CWT}_x(\tau, a) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) h^* \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt \quad (4)$$

در این رابطه a مقیاس است و ضرب $\frac{1}{\sqrt{|a|}}$ نرمالیزه کردن انرژی به کار رفته است.

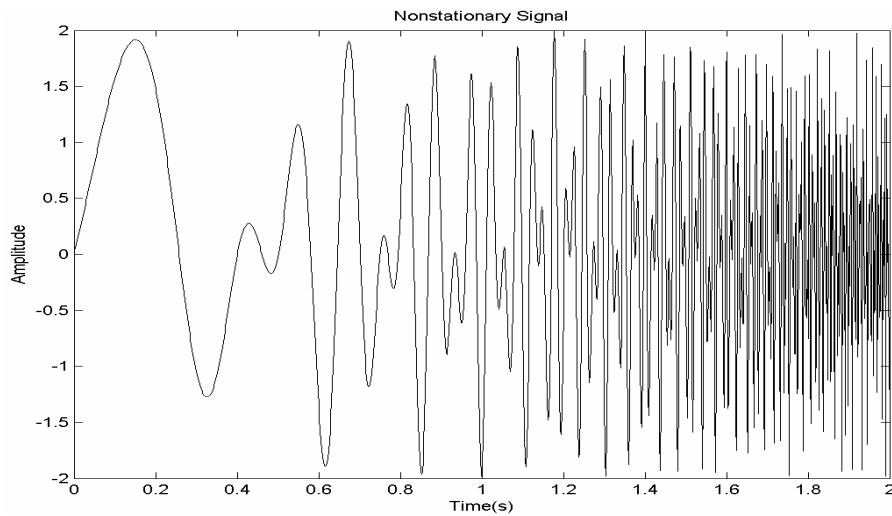
طیف‌نما که با مربع دامنه تبدیل فوریه زمان کوتاه تعریف شد ابزار بسیار مفیدی در تحلیل سیگنال است چرا

زمان- بسامد است. دامنه یک تک بسامد در حکم نشانگر لرزه‌ای، عمل تفسیر را اجرا کرد.

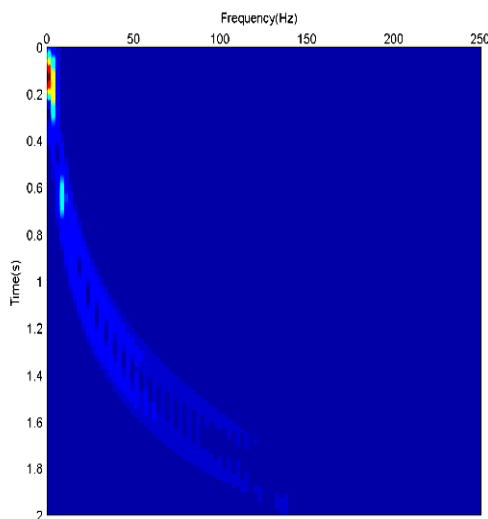
خواهیم دید که سایه‌های بسامد کم ناشی از مخازن هیدروکربور به خوبی خود را در نقشه زمان- بسامد مقطع لرزه‌ای نشان می‌دهند. سان و همکاران (۲۰۰۲) پیشنهاد می‌کنند که چنین پدیده‌ای می‌تواند در حکم نشانگر مستقیم هیدروکربور در نظر گرفته شود.

۴ تصویرسازی در فضای بسامد

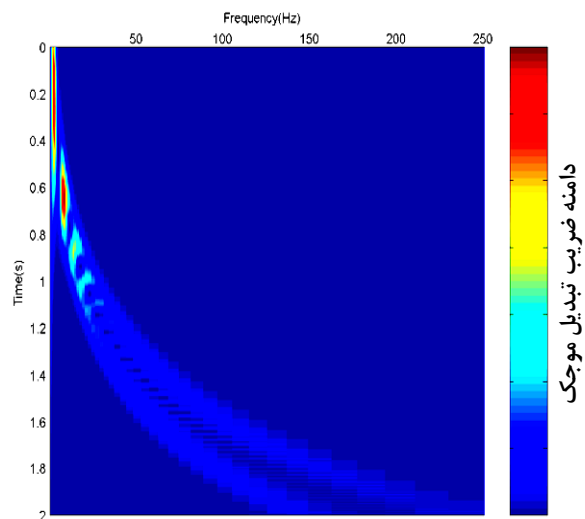
می‌توان گفت تصویرسازی و تفسیر داده‌های لرزه‌ای در حوزه بسامد یک فکر جدیدی است. یکی از روش‌های تحلیل زمان- بسامد سیگنال یک بعدی را به صفحه زمان- بسامد می‌برد. در صفحه زمان- بسامد می‌توان با برداشتن



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳. (الف) سیگنال غیر ایستا (ب) تبدیل فوری زمان کوتاه با طول پنجره ۳۵۰ میلی ثانیه (ج) تبدیل موجک پیوسته که هیچ نیازی به تنظیم طول پنجره ندارد.

