

تعیین نشانگرهای لرزه‌ای پردازش دامنه در برابر دورافت برای شناسایی لایه‌های گازدار با وارون سازی تقریب "شوی"

فاطمه قدیمی^۱، سعید مجدی فر^۲، محسن همتی چگنی^۲

۱- کارشناسی ارشد اکتشاف معدن، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک،

۲- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک،

(دریافت ۱۳۹۸/۰۸/۲۳، پذیرش ۱۳۹۹/۰۳/۳۱)

چکیده

مطالعه‌ی مخازن هیدروکربنی با استفاده از پردازش داده‌های لرزه‌ای یکی از راهکارهای مهم برای تعیین لایه‌های هیدروکربن‌دار است. در این تحقیق از داده‌های پیش از برانبارش منطقه پنوبسکات کانادا استفاده شده است تا به کمک روش پردازش دامنه در مقابل دورافت (آنالیز AVO) لایه‌های گازدار شناسایی شود. آنالیز AVO بر اساس معادلات زوپریتس به سادگی قابل حل نیست بدین ترتیب تقریب‌های مختلفی ارایه شده که در این تحقیق از تقریب شوی استفاده شده است. تقریب شوی دو نشانگر عرض از مبدا (R_p) و گرادیان (G) دارد که در این تحقیق به کمک روش وارون‌سازی کمترین مربعات و تیخونوف در خط برداشت عمودی ۱۱۵۳ تخمین زده شده‌اند. ماتریس کوواریانس مدل روش‌های وارون‌سازی کمترین مربعات و تیخونوف محاسبه شد تا واریانس تخمین نشانگرهای R_p و G به دست آید. واریانس تخمین نشانگرهای R_p و G با استفاده از روش کمترین مربعات برابر ۰/۲۴ و ۱۵/۰۸ است در حالی که با استفاده از روش تیخونوف برابر ۰/۰۸ و ۰/۱۴ است. بنابراین نتایج روش تیخونوف نسبت به کمترین مربعات با اطمینان بیشتری قابل استناد و تفسیر نشانگرهای حاصل ضرب R_p در G ، ضریب بازتاب نرمال موج برشی و تفاوت ضریب بازتاب نرمال موج تراکمی و برشی حاکی از وجود یک لایه‌ی گازدار در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۳۶ میلی‌ثانیه است که با نتایج چاه L30 در منطقه مطابقت دارد.

کلمات کلیدی

آنالیز AVO، تقریب شوی، واریانس تخمین، کمترین مربعات، تیخونوف.

۱- مقدمه

نشانهگر ضریب بازتاب موج S, P و نشانهگر ضریب بازتاب تفاضل موج P و S سه نشانهگری اند که تغییرات پارامترهای الاستیک منطقه را شبیه‌سازی می‌کنند و در این تحقیق برای شناسایی لایه‌های گازدار استفاده می‌شوند. برای تخمین نشانهگرهای تقریب شوی از تکنیک‌های وارون‌سازی کمترین مربعات و روش پایدارسازی تیخونوف استفاده می‌شود ولی تلاش می‌شود با محاسبات جبری، پایداری نشانهگرهای لرزه‌ای به دست آمده، در مقابل خطا ارزیابی و واریانس تخمین نشانهگرهای معادله شوی ارایه شود. با محاسبه واریانس تخمین می‌توان دقت روش وارون‌سازی را شناسایی و سطح تفسیر نشانهگرهای AVO را مشخص کرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- پردازش دامنه در برابر دورافت (AVO)

معادله زوپریتس به دلیل اینکه پارامترهای مجهول زیادی دارد قابل حل نیست و حل آن بسیار دشوار است، به همین دلیل محققان مختلف تقریب‌هایی از این معادله را ارایه کردند که قابل حل است و باید در پردازش AVO از این تقریب‌ها استفاده کرد. شوی^۱ تقریبی از معادله زوپریتس را به شکل رابطه ۱ ارایه کرد [۸]:

$$R(\theta) = R_p + G \sin^2 \theta \quad (1)$$

که در آن:

R_p : عرض از مبدا یا ضریب بازتاب موج فشاری

G: گرادیان آنالیز AVO

θ : زاویه فرود موج است.

اگر ضریب بازتاب ردلرزه‌ها در زوایای مختلف تابش بر حسب توان دوم سینوس زاویه تابش رسم شود، خطی حاصل می‌شود که می‌توان با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی بر روی آن R_p و G را تخمین زد.

۲-۲- نشانهگرهای تفسیر AVO

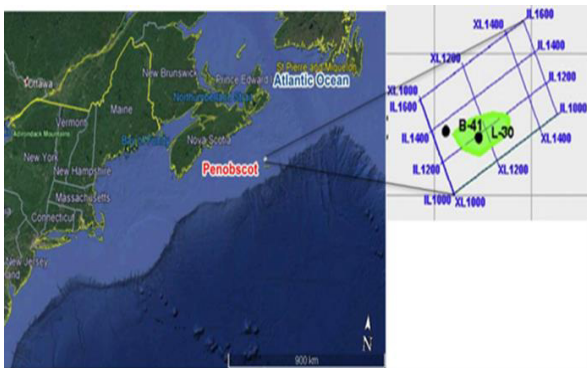
نشانهگرهای تفسیر AVO توابعی از نشانهگرهای عرض از مبدا و گرادیان‌اند که با استفاده از آن‌ها می‌توان تفسیری از خصوصیات مخزن ارایه کرد. برخی از آن‌ها در تشخیص سیال و برخی در شناسایی لیتولوژی مخزن استفاده می‌شوند. رایج‌ترین نشانهگرهای AVO به دست آمده از تقریب شوی عبارتند از:

- نشانهگر عرض از مبدا (R_p): این نشانهگر تقریبی از ضریب

در بررسی و تخمین پارامترهای پتروفیزیکی مخازن هیدروکربنی، روش لرزه‌نگاری از جمله روش‌های ژئوفیزیکی متداول است. چگالی و سرعت امواج طولی یا فشاری (P) و امواج عرضی (S) مهم‌ترین پارامترهای الاستیکی اند که با پردازش لرزه‌ای تخمین زده می‌شوند و در اکتشافات هیدروکربنی نقش مهمی ایفا می‌کنند. اختلاف بین خصوصیات کشسانی لایه‌های زیرزمین، معمولاً ناهنجاری‌هایی را در دامنه سیگنال‌ها ایجاد می‌کند. روش آنالیز دامنه در برابر دورافت (AVO)^۱ با مطالعه تغییرات دامنه سیگنال‌های لرزه‌ای نسبت به زوایای تابش در یک عمق مشترک به مطالعه ناهنجاری‌های دامنه می‌پردازد و به شکل گسترده‌ای در اکتشافات نفتی استفاده می‌شود.

گاه کاهش مقاومت لرزه‌ای در لایه‌های زیرین زمین به کاهش دامنه‌های لرزه‌ای منجر می‌شود که به آنومالی‌های لکه تاریک شهرت دارد و گاه کاهش مقاومت لرزه‌ای عامل افزایش دامنه ردلرزه‌ها و به وجود آمدن آنومالی لکه روشن می‌شود [۱]، بنابراین استراندرد^۲ استفاده از روش دامنه در برابر دورافت (AVO) به منظور شناسایی آنومالی‌های لکه روشن وابسته به لایه‌های گازدار را پیشنهاد داد. اولین تحقیق درباره تئوری AVO توسط نات^۳ و زوپریتس^۴ انجام شد، که به تعریف معادله‌هایی درباره بازتاب و انکسار امواج الاستیک همساز^۵ در مرز بین دو لایه هموزن و ایزوتروپیک منجر شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که انرژی بازتابی، از سطوح مختلف الاستیکی، با افزایش زاویه تابش، کاهش خواهد یافت [۲]. تقریب شوی قادر است نشانهگرهای لرزه‌ای مختلفی همچون عرض از مبدا، گرادیان، حاصلضرب گرادیان در عرض از مبدا و فاکتور سیال را ارایه دهد. مطالعه این نشانهگرها توسط محققین مختلفی [۷-۳] در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. این تحقیق در نظر دارد با پردازش AVO، نشانهگرهای لرزه‌ای معادله شوی را استخراج و با تفسیر آن‌ها لایه‌های گازدار را آشکارسازی کند. برای این منظور از داده‌های پیش از برانبارش^۶ یک مخزن ماسه سنگی در کانادا به نام پنوبسکات^۷، استفاده می‌شود. آشکارسازی لایه‌های گازدار به وسیله تقریب شوی، معمولاً با استفاده از نشانهگرهای عرض از مبدا و گرادیان انجام می‌گیرد که بر روی نمودارهای متقاطع تحلیل و بررسی می‌شوند ولی این تحقیق تلاش می‌کند با استفاده از ترکیب نشانهگرهای تقریب شوی با یکدیگر؛ پارامترهای الاستیک منطقه را شبیه‌سازی کند و از طریق مطالعه آن‌ها اکتشاف لایه‌های گازدار را انجام دهد.

