

## تعیین محدوده مخزن با استفاده از وارون‌سازی هم‌زمان داده‌های لرزه‌ای

حامد قنبرنژاد مغانلو<sup>۱</sup>، محمد علی ریاحی<sup>۲</sup>، مجید باقری<sup>۳\*</sup>، و سید محسن سید علی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۴</sup> کارشناسی ارشد، شرکت نفت فلات قاره ایران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۵/۱۰)

### چکیده

لرزه‌شناسی اکتشافی به‌طور گسترده‌ای مورد توجه مهندسين نفت بوده است، به‌طوری‌که بیشترین میزان هیدروکربن‌های شناخته شده در سال‌های اخیر با استفاده از روش‌های لرزه‌ای بوده است. تعیین محدوده مخزن با استفاده از روش لرزه‌شناسی بازتابی به‌طور جدی از سال ۱۹۳۰ شروع شده و تاکنون مورد توجه بوده است. قدرت تفکیک بالای داده‌ها و هزینه پایین در مقایسه با حفاری، این روش غیرمستقیم را در اکتشاف هیدروکربن‌ها بسیار ضروری نموده است. تاکنون روش‌های مختلفی برای تعیین محدوده مخازن هیدروکربنی معرفی شده است که یکی از معروف‌ترین آنها روش‌های وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای است.

در وارون‌سازی پس از برانبارش، از داده‌های لرزه‌ای پس از برانبارش استفاده می‌شود. در این حالت تنها اطلاعاتی که می‌تواند از روی داده‌ها تخمین زده شود، مقاومت صوتی موج تراکمی می‌باشد. در وارون‌سازی هم‌زمان پیش از برانبارش که از داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش استفاده می‌کند، علاوه بر مقاومت صوتی موج تراکمی، اطلاعات موج برشی، چگالی و همچنین نسبت پواسون از روی داده‌ها قابل استخراج می‌باشد. بنابراین وارون‌سازی هم‌زمان پیش از برانبارش اطلاعات بیشتری را نسبت به وارون‌سازی پس از برانبارش نتیجه می‌دهد. در این مقاله از روش وارون‌سازی هم‌زمان داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش برای تعیین محدوده مخزنی در یکی از میادین هیدروکربنی خلیج فارس استفاده شده است. با استفاده از این روش، کمیت‌های مقاومت صوتی موج تراکمی، مقاومت صوتی موج برشی و چگالی تخمین زده شدند. در محدوده مخزنی کمیت‌های مورد نظر با کاهش غیرعادی مواجه شدند که دلیلی بر وجود ناهنجاری هیدروکربنی در این محدوده است و به‌این‌ترتیب محدوده مخزن مورد نظر شناسایی شد.

**واژه‌های کلیدی:** وارون‌سازی هم‌زمان پیش از برانبارش، وارون‌سازی پس از برانبارش، مقاومت صوتی موج تراکمی، محدوده مخزن، مقاومت صوتی موج برشی، چگالی

## ۱ مقدمه

شناسایی محدوده مخزن با استفاده از داده‌های لرزه‌ای اهمیت زیادی به لحاظ تعیین دقیق محل حفاری مناسب، کاهش ریسک حفاری و افزایش تولید نفت و گاز در میدان‌های هیدروکربنی دارد. یکی از مهم‌ترین روش‌های تعیین محدوده مخزن، وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای می‌باشد. وارون‌سازی ژئوفیزیکی عبارت است از به نقشه درآوردن ساختار فیزیکی و خواص لایه‌های زیرسطحی زمین با استفاده از اندازه‌گیری‌هایی که در سطح زمین انجام می‌پذیرد (راسل، ۱۹۸۸). از یک دیدگاه، وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای را می‌توان به‌عنوان مدل‌سازی معکوس در نظر گرفت. در این حالت، ایجاد مدل زمین بر اساس پاسخ ثبت شده، مد نظر می‌باشد (میسرا، ۲۰۰۸). هدف از وارون‌سازی لرزه‌ای محاسبه مقاومت صوتی موج تراکمی به‌منظور بررسی دقیق‌تر مخزن از نظر سنگ‌شناسی، تخلخل و همچنین ماهیت سیال مخزنی است. در این تحقیق از نوع خاصی از وارون‌سازی به نام وارون‌سازی هم‌زمان به‌منظور تعیین محدوده مخزنی استفاده می‌شود. فرآیند دو مرحله‌ای تخمین ضریب بازتاب توسط وارون‌سازی بر مبنای مدل، در این نوع وارون‌سازی با استخراج مستقیم و هم‌زمان مقاومت صوتی تراکمی، مقاومت صوتی برشی و چگالی به یک مرحله تبدیل می‌شود (سیم و بیکن، ۲۰۱۴). الگوریتم وارون‌سازی هم‌زمان با اختصاص دادن مجموعه‌ای از ردلرزه‌ها در محدوده‌های زاویه‌ای یکسان و موجک‌هایی برای هر محدوده، مدل‌هایی برای مقاومت تراکمی، مقاومت صوتی برشی و چگالی تولید می‌کند (مارتینز، ۲۰۰۶). تلفیق این مدل‌ها با اطلاعات زمین‌شناسی و داده‌های چاه برای شناسایی رخساره‌های مخزنی مورد استفاده قرار می‌گیرد (چوپرا و کاستاگنا، ۲۰۱۴).

## ۲ روش تحقیق

وارون کردن گردآوری‌های نقاط عمقی مشترک برای تعیین مقاومت صوتی تراکمی، مقاومت صوتی برشی و چگالی می‌باشد (چوپرا و کاستاگنا، ۲۰۱۴). در وارون‌سازی پس از برانبارش، این نکته که در سنگ‌های آواری، مقاومت صوتی تراکمی و مقاومت صوتی برشی با هم رابطه دارند، در نظر گرفته می‌شود. زمانی که پارامترهای پیچیده مانند حضور هیدروکربن در سنگ وجود نداشته باشد، سرعت موج تراکمی و برشی باید با هم رابطه خطی داشته باشند (مطابق معادله کاستاگنا). همچنین مطابق معادله گاردنر (گاردنر و همکاران، ۱۹۷۴)، چگالی باید با سرعت موج تراکمی رابطه داشته باشد؛ بنابراین، وارون‌سازی هم‌زمان از معادله‌هایی که بین پارامترهای فوق ارتباط برقرار می‌نمایند، استفاده می‌کند (همپسون و همکاران، ۲۰۰۵).

