

# برآورد مقاومت لرزه‌ای برشی با استفاده از دامنه موج تراکمی و کاربرد آن در تعیین نوع سیالات مخزن‌های کربناته

علی‌رضا گلال‌زاده<sup>۱</sup>، عبدالرحیم جواهریان<sup>۲</sup> و مجید نبی‌بیدهندی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانش‌آموخته دکتری ژئوفیزیک موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (e-mail: golalzadeh@yahoo.com)

<sup>۲</sup>عضو هیات علمی موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (e-mail: javaheri@ut.ac.ir)

<sup>۳</sup>عضو هیات علمی موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (e-mail: mnbhendi@ut.ac.ir)

(دریافت: ۸۶/۰۴/۳۰، پذیرش نهایی: ۸۷/۰۴/۰۸)

## چکیده

به دلیل متفاوت بودن خاصیت موج تراکمی از موج برشی و تاثیرپذیری متفاوت آنها از خواص کشسان سنگ، اگر به شکلی بتوان هر دو موج را با هم در یک نمونه سنگی مورد بررسی قرار داد، اطلاعات با ارزشی از سیال و جنس مواد تشکیل دهنده مخزن به دست می‌آید. به دلیل مشکلات برداشت اطلاعات لرزه‌ای برشی، در این مقاله نشان داده می‌شود که می‌توان با استفاده از اطلاعات لرزه‌نگاری موج تراکمی، اطلاعات موج برشی را استخراج کرد. سپس آنها را به صورت دو نشانگر لرزه‌ای توانمند که قادر به تفکیک و شناسایی اطلاعات سنگ‌شناسی و سیالات درون مخزن هستند مورد بررسی قرار داد. در این مقاله برآورد ضرایب بازتاب موج تراکمی و برشی با استفاده از روش وارون سازی محاسبه شده است. همچنین با استفاده از روش وارون سازی باند بسامدی محدود، نسبت به برآورد مقاومت‌های لرزه‌ای تراکمی و برشی اقدام صورت گرفته است. در ادامه کاربرد این روش روی یک مخزن کربناته از نواحی جنوب غرب ایران بررسی شده است. این بررسی روشن ساخت که مقاومت‌های لرزه‌ای تراکمی و برشی به خواص مخزنی حساسیت نشان می‌دهند و به پیدا کردن تغییرات سیال در مخزن را کمک می‌کند.

**کلیدواژه‌ها:** مقاومت‌های لرزه‌ای تراکمی و برشی، ضرایب بازتاب، نشانگرهای لرزه‌ای، مخزن‌های کربناته

## ۱ مقدمه

آنجائی که موج تراکمی از جامد، مایع و گاز و موج برشی فقط از جامد عبور می‌کند، اگر هر دو موج در یک نمونه سنگ مورد بررسی قرار گیرند، اطلاعات با ارزشی از مایعات و جنس مواد تشکیل دهنده آن به دست می‌آید. در سال‌های اخیر در تعداد محدودی از مخازن نفتی، برداشت اطلاعات با استفاده از ژئوفون‌های مخصوص چندمؤلفه‌ای صورت گرفته است که با استفاده از این داده‌ها می‌توان اطلاعات با ارزشی از موج تراکمی و موج برشی به دست آورد. مشکلی که در این روش وجود دارد، هزینه بسیار زیاد برداشت و پردازش این اطلاعات است که استفاده از این روش را با محدودیت‌هایی مواجه ساخته است.

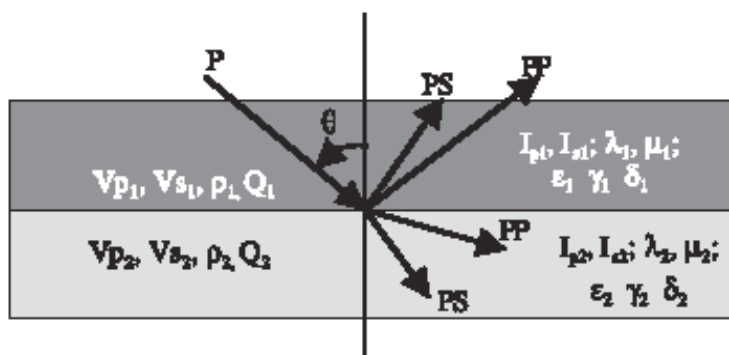
به منظور کاهش هزینه‌ها، محققان کوشش خود را

یکی از روش‌های مرسوم در بررسی مخازن هیدروکربوری، روش لرزه بازتابی است. شیوه متداول برای بررسی مخازن با استفاده از این روش، ایجاد امواج کشسان در سطح زمین است. در این روش، فرستادن موج به درون زمین و برخورد آنها با سطوح دارای مقاومت‌های لرزه‌ای متفاوت، باعث بازتابشان به سطح زمین می‌شود و در سطح زمین با گیرنده‌هایی که قادر به دریافت موج‌اند به ثبت می‌رسند. به دلیل متفاوت بودن خاصیت موج تراکمی، از موج برشی و تاثیرات متفاوتی که این دو موج نسبت به خواص کشسان سنگ نشان می‌دهند (برای مثال، تغییرات متفاوت سرعت این دو نوع موج در اثر وجود هیدروکربور در سازند)، محققان بر آن شدند تا تلاش خود را بر ثبت کردن و بررسی هر دو موج قرار دهند. از

ناهمسانگردی  $\delta$ ،  $\gamma$  و  $\varepsilon$  که پارامترهای ناهمسانگردی تامسن (۱۹۸۶) هستند برای این مدل مشخص شده است. تحقیقات نشان داده است که خواص ناهمسانگردی سنگ‌ها تاثیر زیادی در بررسی تفسیر لرزه‌ای، تعیین پارامترهای مخزنی و تصویرسازی لرزه‌ای دارد. همچنین این خواص تاثیر زیادی بر تحلیل لرزه‌ای قبل از برانبارش، تحلیل دامنه لرزه‌ای، تحلیل سرعت و وارون‌سازی لرزه‌ای دارند. نظریه و مفاهیم امواج عبوری و بازتابی در محل تقاطع دو محیط ناهمسانگرد را ماسگراو (۱۹۷۰)؛ هنیک (۱۹۷۲)؛ کیت و کرمین (۱۹۷۷)؛ دلی و هرون (۱۹۷۷)؛ تامسن (۱۹۸۶، ۱۹۸۸، ۱۹۹۳، ۱۹۹۵، ۲۰۰۱)؛ بانیک (۱۹۸۷)؛ لین و همکاران (۱۹۹۵)؛ روگر (۱۹۹۷)؛ گودوی (۲۰۰۱)؛ دافور و همکاران (۲۰۰۲) و لی و همکاران (۲۰۰۳) مورد بحث قرار داده‌اند. اولین مرحله از نظر سادگی در اعمال پارامترهای ناهمسانگردی، در نظر گرفتن محیط ناهمسانگرد، به صورت همسانگرد عرضی با محور تقارن قائم می باشد. در این مقاله روشی برای برآورد مقاومتهای لرزه‌ای تراکمی و برشی در محیط همسانگرد عرضی با محور تقارن قائم ارائه می‌شود. سپس روش فوق بر روی یکی از مخازن کربناته جنوب غرب ایران مورد بررسی قرار می‌گیرد.

