پیش‌بینی سرعت زیر چاه توسط وارون غیرخطی امپدانس صوتی داده‌های ZVSP

احمد امینی[1] و یاسر فاضل بیدگلی[2]

[1]دانشجوی دکترای لرزه‌شناسی موسسه ژئوفیزیک/دانشگاه تهران، amini1.a@ut.ac.ir
[1]کارشناس بخش ژئومکانیک/شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، amini1.a@nisoc.ir
[2]فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد ژئومغناطیس موسسه ژئوفیزیک/دانشگاه تهران، y_fazel@yaoo.com

چکیده

در این مقاله روشی برای پیش‌بینی امپدانس زیر چاه، جلوتر از مته حفاری به کمک خروجی ردلرزه حاصل از راهروی برانبارش روی جبهه موجهای بالارونده داده VSP دورافت صفر، پیشنهاد می‌گردد. وارون تکرار غیرخطی برای وارونسازی امپدانس، به کمک روش گرادیان مزدوج (CG) پیش‌شرطی و تغییر فاکتور میرایی برای اطمینان از پایداری و همگرایی نتایج وارون انجام می‌گیرد. روش CG پیش شرطی با کاهش تعداد حالات ماتریس هسیان، نرخ همگرایی را بهبود می‌دهد و روش لونبرگ-مارکوارت، فاکتور میرایی را به طور خودکار در هر تکرار محاسبه می‌نماید. اثربخشی این روش برای پیش‌بینی قبل از حفاری به کمک داده‌های VSP، توسط مدلهای نظری و واقعی نشان داده می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: وارون تکراری غیرخطی، روش گرادیان مزدوج پیش‌شرطی، VSP دورافت صفر، امپدانس صوتی

Velocity prediction under TD by nonlinear acoustic impedance inversion of zero-offset ZVSP data

Ahmad Amini[1], Yaser Fazel Bidgoli[2]

[1] University of Tehran, Institute of Geophysics; Geomechanic department of NISOC
[2]University of Tehran, Institute of Geophysics

Abstract

In this paper proposed a method of predicting the impedance below the borehole in front of the bit using output seismic trace by corridor stack on upgoing wavefronts of zero-offset VSP data. The method of nonlinear iterative inversion using the preconditioned conjugate gradient method and modifying the damping factor in order to sure the stability and convergence of the inversion results is carried out. The preconditioned CG method with decreasing condition number of the Hessian matrix, improves the convergence rate. Levenberg-Marquardt method, calculates the damping factor automatically in each iteration. Theoretical models and actual data show the effectiveness of this method for pre-drilling prediction using VSP data.

Keywords: zero-offset VSP, impedance inversion, non-linear iterative inversion, damping factor, pre-conditioned conjugate gradient method, acoustic impedance

1 مقدمه

پردازش حاصل از VSP می‌تواند محیط زیرسطحی را با دقت بالاتری نسبت به روش لرزه‌ای سطحی معمول توصیف نماید. به ویژه در مرحله حفاری، نقش مهمی در پیش‌بینی عمق لایه هدف و مشخصه‌های سنگ‌شناسی لایه‌بندیهای عمیق در جلوی مته حفاری بازی می‌نماید. بنابراین استفاده از داده‌های VSP برای پیش‌بینی جلوتر از مته حفاری، یک موضوع رایج گردیده است. دقت پیش‌بینی قبل از حفاری توسط VSP، غالباً به امپدانس وارون‌یافته و دقت سرعت تکیه دارد.

برای روشهای وارون غیرخطی بر پایه مدل همامیخت، از آنجا که وارون تکراری دارای الگوریتمی ساده است و به نوفه لرزه‌ای حساس نیست (زانگ، 2002)، به طور وسیع استفاده شده است. اما بهبود همگرایی، دقت و پایداری این روش هنوز مساله‌ای مهم برای تحقیق می‌باشد. در این مقاله، از روش وارون غیرخطی برای وارونسازی داده VSP برای امپدانس و پیش‌بینی سرعت استفاده می‌گردد. به منظور پایداری و سرعت محاسباتی، روش گرادیان مزدوج (CG) پیش‌شرطی برای بهبود شرط ماتریس هسیان استفاده می‌گردد. این روش همچنین می‌تواند نرخ همگرایی را شتاب بخشد. برای معقول کردن تعیین فاکتور میرایی، در هر تکرار تصحیح می‌گردد و عناصر قطری ماتریس هسیان تغییر داده می‌شود تا از همگرایی اطمینان یابیم. نتایج مدل نظری و داده واقعی نشان می‌دهند که این روش برای وارونسازی امپدانس از داده‌های VSP موثر است.

