

## شناسایی مستقیم منابع هیدروکربنی به روش تعیین فاکتور کیفیت با استفاده از محاسبه چگالی انرژی در حوزه زمان-مقیاس

امین روشندل کاهو<sup>۱\*</sup> و حمیدرضا سیاهکوهی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۸/۲/۲۲، پذیرش نهایی: ۸۸/۱۲/۱۸)

### چکیده

در لرزه‌شناسی، فاکتور کیفیت محیط انتشار موج به‌منزله یک نشانگر لرزه‌ای برای بررسی بی‌هنجاری‌های مربوط به افت دامنه، مخصوصاً در مواردی که افت دامنه ناشی از حضور هیدروکربن باشد، به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحقیقات نشان داده است که افت انرژی (یا دامنه) امواج که معمولاً تحت عنوان پدیده تضعیف (یا جذب) امواج لرزه‌ای بیان می‌شود، برای بسامدهای زیاد بیشتر از بسامدهای کم است. در اینجا با استفاده از تبدیل موجک پیوسته به بررسی پدیده تضعیف پرداخته و چگالی انرژی داده لرزه‌ای در مقیاس‌های گوناگون محاسبه می‌شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد که افت انرژی برای مقیاس‌های کوچک (بسامد زیاد) بیشتر از مقیاس‌های بزرگ (بسامدهای کم) است. همچنین از این روش برای شناسایی بی‌هنجاری‌های مربوط به افت انرژی ناشی از حضور هیدروکربن استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که در روش مبتنی بر موجک مورلت بهبودیافته نیاز به محاسبات کمتر است. همچنین کارایی روش روی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی بررسی و نتایج به‌دست آمده از این روش با نتایج به‌دست آمده از وارون داده‌های لرزه‌ای مقاومت صوتی با استفاده از نرم‌افزار همپسن-راسل (Hampson-Russell) مقایسه شد که همخوانی زیادی نتایج هر دو روش را نشان می‌دهد. همچنین نتایج حاکی از حساسیت کمتر موجک مورلت بهبود یافته نسبت به موجک مورلت معمولی به نوفه است.

واژه‌های کلیدی: اکتشاف هیدروکربن، میرایی، تبدیل موجک پیوسته، مقیاس، چگالی انرژی

## Direct hydrocarbon identification by quality factor determination using energy density calculation in time-frequency domain

Roshandel Kahoo, A.<sup>1</sup> and Siahkoohi, H. R.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. student of Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 22 May 2009, Accepted: 9 March 2010)

### Abstract

In exploration seismology quality factor is widely used as a seismic attribute to identify anomalies related to attenuation, especially those caused by hydrocarbon. Previous studies have indicated that seismic energy loss known as attenuation is greater for high frequency components of seismic data compared to the low frequency components. Here the continuous wavelet transform is used to study the attenuation of seismic data and to calculate the energy density at different scales. The results show that the energy loss at low scales is more than that of the high scales. The method is also used for determination of the anomalies related to energy attenuation due to the presence of hydrocarbon. The results indicated that using modified complex Morlet wavelet needs fewer computations

than the regular complex Morlet wavelet. We investigated the efficiency of the method on both synthetic and real seismic data and the results are compared to the results obtained from inversion of seismic data to acoustic impedance using the Hampson-Russell software. The results showed an acceptable correlation. We also found that regular complex Morlet wavelet is more sensitive to the presence of noise than the modified complex Morlet wavelet.

**Continuous Wavelet Transform:** The time domain continuous wavelet transform (CWT) of a signal  $f(t)$  can be defined as:

$$W_f(a,b) = \int f(t)\psi_{a,b}^*(t)dt \tag{1}$$

where, \* denotes the complex conjugate,  $a$  is scale,  $b$  is time shift and  $\psi(t)$  is the mother wavelet. Shifted and scaled version of the mother wavelet can be computed as:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{2}$$

We can define the frequency domain CWT as:

$$W_f(a,b) = \sqrt{a}F(\omega)e^{jb\omega}\psi^*(a\omega) \tag{3}$$

where,  $\omega$  is angular frequency,  $F(\omega)$  and  $\psi(\omega)$  are the Fourier transform of  $f(t)$  and mother wavelet, respectively (Poularikas, 2000). Since the Morlet's wavelet is similar to the seismic source wavelet, we used the complex Morlet wavelet and a modified version of it as the mother wavelet in our study (Li et. al., 2006).

**Energy Attenuation Density Equation:** Considering a plane wave  $U(\omega,z)$  propagating in the anelastic medium, assuming that the quality factor  $Q$  is constant, its propagating equation is defined as (Aki and Richard, 1980):

$$U(\omega,z) = U(\omega,0)e^{\frac{j\omega z}{c(\omega)}}e^{\frac{-\omega z}{2Qc(\omega)}} \tag{4}$$

where,  $\omega$  is angular frequency,  $z$  is propagating distance and  $c(\omega)$  is phase velocity.

The energy density  $E(\omega,z)$  at any angular frequency  $\omega$  is by definition:

$$E(\omega,z) = U(\omega,z)U^*(\omega,z) \tag{5}$$

By introducing Eq. (4) to Eq. (5) and calculating the frequency domain CWT, assuming that  $|U(\omega,0)|^2 = 1$  and  $Q \gg 1$  the wavelet domain energy density of signal can be obtained as:

$$E_a = e^{\frac{-t\omega_0}{Qa}} \tag{6}$$

Equation (6) shows that the energy of a signal in the wavelet domain is a function of the quality factor  $Q$  and scale factor  $a$  as well as travel time  $t$ . The larger  $Q$  is, the more slowly the energy attenuates; The smaller  $Q$  is, the faster the energy attenuates. The smaller the scale, the less the energy involved in the signal, because high scales correspond to low frequencies, and low scales correspond to high frequencies.

**Discussion:** This paper derives an energy attenuation formula for seismic waves in the wavelet-scale domain from wavelet theory and the seismic propagation equation in the anelastic medium. To investigate the efficiency of this method, we tested the method on both synthetic and real

seismic data. The results showed an acceptable correlation. We also found that regular complex Morlet wavelet is more sensitive to the presence of noise than the modified complex Morlet wavelet. Also, the results indicated that using the modified complex Morlet wavelet needs fewer computations than the regular complex Morlet wavelet.

**Key words:** Direct hydrocarbon identification, CWT, quality factor, time- frequency analysis

## ۱ مقدمه

تبدیل‌های زمان- بسامد و زمان- مقیاس ابزاری مناسب برای بررسی فاکتور کیفیت هستند. تبدیل‌های زمان- بسامد و زمان- مقیاس امروزه به‌مثابه ابزاری متداول برای بررسی سیگنال‌ها، به‌خصوص سیگنال‌هایی که در آنها محتوای بسامدی با زمان تغییر می‌کند (ناپایا) مورد استفاده قرار می‌گیرند. در لرزه‌شناسی از این تبدیل‌ها می‌توان در بخش تفسیر برای به‌دست آوردن نشانگرهای گوناگون برای شناسایی مخازن هیدروکربن و بررسی لایه‌های نازک و در بخش پردازش برای حذف نوفه‌های لرزه‌ای استفاده کرد (ماتوس و همکاران، ۲۰۰۵؛ کستگنا و همکاران، ۲۰۰۳؛ سینها و همکاران، ۲۰۰۵؛ لیته و همکاران، ۲۰۰۸؛ عسکری و سیاه‌کوهی، ۲۰۰۸). روش‌های تعیین میرایی در حوزه زمان- بسامد و زمان- مقیاس یا به صورت کیفی و یا به صورت کمی به برآورد فاکتور کیفیت می‌پردازند. در این مقاله با استفاده از محاسبه انرژی در حوزه زمان- مقیاس با تبدیل موجک (مالات، ۱۹۹۹) و موجک مادر مورلت بهبود یافته به شناسایی ناهنجاری‌های مرتبط با میرایی روی مقطع لرزه‌ای پرداخته می‌شود.

