



وارون سازی زمان سیر امواج لرزه‌ای برای محاسبه سرعت موج تراکمی در توموگرافی لرزه‌ای

بین چاهی

سعید آفتاب^۱، رسول حمیدزاده مقدم^۲، احسن لیسی^۳، نوید شادمانمان^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، saeedaftab1996marand@gmail.com

۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، hamidzadeh@sut.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، ahsan.leisi.1995@gmail.com

۴- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، shadmanaman@sut.ac.ir

چکیده

روش توموگرافی لرزه‌ای بین چاهی روشی مهم برای دستیابی به توزیع سرعت موج تراکمی در سازندهای زیر سطحی می‌باشد. یکی از مهم ترین دلایل استفاده از توموگرافی لرزه‌ای قابلیت ثبت امواج فرکانس بالا در این روش می‌باشد که می‌توان تصاویر با وضوح بالا را تهیه نمود. در این پژوهش کارایی توموگرافی لرزه‌ای برای دو مدل مصنوعی بررسی گردید. برای مدل سازی مستقیم توموگرافی لرزه‌ای و محاسبه زمان سیر امواج از روش Fast Marching Method (FMM)، و برای وارون سازی زمان سیر از الگوریتم گاوس-نیوتن جهت محاسبه سرعت موج تراکمی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که این دو روش در شبیه سازی لرزه‌ای موثر می‌باشد و در نتایج وارون به خوبی مدل اصلی بازسازی شده است و قسمت های مختلف مدل قابل تفکیک هستند. الگوریتم وارون سازی گاوس- نیوتن در طی تکرارهای مختلف میزان خطا را کمینه کرده و به پایداری مطلوبی رسیده است. پوشش امواج لرزه‌ای در محیط مورد مطالعه نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید که تراکم امواج لرزه‌ای در محیط های پرسرعت بیشتر و در محیط های کم سرعت کمتر است که مطابق با واقعیت می‌باشد.

کلمات کلیدی

- توموگرافی لرزه‌ای
- مدل سازی مستقیم
- وارون سازی
- پایتون

Traveltime inversion to compute P-wave velocity in crosswell seismic tomography

Saeed Aftab¹, Rasoul Hamidzadeh Moghaddam², Ahsan Leisi³, Navid Shadmanaman⁴

1- PH.D. Student, Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, saeedaftab1996marand@gmail.com

2- Associate Professor, Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, hamidzadeh@sut.ac.ir

3- PH.D. Student, Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, ahsan.leisi.1995@gmail.com

2- Associate Professor, Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, shadmanaman@sut.ac.ir

KEYWORDS	ABSTRACT
<ul style="list-style-type: none"> • Crosswell seismic tomography • Traveltime forward modelling • Traveltime inversion • python 	<p>The Crosswell seismic tomography is an essential method to reach P-wave velocity distribution in subsurface structures. One of the significant reasons for using Crosswell seismic tomography ability to record high-frequency seismic waves to create high-resolution images of the subsurface. For forward modeling of Traveltime tomography Fast Marching Method (FMM), and for inversion of Traveltime to reach P-wave velocity Gauss-Newton algorithm has been used. Results showed that the FMM and Gauss-Newton algorithms are effective for simulation Crosswell seismic tomography. Obvious that the inversion results reconstructed the main models acceptably and different parts of the model distinguishable. The Gauss-Newton algorithm during iterations minimized the inversion error and reached reasonable stability. The seismic ray's coverage in studied media showed that the seismic rays attracted by high-velocity zones and for low-velocity zones the seismic ray's coverage is poor.</p>