تک بسامد با استفاده از تبدیل موجک پیوسته در بسامد ۱۵ هرتز را نشان می‌دهد. بی‌هنجاری تک‌بسامد در محل مخزن دیده می‌شود. از آنجا که این بی‌هنجاری غالباً حاوی مولفه‌های بسامدی کم است (فنگ و همکاران، ۲۰۰۴)، برای نمایش این واقعیت، این بی‌هنجاری در مقطع لرزه‌ای تک بسامد ۳۵ هرتز (شکل ۶) نیز نشان داده شد. همان‌طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود این بی‌هنجاری ضعیف‌تر شده است. با توجه به اینکه نویسندگان به گزارش زمین‌شناسی منطقه دسترسی نداشتند، لذا اظهار نظر کلی در مورد بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در زمان‌های دیرتر تا CDP شماره ۱۵۰ می‌تواند این باشد که احتمالاً آنها ناشی از حضور زون‌های گسلی‌اند. شایان ذکر است که گسل خوردگی در این ناحیه در عمق‌های کمتر (بردار سرخ) به‌وضوح از روی مقطع لرزه‌ای معلوم است. احتمال دیگر آنکه این بی‌هنجاری‌ها نشانیگر اثر به‌جا مانده از مهاجرت در لبه‌های مقطع لرزه‌ای باشد.

شکل‌های ۷ و ۸ مقاطع لرزه‌ای تک‌بسامد (۱۵ و ۳۵ هرتز) حاصل از تبدیل فوریۀ زمان کوتاه با طول پنجره ۲۰۰ میلی‌ثانیه‌اند. این مقاطع لرزه‌ای تک‌بسامد نیز به‌دلایلی که در مورد شکل‌های ۵ و ۶ ذکر شد انتخاب شدند. بررسی همهٔ مقاطع لرزه‌ای تک بسامد نشانیگر میزان حضور این بی‌هنجاری در بسامدهای متفاوت خواهد بود، که برای جلوگیری از طولانی شدن مقاله از آوردن آنها پرهیز شده است (برای مشاهدهٔ مقاطع بیشتر به ذبیحی ۱۳۸۴ رجوع شود). با توجه به نتایج این تحقیق و تحقیقات سان و همکاران (۲۰۰۲) و سینها و همکاران (۲۰۰۴) مشکل کار با مقاطع لرزه‌ای تک‌بسامد حاصل از تبدیل فوریۀ زمان کوتاه این است که به دلیل نبود قدرت تفکیک بهینه در این نوع تحلیل زمان- بسامد، بی‌هنجاری‌های کم بسامد در نواحی دیگر غیر از مخزن نیز پدیدار می‌شوند.

در تحلیل زمان- بسامد اعمال تبدیل روی یک ردلرزه منجر به پدید آمدن مجموعه‌ای از داده‌های دوبعدی می‌شود که بعد دوم آن فرکانس است، به همین ترتیب یک مقطع لرزه‌ای دوبعدی منجر به یک حجم دادهٔ سه‌بعدی می‌شود که محور سوم آن بسامد تا حد نایکوئیست است. به ازای هر مؤلفهٔ بسامدی موجود در دادهٔ لرزه‌ای می‌توان از حجم دادهٔ سه‌بعدی حاصل، مقطع لرزه‌ای تک بسامد استخراج کرد (ذبیحی، ۱۳۸۴).

الف- سایه‌های بسامد کم

مقایسهٔ مقاطع لرزه‌ای تک بسامد متفاوت را می‌توان برای آشکارسازی سایه‌های بسامد کم که توسط مخازن هیدروکربور ایجاد شده‌اند به‌کار رود. سایه‌های بسامد کم در محل مخزن هیدروکربور یا زیر آن پدیدهٔ آشنایی است. تضعیف امواج لرزه‌ای در یک مخزن تابعی از خواص سنگ مخزن است. حضور خردشدگی‌ها و هیدروکربور می‌تواند تضعیف مولفه‌های بسامد زیاد را در مخزن یا زیر آن موجب شود (فنگ و همکاران، ۲۰۰۴). مطالعات موردی متعددی روی سایه‌های کم بسامد زیر مخازن هیدروکربور توسط سان و همکاران (۲۰۰۲) و فنگ و همکاران (۲۰۰۴) گزارش شده است.