## ۲ تبدیل موجک پیوسته

تبدیل موجک پیوسته تابع  $f(t)$  به صورت رابطه (۱) در حوزه زمان و رابطه (۲) در حوزه بسامد بیان می‌شود.

$$W_f(a,b) = \int f(t)\psi_{a,b}^*(t)dt \quad (1)$$

$$W_f(a,b) = \sqrt{a}F(\omega)e^{j\omega t}\psi^*(a\omega) \quad (2)$$

میرایی غیرکشسان معمولاً با پارامتری موسوم به فاکتور کیفیت بیان می‌شود. میرایی با گذشت زمان سبب افت انرژی بسامدهای زیاد می‌شود. این تغییر با زمان در محتوای بسامدی سبب تغییر شکل موجک و افزایش طول آن می‌شود که کاهش قدرت تفکیک زمانی داده‌ها و مشکلاتی در تحلیل دامنه را در پی دارد (ژائو و همکاران، ۲۰۰۴). میرایی معمولاً با شکستگی‌ها، خواص فیزیکی سنگ‌ها و سیالات منفذی مرتبط است. لذا از این پارامتر می‌توان به صورت یک نشانگر برای شناسایی ناهنجاری‌های مربوط به فاکتور کیفیت استفاده کرد. برای مثال از نشانگر فاکتور کیفیت می‌توان برای تعیین سنگ‌شناسی، ساختارهای خردشده، شکستگی‌ها، محتویات سیال درون حفرات استفاده کرد (پارا و هکت، ۲۰۰۲؛ کلایمتوس، ۱۹۹۵).

تاکنون روش‌های گوناگونی برای بررسی فاکتور کیفیت معرفی شده است (استینزبای و ورسینگتون، ۱۹۸۵؛ لی و همکاران، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۴؛ لیو و همکاران، ۲۰۰۳؛ لیو و همکاران، ۲۰۰۶؛ بای و لی، ۱۹۹۹؛ تای و همکاران، ۲۰۰۶؛ یانگ‌دونگ و زیادونگ، ۲۰۰۷؛ چن و جاو، ۲۰۰۷؛ گو و همکاران، ۲۰۰۷). یکی از روش‌های قدیمی برآورد فاکتور کیفیت، نسبت طیفی است. در این روش نسبت طیف دامنه هر تپ (پالس) بازتابی به طیف دامنه تپ مرجع محاسبه می‌شود و از روی آن فاکتور کیفیت به‌دست می‌آید. روش‌های جدیدتر بر مبنای تاخیر بسامدی در مرکز ثقل بسامد تپ بنا نهاده شدند. با توجه به تغییرات بسامد با زمان و وابستگی بسامدی فاکتور کیفیت،

که در تبدیل موجک یک سیگنال حقیقی با خانواده این موجک مادر، قسمت موهومی ضرایب تبدیل، تبدیل هیلبرت قسمت حقیقی آن است. در این مقاله از این خاصیت برای محاسبه توزیع انرژی برای سیگنال در هر مقیاس استفاده شد.

### ۳ معادله چگالی میرایی انرژی

آکی و ریچادز (۱۹۸۰) روشن ساختند که معادله انتشار موج تختی مانند  $U(\omega, z)$  در یک محیط غیرکشسان با فاکتور کیفیت ثابت،  $Q$ ، را می توان با رابطه (۹) نشان داد.

$$U(\omega, z) = U(\omega, 0) e^{\frac{j\omega_0 z}{c(\omega)}} e^{-\frac{\omega z}{2Qc(\omega)}} \quad (9)$$

که در آن،  $\omega$  بسامد زاویه‌ای،  $z$  فاصله انتشار و  $c(\omega)$  سرعت فاز است.

چگالی انرژی،  $E(\omega, z)$ ، در هر بسامد زاویه‌ای،  $\omega$ ، با استفاده از رابطه (۱۰) به دست می آید.

$$E(\omega, z) = U(\omega, z) U^*(\omega, z) \quad (10)$$

با جای گذاری معادله (۹) در (۱۰) رابطه (۱۱) به دست می آید.

$$E(\omega, z) = |U(\omega, 0)|^2 e^{\frac{-|\omega|z}{Qc(\omega)}} \quad (11)$$

با استفاده از تبدیل موجک در حوزه بسامد، تبدیل موجک رابطه (۹) محاسبه شده و با فرض  $|U(\omega, 0)|^2 = 1$  و  $Q \gg 1$  چگالی انرژی به صورت رابطه (۱۲) به دست می آید.

$$E_a = e^{\frac{-t\omega_0}{Qa}} \quad (12)$$

در شکل ۱ تابع چگالی انرژی برای سه مقدار فاکتور کیفیت بی نهایت، ۱۵۰ و ۵۰ نشان داده شده است. همان طوری که در شکل مشاهده می شود، هنگامی که فاکتور کیفیت بی نهایت است مقدار چگالی انرژی برای

که در آن، \* نشان دهنده مزدوج مختلط،  $\psi_{a,b}(t)$  موجک،  $a$  بیانگر مقیاس و  $b$  مرکز پنجره موجک یا بیانگر جابه جایی در راستای محور زمان است.  $\psi_{a,b}(t)$  نسخه مقیاس شده (با  $a$ ) و انتقال یافته در زمان (به اندازه  $b$ ) موجک مادر است که با استفاده از رابطه (۳) ساخته می شود،  $\omega$  بسامد زاویه‌ای و  $F(\omega)$  تبدیل فوریه سیگنال است (پولاریکاس، ۲۰۰۰).

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3)$$

تابع مورد استفاده برای موجک مادر، بایستی شرط رابطه (۴) را داشته باشد.

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < +\infty \quad (4)$$

که در آن،  $\hat{\psi}(\omega)$  تبدیل فوریه موجک مادر است. دسته‌ای از موجک‌ها، خانواده موجک مورلت است که به دلیل شباهت زیاد آن به موجک چشمه لرزه‌ای، در اغلب موارد از آن استفاده می شود. موجک مورلت در حوزه زمان و بسامد به ترتیب با استفاده از روابط (۵) و (۶) معرفی می شود.

$$\psi(t) = e^{j\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (5)$$

$$\psi(\omega) = \sqrt{2} e^{-(\omega-\omega_0)^2/2} \quad (6)$$

که در آن،  $\omega_0 \geq 5$  است. شکل بهبودیافته این موجک طبق روابط (۷) و (۸) برای حوزه زمان و بسامد به دست می آید (لی و همکاران، ۲۰۰۶).

