

## تحلیل پیشرو تطبیق‌پذیر دامنه در مقابل دورافت در محیط ناهمسانگرد عرضی عمودی با استفاده از تلفیق یکپارچه مدل‌سازی فیزیک سنگ و ضرایب تامسن

زهرا آقایی خیرآبادی<sup>\*۱</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشگاه علوم پایه، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۹)

### چکیده

همانطور که در سال‌های اخیر استخراج اطلاعات در مورد سنگ‌شناسی و محتوای سیال از تغییرات دامنه در مقابل دورافت اهمیت بیشتری یافته است، درک اثر ناهمسانگردی شیل در دامنه در مقابل دورافت ضروری است. ساختار لایه‌ای کانی‌های رسی باعث ناهمسانگردی کشسان می‌شود. شیل‌ها (حتی نمونه‌های مرسوم شیل) اغلب به دلیل همسویی کانی‌های رسی ناهمسانگرد با صفحه بستر، ناهمسانگرد کشسان هستند. این تحقیق با هدف رفع این مشکل، روشی مبتنی بر مدل‌سازی فیزیک سنگ و استفاده از پارامترهای تامسن برای تحلیل AVO در محیط‌های VTI ارائه می‌دهد. در این مطالعه، تأثیر ناهمسانگردی شیل بر تحلیل دامنه در مقابل دورافت (AVO) بررسی شده است. این مسئله از آن جهت اهمیت دارد که تحلیل دقیق AVO می‌تواند در شناسایی مناطق هیدروکربنی مؤثر باشد، ولی در بسیاری از مطالعات قبلی فرض همسانگردی در محیط‌ها در نظر گرفته شده که ممکن است باعث خطا شود. در این مطالعه، تحلیل دامنه در مقابل دورافت در محیط همسانگرد عرضی عمودی (VTI) در سازند کژدمی در بالای فصل مشترک شیل / ماسه گاز بررسی شده است. برای این منظور، پارامترهای ناهمسانگردی تامسن محاسبه شدند. از آنجایی که ناهمسانگردی شیل بر نتایج تجزیه و تحلیل دامنه در مقابل دورافت در فصل مشترک ماسه گازی/شیل سازند کژدمی تأثیر می‌گذارد، ما تأثیر شیل را در تجزیه و تحلیل دامنه در مقابل دورافت سازند کژدمی ارزیابی کرده‌ایم. نتایج نشان داد که در محیط ناهمسانگرد، کلاس یک AVO قابل شناسایی است که بیانگر حضور هیدروکربن می‌باشد، در حالی که در محیط همسانگرد، روند مشخصی در کلاس AVO مشاهده نمی‌شود. به علاوه، در مدل‌های مصنوعی نیز مشاهده شد که اثر ناهمسانگردی در زوایای بزرگ‌تر مشهودتر است. نوآوری این مطالعه در ارائه یک رویکرد تحلیلی ترکیبی بر پایه مدل‌سازی فیزیک سنگ و پارامترهای تامسن برای تحلیل AVO در محیط ناهمسانگرد است، که فراتر از فرضیات کلاسیک همسانگردی عمل کرده و می‌تواند به بهبود مکان‌یابی نواحی حفاری کمک کند.

**کلمات کلیدی:** پارامترهای تامسن، دامنه در مقابل دورافت، سازند کژدمی، محیط همسانگرد عرضی عمودی

## ۱ مقدمه

در روش‌های مرسوم تحلیل دامنه در مقابل دورافت معمولاً فرض می‌شود که لایه‌های تشکیل‌دهنده محیط، همسانگرد هستند (چوپرا و کاستاگنا، ۲۰۱۴؛ سیم و باکن، ۲۰۱۴). به طور کلی، در معادلات زوپریتس و همچنین در برخی تقریب‌های خطی آن، فرض می‌شود که محیط مورد مطالعه، همگن و همسانگرد است (گارنرو و همکاران، ۲۰۰۴؛ لو و همکاران، ۲۰۲۲). برای کانی‌های تقریباً همسانگرد، می‌توان از این فرض برای به دست آوردن یک تقریب صحیح برای پاسخ دامنه در مقابل دورافت استفاده کرد. با این وجود، حضور کانی‌هایی با ناهمسانگردی بالا (مانند شیل‌های بین لایه‌ای) در ماتریس سنگ، دقت تحلیل پاسخ دامنه در مقابل دورافت (یا زاویه) را در شناسایی مناطق هیدروکربنی کاهش می‌دهد (آساکا، ۲۰۱۸؛ سمز و همکاران، ۲۰۲۵؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۵). از این رو، بررسی نقش ناهمسانگردی در تحلیل AVO نه تنها از نظر تئوری، بلکه از دیدگاه کاربردی در کاهش ریسک حفاری و بهینه‌سازی مکان‌یابی چاه‌های اکتشافی ضروری است. در حضور ناهمسانگردی، سرعت به جهت انتشار بستگی دارد و در نتیجه باعث ایجاد وابستگی زاویه‌ای سرعت و در نتیجه تغییر در بازتاب با دورافت می‌شود (روگر، ۲۰۰۲؛ چوپرا و کاستاگنا، ۲۰۱۴). تحلیل دامنه در مقابل دورافت، نقش مهمی در شناسایی مناطق هیدروکربنی ایفا می‌کند. بنابراین، تقاضای فزاینده‌ای برای درک ماهیت ناهمسانگردی به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر تحلیل دامنه بر حسب دورافت به وجود آمده است (چوپرا و کاستاگنا، ۲۰۱۴؛ جیانگبو و همکاران، ۲۰۲۵). تأثیر ناهمسانگردی در فرآیندهای متفاوت پردازش و تفسیر لرزه‌ای توسط رویکردهای مختلف بررسی شده است. به عنوان مثال، باکولین (۲۰۰۳)، چگونگی ارتباط پارامترهای تامسن (تامسن، ۱۹۸۶) را با

خواص کشسانی برای محیط‌های همسانگرد عرضی عمودی مورد بحث قرار داد. تسوانکین و همکاران (۲۰۱۰) مروری کوتاه بر مدل‌سازی، پردازش و وارون-سازی داده‌های لرزه‌ای برای محیط‌های ناهمسانگرد کردند. گرچکا و همکاران (۲۰۰۴) محاسبه موج برشی در محیط‌های با ناهمسانگردی عرضی را بررسی کردند. آساکا (۲۰۱۸) اثر ناهمسانگردی را در برخی مفاهیم تفسیر لرزه‌ای مورد بررسی قرار داد و نشان داد که می‌تواند نتایج وارون‌سازی همزمان پیش از برانبارش و مقاومت کشسان در محیط همسانگرد عرضی عمودی را بهبود بخشد. عابدی و همکاران (۲۰۱۹) یک روش برونراند نرمال بدون کشش را توسعه دادند که در آن پارامترهای ورودی به طور خودکار در طی تصحیح برونراند نرمال در محیط ناهمسانگرد اصلاح می‌شوند. سایرز (۲۰۱۹) اثر کروژن را بر ناهمسانگردی شیل محاسبه کرد. ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) از تقریب اصلاح شده ضریب بازتاب موج PP برای اعمال روش وارون‌سازی تغییرات دامنه با زاویه در محیط‌های همسانگرد عرضی عمودی استفاده کردند. آنها نشان دادند که نتایج وارون‌سازی در زمان در نظر گرفتن ناهمسانگردی، به طور چشمگیری بهبود یافته است.

