

وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای و بازیابی لایه نازک در یک میدان نفتی خلیج فارس

مصطفی زارع^۱، عبدالرحیم جواهریان^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، zare.m@aut.ac.ir

^۲ استاد بازنشسته، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، استاد، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، javaherian@aut.ac.ir

چکیده

وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای به دلیل محدود بودن باند فرکانسی این داده‌ها با عدم قطعیت‌هایی همراه است. روش‌های وارون‌سازی قطعی به دلیل ناتوانی در مدل کردن ناهمگونی‌ها و عدم قطعیت‌ها برای توصیف مخزن مناسب نیستند. اما وارون‌سازی تصادفی لرزه‌ای علاوه بر مدل کردن ناهمگونی‌ها، امکان محاسبه عدم قطعیت‌ها را نیز فراهم می‌آورد. در این مطالعه با فرض گوسی بودن توابع چگالی احتمال لگاریتم مقاومت صوتی و لگاریتم مقاومت برشی، با استفاده از قاعده بیزین این توابع محاسبه شدند، نمونه‌گیری از آن‌ها با روش شبیه‌سازی گوسی متوالی انجام شد و تحقیق‌های مختلف از مدل مقاومت‌ها به دست آمد. اعمال روش به داده‌های لرزه‌ای یک میدان نفتی خلیج فارس نشان داد که روش تصادفی قابلیت مدل کردن ناهمگونی‌ها را دارد و با تفکیک بالایی لایه‌های نازک را بازیابی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: وارون‌سازی تصادفی، وارون‌سازی قطعی، تابع احتمال، قاعده بیزین، شبیه‌سازی گوسی، لایه نازک

Stochastic seismic inversion and recovery of the thin bed in a Persian Gulf oilfield

Mostafa Zare¹, Abdolrahim Javaherian²

¹ Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

² Formerly Institute of Geophysics, University of Tehran, presently Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Seismic inversion associates uncertainties due to the band-limited nature of the seismic data. Deterministic methods of seismic inversion are not appropriate for reservoir characterization because of the inability to model the heterogeneities and uncertainties. Stochastic seismic inversion, in addition to model heterogeneities, provides the possibility to calculate uncertainties in the reservoir. In this research, it is assumed that the probability density functions of the logarithm of acoustic and shear impedances are Gaussian and these functions were obtained using Bayesian principle. The sampling of the global functions was performed using sequential Gaussian simulation, and multiple realizations of acoustic and shear impedances were generated. Applying this method to one of the Persian Gulf oilfields showed that the stochastic inversion is capable of modeling the heterogeneities and recovers the high-resolution thin beds.

Keywords: Stochastic inversion, deterministic inversion, probability function, Bayesian principle, Gaussian simulation, thin bed

۱ مقدمه

یکی از اهداف اصلی در لرزه‌نگاری بازتابی، بازیابی مقاومت صوتی از اطلاعات لرزه‌ای (وارون‌سازی لرزه‌ای) است. روش‌های وارون‌سازی به دو دسته قطعی و تصادفی تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های قطعی بر مبنای کمینه کردن عبارت خطأ بین مدل پیشرو به دست آمده از یک مقاومت صوتی اولیه و مدل واقعی است و نتیجه آن‌ها معمولاً یک مدل هموار از مقاومت صوتی

