



وارون سازی خطی AVO به روش بیزی برای تخمین پارامترهای سنگ

مصطفی عباسی^{۱*} و علی غلامی^۲

۱- دانشجوی دکتری، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

۲- دانشیار، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۰۲؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۸

* نویسنده مسئول مکاتبات: abbasi.mostafa@ut.ac.ir

چکیده

در این مطالعه راهکاری برای وارون سازی خطی AVO در یک قالب بیزی ارائه گردیده است. هدف، به دست آوردن توزیع پسین سه پارامتر سرعت موج P، سرعت موج S و چگالی سنگ است. وارون سازی بکار رفته در این مطالعه بر مبنای مدل هممیشی و یک تقریب خطی از معادله زوپریتس به نام مدل تباین ضعیف است. در این مسئله با ارائه یک رابطه تحلیلی برای توزیع پسین پارامترهای هدف، یک روش کارآمد با تفکیک پذیری قابل قبول در وارون سازی تصادفی داده های لرزه ای فراهم شده است. به منظور بررسی هرچه بهتر عملکرد این روش، خروجی های آن با نتایج حاصل از وارون سازی همزمان پیش از برانبارش که یک روش رایج در وارون سازی داده های لرزه ای است؛ مقایسه شده است. آزمایش های انجام شده روی داده های مصنوعی نشان می دهد که این روش پارامترهای هدف را تقریباً به طور کامل بازیابی می کند. این روش همچنین روی داده های واقعی مربوط به یک میدان نفتی در خلیج مکزیک نیز پیاده سازی شده است؛ که نتایج حاصل از آن انطباق قابل قبولی با داده های چاه نشان می دهد. به علاوه این که در مقایسه با روش وارون سازی همزمان پیش از برانبارش، نتایج بسیار بهتری مخصوصاً در مورد دو پارامتر سرعت موج S و چگالی ارائه می دهد.

واژگان کلیدی

وارون سازی پیش از برانبارش
وارون سازی بیزی
AVO خطی
وارون سازی همزمان پیش از برانبارش
تباین ضعیف
عدم قطعیت

۱- مقدمه

هدف از وارون سازی لرزه ای تخمین پارامترهای مدل بر اساس اندازه گیری های صورت گرفته است. هرچند علاوه بر تخمین پارامترها، ارزیابی عدم قطعیت در تخمین این پارامترها نیز از اهداف وارون سازی است. چارچوب بیزی (Bayesian Framework) یک ساختار پذیرفته شده در بسیاری از مسائل ژئوفیزیکی است؛ که قادر است اطلاعات اولیه را با مقادیر اندازه گیری شده تلفیق نماید. جواب حاصل از یک مسئله وارون بیزی در قالب یک توزیع پسین (Posterior) بیان می شود. مسائل ژئوفیزیکی اغلب دارای یک رابطه غیرخطی بوده و لذا ساخت توزیع پسین تنها از طریق روش های نمونه گیری مانند مونت-کارلو امکان پذیر است (موزگارد و تارانتولا، ۱۹۹۵). البته استفاده از این روش اغلب به دلیل حجم بالای محاسبات، غیر عملی بوده و خطی سازی این مسائل، یک راه حل رایج محسوب می شود؛ به طوری که جواب نهایی به صورت تحلیلی و بدون نیاز به نمونه گیری قابل محاسبه خواهد بود.

وارون سازی دامنه برحسب دورافت (AVO) یک روش برای تخمین پارامترهای الاستیک مخزن برحسب داده های لرزه ای پیش از برانبارش است. این روش معمولاً به دو صورت غیرخطی (دال و اورسین، ۱۹۹۱) و خطی (اسمیت و گیلدو، ۱۹۸۷) قابل حل است

در مدل خطی شده این روش، معادله زوپریتس با فرض تباین ضعیف (Weak contrast) خطی می شود. گوویا و اسکیلز (۱۹۹۸) با تعریف یک مدل غیرخطی بیزی اقدام به تخمین توزیع پسین پارامترهای وارون سازی نمودند. روش آن ها اگرچه از روش مونت-کارلو سریع تر بود؛ اما همچنان به دلیل غیرخطی و پیچیده بودن مسئله، در قیاس با روش های خطی بسیار زمان بر بود.

در این مطالعه، با استفاده از وارون سازی خطی AVO در یک قالب بیزی، توزیع پسین سه پارامتر سرعت موج P، سرعت موج S و چگالی مورد محاسبه قرار گرفته است. پیش از این لورترز و برکاوت (۱۹۹۳) نیز از روش مشابهی استفاده نمودند؛ با این تفاوت که آن ها تباین نسبی پارامترهای الاستیک را مورد محاسبه قرار دادند و نه خود این پارامترها را. به علاوه، روش آن ها مبتنی بر فرض سطح جدایش تکی بوده به صورت نمونه به نمونه محاسبه می شد. بولاند و اومره (۲۰۰۳) برای رفع این مشکلات، با به کارگیری رابطه مربوط به تباین ضعیف، مسئله وارون سازی را برای کل پنجره موردنظر به صورت همزمان حل نمودند. بدین ترتیب آن ها قادر بودند هم موجک و هم همبستگی نمونه های نزدیک به هم را در فرآیند وارون سازی وارد کنند.

در این مطالعه به منظور بررسی قابلیت های این روش، اقدام به پیاده سازی آن روی داده های مصنوعی و واقعی نموده و نتایج آن با یکی از روش های رایج در وارون سازی که با عنوان روش وارون سازی همزمان پیش از برانبارش (Simultaneous Prestack inversion) شناخته می شود (همسون و همکاران، ۲۰۰۵)، مقایسه شد.

۲- وارون سازی خطی AVO

یک محیط کشسان همسانگرد را می توان با سه پارامتر مستقل به صورت کامل تعریف نمود. در ژئوفیزیک مخزن، این سه پارامتر مطلوب معمولاً عبارتند از: سرعت موج P، سرعت موج S و چگالی، $\{\alpha(t), \beta(t), \rho(t)\}$. مسئله وارون سازی بر مبنای فرض تباین ضعیف برای ضرایب بازتاب PP (c_{pp}) استوار است (آکی و ریچاردز، ۱۹۸۰):

$$c_{pp}(t, \theta) = a_{\alpha}(\theta) \frac{\partial}{\partial t} \ln \alpha(t) + a_{\beta}(t, \theta) \frac{\partial}{\partial t} \ln \beta(t) + a_{\rho}(t, \theta) \frac{\partial}{\partial t} \ln \rho(t) \quad (1)$$

به طوری که

$$a_{\alpha}(\theta) = \frac{1}{2} (1 + \tan^2 \theta),$$

$$a_{\beta}(t, \theta) = -4 \left(\frac{\bar{\beta}^2}{\alpha^2} \sin^2 \theta \right), \quad (2)$$

$$a_{\rho}(t, \theta) = \frac{1}{2} (1 - 4 \frac{\bar{\beta}^2}{\alpha^2} \sin^2 \theta).$$

در این روابط، $\bar{\alpha}$ میانگین سرعت موج P، $\bar{\beta}$ میانگین سرعت موج S و متغیر θ نیز بیانگر زاویه برخورد موج تابشی است. a_{α} ، a_{β} و a_{ρ} نیز ضرایب معادله آکی و ریچاردز هستند.