۱ مقدمه

شناسایی خواص الاستیک زیر سطحی با استفاده از توموگرافی لرزه‌ای بین دو چاه از مهم‌ترین و مرسوم‌ترین بخش‌های یک پروژه اکتشافی است [۱]. روش‌های برداشت داده‌های لرزه‌ای به سه صورت انجام می‌گیرد: ثبت داده‌های لرزه‌ای بازتابی، انکساری و توموگرافی لرزه‌ای. یکی از محدودیت‌های مهم روش‌های لرزه‌ای اثر لایه سطحی هوازده و میرایی امواج با فرکانس‌های بالا می‌باشد. روش توموگرافی لرزه‌ای تکنیکی است تا بتوانیم به این محدودیت‌ها غلبه کنیم [۲]. در این روش فرستنده‌ها در یک چاه و گیرنده‌ها در چاه دیگر قرار می‌گیرند و می‌توان در این روش امواج لرزه‌ای با فرکانس بالا را ثبت نمود تا تصاویری با وضوح بالا از داخل زمین تهیه نمود. به دلیل شباهت با توموگرافی اشعه-ایکس، این روش به نام توموگرافی لرزه‌ای شناخته شده است. ولی در توموگرافی لرزه‌ای محدودیت‌هایی وجود دارد که در توموگرافی اشعه-ایکس وجود ندارد. در توموگرافی لرزه‌ای موقعیت فرستنده‌ها و گیرنده‌ها ثابت هستند و نمی‌توان مثل توموگرافی اشعه-ایکس فرستنده‌ها و گیرنده‌ها را حول محیط مورد مطالعه چرخش داد. محدودیت دیگر این است که در توموگرافی لرزه‌ای امواج لرزه‌ای در محیط دچار شکستگی و انحراف می‌شوند و تغییر مسیر می‌دهند و این تغییر مسیر ناشی از ناهمگن بودن محیط مورد مطالعه می‌باشد [۱]. توموگرافی لرزه‌ای در زمینه‌های مختلفی استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان به مانیتورینگ مخازن هیدروکربنی [۳]، مطالعه آب‌های زیرزمینی [۴] و تصویرسازی منابع معدنی [۵] اشاره نمود. در سالیان اخیر متخصصان ژئوفیزیک به طور موفقیت آمیزی توموگرافی لرزه‌ای را برای شناسایی تغییرات سرعت موج تراکمی در داخل زمین به کار گرفته اند و می‌توان با استفاده از این پارامتر اطلاعاتی از خصوصیات ژئومکانیکی را در محیط مورد مطالعه به دست آورد [۶]. همچنین آنالیز همزمان سرعت موج تراکمی و برشی می‌تواند در طبقه‌بندی لیتولوژیکی بسیار موثر واقع شود [۷]. در این مقاله، هدف در مرحله اول مدل‌سازی مستقیم (مدل‌سازی پیشرو) زمان سیر امواج لرزه‌ای در توموگرافی لرزه‌ای بین چاهی می‌باشد و سپس وارون‌سازی زمان برای به دست آوردن سرعت موج تراکمی انجام شده است تا با استفاده از شناسایی تغییرات سرعت موج تراکمی بتوانیم تصویر درستی از محیط مورد مطالعه به دست آوریم. برای انجام این مدل‌سازی (شبیه‌سازی) و وارون‌سازی از زبان برنامه نویسی پایتون استفاده شده است. در این مدل‌سازی سعی شده است تا شرایط واقعی یک برداشت مثل وجود نویز، انحراف امواج لرزه‌ای و اثر مسیر امواج لرزه‌ای در نظر گرفته شود.

۲ روش‌شناسی تحقیق

یکی از مسائل اساسی در اکتشافات لرزه‌ای محاسبه‌ی دقیق زمان سیر امواج لرزه‌ای در یک محیط می‌باشد. الگوریتم مهم و بسیار کاربردی که در این زمینه وجود دارد روش Fast Marching Method (FMM) است. روش FMM که اخیراً در صنعت اکتشاف توسعه داده شده است، از روش تفاضل محدود برای حل معادله موج در یک محیط شبکه بندی شده استفاده می‌کند [۸]. از این روش می‌توان برای مدل‌سازی زمان سیر موج لرزه‌ای استفاده کرد (مدل‌سازی مستقیم). روش FMM به صورت زیر بیان می‌شود:

$$|\nabla_x T| = s(x) \quad (1)$$

که در رابطه (۱) عملگر گرادیان، T زمان و $s(x)$ بیانگر عکس سرعت می باشد. بعد از محاسبه زمان سیر موج لرزه‌ای، سرعت موج تراکمی با استفاده از وارون سازی زمان سیر موج لرزه‌ای به دست می آید. برای این منظور از الگوریتم وارون سازی گاوس-نیوتن استفاده شده است. مزیت مهم الگوریتم گاوس-نیوتن این است که می تواند برای وارون سازی انواع داده‌های ژئوفیزیکی استفاده شود [۹].