است که ممکن است دو از واقعیت باشد (فرانسیس، ۲۰۰۵). به دلیل هموار بودن نتایج وارون سازی قطعی، استفاده از آنها جهت ساخت مدل مخزنی به منظور محاسبات حجمی نفت درجا و شبیه سازی جریان سیال در مخزن مناسب نمی باشد (فرانسیس، ۲۰۰۶). روش های تصادفی بر مبنای نمونه گیری از توابع چگالی احتمال می باشند، به عبارت دیگر توابع چگالی احتمال مقاومت صوتی با استفاده از داده های چاه و واریوگرام های حاصل از این داده ها در نقاط مختلف به دست می آیند و با استفاده از یک ماشین تولید کننده اعداد تصادفی، نمونه گیری از آنها انجام می شود. بنابراین در روش های تصادفی امکان تولید تعداد زیادی تحقق از مدل مقاومت صوتی وجود دارد که احتمال وقوع هر کدام از این تحقیق ها یکسان است. همچنین این تحقیق ها هموار نیستند بلکه تفکیک پذیری بالایی دارند و امکان مدل سازی ناهمگونی های مخزن را فراهم می آورند (فرانسیس، ۲۰۰۶). وارون سازی تصادفی اولین بار توسط دابرول و هس (۱۹۹۴) مطرح شد. آنها روش شبیه سازی گوسی متوالی را در محل های رد لرزه که به صورت تصادفی انتخاب می شوند، انجام دادند و نتایج به دست آمده را با استفاده از مدل پیشرو به رد لرزه مصنوعی تبدیل کردند. با توجه به میزان همبستگی بین رد لرزه مصنوعی و رد لرزه واقعی، مقادیر شبیه سازی شده تایید یا مردود شد و این فرآیند تا زمانی که تمام محل رد لرزه ها مدل سازی شود صورت گرفت. بلند و عمر (۲۰۰۳) با خطی سازی تغییرات دامنه با دورافت و با فرض گوسی بودن توابع چگالی احتمال لگاریتم مقاومت صوتی و مقاومت برشی، از طریق قاعده بیزین به صورت تحلیلی توابع چگالی احتمال چند متغیره را محاسبه کردند، با این وجود، به دلیل ابعاد زیاد توابع چگالی احتمال، نمونه گیری از آنها کار دشواری است. اسکوبار و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از قاعده بیزین توابع چگالی احتمال را به صورت تحلیلی محاسبه کردند و نمونه گیری از این توابع را با شبیه سازی گوسی متوالی انجام دادند. مک کرانک و همکاران (۲۰۰۹) از وارون سازی تصادفی برای بازیابی لایه های نازک زغال (حدود ۳ تا ۱۰ متر) استفاده کردند و موفق به تشخیص لایه های نازک زغال شدند. ثابتی و همکاران (۲۰۱۷) وارون سازی تصادفی برای الگوهای فضایی ناپایا در مخازن هیدروکربوری را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند وارون سازی تصادفی برای الگوهای ناپایا عدم قطعیت کمتری نسبت به الگوهای پایا دارد. در این مطالعه از روش اسکوبار و همکاران (۲۰۰۶) برای وارون سازی تصادفی لرزه های و بازیابی لایه های نازک در یک میدان نفتی خلیج فارس استفاده شده است.

۲ روش تحقیق

این تحقیق بر مبنای رابطه خطی بین خواص کشسان و بازتاب لرزه های می باشد. در صورت تابش موج تراکمی، ضریب بازتاب موج تراکمی بازتابی وابسته به زاویه برخورد با رابطه زیر تقریب زده می شود (اسکوبار و همکاران، ۲۰۰۶)

$$r_\theta \approx \frac{1}{2 \cos^2 \theta} \Delta \ln(I_p) - 4 \frac{W^2}{V^2} \sin^2 \theta \Delta \ln(I_s), \quad (1)$$

که r_θ ضریب بازتاب، θ زاویه برخورد، I_p ، I_s و V به ترتیب میانگین های مقاومت صوتی، مقاومت برشی، سرعت موج تراکمی و سرعت موج برشی در دو محیط تابش و عبور هستند. می توان این رابطه را به جای یک سطح مشترک، برای مجموعه ای از سطوح مشترک نوشت که در محل i (محل رد لرزه i) به صورت زیر تعریف می شود

