

مقایسه وارون‌سازی تصادفی داده‌های لرزه‌ای بازتابی در شرایط پایا و ناپایا

حمید ثابتی^{۱*}، علی مرادزاده^۲، فرامرز دولتی اردیجانی^۳، آمیلکار سوارس^۴

^۱استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند و دانشآموخته دکتری دانشگاه صنعتی شهرورد، sabeti@birjandut.ac.ir

^۲استاد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، a_moradzadeh@ut.ac.ir

^۳استاد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، fdoulati@ut.ac.ir

^۴استاد، گروه نفت، استیتو فنی عالی، دانشگاه لیسبون، asoares@tecnico.ulisboa.pt

چکیده

وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای به امپدانس صوتی کاربرد وسیعی در علم لرزه‌شناسی اکتشافی دارد. در سالهای اخیر، روش‌های وارون‌سازی تصادفی، پیشرفت چشمگیری داشته است. در این مقاله، روشی برای وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای کلی در دو حالت پایا و ناپایا ارائه شده است. نتایج بکارگیری این الگوریتم‌ها بر روی یک مجموعه داده مصنوعی نشان می‌دهد که در الگوریتم وارون‌سازی ناپایا، بهبود قابل توجهی در توزیع فضایی مقادیر امپدانس حاصل شده است. اعتبارسنجی نتایج وارون‌سازی توسط دو چاه آزمون نیز توانایی بالاتر الگوریتم وارون‌سازی ناپایا را در مقایسه با الگوریتم پایا به اثبات رسانیده است. این موضوع با کاهش خطای وارون‌سازی در حالت ناپایا نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: امپدانس صوتی، وارون‌سازی تصادفی، زمین‌آمار، پایا، ناپایا

Comparison between stochastic seismic inversion in stationary and non-stationary conditions

Hamid Sabeti^{1*}, Ali Moradzadeh², Faramarz Doulati Ardejani³, Amilcar Soares⁴

¹Assistant professor, Birjand University of Technology and PhD graduate, Shahrood University of Technology

²Professor, School of Mining, College of Engineering, University of Tehran

³Professor, School of Mining, College of Engineering, University of Tehran

⁴Professor, Petroleum Group, CERENA, Instituto Superior Técnico, University of Lisbon

...

Abstract

Seismic inversion to acoustic impedance is widely used in exploration seismology. In recent years, stochastic seismic inversion has been developed significantly. In this paper, a global stochastic inversion is presented in stationary and non-stationary conditions. Application of the methods to a synthetic dataset shows considerable improvement in spatial distribution of acoustic impedance values in non-stationary method. Validation based on two blind well tests also confirms this improvement according to decreasing RMS error in case of non-stationary.

Keywords: Acoustic impedance, stochastic inversion, geostatistics, stationary, non-stationary

۱ مقدمه

وارون‌سازی لرزه‌ای به طور کلی فرایندی است که در آن داده‌های لرزه‌ای بازتابی به یکی از مشخصه‌های فیزیکی زیر سطحی مانند امپدانس صوتی، تخلخل، اشباع سیال، ... تبدیل می‌شوند. داده‌های لرزه‌ای بازتابی برای توصیف هندسی ساختارهای زیرسطحی و همچنین تخمین خواص مخزن مانند تخلخل، لیتولوژی و اشباع سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما تبدیل داده لرزه‌ای به خواص مخزن یک مسئله وارون با جواب غیر یکتاست. داده‌های لرزه‌ای بازتابی اطلاعات وسیعی از زمین‌شناسی کل مخزن در اختیار مهندسان قرار می‌دهد که در مقایسه با چاهها، توزیع فضایی بسیار گسترده‌تری دارند. در مقابل این مزیت، داده‌های لرزه‌ای کمتر قابل اطمینان است چون اطلاعات زمین‌شناسی در آن به طور غیرمستقیم برداشت شده است و در نتیجه، رابطه این داده با خواص پتروفیزیکی، غیرخطی و دارای پیچیدگی‌های زیادی است. روش‌های مختلف وارون‌سازی لرزه ای از گذشته تا حال سعی در استخراج اطلاعات الاستیکی زیرسطحی و سپس تبدیل آن به خواص متعدد مخزن داشته‌اند. تئوری عمومی مسائل وارون در کتاب‌های زیادی آورده است (تارانتولا ۱۹۸۷، منکه ۱۹۸۴، استر و همکاران ۲۰۱۳).

