

تعیین کلاس بی‌هنجاری‌های AVO و شناسایی هیدروکربورها با استفاده از نشان‌گرهای عرض از مبدأ، شیب، تغییر نسبت پواسن و ترسیم متقاطع آنها

صادق رحیم‌بختیاری^۱، احسان فرح‌بخش^{۲*} و رسول حمیدزاده مقدم^۱

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، ایران

۲- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۲/۸ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۲۵

چکیده

نتایج بررسی تغییرات دامنه بازتاب امواج لرزه‌ای در برابر دورافت می‌تواند در استخراج خصوصیات کشسانی و در نتیجه تعیین سنگ‌شناسی و محتوای سیالی مخازن در صنعت نفت به کار رود. یکی از روش‌های مطالعه کمی داده‌های لرزه‌ای، تحلیل AVO می‌باشد که بر روی داده‌های پیش بر انبارش صورت می‌گیرد. پیش از انجام مطالعات تحلیلی AVO باید از صحت مراحل پردازش اطمینان حاصل شود، به طوری که تغییرات دامنه بازتاب تنها مربوط به تغییر خصوصیات کشسانی لایه‌ها باشد. از بخش‌های عمده در تحلیل AVO، بررسی نشان‌گرهای معمول AVO، از جمله: عرض از مبدأ (A)، شیب (B) و تغییر نسبت پواسن و یا ترکیبی از آنها است. روش ترسیم متقاطع که به مقایسه دو نشان‌گر به طور همزمان می‌پردازد، می‌تواند در تحلیل AVO کارآمد باشد. در این مطالعه، تحلیل AVO بر روی یک مخزن ماسه‌سنگی سست و نافشرده انجام شده است؛ به منظور کالیبره کردن داده‌های لرزه‌ای واقعی، داده‌های یک چاه مورد استفاده قرار گرفته است و موج برشی نیز در این چاه اندازه‌گیری شده است. مدل‌سازی جانشینی سیال (FRM) در مخزن به کمک داده‌های چاه و معادله گسمن نشان داد که رفتار AVO در تمام حالات مخزن (با تغییر نوع سیال و درصد اشباع سیال) متعلق به کلاس چهارم از طبقه‌بندی روترفورد و ویلیامز است که با داده‌های واقعی نیز هم‌خوانی دارد. مرز هیدروکربوری در داده‌های لرزه‌ای مطابق با مکان به‌دست آمده در داده‌های چاه به کمک نشان‌گرها، ترسیم متقاطع آن‌ها و همچنین ترسیم نشان‌گرها به صورت مقاطع ساختاری در افق مورد نظر به دست آمد.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی لرزه‌ای AVO، مدل‌سازی جانشینی سیال، بی‌هنجاری AVO، نشان‌گرهای AVO، ترسیم متقاطع نشان‌گرهای AVO.

مقدمه

از سال ۱۹۳۰، روش بازتابی لزره‌ای در بررسی مخازن هیدروکربوری مورد استفاده قرار گرفته است. روش‌های کمی تفسیر داده‌های لزره‌ای به جای تنها کاربرد کیفی این نوع اطلاعات در مراحل اکتشاف تا تولید مخزن به تدریج جای خود را در صنعت نفت پیدا کرده است. با توجه به خصوصیات مختلف امواج تراکمی و برشی و اثرات متفاوت خصوصیات کشسان زمین بر روی این امواج، نیاز به آگاهی از رفتار و تغییرات موج برشی علاوه بر موج تراکمی به منظور مطالعات کمی و کسب اطلاعاتی در مورد سیالات مختلف و جنس مواد تشکیل دهنده سنگ احساس شد.

تغییر خواص پالس لزره‌ای بازتابیده شده از یک بازتابنده می‌تواند به منظور مشخص کردن تاریخچه یک حوضه، نوع سنگ در یک لایه و حتی سیال منفذی، تفسیر شود. اولین شواهد عملی برای شناسایی وجود سیال، لکه‌های روشن^۱ بودند که در ابتدای ۱۹۷۰ به صورت یک شناساگر هیدروکربور و به خصوص برای شناسایی گاز مورد توجه قرار گرفتند. اما به زودی با حفاری‌های انجام شده دریافتند که هیدروکربورها تنها منبع ایجادکننده این نوع از پاسخ‌های دامنه نمی‌باشند. روترفورد و ویلیامز برای شناسایی بهتر، پاسخ دامنه ماسه‌های گازی احاطه شده توسط شیل‌ها در مقاطع لزره‌ای را به سه دسته تقسیم‌بندی کردند [۱]. با بررسی‌های بیشتر و مشاهده رفتارهایی دیگر از ماسه گازی، کاستاگنا و همکاران این دسته‌بندی را توسعه داده و نوع چهارم از این پاسخ را به آن اضافه نمودند [۲]. دسته‌بندی بی‌هنجاری‌های AVO^۲ محدود به این دسته‌بندی نشد و بعدها کاستاگنا و سوان بررسی بی‌هنجاری AVO را در ترسیم متقاطع نشان‌گرهای عرض‌ازمبدأ (A) و شیب (B) AVO بهتر دانستند [۳]. کلید اصلی استفاده از AVO، مقایسه داده‌های حقیقی موجود با یک حالت استاندارد یعنی مدل لزره‌ای مصنوعی می‌باشد. این مقایسه برای تعیین

صحت بی‌هنجاری ناشی از تغییر سنگ‌شناسی و یا سیال است.

اصول AVO

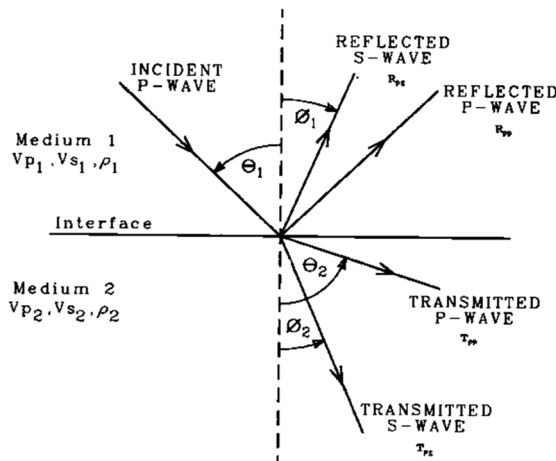
تغییر ضریب بازتاب و انتقال با تغییر زاویه برخورد (و متناظر با آن تغییر دورافت) (AVA) اغلب اشاره به وابستگی بازتاب به دورافت دارد و اساس تحلیل دامنه در مقابل دورافت (AVO) می‌باشد. امروزه AVO به‌طور گسترده در شناسایی هیدروکربور، تعیین سنگ‌شناسی و تحلیل عامل سیال براساس این واقعیت که دامنه‌های لزره‌ای در مرزها تحت تأثیر خواص فیزیکی متفاوت بالا و پایین این مرز هستند، استفاده می‌شود.