استفاده از تحلیل بردارهای ویژه برای شناسایی ناپیوستگی‌های لرزه‌ای، اگرچه ابزار قدرتمندی در برجسته‌سازی مرزهای ساختاری است، اما محدودیت‌های ذاتی مهمی نیز دارد. این روش به شدت به نویز لرزه‌ای، تغییرات دامنه، و کیفیت داده‌ها حساس است و در محیط‌های پیچیده مانند لایه‌بندی شیبدار یا تداخلات چند بازتابی ممکن است به نتایج گمراه‌کننده منجر شود. همچنین تفسیر مستقیم خروجی‌های بردار ویژه، به ویژه در غیاب راهنمای زمین‌شناسی، می‌تواند دچار ابهام شود. برای رفع این محدودیت‌ها، در این مطالعه به جای تکیه صرف بر تحلیل بردارهای ویژه، از

نمودارهای چاه (صوتی تراکمی، صوتی برشی و محتوای شیل) ارزیابی می‌شوند. به منظور تبدیل از حیطه دورافت به حیطه زاویه، یک مدل سرعت با استفاده از داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش ساخته می‌شود و جمع‌آوری زاویه بازسازی می‌شود. نشانگرهای دامنه در مقابل دورافت شامل عرض از مبدأ، گرادیان و انحنا با استفاده از جمع‌آوری زاویه تولید شده استخراج می‌شوند. سپس پارامترهای تامسن با استفاده از نمودارهای صوتی اصلاح شده و حجم شیل استخراج می‌شوند. بر اساس پارامترهای تامسن، دامنه انعکاس P-P ناهمسانگرد در زاویه فرود  $\theta$ ،  $R_{app}(\theta)$  به دست می‌آید.

## ۱-۲ محیط همسانگرد قائم عرضی

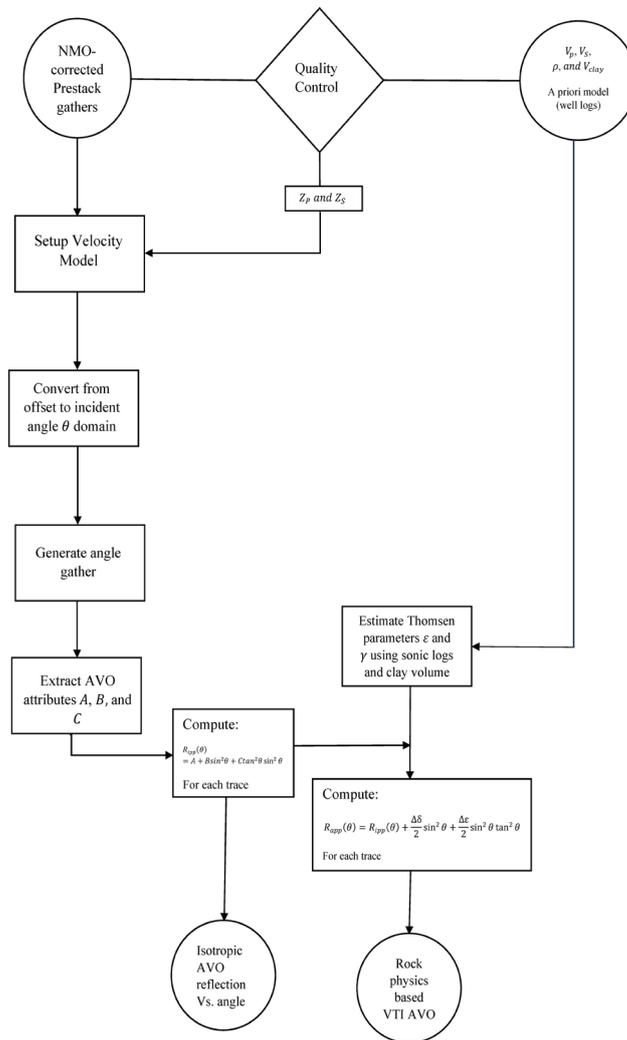
سنگ‌های زیر سطحی از مجموعه‌ای از لایه‌ها تشکیل شده‌اند. سنگ‌های رسوبی لایه‌ای افقی، عموماً یک محیط همسانگرد عرضی با محور تقارن عمودی در نظر گرفته می‌شوند و اغلب به عنوان همسانگردی عرضی عمودی (VTI) شناخته می‌شوند (چوپرا و کاستاگنا، ۲۰۱۴؛ پان و همکاران، ۲۰۲۴). سیستم‌های همسانگرد عرضی از لایه‌های نازک تکراری یا دانه‌های معدنی که در لایه‌های نازک قرار گرفته‌اند تشکیل شده‌اند. معمولاً سازندهای شیل از لایه‌های افقی ذرات رسی صفحه‌شکل تشکیل شده‌اند، بنابراین مدل همسانگرد عرضی با محور تقارن عمودی سازندهای شیلی را به خوبی توصیف می‌کند (چوپرا و کاستاگنا، ۲۰۱۴؛ لانگ و همکاران، ۲۰۲۵). شکل ۲ چپ مدلی با ناهمسانگردی VTI را نشان می‌دهد. فرض بر این است که تمام صفحات عمود بر محور چرخش دارای خواص فیزیکی یکسانی هستند. شکل ۲ راست، مقطع تصویری از لایه‌بندی ماسه-ای/سیلتی و شیلی/مارلی غنی از مواد آلی در سازند کژدمی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، لایه بندی موازی فواصل شیل روی مقطع نازک قابل

مدل‌سازی فیزیک سنگ و تحلیل AVO در محیط ناهمسانگرد استفاده شده است که رویکردی یکپارچه‌تر برای تشخیص ناپیوستگی‌های مرتبط با تغییرات لیتولوژی و سیال فراهم می‌آورد. این روش با استفاده از پارامترهای تامسن و تحلیل زاویه‌ای دامنه، می‌تواند اطلاعاتی دقیق‌تر درباره مرزهای مخزنی فراهم آورد که فراتر از قابلیت‌های صرفاً هندسی روش‌های بردار ویژه است. در نتیجه، محدودیت‌های تحلیلی روش بردار ویژه تا حد زیادی با بهره‌گیری از پاسخ‌های ژئوفیزیکی وابسته به زاویه در محیط ناهمسانگرد جبران شده‌اند.

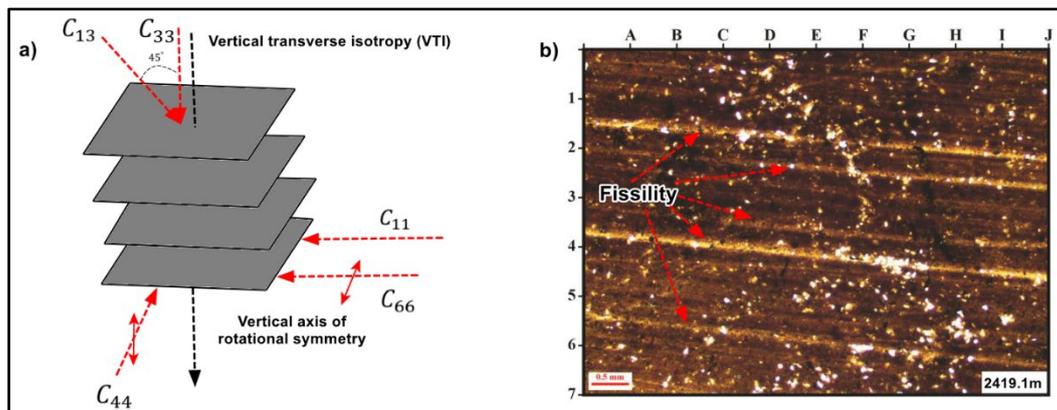
با توجه به اهمیت نقش ناهمسانگردی در تحلیل دامنه در مقابل دورافت، هدف این مطالعه ارائه یک رویکرد تحلیلی دقیق برای ارزیابی اثر ناهمسانگردی در تحلیل AVO در سازندهای شیلی است. نوآوری اصلی این پژوهش در استفاده از پارامترهای تامسن استخراج شده از داده‌های پتروفیزیکی واقعی و ترکیب آن با مدل‌سازی AVO در محیط‌های VTI است. برخلاف بسیاری از مطالعات قبلی که تحلیل AVO را با فرض همسانگردی بررسی کرده‌اند، این تحقیق به‌طور خاص اثر ناهمسانگردی را هم در داده‌های مصنوعی و هم واقعی بررسی کرده و نشان می‌دهد که چگونه می‌توان از این تحلیل در مکان‌یابی دقیق‌تر نواحی هیدروکربنی استفاده کرد.