نووا اسکوشیا واقع در کشور کانادا قرار دارد. این منطقه در حدود ۸۶۴ کیلومتر مربع مساحت دارد. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. داده‌های مورد استفاده این تحقیق، داده‌های لرزه‌نگاری سه‌بعدی پیش از برانبارش است که توسط شرکت dGB Earth Science در اختیار این تحقیق قرار گرفته است. در مخزن پنبوسکات دو چاه L30 و B41 حفاری شده است که چاه L30 به مخزن گاز برخورد کرده است ولی در چاه B41 گازی دیده نمی‌شود [۱۰]. چاه نمودارهای گاما، چگالی و صوتی این دو چاه نیز در اختیار این تحقیق قرار گرفته است که برای پردازش داده‌های لرزه‌ای استفاده می‌شود. خطوط برداشت اصلی (اینلاین) از ۱۰۰۰ تا ۱۶۰۰ با گام یک و خطوط برداشت عمودی (کراس لاین) از ۱۰۰۰ تا ۱۴۸۱ با گام یک تغییر می‌کند. فاصله اینلاینها و کراس لاین‌ها از یکدیگر به ترتیب ۱۲ و ۲۵ متر است. محدوده برداشت زمانی نیز از صفر تا ۶۰۰۰ میلی‌ثانیه با گام ۴ میلی‌ثانیه است که البته سیگنال ثبت شده پس از ۳ ثانیه (در حدود ۵ کیلومتر) ضعیف می‌شود.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه [۸]

۴- وارون‌سازی تقریب شوی

این تحقیق از داده‌های پیش از برانبارش برای تخمین پارامترهای الاستیک مخزن هیدروکربنی استفاده می‌کند؛ بنابراین در زوایای مختلف در هر نقطه، بازتاب امواج لرزه‌ای در اختیار است و بر اساس معادله شوی می‌توان تخمینی از پارامترهای الاستیک مخزن به دست آورد. شکل ۲ داده‌های لرزه‌ای در خطوط برداشت ۱۱۷۷ را در زوایای ۳ تا ۲۷ درجه نشان می‌دهد. چاه L30 در خط برداشت ۱۱۷۷ قرار دارد و

بازتابی موج فشاری یا موج P است و انتظار می‌رود در محیط گازی مقداری منفی داشته باشد [۹].

- نشانگر گرادیان (G): این نشانگر مقدار گرادیان AVO را برای هر نقطه میانی مشترک نشان می‌دهد. تغییرات گرادیان وابستگی زیادی به تغییرات نسبت پواسون در بازتابنده دارد. این نشانگر به تنهایی نمی‌تواند نشان‌دهنده تغییرات دامنه با دورافت باشد، از این رو با نشانگر عرض از مبدا به صورت ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماسه‌های گازدار گرادیان و عرض از مبدا منفی‌تری نسبت به ماسه‌های آبدار دارند [۹].

- نشانگر حاصلضرب R_p در G: این نشانگر از حاصلضرب نشانگر عرض از مبدا در گرادیان حاصل می‌شود. در مواردی که ضریب بازتاب موج فشاری یا P، منفی و گرادیان نیز منفی باشد، پاسخ به صورت مثبت ظاهر می‌شود که وقتی پاسخ به صورت مثبت است آنومالی کلاس نوع سوم را نشان می‌دهد و نشان‌دهنده این است که در محیط هیدروکربن وجود دارد و همچنین مشخص‌کننده مرز نفت و گاز است [۹].

- نشانگر ضریب بازتاب نرمال موج برشی یا R_S : این نشانگر برای نشان دادن تغییر مقاومت لرزه‌ای موج S استفاده می‌شود. از آنجا که وجود گاز ممکن است باعث افزایش اندکی در سرعت موج S شود، بنابراین این رفتار آنومال گونه موج S در بالای لایه گازدار رخ می‌دهد [۹]. رابطه ۲ ضریب بازتابی موج برشی را نشان می‌دهد:

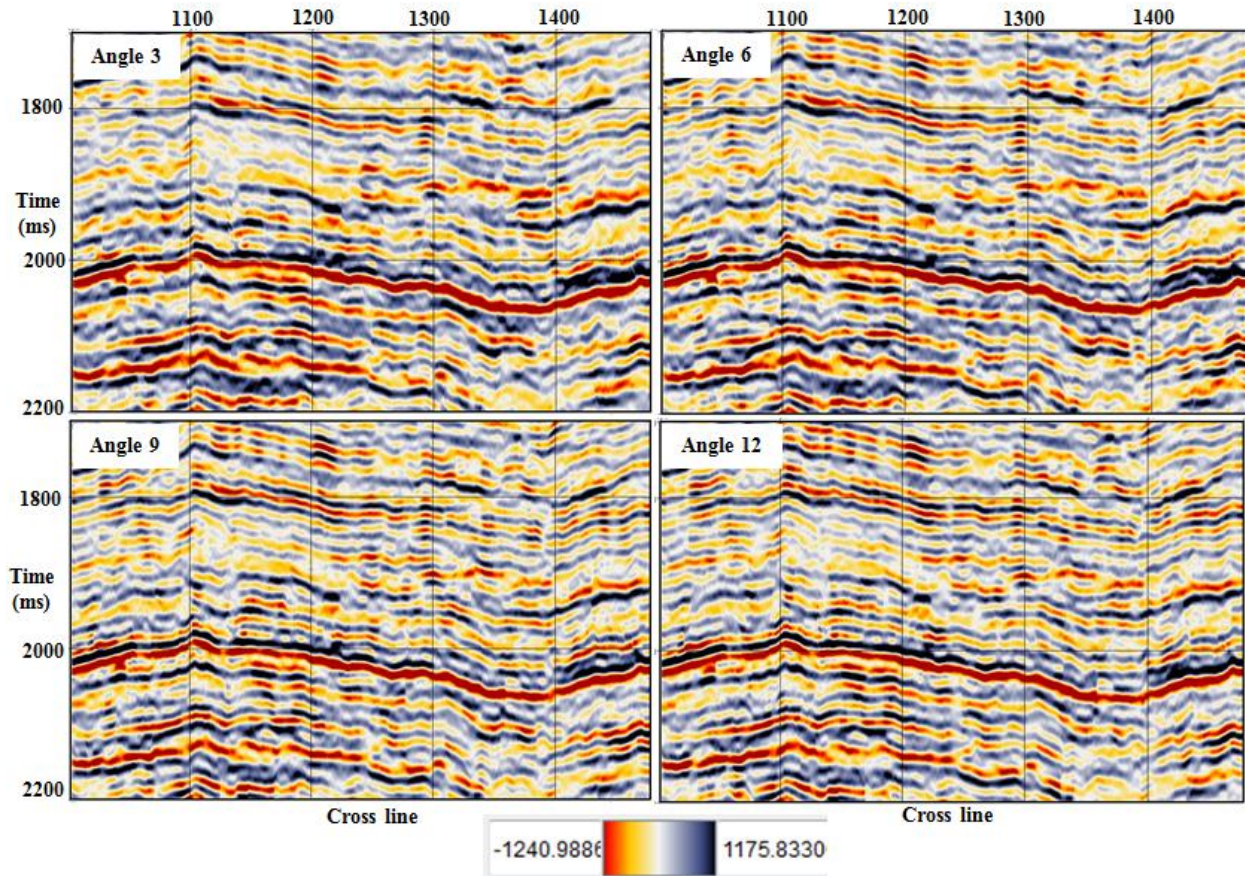
$$R_S = \frac{1}{2} \times (R_p - G) \quad (2)$$

