



Research Article

Uncertainty analysis in induced polarization tomography inverse modeling using non-parametric resampling method

Ashkan Rahmati Shad¹, Reza Ghanati^{1*} , Mahdi Fallahsafari¹

1-Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 30 Apr 2026 Accepted: 07 Jun 2026

Extended Abstract

Introduction

Induced polarization tomography (IPT) is a non-invasive geophysical method for subsurface imaging based on changes in the polarization parameter, which is used in various fields such as subsurface resource exploration and environmental studies. The main goal of induced polarization tomography data inversion is to infer subsurface physical properties from noisy data, which is often accompanied by various uncertainties. These uncertainties are divided into two main categories, including inherent data noise and incomplete knowledge of the physics of the problem. In this study, the uncertainty of polarization models resulting from induced polarization tomography data inversion using moving block bootstrap (MBB) resampling methods is considered. This method helps to analyze uncertainty in models by generating a set of models with a defined level of fit to the observed data. The moving block bootstrap is specifically designed to improve sampling accuracy in data where there is a possibility of correlation and dependence between data samples. This approach is used to assess the uncertainty of model parameters under different conditions, both in terms of synthetic data and field data. The results of this research can help improve geophysical analyses and decision-making related to predicting subsurface conditions. Numerical modeling on both synthetic and field data shows that increasing the complexity of the subsurface model and decreasing the model's sensitivity to the data leads to greater uncertainty in the inverted model. Additionally, the type of regularization term and the choice of regularization parameters were found to influence uncertainty quantification. In this study, we developed a software package in the MATLAB programming environment that includes comprehensive modules for forward modeling, effective resampling using the aforementioned approach, and inverse modeling. The software has been tested on various synthetic examples and field data. Our numerical tests involve two synthetic models with specified chargeability and resistivity values, designed for reconstructing areas prone to mineral deposits and valuable metal and sulfide minerals covered by alluvial overburden. For real-world examples, two profiles from two different regions in northwestern and southeastern Iran were selected. The first study area includes a 2000 m geoelectrical profile, and the second area, with an 800 m geoelectrical profile and the presence of exploratory boreholes, provides robust evidence for evaluating and testing the proposed approach.

Materials and Methods

This research follows a step-by-step analytical workflow including: forward modeling of induced polarization response, generation of synthetic data with controlled noise, inversion of resistivity and induced polarization data, implementation of the moving block bootstrap resampling algorithm, and finally statistical analysis of results.

Citation: Rahmati Shad, A. et al, 2026. Uncertainty analysis in induced polarization tomography inverse modeling, *Res. Earth. Sci.* 17(2), (183-206) DOI: 10.48308/esrj.2026.107329

* Corresponding author E-mail address: rghanati@ut.ac.ir



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Forward Modeling: To simulate the earth's response to time-domain induced polarization, the chargeability perturbation model proposed by Seigel (1959) was used. Apparent chargeability (η_a) is calculated from:

Eq. 1)

$$\eta_a = \frac{V_s}{V_p} = \frac{V_p - V_\sigma}{V_p} = \frac{F_{dc} [\sigma(1 - \eta)] - F_{dc} [\sigma]}{F_{dc} [\sigma(1 - \eta)]}$$

where σ is conductivity, η is chargeability, V_p is primary voltage, V_s is secondary voltage, and F_{dc} is the DC resistivity forward modeling operator. This equation reveals that the apparent chargeability is computed based on two consecutive applications of the resistivity forward operator for two conductivity models, that is σ and $\sigma(1 - \eta)$.

Inversion: For data inversion, the non-linear approach of Oldenburg and Li (1994) was used. The objective function, consisting of the weighted sum of data misfit (Φ_d) and model stability (Φ_η), is defined as:

Eq. 2)

$$\Psi(\eta, \alpha) = \min(\Phi_d + \alpha\Phi_\eta) = \min\left(\|W_d(d - f(\eta))\|_2^2 + \alpha\|W_m(\eta - \eta_{apr})\|_2^2\right).$$

Here, η is the chargeability model, α is the damping factor, W_d is the data weighting matrix (inverse of data error), W_m is the model smoothing matrix (combination of horizontal and vertical derivatives), and η_{apr} is the prior chargeability model. The inversion starts with an initial model η^0 obtained from the geometric mean of apparent chargeability data. The IP sensitivity matrix is updated at each iteration, and the iterative numerical method continues until convergence. **Moving Block Bootstrap (MBB) Resampling:** To quantify uncertainty, the MBB resampling algorithm as a non-parametric method is used. Unlike classical bootstrap that assumes data independence, this method preserves the correlation and dependence structure of the data points. The bootstrap resampling algorithm has found numerous practical applications in the mathematical literature for statistical inference, such as estimating distribution functions, conducting hypothesis tests, and identifying models. Despite its proven effectiveness, it has been seldom applied for quantitatively assessing uncertainty intervals in geophysical models. Following data resampling, the inversion process is performed independently for each data realization (bootstrapped data). Finally, among the inverted models, those with an appropriate fit level (i.e., $\chi^2 \leq m + \sqrt{2m}$, where m is the number of data) are selected as equivalent models, and their mean and standard deviation are calculated. The mean represents the stable model structure, while the standard deviation represents the uncertainty map of the inverted chargeability models.

Results and Discussion

Results from synthetic modeling and field data sets indicate that the Moving Block Bootstrap (MBB) resampling approach is an effective tool for quantifying uncertainty in the inversion of induced polarization tomography data. In both designed synthetic models, it was observed that the mean model derived from 1000 resampling runs reconstructed the main subsurface structures (including the location of anomalies, layer boundaries, and alteration zones) with reasonable accuracy compared to a single inversion model. The standard deviation maps from the uncertainty analysis systematically identified the areas with the highest model variability. In the first synthetic model, the highest uncertainty was observed at the boundary between the surface layer and the host medium, as well as at the edges of the anomaly. In the second, more complex synthetic model (which includes a fault structure and three zones with different properties), uncertainty increased not only at the overburden-fault boundary but also within the environment exhibiting higher chargeability. These patterns indicate that uncertainty is mainly concentrated in areas with sharp gradients in physical parameters, as well as in parts of the model where data sensitivity to the parameters decreases. This finding is consistent with the theoretical foundations of the ill-posed inverse problem and demonstrates that the MBB method can naturally highlight areas requiring supplementary surveys or more detailed analyses. In the field data, a significant agreement was observed between high-chargeability zones in the inverted models and the mineralization intervals recorded in exploratory boreholes (N23 and N12). This depth and lateral consistency confirms the validity of the proposed method under real conditions. Particularly in Profile 2 from the Khuf area, the coincidence of zones with chargeability exceeding 14-15 mV/V and resistivity below 20 Ωm with the sulfide mineralization logs demonstrates the high efficiency of the

method in distinguishing alteration and mineralization zones from barren rocks. It was also observed that the highest uncertainty lies in the transition zones between resistive rocks and altered zones, which matches the lithological changes reported in the boreholes. Importantly, the MBB method not only helps identify mineralization zones but also reveals the boundaries of high uncertainty, which represent geologically high-risk areas. In the first field dataset (Meshgin-Shahr area), which lacked exploratory boreholes, the uncertainty analysis showed that the western part of the survey profile had the highest standard deviation. This section had previously shown different behavior in pseudo-sections, characterized by low resistivity and high chargeability. The alignment of this high uncertainty with a possible alteration zone (argillic) suggests that even in the absence of direct control data, the standard deviation map can serve as an indicator for identifying complex areas requiring supplementary investigation. On the other hand, the results showed that the type of regularization term and its coefficients have a direct impact on the estimated uncertainty. The use of the L_2 norm together with horizontal and vertical smoothing matrices led to more continuous models and a relative reduction of uncertainty in homogeneous areas, but at the same time somewhat smoothed the sharp boundaries of geological structures. These observations underscore the necessity of optimizing regularization parameters according to the study objective (distinguishing continuous versus discrete structures). In summary, the results of this discussion confirm that the MBB resampling approach, beyond merely quantifying uncertainty, provides the following capabilities: identifying high-sensitivity areas requiring further investigation, indirect validation of inversion results in the absence of control data, and providing a basis for decision-making in the design of supplementary surveys. These features are of high practical value, especially in mineral exploration and environmental studies where the cost of drilling and additional surveys is very high.

Conclusion

In this study, a comprehensive framework for quantifying uncertainty in induced polarization tomography data inversion using the non-parametric Moving Block Bootstrap (MBB) resampling method was presented and implemented. The developed algorithm in MATLAB is capable of forward modeling, controlled noise application, 2D inversion of resistivity and chargeability, and generation of multiple resampled datasets with adjustable block length, removal percentage, and number of iterations (1000 times). Results from synthetic models showed that standard deviation maps clearly identify high-uncertainty areas, which mainly correspond to geological boundaries, anomaly edges, and zones with sharp gradients in physical parameters. For field data, significant agreement between high chargeability zones in inverted models and mineralization intervals recorded in exploratory boreholes (Khusf area) was observed, confirming the validity of the proposed method. Furthermore, in the Meshgin-Shahr area (lacking boreholes), the uncertainty map successfully identified the western part of the profile as a complex area requiring supplementary investigation.

Keywords: Resampling, chargeability, uncertainty quantification, inversion.

تحلیل عدم قطعیت مدل سازی وارون توموگرافی پلاریزاسیون القائی با استفاده از الگوریتم باز نمونه برداری ناپارامتری

اشکان رحمتی شاد^۱، رضا قناتی^{۱*} , مهدی فلاح صفری^۱

۱- گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۱۷

چکیده گسترده

مقدمه

توموگرافی پلاریزاسیون القایی (IPT) یک روش ژئوفیزیکی غیرتهاجمی برای تصویربرداری زیرسطحی بر اساس تغییرات پارامتر قطبش پذیری است که در زمینه های مختلفی از جمله اکتشاف منابع زیرسطحی و مطالعات زیست محیطی کاربرد دارد. هدف اصلی در وارون سازی داده های IPT، استنتاج خواص فیزیکی زیرسطحی از داده های نویزدار است که این فرآیند غالباً با عدم قطعیت های مختلفی همراه است. این عدم قطعیت ها به دو دسته عمده شامل نویز ذاتی داده ها و دانش ناقص از فیزیک مسئله تقسیم می شوند. در این پژوهش، بررسی عدم قطعیت مدل های قطبش پذیری حاصل از وارون سازی داده های IPT با استفاده از روش باز نمونه برداری بوت استرپ بلوکی متحرک (MBB) مورد توجه قرار گرفته است. این روش، از طریق تولید مجموعه ای از مدل ها با سطح برازش تعریف شده به داده های مشاهده ای، به تحلیل عدم قطعیت در مدل ها کمک می کند. بوت استرپ بلوکی متحرک به طور خاص برای بهبود دقت نمونه برداری در داده هایی طراحی شده است که احتمال همبستگی و وابستگی بین نمونه داده ها وجود دارد. این رهیافت با هدف ارزیابی عدم قطعیت پارامترهای مدل در شرایط مختلف، هم از نظر داده های مصنوعی و هم از نظر داده های صحرایی، به کار می رود. نتایج این تحقیق می تواند به بهبود تحلیل های ژئوفیزیکی و تصمیم گیری های مرتبط با پیش بینی شرایط زیرسطحی کمک کند. مدل سازی های عددی در داده های مصنوعی و صحرایی نشان می دهد که افزایش پیچیدگی مدل زیرسطحی و کاهش حساسیت مدل به داده ها منجر به افزایش عدم قطعیت در مدل وارون شده می شود. همچنین مشاهده شد که نوع جمله منظم ساز و نیز پارامترهای منظم ساز در کمی سازی عدم قطعیت مؤثر هستند. در پژوهش پیشرو، نرم افزار بومی شامل بخش های متنوع و جامعی برای مدلسازی پیشرو، باز نمونه برداری مؤثر به شیوه ی یاد شده و مدلسازی وارون در محیط برنامه نویسی متلب توسعه یافته است. کارایی این نرم افزار با استفاده از داده های مصنوعی و صحرایی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج و تفاسیر حاصل، به صورت مدل های گوناگون ارائه شده اند که از آن جمله می توان به دو مدل مصنوعی با شارژ پذیری و مقاومت ویژه معین اشاره کرد که برای بازسازی زمین های مستعد ذخایر معدنی و کانه های ارزشمند فلزی و سولفیدی پوشیده شده با لایه آبرفتی طراحی شده اند. در ادامه، دو پروفیل از دو منطقه متفاوت در شمال غربی و جنوب شرقی ایران انتخاب شده است. منطقه اول با پروفیل ۲۰۰۰ متری و حجم داده بالا، و منطقه دوم با پروفیل ۸۰۰ متری و وجود گمانه های اکتشافی، معیار مناسبی برای سنجش و اعتبارسنجی این رهیافت به شمار می روند.

استناد: رحمتی شاد، ا. و همکاران، ۱۴۰۵. تحلیل عدم قطعیت مدل سازی وارون توموگرافی پلاریزاسیون القائی با استفاده از الگوریتم باز نمونه برداری ناپارامتری، پژوهشهای دانش زمین: ۱۷(۲)، (۲۰۶-۱۸۳)، DOI: 10.48308/esrj.2026.107329

E-mail: rghanati@ut.ac.ir

* نویسنده مسئول:

مواد و روش‌ها

این پژوهش در قالب یک مسیر تحلیلی گام‌به‌گام طراحی شده است که شامل مراحل زیر می‌باشد: مدل‌سازی پیشرو پاسخ پلاریزاسیون القایی، تولید داده‌های مصنوعی با نوفه کنترل‌شده، وارون‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه و شارژپذیری، پیاده‌سازی الگوریتم بازنمونه‌برداری MBB، و در آخر تحلیل آماری نتایج.