شکل ۴ مقطع لرزه‌ای برانبارش شده‌ای است مربوط به مخزن هیدروکربور حدود CDP شمارهٔ ۵۰۰ و زمان ۲۵۰۰ میلی‌ثانیه. در ادامه مقاطع لرزه‌ای تک بسامد حاصل از طیف‌نما و تبدیل موجک پیوسته را به‌طور مستقل مقایسه می‌کنیم و تفاوت‌های بین این دو تحلیل زمان- بسامد را واضح‌تر می‌سازیم.

همان‌طور که ذکر شد، در حوزهٔ زمان- بسامد به تعداد مؤلفه‌های بسامدی می‌توان مقطع لرزه‌ای تک بسامد داشت. برای نمونه، شکل ۵ یک مقطع لرزه‌ای

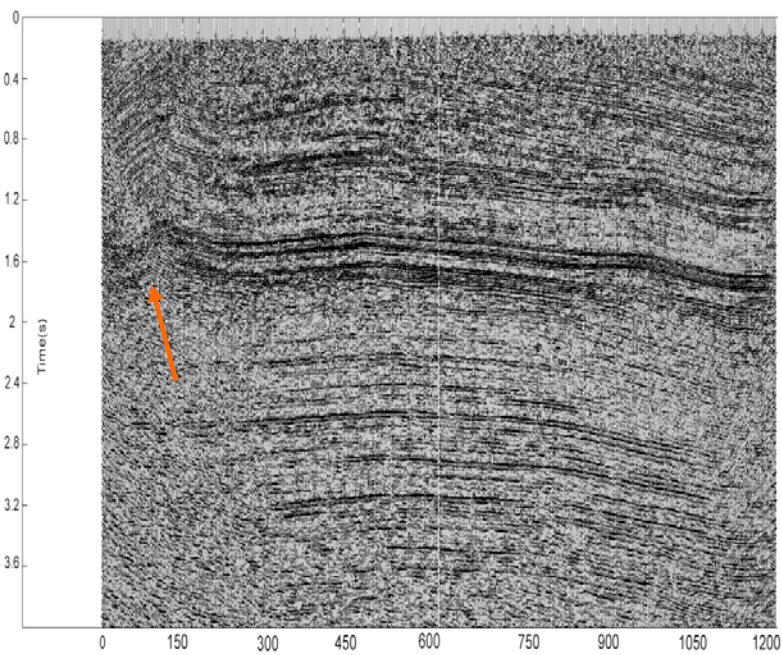
ب- لایه‌های نازک

تحلیل طیفی ابزاری است برای تصویرسازی و به نقشه درآوردن ضخامت زمانی لایه‌ها و گسستگی‌های موجود در داده‌های سه‌بعدی لرزه‌ای (پارتیکا، ۲۰۰۰).

وقتی یک لایه که در محیطی با خواص متفاوت قرار دارد ضخامتی به اندازه یک چهارم طول موج داشته باشد، بازتاب‌های کم مرز لایه تداخل سازنده خواهند داشت و دامنهٔ بیشینه خواهیم دید، این پدیده را تیونینگ (tuning) گویند. تیونینگ در تحلیل مخازن هیدروکربور و دیگر اهداف تفسیر لایه‌های نازک، دارای اهمیت است (شریف و جلدارت، ۱۹۹۵).

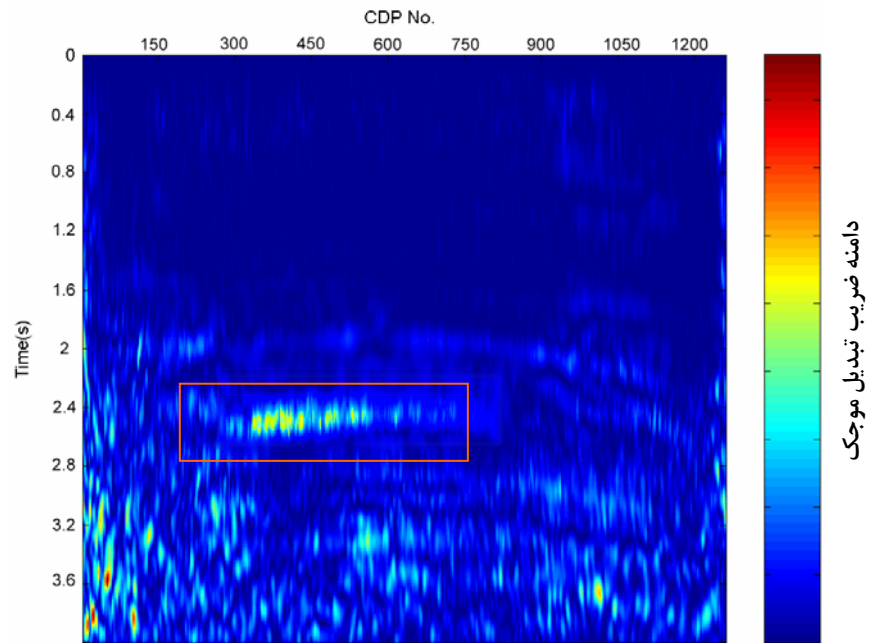
با در نظر گرفتن یک مدل لرزه‌ای ساده، قابلیت تحلیل زمان- بسامد در بررسی لایه‌های نازک را مورد تحقیق قرار می‌دهیم. مدل زمین‌شناسی شکل ۹ را در نظر می‌گیریم.

