

تعیین فاکتور کیفیت با استفاده از تبدیل‌های زمان-مقیاس و زمان-فرکانس

امین روشندل کاهو^۱ و حمیدرضا سیاه‌کوهی^{*۲}

^۱دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

^۲دانشیار، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

roshandel@ut.ac.ir, hamid@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۱/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۱۲/۲۰)

چکیده

در روش‌های مرسوم، ضریب میرایی امواج لرزه‌ای را معمولاً در حوزه فرکانس و براساس طیف توان و روش‌های آماری محاسبه می‌کنند. با توجه به محدودیت‌های تبدیل فوریه در تحلیل سیگنال‌های ناپایا، در این تحقیق با به‌کارگیری مرکز ثقل مقیاس و مرکز ثقل فرکانس و سه روش متفاوت برپایه ابزار ریاضی تحلیل هارمونیک‌ها (harmonic analysis)، فاکتور کیفیت (Q) برای داده‌های لرزه‌ای تعیین می‌شود. سه روش به‌کاررفته، براساس تبدیل موجک پیوسته با استفاده از موجک مادر مورلت بهبود یافته، توزیع ویگنر- وایل نمای هموارشده (smoothed pseudo Wigner-Ville) و شکل بازچینی‌شده (reassignment) این توزیع هستند. کارایی روش‌ها روی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی و واقعی بررسی شده‌اند و نتایج به‌دست آمده حاکی از موفقیت آنها در نیل به این هدف است. از میان روش‌های پیش‌گفته، دقت شکل بازچینی‌شده توزیع ویگنر- وایل نمای هموار شده از سایر روش‌ها بهتر است.

واژه‌های کلیدی: میرایی امواج لرزه‌ای، توزیع ویگنر- وایل، تبدیل موجک، فاکتور کیفیت

Quality factor determination using time-scale and time-frequency transforms

Amin Roshandel Kahoo¹ and Hamid Reza Siahkoohi^{*2}

¹Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 25 January 2009, accepted: 10 March 2009)

Summary

Seismic waves lose energy by traveling through the earth. Attenuation refers to the loss of energy which is caused by parameters other than geometrical spreading, and depends on the characteristics of the transmitting medium. Generally, attenuation is determined by quality factor (Q) which is a dimensionless parameter and has a reverse relation with attenuation coefficient. Experiments show that seismic wave quality factor depends on the fluid content of formation and its elastic properties. Hence, quality factor (Q) (or attenuation) is one of the most important attributes in seismic exploration used as a direct hydrocarbon indicator. Attenuation coefficient is usually calculated in frequency domain

*Corresponding author:

hamid@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

based on power spectrum and statistical methods. Because of the Fourier transform's limitations in analyzing non-stationary signals, this paper proposes an approach using three different harmonic analysis methods and two different attributes, namely the centroid of scale and the centroid of frequency, to determine the seismic quality factor (Q). The three methods consist of the continuous wavelet transform (Mallat, 1999) with modified Morlet wavelet, the smoothed pseudo Wigner-Ville distribution, and the reassigned form of the smoothed pseudo Wigner-Ville distribution (Auger and Flandrin, 1995). Because the Wigner-Ville distributions are energy distribution type, they were used in this study to determine the seismic quality factor. Since both the traditional Wigner-Ville distribution and pseudo Wigner-Ville distribution suffer from cross terms, the smoothed and reassigned forms of them were implemented to overcome the cross terms. Smoothing extends the auto terms in Wigner-Ville distribution which is not desirable for the purposes of this study. Therefore, by using the reassigned method we solved the problem of auto terms extension in the smoothed pseudo Wigner-Ville distribution. According to the results of this study, the reassigned smoothed pseudo Wigner-Ville distribution indicates fewer cross terms than traditional Wigner-Ville and provides better resolution than smoothed pseudo Wigner-Ville distributions.

We can verify that for a spike, as an ideal seismic source wavelet, the centroid of scale is inversely proportional to the quality factor (Equation (1)), while the centroid of frequency has a direct relation with the quality factor:

$$Sc(t) = \frac{mt}{Q} \tag{1}$$

where Sc is the centroid of scale, t is time, m is the modulation frequency, and Q is the quality factor. For a band-limited seismic wavelet, the estimated quality factor using Equation (1) differs from the true value. In such cases, there will be a relative reverse relation between the centroid of scale and quality factor as well as relative direct relation between the centroid of frequency and quality factor. Therefore, it is preferred to use the centroid of scale or centroid of frequency as a qualitative attribute for Q -factor determination.

The efficiency of the introduced methods was investigated on both synthetic and real seismic data. The results showed that the quality factor estimated by the reassigned smoothed pseudo Wigner-Ville distribution method has better resolution than that of the other two transforms. Furthermore, the frequency-based results for the estimated quality factor show the low frequency shadow properties beneath the true position of the anomaly while the same results based on amplitude show the anomaly at its true position. Moreover, the results indicate that the existence of noise in the data do not affect the efficiency of the methods.

Key words: Seismic wave attenuation, Wigner-Ville distribution, wavelet transform, quality factor

$$A(x) = A(x_0) \left(\frac{x_0}{x}\right)^n e^{-\alpha(x-x_0)} \tag{1}$$

که در آن، $A(x)$ دامنه موج در فاصله x از منبع، $A(x_0)$ دامنه موج در فاصله x_0 از منبع، $\left(\frac{x_0}{x}\right)^n$ کاهش

۱ مقدمه

امواج لرزه‌ای به هنگام انتشار درون زمین بر اثر تبدیل بخشی از انرژی کشسان آن به گرما، میرا می‌شود. می‌توان دامنه موج در دو فاصله x و x_0 از منبع را با استفاده از رابطه (۱) نشان داد (آکی و ریچاردز، ۲۰۰۲).

۲۰۰۶؛ لیو و همکاران، ۲۰۰۳؛ لیو و همکاران، ۲۰۰۶؛ بای و لی، ۱۹۹۹؛ لی و همکاران، ۲۰۰۴؛ تای و همکاران، ۲۰۰۶؛ یان‌دونگ و زی‌اودونگ، ۲۰۰۷؛ چن و جاو، ۲۰۰۷؛ گو و همکاران، ۲۰۰۷). بخاطر ماهیت ناپایای ردلرزه‌ها در این تحقیق ما فاکتور کیفیت را در حوزه زمان - مقیاس و زمان - فرکانس بررسی می‌کنیم.

از تبدیل‌های زمان - فرکانس، امروزه در حکم ابزاری متداول برای بررسی سیگنال‌ها، به‌خصوص سیگنال‌هایی که در آنها محتوای فرکانسی با زمان تغییر می‌کند (ناپایا)، استفاده می‌شود (ماتوس و همکاران، ۲۰۰۵؛ کستگنا و همکاران، ۲۰۰۳؛ سینها و همکاران، ۲۰۰۵؛ لیتنه و همکاران، ۲۰۰۸؛ عسکری و سیاه‌کوهی، ۲۰۰۸). گابور (۱۹۴۶) با معرفی تبدیل فوریه زمان کوتاه (تبدیل گابور) پایه‌گذار این روش‌ها محسوب می‌شود. تبدیل فوریه زمان کوتاه علی‌رغم کاربردهای فراوان، دارای محدودیت‌هایی نیز هست. عمده‌ترین این محدودیت‌ها ثابت بودن قدرت تفکیک آن در حوزه زمان - فرکانس و اصل عدم قطعیت هایزنبرگ است. بر همین اساس تحقیقات فراوانی برای رفع این محدودیت صورت گرفته است که می‌توان به تبدیل موجک (مالات، ۱۹۹۹) اشاره کرد.