$$\psi_m(t) = \pi^{-1/4} e^{j\omega_0 t} e^{-(ct)^2/2} \quad (7)$$

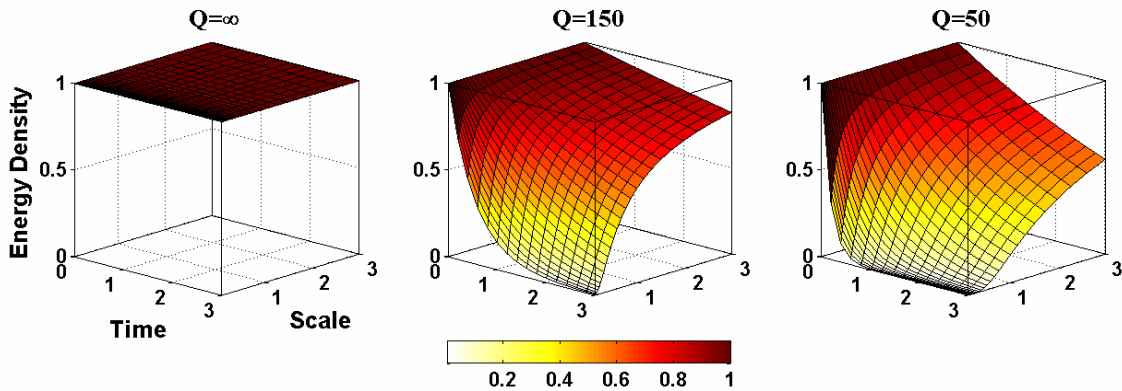
$$\hat{\psi}_m(\omega) = \sqrt{2}\pi^{1/4} c^{-1} e^{-(\omega-m)^2/2c^2} \quad (8)$$

که در آنها،  $\omega_0$  بسامد تلفیق و  $c$  عامل کنترل طول موجک است. در صورتی که  $c=1$  در نظر گرفته شود، موجک بهبودیافته مورلت با خود موجک مورلت یکی خواهد بود. گراسمن و همکاران (۱۹۸۹) روشن ساختند

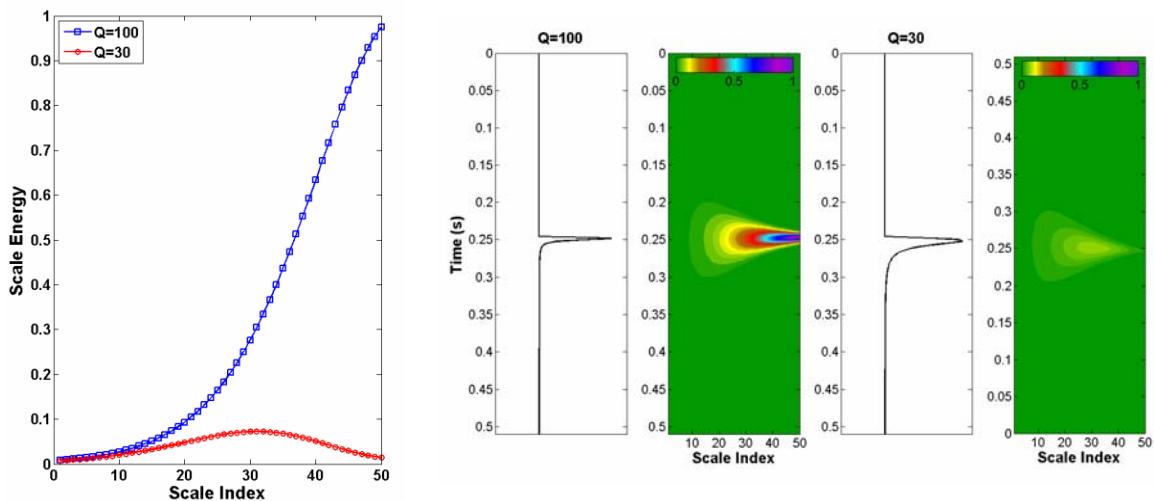
رابطه مربوط به چگالی انرژی پیچیده تر می شود. در شکل ۲ چگالی انرژی مربوط به یک موجک ایدئال برای دو فاکتور کیفیت ۱۰۰ و ۳۰ و برش چگالی انرژی در زمان ۰/۲۵ ثانیه نشان داده شده است. شکل ۳ مشابه شکل ۲ است با این تفاوت که موجک در ردلرزه، موجک ریکر با بسامد غالب ۳۰ هرتز است. همان طوری که در شکل ها دیده می شود، به ازای مقدار فاکتور کیفیت ۳۰، در هر دو حالت از موجک، انرژی کمتر از انرژی مربوط به فاکتور کیفیت ۱۰۰ است.

مقیاس های گوناگون در تمام زمان ها یکسان است. اما هنگامی که فاکتور کیفیت دارای مقداری غیر از بی نهایت است، با افزایش زمان، چگالی انرژی کاهش می یابد و مقدار این کاهش برای مقیاس های کوچک نسبت به مقیاس های بزرگ بیشتر است. هرچه مقدار فاکتور کیفیت کوچک تر باشد، نرخ کاهش چگالی انرژی بیشتر خواهد بود.

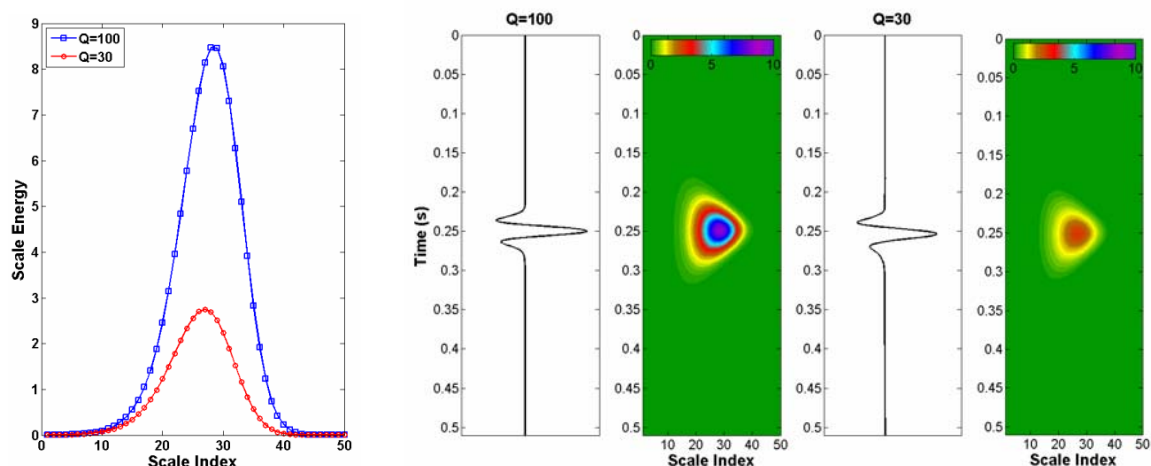
رابطه (۱۲) با فرض موجک ایدئال  $|U(\omega, 0)|^2 = 1$  به دست آمد. چنانچه موجک به واقعیت نزدیک شود،



شکل ۱. تابع چگالی انرژی برای سه مقدار فاکتور کیفیت (چپ) بی نهایت، (وسط) ۱۵۰ و (راست) ۵۰.