## ۲ روش‌شناسی

در این بخش، فرایند محاسبه تحلیل دامنه در مقابل دورافت در محیط ناهمسانگرد در سازند کژدمی شرح داده می‌شود. شکل ۱، طرح‌واره محاسبه تحلیل ناهمسانگرد دامنه در مقابل دورافت را با استفاده مشترک از داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش و اطلاعات پتروفیزیکی نشان می‌دهد. در این روش، در مرحله اول کیفیت جمع‌آوری‌های پیش برانبارش تصحیح شده و



شکل ۱. طرح‌واره استخراج اطلاعات دامنه در مقابل دورافت در محیط ناهمسانگرد با استفاده یکپارچه از داده‌های پیش از برانبارش لرزه‌ای و اطلاعات پتروفیزیکی.



شکل ۲. مدلی با ناهمسانگردی VTI که لایه‌بندی ناهمسانگرد با یک محور عمودی تقارن دورانی را نشان می‌دهد، و راست) مقطع تصویری از لایه‌بندی رسوبی ماسه‌ای/سیلتی و شیلی/مارلی غنی از مواد آلی در سازند کژدمی. خاصیت ورقه‌ای بودن ویژگی‌های اصلی سازندهای شیلی هستند (برگرفته از ورزینیاک، ۲۰۱۹). مقیاس طولی (عمودی) با یک نوار قرمز رنگ در پایین سمت راست تصویر مشخص شده است.

تامسن (۱۹۸۶) سه پارامتر ناهمسانگردی  $\varepsilon$ ،  $\gamma$  و  $\sigma$  را معرفی کرد که در کاربردهای ژئوفیزیک رایج شده‌اند:

$$\varepsilon = \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}} \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}} \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33} (C_{33} - C_{44})} \quad (9)$$

با فرض افقی بودن سازندهای زمین‌شناسی و عمودی بودن چاه‌ها، نمودارهای صوتی تنها سرعت‌های عمودی  $V_{P0}$  و  $V_{S0}$  را اندازه‌گیری می‌کنند با این حال، برای حل رابطه‌های (۷) تا (۹)، به سرعت‌های موج افقی نیاز است. بنابراین، نمودارهای صوتی نمی‌توانند پارامترهای تامسن را اندازه‌گیری کنند (ورزینیاک، ۲۰۱۹). با این حال، لی (۲۰۰۶) روشی را برای محاسبه  $\varepsilon$ ،  $\gamma$  و  $\sigma$  پیشنهاد کرد که می‌توان این پارامترها را به طور مستقیم با استفاده از نمودارهای صوتی و حجم شیل  $V_{clay}$  محاسبه نمود:

(۱۰)

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{clay} \cdot V_{clay} \cdot (V_{P0} - V_{P\ water})}{V_{P\ quartz} - V_{P\ water} - (V_{P\ quartz} - V_{P\ clay}) \cdot V_{clay}} \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{\gamma_{clay} \cdot V_{clay} \cdot V_{S0}}{V_{S\ quartz} - (V_{S\ quartz} - V_{S\ clay}) \cdot V_{clay}} \quad (12)$$

$$\sigma = 0.32\varepsilon$$

که در آن  $\varepsilon_{clay}$  و  $\gamma_{clay}$  پارامترهای تامسن شیل،  $V_{clay}$ ، حجم شیل،  $V_{P0}$  و  $V_{S0}$  به ترتیب برابر سرعت‌های قائم موج تراکمی و برشی،  $V_{P\ water}$ ، سرعت موج در آب،  $V_{P\ quartz}$  و  $V_{S\ quartz}$  به ترتیب برابر سرعت موج تراکمی و برشی در کوارتز،  $V_{P\ clay}$  و  $V_{S\ clay}$  به ترتیب برابر سرعت موج تراکمی و برشی در شیل هستند. لی (۲۰۰۶)، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی پارامترهای ناهمسانگرد را برای کانی شیل استخراج کرد:  $\varepsilon_{clay} = 0.6$  و  $\gamma_{clay} = 0.67$ . سایر ثابت‌های استفاده شده در رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) عبارتند از:  $V_{P\ water} = 1.5 \frac{km}{s}$

مشاهده است. به همین دلیل، سازندهای شیل در سازند کژدمی را می‌توان با مدل همسانگرد عرضی با محور تقارن عمودی توصیف کرد.

یک محیط TI دارای تقارن شش ضلعی با پنج سفتی کشسان مستقل است (ماو کو و همکاران، ۲۰۲۰). با فرض قرار گرفتن محور  $x_3$  در امتداد محور تقارن دورانی، ضرایب سفتی کشسان مستقل عبارتند از:  $C_{11} = C_{22}$ ،  $C_{44} = C_{13} = C_{31} = C_{23} = C_{32}$ ،  $C_{12} = C_{21}$ ،  $C_{33}$  و  $C_{55} = C_{66} = (C_{11} - C_{12})/2$ . ماتریس سفتی کشسان در نماد ویگت را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$C_{11}$  سرعت تراکمی افقی را تعیین می‌کند:

$$C_{11} = \rho V_{P90}^2 \quad (2)$$

$C_{33}$  مدول M است که سرعت فشاری قائم را تعیین می‌کند:

$$C_{33} = \rho V_{P0}^2 \quad (3)$$

$C_{44}$  مدول  $\mu$  است که موج برشی عمود بر لایه‌بندی را کنترل می‌کند ( $C_{44} = \rho V_{S0}^2$ ).

$$C_{44} = \rho V_{S0}^2 \quad (4)$$

$C_{66}$  موج برشی افقی با جابجایی موازی با لایه‌بندی را کنترل می‌کند ( $C_{66} = \rho V_{S9090}^2$ ).

$$C_{66} = \rho V_{S9090}^2 \quad (5)$$

$C_{13}$ ، انتشار در جهت‌های مورب را برای هردو موج تراکمی و برشی کنترل می‌کند (سیم و باکن، ۲۰۱۴؛ ورزینیاک، ۲۰۱۹):

$$C_{13} = -C_{44} + [4\rho^2 V_{P45}^2 (C_{11} + C_{33} + 2C_{44}) + (C_{11} + C_{44})(C_{33} + C_{44})]^{0.5} \quad (6)$$

$$R_{app}(\theta) = A + B \sin^2 \theta + C \tan^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{\Delta \delta}{2} \sin^2 \theta + \frac{\Delta \varepsilon}{2} \sin^2 \theta \tan^2 \theta \quad (13)$$

به طوری که:

$$A = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad (14)$$

$$B = \frac{\Delta V_P}{2V_P} - 4 \left( \frac{V_S}{V_P} \right)^2 \left( \frac{\Delta V_S}{V_S} \right) - 2 \left( \frac{V_S}{V_P} \right)^2 \left( \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad (15)$$

$$C = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P} \quad (16)$$

به طوری که  $V_S = \frac{V_{S1} + V_{S2}}{2}$ ،  $V_P = \frac{V_{P1} + V_{P2}}{2}$

$$\Delta V_P = V_{P2} - V_{P1} \cdot \left( \frac{V_S}{V_P} \right)^2 = \frac{\left( \frac{V_{S1}}{V_{P1}} \right)^2 + \left( \frac{V_{S2}}{V_{P2}} \right)^2}{2} \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$$