مدل‌سازی پیشرو: در این پژوهش، برای شبیه‌سازی پاسخ زمین به روش پلاریزاسیون القایی در حوزه زمان، از مدل اغتشاش بارپذیری پیشنهادشده توسط سیگل (Seigel, 1959) استفاده شده است. در این مدل، شارژپذیری ظاهری (η_a) از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$\text{رابطه ۱)} \quad \eta_a = \frac{V_s}{V_p} = \frac{V_p - V_\sigma}{V_p} = \frac{F_{dc} [\sigma(1 - \eta)] - F_{dc} [\sigma]}{F_{dc} [\sigma(1 - \eta)]}$$

که در آن σ رسانندگی، η شارژپذیری، V_p ولتاژ اولیه، V_s ولتاژ ثانویه، و F_{dc} عملگر مدلسازی پیشرو مقاومت‌ویژه DC است. این معادله نشان می‌دهد که قطبش‌پذیری ظاهری بر اساس دو اعمال متوالی عملگر پیشرو مقاومت‌ویژه برای دو مدل رسانندگی الکتریکی، یعنی σ و $\sigma(1 - \eta)$ ، محاسبه می‌شود.

وارون‌سازی: برای وارون‌سازی داده‌ها، از رویکرد غیرخطی لی و اولدنبرگ (Oldenburg and Li, 1994) استفاده شده است. تابع هدف این الگوریتم که شامل مجموع وزن‌دار تابع تطابق با داده‌ها (Φ_d) و تابع پایداری مدل (Φ_η) است، به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$\text{رابطه ۲)} \quad \Psi(\eta, \alpha) = \min(\Phi_d + \alpha\Phi_\eta) = \min(\|W_d(d - f(\eta))\|_2^2 + \alpha\|W_m(\eta - \eta_{apr})\|_2^2),$$

در این رابطه، η مدل شارژپذیری، α ضریب میرایی، W_d ماتریس وزن‌دهی داده‌ها (معکوس خطای داده‌ها) W_m ماتریس هموارساز مدل (ترکیبی از مشتقات افقی و عمودی)، و η_{apr} مدل شارژپذیری پیشین است. فرآیند وارون‌سازی با مدل اولیه η^0 که از میانگین هندسی داده‌های شارژپذیری ظاهری به‌دست آمده، آغاز می‌شود. ماتریس حساسیت IP در هر تکرار به‌روزرسانی شده و روش عددی تکراری تا رسیدن به همگرایی ادامه می‌یابد. بازنمونه‌برداری بوت‌استرپ بلوکی متحرک (MBB): با هدف تحلیل عدم قطعیت، از الگوریتم بازنمونه‌برداری MBB استفاده شده است. در این روش، بر خلاف بوت‌استرپ کلاسیک که استقلال داده‌ها را فرض می‌کند، ساختار وابستگی و همبستگی داده‌ها حفظ می‌شود. مراحل نمونه‌برداری به تعداد مشخص (در این پژوهش ۱۰۰۰ بار) تکرار می‌شود تا مجموعه‌ای از داده‌های بازنمونه‌برداری شده تولید گردد. سپس برای هر یک از این پیشامدها، فرآیند وارون‌سازی به طور مستقل انجام می‌شود. در انتها، از بین مدل‌های وارون‌شده، آن‌هایی که دارای سطح برازش مناسب هستند (منطبق با معیار: $\chi^2 \leq m + \sqrt{2m}$ که در آن m تعداد داده‌ها است) به عنوان مدل‌های معادل انتخاب شده و میانگین و انحراف معیار آن‌ها محاسبه می‌شود. میانگین نشان‌دهنده ساختار پایدار مدل و انحراف معیار بیانگر نقشه عدم قطعیت مدل وارون‌شده است.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های مصنوعی و داده‌های صحرایی نشان می‌دهد که رویکرد بازنمونه‌برداری بوت‌استرپ بلوکی متحرک (MBB) ابزاری کارآمد برای کمی‌سازی عدم قطعیت در وارون‌سازی داده‌های توموگرافی پلاریزاسیون القایی محسوب می‌شود. در هر دو مدل مصنوعی طراحی شده، مشاهده گردید که مدل میانگین حاصل از ۱۰۰۰ اجرای بازنمونه‌برداری، ساختارهای اصلی زیرسطحی (از جمله موقعیت آنومالی‌ها، مرز لایه‌ها و زون‌های دگرسانی) را با دقت مناسبی در مقایسه با مدل وارون‌سازی تکی بازسازی می‌کند. نقشه‌های انحراف معیار حاصل از تحلیل عدم قطعیت، به‌طور سیستماتیک نواحی با بیشترین تغییرپذیری مدل را مشخص کردند. در مدل مصنوعی اول، بیشترین عدم قطعیت در مرز بین لایه سطحی و محیط میزبان و نیز در لبه‌های آنومالی مشاهده شد. در مدل مصنوعی دوم که پیچیدگی بیشتری داشت (شامل ساختار گسلی و سه ناحیه با خواص متفاوت)، عدم قطعیت نه تنها در مرز رولایه و محیط گسلی، بلکه در درون محیط با شارژپذیری بالاتر نیز افزایش یافت. این الگوها بیانگر آن است که عدم قطعیت عمدتاً در نواحی با گرادیان شدید پارامترهای فیزیکی و در بخش‌هایی از مدل که حساسیت داده‌ها به

پارامترها کاهش می‌یابد، متمرکز است. این یافته با مبانی نظری مسئله معکوس بدوضع همخوانی دارد و نشان می‌دهد که روش MBB قادر است به‌طور طبیعی نواحی نیازمند برداشت‌های تکمیلی یا تحلیل‌های دقیق‌تر را برجسته سازد. در داده‌های صحرایی، تطابق قابل توجهی بین پهنه‌های شارژپذیری بالا در مدل‌های وارون‌شده و بازه‌های کانی‌سازی ثبت‌شده در گمانه‌های اکتشافی (N12 و N23) مشاهده شد. این همخوانی عمقی و افقی، اعتبار روش پیشنهادی را در شرایط واقعی تأیید می‌کند. به‌ویژه در پروفیل ۲ از منطقه خوسف، هم‌مکانی پهنه‌های با شارژپذیری بیش از ۱۴-۱۵ میلی‌ولت بر ولت و مقاومت‌ویژه کمتر از ۲۰ اهم‌متر با لاگ‌های کانی‌سازی سولفیدی، نشان‌دهنده کارایی بالایی روش در تفکیک زون‌های دگرسانی و کانه‌زایی از سنگ‌های سالم است. همچنین مشاهده شد که بیشترین عدم قطعیت در نواحی گذار میان سنگ‌های مقاوم و زون‌های دگرسان قرار دارد که با تغییرات لیتولوژیکی گزارش‌شده در گمانه‌ها مطابقت دارد. این نکته حائز اهمیت است که روش MBB نه تنها به شناسایی زون‌های کانه‌زایی کمک می‌کند، بلکه مرزهای عدم قطعیت بالا را که نواحی پرریسک از نظر زمین‌شناسی هستند، آشکار می‌سازد. در داده صحرایی اول (منطقه مشگین‌شهر) که فاقد گمانه اکتشافی بود، تحلیل عدم قطعیت نشان داد که بخش غربی پروفیل برداشت، بالاترین انحراف معیار را دارد. این بخش پیش‌تر در شبه‌مقاطع نیز رفتار متفاوتی از نظر مقاومت‌ویژه پایین و شارژپذیری بالا نشان داده بود. هم‌راستایی این عدم قطعیت بالا با زون دگرسانی احتمالی (آرژلیک) حاکی از آن است که حتی در نبود داده‌های کنترلی مستقیم، نقشه انحراف معیار می‌تواند به عنوان شاخصی برای شناسایی نواحی پیچیده و نیازمند بررسی‌های تکمیلی عمل کند. از سوی دیگر، نتایج نشان داد که نوع جمله منظم‌ساز و ضرایب آن تأثیر مستقیمی بر میزان عدم قطعیت برآوردشده دارند. استفاده از نرم L_2 به همراه ماتریس‌های هموارسازی افقی و عمودی، منجر به مدل‌های پیوسته‌تر و کاهش نسبی عدم قطعیت در نواحی همگن گردید، اما در عین حال مرزهای تیز ساختارهای زمین‌شناسی را تا حدودی هموار کرد. این مشاهدات لزوم بهینه‌سازی پارامترهای منظم‌سازی متناسب با هدف مطالعه (تشخیص ساختارهای پیوسته در مقابل ساختارهای گسسته) را گوشزد می‌کند. در مجموع، نتایج بحث حاضر مؤید آن است که رویکرد بازنمونه‌برداری MBB، فراتر از صرفاً کمی‌سازی عدم قطعیت، قابلیت‌های زیر را نیز فراهم می‌آورد: شناسایی نواحی با حساسیت بالا و نیازمند بررسی بیشتر، اعتبارسنجی غیرمستقیم نتایج وارون‌سازی در نبود داده‌های کنترلی، و فراهم کردن مبنایی برای تصمیم‌گیری در طراحی برداشت‌های تکمیلی. این ویژگی‌ها به‌ویژه در اکتشافات معدنی و مطالعات زیست‌محیطی که هزینه حفاری و برداشت‌های اضافی بسیار بالاست، از ارزش عملی بالایی برخوردارند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک چارچوب جامع برای کمی‌سازی عدم قطعیت در وارون‌سازی داده‌های توموگرافی پلاریزاسیون القایی با استفاده از روش بازنمونه‌برداری ناپارامتری بوت‌استرپ بلوکی متحرک ارائه و پیاده‌سازی شد. الگوریتم بومی توسعه‌یافته در محیط MATLAB، قادر به انجام مدل‌سازی پیشرو، اعمال نوفه کنترل‌شده، وارون‌سازی دوبعدی مقاومت‌ویژه و شارژپذیری، و تولید مجموعه‌های متعدد داده بازنمونه‌برداری‌شده با قابلیت تنظیم طول بلوک، درصد حذف و تعداد تکرار است. عملکرد این چارچوب بر روی دو مدل مصنوعی با سطوح پیچیدگی متفاوت و دو مجموعه داده صحرایی از دو منطقه زمین‌شناسی مجزا (مشگین‌شهر و خوسف) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل‌های مصنوعی نشان داد که نقشه‌های انحراف معیار به‌وضوح نواحی با عدم قطعیت بالا را که عمدتاً منطبق بر مرزهای زمین‌شناسی، لبه‌های آنومالی و نواحی با گرادیان شدید پارامترهای فیزیکی هستند، مشخص می‌کند. این یافته با ماهیت بدوضع مسئله وارون ژئوفیزیکی همخوانی کامل دارد. در داده‌های صحرایی، تطابق معناداری بین پهنه‌های شارژپذیری بالا در مدل‌های وارون‌شده و بازه‌های کانی‌سازی ثبت‌شده در گمانه‌های اکتشافی (منطقه خوسف) مشاهده شد. این همخوانی، اعتبار روش پیشنهادی را در شرایط واقعی تأیید می‌کند. همچنین در منطقه مشگین‌شهر که فاقد گمانه بود، نقشه عدم قطعیت توانست بخش غربی خط برداشت (که پیش‌تر رفتار ژئوفیزیکی متفاوتی داشت) را به عنوان ناحیه‌ای با پیچیدگی بالا و نیازمند بررسی تکمیلی معرفی کند.

واژگان کلیدی: بازنمونه‌برداری، شارژپذیری، کمی‌سازی عدم قطعیت، وارون‌سازی

مقدمه

پلاریزاسیون القایی (Induced Polarization: IP) یکی از روش های مهم در ژئوفیزیک اکتشافی و مهندسی است که برای بررسی خواص الکتریکی زیرسطح، به ویژه در محیط های متخلخل اشباع از سیال، به کار می رود. این پدیده الکتروشیمیایی، نتیجه ی تجمع بارهای الکتریکی در مرزهای فازهای رسنا و نارسناست که در پاسخ به اعمال و سپس قطع یک میدان خارجی، به صورت ولتاژ تأخیری قابل اندازه گیری است (Slater et al, 2000). این پاسخ معمولاً با تابعی نمایی از زمان توصیف می شود و شاخص های کلیدی آن، شارژپذیری، ثابت زمانی و شکل تابع نزولی هستند. در ابتدا، کاربرد اصلی IP محدود به اکتشاف کانسارهای سولفیدی بود؛ اما امروزه دامنه استفاده از آن به حوزه های متعددی مانند شناسایی آلودگی های زیرسطحی، ردیابی مهاجرت سیال، تحلیل پایداری سازه های زیرزمینی، و مطالعات هیدروژئولوژی گسترش یافته است (Slater et al, Oldenbur and Li, 1999; 2000; Roudsari et al, 2024; Oldenborger et al, 2007; Dadehai IP می توانند در دو حوزه ی زمان (Time Domain) و فرکانس (Frequency Domain) برداشت شوند. در حوزه ی زمان، جریان پالسی اعمال شده و ولتاژ نزولی ثبت می گردد، در حالی که در حوزه ی فرکانس، امپدانس مختلط سیستم با جریان سینوسی تحلیل می شود (Binley and Slater, 2020). علیرغم مزایای تفسیرپذیری بالاتر در حوزه ی فرکانس، پیچیدگی ابزار و هزینه بالا، استفاده از حوزه ی زمان را در بسیاری از پروژه ها عملی تر کرده است. تحقیقات جدید در زمینه وارون سازی داده های IP نشان داده اند که با بهره گیری از مدل سازی دوبعدی و سه بعدی می توان اطلاعات ساختاری بسیار دقیق تری نسبت به تفسیر شبه مقطعی به دست آورد (Li Oldenburg and Li, 1994; Oldenbur and Li, 1999; and Oldenburg, 2000). مروری بر روش پلاریزاسیون القایی را می توان در منابع مختلفی از جمله سامنر، برتین و لوب و فینک و همکاران (Fink et al, 1990; Bertin et al, 1976; Sumner, 1976) یافت. علاوه بر پیشرفت هایی در درک بنیادی پدیده های پلاریزاسیون القایی، روش توموگرافی پلاریزاسیون القایی حوزه زمان در سال های اخیر پیشرفت فزاینده و توسعه قابل توجهی در بسیاری از زمینه های تحقیقاتی از مدل سازی پیشرو تا وارون سازی نشان داده است (Binley and Slater,

