

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

داود کرمی مزین^۱، علی غلامی^{۲*} و حمیدرضا سیاهکوهی^۳

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

چکیده

واژگان کلیدی

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 می توان با استفاده از داده های لرزه ای پیش از برانبارش استخراج نمود. در این مطالعه دو روش وارون سازی این پارامترها مورد مقایسه قرار می گیرد. روش اول روشی قطعی و روش دوم روشی آماری است. در روش اول در مرحله اول با استفاده از الگوریتم وارون سازی لرزه ای کور چندکاناله مدل های مقاومت کشسانی بلوکی با تفکیک پذیری بالا از مقاطع برانبارش زاویه محدود^۱ استخراج می شوند. این وارون سازی بدون اطلاع از موجک چشمه و به صورت کور انجام می شود تا موجک و مدل مقاومت به طور همزمان محاسبه شوند. اهمیت این موضوع هنگامی معلوم می شود؛ که بدانیم این موجک ها به دلیل ناهمسانگردی و طی مسیرهای متفاوت دارای محتوای فرکانسی متفاوت هستند. مرحله دوم شامل وارون مدل های 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 وارون سازی مقاومت ها به پارامترهای کشسانی از طریق روش کمترین مربعات صورت می پذیرد. در روش دوم طی یک مرحله، در چارچوبی بیزین، با استفاده از تقریب خطی معادلات زوپریتس، توزیعی پسین برای هریک از پارامترهای کشسانی بدست می آید. استفاده از توزیع های بدست آمده به روش های گوناگونی انجام می شود. در این مطالعه با استفاده از توزیع های بدست آمده مدل با بیشترین احتمال انتخاب می شود. نتایج بدست آمده از هر دو روش با استفاده از داده مصنوعی و واقعی مورد ارزیابی و بحث قرار می گیرند و مزایا و کمبودهای آنها بیان می شوند.

پارامترهای کشسانی
مقاومت کشسانی
واهمامیخت کور
وارون بلوکی
وارون سازی بیزین

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^۱ 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 وارون سازی 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 وارون سازی غیرخطی برای وارون سازی 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 منظم سازی مسائل وارون غیرخطی بدست آورد.

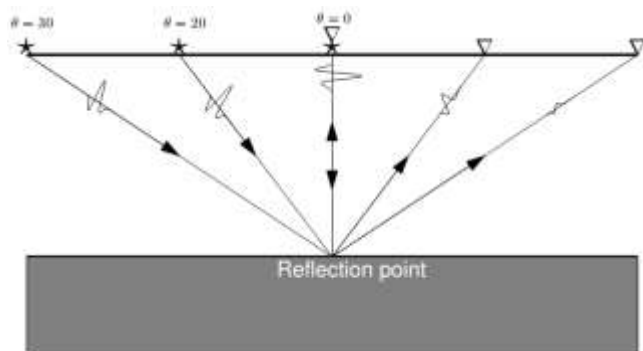
راه دیگر ارایه تقریب خطی از روابط غیرخطی است. به طور مثال معادلات زوپریتس به اشکال مختلفی خطی سازی شده است. یکی از این موارد تقریب Aki-Richard (1985) است؛ که به طور مستقیم امکان وارون سازی خطی پارامترهای کشسانی از داده لرزه‌ای را فراهم می‌آورد. در این مطالعه از دو روش برای برآورد پارامترهای کشسانی استفاده خواهد شد. در روش اول از الگوریتمی چندکاناله‌ای با تفکیک پذیری 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 همایخت 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. بازتابی 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 وارون سازی مقاومت صوتی با تفکیک پذیری بالا ارائه شده است (Gholami, 2015; 2016) که می‌توان از آنها برای وارون سازی مقاومت کشسانی استفاده نمود. در این مطالعه الگوریتم وارون سازی 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. وارون سازی مقاومت کشسانی برای پارامترهای کشسانی به راحتی و از طریق برازش به روش کمترین مربعات انجام می‌شود؛ اما وارون سازی 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 وارون سازی 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 لاگ نرمال 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 همایخت یک موجک چشمه و سری بازتابی مربوطه در نظر گرفته می‌شود.