زمانی که یک موج P به صورت مایل به یک سطح مشترک تخت دولایه همگن و همسان‌گرد با گسترش نامحدود با امپدانس (مقاومت ظاهری) صوتی متغیر برخورد می‌کند، همانند برخورد قائم، موج P بازتابی و انکساری ایجاد می‌شود و علاوه بر آن، برخی از انرژی موج تراکمی برخوردی تبدیل به بازتاب و انکسار پرتو موج S می‌شود (شکل ۱). زوایای برخورد، بازتاب و عبور پرتوها طبق قانون اسنل عبارتند از:

$$P = \frac{\sin\theta_1}{V_{P1}} = \frac{\sin\theta_2}{V_{P2}} = \frac{\sin\theta_1}{V_{S1}} = \frac{\sin\theta_2}{V_{S2}} \quad (1)$$

که P پارامتر پرتو می‌باشد. نات و زوپریتز، پیوستگی جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها در بازتابنده را تحت عنوان شرایط مرزی، برای محاسبه ضرایب بازتاب و عبور به‌عنوان تابع زاویه برخورد و خصوصیات کشسانی محیط (چگالی، مدول برشی و مدول حجمی) در نظر گرفتند [۴ و ۵]. معادلات زوپریتز روابط بین امواج برشی و تراکمی عبوری، بازتابی و تابشی را برای هر دو محیط توصیف می‌کنند و انتشار هر موج تخت ایده‌آل را محاسبه می‌نمایند.

1. Bright Spots
2. Amplitude Versus Offset



شکل ۱ پرتوهای بازتابی و انکساری امواج P و S تولید شده ناشی از برخورد مایل موج P به مرز مشترکی با امپدانس صوتی متفاوت در بالا و پایین [۴].

همچنین معادله شویی می‌تواند به صورت معادله (۴) نیز تغییر کند [۹].

$$R(\theta) = R_0 + \left[A_0 R_0 + \frac{\Delta\sigma}{(1-\sigma)^2} \right] \sin^2\theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P} (\tan^2\theta + \sin^2\theta) \quad (4)$$

که در آن، R_0 ضریب بازتاب نرمال موج تراکمی و A_0 ، $\Delta\sigma$ و σ به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$A_0 = B_0 - 2(1 + B_0) \frac{1 - 2\sigma}{1 - \sigma} \quad (5)$$

$$B_0 = \frac{\frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta\rho}{\rho}}{\frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta\rho}{\rho}} \sigma = \frac{(\sigma_2 + \sigma_1)}{2} \quad \text{و} \quad \Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1 \quad (6)$$

از این رو A_0 تغییرات $R(\theta)$ را در زوایای بین صفر تا ۳۰ درجه، در حالی که تفاوتی بین نسبت پواسن وجود ندارد، بیان می‌کند. در این صورت می‌توان گفت که قسمت اول معادله شویی نمایان گر ضریب بازتاب نرمال، قسمت دوم آن شاخص تغییرات $R(\theta)$ در زوایای تابش متوسط و قسمت سوم معادله مربوط به زوایای تابش بحرانی می‌شود. باتوجه به مدل سازی AVO که توسط راسل و همکاران انجام شد [۱۰]، معادله شویی با توجه به عرض از مبدأ و شیب، در زوایای کمتر از ۳۰ درجه به صورت زیر تغییر می‌کند [۸].

$$R(\theta) = A + B \sin^2\theta \quad (7)$$

در این معادله، A همان ضریب بازتاب نرمال است که به وسیله معادله (۶) تعریف می‌شود و B شیب تغییر دامنه در مقابل دورافت می‌باشد.

ضرایب بازتاب و عبوری T_{ps} ، T_{pp} ، R_{ps} ، R_{pp} در هر زاویه تابش θ به طور کامل به وسیله چگالی و سرعت موج‌های P و S در هر محیط تعیین می‌شوند. این عوامل خود وابسته به خصوصیات فیزیکی محیط از جمله سنگ‌شناسی، تخلخل و نوع سیال می‌باشند.

از آنجا که در معادلات زوپریتز تعداد زیادی مجهول وجود دارد و همچنین به واسطه طبیعت پیچیده زمین، تقاریب متعددی بر معادلات زده شده است. از جمله این تقریب‌ها می‌توان به معادلات اکی و ریچاردز و شویی اشاره کرد که به ترتیب در زیر آورده شده است [۷ و ۸]. معادلات مذکور، رابطه بین ضریب بازتاب و زاویه فرود را ساده نموده‌اند، به طوری که فاکتورهای اساسی معادلات زوپریتز قابل تشخیص باشد.

$$R(\theta) = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right] \left[\frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P} - 4 \frac{V_S^2}{V_P^2} \frac{\Delta V_S}{V_S} - 2 \frac{V_S^2}{V_P^2} \frac{\Delta\rho}{\rho} \right] \times \sin^2\theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P} [\tan^2\theta - \sin^3\theta] \quad (2)$$

$$R(\theta) = \frac{1}{2} \left[1 - 4 \frac{V_S^2}{V_P^2} \sin^2\theta \right] \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\sec^2\theta \Delta V_P}{2 V_P} - \frac{4V_S^2}{V_P^2} \sin^2\theta \quad (3)$$

که در آنها V_p و V_s و ρ به ترتیب سرعت متوسط موج‌های تراکمی، برشی و چگالی در دو محیط فوقانی و تحتانی سطح بازتابنده می‌باشند. معادله اکی-ریچاردز تقریب مناسبی از معادله زوپریتز، به خصوص در زوایای کمتر از ۳۰ درجه می‌باشد.

تغییرات AVO وجود دارد. همچنین تحلیل AVO می‌تواند در ارزیابی بازتاب‌هایی که در مقاطع برابارش ممکن است به‌صورت لکه روشن مشاهده نشوند، مورد استفاده قرار گیرد. روترفورد و ویلیامز پاسخ‌های مختلف AVO را طبقه‌بندی کردند [۱]. آن‌ها بازتاب‌های ماسه‌های گازی را با توجه به اندازه ضریب بازتاب برخورد نرمال (R_p) در رأس ماسه‌های گازی به سه گروه تقسیم‌بندی کردند. شکل ۳ تغییر ضرایب بازتاب در برابر زاویه فرود از شیل به ماسه گازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تغییرات مذکور شامل ماسه‌های با مقاومت لرزه‌ای بالا (کلاس I)، ماسه‌های با مقاومت لرزه‌ای نزدیک به شیل (کلاس II) و ماسه‌های با مقاومت لرزه‌ای پایین (کلاس III) می‌باشد. کاستاگانا و سوان چهارم از تغییرات AVO (کلاس IV) را معرفی کردند [۳]. در این دسته، ضریب بازتاب نرمال منفی است و با افزایش دورافت، مقدار قدر مطلق آن کاهش می‌یابد.

مدل‌سازی جانشینی سیال

تغییر نوع سیال و مقدار اشباع آن در مخزن و تولید نگارهای مصنوعی مرتبط با این تغییرات تحت عنوان مدل‌سازی جانشینی سیال معرفی می‌شود.

