



Imam Khomeini International University
Vol. 10, No. 3, Autumn 2025



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Determination of Subsurface Electrical Structures in Southern Sabalan Using Two-Dimensional Inversion of Magnetotelluric Data with the Adaptive Finite Element Method

Filbandi Kashkouli M.¹, Kamkar-Rouhani A.^{2*}, Arab-Amiri A.R.³, Seyedrahimi-Niaraq M.⁴, Rahmani M.R.⁵

1- Ph.D, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

4- Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

5- Ph.D, Renewable Energy and Energy Efficiency Organization, Tehran, Iran

Received: 17 Oct. 2024

Accepted: 17 Jun. 2025

Abstract: The presence of numerous hot springs in the Sabalan region makes it a highly favorable area for geothermal exploration. In this study, magnetotelluric (MT) data were used to investigate the thermal origin of geothermal resources in the southern part of the Sabalan volcanic region. For this purpose, data from 13 MT stations along a survey line with varying station spacing were employed. Since magma exhibits lower electrical resistivity compared to the surrounding host rocks, it can be detected through the magnetotelluric method. Dimensionality analysis revealed shallow-to-medium-depth structures dominated by one-dimensional (1D) and two-dimensional (2D) geometries, while deeper structures exhibited three-dimensional (3D) complexity. A 2D isotropic inversion was performed using an adaptive finite element method, incorporating rapid Occam inversion to minimize the objective function. Sensitivity analysis was conducted to evaluate the reliability of the conductive structures resolved in the final model, confirming high accuracy and robustness. The model resulting from 2D inversion of the MT data demonstrates that one of the thermal sources of the geothermal system originates from the southern part of the Sabalan region. Furthermore, the migration of high-temperature fluids is controlled by fault-induced fractures in the southern part of the region, directing the fluids toward the northwest.

Keywords: Magnetotelluric (MT), Inversion, Adaptive finite element, Geothermal, Sabalan.

How to cite this article

Filbandi kashkouli, M., Kamkar-Rouhani, A., Arab-Amiri, A., Seyedrahimi-Niaraq, M., and Rahmani, M. R. (2025). "Determination of subsurface electrical structures in southern Sabalan using two-dimensional inversion of magnetotelluric data with the adaptive finite element method". Journal of Mineral Resources Engineering, 10(3): 1-17.

DOI: [10.30479/jmre.2025.21063.1714](https://doi.org/10.30479/jmre.2025.21063.1714)

*Corresponding Author Email: kamkarr@sharoodut.ac.ir

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

INTRODUCTION

The Sabalan geothermal field, located in the northwestern region of Iran, is considered one of the most promising geothermal zones in the country. Its geothermal potential is evidenced by the presence of numerous hot springs, surface hydrothermal manifestations, and its location near the Sabalan stratovolcano [1,2]. These features have attracted continuous geophysical exploration since the late 1990s [3]. The region's geological complexity stems from its tectonic position over the collision zone of the Arabian and Eurasian plates. This tectonic interaction has resulted in significant volcanic activity, faulting, and the formation of a stratovolcano characterized by andesitic to rhyolitic lava flows. The Quaternary volcanic activity plays a crucial role in feeding and sustaining the hydrothermal system [4].

Historical MT surveys in 1997 and later campaigns in 2007 and 2009 have indicated the presence of multiple low-resistivity anomalies around the volcano. However, interpretations varied due to differences in modelling approaches, dimensional assumptions, and sparse data density in key areas like the southern flank [1].

In this study, a new 13-station MT survey line has been established across the southern slopes of Sabalan in the Dolar area. The goal has been to accurately delineate the subsurface resistivity structure using adaptive finite element 2D inversion, identify potential heat sources, and understand the influence of tectonic features such as faults in controlling geothermal fluid migration.

METHODS

MT data were acquired using Phoenix MTU-5A equipment capable of capturing natural electromagnetic signals across a wide frequency range. The MT dataset consisted of five-component time series (three magnetic and two electric fields) recorded at 13 stations with variable spacing across a 12.3 km transect crossing several fault zones. The raw data were processed using the SSMT200 software to obtain impedance tensors, from which apparent resistivity and phase responses were derived [5]. Dimensionality analysis was performed using the phase tensor method [6], which indicated dominantly 1D and 2D behavior at shallow to intermediate depths and 3D structures at greater depths. To assess signal penetration, the Niblett-Bostick skin depth [7-9] approach was applied, estimating reliable penetration depths of up to 10 km depending on the station and mode (TE or TM).