در این جا هدف از وارون سازی که در واقع نوعی بهینه سازی می باشد، کمینه سازی خطا است. برای اینکه نتایج وارون سازی با دقت کافی همراه باشد باید قیدهای مناسب تعریف شود. مدل ریاضی کمینه سازی به صورت زیر است [۱۰]:

$$\|W_d(Am - d)\|_2^2 + \lambda \|W_m(m - m_0)\|_2^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

که در رابطه (۲) W_d ماترسی وزن دهی شامل خطای داده‌های وارون، W_m ماتریس قیدهای مدل، m_0 مدل اولیه (مدل پس زمینه)، m پارامترهای مدل، d داده‌ها، A عملگر مدل سازی مستقیم (کرنل) و λ فاکتور کاهش ابعاد (فشرده سازی) می باشد. الگوریتم گاوس-نیوتن به این صورت است که در تکرارهای مختلف با کاهش خطا، مدل‌ها را به سمت مدل واقعی سوق می دهد. الگوریتم گاوس-نیوتن به صورت بیان می شود:

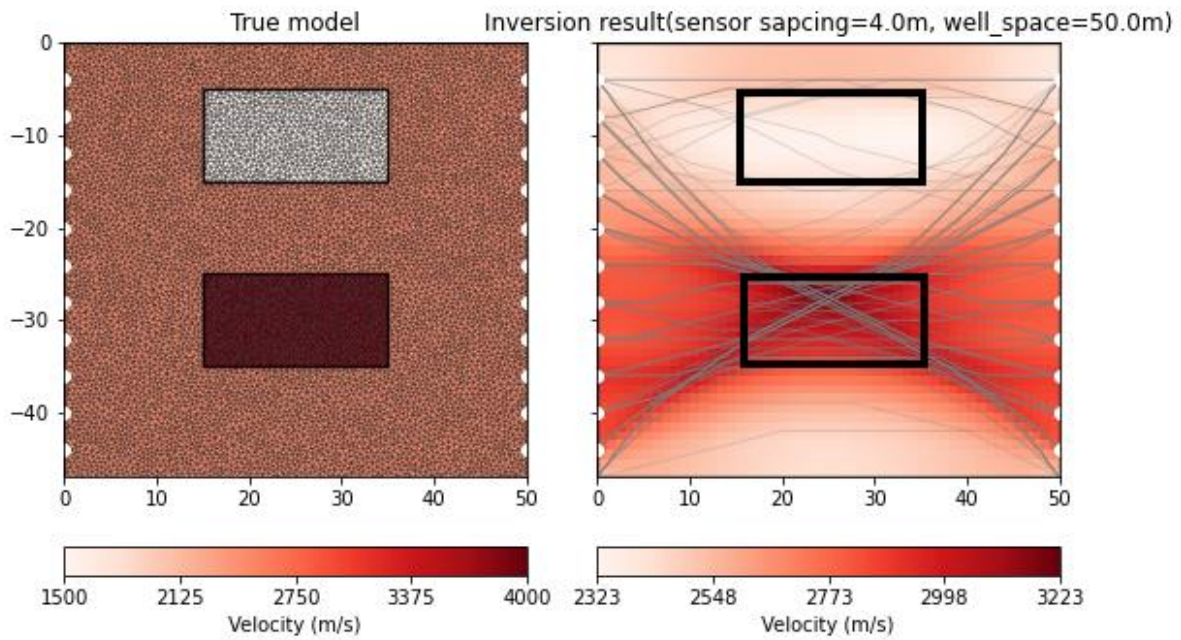
$$(J^T W_d^T W_d J + \lambda W_m^T W_m) \Delta m^k = J^T W_d^T W_d (\Delta d^k) - \lambda W_m^T W_m (m^k - m_0) \quad (3)$$

$$\text{With } \Delta d^k = d - Am^k \quad \text{and } \Delta m^k = m^k - m^{k-1}$$

