

Inverse Modeling of Time-Domain Induced Polarization Data with the Aim of Imaging Mineralization Zones

Zia, A. H.¹  | Ghanati, R.¹   | Fallahsafari, M.¹ 

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

Corresponding Author E-mail: rghanati@ut.ac.ir

(Received: 2 Sep 2025, Revised: 18 Oct 2025, Accepted: 16 Nov 2025, Published online: 16 Dec 2025)

Summary

Time-domain induced polarization (TDIP) measurements provide valuable information about the degree of polarization of subsurface geological layers. This geophysical technique plays a crucial role in a wide range of applications, including mineral exploration (for determining bedrock depth, identifying cavities, fracture zones, and faults), geotechnical investigations (such as assessing the stability of dams, airport runways, and other infrastructures), as well as in environmental studies (as detecting and monitoring contaminated areas). The primary objective of TDIP measurements is to determine the spatial distribution of the subsurface's electrical properties, whether within a buried object along its boundaries, or in the surrounding medium. These electrical characteristics are typically influenced by factors such as mineral composition, porosity, fluid saturation, and grain surface chemistry. Mathematically, the behavior of the electric potential in the earth is governed by Poisson's equation, which must be solved under appropriate boundary conditions. By solving this equation, a model of the subsurface can be generated, offering deeper insight into its geological structure. In the forward modeling process, for a two-dimensional environment with an arbitrary distribution of electrical conductivity, the governing partial differential equation is solved numerically—commonly using the finite difference method (FDM). Based on the conductivity distribution, apparent induced polarization (IP) responses are calculated by incorporating the relationship between conductivity and IP parameters such as chargeability. These apparent IP responses include the calculation of Frechét derivatives, which form the elements of the sensitivity matrix (Jacobian matrix). This matrix plays a key role in defining the objective function for the inversion process. Inversion of TDIP data is inherently nonlinear and typically involves a two-step procedure. In the first step, the direct current (DC) resistivity data is used to estimate the distribution of electric potential within the medium, which leads to the estimation of the background conductivity. In the second step, using this conductivity model as a fixed or initial condition, the main goal is to recover the chargeability distribution that best explains the observed IP data. This is achieved by solving the inverse problem using suitable numerical optimization methods. The final chargeability model is considered acceptable when it produces simulated data that adequately match the measured field data within a defined error tolerance.

To evaluate the effectiveness and robustness of the proposed inversion algorithm, both synthetic datasets and field measurements from the Borzamin area were utilized. Numerical results demonstrate that the algorithm can provide reasonable reconstructions of synthetic models. However, as the complexity of the IP model increases (e.g., due to heterogeneity or anisotropy), the uncertainty in precisely determining the chargeability distribution also increases. Field data inversion results indicate the presence of chargeable anomalies across multiple profiles in the study area. When interpreted alongside lithological information, these anomalies suggest the potential existence of mineralized zones within the Borzamin region. Such integrated geophysical and geological interpretations can significantly enhance exploration strategies and reduce the uncertainty in locating economically viable ore deposits.

Keywords: Time-Domain Induced Polarization, Forward Modeling, , Inversion, Conductivity, Chargeability, Finite Difference.

Cite this article: Zia, A. H., Ghanati, R., & Fallahsafari, M. (2025). Inverse Modeling of Time-Domain Induced Polarization Data with the Aim of Imaging Mineralization Zones. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(3), 571- 592. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.401218.1007718>

E-mail: (1) amirhosseinzia@ut.ac.ir | fallahsafari@ut.ac.ir



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.401218.1007718>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

مدل سازی وارون داده های پلاریزاسیون القایی حوزه زمان با هدف تصویر سازی زون های کانی زایی

امیرحسین ضیاء^۱ | رضا قناتی^۱ | مهدی فلاح صفری^۱

۱. گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: rghanati@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۴/۶/۱۱، بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۲۶، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۸/۲۵، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۹/۲۵)

چکیده

اندازه گیری های پلاریزاسیون القایی در حوزه زمان، اطلاعات ارزشمندی درباره میزان قطبش لایه های زیرسطحی فراهم می کنند. هدف اصلی این اندازه گیری ها، تعیین توزیع ویژگی های الکتریکی درون زمین است. این ویژگی ها را می توان با بهره گیری از مدل سازی ریاضی، به ویژه با استفاده از معادله پواسون و در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب، توصیف کرد. در فرایند مدل سازی پیشرو برای محیطی با هندسه دوبعدی و توزیع دلخواهی از رسانندگی الکتریکی، نخست معادله دیفرانسیل جزئی با استفاده از روش تفاضل محدود حل می شود. سپس با بهره گیری از روابط بین رسانندگی و شارژپذیری، پاسخ های پلاریزاسیون القایی ظاهری محاسبه می شود. مسائل وارون سازی در پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه ظاهری الکتریکی معمولاً غیرخطی هستند و حل آنها نیازمند پیاده سازی یک فرایند دو مرحله ای است. در مرحله نخست، با استفاده از توزیع پتانسیل های الکتریکی اندازه گیری شده، رسانندگی ذاتی تخمین زده می شود. در مرحله دوم، با استفاده از توزیع رسانندگی مرحله قبل و با بهره گیری از پاسخ های پلاریزاسیون القایی و روش های عددی مناسب، توزیع شارژپذیری در محیط زیرسطحی استخراج شود؛ به گونه ای که مدل نهایی تطابق قابل قبولی با داده های مشاهده شده داشته باشد. در این مطالعه، وارون سازی غیرخطی با استفاده از چارچوب الگوریتم آکام و با به کارگیری ماتریس حساسیت مبتنی بر مشتقات جزئی پاسخ های شبیه سازی شده نسبت به پارامترهای مدل، پیاده سازی شده است. به منظور ارزیابی الگوریتم وارون سازی، دو مجموعه داده مصنوعی و یک مجموعه اندازه گیری های صحرایی مربوط به محدوده بورزمین مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج عددی نشان می دهد که الگوریتم ارائه شده امکان برآورد مناسبی از مدل های مصنوعی دارد، هرچند که با افزایش پیچیدگی مدل پلاریزاسیون القایی، عدم قطعیت در تعیین دقیق توزیع کمیت شارژپذیری افزایش می یابد. همچنین مدل سازی داده های صحرایی نشان دهنده وجود ناهنجاری های شارژپذیری در پروفیل های مختلف منطقه است که با توجه به لیتولوژی منطقه، امکان وجود زون کانی زایی در محدوده مورد مطالعه وجود دارد.

واژه های کلیدی: پلاریزاسیون القایی در حوزه زمان، مدل سازی پیشرو، وارون سازی، رسانندگی، شارژپذیری، تفاضل محدود.

۱. مقدمه

مواد معدنی از دیرباز به عنوان پایه و اساس تمدن و توسعه صنعتی بشر شناخته شده اند و تأمین آنها در صنایع مختلف، مزیت نسبی مهمی برای کشورها به شمار می رود (سامنر، ۱۹۷۶). در ایران، با وجود دارا بودن ذخایر متنوع فلزی و غیرفلزی مانند مس، طلا، سرب، روی و سنگ های ساختمانی، تنها بخش محدودی از این ذخایر مورد اکتشاف و بهره برداری قرار گرفته است. بنابراین، ضرورت به کارگیری روش های پیشرفته و دقیق در مطالعات اکتشافی به ویژه در مناطق دارای پتانسیل معدنی، بیش از پیش احساس می شود. روش های ژئوفیزیکی نقش مهمی در شناسایی ویژگی های زیرسطحی زمین، به ویژه در مطالعات اکتشافات معدنی ایفا می کنند (بینلی و اسلیتر، ۲۰۲۰). در این میان، روش پلاریزاسیون القایی در حوزه زمان (Time Domain Induced Polarization) به عنوان یکی از مؤثرترین روش ها برای شناسایی زون های دگرسانی و مناطق دارای پتانسیل کانی زایی، به ویژه در ارتباط با کانه های سولفیدی، شناخته

است. این روش با اعمال یک جریان الکتریکی در زمین، تغییرات پتانسیل القایی را اندازه گیری می کند که با گذشت زمان، به تدریج به صفر میل می کند. این تغییرات پتانسیل، به دلیل شارژپذیری مناطق دگرسانی و کانه های سولفیدی است. روش های پلاریزاسیون القایی در حوزه زمان، به دلیل حساسیت بالا به تغییرات پتانسیل القایی، در شناسایی زون های دگرسانی و کانه های سولفیدی، به ویژه در مناطق دارای پتانسیل کانی زایی، به عنوان یکی از مؤثرترین روش ها شناخته شده است.

استناد: ضیاء، امیرحسین؛ قناتی، رضا و فلاح صفری، مهدی (۱۴۰۴). مدل سازی وارون داده های پلاریزاسیون القایی حوزه زمان با هدف تصویر سازی زون های کانی زایی. مجله فیزیک

زمین و فضا، ۵۱ (۳)، ۵۷۱-۵۹۲. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.401218.1007718>

رایانامه: (۱) amirhosseinzia@ut.ac.ir | falabsafari@ut.ac.ir



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.401218.1007718>

مشکله وارون به عنوان یک فرایند بهینه سازی، که در آن یک تابع هدف مدل برای دستیابی به برازش نسبتاً کافی با داده ها کمینه می شود، قابل حل است. اولین تلاش برای مدل سازی اثر حضور ماده شارژپذیر بر روی مقاومت ویژه، بر اساس مطالعه سیگل (سیگل، ۱۹۵۹) می باشد. به دنبال مدل ارائه شده توسط سیگل، اولدنبرگ و لی (اولدنبرگ و لی، ۱۹۹۴) یک رویکرد وارن سازی دو مرحله ای برای بازیابی یک مدل شارژپذیر پیشنهاد کردند. روش آنها بر اساس مدل سازی مقاوم ویژه DC در مرحله اول بود، و در مرحله دوم، با این فرض که وارون سازی مقاومت ویژه DC، مدل مقاومت ویژه مؤثر را به جای مدل مقاومت ویژه ذاتی برآورد می کند، داده های پلاریزاسیون القایی وارون سازی شده و مدل شارژپذیری حاصل می شود. بعدها، روش ارائه شده در مدل سازی دوبعدی در مدل سازی سه بعدی داده های IP توسط لی و اولدنبرگ (۱۹۹۶) توسعه داده شد. برد و اوهمن (۱۹۹۶) یک وارون سازی تقریبی از داده های IP ارائه داد که برای تبیین کم مقاومت ویژه لایه های زیرسطحی معتبر است. هرچند، این رویکرد به دلیل پیشرفت های محاسباتی بعدی، اکنون از ارزش کمتری برخوردار است. کارولیس و همکاران (۲۰۱۳) نرم افزاری برای مدل سازی وارون دوبعدی و سه بعدی داده های IP توسعه دادند. با وجود پیشرفت در کاربرد روش پلاریزاسیون القایی حوزه زمان، اصول پایه ای مدل سازی وارون داده های مقاومت ویژه و قطبش القایی در سال های اخیر تغییر چندانی نکرده است. ورمن و همکاران (۲۰۲۴) وارون سازی توأمان داده های پلاریزاسیون القایی و مقاومت ویژه الکتریکی را با هدف شناسایی زون های حاوی اورانیوم ارائه کردند. همچنین، یو و همکاران (۲۰۲۴) روشی مبتنی بر تفاضل مرتبه دوم معرفی کردند که با هدف افزایش دقت وارون سازی منحنی واهلش پلاریزاسیون القایی در حوزه زمان توسعه یافته است. با وجود ارائه روش های گوناگون در سال های اخیر برای مدل سازی داده های پلاریزاسیون القایی، توسعه الگوریتم های نوین و ارزیابی عملکرد آنها در شرایط زمین شناسی متنوع همچنان به عنوان یک چالش و زمینه تحقیقاتی فعال مطرح است. بنابراین در این مقاله، با الهام از مبانی فیزیکی ارائه شده در سیگل (۱۹۵۹)

شده است (پلتون و همکاران، ۱۹۷۸، سو و همکاران، ۲۰۲۴). علاوه بر این، در سال های اخیر، روش پلاریزاسیون القایی به طور فزاینده ای در طیف گسترده ای از کاربردهای مهندسی و محیط زیستی مورد استفاده قرار گرفته است (رودسری و همکاران، ۲۰۲۴؛ کاسوتی و همکاران، ۲۰۲۵). بر اساس تعاریف پذیرفته شده، اثر یک توده شارژپذیر را می توان ناشی از تغییر در رسانایی مؤثر دانست، که باعث ایجاد ارتباط میان داده های IP و مقاومت ویژه جریان مستقیم می شود (اوتا و همکاران، ۲۰۲۴؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۴). اندازه گیری های IP در دو حوزه زمان و فرکانس انجام می شوند. بسته به نوع سیگنال تزریق شده به زمین، تفاوتی در نوع پاسخ ثبت شده وجود دارد. طبیعتاً در حوزه فرکانس، با اطلاعات بیشتری از اندازه گیری ها مواجه می شویم و به دلیل وجود پارامترهای تفسیری بیشتر، عدم قطعیت در مدل سازی و تفسیر ساختارهای زیرسطحی کاهش می یابد. بررسی های حوزه فرکانس که در فرکانس های خاصی انجام می شوند، می توانند زمان بر و پرهزینه باشند و در دسترس بودن تجهیزات ممکن است محدود باشد. بنابراین، به دلیل حساسیت زمانی پروژه، معمولاً بررسی های حوزه زمان ترجیح داده می شوند.

