JRAG
نشریه پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی

دوره ۷، شماره ۱، ۱۴۰۰، صفحات ۱–۱۲

شناسه دیجیتال(DOI): 10.22044/JRAG.2018.5999.1140

تخمین پارامترهای کشسانی از وارون کور چندکاناله مقاومت کشسانی و مقایسه آن با وارون‌سازی بیزین

داود کرمی مزین[1]، علی غلامی[2]* و حمیدرضا سیاهکوهی[3]

۱- دانشجوی دکتری لرزه شناسی؛ موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، دانشگاه تهران
۲- دانشیار؛ موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، دانشگاه تهران
۳- استاد؛ موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۲۴؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۴

* نویسنده مسئول مکاتبات: **agholami@ut.ac.ir**

واژگان کلیدی

پارامترهای کشسانی
مقاومت کشسانی
واهمامیخت کور
وارون بلوکی
وارون‌سازی بیزین

چکیده

توصیف پتروفیزیکی مخزن نیازمند آگاهی از پارامترهای کشسانی نظیر سرعت موج طولی v_p، سرعت موج برشی V_S، و چگالی ρ است. این پارامترهای کشسانی را می‌توان با استفاده از داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش استخراج نمود. در این مطالعه دو روش وارون‌سازی این پارامترها مورد مقایسه قرار می‌گیرد. روش اول روشی قطعی و روش دوم روشی آماری است. در روش اول در مرحله اول با استفاده از الگوریتم وارون‌سازی لرزه‌ای کور چندکاناله مدل‌های مقاومت کشسانی بلوکی با تفکیک‌پذیری بالا از مقاطع برانبارش زاویه محدود[1] استخراج می‌شوند. این وارون‌سازی بدون اطلاع از موجک چشمه و به صورت کور انجام می‌شود تا موجک و مدل مقاومت به طور همزمان محاسبه شوند. اهمیت این موضوع هنگامی معلوم می‌شود؛ که بدانیم این موجک‌ها به دلیل ناهمسانگردی و طی مسیرهای متفاوت دارای محتوای فرکانسی متفاوت هستند. مرحله دوم شامل وارون مدل‌های مقاومت بدست آمده برای پارامترهای کشسانی است. به لحاظ ریاضی مقاومت کشسانی در حوزه لگاریتمی رابطه خطی با پارامترهای کشسانی دارد. با استفاده از این واقعیت وارون‌سازی مقاومت‌ها به پارامترهای کشسانی از طریق روش کمترین مربعات صورت می‌پذیرد. در روش دوم طی یک مرحله، در چارچوبی بیزین، با استفاده از تقریب خطی معادلات زوپریتس، توزیعی پسین برای هریک از پارامترهای کشسانی بدست می‌آید. استفاده از توزیع‌های بدست آمده به روش‌های گوناگونی انجام می‌شود. در این مطالعه با استفاده از توزیع‌های بدست آمده مدل با بیشترین احتمال انتخاب می‌شود. نتایج بدست آمده از هر دو روش با استفاده از داده مصنوعی و واقعی مورد ارزیابی و بحث قرار می‌گیرند و مزایا و کمبودهای آنها بیان می‌شوند.

1 Partial angle stacks

۱- مقدمه

تغییرات خواص فیزیکی سنگ‌ها و سیالات در محیط، ویژگی‌های امواج لرزه‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این اثرات با مشاهده تغییراتی که در زمان رسید و دامنه پاسخ لرزه‌ای ثبت شده دیده می‌شود، قابل شناسایی است. ارتباط فیزیکی بین این تغییرات و پارامترهای کشسانی سرعت موج طولی V_p، سرعت موج برشی V_s، و چگالی ρ، این امکان را فراهم آورده است، تا بتوان پارامترهای کشسانی را از وارون داده‌های لرزه‌ای تخمین زد (Mukerji et al., 2014). از مدل‌های پتروفیزیکی به منظور محاسبه پارامترهای کشسانی مخزن نظیر تخلخل، اشباع شدگی و تراوایی، استفاده می‌شود (Bosch et al., 2016). این مدل‌ها تابعی از پارامترهای کشسانی هستند و این بدان معنی است که برآورد کم دقت پارامترهای کشسانی به پیش‌بینی غیردقیق خواص مخزن منجر خواهد شد.

با معرفی مقاومت کشسانی[1] توسط Connolly (1999) که چارچوبی فراهم آورد تا بتوان داده‌های لرزه‌ای را برای پارامترهای کشسانی وارون نمود، کاربردهای موفقی از مقاومت کشسانی گزارش شده است. به طور مثال Cao et al., (2008) الگوریتم مقاومی برای وارون‌سازی پارامترهای کشسانی در یک چارچوب بیزین ارائه نمودند. در این روش برای پارامترهای کشسانی، توزیع کوشی در نظر گرفته شده است. Zhang et al., (2007) مبتنی بر روش مونت کارلوی زنجیره مارکوف سریع روش وارون‌سازی غیرخطی برای وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای به مقاومت کشسانی ارائه نمودند و از آن در برآورد مدول بالک و سپس شناسایی سیالات مخزن استفاده کردند. برخلاف مقاومت صوتی که به صورت ρV_p تعریف می‌شود، مقاومت کشسانی تابعی است از V_p، V_s، ρ و زاویه برخورد موج به مرز لایه‌ها. بنابراین می‌توان پارامترهای کشسانی را به کمک روش کمترین مربعات از مجموعه‌ای از مقاومت‌های کشسانی مربوط به زوایای مختلف محاسبه نمود.

به لحاظ نظری پارامترهای کشسانی و داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش در ارتباط هستند. این ارتباط، ارتباطی غیرخطی و به شدت بدوضع است. بنابراین این پارامترها را می‌توان با استفاده از منظم‌سازی مسائل وارون غیرخطی بدست آورد.

راه دیگر ارایه تقریب خطی از روابط غیرخطی است. به طور مثال معادلات زوپریتس به اشکال مختلفی خطی‌سازی شده است. یکی از این موارد تقریب Aki-Richard (1985) است؛ که به طور مستقیم امکان وارون‌سازی خطی پارامترهای کشسانی از داده لرزه‌ای را فراهم می‌آورد. در این مطالعه از دو روش برای برآورد پارامترهای کشسانی استفاده خواهد شد. در روش اول از الگوریتمی چندکاناله‌ای با تفکیک‌پذیری بالا استفاده می‌شود؛ تا پارامترهای کشسانی محاسبه شوند. این الگوریتم شامل دو مرحله است. در مرحله اول از داده لرزه‌ای پیش از برانبارش مقاومت کشسانی محاسبه می‌شود. در مرحله دوم از مقاومت‌های بدست آمده پارامترهای کشسانی تخمین زده می‌شوند. در این روش هر مقطع برانبارش زاویه محدود به صورت همامیخت یک موجک چشمه و سری بازتابی مربوطه در نظر گرفته می‌شود. واضح است که به خاطر عوامل مختلفی مثل طول مسیر انتشار و ناهمسانگردی و باید موجک تابعی از زاویه برخورد در نظر گرفته شود. بنابراین از آنجایی که هر مقطع برانبارش مربوط به اطلاعات لرزه‌ای است، که با زاویه متوسط خاصی به مرز لایه‌ها برخورد کرده است، پس هر موجک مسیر متفاوت و در نتیجه تضعیف متفاوتی را تجربه کرده است. پس باید برای هر مقطع برانبارش زاویه محدود موجک مربوط به آن را بدست آورد. بازیابی مقاومت کشسانی از هر مقطع برانبارش زاویه محدود همانند برآورد مقاومت صوتی از داده برانبارش بدون دورافت است. این بدان معنی است که روش‌های مورد استفاده برای برآورد مقاومت صوتی، برای برآورد مقاومت کشسانی هم کاربرد خواهد داشت. اخیراً الگوریتم‌هایی برای وارون‌سازی مقاومت صوتی با تفکیک‌پذیری بالا ارائه شده است (Gholami, 2015; 2016) که می‌توان از آنها برای وارون‌سازی مقاومت کشسانی استفاده نمود. در این مطالعه الگوریتم وارون‌سازی لرزه‌ای کور و چندکاناله Gholami (2016) برای محاسبه مقاومت کشسانی و موجک برای هر مقطع برانبارش زاویه محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرض می‌شود مدل مقاومت کشسانی با در نظر گرفتن معیار تغییرات کلی، ساختاری بلوکی داشته باشد و هم داده و هم اطلاعات فرکانس پایین پیشین موجود در مورد مقاومت کشسانی را ارضا کند. این اطلاعات می‌تواند از نگاره‌های چاه و یا سرعت‌های برانبارش بدست آمده باشند. وارون‌سازی مقاومت کشسانی برای پارامترهای کشسانی به راحتی و از طریق برازش به روش کمترین مربعات انجام می‌شود؛ اما وارون‌سازی مقاومت به پارامترهای کشسانی به صورت نقطه به نقطه صورت می‌پذیرد و در نتیجه همبستگی مکانی بین پارامترهای کشسانی در نظر گرفته نمی‌شود. هر چند به دلیل تحمیل این همبستگی مکانی در جریان محاسبه مقاومت کشسانی همبستگی بین پارامترهای کشسانی هم کنترل می‌شود.