وارون سازی بیزی طبق رابطه، $p(\mathbf{m} | \mathbf{d}_{obs}) = \frac{p(\mathbf{d}_{obs} | \mathbf{m}) p(\mathbf{m})}{p(\mathbf{d}_{obs})}$

تعریف می شود. در این فرمولاسیون هدف، به دست آوردن تابع توزیع پسین، $p(\mathbf{m} | \mathbf{d}_{obs})$ ، با استفاده از سه مؤلفه توزیع اولیه، $p(\mathbf{m})$ ، تابع درست نمایی (Likelihood)، $p(\mathbf{d}_{obs} | \mathbf{m})$ و توزیع داده های لرزه ای، $p(\mathbf{d}_{obs})$ است.

۲-۱- مدل اولیه $p(\mathbf{m})$

از خصوصیات ویژه این روش این است که قادر است با مدل های اولیه بسیار ساده (مانند یک مقدار ثابت و یا یک روند خطی) نیز جواب های قابل قبولی ارائه کند. اگر فرض کنیم پارامترهای مسئله دارای توزیع لاگ-نرمال باشد، فضای پارامترهای مسئله به صورت $\mathbf{m}(t) = [\ln \alpha(t), \ln \beta(t), \ln \rho(t)]^T$. میانگین ریاضی این بردار در مدل اولیه به صورت $E\{\mathbf{m}(t)\} = \boldsymbol{\mu}(t) = [\mu_{\alpha}(t), \mu_{\beta}(t), \mu_{\rho}(t)]^T$ خواهد بود. تابع کوواریانس این بردار نیز متشکل از دو بخش است: یک کوواریانس پایا و یک تابع همبستگی زمانی که وابستگی مؤلفه های نزدیک به هم را کنترل می کند:

$$\Sigma(t, s) = \Sigma_0 v_t(\tau) = \begin{bmatrix} \sigma_{\alpha}^2 & \sigma_{\alpha} \sigma_{\beta} v_{\alpha\beta} & \sigma_{\alpha} \sigma_{\rho} v_{\alpha\rho} \\ \sigma_{\alpha} \sigma_{\beta} v_{\alpha\beta} & \sigma_{\beta}^2 & \sigma_{\beta} \sigma_{\rho} v_{\beta\rho} \\ \sigma_{\alpha} \sigma_{\rho} v_{\alpha\rho} & \sigma_{\beta} \sigma_{\rho} v_{\beta\rho} & \sigma_{\rho}^2 \end{bmatrix} \times \exp\left(-\frac{\tau^2}{d^2}\right) \quad (3)$$

۳- وارون سازی همزمان

وارون سازی همزمان پیش از برانبارش (همسون و همکاران، ۲۰۰۵)، به عنوان یکی از رایج‌ترین روش‌های وارون سازی پیش از برانبارش، بر سه فرض اولیه استوار است، (الف) تقریب خطی سری بازتاب برقرار است، (ب) رابطه بین سری‌های بازتاب PP و PS و زاویه برخورد از رابطه اکی و ریچارد (۲۰۰۲) پیروی می‌کنند. (پ) بین لگاریتم امپدانس موج P و لگاریتم امپدانس موج S (کاستاگنا و همکاران، ۱۹۸۵) و لگاریتم چگالی (گاردنر و همکاران، ۱۹۷۴) ارتباط خطی برقرار است. بر همین اساس دو رابطه زیر مفروض خواهد بود:

$$\ln(Z_\beta) = k \ln(Z_\alpha) + k_c + \Delta L_\beta \quad (9)$$

$$\ln(\rho) = m \ln(Z_\alpha) + m_c + \Delta L_\rho \quad (10)$$

در این دو رابطه، Z_β و Z_α به ترتیب امپدانس موج P و امپدانس موج S می‌باشند. پارامترهای k ، k_c ، m و m_c نیز از رسم نمودارهای متقابل $L_\beta = \ln(Z_\beta)$ و $L_\rho = \ln(\rho)$ بر حسب $L_\alpha = \ln(Z_\alpha)$ قابل محاسبه هستند. دو پارامتر ΔL_β و ΔL_ρ بیانگر انحراف داده‌های مربوط به موج S و چگالی از خط برازش یافته بر نمودارهای متقابل یاد شده است؛ که به دلیل حضور سیالی غیر از آب در سنگ به وجود می‌آیند.

بنابراین رابطه اکی-ریچاردز را بر حسب سه پارامتر L_α ، ΔL_β و ΔL_ρ می‌توان به صورت زیر نوشت

$$c_{pp} = c_1 \frac{\partial}{\partial t} L_\alpha + c_2 \frac{\partial}{\partial t} \Delta L_\beta + c_3 \frac{\partial}{\partial t} \Delta L_\rho \quad (11)$$

که در آن $c_1 = a_\alpha(\theta)$ ، $c_2 = a_\beta(\theta) + ka_\beta(\theta) + ma_\rho(\theta)$ و $c_3 = a_\rho(\theta)$ بر این اساس، رابطه مستقیم برای ساخت لرزه‌نگاشت‌ها با استفاده از این سه پارامتر به صورت زیر خواهد بود:

$$d_{obs} = SCD \begin{bmatrix} L_\alpha \\ \Delta L_\beta \\ \Delta L_\rho \end{bmatrix} \quad (12)$$

در این رابطه C ماتریس ضرایب در رابطه ۱۱ بوده و مانند ماتریس A در رابطه ۴ ساخته می‌شود، S ماتریس موجک و D ماتریس مشتق است. اگر ماتریس F به صورت $F = SCD$ تعریف شود، با داشتن d_{obs} در هر CDP و وارون‌سازی رابطه ۱۲ به روش کمترین مربعات می‌توان مقادیر L_α ، ΔL_β و ΔL_ρ را تخمین زد و با جایگذاری آن‌ها در رابطه‌های ۹ و ۱۰ به سه پارامتر L_α ، L_β و L_ρ رسید.

این روش در مقایسه با روش وارون سازی خطی AVO یک ضعف عمده دارد و آن عدم تخمین عدم قطعیت در نتایج وارون‌سازی است.

۴- پیاده‌سازی روی داده‌های مصنوعی

برای اجرای روش وارون‌سازی خطی AVO در این مقاله از محیط

در این رابطه، d پارامتر مربوط به شعاع همبستگی نمونه‌ها و $\tau = |t - s|$ است (t و s دو نمونه زمانی مختلف هستند). با توجه به این اطلاعات می‌توان گفت که بردار پارامترها، m دارای توزیع اولیه $m \sim N_{n_m}(\mu_m, \Sigma_m)$ و یا $p(m) = N_{n_m}(\mu_m, \Sigma_m)$ خواهد بود.