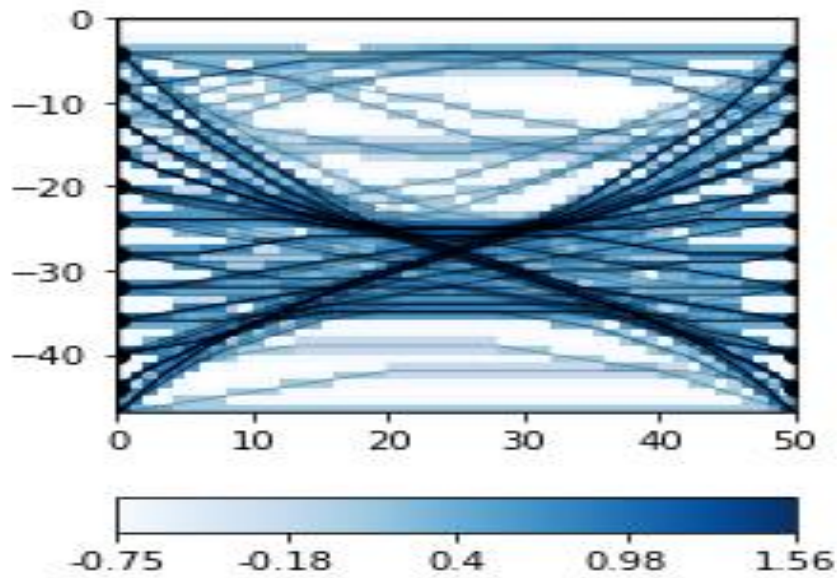
که در رابطه (۳) J ماتریس ژاکوبین داده‌ها و k بیانگر تکرار است [۱۰، ۱۱، ۱۲].

۳ بحث و نتایج تحقیق

برای شبیه سازی توپوگرافی لرزه‌ای دو مدل مصنوعی در نظر گرفته شده است. این دو مدل شامل دو بلوک می باشد که سرعت موج تراکمی در یکی از بلوک‌ها کمتر از سرعت موج تراکمی محیط بوده و در بلوک دیگر بیشتر از سرعت موج تراکمی محیط است. در مدل اول و دوم آرایش بلوک‌ها با یکدیگر متفاوت است. برای طراحی مدل‌های مصنوعی نیز دوچاه در نظر گرفته شده است که فاصله چاه‌ها از یکدیگر ۵۰ متر می باشد. در یک چاه فرستنده‌ها با فاصله ۴ متر از یکدیگر و در چاه دیگر گیرنده‌ها با همین فاصله از یکدیگر در نظر گرفته شده است. در مدل اول بلوک‌ها در زیر هم و در مدل دوم بلوک‌ها به صورت افقی در مجاورت هم قرار دارند. مدل اول و نتیجه وارون سازی در شکل ۱ و پوشش امواج لرزه‌ای برای این مدل در نشان شکل ۲ نشان داده شده است.