صرف آن کردند که با استفاده از اطلاعات لرزه‌نگاری معمولی (لرزه‌نگاری که ضمن آن فقط موج تراکمی برداشت می‌شود) اطلاعات موج برشی را استخراج کنند. یکی از روش‌هایی که به این منظور مورد بررسی قرار می‌گیرد، بررسی تغییرات دامنه موج تراکمی با تغییر دورافت بین منبع و گیرنده است. در واقع هنگامی که موج تراکمی به صورت قائم به سطح یک بازتابنده برخورد می‌کند بازتاب و عبور از این سطح به صورت موج تراکمی است؛ ولی اگر موج به صورت زاویه‌دار به سطح بازتابنده برخورد کند بازتاب و عبور موج به هر دو صورت تراکمی و برشی خواهد بود.

برای شرح دادن روابط موجود بین خواص فیزیکی سنگ و بازتاب لرزه‌ای، یک مدل دو لایه ساده با سطح بازتاب‌کننده افقی شکل ۱ در نظر گرفته شده است. در این شکل یک موج تابش تراکمی پس از برخورد با سطح مشترک دو محیط به صورت موج تراکمی و موج برشی، بازتاب و عبور کرده است. در این شکل پارامترهای مؤثر در انتشار موج لرزه‌ای شامل سرعت‌های موج تراکمی و موج برشی، چگالی، مقاومتهای لرزه‌ای تراکمی و برشی، مدول بالک، مدول برشی، پارامترهای کشسان و ضریب تضعیف نشان داده شده است. همچنین خواص



شکل ۱. بازتاب و عبور موج در مرز دو لایه (لی و همکاران، ۲۰۰۳).

## ۲ معادلات تغییر دامنه لرزه‌ای با دورافت

معادلات زویپریٹس (۱۹۱۹) دامنه امواج عبوری و بازتابی (تراکمی و برشی) را در دو طرف یک سطح لرزه‌ای با زاویه برخورد موج لرزه‌ای مرتبط می‌سازند. برای تحلیل بازتاب موج تراکمی، معادله‌ای ریاضی مورد نیاز است که با استفاده از آن دامنه موج تراکمی را با زاویه برخورد موج تراکمی، به صورت یک تابع از زاویه برخورد مرتبط نماید. اساس وابسته بودن دامنه لرزه‌ای به دورافت بین منبع و گیرنده بر این قرار دارد که ضرایب بازتاب موج لرزه‌ای، تابعی از زاویه برخورد، تغییر چگالی، تغییر در سرعت‌های موج تراکمی و موج برشی در محل برخورد دو لایه‌اند. از طرفی تغییرات سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی، وابسته به تغییرات خواص سنگ است.

برای کاربرد عملی، تعدادی از محققان، معادلات زویپریٹس را ساده کرده‌اند که از آن جمله می‌توان فاتی و همکاران (۱۹۹۴) را نام برد. معادله فاتی و همکاران ضرایب بازتاب موج تراکمی وابسته به دورافت را به صورت تابعی از ضرایب بازتاب موج تراکمی و موج برشی در دورافت صفر مرتبط می‌نماید. معادله فاتی و همکاران فرضی در مورد نسبت موج تراکمی به موج برشی و مقدار چگالی ندارد و برای زوایای بزرگ‌تر از تقریب‌های مشابه خود کاربردی‌تر است. برای استخراج ضرایب بازتاب امواج تراکمی و برشی می‌توان روش حداقل مربعات خطا را، بر داده‌های ورودی با نقطه عمقی مشترک اعمال کرد. هر دو ضریب بازتاب موج تراکمی و موج برشی، در شناسایی سیال درون حفره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. بدین شکل با بررسی هر دو نوع موج می‌توان به بودن یا نبودن هیدروکربور پی‌برد. برای استخراج خواص سنگ‌شناسی و تعیین ویژگی پارامترهای مخزنی، بایستی این دو ضریب بازتاب به خصوصیات زمین‌شناسی و تغییرات در مرز لایه‌ها

وارون‌سازی شوند. وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای در تعیین خواص فیزیکی لایه‌های مخزنی با استفاده از اطلاعات لرزه‌ای صورت می‌گیرد. خواص سنگ‌شناسی همانند سرعت‌ها، نسبت پواسون، مقاومت‌های لرزه‌ای تراکمی و برشی به خوبی با داده‌های نگار درون‌چاهی قابل مقایسه‌اند و به طور مستقیم به خواص مخزنی مرتبط می‌شوند. مقاومت‌های لرزه‌ای تراکمی و برشی از جمله نشانگرهای مستقیم هیدروکربوری‌اند که برای به نقشه در آوردن سیالات مخزنی و برآورد کردن حجم مخزن مفیدند.

فاتی و همکاران (۱۹۹۴) با بازچینی مجدد معادله زویپریٹس که اکی و ریچارد (۱۹۸۰) صورت ساده شده آن را ارائه کرده بودند، معادله خود را معرفی ساختند. این معادله در زیر نشان داده شده است.

$$R_p(\theta) = \frac{1}{2}(1 + \tan^2\theta) \frac{\Delta I}{I} - 4(W/V)^2 \sin^2\theta \left( \frac{\Delta J}{J} - \left[ \frac{1}{2} \tan^2\theta - 2(W/V)^2 \sin^2\theta \right] \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad (1)$$

که در آن  $R_p$ ، ضرایب بازتاب موج تراکمی در زوایای برخورد متفاوت،  $\theta$  میانگین زاویه برخورد  $\theta_1$  و  $\theta_2$ ،  $W$  میانگین سرعت امواج برشی  $W_1$  و  $W_2$ ،  $V$  میانگین سرعت امواج تراکمی  $V_1$  و  $V_2$ ،  $\rho$  میانگین چگالی  $\rho_1$  و  $\rho_2$ ،  $\frac{\Delta I}{I}$  ضرایب بازتاب موج تراکمی در فاصله صفر،  $\frac{1}{2} \frac{\Delta J}{J}$  ضرایب بازتاب موج برشی در فاصله صفر و  $\Delta I = I_2 - I_1$  است و برای دیگر پارامترها نیز چنین معنی می‌دهد. همچنین زیرنویس‌های ۱ و ۲ به ترتیب به محیط‌های بالایی و پایینی اشاره دارند. با استفاده از این معادله می‌توان ضرایب بازتاب موج تراکمی و موج برشی را در محیط همسانگرد به دست آورد.

روگر (۱۹۹۷) با استفاده از نرم‌افزار ریاضی خود فرمول تقریبی دیگری را برای ضرایب بازتاب موج تراکمی P-P ارائه کرد. فرمول او تغییرات دامنه موج

(۱۹۹۴) خواهد شد. برای بررسی درستی کارکرد معادله (۳) مقایسه‌ای بین نتایج استخراج مقاومت لرزه‌ای تراکمی و برشی در شرایط محیط همسانگرد و محیط همسانگرد عرضی قائم صورت خواهد گرفت.

اولین مرحله برای استفاده عملی از این معادلات به‌دست آوردن زاویه برخورد است. در این مقاله برای محاسبه زاویه برخورد از معادله اسپرت و همکاران (۱۹۹۳) استفاده شده است. بعد از محاسبه زاویه برخورد، پنج مجهول دیگر ( $\Delta I/I$ ,  $\Delta J/J$ ,  $\Delta \rho/\rho$ ,  $\Delta \delta$  and  $\Delta \varepsilon$ ) وجود دارد که بایستی با استفاده از روش وارون‌سازی محاسبه شوند.