۲ تبدیل زمان - مقیاس و زمان - فرکانس

رابطه تبدیل موجک پیوسته یک سیگنال در حوزه زمان و فرکانس به ترتیب به صورت رابطه‌های (۲) و (۳) است (مالات، ۱۹۹۹).

$$W_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (۱۲)$$

$$W_f(a,b) = \sqrt{a} F(\omega) e^{ib\omega} \overline{\hat{\psi}(a\omega)} \quad (۳)$$

که در آنها، a و b به ترتیب مقیاس و جابه‌جایی، $f(t)$ و $F(\omega)$ به ترتیب سیگنال در حوزه زمان و فرکانس

دامنه براساس گسترش هندسی، $e^{-\alpha(x-x_0)}$ کاهش دامنه براساس میرایی، α ضریب جذب است. توان n در عامل گسترش هندسی به هندسه موج منتشرشونده وابسته است و مقدار آن برای موج تخت $n=0$ است.

رایج‌ترین مقیاس برای اندازه‌گیری میزان جذب محیط، کمیتی بی‌بعد به نام فاکتور کیفیت، Q ، است که تعریف‌های زیادی برای آن ارائه شده است. اما به طور کلی، فاکتور کیفیت عبارت است از نسبت انرژی ذخیره‌شده به انرژی تلف‌شده در هر دوره تناوب. نتایج آزمایشگاهی نشان داده‌اند که فاکتور کیفیت نسبت به ترکیب سنگ‌شناسی و محتوای سیال درون حفره‌ها بسیار حساس است. طبق این نتایج، فاکتور کیفیت موج p در سنگ‌های کاملاً خشک در بالاترین رده، سنگ‌های اشباع کامل از سیال در رده بعدی و در انتها سنگ‌های دارای اشباع جزئی دسته‌بندی می‌شود. دلیل این دسته‌بندی در مورد اشباع کامل و جزئی، ایجاد جریان سیال درون حفره‌ها به هنگام فشار حجمی در اشباع جزئی و افت انرژی به واسطه وجود این جریان‌ها است که در حالت اشباع کامل ایجاد نمی‌شود (وینکلر و نور، ۱۹۸۲).

$$Q_{p(\text{Perfectly dry rock})} > Q_{p(\text{Fully liquid-saturated rock})} > Q_{p(\text{Partially saturated rock})}$$

همچنین نتایج روشن ساخته‌اند که فاکتور کیفیت مربوط به سنگ‌های گوناگون نیز متفاوت است، برای مثال (شریف و جلداری، ۱۹۹۵):

$$Q_{\text{limestone \& sandstone}} > Q_{\text{shale}} > Q_{\text{gas sandstone}}$$

بنابراین، می‌توان از فاکتور کیفیت یا عکس آن، میرایی، برای توصیف سنگ‌شناسی و محتویات سیال درون حفره‌ها استفاده کرد (کلایمتوس، ۱۹۹۵؛ پارا و هکرت، ۲۰۰۲؛ تای و همکاران، ۲۰۰۶).

تاکنون روش‌های گوناگونی برای بررسی ضریب جذب یا فاکتور کیفیت معرفی شده‌اند (لی و همکاران،

می شود ولی تا حد بسیار مطلوبی جملات متقاطع را حذف می کند. شکل بازچینی شده توزیع ویگنر- وایل نمای هموار شده از رابطه (۷) به دست می آید (آوگر و فلاندرین، ۱۹۹۵). شکل بازچینی این توزیع از قدرت تفکیک زمانی و فرکانسی بیشتری نسبت به شکل معمولی آن برخوردار است.

$$\begin{aligned} & \text{RSPWVD}_x(t', \omega') \\ &= \iint \text{SPWVD}_x(t, \omega) \delta(t' - \hat{t}) \\ & \quad \delta(\omega' - \hat{\omega}) dt \frac{d\omega}{2\pi} \quad (۷) \\ & \hat{t} = t - \frac{\text{SPWVD}_{x,g,Th}(t, \omega)}{\text{SPWVD}_{x,g,h}(t, \omega)} \\ & \hat{\omega} = \omega + j \frac{\text{SPWVD}_{x,g,Dh}(t, \omega)}{\text{SPWVD}_{x,g,h}(t, \omega)} \end{aligned}$$

که در آن،

$$Dh(t) = \frac{dh}{dt}(t) \quad , \quad Th(t) = t \cdot h(t) \quad (۸)$$

در شکل ۱ چهار موجک مورلت مختلط با یکدیگر جمع شده و یک سیگنال را تشکیل داده اند. در شکل ۲ نیز توزیع زمان-فرکانس حاصل از چهار روش گوناگون (۱) طیف نگاشت (spectrogram)، (۲) توزیع ویگنر-وایل، (۳) توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده و (۴) شکل بازچینی شده آن نشان داده شده است. همان طور که در شکل ها مشاهده می شود، توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده با وجود ازدست دادن قدرت تفکیک زمان-فرکانس را به خوبی حذف می کند و از قدرت تفکیک بهتری نسبت به روش طیف نگاشت برخوردار است. در شکل بازچینی شده توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده، نسبت به خود توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده، قدرت تفکیک زمانی و فرکانسی، تا حد زیادی افزایش یافته است.

$\psi(\omega)$ و $\psi(t)$ به ترتیب موجک مادر در حوزه زمان و حوزه فرکانس و خط بالای آنها نشان دهنده مزدوج مختلط آنها و $W_f(a,b)$ ضرایب تبدیل موجک است (مالات، ۱۹۹۹).

در این مقاله در محاسبه تبدیل موجک از موجک بهبود یافته مورلت (لی و همکاران، ۲۰۰۶) به صورت رابطه های (۴) و (۵) به ترتیب در حوزه زمان و فرکانس، به منزله تابع موجک استفاده شد.

$$\psi_m(t) = \pi^{-1/4} e^{imt} e^{-(ct)^2/2} \quad (۴)$$

$$\hat{\psi}_m(\omega) = \sqrt{2\pi}^{1/4} c^{-1} e^{-(\omega-m)^2/2c^2} \quad (۵)$$

که در آنها، m فرکانس مدوله سازی (مدولاسیون) و c عامل کنترل طول موجک است. در صورتی که $c=1$ در نظر گرفته شود، موجک بهبود یافته مورلت با خود موجک مورلت یکی خواهد بود.