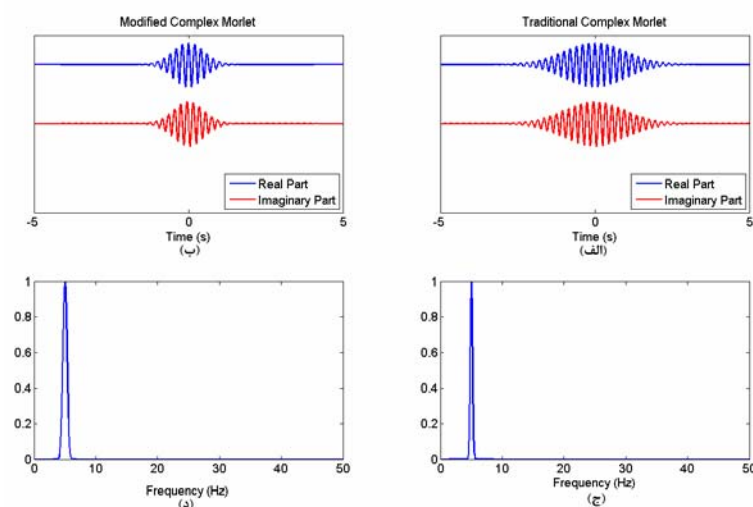
شکل ۲. دو ردلرزه با موجک ایدئال و با دو فاکتور کیفیت ۱۰۰ و ۳۰ و چگالی انرژی مربوط به آنها و برشی از چگالی انرژی در زمان ۰/۲۵ ثانیه (خط سرخ برش از طیف چگالی انرژی مربوط به فاکتور کیفیت ۳۰ و خط آبی برش از طیف چگالی انرژی مربوط به فاکتور کیفیت ۱۰۰).



شکل ۳. دو ردلرزه با موجک ریکر ۳۰ هرتز و با دو فاکتور کیفیت ۱۰۰ و ۳۰ و چگالی انرژی مربوط به آنها و برشی از چگالی انرژی در زمان ۰/۲۵ ثانیه (خط سرخ برش از طیف چگالی انرژی مربوط به فاکتور کیفیت ۳۰ و خط آبی برش از طیف چگالی انرژی مربوط به فاکتور کیفیت ۱۰۰).

زمانی کوتاه آن نسبت به موجک مورلت معمولی است (شکل ۴-الف و ۴-ب). این بدان معنا است که در مواردی که قدرت تفکیک زمانی زیاد مدنظر است، استفاده از این موجک مناسب تر به نظر می رسد. چون هدف مقاله بررسی مقاطع تک مقیاس از مکعب چگالی انرژی در مقیاس های کوچک است و این مقیاس ها متناظر دارند. لذا برای یک بسامد تلفیق خاص، استفاده از موجک مورلت بهبود یافته بهتر است.

قبل از اعمال الگوریتم روی داده های لرزه ای مصنوعی و واقعی ابتدا مقایسه ای میان موجک های مورلت معمولی و بهبود یافته که در بخش قبل معرفی شدند، صورت می گیرد. در شکل ۴ موجک های مورلت معمولی و بهبود یافته ( $C = 2$ ) با بسامد تلفیق ۵ هرتز و طیف دامنه آنها نشان داده شده است. همان طوری که مشاهده می شود (شکل ۴-ج و ۴-د)، قدرت تفکیک بسامدی موجک مورلت معمولی از نوع بهبود یافته آن به مراتب بیشتر است. اما نکته مهم در مورد موجک مورلت بهبود یافته، طول



شکل ۴. (الف) موجک مورلت معمولی و (ب) موجک مورلت بهبود یافته ( $C = 2$ ) با بسامد تلفیق ۵ هرتز (خط آبی قسمت حقیقی موجک و خط سرخ قسمت موهومی موجک را نشان می دهد). (ج) و (د) طیف دامنه موجک های (الف) و (ب) را نشان می دهند.

بسامد تلفیق ۱/۵ هرتز و موجک مورلت بهبود یافته با فرکانس تلفیق ۱۵ هرتز استفاده شده است. در شکل ۶ مقطع لرزه‌ای حاصل از این مدل در دو حالت بدون نوفه و حضور نوفه با سطح ۲۰- دسی‌بل (رابطه (۱۴))، نشان داده شده است. مقاطع چگالی انرژی حاصل از اعمال الگوریتم روی مقطع لرزه‌ای مصنوعی بدون نوفه با استفاده از دو موجک مورلت بهبود یافته در مقیاس ۰/۱ (شکل ۷-الف) و مورلت معمولی در مقیاس ۰/۰۱ (شکل ۷-ب) و در حضور نوفه با استفاده از دو موجک مورلت بهبود یافته در مقیاس ۰/۱ (شکل ۷-د) و مورلت معمولی در مقیاس ۰/۰۱ (شکل ۷-ه) نشان داده شده است. شکل‌های (۷-ج) و (۷-و) به ترتیب برشی از مقاطع چگالی انرژی حاصل از موجک مورلت بهبود یافته (خط آبی) و موجک مورلت معمولی (خط سرخ) در زمان ۰/۱۹ ثانیه در حالت بدون نوفه و در حضور نوفه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو حالت نوفه‌دار و بدون نوفه و با استفاده از دو موجک مورلت معمولی و بهبود یافته می‌توان کاهش انرژی را در ردلرزه‌های مربوط به ناحیه گازدار (فاکتور کیفیت کم) مشاهده کرد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که اثر نوفه روی نتیجه حاصل از موجک مورلت معمولی بیشتر از نتیجه موجک مورلت بهبود یافته است. نتایج مدل‌سازی‌های گوناگون با سطوح متفاوت نوفه، روشن ساخت که در مورد موجک مورلت بهبود یافته تا سطح نوفه ۱۰- دسی‌بل، الگوریتم قادر به شناسایی بی‌هنجاری مربوطه است. این سطح برای موجک معمولی مورلت برابر ۱۲- دسی‌بل است.

$$\text{Noise Level} = -20 \log \frac{A_{\text{rms-noise}}}{A_{\text{max-signal}}} \quad (14)$$

که در آن،  $A_{\text{rms-noise}}$  دامنه حداقل مجموع مربعات نوفه و  $A_{\text{max-signal}}$  بیشینه دامنه سیگنال است.

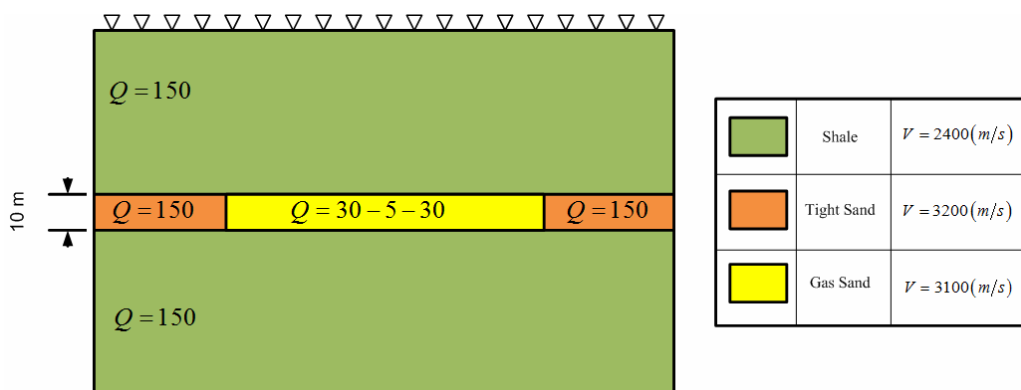
البته در موجک مورلت معمولی با کاهش بسامد تلفیق می‌توان قدرت تفکیک زمانی را افزایش داد. با وجود این نیز استفاده از موجک مورلت بهبود یافته مناسب‌تر است. دلیل این برتری را می‌توان با استفاده از رابطه (۱۳) که ارتباط میان مقیاس و بسامد را بیان می‌کند، نشان داد (آبری، ۱۹۹۷).