از دیدگاه زمین‌شناسی مدل گوه‌ای می‌تواند نشانگر موارد متفاوتی از جمله خاتمۀ یک لیتولوژی خاص با تغییر جانبی ضخامت، نازک‌شدگی یک لایهٔ اشباع از گاز در یک مخزن ماسه سنگی و یا دیگر موارد جالب اکتشافی باشد (رابرتسون و فیشر، ۱۹۸۸). لایهٔ نازک اول که ضخامتی در حدود تیونینگ دارد صرفاً برای بررسی لایه‌های نازک انتخاب شده است اما مدل گوه‌ای و مشخصات زمین‌شناسی آن الهام گرفته از یک مخزن در ساحل مکزیک است (رابرتسون و فیشر، ۱۹۸۸) و در ردلرزهٔ شمارهٔ ۱۸ به حد تیونینگ می‌رسد. لرزه‌نگاشت مصنوعی این مدل در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. موجک این لرزه‌نگاشت با فاز حداقل و بسامد مرکزی ۴۰ هرتز است که از اولین مشتق تابع توزیع نرمال گاوسی به دست می‌آید.

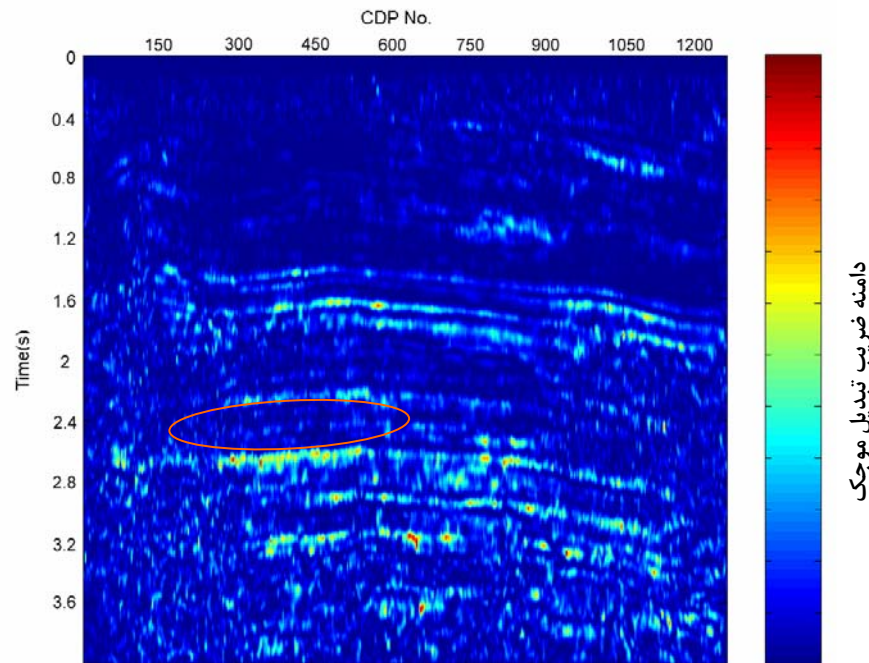


شماره ردلرزه

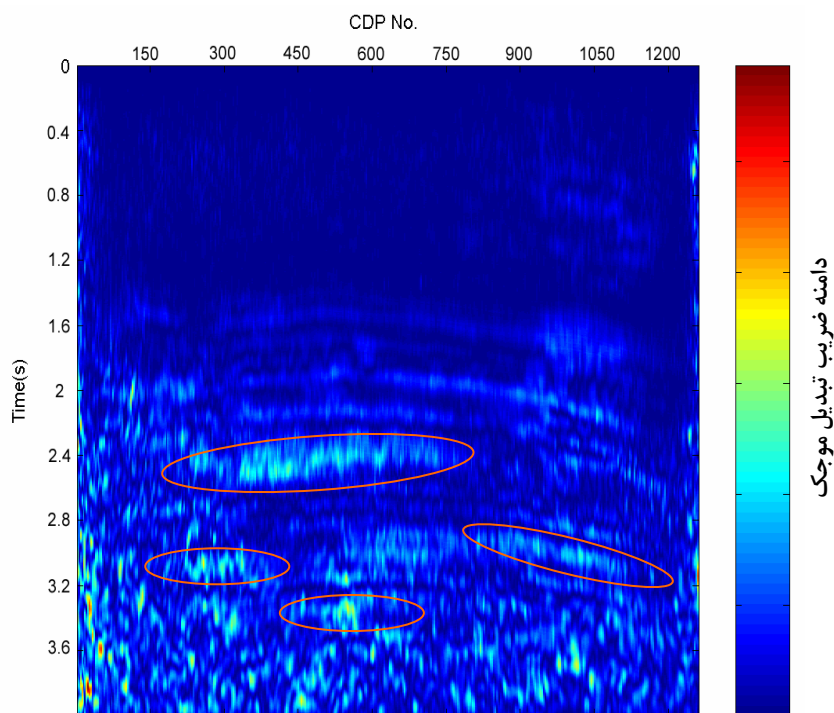
شکل ۴. مقطع لرزه‌ای با ۱۲۶۰ ردلرزه و طول زمانی ۴ ثانیه. وجود مخزن حدود CDP شمارهٔ ۵۰۰ و زمان ۲۵۰۰ میلی‌ثانیه گزارش شده است. بردار سرخ وجود گسل را به وضوح نشان می‌دهد.



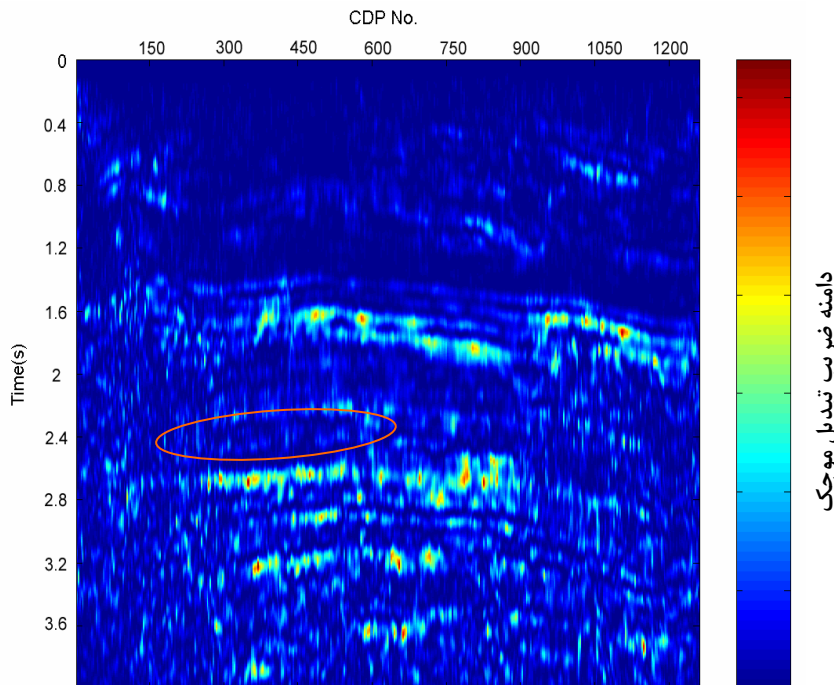
شکل ۵. مقطع لرزه‌ای تک‌بسامد حاصل از تبدیل موجک پیوسته در بسامد ۱۵ هرتز. بی‌هنجاری ناشی از مخزن در زمان حدود ۲/۵ ثانیه با مستطیل سرخ نشان داده شده است.



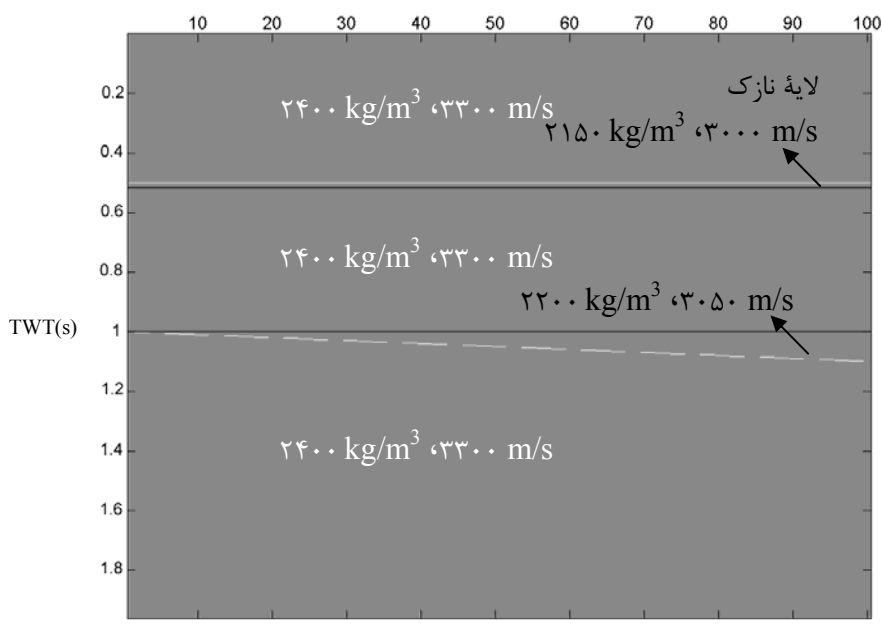
شکل ۶. مقطع لرزه‌ای تک بسامد حاصل از تبدیل موجک پیوسته در بسامد ۳۵ هرتز. دیده می‌شود که با افزایش بسامد افق‌های دیگر ظاهر می‌شوند.