## ۲-۱ فرضیه‌های عمومی

ردلرزه می‌تواند به‌عنوان هم‌میخت بازتابش زمین و یک موجک لرزه‌ای با باند محدود تعریف شود:

$$S = W * r, \quad (1)$$

که  $S$  رد لرزه‌ای،  $W$  موجک لرزه‌ای،  $r$  بازتابش و  $*$  بیانگر عملگر هم‌میخت است.

## ۲-۲ روندهای پیش‌زمینه

ما از سنگ‌های آواری به‌عنوان روند پیش‌زمینه استفاده کردیم. در وارون‌سازی هم‌زمان دو رابطه خطی در جهت تعریف روابطی بین آنها فرض می‌شود. اولین رابطه با فرض ثابت بودن نسبت سرعت موج برشی و سرعت موج تراکمی در یک لایه به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\ln(Z_s) = \ln(Z_p) + \ln(V_s/V_p), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} C_1 &= 1 + \tan^2 \theta \\ C_2 &= -8 \left( \frac{V_s}{V_p} \right)^2 \tan^2 \theta \\ C_3 &= \frac{1}{2} \tan^2 \theta - 2 \left( \frac{V_s}{V_p} \right)^2 \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (9)$$

و:

$$\begin{aligned} r_p &= \frac{Z_{P_{i+1}} - Z_{P_i}}{Z_{P_{i+1}} + Z_{P_i}} = \frac{1}{2} \Delta \ln(Z_p) \\ r_s &= \frac{Z_{S_{i+1}} - Z_{S_i}}{Z_{S_{i+1}} + Z_{S_i}} = \frac{1}{2} \Delta \ln(Z_s), \\ r_D &= \frac{\Delta \rho}{\rho} = \Delta \ln(\rho) \end{aligned} \quad (10)$$

با دانستن  $r_{P_i} = \frac{Z_{P_{i+1}} - Z_{P_i}}{Z_{P_{i+1}} + Z_{P_i}}$ ، اگر ضرایب بازتاب، یک‌دهم یا کمتر از آن باشند و  $i$  بیانگر  $i$ -امین مرز بین لایه‌های  $i$  و  $i+1$  باشد، آنگاه  $r_{P_i} \approx \frac{\Delta Z_{P_i}}{2Z_{P_i}}$ .

از ریاضیات داریم که مشتق لگاریتم مقاومت صوتی تراکمی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\frac{d \ln Z_t}{dt} = \frac{1}{Z_t} \frac{dZ_t}{dt} \quad (11)$$

با حذف  $dt$  از طرفین و استفاده از  $\Delta$  به جای  $d$ :

$$r_{P_i} \approx \frac{1}{2} \Delta \ln(Z_i) = \frac{1}{2} [\ln Z_{P_{i+1}} - \ln Z_{P_i}], \quad (12)$$

با تغییر نماد  $L_p = \ln(Z_p)$ ، آنگاه:

$$r_{P_i} = \frac{1}{2} [L_{P_{i+1}} - L_{P_i}], \quad (13)$$

اگر معادله (۱۳) را به صورت نماد ماتریسی نوشته شود:

$$r_p = \frac{1}{2} D L_p, \quad (14)$$

که بردار بازتابش موج تراکمی،  $D$  ماتریس مشتق و  $L_p$  لگاریتم بردار موج تراکمی می‌باشد.

با فرض یک رابطه خطی بین پارامترهای بالا:

$$\ln(Z_s) = k \ln(Z_p) + K_c + \Delta L_s, \quad (3)$$

که  $\Delta L_s$  پارامتری است که زمانی که سیال سنگ، آب نباشد نقش ایفا می‌کند. رابطه دوم از معادله گاردنر به دست می‌آید. معادله گاردنر رابطه بین چگالی و سرعت موج تراکمی را به صورت زیر بیان می‌کند:

$$\rho = a V_p^b, \quad (4)$$

که  $\rho$  چگالی،  $Z_p$  مقاومت صوتی تراکمی و  $a$  و  $b$  ثابت هستند. با ضرب  $\rho^b$  در طرفین معادله:

$$\rho^{(b+1)} = a V_p^b \rho^b, \quad (5)$$

اگر از طرفین معادله بالا  $\ln$  گرفته شود، نهایتاً:

$$\ln(\rho) = \frac{b}{(b+1)} \ln(Z_p) + \frac{\ln(a)}{(b+1)}, \quad (6)$$

با فرض یک رابطه خطی دیگر برای معادله بالا:

$$\ln(\rho) = m \ln(Z_p) + m_c + \Delta L_D, \quad (7)$$

که  $\Delta L_D$  پارامتری است که زمانی که سیال سنگ، آب نباشد نقش ایفا می‌کند.

## ۲-۳ معادله فتی و همکاران

معادله آکی-ریچاردز یک ویرایش خطی از معادلات زوپرتیس است. ویرایش فتی و همکاران (۱۹۹۴) معادله آکی-ریچاردز به صورت زیر می‌باشد:

$$r_{pp\theta} = C_1 r_p + C_2 r_s + C_3 r_D, \quad (8)$$

که:

که بردار بازتابش برشی،  $D$  ماتریس مشتق و  $L_S$ ، لگاریتم بردار مقاومت صوتی برشی می‌باشد. همچنین معادله (۱۸) به صورت ماتریسی زیر می‌تواند نوشته شود:

$$\begin{bmatrix} r_{D1} \\ r_{D2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_{DN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & -1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & -1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{D1} \\ L_{D2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ L_{DN} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

یا در فرم کوتاه‌تر بصورت:

$$r_D = DL_D, \quad (22)$$

که بردار بازتابش چگالی،  $D$  ماتریس مشتق و  $L_D$  بردار لگاریتم چگالی است.

#### ۲-۴ معادله فنی و همکاران بهبود یافته

برای یک رد لرزه زاویه‌ای (Angle trace)  $r_{PP\theta}$  می‌توان وارون‌سازی رد لرزه با دورافت صفر را با ترکیب معادله‌های (۸) و (۱۳) گسترش داد تا به این معادله فنی و همکاران دست یافت.

$$S_\theta = \frac{1}{2} C_1 W_\theta DL_P + \frac{1}{2} C_2 W_\theta DL_S + \frac{1}{2} C_3 W_\theta DL_D, \quad (23)$$

که  $D$  ماتریس مشتق،  $W_\theta$  موجک در زاویه  $\theta$ ،  $L_S = \ln(Z_S)$  و  $L_P = \ln(Z_P)$  می‌باشد. به این نکته توجه شود که در این معادله موجک وابسته به زاویه می‌باشد.