۲-۲- مدل سازی مستقیم داده‌های لرزه‌ای

در وارون‌سازی بیزی، تابع درست‌نمایی (Likelihood) را می‌توان بر حسب توزیع اختلاف بین داده‌های لرزه‌ای واقعی و مصنوعی تعریف نمود. احتمال (توزیع) مشاهده داده‌های لرزه‌ای واقعی، d_{obs} ، برای یک بردار از پارامترهای وارون سازی، m، به صورت $p(d_{obs} | m)$ نمایش داده می‌شود. این کمیت، بیانگر تابع توزیع درست‌نمایی بوده و بیانگر احتمال مشاهده داده‌های لرزه‌ای به ازای پارامتر m است. فرم گسسته تابع ضرایب بازتاب، (رابطه ۱) را می‌توان به صورت ماتریسی $c = Am'$ نشان داد. در این رابطه، A ماتریس حامل ضرایب و $m'(t) = [\frac{\partial}{\partial t} \ln \alpha(t), \frac{\partial}{\partial t} \ln \beta(t), \frac{\partial}{\partial t} \ln \rho(t)]^T$ و بنابراین طبق مدل هم آمیختی می‌توان داده‌های لرزه‌ای (که در قالب Angle Gather می‌باشند) را به صورت زیر مدل سازی نمود:

$$d_{obs} = Sc + e = SAm' + e \quad (4)$$

ماتریس S، یک ماتریس هم‌میشخت است؛ که دربردارنده موجک‌های زوایای مختلف است. ماتریس e نیز بیانگر جمله مربوط به خطا بوده و دارای توزیع $e \sim N_{n_d}(0, \Sigma_e)$ است. با فرض گاوسی بودن توزیع پارامترهای مدل، m و خطای موجود در داده‌های لرزه‌ای e، داده‌های لرزه‌ای، d_{obs} ، نیز دارای یک توزیع گاوسی به شکل $d_{obs} \sim N_{n_d}(\mu_{d_{obs}}, \Sigma_{d_{obs}})$ خواهد بود، به طوری که:

$$\mu_{d_{obs}} = SAm' \quad (5)$$

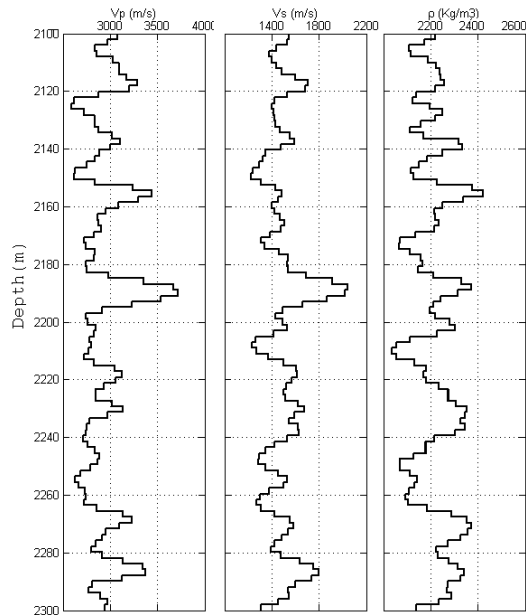
$$\Sigma_{d_{obs}} = SAS^T + \Sigma_e \quad (6)$$

توزیع احتمال پسین، $m | d_{obs} \sim N_{n_m}(\mu_{m|d_{obs}}, \Sigma_{m|d_{obs}})$ را می‌توان با ترکیب روابط یاد شده در رابطه بیز تعیین نمود. این توزیع، یک توزیع گاوسی با میانگین و کوواریانس زیر خواهد بود:

$$\mu_{m|d_{obs}} = \mu_m + (SAS_m')^T \Sigma_{d_{obs}}^{-1} (d_{obs} - \mu_{d_{obs}}) \quad (7)$$

$$\Sigma_{m|d_{obs}} = \Sigma_m - (SAS_m')^T \Sigma_{d_{obs}}^{-1} SAS_m' \quad (8)$$

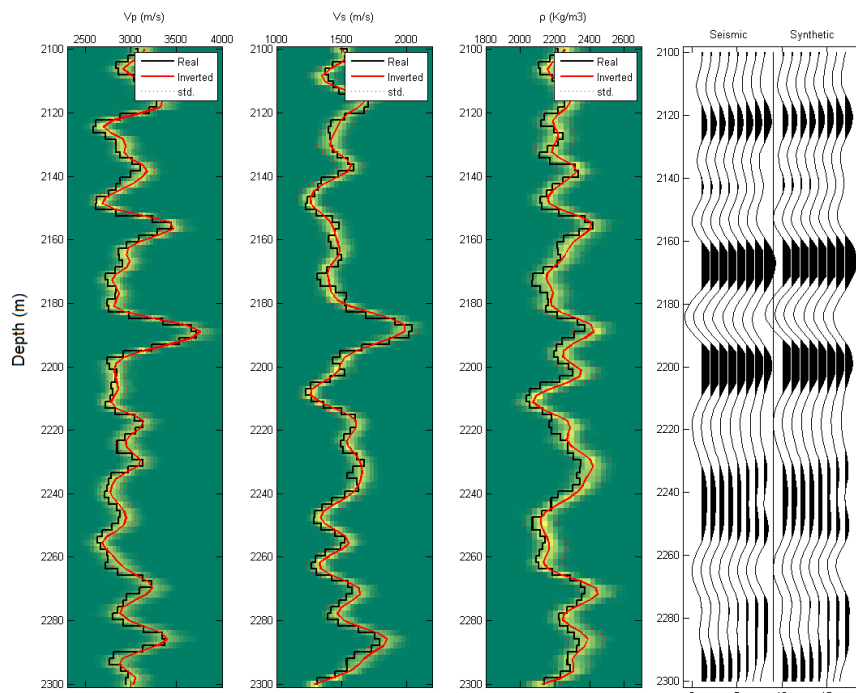
مقدار میانگین در روابط بالا بیانگر جواب وارون سازی خطی AVO در قالب بیزی است. کوواریانس این توزیع نیز دربردارنده عدم قطعیت موجود در جواب نهایی و همبستگی بین مؤلفه‌های جواب است. نمونه برداری از توزیع گاوسی $N_{n_m}(\mu_{m|d_{obs}}, \Sigma_{m|d_{obs}})$ منجر به تولید رخداد (Realization) های تصادفی برای مسئله وارون یا به اصطلاح Pre-Stack Stochastic Inversion خواهد شد. این وارون سازی به دلیل خطی سازی و نوع فرمولاسیون ماتریسی ارائه شده پر سرعت بوده و برخلاف روش‌های کم سرعت فعلی، می‌تواند به یک روش وارون سازی تصادفی پیش از برانبارش کاربردی تبدیل شود.



شکل ۱: سه نمودار V_p ، V_s و ρ مصنوعی بکار رفته برای وارون سازی.

جدول ۱: ضرایب همبستگی داده‌های چاه و AVO خطی به ازای مقادیر مختلف نسبت سیگنال به نوفه.