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \quad \Delta \rho = \rho_2 - \rho_1 \quad \Delta V_S = V_{S2} - V_{S1}$$

و  $\Delta \delta = \delta_2 - \delta_1$ . سه جمله اول رابطه (۱۳)، بازتاب

همسانگرد دامنه انعکاس P-P در زاویه برخورد  $\theta$  در

محیط همسانگرد هستند ( $R_{ipp}(\theta)$ ). شکل ۳، مقاطع

عرض از مبدا (رابطه ۱۴)، گرادیان (رابطه ۱۵) و

انحنای (رابطه ۱۶) را نشان می‌دهد. قبل از اعمال روش

پیشنهادی در سازند کژدمی، این رویکرد برای سه مدل

مصنوعی در فصل مشترک ماسه گازی/شیل که توسط

کیم و همکاران (۱۹۹۳) برای سه کلاس مختلف AVO

پیشنهاد شده‌اند، اعمال شدند (جدول ۱).

هستند  $V_{S \text{ quartz}} = 4.09 \frac{km}{s}$  و  $V_{P \text{ quartz}} = 6.05 \frac{km}{s}$

(لی، ۲۰۰۶). شایان ذکر است که رابطه (۱۲) برای

محاسبه  $\delta$ ، یک رابطه تجربی است که نخستین بار توسط

لی (۲۰۰۶) برای برخی از سنگ‌های ماسه‌ای و شیلی

پیشنهاد شد. این رابطه بر پایه داده‌های آزمایشگاهی و

آمار تعریف شده و بیانگر یک تقریب میانگین است. با

توجه به اینکه پارامتر  $\delta$  حساسیت زیادی به هندسه

لایه‌بندی، ناهمسانگردی ریزساختاری و تخلخل دارد،

این ضریب ممکن است در برخی سازندهای خاص مانند

کربناته‌ها یا شیل‌های با ترکیب معدنی متفاوت دقت کافی

نداشته باشد. بنابراین، در این مطالعه، از این رابطه به‌عنوان

یک تقریب اولیه برای محیط‌های رسوبی شیلی سازند

کژدمی استفاده شده است، اما توصیه می‌شود در مطالعات

آینده با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بومی، ضرایب

دقیق‌تری کالیبره گردد.

از آنجایی که ناهمسانگردی به معنای وابستگی سرعت

به جهت است، وابستگی زاویه‌ای سرعت، بر تغییرات

دامنه در مقابل دورافت تأثیر می‌گذارد. برای محیط‌های

همسانگرد عرضی عمودی (VTI)، دامنه بازتاب P-P و

$R_{app}(\theta)$ ، به صورت زیر محاسبه می‌شود (چوپرا و

کاستاگنا، ۲۰۱۴):

جدول ۱. پارامترهای پتروفیزیکی و کثرتان مورد استفاده در تحلیل دامنه در مقابل دورافت مصنوعی در فصل مشترک شیل/ ماسه گازی.

مدل ۳		مدل ۲		مدل ۱		پارامترها
ماسه	شیل	ماسه	شیل	ماسه	شیل	
۲/۰۲	۲/۷۳	۳/۴۹	۲/۹۶	۴/۲	۳/۳	$\left( \frac{km}{s} \right) V_P$
۱/۲۳	۱/۲۴	۲/۲۹	۱/۳۸	۲/۷	۱/۷	$\left( \frac{km}{s} \right) V_S$
۲/۱۳	۲/۳۵	۲/۱۴	۲/۴۳	۲/۴۹	۲/۳۵	$\left( \frac{gr}{cm^3} \right) \rho$
۰/۰۰۰۱۸	۰/۹۶	۰/۰۰۰۱۳	۰/۹۳	۰/۰۰۰۱۶	۰/۸۹	$V_{clay}$

$\Delta \varepsilon$  و  $\Delta \delta$  محاسبه شدند. با استفاده از پارامترهای مشتق