در این معادله، A همان ضریب بازتاب نرمال است که به وسیله معادله (۶) تعریف می‌شود و B شیب تغییر دامنه در مقابل دورافت می‌باشد.

$$A = R_{p0} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right] \quad (8)$$

که در آن، ΔV_p و $\Delta \rho$ به ترتیب تغییرات سرعت موج تراکمی و چگالی در سطح بازتابنده و V_p و ρ میانگین سرعت موج تراکمی و چگالی می‌باشند.

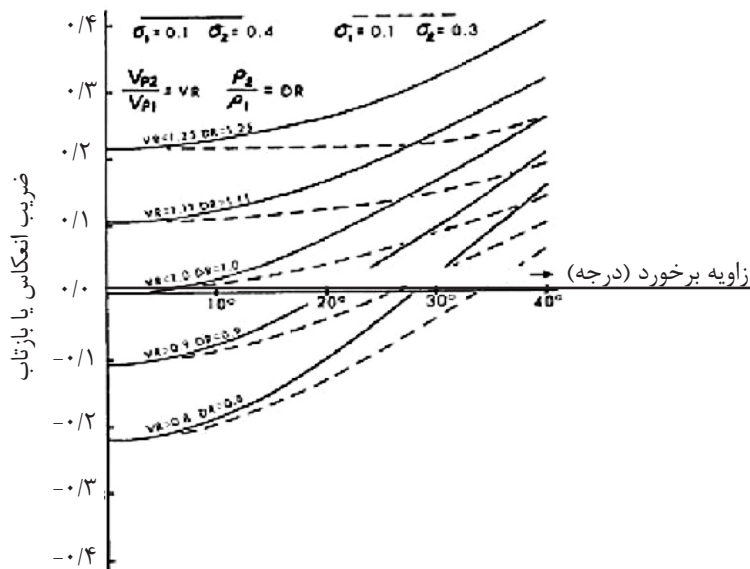
گوفد اولین کسی بود که تغییرات ضرایب بازتاب نسبت به زاویه فرود را ناشی از تفاوت نسبت V_p/V_s یا نسبت پواسن در بازتابنده دانست. ارتباط نسبت پواسن با سرعت امواج لرزه‌ای به‌صورت زیر می‌باشد [۱۱].

$$\sigma = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1} \quad (9)$$

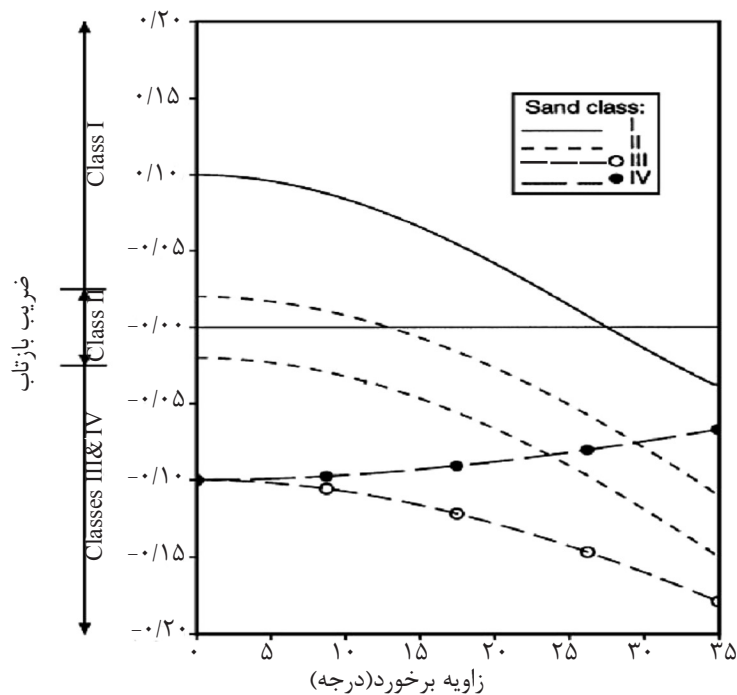
در شکل ۲، تغییرات ضرایب بازتاب موج تراکمی نسبت به زاویه برخورد موج در حالی که نسبت پواسن در بازتابنده از لایه اول به لایه دوم افزایش می‌یابد، نشان داده شده است.

دسته‌بندی بی‌هنجاری AVO

از آغاز انجام تحلیل AVO، محققین دریافتند که در ارتباط با ماسه‌های گازی، محدوده وسیعی از



شکل ۲ تغییرات ضرایب بازتاب موج تراکمی نسبت به زاویه برخورد موج در حالی که نسبت پواسن در بازتابنده از لایه اول به لایه دوم افزایش می‌یابد [۱۱].



شکل ۳ منحنی پاسخ‌های AVO مربوط به مخازن گازدار آواری با پوش سنگ شیل. در این شکل، تغییرات ضرایب بازتاب نسبت به زاویه فرود در چهار کلاس AVO، مشاهده می‌شود. کلاس I دارای ضریب بازتاب نرمال مثبت و شیب منفی، کلاس II دارای ضریب بازتاب نرمال کوچک نزدیک به صفر و کلاس III دارای ضریب بازتاب نرمال منفی و شیب منفی می‌باشد [۱]. کلاس IV دارای ضریب بازتاب نرمال منفی ولی شیب مثبت می‌باشد، از این رو مقدار دامنه با افزایش دورافت کاهش می‌یابد [۱۲].

$$K = K_{dry} + \frac{\left(1 - \frac{K_{dry}}{K_m}\right)^2}{\frac{Q}{K_f} + \frac{1-Q}{K_m} + \frac{K_{dry}}{K_m^2}} \quad (10)$$

که در آن، K مدول حجمی سنگ مخزن اشباع شده از سیالی با مدول حجمی K_{dry} ، K_f مدول حجمی اسکلت سنگ در حالت خشک، K_m برایند مدول حجمی کانی‌های سازنده سنگ مخزن و Q تخلخل سنگ مخزن به صورت اعشاری می‌باشد.

