



تحلیل پارامترهای موثر در تفکیک پذیری و عمق قابل اطمینان دادههای MRS

فاطمه عالم گرد'، رضا قناتی^۲

fatemealamgard@ut.ac.ir ^۱کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، rghanati@ut.ac.ir ^۲ استادیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران rghanati

چکیدہ:

یکی از مسائل مهمی که در معکوسسازی دادههای ژئوفیزیکی مورد بررسی قرار می گیرد، ارزیابی قابلیت اطمینان مدلهای معکوس شده است. به این معنی که با استفاده از ابزارهای ریاضی میزان قطعیت و یا عدم قطعیت مدلهای بدست آمده از حل مساله معکوس شده است. به این معنی که با استفاده از ابزارهای ریاضی میزان قطعیت و یا عدم قطعیت مدلهای ژئوفیزیکی می کند. ارزیابی مساله معکوس به صورت کمی تعیین می گردد و این امر کمک شایانی در تفسیر بهتر مدلهای ژئوفیزیکی می کند. ارزیابی کیفیت مدلهای ژئوفیزیکی می کند. ارزیابی کیفیت مدلهای محتوی آب و زمان آسایش که از معکوس سازی دادههای تشدید مغناطیس هستهای سطحی نتیجه می شود کیفیت مدلهای محتوی آب و زمان آسایش که از معکوس سازی دادههای تشدید مغناطیس هستهای سطحی نتیجه می شود نیز ضرورتی اجتناب ناپذیر است. در این پژوهش با استفاده از تجزیه مقادیر منفرد^{۹۹} تابع پیشرو MRS، ماتریس تفکیک پذیری مدل را استخراج می کنیم. در این روش مولفه های چون اندازه حلقه (گیرنده)، مقدار بیشینه پالس ممان، توزیع رسانندگی لایههای زیرسطحی و همچنین شرایط سطح نوفهی محیطی را به عنوان پارامترهای ورودی موثر بر تفکیک پذیری و عمق نفوذ معلی استخراج می کنیم. در این روش مولفه های چون اندازه حلقه (گیرنده)، مقدار بیشینه پالس ممان، توزیع رسانندگی دادههای زیرسطحی و همچنین شرایط سطح نوفهی محیطی را به عنوان پارامترهای ورودی موثر بر تفکیک پذیری و عمق نفوذ معوی میدهای زیرسطحی و همچنین شرایط سطح نوفهی محیطی را به عنوان پارامترهای ورودی موثر بر تفکیک پذیری و عمق نفوذ مادههای زیرسطحی و همچنین شرایط سطح نوفهی محیطی را به عنوان پارامترهای ورودی موثر بر تفکیک پذیری و عمق نفوذ مادههای زیرسطحی و همچنین شرایط سطح نوفهی محیطی را به عنوان پارامترهای ورودی موثر بر تفکیک پذیری و عمق نفوذ مادههای زیره مولوی می دازه مده ها بر روی تفکیک پذیری دادههای سونداژ تشدید مغناطیسی از طریق مدل مصنوعی، سنجیده می شود.

Analysis of effective parameters on the resolution and reliable depth of MRS data Fatemeh Alamgard¹, Reza Ghanati²

¹M.Sc. Graduated, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran ² Assistant Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran

Abstract

One of the significant issues in the inversion of geophysical data is the evaluation of the reliability of inverted models. This means that using mathematical tools, the degree of certainty or uncertainty of the models obtained from solving the inverse problem is determined quantitatively, and this helps to better interpret geophysical models. Evaluating the quality of water content and comfort time models resulting from the inversion of surface nuclear magnetic resonance data is also an unavoidable necessity. In this research, we extract the model resolution matrix using Single Value Analysis (SVD) of the forward MRS function. In this method, we evaluate components such as surface loop size (receiver), maximum moment pulse value, conductivity distribution of subsurface layers as well as ambient noise level conditions as input parameters affecting the resolution and penetration depth of MRS data. The effect of each of these components on the resolution of magnetic resonance sounding data is measured through synthetic models.

Keywords: Magnetic resonance sounding, Resolution analysis, Reliable depth of investigation.