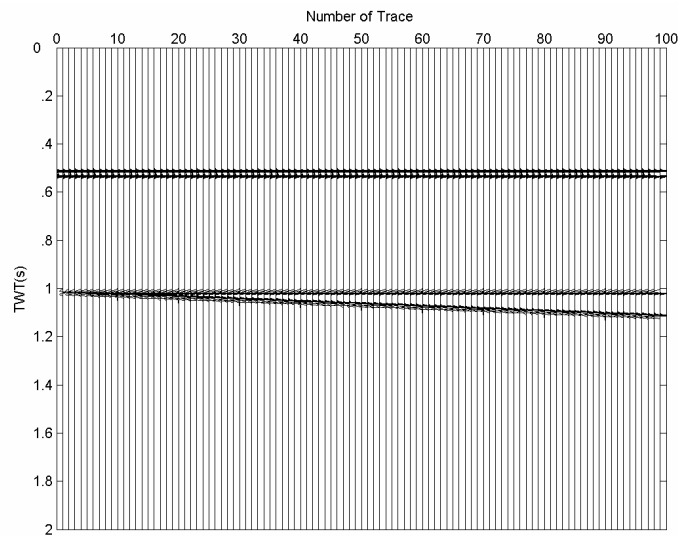
شکل ۷. مقطع لرزه‌ای تک بسامد حاصل از تبدیل فوریه زمان کوتاه در بسامد ۱۵ هرتز با طول پنجره ۲۰۰ میلی‌ثانیه. علاوه بر بی‌هنجاری مخزن، بی‌هنجاری‌های هم‌دامنه با آن در نواحی دیگر غیر از مخزن نیز ظاهر می‌شوند که ناشی از نبود قدرت تفکیک بهینه در روش تبدیل فوریه زمان کوتاه است و با بیضی سرخ نشان داده شده‌اند.



شکل ۸. مقطع لرزه‌ای تک‌بسامد حاصل از تبدیل فوریه زمان کوتاه در بسامد ۳۵ هرتز با طول پنجره ۲۰۰ میلی‌ثانیه. همان‌طور که انتظار می‌رفت بی‌هنجاری‌های بسامد کم ناپدید شده‌اند. در صورت مقایسه با شکل ۶ دیده می‌شود که قدرت تفکیک تبدیل فوریه زمان کوتاه در جداسازی افق‌ها به وضوح کمتر از تبدیل موجک پیوسته است.



شکل ۹. مدل زمین‌شناسی. محور عمودی زمان دوطرفه و محور افقی دورافت است. پیکان‌ها بیانگر لایه نازک در آن محل است.



شکل ۱۰. لرزه نگاشت مصنوعی مدل زمین‌شناسی شکل ۹.

در بسامدهای زیاد به حد تیونینگ می‌رسند و در نتیجه امکان تصویرسازی با استفاده از مقاطع لرزه‌ای تک بسامد را به ما می‌دهد (ذبیحی، ۱۳۸۴).
شکل ۱۱ مقاطع لرزه‌ای تک بسامد حاصل از تبدیل

تصویرسازی لایه‌های نازک در حوزه زمان- بسامد برای بررسی لایه‌های نازک بسیار مفید است چراکه بسامدهای بیشتر از بسامد غالب، مقادیر کمتری از یک چهارم طول موج را به خود می‌گیرند و لایه‌های نازک‌تر