2020). با این حال، پیاده سازی مؤثر چنین وارون سازی هایی با چالش هایی همراه است، از جمله وابستگی شدید به کیفیت داده ها، وجود نوفه، ماهیت غیرخطی پاسخ IP، و کمبود الگوریتم های وارون سازی انعطاف پذیر و قابل دست رس (Adrian et al, 2022). از نظر فیزیکی پاسخ IP تابعی از رسانندگی محیط است؛ بنابراین ارتباط تنگاتنگی میان وارون سازی IP و مقاومت ویژه DC وجود دارد (Pourhashemi et al, 2024). رویکردهای کلاسیک در وارون سازی IP اغلب شامل تخمین اولیه رسانایی از داده های DC و سپس خطی سازی پاسخ IP برای استخراج شارژپذیری هستند (Sasaki, 1994; Pelton et al, 1978). بر اساس طبقه بندی های اخیر، روش های وارون سازی را می توان در سه دسته جای داد: (۱) وارون سازی خطی با پاسخ تقریب زده، (۲) وارون سازی متوالی، و (۳) حل مستقیم غیرخطی مسئله معکوس (Oldenburg and Li, 1994; Pourhashemi et al, 2024). در این پژوهش، رهیافت سوم به عنوان روش اصلی انتخاب شده است. ابتدا یک الگوریتم بومی در محیط MATLAB طراحی شده که فرآیند مدل سازی و اعمال نوفه را انجام می دهد. سپس مراحل وارون سازی داده های مقاومت ویژه الکتریکی (DC) و قطبش القایی (IP) همراه با تحلیل عدم قطعیت، به کمک همین الگوریتم پیاده سازی شده است. علاوه بر آن، برای تحلیل عدم قطعیت پارامترهای وارون شده، از الگوریتم باز نمونه برداری بوت استرپ بلوکی متحرک (Moving Block Bootstrap-MBB) بهره گرفته شده است. ویژگی شاخص الگوریتم توسعه یافته، کنترل کامل بر فرآیند مدل سازی و وارون سازی است. این کنترل شامل امکان تنظیم طول بلوک های باز نمونه برداری، درصد حذف، تعداد تکرار، نوع وزن دهی در ماتریس وارون، و اعمال آزمون های پایداری است. این موارد باعث می شوند تحلیل حساسیت مدل به داده و پایداری الگوریتم در مواجهه با نوفه به صورت کمی و دقیق تر انجام گیرد. تحلیل عدم قطعیت با استفاده از MBB به دلیل حفظ ساختار وابستگی زمانی و مکانی داده های IP، نسبت به روش های مستقل کلاسیک مانند بوت استرپ معمولی بسیار مؤثرتر است (Davison and Hinkley, 1997; Rahmati Shad et al, 2025). در این روش، داده ها به صورت بلوک های همپوشان در طول زمان یا موقعیت مکانی انتخاب شده و سپس با باز نمونه برداری و

رابطه ۲)

$$\eta_{12} = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt$$

که در آن V_p ولتاژ اولیه و $V(t)$ ولتاژ ثانویه وابسته به زمان است. به بیان دیگر، شارژپذیری قابل قبول در بازه زمانی $[t_1, t_2]$ برابر است با نسبت مساحت سطح زیر منحنی ولتاژ ثانویه به ولتاژ اولیه. این کمیت یک پارامتر ذاتی است که بیانگر توانایی محیط در نگهداری و آزادسازی بارهای الکتریکی بوده و بر حسب میلی ثانیه گزارش می‌شود. برای تحلیل دقیق پدیده‌ی پلاریزاسیون القائی، لازم است پاسخ محیط از دیدگاه ریاضی به صورت کمی بیان شود. در این راستا، یکی از رویکردهای پرکاربرد، استفاده از مدل سازی مبتنی بر ممان دوقطبی‌های الکتریکی است. در این مدل، فرض می‌شود که اثرات پلاریزاسیون را می‌توان با برهم‌نهی رفتار تعداد زیادی از دوقطبی‌ها شبیه‌سازی کرد. شدت جریان‌های ناشی از این ممان دوقطبی‌ها در یک نقطه‌ی دلخواه از فضا به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود (Oldenburg and Li, 1994; Seigel, 1959):

رابطه ۳)

$$V = \frac{1}{4\pi} \iiint M \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dv$$

که در آن، M بردار ممان دوقطبی، r فاصله‌ی نقطه‌ی مشاهده از منبع، و dv حجم تفاضلی است. با به کارگیری قضیه‌ی دیورژانس، رابطه‌ی فوق به شکل رابطه ۴ بازنویسی می‌شود:

رابطه ۴)

$$\text{div} = \left(\frac{M}{\sigma r} \right) = \frac{1}{r} \text{div} \left(\frac{M}{\sigma} \right) + \frac{M}{\sigma} \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right)$$

که با بهره‌گیری از آن به بیان معادله رابطه ۵ می‌رسیم:

رابطه ۵)

$$V = \frac{1}{4\pi} \iiint \left[\text{div} \left(\frac{M}{\sigma r} \right) - \frac{1}{r} \text{div} \left(\frac{M}{\sigma} \right) \right] dv$$

حال با استفاده از قضیه‌ی گاوس، می‌توان انتگرال حجمی را به انتگرال سطحی و حجمی تبدیل کرد:

رابطه ۶)

$$V = \frac{1}{4\pi} \iint_s \frac{M_n}{\sigma r} ds - \frac{1}{4} \iiint_v \frac{1}{r} \text{div} \left(\frac{M}{\sigma} \right) dv$$

از دیدگاه فیزیکی، معادلات فوق نشان‌دهنده‌ی آن است که توزیع بار و جریان در یک محیط قطبش‌پذیر را می‌توان به صورت ترکیبی از مؤلفه‌های سطحی و حجمی توصیف کرد.

حذف جزئی داده‌ها، تعداد زیادی (مثلاً ۱۰۰۰ تکرار) مجموعه داده مصنوعی تولید می‌شود. این تعداد بالای تکرار موجب می‌شود توزیع آماری پارامترهای وارون‌شده به شکل تجربی و معتبر تخمین زده شود، در حالی که انجام همین تعداد برداشت واقعی در شرایط میدانی، از لحاظ اقتصادی و زمانی کاملاً غیرممکن است. از دیدگاه آماری، بازنمونه‌برداری ناپارامتری، به‌ویژه به صورت MBB، نه تنها باعث تخمین واریانس و خطای استاندارد مدل می‌شود، بلکه امکان ارزیابی پوشش احتمالاتی و ساخت فواصل اطمینان نیز فراهم می‌گردد. برخلاف مدل‌های تحلیلی که به فرضیات خاص درباره توزیع داده وابسته‌اند، روش‌های بازنمونه‌برداری مبتنی بر داده‌اند و به همین دلیل به‌ویژه در داده‌های ژئوفیزیکی با ساختار وابسته، کاربردپذیری بالایی دارند (Khabaz et al, 2024). مقاله حاضر قصد دارد با تلفیق مدل‌سازی پلاریزاسیون القائی دقیق و تحلیل آماری مبتنی بر بازنمونه‌برداری به روشی MBB، گامی در جهت بهبود کیفیت وارون‌سازی و کمی‌سازی عدم قطعیت نتایج در شرایط داده‌های نوفه‌ای و زمین‌شناسی پیچیده بردارد. الگوریتم طراحی‌شده از نظر ساختار عددی، کنترل محاسباتی و پایه آماری، قابلیت گسترش در مطالعات واقعی را نیز دارا است که این مهم در ادامه مسیر با داده‌های مصنوعی و صحرایی آزموده خواهد شد.

مواد و روش‌ها

مدل‌سازی پیشرو پاسخ پلاریزاسیون القائی زمین دلخواه از لحاظ تئوری شارژپذیری ذاتی که نسبت ولتاژ ثانویه به ولتاژ اولیه است، طبق رابطه ۱ بیان می‌شود (Oldenburg and Li, 1994; Telford et al, 1990):

رابطه ۱)

$$\eta = \frac{V_s}{V_p}$$

که در آن η شارژپذیری ذاتی، V_s ولتاژ ثانویه فروپاشی و V_p ولتاژ اولیه است. در عمل محاسبه شارژپذیری با استفاده از معادله رابطه ۲ به دلیل عدم امکان اندازه‌گیری V_s وجود ندارد. بنابراین برای اندازه‌گیری شارژپذیری نیاز به اندازه‌گیری منحنی واهلش ولتاژ در پنجره‌های زمانی مختلف وجود دارد. در این حالت، شارژپذیری (η) در یک بازه‌ی زمانی $[t_1, t_2]$ به صورت انتگرالی از منحنی ولتاژ ($V(t)$) تعریف می‌شود:

مبنا برای محاسبه و تفسیر داده‌های IP در حوزه‌ی زمان به شمار می‌رود.

مدل‌سازی وارون

بازنمونه‌برداری بر مبنای الگوریتم MBB

یکی از رویکردهای نوین و کارآمد در زمینه کمی‌سازی عدم قطعیت، استفاده از روش‌های آماری پیشرفته مانند الگوریتم بازنمونه برداری بوت‌استرپ بلوکی به عنوان یک روش ناپارامتری است. روش بوت‌استرپ متعارف، نمونه‌های جدید را از طریق بازنمونه‌گیری تصادفی از داده‌های مشاهده شده تولید می‌کند. این بازنمونه‌گیری می‌تواند همراه با جایگزینی یا بدون جایگزینی انجام گیرد. فرض اصلی این روش بر این است که مشاهدات به صورت مستقل و هم‌توزیع هستند. در چنین شرایطی، با تکرار بازنمونه‌گیری، تابع توزیع تجربی داده‌ها ساخته می‌شود و می‌توان از آن برای برآورد عدم قطعیت استفاده کرد. با این حال، در بسیاری از مسائل ژئوفیزیکی، داده‌های مشاهده شده دارای وابستگی‌ها و همبستگی‌های درونی هستند. این امر موجب می‌شود که کارایی و دقت روش بوت‌استرپ متعارف کاهش یابد. راه‌حل برای رفع این محدودیت، استفاده از بازنمونه‌برداری بلوکی است. در این روش، داده‌ها به چندین بلوک تقسیم می‌شوند و بازنمونه‌گیری به جای تک‌نمونه‌ها، روی بلوک‌های داده صورت می‌گیرد. بلوک‌ها می‌توانند همپوشان یا غیرهمپوشان باشند. این روش ابتدا توسط کونش (Kunsch, 1989) و سپس لیو و سینگ (Liu and Singh, 1992) معرفی شد و برای طیف وسیعی از مشاهدات تصادفی با همبستگی ضعیف به کار می‌رود. جزئیات این استراتژی در الگوریتم زیر خلاصه شده است (Rahmati et al, 2025). الگوریتم ۱ شامل d بردار داده‌ها، ζ_{min} کمینه طول بلوک، ζ_{max} بیشینه طول بلوک، κ تعداد بلوک‌ها تعریف شده، n تعداد (طول) داده‌ها، و d^* داده‌های بوت‌استرپ شده (بازنمونه‌برداری شده) می‌شود.

علاوه بر این، قانون پایستگی بار در حضور منابع قطبش‌پذیر به شکل روابط ۷، ۸ و ۹ قابل بیان است (Seigel, 1959)

رابطه (۷)

$$\text{div} j = i$$

رابطه (۸)

$$\text{div} j = i - \text{div} M$$

رابطه (۹)

$$\text{div}(j + M) = i$$

که در آن j چگالی جریان الکتریکی و i منبع جریان تزریقی است. در محیط قطبش‌پذیر، ولتاژهای حاصل از مدل‌سازی با استفاده از توابع نگاشت به شکل روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۲ بیان می‌شوند:

رابطه (۱۰)

$$V_{\sigma} = F_{dc}[\sigma]$$

رابطه (۱۱)

$$\nabla(\sigma \nabla V_a) = -I \delta(r - r_s)$$

رابطه (۱۲)

$$V_p = F_{dc}[\sigma(1 - \eta)]$$

$$\nabla(\sigma(1 - \eta) \nabla V_p) = -I \delta(r - r_s)$$

که در آن σ رسانندگی، η شارژپذیری، I شدت جریان تزریقی و $\delta(r - r_s)$ تابع دلتای دیراک در محل منبع جریان است. F_{dc} عملگر مدل‌سازی پیشرو مقاومت‌ویژه DC است. جزئیات بیشتر نحوی محاسبه پاسخ مقاومت‌ویژه DC در مقالات قناتی و همکاران (Ghanati et al, 2020) و پورهایمی و همکاران (Pourhashemi et al, 2024) آورده شده است. نهایتاً شارژپذیری ظاهری از رابطه‌ی ۱۳ استخراج می‌شود:

رابطه (۱۳)

$$\eta_a = \frac{V_s}{V_p} = \frac{V_p - V_{\sigma}}{V_p} = \frac{F_{dc}[\sigma(1 - \eta)] - F_{dc}[\sigma]}{F_{dc}[\sigma(1 - \eta)]}$$

این معادله نشان می‌دهد که شارژپذیری ظاهری در حقیقت نسبت اختلاف بین پتانسیل اولیه و پتانسیل بدون پلاریزاسیون به پتانسیل اولیه است. این تعریف پایه‌ای‌ترین

الگوریتم ۱: بازنمونه برداری بوت‌استرپ بلوکی متحرک

Step 0. Given: noisy data $d \in \mathbb{R}^{n \times 1} = (d_1, \dots, d_n)$, ζ_{min} , and ζ_{max} , where $\zeta_{min} > 1$ and $\zeta_{max} < n$.

Step 1. Define the block length ζ randomly in the range of $(\zeta_{min}, \zeta_{max})$.

Step 2. Construct κ blocks with $\kappa = n - \zeta + 1$ from d , where the i th block B_i with starting point d_i consists of ζ elements, i.e., $B_i = (d_i, d_{i+1}, d_{i+2}, \dots, d_{i+\zeta-1})$ with $1 \leq i \leq \kappa$.

Step 3. The κ overlapping blocks form a matrix with κ rows and ζ columns $B^* = \begin{pmatrix} d_1 & \dots & d_{1+\zeta-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{\kappa} & \dots & d_{\kappa+\zeta-1} \end{pmatrix}_{\kappa \times \zeta}$.

Step 4. Select randomly ℓ blocks (rows) without replacement from B^* .

Step 5. Sort the ℓ blocks (rows) in the ascending order in terms of the number of each row, and then concatenate them together without the repeated samples to form the bootstrapped data $d^* \in \mathbb{R}^{(\ell \times \zeta) - q}$, with q being the length of the overlap.

Step 1 to 5 is repeated to generate a variety of data realizations.

