وارون‌سازی چندکاناله مقاومت صوتی با استفاده از منظم‌ساز ترکیبی تیخونف-تغییرات کلی

یوسف امیرزاده [۱]، کمال آقازاده[۲]، علی غلامی[۳]
[۱] دانش آموخته کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، yosef.amirzadeh@ut.ac.ir
[۲] دانشجو دکتری، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، aghazade.kamal@ut.ac.ir
[۳] استاد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، agholami@ut.ac.ir

چکیده

مقاومت صوتی لرزه‌ای، از جمله پارامترهای کلیدی در تفسیر داده‌های لرزه‌ای پس از برانبارش است. با فرض پیوسته بودن خصوصیات فیزیکی زمین، یک رابطه غیرخطی بین سری بازتاب زمین و امپدانس صوتی ارائه می‌شود که در حوزه لگاریتم می‌توان آن را خطی‌سازی کرد. تخمین مقاومت صوتی از سری بازتاب زمین را می‌توان به صورت یک مسئله بهینه‌سازی بیان کرد. در این حالت، به جهت حضور نوفه و سایر پارامترهای تشکیل خطا، روش‌های متداول در بازسازی مقاومت صوتی ناکارآمد هستند. برای رفع این مشکل، استفاده از توابع منظم‌ساز با توجه به پیش‌فرض‌های مدل مجهول پیشنهاد می‌شود. در مطالعه حاضر به بررسی عملکرد توابع منظم‌ساز تغییرات کلی و ترکیب آن با منظم ساز تیخونف (ترکیبی) در بازسازی مقطع مقاومت صوتی (به‌صورت چندکاناله) پرداخته می‌شود. پس از ارائه فرمول‌بندی مسئله وارون و الگوریتم حل، علمکرد منظم‌سازها بر روی مدل مصنوعی BP2007 مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده بیانگر بهبود قابل توجه مدل بازسازی شده توسط هریک از منظم‌سازها بوده و در این بین در بازسازی قسمت‌های هموار منظم‌سازی ترکیبی برتری دارد.

واژه‌های کلیدی: وارون سازی مقاومت صوتی، منظم‌ساز تیخونف، منظم‌ساز تغییرات کلی، منظم‌ساز تیخونف-تغییرات کلی

Multi-channel seismic acoustic impedance inversion with Tikhonov-Total variation regularization

Yousef Amirzadeh[1], Kamal Aghazade[2], Ali Gholami[3]
[1] *Institute of Geophysics, University of Tehran*
[2] *Institute of Geophysics, University of Tehran*
[3] *Institute of Geophysics, University of Tehran*

ABSTRACT

Seismic acoustic impedance is an important parameter at the interpretation stage of post-stack seismic data. Assuming that the Earth's elastic parameters vary continuously as a function of depth, a nonlinear equation describes the relationship between the Earth's reflectivity series and acoustic impedance. Estimation of acoustic impedance from post-stack seismic data can be formulated as a linear optimization problem in logarithmic space. Due to the failure of conventional methods in the presence of noise or other sources of errors, using regularization functions is proposed. In this study, we focus on the performance of two regularization methods, namely total variation (TV) regularization and its combination with Tikhonov regularization (TT). After deriving inverse problem and corresponding solution via two regularization approaches, we assess their performance on the synthetic BP2007 benchmark model. The results indicate good performance of both methods. Nevertheless, concerning the smooth parts of the model, the TT method outperforms TV regularizations.

Keywords: Acoustic Impedance Inversion, Tikhonov Regularization, TV Regularization, Tikhonov-TV Regularization

۱ مقدمه

مقاومت صوتی لرزه‌ای (حاصل ضرب سرعت و چگالی) خاصیتی است که با سنگ‌شناسی، تخلخل، پر شدن منافذ و سایر عوامل مرتبط است و تخمین آن با استفاده از اطلاعات لرزه‌ای از جمله اهداف لرزه‌نگاری بازتابی است که برای تفسیر کمی داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (واکر و اولریچ، ۱۹۸۳؛ گوش، ۲۰۰۰). به‌منظور تخمین مقاومت صوتی، محققین روش‌های وارون‌سازی امپدانس