مقدمه

در روشهای ژئوفیزیکی مانند ژئوالکتریک، الکترومغناطیس، ژئورادار و لرزهنگاری که بطور معمول در بررسیهای هیدروژئولوژیکی، برای ترسیم سنگ بستر و تعیین عمق ایستابی سفرههای آب زیرزمینی و سایر مرزهای اصلی زمین شناسی بکار میروند (هرتریچ، ۲۰۰۸)، هیچ قطعیتی از شناسایی آب وجود ندارد و تداخل رسها در بسیاری از مواقع میتواند پیچیده

¹⁹ Singular value decomposition





یا در موارد بدتر باعث ایجاد خطا در تفسیر شود. روش نوینی که امروزه برای اکتشاف آبهای زیر زمینی بکار گرفته می شود، سونداژ تشدید مغناطیسی (MRS²⁰) است. این روش به دلیل پیشرفتهای چشمگیر در ابزار، پردازش دادهها، مدلسازی پیشرو، معکوس سازی و تکنیکهای اندازه گیری در مسائل ژئوفیزیکی نزدیک به سطح، به طور قابل توجهی محبوب شده است. سفرههای آب نزدیک سطح منبع اصلی آب آشامیدنی در سراسر جهان می باشند. این سفرههای آب ممکن است به طور قابل ملاحظهای تحت تأثیر آلودگیهای زیست محیطی قرار بگیرند (اسماعیلی، ۱۳۹۸). با استفاده از روش MRS امکان برآورد توزیع محتوای آب و رسانندگی هیدرولیکی لایههای زیر سطحی وجود دارد (هرتریچ، ۲۰۰۸). استفاده روز افزون از سونداژ تشدید مغناطیسی برای تشخیص آبهای زیرزمینی و توصیف آبخوانها، به دلیل حساسیت بی نظیری است که میزان آب قابل استخراج را مستقیماً از سطح تعیین می کند (یارامانسی، ۲۰۰۰)، بنابراین مسئله عمق قابل اطمینان روش و قابلیت اطمینان مدل های تخمین زده شده اهمیت بسیاری دارد. دانش در مورد وابستگی عمق اطمینان و تفکیک پذیری در تنظیمات اندازه گیری مختلف، مانند اندازه حلقه، سرى ممانهاى پالس و مقاومت ويژه زيرسطحي، تعيين پارامترهاى بهينه بررسى را بهبود مىبخشد. مقالات مختلفي در رابطه با بررسی تفکیک پذیری و عمق قابل اطمینان مدل های منتج شده از دادههای ژئوفیزیکی وجود دارد که از جمله می توان به لگچنکو و همکاران (۲۰۰۲)، فریدل (۲۰۰۳)، زادانوف (۲۰۰۶)، فیچتنر و ترامپرت (۲۰۱۱)، رن و کالشوئر (۲۰۲۰)، دلگوش و پتکه (۲۰۲۰) اشاره کرد. در این مقاله با استفاده از تجزیه مقادیر منفرد^{۲۱} تابع پیشرو MRS، ماتریس تفکیکپذیری مدل را استخراج می کنیم. در این روش مولفه های چون اندازه حلقه (گیرنده)، مقدار بیشینه پالس ممان، توزیع رسانندگی لایههای زیرسطحی و همچنین شرایط سطح نوفهی محیطی را به عنوان پارامترهای ورودی موثر بر تفکیک پذیری و عمق نفوذ دادەھای MRS مورد بررسی قرار میدھیم.

تئوري مساله

در رابطه (۱) d بیانگر دادههای مساله و کمیت مختلط میباشد. K فیزیک مساله با مقادیر مختلط و w پارامترهای مدل مجهول است. در اینجا پارامترهای مدل، توزیع محتوای آب جزئی میباشد. برای به دست آوردن تخمینی از پارامترهای مدل، باید یک مساله معکوس غیر خطی K داریم. بنابراین با استفاده از مدل اولیهی w^i ماتریس ژاکوبین به صورت زیر محاسبه میشود:

$$J_{ij} = \frac{dK_i}{dw_j} (i = 1, \cdots N) \& (j = 1, \cdots M)$$
^(Y)