در روش دوم، با استفاده از وارون‌سازی خطی AVO معرفی شده توسط Buland. And Omre (2003)، در یک چارچوب بیزین، توزیع پسینی برای پارامترهای کشسانی بدست می‌آید. در این روش با استفاده از تقریب خطی Aki-Richards (1985) و با در نظر گرفتن توزیع لاگ‌نرمال برای پارامترهای کشسانی، توزیع پسینی به شکل تحلیلی ارائه می‌شود. با استفاده از این توزیع می‌توان نمونه‌های تصادفی از پارامترهای کشسان محتمل تولید نمود. یکی از پاسخ‌های انتخابی می‌تواند مدل با بیشترین احتمال باشد؛ که با توجه به گوسی بودن توزیع پسین و در نتیجه متقارن بودن توزیع، با میانگین آن یکسان خواهد بود. در این روش هم هر مقطع برانبارش زاویه محدود به صورت همامیخت یک موجک چشمه و سری بازتابی مربوطه در نظر گرفته می‌شود.

مقایسه روش‌های مختلف وارون‌سازی این امکان را فراهم می‌آورد؛ تا مزایا و معایب روش‌ها بهتر نمایان شوند (به طور مثال (عباسی و غلامی،

1 Elastic impedance

۱۳۹۵)). در این مطالعه نتایج وارون‌سازی در این دو گام با یکدیگر مقایسه شده و مزیت‌ها و کمبودهای هر روش مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- تئوری روش

محاسبه پارامترهای کشسانی با استفاده از الگوریتم کور چندکاناله

مقاومت کشسانی به عنوان بسط مفهوم مقاومت صوتی برای زاویه θ است؛ که در زاویه صفر به مقاومت صوتی تبدیل می‌شود. مقاومت کشسانی ابزاری برای توصیف امواجی که با زاویه برخورد غیرصفر بازتاب می‌شوند؛ ایجاد می‌کند. این کمیت از تقریب خطی Aki-Richards (1985) بدست می‌آید و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$EI = V_p^{\left(1+tan^2\theta\right)} V_s^{\left(-8Ksin^2\theta\right)} \rho^{\left(1-4Ksin^2\theta\right)} \tag{۱}$$

که در آن $K = \left(V_S / V_p\right)^2$ ثابت فرض می‌شود (Connelly, 1999). همچنین داریم:

$$R\left(\theta\right) = \frac{EI\left(t_i\right) - EI\left(t_{i-1}\right)}{EI\left(t_i\right) + EI\left(t_{i-1}\right)} \tag{۲}$$

که در آن $R(\theta)$ ضریب بازتاب موجی است؛ که با زاویه θ به مرز لایه‌ها برخورد می‌کند؛ اما اندازه و بعد مقاومت کشسانی با زاویه تغییر می‌کند و این امکان را فراهم می‌کند تا داده‌های لرزه‌ای با دورافت غیر صفر را وارون کرد.

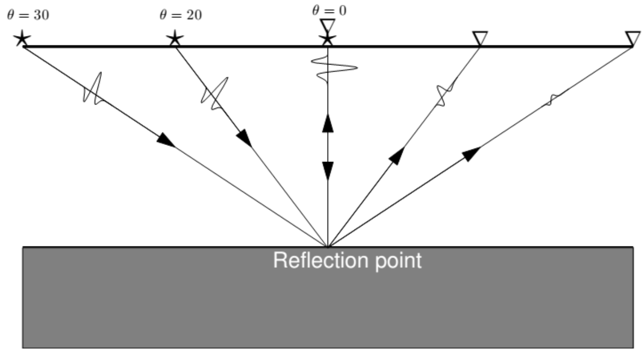
اگر فرض کنیم W_θ موجک چشمه برای پرتو با زاویه θ باشد و $R_\theta = \left[r_\theta^1 \middle| r_\theta^2 \middle| \ldots \middle| r_\theta^n\right]$ مدل سری بازتابی برای مجموعه‌ای از n موقعیت منطقه بازتاب باشد، در این صورت مدل همامیخت برای مقطع برانبارش با زاویه محدود به صورت زیر خواهد بود:

$$Y_\theta = w_\theta \circledast_t R_\theta + \xi_\theta \tag{۳}$$

که $\circledast_t$ بیانگر همامیخت نسبت به زمان، Y_θ مقطع بر انبارش زاویه ثابت و ξ_θ نشان‌دهنده نوفه اضافه شده است. مدلی که در معادله (۳) بیان شده مدل همامیخت پایا برای یک برانبارش زاویه محدود است. جزئیات بیشتری در مورد نحوه ساختن این مقاطع را می‌توان در Connolly (1999) مشاهده کرد. بنابراین فرض می‌شود مجموعه‌ای از مقاطع برانبارش زاویه محدود در دست است و یک وارون‌سازی دو مرحله‌ای برای برآورد پارامترهای کشسانی معرفی می‌شود. به این صورت که در ابتدا مقاومت‌های کشسانی مربوط به مقاطع برانبارش زاویه محدود محاسبه می‌شوند و سپس با استفاده از آنها پارامترهای کشسانی برآورد می‌شوند.

۲-۱- وارون لرزه‌ای کور چندکاناله برای مقاومت

وارون مقاطع حاصل از برانبارش زاویه ثابت برای مقاومت کشسانی مسأله‌ای بدوضع است. بنابراین نیازمند ابزارهای منظم‌سازی پیچیده‌ای است تا پاسخی مناسب برای مسأله پیدا شود. علاوه بر رویارویی با چالش‌هایی که در وارون‌سازی مقاومت کشسانی وجود دارد، نداشتن اطلاعات کافی راجع به موجک چشمه خود مسأله مهمی است. به علت تفاوت در مسیر طی شده توسط موجک در زوایای مختلف، موجک رسیده به سطح تابعی از زاویه برخورد خواهد بود. این موضوع به صورت نمادین در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱: نمایش تغییرخصوصیات موجک بازتابی با تغییر زاویه بازتاب در این شکل به صورت نمادین نشان داده شده است؛ که با تغییر زاویه بازتاب موجک‌ها مسیرهای متفاوتی را طی کرده و تضعیف متفاوتی را تجربه می‌کنند. بنابراین انتظار می‌رود برای هر مقطع برانبارش زاویه محدود موجک متفاوتی استخراج شود.