مروری بر روش قطبش القایی را می توان در منابع مختلفی از جمله سامنر (۱۹۷۶)، برتین و همکاران (۱۹۷۶) و فینک و همکاران (۱۹۹۰) یافت. علاوه بر پیشرفت ها در درک بنیادی پدیده های قطبش 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. الگوریتم های اولیه وارون سازی، مدل زمین را به بلوک هایی با تعداد کم پارامتر بندی کرده و آن را برای مدل سازی وارون حفظ می کردند (پلتون و همکاران، ۱۹۷۸؛ ساساکی، ۱۹۹۴). بر همین اساس دستگاه معادلات فرامعینی حل می شد و همگرایی الگوریتم صرفاً بر اساس عدم برازش قضاوت می شد. اما به دلیل پیچیدگی ساختار هدایت الکتریکی و شارژپذیری زمین، نمایش چند بلوک، توزیع واقعی این ویژگی فیزیکی را به طور کافی نشان نمی دهد. این مشکل تا حد زیادی با گسسته سازی زمین به تعداد زیادی بلوک و حل

و الگوریتم پیشنهادی توسط اولدنبرگ و لی (۱۹۹۴)، یک مدل سازی وارون دومرحله ای برای داده های IP ارائه می دهیم که در آن ابتدا داده های مقاومت ویژه الکتریکی وارون می شوند و در مرحله دوم، مدل قطبش پذیری با استفاده از یک مدل سازی وارون غیرخطی شارژپذیری بازایی می شود. در وارون سازی غیرخطی، غیرخطی بودن مسئله پایه با استفاده از یک ماتریس حساسیت که شامل مشتقات جزئی اندازه گیری ها نسبت به پارامترهای مدل است، خطی سازی می شود.

در این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد الگوریتم وارون سازی داده های IP، ابتدا مدل های مصنوعی تحت شرایط کنترل شده مورد استفاده قرار می گیرد. سپس به عنوان یک مطالعه موردی، داده های مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی در حوزه زمان مربوط به منطقه بورزمین از شهرستان خوسف به منظور شناسایی نواحی دارای پتانسیل کانی زایی مس، وارون می شود. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر زون های دگرسانی بر الگوهای شارژپذیری و مقاومت ویژه الکتریکی در نواحی دارای کانی سازی احتمالی است. با توجه به ویژگی پلی متال منطقه و تنوع دگرسانی ها، انتظار می رود که پاسخ های متفاوتی از نظر پارامترهای ژئوالکتریکی مرتبط با کانسارهای فلزی در مدل های شارژپذیری مشاهده شود.

۲. روش شناسی

۱-۲. مدل سازی پیشرو

مدل سازی پیشرو بخش اساسی و مقدماتی از فرایند وارون سازی در مسائل ژئوفیزیکی محسوب می شود. در این مرحله، با استفاده از ویژگی های فیزیکی مدل، پاسخ سیستم شبیه سازی شده و از طریق آن می توان الگوریتم وارون سازی را توسعه داد (تلفورد و همکاران، ۱۹۹۰). در گام نخست مدل سازی پیشرو، پتانسیل الکتریکی زمین برای یک آرایه مشخص و در چهارچوب روش های عددی، نظیر تفاضل محدود، برای یک مدل دوبعدی با توزیع دلخواه از رسانندگی و پلاریزاسیون القایی محاسبه می شود (مفتی، ۱۹۷۶). سپس بر اساس روابط موجود بین رسانندگی ظاهری

و پارامترهای پلاریزاسیون، پاسخ پلاریزاسیون القایی تعیین شده و الگوریتم موردنظر در قالب زبان برنامه نویسی MATLAB پیاده سازی و اعتبارسنجی می شود.

استفاده از روش های عددی برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی در مدل سازی پاسخ های الکتریکی، از اواخر دهه ۱۹۶۰ با بهره گیری از تکنیک های مختلفی همچون روش المان محدود، تفاضلات محدود و معادلات انتگرالی آغاز شد (دی و موریسون، ۱۹۷۹). در دهه های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰، استفاده از روش تفاضل محدود گسترش یافته و چندین بار بهبود یافت. از جمله این اصلاحات می توان به توسعه شرایط مرزی دقیق تر برای تقریب پتانسیل و نیز به کارگیری حل کننده های کارآمد نظیر گرادیان مزدوج همراه با پیش شرط کننده ها برای کاهش زمان اجرا اشاره کرد (اسمیت، ۱۹۹۶). در این روش، پتانسیل کل به پتانسیل مرجع و پتانسیل ثانویه تفکیک می شود، که پتانسیل ثانویه ناشی از انحرافات رسانایی نسبت به مدل پس زمینه است. این روش امکان محاسبه دقیق پتانسیل ثانویه را در شبکه های متوسط فراهم می کند (ژدانوف، ۲۰۰۹).

با وجود این پیشرفت ها، روش تفاضل محدود عمدتاً برای مدل های با سطح زمین صاف و پتانسیل های قابل تحلیل مناسب است و بازتولید هندسه های غیرمتعامد در آن با محدودیت هایی مواجه است (ساساکی، ۱۹۹۴). در سال های اخیر، استفاده از روش های المان محدود به دلیل توانایی بیشتر در مدل سازی هندسه های پیچیده، به ویژه در مدل های سه بعدی و با توپوگرافی متغیر، رواج بیشتری یافته است (کامر و نیومن، ۲۰۰۸). این روش ها در پژوهش های متعددی برای مدل سازی دوبعدی و سه بعدی سطح زمین ارائه شده اند. در مقابل، رهیافت های مبتنی بر معادلات انتگرالی که بر پایه تابع گرین محیط یکنواخت بنا شده اند، بیشتر برای هندسه های ساده کاربرد دارند (اولدنبرگ و لی، ۱۹۹۴). به طور کلی، روش های المان محدود و تفاضل محدود برای مدل سازی محیط های ناهمگن و دلخواه مناسب تر هستند.

در مقایسه با روش المان محدود، روش تفاضل محدود به دلیل سادگی نسبی پیاده سازی و سرعت بالاتر در تقریب راه حل ها برای مدل های پیچیده و دلخواه، گزینه ای مناسب تر به شمار می رود (رودی و مک کی، ۲۰۰۱)؛ هرچند که در نزدیکی

(x, K_y, z) استفاده کنیم. این عملیات در جهت مستقیم و معکوس قابل اجراست. K_y عدد موج در جهت y است.

$$\tilde{V}(x, K_y, z) = \int_0^\infty V(x, y, z) \cos(K_y y) dy \quad (۷)$$

$$V(x, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \tilde{V}(x, K_y, z) \cos(K_y y) dK_y \quad (۸)$$

که $V(x, z)$ و $\tilde{V}(x, K_y, z)$ به ترتیب توزیع پتانسیل در حوزه مکان و حوزه عدد موج را نشان می دهند. در نتیجه توزیع پتانسیل سه بعدی $V(x, y, z)$ نسبت به نقطه منبع (x_s, y_s, z_s) بر روی یک توزیع رسانایی دو بعدی $\sigma(x, z)$ ، به یک توزیع پتانسیل دو بعدی $\tilde{V}(x, K_y, z)$ (در حوزه عدد موج) تبدیل می شود که یک پاسخ برای رابطه (۵) خواهد بود (دی و مورسون، ۱۹۷۹):

$$\nabla \cdot [\sigma(x, z) \nabla \tilde{V}(x, K_y, z)] + K_y^2 \sigma(x, z) \tilde{V}(x, K_y, z) = -\nabla \cdot \vec{J}_s \quad (۹)$$

به طوری که

$$\nabla \cdot \vec{J}_s = I \delta(x - x_s) \delta(z - z_s) \quad (۱۰)$$

که در آن δ تابع دلتای دیراک و I شدت جریان تزریقی می باشد. معادله (۹) به عنوان معادله اصلی مدل سازی پیشروی داده های مقاومت ویژه الکتریکی شناخته می شود. پس از محاسبه توزیع پتانسیل $\tilde{V}(x, K_y, z)$ ، مقدار پتانسیل الکتریکی در فضای مکان $V(x, z)$ از طریق عکس تبدیل فوریه (۸) برآورد می شود. همچنین از معادله (۹) جهت محاسبه پاسخ پلاریزاسیون القائی نیز استفاده می شود که در ادامه به آن پرداخته می شود. بنابراین، هدف از این بخش، شبیه سازی داده های مصنوعی جریان مستقیم (مقاومت ویژه ظاهری) و پلاریزاسیون القائی در حوزه زمان (شارژپذیری ظاهری) برای یک مدل زیرسطحی دوبعدی است. در این مدل، توزیع مقاومت ویژه با تابع $\rho(x, z)$ و توزیع شارژپذیری با تابع $\eta(x, y)$ تعریف می شود.

در تحلیل دوبعدی، محور x در راستای امتداد پروفیل و عمود بر جهت امتداد ساختار قرار دارد، در حالی که محور y با جهت امتداد ساختار منطبق است. این بدان معناست که مدل در راستای y تغییر نمی کند و متقارن در آن جهت فرض می شود؛ بنابراین، مسئله به صفحه دوبعدی (x, y) محدود می شود.

در این شرایط، توزیع پتانسیل الکتریکی $V(x, z)$ به عنوان

نقاط چشمه، ممکن است با مشکلاتی نظیر تکیگی مواجه شود که نیازمند ملاحظات ویژه در طراحی شبکه عددی است. در ادامه معادلات پایه با هدف مدل سازی پاسخ پلاریزاسیون القائی ارائه می شود.

۲-۲. معادلات پایه

اساس کار قانون اهم است. قانونی که چگالی جریان J را به میدان الکتریکی E به وسیله یک رسانایی ایزوتروپیک σ مربوط می کند:

$$J = \sigma E \quad (۱)$$

از آنجایی که میدان الکتریکی یک میدان پایستار است و داریم:

$$E = -\nabla V \quad (۲)$$

که V پتانسیل میدان پایستار E می باشد. حال با جای گذاری معادله (۲) در معادله (۱) خواهیم داشت:

$$J = -\sigma \nabla V \quad (۳)$$

اگر قانون پایستگی بار در یک حجم را به این رابطه اعمال کنیم خواهیم داشت:

$$\nabla \cdot J = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta(x) \delta(y) \delta(z) \quad (۴)$$

که در آن ρ چگالی بار در نقطه (x, y, z) در صفحه مختصات کارتزین است.

با جای گذاری معادله (۳) و تعمیم آن به یک فضای سه بعدی داریم:

$$-\nabla \cdot [\sigma(x, y, z) \nabla V(x, y, z)] = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta(x) \delta(y) \delta(z) \quad (۵)$$

اگر در حین ساده سازی رابطه (۵) این فرض را در نظر بگیریم که تغییرات σ در راستای y وجود ندارند؛ یعنی $\frac{\partial \sigma(x, y, z)}{\partial y} = 0$ خواهیم داشت:

$$\nabla^2 \{ \sigma(x, z) V(x, y, z) \} + \sigma(x, z) \nabla^2 V(x, y, z) - V(x, y, z) \nabla^2 \sigma(x, z) = -\nabla \cdot \vec{J}_s \quad (۶)$$

که در آن $\vec{J}_s$ نشان دهنده چگالی جریان تزریق شده است. لازم به ذکر است هر چند که رسانایی به صورت $\sigma(x, z)$ است، توزیع پتانسیل هم چنان به جهت y وابسته است و به صورت $V(x, y, z)$ نوشته می شود.

برای سادگی حل عددی بهتر است از تبدیل فوریه در فضای

کرد. بر اساس روابط سیگل (۱۹۵۹)، این اثر با تعریف رسانندگی مؤثر به صورت $\sigma_\eta = \sigma_\infty(1 - \eta)$ در مدل سازی مستقیم لحاظ می شود.

$$V_\eta = f_{dc}[\sigma_\infty(1 - \eta)] \quad (14)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_\infty(1 - \eta) \nabla V_\eta) = -I\delta(x - x_s)\delta(y - y_s)\delta(z - z_s) \quad (15)$$

در حالی که معادله (۱۳) اثر شارژپذیری را نادیده می گیرد، معادله (۱۵) این اثر را لحاظ می کند. در عمل، پتانسیل V_η از داده ها اندازه گیری می شود و هدف، بازیابی رسانندگی ذاتی σ_∞ است، اما وارون سازی مستقیم آن به تخمین رسانندگی مؤثر منجر می شود. بنابراین، گام ابتدایی، حل مسئله مدل سازی پیشرو به صورت ۲/۵ بعدی است که با حفظ هندسه دوبعدی و در نظر گرفتن عدد موج های مختلف، امکان شبیه سازی توزیع سه بعدی پتانسیل را با هزینه محاسباتی کمتر نسبت به مدل سازی کامل ۳ بعدی فراهم می کند. این مدل سازی با حل معادله پواسون و استفاده از روش تفاضل محدود و شرایط مرزی ترکیبی انجام می شود (دی و موريسون، ۱۹۷۹؛ قناتی و همکاران، ۲۰۲۰).