صوتی متنوعی را پیشنهاد داده‌اند. از جمله روش‌های مختلف می‌توان به روش‌های وارون امپدانس صوتی، مانند وارون‌سازی باند محدود (لیندست، ۱۹۷۹) و وارون‌سازی خطی تعمیم یافته (کوک و اشنایدر، ۱۹۸۳) که رویکرد منظم ساز تیخونف است اشاره کرد. در سال‌های اخیر، به جهت کاستن از بدوضعی مسئله وارون مرتبط با تخمین مقاومت صوتی، اضافه کردن اطلاعات اولیه و قیدها در قالب توابع منظم‌سازی، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به ضعف منظم‌سازی مبتنی بر نرم ۲، منظم‌ساز تغییرات کلی به‌صورت جایگزین مورد استفاده قرار گرفته است (وانگ، ۲۰۱۰؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴). در غالب روش‌های وارون‌سازی متداول، فرآیند وارون‌سازی به‌صورت تک کاناله اجرا می‌شود و اجازه بهینه سازی نقشه امپدانس صوتی را نمی‌دهند. همچنین، این روش‌ها به راحتی تحت تأثیر حضور نوفه در داده قرار گرفته و نتایجی آغشته به نوفه را ارائه می‌دهند. نتیجه آن ضعف این‌گونه روش‌ها در بازسازی ویژگی‌های مهم زمین شناسی است. برخی از محققان روش وارون‌سازی امپدانس صوتی چند کاناله را مطرح می‌کنند (غلامی، ۲۰۱۵). در مطالعه حاضر، به بررسی عملکرد روش‌های مختلف منظم‌سازی در وارون‌سازی مقاومت صوتی به‌صورت چندکاناله پرداخته می‌شود. در این راستا، منظم‌سازی‌های تغییرات کلی و ترکیب آن با منظم‌ساز تیخونف (غلامی و حسینی، ۲۰۱۳) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برخلاف منظم‌سازی‌های دیگر به‌صورت انفرادی، ترکیب منظم‌سازی‌های تیخونف-تغییرات کلی ویژگی‌های سیگنال همانند همواری و ناپیوستگی را با هم درنظر می‌گیرد که این منظم‌ساز را در مقابل سایر منظم‌سازها برجسته‌تر می‌کند.

۲ مبانی تئوری

با فرض پیوسته بودن زمین (تغییرات پیوسته پارامترهای الاستیک با عمق) و برخورد موج به صورت عمودی به مرز یک لایه زیرسطحی، یک رابطه‌ی غیرخطی سری‌بازتاب زمین را به مقاومت صوتی لایه مرتبط می‌کند (فاستر، ۱۹۷۵). با گسسته‌سازی رابطه، سری بازتاب لایه jام ($r[j]$) به‌صورت زیر قابل بیان است:

$$r[j]=\frac{1}{2}\log\frac{z[j+1]}{z[j]},$$

که در آن $z=\rho[j]v[j]$، امپدانس صوتی و $\rho[j]$ و $v[j]$ به ترتیب چگالی و سرعت لایه jام می‌باشد. با معرفی متغیر $x[j]=(1/2)\log z[j]$ رابطه (۱) را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\mathbf{r}=\mathbf{D}_1\mathbf{x},$$

که درآن $\mathbf{D}_1$ عملگر مشتق اول می‌باشد. معادله (۲) را می‌توان در چارچوب یک مسئله بهینه سازی با منظم‌ساز به‌صورت زیر بیان کرد:

$$\mathbf{x}=\min_{x}\Phi(x)\ \text{where}\ \Phi(x)=\frac{1}{2}\|\mathbf{r}-\mathbf{D}_1\mathbf{x}\|_2^2+\lambda R(x)+\frac{\gamma}{2}\|\mathbf{x}_{low}-\mathbf{F}\mathbf{x}\|_2^2,$$

که در آن $\lambda,\gamma>0$ پارامتر منظم‌ساز، $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ تابع منظم‌ساز، $\mathbf{x}_{low}$ مدل فرکانس پایین که از طریق داده‌های چاه و سرعت‌های پردازش لرزه‌ای به دست می‌آید (سرنی و بارتل، ۲۰۰۷) و $\mathbf{F}$ عملگر فیلتر پایین‌گذر است. با جایگذاری $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ با تابع منظم‌ساز تغییرات کلی ،تابع هزینه آورده شده در رابطه (۳) به ترتیب صورت زیر خواهد بود:

$$\Phi_{TV}(x)=\frac{1}{2}\|\mathbf{r}-\mathbf{D}_1\mathbf{x}\|_2^2+\lambda\|\mathbf{D}_1\mathbf{x}\|_1+\frac{\gamma}{2}\|\mathbf{x}_{low}-\mathbf{F}\mathbf{x}\|_2^2,$$