بنابراین مسأله بازیابی مقاومت کشسانی نیازمند آن است که به صورت کور و بدون اطلاع از موجک حل شود. Gholami (2016) الگوریتم وارون‌سازی لرزه‌ای کور چندکاناله‌ای معرفی کرد، که در آن وارون‌سازی برای محاسبه مقاومت صوتی و موجک به طور مستقیم در حوزه داده صورت می‌پذیرد. علاوه بر این الگوریتم وارون ارائه شده به صورت توام[1] است. به این صورت که داده لرزه‌ای و داده بدست آمده از نگاره‌های چاه با هم ترکیب می‌شوند تا اطلاعات فرکانس پایین در تخمین مقاومت صوتی گنجانده شود. ویژگی‌های عمده این الگوریتم عبارتند از: (۱) به صورت چندکاناله اعمال می‌شود و بنابراین همبستگی مکانی و زمانی پارامترها در نظر گرفته می‌شود. (۲) این الگوریتم قید تغییرات کلی را بر داده اعمال می‌کند، بنابراین برای بازیابی پارامترهای مربوط به یک زمین لایه‌لایه مناسب خواهد بود. (۳) سریع است؛ به طوری که یک مدل مقاومت بزرگ با ساختار بلوکی را می‌توان به راحتی و با استفاده از یک رایانه شخصی بدست آورد. (۴) اطلاعات فرکانس پایین پیشین موجود به صورت توام و به همراه داده لرزه‌ای وارون می‌شود. اگر D به عنوان عملگر مشتق مرتبه اول به صورت زیر فرض شود:

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 1 & & & \\ & -1 & 1 & & \\ & & \ldots & & \\ & & -1 & 1 & \\ & & & -1 & 1 \end{bmatrix} \in R^{(n-1)\times n} \tag{۴}$$

و W_θ به عنوان ماتریس توپلیتسی که از موجک ساخته می‌شود. در این صورت معادله (۳) به شکل ماتریسی به صورت زیر خواهد بود:

---

1 Joint

$$Y_\theta = W_\theta DX_\theta + \xi_\theta \quad (۵)$$

که در آن X_θ لگاریتم مقاومت است. یعنی $X_\theta[i,j] = 0.5 logEI_\theta[i,j]$ (به عنوان مثال به (Gholami, 2015) مراجعه نمایید). حل معادله (۵) رفت و برگشت بین حل دو زیرمسأله یکی برای مدل مقاومت و یکی برای موجک است. مدل مقاومت به سنگ‌شناسی زمین مرتبط است. به همین دلیل در مدل‌های زمین لایه لایه که دارای لایه‌بندی با مرز تیز هستند؛ استفاده از نرم تغییرات کلی برای مقید کردن مدل مقاومتی گزینه مناسبی خواهد بود (Gholami, 2016). بنابراین X_θ را به عنوان حل مساله منظم‌سازی تغییرات کلی زیر تعریف می‌کنیم

$$\underset{X}{argmin} \; \|X\|_{TV} \quad s.t. \begin{cases} \|Y_\theta - W_\theta DX\|_F^2 \le \varepsilon \\ X_{low}^{\theta} = LX \end{cases} \quad (۶)$$

که در آن $\|X\|_{TV} = \sum_{ij}\sqrt{(DX)_{i,j}^2 + (XD^T)_{i,j}^2}$ نرم تغییرات کلی نامیده می‌شود، D^T ترانهاده D و $\|\cdot\|_F$ بیانگر نرم فربنیوس[1] و $\varepsilon = \|\xi_\theta\|_F^2$ محدوده خطا در داده است و L در معادله (۶) بیانگر یک فیلتر پایین‌گذر است. با توجه به عدم حضور فرکانس‌های پایین در داده لرزه‌ای، یعنی محدوده ۷-۵ هرتز، محدوده پاسخ فرکانسی این فیلتر هم همین بازه انتخاب می‌شود. همچنین X_{low}^{θ} محتوی فرکانس پایین مدل مقاومت کشسانی را نشان می‌دهد. انتظار می‌رود مدل مقاومت کشسانی نهایی شامل آن باشد و به همین دلیل به صورت قید به مساله اضافه شده است.

از الگوریتم کارآمدی براساس شکافت برگمن[2] که در Gholami (2016) آمده است؛ استفاده می‌شود؛ تا معادله (۶) حل شود. وقتی تخمین اولیه‌ای از X_θ بدست آمد، موجک W_θ از طریق واهمامیخت تنک چندکاناله به روز رسانی می‌شود (Gholami and Sacchi, 2013؛ Gholami, 2016). این فرآیند تکرار می‌شود؛ تا زمانی که اختلاف موجک‌های متوالی کمتر از یک مقدار از پیش تعیین شده قرار بگیرد.

۲-۲- وارون مقاومت کشسانی برای پارامترهای کشسانی

اگر مقاومت‌های کشسانی برای زوایای مختلف بدست آمده باشند، از معادله (۱) می‌توان برای بدست آوردن پارامترهای کشسانی V_p، V_S و ρ استفاده نمود. مسأله را می‌توان با خطی‌سازی معادله (۱) در حوزه لگاریتمی به صورت زیر حل کرد (به طور مثال Connolly, 1999):

$$\log EI_\theta = \left[1+tan^2\theta\right]\log Vp - 8K\sin^2\theta \log Vs + \left[1-4K\sin^2\theta\right]\log\rho \quad (۷)$$

اگر J نشاندهنده تعداد مقاطع برانبارش زاویه محدود باشد، در این صورت دستگاه معادلات مربوط به شکل ماتریسی به صورت زیر خواهد بود:

$$\boldsymbol{d} = \boldsymbol{Gm} \quad (۸)$$

که:

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} 1+tan^2\theta_1 & -8K\sin^2\theta & 1-4K\sin^2\theta \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 1+tan^2\theta_J & -8K\sin^2\theta_J & 1-4K\sin^2\theta_J \end{bmatrix}, \quad (۹)$$

$$\boldsymbol{m} = \begin{bmatrix} \log Vp \\ \log Vs \\ \log\rho \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$ و نیز

$$\boldsymbol{d} = \begin{bmatrix} \log EI(\theta_1) \\ \cdots \\ \log EI(\theta_J) \end{bmatrix} \quad (۱۱)$$

حل کمینه مربعات میرا شده[3] معادله (۸) به صورت $(\boldsymbol{G^TG} + \lambda\boldsymbol{I})\boldsymbol{m} = \boldsymbol{G^Td}$ خواهد بود؛ که λ پارامتر منظم‌سازی است و $\boldsymbol{I}$ ماتریس یکانی است.

۲-۳- محاسبه پارامترهای کشسانی به روش وارون‌سازی خطی AVO به روش بیزین

وارون‌سازی بیزی طبق رابطه زیر انجام می‌شود (Buland and Omre, 2003):

$$p(\mathbf{m}\,|\,\mathbf{d}_{obs}) = \frac{p(\mathbf{d}_{obs}\,|\,\mathbf{m})\,p(\mathbf{m})}{p(\mathbf{d}_{obs})} \quad (۱۲)$$

در این رابطه $p(\mathbf{m}\,|\,\mathbf{d}_{obs})$ توزیع پسین مدل به شرط $\mathbf{d}_{obs}$ ، $p(\mathbf{m})$ توزیع مدل، $p(\mathbf{d}_{obs}\,|\,\mathbf{m})$ توزیع داده‌های لرزه‌ای به شرط مدل $\mathbf{m}$ و $p(\mathbf{d}_{obs})$ توزیع داده‌های لرزه‌ای است.

در واقع $p(\mathbf{d}_{obs}\,|\,\mathbf{m})$ در بردارنده فیزیک مساله و $p(\mathbf{m})$ در بردارنده اطلاعات پیشین درباره مدل است. ترکیب این دو مورد با استفاده از رابطه فوق توزیع پسینی خواهد بود؛ که برای استخراج مدل دلخواه استفاده می‌شود.

در روش قبلی (روش قطعی)، مدل‌سازی داده لرزه‌ای بر اساس مفهوم مقاومت کشسانی انجام شد؛ اما می‌توان با استفاده از تقریب‌های خطی معادلات زوپریتس نظیر تقریب خطی Aki-Richards (1985) ، اقدام به وارون‌سازی مستقیم داده لرزه‌ای برای پارامترهای کشسانی نمود.

بر این اساس، ضرایب بازتاب PP (c_{pp}) با استفاده از تقریب فوق به صورت رابطه آتی محاسبه می‌شوند (Buland and Omre, 2003):

$$c_{pp}(t,\theta) = a_\alpha(\theta)\frac{\partial}{\partial t}\ln\alpha(t) + a_\beta(t,\theta)\frac{\partial}{\partial t}\ln\beta(t) + a_\rho(t,\theta)\frac{\partial}{\partial t}\ln\rho(t) \quad (۱۳)$$

که در آن

$$a_\alpha(\theta) = \frac{1}{2}(1+\tan^2\theta), \qquad a_\beta(t,\theta) = -4\left(\frac{\bar{\beta}^2}{\bar{\alpha}^2}\sin^2\theta\right), \quad (۱۴)$$

1 Frobenius norm
2 Split Bergman
3 Damped least square

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

که در آن $\bar{\alpha}$ میانگین سرعت موج P، $\bar{\beta}$ میانگین سرعت موج S و θ زاویه برخورد موج به مرز لایه‌هاست.