#### ۲-۵ در نظر گرفتن روند پیش‌زمینه

معادله (۲۳) می‌تواند برای وارون‌سازی مورد استفاده قرار گیرد، اما این واقعیت را که یک رابطه بین روندهای

با ترکیب معادله‌های (۱) و (۱۴) معادله‌ای به دست می‌آید که رد لرزه‌ای را به لگاریتم مقاومت صوتی تراکمی مربوط می‌سازد:

$$S = \frac{1}{2} WDL_P, \quad (15)$$

معادله (۱۴) در شکل ماتریسی، به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{bmatrix} r_{P1} \\ r_{P2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_{PN} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & -1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & -1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{P1} \\ L_{P2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ L_{PN} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

و اگر عملیات مشابه را برای جمله‌های چگالی و برشی اعمال شود:

$$r_{Si} \approx \frac{1}{2} [L_{S_{i+1}} - L_{S_i}], \quad L_{S_i} = \ln Z_{S_i}, \quad (17)$$

$$r_{Di} \approx L_{D_{i+1}} - L_{D_i}, \quad L_{D_i} = \ln \rho_i, \quad (18)$$

به این نکته توجه شود که جمله چگالی ضریب  $\frac{1}{2}$  ندارد. اگر  $N$  نمونه بازتابش را در نظر بگیریم، معادله (۱۷) در فرم ماتریسی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{bmatrix} r_{S1} \\ r_{S2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_{SN} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & -1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & -1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{S1} \\ L_{S2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ L_{SN} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

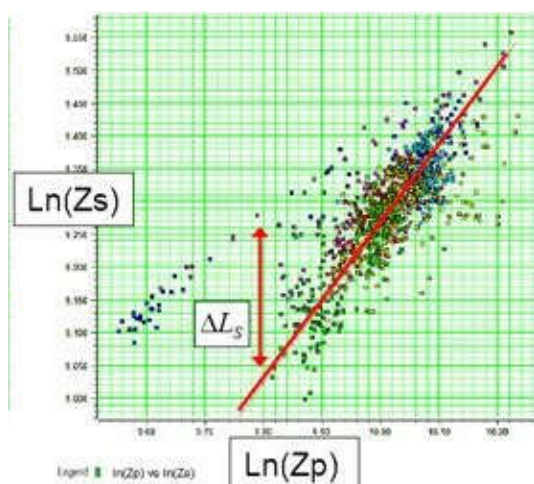
یا در فرم کوتاه‌تر بصورت:

$$r_S = \frac{1}{2} DL_S, \quad (20)$$

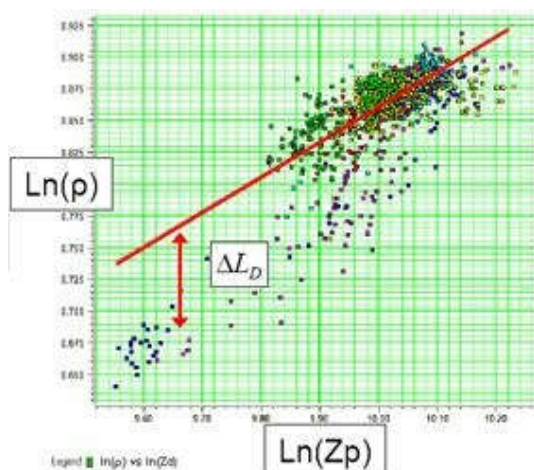
$$S_{\theta} = C_1 W_{\theta} D L_p + C_2 W_{\theta} D \Delta L_s + C_3 W_{\theta} D \Delta L_D, \quad (30)$$

که:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{2} C_1 + \frac{1}{2} K C_2 + m C_3, \\ C_2 &= \frac{1}{2} C_2 \end{aligned}, \quad (31)$$



(الف)



(ب)

شکل ۱. نمودارهای تقاطعی، (الف)  $\ln(Z_p)$  در مقابل  $\ln(Z_s)$ ، (ب)  $\ln(\rho)$  در مقابل  $\ln(Z_p)$ ، که در هر دو مورد یک‌جور شدگی خط راست اضافه شده است. میزان انحراف از خط راست یعنی  $\Delta L_s$  و  $\Delta L_D$  آنومالی‌های سیال مورد نظر هستند (همپسون و همکاران، ۲۰۰۵).

معادله (۳۰)، می‌تواند به شکل ماتریسی زیر نوشته شود:

پیش‌زمینه مقاومت صوتی تراکمی، مقاومت صوتی یرشی و چگالی وجود دارد را در نظر نمی‌گیرد. به‌طور کلی، فرض می‌شود که روابط زیر بین سه پارامتر فوق برقرار است:

$$L_s = K L_p + K_c + \Delta L_s, \quad (24)$$

که  $L_p = \ln(Z_p)$ .

$$L_D = m L_p + m_c + \Delta L_D, \quad (25)$$

که  $L_D = \ln(\rho)$ . انحراف از خط راست از یک جورشدگی خطی (Linear fit) در فضای لگاریتمی مد نظر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، جمله‌های  $\Delta L_D$  و  $\Delta L_s$  میزان انحراف‌ها از خط راست هستند که به‌واسطه حضور هیدروکربن به وجود آمده‌اند. با اعمال عملگر مشتق  $D$  به دو طرف معادله (۲۴) و (۲۵)، بدست خواهد آمد:

$$D L_s = K D \Delta L_p + D \Delta L_s, \quad (26)$$

$$D L_D = m D \Delta L_p + D \Delta L_D, \quad (27)$$

بایستی توجه شود که ثابت‌های  $K_c$  و  $m_c$  در این معادلات ظاهر نمی‌شوند، زیرا مشتق عدد ثابت برابر با صفر می‌باشد. حال با ترکیب معادله‌های (۲۶) و (۲۷) در داخل معادله (۲۳)، بدست خواهد آمد:

$$S_{\theta} = \frac{1}{2} C_1 W_{\theta} D L_p + \frac{1}{2} C_2 W_{\theta} (K D L_p + D \Delta L_s) + C_3 W_{\theta} (m D L_p + D \Delta L_D), \quad (28)$$

با مرتب کردن معادله فوق بدست خواهد آمد:

$$S_{\theta} = \left( \frac{C_1}{2} + \frac{K C_2}{2} + m C_3 \right) W_{\theta} D L_p + \frac{C_2}{2} W_{\theta} D \Delta L_s + C_3 W_{\theta} (m D L_p + D \Delta L_D), \quad (29)$$

در نهایت با ساده‌سازی ثابت‌ها معادله وارون‌سازی هم‌زمان نتیجه خواهد شد:

### ۳ کاربرد روش

در عمل انجام وارون‌سازی هم‌زمان شامل مراحل زیر می‌باشد:

- ساخت مدل اولیه مقاومت صوتی موج تراکمی، مقاومت صوتی برشی و چگالی،
- استخراج موجک‌های لرزه‌ای وابسته به زاویه به روش آماری،
- یافتن رابطه بین مقاومت صوتی موج تراکمی، برشی و چگالی از روی اطلاعات نگارهای چاه،
- یافتن مقادیر  $m$ ،  $k$ ،  $m_c$  و  $k_c$  با استفاده از نمودارهای تقاطعی نگارهای چاه،
- انجام وارون‌سازی هم‌زمان،
- شناسایی رخساره‌های مخزنی با استفاده از نمودار تقاطعی نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی در مقابل مقاومت صوتی تراکمی.