مدل‌های امپدانس صوتی وارون‌شده با استفاده از روش‌های وارون‌سازی قطعی دارای نمایش هموارشده‌ای از خواص زیرسطحی زمین هستند و تغییرپذیری فضایی بسیار پایین‌تری نسبت به زمین‌شناسی زیرسطحی واقعی دارند (راسل و همپسون ۱۹۹۱). در روش‌های تصادفی، راه حل مسئله وارون توسط یکتابع چگالی احتمالی در فضای پارامتری مدل تعیین می‌شود (بوش و همکاران ۲۰۱۰). این کار با نمونه‌برداری از فضای پارامتری مدل با روش مونت کارلو با استفاده از شبیه‌سازی متوالی زمین آماری و ترکیب آن با الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلی انجام می‌شود. الگوریتم‌های ژنتیک (ملیک ۱۹۹۵ و ۱۹۹۹، بوشتی و همکاران ۱۹۹۶، سوآرس و همکاران ۲۰۰۷) و تبرید شبیه‌سازی شده (سن و ستوفا ۱۹۹۱، ما ۲۰۰۲) از جمله روش‌های استفاده شده در وارون‌سازی لرزه‌ای تصادفی هستند. اما از نظر الگوریتم وارون‌سازی، این روش‌ها به دو دسته وارون‌سازی استفاده شده در وارون‌سازی لرزه‌ای تصادفی هستند. در روش‌های ردلرزه، وارون‌سازی ابتدا بر روی یک ردلرزه انجام می‌شود و سپس این عمل با استفاده از ردلرزه‌هایی که در مراحل قبل وارون شده‌اند ادامه می‌یابد تا اینکه کل شبکه وارون‌سازی را در بر گیرد (دوبرول ۱۹۸۹). سوآرس و همکاران (۲۰۰۷) برای اولین بار، یک روش کلی را به جای روش ردلرزه به ردلرزه ارائه دادند (سوآرس و همکاران ۲۰۰۷). سپس این روش توسط ثابتی و همکاران (۲۰۱۷) توسعه داده شد. در روش ارائه شده توسط سوآرس و همکاران (۲۰۰۷)، ساختار پیوستگی فضایی (واریوگرام) به صورت کلی وارد الگوریتم وارون‌سازی شده است. همچنین تابع چگالی احتمال استفاده شده برای نمونه‌برداری و تولید مقدار شبیه‌سازی به صورت کلی است و منطقه‌بندی صورت نگرفته است. به این نوع وارون‌سازی، وارون‌سازی در شرایط پایا اطلاق می‌شود. اما پیچیدگی لایه‌های زیرسطحی معمولاً شرایط را برای وارون‌سازی پایا نامناسب می‌کند. به عنوان مثال، اگر در جهت قائم، مقادیر امپدانس صوتی تغییرات معناداری داشته باشد، شرایط ناپایا محقق شده است. استفاده از روش وارون‌سازی پایا در شرایط مذکور، منطقی به نظر نمی‌رسد. در این مقاله، روش جدیدی برای وارون‌سازی تصادفی کلی ناپایا ارائه و نتایج آن با روش قدیمی پایا مقایسه شده است.