$$r_{i,\theta} \approx A_{i,\theta} m_i, \quad (2)$$

که $r_{i,\theta}$ ماتریس ستونی شامل ضرایب بازتاب وابسته به زاویه θ در محل i ، $A_{i,\theta}$ ماتریس ضرایب موجود در رابطه (1) و m_i بردار شامل $\ln(I_p)$ و $\ln(I_s)$ می باشد. رابطه (2) نسبت به لگاریتم مقاومت صوتی و لگاریتم مقاومت برشی خطی است تنها در صورتی که فرض شود مجذور نسبت مقاومت ها در رابطه (1) معلوم باشد (اسکوبار و همکاران، ۲۰۰۶). با فرض گوسی بودن توابع چگالی احتمال لگاریتم مقاومت صوتی و مقاومت برشی، از طریق قاعده بیزین می توان وارون سازی مساله را انجام داد. در صورتی که نویه لرزه های هیچ همبستگی با رد لرزه ها و زاویه نداشته باشد، تابع محتمل (function) برای داده های لرزه های i به شکل زیر تعریف می شود (بلند و عمر، ۲۰۰۳)

$$p(s|m) \propto \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_{\theta} \sum_i (s_{i,\theta} - G_{i,\theta} m_i)^T C_{s_{i,\theta}}^{-1} (s_{i,\theta} - G_{i,\theta} m_i) \right), \quad (3)$$

که $C_{s_{i,\theta}}$ ماتریس کواریانس مربوط به نوشه و $G_{i,\theta}$ ماتریس مربوط به ترکیب هم‌آمیخت موجک با ضرایب $A_{i,\theta}$ می‌باشد. از طرف دیگر، تابع چگالی احتمال اولیه برای m به صورت زیر قابل تعریف است (اسکوبار و همکاران، ۲۰۰۶)

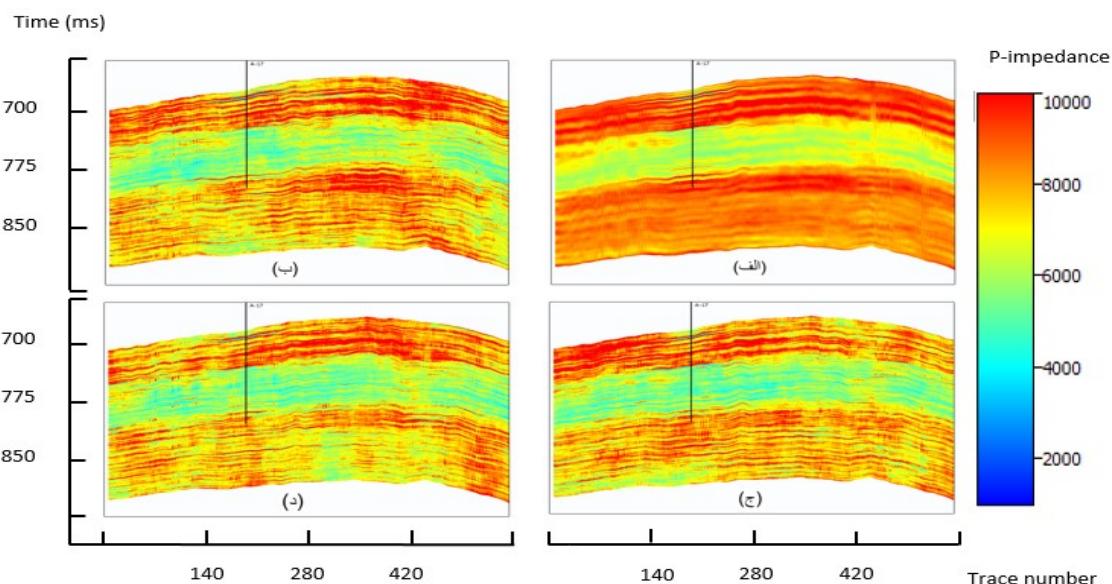
$$p(m) \propto \exp\left(-\frac{1}{2}(m - \mu_m)^T C_m^{-1}(m - \mu_m)\right), \quad (4)$$

که μ_m و C_m به ترتیب ماتریس میانگین و کواریانس مربوط به مدل اولیه می‌باشند. تابع چگالی احتمال پسین ($m|s$) با ترکیب روابط (۳) و (۴) ساخته می‌شود، سپس با استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی نمونه‌گیری از تابع چگالی احتمال انجام می‌شود. به عبارت دیگر، تابع چگالی احتمال کلی با شبیه‌سازی گوسی متوالی به چندین تابع چگالی احتمال محلی در محل ردلرزهای مختلف تجزیه می‌شود به گونه‌ای که این توابع مقید به ردلرزهای شبیه‌سازی شده قبلی باشند. بنابراین نمونه‌گیری از این توابع چگالی احتمال محلی به آسانی انجام می‌شود و امکان تولید تحقیقات مختلف فراهم می‌آید.