$$f_a = \frac{f_c}{a\Delta} \quad (13)$$

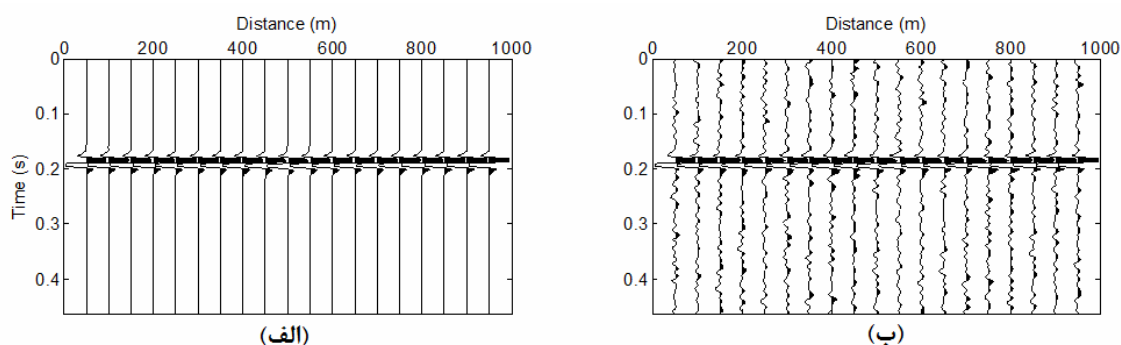
که در آن،  $a$  مقیاس،  $\Delta$  فاصله نمونه‌برداری،  $f_c$  بسامد تلفیق و  $f_a$  بسامد متناظر با مقیاس  $a$  است. برای مثال اگر برای تهیه مقطع تک‌بسامد  $f_a$  با موجک مورلت معمولی بسامد تلفیق  $f_{c1}$ ، به مقیاس متناظر  $a_1$  نیاز باشد و با موجک مورلت بهبود یافته بسامد تلفیق  $f_{c2}$ ، مقیاس متناظر  $a_2$  نیاز باشد. با توجه به رابطه  $f_{c1}/f_{c2} = a_2/a_1$  در موجک مورلت معمولی نیاز به محاسبه مقیاس‌های بیشتری هست.

#### ۴ اعمال الگوریتم بر روی داده لرزه‌ای مصنوعی و واقعی

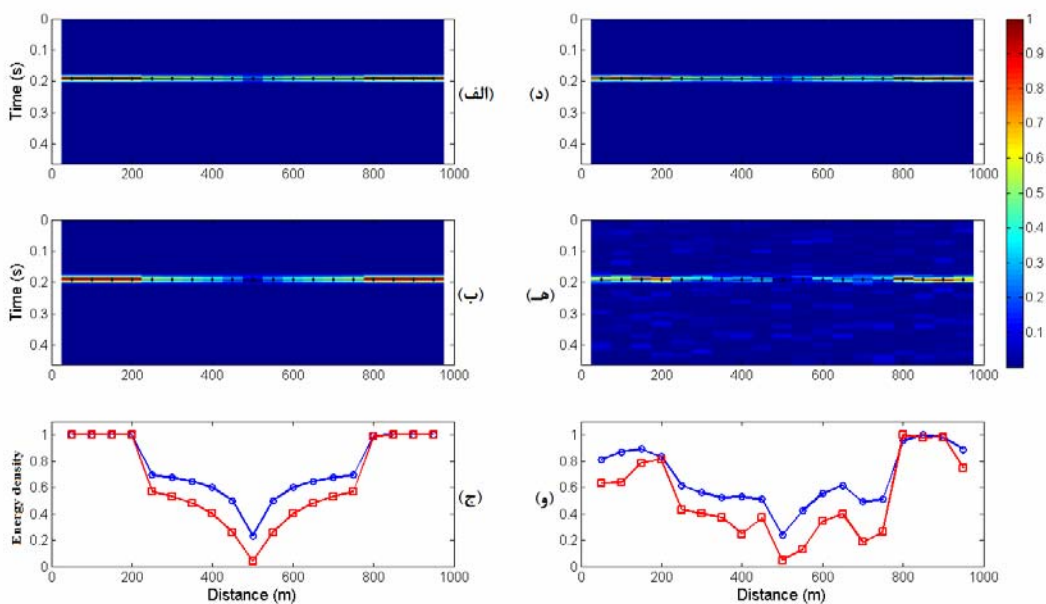
به منظور بررسی کارایی روش در شناسایی بی‌هنجاری‌های مرتبط با فاکتور کیفیت، الگوریتم روی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی اعمال شد. دو مدل مصنوعی در ساخت داده‌های مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت. اولین داده لرزه‌ای مصنوعی شامل یک لایه نازک ماسه‌ای به ضخامت ۱۰ متر محصور در شیل است که قسمتی از ماسه حاوی گاز است و به همین دلیل فاکتور کیفیت آن به تدریج از ۳۰ به ۵ کاهش و دوباره به ۳۰ افزایش می‌یابد. در سایر قسمت‌های مدل، مقدار فاکتور کیفیت برابر با ۱۵۰ در نظر گرفته شده است (شکل ۵). روی شکل ۵ محل CMPها با مثلث‌های وارونه نشان داده شده است. در محاسبات از موجک مورلت معمولی با



شکل ۵. مدل مصنوعی زمین برای ساخت مقطع لرزهای مصنوعی. مثلث‌ها محل CMPها را برای مدل‌سازی نشان می‌دهد.



شکل ۶. (الف) مقطع مصنوعی لرزهای بدون نوفه، (ب) مقطع مصنوعی لرزهای حاوی نوفه با سطح ۲۰-دسی‌بل.



شکل ۷. مقطع چگالی انرژی با استفاده از (الف) و (د) موجک مورلت بهبودیافته در مقیاس ۰/۱ و (ب) و (ه) موجک مورلت معمولی در مقیاس ۰/۱ و (ج) و (و) برش زمانی از مقطع چگالی انرژی حاصل از موجک مورلت بهبودیافته (خط آبی) و مقطع چگالی انرژی حاصل از موجک مورلت معمولی (خط سرخ) در زمان ۰/۱۹ ثانیه (محل برش روی مقاطع با خط نقطه سیاه مشخص شده است) در دو حالت بدون نوفه و همراه نوفه برای مدل مصنوعی شکل ۵.

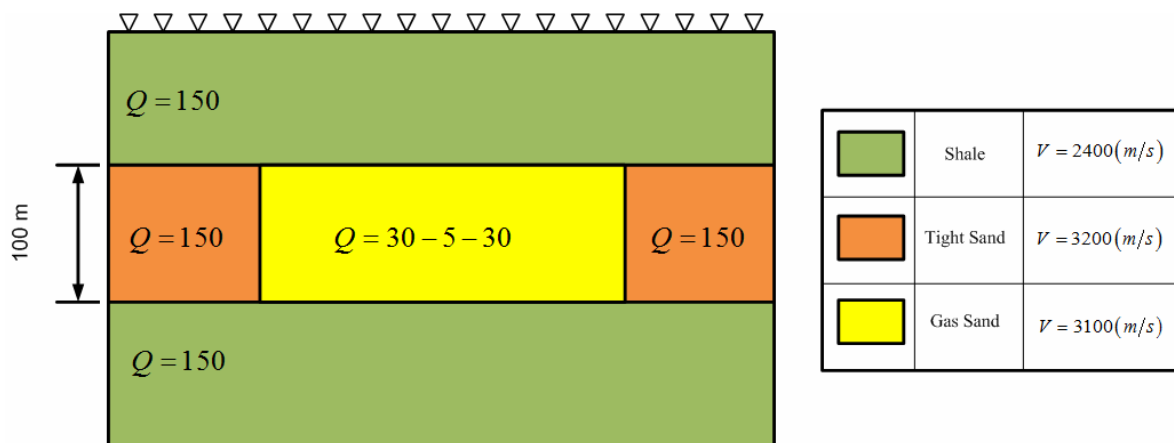


مدل مصنوعی دیگری که مورد بررسی قرار گرفت مشابه مدل مصنوعی شکل ۵ است، با این تفاوت که ضخامت لایه ماسه‌ای برابر ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۸ مدل مصنوعی پیش‌گفته و در شکل ۹ نیز مقطع لرزه‌ای حاصل در دو حالت بدون نوفه و حضور نوفه با سطح ۲۰- دسی‌بل (سطح حداقل مجذور مربعات نوفه یک‌دهم قدر مطلق بزرگ‌ترین دامنه سیگنال است)، نشان داده شده است.