۲ وارون‌سازی تصادفی کلی پایا و ناپایا

در این روش و در مرحله اول، برخلاف روش‌های ردلرزه به ردلرزه، به جای ستون‌های انفرادی، تعداد زیادی تحقق سه‌بعدی از امپدانس صوتی برای کل حجم شبکه وارون‌سازی، شبیه‌سازی می‌شود. در مرحله دوم و بعد از همامیخت با موجک لرزه‌ای، مناطقی که دارای بیشترین شباهت بین داده لرزه‌ای واقعی و مصنوعی هستند، انتخاب شده و باهم ترکیب می‌شوند. نتیجه این کار تولید یک متغیر ثانویه برای استفاده در شبیه‌سازی تواأم در تکرار بعدی با چارچوب الگوریتم ژنتیک است. این فرایند تا زمانی تکرار می‌شود که همگرایی صورت گیرد و شرط توقف حاصل شود (سوآرس و همکاران ۲۰۰۷). همان‌طور که قبل اشاره شد، روش‌های وارون‌سازی پایا از پارامترهای پیوستگی فضایی یکسان برای انجام عمل شبیه‌سازی زمین‌آماری استفاده می‌کنند. همچنین، تابع توزیع احتمالی برای نمونه‌برداری مقادیر شبیه‌سازی شده نیز یکسان در نظر گرفته می‌شود. این فرضیه اگرچه به کنترل و کاهش قابل ملاحظه حجم محاسباتی روش‌های پایا می‌انجامد، اما معمولاً با ساختار پیچیده لایه‌های زیرسطحی مطابقت ندارد. زیرا خواص پتروفیزیکی لایه‌های زیرسطحی ممکن است تغییرات جانبی و قائم داشته باشد. در چنین شرایطی با مطالعه دقیق‌تر آمارهای میانگین و واریانس داده‌های لرزه‌ای و چاهنگاری می‌توان یک عمل تقسیم‌بندی یا منطقه‌بندی انجام داد که در آن تغییرات لیتوژوژیکی در هر منطقه تغییرات افقی و قائم مناسب‌تری داشته باشد. در این حالت، با مدل‌سازی واریوگرام‌های افقی و قائم در هر منطقه و ورود آن به الگوریتم وارون‌سازی تصادفی به صورت جداگانه، امکان مطالعه دقیق‌تر (ناپایا) خواص الاستیکی لایه‌های زیرسطحی به وجود خواهد آمد.

۳ مقایسه بکارگیری وارون‌سازی تصادفی کلی پایا و ناپایا بر روی داده مصنوعی

داده‌های مصنوعی استفاده شده، دارای داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی بعد از برآنبارش و داده‌های امپدانس صوتی ۱۴ چاه می‌باشد. شبکه وارون‌سازی در این داده‌ها، دارای ابعاد $10 \times 10 \times 90$ سلول است. ابعاد هر سلول در راستای افقی، 25×25 متر و در راستای قائم، ۴ متر است. ۱۲ چاه برای وارون‌سازی و ۲ چاه برای آزمون چاه آزمون (اعتبارسنجی) در نظر گرفته شده است. برای بکارگیری وارون‌سازی ناپایا ابتدا داده مورد نظر براساس توزیع فضایی مقادیر امپدانس صوتی، به سه منطقه تقسیم شده و