در این مقاله از توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده و شکل بازچینی شده این توزیع در حکم توزیع های زمان-فرکانس استفاده شده است. توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده از رابطه (۸) به دست می آید. خوانندگان برای آشنایی با توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده به (پاپاندرو-سوپاپولا، ۲۰۰۳) رجوع کنند.

$$\begin{aligned} & \text{SPWVD}_f(t, f) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) \int_{-\infty}^{+\infty} g(s-t) \\ & \quad f\left(s + \frac{\tau}{2}\right) f^*\left(s - \frac{\tau}{2}\right) ds e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (۶) \end{aligned}$$

که در آن، $h(t)$ و $g(t)$ پنجره های زمانی اند که به ترتیب توزیع ویگنر-وایل را در راستای فرکانس و زمان هموار می کنند. هموار کردن در راستای زمان و فرکانس باعث کاهش قدرت تفکیک زمانی و فرکانسی آن

$$W_U(a, b, \omega) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{2\pi^4} c^{-1} \sqrt{ae}^{i\omega(-t+b)} \\ & e^{\left(\frac{-a\omega}{2Q} - \frac{(a\omega-m)^2}{2c^2} \right)} \\ &= \sqrt{2\pi^4} c^{-1} \sqrt{ae}^{i\omega(-t+b)} \\ & e^{-\left(\frac{a^2\omega^2}{2c^2} + \frac{m^2}{2c^2} - \omega \left(\frac{am}{c^2} - \frac{t}{2Q} \right) \right)} \\ &= \sqrt{2\pi^4} c^{-1} \sqrt{ae}^{i\omega(-t+b)} \\ & e^{-\left(\frac{m^2}{2c^2} \right)} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{a\omega}{c} - \frac{m}{c} + \frac{ct}{2Qa} \right)^2} e^{\frac{1}{2} \left(\frac{m}{c} + \frac{ct}{2Qa} \right)^2} \\ &= \sqrt{2\pi^4} c^{-1} \sqrt{ae}^{i\omega(-t+b)} \\ & e^{\left(\frac{mt}{2Qa} + \frac{c^2 t^2}{8Q^2 a^2} \right)} \\ & e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{a\omega}{c} - \frac{m}{c} + \frac{ct}{2Qa} \right)^2} \end{aligned}$$

با تبدیل رابطه (۱۳) از حوزه فرکانس به حوزه زمان، می‌توان نوشت.

$$\begin{aligned} W_U(a, b, t) &= a^{-\frac{1}{2}} \pi^{-\frac{1}{4}} \\ & e^{-\frac{mt}{2Qa} + \frac{c^2 t^2}{8Q^2 a^2} - \frac{c^2 (t-b)^2}{2a^2}} \\ & e^{-\frac{i(t-b)c}{a \left[\frac{m}{c} - \frac{c(t-b)}{2Qa} \right]}} \quad (14) \end{aligned}$$

۳ تعیین فاکتور کیفیت در حوزه زمان-مقیاس و حوزه زمان-فرکانس

آکی و ریچاردز (۲۰۰۲) معادله موجی که در یک محیط با فاکتور کیفیت ثابت منتشر می‌شود را به صورت رابطه (۹) معرفی کردند.

$$\begin{aligned} U(\omega, z) \\ &= U(\omega, 0) e^{-i\omega z/c(\omega)} e^{-\omega z/2Qc(\omega)} \quad (9) \end{aligned}$$

که در آن، ω فرکانس زاویه‌ای، z فاصله انتشار، $U(\omega, 0)$ جبهه موج در محل منبع، $U(\omega, z)$ جبهه موج در فاصله z ، $c(\omega)$ سرعت فاز و Q فاکتور کیفیت است. سرعت فاز به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود.

$$c(\omega) = c_0 \left(1 + \frac{1}{\pi Q} \ln \left| \frac{\omega}{\omega_0} \right| \right) \quad (10)$$

با صرف نظر کردن از میرایی به خاطر پاشش سرعت $(c(\omega) = c_0)$ و با در نظر گرفتن $t = z/c_0$ رابطه (۹) را می‌توان به صورت رابطه (۱۱) ساده کرد.

$$\begin{aligned} U(\omega, t) \\ &= U(\omega, 0) e^{-i\omega t} e^{-\omega t/2Q} \quad (11) \end{aligned}$$

اگر منبع به صورت ایده آل یک ضربه فرض شود، به عبارت دیگر $|U(\omega, 0)| = 1$ ، آنگاه می‌توان نوشت.

$$U(\omega, t) = e^{-i\omega t} e^{-\omega t/2Q} \quad (12)$$

با استفاده از روابط (۳) و (۵)، تبدیل موجک پیوسته رابطه (۱۲) به صورت رابطه (۱۳) نوشته می‌شود.

فاکتور کیفیت را برآورد کرد. در عمل موجک منبع هیچ‌گاه به صورت ضربه نیست، بلکه به صورت موجک باندگذر است. در موجک باندگذر فرکانس‌های کم (مقیاس‌های بزرگ) وجود ندارند، بنابراین مرکز ثقل مقیاس به سوی مقیاس‌های کوچک‌تر منتقل می‌شود و فاکتور کیفیت برآورد شده بیشتر از واقعیت برآورد می‌شود. اما فاکتور کیفیت نسبی از شکل موجک تاثیر زیادی نمی‌پذیرد، لذا می‌توان از این روش برای توصیف کیفی فاکتور کیفیت استفاده کرد. با توجه به مطالب بیان شده می‌توان از این نشانگر در شناسایی مناطق با جذب زیاد نظیر ذخایر هیدروکربنی استفاده کرد.

برای مثال در شکل ۳-الف ردلرزه مصنوعی با بازتابی در زمان ۰/۲۴۸ ثانیه و موجک تابع تکانه (impulse) در یک محیط کاملاً کشسان ($Q \rightarrow \infty$) است. شکل ۳-ب همان ردلرزه است، با این تفاوت که محیط دارای فاکتور کیفیت برابر با $Q=150$ است. شکل‌های ۳-ج و ۳-د به ترتیب تبدیل موجک پیوسته با تابع موجک مورلت بهبودیافته برای مقیاس ۰/۱ تا ۵/۹۷ و ردلرزه پیش‌گفته است. ارتباط میان مقدار مقیاس و اندیس آن به صورت $(I=1:60, a=0.1 \times 2^{0.1 \times (60-I)})$ است، که در آن، I اندیس مقیاس و a مقدار مقیاس است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تبدیل موجک پیوسته ردلرزه اول قله مقیاس در اندیس $I=60$ یا مقیاس $a=0.1$ (کوچک‌ترین مقیاس) رخ می‌دهد. اما به لحاظ نظری این مقدار بایستی برابر با صفر باشد که $Q = \infty$ را نتیجه می‌دهد.