ρ	β	α	
۰٫۷۰	۰٫۷۸	۰٫۷۲	SNR = 1
۰٫۷۱	۰٫۷۸	۰٫۷۴	SNR = 4
۰٫۷۱	۰٫۷۸	۰٫۷۴	SNR = 9

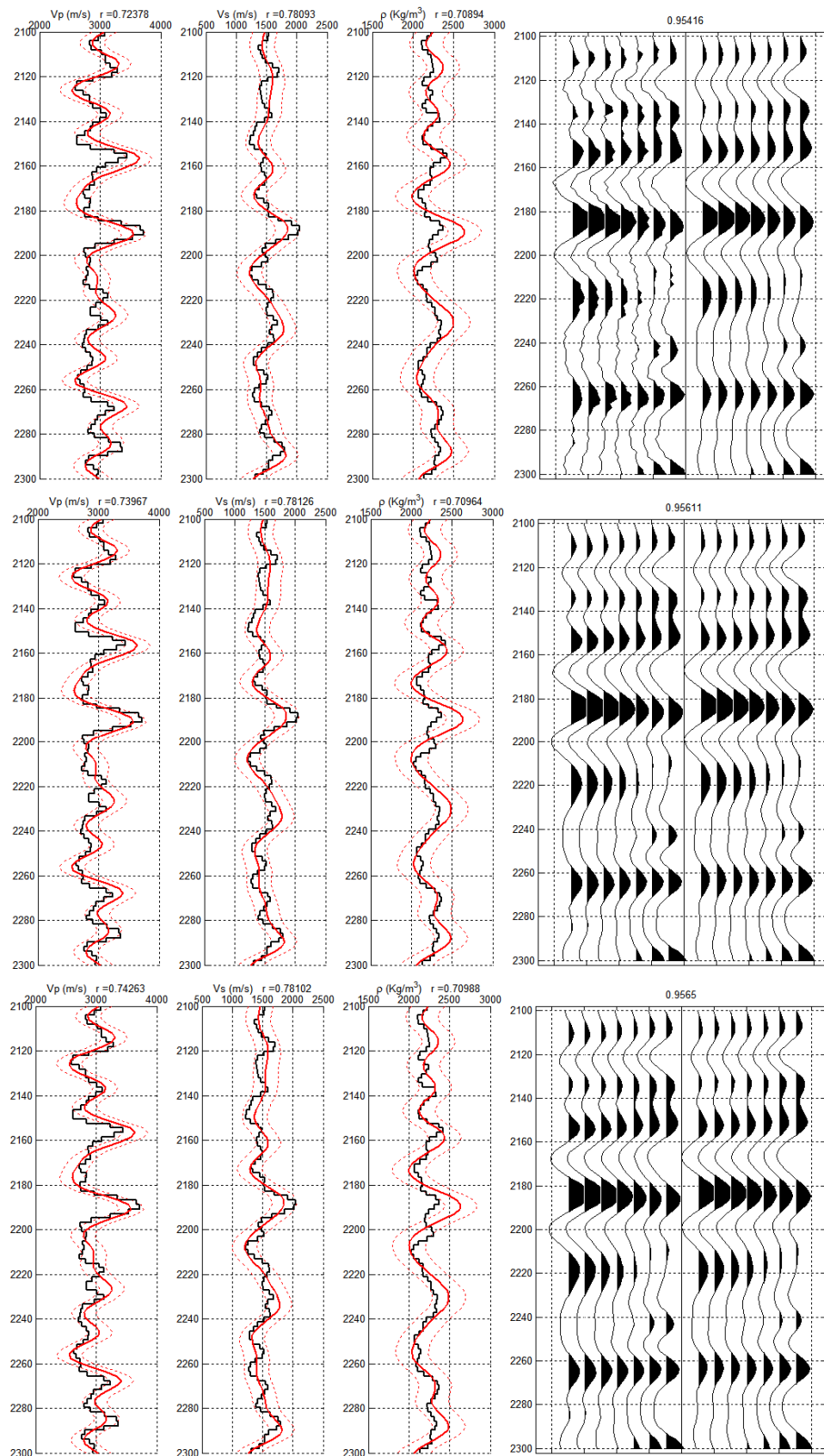


شکل ۲: نتایج حاصل از وارون سازی داده‌های مصنوعی. خطوط مشکی بیانگر مدل واقعی، خطوط قرمز رنگ بیانگر مدل حاصل از وارون سازی و خط چین‌ها، نشان‌دهنده عدم قطعیتی به اندازه یک انحراف معیار از مقدار میانگین است. زمینه رنگی نیز بیانگر توزیع عدم قطعیت جواب‌های تصادفی است.

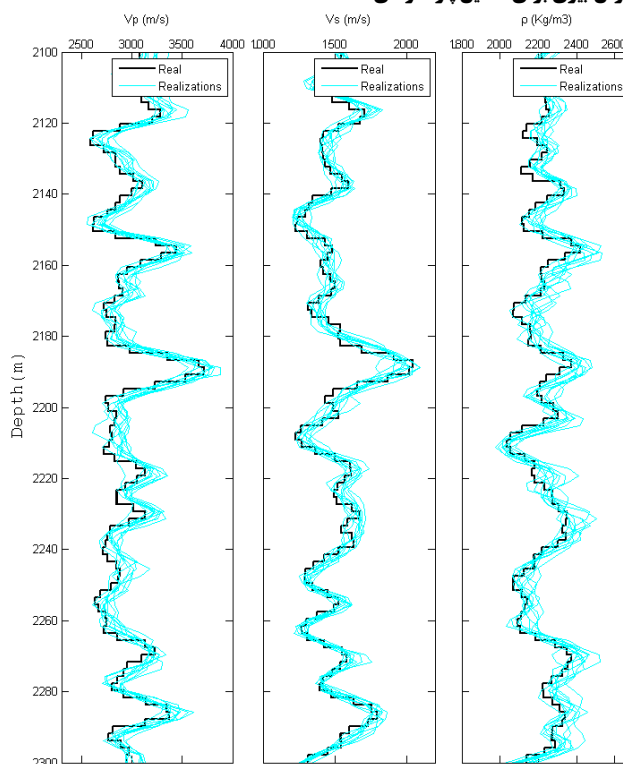
متلب (MATLAB) استفاده شده و کلیه مراحل در این نرم‌افزار پیاده‌سازی شده‌اند. برای بررسی عملکرد روش وارون سازی خطی AVO، از یک چاه مصنوعی شامل سه نمودار V_p ، V_s و ρ استفاده شد (شکل ۱). برای ساخت داده‌های لرزه‌ای مصنوعی نیز از یک موجک ریکر با فرکانس غالب ۲۵ هرتز و بازه نمونه‌گیری ۲ میلی‌ثانیه استفاده شد.

نتایج وارون سازی برای این مسئله در شکل ۲ نمایش داده شده است. زمینه رنگی موجود در تصاویر بیانگر عدم قطعیت موجود در جواب‌ها است که با تولید ۱۰۰ رخداد تصادفی (Realization) از توزیع پسین حاصل شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود محتمل‌ترین مقدار (MAP) برابر است با نمودار حاصل از وارون سازی که با رنگ قرمز نمایش داده شده است. این نمودار همان جواب حاصل از وارون سازی است. به منظور بررسی میزان حساسیت این روش به نوفه، نتایج وارون سازی را برای سه دسته داده پیش از برانبارش ورودی با نسبت‌های سیگنال به نوفه ۱، ۴ و ۹ محاسبه نمودیم. نتایج حاصل از این محاسبات در شکل ۳ و جدول ۱ نمایش داده شده است.