- نشانگر تفاوت ضریب بازتاب موج فشاری و موج برشی $(R_p - R_S)$: این پروفیل همچنین نسبت شبه پواسون نامیده می‌شود، زیرا ترکیب خطی R_p و G برابر با تغییر نسبت پواسون است. از آنجا که مقدار کمی گاز در لایه‌ها می‌تواند نسبت پواسون را به شدت کاهش دهد، کاهش نسبت پواسون نشان‌دهنده یک لایه گازدار در منطقه است. از مزایای این نشانگر نسبت به نشانگرهای دیگر این است که اغلب برای ماسه‌های گازدار نسبت به ماسه‌های آبدار مقدار منفی‌تری دارد [۹]. رابطه ۳ این نشانگر را نشان می‌دهد:

$$R_p - R_S = \frac{1}{2} \times (R_p + G) \quad (3)$$

۳- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه این تحقیق، یک مخزن گازدار ماسه سنگی به نام پنبوسکات واقع در کشور کانادا است که در سواحل



شکل ۲: داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش در زوایای ۳، ۶، ۹ و ۱۲ درجه در خط برداشت ۱۱۷۷ (بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۳۶ میلی‌ثانیه حاوی زون گازدار)

بر اساس معادله شوی، ماتریس کرنل (F) که ارتباط میان ماتریس داده‌ها (R) و ماتریس پارامترهای مجهول (m) را برقرار می‌کند به صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \sin^2 \theta_1 \\ 1 & \sin^2 \theta_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \sin^2 \theta_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

در ماتریس کرنل F ، زاویه تابش از ۳ تا ۳۰ درجه است؛ بنابراین این ماتریس بعد 10×2 در هر نقطه از مخزن برای محاسبه پارامترهای الاستیک دارد. در نهایت می‌توان معادله شوی را بر اساس ماتریس‌های تعریف شده به صورت رابطه ۷ در نظر گرفت:

$$\begin{bmatrix} R(\theta_1) \\ R(\theta_2) \\ \vdots \\ R(\theta_n) \end{bmatrix}_{10 \times 1} = \quad (7)$$

در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۳۶ میلی‌ثانیه به زون گازدار برخورد کرده است.

اگر بازتاب امواج لرزه‌ای در زوایای کمتر از ۳۰ درجه در بردار R در نظر گرفته شود، خواهیم داشت:

$$R = [r_3 \ r_6 \ r_9 \ r_{12} \ r_{15} \ r_{18} \ r_{21} \ r_{24} \ r_{27} \ r_{30}]^T \quad (4)$$

بردار R ضرایب بازتاب امواج لرزه‌ای در هر نقطه است که به عنوان ماتریس داده‌ها در نظر گرفته می‌شود. مقدار ضرایب بازتاب از ۳ تا ۳۰ درجه برای هر نقطه در اختیار است. این تحقیق در نظر دارد عرض از مبدا (R_p) و گرادیان (G) را با استفاده از معادله شوی (رابطه ۱) در هر نقطه تخمین بزند که به عنوان پارامترهای مجهول مدل در نظر گرفته می‌شوند. پارامترهای مجهول مدل با استفاده از ماتریس m به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شوند:

$$m = \begin{bmatrix} R_p \\ F \end{bmatrix} \quad (5)$$

از داده‌های اندازه‌گیری شده است و مقادیر غیرقطری آن، کوواریانس داده‌ها تعریف می‌شود.

علامت $\langle \rangle$: نشان دهنده میانگین است.

حال برای محاسبه واریانس تخمین پارامترهای مجهول یک عملیات وارون‌سازی، باید ماتریس کوواریانس مدل طبق رابطه ۱۲ محاسبه شود:

$$[cov m] = \langle \Delta m \Delta m^T \rangle \quad (12)$$

در وارون‌سازی ارتباط ماتریس پارامترهای مجهول (m) با ماتریس داده‌های اندازه‌گیری شده (d) به وسیله ماتریس کرنل (G) برقرار می‌شود، بنابراین خواهیم داشت:

$$\Delta m = F_g^{-1} \Delta d \quad (13)$$

که F_g^{-1} ماتریس کرنل کل که برای هر روش خاص وارون‌سازی مقدار آن متفاوت است، بنابراین با جایگذاری رابطه ۱۳ در رابطه ۱۲ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} [cov m] &= \langle \Delta m \Delta m^T \rangle \\ &= \langle F_g^{-1} \Delta d [F_g^{-1} \Delta d]^T \rangle \\ &= \langle F_g^{-1} \Delta d \Delta d^T [F_g^{-1}]^T \rangle \end{aligned} \quad (14)$$

در رابطه ۱۴، مقدار F_g^{-1} در هر بار تکرار داده‌های لرزه‌ای تغییری نمی‌کند، بنابراین از فرآیند میانگین‌گیری می‌تواند خارج شود:

$$[cov m] = F_g^{-1} \langle \Delta d \Delta d^T \rangle [F_g^{-1}]^T = \quad (15)$$

$$F_g^{-1} [cov d] [F_g^{-1}]^T$$

بنابراین می‌توان برای محاسبه ماتریس کوواریانس پارامترهای مجهول، از رابطه ۱۵ استفاده کرد که مقادیر قطری این ماتریس برابر واریانس تخمین پارامترهای مجهول است. در رابطه ۱۵ مقدار ماتریس $[cov d]$ به راحتی قابل محاسبه نیست، بنابراین مقدار آن برابر ماتریس واحد $[I]$ تعریف می‌شود [۱۱]. ماتریس کوواریانس پارامترهای مجهول یا ماتریس کوواریانس مدل در روش‌های وارون‌سازی کمتری مربعات و روش پایدارساز تیخونوف به صورت روابط ۱۶ و ۱۷ به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} [cov m]_{ls} &= F_g^{-1} [F_g^{-1}]^T = \\ [F^T F]^{-1} F^T ([F^T F]^{-1} F^T)^T \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \sin^2 \theta_1 \\ 1 & \sin^2 \theta_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \sin^2 \theta_n \end{bmatrix}_{10 \times 2} \begin{bmatrix} R_p \\ F \end{bmatrix}_{2 \times 1} \rightarrow d = Gm \quad (7 \text{ ادامه})$$

برای حل معادله یاد شده، باید معکوس ماتریس F محاسبه شود که برای این منظور از روش کمترین مربعات و روش پایدارساز تیخونوف استفاده می‌شود. برای محاسبه ماتریس پارامترهای مجهول مدل با روش کمترین مربعات خواهیم داشت:

$$m^{est} = F^{-1}(d) \quad (8)$$

برای حل معادله یاد شده، باید معکوس ماتریس F محاسبه شود که برای این منظور از روش کمترین مربعات و روش پایدارساز تیخونوف استفاده می‌شود. برای محاسبه ماتریس پارامترهای مجهول مدل با روش کمترین مربعات خواهیم داشت:

$$m_{LS} = [F^T F]^{-1} F^T d \quad (9)$$

و محاسبه ماتریس پارامترهای مجهول مدل با استفاده از روش تیخونوف عبارت است از رابطه ۱۰:

$$m_{Tikh} = [F^T F + \varepsilon^2 I]^{-1} F^T d \quad (10)$$

۵- واریانس تخمین وارون‌سازی لرزه‌ای

یکی از عواملی که باعث می‌شود تخمین پارامترهای مجهول با خطا همراه باشد خطای موجود در اندازه‌گیری داده‌های لرزه‌ای است، بنابراین در عملیات وارون‌سازی لرزه‌ای باید از روشی استفاده کرد که خطای موجود در داده‌ها را به پارامترهای مجهول در حال تخمین کمتر انتقال دهد. اگر فرض شود داده‌های لرزه‌ای یک مخزن n بار برداشت شوند، در اینصورت می‌توان با محاسبه ماتریس کوواریانس این داده‌های تکرار شده، واریانس هر داده را محاسبه کرد [۱۱]. ماتریس کوواریانس داده‌های لرزه‌ای برای n بار تکرار می‌تواند به صورت رابطه ۱۱ تعریف شود:

$$[cov d] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta d^i [\Delta d^i]^T = \langle \Delta d \Delta d^2 \rangle \quad (11)$$

که در آن:

Δd^i : اختلاف داده i ام با میانگین کل داده‌های اندازه‌گیری شده است.