### ۳-۱ ساخت مدل اولیه مقاومت صوتی موج

#### تراکمی، مقاومت صوتی برشی و چگالی

در روش وارون‌سازی هم‌زمان، ساخت مدل‌های اولیه با استفاده از نگارهای چاه انجام می‌پذیرد. مدل اولیه چگالی، با استفاده از نگار چگالی موجود در چاه‌های منطقه ساخته شد. مدل اولیه مقاومت صوتی موج تراکمی با استفاده از نگار صوتی و نگار چگالی موجود در چاه‌های منطقه صورت گرفت. با استفاده از دو نگار فوق، مدل اولیه مقاومت صوتی موج تراکمی به دست می‌آید. در نهایت مدل مقاومت صوتی موج برشی، با استفاده از نگار موج برشی برداشت شده در یکی از چاه‌های منطقه ساخته شد (شکل‌های ۲، ۳ و ۴).

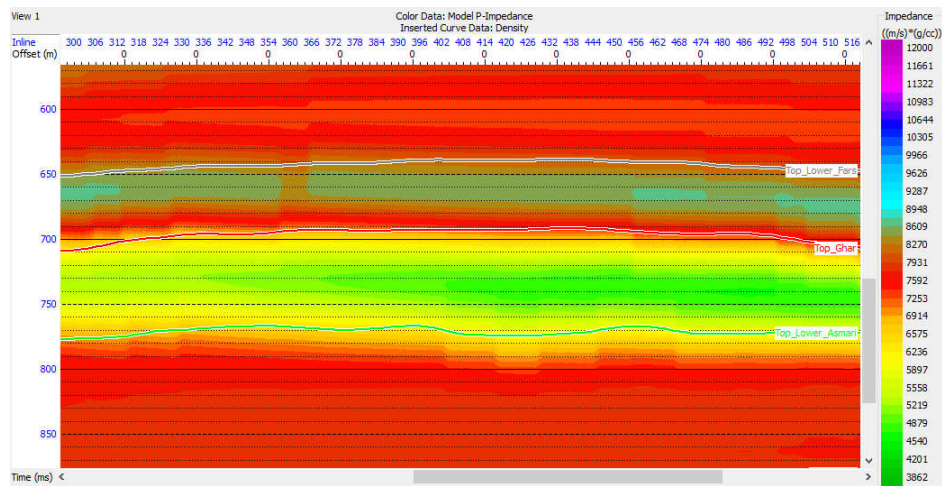
$$\begin{bmatrix} S_{\theta 1} \\ S_{\theta 2} \\ \vdots \\ S_{\theta N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \square & \square & \square \\ C_1 W_{\theta 1 D} & C_2 W_{\theta 1 D} & C_3 W_{\theta 1 D} \\ \square & \square & \square \\ C_1 W_{\theta 2 D} & C_2 W_{\theta 2 D} & C_3 W_{\theta 2 D} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \square & \square & \square \\ C_1 W_{\theta N D} & C_2 W_{\theta N D} & C_3 W_{\theta N D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_p \\ \Delta L_s \\ \Delta L_b \end{bmatrix}, \quad (32)$$

اگر معادله (۳۲) با استفاده از روش وارون‌سازی ماتریس (Matrix inversion) حل شود، دچار مشکلات حافظه و زمان اجرا خواهیم شد. یک راه‌حل عملی، ساخت مدل اولیه به صورت  $[L_p \quad \Delta L_s \quad \Delta L_b]^T = [1 \ln(Z_{F_0}) \quad 0 \quad 0]^T$  می‌باشد؛ به طوری که  $Z_{F_0}$  مدل مقاومت صوتی تراکمی اولیه - می‌باشد و سپس با روش گرادیان مزدوج به سمت جواب معادله تکرار می‌شود.

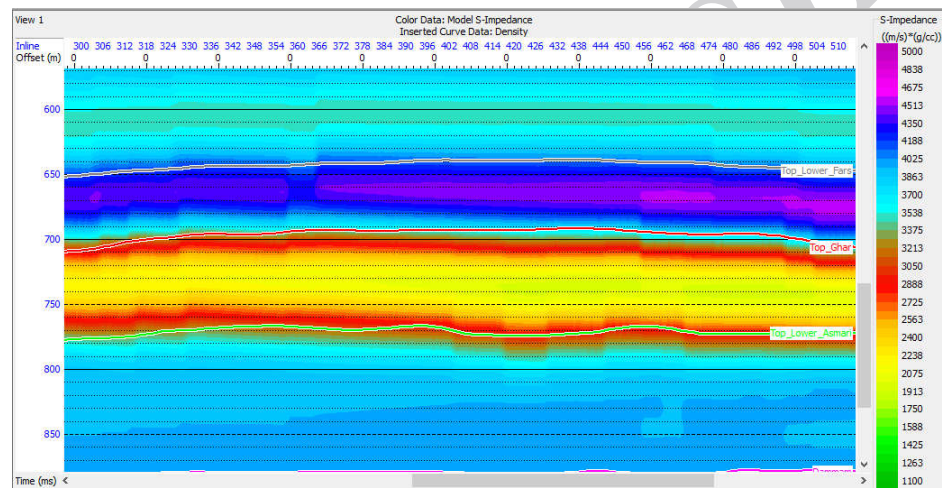
### ۲-۶ الگوریتم وارون‌سازی هم‌زمان

- ساخت  $N$  برانبارش زاویه.
- تخمین  $N$  موجک، برای هر برانبارش زاویه.
- ساخت مدل‌های اولیه برای  $Z_p$ ،  $Z_s$  و  $\rho$ .
- محاسبه مقادیر بهینه برای  $k$  و  $m$  با استفاده از نگارهای چاه.
- ساخت حدس اولیه به صورت مقابل.
- حل سیستم معادلات با استفاده از روش گرادیان مزدوج.
- محاسبه مقادیر نهایی  $Z_p$ ،  $Z_s$  و  $\rho$  با استفاده از روابط زیر:

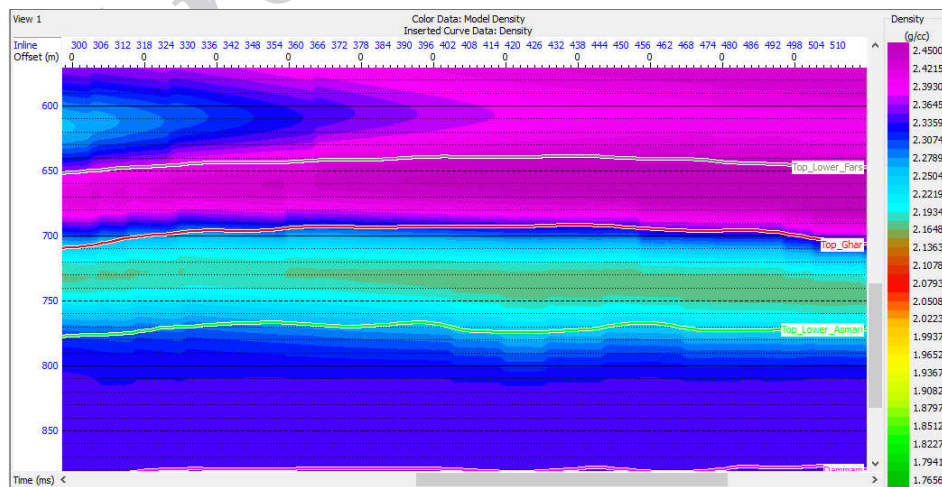
$$\begin{aligned} Z_p &= \exp(L_p) \\ Z_s &= \exp(KL_p + K_c + \Delta L_s), \\ \rho &= \exp(mL_p + m_c + \Delta L_b) \end{aligned} \quad (33)$$



شکل ۲. ساخت مدل اولیه برای مقاومت صوتی موج تراکمی با استفاده از اطلاعات نگارهای چاه.



شکل ۳. ساخت مدل اولیه برای مقاومت صوتی برشی با استفاده از اطلاعات نگارهای چاه.



شکل ۴. ساخت مدل اولیه چگالی با استفاده از اطلاعات نگارهای چاه.

### ۲-۳ استخراج موجک‌های لرزه‌ای وابسته به

#### زاویه به روش آماری

همان‌گونه که پیشتر ذکر شد، برای حل معادله (۳۲) علاوه بر موارد بالا، نیاز به استخراج موجک‌های وابسته به زاویه داریم. بدین منظور ابتدا باید جمع‌آوری‌های زاویه برای سه دسته زاویه ساخته شود. سپس با استفاده از جمع‌آوری‌های زاویه سه دسته موجک وابسته به زاویه با فاز صفر برای زوایای نزدیک (۲ تا ۱۱ درجه)، میانه (۱۱ تا ۲۰ درجه) و دور (۲۰ تا ۲۹ درجه)، به روش آماری استخراج گردیدند. شکل ۵ نمایش هم‌زمان سه موجک استخراج شده فوق را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود هر دو مؤلفه کم فرکانس و فرکانس بالای موجک وابسته به زاویه از داده لرزه‌ای پیش از برانبارش می‌توانند استخراج شوند. فاز هر سه موجک استخراج شده برابر صفر درجه است.

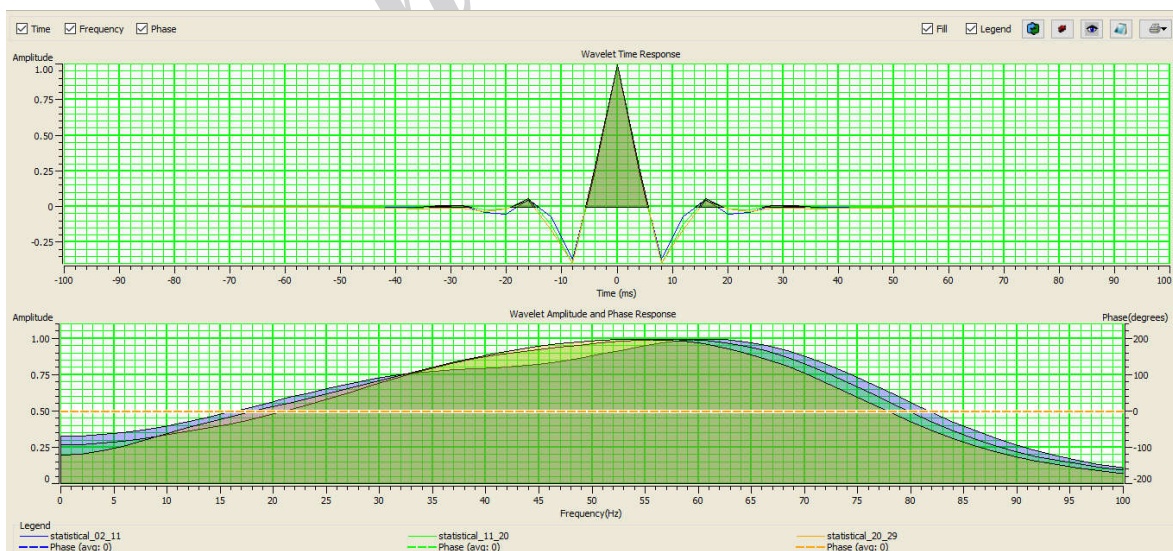
### ۳-۳ یافتن مقادیر $m$ ، $k$ ، $m_c$ و $k_c$ با استفاده از

#### نمودارهای تقاطعی نگارهای چاه

در مرحله بعدی، نیاز به محاسبه مقادیر  $m$ ،  $k$ ،  $m_c$  و  $k_c$  می‌باشد که به ترتیب برابر با شیب خط نمودار تقاطعی لگاریتم چگالی در مقابل لگاریتم مقاومت صوتی، شیب خط نمودار تقاطعی لگاریتم مقاومت صوتی برشی در مقابل لگاریتم مقاومت صوتی تراکمی، عرض از مبدأ نمودار تقاطعی لگاریتم چگالی در مقابل لگاریتم مقاومت صوتی تراکمی و عرض از مبدأ نمودار تقاطعی لگاریتم مقاومت صوتی برشی در مقابل لگاریتم مقاومت صوتی تراکمی می‌باشد (شکل ۶). این مقادیر با استفاده از نگارهای چاه ترسیم می‌شوند. مقادیر به‌دست‌آمده برای چهار پارامتر ذکر شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