نشان‌گرهای AVO

تفسیر AVO شامل استخراج نشان‌گرهای معمول AVO از جمله عرض از مبدأ (A)، شیب (B)، نسبت پواسن و رسم مقاطع آن‌ها به منظور تشخیص سیالات مخزنی و واحدهای سنگ‌شناسی مختلف می‌باشد. ترسیم مقاطع در AVO می‌تواند به عنوان ابزار تشخیص نوع AVO (۱۳ و ۱۴) و تشخیص رسوبات هیدروکربوری (۱۵ و ۱۴) به کار رود. تحت شرایط مختلف زمین‌شناسی، مقادیر A و B در ماسه‌های آبدار و لایه‌های شیل از یک

در اغلب موارد تنها یک چاه در دسترس قرار دارد که در افقی خاص به نوعی از ترکیبات هیدروکربوری برخورد کرده است. در چنین موقعیتی، مدل‌سازی رفتار احتمالی AVO برای تمام حالات گازی، نفتی و آبدار یک مخزن وجود نخواهد داشت. راه حل، انجام مدل‌سازی سنگ مخزن و سیالات موجود در آن و سپس پیش‌بینی نگارهای مصنوعی به کمک این مدل‌سازی می‌باشد. با داشتن نگارهای موج تراکمی، موج برشی و چگالی و استفاده از معادلات زوپریتز یا یکی از تقاریب آن، می‌توان رفتار AVO مخزن را در حالات مختلف حضور سیالات منفذی تخمین زد و با داده‌های لرزه‌ای از طریق ساخت لرزه‌نگاشت مصنوعی مقایسه کرد. برای انجام مدل‌سازی سنگ مخزن از معادلات گسمن استفاده می‌شود. گسمن به منظور پیش‌بینی تغییرات خصوصیات لرزه‌ای مخزن یعنی چگالی، سرعت امواج تراکمی و برشی در اثر جابه‌جایی سیال، براساس ویژگی بافتی سنگ مخزن معادله (۸) را ارائه داد.

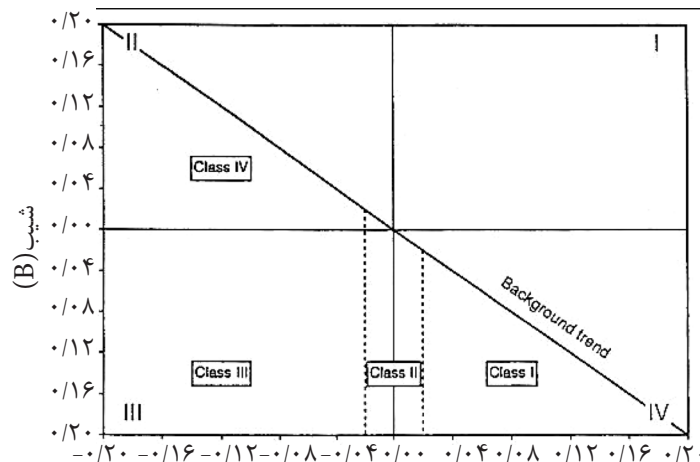
دارای ستون هیدروکربوری در حدود ۶۲ m می‌باشد. مخزن شامل ستون نفت در حدود ۴۴ m و یک کلاهدک گازی حداکثر ۱۸ m می‌باشد. میدان شامل سه واحد آسماری کربناته زیرین، ماسه غار (معادل بخش ۱ اهواز) و آسماری بالایی کربناته (فارس زیرین) می‌باشد. آسماری بالایی دارای پتانسیل مخزنی است، در حالی که آسماری زیرین کاملاً متراکم و بدون تخلخل می‌باشد. سازند در میدان به‌طور عمده شامل تقریباً ۱۰۰۰ m ماسه غیرمتراکم و بین لایه‌های شیل، دولومیت و ماسه سنگ دولومیتی و همچنین انیدریت نودولی قرار دارد. در شکل ۵، محل چاه و تغییرات زمانی افق بالایی مخزن نمایش داده شده است.

روند مشخص زمینه پیروی می‌کنند (شکل ۴). بی‌هنجاری AVO به‌صورت انحراف از این روند زمینه مشخص می‌شود که ممکن است مربوط به عوامل سنگ‌شناسی یا حضور هیدروکربور باشد. شیب این خط بستگی به نسبت V_p/V_s زمینه دارد.

مطالعه موردی

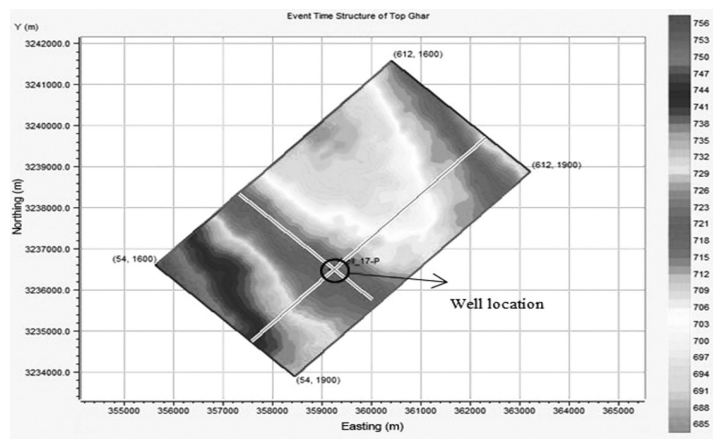
اطلاعات میدان

مطالعه بر روی میدانی با وسعتی حدود ۲۴۲ km² و عمق مخزن بین ۸۲۰ تا ۸۸۰ m در خلیج فارس انجام شد. منشأ ترکیب هیدروکربوری این میدان متعلق به سازند ماسه سنگی با سن الیگومیوسن می‌باشد. میدان به صورت یک طاق‌دیس با روند NW-SE و پلانژ ۱/۵ تا ۱/۵ درجه است و از نقطه رأس طاق‌دیس



عرض از مبدأ (A)

شکل ۴ ترسیم مقاطع عرض از مبدأ (A) و شیب (B)، امکان وجود چهار منطقه تغییر عرض از مبدأ و شیب را نشان می‌دهد. موقعیت هر یک از کلاس‌های AVO در این چهار منطقه مشخص شده است. برای یک پنجره زمانی محدود، ماسه آبدار و شیل روی یک روند زمینه مشخص قرار می‌گیرند. رأس لایه گازی در قسمت پایین روند زمینه و انتهای لایه گازی در قسمت بالای روند قرار می‌گیرند [۱۲].



شکل ۵ محل چاه و تغییرات زمانی افق بالایی مخزن (زمان با کاهش شدت رنگ‌ها کاهش می‌یابد).

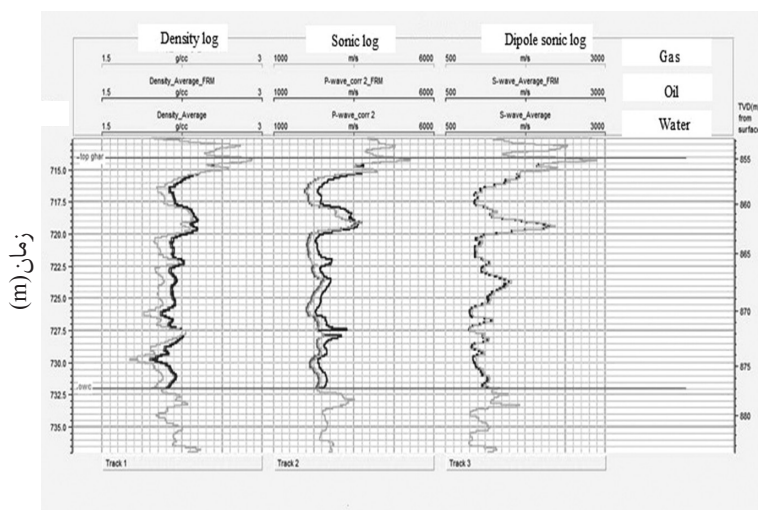
فرآیند

به لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی که در شکل ۷ آورده شده‌اند، ملاحظه می‌شود. همان طور که دیده می‌شود، تغییرات مربوط به نسبت پواسن در قسمت گازی بیشتر از قسمت نفت‌دار و آبدار می‌باشد، هر چند تفاوت قسمت‌های گازی و نفتی چندان زیاد نیست. بنابراین این نشان‌گر می‌تواند برای تفکیک مرز سیالات مناسب باشد. همچنین از آن جا که در هر سه حالت، تقریباً مقدار شیب مساوی ولی عرض از مبدأ در هریک از این حالات متفاوت است، نشان‌گر عرض از مبدأ نیز می‌تواند برای تفکیک مرز سیالات مناسب باشد.