شده تاملسن، رابطه (۱۳) حل شد که ضریب بازتاب در

مقابل زاویه برخورد در محیط VTI است. شکل ۴،

ضریب بازتاب همسانگرد و ناهمسانگرد را در برابر زاویه

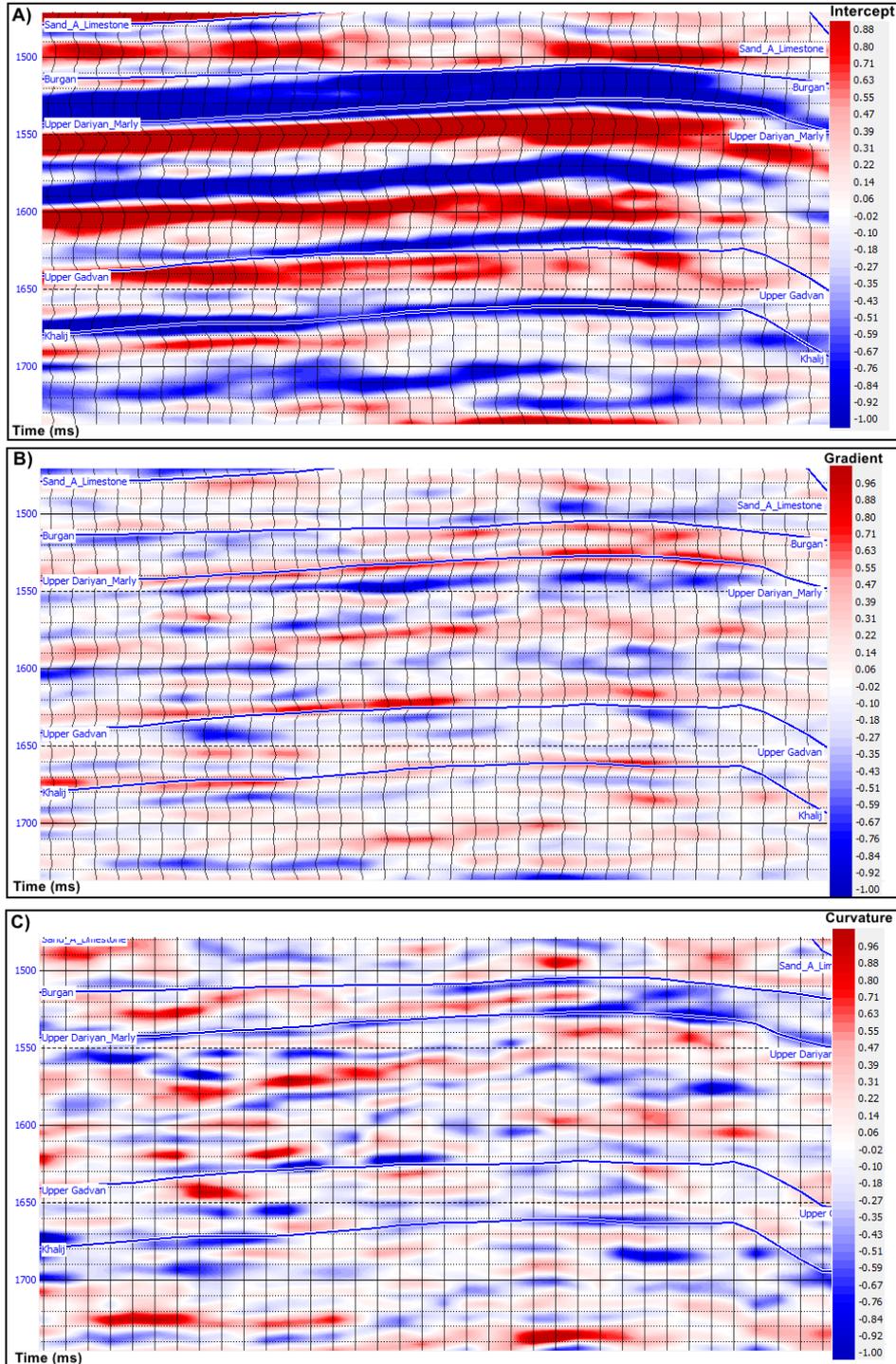
### ۳ نتایج و بحث

با استفاده از سرعت، چگالی و حجم شیل مدل‌های

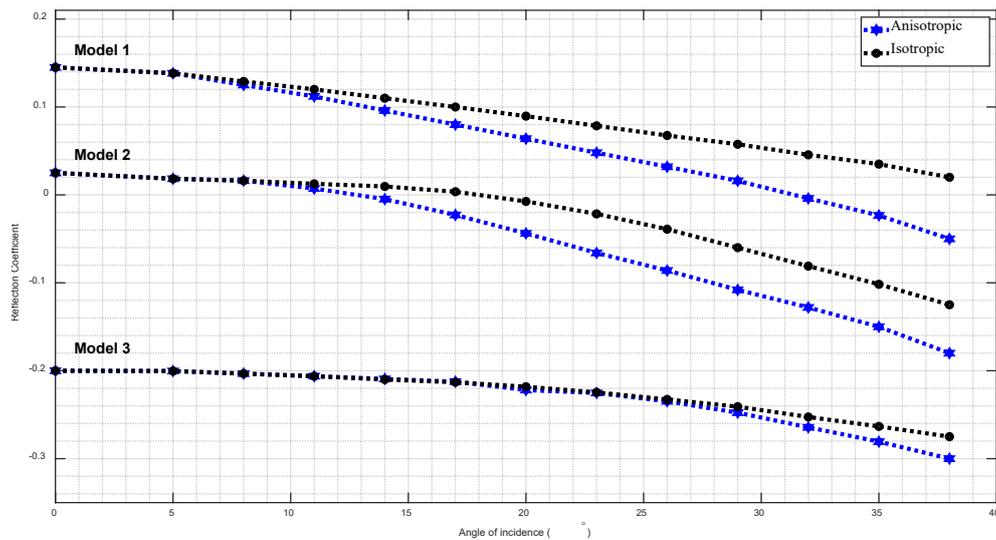
سه‌گانه (جدول ۱)، پارامترهای تاملسن با استفاده از

رابطه‌های (۱۰) تا (۱۲) محاسبه شدند. سپس برای هر بازه،

برخورد نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، تاثیر دورافت های بزرگتر (یا زاویه برخورد های بزرگتر) قابل ناهمسانگردی بر تحلیل AVO با افزایش زاویه برخورد افزایش می یابد. بنابراین، اثر ناهمسانگردی در



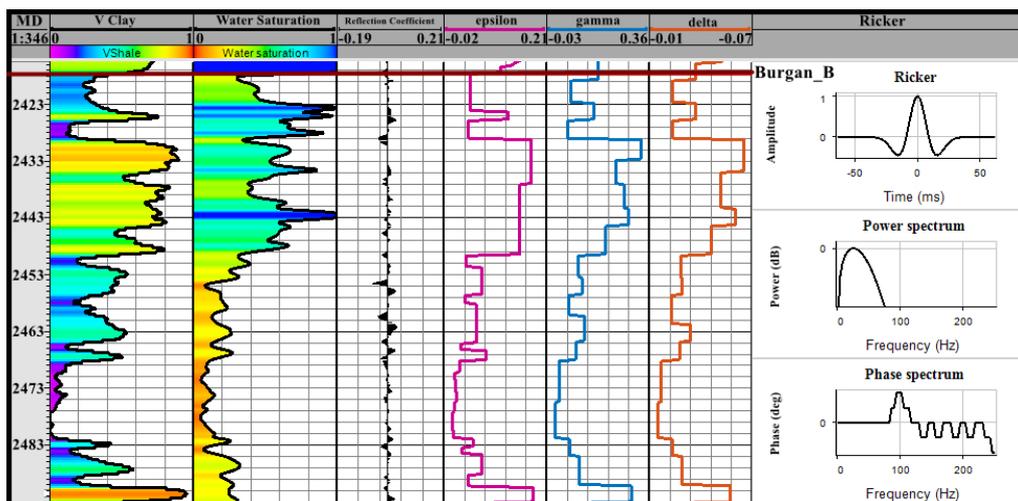
شکل ۳. مقاطع عرض از مبدا (شکل بالا)، گرادیان (شکل وسط) و انحنا (شکل پایین). این مقاطع به منظور تخمین دامنه بازتاب P-P در محیط ناهمسانگرد استفاده می شوند.



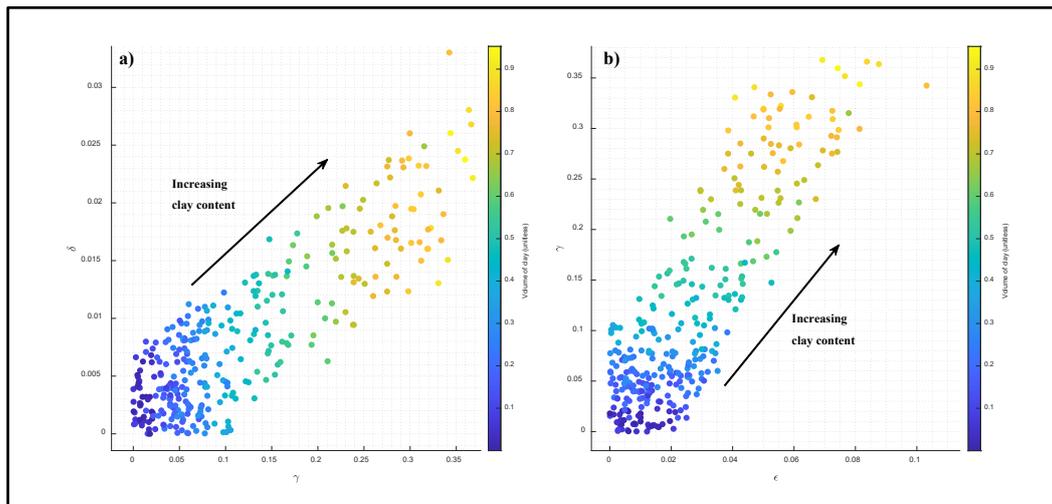
شکل ۴. دامنه در مقابل زاویه برخورد برای سه مدل مصنوعی بازتابنده‌های ماسه گازی/شیل در محیط‌های همسانگرد و VTI. منحنی‌های خط چین سیاه و آبی، به ترتیب بیانگر حالت همسانگرد و ناهمسانگرد هستند. اثر ناهمسانگردی در زاویه برخوردهای (و یا دامنه در مقابل دورافت) بزرگ بیشتر قابل توجه است.

نشان داده شده است. شکل ۶، نمودارهای متقاطع پارامترهای تامسن  $\epsilon$ ،  $\gamma$  و  $\sigma$  را نشان می‌دهد. ستون رنگی حجم شیل را برای هر نمونه نشان می‌دهد. نمونه‌هایی با حجم شیل کم (بازه‌های ماسه‌ای) دارای خواص ناهمسانگردی کمتری هستند، در حالی که نمونه‌هایی با حجم شیل بالا (بازه‌های شیلی)، خواص ناهمسانگردی بیشتری دارند. بنابراین با افزایش حجم شیل، پارامترهای تامسن افزایش می‌یابد.