ها است. استفاده از بسط تیلور و خطی سازی، جمله اول جایگزین شده و معادله خطی شده زیر حاصل می شود:

رابطه ۱۵)

$$\min_{\eta \in \mathbb{R}^n} (\|d - f(\eta) - \nabla f(\eta) \Delta \eta\|_2^2 + \alpha \|W_m(\eta - \eta_{apr})\|_2^2)$$

با مشتق گیری تابع هدف نسبت به $\Delta \eta$ و حل معادله حاصل، روش عددی تکراری زیر به دست می آید، یعنی:

رابطه ۱۶)

$$\Delta \eta = (J_{IP}(\eta^k)^T W_d^T W_d J_{IP}(\eta^k) + \alpha(a_h D_h^T D_h + b_v D_v^T D_v) + \lambda W_p)^{-1} (J_{IP}(\eta^k)^T W_d^T W_d \Delta d - \alpha(a_h D_h^T D_h + b_v D_v^T D_v) \eta^{k-1} - \lambda W_p \eta^{k-1})$$

بطوریکه J_{IP} ماتریس حساسیت IP است که بر اساس رسانایی حاصل از وارون سازی مقاومت ویژه محاسبه می شود. λ مقدار مثبت بزرگی است که مقادیر منفی شارژپذیری را تعدیل می کند. $W_p = \text{diag}(u(-\eta))$ ماتریس قطری با عناصر صفر و یک است که از تابع پله ای $u(x)$ ساخته شده است و Δd بردار باقی مانده داده ها است. مابقی پارامترها نیز پیشتر تعریف شده است. فرآیند وارون سازی با مدل شارژپذیری η^0 که از میانگین هندسی داده های شارژپذیری ظاهری به عنوان مدل اولیه، آغاز می شود. ماتریس حساسیت IP در هر تکرار به روزرسانی می شود. ماتریس ژاکوبین تغییرات داده های مشاهده شده نسبت به پارامترهای مدل را نشان می دهد (Pourhashemi et al, 2024; Oldenburg and Li, 1994):

رابطه ۱۷)

$$J_{IP}^{ij} = \frac{\partial d_i}{\partial \eta_j}$$

نتایج عددی

مدل مصنوعی اول

با هدف بررسی عملکرد الگوریتم وارون سازی و روش بازنمونه برداری، نخستین مدل مصنوعی شامل یک لایه سطحی با توپوگرافی مشخص و یک ناحیه غیرهمگن در بخش میانی است. برای تعریف این مدل، دو پارامتر اصلی مقاومت ویژه و شارژپذیری در نظر گرفته شد.

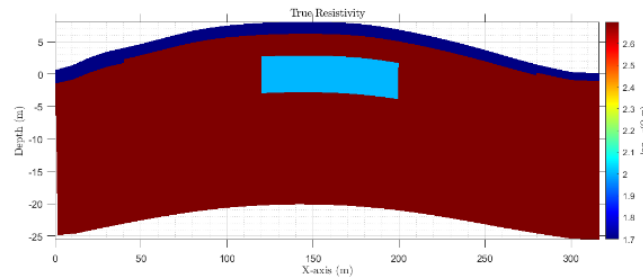
اولدنبرگ و لی (Oldenburg and Li, 1994) سه رویکرد برای وارون سازی داده های پلاریزاسیون القایی (IP) در حوزه زمان ارائه کرده اند که همگی مبتنی بر مدل اغتشاش بارپذیری پیشنهاد شده توسط سیگل (Seigel, 1959) هستند. این رویکردها شامل دو مرحله وارون سازی متوالی هستند که ابتدا مدل رسانندگی ویژه و سپس مدل بارپذیری را بازیابی می کنند. در روش اول، مسئله وارون به صورت خطی و با فرض بارپذیری ناچیز حل می شود. روش دوم با ایجاد اغتشاش در مدل رسانندگی ویژه، مدل بارپذیری را استخراج می کند. روش سوم با حل یک مسئله غیرخطی، چارچوبی جامع برای وارون سازی داده های IP ارائه می دهد که از جمله مزایای آن حذف فرض بارپذیری ناچیز و امکان استفاده از الگوریتمی مشترک برای داده های مقاومت ویژه و IP است. در این پژوهش، به دلیل مزایای روش سوم، این رویکرد به عنوان استراتژی اصلی وارون سازی داده های IP مورد استفاده قرار گرفته است. تابع هدف این الگوریتم که شامل مجموع وزن دار تابع تطابق با داده ها Φ_d و تابع پایداری مدل Φ_η که با ضریب وزنی α ترکیب شده به صورت رابطه ۱۴ تعریف می شود.

رابطه ۱۴)

$$\Psi(\eta, \alpha) = \min(\Phi_d + \alpha \Phi_\eta) = \min(\|W_d(d - f(\eta))\|_2^2 + \alpha \|W_m(\eta - \eta_{apr})\|_2^2),$$
 در این رابطه، η مدل شارژپذیری، α ضریب میرایی و W_d ماتریس وزن دهی داده ها است که از معکوس خطای داده ها تشکیل شده است. ماتریس هموارساز مدل $W_m = a_h D_h^T D_h + b_v D_v^T D_v$ ترکیبی از ماتریس های مشتق گیری در جهات افقی و عمودی است. ضرایب $b_v = 1$ و $a_h = 1$ برای افزایش همواری مدل در این جهات به کار می روند. η_{apr} مدل شارژپذیری پیشین است. خروجی $f(\eta)$ برابر است با η_a مطابق با معادله رابطه ۱۳. جمله اول تابع هدف تحت عنوان χ^2 شناخته می شود که معیاری از سطح برازش داده های محاسباتی به داده های مشاهده ای است. مقدار $\chi^2 = 1$ معیاری ایده آل برای برازش مناسب داده ها در سطح نوفه موجود در اندازه گیری

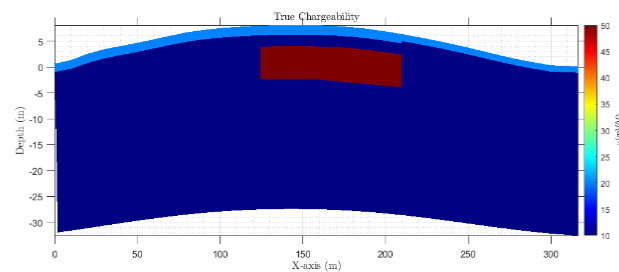
شکل ۲ نیز توزیع شارژپذیری متناظر نمایش داده شده است که به طور مشابه بیانگر وجود ناحیه‌ای با رفتار متفاوت از محیط اطراف است.

در شکل ۱ توزیع مقاومت‌ویژه واقعی مدل نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بخش میانی دارای یک ناحیه با مقاومت‌ویژه کمتر نسبت به زمینه است.



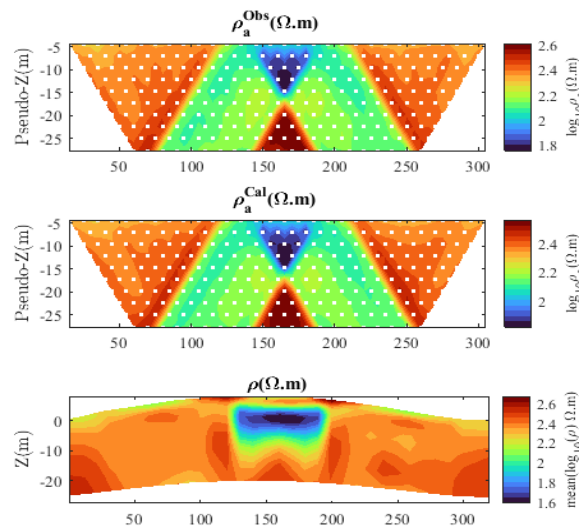
شکل ۱: مدل واقعی مقاومت‌ویژه همراه با توپوگرافی مربوط به مدل اول.

Fig. 1: True resistivity along with the topography corresponding to synthetic model 1.



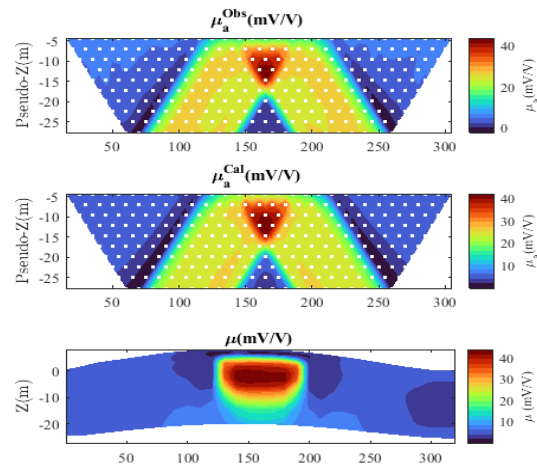
شکل ۲: مدل واقعی شارژپذیری همراه با توپوگرافی متناظر مدل اول.

Fig. 2: True chargeability along with the topography corresponding to synthetic model 1.



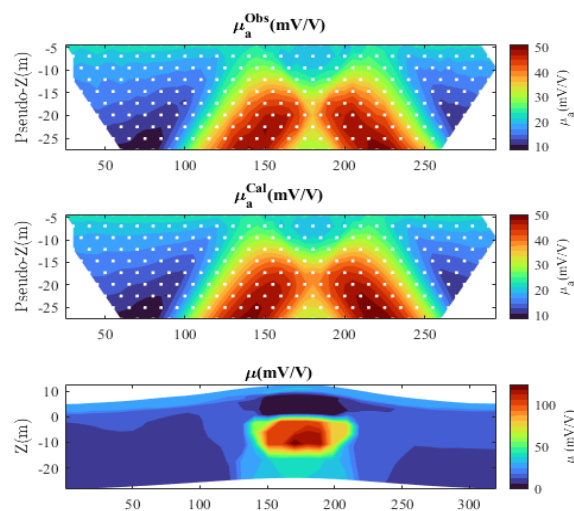
شکل ۳: نتیجه وارون‌سازی مقاومت‌ویژه بدون بازنمونه‌برداری مربوط به مدل اول. شبه مقطع مقاومت‌ویژه ظاهری (بالا)، شبه مقطع مقاومت‌ویژه محاسباتی (وسط)، و مقطع مقاومت‌ویژه (پایین). نقاط سفید رنگ روی شبه مقاطع موقعیت عمقی و جانبی نقاط اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

Fig. 3: Resistivity inversion result without resampling corresponding to the first model. Apparent resistivity pseudosection (top), calculated resistivity pseudosection (middle), and resistivity section (bottom). The white points on the pseudosections indicate the depth and lateral positions of the measured points.



شکل ۴: نتیجه وارون سازی شارژپذیری بدون بازنمونه برداری مربوط به مدل اول. شبه مقطع شارژپذیری ظاهری (بالا)، شبه مقطع شارژپذیری محاسباتی (وسط)، و مقطع شارژپذیری (پایین).

Fig. 4: Chargeability inversion result without resampling corresponding to the first model. Apparent chargeability pseudosection (top), calculated chargeability pseudosection (middle), and chargeability section (bottom).



شکل ۵: مثالی از وارون سازی شارژپذیری با استفاده از یک داده نمونه برداری شده مربوط به مدل مصنوعی اول. شبه مقطع شارژپذیری ظاهری (بالا)، شبه مقطع شارژپذیری محاسباتی (وسط)، و مقطع شارژپذیری (پایین).

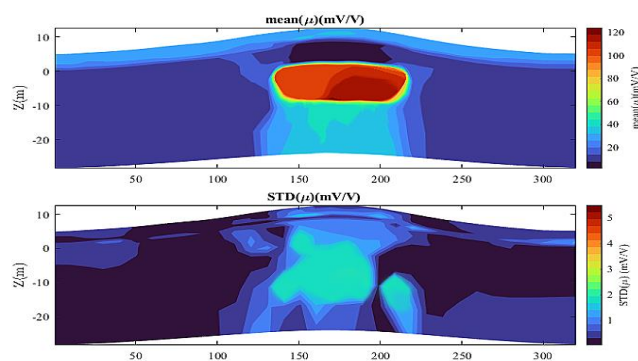
Fig. 5: An example of chargeability inversion using a resampled dataset corresponding to the first model. Apparent chargeability pseudosection (top), calculated chargeability pseudosection (middle), and chargeability section (bottom).

درصد دامنه داده ها، در اولین گام وارون سازی بدون بازنمونه برداری (داده های غیر بوت استرپ شده) انجام شد. خروجی های این مرحله برای مقاومت ویژه و شارژپذیری به ترتیب در شکل های ۳ و ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که ساختار اصلی مدل به خوبی بازایی و قابل تشخیص است، اما به دلیل تأثیر نوفه مصنوعی و محدودیت ذاتی وارون سازی، برخی جزئیات به طور کامل بازسازی نشده اند. مقدار χ^2 برای وارون سازی داده های مقاومت ویژه

اندازه گیری های شبیه سازی شده مقاومت ویژه DC و پلاریزاسیون القایی با استفاده از آرایه دایپل - دایپل، با فاصله الکترودی ۲۰ متر و تعداد پرش ۸، انجام شد. انتخاب این آرایه به دلیل حساسیت مناسب آن نسبت به تغییرات جانبی زیرسطحی و پوشش افقی قابل قبول صورت گرفت، به طوری که این آرایه به عنوان گزینه ای بهینه برای شناسایی ساختارهای دوبعدی و سه بعدی محسوب می شود. پس از تولید داده ها و اضافه کردن نوفه گوسی به میزان ۵

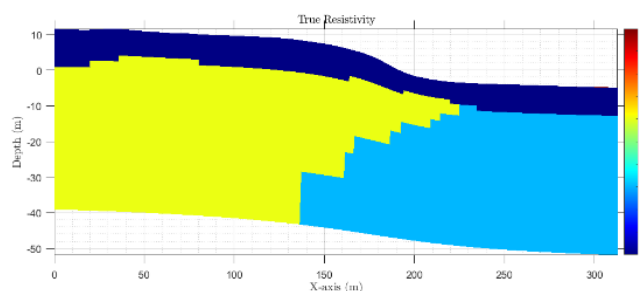
چندانی در مقاطع عدم قطعیت وجود ندارد. از طرف دیگر مشاهده شده که مقاطع عدم قطعیت با ۵۰۰ پیشامد تفاوت قابل ملاحظه‌ای با مقادیر ۱۰۰۰ وجود داشت. بنابراین براساس این رویکرد عدد ۱۰۰۰ برای تمام مدل‌سازی‌های مصنوعی و واقعی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین الگوریتم وارون‌سازی به تعداد پیشامدهای تولید شده اجراء می‌گردد. این دو کمیت آماری که از مدل‌های برزاش داده شده با معیار سطح برزش مناسب (یعنی $\chi^2 \leq m + \sqrt{2m}$) به طوری که m تعداد داده‌ها است) بدست آمده در شکل ۶ ارائه گردیده‌اند. میانگین نشان‌دهنده ساختار پایدار مدل در بین تکرارهاست، در حالی که نقشه انحراف معیار بیانگر توزیع پراکندگی پارامتر شارژپذیری و یا نقشه عدم قطعیت مدل وارون‌شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقطع میانگین شکل هندسی آنومالی و مرز رولایه را به خوبی نشان می‌دهد. مقطع انحراف معیار بیشترین مقدار عدم قطعیت را در مرز رولایه و محیط میزبان و نیز در لبه‌های آنومالی نمایش می‌دهد.