با بسط تیلور تابع در همسایگی مقدار اولیهی ⁴ به رابطه زیر دست مییابیم:

$$K(w^i + \delta w) \approx K(w^i) + \frac{dK}{dw} \delta w$$
 ((*)

همچنین برای حل مساله معکوسسازی سونداژ تشدید مغناطیسی ابتدا تابع هدف خطی سازی میشود. ماتریس ژاکوبین سونداژ تشدید مغناطیسی به شکل زیر محاسبه میشود (اسماعیلی و همکاران، ۲۰۲۰):

$$J = \frac{k_{real}d_{real} + k_{imag}d_{imag}}{|d|} \tag{(f)}$$

که real و imag بیانگر بخش های حقیقی و موهومی دادههای صحرایی هستند، k تابع پیشروی بدست آمده از مدل تخمینی در هر تکرار است و d بردار مقادیر مختلط اولیه ی منتج شده از مدل تخمینی در هر تکرار است. در معکوس سازی مساله سونداژ تشدید مغناطیسی به روش تجزیه مقادیر تکین تعمیم یافته پس از محاسبه ماتریس ژاکوبین و ماتریس هموار ساز

²⁰ Magnetic resonance sounding

²¹ Singular value decomposition





 $I = U\Lambda X^T$

 $L = VMX^{T}$



سپس مساله را براساس تکرار مختلف حل میکنیم.

$$\Delta w^{k} = X^{-T} (\Lambda^{T} W_{d}^{T} W_{d} \Lambda + \lambda M^{T} M)^{-1} \Lambda^{T} W_{d}^{T} W_{d} U^{T} \Delta d$$

مثال عددى

(6)

تا زمانی که از دادههای مختلط سیگنال سونداژ تشدید مغناطیسی استفاده کنیم، مساله پیشرو MRS خطی است و هنگامی که از بزرگی دادههای مختلط استفاده کنیم، ارتباط بین دادهها و پارامترهای مدل غیرخطی خواهد بود و برای معکوسسازی نیاز به خطیسازی داریم. این رابطه در عبارت زیر نشان داده میشود (عالم گرد، ۱۴۰۰):

$$|d| = |Kw|$$
 (۲)
 $d^{rotated} = |Kw|$ میدانیم که:
 $d^{rotated} \neq |K|w$ (۸)

برای ارزیابی تفکیک پذیری و تخمین عمق قابل اطمینان از ماتریس تفکیک پذیری پارامترهای مدل معکوس شده استفاده میشود. ما از معیارهایی بهره می گیریم که به شرایط سطح نوفه، بیشینه ممان پالس و ابعاد حلقه (آنتن گیرنده) وابسته است. این اقدامات برای نشان دادن وابستگی مدلهای هیدروژئوفیزیکی برآمده از دادههای MRS از نظر افزایش سطح نوفه، افزایش بیشینه هر بیشینه ممان پالس و محاسبه پهنا در نصف مقدار بیشینه هر بیشینه ممان پالس محاسبه پهنا در نصف مقدار بیشینه هر اور می مان پالس و انعاد حلقه (آنتن گیرنده) وابسته است. میشینه ممان پالس و افزایش اندازه حلقه استفاده می شود. بازه تفکیک پذیری براساس محاسبه پهنا در نصف مقدار بیشینه هر ردیف ماتریس تفکیک پذیری برآورد می شود. همچنین با در نظر گرفتن روند تغییرات تفکیک پذیری یا محاسبه شیب نمودار تفکیک پذیری، از جایی که تغییرات تفکیک پذیری در یک عمق به شدت کاهش می ابد آن نقطه بعنوان عمق قابل اطمینان تعریف می شود.