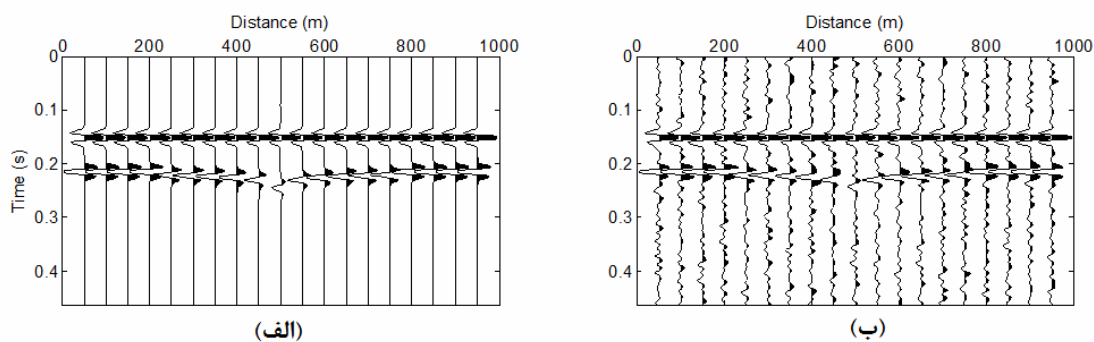
در محاسبات مربوط به این مدل مصنوعی نیز از موجک مورلت معمولی با بسامد تلفیق ۱/۵ هرتز و موجک مورلت بهبودیافته با بسامد تلفیق ۱۵ هرتز استفاده شده است. مشابه مدل مصنوعی قبل، مقاطع چگالی انرژی حاصل از اعمال الگوریتم روی مقطع لرزه‌ای مصنوعی بدون نوفه با استفاده از دو موجک مورلت بهبودیافته در مقیاس ۰/۱ (شکل ۱۰-الف) و مورلت معمولی در مقیاس ۰/۰۱ (شکل ۱۰-ب) و در حضور نوفه با سطح ۲۰- دسی‌بل با استفاده از دو موجک مورلت بهبودیافته در مقیاس ۰/۱ (شکل ۱۰-د) و مورلت معمولی در مقیاس ۰/۰۱ (شکل ۱۰-ه) نشان داده شده است. شکل‌های (۱۰-ج) و (۱۰-و) به ترتیب برشی از مقاطع چگالی انرژی حاصل از موجک مورلت بهبودیافته (خط آبی) و موجک

مورلت معمولی (خط سرخ) در محلی که روی مقاطع چگالی انرژی با نقطه خط سیاه مشخص شده است، در حالت بدون نوفه و در حضور نوفه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این داده لرزه‌ای مصنوعی نیز در هر دو حالت نوفه‌دار و بدون نوفه و با استفاده از دو موجک مورلت معمولی و بهبودیافته می‌توان کاهش انرژی را در ردلرزه‌های مربوط به ناحیه گازدار (فاکتور کیفیت کم) مشاهده کرد.

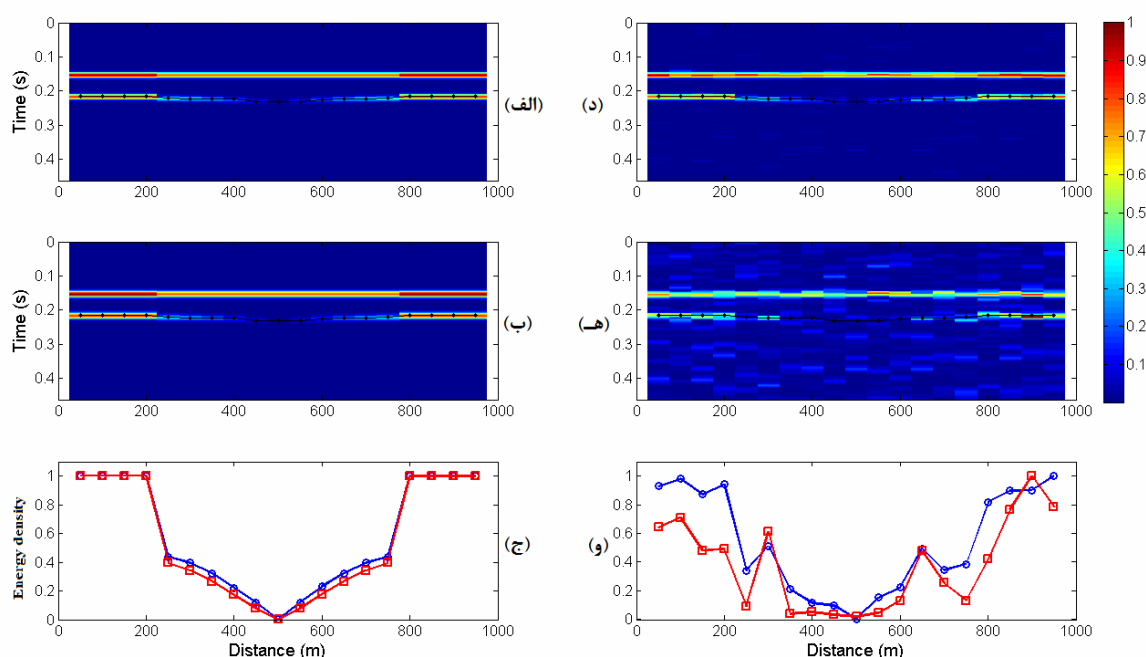
همچنین می‌توان دید که اثر نوفه روی نتیجه حاصل از موجک مورلت معمولی بیشتر از نتیجه موجک مورلت بهبودیافته است. نکته بارز در دو مثال مصنوعی فوق این است که شاید در مدل مصنوعی دوم به‌راحتی از روی مقطع لرزه‌ای بتوان اثر میرایی را مشاهده کرد، اما در مدل مصنوعی اول این اثر روی مقطع لرزه‌ای قابل مشاهده نیست. در واقع این روش قادر به شناسایی لایه‌های نازکی که در آنها افت انرژی در اثر کاهش فاکتور کیفیت ایجاد می‌شود، هست. نتایج مدل‌سازی برای این مدل با سطوح متفاوت نوفه، سطح آستانه نوفه برای موجک مورلت بهبودیافته را برابر ۱۲- دسی‌بل و برای موجک مورلت معمولی برابر ۱۵- دسی‌بل نشان داد.



شکل ۸. مدل مصنوعی زمین برای ساخت مقطع لرزه‌ای مصنوعی. مثلث‌ها محل CMPها را برای مدل‌سازی نشان می‌دهد.