ظاهری و شارژپذیری ظاهری به ترتیب بعد از ۱۱ و ۹ تکرار برابر $1/42$ و $1/27$ حاصل شد. از لحاظ بصری نیز شباهت قابی قبولی بین شبه مقاطع مشاهده‌ای و محاسباتی دیده می‌شود (شکل ۳ و ۴). برای بررسی اثر بازنمونه‌برداری به کمک رهیافت MBB، مجموعه‌ای از داده‌های بازنمونه‌برداری شده با استفاده از الگوریتم ۱ تولید و فرآیند وارون‌سازی برای هر مجموعه داده انجام شد. با توجه به اینکه هدف تعیین عدم قطعیت در مدل شارژپذیری است، بنابراین صرفاً داده‌های پلاریزاسیون القائی وارد الگوریتم ۱ می‌گردد. بر همین مبنا داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی بدون بازنمونه‌برداری وارد فرآیند وارون‌سازی شد. در شکل (۵) یک پیشامد (realization) از داده‌های بوت‌استرپ شده همراه با نتیجه مدل وارون‌شده شارژپذیری را نمایش می‌دهد. در ادامه، میانگین نتایج حاصل از کل اجرای بازنمونه‌برداری و انحراف معیار آن‌ها محاسبه شد. تعداد پیشامدهای تولید شده از داده‌های اصلی ۱۰۰۰ عدد می‌باشد. این نکته شایان ذکر است که بررسی‌های عددی ما نشان داد که نتایج ۱۰۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰۰ پیشامد تفاوت



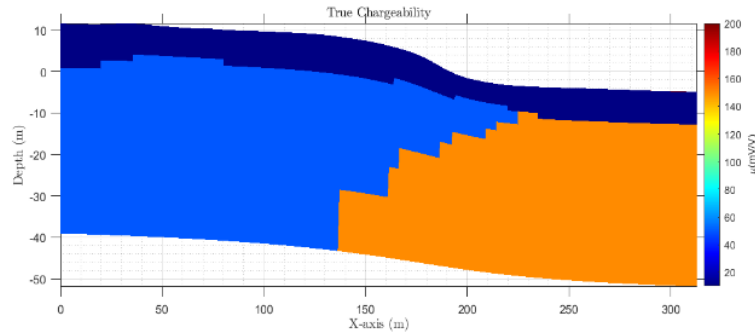
شکل ۶: مقطع میانگین (بالا) و انحراف معیار (پایین) منتج شده از مدل‌های معادل وارون شده از داده‌های بازنمونه‌برداری شده مربوط به مثال مصنوعی اول.

Fig. 6: Mean section (top) and standard deviation section (bottom) derived from equivalent inverted models of resampled data corresponding to the first synthetic example.



شکل ۷: مدل واقعی مقاومت‌ویژه به همراه توپوگرافی مربوط به مدل دوم.

Fig. 7: True resistivity model along with the topography corresponding to the second model.



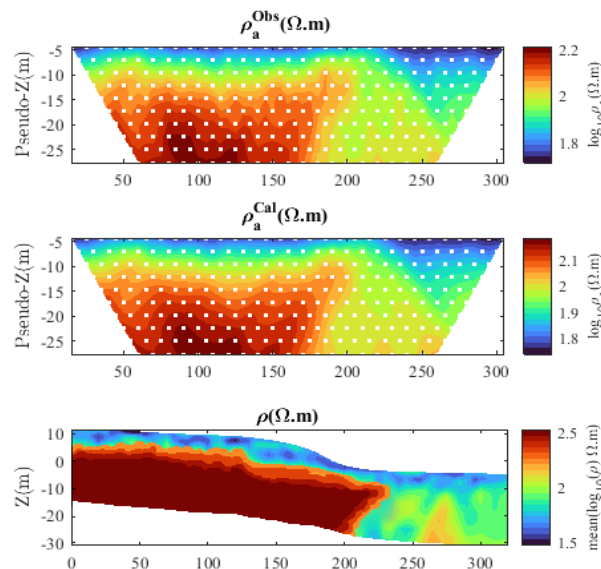
شکل ۸: مدل واقعی شارژپذیری به همراه توپوگرافی مربوط به مدل دوم.

Fig. 8: True chargeability model along with the topography corresponding to the second model.

مدل مصنوعی دوم

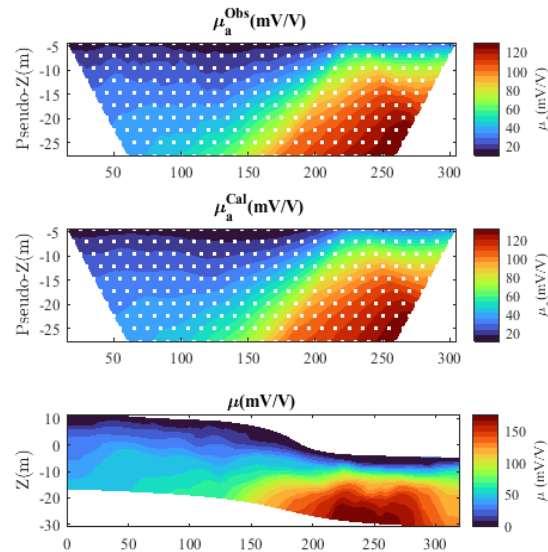
۱۰۰۰ عدد پیشامد از مجموعه داده اصلی تولید می‌شود و فرآیند وارون‌سازی برای هریک از این پیشامدها اجرا می‌گردد. در گام پایانی، مدل‌هایی که در سطح نوفه به داده‌های مشاهده‌ای برزاش شده‌اند (یعنی $\chi^2 \leq m + \sqrt{2m}$ ، به طوری که m تعداد داده‌ها است) به عنوان مدل‌های معادل در نظر گرفته می‌شود. برآورد میانگین و انحراف معیار از مدل‌های معادل انجام می‌شود، نتایج وارون‌سازی برای دو کمیت مقاومت‌ویژه و شارژپذیری بدون بازنمونه‌برداری داده‌های مشاهده‌ای در شکل‌های ۹ و ۱۰ آمده است.

مدل مصنوعی دوم از سه ناحیه با پارامترهای فیزیکی مقاومت‌ویژه و شارژپذیری مختلف تشکیل شده است. شکل ۷ و ۸ به ترتیب توزیع واقعی مقاومت ویژه و شارژپذیری را نمایش می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، محیط دارای دو ناحیه مجزا با رفتار الکتریکی متفاوت است که شرایطی چالش‌برانگیزتر برای وارون‌سازی ایجاد می‌کند. شبیه‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه ظاهری و شارژپذیری ظاهری از طریق آرایه داپیل-دایپل با فاصله الکترودی ۲۰ متر و تعداد پرش ۸ انجام شد. همانند مدل مصنوعی اول،



شکل ۹: نتیجه وارون‌سازی مقاومت‌ویژه بدون بازنمونه‌برداری مربوط به مدل دوم. شبه مقطع مقاومت‌ویژه ظاهری (بالا)، شبه مقطع مقاومت‌ویژه محاسباتی (وسط)، و مقطع مقاومت‌ویژه (پایین).

Fig. 9: Resistivity inversion result without resampling corresponding to the second model. Apparent resistivity pseudosection (top), calculated resistivity pseudosection (middle), and resistivity section (bottom).

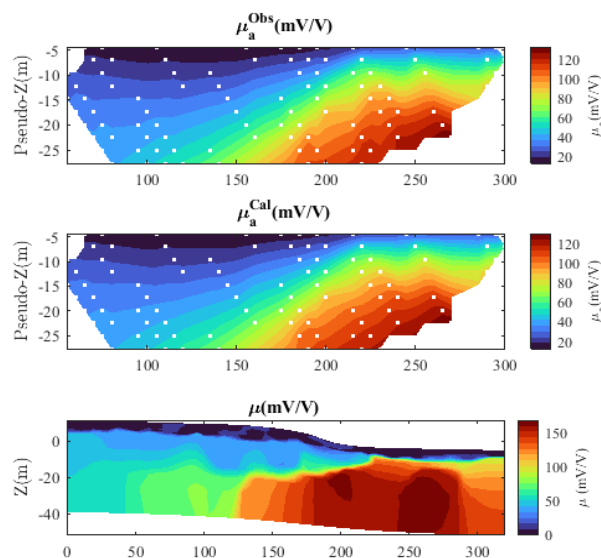


شکل ۱۰: نتیجه وارون سازی شارژپذیری بدون بازنمونه برداری مربوط به مدل دوم. شبه مقطع شارژپذیری ظاهری (بالا)، شبه مقطع شارژپذیری محاسباتی (وسط)، و مقطع شارژپذیری (پایین).

Fig. 10: Chargeability inversion result without resampling corresponding to the second model. Apparent chargeability pseudosection (top), calculated chargeability pseudosection (middle), and chargeability section (bottom).

ظاهری و شارژپذیری ظاهری به ترتیب بعد از ۱۰ و ۱۲ تکرار برابر ۱/۱۸ و ۱/۰۹ حاصل شد. برای بررسی اثر بازنمونه برداری، در شکل ۱۱ نمونه ای از نتایج وارون سازی شارژپذیری با استفاده از یک اجرای بازنمونه برداری نمایش داده شده است.

در این نتایج ساختار کلی مدل تا حدی بازیابی شده است، اما به دلیل نوفه داده ها و محدودیت تفکیک پذیری روش های ژئوالکتریکی و چالش های موجود در وارون سازی، بخشی از جزئیات و مرزهای واقعی دچار هموارشدگی شده اند. مقدار χ^2 برای وارون سازی داده های مقاومت ویژه

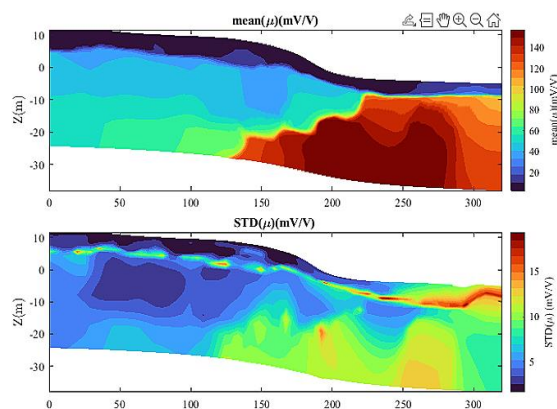


شکل ۱۱: مثالی از وارون سازی شارژپذیری با استفاده از یک داده نمونه برداری شده مربوط به مدل مصنوعی دوم. شبه مقطع شارژپذیری ظاهری (بالا)، شبه مقطع شارژپذیری محاسباتی (وسط)، و مقطع شارژپذیری (پایین).

Fig. 11: An example of chargeability inversion using a resampled dataset corresponding to the second model. Apparent chargeability pseudosection (top), calculated chargeability pseudosection (middle), and chargeability section (bottom).

میزان پراکندگی مقادیر شارژپذیر در نواحی مختلف مدل را به تصویر می کشد. همانطور که مشاهده می شود مقطع میانگین سه محیط زیرسطحی با مقادیر شارژپذیری متفاوت را به خوبی از یکدیگر تفکیک کرده است و تا حدودی مقطع وارون شده به مدل واقعی نزدیک است.

همانطور که مشاهده می شود علیرغم حذف بخشی از داده ها، مدل وارون شده توزیع شارژپذیری نزدیک به مدل واقعی را نشان می دهد. سرانجام میانگین و انحراف معیار نتایج حاصل از چندین اجرای بازنمونه برداری محاسبه شده در شکل ۱۲ ارائه شده است. میانگین نتایج، ساختار پایدار مدل را نشان می دهد، در حالی که نقشه انحراف معیار



شکل ۱۲: مقطع میانگین (بالا) و انحراف معیار (پایین) شارژپذیری منتج شده از مدل های معادل وارون شده از داده های بازنمونه برداری شده مربوط به مثال مصنوعی دوم.

Fig. 12: Mean section (top) and standard deviation section (bottom) of chargeability derived from equivalent inverted models of resampled data corresponding to the second synthetic example.