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

اطلاعات کافی راجع به موجک چشمه خود مسئله 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 تغییر خصوصیات 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 مسئله 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 توم^۱ 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 توم و به همراه داده لرزه‌ای وارون می‌شود. اگر D به عنوان عملگر مشتق مرتبه اول به صورت زیر فرض شود:

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 1 & & \\ & -1 & 1 & \\ & & \dots & \\ & & -1 & 1 \\ & & & -1 & 1 \end{bmatrix} \in R^{(n-1) \times n} \quad (4)$$

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:

$$Y_\theta = W_\theta D X_\theta + \xi_\theta \quad (5)$$

که در آن X_θ لگاریتم مقاومت است. یعنی $X_\theta[i, j] = 0.5 \log EI_\theta[i, j]$

(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 غیر صفر بازتاب می‌شوند؛ ایجاد می‌کند. این کمیت از تقریب خطی Aki-Richards (1985) بدست می‌آید و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$EI = V_p \left(1 + \tan^2 \theta \right) V_s \left(-8K \sin^2 \theta \right) \rho \left(1 - 4K \sin^2 \theta \right) \quad (1)$$

که در آن $K = \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2$ ثابت فرض می‌شود (Connolly, 1999). همچنین داریم:

$$R(\theta) = \frac{EI(t_i) - EI(t_{i-1})}{EI(t_i) + EI(t_{i-1})} \quad (2)$$

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 $R_\theta = \begin{bmatrix} r_\theta^1 & r_\theta^2 & \dots & r_\theta^n \end{bmatrix}$ 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:

$$Y_\theta = w_\theta \#_t R_\theta + \xi_\theta \quad (3)$$

که $\#_t$ بیانگر همامیخت نسبت به زمان، Y_θ مقطع برانبارش 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 مسئله‌ای بدووضع است. بنابراین نیازمند ابزارهای منظم‌سازی پیچیده‌ای است تا پاسخی مناسب برای مسئله پیدا شود. علاوه بر رویارویی با چالش‌هایی که در وارون‌سازی مقاومت کشسانی وجود دارد، داشتن

کرمی مزین و همکاران، تخمین پارامترهای کشسانی از وارون کور چندکاناله مقاومت کشسانی و مقایسه آن با وارون سازی بیزین، صفحات ۱-۱۲.

$$G = \begin{bmatrix} 1+\tan^2\theta_1 & -8K \sin^2\theta & 1-4K \sin^2\theta \\ \dots & \dots & \dots \\ 1+\tan^2\theta_J & -8K \sin^2\theta_J & 1-4K \sin^2\theta_J \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$m = \begin{bmatrix} \log Vp \\ \log Vs \\ \log \rho \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$d = \begin{bmatrix} \log EI(\theta_1) \\ \dots \\ \log EI(\theta_J) \end{bmatrix} \quad (11)$$

حل کمینه مربعات میرا شده^۳ معادله (۸) به صورت $(G^T G + \lambda I)m = G^T d$ خواهد بود؛ که λ پارامتر منظم سازی است و I ماتریس یکانی است. **۲-۳- محاسبه پارامترهای کشسانی به روش وارون سازی خطی AVO به روش بیزین**

وارون سازی بیزی طبق رابطه زیر انجام می شود (Buland and Omre, 2003):

$$p(m | d_{obs}) = \frac{p(d_{obs} | m)p(m)}{p(d_{obs})} \quad (12)$$

در این رابطه $p(m | d_{obs})$ توزیع پسین مدل به شرط d_{obs} ، $p(m)$ توزیع مدل، $p(d_{obs} | m)$ توزیع داده های لرزه ای به شرط مدل m و $p(d_{obs})$ توزیع داده های لرزه ای است.

در واقع $p(d_{obs} | m)$ در بردارنده فیزیک مساله و $p(m)$ 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 می شود.

در روش قبلی (روش قطعی)، مدل سازی داده لرزه ای بر اساس مفهوم مقاومت کشسانی انجام شد؛ اما می توان با استفاده از تقریب های خطی معادلات زوپریتس نظیر تقریب خطی (Aki-Richards 1985)، اقدام به وارون سازی مستقیم داده لرزه ای برای پارامترهای کشسانی نمود.

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

$$c_{pp}(t, \theta) = a_\alpha(\theta) \frac{\partial}{\partial t} \ln \alpha(t) + \quad (13)$$

$$a_\beta(t, \theta) \frac{\partial}{\partial t} \ln \beta(t) + a_\rho(t, \theta) \frac{\partial}{\partial t} \ln \rho(t)$$

که در آن

$$a_\alpha(\theta) = \frac{1}{2} (1 + \tan^2 \theta), \quad (14)$$

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

(به عنوان مثال به (Gholami, 2015) مراجعه نمایید). حل معادله (۵) رفت و برگشت بین حل دو زیرمسئله یکی برای مدل مقاومت و یکی برای موجک است. مدل مقاومت به سنگ شناسی زمین مرتبط است. به همین دلیل در مدل های زمین لایه لایه که دارای لایه بندی 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 منظم سازی تغییرات کلی زیر تعریف می کنیم

$$\operatorname{argmin}_X \|X\|_{TV} \quad s.t. \begin{cases} \|W_\theta - W_\theta DX\|_F^2 \leq \varepsilon \\ X_{low}^\theta = LX \end{cases} \quad (6)$$