ترکیب منظم‌سازی تیخونف-تغییرات کلی مدل مجهول $\mathbf{x}$ را به‌صورت ترکیب دو قسمت بلوکی ($\mathbf{x}_1$) و هموار ($\mathbf{x}_2$) در نظر می‌گیرد؛ $\mathbf{x}=\mathbf{x}_1+\mathbf{x}_2$ و به‌صورت جداگانه به بازسازی قسمت‌های بلوکی و هموار می‌پردازد. تابع هزینه به‌صورت زیر قابل بیان است:

$$\Phi_{TT}(x)=\frac{1}{2}\|\mathbf{r}-\mathbf{D}_1(\mathbf{x}_1+\mathbf{x}_2)\|_2^2+\lambda\left(\mu\|\mathbf{D}_1\mathbf{x}_1\|_1+\|\mathbf{D}_2\mathbf{x}_2\|_2^2\right)+\frac{\gamma}{2}\|\mathbf{x}_{low}-\mathbf{F}(\mathbf{x}_1+\mathbf{x}_2)\|_2^2,$$

که $\mathbf{D}_2$، عملگر مشتق مرتبه دوم است.

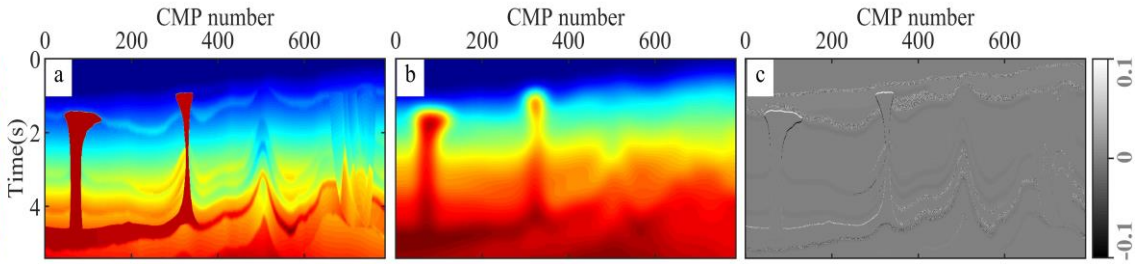
در این مطالعه در حل منظم‌سازی‌های مبتنی بر نُرم ۱ از روش کمترین مربعات وزندار تکراری (IRLS) (دوبچیز، ۲۰۱۰) استفاده شده است که مشتق تابع مبتنی بر نرم ۱ را به صورت تکراری توسط ساخت و اعمال یک ماتریس وزن‌دهی انجام می‌دهد. الگوریتم روش IRLS جهت حل رابطه (۵) برای منظم‌سازهای نرم ۱، در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. الگوریتم IRLS برای حل رابطه (۴) با قید منظم‌ساز TV	
(1)	Set $k = 0, Q^0 = I_n, x^0 = 0, \lambda, \gamma > 0$
(2)	Solve $\left(\mathbf{D}_1^T\mathbf{D}_1 + \frac{\lambda}{2}\mathbf{D}_1^T\mathbf{Q}^k\mathbf{D}_1 + \gamma\mathbf{F}^T\mathbf{F}\right)\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{D}_1^T\mathbf{r} + \gamma\mathbf{F}^T\mathbf{x}_{low}$
(3)	Define $\mathbf{Q}^{k+1} = \underset{i=1...n}{\mathrm{diag}}\left(\frac{1}{\sqrt{\left[\mathbf{D}_1\mathbf{x}^{k+1}\right]_i^2 + \varepsilon}}\right)$
(4)	If $\left\|\mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}^k\right\| < \mathrm{tol}$ stop else $k = k+1$ & go to step 2
(5)	$\mathbf{z} = \exp(2\mathbf{x})$