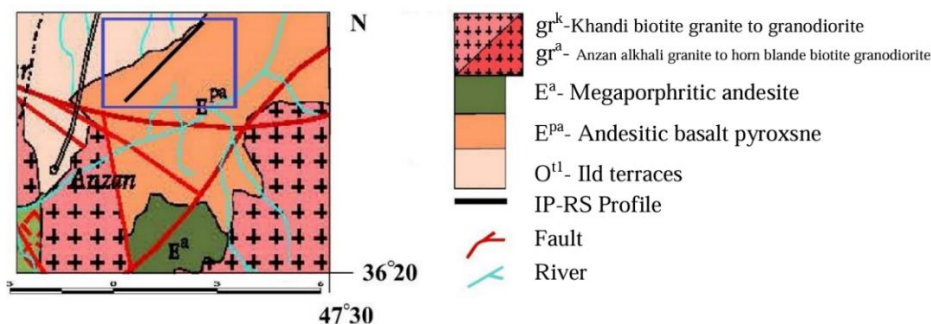
کیفیت مانند خطای داده و پایداری مدل نسبت به تغییرات هایپرپارامترها است. مجموعه دوم دارای گمانه اکتشافی است و امکان اعتبارسنجی بیرونی را فراهم می کنند. در این مطالعه (مجموعه داده های واقعی دوم) محل گمانه ها بر روی خروجی های وارون سازی نمایش داده می شود تا انطباق عمقی و افقی ساختارهای بازبایی شده با مشاهدات مستقیم سنجیده شود. داده صحرائی اول مربوط به محدوده شمال غرب ایران و بخش هایی از زون آذربایجان، شهرستان مشگین شهر، روستای انزان می شود. بر اساس نقشه زمین شناسی موجود، رخنمون های متنوعی از واحدهای آذرین درونی و بیرونی به همراه رسوبات جوان تر در این محدوده گسترش یافته است. در بخش شمالی و شمال شرقی محدوده، توده های گرانیتی تا گرانودیوریتی با ترکیب بیوتیت دار و هورنبلاند بیوتیت دیده می شود که معرف توده های اسیدی و نیمه عمیق هستند. این سنگ ها به صورت گرانیت قلیایی و گرانودیوریت بیوتیتی شناسایی شده اند و به لحاظ ژئوشیمیایی نشانگر یک ماگماتیسم با خاستگاه کالکوالکالن تا قلیایی می باشند. در بخش های میانی نقشه، واحدهای آندزیتی، بازالت آندزیتی و

معیار، بیشترین مقدار انحراف معیار را در مرز رولایه و محیط گسلی نشان می دهد. همچنین وجود مقادیر بزرگ تر انحراف معیار در محیط با شارژپذیری بیشتر و مرز دو گسل به دلیل پیچیدگی آن مشهود است.

داده های صحرائی

هدف اصلی این قسمت از مقاله انتقال از فضای کنترل شده و مدل های مصنوعی به شرایط واقعی است تا کارایی الگوریتم های وارون سازی و چارچوب تحلیل عدم قطعیت در برابر پیچیدگی های زمین واقعی ارزیابی شود. در بخش های پیشین چارچوب فیزیکی مسئله و الگوریتم وارون سازی ارائه شد و سازوکار بازنمونه برداری غیرپارامتری با تکیه بر بوت استرپ بلوکی متحرک تشریح گردید. اکنون در زیربخش همان زنجیره محاسباتی به کار گرفته شده در مدل های مصنوعی بر داده های واقعی اعمال می شود تا پاسخ مدل به ناهمگنی های زمین و نوفه های محیطی و محدودیت های هندسی نوع آرایه برداشت روشن گردد. در این فصل دو مجموعه داده واقعی بررسی می شود. مجموعه نخست بدون اتکال مستقیم به گمانه ارزیابی خواهد شد و تمرکز آن بر خوداتکایی الگوریتم و سنجه های درونی

کنترل هندسه واحدهای سنگی، در زهکشی منطقه نیز اثرگذار بوده‌اند. رودخانه‌های اصلی با روند عمومی شمالی - جنوبی در امتداد همین ساختارها جریان دارند و سبب ایجاد فرسایش خطی و تشکیل دره‌های باریک در واحدهای ولکانیکی شده‌اند. در نقشه زمین‌شناسی شکل ۱۳، موقعیت خط برداشت داده‌های ژئوفیزیکی به صورت خطی سیاه‌رنگ با طول حدود ۲ کیلومتر مشخص شده است. این خط برداشت به گونه‌ای انتخاب شده که از بخش‌های اصلی واحدهای آذرین و تراس‌های کواترنری عبور کند تا امکان مقایسه رفتار الکتریکی و پلاریزاسیون القایی در سنگ‌های مختلف فراهم شود. عبور خط برداشت از محدوده دربرگیرنده گسل‌ها و رودخانه‌ها نیز شرایط مناسبی برای بررسی نقش ساختارهای تکتونیکی و هیدروژئولوژیکی بر پاسخ‌های ژئوفیزیکی ایجاد می‌کند.



شکل ۱۳: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در داده صحرایی اول. محدوده مورد مطالعه توسط کادر مستطیلی مشخص شده است.
Fig. 13: Geological map of the study area in the first field dataset. The study area is indicated by a rectangular box.

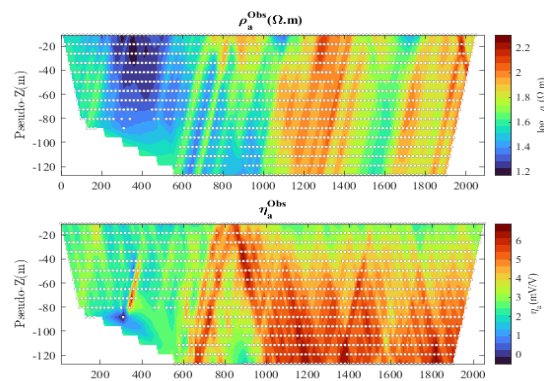
تزریقی در منبع است که بر اساس روابط پایه مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی به مقاومت‌ویژه ظاهری و شارژپذیری ظاهری تبدیل شدند. در مرحله برداشت، برای کاهش اثر نوفه محیطی و نوفه الکتریکی ناشی از خطوط انتقال نیرو و جفت‌شدگی الکترومغناطیسی، هر اندازه‌گیری چندین بار تکرار و مقدار نهایی بر اساس میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده محاسبه گردید. از طرف دیگر کیفیت داده‌ها با استفاده از شاخص انحراف معیار داده‌ها کنترل شد و داده‌های مشکوک که دارای انحراف زیادی از روند عمومی بودند، حذف گردیدند. داده‌های خام برداشت شده در ادامه به صورت شبه‌مقاطع مقاومت‌ویژه و شارژپذیری ارائه شده‌اند تا پیش از انجام وارون‌سازی، تصویری از وضعیت اولیه زیرسطحی به دست آید. این داده‌ها مبنای اصلی تحلیل در بخش‌های بعدی هستند و پس از آماده‌سازی در

تراکی‌اندزیت به صورت لایه‌ها و جریان‌های آتشفشانی رخنمون دارند. این واحدها دارای ترکیب پورفیری تا مگاپورفیری بوده و کانی‌های شاخصی همچون پلاژیوکلاز، پیروکسن و آمفیبول را در بر می‌گیرند. حضور این واحدهای ولکانیکی نشان‌دهنده فعالیت‌های آتشفشانی گسترده در سنین ترشیری است که نقش مهمی در تکامل زمین‌ساختی منطقه ایفا کرده است. در جنوب و جنوب‌غرب منطقه، تراس‌های قدیمی کواترنری به چشم می‌خورند که حاصل فرایندهای رسوبی و فرسایشی رودخانه‌های محلی هستند. این رسوبات عموماً شامل ماسه، شن و قطعات آذرین فرسایش‌یافته‌اند و معرف جوان‌ترین واحدهای زمین‌شناسی منطقه محسوب می‌شوند. از دیدگاه ساختاری، منطقه تحت تأثیر گسل‌های عمده با روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی و شمال‌شرقی - جنوب‌غربی قرار دارد. این گسل‌ها علاوه بر

برای بررسی ویژگی‌های زیرسطحی در محدوده مورد مطالعه، اندازه‌گیری‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی با آرایش قطبی-دوقطبی انجام شد. خط برداشت اصلی در امتداد شمال‌شرق - جنوب‌غرب طراحی گردید و طول آن حدود دو کیلومتر است. در طول این خط تعداد ۶۴ الکتروود در فواصل منظم ۲۰ متری نصب شدند و برداشت داده‌ها در هر ایستگاه تا ۱۶ پرش انجام شد تا پوشش عمقی مناسبی به دست آید. منبع جریان مورد استفاده، یک ژنراتور جریان استاندارد بود که قادر به تزریق جریان تا مقادیر چند آمپری می‌باشد. الکتروودهای جریان پتانسیل به صورت جفت در نقاط از پیش تعیین‌شده نصب شدند و در هر ایستگاه هم‌زمان مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری و شارژپذیری ظاهری اندازه‌گیری شد. داده‌های برداشت‌شده شامل ولتاژهای ثبت‌شده در گیرنده و جریان

نشان می‌دهد که در بخش غربی خط برداشت، ناحیه‌ای با مقادیر پایین مقاومت‌ویژه وجود دارد که می‌تواند حاصل دگرسانی شدید (دگرسانی آرژلیک) در واحدهای سنگی باشد. در مقابل، بخش‌های میانی و شرقی مقادیر بالاتری از مقاومت‌ویژه نشان می‌دهند که با رخنمون واحدهای گرانیتی و سنگ‌های سالم‌تر منطقه همخوانی دارد. در شبه‌مقطع شارژپذیری، روندی معکوس نسبت به مقاومت‌ویژه مشاهده می‌شود. در همان بخش غربی که مقاومت‌ویژه پایین است، مقادیر شارژپذیری افزایش یافته که می‌تواند ناشی از حضور کانی‌های رسی در اثر دگرسانی یا رطوبت بالا در شکستگی‌ها باشد. در بخش‌های مقاوم‌تر، مقدار شارژپذیری کاهش یافته و نشان‌دهنده واحدهای سنگی آذرین است.

چارچوب الگوریتم وارون‌سازی معرفی شده در بخش پیشین مورد استفاده قرار گرفتند. برای تحلیل مقدماتی داده‌های برداشت شده و پیش از انجام وارون‌سازی، مقاومت‌ویژه و شارژپذیری به صورت شبه‌مقاطع دوبعدی نمایش داده شدند. این نمایش، توزیع اولیه داده‌ها را در امتداد خط برداشت مشخص کرده و نقاط با رفتار غیرعادی را آشکار می‌سازد. در شکل ۱۴، بخش بالایی شبه‌مقطع مقاومت‌ویژه ظاهری و بخش پایینی شبه‌مقطع شارژپذیری ظاهری را نشان می‌دهد. در این شکل، محور افقی بیانگر موقعیت ایستگاه‌ها در امتداد خط برداشت و محور عمودی بیانگر عمق نفوذ معادل (یا عمق نفوذ ظاهری) است. تغییرات رنگی نشان‌دهنده مقدار مقاومت‌ویژه و شارژپذیری در هر نقطه از زیرسطح می‌باشد. بررسی شبه‌مقطع مقاومت‌ویژه

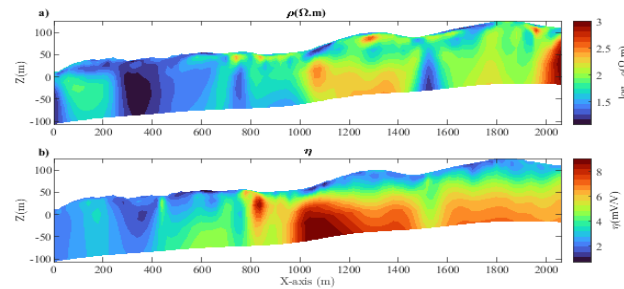


شکل ۱۴: شبه‌مقاطع اولیه داده‌ها در خط برداشت مربوط به داده صحرایی اول: بالا، شبه‌مقطع مقاومت ویژه ظاهری؛ پایین، شبه‌مقطع شارژپذیری ظاهری. نقاط سفید رنگ روی شبه‌مقاطع موقعیت عمقی و جانبی نقاط اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

Fig. 14: Initial pseudosections of the first real data along the survey line: top, apparent resistivity pseudosection; bottom, apparent chargeability pseudosection. The white points on the pseudosections indicate the depth and lateral positions of the measured points.

غربی خط برداشت احتمالاً به دلیل وجود زون دگرسانی آرژلیکی در این ناحیه است که با برداشت‌های زمین‌شناسی منطقه نیز سازگاری دارد. بخش پایینی شکل، مدل وارون‌سازی شارژپذیری را نشان می‌دهد. در این مدل، ناحیه غربی خط برداشت مقادیر بالاتری از شارژپذیری دارد که می‌تواند نشانه‌ای از وجود دگرسانی آرژلیکی یا حضور رطوبت در شکستگی‌ها باشد. مقادیر شارژپذیری در بخش‌های مرکزی و شرقی کاهش یافته و نشانگر سنگ‌های کم‌دگرسان و فاقد کانی‌سازی گسترده است. این نتایج پایه، ضمن تأیید مشاهدات اولیه از مشاهدات زمین‌شناسی، چارچوبی برای تحلیل عدم‌قطعیت در بخش بعدی فراهم می‌سازد.

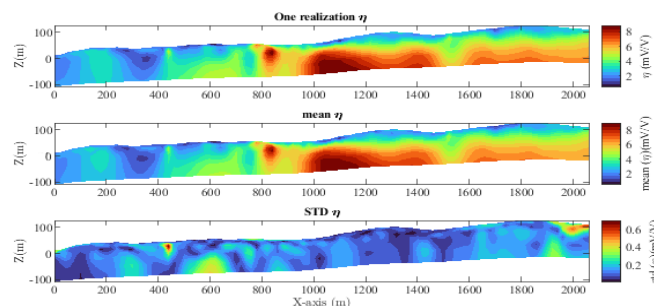
پس از بررسی شبه‌مقاطع اولیه، داده‌های برداشت شده با استفاده از الگوریتم وارون‌سازی پایه مورد تحلیل قرار گرفتند. در این مرحله، از روش استاندارد بدون بازنمونه‌برداری استفاده شد تا تصویری مرجع از توزیع مقاومت‌ویژه و شارژپذیری در زیرسطح به دست آید. این نتایج مبنای مقایسه با خروجی‌های حاصل از بازنمونه‌برداری در بخش بعدی خواهند بود. در شکل ۱۵ نتایج وارون‌سازی مقاومت‌ویژه و شارژپذیری ارائه شده است. بخش بالایی شکل توزیع مقاومت‌ویژه را در امتداد خط برداشت نشان می‌دهد. مقادیر بالاتر مقاومت‌ویژه در بخش میانی و شرقی خط برداشت بیانگر حضور واحدهای گرانیتی نسبتاً سالم است. در مقابل، کاهش مقاومت‌ویژه در بخش



شکل ۱۵: نتایج وارون سازی داده صحرایی اول بدون بازنمونه برداری. بالا: مدل مقاومت ویژه، پایین: مدل شارژپذیری.
Fig. 15: Inversion results for associated with the first real data without resampling. Top: resistivity model; Bottom: chargeability model.