۲-۳. مدل سازی وارون

مسئله وارون سازی داده های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) به عنوان یک مسئله غیرخطی تعریف می شود که به طور معمول از طریق یک فرایند تکراری حل می شود. در این فرایند، با استفاده از مدل سازی پیشرو برای توزیع های دلخواه مقاومت ویژه، پاسخ مصنوعی مدل محاسبه شده و با داده های مشاهده شده مقایسه می شود. ارتباط بین داده های اندازه گیری شده و پارامترهای مدل به صورت زیر بیان می شود:

$$d = f(m). \quad (16)$$

با خطی سازی معادله (۱۶) با استفاده از بسط تیلور مرتبه اول، خواهیم داشت:

$$\Delta d = \nabla f(m) \Delta m. \quad (17)$$

در این معادلات، d بردار داده های مشاهده شده و m شامل پارامترهای مدل، از جمله توزیع رسانایی زیرسطحی است. تابع $f(m)$ عملگر پیشرو غیرخطی، و $\Delta d = d - f(m)$

پاسخ محیط به تزریق جریان از طریق الکتروود جریان محاسبه می شود. برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری در یک پیکربندی مشخص الکتروودی، ابتدا پتانسیل الکتریکی در تمام موقعیت های موردنظر (الکتروودهای جریان و پتانسیل) تعیین می شود. سپس، با استفاده از رابطه زیر، مقدار مقاومت ویژه ظاهری محاسبه می شود:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} G, \quad (11)$$

که G فاکتور هندسی و به موقعیت نسبی الکتروودها وابسته است، ρ_a مقاومت ویژه ظاهری و ΔV اختلاف پتانسیل الکتریکی (منتج شده از مدل سازی پیشروی داده های مقاومت ویژه الکتریکی) است. مفهوم شارژپذیری به عنوان یک ویژگی فیزیکی نخستین بار توسط سیگل (۱۹۵۹) معرفی شد. وی نشان داد که پاسخ پلاریزاسیون القایی یا شارژپذیری ظاهری η_a تحت تأثیر توزیع زیرسطحی شارژپذیری ذاتی η قرار دارد. برای یک محیط یکنواخت با هدایت ذاتی σ_∞ و شارژپذیری η ، پاسخ IP به صورت زیر بیان می شود (اولدنبرگ و لی، ۱۹۹۴):

$$\eta_a = \frac{f_{dc}(\sigma_\infty(1-\eta)) - f_{dc}(\sigma_\infty)}{f_{dc}(\sigma_\infty(1-\eta))}, \quad (12)$$

در این رابطه، f_{dc} عملگر مدل سازی پیشرو مقاومت ویژه جریان مستقیم است. پاسخ عملگر f_{dc} در واقع همان حل معادله (۹) می باشد. مقادیر $f_{dc}(\sigma_\infty)$ و $f_{dc}(\sigma_\infty(1 - \eta))$ به ترتیب متناظر با ولتاژهای ثبت شده در حضور و غیاب اثرات پلاریزاسیون هستند. این معادله نشان می دهد که شارژپذیری ظاهری از طریق دو بار اجرای مدل سازی پیشرو برای دو مدل رسانندگی محاسبه می شود. مدل سازی این پتانسیل ها بر پایه معادله پواسون انجام می گیرد.

$$\nabla \cdot (\sigma_\infty \nabla V_\infty) = -I\delta(x - x_s)\delta(y - y_s)\delta(z - z_s). \quad (13)$$

در این معادله، V_∞ پتانسیل الکتریکی اندازه گیری شده در غیاب اثرات پلاریزاسیون یا پتانسیل لحظه ای در زمان تزریق جریان است. با فرض میدان الکتریکی خارجی E ، چگالی جریان اعمال شده در محیط بدون پلاریزاسیون برابر با $J = \sigma_\infty E$ است. در حضور شارژپذیری، این مقدار به $J = \sigma_\infty(1 - \eta)E$ کاهش می یابد. بنابراین، اثر شارژپذیری را می توان به صورت کاهش مؤثر در رسانندگی محیط مدل

نوفه مقاوم تر است ولی حل تابع هدف پیچیدگی های محاسباتی بیشتری دارد و در مدل های با ساختار تیز یا لبه دار کاربرد دارد. نرم L_2 برای مدل های نرم تر و پیوسته مناسب تر است (خجاز و همکاران، ۲۰۲۴).

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

$$\min_{m \in \mathbb{R}^n} (\|d - f(m) - \nabla f(m)\Delta m\|_2^2 + \alpha \|W_m(m - m_{apr})\|_2^2) \quad (20)$$

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

$$\Delta m = (J(m^k)^T W_d^T W_d J(m^k) + \alpha (a_h D_h^T D_h + b_h D_V^T D_V))^{-1} (J(m^k)^T W_d^T W_d \Delta d - \alpha (a_h D_h^T D_h + b_h D_V^T D_V)(m^{k-1} - m_{apr})), \quad (21)$$

در این معادله، J^T ترانهاده ماتریس ژاکوبین است و k شماره تکرار و Δm جهت جستجو در k امین تکرار را نشان می دهد. ماتریس ژاکوبین از طریق روش عددی کارآمد در مدل سازی ۲/۵ بعدی مقاومت ویژه محاسبه می شود. اختلاف داده ها به صورت لگاریتمی تعریف می شود تا رسانایی به روز شده مثبت باقی بماند.

مدل در هر تکرار از طریق رابطه $m^{k+1} = m^k + \mu \Delta m$ به روزرسانی می شود و طول گام μ با جستجوی خطی تعیین می شود تا از واگرایی فرایند بهینه سازی جلوگیری شود. کمینه سازی تابع هدف برای مقادیر مختلف α انجام شده و مقداری به عنوان بهترین مقدار α انتخاب می شود که بین نرم مدل و خطای تطبیق (برازش) آن تعادل مناسبی برقرار کند. این فرایند که به وارون سازی اُکام معروف است، با هدف یافتن ساده ترین مدلی که داده ها را به خوبی توضیح می دهد، انجام می شود. فرایند تکرار تا رسیدن به یکی از سه شرط توقف ادامه می یابد: کاهش خطای χ^2 ، رسیدن RMS به زیر حد تعیین شده، یا اتمام حداکثر تعداد تکرارها. با توجه به این که شرط وارون سازی داده های قطبش القایی، برآورد رسانندگی ویژه از طریق وارون سازی داده های مقاومت ویژه الکتریکی است، از فرایند حل وارون ارائه شده برای تخمین

بیانگر اختلاف بین داده های واقعی و محاسبه شده است. ماتریس حساسیت $\nabla f(m)$ تغییرات پاسخ مدل نسبت به پارامترهای مدل را نشان می دهد که عناصر آن به صورت $J_{i,j} = \frac{\partial d_i}{\partial m_j}$ تعریف می شوند. همچنین، Δm بردار اصلاح مدل است.

در فرایند وارون سازی، هدف کمینه سازی اختلاف بین داده های مشاهده شده و پاسخ مدل شده است که این کار از طریق تابع هدف انجام می شود که میزان برازش بین مدل و داده ها را با در نظر گرفتن نوفه اندازه گیری ارزیابی می کند.

$$\Phi_d = \min (\|W_d(d - f(m))\|_2^2). \quad (18)$$

حل مسائل وارون ژئوفیزیکی معمولاً ناپایدار است، به طوری که حتی تغییرات کوچک در داده ها می تواند به تغییرات بزرگی در مدل منجر شود. مسئله وارون غیرخطی ERT نیز به صورت ذاتی بدوضع و دارای جواب های غیرمنحصربه فرد است. برای کاهش ناپایداری و محدود کردن فضای مدل، لازم است علاوه بر تطابق با داده ها، قیود مدل و ملاحظات فیزیکی نیز در نظر گرفته شود.

برای این منظور، تابع هدفی تعریف می شود که شامل مجموع وزن دار تابع تطابق با داده ها Φ_d و تابع پایداری مدل Φ_m است. این دو بخش با ضریب وزنی α ترکیب شده و هدف، کمینه سازی این تابع هدف است.

$$\Psi(m, \alpha) = \min(\Phi_d + \alpha \Phi_m) = \min (\|W_d(d - f(m))\|_2^2 + \alpha \|W_m(m - m_{apr})\|_2^2), \quad (19)$$

در این رابطه، α ضریب میرایی و W_d ماتریس وزن دهی داده ها است که از معکوس خطای داده ها تشکیل شده است. ماتریس هموارساز مدل $W_m = a_h D_h^T D_h + b_h D_V^T D_V$ ترکیبی از ماتریس های مشتق گیری در جهات افقی و عمودی است. ضرایب $b_h = 1$ و $a_h = 1$ برای افزایش همواری مدل در این جهات به کار می روند. همچنین، m_{apr} مدل پیشین است.

برای اندازه گیری اختلاف و منظم سازی، می توان از نرم های مختلف استفاده کرد. نرم L_2 رایج تر است چون محاسبات ساده تر است، اما نسبت به نوفه حساس است. نرم L_1 نسبت به

نسبت به پارامترهای مدل را نشان می‌دهد:

$$J_{IP}^{ij} = \frac{\partial d_i}{\partial \eta_j} \quad (23)$$

$$d_i = \eta_a = \frac{v_{\eta}^i - v_{\infty}^i}{v_{\eta}^i} \quad (24)$$

با مشتق‌گیری قابلیت شارژ ظاهری نسبت به η_j خواهیم داشت:

$$\frac{\partial d_i}{\partial \eta_j} = \frac{v_{\infty}^i}{(v_{\eta}^i)^2} \frac{\partial v_{\eta}^i}{\partial \eta_j} \quad (25)$$

پس از پایان تکرار، کافی است مشتق $\frac{\partial v_{\eta}^i}{\partial \eta_j}$ محاسبه شود. با جای‌گذاری $\sigma_{\eta} = \sigma_{\infty}(1 - \eta)$ در معادله ۲۵، این مشتق به‌دست می‌آید.

$$\frac{\partial v_{\eta}^i}{\partial \eta_j} = -\sigma_{\infty} \frac{\partial v_{\eta}^i}{\partial \sigma_{\eta_j}} \equiv -\sigma_{\infty} J_{ij} \quad (26)$$

این مقدار مقیاس‌شده از ماتریس حساسیت برای مسئله مقاومت‌ویژه است. در این رابطه، σ_{∞} رسانایی ذاتی یا پس‌زمینه و $J_{ij}(\sigma_{\infty})$ ماتریس حساسیتی است که از وارون‌سازی مقاومت‌ویژه الکتریکی جریان مستقیم در مرحله اول به‌دست آمده است. ماتریس ژاکوبی نهایی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$J_{IP}^{ij} = \frac{\partial d_i}{\partial \eta_j} = -\sigma_{\infty}^j \frac{v_{\sigma}^i}{(v_{\eta}^i)^2} J_{ij} \quad (27)$$

۳. نتایج عددی بر روی داده‌های مصنوعی

در این بخش، الگوریتم وارون‌سازی برای داده‌های مصنوعی تولید شده در مدل‌های دو بعدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پاسخ‌های مقاومت‌ویژه ظاهری و پلاریزاسیون القایی با استفاده از آرایه دوقطبی-دوقطبی و مدل‌سازی پیشرو ۲/۵ بعدی محاسبه شده‌اند. به‌منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی، نوفه تصادفی با توزیع گوسین و با خطای ۲ درصد دامنه هریک از داده‌ها به هریک از پاسخ‌های مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی اضافه شده است.

فرایند وارون‌سازی با یک مدل اولیه ساده آغاز می‌شود و در هر تکرار، ماتریس ژاکوبین مجدداً محاسبه می‌شود. الگوریتم به‌گونه‌ای طراحی شده است مسئله وارون به ازاء مقادیر مختلفی از پارامتر منظم‌سازی حل می‌شود. جدول ۱ شبه‌کد الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. این الگوریتم با فرض مشخص بودن رسانندگی σ_{∞} از وارون‌سازی داده‌های

رسانندگی ویژه استفاده می‌شود. بنابراین، وارون‌سازی داده‌های قطبش القایی، فرایند ویژه خود را دارد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

اولدنبرگ و لی (۱۹۹۴) سه رویکرد برای وارون‌سازی داده‌های پلاریزاسیون القایی (IP) در حوزه زمان ارائه کرده‌اند که همگی مبتنی بر مدل اغتشاش بارپذیری پیشنهادشده توسط سیگل (۱۹۵۹) هستند. این رویکردها شامل دو مرحله وارون‌سازی متوالی هستند که ابتدا مدل رسانندگی ویژه و سپس مدل بارپذیری را بازیابی می‌کنند.

در روش اول، مسئله وارون به‌صورت خطی و با فرض بارپذیری ناچیز حل می‌شود. روش دوم با ایجاد اغتشاش در مدل رسانندگی ویژه، مدل بارپذیری را استخراج می‌کند. روش سوم با حل یک مسئله غیرخطی، چارچوبی جامع برای وارون‌سازی داده‌های IP ارائه می‌دهد که از جمله مزایای آن حذف فرض بارپذیری ناچیز و امکان استفاده از الگوریتمی مشترک برای داده‌های مقاومت‌ویژه و IP است.

در این پژوهش، به‌دلیل مزایای روش سوم، این رویکرد به‌عنوان استراتژی اصلی وارون‌سازی داده‌های IP مورد استفاده قرار گرفته است. تابع هدف این الگوریتم به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \Delta \eta = & (J_{IP}(\eta^k)^T W_d^T W_d J_{IP}(\eta^k) + \alpha(a_h D_h^T D_h \\ & + b_h D_V^T D_V) + \lambda W_p)^{-1} \\ & (J_{IP}(\eta^k)^T W_d^T W_d \Delta d - \alpha(a_h D_h^T D_h \\ & + b_h D_V^T D_V) \eta^{k-1} - \lambda W_p \eta^{k-1}) \end{aligned} \quad (28)$$

به‌طوری‌که J_{IP} ماتریس حساسیت IP است که بر اساس رسانایی حاصل از وارون‌سازی مقاومت‌ویژه محاسبه می‌شود. λ مقدار مثبت بزرگی است که مقادیر منفی شارژپذیری را تعدیل می‌کند. $W_p = \text{diag}(u(-\eta))$ ماتریس قطری با عناصر صفر و یک است که از تابع پله‌ای $u(x)$ ساخته شده است و Δd بردار باقی‌مانده داده‌ها است (پوره‌اشمی و همکاران، ۲۰۲۴). مابقی پارامترها نیز پیشتر تعریف شده است. فرایند وارون‌سازی با مدل شارژپذیری η^0 که از میانگین هندسی داده‌های شارژپذیری ظاهری به‌عنوان مدل اولیه، آغاز می‌شود. ماتریس حساسیت IP در هر تکرار به‌روزرسانی می‌شود. ماتریس ژاکوبین تغییرات داده‌های مشاهده‌شده

یک ابزار مناسب برای برگرداندن توزیع کمیت شارژپذیری و به دنبال آن تفسیر صحیحی از ساختارهای زیرسطحی مورد استفاده قرار می گیرد.

۳-۱. مثال مدل مصنوعی اول

مدل مصنوعی اولیه از سه ساختار زمین شناسی مجزا تشکیل شده است (شکل ۱). ساختار نخست، یک لایه سطحی به ضخامت ۴ متر است که از سطح زمین آغاز می شود. دومین ساختار، یک ناحیه جعبه ای شکل به ابعاد ۱۰ در ۹۰ متر است که در بخش مرکزی محیط زمینه قرار گرفته و برای شبیه سازی یک توده رسانا با قابلیت شارژپذیری بالا طراحی شده است. سومین ساختار، محیط زمینه است که با ویژگی های فیزیکی متفاوت از لایه سطحی، بخش عمده مدل را شامل می شود. جزئیات عددی پارامترهای فیزیکی مربوط به هر یک از این ساختارها در جدول ۲ ارائه شده اند.

مقاومت ویژه نوشته شده است. فرایند تکرار در الگوریتم ارائه شده در جدول ۱ تا زمانی ادامه می یابد که معیارهای توقف مشخص شده برآورده شوند. این معیارها شامل شرایط زیر هستند:

- شرط χ^2 : مقدار χ^2 باید به عددی نزدیک یک متمایل شود.