تفسیر AVO

همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، رفتار AVO در بالای مخزن و در داده‌های لرزه‌ای، تطابق خوبی را با رفتار AVO در مدل به دست آمده از داده‌های چاه نشان می‌دهد و به خوبی می‌توان نوع AVO (IV) را در این افق در داده‌های لرزه‌ای مشاهده کرد. البته قابل ذکر است که تغییرات غیریک‌نواخت دامنه در داده‌های حقیقی به دلیل وجود نوفه در داده‌ها می‌باشد و در حالت کلی یک روند خطی مشابه با رفتار AVO در مدل مصنوعی دارد.

چاه مورد مطالعه، مخزن را در مکان نفت‌دار قطع کرده است؛ پس با استفاده از روش جانشینی سیال، حالات دیگر (محل برخورد به صورت گازدار یا آبدار) مدل‌سازی شد (با استفاده از اطلاعات به دست آمده از مغزه‌ها و نگاره‌ها). در شکل ۶ می‌توان نگاره‌های موج برشی، موج تراکمی و چگالی را برای هر سه حالت حضور سیالات منفذی مشاهده کرد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، V_s در همه حالات منفی است، پس تغییرات دامنه نسبت به دورافت باید مثبت باشد، از این رو افزایش کلی دامنه نسبت به دورافت باید تقلیل یابد. در جدول (۱) پارامترهای کشسان سنگ مخزن با توجه به درصد کانی‌های موجود در آن که در مدل‌سازی مخزن مورد استفاده قرار گرفت نشان داده شده است. لازم به ذکر است، همان‌طور که در شکل ۷ نمایش داده شده است، به دلیل فاز منفی موجک مورد استفاده در مدل‌سازی، عرض از مبدأ مثبت و شیب منفی می‌باشد (اگر فاز به صورت نرمال باشد، عرض از مبدأ منفی و شیب مثبت خواهد بود). در شکل ۸، مقطع برانبارش به دست آمده از نشان‌گر تغییرات نسبت پواسن در افق بالایی مخزن مربوط

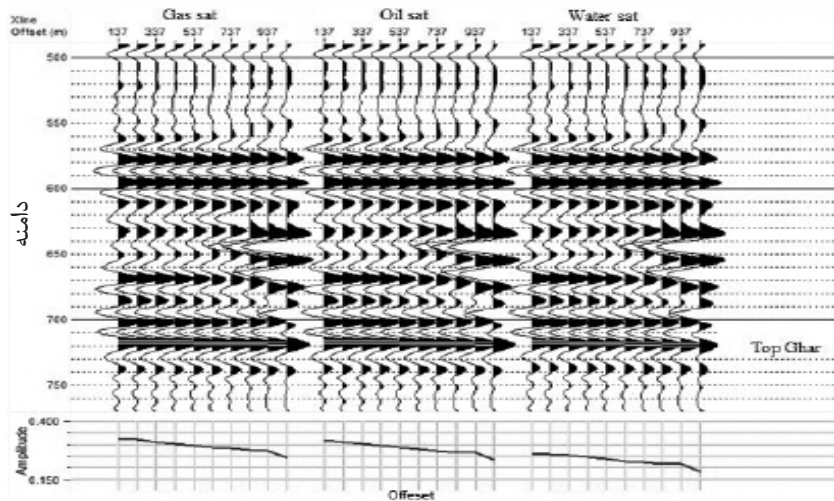


شکل ۶ مقایسه تغییرات V_p ، V_s و چگالی در اثر تغییر نوع سیال در مخزن که با انجام مدل‌سازی جانشینی سیال به کمک داده‌های چاه تهیه شده است؛ نگار چگالی و موج تراکمی در حالت آبدار بیشترین مقدار و در حالت گازدار کمترین مقدار است در حالی که مقدار نگار موج برشی در حالت گازدار اندکی بیشتر از حالت‌های دیگر است.

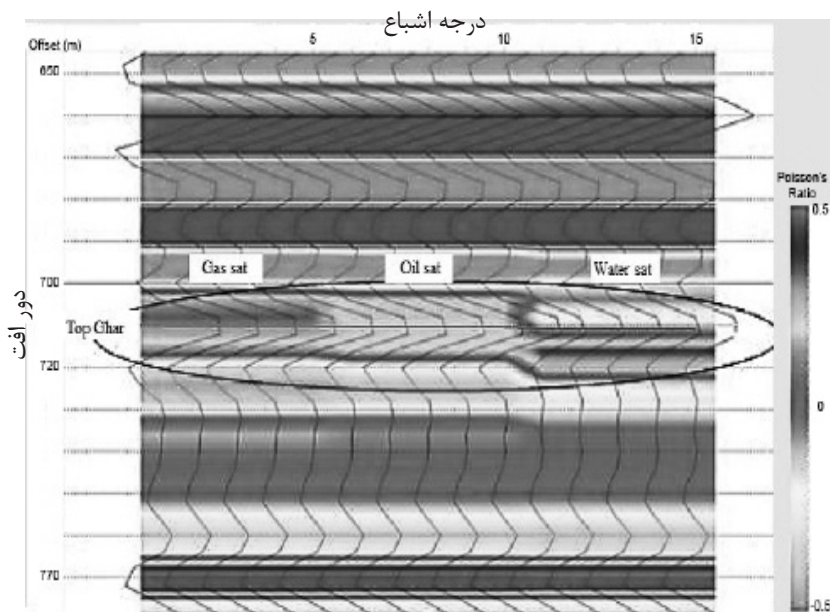
جدول ۱ پارامترهای کشسان سنگ مخزن با توجه به درصد کانی‌های موجود در آن که در مدل‌سازی مخزن مورد استفاده قرار گرفت.