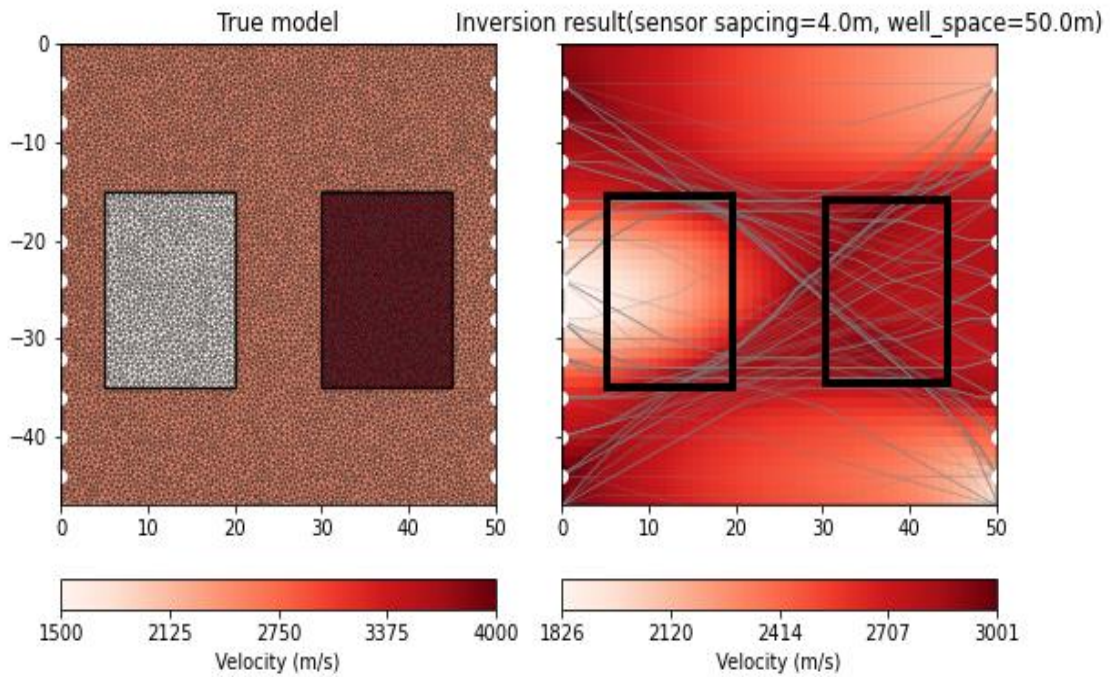


شکل ۱: مدل مصنوعی اول و نتیجه وارون‌سازی حاصل شده. موقعیت بلوک‌ها در نتیجه وارون با کادرهای سیاه نشان داده شده است.

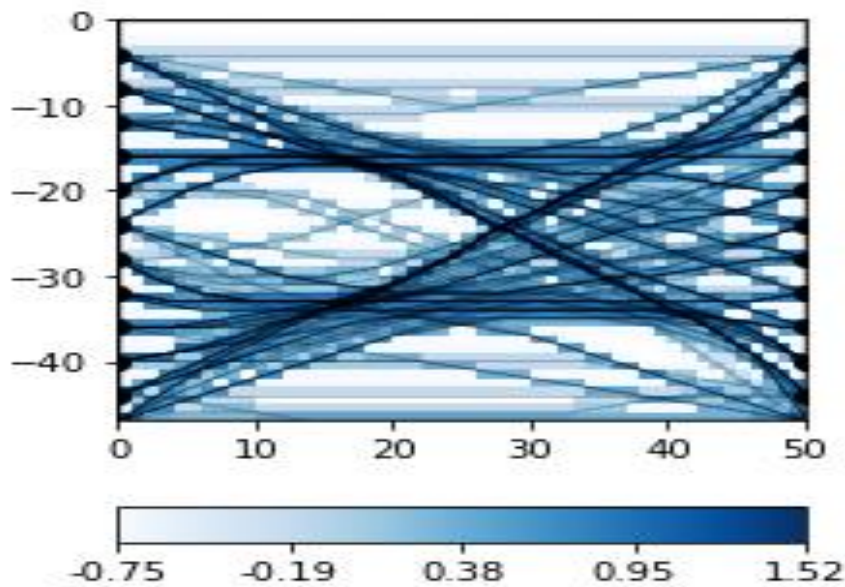


شکل ۲: پوشش امواج لرزه‌ای برای مدل اول.

مدل دوم و نتیجه وارون‌سازی آن در شکل ۳ و پوشش امواج لرزه‌ای برای این مدل در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳: مدل مصنوعی دوم و نتیجه وارون‌سازی حاصل شده. موقعیت بلوک‌ها در نتیجه وارون با کادرهای سیاه نشان داده شده است.