که در آن $\|X\|_{TV} = \sum_{ij} \sqrt{(DX)_{i,j}^2 + (XD^T)_{i,j}^2}$ نرم تغییرات کلی نامیده می شود، D^T ترانپوز D و $\|.\|_F$ بیانگر نرم فربنیوس^۱ و $\varepsilon = \|\xi_\theta\|_F^2$ محدوده خطا در داده است و L در معادله (۶) بیانگر یک فیلتر پایین گذر است. با توجه به عدم حضور فرکانس های پایین در داده لرزه ای، یعنی محدوده ۷-۵ هرتز، محدوده پاسخ فرکانسی این فیلتر هم همین بازه انتخاب می شود. همچنین X_{low}^θ محتوی فرکانس پایین مدل مقاومت کشسانی را نشان می دهد. انتظار می رود 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^۲ که در (Gholami 2016) آمده است؛ استفاده می شود؛ تا معادله (۶) حل شود. وقتی تخمین اولیه ای از X_θ بدست آمد، موجک w_θ از طریق واهمامیخت تنک چندکاناله به روز رسانی می شود (Gholami and Sacchi, 2013)؛ (Gholami, 2016). این فرآیند تکرار می شود؛ تا زمانی که اختلاف موجک های متوالی کمتر از یک مقدار از پیش تعیین شده قرار بگیرد.

۲-۲- وارون مقاومت کشسانی برای پارامترهای کشسانی

اگر مقاومت های کشسانی برای زوایای مختلف بدست آمده باشند، از معادله (۱) می توان برای بدست آوردن پارامترهای کشسانی v_p ، v_s و ρ استفاده نمود. مسأله را می توان با خطی سازی معادله (۱) در حوزه لگاریتمی به صورت زیر حل کرد (به طور مثال Connolly, 1999):

$$\log EI_\theta = [1 + \tan^2 \theta] \log Vp - 8K \sin^2 \theta \log Vs + [1 - 4K \sin^2 \theta] \log \rho \quad (7)$$

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

$$d = Gm \quad (8)$$

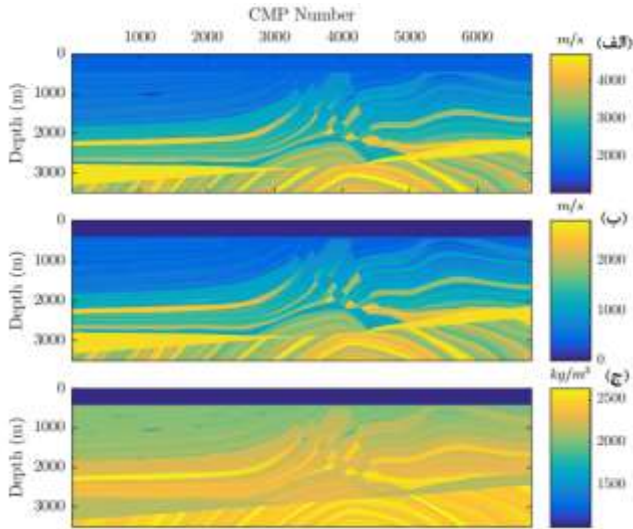
که:

- 1 Frobenius norm
- 2 Split Bergman

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.



شکل ۲: 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 هم‌میخت شدند. موجک‌های مورد استفاده دارای فرکانس‌های ۵، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۸، ۲۴ و ۳۰ درجه هستند. پس از آن نوبه سفید گوسی $5db$ 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 ذکر شده در بالا به ترتیب در شکل ۳ و ۴ آمده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۳ 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.

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

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

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

$$\mathbf{m}'(t) = \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{m}(t) = [\frac{\partial}{\partial t} \ln \alpha(t), \frac{\partial}{\partial t} \ln \beta(t), \frac{\partial}{\partial t} \ln \rho(t)]^T \quad (15)$$

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

$$\mathbf{d}_{obs} = \mathbf{S}\mathbf{c} + \mathbf{e} = \mathbf{S}\mathbf{A}\mathbf{m}' + \mathbf{e} \quad (16)$$