در مورد ردلرزه دوم قله مقیاس در اندیس $I=53$ یا مقیاس $a=0.1625$ رخ می‌دهد که $Q=152.6619$ به دست می‌آید. حال اگر به جای تابع تکانه از موجک ریکر ۳۰ هرتز درحکم موجک منبع استفاده شود، همان طوری که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، قله مقیاس در اندیس $I=38$ یا مقیاس $a=0.4595$ رخ می‌دهد که

با توجه به تعریف چگالی انرژی (energy density) (مالات، ۱۹۹۹)، می‌توان نوشت.

$$G_{a,b}(t) = \left\| W_U(a,b,t) \right\|^2 = \frac{a^{-1}}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{mt}{Qa} - \frac{c^2 t^2}{4Q^2 a^2} - \frac{c^2 (t-b)^2}{a^2}} \quad (15)$$

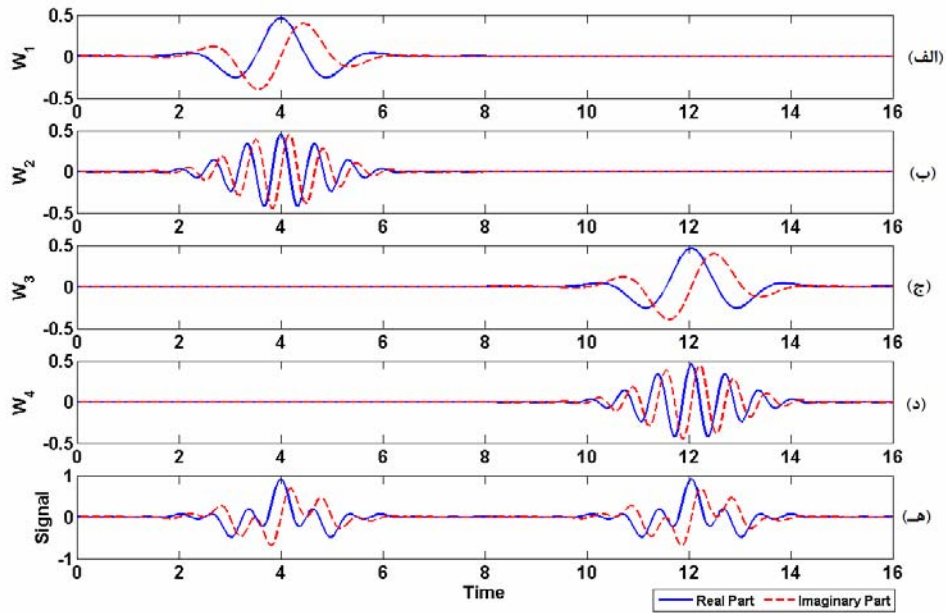
مشابه مرکز ثقل فرکانس می‌توان مرکز ثقل مقیاس را به صورت رابطه (۱۶) تعریف کرد.

$$Sc(b) = \frac{\int_0^{+\infty} G_{a,b}(t) \frac{da}{a}}{\int_0^{+\infty} \frac{1}{a} G_{a,b}(t) \frac{da}{a}} \quad (16)$$

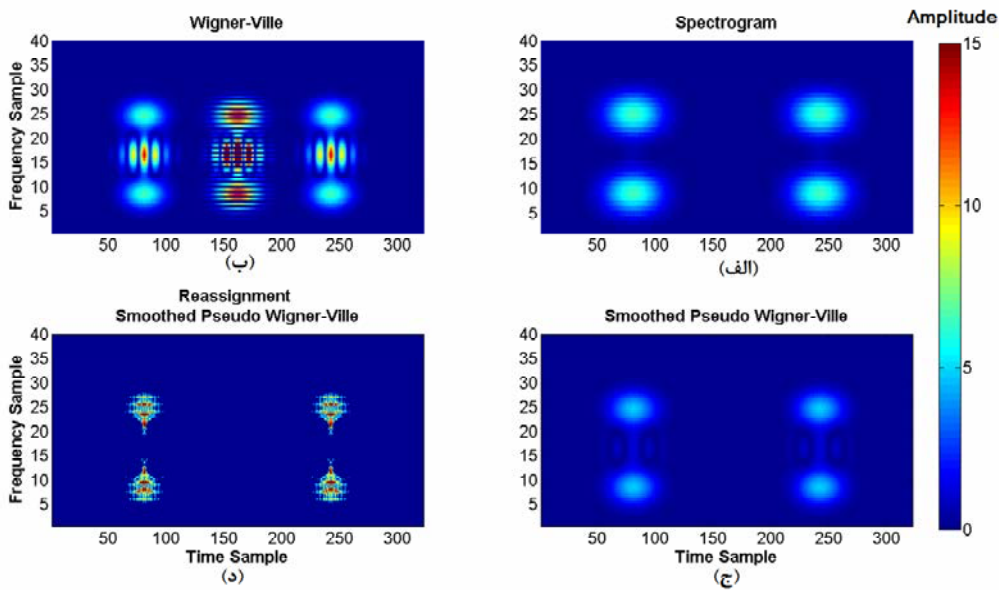
حساسیت مرکز ثقل مقیاس به نوفه از حساسیت مقیاس قله به نوفه کمتر است و بنابراین برای محاسبات اطمینان و دقت بیشتری دارد. برای محاسبه مرکز ثقل مقیاس در b ، $Sc(b)$ کافیت $t=b$ در نظر گرفته شود و انتگرال رابطه (۱۶) محاسبه شود.

$$\left. \begin{aligned} & \int_0^{+\infty} G_{a,b}(t) \frac{da}{a} \\ & = 4\pi^{\frac{3}{2}} \int_0^{+\infty} \frac{1}{a^2} e^{-\frac{mt}{Qa}} da \\ & = \frac{Q}{\sqrt{\pi mt}} \\ & \int_0^{+\infty} \frac{1}{a} G_{a,b}(t) \frac{da}{a} \\ & = 4\pi^{\frac{3}{2}} \int_0^{+\infty} \frac{1}{a^3} e^{-\frac{mt}{Qa}} da \\ & = \frac{Q^2}{\sqrt{\pi m} 2t^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow Sc(t) = \frac{mt}{Q} \quad (17)$$

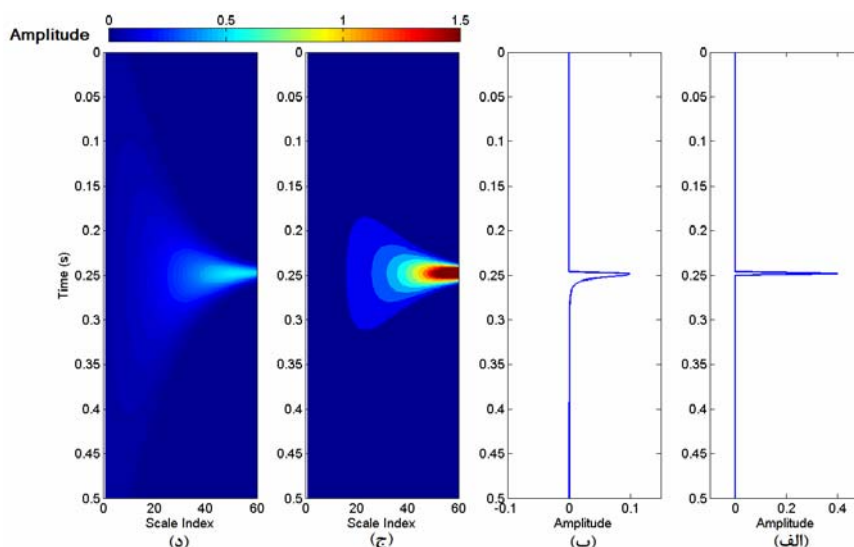
رابطه (۱۷) نشان می‌دهد، ارتباط بین فاکتور کیفیت و مرکز ثقل مقیاس معکوس است. به عبارت دیگر مرکز ثقل‌های مقیاس بزرگ نشانگر فاکتور کیفیت کم یا جذب زیادند. اگر موجک منبع یک ضربه باشد، می‌توان



شکل ۱. سیگنال تولید شده (هـ) از چهار موجک مورلت مختلط (الف) تا (د).