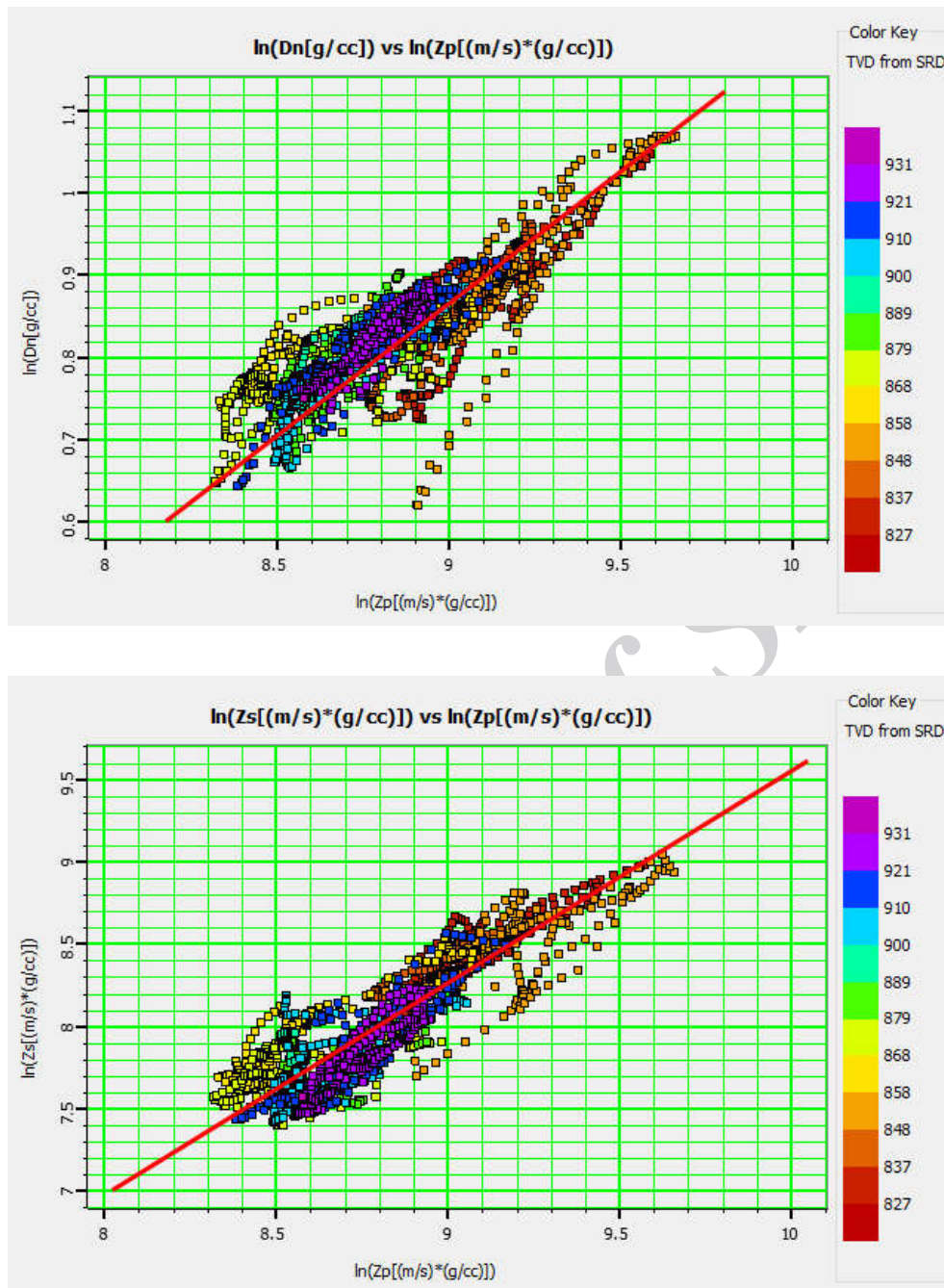
جدول ۱. مقادیر پارامترهای  $m$ ،  $k$ ،  $m_c$  و  $k_c$  به‌دست‌آمده از اطلاعات چاه.

$k$	$k_c$	$m$	$m_c$
۱.۲۸۷	-۳.۳۱۶	۰.۳۲۱	-۲.۰۲۴



شکل ۵. نمایش هم‌زمان سه موجک وابسته به زاویه استخراج شده به روش آماری با فاز صفر. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود هر دو مؤلفه کم فرکانس و فرکانس بالای موجک وابسته به زاویه از داده لرزه‌ای پیش از برانبارش استخراج شده‌اند.





شکل ۶. به‌دست آوردن مقادیر  $m$ ،  $k$ ،  $m_e$  و  $k_e$  با استفاده از نمودار تقاطعی لگاریتم مقاومت صوتی برشی در مقابل مقاومت صوتی تراکمی و همچنین نمودار تقاطعی لگاریتم چگالی در مقابل مقاومت صوتی تراکمی که از داده‌های نگارهای چاه به‌دست آمده‌اند.

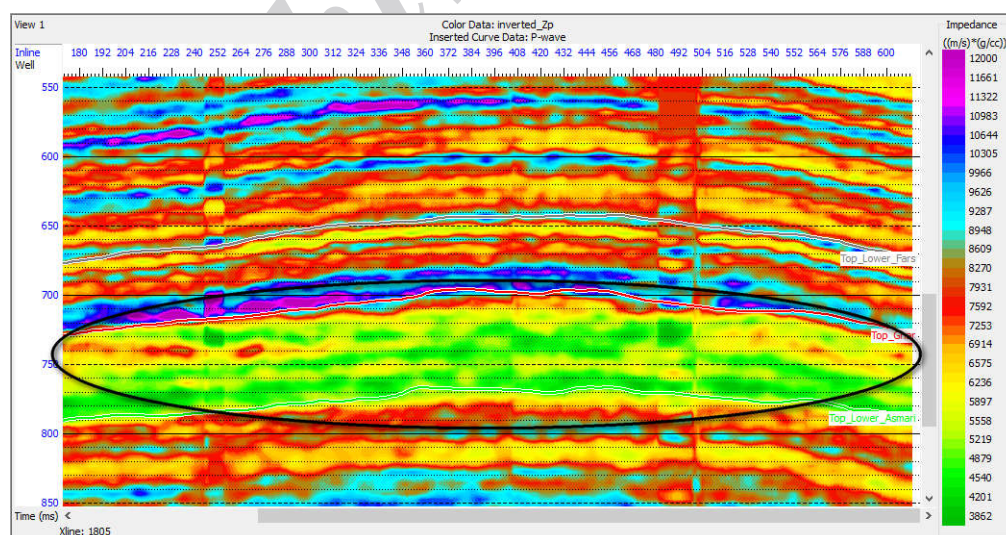
استخراج می‌شوند. در این مرحله، معادلات سه‌گانه برای به‌دست آوردن مقادیر مقاومت صوتی تراکمی، مقاومت صوتی برشی و چگالی با استفاده از روش گرادیان مزدوج