مقادیر قطری ماتریس $[cov d]$: برابر واریانس هر یک

مربعات مقادیر R_p و G تخمین زده و در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است.

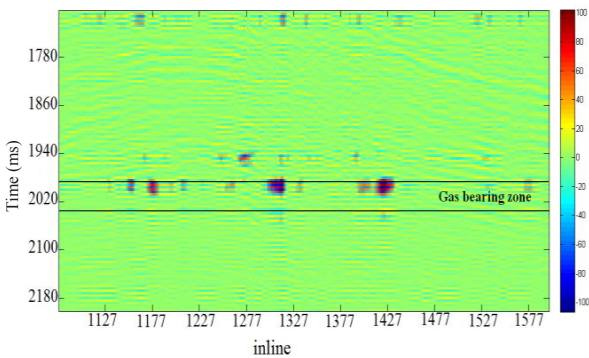
مقادیر R_p و G در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ میلی ثانیه یک آنومالی منفی نشان می‌دهند. تحقیقات نشان می‌دهد در لایه‌های گازدار، مقدار پارامتر R_p و G منفی می‌شود و بر اساس کلاسه‌بندی پاسخ‌های AVO، اگر مقدار عرض از مبدا (R_p) در مقابل گرادیان (G) رسم شود و نقاط به دست آمده در کلاس سوم قرار گیرند محدوده حاوی ماسه سنگ گازدار است و در محدوده کلاس سوم در صورتی که حاوی گاز باشد ضرایب بازتاب در یک نقطه در مقابل زوایای تابش مختلف نزولی و منفی‌اند که دسته‌بندی پاسخ‌های AVO در شکل ۵ نشان داده شده است.

$$[cov m]_{Tikh} = F_g^{-1} [F_g^{-1}]^T = [F^T F + \varepsilon^2 I]^{-1} F^T ([F^T F + \varepsilon^2 I]^{-1} F^T)^T \quad (17)$$

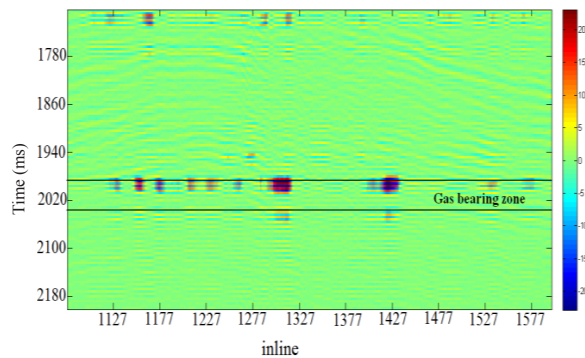
۶- نتایج و بحث

۶-۱- روش کمترین مربعات

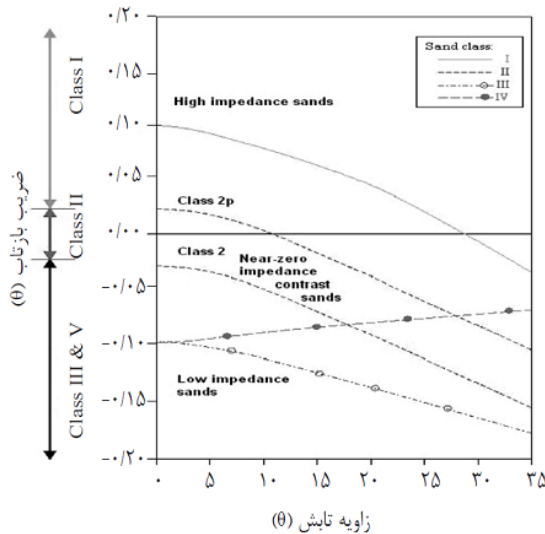
چاه L30 بر روی خط برداشت ۱۱۷۷ و خط برداشت عمودی ۱۱۵۳ قرار دارد که در آن هیدروکربن‌گازی در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۳۶ میلی ثانیه مشاهده شده است. به همین منظور داده‌های پیش از برنبارش این مقطع را از نرم‌افزار OpendTect استخراج کرده و با استفاده از روش کمترین



شکل ۴: مقدار تخمین زده شده G با استفاده از روش کمترین مربعات در خط برداشت عمودی ۱۱۵۳



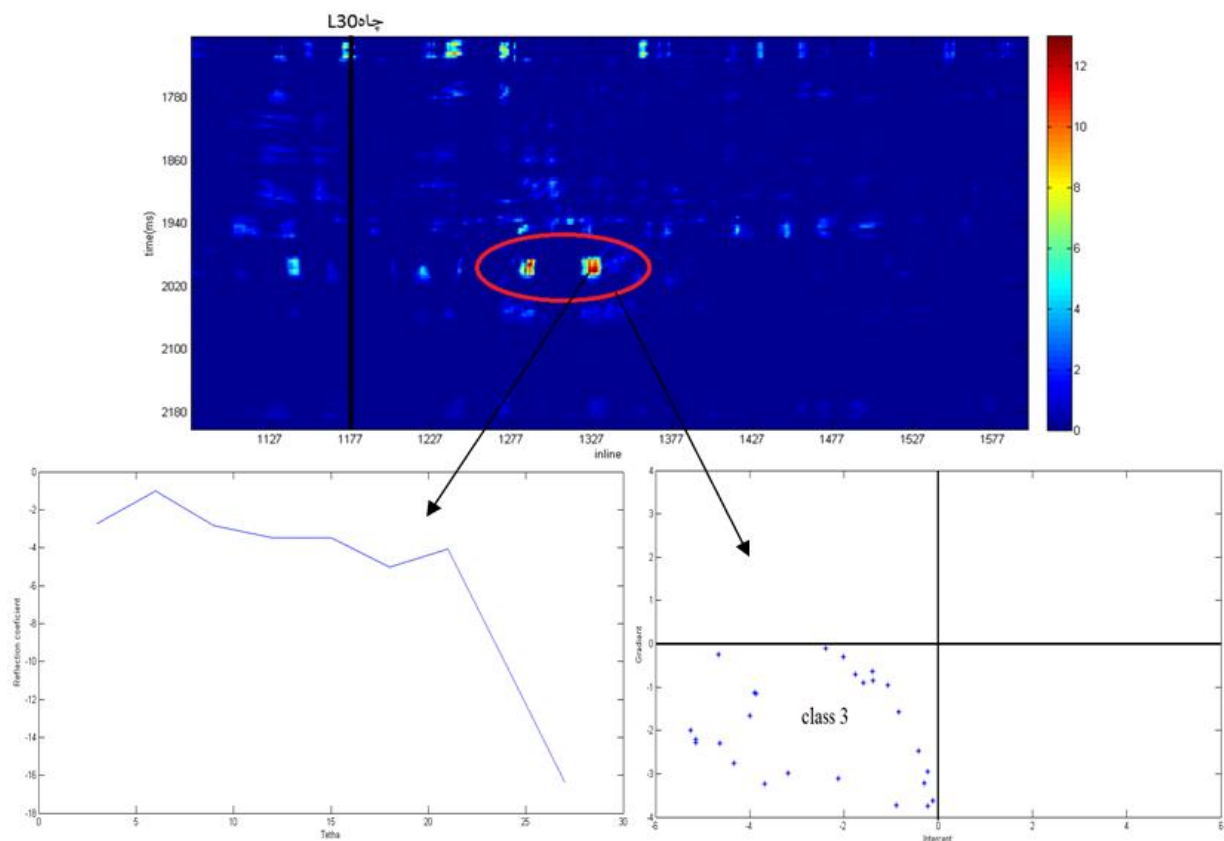
شکل ۳: مقدار تخمین زده شده R_p با استفاده از روش کمترین مربعات در خط برداشت عمودی ۱۱۵۳