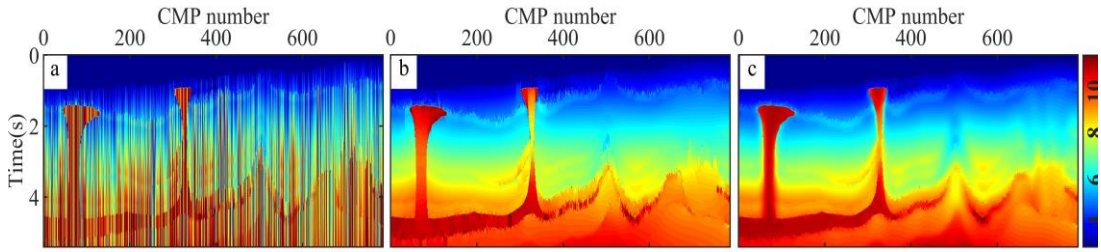
جدول ۲. الگوریتم IRLS جهت حل رابطه ۵ با قید منظم‌ساز تیخونف-TV	
(1)	Set $k = 0, Q^0 = I_n, \lambda, \mu > 0$
(2)	Solve $\begin{bmatrix} \mathbf{D}_1^T\mathbf{D}_1 + \frac{\lambda\mu}{2}\mathbf{D}_1^T\mathbf{Q}^k\mathbf{D}_1 & \mathbf{D}_1^T\mathbf{D}_1 + \gamma\mathbf{F}^T\mathbf{F} \\ \mathbf{D}_1^T\mathbf{D}_1 + \gamma\mathbf{F}^T\mathbf{F} & \mathbf{D}_1^T\mathbf{D}_1 + \lambda\mathbf{D}_2^T\mathbf{D}_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1^T\mathbf{r} + \gamma\mathbf{F}^T\mathbf{x}_{low} \\ \mathbf{D}_1^T\mathbf{r} + \gamma\mathbf{F}^T\mathbf{x}_{low} \end{bmatrix}$
(3)	Define $\mathbf{Q}^{k+1} = \underset{i=1...n}{\mathrm{diag}}\left(\frac{1}{\sqrt{\left[\mathbf{D}_1\mathbf{x}_1^{k+1}\right]_i^2 + \varepsilon}}\right)$
(4)	$\mathbf{x} = \mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2$
(5)	If $\left\|\mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}^k\right\| < \mathrm{tol}$ stop else $k = k+1$ and go to 2
(6)	$\mathbf{z} = \exp(2\mathbf{x})$

مثال‌های عددی

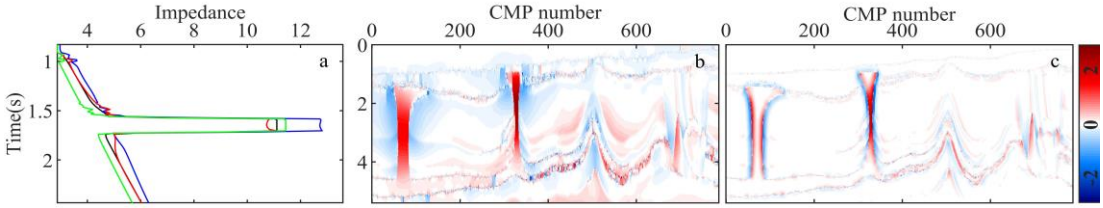
در این بخش، عملکرد سه منظم‌ساز ذکر شده در وارون‌سازی مقاومت صوتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از مدل مصنوعی BP 2007 (شکل ۱a) برای بررسی عملکر منظم‌سازها استفاده شده است. مدل فرکانس پایین و سری بازتاب آغشته به نوفه گوسی با SNR=15 به ترتیب در شکل‌های (۱b) و (۱c) نمایش داده شده است. نتایج بدست آمده با استفاده از منظم‌سازی مختلف در شکل (۲) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مسئله وارون بدون استفاده از منظم سازی قادر به بازسازی مقطع مقاومت صوتی نیست (شکل ۲a). در مقابل استفاده از توابع منظم به‌صورت قابل توجهی کیفیت مقاومت صوتی تخمین زده شده را بهبود داده است (شکل‌های ۲b و ۲c). در این بین، منظم‌سازی ترکیبی (شکل ۲c) نسبت به منظم‌سازی تغییرات کلی (شکل ۲b) عملکرد بهتری در بازسازی بخش‌های مختلف مقاومت صوتی داشته است. همچنین، اختلاف بین مدل اصلی و مدل بازسازی شده به کمک منظم‌سازها و بخشی از cmp شماره ۱۲۸ در شکل (۳) نمایش داده شده است که تایید کننده برتری منظم‌ساز ترکیبی است.