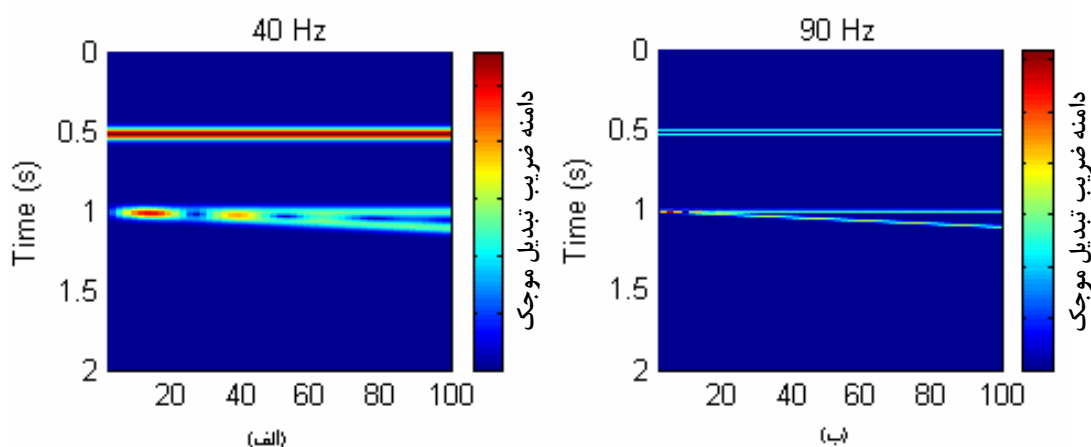
۵ نتیجه گیری

در لرزه‌نگاری تحلیل درست از نشانگرها نقش مهمی را در به دست آوردن اطلاعات زیرسطحی بازی می‌کند. نشانگرهایی که براساس طیف زمان- بسامد به دست می‌آیند مدت زمان زیادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همان‌طور که نتایج این بررسی نشان دادند، تبدیل موجک پیوسته تا حدی مشکلات تبدیل فوریۀ زمان کوتاه را برطرف می‌کند. الگوریتم‌های تدوین شده در این تحقیق در محیط Matlab از تبدیل فوریۀ سریع استفاده می‌کنند که سرعت محاسبه زیادی دارند و به لحاظ صرف زمان، با روش‌های دیگر (تفکیک لایه نازک به کمک بعد فرکتالی و مانند آن) قابل مقایسه هستند.

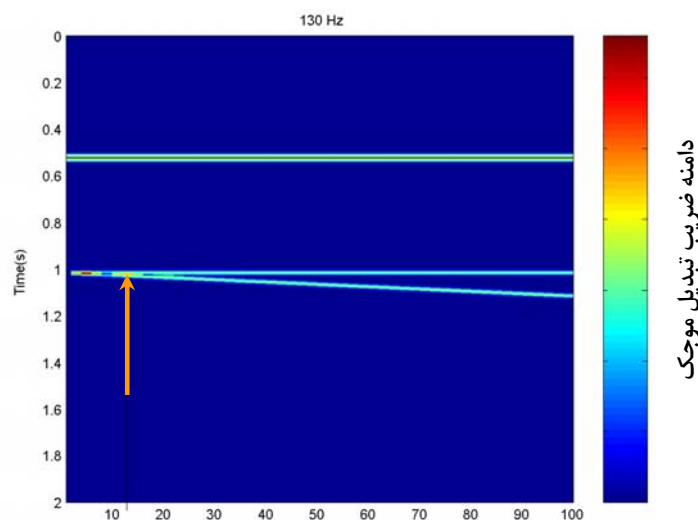
از آنجا که در لرزه‌شناسی اکتشافی در محدوده بسامدهای کم، نیاز به تفکیک بسامدها از هم داریم و در بسامدهای زیاد قدرت تفکیک زمانی بسیار مفیدتر از اطلاعات بسامدی‌اند با استفاده از الگوریتم تدوین شده براساس تبدیل موجک، در این تحقیق توانستیم از این ویژگی استفاده کنیم و سایه‌های بسامد کم و ضخامت‌های کمتر از تیونینگ را نشان دهیم.

موجک پیوسته را نشان می‌دهد. در بسامد ۴۰ هرتز که بسامد غالب موجک است انتظار تفکیک زیاد و کم لایه‌ها را نداریم اما در بسامد ۹۰ هرتز لایه نازکی که در حدود زمان نیم‌ثانیه است به خوبی تفکیک شده و در مورد لایه گوه‌ای شکل حد تیونینگ به ردلرزه شماره ۱۴ منتقل شده است. برای تأکید بیشتر مقطع لرزه‌ای تک بسامد حاصل از تبدیل موجک پیوسته را در بسامد ۱۳۰ هرتز نیز ساخته‌ایم که به وضوح از شکل ۱۲ پیداست که لایه‌های نازک بهتر از هم تفکیک داده شده‌اند.