با محاسبه تابع میانگین و تابع کوواریانس و با علم بر گاوسی بودن توزیع جواب‌ها (توزیع پسین)، به راحتی می‌توان از این توزیع نمونه برداری کرد تا به رخدادهای (realizations) تصادفی وارون سازی دست یابیم. نمونه‌ای از ده رخداد تصادفی حول جواب این مسئله مصنوعی در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۳: بررسی تأثیر نوفه بر نتایج وارون سازی. (بالا) $SNR=1$ ، (وسط) $SNR=4$ و (پایین) $SNR=9$. نتایج این شکل نشان می‌دهد که وارون سازی تأثیر چندانی از میزان نوفه موجود در داده‌ها نمی‌پذیرد. ضرایب همبستگی در بالای هر یک از نمودارها نمایش داده شده است. (خط مشکی) نمودار چاه، (خط قرمز) نتیجه وارون سازی (خط چین قرمز) انحراف معیار حول میانگین.



شکل ۴: نمونه‌ای از ده رخداد تصادفی حاصل از وارون سازی.

تغییرات این پارامترها را دنبال می‌کنند. به منظور تعیین کوواریانس پایا باید ارتباط بین پارامترهای مسئله، یعنی لگاریتم سه پارامتر V_p ، V_s و ρ مورد بررسی قرار گیرد. در اغلب مسائل عملی این سه پارامتر به یکدیگر وابسته هستند. این مسئله در داده‌های واقعی بکار رفته در این مقاله نیز قابل مشاهده است (شکل ۷).

نتایج حاصل از این آزمایش انطباق قابل قبولی را با نمودارهای چاه نشان می‌دهد (شکل ۸) و نسبت به روش وارون سازی همزمان پیش از برانبارش بهبود چشم‌گیری در تفکیک‌پذیری دو پارامتر سرعت موج S و چگالی نشان می‌دهد. این مسئله را می‌توان به وضوح در شکل ۹ مشاهده نمود. ضریب همبستگی نمودار چاه با خروجی‌های حاصل از این دو روش وارون سازی در جدول ۲ نشان داده شده است.

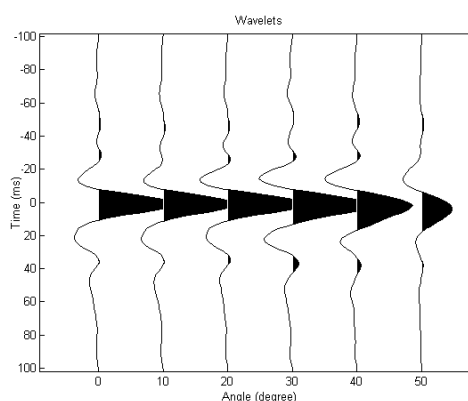
جدول ۲: ضریب همبستگی بین نمودارهای چاه با خروجی‌های به دست آمده از دو روش وارون سازی.

ρ	β	α	
۰٫۶۸	۰٫۶۵	۰٫۸۳	وارون سازی خطی AVO
۰٫۵۵	۰٫۵۱	۰٫۸۰	وارون سازی همزمان

به منظور بررسی پایداری این دو الگوریتم ارائه شده، این روش روی یک خط از داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش نیز آزمایش شد و نتایج آن با روش وارون سازی همزمان پیش از برانبارش مقایسه

۵- پیاده‌سازی روی داده‌های واقعی

برای این منظور از داده‌های پیش از برانبارش یک میدان نفتی واقع در خلیج مکزیک استفاده شد. داده‌های لرزه‌ای شامل زوایای بازتاب صفر تا ۶۰ درجه است که در ۶ بازه ده درجه‌ای برانبارش شده‌اند. برای هریک از زوایا نیز یک موجک جداگانه استخراج شده است (شکل ۵).



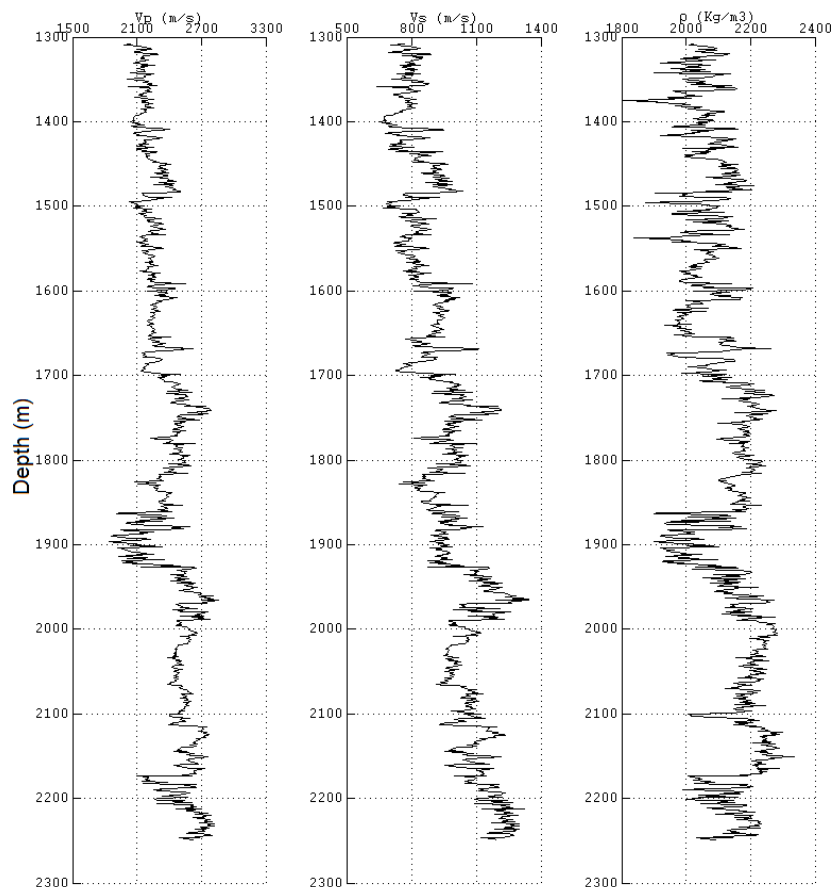
شکل ۵: موجک‌های استخراج شده برای هریک از زوایا در محل چاه.