- شرط rRMS: مقدار تغییرات جذر میانگین مربعات نسبی (rRMS) بین دو تکرار متوالی باید کمتر از یک درصد باشد. این شرط به صورت ریاضی به این شکل زیر تعریف می شود:

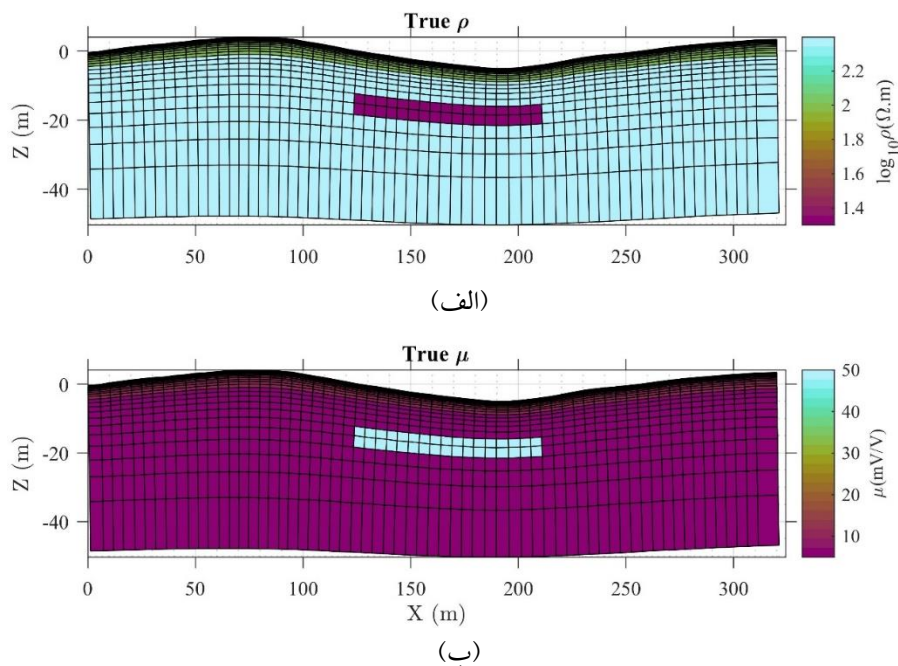
$$\frac{\|rRMS_k - rRMS_{k-1}\|_2}{\|rRMS_k\|_2} \times 100 \leq 1 \quad (28)$$

- بیشینه تعداد تکرارها: حداکثر تعداد تکرارها نیز به عنوان یکی از معیارهای توقف در نظر گرفته می شود.

پس از اعمال این شرایط، الگوریتم به مقدار نهایی همگرا می شود و فرایند تکرار متوقف می شود. این رویکرد اطمینان می دهد که نتایج وارون سازی قابل اعتماد هستند و الگوریتم به طور مؤثر به پاسخ نهایی همگرا می شود. این روش به عنوان

جدول ۱. الگوریتم شبه کد مدل سازی وارون پلاریزاسیون القائی.

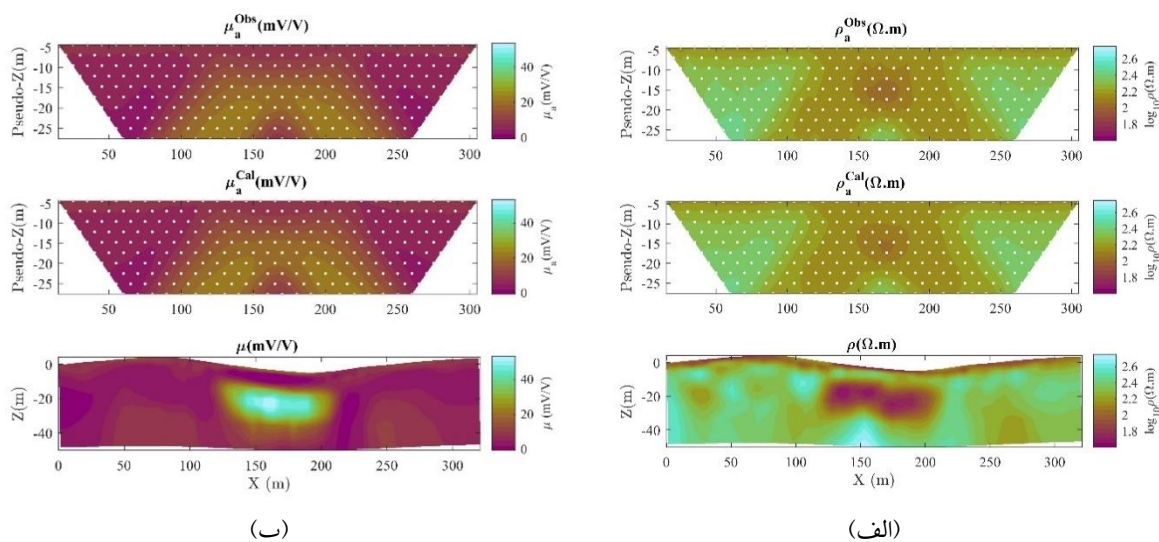
Inputs: Observed data $\eta_a \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ including apparent chargeability measurements, the conductivity distribution σ_∞ derived from the direct current resistivity inversion, and data weighting matrix $W_d \in \mathbb{R}^{m \times m}$.
Outputs: Inverted model parameters $\eta \in \mathbb{R}^{n \times 1}$
 Initialization: define a range of α_q ($q = 1, \dots, N$), W_m (model constraint matrix defined as the first order roughening matrix), $\epsilon = 5\%$, $k = 1$, the initial chargeability model η^0 .
While $\chi^2 > 1$ or $(100 \times \sqrt{m}^{-1} \|\eta_a - \eta_a^{cal}\|_{l_2}) < \epsilon$ or maximum iteration is not reached **do**
 Compute $\sigma_\eta^k = \sigma_\infty (1 - \eta^{k-1})$
 Compute $\eta_a^{cal} = \frac{f(\sigma_\eta^k) - f(\sigma_\infty)}{f(\sigma_\eta^k)}$
 Compute $\Delta d = (\eta_a - \eta_a^{cal})$ the discrepancy between the measured apparent chargeability data and the calculated one
 Compute the matrix $J_{IP}(\eta^{k-1}) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ with respect to all model cells and measurements
 For α_q , $q = 1, \dots, N$ **do**
 Compute the model perturbation Δm using Equation 16
 Compute $\eta^q = \eta^{q-1} + \Delta m$
 Calculate $\sigma_\eta^q = \sigma_\infty (1 - \eta^q)$
 Compute $\eta_a^{cal} = \frac{f(\sigma_\eta^q) - f(\sigma_\infty)}{f(\sigma_\eta^q)}$
 Compute the data fidelity term $\Phi_d = \|\eta_a - \eta_a^{cal}\|_{l_2}^2$
 End for
 Choose the largest value for α_q such $\chi^2 \leq 1$, otherwise select a α_q minimizing Φ_d
 $k = k + 1$
 Set $\eta^{k-1} = \eta^q$
End while



شکل ۱. توزیع مقادیر مقاومت ویژه (الف) و شارژپذیری (ب) در مدل مصنوعی اول.

جدول ۲. مقادیر مقاومت ویژه و شارژپذیری واقعی در نواحی مختلف مدل مصنوعی اول.

مقدار شارژپذیری (میلی ولت بر ولت)	مقدار مقاومت ویژه (اهم متر)	لایه های تشکیل دهنده
۱۰	۱۰۰	رولایه
۵۰	۲۰	ناهنجاری
۵	۲۵۰	زمینه



شکل ۲. الف) شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری مشاهده ای (بالا) و محاسباتی (وسط) و مقطع وارون سازی شده نهایی (پایین) (ب) شبه مقاطع شارژپذیری ظاهری مشاهده ای (بالا) و محاسباتی (وسط) و مقطع وارون سازی شده نهایی (پایین) مربوط به مدل مصنوعی اول.

شدت جریان ۱ آمپر محاسبه شد. در شکل ۲، شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری و شارژپذیری ظاهری به ترتیب از بالا به پایین نشان داده شده است. داده های مشاهده ای با استفاده از

پاسخ های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی این مدل با انتخاب آرایه دوقطبی-دوقطبی، برای ۳۰ ایستگاه اندازه گیری، با فاصله الکترودی ۱۰ متر، تعداد پرش ۱۰ و

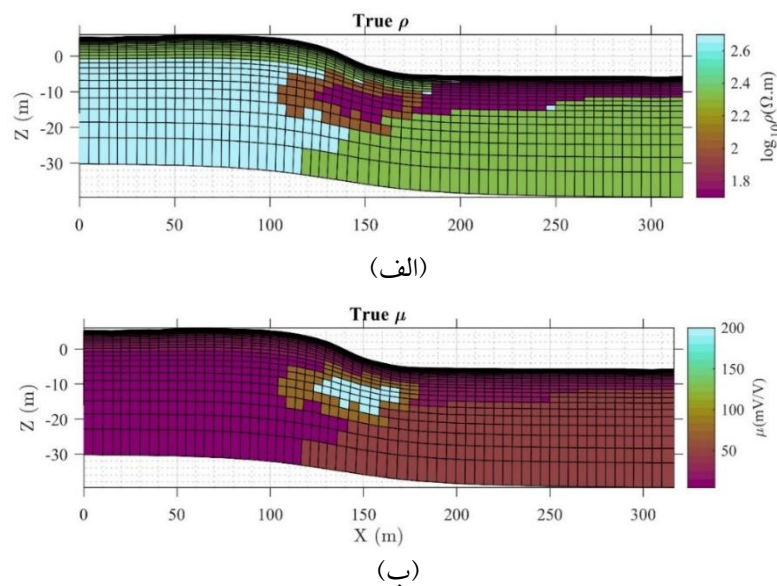
است، از شش ناحیه مختلف تشکیل شده است. در سطح، دو لایه با ضخامتی در حدود پنج متر قرار گرفته اند که نقش پوشش سطحی در ساختار زمین شناسی شبیه سازی شده را ایفا می کنند. در عمق، دو لایه با ویژگی های الکتریکی متفاوت مشاهده می شوند: یک لایه با مقاومت ویژه الکتریکی پایین و یک لایه با مقاومت ویژه الکتریکی بالا که توسط یک گسل از یکدیگر جدا شده اند. این گسل نه تنها به عنوان مرز فیزیکی بین این دو لایه عمل می کند، بلکه نقش مهمی در توزیع خواص الکتریکی مدل ایفا می کند.

یک ناهنجاری به شکل جعبه نیز در این مدل قابل تشخیص است که توسط یک حاشیه دگرسان شده با مقاومت ویژه الکتریکی پایین احاطه شده است. این ناهنجاری در محیطی با مقاومت ویژه بالا قرار گرفته است. مقادیر کمیت های مقاومت ویژه و شارژ پذیری مربوط به نواحی مختلف مدل مصنوعی دوم در جدول ۳ ارائه شده است.

الگوریتم پیشنهادی ارائه شده در جدول ۱ وارون شد و مقاطع مربوط به مدل های مقاومت ویژه و شارژ پذیری در شکل ۲ (نمودار پایین) قابل مشاهده است. ساختارهای اصلی شامل یک بلوک جعبه ای و لایه سطحی در هر دو مقطع مقاومت ویژه و شارژ پذیری قابل تشخیص است. هرچند به دلیل تباین پایین لایه سطحی در شارژ پذیری با زمینه، امکان برآورد دقیق مرز این لایه وجود ندارد. الگوریتم وارون سازی پس از ۱۲ تکرار، در هر دو مسئله وارون مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی، با مقادیر χ^2 به ترتیب ۱/۵۵ و ۱/۳ به همگرایی رسید. با این حال، کاهش بیشتر مقادیر χ^2 ممکن است به ایجاد ساختارهای کاذب در مدل وارون نهایی منجر شود.

۲-۳. مثال مدل مصنوعی دوم

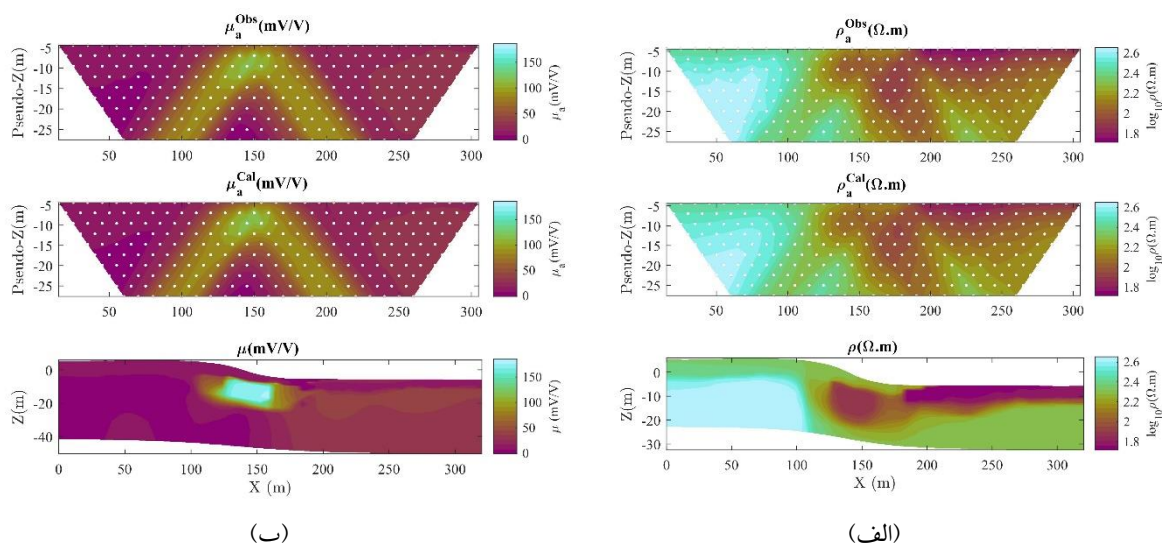
مدل مصنوعی دوم که در شکل ۳ به تصویر کشیده شده



شکل ۳. توزیع مقادیر مقاومت ویژه (الف) و شارژ پذیری (ب) در مدل مصنوعی دوم.