ضریب برشی (μ)(Gpa)	مدول حجمی (K)(Gpa)	چگالی (g/cc)	درصد	اجزای اصلی سنگ مخزن با توجه به اطلاعات مغزه‌ها و نگاره‌ها
۴۵	۳۶/۶	۲/۶۵	۷۰	کوارتز
۶/۹	۲۰/۹	۲/۵۰	۱۳	رس
۴۵	۹۴/۹	۲/۸۷	۱۷	دولومیت

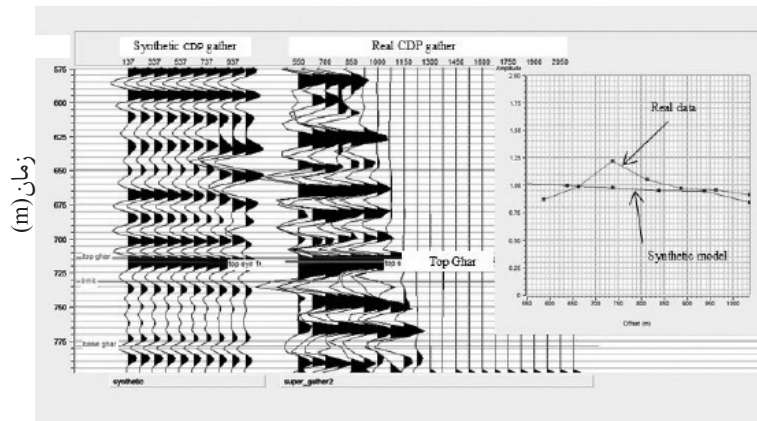
چگالی محاسبه شده برای مخزن: ۲/۶۸ g/cc
 مدول حجمی محاسبه شده برای سنگ مخزن: ۳۹/۱۹ Gpa
 مدول برشی محاسبه شده برای سنگ مخزن: ۳۴/۵۸ Gpa



شکل ۷ رفتار AVO در رأس مخزن مربوط به گروه‌های نقطه میانی مشترک مصنوعی با تغییر نوع سیال. لرزه‌نگاشت‌ها به ترتیب از چپ به راست مربوط به حالت گازدار، نفت‌دار و آبدار می‌باشند. در قسمت پایین شکل، میزان تغییرات دامنه در برابر دورافت ملاحظه می‌شود.



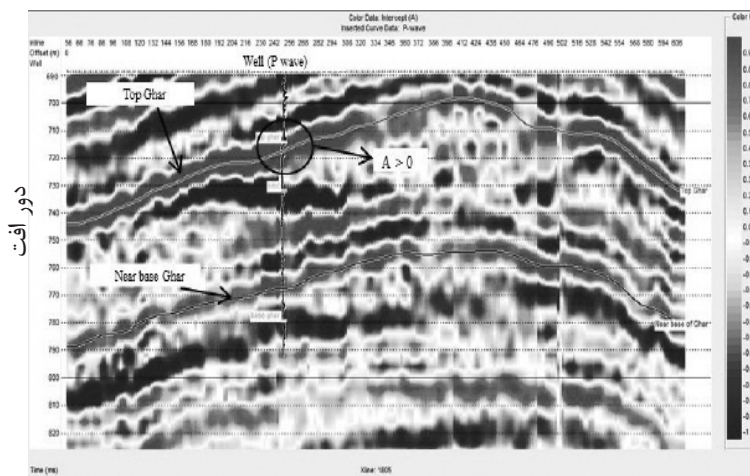
شکل ۸ مقطع برانبارش شده نشان‌گر تغییر نسبت پواسن افق بالایی مخزن مربوط به گروه‌های شکل ۷. از چپ به راست، نگاشت لرزه‌ها به ترتیب مربوط به قسمت‌های گازی، نفتی و آبدار می‌باشند [۱۶].



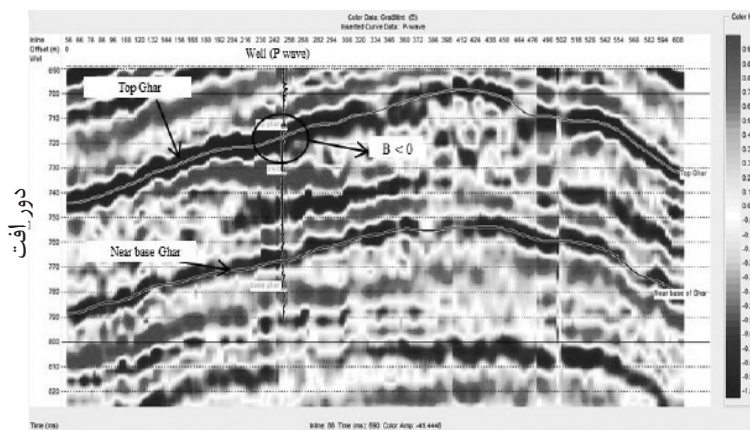
شکل ۹ مقایسه AVO در افق بالایی مخزن برای مدل مصنوعی و داده‌های لرزه‌ای.

سازند را نشان داد. همان طور که در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ دیده می‌شود، تغییر سیال در افق بالایی مخزن در محل چاه براساس نشان‌گرهای عرض از مبدأ، شیب و تغییرنسبت پواسن به خوبی دیده می‌شود و همچنین این تغییر سیال را می‌توان با استفاده از همین نشان‌گرها در رأس مخزن مشخص کرد.

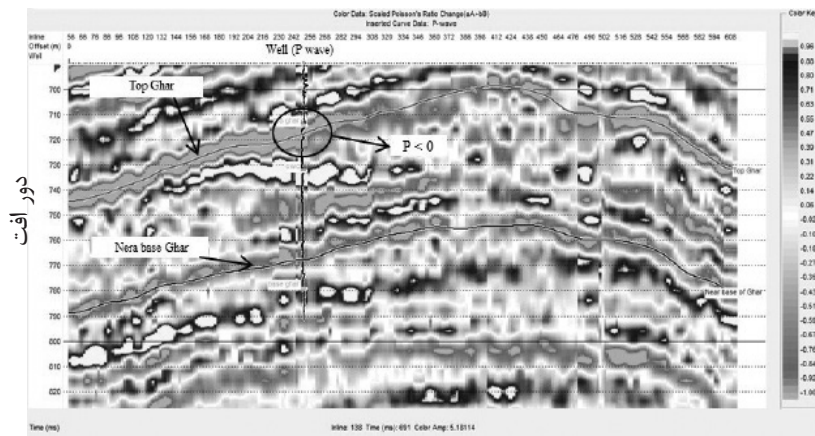
پس از استخراج نشان‌گرها (شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲) با استفاده از رسم مقاطع‌های نشانگرهای عرض از مبدأ برحسب شیب و شیب برحسب نسبت پواسن برای مدل مصنوعی به‌عنوان یک الگو و اعمال آن به‌صورت نواحی بی‌هنجاری و زمینه در ترسیم مقاطع‌های به دست آمده از داده‌های لرزه‌ای حقیقی، مقطع عرضی به‌دست می‌آید که به خوبی افق بالای