رابطه (۱۳) را می‌توان به صورت ماتریسی $\mathbf{c}=\mathbf{Am}'$، نشان داد. که در این رابطه، ماتریس A ضرایب رابطه (۱۳) را در بر دارد و

$$\mathbf{m}'(t)=\frac{\partial}{\partial t}\mathbf{m}(t)=[\frac{\partial}{\partial t}\ln\alpha(t),\frac{\partial}{\partial t}\ln\beta(t),\frac{\partial}{\partial t}\ln\rho(t)]^T \qquad (۱۵)$$

با استفاده از شکل ماتریسی ضرایب و استفاده از عملگر همامیخت، داده لرزه‌ای را می‌توان به صورت زیر مدل‌سازی کرد

$$\mathbf{d}_{obs}=\mathbf{Sc}+\mathbf{e}=\mathbf{SAm}'+\mathbf{e} \qquad (۱۶)$$

از این رابطه برای مدل‌سازی مقاطع زاویه محدود[1] استفاده می‌شود. در این رابطه ماتریس $\mathbf{S}$ در بردارنده موجک چشمه برای زوایای مختلف است و e نوفه تصادفی اضافه شده به داده است. با فرض گوسی بودن توزیع نوفه، $\mathbf{e}\sim N_{n_d}(\mathbf{0},\mathbf{\Sigma_e})$ و نیز گوسی بودن توزیع پارامترهای مدل، داده هم دارای توزیع گاوسی $\mathbf{d}_{obs}\sim N_{n_d}(\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{d}obs},\mathbf{\Sigma}_{\mathbf{d}obs})$ خواهد بود؛ که میانگین و ماتریس کوواریانس آن در روابط زیر آمده است:

$$\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{d}_{obs}}=\mathbf{SA}\boldsymbol{\mu}'_m \qquad (۱۷)$$

$$\mathbf{\Sigma}_{\mathbf{d}_{obs}}=\mathbf{SA\Sigma}''_m\mathbf{A}^T\mathbf{S}^T+\mathbf{\Sigma}_e \qquad (۱۸)$$

با استفاده از این روابط، و رابطه بیزین (۱۲)، توزیع احتمال پسین، $\mathbf{m}\,|\,\mathbf{d}_{obs}\sim N_{n_m}(\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{m|d}obs},\mathbf{\Sigma}_{\mathbf{m|d}obs})$، توزیعی گاوسی با میانگین و کوواریانس زیر خواهد بود:

$$\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{m|d}_{obs}}=\boldsymbol{\mu}_m+(\mathbf{SA\Sigma}'_m)^T\,\mathbf{\Sigma}^{-1}_{\mathbf{dobs}}(\mathbf{d}_{obs}-\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{d}obs}) \qquad (۱۹)$$

$$\mathbf{\Sigma}_{\mathbf{m|d}_{obs}}=\mathbf{\Sigma}_m-(\mathbf{SA\Sigma}'_m)^T\,\mathbf{\Sigma}^{-1}_{\mathbf{dobs}}\mathbf{SA\Sigma}'_m \qquad (۲۰)$$

(برای جزئیات بیشتر به Buland and Omre (2003) و یا غلامی و عباسی (۱۳۹۵) مراجعه شود).

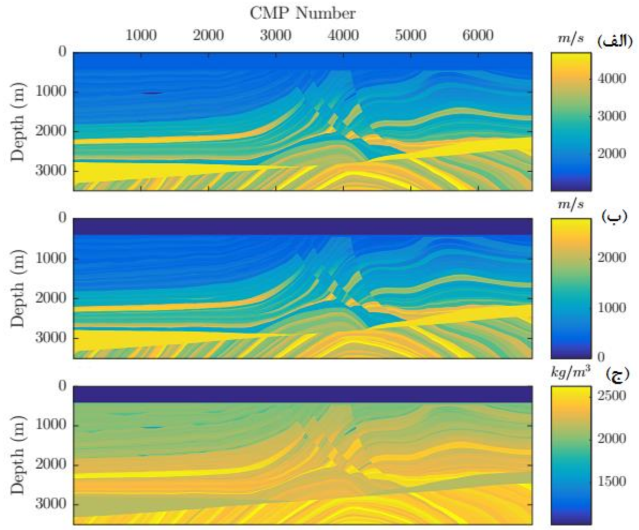
در ادامه از این روابط برای استخراج پارامترهای کشسانی مجهول استفاده خواهد شد.

۳- مثال‌های عددی

در این بخش با استفاده از داده مصنوعی و نیز داده واقعی کارآمدی روش‌ها مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. برای تولید داده مصنوعی فرضیات اولیه هر روش مورد نظر قرار می‌گیرد. برای روش قطعی که چند کاناله بوده و از فرض بلوکی بودن زمین استفاده می‌کند، بخشی از مدل مارموسی که به عنوان مدلی مرجع استفاده می‌شود، درنظر گرفته شده و برای روش بیزین هم بر اساس فرض لاگ-نرمال بودن پارامترهای کشسانی و نیز مدل کوواریانس پایا (Buland and Omre, 2003) چند نگاره مصنوعی تولید و استفاده می‌شود. داده واقعی نیز از یک خط دو بعدی لرزه‌ای در خلیج مکزیک انتخاب شده و از آن برای آزمودن هر دو روش استفاده می‌شود.

۳-۱- اعمال روش‌ها بر داده مصنوعی

به عنوان یک مدل مرجع، مدل مارموسی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ تا عملکرد روش قطعی مورد ارزیابی قرار بگیرد. پارامترهای مدل در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند.

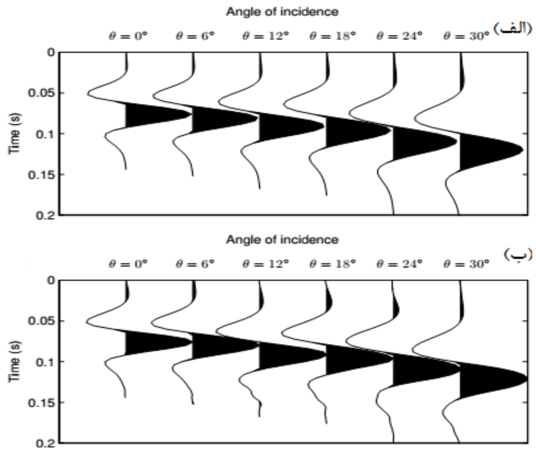


شکل۲: پارامترهای کشسانی مدل مارموسی. الف) V_p ب) V_s ج) ρ

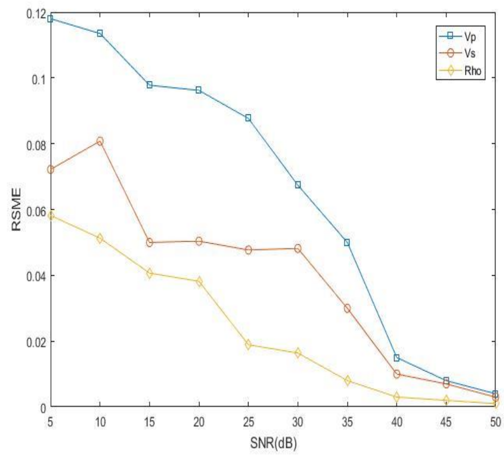
مدل‌های سری بازتابی و مقاومت برای زوایای فرود مختلف با استفاده از معادلات (۱)، (۲) ساخته شده‌اند. به منظور نزدیک‌تر شدن داده مصنوعی به واقعیت، مدل‌های سری بازتابی برای هر زاویه با موجک‌های ریکر کمینه فاز مختلفی همامیخت شدند. موجک‌های مورد استفاده `دارای فرکانس‌های ۱۵، ۱۴، ۱۳، ۱۲، ۱۱ و ۱۰ هرتز به ترتیب برای زوایای °۵، °۶، °۱۲، °۱۸، °۲۴ و °۳۰ درجه هستند. پس از آن نوفه سفید گوسی $S/R=5db$ به داده مصنوعی اضافه شد؛ تا به عنوان مقاطعی قابل قبول برای آزمایش الگوریتم قطعی برای وارون‌سازی مقاومت کشسانی تبدیل شده باشند. به منظور وارون‌سازی مقاطع تولید شده برای مقاومت کشسانی با فرض معلوم نبودن موجک، الگوریتم وارون‌سازی کور چندکاناله Gholami, (2016) برای وارون‌سازی توام موجک‌ها و مقاومت مورد استفاده قرار گرفت. مقاطع مقاومت بدست آمده و موجک‌های مربوط به زوایای ذکرشده در بالا به ترتیب در شکل ۳ و ۴ آمده‌اند.