### ۳ وارون‌سازی ضرایب بازتاب

در اینجا روش‌های مرسوم حل معادلات متداول بررسی تغییر دامنه موج لرزه‌ای با دورافت که با حذف بعضی توان‌های مرتبه بالا و یا با به‌دست آوردن رابطه‌ای تجربی بین پارامترهای مجهول همراه است کاربردی ندارد و نمی‌توان با استفاده از آنها همه مجهولات را محاسبه کرد. در واقع در اینجا نوعی مسئله بیش‌معین (over determined) وارون‌سازی وجود دارد. این مسئله با روش وارون‌سازی حداقل مربعات خطا با به‌کارگیری همه زاویه‌های برخورد قابل حل است. به این منظور معادله (۳) به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$R_p(\theta_i) = \frac{1}{2} \Delta I/I A(\theta_i) + \frac{1}{2} \Delta J/J B(\theta_i) + \frac{1}{2} \Delta \rho/\rho C(\theta_i) + \Delta \delta D(\theta_i) + \Delta \varepsilon E(\theta_i)$$

$$A(\theta_i) = 1 + \tan^2 \theta_i$$

$$B(\theta_i) = -8(W/V)^2 \sin^2 \theta_i$$

$$C(\theta_i) = -\tan^2 \theta_i + 4(W/V)^2 \sin^2 \theta_i$$

$$D(\theta_i) = -\frac{1}{2} \sin^2 \theta_i$$

$$E(\theta_i) = \frac{1}{2} (\tan^2 \theta_i + \sin^2 \theta_i)$$

(۴)

در آنها  $i$  نشان دهنده دورافت‌های متفاوت برداشت و میانگین زاویه تابش و بازتابش است. برای محاسبه

لرزه‌ای را در محیط همسانگرد عرضی با محور تقارن قائم نشان می‌دهد. معادله روگر (۱۹۹۷) در زیر نشان داده شده است.

$$R_p(\theta) = \frac{1}{2} \Delta Z/Z + \frac{1}{2} [\Delta V/V - (2W/V)^2 \Delta G/G + \Delta \delta] \sin^2 \theta + \frac{1}{2} [\Delta V/V + \Delta \varepsilon] \sin^2 \theta \tan^2 \theta$$

(۲)

که در آن،  $Z = \rho V$  میانگین مقاومت لرزه‌ای امواج تراکمی  $Z_1$  و  $Z_2$  و  $G$  میانگین مدول برشی  $G_1$  و  $G_2$  است. در این فرمول  $\Delta Z = Z_2 - Z_1$  است و برای دیگر پارامترها نیز چنین معنی می‌دهد. تفاوت ناهمسانگردی در دو طرف یک مرز به صورت  $\Delta \delta = (\delta_2 - \delta_1)$ ,  $\Delta \varepsilon = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$  نشان داده شده است که در آنها  $\varepsilon$  و  $\delta$  ضرایب ناهمسانگردی تامسن (۱۹۸۶) است. معادله روگر رابطه بین تغییرات دامنه موج لرزه‌ای و فاصله بین منبع و گیرنده را در محیط همسانگرد عرضی با محور تقارن قائم نشان می‌دهد.

برای استخراج ضرایب بازتاب موج تراکمی و موج برشی در محیط همسانگرد عرضی با محور تقارن قائم، با فرض کوچک بودن درصد تغییرات خواص کشسانی معادله (۲) را می‌توان به صورت زیر نوشت (گلال زاده و همکاران، ۲۰۰۸).

$$R_p(\theta) = \frac{1}{2} \Delta I/I (1 + \tan^2 \theta) - \frac{1}{2} \Delta \rho/\rho \tan^2 \theta - 4(W/V)^2 (\Delta J/J) \sin^2 \theta + 2(W/V)^2 \Delta \rho/\rho \sin^2 \theta - \frac{1}{2} \Delta \delta \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \Delta \varepsilon (\tan^2 \theta + \sin^2 \theta)$$

(۳)

که در آن،  $R_p$  ضرایب بازتاب موج تراکمی در زوایای برخورد متفاوت،  $\theta$  زاویه فاز برخورد،  $\frac{1}{2} \Delta I/I$  ضرایب بازتاب موج تراکمی در فاصله صفر،  $\frac{1}{2} \Delta J/J$  ضرایب بازتاب موج برشی در فاصله صفر،  $\rho$  چگالی و  $\Delta \delta = (\delta_2 - \delta_1)$ ,  $\Delta \varepsilon = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$  ناهمسانگردی تامسن در دو طرف مرز است.

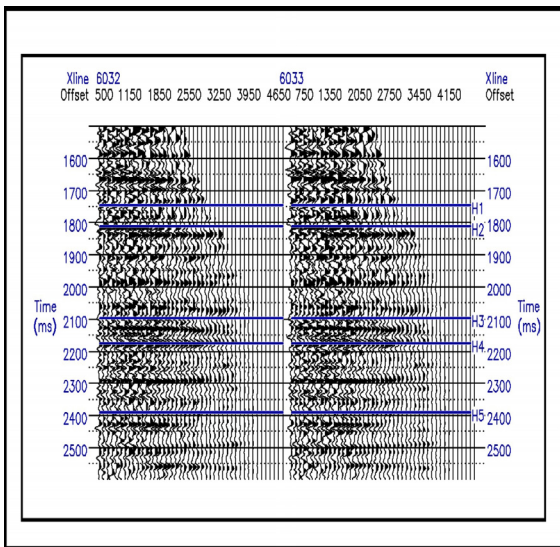
در صورتی که پارامترهای ناهمسانگردی تامسن صفر فرض شود، این معادله برابر معادله فاتی و همکاران

مجهولات معادله (۴) آن را به صورت زیر می‌نویسیم.

$$R = G X \quad (5)$$

که در آن،  $R$ ،  $G$  و  $X$  به صورت زیر تعریف شده‌اند و  $R$  ضرایب بازتاب موج تراکمی در زوایای برخورد متفاوت است.

$$X = \begin{bmatrix} \frac{\Delta I}{2I} \\ \frac{\Delta J}{\Delta \rho} \\ \frac{2J}{\Delta \rho} \\ \frac{2\rho}{\Delta \delta} \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} R_{pp1} \\ R_{pp2} \\ \vdots \\ R_{ppi} \end{bmatrix}$$



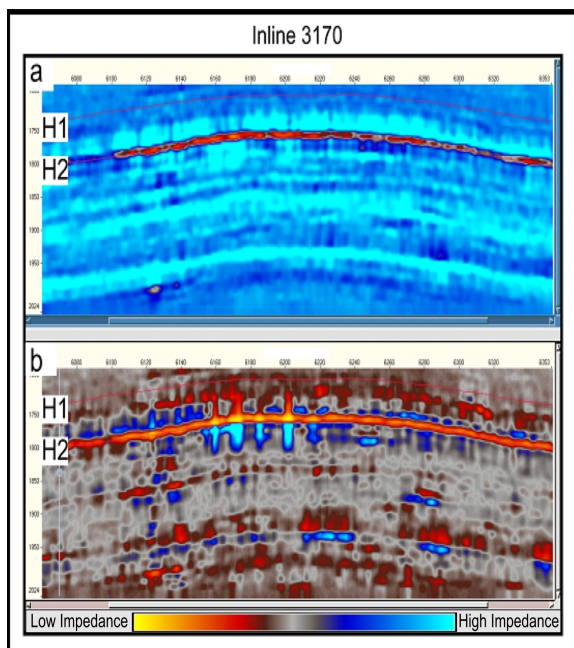
شکل ۲. دو ثبت نقطه عمقی مشترک بعد از اعمال تصحیحات دینامیکی از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی یکی از میدان‌های نفتی جنوب غرب ایران. H1, H2, H3, H4 و H5 به ترتیب نشان‌دهنده راس سازندهای ایلام، سروک، کزدمی، داریان و فهلیان است.