۳ اعمال روش به داده واقعی

روش استفاده شده توسط اسکوبار و همکاران (۲۰۰۶) در یکی از میدادین نفتی خلیج فارس پیاده‌سازی شده است. مخزن این میدان نفتی از جنس ماسه سنگ بوده و توسط دو لایه کربناته محصور شده است. همچنان در داخل مخزن، چند لایه نازک کربناته وجود دارد. با استفاده از نرمافزار همسون-راسل، وارونسازی تصادفی بر کل داده‌های میدان اعمال و ۲۰۰ تحقق از مدل‌های مقاومت صوتی و مقاومت برشی حاصل شده است. نتیجه وارونسازی مربوط به بازیابی مقاومت صوتی در یکی از خطوط لرزه‌نگاری میدان (شامل یکی از چاه‌های میدان) در شکل ۱ نمایش داده شده است. شکل ۲ نتایج وارونسازی در محل چاه و مقایسه‌ی آن با داده‌های چاه را نشان می‌دهد. وارونسازی تصادفی با همبستگی بالایی در محل چاه مقاومت‌های صوتی و برشی را بازیابی کرده است.

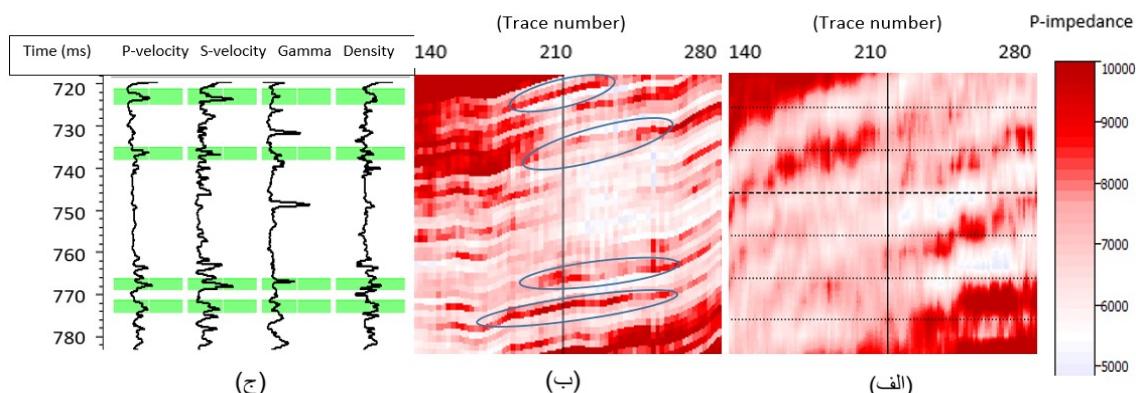
شکل ۳ داده‌های چاه موجود در مخزن و نتایج وارونسازی قطعی و تصادفی در مخزن را نشان می‌دهد. روش قطعی به دلیل باند فرکانسی کم قادر به تشخیص لایه‌های نازک نبوده یا آن‌ها را با ضخامت غیر واقعی بازیابی کرده است، اما روش تصادفی به خوبی لایه‌های نازک را تشخیص داده و با تفکیک بالایی آن‌ها را بازیابی کرده است.