همان‌طور که در شکل۳ دیده می‌شود موجک‌های بدست آمده بسیار به موجک‌های اصلی نزدیک هستند و مدل مقاومت بدست آمده با دقت بالایی برآورد شده‌اند. مقاومت‌های بدست آمده در مرحله بعد به عنوان ورودی یک وارون‌سازی کمینه مربعات برای وارون‌سازی پارامترهای کشسانی مورد استفاده قرار گرفتند.

1 Partial angle stacks



شکل۳: الف) موجک‌های مورد استفاده برای ساخت داده لرزه‌ای مصنوعی، ب) موجک‌های برآورد شده. در دورافت های بالاتر اطلاعات لرزه‌ای بیشتر تضعیف شده و فرکانس غالب کاهش می‌یابد و درنتیجه موجک کشیدگی بیشتری خواهد داشت. این مطلب در انتخاب موجک‌ها لحاظ شده است.

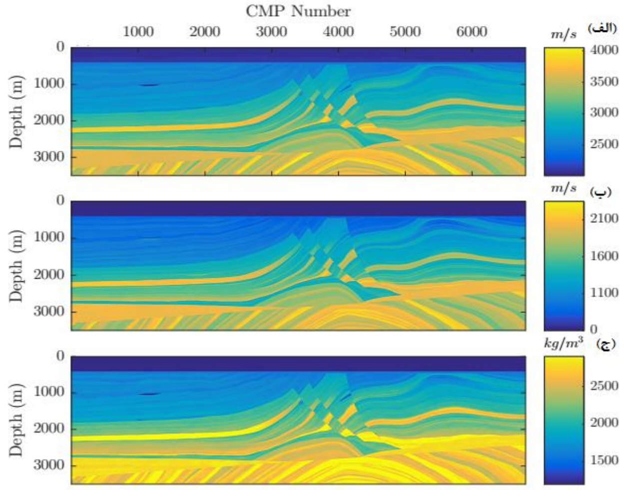


شکل ۴: الف–و به ترتیب مربوط به مقاطع مقاومت کشسانی زوایای °۰، °۶، °۱۲، °۱۸، °۲۴ و °۳۰هستند و ز–ل مربوط به مقاطع برآورد شده. همان طور که دیده می‌شود، مرزها و دامنه مقاومت‌های کشسانی به خوبی برآورد شده‌اند.

با آزمودن پارامترهای منظم‌سازی مختلف برای این وارون‌سازی این نکته معلوم شد، که پارامترهای کشسانی حساسیت بالایی نسبت به این پارامتر دارند و انتخاب نامناسب این پارامتر می‌تواند کیفیت این تخمین‌ها را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. به علاوه این که با انتخاب مناسب پارامتر منظم‌سازی، در بهترین حالت تنها یکی از پارامترها به خوبی برآورد می‌شود.

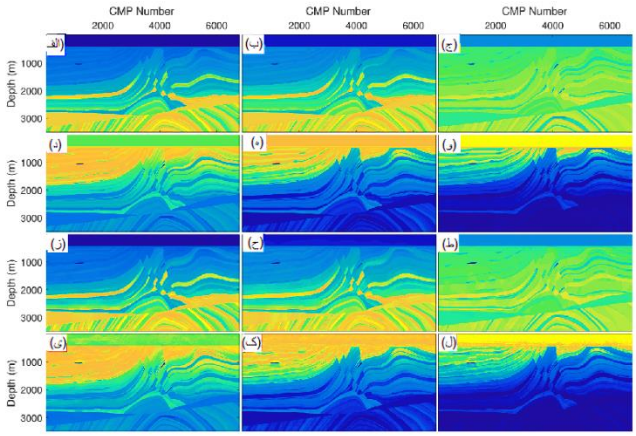
پارامترهای بدست آمده در شکل ***Error! Reference source not found.***۶ نمایش داده شده‌اند. در مقایسه با پارامترهای اصلی که در شکل ۲ آمده است؛ پارامترها به خوبی برآورد شده‌اند. در این برآورد مرزهای تیز مدل به خوبی حفظ شده‌اند.

حال در این بخش با استفاده از داده مصنوعی توانایی روش وارون‌سازی بیزین در برآورد پارامترهای کشسانی مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۵: بررسی خطای محاسبه پارامترهای کشسانی با استفاده از نسبت سیگنال به نوفه های متفاوت. با افزایش این نسبت خطای محاسبه برای این پارامترها کاهش پیدا کرده است. این مطلب پایداری روش در برآورد این پارامترها را نشان می‌دهد.

برای آزمودن این روش از نگاره‌های مصنوعی ساخته شده برای سرعت موج P، S و چگالی استفاده شده است. از این نگاره‌ها برای ساخت داده مصنوعی استفاده شده و سپس به داده نوفه $S/N=5db$ اضافه شده است.

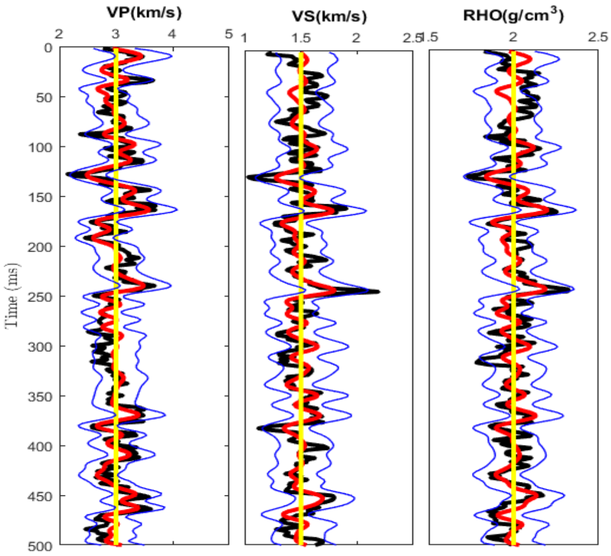


شکل ۶: پارامترهای کشسانی وارون شده با استفاده از مقاومت‌های کشسانی شکل ۴ ز–ل. الف) V_p ب) V_s ج) ρ . همان گونه که دیده می‌شود، مرزها و دامنه پارامترهای کشسانی به خوبی برآورد شده‌اند.

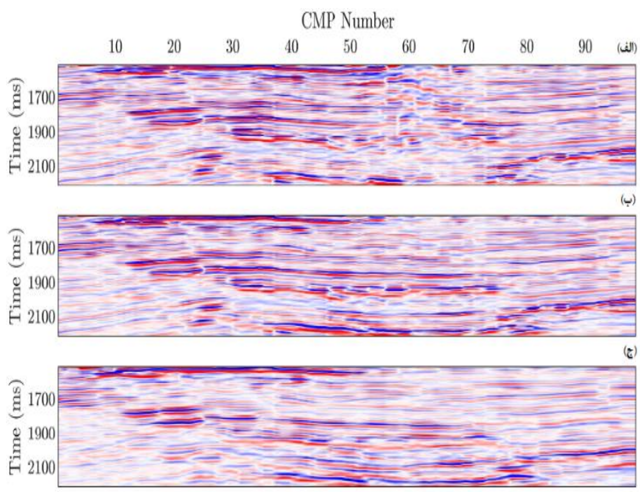
در ساخت این داده‌ها هم از موجک‌های مورد استفاده در روش قبل استفاده شده است. نتیجه وارون‌سازی به همراه مدل‌های واقعی در شکل۷ آمده است. همان طور که دیده می‌شود، نتایج وارون‌سازی بسیار مطلوب

بوده و مدل‌های اولیه با دقت خوبی برآورده شده‌اند.