در نهایت ضرایب بازتاب امواج تراکمی و برشی و مجهولات با استفاده از فرمول وارون‌سازی حداقل مربعات خطا در شرایط پیش معین به صورت زیر محاسبه می‌شود (بدلی، ۱۹۸۵).

$$X = (G^T G)^{-1} G^T R \quad (6)$$

شکل ۳ مقطع برانبارش ضرایب بازتاب امواج تراکمی و برشی حاصل وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای با نقطه عمقی مشترک در منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد. در این مقاطع افق‌های تفسیری H1, H2, H3, H4 و H5 به ترتیب نشان‌دهنده راس سازندهای ایلام، سروک، کزدمی، داریان و فهلیان هستند. برای محاسبه مقاومت‌های لرزه‌ای

نرم‌افزاری به منظور وارون‌سازی در محیط Matlab نوشته شد. داده‌های لرزه‌ای مرتب شده به صورت نقطه عمقی مشترک (در این حالت با دقت قابل قبولی می‌توان فرض کرد، رد لرزه‌ها از یک موقعیت بازتاب شده‌اند و تغییرات دامنه لرزه‌ای مشاهده شده در نتیجه تغییرات خصوصیات لرزه‌ای آن بخش صورت گرفته استس)، نسبت  $V_p/V_s$ ،



شکل ۴. مقاومت‌های لرزه‌ای حاصل از اعمال روش وارون‌سازی با روش باند بسامدی محدود روی ضرایب بازتاب تراکمی و برشی به‌دست آمده از مراحل AVO. (a) مقاومت لرزه‌ای تراکمی، (b) مقاومت لرزه‌ای برشی. H1 و H2 به ترتیب نشان دهنده راس سازندهای ایلام و سروک است. در این دو شکل به‌ترتیب از رنگ آبی کم‌رنگ، آبی پررنگ، خاکستری، سیاه، سرخ و زرد، از مقدار مقاومت‌های لرزه‌ای تراکمی و برشی کاسته می‌شود. مقاومت لرزه‌ای برشی کم نشان از تخلخل بالا، مقاومت لرزه‌ای تراکمی زیاد نشان از آبدار بودن و مقاومت لرزه‌ای تراکمی کم نشان از هیدروکربوردار بودن سازند دارد.

رابطه نهایی زیر با استفاده از رگرسیون چندبعدی خطی حاصل شد.

$$V_s = 0.525V_p - 0.0259\gamma + 1.09 \quad (V)$$

$$R^2 = 0.907$$

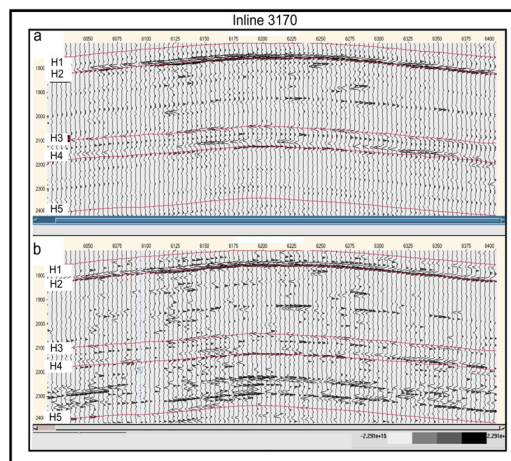
که در آن،  $\gamma$  پرتوزدایی طبیعی،  $V_s$  سرعت موج برشی و  $V_p$  سرعت موج تراکمی است.

تطبیق زمانی بین اطلاعات نگار صوتی و اطلاعات لرزه‌ای از مراحل صورت گرفته دیگر بود. بدین منظور با تصحیح و به‌کارگیری اطلاعات VSP موجود، تطبیق مورد نظر تا حد امکان عملی شد.

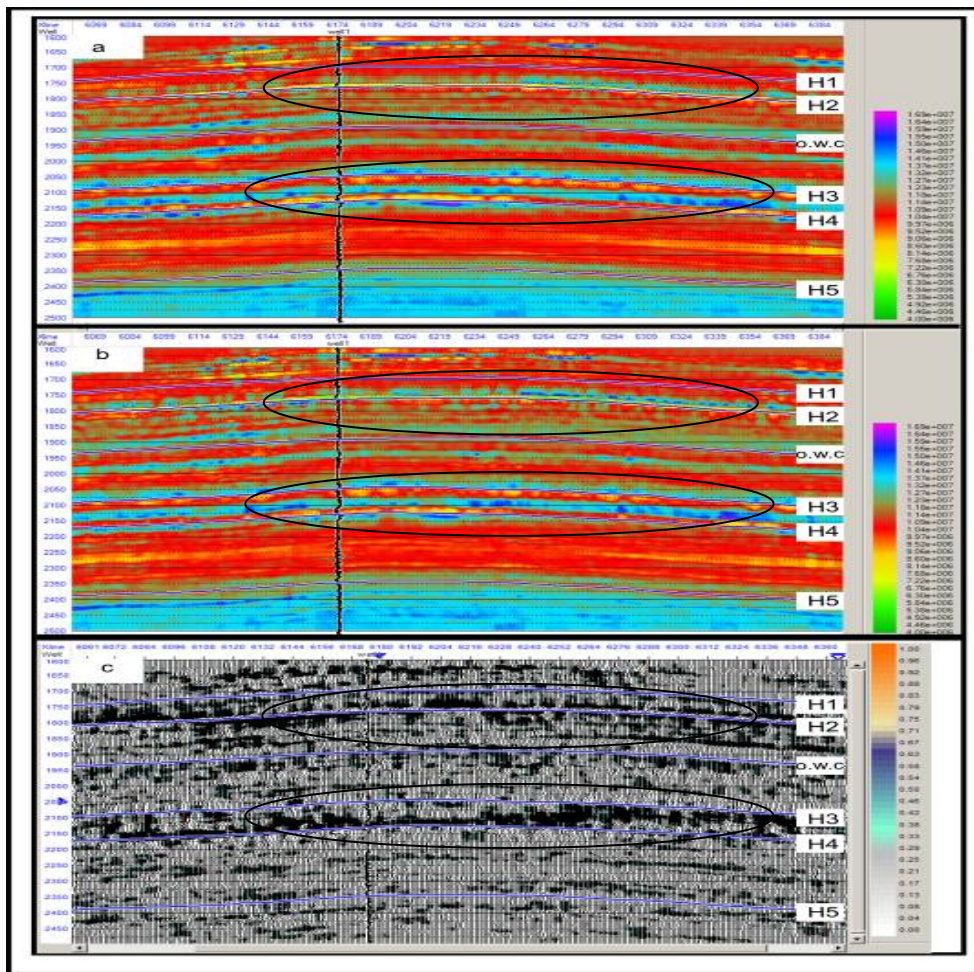
تراکمی و برشی، لازم است مراحل وارون‌سازی مقاومت لرزه‌ای روی این مقاطع صورت گیرد.