تصویری پایدار و هموار از توزیع مقاومت ویژه و شارژپذیری در زیرسطح است که از ترکیب نتایج متعدد به دست آمده و بنابراین نسبت به مدل منفرد دارای ویژگی های بیشتری است. بخش پایینی مقادیر انحراف معیار مدل های بازنمونه برداری شده را نمایش می دهد. این نقشه نواحی با عدم قطعیت بالا و پایین را مشخص می سازد. مناطقی که دارای انحراف معیار بزرگ تر هستند، نشان دهنده حساسیت بالای مدل به تغییرات داده ها و بنابراین نیازمند برداشت های تکمیلی یا تحلیل های بیشتر می باشند. در مقابل، نواحی با انحراف معیار پایین از پایداری نسبی برخوردار بوده و اعتماد بیشتری به نتایج آن ها وجود دارد. بررسی کلی نشان می دهد که بخش غربی خط برداشت، که پیش تر در شبه مقاطع اولیه نیز رفتار متفاوتی داشت، بالاترین میزان انحراف معیار را نشان می دهد. این موضوع نشانگر آن است که ساختارهای زیرسطحی در این محدوده پیچیده تر بوده و داده های موجود داده های موجود برای توصیف کامل آن کافی نیستند.

برای ارزیابی پایداری مدل ها و تحلیل عدم قطعیت، داده های برداشت شده با استفاده از روش بازنمونه برداری بوت استرپ بلوکی متحرک مجدداً پردازش شدند. در این روش، مجموعه های متعددی از داده های بازنمونه برداری شده تولید گردید و هر یک از این پیشامدها به طور مستقل تحت فرآیند وارون سازی قرار گرفت. بدین ترتیب امکان بررسی تغییرپذیری مدل های حاصل و تعیین میزان اعتماد به نتایج فراهم شد. فرآیند نمونه برداری و وارون سازی داده ها همانند مدل های مصنوعی در بخش قبل می باشد، به گونه ای که تحلیل عدم قطعیت به ازای وارون سازی ۱۰۰۰ داده بازنمونه برداری شده از داده اصلی انجام می شود. شکل ۱۶ نتایج تحلیل بازنمونه برداری را نشان می دهد. بخش بالایی شکل یکی از مدل های حاصل از بازنمونه برداری را نشان می دهد. این مدل بیانگر نمونه ای منفرد از بین مجموعه بزرگ مدل های بازنمونه برداری شده است و به خوبی نوسانات موضعی در مقادیر مقاومت ویژه و شارژپذیری را نمایان می کند. بخش میانی توزیع میانگین همه مدل های بازنمونه برداری شده را نشان می دهد. این میانگین بیانگر

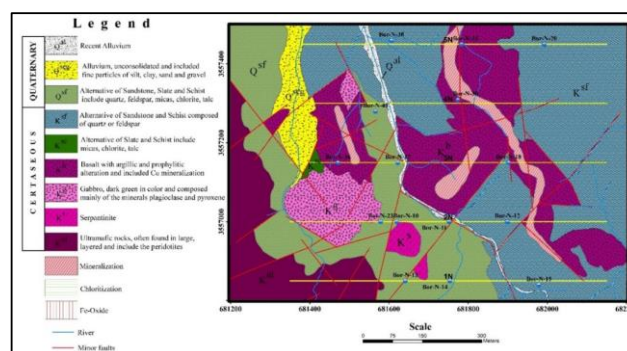


شکل ۱۶: نتایج بازنمونه برداری و تحلیل عدم قطعیت مربوط به داده صحرایی اول. بالا: یک مدل منفرد حاصل از بازنمونه برداری؛ میانی: میانگین کل مدل های بازنمونه برداری شده؛ پایین: انحراف معیار مدل های بازنمونه برداری شده.

Fig. 16: Resampling results and uncertainty analysis associated with the first real data. Top: a single model obtained from resampling; Middle: mean of all resampled models; Bottom: standard deviation of the resampled models.

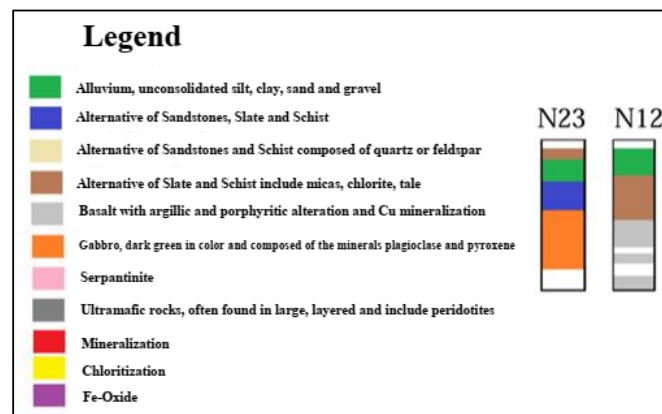
چنین ساختارهایی نه تنها سبب تمرکز دگرسانی و کانه زایی شده اند، بلکه مسیر جریان سیالات گرمایی را نیز هدایت کرده اند. ویژگی های ساختاری منطقه شامل تراکم بالای گسل ها، درهم تنیدگی پهنه های افیولیتی و ولکانیکی و هم راستایی شبکه زهکشی با این ساختارهاست. رودخانه ها عموماً موازی یا هم راستا با گسل های فرعی جریان دارند و همین هم راستایی شاخصی از کنترل تکتونیکی شدید در شکل گیری توپوگرافی و رخنمون ها است. در این منطقه، مجموعاً ۵ پروفیل با امتداد غربی - شرقی و طول تقریبی ۸۰۰ متر برداشت شده است. داده های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی مورد استفاده در این مقاله مربوط به پروفیل ۲ (شمارش از جنوب به شمال - 2N) می باشد. پروفیل ۲ در امتداد پهنه دگرسانی مرکزی منطقه مورد مطالعه قرار گرفته و دو گمانه اکتشافی با شناسه های N12 و N23 بر روی این پروفیل حفر شده است. جزئیات سنگ شناسی این پروفیل ها در شکل ۱۸ قابل مشاهده است. داده های این گمانه ها در ادامه برای اعتبارسنجی نتایج وارون سازی و تحلیل عدم قطعیت به کار گرفته می شوند. بنابراین، پروفیل به گونه ای انتخاب شده است که از زون های دگرسانی عبور کنند تا هم اثرات سنگ شناسی و ساختاری و هم ارتباط آن ها با کانی سازی های سولفیدی در داده های مقاومت ویژه و شارژ پذیری به خوبی آشکار شود. نقشه زمین شناسی و راستای پروفیل در شکل ۱۷ قابل مشاهده است.

داده صحرایی دوم مربوط به استان خراسان جنوبی و حوالی شهرستان خوسف است. این ناحیه بخشی از کمربند افیولیتی و آتشفشانی شرق ایران به شمار می آید و از دیدگاه سنگ شناسی و ساختاری تنوع قابل توجهی دارد. بر پایه نقشه زمین شناسی شکل ۱۷، واحدهای سنگی و رخنمون های اصلی منطقه عبارتند از: آبرفت های جوان (Qal) شامل رسوبات سخت نشده مانند ماسه، سیلت، رس و قطعات ریز شن و قلوه سنگ که عمدتاً در مسیر رودخانه ها و دشت های کم ارتفاع گسترش دارند؛ رسوبات کواترنری (Qsc, Qsf) شامل تناوبی از ماسه سنگ، شیل و اسلیت که با کانی هایی چون کوارتز، فلدسپار، میکا، کلریت و تالک همراه هستند؛ بازالت های دگرسان شده (Kb) که تحت آلتراسیون آرژیلیک و پروپیلیتی قرار گرفته اند و اغلب همراه با کانه زایی مس دیده می شوند؛ گابرو (Kg) با رنگ سبز تیره و ترکیب اصلی پلاژیوکلاز و پیروکسن که در پهنه های افیولیتی منطقه رخنمون دارد؛ سرپانتینیت (Ks) که به صورت توده ای یا عدسی در بخش های افیولیتی گسترش یافته است؛ و در نهایت سنگ های اولترامافیک (Kul) که غالباً پریدوتیت های لایه ای هستند و نشان دهنده خاستگاه افیولیتی منطقه می باشند. علاوه بر این واحدها، زون های دگرسانی مهمی شامل کلریتیزاسیون، پهنه های اکسید آهن و زون های کانه زایی سولفیدی در نقشه مشخص شده اند که نقش کلیدی در کانی سازی مس دارند. این زون ها عموماً توسط گسل های فرعی با روند شمال غربی - جنوب شرقی و شمال شرقی - جنوب غربی کنترل می شوند.



شکل ۱۷: نقشه زمین شناسی محدوده خوسف (بورزمین) شامل واحدهای اصلی سنگی (آبرفت های جوان، بازالت دگرسان، گابرو، سرپانتینیت و اولترامافیک)، زون های دگرسانی و کانی سازی، گسل های فرعی و مسیر رودخانه ها. موقعیت خطوط برداشت ژئوفیزیکی از شمال (بالا) به جنوب (پایین) همراه با گمانه های اکتشافی حفر شده بر روی پروفیل ها در نقشه مشخص شده است.

Fig. 17: Geological map of the Khusf (Borzeamin) area, including main rock units (young alluvium, altered basalt, gabbro, serpentinite, and ultramafic rocks), alteration and mineralization zones, minor faults, and river courses. The locations of geophysical survey lines from north (top) to south (bottom) along with exploration boreholes drilled on the profiles are also indicated on the map.

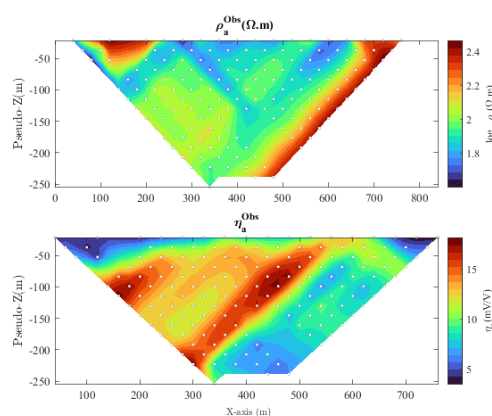


شکل ۱۸: گمانه‌های اکتشافی مربوط به پروفیل ۲ داده صحرائی دوم.

Fig. 18: Exploration boreholes related to profile 2 of the second field dataset.

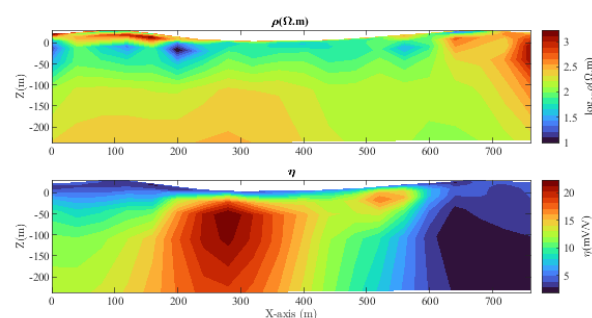
این همبستگی اغلب معرف حضور زون‌های دگرسانی و تجمع کانی‌های سولفیدی است. در مقابل، در دو انتهای پروفیل مقادیر مقاومت‌ویژه بالاتر از ۵۰ اهم‌متر و شارژپذیری کمتر از ۸ میلی‌ولت بر ولت مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده سنگ‌های سالم و کم‌دگرسان است.

شبه‌مقاطع مقاومت‌ویژه و شارژپذیری پروفیل ۲ در شکل ۱۹ ارائه شده‌اند. در بخش بالایی شکل، مقاومت‌ویژه ظاهری و در بخش پایینی، شارژپذیری ظاهری ترسیم شده است. الگوهای مشاهده‌شده نشان می‌دهند که در مرکز پروفیل کاهش مقاومت‌ویژه همراه با افزایش شارژپذیری وجود دارد.



شکل ۱۹: شبه‌مقاطع داده‌های برداشت شده مربوط به پروفیل ۲. بالا: مقاومت‌ویژه ظاهری، پایین: شارژپذیری ظاهری.

Fig. 19: Pseudosections of the acquired data for the second real data (profile 2). Top: apparent resistivity, Bottom: apparent chargeability

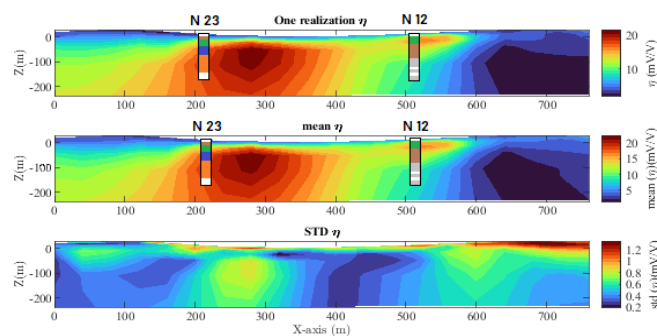


شکل ۲۰: نتایج وارون‌سازی پروفیل ۲ داده صحرائی دوم بدون بازنمونه‌برداری. بالا: مدل مقاومت‌ویژه، پایین: مدل شارژپذیری.

Fig. 20: Inversion results for the second real data (profile 2) without resampling. Top: resistivity model, Bottom: chargeability model

ترسیم شده است و در قسمت پایین، نقشه انحراف معیار مدل‌ها به عنوان شاخص عدم قطعیت نشان داده شده است. برای اعتبارسنجی نتایج، موقعیت دو گمانه اکتشافی N23 و N12 به همراه لاگ کانی سازی بر روی دو پنتل بالایی ترسیم شدند. بررسی تطبیقی نشان داد که پهنه‌های شارژپذیری بالا در مرکز خط با بازه‌های کانی سازی ثبت شده در هر دو گمانه هم‌مکان هستند. مرز بالایی این پهنه‌ها تقریباً با آغاز کانی سازی در لاگ‌ها هم‌عمق بوده و از نظر عمقی هم‌خوانی مطلوبی مشاهده می‌شود. در نقشه انحراف معیار نشان داده شد که بیشترین عدم قطعیت در نواحی گذار میان سنگ‌های مقاوم و زون‌های دگرسان وجود دارد که با تغییرات لیتولوژیکی گزارش شده در لاگ‌ها مطابقت دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش بازنمونه برداری علاوه بر تعیین کمی عدم قطعیت در مدل‌ها، مناطق پیچیده و پرریسک زمین‌شناسی را نیز برجسته می‌کند.