بررسی عملکرد روش تحت تاثیر نسبت سیگنال به نوفه های متفاوت در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش این نسبت میزان خطای پارامترهای بدست آمده کاهش پیدا کرده است که این موضوع بیانگر پایداری روش است.



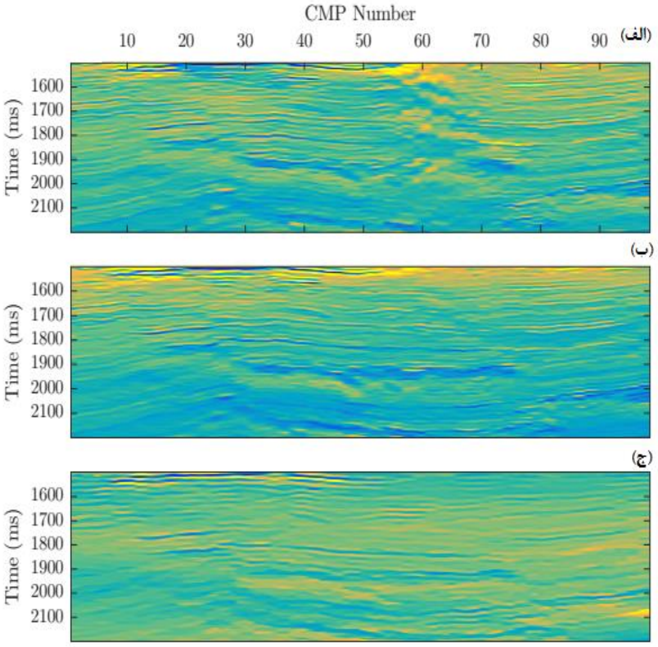
شکل ۷: الف) V_P ب) V_S ج) ρ. مدل مصنوعی مورد استفاده برای آزمایش روش بیزین (سیاه)، مدل اولیه (اطلاعات پیشین (P(m)) درنظرگرفته شده (زرد) و نتیجه وارون‌سازی (قرمز). همچنین بازه اطمینان ٪۹۵ هم (به رنگ آبی) اطراف پاسخ میانگین ترسیم شده است.



شکل ۹: مقاطع برانبارش زاویه محدود واقعی برای زوایای الف) °۵، ب) °۲۵ و ج) °۵۵

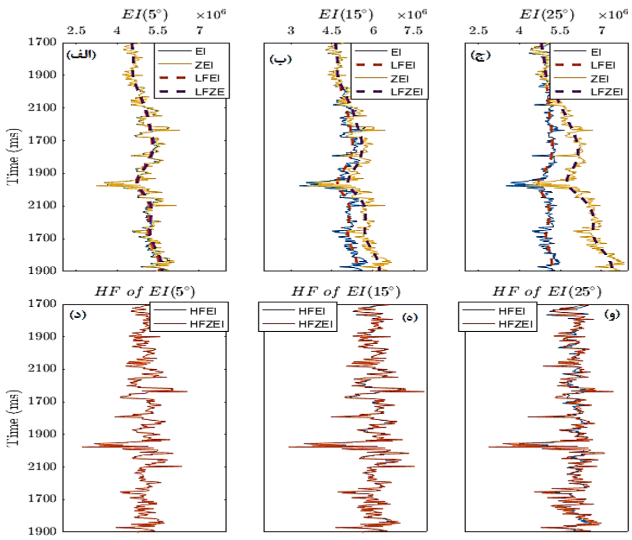
۴- اعمال روش‌ها بر داده واقعی

در این بخش نتایج اعمال دو روش وارون‌سازی بیان شده بر مقاطع زاویه



شکل ۱۰: مقاطع مقاومت کشسانی برآورد شده با استفاده از داده‌های لرزه‌ای شکل ۷ برای الف) °۵، ب) °۲۵ و ج) °۵۵

ثابت واقعی بیان می‌گردید. هر یک این مقاطع دارای ۱۱۲ ردلرزه از یک خط لرزه‌ای دوبعدی در خلیج مکزیک است. چهار چاه در امتداد خط لرزه‌ای قرار دارد، که در ارزیابی نتایج وارون‌سازی و نیز ساخت مدل‌های فرکانس پایین مورد استفاده قرار گرفته‌اند.



شکل ۸: مقایسه بین مقاوت کشسانی زوپریتس (به رنگ زرد) و مقاوت کشسانی (به رنگ آبی) در نقطه میانی مشترک ۷۴ برای زوایای الف)°۵ ب)°۱۵ ج)°۲۵. در این شکل‌ها روند فرکانس پایین (LF) با خط چین نمایش داده شده است. روند فرکانس بالای (HF) این نمودارها در ردیف پایین (د-و) آورده شده است

برای بررسی روش قطعی، همانند داده‌های مصنوعی، با استفاده از اطلاعات چاه‌ها مقادیر فرکانس پایین مقاومت در محل چاه‌ها محاسبه گردید و سپس با درون‌یابی مقادیر فرکانس پایین مقاومت در خارج چاه‌ها به کمک رابطه (۱) ساخته شد.

پس از آن مقاطع برای بدست آوردن مقاومت کشسانی وارون شدند، که همزمان هم داده‌ها را پیش‌بینی کنند و هم فرکانس پایین مدل مقاومت را ارضاء کنند. البته متأسفانه این انتظار برآورده نشد و داده‌ها به خوبی پیش‌بینی نشدند. به منظور پیدا کردن علت، با استفاده از نگاره‌های چاه، مقاومت‌های کشسانی و مقاومت‌های کشسانی زوپریتس[1] برآورد گردیدند (Ma, 2005). در بخش بعد این مفهوم توضیح داده شده است.

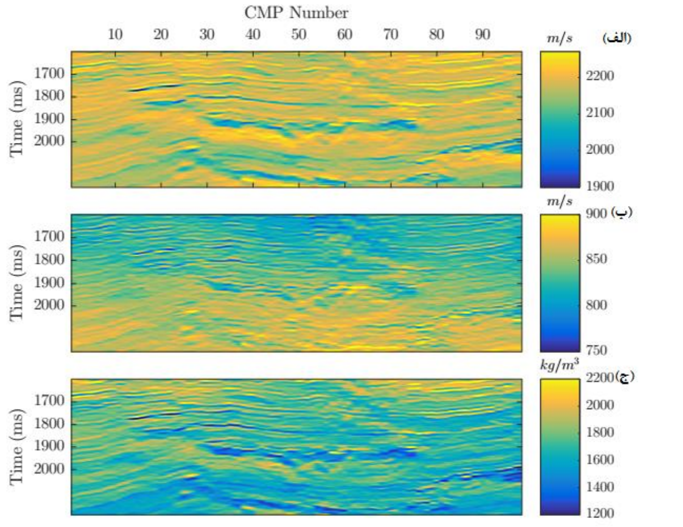
$$ZEI[j]=\frac{ZEI[j][1+r[j]]}{[1-r[j]]} \tag{۲۱}$$

۴-۱ مقاومت کشسانی زوپریتس

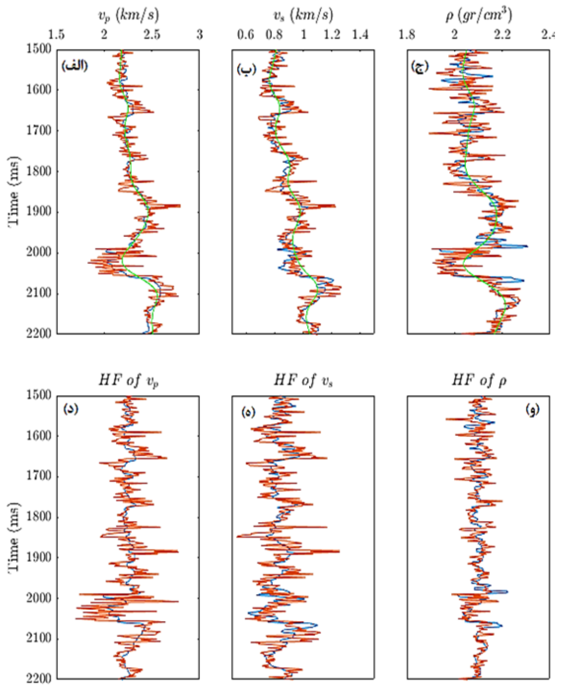
منظور از مقاومت کشسانی زوپریتس آن است که با داشتن ضرایب بازتاب دقیق از معادلات زوپریتس، مقاومتی برای لایه‌های مختلف در نظر گرفته شود؛ که در مرز هر دولایه دلخواه با تقسیم اختلاف مقاومت‌ها به جمع آنها ضرایب بازتاب دقیق زوپریتس حاصل شود. به عبارت دیگر در هر زاویه دلخواه با داشتن سرعت موج‌ها و چگالی از نگاره‌های چاه، با استفاده از معادلات زوپریتس ضرایب بازتاب دقیق محاسبه شده، سپس با استفاده از معادله (۲۱) مقاومت زوپریتس برای لایه‌ها محاسبه می‌شود (Ma, 2005).