#### ۴ وارون‌سازی مقاومت لرزه‌ای

برای تفسیر مخزنی نتایج حاصل از مراحل قبل، لازم است ضرایب بازتاب امواج تراکمی و برشی به مقاومت‌های لرزه‌ای تبدیل شوند. در این مقاله با استفاده از روش وارون‌سازی باند بسامدی محدود، نسبت به برآورد مقاومت‌های لرزه‌ای اقدام شد (فرگوسن و مارگریو، ۱۹۹۶). در این روش، برای محاسبه مدل اولیه مقاومت‌های لرزه‌ای تراکمی و برشی لازم است اطلاعات سرعت موج تراکمی و موج برشی وجود داشته باشد. اطلاعات سرعت موج تراکمی با استفاده از نگار صوتی (sonic log) حاصل از چاه ۱ که در منطقه مورد بررسی قرار دارد به‌دست آمد. اطلاعات سرعت موج برشی نیز با توجه به رابطه بین سرعت موج تراکمی، پرتوزدایی طبیعی و سرعت موج برشی به‌دست آمده از چاه نزدیک به منطقه مورد بررسی محاسبه شد.



شکل ۳. مقطع برانبارش ضرایب بازتاب موج تراکمی و موج برشی حاصل شده از برانبارش داده‌های لرزه‌ای با نقطه عمقی مشترک منطقه مورد بررسی از راه مراحل وارون‌سازی. (a) مقطع ضرایب بازتاب موج تراکمی، (b) مقطع ضرایب بازتاب موج برشی. H1، H2، H3، H4 و H5 به ترتیب نشان دهنده راس سازندهای ایلام، سروک، کژدمی، داریان و فهلیان است.



شکل ۵. نمایش مقاومت لرزه‌ای تراکمی با فرض: (a) محیط همسانگرد، (b) محیط همسانگرد عرضی قائم و (c) تفاضل بین شکل a-5 و b-5. H1, H2, o.w.c., H3, H4 و H5 به ترتیب به راس سازندهای ایلام، سروک، مرز آب و نفت، کژدمی، داریان و فهلیان اشاره می‌کند. در این دو شکل نواحی که با بیضی مشخص شده‌اند به مقدار جزئی با هم تفاوت دارند.

نشان از تخلخل زیاد سازند است. مقاومت لرزه‌ای تراکمی زیاد در مناطقی از محدوده مخزن نشانه آبدار بودن آن بخش و کم بودن مقاومت لرزه‌ای تراکمی نشانه هیدروکربور دار بودن آن بخش است. در این تحقیق مقایسه‌ای بین نتایج در شرایط فرض محیط همسانگرد و شرایط محیط همسانگرد عرضی با محور تقارن قائم صورت گرفت. در شکل ۵ نتایج وارون سازی مقاومت لرزه‌ای تراکمی در شرایط فرض محیط همسانگرد با محیط همسانگرد عرضی قائم نشان داده شده است.

پس از تصحیحات صورت گرفته، مدل اولیه مقاومت لرزه‌ای با استفاده از نگار چگالی و اطلاعات سرعت موج تراکمی و سرعت موج برشی به صورت جداگانه محاسبه شد. با استفاده از نرم افزار تجاری Vanguard مراحل وارون سازی با روش بانند بسامدی محدود روی اطلاعات لرزه‌نگاری سه بعدی صورت گرفت. نتایج حاصل از این نرم افزار، مقاومت‌های لرزه‌ای تراکمی و برشی است. یک خط لرزه‌ای از اطلاعات سه بعدی در شکل ۴ نشان داده شده است. در جایی که مقاومت لرزه‌ای برشی کم باشد،

بنابراین با داشتن خواص پتروفیزیکی می توان نوع سنگ را تشخیص داد. آسفا و همکاران (۲۰۰۳) مقاله ای به منظور بررسی سرعت های موج تراکمی و برشی در آهک و رابطه آن با خواص پتروفیزیکی ارائه کردند. آنها اندازه گیری های آزمایشگاهی سرعت های موج تراکمی و موج برشی در فشار ۵۰ مگا پاسکال را عملی ساختند. نتایج آنها روشن ساخت که سرعت موج تراکمی سریع تر از سرعت موج برشی با افزایش تخلخل کاهش می یابد. همچنین آنها نشان دادند که رابطه بین سرعت و تراوایی نمونه ها ضعیف است. انتشار موج لرزه ای در سنگ ها با بزرگی، نحوه توزیع و طبیعت تخلخل داخل آنها کنترل می شود. آهک به واسطه موجودات زنده سازنده آن دارای توزیع پیچیده تخلخل است. آسفا و همکاران (۲۰۰۳) نشان دادند که سرعت موج تراکمی تقریباً به اندازه دو برابر بیشتر از سرعت موج برشی، با افزایش تخلخل تغییر می کند. همچنین آنها روشن ساختند که نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی برای آهک های اشباع از آب، به تخلخل وابستگی ندارد و مقدار متوسط آن  $1/9$  است. در صورت تغییر آهک به دولومیت که ممکن است در بعضی نمونه های سنگی با افزایش تخلخل بیشتر از ۵ درصد همراه باشد باشد، نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی با افزایش تخلخل کاهش می یابد. این اثر به واسطه افزایش تخلخل رخ نمی دهد بلکه در اثر افزایش دولومیت ایجاد می شود (آسفا و همکاران، ۲۰۰۳).