استفاده از این فن در مورد داده‌های واقعی نیز منطقی است چرا که نه فقط هیچ اصل فیزیکی زیر پا گذاشته نشده بلکه دقیقاً از فیزیک مسئله برای تصویرسازی استفاده شده است و با زیاد کردن بسامد مورد بررسی کاری می‌کنیم که لایه در ضخامت بیشتر به حد فن برسد. این فن امروزه در بسیاری از پروژه‌ها اجرا می‌شود (پارتیکا ۲۰۰۰؛ سینها و همکاران، ۲۰۰۴). متأسفانه امکان دسترسی به داده‌های واقعی حاوی گوه به همراه اطلاعات دقیق زمین‌شناسی مقدور نبود، لذا امکان اجرای الگوریتم روی داده‌های واقعی، میسر نشد.



شکل ۱۱. مقاطع لرزه‌ای تک بسامد حاصل از تبدیل موجک پیوسته. الف. بسامد ۴۰ هرتز که بسامد غالب موجک است و انتظار تفکیک زیاد و کم لایه‌های نازک را نداریم. ب. بسامد ۹۰ هرتز که در آن لایه واقع در ۰/۵ ثانیه از هم تفکیک می‌شود و حد تیونینگ در لایه گوه‌ای به ردلرزه شماره ۱۴ انتقال یافته است.



شکل ۱۲. مقطع لرزه‌ای تک بسامد حاصل از تبدیل موجک پیوسته در بسامد ۱۳۰ هرتز. دیده می‌شود که لایه‌ی واقع در زمان ۰/۵ ثانیه به‌خوبی تفکیک داده شده و حد تیونینگ در لایه‌ی گوه‌ای نیز حدود ردلرزه ۱۲ است (بردار سرخ).

Goupillaud, P., Grossmann, A., and Morlet, J., 1985, Cycle octave and related transforms in seismic signal analysis: *Geoexploration*, **23**, 85-102.

Mallat, S., 1999, *A wavelet tour of signal processing*, Academic Press, California, USA.

Mertins, A., 1998, *Signal analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-frequency transforms and applications*, John Wiley & Sons, West Sussex, England.

Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E., and Giard, D., 1982, Wave propagation and sampling theory: *Geophysics*, **47**, 203-236.

Partyka, G. A., 2000, Seismic attribute sensitivity to energy, bandwidth, phase, and thickness: *SEG expanded abstracts*, 2409-2412.

Rioul, O., and Flandrin, P., 1992, Time-scale energy distributions: A general class extending wavelet transforms: *IEEE T. Signal Proces.*, **40**, 1746-1757.

Rioul, O., and Vetterli, M., 1991, Wavelets and signal processing: *IEEE Signal Processing Magazine*, October 1991.

Robertson, J. D., and Fisher, D. A., 1988, Complex seismic attributes: *Leading Edge*, **7**, 6, 22-26.

Sheriff, R. E., and Geldart L. P., 1995, *Exploration Seismology*: Cambridge University Press.

Sinha, S. K., Routh, P. S., Anno, P. D., and Castagna, J. P., 2004, Time-frequency attributes of seismic data using continuous

منابع

ذبیحی نائینی، ا، ۱۳۸۴، تحلیل مقاطع لرزه‌ای در حوزه زمان-بسامد برای تصویرسازی لایه‌های نازک و مخازن هیدروکربور، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

Abry, P., Goncalves, P., and Flandrin, P., 1993, Wavelet-based spectral analysis of 1/f processes: *IEEE Internat. Conf. Acoustic, Speech and Signal Processing*, **3**, 237-240.

Barnes, A. E., 1992, Another look at NMO stretch: *Geophysics*, **57**, 749-751.

Barnes, A. E., 1993, Instantaneous spectral bandwidth and dominant frequency with application to seismic reflection data: *Geophysics*, **58**, 419-428.

Chakraborty, A., and Okaya, D., 1995, Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods: *Geophysics*, **60**, 1906-1916.

Chen, Q., and Sidney, S., 1997, Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring: *Leading Edge*, **16**, 459-469.

Feng, S., Robinson, G. C., and Jiang, T., 2004, Instantaneous spectral analysis applied to reservoir imaging and producibility characterization: *SEG expanded abstracts*, 1406-1409.

- wavelet transform: SEG expanded abstracts, 1481-1484.
- Sun, S., Castagna, J. P., and Seigfried, R. W., 2002, Examples of wavelet transform time-frequency analysis in direct hydrocarbon detection: 72nd Ann. Internat. Mtg., SEG, Salt Lake City, Utah, USA.
- Taner, M. T., and Sheriff, R. E., 1977, Application of amplitude, frequency, and other attributes to stratigraphies and hydrocarbon determination: AAPG Memoir, **26**, 301-327.
- Torrence, C., and Compo, G. P., 1998, A practical guide to wavelet analysis: B. Am. Meteorol. Soc., **79**, 1, 61-78.
- Wang, Y., 2004, Q analysis on reflection seismic data: Geophysical Research Letters, 31.
- Yilmaz, O., 2001, Seismic data analysis, SEG Publication.