برای ساخت ماتریس کوواریانس در روش وارون سازی خطی AVO از داده‌های چاه استفاده شد. داده‌های چاه شامل سه نمودار V_p ، V_s و ρ است (شکل ۶). مدل اولیه بکار رفته در این مثال سه روند خطی ساده (برای هریک از سه پارامتر) است؛ که روند کلی

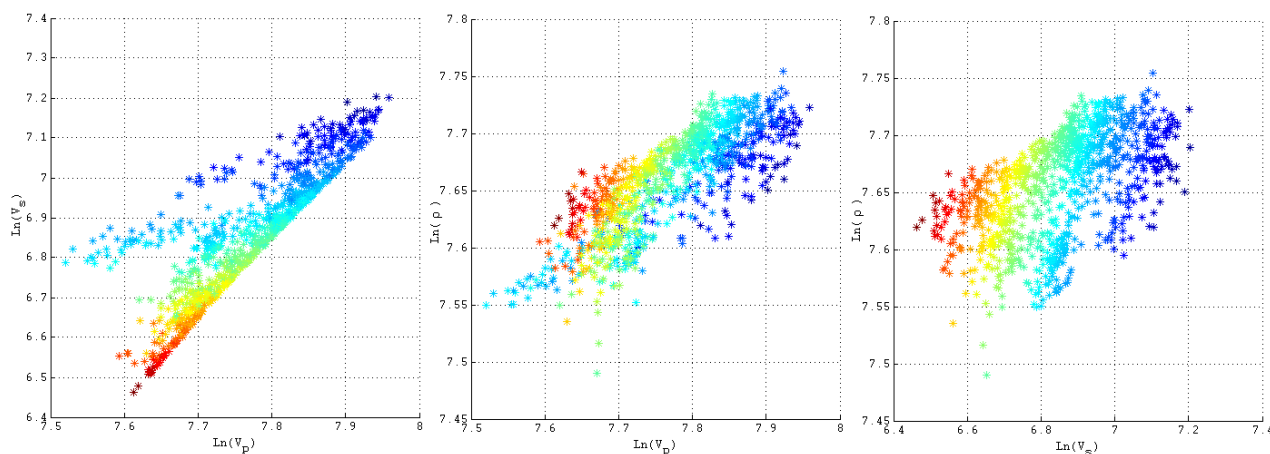
نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۴، شماره ۲، ۱۳۹۷.

پیش از برنبارش در محیط نرم‌افزار HRS انجام گرفته است. مقایسه نتایج حاصل از این دو روش و بررسی انطباق آن‌ها با نمودار چاه، به وضوح بهبود کیفیت وارون‌سازی را در روش وارون‌سازی خطی AVO نشان می‌دهد. این مسئله به خصوص در مورد دو پارامتر سرعت موج S و چگالی برجسته‌تر بوده و بهبود چشم‌گیری را در تفکیک‌پذیری این داده‌ها نشان می‌دهد.

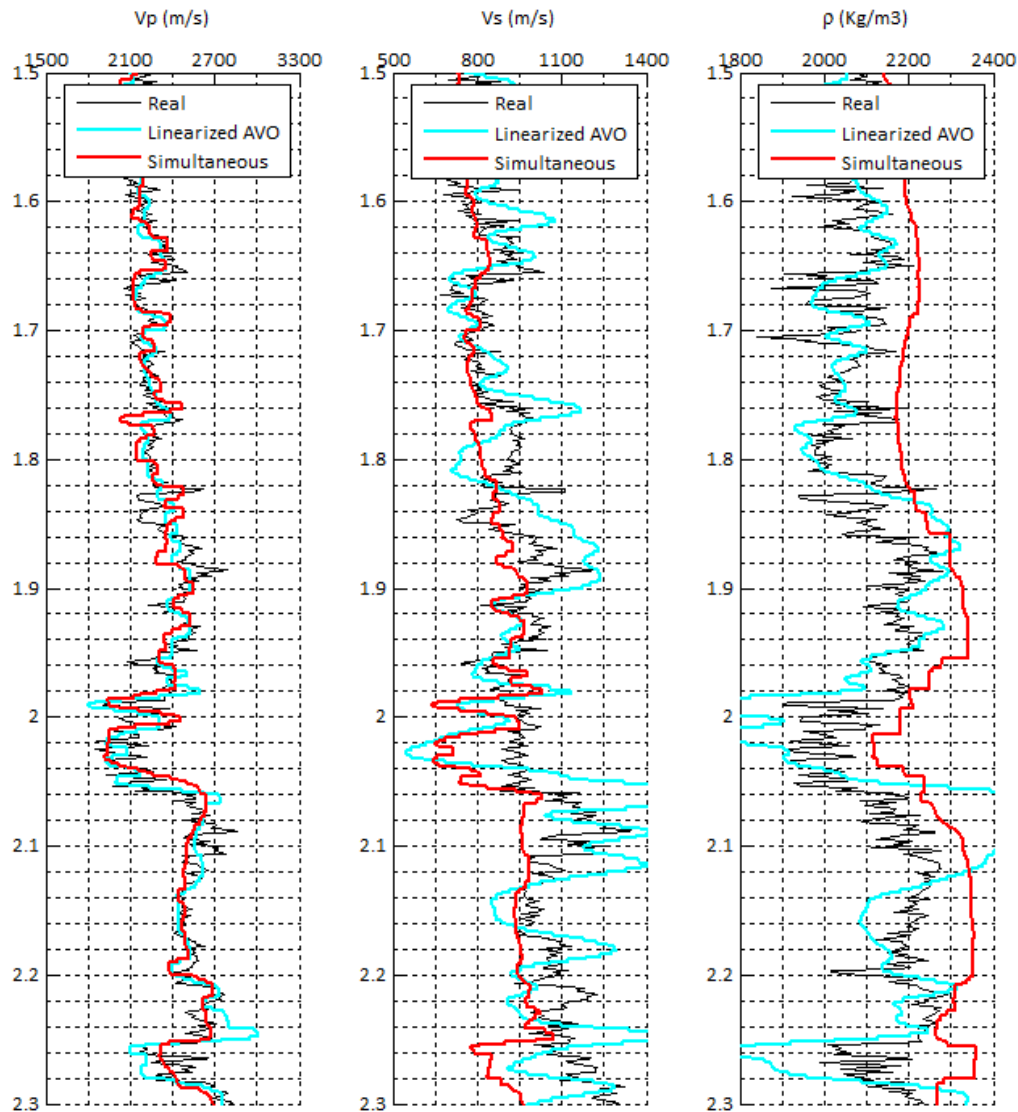
گردید. مقطع لرزه‌ای برنبارش شده این خط لرزه‌ای در شکل ۹ نمایش داده شده است. به منظور وارون‌سازی این مقطع نیز از موجک‌های نمایش داده شده در شکل ۵ استفاده گردید. نتایج حاصل به روش وارون‌سازی همزمان پیش از برنبارش و وارون‌سازی خطی AVO برای سه پارامتر V_p ، V_s و ρ به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است وارون‌سازی همزمان



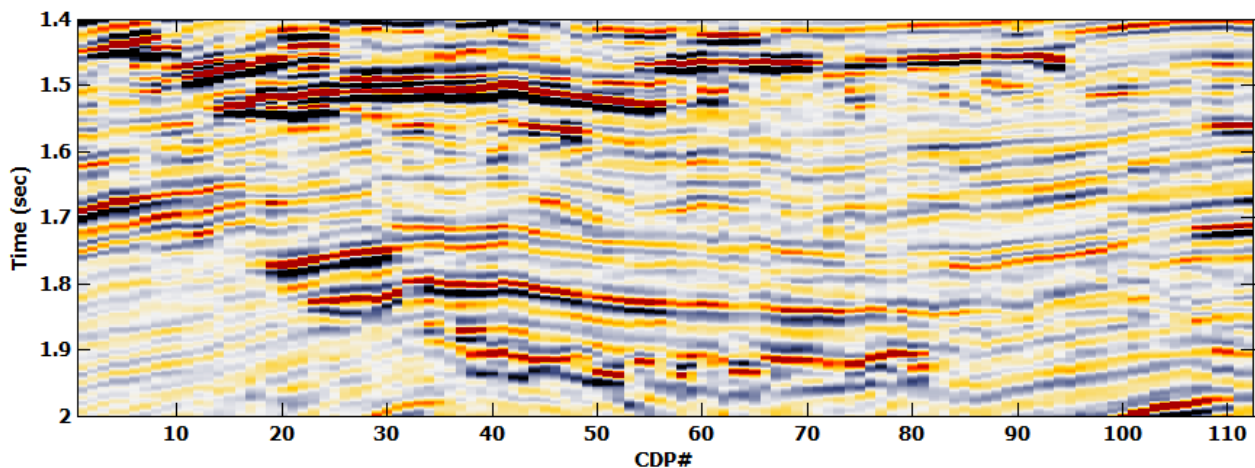
شکل ۶: نمودارهای V_p ، V_s و ρ در محل یک چاه واقعی که از داده‌های لرزه‌ای آن برای انجام وارون‌سازی استفاده شد.