پارامترهای تامسن با استفاده از رابطه‌های (۱۰) تا (۱۲) در محل چاه محاسبه شدند (شکل ۵). در بالای سازند کژدمی، حجم شیل و اشباع آب کاهش می‌یابد و بنابراین پارامترهای تامسن ( $\epsilon$ ،  $\gamma$  و  $\sigma$ ) کاهش می‌یابند. به طور کلی، با افزایش محتوای شیل (حجم شیل بیشتر)، مقدار ناهمسانگردی افزایش می‌یابد. ضریب بازتاب و موجک آماري استخراج شده از داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش و همچنین طیف و فاز آن نیز در شکل ۵،



شکل ۵. از چپ به راست: حجم شیل، اشباع آب، ضریب بازتاب، پارامترهای تامسن در محل چاه، و موجک آماري استخراج شده از داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش و توان و طیف فاز موجک استخراج شده. افزایش محتوای شیل منجر به افزایش پارامترهای ناهمسانگردی می‌شود.



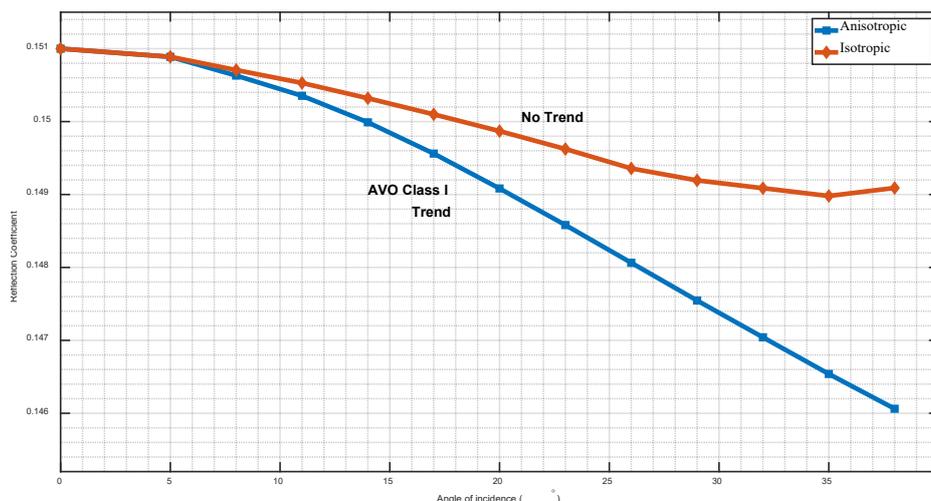
شکل ۶. نمودار متقاطع پارامترهای تامسن: (a) دلتا در مقابل پرتو گاما و (b) پرتو گاما در مقابل اپسیلون. رنگ نمونه‌ها، بیانگر حجم شیل است. نمونه‌های با حجم شیل کم (بازه‌های ماسه‌ای) خواص ناهمسانگردی پایین دارند، در حالی که نمونه‌های با حجم شیل بالا (بازه‌های شیلی) خواص ناهمسانگرد بیشتری دارند.

تشخیص است که بیانگر حضور هیدروکربن در بالای سازند کژدمی است (شکل ۷). شکل ۸، جمع آوری زاویه پیش از برانبارش را در محیط‌های همسانگرد و ناهمسانگرد نشان می‌دهد. در محیط‌های همسانگرد کلاس AVO قابل مشاهده نیست. در حالی که در محیط ناهمسانگرد AVO، کلاس I (کاهش دامنه با افزایش زاویه برخورد) مشخص است که نشان دهنده وجود هیدروکربن در بالای سازند کژدمی است.

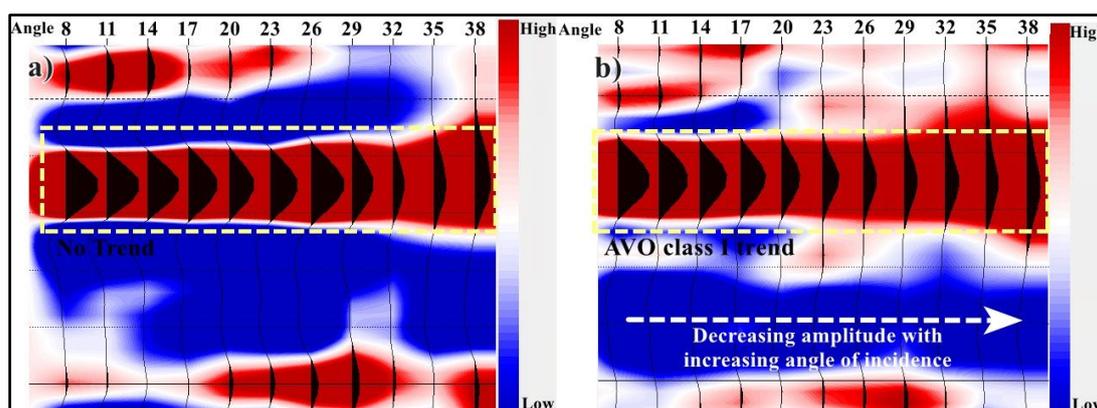
در مقایسه با مطالعات پیشین مانند کیم و همکاران (۱۹۹۳)، روگر (۲۰۰۲) و آساکا (۲۰۱۸) که عمدتاً به تحلیل AVO با فرض‌های ساده شده در محیط‌های همسانگرد یا با مدل‌های مصنوعی پرداخته‌اند، این تحقیق با استفاده از پارامترهای ناهمسانگردی تامسن استخراج شده از داده‌های واقعی پتروفیزیکی، تحلیل AVO را در محیط واقعی VTI انجام داده است. برخلاف آن مطالعات که فرض ساده‌سازی شده‌ای برای محیط زمین‌شناسی داشته‌اند، این مطالعه نشان داد که در محیط واقعی شیلی با ناهمسانگردی طبیعی، کلاس یک AVO تنها در مدل ناهمسانگرد قابل تشخیص است، در حالی که در مدل همسانگرد این روند مشاهده نمی‌شود. بنابراین،

به منظور ارزیابی عددی تفاوت میان پاسخ AVO در محیط‌های همسانگرد و ناهمسانگرد، میزان گرادیان تغییرات دامنه نسبت به زاویه برخورد برای کلاس IAVO در هر دو حالت محاسبه شد. نتایج نشان داد که در محیط ناهمسانگرد، گرادیان بازتاب منفی و با مقدار میانگین حدود ۰.۲۵- بوده است، در حالی که در محیط همسانگرد، مقدار گرادیان در همان بازه زاویه‌ای حدود ۰.۰۸- است. این اختلاف به‌طور کمی نشان‌دهنده افزایش حدود ۳ برابری حساسیت زاویه‌ای در محیط ناهمسانگرد نسبت به همسانگرد است.

با استفاده از پارامترهای مشتق شده تامسن، رابطه (۱۳) حل شد که ضریب بازتاب در مقابل زاویه برخورد در محیط VTI است. شکل ۷، تغییرات دامنه در محیط همسانگرد و ناهمسانگرد در مقابل زاویه برخورد را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۷، در تحلیل AVO همسانگرد (منحنی قرمز) کلاس AVO آشکاری قابل تشخیص نیست. به عبارت دیگر، تحلیل همسانگرد AVO وجود هیدروکربن را در بالای سازند کژدمی نشان نمی‌دهد. در حالی که در تحلیل ناهمسانگرد AVO (منحنی آبی)، کلاس I دامنه در مقابل دورافت قابل



شکل ۷. ضریب بازتاب در مقابل زاویه برخورد در بالای سازند کزدمی در محیط‌های همسانگرد و ناهمسانگرد. در محیط‌های همسانگرد، کلاس AVO آشکاری قابل تشخیص نیست. در صورتی که در محیط‌های ناهمسانگرد، کلاس I دامنه در مقابل دورافت قابل تشخیص است که نشان‌دهنده حضور هیدروکربن در بالای سازند کزدمی است.