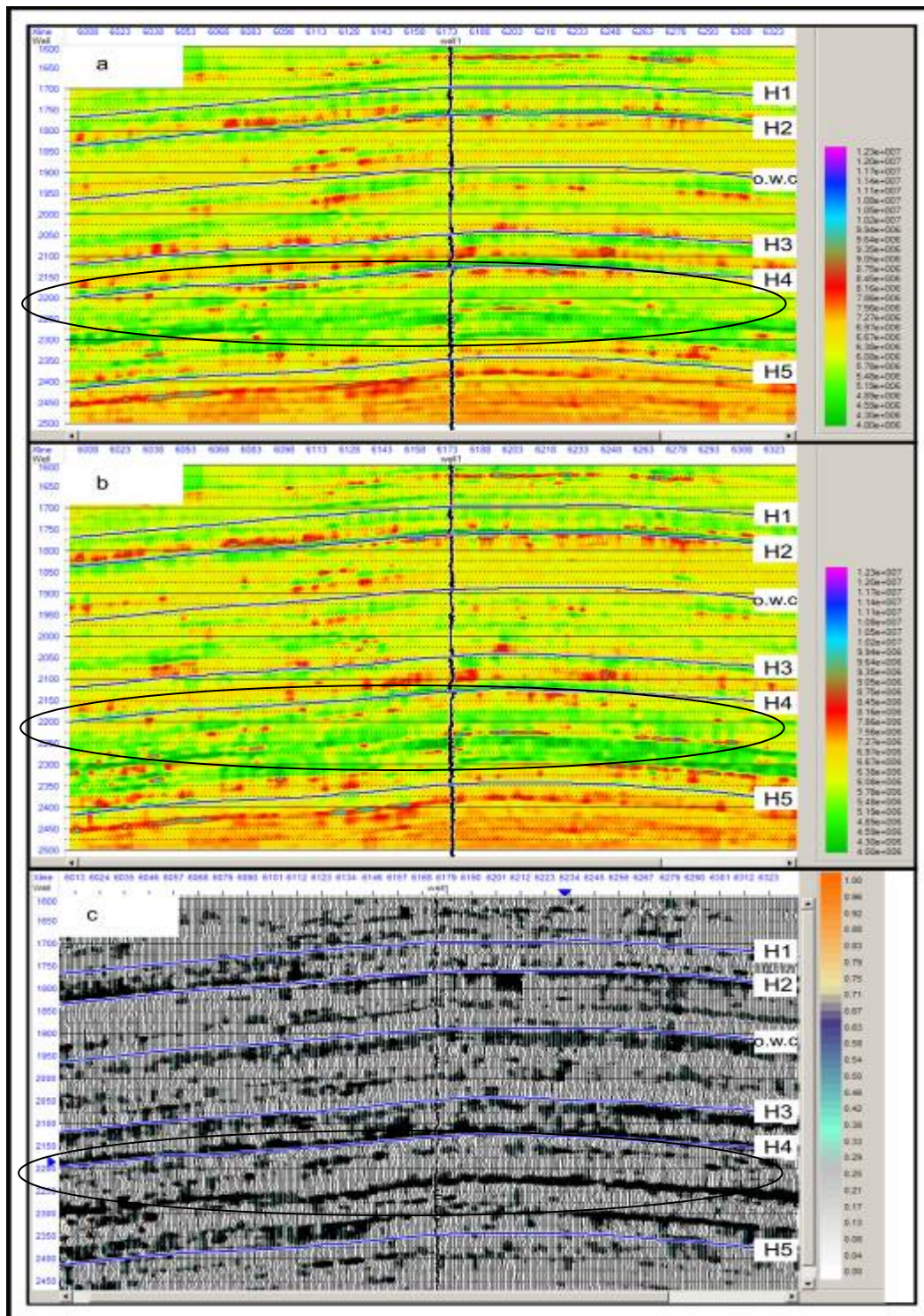
در منطقه مورد بررسی، واقع در جنوب غربی ایران، سازندهای زمین شناسی با خواص سنگ شناسی متفاوتی وجود دارد. در این بررسی، دو سازند زمین شناسی ایلام و سروک با توان مخزنی و هیدرو کربوری متفاوت که هر دو از سازندهای کربناته اند مورد بررسی قرار گرفت. این دو سازند بین افق های تفسیری H1 و H3 قرار دارند.

شکل ۵-a مقاومت لرزه ای تراکمی در محیط همسانگرد و شکل ۵-b مقاومت لرزه ای تراکمی در محیط همسانگرد عرضی قائم را نشان می دهد. تفاضل بین شکل ۵-a و ۵-b در شکل ۵-c نشان داده شده است. نتایج در اکثر نواحی شباهت زیادی با هم دارند و در بعضی نواحی به مقدار جزئی با هم تفاوت دارند. نواحی تفاوت با شکل بیضی مشخص شده است. شکل ۶-a مقاومت لرزه ای برشی در محیط همسانگرد و شکل ۶-b مقاومت لرزه ای برشی در محیط همسانگرد عرضی قائم را نشان می دهد. تفاضل بین شکل ۶-a و ۶-b در شکل ۶-c نشان داده شده است. نتایج در اکثر نواحی شباهت زیادی با هم دارند و در بعضی نواحی که در شکل با بیضی مشخص شده اند با هم تفاوت جزئی دارند. همان طوری که در شکل دیده می شود در حالت فرض محیط همسانگرد عرضی با محور تقارن قائم، پیوستگی بازتاب ها بهتر شده است و امکان ردیابی آنها فراهم می شود. با مقایسه این شکل و شکل قبل این نتیجه حاصل می شود که مقاومت لرزه ای برشی حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات خواص ناهمسانگردی از خود نشان می دهد.

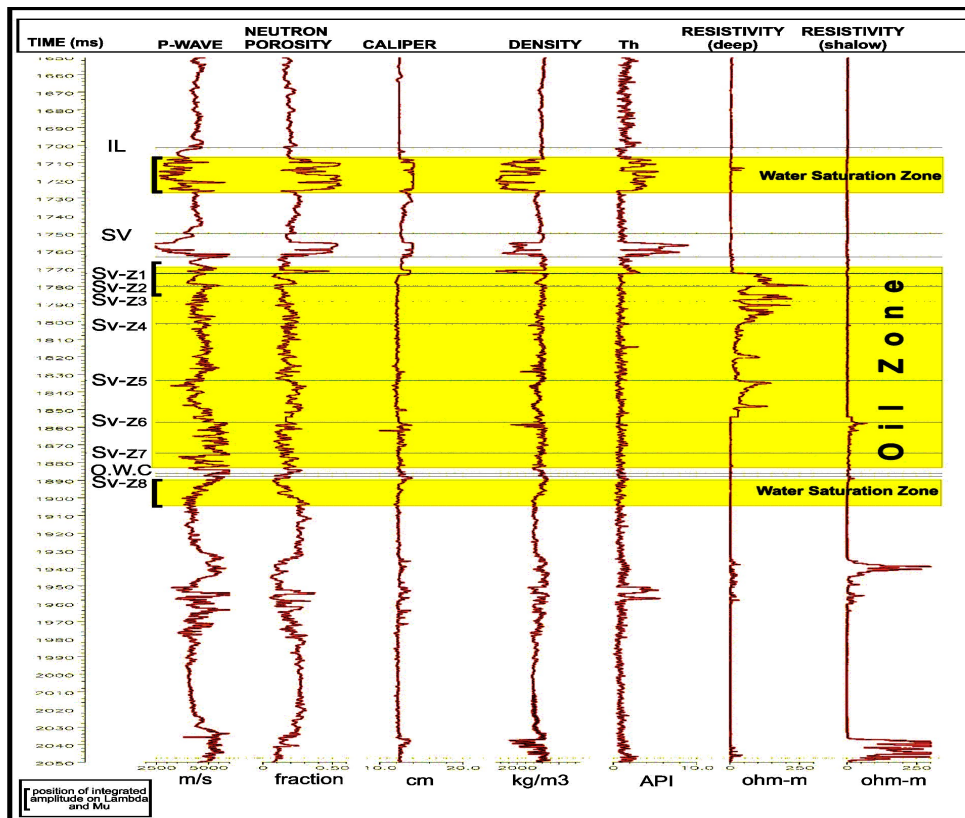
## ۵ تفسیر اطلاعات مقاومت های لرزه ای تراکمی و برشی

بر اساس کارهای تحقیقی آسفا و همکاران (۲۰۰۳) تفسیر سرعت های موج تراکمی و موج برشی می تواند مشخصات مخزن را آشکار کند. بررسی های ترکیبی که روی خواص پتروفیزیکی، سنگ شناسی و لرزه ای در آهک ها صورت گرفته است روشن ساخته که روابط خوبی بین این خواص وجود دارد (آسفا و همکاران، ۲۰۰۳). برای مثال ثابت شده است که نسبت سرعت موج تراکمی به سرعت موج برشی برای آهک های خالص در حدود  $1/9$  است. این مقدار کاملاً متفاوت از ماسه سنگ کوارتز (بین  $1/5$  تا  $1/7$ ) است (آسفا و همکاران، ۲۰۰۳).