### ۳-۴ انجام وارون‌سازی هم‌زمان

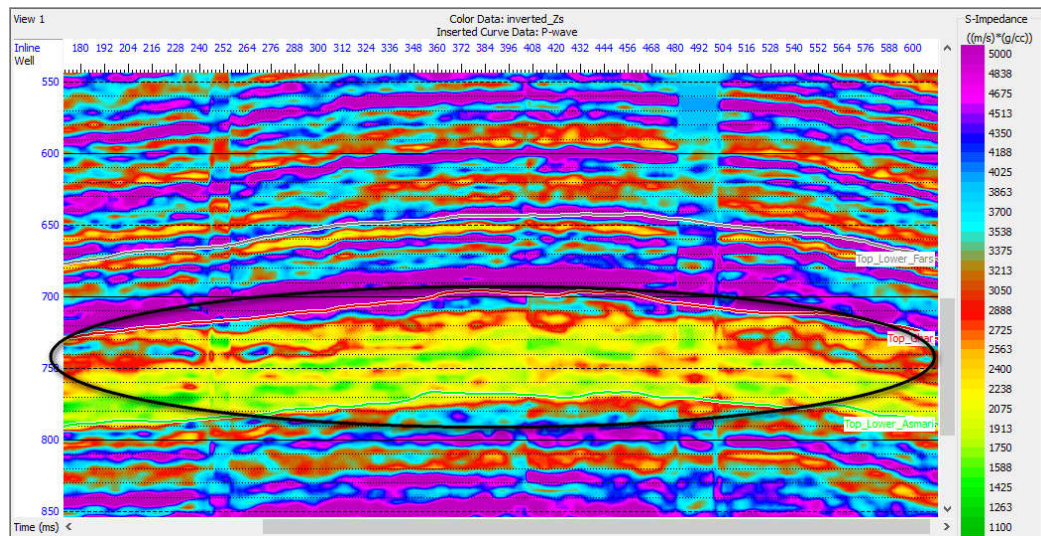
با انجام مراحل فوق، تمامی پارامترهای مورد نیاز برای حل معادله (۳۲) از روی داده‌های لرزه‌ای و نگارهای چاه

می‌شود، در محدوده مخزن (محدوده مشخص شده با بیضی)، چگالی کاهش می‌یابد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در محدوده مخزنی سه پارامتر مقاومت صوتی تراکمی، مقاومت صوتی برشی و چگالی با کاهش غیرعادی مواجه می‌شوند. به‌طور کلی حضور هیدروکربن موجب کاهش چگالی می‌شود. البته ذکر این نکته ضروری است که به‌علت آنکه در مقطع چگالی، تباین بین محدوده مخزنی و خارج از آن، نسبت به مقاطع مقاومت صوتی تراکمی و برشی کمتر است، مقادیر چگالی به‌دست‌آمده از وارون‌سازی هم‌زمان ممکن است دقت بالایی نداشته باشند. به همین منظور مقطع چگالی تنها به‌عنوان یک پارامتر کمکی برای تعیین محدوده مخزن به کار می‌رود و با استفاده از دو پارامتر مقاومت صوتی تراکمی و مقاومت صوتی برشی و با کمک مقطع چگالی می‌توان محدوده مخزنی را با درصد اطمینان بالایی تعیین نمود.

حل می‌شوند و مقاطع سه پارامتر فوق به‌دست می‌آیند. شکل ۷، مقطع مقاومت صوتی تراکمی به‌دست آمده از حل معادله (۳۲) می‌باشد. به‌علت حضور پوش‌سنگ انیدریتی در بالای مخزن، شاهد بیشترین مقاومت صوتی تراکمی در این ناحیه هستیم. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقادیر مقاومت صوتی تراکمی در محدوده مخزن (محدوده مشخص شده با بیضی) با کاهش غیر عادی مواجه می‌شوند. علت کاهش غیرعادی مقاومت صوتی تراکمی در محدوده مخزن، کاهش غیرعادی چگالی و سرعت موج تراکمی در هنگام حضور هیدروکربن می‌باشد. شکل ۸، مقطع مقاومت صوتی برشی به‌دست‌آمده از وارون‌سازی هم‌زمان را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در محدوده مخزن (محدوده مشخص شده با بیضی)، مقاومت صوتی برشی کاهش می‌یابد. شکل ۹ نیز مقطع چگالی به‌دست‌آمده از وارون‌سازی هم‌زمان را نشان می‌دهد. چنانچه ملاحظه



شکل ۷. مقطع لرزه‌ای مقاومت صوتی تراکمی حاصل از وارون‌سازی هم‌زمان. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در محدوده مخزن (محدوده مشخص شده با بیضی)، مقاومت صوتی تراکمی کاهش می‌یابد.



شکل ۸. مقطع لرزه‌ای مقاومت صوتی برشی حاصل از وارون‌سازی هم‌زمان. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در محدوده مخزن (محدوده مشخص شده با بیضی)، مقاومت صوتی برشی کاهش می‌یابد.

#### ۴ نتیجه‌گیری

محدوده مخزن، هر سه پارامتر مقاومت صوتی تراکمی، مقاومت صوتی برشی و چگالی با کاهش مواجه می‌شوند که خود دلیلی بر وجود مخزن در ناحیه مورد نظر است. به علت برداشت موج برشی در یکی از چاه‌های حفر شده، دقت محاسبه برای چهار پارامتر  $k$ ،  $m$ ،  $k_c$  و  $m_c$  که در ماتریس وارون‌سازی هم‌زمان مورد استفاده قرار می‌گیرند، افزایش یافت. بنابراین پیشنهاد می‌شود در چاه‌هایی که در آینده حفر می‌شوند، این نگار نیز برداشت گردد. تمامی مراحل توضیح داده شده در بخش ۲ برای نیل به وارون‌سازی هم‌زمان با دقت بالا انجام شد که نتیجه آن، تهیه مقاطع مقاومت صوتی، مقاومت صوتی برشی و چگالی با ضریب اطمینان بالا بود. با در دست داشتن مقادیر مقاومت صوتی، مقاومت صوتی برشی و چگالی، تعیین محدوده مخزنی با ضریب اطمینان بالایی انجام پذیرفت.