شکل ۲. توزیع زمان-فرکانس سیگنال شکل ۱ با استفاده از چهار روش (الف) طیف‌نگاشت، (ب) توزیع ویگنر-وایل، (ج) توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده و (د) شکل بازچینی شده توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده.



شکل ۳. الف) ردلرزه با موجک تابع تکانه در محیط کشسان و (ب) در محیط با $Q = 150$ و (ج) و (د) تبدیل موجک پیوسته دو ردلرزه (الف) و (ب).

فرکانس حاصل از توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده و شکل بازچینی شده آن نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، مرکز ثقل فرکانس محاسبه شده از روش شکل بازچینی شده توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده دارای قدرت تفکیک زمانی بهتری نسبت به دو روش دیگر است. این شکل توانمندی زیاد شکل بازچینی شده توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده را برای شناسایی موقعیت بی‌هنجاری‌های مرتبط با فاکتور کیفیت (مثل حضور مخازن هیدروکربن) نسبت به دو روش اول نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، در حضور نوفه (نسبت سیگنال به نوفه ۲۰ دسی‌بل) نیز کارایی روش‌ها مناسب است و نوفه تأثیر چندانی روی عملکرد آنها ندارد.

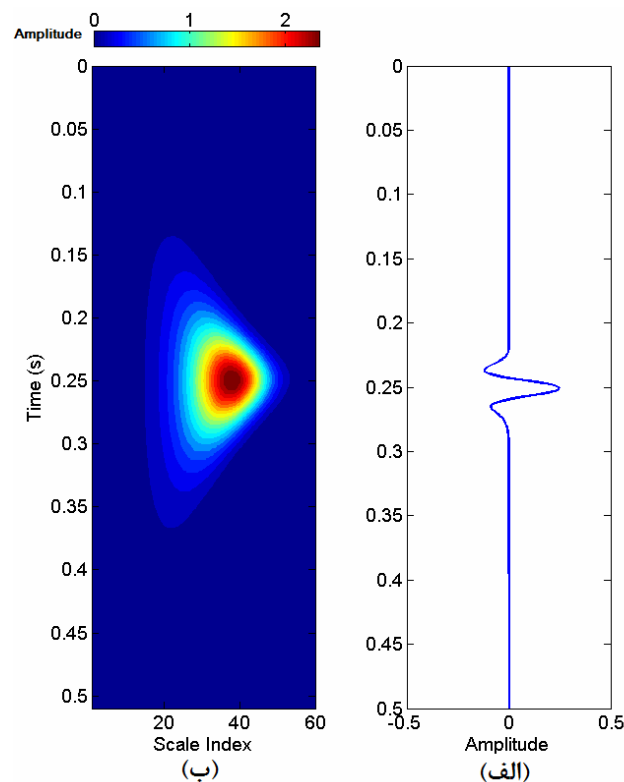
به منظور بررسی کارایی روش‌ها روی داده‌های واقعی، فاکتور کیفیت برای مکعب برانبارش شده داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی عرضه شده در نرم‌افزار همپسون-راسل (Hampson-Russell) به دست آمد.

مکعب برانبارش شده داده‌های لرزه‌ای در شکل ۶ و مکعب فاکتور کیفیت به دست آمده برای آن در شکل ۷

مقدار $Q = 54.4094$ را به دست می‌آورد. با توجه به رابطه معکوس بین مرکز ثقل مقیاس و مرکز ثقل فرکانس می‌توان به صورت توصیفی از مرکز ثقل فرکانس نیز برای برآورد کردن فاکتور کیفیت استفاده کرد. به عبارت دیگر، مرکز ثقل فرکانس زیاد نشانگر فاکتور کیفیت زیاد و مرکز ثقل فرکانس کم، نشانگر فاکتور کیفیت کم است. این موضوع از نقطه نظر نتایج به دست آمده ژانگ و اولریچ (۲۰۰۲) نیز قابل اثبات است. ارتباط بین نتایج حاصل از مرکز ثقل مقیاس و مرکز ثقل فرکانس را می‌توان از مقایسه نتایج روش تبدیل موجک پیوسته، توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده و شکل بازچینی شده آن (پاپاندرو-سوپاپولا، ۲۰۰۳) مشاهده کرد.

۴ اعمال روش‌ها روی داده مصنوعی و واقعی

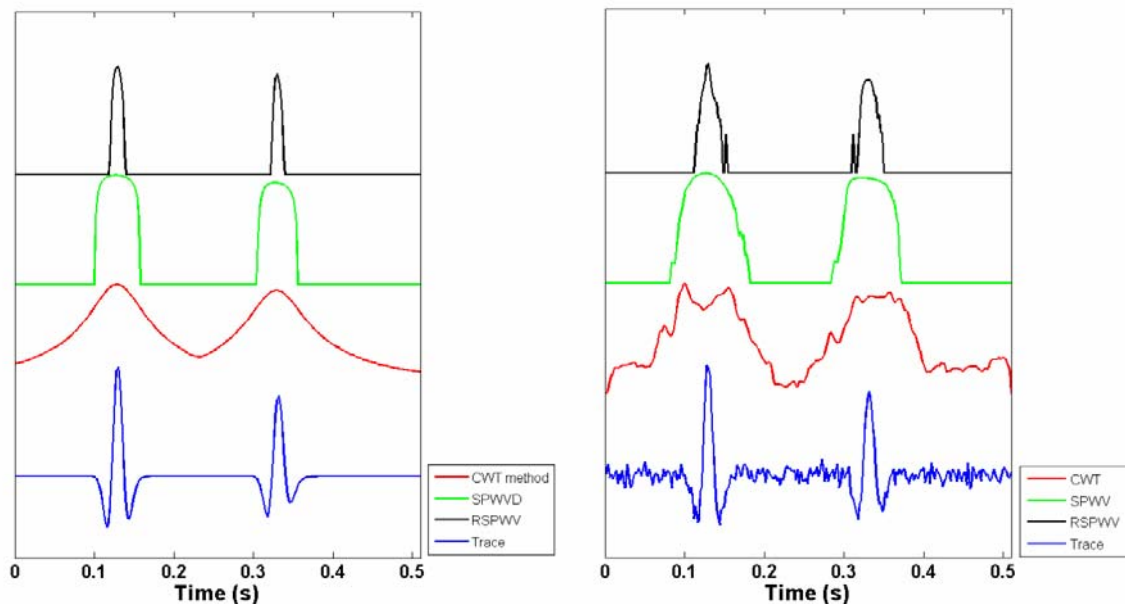
مدل مصنوعی مورد نظر مربوط به یک زمین دولایه است که فاکتور کیفیت برای بازتاب اول ۴۵ و برای بازتاب دوم ۳۵ در نظر گرفته شده است. در شکل ۵ ردلرزه مصنوعی در دو حالت بدون نوفه و با حضور نوفه به همراه مرکز ثقل مقیاس حاصل از تبدیل موجک پیوسته و مرکز ثقل



شکل ۴. (الف) ردلرزه در محیط با $Q=150$ و (ب) تبدیل موجک آن.