2 روش تحقیق

وارون‌سازی تکراری غیرخطی تریس لرزه‌ای

خروجی حاصل از راهروی برانبارش VSP دورافت صفر به صورت تک ردلرزه‌ای، حاصل واهامیخت ضرایب بازتابش لایه‌ها و موجک لرزه‌ای می‌باشد:

$$s_i = \sum_{j=1}^{N} r_j w_{i-j+1} = \sum_{j=1}^{N} \frac{z_{j+1}-z_j}{z_{j+1}+z_j} w_{i-j+1} \quad i,j = 1,2,\dots,N \qquad (1)$$

برای حل معادله غیرخطی فوق، ابتدا مساله وارون را به مساله بهینه‌سازی تبدیل می‌کنیم به گونه‌ای که خطای بین داده واقعی و مصنوعی کمینه گردد. بنابراین تابع حداقل مربعات زیر، تعریف می‌گردد (هو و همکاران، 2000):

$$f(\boldsymbol{z}) = \|\boldsymbol{s}'(\boldsymbol{z}) - \boldsymbol{s}\| \qquad (2)$$

که باید کمینه شود. امپدانس z، پارامتر وارون تعیین‌نشده، $\boldsymbol{s}'(\boldsymbol{z})$ داده مصنوعی محاسبه شده توسط z و s داده واقعی مشاهده شده است. به کمک سری تیلور، تابع $f(\mathbf{z})$ به صورت زیر حول $\mathbf{z}^{(k)}$ تا درجه دوم بسط می‌یابد:

$$f(\boldsymbol{z}) = f(\boldsymbol{z}^{(k)}) + \left[\boldsymbol{g}^{(k)}\right]^T \Delta\boldsymbol{z} + \frac{1}{2}\Delta\boldsymbol{z}^T \boldsymbol{H}^{(k)} \Delta\boldsymbol{z} \qquad (3)$$

که $\Delta\boldsymbol{z}$ مقدار تصحیح برای امپدانس در هر مرحله تکرار می‌باشد. $\boldsymbol{g}^{(k)}$ بردار گرادیان در $\boldsymbol{z}^{(k)}$، $\boldsymbol{H}^{(k)}$، ماتریس هسیان محدود مثبت در $\boldsymbol{z}^{(k)}$، به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$\left[\boldsymbol{g}^{(k)}\right]^T = \left[\frac{\partial f(\boldsymbol{z}^{(k)})}{\partial z_1} \; \frac{\partial f(\boldsymbol{z}^{(k)})}{\partial z_2} \cdots \frac{\partial f(\boldsymbol{z}^{(k)})}{\partial z_N}\right] \qquad (4)$$

$$H^{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{z}^{(k)})}{\partial^2 z_1} & \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{z}^{(k)})}{\partial z_1 \partial z_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{z}^{(k)})}{\partial z_1 \partial z_N} \\ \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{z}^{(k)})}{\partial z_2 \partial z_1} & \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{z}^{(k)})}{\partial^2 z_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{z}^{(k)})}{\partial z_1 \partial z_N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{z}^{(k)})}{\partial z_N \partial z_1} & \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{z}^{(k)})}{\partial z_N \partial z_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{z}^{(k)})}{\partial^2 z_N} \end{bmatrix} \qquad (5)$$

با کمینه سازی رابطه 5 برای تابع هدف و بر اساس روش تکرار نیوتن، معادله زیر را برای امپدانس در k امین تکرار:

$$\Delta\mathbf{z} = \mathbf{z}^{(k+1)} - \mathbf{z}^{(k+1)} = -[\mathbf{H}^{(k)}]^{-1}\mathbf{g}^{(k)} \qquad (6)$$

حاصل می‌شود. با داشتن اولین مدل امپدانس، معادله (فوق) به صورت بازگشت‌پذیر حل می گردد تا جایی که $\|\Delta\mathbf{z}\| < \varepsilon$ (ε ثابت داده شده است). به منظور بهبود سرعت محاسباتی و تضمین پایداری حل معادله6، روش CG پیش شرطی برای کاهش تعداد حالت ماتریس هسیان استفاده می‌شود. این روش نرخ همگرایی را شتاب می‌دهد. فلوی کاری روش CG پیش‌شرطی (شکل1) روی داده‌ها اعمال شد (برای مثال، میجرینک و وان در ورست، 1977).