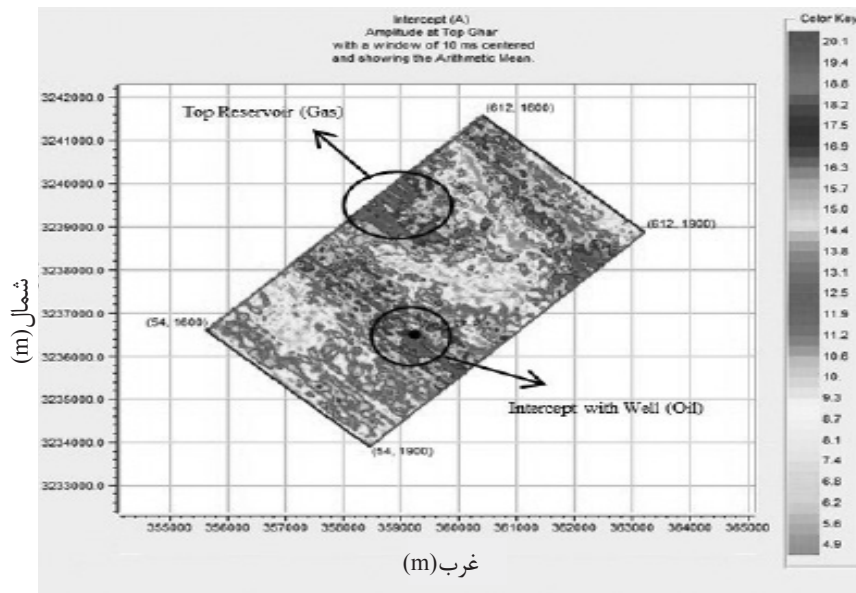
شکل ۱۰ مقطع عرضی نشان‌گر عرض از مبدأ (A) AVO در محل تقاطع با چاه.



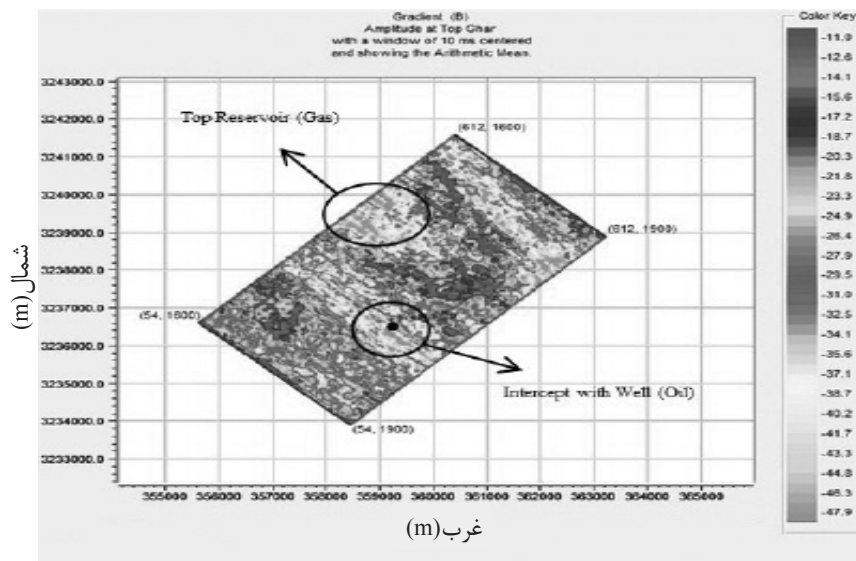
شکل ۱۱ مقطع عرضی نشان‌گر شیب (B) AVO در محل تقاطع با چاه.



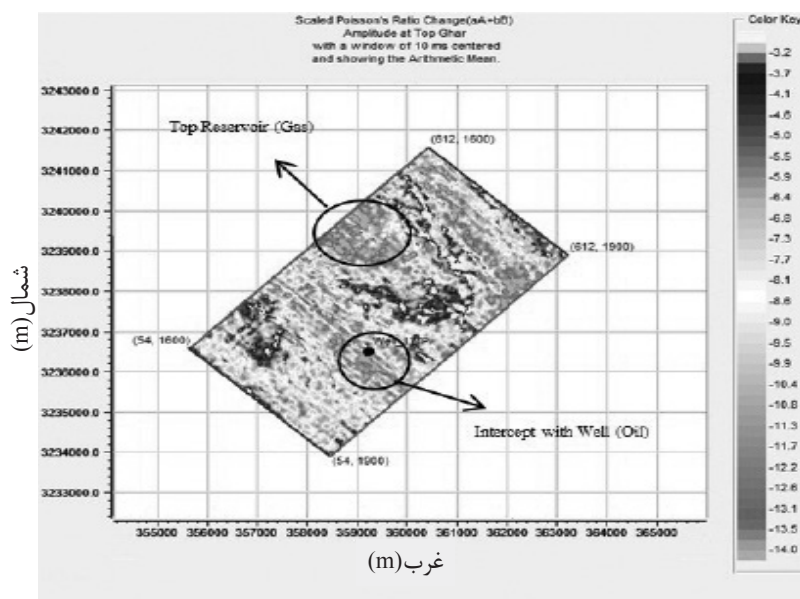
شکل ۱۲ مقطع عرضی نشان‌گر تغییر نسبت پواسن AVO در محل تقاطع با چاه.



شکل ۱۳ نشان‌گر عرض از مبدأ AVO در مقطع دامنه افق بالایی مخزن، حاصل از به‌کارگیری روش میانگین حسابی.



شکل ۱۴ نشان‌گر شیب AVO در مقطع دامنه افق بالایی مخزن، حاصل از به‌کارگیری روش میانگین حسابی.



شکل ۱۵ نشان گر نسبت پواسن در مقطع دامنه افق بالایی مخزن، حاصل از به کارگیری روش میانگین حسابی.

داده‌های پیش‌برآیند به کمک نگارهای سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی برای حالت‌های مختلف مخزنی (گازدار، نفت‌دار و آب‌دار) نشان می‌دهد که تغییرات دامنه در برابر دورافت در افق بالای مخزن متعلق به دسته IV تغییرات AVO می‌باشد و با داده‌های واقعی نیز همخوانی دارد که در حقیقت دارای عرض از مبدأ منفی و شیب مثبت می‌باشد به طوری که قدر مطلق دامنه بازتاب با افزایش دورافت کاهش می‌یابد. هر سه حالت مخزنی دارای مقدار شیب تقریباً برابر می‌باشند، در حالی که مقدار قدر مطلق عرض از مبدأ در حالت گازدار بیشترین مقدار و در حالت آب‌دار کمترین مقدار است و در حالت نفت‌دار، مقدار این نشان گر به دلیل داشتن مقداری گاز محلول، نزدیک به حالت گازدار است. نشان گر عرض از مبدأ و تغییرات نسبت پواسن در تشخیص سیالات مخزنی مناسب ارزیابی شد. هر چند به دلیل وجود نوفه در داده‌های واقعی، مقدار این نشان گر در قسمت گازدار و نفت‌دار تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند، ولی در مقاطع ساختاری افق بالای سازند غار مربوط به این نشان گر، مرز سیالات به خوبی قابل تشخیص است.