شکل ۸. جمع‌آوری زاویه در (a) محیط همسانگرد و (b) محیط ناهمسانگرد در فصل مشترک ماسه گازی/شیل در بالای سازند کزدمی. در محیط‌های همسانگرد (سمت چپ)، کلاس AVO قابل مشاهده نیست، در حالی که در محیط‌های ناهمسانگرد (راست)، کلاس I دامنه در مقابل دورافت مشخص است که نشان‌دهنده وجود هیدروکربن است.

برای ارزیابی دقت مدل‌سازی ناهمسانگرد در تحلیل دامنه در مقابل دورافت، نتایج کمی حاصل از حل رابطه ضریب ، با داده‌های واقعی چاه در اعماق VTI بازتاب در محیط کلیدی مقایسه شدند (

شده‌اند. مطابقت کلاس AVO بین مدل و داده‌های چاه در چندین عمق تأیید می‌کند که مدل ناهمسانگرد مبتنی بر پارامترهای تامسن قادر است رفتار واقعی بازتابی سنگ مخزن را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند. همچنین اختلاف کم بین

سهم اصلی این مطالعه در توسعه یک چارچوب کاربردی برای تحلیل AVO ناهمسانگرد با استفاده از داده‌های میدانی واقعی است که می‌تواند در مکان‌یابی دقیق تر نواحی هیدروکربنی مفید باشد.

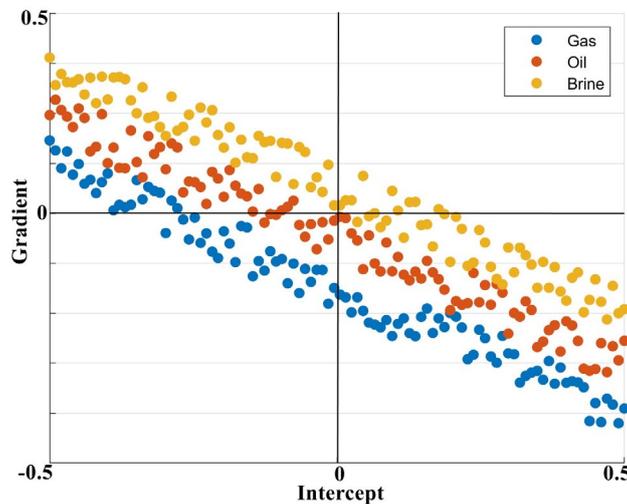
جدول ۲). در این جدول، پارامترهای پتروفیزیکی (شامل سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی) به همراه ضرایب تامسن محاسبه‌شده و کلاس AVO حاصل از مدل‌سازی، در کنار نتایج استخراج‌شده از داده‌های چاه آورده

مقادیر ضریب بازتاب مدل و چاه نشان دهنده کارایی روش پیشنهادی در باز تولید پاسخ لرزه‌ای مخزن است.

جدول ۲. مقایسه پارامترهای پتروفیزیکی و ضرایب تامل استخراج شده از داده‌های چاه با نتایج مدل سازی تحلیل AVO در محیط ناهمسانگرد VTI.

مقادیر کلاس AVO به صورت تفسیری از منحنی‌های دامنه-زاویه تعیین شده‌اند.

عمق (متر)	سرعت موج تراکمی چاه (متر بر ثانیه)	سرعت موج برشی چاه (متر بر ثانیه)	چگالی چاه (گرم بر سانتی متر مکعب)	$\delta$	$\epsilon$	$\gamma$	کلاس AVO (مدل)	کلاس AVO (چاه)	اختلاف بازتاب (مدل-چاه)
۲۸۵۰	۳۳۰۰	۱۷۰۰	۲.۴۵	۰.۰۸	۰.۱۲	۰.۱۰	I	I	۰.۰۳
۲۸۷۵	۳۴۰۰	۱۸۰۰	۲.۵۰	۰.۰۷	۰.۱۱	۰.۰۹	I	-	-
۲۹۰۰	۳۵۵۰	۱۹۰۰	۲.۵۵	۰.۰۶	۰.۱۰	۰.۰۸	I	I	۰.۰۲



شکل ۹. نتایج شبیه سازی تصادفی مونت کارلو برای سه حالت اشباع سیال آب، گاز و نفت. I بیانگر عرض از مبدا و G بیانگر گرادیان است.

وجود دارد، زیرا ما فقط دو حالتی را مدل کرده‌ایم که شرایطشان با داده‌های لرزه‌ای سطحی متفاوت است. علاوه بر این، می‌خواهیم اندازه‌گیری عددی از نحوه تطابق داده‌های واقعی با شرایط مدل شده داشته باشیم. به این منظور، می‌توانیم تعداد زیادی مدل تولید کنیم که شرایط مخزنی مختلفی داشته باشند. روش شبیه سازی مونت کارلو شرح داده شده می‌تواند به ما کمک کند. برای انجام این کار، تحقیق‌های بسیاری با در نظر گرفتن شرایط مخزنی متفاوت، تولید می‌شود. اکنون، ما یک نقطه برای عرض از مبدا و گرادیان نداریم، بلکه یک

### ۱-۳ عدم قطعیت در تحلیل دامنه در مقابل دورافت

همپسون و همکاران (۲۰۰۵)، کمی سازی عدم قطعیت در تحلیل دامنه بر حسب دورافت را پیشنهاد کردند. اجرای تحلیل دامنه بر حسب دورافت با ساخت جمع‌آوری‌های مصنوعی و نشانگرهای دامنه بر حسب دورافت آغاز می‌شود. در اصل، می‌توانیم داده‌های واقعی عرض از مبدا و گرادیان را با این مقادیر مقایسه کنیم و داده‌ها را داخل آب شور یا هیدروکربن دسته‌بندی کنیم. نمودار تقاطعی عرض از مبدا و گرادیان معمولاً برای جداسازی مناطق غیرعادی انجام می‌شود. با انجام این کار، کمی نگرانی

اثر بخشی رویکرد پیشنهادی را تأیید کرد. همچنین در جمع‌آوری زاویه پیش از برانبارش در محیط‌های همسانگرد، روند قابل مشاهده‌ای از کلاس AVO را مشاهده نمی‌شود، در حالی که در محیط ناهمسانگرد AVO، کلاس I (کاهش دامنه با افزایش زاویه برخورد)، قابل تشخیص است که نشان دهنده وجود هیدروکربن در بالای سازند کژدمی است. دستاورد اصلی این تحقیق، ارائه یک چارچوب عملی و قابل اجرا برای تحلیل AVO ناهمسانگرد بر پایه داده‌های واقعی است که به شناسایی دقیق‌تر نواحی هیدروکربنی کمک می‌کند. با این حال، محدودیت‌هایی نیز از جمله وابستگی کیفیت نتایج به دقت داده‌های پتروفیزیکی، فرض ساده‌شده مدل VTI و عدم در نظر گرفتن ناهمسانگردی پیچیده‌تر مانند HTI یا زاویه‌دار وجود دارد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، این روش در محیط‌های پیچیده‌تر زمین‌شناسی و با استفاده از وارون‌سازی همزمان و مدل‌های سه‌بعدی نیز آزمایش شود.