The inversion was carried out using MARE2DEM [10], an adaptive finite element inversion tool. This method constructs an unstructured triangular mesh that conforms to topography and subsurface gradients. The Occam inversion algorithm was employed to regularize the model, minimize the RMS error, and balance model smoothness with data fit. The initial model was a homogeneous half-space of 10 Ωm .

FINDINGS AND DISCUSSION

The final resistivity model revealed four main structural units: (1) a shallow resistive layer (R1) associated with surface rocks, (2) a conductive cap (C1) interpreted as a clay-rich alteration zone, (3) a mid-depth resistive layer (R2), and (4) a prominent deep conductive anomaly (C2) situated between 4.5 and 8 km depth (see Figure 1). This C2 anomaly is spatially associated with mapped faults and is interpreted as a geothermal heat source.

Sensitivity analysis was conducted by replacing the C2 anomaly with a high-resistivity (1000 Ωm) body. The resulting increase in RMS error (by 19%) validated the importance and reliability of the C2 feature in the obtained model from the inversion. This suggests a fluid- or melt-rich zone likely contributing to the regional geothermal system.

A comparison of the inversion-resulting model with previously obtained models and geological maps shows good agreement between them in terms of fault alignments and low-resistivity bodies. The role of fault structures, particularly those trending northwest-southeast, appears critical in controlling the ascent and horizontal flow of geothermal fluids, aligning with global conceptual models of geothermal systems.

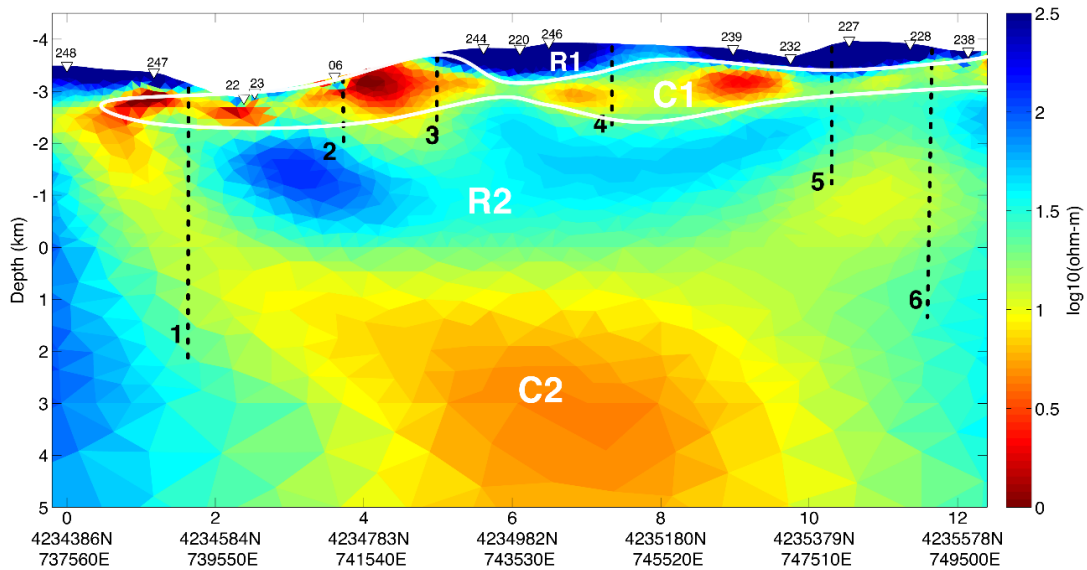


Figure 1. The final section resulting from 2D inversion of the MT data. Inferred faults are shown with black dashed lines

CONCLUSION

The application of adaptive finite element 2D inversion to MT data in the southern Sabalan geothermal field successfully leads to delineation of major resistivity structures. The identification of a deep conductive zone (C2) and its association with regional faults confirms the presence of a magmatic heat source and active fluid pathways.

These findings enhance understanding of the geothermal system in the Sabalan region and support further exploration. By integrating resistivity modelling, geological context, and structural interpretation, this study provides a robust geophysical basis for future drilling and sustainable geothermal resource development.