شکل ۹. (الف) مقطع مصنوعی لرزه‌ای بدون نوفه، (ب) مقطع مصنوعی لرزه‌ای حاوی نوفه با سطح ۲۰-دسی‌بل.



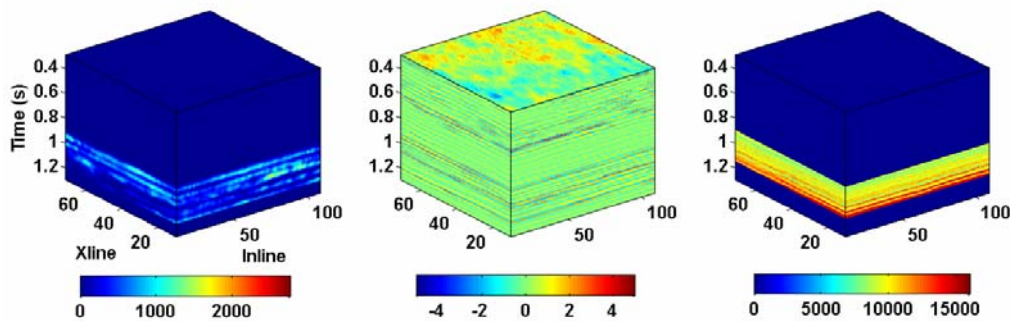
شکل ۱۰. مقطع چگالی انرژی با استفاده از (الف) و (د) موجک مورلت بهبودیافته در مقیاس ۰/۱ و (ب) و (ه) موجک مورلت معمولی در مقیاس ۰/۰۱ و (ج) و (و) برش زمانی از مقطع چگالی انرژی حاصل از موجک مورلت بهبودیافته (خط آبی) و مقطع چگالی انرژی حاصل از موجک مورلت معمولی (خط سرخ) در محل برش که روی مقاطع با خط نقطه سیاه مشخص شده است، در دو حالت بدون نوفه و همراه نوفه برای مدل مصنوعی شکل ۸.

۱۱- (وسط)، مکعب انرژی به دست آمده برای آن در شکل ۱۱- (چپ) و در شکل ۱۱- (راست) مکعب مقاومت صوتی لرزه‌ای حاصل از وارون مکعب داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی به مقاومت صوتی لرزه‌ای با نرم‌افزار همپسن- راسل نشان داده شده است. به منظور رویت بهتر نتیجه، برش‌هایی در راستای خط چشمه ۴۱ و خط گیرنده ۴۱ و زمان‌های ۱/۰۶۰ و ۰/۹۶۶ ثانیه تهیه شده که در شکل ۱۲

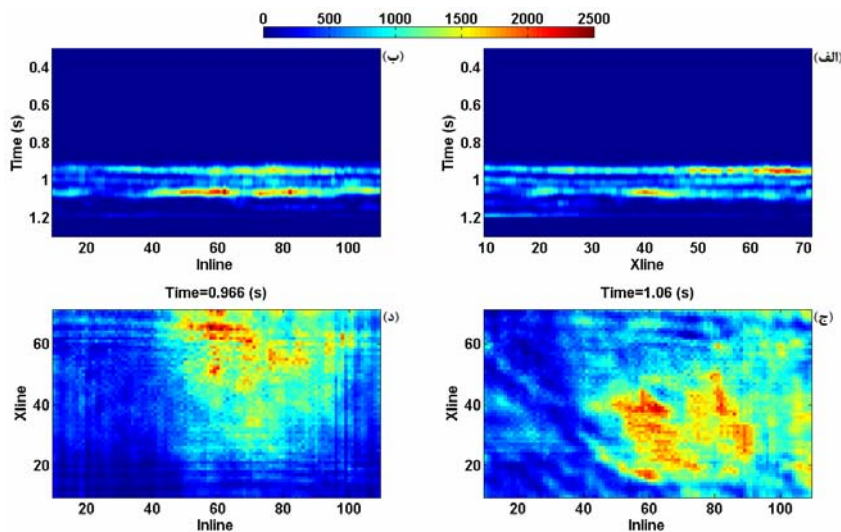
داده‌های لرزه‌ای واقعی مورد استفاده در این تحقیق، مکعب داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی برانبارش شده مورد استفاده در نرم‌افزار همپسن- راسل است. با توجه به اینکه نتایج موجک مورلت بهبودیافته نسبت به نتایج موجک مورلت معمولی قابل قبول‌تر است، لذا در محاسبات داده لرزه‌ای واقعی از موجک مورلت بهبود یافته استفاده شده است. مکعب داده‌های لرزه‌ای برانبارش شده در شکل

حاوی هیدروکربن دارای تخلخل زیادی هستند، لذا انتظار می‌رود دارای مقاومت صوتی کمتری نسبت به مناطق دارای تخلخل کم باشند. همچنین در این مناطق به دلیل زیاد بودن تخلخل و سیالات منفذی انرژی موج لرزه‌ای دچار افت می‌شود و فاکتور کیفیت کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به همخوانی نتایج حاصل از الگوریتم معرفی شده در این تحقیق و نتایج وارون‌سازی داده‌ها به مقاومت صوتی، در قسمت‌هایی که مقاومت صوتی و فاکتور کیفیت کاهش می‌یابند، پتانسیل حضور هیدروکربن زیاد است.

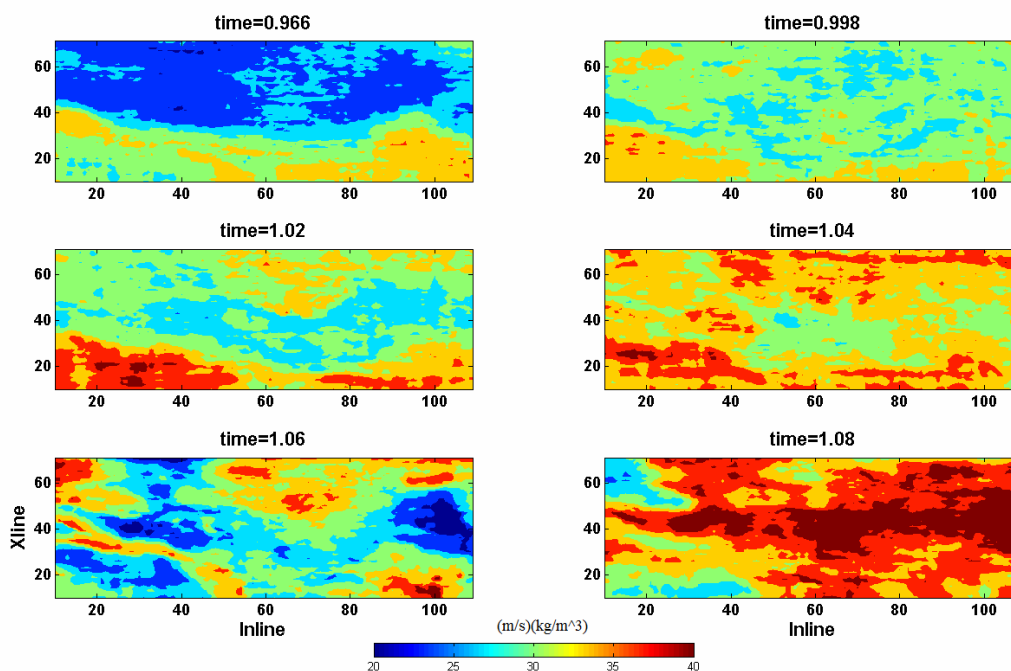
نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، در دو افق ۱/۰۶۰ و ۰/۹۶۶ ثانیه در محدوده خط چشمه ۲۰ تا ۴۰، انرژی کاهش می‌یابد که با رنگ آبی در شکل‌های ۱۲-الف) و ب) نشان داده شده است. نتیجه حاصل از وارون همان داده‌های لرزه‌ای به مقاومت صوتی لرزه‌ای با نرم‌افزار همپسن- راسل برای افق‌های زمانی گوناگون نیز در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، در برش‌های زمانی ۰/۹۶۶ و ۱/۰۶۰ ثانیه مقدار مقاومت صوتی لرزه‌ای افت شدیدی نسبت به سایر برش‌های زمانی دارند (محدوده آبی پررنگ در برش‌های زمانی). به لحاظ نظری مناطق