از این رابطه برای مدل‌سازی مقاطع زاویه محدود^۱ استفاده می‌شود. در این رابطه ماتریس $\mathbf{S}$ در بردارنده موجک چشمه برای زوایای مختلف است و $\mathbf{e}$ نوبه تصادفی اضافه شده به داده است. با فرض گوسی بودن توزیع نوبه، $\mathbf{e} \sim N_{n_d}(\mathbf{0}, \Sigma_e)$ و نیز گوسی بودن توزیع پارامترهای مدل، داده هم دارای توزیع گوسی $\mathbf{d}_{obs} \sim N_{n_d}(\mu_{d_{obs}}, \Sigma_{d_{obs}})$ خواهد بود؛ که میانگین و ماتریس کوواریانس آن در روابط زیر آمده است:

$$\mu_{d_{obs}} = \mathbf{S}\mathbf{A}\mu'_m \quad (17)$$

$$\Sigma_{d_{obs}} = \mathbf{S}\mathbf{A}\Sigma'_m\mathbf{A}^T\mathbf{S}^T + \Sigma_e \quad (18)$$

با استفاده از این روابط، و رابطه ببزین (۱۲)، توزیع احتمال پسین، $\mathbf{m} | \mathbf{d}_{obs} \sim N_{n_m}(\mu_{m|d_{obs}}, \Sigma_{m|d_{obs}})$ توزیعی گوسی با میانگین و کوواریانس زیر خواهد بود:

$$\mu_{m|d_{obs}} = \mu_m + (\mathbf{S}\mathbf{A}\Sigma'_m)^T \Sigma_{d_{obs}}^{-1} (\mathbf{d}_{obs} - \mu_{d_{obs}}) \quad (19)$$

$$\Sigma_{m|d_{obs}} = \Sigma_m - (\mathbf{S}\mathbf{A}\Sigma'_m)^T \Sigma_{d_{obs}}^{-1} \mathbf{S}\mathbf{A}\Sigma'_m \quad (20)$$

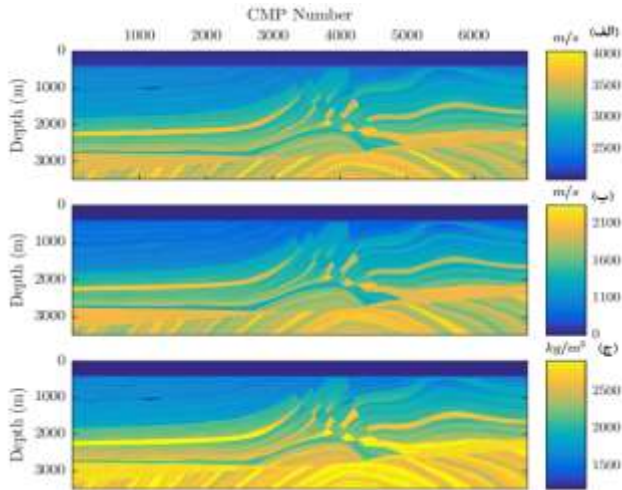
(برای جزئیات بیشتر به Buland and Omre (2003) و یا غلامی و عباسی (۱۳۹۵) مراجعه شود).

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

۳- مثال‌های عددی

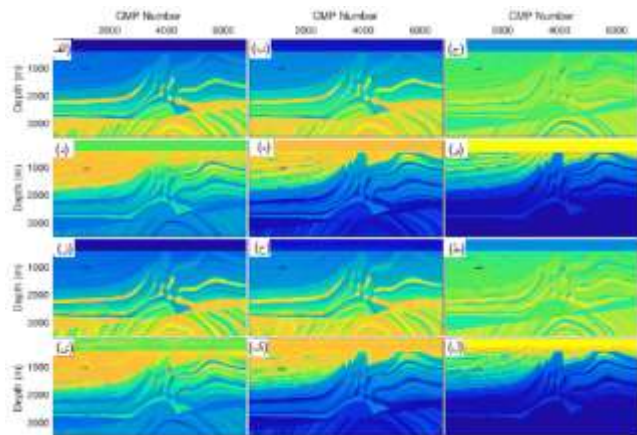
در این بخش با استفاده از داده مصنوعی و نیز داده واقعی کارآمدی روش‌ها مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. برای تولید داده مصنوعی فرضیات اولیه هر روش مورد نظر قرار می‌گیرد. برای روش قطعی که چند کاناله بوده و از فرض بلوکی بودن زمین استفاده می‌کند، بخشی از مدل مارموسی که به عنوان مدلی مرجع استفاده می‌شود، در نظر گرفته شده و برای روش ببزین 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

ت کشسانی و مقایسه آن با وارون سازی بیزین، صفحات ۱-۱۲.



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 می دهد.