فاکتور کیفیت برای هر سه روش پیش گفته نشان داده شده است. در این شکل نگاره مقاومت صوتی موج P حاصل از چاه پیمایی در محل ۳ چاه با خطوط سفید و افق مخزن نیز با خط چین سیاه نشان داده شده است. هنگامی که امواج لرزه‌ای از مخزن هیدروکربنی عبور می‌کنند، در اثر میرایی ناشی از سیالات مخزنی دچار افت انرژی می‌شوند. اما این افت را زمانی می‌توان دید که موج عبوری از مخزن بازتاب شود. این اثر با عنوان سایه فرکانس کم (low frequency shadow) شناخته می‌شود (کستگنا و همکاران، ۲۰۰۳). بنابراین در روش‌های توصیف کیفی فاکتور کیفیت ناهنجاری ناشی از مخزن هیدروکربنی در زیر ناحیه مخزنی مشاهده می‌شود. اما در روش‌هایی که بر مبنای دامنه استوارند، مانند روشی که یان‌دونگ و زیادونگ (۲۰۰۷) برای محاسبه ضریب جذب استفاده

نشان داده شده است. در شکل ۷-الف با توجه به رابطه معکوس مرکز ثقل مقیاس و فاکتور کیفیت، محل‌هایی که دارای مرکز ثقل مقیاس زیادند و به رنگ سرخ نشان داده شده‌اند، بیشترین پتانسیل را برای حضور هیدروکربن دارند. اما در شکل‌های ۷-ب و ۷-ج با توجه به ارتباط مستقیم بین مرکز ثقل فرکانس و فاکتور کیفیت، محل‌های با مرکز ثقل فرکانس کم که با رنگ آبی مشخص شده‌اند، پتانسیل بیشتری برای حضور هیدروکربن را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود هر سه روش دارای همبستگی زیادی هستند و محدوده پتانسیل زیاد را نشان می‌دهند، اما روش سوم که از شکل بازچینی توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده استفاده کرده است از قدرت تفکیک بیشتری برخوردار است. در شکل ۸ نیز برش‌هایی در راستای خط گیرنده ۸۰ و خط منبع ۴۱ از مکعب



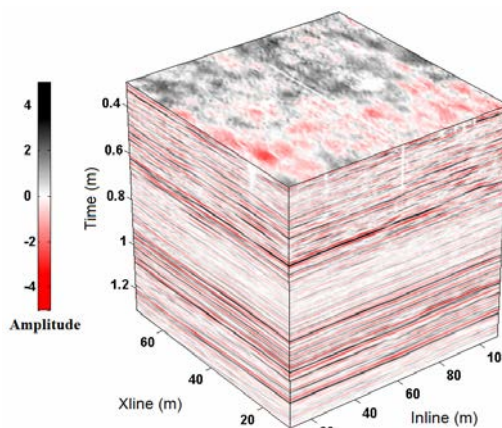
(ب)

(الف)

شکل ۵. (الف) رد لرزه (آبی) و مرکز ثقل معیاس (سرخ) محاسبه شده از راه تبدیل موجک پیوسته و مرکز ثقل فرکانس محاسبه شده از توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده (سبز) و شکل بازچینی شده آن (سیاه) و (ب) نتایج حاصل برای حالت رد لرزه حاوی نوفه.

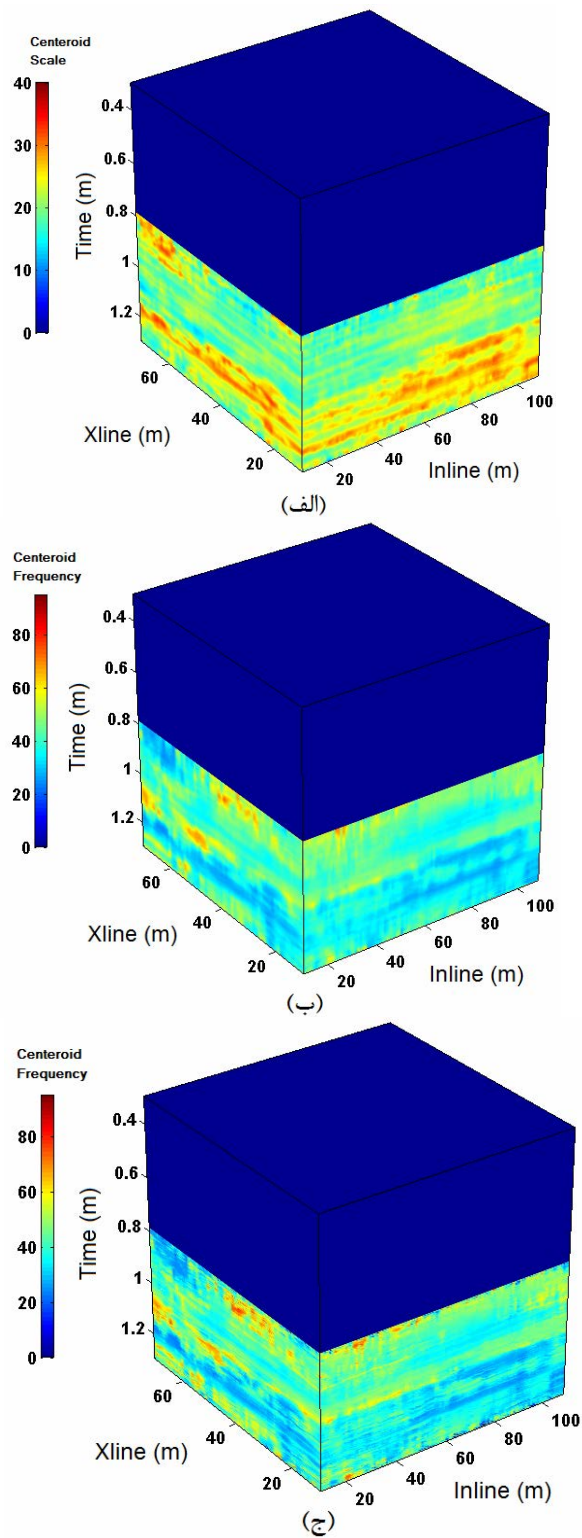
واضح تر نتایج، برش های انتخاب شده در امتداد خطوط گیرنده (خط منبع ۴۱) شکل ۸ که در فضای سه بعدی نشان داده شده اند، به صورت دوبعدی نمایش داده شده است. نگاره های مشکی رنگ روی این برش ها، نگاره های مقاومت صوتی موج P در محل سه چاه که روی خط منبع ۴۱ قرار گرفته اند، هستند.