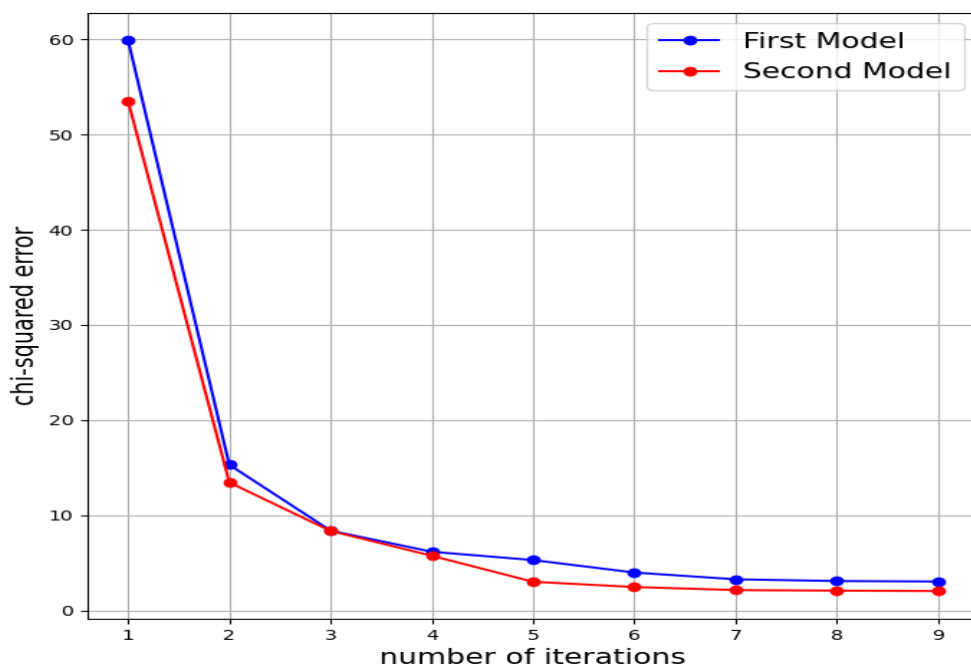


شکل ۴: پوشش امواج لرزه‌ای برای مدل مصنوعی دوم.

همانطور که در شکل ۱ و شکل ۳ مشاهده می‌شود، نتیجه وارون‌سازی سیمای مربوط به مدل‌های مصنوعی را به درستی نشان می‌دهد و قسمت‌های پرسرعت و کم سرعت از یکدیگر قابل تفکیک هستند و موقعیت بلوک‌ها در نتایج وارون توسط کادر نشان داده شده است. آنچه که مهم است توجه به مسئله مدل‌سازی مستقیم است که در مدل‌سازی مستقیم باید زمان سیر امواج لرزه‌ای محاسبه گردد. باید توجه شود که تا حد ممکن شرایط واقعی یک برداشت در شبیه‌سازی لحاظ گردد. در نظر گرفتن این شرایط ما را در انجام مدل‌سازی مستقیم با دقت بیشتری یاری می‌کند. در این شبیه‌سازی شرایط واقعی تا حد امکان در نظر گرفته شده است. در نتایج وارون برای هر دو مدل در شکل ۱ و شکل ۳ تغییر مسیر امواج لرزه‌ای با وارد شدن به محیط‌های مختلف کاملاً مشهود است. نتایج وارون به طور مناسبی موقعیت بلوک‌ها را

بیان می‌کند و الگوریتم گاوس-نیوتن به طور قابل قبولی مدل اصلی را بازسازی کرده است. اما اثر مسیر امواج لرزه‌ای (Ray Path Effect) موجب می‌شود تا هندسه بلوک‌ها به خوبی قابل مشاهده نباشد. باید توجه کرد که در نظر گرفتن اثر مسیر از واقعیت‌های یک برداشت توموگرافی لرزه‌ای است و باید در تفسیرها لحاظ گردد. در شکل ۲ و شکل ۴ پوشش امواج لرزه‌ای برای هر دو مدل نمایش داده شده است و بیانگر این واقعیت است که امواج لرزه‌ای تمایل به عبور از قسمت‌های پرسرعت را دارند تا مسیر در کمترین زمان ممکن طی شود. در شکل‌ها نیز قابل مشاهده است که میزان عبور امواج از قسمت‌های پرسرعت بیشتر بوده و در قسمت‌های کم سرعت کمتر است.

در شکل ۵ نمودار مربوط به کمینه‌سازی خطا برای هر دو مدل در طی فرایند وارون‌سازی نشان داده شده است و خطا به طور قابل توجهی کاهش پیدا کرده و الگوریتم گاوس-نیوتن به همگرایی رسیده است. برای بررسی میزان خطا در مدل‌های وارون از معیار Chi-Squared Error استفاده شده است.



شکل ۵: میزان خطا در تکرارهای مختلف وارون‌سازی برای هر دو مدل.