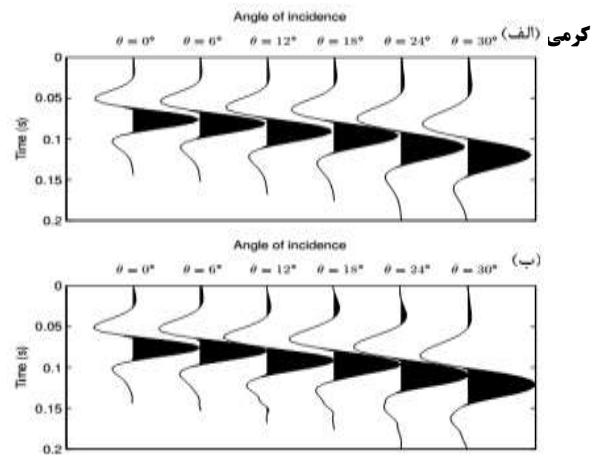
برای آزمودن این روش از نگاره های مصنوعی ساخته شده برای سرعت موج P ، S و چگالی استفاده شده است. از این نگاره ها برای ساخت داده مصنوعی استفاده شده و سپس به داده نوفه $S/N=5db$ اضافه شده است.



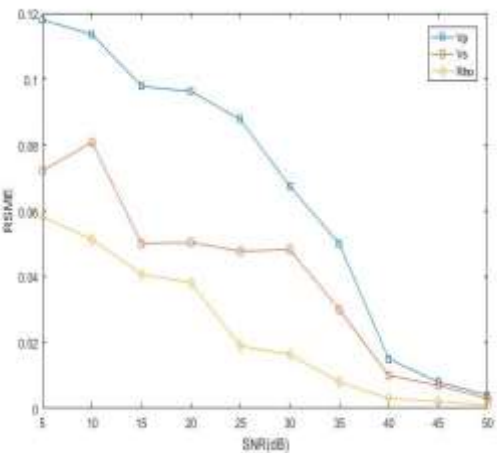
شکل ۶: پارامترهای کشسانی وارون شده با استفاده از مقاومت های کشسانی

شکل ۴-ز-ل. الف) V_p (ب) V_s (ج) ρ . همان گونه که دیده می شود، مرزها و دامنه پارامترهای کشسانی به خوبی برآورد شده اند.

در ساخت این داده ها هم از موجک های مورد استفاده در روش قبل استفاده شده است. نتیجه وارون سازی به همراه مدل های واقعی در شکل ۷ آمده است. همان طور که دیده می شود، نتایج وارون سازی بسیار مطلوب بوده و مدل های اولیه با دقت خوبی برآورده شده اند. بررسی عملکرد روش تحت تاثیر نسبت سیگنال به نوفه های متفاوت در



شکل ۳: الف) موجک های مورد استفاده برای ساخت داده لرزه ای مصنوعی، ب) موجک های برآورد شده. در دورافت های بالاتر اطلاعات لرزه ای بیشتر تضعیف شده و فرکانس غالب کاهش می یابد و در نتیجه موجک کشیدگی بیشتری خواهد داشت. این مطلب در انتخاب موجک ها لحاظ شده است.



شکل ۴: الف-و به ترتیب مربوط به مقاطع مقاومت کشسانی زوایای 0° ، 6° ، 13° ، 18° ، 24° و 30° هستند و ز-ل مربوط به مقاطع برآورد شده. همان طور که دیده می شود، مرزها و دامنه مقاومت های کشسانی به خوبی برآورد شده اند.

با آزمودن پارامترهای منظم سازی مختلف برای این وارون سازی این نکته معلوم شد، که پارامترهای کشسانی حساسیت بالایی نسبت به این پارامتر دارند و انتخاب نامناسب این پارامتر می تواند کیفیت این تخمین ها را به شدت تحت تاثیر قرار دهد. به علاوه این که با انتخاب مناسب پارامتر منظم سازی، در بهترین حالت تنها یکی از پارامترها به خوبی برآورد می شود.