نتایج وارون سازی داده‌های پروفیل دوم بدون اعمال بازنمونه برداری در شکل ۲۰ نمایش داده شده است. بخش بالا مدل مقاومت ویژه و بخش پایین مدل شارژپذیری را نشان می‌دهد. مدل‌های وارون شده نشان می‌دهد که مرکز پروفیل دارای مقادیر مقاومت ویژه کمتر از ۲۰ اهم متر است که هم‌زمان با افزایش شارژپذیری بیش از ۱۵ میلی‌ولت بر ولت همراه شده است. این همبستگی بارز معرف زون دگرسانی و حضور احتمالی کانی سازی سولفیدی است. در سوی شرقی و غربی پروفیل، مقاومت ویژه بالاتر و شارژپذیری پایین‌تر مشاهده می‌شود که معرف سنگ‌های سالم و فاقد کانی سازی گسترده است. برای ارزیابی پایداری نتایج وارون سازی و تحلیل عدم قطعیت، داده‌های پروفیل دوم با استفاده از روش بازنمونه برداری بوت‌استرپ پردازش شدند. نتایج در شکل ۲۱ ارائه گردیده است. در قسمت بالای این شکل یک مدل منفرد از بازنمونه برداری‌ها نمایش داده شده است. در قسمت میانی، میانگین کل مدل‌ها



شکل ۲۱: نتایج بازنمونه برداری خط ۲ داده صحرایی دوم با اعتبارسنجی گمانه‌ها. بالا: یک مدل منفرد از بازنمونه برداری شده همراه با گمانه‌های N23 و N12 و بازه‌های کانی سازی، میانی: میانگین کل مدل‌ها همراه با گمانه‌ها، پایین: نقشه انحراف معیار مدل‌ها.

Fig. 21: Resampling results for the second real data (profile 2) with borehole validation. Top: a single resampled model along with boreholes N23 and N12 and mineralization intervals; Middle: mean of all models together with the boreholes; Bottom: standard deviation map of the models.

بحث و نتایج

تکی بازسازی می‌کند. نقشه‌های انحراف معیار حاصل از تحلیل عدم قطعیت، به‌طور سیستماتیک نواحی با بیشترین تغییرپذیری مدل را مشخص کردند. در مدل مصنوعی اول، بیشترین عدم قطعیت در مرز بین لایه سطحی و محیط میزبان و نیز در لبه‌های آنومالی مشاهده شد. در مدل مصنوعی دوم که پیچیدگی بیشتری داشت (شامل ساختار گسلی و سه ناحیه با خواص متفاوت)، عدم قطعیت نه تنها در مرز رولایه و محیط گسلی، بلکه در درون محیط با شارژپذیری بالاتر نیز افزایش یافت. این الگوها بیانگر آن است که عدم قطعیت عمدتاً در نواحی با گرادیان شدید

نتایج حاصل از مدل سازی‌های مصنوعی و داده‌های صحرایی نشان می‌دهد که رویکرد بازنمونه برداری بوت‌استرپ بلوکی متحرک (MBB) ابزاری کارآمد برای کمی سازی عدم قطعیت در وارون سازی داده‌های توموگرافی پلاریزاسیون القائی محسوب می‌شود. در هر دو مدل مصنوعی طراحی شده، مشاهده گردید که مدل میانگین حاصل از ۱۰۰۰ اجرای بازنمونه برداری، ساختارهای اصلی زیرسطحی (از جمله موقعیت آنومالی‌ها، مرز لایه‌ها و زون‌های دگرسانی) را با دقت مناسبی در مقایسه با مدل وارون سازی

مطالعه (تشخیص ساختارهای پیوسته در مقابل ساختارهای گسسته) را گوشزد می‌کند. در مجموع، نتایج بحث حاضر مؤید آن است که رویکرد بازنمونه‌برداری MBB، فراتر از صرفاً کمی‌سازی عدم قطعیت، قابلیت‌های زیر را نیز فراهم می‌آورد: شناسایی نواحی با حساسیت بالا و نیازمند بررسی بیشتر، اعتبارسنجی غیرمستقیم نتایج وارون‌سازی در نبود داده‌های کنترلی، و فراهم کردن مبنایی برای تصمیم‌گیری در طراحی برداشت‌های تکمیلی. این ویژگی‌ها به ویژه در اکتشافات معدنی و مطالعات زیست‌محیطی که هزینه حفاری و برداشت‌های اضافی بسیار بالاست، از ارزش عملی بالایی برخوردارند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک چارچوب جامع برای کمی‌سازی عدم قطعیت در وارون‌سازی داده‌های توموگرافی پلاریزاسیون القایی (IP) با استفاده از روش بازنمونه‌برداری ناپارامتری بوت‌استرپ بلوکی متحرک (MBB) ارائه و پیاده‌سازی شد. الگوریتم بومی توسعه‌یافته در محیط MATLAB، قادر به انجام مدل‌سازی پیشرو، اعمال نوفه کنترل‌شده، وارون‌سازی دوبعدی مقاومت‌ویژه و شارژپذیری، و تولید مجموعه‌های متعدد داده بازنمونه‌برداری‌شده است. تعداد ۱۰۰۰ پیشامد بر اساس آزمون همگرایی آماره‌های میانگین و انحراف معیار انتخاب گردید. نتایج حاصل از مدل‌های مصنوعی نشان داد که نقشه‌های انحراف معیار، نواحی با عدم قطعیت بالا را که منطبق بر مرزهای زمین‌شناسی، لبه‌های آنومالی و نواحی با گرادین شدید پارامترهای فیزیکی هستند، به وضوح مشخص می‌کنند. روش MBB نسبت به روش‌های کلاسیک بوت‌استرپ، به دلیل حفظ ساختار همبستگی مکانی داده‌ها، عملکرد واقع‌بینانه‌تری دارد. در داده‌های صحرایی، تطابق معناداری بین پهنه‌های شارژپذیری بالا در مدل‌های وارون‌شده و بازه‌های کانی‌سازی ثبت‌شده در گمانه‌های اکتشافی منطقه خوسف مشاهده شد. همچنین در منطقه مشگین‌شهر، نقشه عدم قطعیت توانست بخش غربی خط برداشت را به عنوان ناحیه‌ای با پیچیدگی بالا و نیازمند بررسی تکمیلی معرفی کند. نقشه انحراف معیار می‌تواند به عنوان شاخص کمی برای شناسایی نواحی با حساسیت بالا و عدم قطعیت زیاد مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، تأثیر طول بلوک‌های

پارامترهای فیزیکی و در بخش‌هایی از مدل که حساسیت داده‌ها به پارامترها کاهش می‌یابد، متمرکز است. این یافته با مبنای نظری مسئله معکوس بدوضع همخوانی دارد و نشان می‌دهد که روش MBB قادر است به‌طور طبیعی نواحی نیازمند برداشت‌های تکمیلی یا تحلیل‌های دقیق‌تر را برجسته سازد. در داده‌های صحرایی، تطابق قابل توجهی بین پهنه‌های شارژپذیری بالا در مدل‌های وارون‌شده و بازه‌های کانی‌سازی ثبت‌شده در گمانه‌های اکتشافی (N23 و N12) مشاهده شد. این همخوانی عمقی و افقی، اعتبار روش پیشنهادی را در شرایط واقعی تأیید می‌کند. به‌ویژه در پروفیل ۲ از منطقه خوسف، هم‌مکانی پهنه‌های با شارژپذیری بیش از ۱۴-۱۵ میلی‌ولت بر ولت و مقاومت‌ویژه کمتر از ۲۰ اهم‌متر با لاگ‌های کانی‌سازی سولفیدی، نشان‌دهنده کارایی بالایی روش در تفکیک زون‌های دگرسانی و کانه‌زایی از سنگ‌های سالم است. از طرف دیگر مشاهده شد که بیشترین عدم قطعیت در نواحی گذار میان سنگ‌های مقاوم و زون‌های دگرسان قرار دارد که با تغییرات لیتولوژیکی گزارش‌شده در گمانه‌ها مطابقت دارد. این نکته حائز اهمیت است که روش MBB نه تنها به شناسایی زون‌های کانه‌زایی کمک می‌کند، بلکه مرزهای عدم قطعیت بالا را که نواحی پرریسک از نظر زمین‌شناسی هستند، آشکار می‌سازد. در داده صحرایی اول (منطقه مشگین‌شهر) که فاقد گمانه اکتشافی بود، تحلیل عدم قطعیت نشان داد که بخش غربی پروفیل برداشت، بالاترین انحراف معیار را دارد. این بخش پیش‌تر در شبه‌مقاطع نیز رفتار متفاوتی از نظر مقاومت‌ویژه پایین و شارژپذیری بالا نشان داده بود. هم‌راستایی این عدم قطعیت بالا با زون دگرسانی احتمالی (آرژیلیک) حاکی از آن است که حتی در نبود داده‌های کنترلی مستقیم، نقشه انحراف معیار می‌تواند به عنوان شاخصی برای شناسایی نواحی پیچیده و نیازمند بررسی‌های تکمیلی عمل کند. از سوی دیگر، نتایج نشان داد که نوع جمله منظم‌ساز و ضرایب آن تأثیر مستقیمی بر میزان عدم قطعیت برآوردشده دارند. استفاده از نرم L_2 به همراه ماتریس‌های هموارسازی افقی و عمودی، منجر به مدل‌های پیوسته‌تر و کاهش نسبی عدم قطعیت در نواحی همگن گردید، اما در عین حال مرزهای تیز ساختارهای زمین‌شناسی را تا حدودی هموار کرد. این مشاهدات لزوم بهینه‌سازی پارامترهای منظم‌سازی متناسب با هدف

سیاسگزاری

نویسندگان اعلام می کنند که این پژوهش هیچ گونه حمایت مالی از سوی سازمان ها، نهادهای دولتی یا شرکت های خصوصی دریافت نکرده است. همچنین هیچ گونه تعارض منافع در انجام این پژوهش وجود ندارد.

References

- Adrian, J., Tezkan, B. and Candansayar, M., 2022. Exploration of a copper ore deposit in Elbistan/Turkey using 2D inversion of the time-domain induced polarization data by using unstructured mesh. *Pure and Applied Geophysics*, v. 179, p. 2255-2272.
- Bertin, J., Loeb, J., Van Nostrand, R. and Saxov, S., 1976. Experimental and theoretical aspects of induced polarization, v. 1. Gebrüder Borntraeger.
- Binley, A. and Slater, L., 2020. Resistivity and induced polarization: Theory and applications to the near-surface earth. Cambridge University Press.
- Davison, A. and Hinkley, D., 1997. Bootstrap methods and their application. Cambridge University Press.
- Fink, J., McAlister, E., Sternberg, B., Wieduwilt, W. and Ward, S., 1990. Induced polarization: Applications and case histories. Society of Exploration Geophysicists.
- Ghanati, R., Azadi, Y. and Fakhimi, R., 2020. RESIP2DMODE: A MATLAB-based 2D resistivity and induced polarization forward modeling software. *Iranian Journal of Geophysics*, v. 13(4), p. 60-78.
- Khabaz, Z., Ghanati, R. and Bérubé, C., 2024. Uncertainty quantification in electrical resistivity tomography inversion: Hybridizing block-wise bootstrapping with geostatistics. *Geophysical Journal International*, v. 239(3), p. 1576-1596.
- Kunsch, H., 1989. The jackknife and the bootstrap for general stationary observations. *Annals of Statistics*, v. 17(3), p. 1217-1241.
- Li, Y. and Oldenburg, D., 2000. 3-D inversion of induced polarization data. *Geophysics*, v. 65(6), p. 1931-1945.
- Liu, R. and Singh, K., 1992. Moving blocks jackknife and bootstrap capture weak dependence. In R. LePage and L. Billard (eds.), *exploring the limits of bootstrap*. New York: Wiley.
- Oldenborger, G., Routh, P. and Knoll, M., 2007. Model reliability for 3D electrical resistivity tomography: Application of the volume of investigation index to a time-lapse monitoring experiment. *Geophysics*, v. 72(4), p. F167-F175.
- Oldenburg, D. and Li, Y., 1994. Inversion of induced polarization data. *Geophysics*, v. 59(9), p. 1327-1341.
- Oldenburg, D. and Li, Y., 1999. Estimating depth of investigation in DC resistivity and IP surveys. *Geophysics*, v. 64(2), p. 403-416.
- Pelton, W., Rijo, L. and Swift, C., 1978. Inversion of two-dimensional resistivity and induced-polarization data. *Geophysics*, v. 43, p. 788-803.
- Pourhashemi, S., Ghanati, R. and AliHeidari, A., 2024. Time-domain induced polarization tomography inversion. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, v. 58(2), p. 153-160.
- Rahmati Shad, A., Ghanati, R. and Fallahsafari, M., 2025. A non-parametric resampling method for uncertainty analysis of geophysical inverse problems. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, v. 59(1), p. 61-67.
- Roudsari, M.S., Ghanati, R. and Bérubé, C.L., 2024. Spectral induced polarization tomography inversion: Hybridizing homotopic continuation with Bayesian inversion. *Geophysics*, v. 89, p. 1-16.
- Sasaki, Y., 1994. 3-D resistivity inversion using the finite-element method. *Geophysics*, v. 59(11), p. 1839-1848.
- Seigel, H., 1959. Mathematical formulation and type curves for induced polarization. *Geophysics*, v. 24(3), p. 547-565.
- Slater, L., Binley, A., Daily, W. and Johnson, R., 2000. Cross-hole electrical imaging of a controlled saline tracer injection. *Journal of Applied Geophysics*, v. 44(2-3), p. 85-102.
- Sumner, J., 1976. Principles of induced polarization for geophysical exploration. Amsterdam: Elsevier.
- Telford, W., Geldart, L. and Sheriff, R., 1990. Applied geophysics, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.

بازنمونه برداری بر کیفیت تخمین عدم قطعیت به صورت سیستماتیک بررسی شود. توسعه الگوریتم به حالت سه بعدی و ترکیب آن با روش های وارون سازی بیزی می تواند گام بعدی برای افزایش دقت این رهیافت باشد. به کارگیری روش پیشنهادی در سایر زمینه های ژئوفیزیک زیست محیطی و هیدروژئولوژی نیز توصیه می گردد.