مدل مصنوعی و داده واقعی

شکل2، دو موجک با فازهای مختلف را نشان می‌دهد. فرکانس غالب آنها (40Hz) و پهنای باند و طیف دامنه، مشابهند که اطمینان می‌دهد که موجکها، مختلف ولی دارای توان تفکیک یکسان می‌باشند. مدل حاصل از داده‌های مصنوعی به کمک دو موجک در شکل2 و نتیجه وارون در شکل 3، نشان داده شده‌اند. امپدانس وارون‌یافته و واقعی به طور اساسی برای موجکهای مختلف، مشابهند. ضرائب همبستگی برای اندازه‌گیری میزان شباهتشان مقادیر نزدیک به 100٪ را نشان می‌دهد. در نتیجه وارون موجک برای فازهای مختلف، دقیق و پایدار است.

به منظور مطالعه حساسیت نویزی این روش، مقادیر متفاوت نویز به داده‌های لرزه‌ای افزوده شد و نتیجه تغییرات وارون-سازی مشاهده گردید. شکل4، لرزه‌نگاشت مصنوعی با نسبتهای S/N متفاوت و شکل5، نتایج وارون برای داده‌های مصنوعی موجک فاز کمینه را نشان می‌دهند.

برای وارون‌سازی امپدانس داده‌های VSP دور افت صفر، معمولاً یک موجک را از جبهه‌موج پایین‌رونده استخراج می‌کنیم و جبهه‌موج بالارونده را با عملگر واهمامیخت استخراج شده از جبهه‌موج پایین‌رونده، همامیخت می‌کنیم. بنابراین، چندگانه‌ها می‌توانند حذف گردند و شکل هر دو موجک استخراج شده و موجک حاصل از جبهه‌موج بالارونده مشابه می‌باشد. در این صورت، یک فیلتر باندگذر به داده‌های برانبارش در امتداد راهروی حاصل از جبهه‌موج بالارونده اعمال می‌گردد تا فرکانسهای پایین غیر معتبر و نویزهای فرکانس بالا حذف گردند. به کمک این دیدگاه، وارون امپدانس به این برانبارش اعمال می‌گردد. چگالی می‌تواند از داده‌های نمودار چگالی (RHOB) و یا فرمول گاردنر بدست آید. در اینصورت بر پایه داده‌های نمودار صوتی و منحنی سرعت محاسبه شده از اولین رسیدهای VSP، سرعت وارون‌یافته کالیبره می‌گردد. نتایج وارون‌یافته می‌توانند برای پیش‌بینی سرعت سازند جلوی مته حفاری استفاده گردند.

برای اعتبارسنجی قابلیت پیش‌بینی این روش، داده‌های واقعی چاه 11 منصورآباد مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های برانبارش در امتداد راهرو VSP به کمک یک مدل امپدانس آغازین ساخته شده و موجک استخراج شده، وارون‌سازی شد. مدل آغازین از سرعت محاسبه شده اولین رسیدهای VSP ساخته شد. فرمول گاردنر برای تبدیل سرعت به امپدانس استفاده گردید تا مدل امپدانس آغازین ساخته شود. مدل اولیه نه تنها پایه وارون‌سازی تکراری می‌باشد بلکه همچنین روند فرکانس پایین غائب را نیز تهیه می‌کند.

شکل6، داده VSP دورافت صفر را بعد از جداسازی جبهه‌موج، جبهه‌موجهای پایین‌رونده و بالارونده بعد از واهمامیخت و جبهه‌موج بالارونده بعد از تبدیل به زمان دوطرفه نشان می‌دهد. این ثبت شامل اطلاعات بالا و پایین چاه، وارون‌سازی شد. نتایج وارون درون‌چاهی می‌تواند استفاده گردد تا پیش‌بینی انجام گیرد. عمق نهایی برداشت (2846- متر) در شکل نشان داده شده است. بعد از تبدیل امپدانس وارون‌یافته به سرعت، آنرا با منحنی سرعت محاسبه شده از اولین رسیدهای VSP و داده‌های نمودار کالیبره می‌کنیم. پیش‌بینی از عمق 2846- متری تا چند صد متر زیر چاه انجام شد. در شکل7 منحنی آبی‌رنگ، سرعت پیش‌بینی شده و منحنی سبز، نمودار صوتی اندازه‌گیری شده است. روند دو منحنی به طور واضح مشابه هستند.