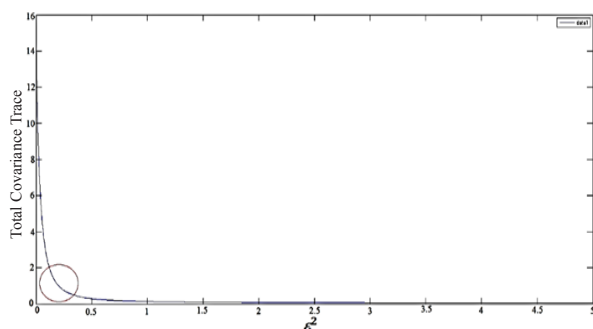
شکل ۵: نمودار سمت راست: کلاسه‌بندی پاسخ‌های AVO، نمودار سمت چپ: رفتار متغیر ضریب بازتاب در مقابل زوایای تابش در کلاس‌های مختلف AVO [۱۲]

شکل ۷ نشانگر R_S را نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد نشانگر ضریب بازتاب نرمال موج برشی (R_S) برای نشان دادن تغییر امپدانس موج S استفاده می‌شود. از آنجا که وجود گاز می‌تواند باعث افزایش کمی در سرعت موج S شود، بنابراین مقاطع تخمین زده شده از ضریب بازتاب نرمال موج S در بالای لایه گازدار مقادیر مثبت می‌شود. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده، در مقطع زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ میلی‌ثانیه مقدار R_S با مقدار مثبت آشکار شده است که می‌دانیم این رفتار در بالای لایه گازدار وجود دارد. پروفیل نشانگر R_p-R_S در شکل ۸ آورده شده است. این نشانگر هنگام ورود به لایه گازدار باید منفی شود. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در مقاطع زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۳۶ میلی‌ثانیه در چاه L30 گاز مشاهده می‌شود.

حاصلضرب R_p در G در محل زون گازدار باید مثبت شود که در شکل ۶ در خط برداشت عمودی ۱۱۵۳ با پلیگون بیضی شکل نشان داده شده است. نمودار متقاطع R_p در مقابل G تعداد ۲۵ نقطه از آنومالی شکل ۶، نشان می‌دهد که نقاط در کلاس سوم قرار دارند و بر اساس آنالیز پاسخ AVO در شکل ۵، این محدوده به ماسه سنگ‌های گازدار اختصاص دارد. همچنین نمودار متقاطع ضریب بازتاب در مقابل زاویه تابش یکی از نقاط آنومالی شکل R_p در G ، در شکل ۶ نشان داده شده است که سیر نزولی آن و وجود داده‌ها در کلاس سوم آنومالی گازدار را به اثبات می‌رساند، بنابراین حاصلضرب R_p در G (شکل ۶) در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ میلی‌ثانیه آنومالی مثبت نشان می‌دهد که بر اساس اطلاعات دریافتی از چاه L30 و تفسیر پاسخ‌های AVO وجود گاز در این محدوده به اثبات می‌رسد.



شکل ۶: مقطع حاصلضرب R_p در G با استفاده از روش کمترین مربعات در خط برداشت عمودی ۱۱۵۳ (پلیگون بیضی شکل محل زون گازدار را نشان می‌دهد. پاسخ‌های AVO در محل آنومالی گازدار وجود گاز را اثبات می‌کند).



شکل ۹: نمودار رد ماتریس کواریانس مدل در مقابل پارامتر پایداری سازی (ϵ^2)

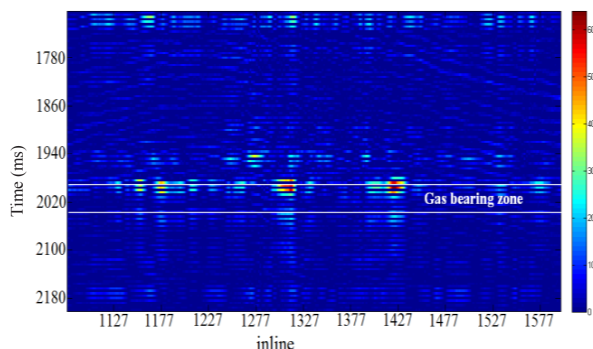
در حالت دیگر ماتریسی به نام ماتریس رزولوشن مدل وجود دارد که میزان دقت تخمین پارامترهای مجهول را ارزیابی می‌کند. این ماتریس از رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود:

$$R = (G^T G + \epsilon^2 I)^{-1} G^T G \quad (18)$$

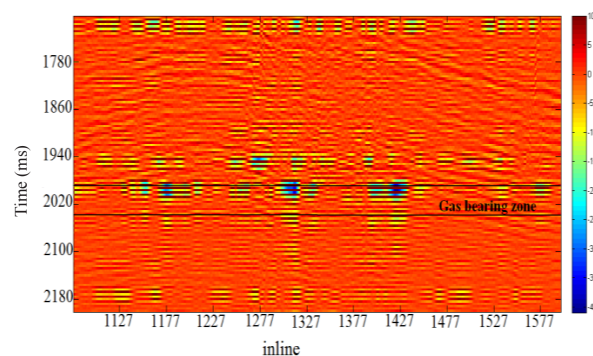
در یک عملیات وارون‌سازی، در بهترین حالت ماتریس R باید برابر ماتریس واحد باشد که از آنجایی که این تحقیق دو پارامتر مجهول را تخمین می‌زند باید رد ماتریس R برابر ۲ باشد، بنابراین مشابه روشی که در ماتریس کواریانس مدل مطرح شد، نمودار ϵ^2 بر حسب رد ماتریس R را رسم کرده که بهترین حالت ϵ^2 مقداری است که رد R برابر سه باشد (شکل ۱۰). اکنون با استفاده از شکل‌های ۹ و ۱۰، می‌توان گفت همیشه بهترین جواب در گوشه نمودارهای یاد شده وجود دارد. زیرا در شکل ۹ مقدار ϵ^2 باید زیاد و در شکل ۱۰ مقدار آن باید کم شود، پس بهترین حالت جواب، در گوشه نمودار است. بدین ترتیب مقدار ϵ^2 در گوشه‌های هر دو نمودار، برابر با ۰٫۶ در نظر گرفته شد.

با جایگزینی ϵ^2 در رابطه ۱۰ مقادیر مجهول R_p و G از روش تیخونوف به دست می‌آید. شکل ۱۱ و ۱۲ مقاطع به دست آمده از R_p و G می‌باشد.

انتظار می‌رود مقادیر به دست آمده از R_p و G در مقاطع زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۳۶ میلی‌ثانیه منفی باشد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود مقاطع به دست آمده مقادیر منفی را نشان می‌دهد (لکه‌های مشکی)، که نتایج درستی است. شکل ۱۳ مقاطع به دست آمده از حاصلضرب R_p در G را نشان می‌دهد.