۴ نتیجه‌گیری

در این مقاله توموگرافی لرزه‌ای بین‌چاهی شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی برای مدل‌سازی مستقیم که همان محاسبه زمان سیر امواج لرزه‌ای است، از الگوریتم Fast Marching Method (FMM)، و برای وارون‌سازی زمان سیر جهت محاسبه سرعت موج تراکمی از الگوریتم وارون‌سازی گاوس-نیوتن استفاده شده است. در مدل‌سازی مستقیم تا حد امکان شرایط یک برداشت واقعی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند که توموگرافی لرزه‌ای بین‌چاهی روش مناسبی برای تهیه تصویر از سازندهای زیر سطحی با وضوح بالا می‌باشد و می‌توان توزیع سرعت موج تراکمی را پیدا کرد. این شبیه‌سازی بر روی دو مدل مصنوعی مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج وارون‌سازی به خوبی مدل‌های اصلی را بازسازی کردند. میزان خطای حاصل از وارون‌سازی برای هر دو مدل با استفاده از الگوریتم گاوس-نیوتن به طور قابل توجهی کاهش پیدا کرده است و الگوریتم به همگرایی و پایداری در تولید نتیجه رسیده است. پوشش امواج لرزه‌ای در هر دو مدل نشان داد که امواج لرزه‌ای در محیط‌های پرسرعت تراکم بیشتری نسبت به محیط‌های کم سرعت دارد. پس قبل از هر برداشت صحرائی واقعی پیشنهاد می‌شود تا شبیه‌سازی انجام شود و پارامترهای برداشت به صورت بهینه انتخاب گردد.

۵ مراجع

- [1] Zhou, B., Greenhalgh, S., and Green, A., 2008. Nonlinear travelt ime inversion scheme for crosshole seismic tomography in tilted transversely isotropic media. *Geophysics*, 73(4), pp.V17–V33.
- [2] Bregman, N.D., Bailey, R.C., and Chapman, C.H., 1988. Crosshole seismic tomography. *Geophysics*, 54(2), pp.V200-V215.
- [3] Sung Lee, D., Stevenson, V.M., Johnston, P.F., and Mullen, C.E., 1995. Time-lapse crosswell seismic tomography to characterize flow structure in the reservoir during the thermal stimulation. *Geophysics*, 60(3), pp. V660-V665.
- [4] Zelt, C.A., Azaria, A., and Levander, A., 2006. 3D seismic refraction travelt ime tomography at a groundwater contamination site. *Geophysics*, 71(5), pp.V67–V78.
- [5] Malehmir, A., Tryggvason, A., Wijns, C., Koivisto, E., Lindqvist, T., Skyttä, P., and Montonen, M., 2018. Why 3D seismic data are an asset for exploration and mine planning? Velocity tomography of weakness zones in the Kevitsa Ni-Cu-PGE mine, northern Finland. *Geophysics*, 83(2), pp. V33–V46.
- [6] Parra, J.O., and Hackert, C.L., 2006. Permeability and porosity images based on P-wave surface seismic data: Application to a south Florida aquifer. *Journal of Geophysical Research*, 42(W02415), pp.V1-V14.
- [7] Bauer, k., Schulze, a., Ryberg, T., Sobolev, S.V., and Weber, M.H., 2003. Classification of lithology from seismic tomography: A case study from the Messum igneous complex, Namibia. *Journal of Geophysical Research*, 108(9), pp.V1-V15.
- [8] Ronczka, M., Hellman, K., Günther, T., Wisén, R., and Dahlin, T., 2017. Electric resistivity and seismic refraction tomography: a challenging joint underwater survey at Äspö Hard Rock Laboratory. *Solid Earth*, 13, pp.V671-V682.
- [9] Rawlinson, N., and Sambridge, M., 2005. The Fast Marching Method: An Effective Tool for Tomographic Imaging and Tracking Multiple Phases in Complex Layered Media. *Exploration Geophysics*, 36(4), pp.V341-V350.
- [10] Rückera, C., Güntherb, T., and Wagner, F.M., 2017. pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. *Computers and Geosciences*, 109, pp.V106-V123.
- [11] Cockett, R., Kang, S., Heagy, L.J., Pidlisecky, A., and Oldenburger, D.W., 2015. SimPEG: An open source framework for simulation and gradient based parameter estimation in geophysical applications. *Computers and Geosciences*, 85, pp.V142-V154.
- [12] Schaa, R., Gross, L., and Plessis, J., 2016. PDE-based geophysical modelling using finite elements: examples from 3D resistivity and 2D magnetotellurics. *Journal of Geophysics and Engineering*, 13(2), pp.V59–V73.