جدول ۳. مقادیر مقاومت ویژه و شارژ پذیری واقعی در نواحی مختلف مدل مصنوعی دوم.

مقدار شارژ پذیری (میلی ولت بر ولت)	مقدار مقاومت ویژه (اهم متر)	لایه های تشکیل دهنده
۲۰	۲۰۰	رولایه فرادیواره گسل
۲۰	۵۰	رولایه فرو دیواره گسل
۵۰	۲۰۰	فرودیواره
۸۰	۱۰۰	ناحیه دگرسان
۲۰۰	۵۰	ناهنجاری
۵	۵۰۰	فرادیواره



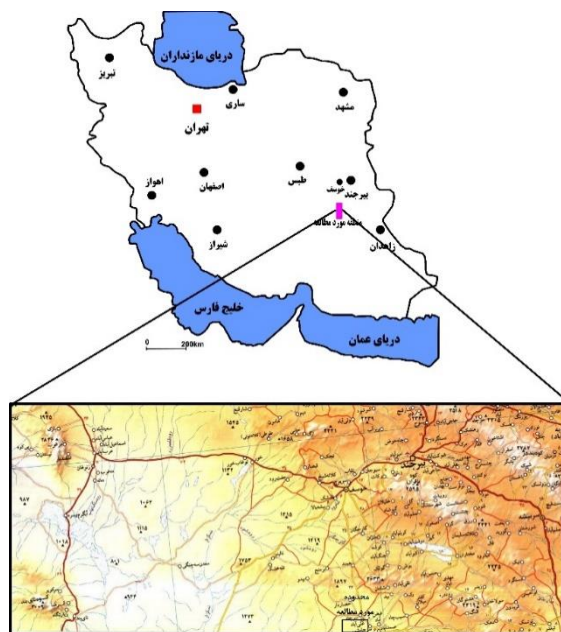
شکل ۴. الف) شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری مشاهده‌ای (بالا) و محاسباتی (وسط) و مقطع وارون‌سازی شده نهایی (پایین) (ب) شبه مقاطع شارژپذیری ظاهری مشاهده‌ای (بالا) و محاسباتی (وسط) و مقطع وارون‌سازی شده نهایی (پایین) مربوط به مدل مصنوعی دوم.

الگوریتم وارون‌سازی در مدل مصنوعی دوم پس از ۱۵ تکرار، در هر دو مسئله وارون مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی، با مقادیر χ^2 به ترتیب ۱/۶۲ و ۱/۴۳ به همگرایی رسید.

۴. مثال داده‌های واقعی

در راستای ارزیابی و صحت‌سنجی عملکرد الگوریتم‌های وارون‌سازی توسعه‌یافته برای داده‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی، از مجموعه داده‌های برداشت‌شده در محدوده بورزمین واقع در استان خراسان جنوبی استفاده شد. این محدوده با هدف اکتشاف ذخایر کانسار مس از نوع ماسیو سولفیدی به‌عنوان پایلوت تحقیقاتی انتخاب شد. وسعت محدوده مورد مطالعه حدود ۱ کیلومتر مربع بوده و در موقعیتی در فاصله ۱۰۰ کیلومتری جنوب غربی شهر بیرجند و ۷۵ کیلومتری جنوب شهرستان خوسف قرار دارد (شکل ۵). داده‌های حاصل از این برداشت‌ها به‌عنوان مبنایی برای اعتبارسنجی کیفیت نتایج وارون‌سازی و تحلیل توان تفکیک ساختارهای زیرسطحی با هدف تعیین زون‌های کانی‌زایی شده مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

همانند مدل مصنوعی اول، پاسخ‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی این مدل با انتخاب آرایه دوقطبی-دوقطبی، برای ۳۰ ایستگاه اندازه‌گیری، با فاصله الکترودی ۱۰ متر، تعداد پرش ۱۰ و شدت جریان ۱ آمپر محاسبه شد. در شکل ۴، شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری و شارژپذیری ظاهری به ترتیب از بالا به پایین نشان داده شده است. با توجه به این که ساختار این مدل نسبت به مدل قبلی پیچیدگی بیشتری دارد، تصویرسازی زون‌های زیرسطحی از طریق مدل‌سازی وارون با چالش بیشتری روبه‌روست. نتایج مدل‌سازی وارون برای مقطع مقاومت ویژه و شارژپذیری به ترتیب در شکل‌های ۴-الف و ۴-ب قابل مشاهده است. همان‌طور که مشخص است، ناهنجاری در مرکز مدل از لحاظ فیزیکی و هندسی با دقت مناسبی برآورد شده است. از سوی دیگر، مرز گسل در مقطع مقاومت ویژه با توجه به تباین قابل ملاحظه دو طرف گسل، بهتر نمایان شده است؛ در حالی که موقعیت گسل در مقطع شارژپذیری به خوبی قابل تشخیص نیست. بنابراین، با افزایش پیچیدگی در محیط زیرسطحی، عدم قطعیت در تصویرسازی ساختارهای زیرسطحی نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۵. نقشه موقعیت محدوده بورزمین و راه‌های دسترسی به آن.

۴-۱. زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی

بر اساس تقسیم‌بندی‌های پهنه‌های ساختمانی-رسوبی ایران، محدوده بورزمین در بخش شرقی پهنه ساختمانی لوت از خردقاره ایران مرکزی واقع شده است. بلوک لوت با درازای حدود ۹۰۰ کیلومتر، خاوری‌ترین بخش خردقاره ایران مرکزی به‌شمار می‌رود. مرز شرقی این بلوک با گسل نه‌بندان و حوضه فیلیشی خاور ایران تعیین می‌شود و از غرب به گسل نایبند و بلوک طبس محدود است. این بلوک از شمال با فرورفتگی جنوب کاشمر مشخص و از جنوب به فرونشست جازموریان منتهی می‌شود. با این حال، به دلیل چرخش واحدهای سنگی حوضه فیلیشی شرق ایران در شمال شرق لوت، مرز این بخش از بلوک لوت با حوضه فیلیشی به‌وضوح قابل تشخیص نیست.

علی‌رغم تاریخچه چینه‌ای مشابه بلوک لوت با دیگر نواحی ایران مرکزی، مطالعات جدید بر روی سنگ‌های آتشفشانی و توده‌های نفوذی این بلوک، نشان‌دهنده تحولات تکتونی-ماگمایی خاص در این ناحیه است. این مطالعات بیانگر تأثیر چشمگیر حوادث کوه‌زایی و پساکوه‌زایی بر توزیع و رخداد ماگماتیسم در بلوک لوت دارد. سنگ‌های آتشفشانی سیستم ترشیری به‌ویژه ائوسن، با ضخامتی در حدود ۲۰۰۰ متر، بیش از نیمی از بلوک لوت را می‌پوشانند. بررسی‌ها نشان از

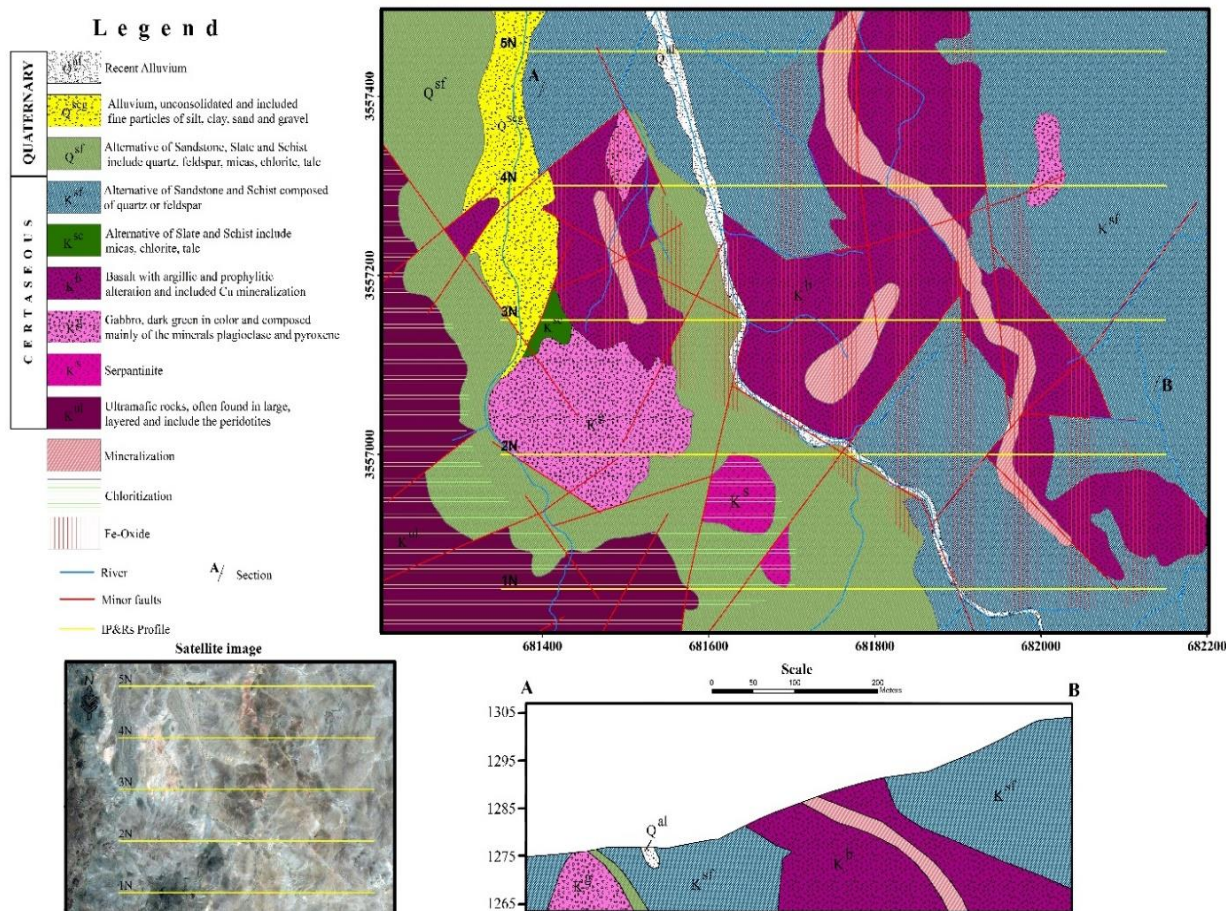
ماهیت آداکیتی بسیاری از این واحدهای سنگی دارد که به نظر می‌رسد در ارتباط با لایه‌ای شدن و نازک شدن پوسته قاره‌ای در پی حوادث پس از فرورانش و کوه‌زایی و تأثیر جریان‌ات رو به بالای گوشته بوده و به ایجاد ماگماتیسمی با ماهیت آداکیتی انجامیده است.

شناسایی رخداد ماگماتیسم با ماهیت آداکیتی از این جهت حائز اهمیت است که مطالعات اخیر ارتباط نزدیک این نوع ماگماتیسم را با تشکیل کانسارهای مس-مولیبدن پورفیری در کمرندهای ولکانیکی پساکوه‌زایی نشان می‌دهند. به‌طوری‌که تشکیل بسیاری از کانسارهای مس پورفیری و رگه‌ای شناخته‌شده ایران در کمرند ماگمایی ارومیه-دختر و ناحیه کرمان نیز به ماگماتیسم آداکیتی نسبت داده شده است. اهمیت شناخت ماهیت آداکیتی سنگ‌های آذرین بلوک لوت زمانی آشکار می‌شود که به رخداد کانسارهای مشابه در این بلوک توجه شود. از جمله این کانسارها می‌توان به کالکافی و دهسلم اشاره کرد.

بلوک لوت شامل توده‌های نفوذی و سنگ‌های ولکانیکی گسترده با سن ژوراسیک تا ترشیری است و وجود فعالیت‌های ماگمایی و آتشفشانی ائوسن تا الیگومیوسن از مهم‌ترین ویژگی‌های آن به‌شمار می‌رود. بسیاری از کانه‌زایی‌های فلزی، از جمله کانسارهای مس پورفیری مانند

لوت محسوب می‌شود که در طی تاریخ زمین‌شناسی تحت تأثیر فرایندهای تکتونیکی نظیر چین‌خوردگی و گسلش شدید قرار گرفته است. ساختارهای اصلی محدوده عمدتاً دارای روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی هستند. رخنمون‌های غالب شامل سرپانتینیت، گابرو، دیوریت، بازالت‌های دگرسان‌شده و رسوبات پلاژیک بوده که در برداشت‌های مقیاس ۱:۵۰۰۰ (شکل ۶) تفکیک شده‌اند. این تنوع سنگ‌شناسی و ساختاری، محدوده بورزمین را به محیطی با پتانسیل مناسب برای کانه‌زایی از نوع سولفیدی تبدیل کرده است. مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی در دو بلوک شمالی و جنوبی انجام شده است. در این مطالعه به دلیل حجم زیاد داده‌ها، صرفاً از داده‌های پروفیل شمالی استفاده می‌شود. موقعیت و امتداد پروفیل‌ها در شکل ۶ نمایش داده می‌شود.

ماهرآباد و کالکافی، کانسارهای رگه‌ای مس و سرب مانند قلعه پنجسر، و ذخایر رگه‌ای اکسید آهن-مس-طلا مانند قلعه‌زری، همگی در ارتباط مستقیم با فعالیت‌های ماگمایی ترشیری بلوک لوت قرار دارند. کانه‌زایی محدوده بورزمین نیز در پیوند با همین فعالیت‌های ماگمایی شکل گرفته است. واحدهای سنگی اصلی و میزبان کانه‌زایی در این محدوده شامل سنگ‌های آتشفشانی نسبتاً تیره‌رنگ آندزیتی تا آندزیت بازالتی ترشیری و نفوذی‌های گرانیتی تا مونزودیوریتی است که در چارچوب فعالیت‌های ماگمایی-هیدروترمال این منطقه تشکیل شده‌اند. محدوده بورزمین در زون ساختاری سیستان و در محدوده نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ سرچاه شور و ۱:۲۵۰۰۰۰ بیرجند واقع شده است. این منطقه شامل سنگ‌های دگرگونی، افیولیتی و رسوبی با سن کرتاسه میانی تا کواترنری بوده و بخشی از حاشیه بلوک



شکل ۶. نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه ۱:۵۰۰۰، همراه با برش زمین‌شناسی در امتداد دو نقطه A و B.