#### منابع

- Abedi, M. M., Riahi, M. A., & Stovas, A. (2019). Three-parameter normal moveout correction in layered anisotropic media: A stretch-free approach. *Geophysics*, *84*(3), C129-C142.
- Asaka, M. (2018). Anisotropic AVO: Implications for reservoir characterization. *The Leading Edge*, *37*(12), 916-923. <https://doi.org/10.1190/tle37120916>.
- Bakulin, A. (2003). Intrinsic and layer-induced vertical transverse isotropy. *Geophysics*, *68*(5), 1708-1713. <https://doi.org/10.1190/1.1620644>
- Chopra, S., and Castagna, J. P. (2014). Investigations in geophysics—

خوشه داده برای هر شرایط مخزنی داریم. هر کدام از این خوشه‌ها، بیانگر محدوده محتمل برای هر حالت مخزنی می‌باشد (شکل ۹).

#### ۴ نتیجه‌گیری

در این مطالعه، اثر ناهمسانگردی بر تحلیل AVO در محیط واقعی شیلی بررسی شد. با استخراج پارامترهای تامسن از داده‌های پتروفیزیکی واقعی و اعمال آن‌ها در مدل‌سازی بازتاب در محیط VTI، نشان داده شد که در محیط ناهمسانگرد، کلاس یک AVO قابل تشخیص است، در حالی که در تحلیل همسانگرد چنین روندی مشاهده نمی‌شود. نمودارهای متقاطع پارامترهای تامسن نشان دادند که نمونه‌های با حجم شیل کم (بازه‌های ماسه‌ای) دارای خواص ناهمسانگرد کمتری هستند، در حالی که نمونه‌های با حجم شیل بالا (بازه‌های شیلی) خواص ناهمسانگرد بیشتری دارند. این یافته نشان می‌دهد که فرض همسانگردی می‌تواند به نتایج گمراه‌کننده در تشخیص نواحی هیدروکربنی منجر شود. همچنین تحلیل مقایسه‌ای بین داده‌های واقعی و مدل‌های مصنوعی،

*AVO. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.*

- Garnero, E. J., Moore, M. M., Lay, T., and Fouch, M. J. (2004). Isotropy or weak vertical transverse isotropy in D "beneath the Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *109*(B8).
- Grechka, V., Zhang, L., and Rector III, J. W. (2004). Shear waves in acoustic anisotropic media. *Geophysics*, *69*(2), 576-582. <https://doi.org/10.1190/1.1707077>
- Hampson, D. P., Russell, B. H., and Bankhead, B. (2005). Simultaneous inversion of pre-stack seismic data. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2005* (pp. 1633-1637). Society of Exploration Geophysicists.
- Jiangbo, H., Jun, M., Jianli, W.,

- Tongxing, X., & Chuanqi, L. (2025). Prestack reservoir prediction method in ray parameter domain based on wide azimuth ocean bottom node seismic data. *Geophysical Prospecting*, *73*(3), 942-959.
- Kim, K. Y., Wrolstad, K. H., and Aminzadeh, F. (1993). Effects of transverse isotropy on P-wave AVO for gas sands. *Geophysics*, *58*(6), 883-888.
- Li, Y. (2006). An empirical method for estimation of anisotropic parameters in clastic rocks. *The Leading Edge*, *25*(6), 706-711.
- Long, T., Chen, F., Han, D. H., Sun, M., McNease, J. D., & Zheng, Y. (2025). An experimental study of the anisotropic and dispersion signature of shale reservoirs: Implications for seismic well tie. *Interpretation*, *13*(1), T59-T70.
- Luo, C., Ba, J., and Carcione, J. M. (2022). A Hierarchical Prestack Seismic Inversion Scheme for VTI media based on the Exact Reflection Coefficient. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3140133>.
- Nye, J. F. (1985). Physical properties of crystals: their representation by tensors and matrices. Oxford university press.
- Pan, X., Huang, L., & Liu, J. (2024). P-wave amplitude versus offset and azimuth and low-frequency anisotropic poro-acoustoelasticity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- Rüger, A. (2002). *Reflection coefficients and azimuthal AVO analysis in anisotropic media*. Society of Exploration Geophysicists.
- Sams, M., Nasser, J., & Teng Hui Turm, S. (2025). Anisotropy estimation from deviated wells: uncertainties and their implications—A case study. *Interpretation*, *13*(2), T247-T262.
- Sayers, C. M., and Dasgupta, S. (2019). A predictive anisotropic rock-physics model for estimating elastic rock properties of unconventional shale reservoirs. *The Leading Edge*, *38*(5), 358-365.
- Simm, R., and Bacon, M. (2014). *Seismic amplitude: An interpreter's handbook*. Cambridge university press.
- Thomsen, L. (1986). Weak elastic anisotropy. *Geophysics*, *51*(10), 1954-1966.
- Tsvankin, I., Gaiser, J., Grechka, V., Van Der Baan, M., and Thomsen, L. (2010). Seismic anisotropy in exploration and reservoir characterization: An overview. *Geophysics*, *75*(5), 75A15-75A29. <https://doi.org/10.1190/1.3481775>
- Wawrzyniak-Guz, K. (2019). Rock physics modelling for determination of effective elastic properties of the lower Paleozoic shale formation, North Poland. *Acta Geophysica*, *67*(6), 1967-1989.
- Yang, Y., Yin, X., & Li, K. (2025). Nonlinear amplitude variation with offset and azimuth inversion for horizontal transverse isotropic media based on the elastic stiffness matrix. *Geophysics*, *90*(2), C15-C35.
- Zhang, F., Wang, L., and Li, X. Y. (2020). Characterization of a shale-gas reservoir based on a seismic amplitude variation with offset inversion for transverse isotropy with vertical axis of symmetry media and quantitative seismic interpretation. *Interpretation*, *8*(1), SA11-SA23.

## Adaptive forward amplitude versus offset in Vertically Transversely Anisotropic (VTI) Medium Using Integrated Rock Physics Modeling and Thomson Coefficients

Zahra Aghaei Kheyraadi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. in Geophysics, Department of Applied Geology, Faculty of Basic Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

(Received: 07 April 2025, Accepted: 31 August 2025)

### Summary

As the extraction of information about petrophysics and fluid content from near-field versus far-field variations has gained more importance in recent years, understanding the effect of shale anisotropy in near-field versus far-field is essential. The layered structure of clay minerals causes elastic anisotropy. Shales (even conventional shale samples) are often elastically anisotropic due to the alignment of anisotropic clay minerals with the bedding plane. This research aims to address this issue by presenting a method based on rock physics modeling and the use of Thomsen parameters for AVO analysis in VTI environments. In this study, the impact of shale anisotropy on amplitude versus offset (AVO) analysis at the gas sand/shale interface in the Kerman Formation has been examined. This issue is important because accurate AVO analysis can be effective in identifying hydrocarbon areas, but in many previous studies, isotropy in environments has been assumed, which may lead to errors. In this study, the amplitude versus offset analysis in a vertically transverse isotropic (VTI) medium has been examined. For this purpose, Thomsen's anisotropy parameters were calculated. Since the anisotropy of shale affects the results of amplitude versus offset analysis at the gas sand/shale contact in the Kerman Formation, we have evaluated the impact of shale on amplitude versus offset analysis in the Kerman Formation. The results showed that in an anisotropic environment, Class 1 AVO is identifiable, indicating the presence of hydrocarbons, whereas in an isotropic environment, no distinct trend is observed in the AVO class. Additionally, it was observed in synthetic models that the effect of anisotropy is more pronounced at larger angles. The innovation of this study lies in presenting a combined analytical approach based on rock physics modeling and Thomsen parameters for AVO analysis in an anisotropic environment, which goes beyond classical isotropy assumptions and can aid in improving the location of new drilling areas.

**Keywords:** Thomsen parameters, range versus offset, Kazhdumi formation, transversely isotropic medium