دادههای مصنوعی برای سه حالت بیشینه ممان پالس ۸، ۱۸ و ۲۸ آمپرثانیه و اندازه حلقه فرستنده ۱۰۰ متر تولید می شوند. سپس دادهها به نوفه گوسی با سطح نوفه ۲۰ نانوولت آغشته شدند (برای همه مثالها رسانندگی زمین زیرسطحی = σ 0.01 s/m در نظر گرفته می شود). نتایج برآورد ماتریس تفکیک پذیری برای هرسه حالت پالس ممان مورد نظر پس از فرآیند معکوس سازی در شکل ۱ نمایش داده می شود. با توجه به شکل ۱، ماتریس تفکیک پذیری با بیشینه ممان پالس ۸۸ آمپرثانیه نسبت به ماتریس تفکیک پذیری با بیشینه ممان پالس ۸ آمپرثانیه بهبود یافته و ماتریس تفکیک پذیری با بیشینه ممان پالس ۸۸ آمپرثانیه ۲۸ آمپرثانیه نسبت به ماتریس تفکیک پذیری دیگر بهبود بیشتری داشته است، در حالی که تفکیک پذیری با بیشینه ممان پالس (عمق ۳۵ متر) در هر سه حالت تقریبا یکسان است. اما با افزایش عمق، تفکیک پذیری کاهش می یابد. همچنین، عمق قابل (عمق ۳۵ متر) در هر سه حالت تقریبا یکسان است. اما با افزایش عمق، تفکیک پذیری کاهش می یابد. همچنین، عمق قابل اطمینان برای بیشینه ممان پالس، ۸ آمپرثانیه، برابر با ۶۰ متر، برای بیشینه ممان پالس ۸۸ آمپرثانیه، برابر با ۸۵ متر و در حالتی که بیشینه ممان پالس، ۸ آمپرثانیه، است، برابر با ۲۲ متر می باشد، بنابراین می توان نتیجه گرفت که افزایش بیشینه ممان پالس باعث افزایش عمق قابل اطمینان و بهبود تفکیک پذیری می شود. همچنین مشاهده می شود که بازه تغییرات تفکیک پذیری در هر سه حالت بیشینه ممان پالس، از سطح تا عمق افزایش می یابد، ولی میزان این افزایش (بازه تفکیک پذیری) در = 28 آمیرثانیه نسبت به دو حالت قبل کمتر برآورد می شود (شکل ۱).



شکل ۱ بررسی تاثیر افزایش بیشینه ممان پالس بر تفکیک پذیری مدلهای سونداژ تشدید مغناطیسی با بیشینه ممان پالسهای q=8 و q=18 و q=28 آمپر ثانیه. سطح نوفه (20 nV) و اندازه حلقه (L=100 ثابت فرض می شود.

Maximum row of resolution Reliable depth

در ادامه دادههای مصنوعی برای حالتهایی با اندازه حلقههای متفاوت (۵۰ و ۱۰۰ متر) تولید شد. سپس دادهها به نوفه گوسی با سطح نوفه ۲۰ نانوولت آغشته شدند. همانطور که انتظار میرود با افزایش قطر حلقه، تفکیک پذیری برای همه اعماق بهبود یافته است. همچنین مشاهده می کنیم که بازه تغییرات تفکیک پذیری در هر دو حالت اندازه حلقه، از سطح تا عمق افزایش می یابد ولی میزان این افزایش (بازه تفکیک پذیری) در اندازه حلقه ۱۰۰ متر نسبت به اندازه حلقه ۵۰ متر کمتر برآورد می شود. بیشینه ممان پالس در نظر گرفته شده برابر با ۲۸ آمپرثانیه است. در این حالت عمق اطمینان برای اندازه حلقه ۱۰۰ متر برابر با ۹۲ متر و برای اندازه حلقه ۵۰ متر برابر با ۵۵ متر می باشد (شکل ۲).



شکل ۲ بررسی تاثیر افزایش ابعاد حلقه (L = 50 متر و L = 100 متر) بر تفکیک پذیری مدل های سونداژ تشدید مغناطیسی با بیشینه ممان پالس q = 28 آمپر ثانیه. سطح نوفه ($20 \ nV$) ثابت فرض می شود.