شکل ۱. (a) مدل امپدانس BP 2007، (b) مدل فرکانس پایین، (c) سری بازتاب نوفه‌دار



شکل ۲. (a) مدل امپدانس بازسازی شده بدون منظم‌ساز، (b) مدل امپدانس بازسازی شده با منظم‌ساز تغییرات کلی، (c) مد امپدانس بازسازی شده با منظم‌ساز تیخونف-تغییرات کلی



ل ۳. (a) بخشی از cmp ۱۲۸. خط مشکلی مدل اصلی- خط سبز مدل بازسازی شده بدون منظم‌ساز- خط آبی مدل بازسازی منظم‌ساز تغییرات کلی- خط قرمز مدل بازسازی شده با منظم‌ساز تیخونف-تغییرات، (b) اختلاف بین مدل اصلی امپدانس با ه ازی شده به کمک منظم‌ساز تغییرات کلی، (c) اختلاف بین مدل اصلی امپدانس با مدل بازسازی شده به کمک منظم‌ساز تیخ تغییرات کلی

۳ نتیجه‌گیری

در این مطالعه، عملکرد منظم‌سازهای تغییرات کلی و ترکیب تیخونف-تغییرات کلی در بازسازی مقاومت صوتی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که عدم استفاده از منظم‌سازی نتایجی آغشته به نوفه را ارائه می‌دهد. هر دو منظم‌ساز استفاده شده از عملکرد خوبی برخوردار هستند. منظم‌ساز تغییرات کلی در بازسازی لبه‌ها موفق بوده ولی باعث میرا شدن مناطق هموار شده است ولی منظم‌ساز تیخونف-تغییرات کلی در بازسازی لبه‌ها و مناطق هموار موفق‌تر عملکر کرده است. همچنین اختلاف بین مدل اصلی با مدل‌های بازسازی شده بیان می‌کند مدل امپدانس صوتی محاسبه شده به کمک منظم‌ساز تیخونف-تغییرات کلی به مدل اصلی شبیه‌تر است.

منابع

Cerney, B., and D. Bartel, 2007, Uncertainties in lowfrequency acoustic impedance models: *The Leading Edge*, 26, 74–87.

Cooke, D. A., and Schneider W. A., 1983, Generalized linear inversion of reflection seismic data, *Geophysics* **48**, 665–76.

Daubechies, I., R. DeVore, M. Fornasier, and S. Gunturk, 2010, Iteratively re-weighted least squares minimization for sparse recovery: *Communications on Pure and Applied Mathematics*, **63**, 1–38.

Foster, M., 1975, Transmission effects in the continuous one-dimensional seismic model: *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **42**, 519–527.

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

Gholami, A., and S. Hosseini, 2013, A balanced combination of Tikhonov and total variation regularizations for reconstruction of piecewise smooth signals: *Signal Processing*, **93**, 1945–1960.

Ghosh, S. K., 2000, Limitations on impedance inversion of band- limited reflection data, *Geophysics*, **65**, 951–7.

Goldstein, T., and S. Osher, 2009, The split Bregman method for l1 regularized problems: *SIAM Journal on Imaging Sciences*, **2**, 323–343.

Lindseth, R., O., 1979, Synthetic sonic logs—a process for stratigraphic interpretation: *Geophysics* **44**, 3–26.

Walker, C., and Ulrych., T. J., 1983, Autoregressive recovery of the acoustic impedance: *Geophysics*, **48**, 1338–50.

Wang, Y. F., 2010, Seismic impedance inversion using l(1)-norm regularization and gradient descent methods: *J. Inverse IllPosed Problems*, **18**, 823–38.

Zhang, F., Dai, R., and Liu, H., 2014, Seismic inversion based on L1- norm misfit function and total variation regularization: J. Appl. *Geophys*. **109**, 111–8.