REFERENCES

- [1] Talebi, B., Khosrawi, K., and Ussher, G. (2005). "Review of resistivity surveys from the NW Sabalan geothermal field, Iran". World Geothermal Congress, April 24-29, Antalya, Turkey.
- [2] Talebi, B. (2006). "Numerical modeling of the NW Sabalan geothermal field, Iran". Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, January 30-February 1, California, USA.
- [3] KML, (1997). "Sabalan geothermal project, Stage1-Surface exploration, final exploration report". Kingston Morrison Limited Co., report 2505- RPT- GE- 003 for the Renewable Energy Organization of Iran, Tehran, pp. 83.
- [4] Karakhanian, A., Djrbashian, R., Trifonov, V., Philip, H., Arakelian, S., and Avagian, A. (2002). "Holocene-historical volcanism and active faults as natural risk factors for Armenia and adjacent countries". Journal of Volcanology and Geothermal Research, 113: 319-344. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00264-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00264-5).
- [5] Jones, A. G., and J'odicke, H. (1984). "Magnetotelluric transfer function estimation improvement by a coherence based rejection technique". Society of Exploration Geophysicists, SEG Technical Program Expanded Abstracts. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1894081>.
- [6] Caldwell, T. G., Bibby, H. M., and Brown, C. (2004). "The magnetotelluric phase tensor". Geophysical Journal International, 158: 457-469. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02281.x>.
- [7] Niblett, E. R., and Sayn-Wittgenstein, C. (1960). "Variation of electrical conductivity with depth by the magnetotelluric method". Geophysics, 25: 998-1008. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1438799>.
- [8] Bostick, F. X. (1977). "A simple almost exact method of MT analysis: Workshop on Electrical Methods in Geothermal Exploration, U.S. Geol. Sur. Contract. No. 14080001-8-359". In: Workshop on Electrical Methods in Geothermal Exploration, University of Utah Rpt., U.S.G.S contact 14-08-0001-g-359. Ward S. H., ed. pp. 183.

- [9] Jones, A. G. (1983). "On the equivalence of the "Niblett" and "Bostick" transformation in the magnetotelluric method". *Journal of Geophysics*, 53: 72-73. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-009-7069-4_4.
- [10] Key, K. (2016). "Mare2dem: a 2-D inversion code for controlled-source electromagnetic and magnetotelluric data". *Geophysical Journal International*, 207(1): 571-588. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw290>.



تعیین ساختارهای الکتریکی زیرسطحی جنوب سبلان با وارون سازی دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک با روش اجزاء محدود تطبیقی

محمد فیلبندی کشکولی^۱، ابوالقاسم کامکار روحانی^{۲*}، علیرضا عرب امیری^۳، میرمهدی سیدرحیمی نیارق^۴، محمدرضا رحمانی^۵

- ۱- دکتری، گروه اکتشاف معدن، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
- ۲- استاد، گروه نفت و ژئوفیزیک، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
- ۳- دانشیار، گروه اکتشاف معدن، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
- ۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
- ۵- دکتری، شرکت انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق، تهران

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۷

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۶

چکیده

وجود چشمه‌های آب گرم متعدد در منطقه سبلان، این منطقه را به مکانی بسیار مطلوب برای اکتشافات زمین‌گرمایی تبدیل کرده است. در این مقاله از داده‌های مگنتوتلوریک برای شناسایی منشأ حرارتی منابع زمین‌گرمایی در بخش جنوبی قله آتشفشانی سبلان استفاده شده است. برای این منظور از ۱۳ ایستگاه داده مگنتوتلوریک در امتداد یک پروفیل و با فواصل ایستگاهی مختلف استفاده شده است. به دلیل اینکه ماگما نسبت به سنگ‌های میزبان مقاومت ویژه کمتری دارد، لذا با روش مگنتوتلوریک قابل شناسایی است. آنالیز تعیین ابعادی نشان داد که از سطح زمین تا عمق‌های متوسط، ساختارهای یک و دوبعدی وجود دارد و در اعماق زیاد ساختارها به شکل سه‌بعدی هستند. وارون‌سازی همسانگرد دوبعدی با استفاده از روش اجزای محدود تطبیقی که برای وارون‌سازی و کمینه‌سازی تابع هدف از روش آکام سریع استفاده می‌کند، انجام شده است. برای ارزیابی ساختار رسانای آشکار شده در مدل نهایی، تحلیل حساسیت انجام شد و نتایج آن نشان داد که ساختار شناسایی شده دقت و قابلیت اعتماد بالایی دارد. مدل بدست آمده از وارون‌سازی دوبعدی نشان داد که یکی از منشأهای حرارتی سامانه زمین‌گرمایی از جنوب قله سبلان سرچشمه می‌گیرد و انتقال سیالات با دمای بسیار بالا، توسط گسل خوردگی‌های موجود در جنوب به سمت شمال غرب سبلان کنترل می‌شود.