#### منابع

- Chopra, S., and Castagna, J. P., 2014, AVO: SEG Investigations in Geophysics No. 16.  
 Fatti, J. L., Smith, G. C., Vail, P. J., Strauss, P. J., and Levitt, P. R., 1994, Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: A

در این مقاله، از وارون‌سازی هم‌زمان برای تعیین محدوده مخزنی یکی از میدان‌های هیدروکربنی خلیج فارس استفاده شد. در وارون‌سازی پس از برانبارش، تنها مقطع مقاومت صوتی موج تراکمی قابل استخراج است که تعیین محدوده مخزنی را با عدم قطعیت مواجه می‌سازد. به علت اینکه در وارون‌سازی هم‌زمان پیش از برانبارش، هر دو مؤلفه کم فرکانس و فرکانس بالای مقاومت صوتی می‌توانند از روی داده لرزه‌ای استخراج شوند، این وارون‌سازی جزئیات بیشتری از مقطع مقاومت صوتی نسبت به وارون‌سازی پس از برانبارش در اختیار قرار می‌دهد. همچنین، مقطع مقاومت صوتی تراکمی استخراج شده از وارون‌سازی هم‌زمان پیش از برانبارش از دقت بیشتری نسبت به مقطع صوتی تراکمی حاصل از وارون‌سازی پس از برانبارش برخوردار است. در وارون‌سازی پیش از برانبارش، علاوه بر مقاومت صوتی تراکمی، می‌توان مقاومت صوتی برشی و چگالی و در نتیجه نسبت پواسون را نیز از روی داده‌های لرزه‌ای استخراج کرد که موجب افزایش اطلاعات کاربر از مخزن خواهد شد. در

- Mallick, S., 1999, Some practical aspects of prestack waveform inversion using a genetic algorithm: An example from the east Texas Woodbine gas sand: *Geophysics*, **64**(2), 326-336.
- Misra, S., 2008, Global optimization with applications to geophysics: Ph. D. thesis, University of Alberta, Canada.
- Russel, B. H., 1988, Introduction to Seismic Inversion Methods.
- Simm, R., and Bacon, M., 2014, *Seismic Amplitude an Interpreter's Handbook*, ISBN: 9781107011502..
- 3-D seismic case history using the geostack technique: *Geophysics*, **59**(9), 1362-1376.
- Gardner, G., Gardner, L., and Gregory, A., 1974, Formation velocity and density—the diagnostic basis for stratigraphic traps: *Geophysics*, **39**, 770-780.
- Hampson, D., Russell, B., and Bankhead, B., 2005, Simultaneous inversion of pre-stack seismic data. SEG Annual Meeting Abstract.
- Ma, X., 2002, Simultaneous inversion of prestack seismic data for rock properties using simulated annealing *Geophysics*, **67**(6), 1877-1885.
- Martins, J. L., 2006, Elastic impedance in weakly anisotropic media: *Geophysics*, **71**(3), D73-D83.

Archive of SID

## Determining the area of reservoir using simultaneous inversion of seismic data

Hamed Ghanbarnejad Moghanloo<sup>1</sup>, Mohammad Ali Riahi<sup>2</sup>, Majid Bagheri<sup>3\*</sup>, and Seyed Mohsen Seyedali<sup>4</sup>

<sup>1</sup>M. Sc. Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>4</sup>M. Sc., Iranian Offshore Oil Company (IOOC), Tehran, Iran

(Received: 09 January 2017, Accepted: 01 August 2017)

### Summary

Poststack seismic inversion generally transmutes seismic amplitude to P-wave acoustic impedance, which lacks low-frequency component due to the stacking process. This component should be compensated using well logs as a priori constraint. If this low-frequency trend is known with adequate accuracy, poststack inversion could produce precise results. Nevertheless, in most cases, the mentioned information are far from the true model. In such cases, poststack inversion results could have high uncertainty. Because there is no mode conversion at normal incidence, poststack inversion is completely acoustic, hence P-wave impedance is the only information which can be extracted from poststack inversion of P-wave data.

In simulations prestack inversion, in addition to the P-wave acoustic impedance, S-wave information, density, and Poisson's ratio can also be derived from prestack data. Thus, prestack inversion can be used to get more information than poststack inversion. The two-step process of acoustic impedance and shear impedance by model-based inversion is replaced by one-step pre-stack simultaneous inversion.

In order to apply simultaneous inversion method to our prestack seismic data, the data should be transformed from offset domain to angle domain as the first step. A useful approach is to calculate offset as a function of incidence angle, using Snell's Law to follow the ray path through the layers if velocity information is available. The next step is to build initial models of acoustic impedance, shear impedance, and density. We built these initial models using sonic log, Delta-Time Shear (DTSM) log and RHOB log which were available in the interest area.

There are two relationships that should hold for these wet rocks. The first relationship uses this fact that in wet clastics the ratio of the s-wave velocity over p-wave velocity should be constant within a rock layer. After reformulation of the mentioned trend, one can understand that the natural logarithm of shear impedance has a linear relationship with the natural logarithm of acoustic impedance. The second fact uses Gardner equation. After reformulation of the Gardner relation, it is understandable that the natural logarithm of density has a linear relationship with the natural logarithm of acoustic impedance, too.

We determined  $k$ ,  $k_c$ ,  $m$  and  $m_c$  which respectively are slope of the natural logarithm of shear impedance against natural logarithm of acoustic impedance, intercept of the natural logarithm of shear impedance against natural logarithm of acoustic impedance, slope of the natural logarithm of density against natural logarithm of acoustic impedance, intercept of the natural logarithm of shear impedance against natural logarithm of acoustic impedance.

Besides, we need a set of angle-dependent wavelets which are derived from angle stacks. Hence, we built three angle stacks; near-angle stack (0 to 11 degrees), middle-angle stack (11 to 20 degrees) and far-angle stack (20 to 29 degrees). Using these angle stacks, we built three statistical angle-dependent wavelets from three angle stacks. Finally, with log information, we built an initial model for acoustic impedance and tried to solve the inversion matrix using conjugate gradient method. Solving the equation, we can derive acoustic impedance, shear impedance, and density sections simultaneously from prestack data. Using simultaneous inversion, we identified hydrocarbon reservoir.

**Keywords:** prestack simultaneous inversion, poststack inversion, P-wave acoustic impedance, reservoir area, S-wave acoustic impedance, density

\*Corresponding author:

majidbagheri@ut.ac.ir