است. مقادیر شارژپذیری در بازه ۰ تا ۳۵ میلی ولت بر ولت متغیر بوده، حد زمینه حدود ۲/۷ و بیشینه بی‌هنجاری ۱۸/۶ میلی ولت بر ولت ثبت شد. با توجه به لیتولوژی منطقه، بی‌هنجاری‌های پایین تا متوسط به سنگ میزبان و بی‌هنجاری‌های بالا به زون‌های سولفیدی منتسب می‌شود. میانگین شارژپذیری ۱۰/۳ و انحراف معیار ۳/۴ میلی ولت بر ولت شاخص مناسبی برای شناسایی کانه‌زایی به شمار می‌رود. سه زون بی‌هنجاری مشخص، به‌ویژه در غرب مقطع، شناسایی شد که با واحدهای ماسه‌سنگی و دگرسانی شدید همخوانی داشته و به‌عنوان ناحیه اولویت‌دار حفاری پیشنهاد می‌شود. رخنمون‌های مس نیز عمدتاً در شرق پروفیل با زون‌های سطحی مطابقت دارند. در مقطع مقاومت‌ویژه، مقادیر عمدتاً کمتر از ۱۰۰ اهم‌متر بوده و میانگین آن ۱۰۵ با انحراف معیار ۴۲ اهم‌متر است. افت مقاومت‌ویژه در لایه میانی می‌تواند ناشی از زون‌های برشی، دگرسانی و نفوذ سیالات گرمابی باشد. باتوجه به این نتایج نقطه حفاری در فاصله حدود ۲۸۰ متری از ابتدای پروفیل پیشنهاد می‌شود (علامت در نظر گرفته‌شده در توموگرام شارژپذیری).

۴-۲-۲. مقطع پروفیل ۲

همانند پروفیل قبلی، پروفیل دوم با امتداد غربی-شرقی و عمود بر روند ساختاری منطقه برداشت شد. پس از اعمال اصلاحات توپوگرافی، وارون‌سازی داده‌ها به‌منظور دستیابی به مدل‌های زیرسطحی مقاومت‌ویژه و شارژپذیری انجام شد (شکل ۸). در این پروفیل، مقادیر شارژپذیری از حد زمینه ۲/۵ میلی ولت بر ولت و بیشینه ۱۸/۲ میلی ولت بر ولت متغیر بوده و بی‌هنجاری‌های اصلی در سه ناحیه قابل شناسایی‌اند. زون بی‌هنجاری اصلی در غرب پروفیل قرار دارد که با واحدهای دگرسان‌شده شیست و اسلیت همخوانی داشته و از مقادیر پایین مقاومت‌ویژه نیز برخوردار است. میانگین شارژپذیری ۱۰/۵ میلی ولت بر ولت با انحراف معیار ۳/۳ میلی ولت بر ولت به‌عنوان معیار مناسب برای کانی‌زایی سولفورده پیشنهاد می‌شود. در مدل مقاومت‌ویژه، یک لایه با

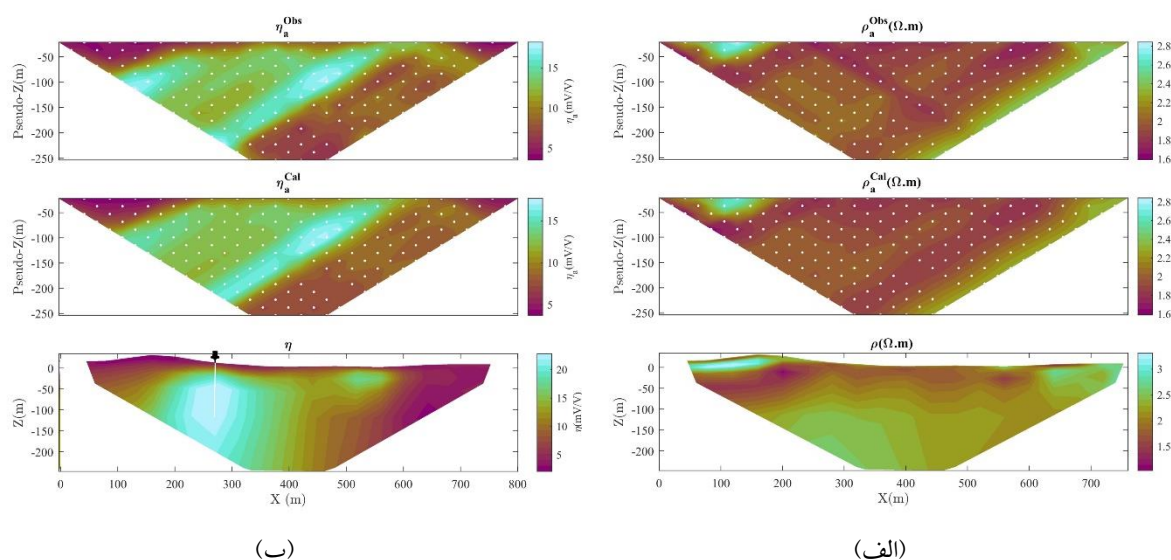
۴-۲. روش‌شناسی و تحلیل داده‌های برداشت صحرائی در این پژوهش، با توجه به اهداف مطالعه و ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه، از آرایش قطبی-دوقطبی برای برداشت داده‌ها استفاده شد. فواصل ایستگاهی ۴۰ متر و تعداد پرش ۱۶ در نظر گرفته شد که امکان دستیابی به عمق مدل‌سازی تا ۲۵۰ متر را فراهم کرد. برای برقراری جریان الکتریکی، از میله‌های مشبک در چاله‌های پر شده با محلول آب و نمک استفاده شد و الکترودهای پتانسیل نیز از نوع گلدانی انتخاب شدند. فاصله بین الکترودهای جریان معادل ۴۰۰ متر و فاصله بین الکترودهای پتانسیل برابر با ۴۰ متر تنظیم شد. بر اساس مطالعات زمین‌شناسی سطحی، پنج پروفیل به طول تقریبی ۸۰۰ متر با روند غربی-شرقی و عمود بر ساختارهای تکتونیکی و کانی‌زایی احتمالی، طراحی و برداشت شد. تحلیل آماری داده‌های پردازش‌شده نشان می‌دهد که تغییرات شارژپذیری از مقادیر پایین (حدود ۱ میلی ولت بر ولت) تا مقادیر بالای ۲۹ میلی ولت بر ولت متغیر است. میانگین مقادیر ناهنجاری بین ۸/۵ تا ۱۱/۵ میلی ولت بر ولت و انحراف معیار آنها بین ۳/۴ تا ۴/۸ میلی ولت بر ولت محاسبه شد که می‌تواند نشان‌دهنده وجود کانی‌زایی سولفورده باشد. تقارن توزیع داده‌ها (برابری نسبی مقادیر میانه و میانگین) نیز تأیید شد. از سوی دیگر، دامنه تغییرات مقاومت‌ویژه از مقادیر بسیار پایین (حدود ۱/۸ اهم‌متر) تا مقادیر بالا (حدود ۷۰۰ اهم‌متر) متغیر بوده و میانگین کلی داده‌ها در حدود ۱۰۰ اهم‌متر محاسبه شده است. این تغییرات گسترده نشان‌دهنده ناهمگونی‌های زمین‌شناسی زیرسطحی ناشی از فرایندهای دگرسانی، کانه‌زایی و مهاجرت سیالات معدنی در محدوده مورد مطالعه است.

۴-۲-۱. مقطع پروفیل ۱

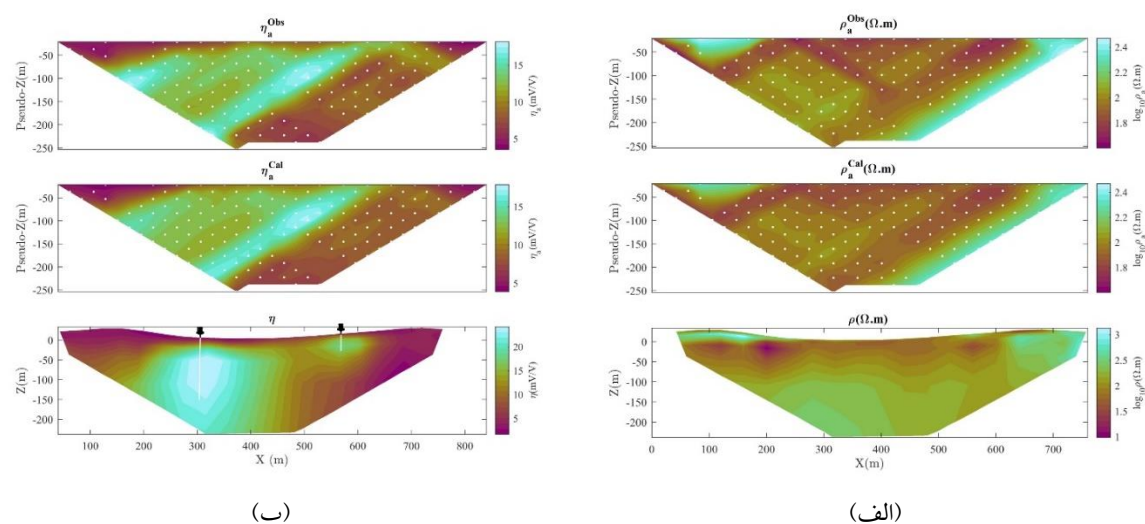
پروفیل اول با امتداد غربی-شرقی و عمود بر روند احتمالی کانه‌زایی طراحی و اجرا شد. پس از اعمال تصحیحات توپوگرافی، مقاطع وارون‌سازی‌شده شارژپذیری و مقاومت‌ویژه مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج مدل‌های مقاومت‌ویژه و شارژپذیری در شکل ۷ نمایش داده شده

گرمایی باشد. دو نقطه حفاری به منظور بررسی منشأ بی‌هنجاری‌ها در این پروفیل در فواصل ۳۱۰ و ۵۷۰ متری پیشنهاد شده است.

مقاومت بالا از شرق به مرکز پروفیل گسترش دارد که در بالای آن افت شدید مقاومت ویژه دیده می‌شود؛ امری که می‌تواند ناشی از زون برشی، رسی‌شدگی و نفوذ سیالات



شکل ۷. الف) شبه‌مقاطع مقاومت‌ویژه ظاهری مشاهده‌ای (بالا) و محاسباتی (وسط) و مقطع وارون‌سازی شده نهایی (پایین) (ب) شبه‌مقاطع شارژپذیری ظاهری مشاهده‌ای (بالا) و محاسباتی (وسط) و مقطع وارون‌سازی شده نهایی (پایین) مربوط به پروفیل ۱ بلوک شمالی. علامت در نظر گرفته شده در توموگرام شارژپذیری، محل نقطه پیشنهادی حفاری می‌باشد.



شکل ۸. الف) شبه‌مقاطع مقاومت‌ویژه ظاهری مشاهده‌ای (بالا) و محاسباتی (وسط) و مقطع وارون‌سازی شده نهایی (پایین) (ب) شبه‌مقاطع شارژپذیری ظاهری مشاهده‌ای (بالا) و محاسباتی (وسط) و مقطع وارون‌سازی شده نهایی (پایین) مربوط به پروفیل ۲ بلوک شمالی. علامت در نظر گرفته شده در توموگرام شارژپذیری، محل نقطه پیشنهادی حفاری می‌باشد.

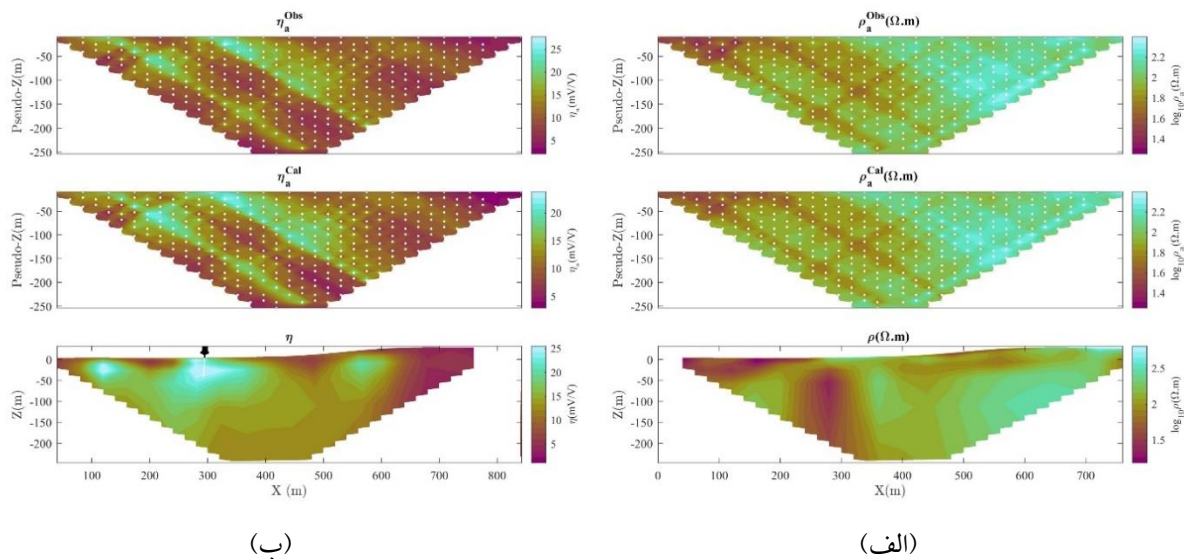
۴-۲-۳. مقطع پروفیل ۳

باتوجه به نتایج وارون‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القائی، نمایش داده شده در شکل ۹، در این پروفیل بیشینه شارژپذیری ۲۷/۷ میلی‌ولت بر ولت و حد زمینه حدود ۲/۱ میلی‌ولت بر ولت به دست آمد. میانگین شارژپذیری حدود ۱۰/۵ میلی‌ولت بر ولت با انحراف معیار ۳/۳ میلی‌ولت بر ولت بوده و دو زون بی‌هنجاری اصلی با مقادیر بالای ۲۰ میلی‌ولت بر ولت شناسایی شدند که با واحدهای ماسه‌سنگ، اسلیت و شیت همخوانی داشته و از مقاومت‌ویژه پایینی برخوردارند. یک زون سطحی در شرق و زون دیگری در مرکز که احتمالاً تحت تأثیر گسل‌هاست، نیز مشاهده شد. مقادیر مقاومت‌ویژه در محدوده ۰ تا ۷۵۰ اهم‌متر متغیر بوده و مقطع عمدتاً دارای مقاومت پایین (میانگین ۹۹ اهم‌متر) است. براساس تفسیر مقاطع مقاومت‌ویژه و شارژپذیری، نقطه حفاری در فاصله حدود ۲۹۰ متری از ابتدای پروفیل پیشنهاد می‌شود.