شکل ۱. نتایج وارونسازی تصادفی برای مقاومت صوتی در یکی از خطوط لرزه‌نگاری میدان (محل چاه با خط مشکی مستقیم روی تمامی مقاطع مشخص شده است). (الف) میانگین ۲۰۰ تحقق از مقاومت صوتی، (ب) تحقق شماره ۴۵، (ج) تحقق شماره ۹۰، (د) تحقق شماره ۱۳۵. میانگین تحقق‌ها که در شکل (الف) مشخص شده است نسبت به هر کدام از تتحقق‌ها هموارتر است در حالی که تتحقق‌های مشخص شده در شکل‌های (ب)، (ج) و (د) با تفکیک بالاتری مقاومت صوتی را نشان می‌دهند و ناهمگونی‌های مخزن را شبیه‌سازی کرده‌اند.



شکل ۲. نتیجه وارون‌سازی تصادفی در محل چاه و مقایسه آن با داده‌های چاه. منحنی‌های با رنگ بنفش نشان‌دهنده نتیجه‌ی وارون‌سازی در محل چاه و منحنی‌های با رنگ آبی نشان‌دهنده اطلاعات اندازه‌گیری شده از نگاره‌ای چاه می‌باشد. وارون‌سازی تصادفی با همبستگی بالایی در محل چاه مقاومت‌های صوتی و برشی را بازیابی کرده است.



شکل ۳. مقایسه تشخیص لایه‌های نازک در مخزن به وسیله‌ی وارون‌سازی قطعی و تصادفی، (الف) نتیجه وارون‌سازی قطعی (خط مشکی مستقیم نشان‌دهنده محل چاه است، (ب) نتیجه وارون‌سازی تصادفی (تحقیق شماره ۹۰)، خط مشکی مستقیم، نشان‌دهنده محل چاه است و بیضی‌های آبی رنگ، لایه‌های نازک تشخیص داده شده توسط وارون‌سازی تصادفی را نشان می‌دهد، (ج) نگاره‌ای سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی، گاما و چگالی (به ترتیب از چپ به راست)، محل لایه‌های نازک روی نگاره‌ای چاه با رنگ سبز مشخص شده است. مقایسه دو شکل (ب) و (ج) نشان می‌دهد که روش تصادفی با تفکیک خوبی لایه‌های نازک را تشخیص داده اما نتیجه روش قطعی یک نقشه هموار است که جزئیات را به درستی نشان نمی‌دهد.

۴ نتیجه‌گیری

وارون‌سازی تصادفی داده‌های لرزه‌ای علاوه بر بازیابی مقاومت صوتی با تفکیک پذیری بالا ناهمگونی‌های موجود در مخزن را نیز مدل‌سازی می‌کند و در مقایسه با وارون‌سازی قطعی، به خوبی لایه‌های نازک را تشخیص می‌دهد. بنابراین برای توصیف مخزن و شبیه‌سازی جریان سیال در مخازن استفاده از وارون‌سازی تصادفی ارجح می‌باشد.

منابع

- Buland, A., and Omre, H., 2003, Bayesian linearized AVO inversion: Geophysics, **68**, 185-198.
- Dubrule, O., and Haas, A., 1994, Geostatistical inversion-a sequential method of stochastic reservoir modelling constrained by seismic data: First Break, **12**, 561-569.
- Escobar, I., Williamson, P., Cherrett, A., Doyen, P.M., Bornard, R., Moyen, R. and Crozat, T., 2006, Fast geostatistical stochastic inversion in a stratigraphic grid. 76th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstract, 2067-2071.
- Francis, A., 2006, Understanding stochastic inversion: part 1: First Break, **24**, 69-77.
- Francis, A., 2005, Limitations of deterministic and advantages of stochastic seismic inversion: Recorder, **30**, 5-11.
- McCrack, J., Lawton, D. and Mangat, C., 2009. Geostatistical inversion of seismic data from thinly bedded Ardley coals, CSPG CSEG CWLS Convention. Expanded Abstract, 649-652
- Sabeti, H., Moradzadeh, A., Ardejani, F.D., Azevedo, L., Soares, A., Pereira, P. and Nunes, R., 2017, Geostatistical seismic inversion for non-stationary patterns using direct sequential simulation and co-simulation: Geophysical Prospecting, **65**, 25-48.