همان طور که در شکل ۹-الف تا ۹-ج مشاهده می شود در زیر افق ۱۰۶۰ میلی ثانیه ناهنجاری مربوط به حضور احتمالی هیدروکربن قابل مشاهده است. در شکل ۹-د ضریب جذب که با یکی از روش های مبتنی بر دامنه محاسبه شده، نشان داده شده است. بررسی شکل ۹-د نیز در افق ۱۰۶۰ میلی ثانیه ناهنجاری مربوط به مخزن احتمالی هیدروکربن را نشان می دهد و تأییدی بر نتایج نشان داده شده در قسمت های (الف) تا (ج) این شکل است.

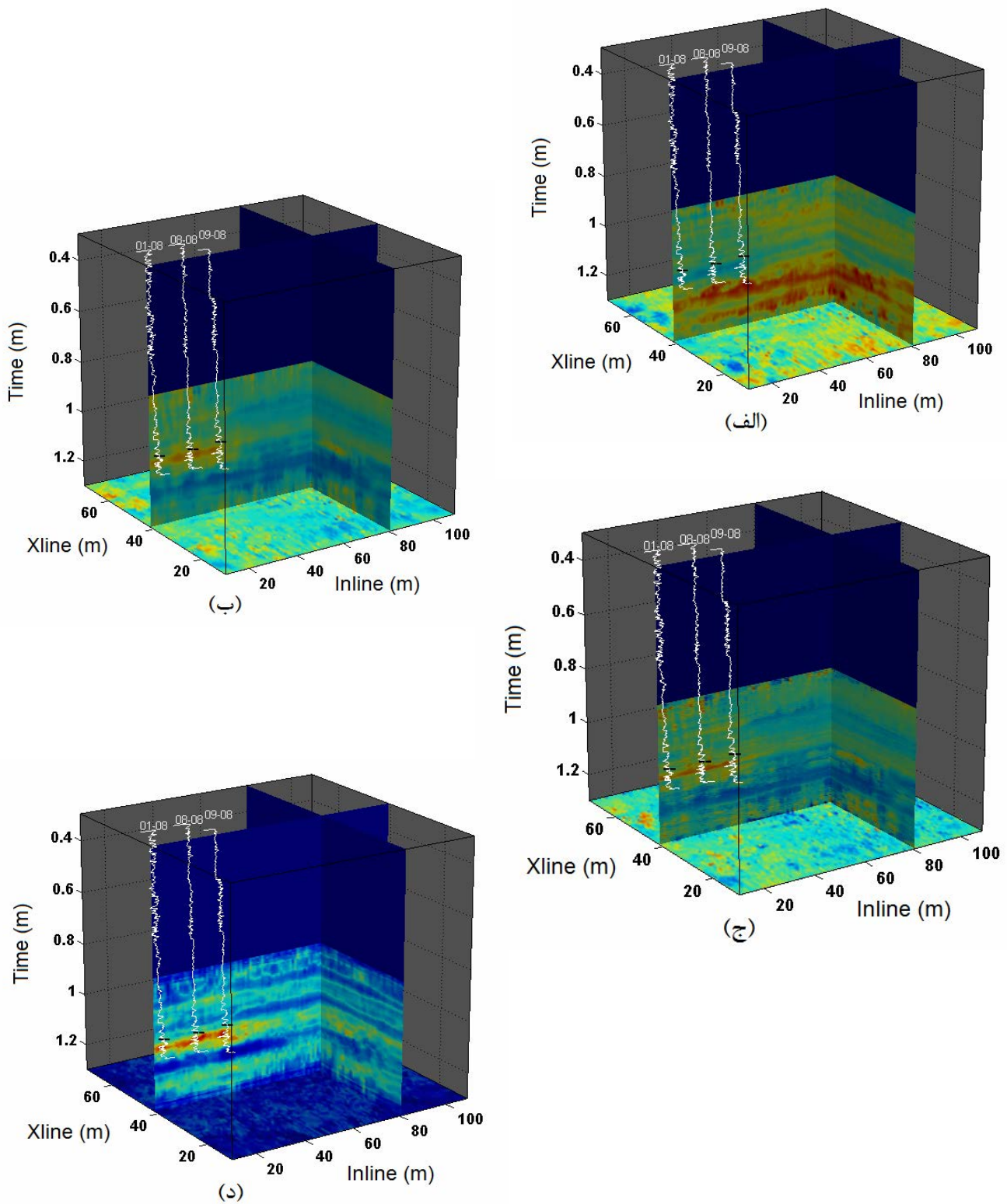


شکل ۶. مکعب داده های لرزه ای واقعی نرم افزار Hampson-Russell.

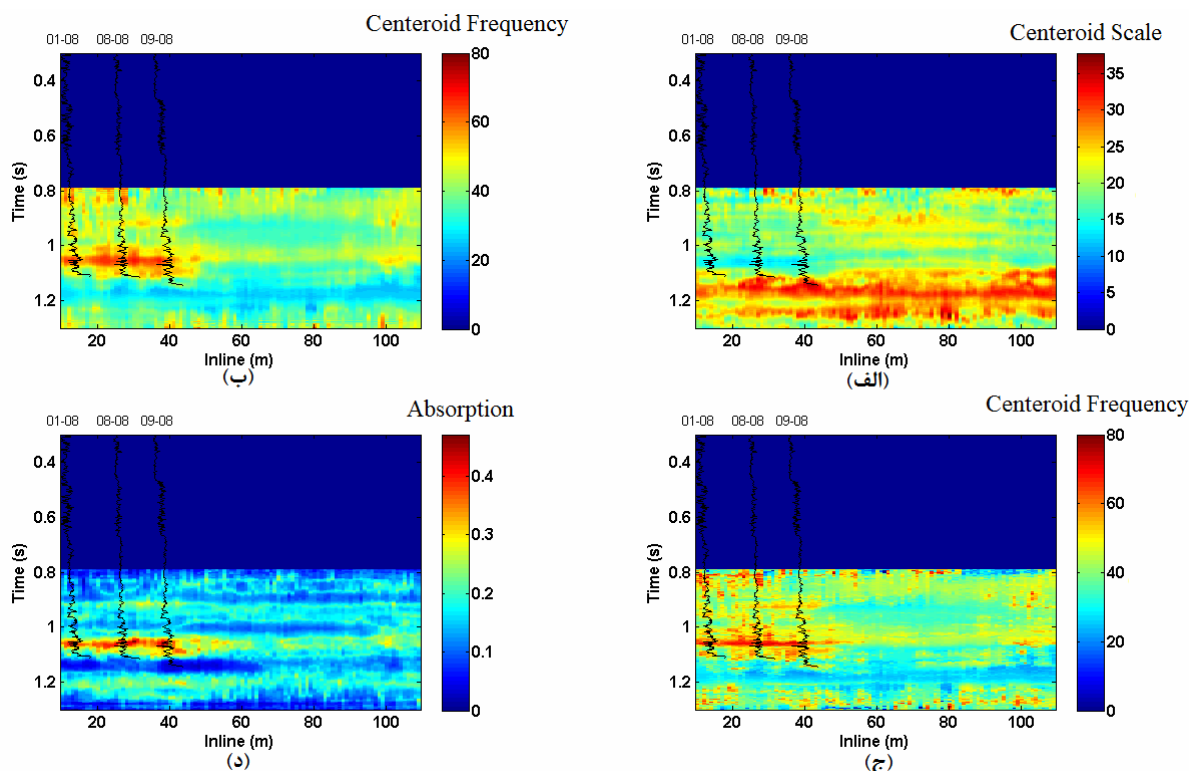
کردند، موقعیت مخزن بدون جابه جایی به دست می آید که در شکل ۸-د نتیجه برآورد ضریب جذب نشان داده شده است. با توجه به توضیحات و شکل ها می توان افق زمانی ۱۰۶۰ میلی ثانیه را به منزله محل احتمالی تجمع هیدروکربن در نظر گرفت. در شکل ۹ به منظور مشاهده