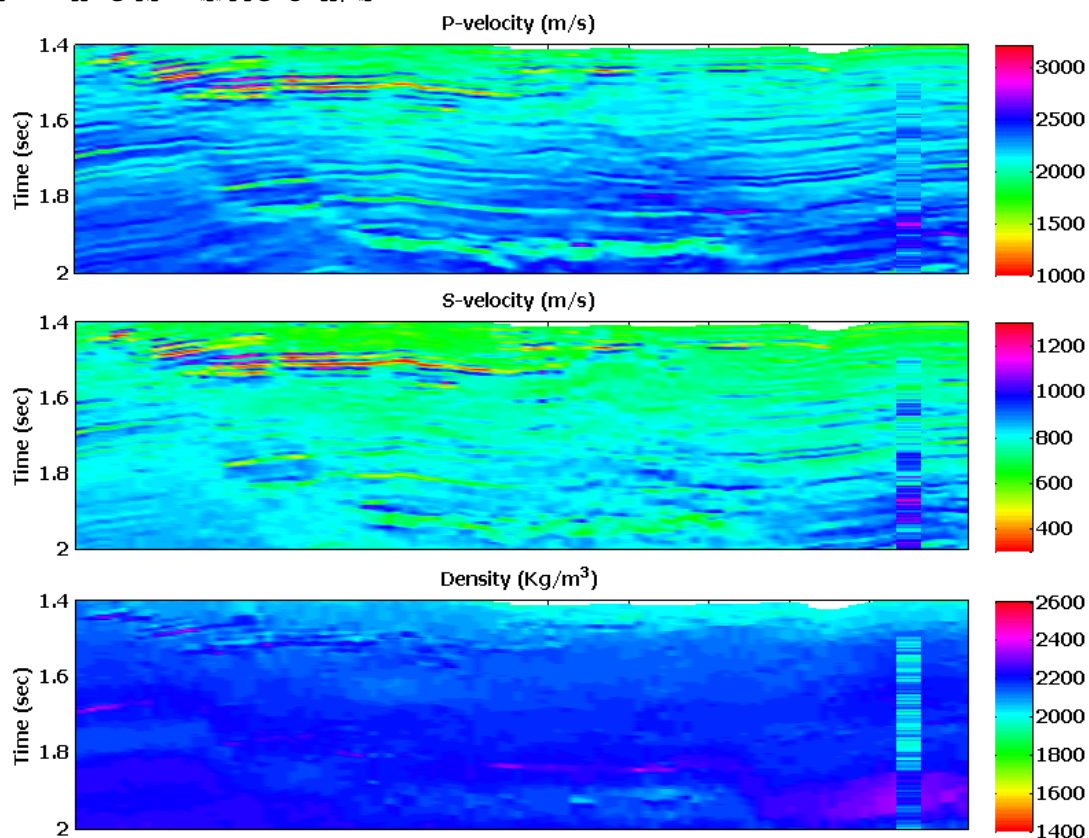
شکل ۷: نمودار همبستگی متقابل پارامترهای وارون‌سازی در محل چاه.



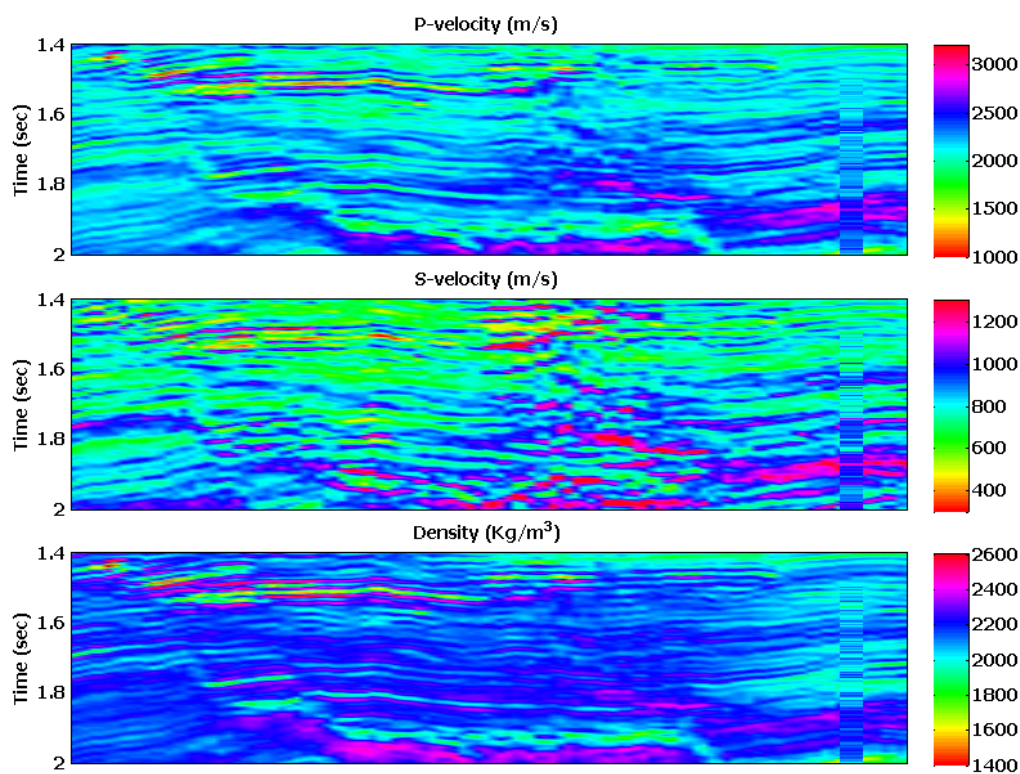
شکل ۸: نتایج حاصل از وارون سازی در محل چاه که با رنگ سبز روشن نمایش داده شده است. نمودارهای مشکی رنگ نمودارهای واقعی می باشند. چنانچه مشاهده می شود، نتایج وارون سازی خطی AVO (نمودارهای سبز رنگ) اگرچه در مورد سرعت موج P بهبود چشم گیری نسبت به روش وارون سازی همزمان پیش از برآینارش نشان نمی دهد؛ اما در مورد دو پارامتر سرعت موج S و چگالی برتری قابل توجهی چه در انطباق و چه در تفکیک پذیری نشان می دهد.