در آخر مدلی را در نظر می گیریم که دادههای مصنوعی تولید شده را یکبار به نوفه گوسی با سطح نوفه ۲۰ نانوولت و سپس به نوفه گوسی با سطح نوفه ۹۰ نانوولت آغشته می کنیم. حال تاثیر نوفه بر تفکیک پذیری را برای حالتی که بیشینه ممان پالسها ۲۸ آمپرثانیه است بررسی می کنیم. افزایش سطح نوفه باعث تنزل کیفیت پارامترهای مدل و در نتیجه منجربه کاهش تفکیک پذیری می شود. همچنین مشاهده می کنیم که بازه تغییرات تفکیک پذیری در هر دو حالت سطح نوفه، از سطح تا عمق افزایش می یابد ولی میزان این افزایش (بازه تفکیک پذیری) در سطح نوفه ۲۰ نانوولت نسبت به سطح نوفه، از سطح تا عمق افزایش می شود. عمق قابل اطمینان هنگامی که سطح نوفه برابر ۲۰ نانوولت است برابر ۱۱۰ متر و در حالتی که سطح نوفه برابر ۹۰ نانوولت است برابر با ۹۵ متر می باشد (شکل ۳).







شکل ۳ بررسی تاثیر افزایش سطح نوفه گاوسی (nV20 و nV 90 NV) بر تفکیک پذیری مدل های سونداژ تشدید مغناطیسی با بیشینه ممان پالس= q 28 آمپر ثانیه.

نتيجهگيرى

در این مقاله معیارهایی از تفکیک پذیری، بازه تفکیک پذیری و عمق قابل اطمینان را معرفی کردهایم که امکان تخمین کیفیت تصاویر توزیع محتوای آب زیرسطحی، MRS را فراهم می کند و همچنین نشان دادهایم که چگونه می توان آنها را مستقیماً از عملگر پیشرو MRS با استفاده از ماتریس تفکیک پذیری مدل استخراج کرد. ما از این معیارها برای محاسبه وابستگی به تنظیمات اندازه گیری کلی مانند اندازه حلقه، سری ممانهای پالس و سطح نوفه استفاده کردیم. با توجه به بررسیهای صورت گرفته می بینیم که افزایش بیشینه ممان پالس و افزایش قطر حلقه، باعث افزایش تفکیک پذیری و عمق قابل اطمینان می شود و افزایش سطح نوفه بر روی پارامترهای مدل اثر مخرب دارد و باعث از بین رفتن پارامترهای مدل و در نتیجه کاهش تفکیک پذیری و همچنین کاهش عمق اطمینان می شود.

منابع:

اسماعیلی، زهرا، ۱۳۹۸، تخمین محتوای آب و زمان آسایش از وارونسازی شکل موج کامل سیگنال سونداژ تشدید مغناطیسی، پایان نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

عالم گرد، فاطمه، ۱۴۰۰، بررسی تفکیکپذیری سیگنال سونداژ تشدید مغناطیسی در چارچوب معکوسسازی چند نمائی، پایان نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

Aster, R.C., Borchers, B., Clifford H. ThUurber, (2013), Parameter estimation and inverse problems

Dlugosch, R., & Müller-Petke, M. (2020). Application of adiabatic pulses for magnetic Resonance Sounding–Pulse shapes and resolution. Journal of Applied Geophysics, 179, 104079

Esmaeili, Z., Ghanati, R., & Hafizi, M. K. (2020). Water Content and Relaxation Time Estimation Using Full-Wave Form Inversion of MRS Signal. Journal of the Earth and Space Physics, 46(2), 225-246.

Fichtner, A., & Trampert, J. (2011). Resolution analysis in full-waveform inversion. Geophysical Journal International, 187(3), 1604-1624.

Friedel, S. (2003). Resolution, stability and efficiency of resistivity tomography estimated from a generalized inverse approach. Geophysical Journal International, 153(2), 305-316.

Hertrich, M. (2008). Imaging of groundwater with nuclear magnetic resonance. Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, 53(4), 227.

Legchenko, A., Baltassat, J. M., Beauce, A., & Bernard, J. (2002). Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists. Journal of Applied Geophysics, 50(1-2), 21-46.

Ren, Z., & Kalscheuer, T. (2020). Uncertainty and resolution analysis of 2D and 3D inversion models computed from geophysical electromagnetic data. Surveys in Geophysics, 41(1), 47-112.

Yaramanci, U., & Müller-Petke, M. (2009). Surface nuclear magnetic resonance—A unique tool for hydrogeophysics. The leading edge, 28(10), 1240-1247.

Zhdanov, M. S., & Tolstaya, E. (2006). A novel approach to the model appraisal and resolution analysis of regularized geophysical inversion. Geophysics, 71(6), R79-R90.