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

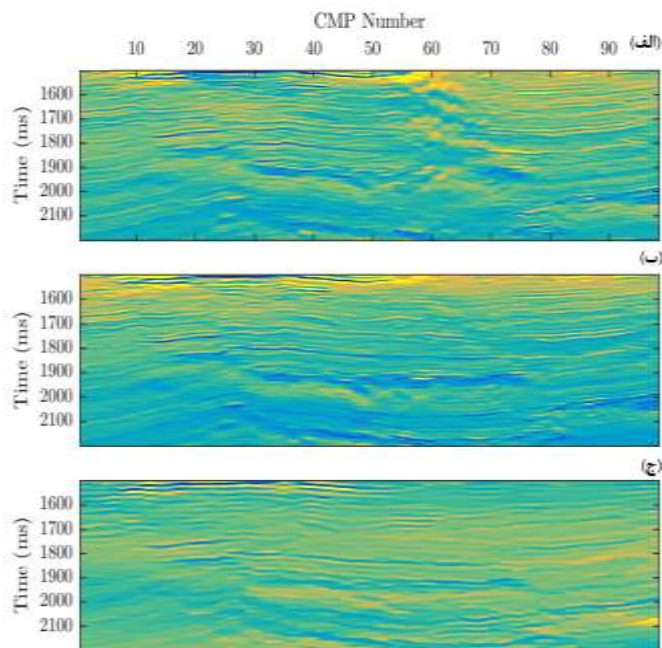
حال در این بخش با استفاده از داده مصنوعی توانایی روش وارون سازی بیزین در برآورد پارامترهای کشسانی مورد بررسی قرار می گیرد.

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۷، شماره ۱، ۱۴۰۰.

لرزه‌ای قرار دارد، که در ارزیابی نتایج وارون‌سازی و نیز ساخت مدل‌های فرکانس پایین مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

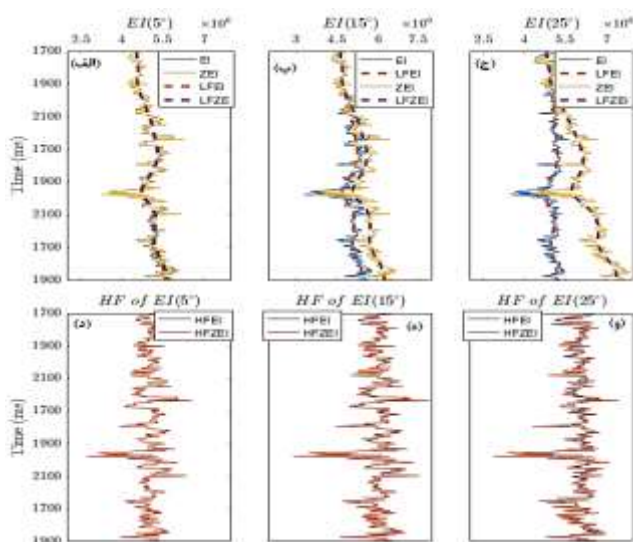
برای بررسی روش قطعی، همانند داده‌های مصنوعی، با استفاده از اطلاعات چاه‌ها مقادیر فرکانس پایین مقاومت در محل چاه‌ها محاسبه گردید و سپس با درون‌یابی مقادیر فرکانس پایین مقاومت در خارج چاه‌ها به کمک رابطه (۱) ساخته شد.

پس از آن مقاطع برای بدست آوردن مقاومت کشسانی وارون شدند، که



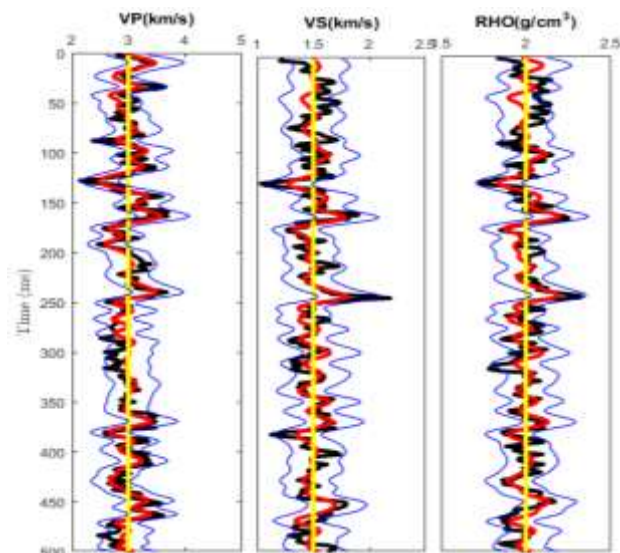
شکل ۷: مقاطع مقاومت کشسانی برآورد شده با استفاده از داده‌های لرزه‌ای شکل ۷