شکل ۶. نمایش مقاومت لرزهای برشی با فرض: (a) محیط همسانگرد، (b) محیط همسانگرد عرضی قائم و (c) تفاضل بین شکل a-۶ و b-۶. H1, H2, o.w.c., H3, H4, H5 به ترتیب به راس سازندهای ایلام، سروک، مرز آب و نفت، کزدمی، دریاپان و فهلیان اشاره می‌کند. در این دو شکل نواحی که با بیضی مشخص شده‌اند به مقدار جزئی با هم تفاوت دارند.



شکل ۷. نمایش تعدادی از نگارهای موجود در چاه ۱ و موقعیت بخش‌های متفاوت مخزنی.

نتایج اعمال این نشانگر را برای بخش‌های متفاوت مخزن نشان می‌دهد. شکل ۸-a اعمال این نشانگر را روی مقادیر مقاومت لرزه‌ای تراکمی و شکل ۸-b اعمال این نشانگر را روی مقادیر مقاومت لرزه‌ای برشی در زیر افق H1 نشان می‌دهد. نتایج در این دو شکل به صورت موفقیت آمیزی نشان از زیادبودن مقاومت لرزه‌ای تراکمی و ثابت و کمبودن مقاومت لرزه‌ای برشی در اطراف چاه ۱ دارد. در مرحله بعد این نشانگر روی زون هیدروکربوری یعنی نواحی زیر افق تفسیری H2 اعمال شد. شکل ۸-c اعمال این نشانگر را روی مقادیر مقاومت لرزه‌ای تراکمی و شکل ۸-d اعمال این نشانگر را روی مقادیر مقاومت لرزه‌ای برشی در زیر افق H2 نشان می‌دهد. نتایج در این دو شکل نشانگر از پایین بودن مقاومت لرزه‌ای تراکمی و

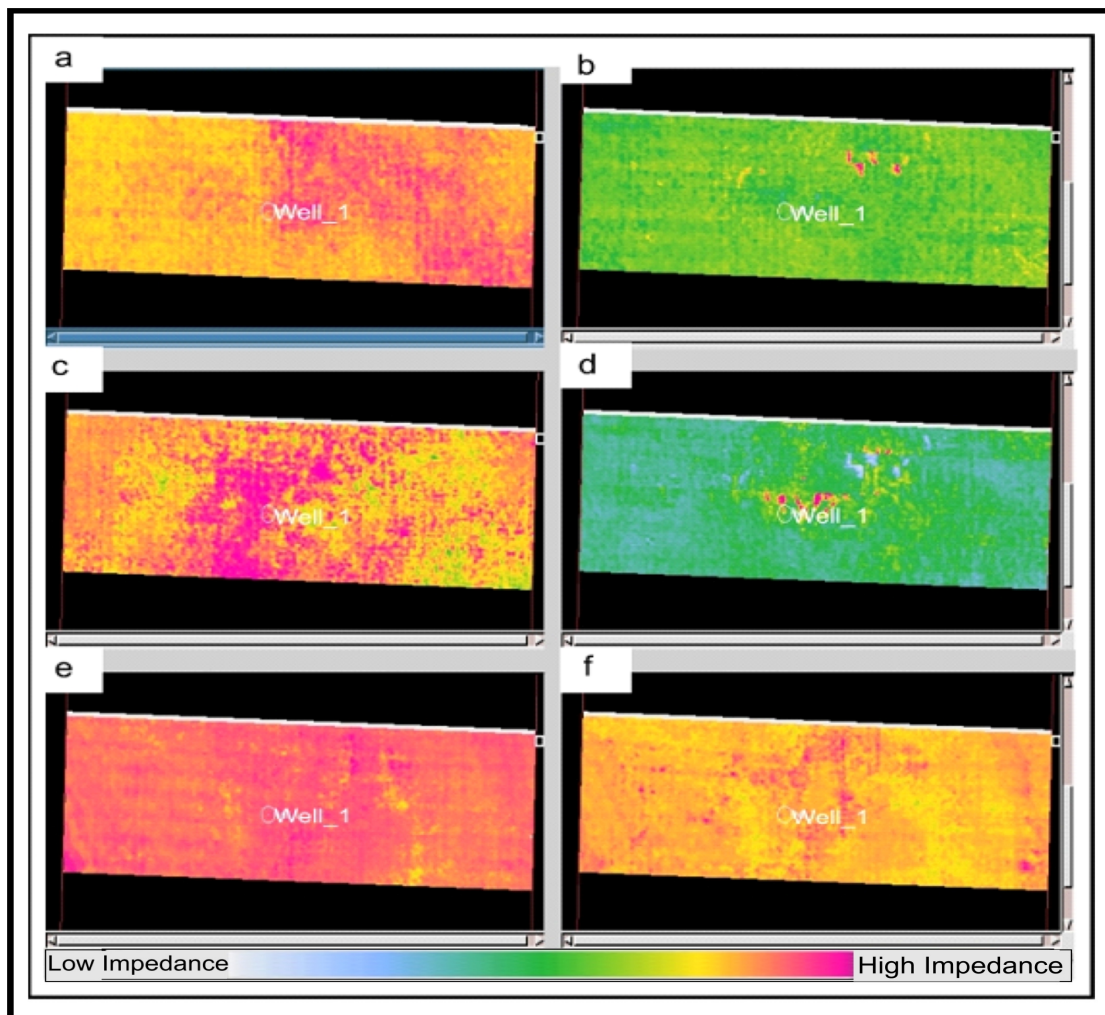
در این دو سازند دو بخش مخزنی با تخلخل حدود ۱۴ درصد قرار دارد. اولین زون با تخلخل خوب در محدوده چاه ۱ از آب اشباع شده است. در قسمت بالای زون مخزنی دوم در محدوده چاه ۱ هیدروکربور (به ویژه ویژه نفت) وجود دارد. قسمت پایین این زون از آب اشباع شده است. برای بررسی تغییرات جانی سنگ‌شناسی و هیدروکربوری، از نشانگر جمع مقادیر دامنه نشانگرهای مقاومت‌های لرزه‌ای موج تراکمی و موج برشی در زون‌های مشخص استفاده شد. محل اعمال این نشانگر در شکل ۷ نشان داده شده است.

همان‌طور که بیان شد برای مشخص شدن اثر تغییر سیال درون حفره‌ها روی مقاومت‌های لرزه‌ای تراکمی و برشی، از نشانگر جمع مقادیر دامنه استفاده شد. شکل ۸

## ۶ نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان داده شد که با استفاده از روش وارون‌سازی در بررسی تغییرات دامنه با دورافت، می‌توان اطلاعات موج برشی را از داده‌های لرزه‌نگاری متداول که فقط موج تراکمی را ثبت می‌کنند استخراج کرد. در این تحقیق مقایسه‌ای بین نتایج در شرایط محیط همسانگرد و شرایط محیط همسانگرد عرضی با محور تقارن قائم صورت گرفت.