$$=ZEI[1]\prod_{k=1}^{j}\frac{1+r[k]}{1-r[k]} \tag{۲۲}$$

مقاومت کشسانی در واقع تقریبی از این مقاومت در زوایای غیر عمود است. در این رابطه ZEI مقاومت کشسانی زوپرتیس را نشان می‌دهد و $ZEI[1]$ مقاومت کشسانی زوپرتیس در لایه اول است. مقاومت‌های زوپرتیس و مقاومت‌های کشسانی مربوطه در نقطه میانی مشترک شماره ۷۴ در شکل ۸ برای زوایای °۵، °۱۵ و°۲۵ با هم مقایسه شده‌اند. همان طوری که دیده می‌شود، در زوایای فرود بالا روند فرکانس پایین مقاومت کشسانی به شدت از مقاومت زوپرتیس دور می‌شود، اما بخش فرکانس بالای آنها بسیار به هم شبیه هستند. این انحراف ناشی از خطای موجود در تقریب خطی معادلات زوپریتس و نیز فرضیات موجود در مقاومت کشسانی است. رویکرد موجود برای غلبه بر این مشکل به این صورت است که محتوی فرکانس بالای مقاومت کشسانی بدون در نظر گرفتن فرکانس پایین، محاسبه شده و سپس مؤلفه‌های فرکانس پایین پارامترهای کشسانی از اطلاعات چاه بدست آورد می‌شود و به محتوی فرکانس بالای پارامترهای کشسانی اضافه می‌شود (Berteussen and Ursin, 1983; Cerney and Bartel, 2007; Hamid and Pidlisecky, 2015).



شکل ۱۱: پارامترهای کشسانی برآورد شده بر اساس الگوریتم قطعی. الف) V_p ب) V_s ج) ρ. همانطور که دیده می‌شود پارامترهای برآورد شده از تفکیک‌پذیری بالایی برخوردار هستند.

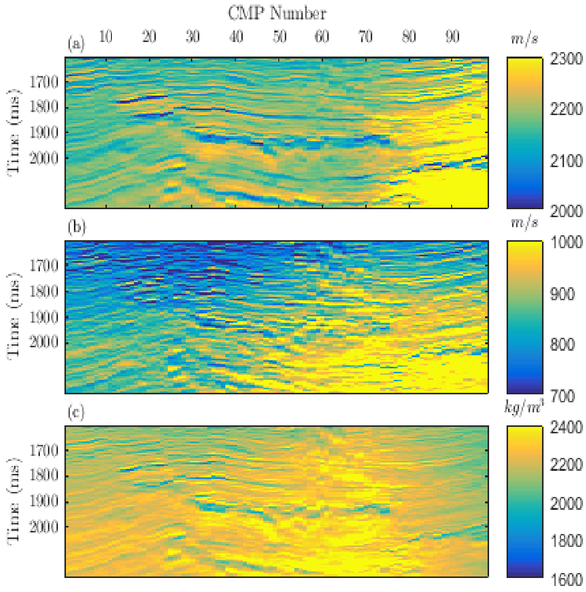


شکل ۱۲: مقایسه پارامترهای کشسانی بدست آمده از داده واقعی در نقطه میانی مشترک ۱۰۴. نگاره‌های چاه (به رنگ قرمز) و نگاره‌های برآورد شده (به رنگ آبی) و روند فرکانس پایین نگاره‌های چاه (به رنگ سبز) در شکل‌ها آمده است. در ردیف اول (الف–ج)، نتایج پس از تزریق مدل فرکانس پایین نگاره‌ها و در ردیف دوم بخش فرکانس بالای مدل‌های برآورد شده از داده لرزه‌ای، نشان داده شده است.

با در نظر گرفتن این رویکرد، شش مقطع برانبارش زاویه محدود°۵، °۱۵، °۲۵، °۳۵، °۴۵ و °۵۵ برای وارون‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند؛ که

---

1 Zoeppritz EI



شکل ۱۳: پارامترهای کشسانی برآورد شده بر اساس الگوریتم بیزین. الف) V_p ب) V_s ج) ρ

سه مورد آنها به همراه مقاومت‌های بدست آمده از آنها در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند. نتیجه وارون‌سازی مقاطع مقاومت کشسانی برای پارامترهای کشسانی در شکل ۱۰ آمده است. در شکل ۱۱ پارامترهای بدست آمده و نگاره‌های چاه در نقطه میانی مشترک ۱۰۴ مقایسه شده‌اند. همان طور که دیده می‌شود، پارامترهای برآورد شده به شکل قابل قبولی با نگاره‌های چاه هماهنگی دارند. با استفاده از داده لرزه‌ای واقعی مورد استفاده پس از آزمایش روش قطعی، روش بیزین هم مورد ارزیابی قرار گرفت. نخست به عنوان اطلاعات اولیه، با استفاده از نگاره‌های چاه مدل بسیار نرمی ساخته شده و عنوان میانگین مدل پیشین درنظر گرفته شد. سپس با استفاده از رابطه (۲۰)، میانگین مدل پسین برآورد شده و به عنوان مدل خروجی در نظر گرفته شد. نتایج این وارون‌سازی در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آمده است. همان طور که مشاهده می‌شود، روش در برآورد پارامترهای کشسانی با دقت خوبی موفق عمل می‌کند.

ضریب همبستگی بین نمودارهای چاه با خروجی های بدست آمده از دو روش وارون سازی در جدول ۱ آمده است. میزان همبستگی بین پارامترهای بدست آمده از روش قطعی نشان‌دهنده برتری نسبی آن نسبت به روش بیزین است.

جدول ۱: ضریب همبستگی بین نمودارهای چاه با خروجی های بدست آمده از دو روش وارون سازی

روش	α	β	ρ
روش بیزین	۰/۷۹	۰/۷۰	۰/۶۸
روش قطعی	۰/۸۳	۰/۸۵	۰/۷۴

۵- نتیجه گیری

مقاومت کشسانی تابعی است از سرعت موج طولی، سرعت موج عرضی و چگالی. با استفاده از این مفهوم می‌توان به کمک الگوریتم‌های وارون‌سازی، پارامترهای کشسانی فوق را دو مرحله تخمین زد. در مرحله اول الگوریتم از روش وارون‌سازی کور چند کاناله با تفکیک‌پذیری بالا استفاده می‌کند تا مقاومت‌های کشسانی را محاسبه کند و سپس به کمک روش کمترین مربعات مقاومت کشسانی به پارامترهای کشسانی وارون می‌شوند. با استفاده از داده مصنوعی تولید شده بر مبنای مفهوم مقاومت کشسانی، الگوریتم در بازسازی پارامترهای کشسانی موفق عمل می‌کند؛ اما به دلیل خطای زیادی که تقریب مقاومت کشسانی برای معادلات زوپرتیس در زوایای بالا ایجاد می‌کند، روش در بازسازی پارامترهای کشسانی موفق عمل نمی‌کند. برای غلبه بر این مشکل در ابتدا محتوای فرکانس بالای مدل‌ها محاسبه می‌شوند و سپس بخش فرکانس پایین با استفاده نگاره‌های چاه محاسبه شده و در پارامترهای کشسانی تزریق می‌شوند. با استفاده از این روش انطباق خوبی با نگاره‌های چاه بدست آمد و نتایج مورد قبولی حاصل می‌گردد.