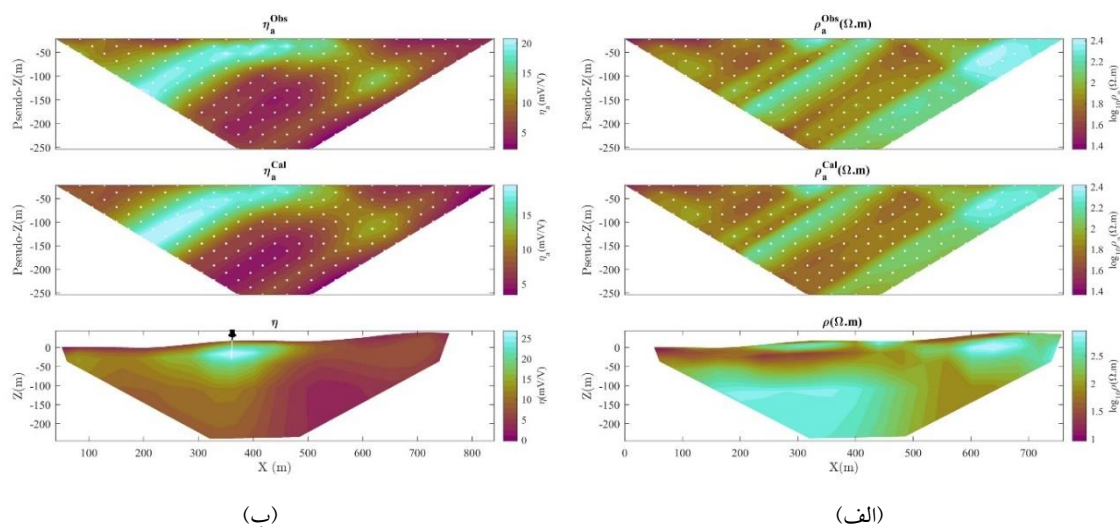
۴-۲-۴. مقطع پروفیل ۴

باتوجه به نتایج وارون‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی

و پلاریزاسیون القائی، نمایش داده شده در شکل ۱۰، در مدل شارژپذیری، بیشینه مقدار ثبت شده ۲۲/۲ میلی‌ولت بر ولت و حد زمینه حدود ۲/۲ میلی‌ولت بر ولت تعیین شد. بی‌هنجاری اصلی در بخش مرکزی پروفیل و تا عمق تقریبی ۱۰۰ متر به صورت لایه‌ای مشاهده می‌شود که با میانگین ۹/۸ میلی‌ولت بر ولت و انحراف معیار ۴/۸ میلی‌ولت بر ولت می‌تواند معرف زون کاننی‌زایی سولفور به باشد. این بی‌هنجاری با واحدهای ماسه‌سنگ، اسلیت و شیت تطابق ساختاری مناسبی داشته و به دلیل شدت دگرسانی و کاننی‌زایی، از مقادیر مقاومت‌ویژه پایینی نیز برخوردار است؛ لذا به‌عنوان هدف اصلی جهت حفاری عمیق پیشنهاد می‌شود. رخنمون‌های مس نیز عمدتاً در همین ناحیه گزارش شده‌اند. در مدل مقاومت‌ویژه، مقادیر عمدتاً پایین (میانگین ۱۰۶ و انحراف معیار ۵۳ اهم‌متر) مشاهده شده و لایه‌ای مقاوم از سطح در بخش شرقی آغاز و به سمت مرکز در عمق ادامه یافته است. کاهش شدید مقاومت در بالای این لایه می‌تواند نشان‌دهنده وجود زون برشی، کاننی‌زایی فلزی، رسی شدن سنگ میزبان و نفوذ سیالات گرمایی شور باشد. باتوجه به این نتایج نقطه حفاری در فاصله حدود ۳۶۰ متری از ابتدای پروفیل پیشنهاد می‌شود.



شکل ۹. الف) شبه‌مقاطع مقاومت‌ویژه ظاهری مشاهده‌ای (بالا) و محاسباتی (وسط) و مقطع وارون‌سازی شده نهایی (پایین) (ب) شبه‌مقاطع شارژپذیری ظاهری مشاهده‌ای (بالا) و محاسباتی (وسط) و مقطع وارون‌سازی شده نهایی (پایین) مربوط به پروفیل ۳ بلوک شمالی. علامت در نظر گرفته شده در توموگرام شارژپذیری، محل نقطه پیشنهادی حفاری می‌باشد.

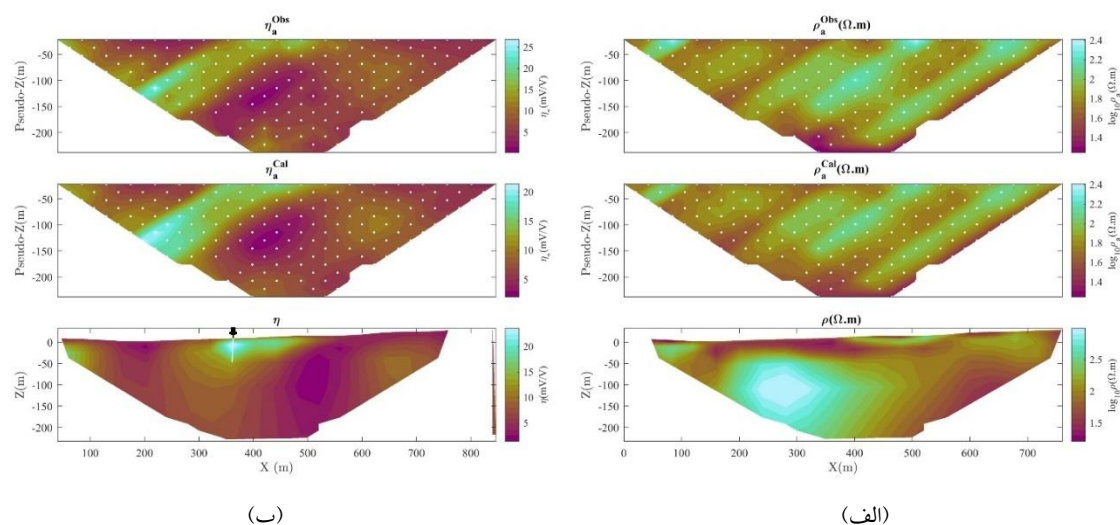


شکل ۱۰. الف) شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری مشاهده‌ای (بالا) و محاسباتی (وسط) و مقطع وارون‌سازی شده نهایی (پایین) (ب) شبه مقاطع شارژپذیری ظاهری مشاهده‌ای (بالا) و محاسباتی (وسط) و مقطع وارون‌سازی شده نهایی (پایین) مربوط به پروفیل ۴ بلوک شمالی. علامت در نظر گرفته شده در توموگرام شارژپذیری، محل نقطه پیشنهادی حفاری می‌باشد.

و فاقد تطابق ساختاری با پروفیل‌های جنوبی است؛ بنابراین پیشنهاد حفاری در این بخش با احتیاط همراه است. در مدل مقاومت ویژه، مقادیر عمده‌تاً پایین (میانگین ۸۳ و انحراف معیار ۳۷ متر) مشاهده شده و تنها در اعماق، مقادیر بالاتر از ۵۰۰ اهم متر تفکیک پذیر هستند. این روند می‌تواند مؤید ویژگی‌های لیتولوژیکی خاص یا تأثیر دگرسانی شدید باشد. براساس نتایج منتج شده از مقاطع، نقطه حفاری در فاصله حدود ۳۶۰ متر از ابتدای پروفیل پیشنهاد می‌شود.

۴-۲-۵. مقطع پروفیل ۵

باتوجه به نتایج وارون‌سازی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القائی، نمایش داده شده در شکل ۱۱، در مدل شارژپذیری، بیشینه مقدار ثبت شده ۲۹/۳ میلی‌ولت بر ولت و حد زمینه حدود ۰/۱ میلی‌ولت بر ولت بوده و میانگین داده‌ها حدود ۸/۵ میلی‌ولت بر ولت با انحراف معیار ۴/۸ میلی‌ولت بر ولت است. با وجود مشاهده زون‌های متعدد بی‌هنجاری با مقادیر بالاتر از ۲۰ میلی‌ولت بر ولت، به دلیل وجود نوفه زیاد، اعتبار این بی‌هنجاری‌ها پایین ارزیابی شده



شکل ۱۱. الف) شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری مشاهده‌ای (بالا) و محاسباتی (وسط) و مقطع وارون‌سازی شده نهایی (پایین) (ب) شبه مقاطع شارژپذیری ظاهری مشاهده‌ای (بالا) و محاسباتی (وسط) و مقطع وارون‌سازی شده نهایی (پایین) مربوط به پروفیل ۵ بلوک شمالی. علامت در نظر گرفته شده در توموگرام شارژپذیری، محل نقطه پیشنهادی حفاری می‌باشد.

۵. بحث

در مناطقی که تمرکز کانی‌های فلزی یا سولفیدی بالاست، به‌طور طبیعی پاسخ پلاریزاسیون القایی بالا به‌عنوان شاخص اصلی در اکتشاف ژئوفیزیکی مطرح می‌شود. با این حال، در چنین مناطقی همواره مقدار مقاومت‌ویژه الکتریکی پایین مشاهده نمی‌شود. به‌عنوان نمونه، حضور کانی‌های مس‌دار در زون‌های سیلیسی می‌تواند همزمان منجر به مقادیر بالای پلاریزاسیون القایی و مقاومت‌ویژه بالا شود. نوع دگرسانی غالب در منطقه مورد مطالعه، از نوع آرژیلیکی است که به‌واسطه حضور کانی‌های سولفیدی، پاسخ شارژپذیری در مقاطع وارون‌شده به‌وضوح بالا ثبت شده است.

نتایج مدل‌سازی ژئوفیزیکی نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه در مقادیر شارژپذیری، از سطوح پایین تا نسبتاً بالا، در بخش گسترده‌ای از منطقه مورد بررسی است. مقدار حد زمینه برای پارامتر شارژپذیری حدود ۱ میلی‌ولت بر ولت برآورد شده و بیشینه این مقدار تا حدود ۲۹ میلی‌ولت بر ولت نیز افزایش یافته است. تحلیل آماری داده‌های برداشت‌شده از پروفیل‌های ژئوفیزیکی حاکی از آن است که میانگین مقادیر بی‌هنجاری شارژپذیری در بازه‌ای بین ۵/۸ تا ۱۱ میلی‌ولت بر ولت و مقادیر انحراف معیار نیز در محدوده ۳/۳ تا ۴/۸ میلی‌ولت بر ولت قرار دارد. این مقادیر، شاخص مناسبی برای شناسایی زون‌های دارای پتانسیل کانی‌زایی سولفیدی به‌شمار می‌آیند.

در نواحی مرکزی و غربی پروفیل‌های اول و دوم، بی‌هنجاری‌هایی مشخص و قابل تفکیک مشاهده می‌شود که از پروفیل سوم به بعد، با افزایش شدت و کاهش عمق همراه شده‌اند. مدل‌سازی‌های سه‌بعدی و شبه‌سه‌بعدی، روند گسترش این بی‌هنجاری‌ها را در امتداد جنوب‌غربی - شمال‌شرقی با آزمون اندک به‌روشنی نشان می‌دهند؛ به‌طوری‌که در بخش جنوب‌غربی منطقه، این زون‌های بی‌هنجار در اعماق بیشتری گسترش دارند و به‌تدریج به سمت شمال‌شرقی از عمق آنها کاسته می‌شود. تطابق ساختاری این بی‌هنجاری‌ها با رخنمون‌های سطحی کانی‌سازی مس در بخش شمال‌شرقی، مؤید اعتبار بالای

نتایج مدل‌سازی است.

مقادیر بالای شارژپذیری در اعماق منطقه به‌احتمال زیاد ناشی از حضور زون‌های دگرسانی‌شده، به‌ویژه رسی‌شدگی، و تجمع توده‌های معدنی سولفیدی است. به همین دلیل، انجام حفاری اکتشافی در این نواحی به‌منظور تأیید صحت تفسیرهای ژئوفیزیکی ضروری به‌نظر می‌رسد. همچنین، مقادیر اندازه‌گیری‌شده مقاومت‌ویژه در این منطقه، به‌طور کلی کمتر از مقادیر معمول در سنگ‌های بازالتی است؛ که احتمالاً این کاهش در پی نفوذ ماگمای اسیدی و تغییر در ویژگی‌های فیزیکی توده سنگ‌ها اتفاق افتاده است. لازم به ذکر است که مقادیر بالای شارژپذیری اغلب با نواحی دارای مقاومت‌ویژه متوسط (حدود ۱۰۰ اهم‌متر) انطباق دارند. افزون بر این، حضور زون‌های برشی، دگرسانی رسی و نفوذ سیالات گرمایی از جمله عوامل مؤثر در کاهش مقاومت‌ویژه به‌ویژه در نواحی عمیق‌تر محسوب می‌شوند.