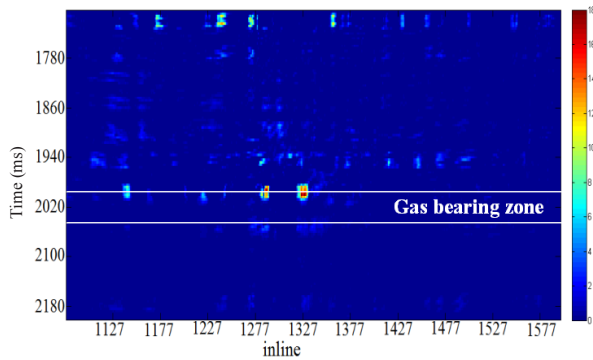
شکل ۷: مقدار نشانگر R_s با استفاده از روش کمترین مربعات در خط برداشت عمودی ۱۱۵۳



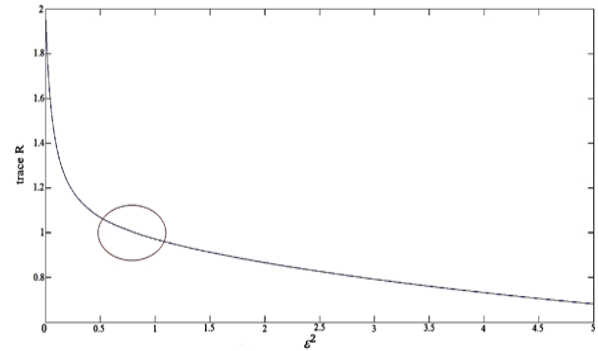
شکل ۸: مقدار نشانگر R_p-R_s با استفاده از روش کمترین مربعات در خط برداشت عمودی ۱۱۵۳

۲-۶- روش تیخونوف

در این قسمت نشانگرهای AVO با استفاده از روش تیخونوف به دست می‌آیند. پاسخ تیخونوف بر اساس رابطه ۱۰ به مقدار پارامتر ϵ^2 وابسته است و مقدار آن از طریق محاسبه ماتریس کواریانس مدل و ماتریس رزولوشن مدل حاصل می‌شود. همان‌طور که توضیح داده شد، ماتریس کواریانس مدل، ماتریسی است که درایه‌های اصلی آن واریانس تک تک پارامترهای تخمینی است. همیشه در بهترین حالت واریانس که همان خطا است، باید برابر صفر باشد، بنابراین رد این ماتریس که جمع قطر اصلی آن است باید برابر صفر باشد سپس باید نموداری رسم شود که در محور افقی ϵ^2 و در محور عمودی آن رد کواریانس مدل رسم شود. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است ϵ^2 در بهترین حالت مقداری است که رد ماتریس کواریانس مدل برابر صفر شود.

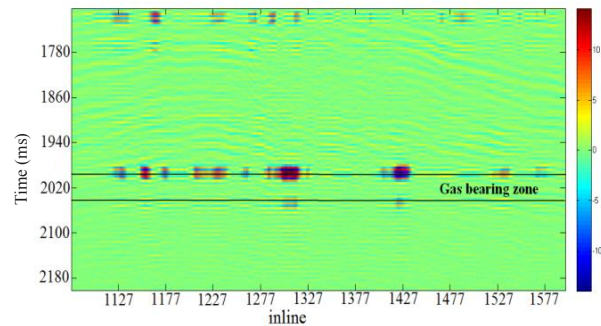


شکل ۱۳: مقادیر نشانگر R_p در G با استفاده از روش تیخونوف در خط برداشت عمودی ۱۱۵۳



شکل ۱۰: نمودار رد ماتریس R در مقابل پارامتر پایداری (ϵ^2)

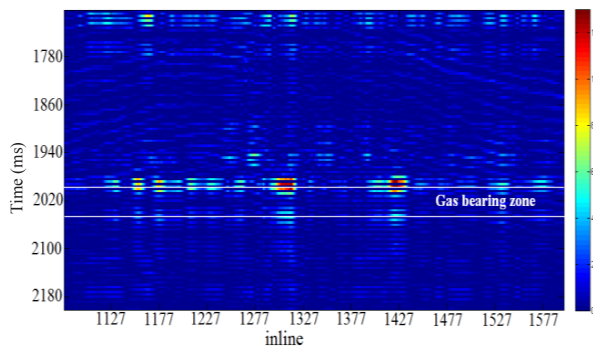
در شکل ۱۳ حاصلضرب R_p در G مقداری مثبت و بزرگ شده که به صورت لکه‌های سفید در مقاطع زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۳۶ میلی‌ثانیه نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً گفته شد این پروفیل آنومالی کلاس نوع سوم را نشان می‌دهد که دلالت بر وجود گاز دارد و نتایج قابل قبولی را نشان می‌دهد. شکل ۱۴ پروفیل نشانگر R_s را نشان می‌دهد. نشانگر R_s در بالای لایه گازدار مقداری مثبت شده است. شکل ۱۵ پروفیل نشانگر $R_p - R_s$ را نشان می‌دهد که این نشانگر در مقطع زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ منفی شده که نشان‌دهنده وجود گاز است.



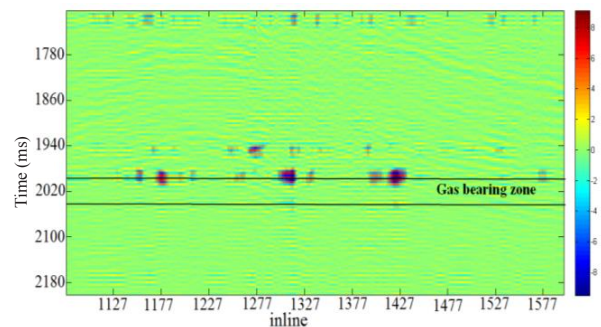
شکل ۱۱: مقدار R_p با استفاده از روش تیخونوف در خط برداشت عمودی ۱۱۵۳

۳-۶- واریانس تخمین نتایج وارون‌سازی کمترین مربعات و تیخونوف

برای ارزیابی دقت تخمین روش‌های کمترین مربعات و تیخونوف از رابطه‌های ۱۶ و ۱۷ استفاده می‌شود. بعد ماتریس



شکل ۱۴: مقدار نشانگر R_s با استفاده از روش تیخونوف در خط برداشت عمودی ۱۱۵۳

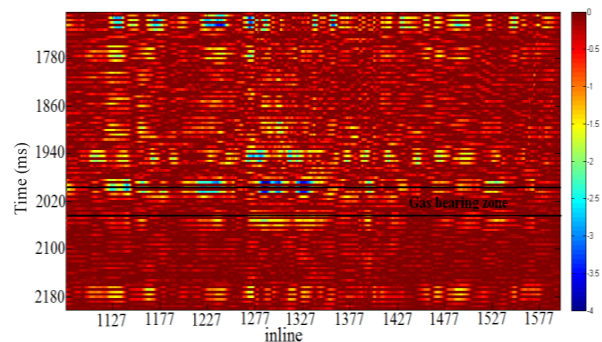


شکل ۱۲: مقدار G با استفاده از روش تیخونوف در خط برداشت عمودی ۱۱۵۳

را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده لایه گازدار است. پروفیل نشانگر R_p-R_s در هنگام ورود به لایه گازدار باید منفی شود که این نتیجه در مقاطع زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۳۶ میلی‌ثانیه در هر دو روش حل وارون‌سازی مشاهده می‌شود. نمودارهای متقاطع آنومالی‌های AVO نشان می‌دهد که داده‌های زون آنومالی در کلاس سوم پاسخ‌های AVO قرار دارند و کلاس سوم مربوط به داده‌های زون ماسه سنگ گازدار است، بنابراین ماهیت آنومالی آشکارسازی شده با تفسیر پاسخ‌های AVO تایید می‌شوند. همچنین نتایج واریانس تخمین در این تحقیق نشان می‌دهد، نشانگرهای R_p و G به دست آمده از روش تیخونوف با واریانس ۰/۱۴ و ۰/۰۸ نسبت به روش کمترین مربعات قابل اعتمادتراند.