3 نتیجه‌گیری

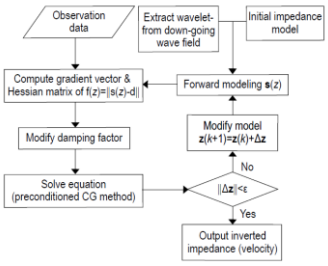
نتایج حاصل از آزمایش داده‌های مصنوعی و واقعی روشن می‌سازند که 1) وارون تکراری غیرخطی بر پایه ردلرزه‌ای، روشی موثر در وارون‌سازی می‌باشد. در مقایسه با وارون خطی، وارون تکراری غیرخطی حاصل از بسط جملات درجه دوم بسط تیلور می‌تواند دقت محاسباتی را بهبود بخشد. به کمک روش CG پیش شرطی می‌توان تعداد حالات ماتریس هسیان را کاهش و نرخ همگرایی را بهبود داد. 2) وارون تکراری غیرخطی می‌تواند به سادگی برای حل مسائل پایداری وارون به کار رود. به کمک روش مارکوارت-لونبرگ، فاکتور میرایی به طور خودکار در هر تکرار محاسبه می‌گردد تا ماتریس هسیان حل گردد و پایداری وارون بهبود یابد. 3) نتایج تحلیل داده‌های مدل مصنوعی و واقعی نشان می‌دهند که این روش معتبر و موثر است.

منابع

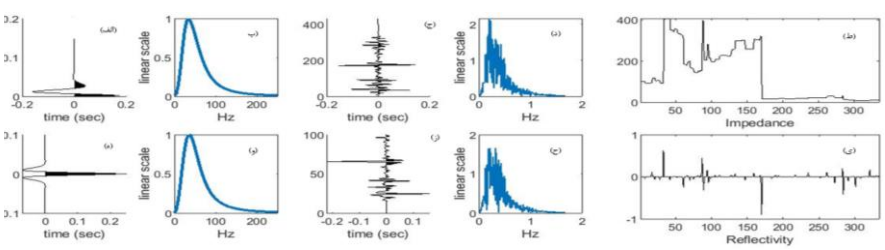
Meijerink, J. A., and Van Der Vorst, H. A., 1977, An iterative solution method for linear system of which the coeffi cient matrix is a symmetric M-Matrix: Math Comp, 31, 148 – 162.

Zhang, Y. G., 2002, The present and future of wave impedance inversion technique: Geophysical Prospecting for Petroleum (in Chinese), 41(4), 385 – 390.

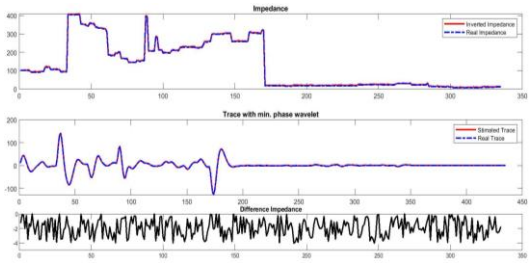
Wang, J., Liu, Y., Sun, Z., Tian, H., Su, H., Zhao, Q. H., and Liu, Y. Y., 2009, Acoustic impedance inversion of zerooffset VSP data: Applied Geophysics, 6(2), 150 – 158.



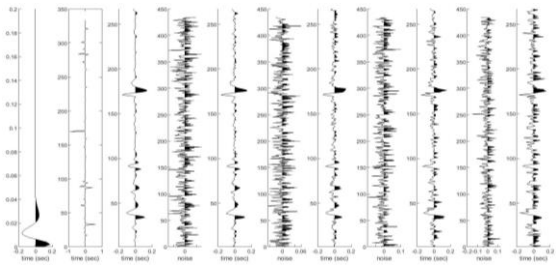
شکل1. فلوچارت وارون تکراری غیرخطی (وانگ و همکاران، 2009)