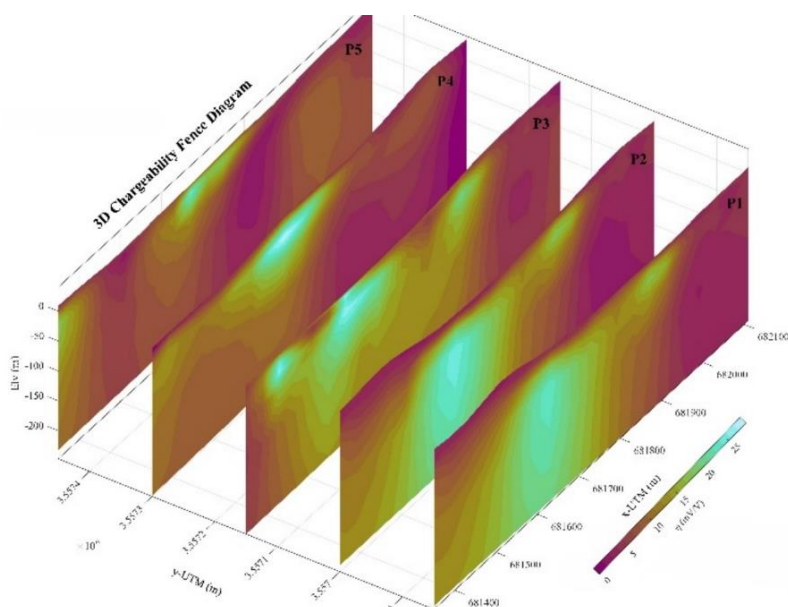
تلفیق و هم‌سنجی داده‌های برداشت‌شده بیانگر وجود همبستگی مثبت بین دو پارامتر ژئوالکتریکی شامل شارژپذیری بالا و مقاومت‌ویژه متوسط در بخش‌هایی از محدوده مورد بررسی است. در نواحی جنوبی منطقه نیز زونی‌های با شارژپذیری متوسط قابل شناسایی است که احتمالاً مرتبط با دگرسانی شدید بوده و نشانه مستقیم از کانی‌زایی به‌شمار نمی‌رود. با این حال، با توجه به ساختارهای زیرسطحی و ویژگی‌های زمین‌شناسی، حفاری اکتشافی در این بخش نیز پیشنهاد می‌شود.

در بخش شمال‌غربی محدوده، زونی با شارژپذیری بالا و مقاومت‌ویژه نسبتاً متوسط شناسایی شده که با وجود مقادیر متوسط مقاومت‌ویژه، از منظر ژئوشیمیایی و نوع دگرسانی در طبقه‌بندی نواحی دارای پتانسیل کانی‌زایی قرار می‌گیرد. به همین سبب، تمرکز برنامه‌های حفاری در مراحل آتی، عمدتاً بر این ناحیه متمرکز خواهد شد.

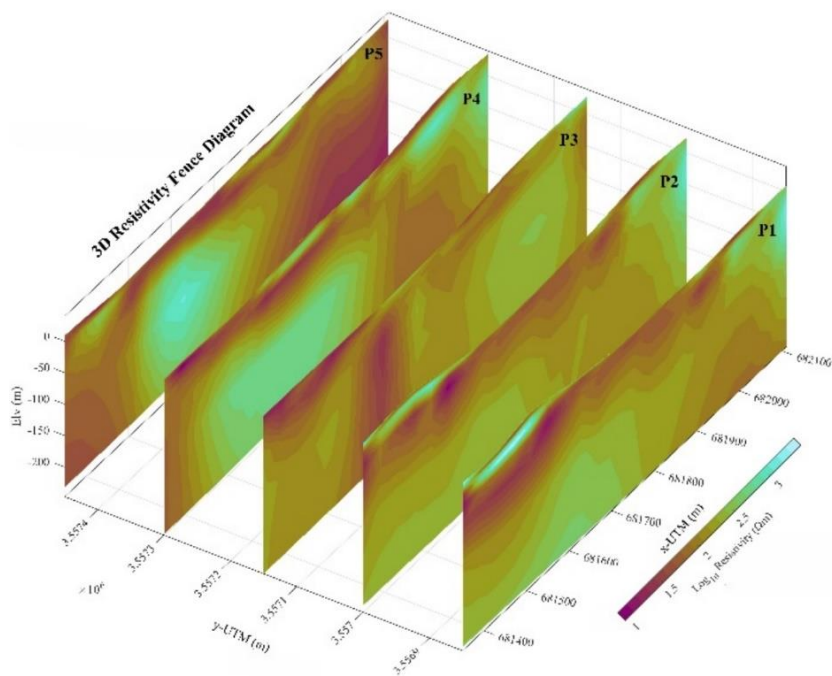
به‌منظور درک بهتر از روند کانی‌زایی و تغییرات ساختاری زیرسطحی، نمایش سه‌بعدی حاصل از وارون‌سازی پارامترهای شارژپذیری و مقاومت‌ویژه در شکل ۱۲-الف و

۱۲-ب ارائه شده‌اند. این تصاویر، روند شمالی-جنوبی گسترش زون شارژپذیر را به‌خوبی نمایش می‌دهند و حاکی از آن است که ابعاد این زون از شمال به سمت جنوب افزایش یافته و تا حدودی با روند کاهشی مقاومت‌ویژه نیز

همراه است. این رفتار، می‌تواند نشان‌دهنده پیچیدگی‌های ساختاری و گسترش جانبی زون‌های کانیزایی باشد که لزوم ادامه مطالعات اکتشافی را بیش از پیش برجسته می‌سازد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۲. نمایش سه‌بعدی، الف) مقاطع شارژپذیری ب) مقاطع مقاومت‌ویژه.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های وارون‌سازی توسعه‌یافته برای داده‌های مقاومت‌ویژه و پلاریزاسیون القایی، دو مدل مصنوعی با سطوح متفاوتی از پیچیدگی ساختاری طراحی و تحلیل شدند و سپس نتایج حاصل با داده‌های واقعی برداشت‌شده از محدوده بورزمین در استان خراسان جنوبی مقایسه شد. مدل مصنوعی نخست شامل یک لایه سطحی کم‌ضخامت، یک توده جعبه‌ای مقاوم و محیط زمینه بود که با تباین مناسب در پارامترهای الکتریکی، امکان شناسایی واضح ساختارها را فراهم ساخت. مقاطع وارون‌شده مقاومت‌ویژه و شارژپذیری در این مدل، به‌ویژه در ناحیه توده مرکزی، تطابق خوبی با مدل اولیه نشان دادند و الگوریتم وارون‌سازی با رسیدن به مقادیر پایین تابع هدف، به همگرایی مناسب دست یافت. در مدل دوم، با معرفی گسل، ناهنجاری جعبه‌ای و لایه‌های زیرسطحی با تباین شدید، ساختار زمین‌شناسی پیچیده‌تری شبیه‌سازی شد. در این حالت، مرز گسل در مقطع وارون‌شده مقاومت‌ویژه به‌وضوح قابل شناسایی بود، اما در مقطع شارژپذیری، به دلیل کاهش تباین فیزیکی، تشخیص آن با دقت کمتری همراه بود. ناهنجاری مرکزی در هر دو مدل فیزیکی و هندسی، با دقت مناسبی بازسازی شد که مؤید پایداری الگوریتم در شرایط پیچیده‌تر بود.

برای ارزیابی میدانی عملکرد الگوریتم وارون‌سازی، داده‌های واقعی حاصل از برداشت ژئوفیزیکی در محدوده اکتشافی بورزمین به کار گرفته شد. این محدوده به‌عنوان زون پتانسیل‌دار کانی‌زایی مس از نوع ماسیو سولفیدی شناخته می‌شود. در این مطالعه، پنج پروفیل با آرایش قطبی-دوقطبی

برداشت و تا عمق حدود ۲۵۰ متر مدل‌سازی شدند. مقاطع وارون‌شده مقاومت‌ویژه و شارژپذیری، حضور زون‌های بی‌هنجاری عمیق و گسترده را در بخش‌های مرکزی و غربی پروفیل‌ها نمایان ساختند که از نظر ساختاری با واحدهای دگرسان‌شده ماسه‌سنگ، شیست و اسلیت تطابق مناسبی داشتند. افزایش شارژپذیری تا مقادیر بیش از ۲۹ میلی‌ولت بر ولت، همراه با افت مقاومت‌ویژه تا کمتر از ۱۰۰ اهم‌متر، به‌ویژه در لایه‌های میانی تا عمقی، نشانگر زون‌های دگرسانی رسی، زون‌های برشی و کانی‌زایی سولفیدی احتمالی است. تفسیر مقاطع نشان داد که بی‌هنجاری‌های شدید شارژپذیری، عمدتاً در مناطقی با مقاومت‌ویژه متوسط تا پایین تمرکز یافته‌اند که این هم‌پوشانی، نشانه‌ای از تجمع سولفیدهای رسانا در بسترهای آبدار یا دگرسان‌شده می‌باشد. همچنین، در نمایش سه‌بعدی حاصل از تلفیق پروفیل‌ها، روند گسترش زون‌های شارژپذیر به‌صورت شمال-جنوب مشخص شد که از نظر ساختاری با روند شرایط زمین‌شناسی منطقه همخوانی دارد.

مقایسه کمی و کیفی نتایج حاصل از داده‌های واقعی با مدل‌های مصنوعی، نشان می‌دهد که الگوریتم وارون‌سازی توان تفکیک مناسبی در شرایط پیچیده زمین‌شناسی داشته و قادر است ناهنجاری‌های الکتریکی مؤثر در تعیین زون‌های کانی‌زایی را با دقت مناسبی آشکار سازد. از این‌رو، استفاده از این الگوریتم وارون‌سازی به‌عنوان ابزار تصمیم‌سازی در طراحی حفاری‌های اکتشافی، به‌ویژه در مراحل اولیه شناسایی ذخایر سولفیدی، توصیه می‌شود.

مراجع

- Bertin, J., Loeb, J., Van Nostrand, R.G. & Saxov, S. (1976). *Experimental and theoretical aspects of induced polarization*. Vol. 1, 250.
- Binley, A. & Slater, L. (2020). *Resistivity and induced polarization: Theory and applications to the near-surface earth*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Board, M. & Ohman, J. (1996). Approximate inversion of induced polarization data. *Geophysics*, 61(6), 1342–1350.
- Carolus, C., Schmutz, M., Camerlynck, C., & Florsch, N. (2013). A new 2D/3D inversion

- software for time-domain induced polarization data. In *Proceedings of the 5th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*, 1-5.
- Casotti, C., Revil, A., Johnson, T., Ménard, G., Su, Z., Qiang, S., Ghorbani, A., Duvillard, P.-A., Martin, G., Abdelfattah, M., Nicaise, J. B., Houtteville, T. & Côme, J. M. (2025). Induced polarization applied to landslides. Part 2: anatomy and water content tomography of a mudflow. *Geophysical Journal International*, 242(2), 1-25.

- Dey, A. & Morrison, H.F. (1979). Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, 27(1), 106–136.
- Fink, J.B., McAlister, E.O., Sternberg, B.K., Wieduwilt, W.G. & Ward, S.H. (1990). *Induced polarization applications and case histories*.
- Ghanati, R., Azadi, Y. & Fakhimi, R. (2020). RESIP2DMODE: A MATLAB-based 2D resistivity and induced polarization forward modeling software. *Iranian Journal of Geophysics*, 13(4), 60–78.
- Khabaz, Z. T., Ghanati, R. & Bérubé, C. L. (2024). Uncertainty quantification in electrical resistivity tomography inversion: Hybridizing block-wise bootstrapping with geostatistics. *Geophysical Journal International*, 239(3), 1576–1596.
- Li, Y. & Oldenburg, D.W. (1996). 3-D inversion of induced polarization data. *Geophysics*, 61(6), 1328–1341.
- Liu, Y., Heinson, G., Kay, B., Boren, G., Carter, S., Olivier, G., Jones, T., Abel, R., Vella, L., McAllister, L. (2024). Natural source-field induced polarisation exploration of an iron-oxide copper-gold (IOCG) deposit under thick cover. *Exploration Geophysics*, 55(6), 657–666.
- Mufti, I.R. (1976). Finite-difference resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures. *Geophysics*, 41(1), 62–78.
- Ohta, Y., Goto, T., Koike, K., Lin, W., Tadai, O., Kasaya, T., Kanamatsu, T. & Machiyama, H. (2024). Correlation between induced polarization and sulfide content of rock samples obtained from seafloor hydrothermal mounds in the Okinawa Trough, Japan. *Earth, Planets and Space*, 76, 54.
- Oldenburg, D.W. & Li, Y. (1994). Inversion of induced polarization data. *Geophysics*, 59(9), 1327–1341.
- Pelton, W.H., Rijo, L. & Swift, C.M. (1978). Inversion of two-dimensional resistivity and induced-polarization data.
- Pourhashemi, S., Ghanati, R., AliHeidari, A. (2024). 'Time-domain induced polarization tomography inversion', *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 58(2), 153-160.
- Rodi, W. & Mackie, R.L. (2001). Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66(1), 174–187.
- Roudsari, M. S., Ghanati, R. & Bérubé, C. L. (2024). Spectral induced polarization tomography inversion: Hybridizing homotopic continuation with Bayesian inversion. *Geophysics*, 89(4), 1–63.
- Sasaki, Y. (1994). 3-D resistivity inversion using the finite-element method. *Geophysics*, 59(11), 1839–1848.
- Seigel, H.O. (1959). Mathematical formulation and type curves for induced polarization. *Geophysics*, 24(3), 547–565.
- Smith, J.T. (1996). Conservative modeling of 3-D electromagnetic fields, Part II: Biconjugate gradient solution and an accelerator. *Geophysics*, 61(5), 1319–1324.
- Sumner, J.S. (1976). *Principles of induced polarization for geophysical exploration*. Amsterdam: Elsevier.
- Su, Z., Revil, A., Ghorbani, A., Zhang, X., Zhao, X. & Richard, J. (2024). Combining electrical resistivity, induced polarization, and self-potential for a better detection of ore bodies. *Minerals*, 14, 12.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. & Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Verma, V.K., Singh, S. & Singh, A. (2024). Extraction of high chargeability distribution using joint inversion of direct current resistivity and time domain induced polarization data: A development and test results on uranium bearing target rock. *Pure and Applied Geophysics*, 181, 953–976.
- Yu, H., Kim, B. & Nam, M.J. (2024). Inversion of the decay curves of time-domain induced-polarization survey data with consideration of hybrid time constraints. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62, 1–9.