برای الف (۵°، ب (۲۵° و ج (۵۵°

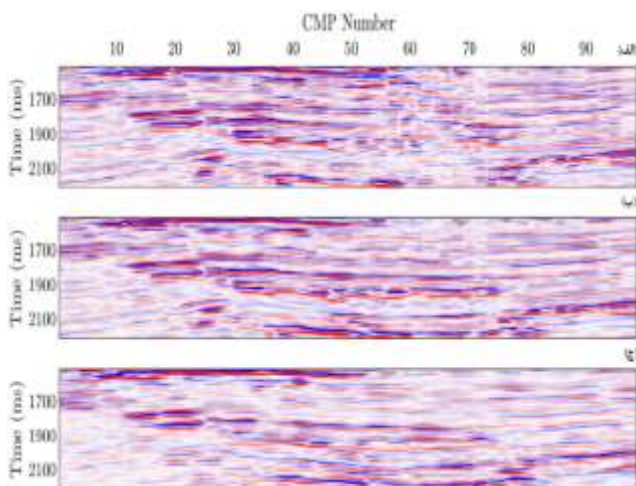


شکل ۸: مقایسه بین مقاومت کشسانی زوپریتس (به رنگ زرد) و مقاوت کشسانی (به رنگ آبی) در نقطه میانی مشترک ۷۴ برای زوایای الف (۵°، ب (۱۵°، ج (۲۵°). در این شکل‌ها روند فرکانس پایین (LF) با خط چین نمایش داده شده است. روند فرکانس بالای (HF) این نمودارها در ردیف پایین (د-و) آورده شده است همزمان هم داده‌ها را پیش‌بینی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

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



شکل ۱۰: مقایسه بین مقاومت 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 همزمان هم داده‌ها را پیش‌بینی کنند و هم فرکانس پایین مدل مقاومت

۴- اعمال روش‌ها بر داده واقعی

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

کرمی مزین و همکاران، تخمین پارامترهای کشسانی از وارون کور چندکاناله مقاومت کشسانی و مقایسه آن با وارون سازی بیزین، صفحات ۱-۱۲.

بدست آمده و نگاره های چاه در نقطه میانی مشترک ۱۰۴ مقایسه شده اند. همان طور که دیده می شود، پارامترهای برآورد شده به شکل قابل قبولی با نگاره های چاه هماهنگی دارند. با استفاده از داده لرزه ای واقعی مورد استفاده پس از آزمایش روش قطعی، روش بیزین هم مورد ارزیابی قرار گرفت. نخست به عنوان اطلاعات اولیه، با استفاده از نگاره های چاه مدل بسیار نرمی ساخته شده و عنوان میانگین مدل پیشین در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از رابطه (۲۰)، میانگین مدل پسین برآورد شده و به عنوان مدل خروجی در نظر گرفته شد. نتایج این وارون سازی در شکل های ۱۲ و ۱۳ آمده است. همان طور که مشاهده می شود، روش در برآورد پارامترهای کشسانی با دقت خوبی موفق عمل می کند. ضریب همبستگی بین نمودارهای چاه با خروجی های بدست آمده از دو

را ارضاء کنند. البته متأسفانه این انتظار برآورده نشد و داده ها به خوبی پیش بینی نشدند. به منظور پیدا کردن علت، با استفاده از نگاره های چاه، مقاومت های کشسانی و مقاومت های کشسانی زوپریتس^۱ برآورد گردیدند (Ma, 2005). در بخش بعد این مفهوم توضیح داده شده است.

$$ZEI[j] = \frac{ZEI[j][1+r[j]]}{[1-r[j]]} \quad (21)$$

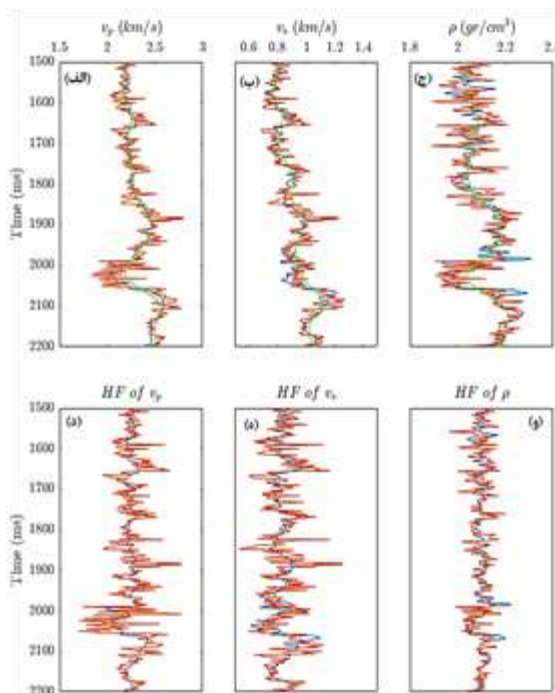
۱-۴ مقاومت کشسانی زوپریتس

منظور از مقاومت کشسانی زوپریتس آن است که با داشتن ضرایب بازتاب دقیق از معادلات زوپریتس، مقاومتی برای لایه های مختلف در نظر گرفته شود؛ که در مرز هر دولایه دلخواه با تقسیم اختلاف مقاومت ها به جمع آنها ضرایب بازتاب دقیق زوپریتس حاصل شود. به عبارت دیگر در هر زایوه دلخواه با داشتن سرعت موج ها و چگالی از نگاره های چاه، با استفاده از معادلات زوپریتس ضرایب بازتاب دقیق محاسبه شده، سپس با استفاده از معادله (۲۱) مقاومت زوپریتس برای لایه ها محاسبه می شود (Ma, 2005).