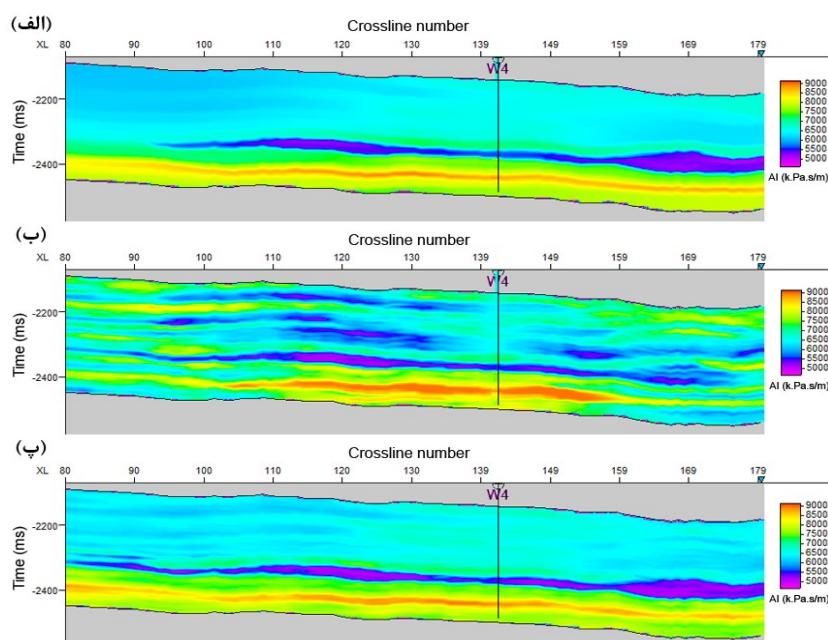
داده‌های امپدانس صوتی چاهها در هر منطقه برای مدل‌سازی واریوگرام مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۱ نتایج به کارگیری وارونسازی پایا و ناپایا بر روی داده لرزه‌ای بدون نوفه را نشان می‌دهد. شکل ۱-الف مقطع امپدانس صوتی واقعی، شکل ۱-ب مقطع امپدانس صوتی حاصل از وارونسازی پایا و شکل ۱-پ مقطع امپدانس صوتی حاصل از وارونسازی ناپایا را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج وارونسازی پایا (شکل ۱-ب) در بعضی مناطق خصوصاً قسمت‌های بالایی مقطع، مقادیر غیرواقعی امپدانس صوتی را تولید کرده است. اما وارونسازی ناپایا (شکل ۱-پ) دارای تشابه بسیار بالاتری با مقطع امپدانس صوتی واقعی است. به منظور بررسی نتایج وارونسازی در شرایط داده نوفهدار، داده لرزه‌ای نوفهدار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسیبل مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۲ نتایج وارونسازی پایا و ناپایا داده‌های نوفه‌دار فوق را نشان می‌دهد. وجود نوفه، نتیجه وارونسازی پایا (شکل ۲-ب) را به شدت تحت تأثیر قرار داده است. این تأثیر در نواحی بالایی مقطع با پدید آمدن مقادیر بسیار پایین مقاومت صوتی وارون‌شده روی داده است. اما در الگوریتم ناپایا، مقادیر مقاومت صوتی مشابه با مقادیر واقعی، تولید شده است (شکل ۲-پ). همچنین، داده‌های امپدانس صوتی وارون‌شده در محل دو چاه آزمون استخراج و با مقدار امپدانس صوتی واقعی در جدول ۱ مقایسه شده‌اند. طبق این جدول، خطای وارونسازی در حالت ناپایا کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است.

۴ نتیجه‌گیری

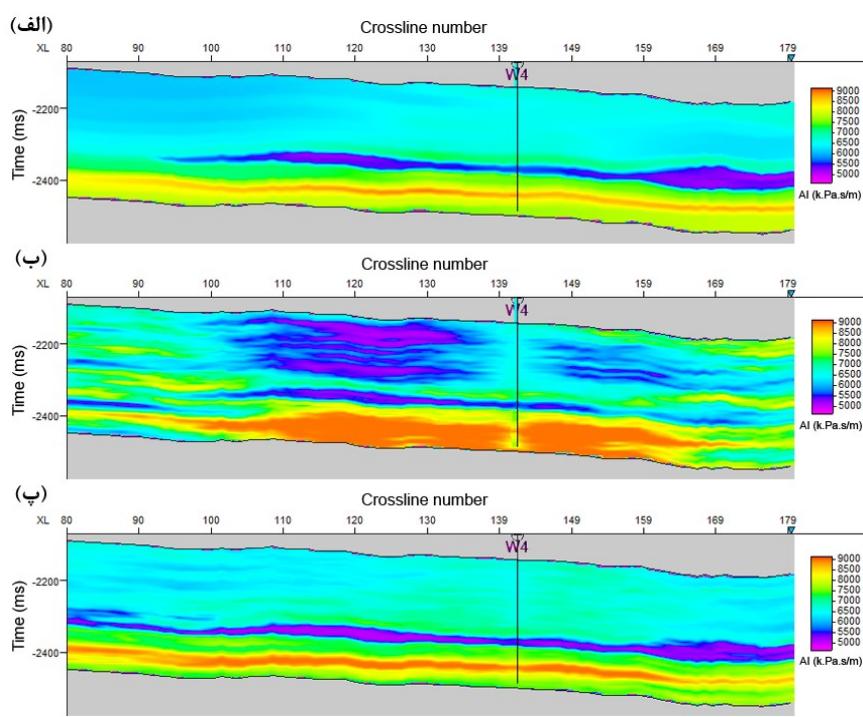
در این مقاله، وارونسازی تصادفی لرزه‌ای در دو حالت پایا و ناپایا مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه به کارگیری وارونسازی بر روی یک داده مصنوعی نشان داد که مقادیر امپدانس صوتی وارون‌شده توسط وارونسازی تصادفی لرزه‌ای ناپایا دارای بهبود چشمگیری در مقایسه با الگوریتم پایا است. اعتبارسنجی نتایج وارونسازی توسط دو چاه آزمون نشان داد که خطای وارونسازی در حالت ناپایا دارای کاهش قابل ملاحظه‌ای نسبت به حالت پایا می‌باشد.