نتیجه گیری

در این تحقیق به مطالعه AVO بر روی یکی از میادین نفتی در خلیج فارس با هیدروکربورهای ناشی از سازند ماسه‌سنگی سست پرداخته شد. به منظور بررسی تغییرات AVO در حالات مختلف مخزنی، مدل‌سازی مخزن به کمک اطلاعات سنگ مخزن و سیالات موجود (که از مطالعه مغزه‌ها و نگارهای موجود به دست آمده است) با استفاده از معادله گسمن انجام شده است و نگارهای مصنوعی سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی و چگالی برای حالت‌های آب‌دار و گازدار نیز تهیه شده است. با این مدل‌سازی، رفتار AVO و کلاس AVO در رأس مخزن مشخص شد. پس از مدل‌سازی و بررسی نوع رفتار AVO در مدل مصنوعی حاصل از چاه، رفتار AVO در داده لرزه‌ای سه بعدی نیز به صورت استخراج نشان گر، رسم مقاطع نشان گر و بررسی آنها در مقاطع ساختاری انجام شد. افق بالایی سازند مخزنی در مقطع لرزه‌ای به دلیل اختلاف مقاومت لرزه‌ای پوش سنگ با ماسه‌سنگ مخزن به صورت یک افق مشخص با ضریب بازتاب منفی قابل شناسایی است که به دلیل فاز منفی موج به صورت قله مشخص می‌شود. مدل‌سازی لرزه‌ای

مراجع

- [1]. Rutherford S., Williams R., "Amplitude-versus-offset variations in gas sands," Journal of Geophysics, Vol. 54, No. 6, pp. 680-688, 1989.
- [2]. Castagna J., Batzle M., Eastwood R., "Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks," Journal of Geophysics, Vol. 50, No. 4, pp. 571-581, 1985.
- [3]. Castagna J., Swan H., "Principles of AVO crossplotting," Journal of the Leading Edge, Vol. 16, No. 4, pp. 337-342, 1997.
- [4]. Zhang H., Brown R. J., "A review of AVO analysis," CREWES Research Report, Vol. 13, 2001.
- [5]. Knott C., "Reflection and refraction of elastic waves with seismological applications," Philosophy Magazine, Vol. 48, pp. 64-97, 1899.
- [6]. Zoeppritz K., "Erdbebenwellen VII. VIIb, Über reflexion und durchgang seismischer wellen durch un stetigkeitsflächen, nachrichten von der königlichen gesellschaft der wissenschaften zu göttingen", Mathematisch-physikalische Klasse, pp. 66-84, 1919.
- [7]. Aki K., Richards P. G., "Quantitative seismology: theory and methods", 2nd ed., W. H. Freeman and Company, 1980.
- [8]. Shuey R. T., "A simplification of the Zoeppritz equations", Journal of Geophysics, Vol. 50, No. 4, pp. 609-614, 1985.
- [9]. Castagna J. P., "Offset-dependent reflectivity: Theory and practice of AVO analysis", Book edited by Backus M. M., Society of Exploration Geophysics, 1993.
- [10]. Russell B., Line L. R., Hirsche K. W., Peron J., "The AVO modeling volume," Journal of Exploration Geophysics, Vol. 32, No. 4, pp. 264-270, 2000.
- [11]. Ostrander W. J., "Plane wave reflection coefficients for gas sands at non-normal angles of incident," Journal of Geophysics, Vol. 49, No. 10, pp. 1637-1648, 1984.
- [12]. Castagna J. P., Swan H. W., Foster D. J., "Framework for AVO gradient and intercept interpretation," Journal of Geophysics, Vol. 63, No. 3, pp. 948-956, 1998.
- [13]. Foster D. J., Keys R. G., "Interpreting AVO responses," Society of Exploration Geophysics, 1999.
- [14]. Ross C. P., Kinmann D. L., "Non-bright spot AVO; two examples", Journal of Geophysics: Vol. 60, No. 5, pp. 1398-1408, 1995.
- [15]. Verm R. W., Hilterman F. J., "Lithologic color-coded sections by AVO crossplots", 64th Society of Exploration Geophysicists Meeting, 1994.
- [۱۶]. م. میرزاخانیا، "تفکیک سیالات مخزنی و سنگ‌شناسی‌های مختلف در مخزن ماسه‌سنگی غار در میدان نفتی ابودر خلیج فارس با نشانگرهای AVO"، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ۱۳۸۶.
- [17]. Alaei B., "Seismic modeling of complex geological structures," Book edited by Kanao, M., InTechOpen, 2012.
- [18]. Anderson N., Cardimona S., "Forward seismic modeling: the key to understanding reflection seismic and ground penetrating (GPR) techniques," Geophysics 2002, The 2nd Annual Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure, 2002.

- [19]. Castagna J. P., "Recent advances in seismic lithologic analysis," Journal of Geophysics, Vol. 66, No. 1, pp. 42-46, 2001.
- [20]. Castagna J. P. and Smith S. W., "Comparison of AVO indicators: a modeling study," Geophysics, Vol. 59, No. 12, pp. 1849-1855, 1994.
- [21]. Fatti J. L., Smith G. C., Vali P. J., Strauss P. J. and Levitt P. R., "Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: a 3-D seismic case history using the Geostack technique", Journal of Geophysics, Vol. 59, No. 9, pp. 1362-1376, 1994.
- [22]. Fugro-Jason (UK) Ltd., "Aboozar field geostatistical inversion report," IOOC, 2006.
- [23]. Gardner G., Gardner L. and Gregory A., "Formation velocity and density; the diagnostic basics for stratigraphic traps," Journal of Geophysics, Vol. 39, No. 6, pp. 770-80, 1974.
- [24]. Goodway B., Chen T. and Downton J., "Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters," 67th Annual International Meeting (Society of Exploration Geophysics), pp. 183-186, 1997.
- [25]. Goodway B., "A tutorial on AVO and Lamé constants for rock parameterization and fluid detection," Journal of CSEG Recorder, Vol. 26, No. 6, pp. 39-60, 2001.
- [26]. Kearey P., Brooks M. and Hill I., "An introduction to geophysical exploration," 3rd ed., Wiley-Blackwell, 2002.
- [28]. Richards T. C., "Motion of the ground on arrival of reflected longitudinal and transverse waves at wide-angle reflection distances," Journal of Geophysics, Vol. 26, No. 3, pp. 277-297, 1961.
- [29]. Sheriff R., Geldart L., "Exploration Seismology," 2nd ed., Cambridge University Press, 1995.
- [30]. Smith G. C. and Gidlow P. M., "Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas," Journal of Geophysical Prospecting, Vol. 35, No. 9, pp. 993-1014, 1987.
- [31]. Yilmaz O., "Seismic data analysis and processing, inversion, and interpretation of seismic data," 2nd ed., Society of Exploration Geophysicists, 2001.