$$= ZEI[1] \prod_{k=1}^j \frac{1+r[k]}{1-r[k]} \quad (22)$$

مقاومت کشسانی در واقع تقریبی از این مقاومت در زوایای غیر عمود است. در این رابطه ZEI مقاومت کشسانی زوپریتس را نشان می دهد و $ZEI[1]$ مقاومت کشسانی زوپریتس در لایه اول است. مقاومت های زوپریتس و مقاومت های کشسانی مربوطه در نقطه میانی مشترک شماره ۷۴ در شکل ۸ برای زوایای 5° ، 15° و 25° با هم مقایسه شده اند. همان طوری که دیده می شود، در زوایای فرود بالا روند فرکانس پایین مقاومت کشسانی به شدت از مقاومت زوپریتس دور می شود، 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 مؤلفه های فرکانس پایین پارامترهای کشسانی از اطلاعات چاه بدست آورد می شود و به محتوی فرکانس بالای پارامترهای کشسانی اضافه می شود (Berteussen and Ursin, 1983; Cerney and Bartel, 2007; Hamid and Pidlisecky, 2015).

با در نظر گرفتن این رویکرد، شش مقطع برانبارش زایوه محدود 5° ، 15° ، 25° ، 35° و 45° برای وارون سازی مورد استفاده قرار گرفتند؛ که سه مورد آنها به همراه مقاومت های بدست آمده از آنها در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده اند. نتیجه وارون سازی مقاطع مقاومت کشسانی برای پارامترهای کشسانی در شکل ۱۰ آمده است. در شکل ۱۱ پارامترهای



شکل ۱۲: مقایسه پارامترهای کشسانی بدست آمده از داده واقعی در نقطه میانی مشترک ۱۰۴. نگاره های چاه (به رنگ قرمز) و نگاره های برآورد شده (به رنگ آبی) و روند فرکانس پایین نگاره های چاه (به رنگ سبز) در شکل ها آمده است. در ردیف اول (الف-ج)، نتایج پس از تزیق مدل فرکانس پایین نگاره ها و در ردیف دوم بخش فرکانس بالای مدل های برآورد شده از داده لرزه ای، نشان داده شده است.

روش وارون سازی در جدول ۱ آمده است. میزان همبستگی بین پارامترهای بدست آمده از روش قطعی نشان دهنده 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

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۷، شماره ۱، ۱۴۰۰.

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,

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, 74–87. Hamid, 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.

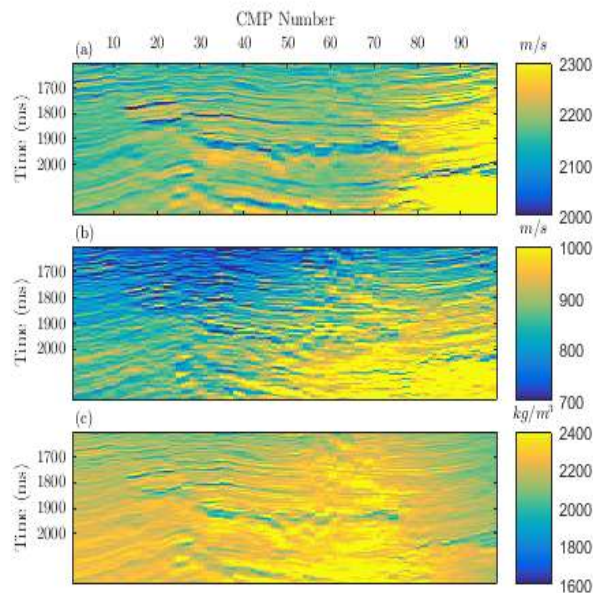
Gholami, A., 2015, Nonlinear multichannel impedance inversion by total-variation regularization: Geophysics, 80(5), R217–R224.

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

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.



شکل ۱۳: پارامترهای کشسانی برآورد شده بر اساس الگوریتم بیزین. الف)

ب) V_p ج) ρ

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 الگوریتم‌های 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

کرمی مزین و همکاران، تخمین پارامترهای کشسانی از وارون کور چندکاناله مقاومت کشسانی و مقایسه آن با وارون سازی بیزین، صفحات ۱-۱۲.

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

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.