۸- مراجع

- [1] Johnston, D. H. (2013). "Practical applications of time-lapse seismic data". Society of Exploration Geophysicists, pp. 289.
- [2] Coulombe, C. A. (1993). "Amplitude- Versus- Offset Analysis Using Vertical Seismic Profiling and Well Log Data". University of Calgary, Department of Geology and Geophysics, M.Sc. Thesis.
- [3] Veeken, P. C. H., and Rauch-Davies, M. (2006). "AVO attribute analysis and seismic reservoir characterization". First Break, 24(2): 41-52.
- [4] Parvizi, R., Norouzi, G. H., and Sahabi, F. (2011). "Amplitude versus Offset (AVO) Technique for Light Hydrocarbon Exploration: A Case Study". International Journal of Mining and Geo-Engineering, University of Tehran, 45(1): 81-86.
- [5] Jalali, V. (2014). "Seismic AVO Attributes and Rock Physics in Hydrocarbon Exploration". M.S.c Thesis, Eastern Mediterranean University, North Cyprus, 25-65.
- [6] Bakhtiari, S. B., Farahbakhsh, E., and Hamidzadeh Moghadam, R. (2014). "Application of AVO Attributes and Fluid Replacement in Determining AVO Anomaly; Case Study of Aboozar Oil Field". Iran Journal of Tethys, 2(3): 242-253.
- [7] Di Luca, M., Salinas, T., Arminio, J. F., Alvarez, G., Alvarez, P., Bolivar, F., and Marín, W. (2014). "Seismic inversion and AVO analysis applied to predictive modeling gas-condensate sands for exploration and early production in the Lower Magdalena Basin, Colombia". The Leading Edge, 746-756.
- [8] Rutherford, S. R., and Williams, R. H. (1989). "Amplitude Versus Offset Variation in Gas Sands".



شکل ۱۵: مقدار نشانگر R_p-R_s با استفاده از روش تیخونوف در خط برداشت عمودی ۱۱۵۳

مربعی کوواریانس مدل در این تحقیق برابر تعداد مجهولات است که مقادیر قطری این ماتریس، واریانس تخمین هر یک از مجهولات (R_p و G) است. ماتریس کوواریانس روش کمترین مربعات و تیخونوف بر اساس رابطه‌های ۱۶ و ۱۷ برابر است با:

$$COV_{LS} = \begin{bmatrix} 0.2490 & -1.4995 \\ -1.4995 & 15.0883 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$COV_{Tikh} = \begin{bmatrix} 0.0888 & -0.0059 \\ -0.0059 & 0.1475 \end{bmatrix} \quad (20)$$

بر اساس رابطه ۱۹ واریانس تخمین نشانگرهای R_p و G با استفاده از روش کمترین مربعات برابر ۰/۲۴ و ۱۵/۰۸ است در حالی که بر اساس رابطه ۲۰ برابر ۰/۰۸ و ۰/۱۴ است، بنابراین نتایج روش تیخونوف نسبت به کمترین مربعات با اطمینان بیشتری قابل استناد است.

۷- نتیجه‌گیری

تفسیر نشانگرهای لرزه‌ای AVO بر اساس معادله شوی نشان می‌دهد که در محیط ماسه سنگی مخزن پنوسکات در فاصله زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۳۶ میلی‌ثانیه گاز وجود دارد. برای تخمین نشانگرهای معادله شوی از دو راه حل کمترین مربعات و تیخونوف استفاده شد. در هر دو روش، نشانگرهای R_p و G باید مقدار منفی را نشان دهند و حاصلضرب آن‌ها نیز مثبت باشد که این نتایج به دست آمده است. نشانگر R_s برای نشان دادن تغییر امپدانس موج S استفاده می‌شود که وجود گاز می‌تواند باعث افزایش کمی در سرعت موج S شود، بنابراین ضریب بازتاب نرمال موج S در بالای لایه گازدار مقادیر مثبت

Geophysics, 54: 686-688.

¹ Amplitude versus offset (AVO)

² Ostrander

³ C.G.Knott

⁴ Zoeppritz

⁵ Harmonic

⁶ Pre-stack

⁷ Penobscot

⁸ Shuey

⁹ Nova scotia

¹⁰ Inline

¹¹ Crossline

- [9] Wang, X., and Pan, D. (2016). "Application of AVO attribute inversion technology to gas hydrate identification in the Shenhu Area, South China Sea". Marine and Petroleum Geology, 80: 23-31.
- [10] Mandal, A., and Srivastava, E. (2017). "Enhanced structural interpretation from 3D seismic data using hybrid attributes: New insights into fault visualization and displacement in Cretaceous formations of the Scotian Basin, offshore Nova Scotia". Marine and Petroleum Geology.
- [11] Menke, W. (1989). "Geophysical data analysis: discrete inverse theory (Revised Edition)". Waltham: Academic Press, pp. 330.
- [12] Castagna, J. P., and Backus, M. M. (1993). "Offset-dependent reflectivity—Theory and practice of AVO analysis". Society of Exploration Geophysicists, pp. 357.

Determining Seismic Attributes of Amplitude Versus Offset Analysis in Order to Identify Gas-Bearing Layers Using Inversion of Shuey Approximation

Ghadimi F.¹, Mojeddifar S.^{2*}, Hemmati Chegeni M.³

1- M.Sc, Dept. of Mining Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran
ghadimi.fatemeh@yahoo.com

2- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran
Mojeddifar@arakut.ac.it

3- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran
m.hemmatichegeni@arakut.ac.ir

(Received: 14 Nov. 2019, Accepted: 20 Jun. 2020)

Abstract: This research used prestack seismic data in Penobscot to detect gas-bearing layers using AVO analysis. AVO technique is not easy based on Zoeppritz equations then this work applied Shuey approximation to calculate gradient (G) and intercept (Rp) parameters using least square and Tikhonov solutions. Model covariance matrix was calculated for least square and Tikhonov technique to obtain the variance of estimation of Rp and G. The variance of estimation of least square method is 0.24 and 15.08 for Rp and G, respectively. Also, it is equal to 0.08 and 0.14 for Rp and G in Tikhonov solution. Therefore, the results of Tikhonov are more reliable than least square solution. Multiplication of intercept and gradient showed the strong and positive values in gas layers. The reflection coefficient of shear wave identified gas-bearing layers by a positive value. The difference of P-wave and S-wave profile appeared relatively high negative values in time range of 2000 to 2020 ms. L30 well which was drilled in cross line 1153 showed that there is gas accumulation in time range of 2000 to 2036 ms. Therefore, AVO attributes could identify gas-bearing layers.

Keywords: AVO analysis, Shuey approximation, Variance estimation, Least square, Tikhonov.

INTRODUCTION

The Zoeppritz equations describe the amplitudes of the reflected and transmitted P_{wave} and S_{wave} when a P_{wave} is incident at a boundary between two elastic media. In general, this process will produce two reflected waves and two transmitted waves [1]. The non-linearized form of the Zoeppritz equations are so complicated. Over the years, a number of linearized approximations to the Zoeppritz equations have been made[2]. Shuey's equation relates the amplitude variation to changes in Poisson's ratio, P_{wave} velocity and density[3]. The present work attempts to estimate the seismic attributes of Shuey's equation and explore the gas-bearing layers. Seismic attributes of Shuey's equation are intercept and gradient. This research combines the intercept and gradient to simulate reflection coefficient of P and S waves. Least

square and Tokhonov solutions are applied to estimate intercept and gradient attributes. Also, stability of obtained attributes is evaluated to validate the outputs.