شکل ۷. مکعب نشانگر فاکتور کیفیت با استفاده از (الف) تبدیل موجک پیوسته، (ب) توزیع ویگنر- وایل نمای هموار شده و (ج) شکل بازچینی شده توزیع ویگنر- وایل نمای هموار شده.



شکل ۸. مقاطع عمودی در راستای خط گیرنده ۸۰ و خط چشمه ۴۱ برای مکعب فاکتور کیفیت با استفاده از روش‌های (الف) تبدیل موجک پیوسته، (ب) توزیع ویگنر- وایل نمای هموار شده و (ج) شکل بازچینی شده توزیع ویگنر- وایل نمای هموار شده و (د) مقاطع برای مکعب ضریب جذب.



شکل ۹. مقاطع عمودی در راستای خط منبع ۴۱ برای مکعب فاکتور کیفیت با استفاده از روش‌های (الف) تبدیل موجک پیوسته، (ب) توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده و (ج) شکل بازچینی شده توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده و (د) مقاطع برای مکعب ضریب جذب. خطوط مشکی ممتد نگار مقاومت صوتی را نشان می‌دهد.

۵ نتیجه‌گیری

بهبودیافته، توزیع ویگنر-وایل نمای هموار شده و شکل بازچینی شده آن که علاوه بر قدرت تفکیک بیشتر دارای جملات متقاطع کمتری نیز هست، سه تبدیل زمان-فرکانس مورد استفاده در این تحقیق است. کارایی الگوریتم‌های معرفی شده روی داده‌های مصنوعی و واقعی بررسی شد. نتایج به دست آمده با موفقیت فاکتور کیفیت را برآورد کرده‌اند. نتایج در زیر محل تجمع هیدروکربن حضور بی‌هنجاری با دامنه زیاد برای نشانگر مرکز ثقل مقیاس و بی‌هنجاری با دامنه کم برای نشانگر مرکز ثقل فرکانس نشان می‌دهند. این نتایج بیانگر این واقعیت هستند که کمیت‌های مرکز ثقل مقیاس و مرکز ثقل فرکانس می‌توانند به منزله نشانگر برای شناسایی مخازن مورد استفاده قرار گیرند. همچنین زیاد بودن قدرت تفکیک در شکل بازچینی شده توزیع ویگنر-وایل هموار شده باعث

از آنجا که امواج لرزه‌ای به هنگام انتشار درون زمین به‌خاطر پدیده جذب به‌صورت تابعی از فرکانس، متحمل افت دامنه می‌شوند، و میزان میرایی امواج لرزه‌ای به جنس و محتوای سیال درون حفره‌های سازندها بسیار وابسته است، لذا از آن می‌توان در حکم نشانگری برای مناطق حاوی هیدروکربن استفاده کرد. بررسی‌های ضریب میرایی امواج لرزه‌ای معمولاً در حوزه فرکانس و براساس طیف توان و روش‌های آماری صورت گیرد. با توجه به محدودیت‌های تبدیل فوریه در تحلیل سیگنال‌های ناپایا، در این تحقیق برای برآورد کردن فاکتور کیفیت، علاوه بر تبدیل‌های زمان-فرکانس، از نشانگرهای مرکز ثقل مقیاس و مرکز ثقل فرکانس به جای طیف توان استفاده شده است. تبدیل موجک پیوسته با استفاده از موجک مادر مورلت

- 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*: Academic Press Inc.
- Matos, M. C., Osorio, P. L. M., Mundim, E. C., and Moraces, M., 2005, Characterization of thin beds through joint time-frequency analysis applied to a turbidite reservoir in Campos Basin, Brazil: 75th Annual International Meeting, SEG, Extended Abstracts, 1429-1432.
- Papandreou-Suppappola, A., 2003, *Applications in time-frequency signal processing*: CRC Press, e-book.
- Parra, J. O., and Hacket, C., 2002, Wave attenuation attributes as flow unit indicators: *The Leading Edge*, **21**, 564-572.
- Sheriff, R. E., and Geldart, L. P., 1995, *Exploration seismology*: Cambridge University Press.
- Sinha, S., Routh, P. S., Anno, P. D., and Castagna, J. P., 2005, Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform: *Geophysics*, **70**, P19-P25.
- Tai, S., Han, D., and Castagna, J. P., 2006, Attenuation estimation with continuous wavelet transforms: 76th Annual International Meeting, SEG, Extended Abstracts, 1933-1936.
- Winkler, K. W., and Nur, A., 1982, Seismic attenuation: effects of pore fluids and frictional sliding: *Geophysics*, **47**, 1-15.
- Yandong, L., and Xiaodong, Z., 2007, Wigner-Ville distribution and its application in seismic attenuation estimation: *Applied Geophysics*, **4**, 245-254.
- Zhang, C. J., and Ulrych, T. J., 2002, Estimation of quality factor from CMP records: *Geophysics*, **67**, 1542-1547.
- افزایش قدرت تفکیک در برآورد کردن فاکتور کیفیت می شود. با توجه به نتایج می توان گفت در روش های مبتنی بر فرکانس بی هنجاری ناشی از اثر سایه فرکانس های کم در زیر موقعیت مخزن مشاهده می شود در حالی که در روش های مبتنی بر دامنه موج، موقعیت این بی هنجاری منطبق بر موقعیت مخزن است.

منابع

- Aki, K., and Richards, P. G., 2002, *Quantitative seismology*: University Science Books.
- Askari, R., and Siahkoobi, H. R., 2008, Ground roll attenuation using the S and x-f-k transforms: *Geophysical Prospecting*, **56**, 105-114.
- Auger, F., and Flandrin, P., 1995, Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method: *IEEE Tran. on Signal Processing*, **43**, 1068-1089.
- Bai, H., and Li, K. P., 1999, Stratigraphic absorption compensation based on time-frequency analysis: *Oil Geophysical Prospecting*, **34**, 642-648.
- 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: 67th Annual International Meeting, SEG, Extended Abstracts, 1417-1420.
- Gabor, D., 1946, Theory of communication: *Journal I.E.E. (London)*, **93**, 429-457.
- 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: 67th Annual International Meeting, SEG, Extended Abstracts, 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