ثابت بودن مقاومت لرزه‌ای برشی در اطراف چاه ۱ است. در نواحی پایینی زون هیدروکر بوری، آب با نفت جایگزین شده است. نشانگر جمع مقادیر دامنه در این نواحی نیز اعمال شد. شکل ۸ - e اعمال این نشانگر را روی مقادیر مقاومت لرزه‌ای تراکمی و شکل ۸ - f اعمال این نشانگر را روی مقادیر مقاومت لرزه‌ای برشی در پایین افق H2 در قسمت‌های آبدار نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رفت در اطراف چاه ۱ مقاومت لرزه‌ای تراکمی زیاد و مقاومت لرزه‌ای برشی، ثابت بود.



شکل ۸. نتایج اعمال نشانگر جمع مقادیر دامنه روی مقاومت لرزه‌ای تراکمی و مقاومت لرزه‌ای برشی. (a) در زیر افق H1 روی مقاومت لرزه‌ای تراکمی در منطقه آبدار، (b) در زیر افق H1 روی مقاومت لرزه‌ای تراکمی در منطقه آبدار، (c) در زیر افق H2 روی مقاومت لرزه‌ای تراکمی در منطقه هیدروکر بوری، (d) در زیر افق H2 روی مقاومت لرزه‌ای برشی در منطقه هیدروکر بوری، (e) در پایین افق H2 روی مقاومت لرزه‌ای تراکمی در منطقه آبدار و (f) در پایین افق H2 روی مقاومت لرزه‌ای برشی در منطقه آبدار. مقاومت لرزه‌ای برشی کم نشانه تخلخل زیاد سازند است. مقاومت لرزه‌ای تراکمی زیاد در مناطقی از محدوده مخزن نشانه آبدار بودن آن بخش و کم بودن مقاومت لرزه‌ای تراکمی نشانه از هیدروکر بوردار بودن آن بخش است.

- Dufour, J., Squires, J., Goodway, W.N., Edmunds, A., and Shook, I., 2002. Integrated geological and geophysical interpretation case study, and Lamé rock parameter extractions using AVO analysis of the Blackfoot 3D seismic data, southern Alberta, Canada: *Geophysics*, **67**, 27-37.
- Fatti J.L, Smith G.C, Val P.J, Strauss P.J, Levitt P. R, 1994, Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: A 3D seismic case history using the Geostack technique: *Geophysics* 59, 1362-1376.
- Ferguson, R.J. and Margrave, G.F., 1996, A simple algorithm for band-pass impedance inversion: CREWES Research Report, 8, 1-10.
- Golalzadeh, A.R., Javaherian, A., Nabi-Bidhendi, M., 2008, Estimation of Lamé's parameters from P-waves in a VTI medium: *J. Geophys. Eng.*, 5 (2008) 37-45.
- Goodway, W.N., 2001, AVO and lamé constants for rock parameterization and fluid detection: *CSEG Recorder*, 26 (6) 39-60.
- Henneke, E., G., 1972, Reflection-refraction of a stress wave at a plane boundary between anisotropy media: *J. Acoust. Soc. of Am.*, **51**, 210-217.
- Keith, C. M., and Crampin, S., 1977, Seismic body waves in anisotropic media: Reflection and refraction at a plane interface: *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, **49**, 181-208.
- Li, Y., Downton, J., and Xu, Y., 2003, AVO modeling in seismic processing and interpretation, Part 1: fundamentals, *Recorder*, 28 December, 43-52.
- Lynn, H. B., Bates, C. R., Simon, K. M., and van Dok, R., 1995, The effect of azimuthally anisotropy in P-wave 3-D seismic: 65<sup>th</sup> Ann Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstract, 293-296.
- Musgrave, M. J. P., 1970, *Crystal acoustics*, Holden Day.
- Rüger A., 1997, P-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry: *Geophysics*, **62**, 713-722.
- Spratt, R. S., Goins, N. R., and Fitch, T. J., 1993, Pseudo-shear - The analysis of AVO in Castagna, J. P., and Backus, M. M., Eds., *Offset dependent reflectivity - Theory and practice of AVO analysis: Soc. Expl. Geophys.*, 37-56.
- Thomsen, L., 1986, Weak elastic anisotropy: *Geophysics*, **51**, 1954-1966.

نتایج روشن ساخت که در حالت فرض محیط همسانگرد عرضی با محور تقارن قائم، پیوستگی بازتاب‌ها بهتر می‌شود و امکان ردیابی آنها فراهم است. همچنین مقاومت لرزه‌ای برشی در مقایسه با مقاومت لرزه‌ای تراکمی حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات خواص ناهمسانگردی از خود نشان می‌دهد. این تحقیق نشان داد که مقاومت‌های لرزه‌ای تراکمی و برشی به پدیده‌های زمین‌شناسی حساسیت نشان می‌دهند و کمک می‌کنند تا بتوان خواص مخزنی یک میدان را به‌دست آورد.

### تشکر و قدردانی

از اداره کل ژئوفیزیک مدیریت اکتشاف نفت به لحاظ در اختیار قرار دادن داده‌های این تحقیق، از اداره زمین‌شناسی مناطق نفت‌خیز جنوب به لحاظ فراهم نمودن امکانات لازم برای به انجام رسیدن آن و همچنین داوران محترمی که مقاله حاضر را بررسی کرده‌اند و با نظرات خود آن را پربار نموده‌اند تشکر و قدردانی می‌شود.

### منابع

- گللالزاده، ع.، ۱۳۸۶، برآورد پارامترهای کشسان  $\lambda$  و  $\mu$  با استفاده از موج تراکمی، رساله دکتری رشته ژئوفیزیک (گرایش لرزه‌شناسی)، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- Aki, K., and Richards, P. G., 1980, *Quantitative seismology: Theory and methods: Vol. 1*, W.N. Freeman & Co.
- Assefa S., McCann C. and Sothcott J. 2003, Velocity of compressional and shear waves in limestones: *Geophys. Prosp.*, **51**, 1-13.
- Badley, M. E., 1985, *Practical seismic interpretation: International Human Resources Development Corporation*.
- Banik, N. C., 1987, An effective anisotropy parameter in transversely isotropic media: *Geophysics*, **52**, 1654-1664.
- Daley, P. F., and Hron, F., 1977, Reflection and transmission coefficients for transversely isotropy media: *Bull. Seis. Soc. Am.*, **67**, 661-675.

- Thomsen, L., 1988, Reflection seismology over azimuthally anisotropic media: *Geophysics*, **53**, 304-313.
- Thomsen, L., 1993, Weak anisotropy reflections, in offset dependent reflectivity, in Castagna, J. P., and Backus, M. M., Eds., *Offset dependent reflectivity- Theory and practice of AVO analysis*: Soc. Expl. Geophys., 103-114.
- Thomsen, L., 1995, Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock: *Geophys. Prosp.*, **43**, 805-829.
- Thomsen, L., 2001, Seismic anisotropy: *Geophysics*, **66**, 40-41.
- Zoeppritz, K., 1919, Erdbebenwellen VII B, on the reflection and penetration of seismic waves through unstable layers: *Göttinger Nachrichten*, **1**, 66-84.