شکل ۹: داده های لرزه ای برآینارش شده.



شکل ۱۰: نتایج حاصل از وارون سازی همزمان پیش از برانبارش. در این شکل به راحتی می‌توان افت تفکیک پذیری و دقت نتایج وارون سازی را در دو پارامتر سرعت موج S و چگالی مشاهده کرد.



شکل ۱۱: نتایج وارون-سازی خطی AVO. نتایج حاصل از این روش انطباق فوق‌العاده خوبی با داده‌های چاه نشان داده و به علاوه نسبت به شکل ۹ بهبود چشم‌گیری در تفکیک پذیری داده‌ها نشان می‌دهد.

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه با ارائه یک رابطه تحلیلی برای توزیع پسین پارامترهای وارون سازی، از یک روش آماری در وارون سازی داده های لرزه ای استفاده شد. در آزمایش های انجام شده روی داده های مصنوعی، این روش توانست پارامترهای هدف را تقریباً به طور کامل بازیابی نموده و به علاوه تخمینی از میزان عدم قطعیت نیز ارائه دهد. این روش همچنین روی داده های واقعی مربوط به میدان آمبرجک در خلیج مکزیک نیز پیاده سازی و با روش رایج وارون سازی همزمان پیش از برانبارش مقایسه شده؛ که نتایج حاصل از آن انطباق قابل قبولی با داده های چاه نشان داد و به خصوص در مورد دو پارامتر سرعت موج S و چگالی انطباق و تفکیک پذیری فوق العاده بهتری نسبت به این روش نشان داد. همچنین برای بررسی پایداری و مقایسه این دو روش روی یک خط از داده های لرزه ای پیش از برانبارش میدان یادشده نیز آزمایش شد؛ که در این حالت نیز روش وارون سازی خطی، نتایج به مراتب بهتری را چه در میزان انطباق و چه در میزان تفکیک پذیری نسبت به روش وارون سازی همزمان از خود نشان داد. یکی از نکات کلیدی در مورد روش وارون سازی خطی، وابستگی بسیار کم آن به داده های چاه است؛ به طوری که تنها با داشتن توزیع آماری پارامترهای هدف و نه نمودار کامل آن ها، به راحتی می توان این روش را راه اندازی و اجرا کرده و با این وجود به نتایج به مراتب بهتری نسبت به روش های مرسوم دست یافت. همچنین بررسی نتایج روش وارون سازی AVO برای داده های مصنوعی با مقادیر مختلف نسبت سیگنال به نوفه نشان داد که این روش نسبت به نوفه موجود در داده های لرزه ای بسیار پایدار است.

۷- منابع

- Buland, A. and Omre, H., 2003, Bayesian linearized AVO inversion, *Geophysics*, 68 (1), 185-198.
- Castagna, J.P., Batzle, M.L. and Eastwood, R.L., 1985, Relationship between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks, *Geophysics*, 50, 571-581.
- Dahl, T. and Ursin, B., 1991, Parameter estimation in a one dimensional and elastic medium, *J. Geophys. Res.*, 96, 20217-20233.
- Gardner, G.H.F., Gardner, L.W. and Gregory, A.R., 1974, Formation velocity and density- The diagnostic basics for stratigraphic traps, *Geophysics, Soc. of Expl. Geophysics*, 39, 770-780.
- Gouveia, W. and Scales, J.A., 1998, Bayesian seismic waveform inversion Parameter estimation and uncertainty analysis, *Journal of Geophysical Research*, 103, 2759-2779.
- Hampson, D.P., Russell, B.H. and Bankhead, B., 2005, Simultaneous inversion of pre-stack seismic data: *Ann. Mtg. Abstracts, SEG*, pp. 1633-1637.
- Lortzer, G.J.M. and Berkhout, A.J., 1993, Linearized AVO inversion of multi-component seismic data, in Castagna, J., and Backus, M., Eds., *Offset-dependent reflectivity Theory and practice of AVO analysis*, *Sot. Expl. Geophys.*, pp. 317-332.
- Mosegaard, K. and Tarantola, A., 1995, Monte Carlo sampling of solutions to inverse problems, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100 (B7), 12431-12447.
- Smith, G.C. and Gidlow, P.M., 1987, Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas, *Geophys. Prosp.*, 35, 993-1014.

- Aki, K. and Richards, P.G., 1980, *Quantitative seismology*, W. H. Freeman & Co.

Bayesian linearized AVO inversion for prediction of Rock Parameters

Mostafa Abbasi^{1*} and Ali Gholami²

1- Ph.D. Candidate, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 23 October 2016; Accepted: 8 December 2016

* Corresponding author: abbasi.mostafa@ut.ac.ir

Keywords

Prestack Inversion

Bayesian Inversion

Linearized AVO

Prestack Joint Inversion

Weak Contrast

Uncertainty

Extended Abstract

Summary

In this study, a novel approach for linearized amplitude versus offset (AVO) inversion in a Bayesian framework is presented. Objective is to estimate the posterior distribution of three elastic parameters, P wave velocity, S wave velocity and rock density. The methodology is based on the convolutional model and a weak contrast linearized approximation of Zoeppritz equation for PP waves. In this study, assuming a priori Gaussian distribution for input parameters, and also, a Gaussian distribution for seismic misfit function,

Bayesian equation also yields a Gaussian distribution for posterior parameters, which can be analytically computed. This analytic solution is a rather fast approach for inversion of elastic parameters along with their uncertainty distribution. This methodology is tested on both synthetic and field data sets and in both cases yields reasonable solutions. In the current study, assuming a weak contrast model for rock properties, a linearized AVO approximation of Zoeppritz equation is used in a Bayesian framework to invert prestack seismic data for the above-mentioned three elastic parameters. The methodology is tested on both synthetic and field data sets. The results show preferably good matches with the true data.

Introduction

Inversion of seismic AVO is a way to estimate elastic parameters from prestack seismic data. This technique can be solved in both nonlinear (Dahl and Ursin, 1991) and linear (Smith and Gildow, 1987) approaches. Lortzer and Berkhout (1993) also used the same methodology as presented here, but they used the relative contrast of elastic parameters instead of their absolute values.

Methodology and Approaches

Assuming a Gaussian distribution for elastic parameters and seismic noise, and also, a linearized formulation for forward modeling, distribution for posterior parameters will also be Gaussian. Based on this methodology, the mean and covariance matrices of prior distribution are estimated from well data. Then using the linearized formulation of AVO, the mean and covariance matrices of observed seismic data are estimated. Having the statistical parameters of prior and likelihood functions, the statistical parameters of posterior distribution is analytically yielded based on Bayesian formulation. The covariance matrix of posterior distribution gives an estimate of the uncertainty in the elastic parameters.

Results and Conclusions

A Bayesian AVO inversion method was proposed and tested on both synthetic and field data sets. In case of synthetic data, the estimated parameters fitted the true values almost exactly. The result for the field dataset was also reasonable and matched the well log data relatively well except in some locations where prestack seismic data were not preconditioned very well. The initial models used for this methodology does not need to be detailed at all and very simple initial models such as constant or linear values lead to good estimation of the posterior distribution. Therefore, this approach can be a good choice for generation of pseudowells where not a rich dataset is available.