شکل ۱۱. (وسط) مکعب داده‌های لرزه‌ای سه‌بُعدی برانبارش شده مورد استفاده، (چپ) مکعب انرژی به‌دست آمده از روش معرفی شده در محدوده مورد بررسی از مکعب و (راست) مکعب مقاومت صوتی لرزه‌ای حاصل از وارون مکعب داده‌های لرزه‌ای سه‌بُعدی به مقاومت صوتی لرزه‌ای در محدوده مورد بررسی از مکعب.



شکل ۱۲. برش قائم از مکعب شکل (۶ چپ) در راستای الف) خط گیرنده ۴۱، ب) خط چشمه ۴۱ و برش افقی در راستای ج) زمان ۱/۰۶۰ ثانیه و د) زمان ۰/۹۶۶ ثانیه.



شکل ۱۳. برش‌های زمانی متفاوت از مکعب مقاومت صوتی لرزه‌ای (شکل ۶-راست) به دست آمده از وارون داده‌های لرزه‌ای.

آمده روشن ساخت که میزان محاسبات با توجه به زیادتر بودن بسامد تلفیق در موجک مورلت بهبودیافته کمتر است و همچنین نتایج حاصل از این موجک نشان داد که میزان حساسیت به نوفه در موجک بهبود یافته مورلت به مراتب نسبت به موجک مورلت معمولی کمتر است. همچنین نتایج روشن ساخت که این روش قابلیت شناسایی لایه‌های نازک حاوی هیدروکربن را دارد.

#### منابع

- Abry, P., 1997, Ondelettes et turbulence. Multirésolutions, algorithmes de décomposition, invariance d'échelles, Diderot Editeur, Paris.
- Aki, K., and Richards, P. G., 1980, Quantitative seismology: theory and methods. W. H. Freeman & Co, USA.
- Askari, R., and Siahkoochi, H. R., 2008, Ground roll attenuation using the S and x-f-k transforms. Geophysical Prospecting, **56**, 105-114.
- Bai, H., and Li, K. P., 1999, Stratigraphic absorption compensation based on time-frequency analysis. Oil Geophysical Prospecting, **34**, 642-648.

#### ۵ نتیجه‌گیری

در این مقاله از تبدیل موجک با استفاده از موجک مورلت بهبودیافته و معمولی، چگالی انرژی موج در مقیاس‌های متفاوت محاسبه شد. با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق می‌توان دید که در یک زمان خاص بیشترین افت انرژی مربوط به مقیاس‌های کم (بسامدهای زیاد) در مقایسه با مقیاس‌های زیاد (بسامدهای کم) است. از این رو می‌توان از چگالی انرژی موج در مقیاس‌های متفاوت به منظور شناسایی بی‌هنجاری‌های مربوط به میرایی استفاده کرد. در واقع انرژی در محدوده مقیاس‌های کم برای محیط‌های با میرایی زیاد نسبت به محیط‌های با میرایی کم، افت بیشتری خواهد داشت. نتایج حاصل از اعمال این الگوریتم روی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی و مقایسه آنها با نتایج وارون داده‌های لرزه‌ای با استفاده از نرم‌افزار همپسن-راسل، حاکی از موفقیت این روش در به تصویر کشیدن موقعیت بی‌هنجاری‌های مربوط به میرایی ناشی از حضور هیدروکربن است. نتایج به دست

- Moraces, 2005, Characterization of thin beds through joint time-frequency analysis applied to a turbidite reservoir in Campos Basin, Brazil. SEG 75th Annual International Meeting, Houston, USA, 1429-1432.
- Parra, J. O., and Hacket, C., 2002, Wave attenuation attributes as flow unit indicators. *The Leading Edge*, **21**, 564-572.
- Poularikas, A., 2000, *The transforms and applications handbook*. second edition. A CRC Handbook Published in Cooperation with IEEE Press, USA.
- Sinha, S., Routh, P. S., Anno, P. D., and Castagna, J. P., 2005, Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform. *Geophysics*, **70**, 19-25.
- Stainsby, S. D., and Worthington, M. H., 1985, Q estimation from vertical seismic profile data and anomalous variations in the North Sea *Geophysics*, **50**, 615-626.
- Tai, S., Han, D., and Castagna, J. P., 2006, attenuation estimation with continuous wavelet transforms SEG 76th Annual International Meeting, New Orleans, USA, 1933-1936.
- Yandong, L., and Xiaodong, Z., 2007, Wigner-Ville distribution and its application in seismic attenuation estimation. *Applied geophysics*, **4**, 245-254.
- Zhao, W., Li, H., Cao, H., and Yao, F., 2004, Attenuation characteristics of seismic waves in the wavelet domain and the detection of gas. SEG 74<sup>th</sup> Annual International Meeting, Dallas, Texas, 1539-1542.
- 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.
- Chen, W., and Gao, J., 2007, Characteristics of seismic attenuation extraction using MBMSW wavelets. SEG 77th Annual International Meeting, San Antonio, USA, 1417-1420.
- Grossmann., A., Kronland-Martinet., R., and Morlet., J., 1989, "Reading and understanding continuous wavelet transforms" *Wavelets, time-frequency representations and phase space*. Springer Verlag, USA.
- Gu, H., Stewart, R., Li, Z., Qi, L., and Yang, L., 2007, Calculation of relative seismic attenuation from reflection time-frequency differences in carbonate reservoir. SEG 67th Annual International Meeting, San Antonio, USA, 1495-1498.
- Klimentos, T., 1995, attenuation of P- and S-waves as a method of distinguishing gas and condensate from oil and water. *Geophysics*, **60**, 447-458.
- 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.
- Li, H., Zhao, W., Cao, H., Yao, F., and Shao, L., 2004, Characteristics of seismic attenuation in gas rocks in the domain of wavelet scales. *Chinese Journal of Geophysics*, **47**, 1005-1012.
- Li, H., Zhao, W., Cao, H., Yao, F., and Shao, L., 2006, Measures of scale based on the wavelet scalogram with applications to seismic attenuation. *Geophysics*, **71**, V111-V118.
- Liu, X. Q., Shen, P., and Li, H., 2003, Time-frequency energy attenuation factor and its application on the basis of Gauss linear modulation frequency continuous wavelet transform. *Earthquake Research in China*, **19**, 225-235.
- Liu, X. W., Nian, J. B., and Liu, H., 2006, Analysis of seismic wave energy attenuation based on generalized S-transform. *Exploration Geophysics*, **29**, 20-24.
- Mallat, S., 1999, *A wavelet tour of signal processing*. 2nd edition, Academic Press, USA.
- Matos, M. C., P.Osorio, E. C. Mundim, and M.