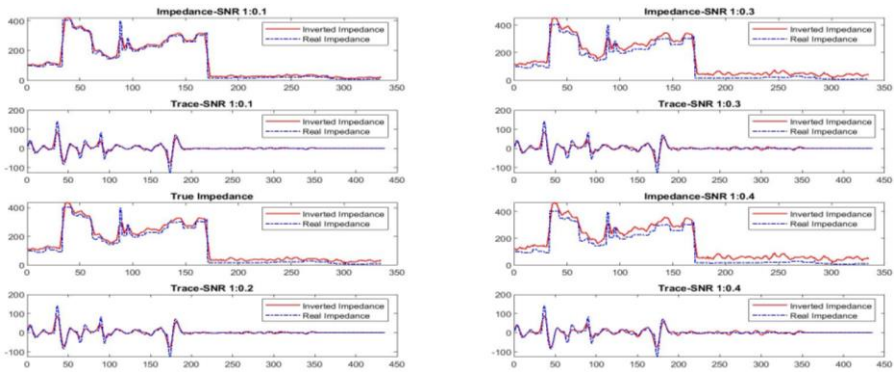
شکل2. موجکها با دو نوع فاز مختلف و طیف دامنه دامنه‌اشان. (الف) و (ب)، به ترتیب، موجک فاز کمینه و طیف دامنه‌اش، (ه) و (و)، موجک فاز صفر و طیف دامنه‌اش. دو لرزه نگاشت مصنوعی با دو نوع فاز مختلف و طیف دامنه‌اشان. (ج) و (د)، لرزه نگاشت مصنوعی فاز کمینه و طیف دامنه‌اش، (ز) و (ح)، لرزه نگاشت مصنوعی فاز صفر و طیف دامنه‌اش. (ط) و (ی)، امپدانس و بازتابندگی برای تولید لرزه‌نگاشت مصنوعی.



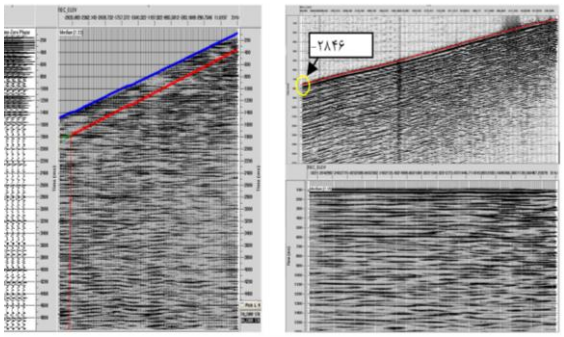
شکل3. مقایسه نتایج بدست آمده توسط وارون امپدانس از داده‌های شکل2. بالا، امپدانس وارون شده و امپدانس واقعی؛ وسط، لرزه‌نگاشت حاصل از امپدانس تخمین زده شده و لرزه‌نگاشت واقعی و پایین، تفاوت امپدانس وارون شده و امپدانس واقعی.



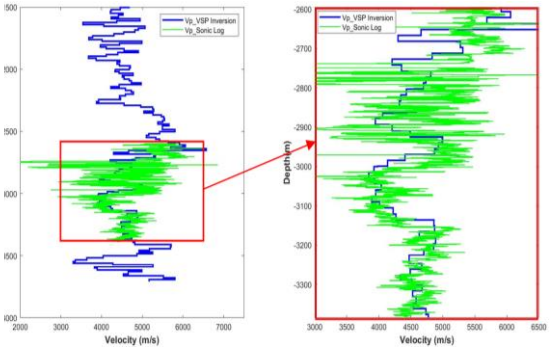
شکل4. لرزه‌نگاشت مصنوعی با نویز. از چپ به راست: موجک فاز کمینه، سری زمانی بازتابی، لرزه‌نگاشت بدون نوفه، نوفه و لرزه‌نگاشت حاصل با نسبتهای S/N=1:0.1، S/N=1:0.2، S/N=1:0.3 و S/N=1:0.4.



شکل5. مقایسه نتایج وارون امپدانس و لرزه‌نگاشت مصنوعی با موجک فاز کمینه برای S/N های متفاوت شکل4.



شکل6. سمت راست-بالا، داده واقعی VSP دورافت صفر. سمت راست-پایین، جبهه‌موج پایین‌رونده جداسازی شده و سمت چپ، جبهه‌موج بالارونده بعد از تصحیح زمان دوطرفه به همراه راهروی برانبارش انتخاب شده و ردلرزه نهایی.



شکل 7. سمت چپ، مقایسه بین سرعت پیش‌بینی شده و سرعت سازند محاسبه شده با نمودار صوتی و سمت راست، شکل بزرگ شده مستطیل قرمز رنگ.