METHODS

A simple form of Shuey’s equation is given by:

$$R(\theta) = R_p + G \sin^2 \theta \tag{1}$$

Where R_p is the intercept and G is the gradient. Product of R_p and G can identify gas-bearing layers. When $R_p * G$ is positive, the considered layer is observed in the third class and it is expected to face with the gas-bearing layers[3]. Another seismic attribute of Shuey’s approximation is the reflection coefficient of shear wave that is given by:

$$R_S = \frac{1}{2} \times (R_p - G) \tag{2}$$

Also, Poisson’s ratio can be estimated by:

$$R_p - R_S = \frac{1}{2} \times (R_p + G) \tag{3}$$

FINDINGS AND ARGUMENT

This research applied the pre-stack seismic data of Penobscot reservoir to estimate seismic attributes of Shuey’s approximation. Based on least square solution, R_p and G attributes were estimated (Figure 1). Gas bearing layer was observed in the time interval of 2000 to 2020 ms.

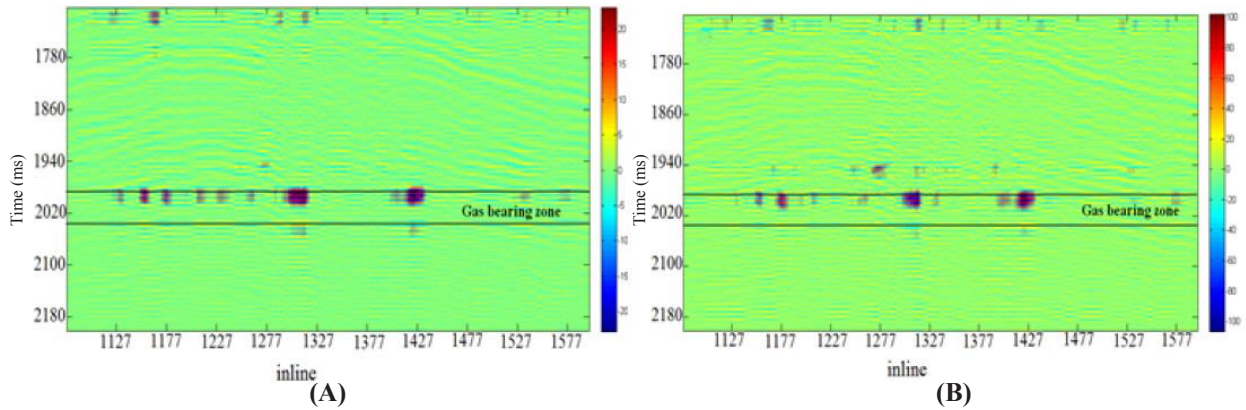


Figure 1. A: R_p and **B:** G attributes based on least square solution

Also, Tikhonov regularization solution was applied and the seismic attributes of R_p and G were estimated. Tikhonov answer is depend on ϵ^2 parameter [4] and it was obtained based on model covariance and model resolution matrices (Figure 2).

Figure 3 shows the outputs of Tikhonov regularization. Gas-bearing layer was illustrated with two parallel lines. To compare the Tikhonov regularization results with the least square ones, the covariance matrix was calculated for each solution (Equations 4 and 5):

$$COV_{LS} = \begin{bmatrix} 0.2490 & -1.4995 \\ -1.4995 & 15.0883 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$COV_{Tikh} = \begin{bmatrix} 0.0888 & -0.0059 \\ -0.0059 & 0.1475 \end{bmatrix} \tag{5}$$

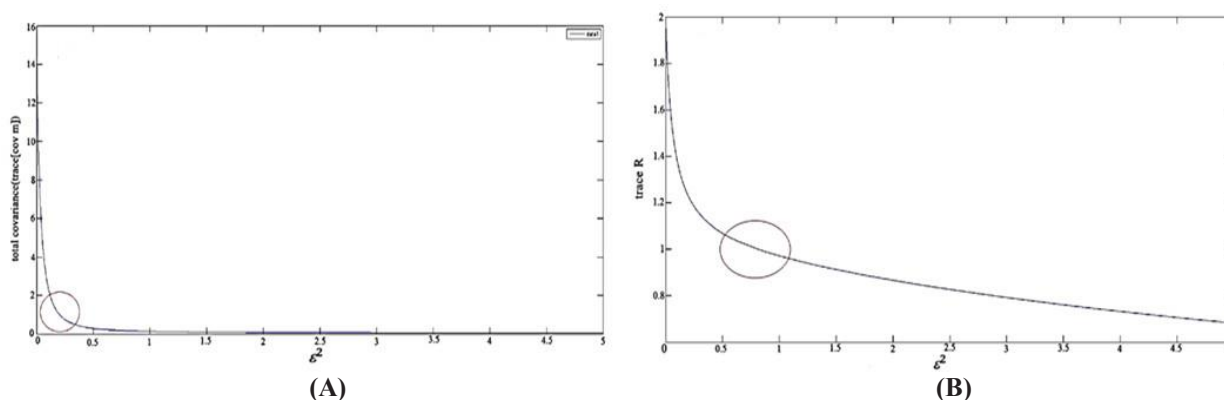


Figure 2. A: Trace of model covariance versus ϵ^2 , B: Trace of model resolution versus ϵ^2

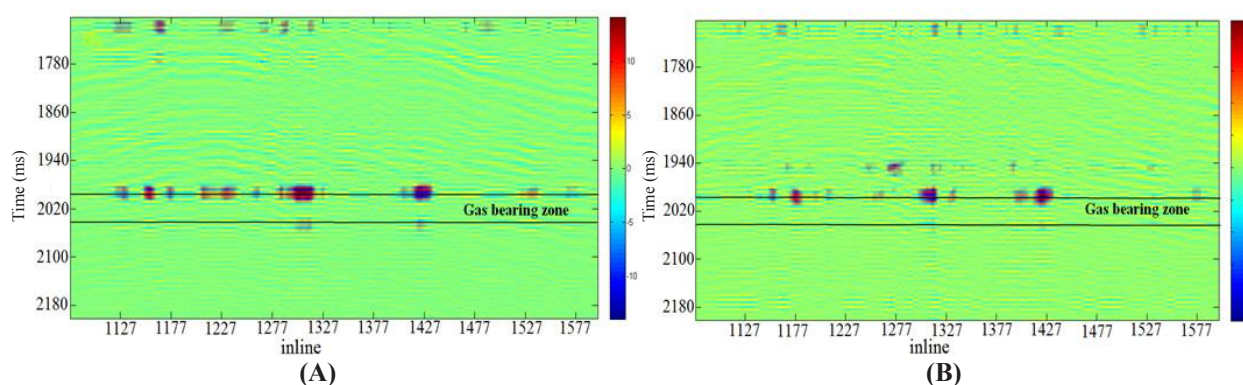


Figure 3. A: R_p and B: G attributes based on Tikhonov regularization solution

Based on Equation 5, the variances of estimating R_p and G are 0.08 and 0.14 for Tikhonov solution, respectively, while they are 0.24 and 15.08 for least square solution. Therefore the Tikhonov outputs have more stability than least square solution.

CONCLUSIONS

The results of seismic attributes of Shuey's approximation showed that there is a gas-bearing layer in time interval of 2000-2036 ms at Penobscot reservoir. L30 well was drilled in Penobscot reservoir and hydrocarbon was observed in 2000-2036 ms. Tikhonov regularization solution was identified as the result with higher accuracy than least square solution. The covariance matrix of Tikhonov solution showed the lower variance for intercept and gradient estimation versus the least square solution.

REFERENCES

- [1] Veeken, P. C. H., and Rauch-Davies, M. (2006). "AVO attribute analysis and seismic reservoir characterization". First Break, 24(2): 41-52.
- [2] Rutherford, S. R., and Williams, R. H. (1989). "Amplitude Versus Offset Variation in Gas Sands". Geophysics, 54: 686-688.
- [3] Castagna, J. P., and Backus, M. M. (1993). "Offset-dependent reflectivity—Theory and practice of AVO analysis". Society of Exploration Geophysicists, pp. 357.
- [4] Menke, W. (1989). "Geophysical data analysis: discrete inverse theory (Revised Edition)". Waltham: Academic Press, pp. 330.