جدول ۱. درصد خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) بین مقاومت صوتی چاههای آزمون و مقادیر امپدانس صوتی حاصل از وارونسازی پایا و ناپایا در مورد داده‌های لرزه‌ای نوفهدار با نسبت سیگنال به نوفه ۴ دسیبل.

چاه آزمون	وارونسازی لرزه‌ای پایا	وارونسازی لرزه‌ای ناپایا
شماره ۱	۱۷/۳	۵/۳
شماره ۲	۱۷/۰	۵/۷



شکل ۱. الف) مقطع امپدانس صوتی واقعی، ب) مقطع امپدانس صوتی وارون‌شده توسط وارونسازی پایا و پ) مقطع امپدانس صوتی وارون‌شده توسط وارونسازی ناپایا در مورد داده‌های مصنوعی بدون نوفه.



شکل ۲. (الف) مقطع مقاومت صوتی واقعی، (ب) مقطع مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی پایا و (پ) مقطع مقاومت صوتی مربوط به وارون‌سازی ناپایا برای داده‌های مصنوعی نویفه دار با نسبت سیگنال به نویه ۴ دسی‌بل.

References

- Aster, R. C., Borchers, B., & Thurber, C. H. (2013). *Parameter Estimation and Inverse Problems*: Academic Press.
- Bosch, M., Mukerji, T., & Gonzalez, E. (2010). Seismic inversion for reservoir properties combining statistical rock physics and geostatistics: A review. *GEOPHYSICS*, 75(5), 75A165-175A176.
- Boschetti, F., Dentith, M., & List, R. (1996). Inversion of seismic refraction data using genetic algorithms. *GEOPHYSICS*, 61(6), 1715-1727.
- Dubrule, O. (1989). A Review of Stochastic Models for Petroleum Reservoirs. In M. Armstrong (Ed.), *Geostatistics* (Vol. 4, pp. 493-506): Springer Netherlands.
- Ma, X. (2002). Simultaneous inversion of prestack seismic data for rock properties using simulated annealing. *GEOPHYSICS*, 67(6), 1877-1885.
- Mallick, S. (1995). Model-based inversion of amplitude-variations-with-offset data using a genetic algorithm. *GEOPHYSICS*, 60(4), 939-954.
- Menke, W. (1984). *Geophysical data analysis — Discrete inversion theory*: Academic Press Inc.
- Russell, B., & Hampson, D. (1991). Comparison of poststack seismic inversion methods. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 1991 (pp. 876-878).
- Sabeti, H., Moradzadeh, A., Ardejani, F. D., Azevedo, L., Soares, A., Pereira, P., & Nunes, R. (2017). Geostatistical seismic inversion for non-stationary patterns using direct sequential simulation and co-simulation. *Geophysical Prospecting*, 65, 25-48.
- Sen, M., & Stoffa, P. (1991). Nonlinear one-dimensional seismic waveform inversion using simulated annealing. *GEOPHYSICS*, 56(10), 1624-1638.
- Soares, A., Diet, J. D., & Guerreiro, L. (2007). Stochastic Inversion with a Global Perturbation Method. Paper presented at the EAGE Petroleum Geostatistics Cascais, Portugal.
- Tarantola, A. (1987). *Inverse problem theory: Methods for data fitting and model parameter estimation*: Elsevier Scientific Publ. Co., Inc.