تقریب خطی Aki-Richards (1985) علاوه بر این که مبنای معرفی مفهوم مقاومت کشسانی بوده است خود چارچوبی برای وارون‌سازی خطی لرزه‌ای ایجاد می‌کند؛ تا پارامترهای کشسانی را به طور مستقیم از داده لرزه‌ای به طور مستقیم محاسبه کرد. یکی از الگوریتم های معرفی شده بر این مبنا وارون‌سازی بیزین خطی است، که در این مطالعه نتایج محاسبات آن با روش قطعی مورد مقایسه قرار گرفته است.

نتایج بدست آمده از دو روش وارون‌سازی فوق نشان می‌دهد که هر دو روش در برآورد پارامترهای کشسانی تا حد زیادی موفق عمل می‌کنند. روش قطعی به دلیل رویکرد چند کاناله خود همبستگی بین اطلاعات لرزه‌ای در ردلرزه‌های مجاور پیوستگی جانبی را برای رخدادها در نظر گرفته و در نتیجه مدل‌های پارامترهای کشسانی از پیوستگی به نسبت بهتری نسبت به روش بیزین برخوردار است. همچنین همبستگی بالاتر پارامترهای بدست آمده در این روش با نگاره‌های چاه موید دقت بالاتر این روش در محاسبه پارامترهای کشسانی است. از طرف دیگر روش اول به دلیل الگوریتم کور خود، توانایی بازیابی همزمان موجک را داراست و از این جهت هم نسبت به روش بیزین برتری دارد؛ اما روش بیزین با توجه به در نظر گرفتن مدل فرکانس پایین پارامترهای کشسانی نگاره‌های چاه به عنوان میانگین مدل پیشین دارای برتری است.

منابع

عباسی، م. و غلامی، ع.، ۱۳۹۵، وارون‌سازی خطی AVO به روش بیزی برای تخمین پارامترهای سنگ، نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، انتشار آنلاین

Aki, K., and P. G. Richards, 1980, Quantitative seismology: theory and methods: W. H. Freeman and Co.

Berteussen, K. A., and B. Ursin, 1983, Approximate computation of the acoustic impedance from seismic data: Geophysics, 48, 1351–1358.

Buland, A., and H. Omre, 2003, Bayesian linearized AVO inversion: Geophysics, 68, 185–198, Gholami, A., and M. D. Sacchi, 2013, Fast 3d blind seismic deconvolution via constrained total variation and gcv: SIAM Journal on Imaging Sciences, 6, 2350–2369.

Hamid, H., and A. Pidlisecky, 2015, Multitrace impedance inversion with lateral constraints: Geophysics, 80, no. 6, M101–M111.

Ma, J., Geng, J., and Guo, T., 2011. Using linearized Bayesian method to extract elastic parameters from elastic impedance. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011 (pp. 2762-2766). Society of Exploration Geophysicists.

Ma, J.F. and Morozov, I.B., 2005. The exact elastic impedance. In CSEG 2005 Annual Meeting Abstracts (pp. 224-227).

Mukerji, T., Mavko, G., and Avseth, A., 2014, Quantitative seismic interpretation: Applying rock physics tools to reduce interpretation risk: Cambridge University Press.

Zhang, H., Shang, Z., and Yang, C., 2007, A non-linear regularized constrained impedance inversion: Geophysical Prospecting, 55, 819–833.

Bosch, M., T. Mukerji, and E. F. Gonzalez, 2010, Seismic inversion for reservoir properties combining statistical rock physics and geostatistics: A review: Geophysics, **75**, 165–176.

Cao, H., Yang, Z. and Li, Y., 2008. Elastic impedance coefficient (EC) for lithology discrimination and gas detection. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2008* (pp. 1526-1530). Society of Exploration Geophysicists.

Cerney, B., and D. Bartel, 2007, Uncertainties in low frequency acoustic impedance models: The Leading Edge, 26, 74–87Hamid, H., and A. Pidlisecky, 2015, Multitrace impedance inversion with lateral constraints: Geophysics, 80, no. 6, M101–M111.Connolly, P., 1999, Elastic impedance: The Leading Edge, **18**, 438–452.

Gholami, A., 2015, Nonlinear multichannel impedance inversion by total-variation regularization: Geophysics, 80(5), R217–R224.

Gholami, A., 2016, A fast automatic multichannel blind seismic inversion for high-resolution impedance recovery: Geophysics, 81(5), V357-V364.

Shahrood University of Technology

JOURNAL OF RESEARCH ON APPLIED GEOPHYSICS

(JRAG)

2021, VOL 7, NO 1

(DOI): 10.22044/JRAG.2018.5999.1140

Estimation of elastic parameters using multichannel blind inversion of elastic impedance and comparison of it with Bayesian AVO inversion

Davoud Karami Mozayan[1], Ali Gholami[2*] and Hamidreza Siyahkohi[3]

1. PhD Student, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. Associated Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.
3. Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received: 15 July 2017; Accepted: 3 February 2018

Corresponding author: agholami@ut.ac.ir

Keywords

Elastic parameters
Elastic impedance
Blind deconvolution
Blocky inversion

Extended Abstract

Summary

Elastic parameters can be retrieved from pre-stack seismic data using the concept of the elastic impedance (EI). As the first inversion method in this study, an inversion algorithm is used that recovers the elastic parameters from pre-stack seismic data in two sequential steps. In the first step, using the multichannel blind seismic inversion, blocky EI models are obtained from partial angle-stacks. Using total-variation (TV) regularization, each angle-stack is inverted in a multichannel form. The second step involves the inversion of the resulting EI models for elastic parameters. Mathematically, the EIs are linearly described by the elastic parameters in the logarithm domain. Thus, a linear least-square inversion is employed to perform this step. Furthermore, elastic parameters are inverted through linearized Bayesian AVO inversion as the second inversion method, and some posterior distribution for elastic parameters is proposed. Finally, the results of both inversion methods are compared and their advantages and shortages are discussed.

Introduction

EI provides a framework to obtain the elastic parameters by inverting seismic data. EI is a nonlinear function of P- and S-wave velocities (Vp and Vs) and density (ρ), therefore, elastic parameters can be extracted from a set of EI parameters corresponding to different angles via a least-square method.

In this study, we use a high-resolution algorithm, which determines elastic parameters from pre-stack seismic data in two steps of EI estimation followed by an inversion for the elastic parameters. Clearly, due to the effects like anisotropy, wavelet should be considered as a function of the incident angle. Here, we employ some multichannel blind seismic inversion to obtain both the EI model and the corresponding wavelet for each angle-stack. The EI and wavelet are automatically obtained via an iterative process. The EI is required to have a blocky structure, in the sense of the total-variation (TV) norm, while satisfying both the data and a priori low-frequency information.

The inversion of EIs for the elastic parameters is easily performed by a least-square fitting strategy. As the second method of estimating elastic parameters, a linearized Bayesian AVO inversion method has been used to estimate posterior distribution of elastic parameters directly from seismic data and the MAP (maximum a posterior) solution is calculated. In general, Bayesian inversion provides a relation between posterior distribution, prior information and the conditional distribution of observed data when the model is known. As the aim of this study, the results of both algorithms are compared and discussed.

Methodology and Approaches

For estimation of EI, we optimize a cost function, which is defined as a multichannel problem, where total variation norm of EI model is expected to be minimum, and also, the mode predicts the seismic data and satisfies some priori information about low frequency content of model.

Bringing EI equation in logarithm domain and using EIs for different angles, a linear inverse problem can be defined and a damped least-square solution can be obtained.

For Bayesian approach, assuming log-normal distribution as priori information about elastic parameters, in logarithm domain, it comes into normal and the posterior distribution will also be normal and model posterior mean and covariance can be expressed explicitly. We select the MAP solution and compare it with damped least-square solution.

For each approach, related software is developed in MATLAB.

Results and Conclusions

The results show that both inversion methods, presented in this paper, are successful in estimation of elastic parameters with a good degree of precision. The deterministic inversion method is multichannel and has a better resolution. Moreover, it is blind and wavelet is taken as an unknown. However, this approach fails in estimation of low-frequency part of parameters but the Bayesian inversion approach recovers the low frequency part very well.