کلمات کلیدی

مگنتوتلوریک، وارون‌سازی، اجزای محدود تطبیقی، زمین‌گرمایی، سبلان.

استناد به این مقاله

فیلبندی کشکولی، م.، کامکار روحانی، ا.، عرب امیری، ع.، ر.، سیدرحیمی نیارق، م.، رحمانی، م.، ر.؛ ۱۴۰۴؛ "تعیین ساختارهای الکتریکی زیرسطحی جنوب سبلان با وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک با روش اجزای محدود تطبیقی". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره دهم، شماره ۳، ص ۱۷-۱.

DOI: 10.30479/jmre.2025.21063.1714



۱- مقدمه

گرمایی در اعماق بیش از ۱۰۰۰ متر را نشان داد [۴]. قائد رحمتی و همکاران در سال ۲۰۱۳، مدلسازی سه‌بعدی ۴۱ ایستگاه از ۷۸ ایستگاه برداشت شده در سال ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ را انجام دادند [۵]. نتیجه این مطالعه، تعیین هندسه منبع زمین‌گرمایی در مرکز منطقه مورد بررسی و در گسترده‌ای به وسعت ۷ کیلومتر مربع است. در این پژوهش از داده‌های ۱۳ ایستگاه مگنتوتلوریک در منطقه دلار و در امتداد پروفیلی به طول ۱۲٫۳ کیلومتر استفاده شده است (شکل ۲). ایستگاه‌های مگنتوتلوریک به صورت نسبتاً پراکنده برداشت شده‌اند و پروفیل گذرنده از ایستگاه‌ها، گسل‌های متعددی را قطع می‌کند (شکل‌های ۲ و ۳). لذا برای جلوگیری از ایجاد ساختارهای غیرمنتظره^۱ هنگام وارون‌سازی داده‌های یک پروفیل با ابزارهای سه‌بعدی، از روش وارون‌سازی دوبعدی استفاده شده است [۶، ۷].

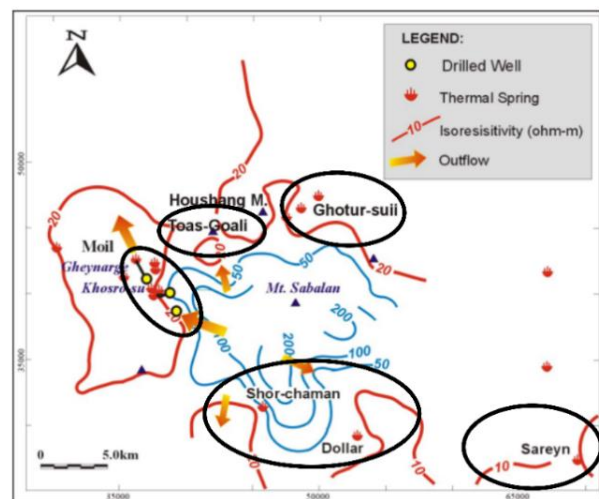
اسکویی و همکاران در سال ۲۰۱۶ با تحلیل داده‌های مگنتوتلوریک برداشت شده در منطقه سبلان دریافتند که دو مخزن حرارتی اصلی وجود دارد که منشأ آن‌ها از جنوب و جنوب غربی قله سبلان به دره مویل گسترش می‌یابد [۸]. پژوهشگران متعددی برای مدلسازی داده‌های مگنتوتلوریک از روش اجزای محدود تطبیقی بهره گرفته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به مطالعات [۹-۱۹] اشاره کرد.

در این مطالعه، با استفاده از مدلسازی دو بعدی مبتنی بر روش اجزای محدود تطبیقی^۲ و بهره‌گیری از روش اکام سریع برای کمینه‌سازی تابع هدف، ساختارهای ژئوالکتریک زیرسطحی منطقه دلار به تصویر درآمده است. به کمک این ساختارها یکی از منشأهای اصلی منبع زمین‌گرمایی در منطقه آتشفشانی سبلان شناسایی شده و علت جابجایی سیالات در این منطقه مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

از نظر زمین‌شناسی، کوه سبلان یک آتشفشان چینه‌ای بسیار بزرگ است که در پی شکل‌گیری یک هورست بزرگ در دوره الیگوسن پدید آمده است. فعالیت‌های آتشفشانی اولیه این کوه از دوره ائوسن آغاز شده اما آن‌چه منجر به شکل‌گیری قله سبلان شده از دوره پلیوسن شروع شده و تا کواترنری ادامه یافته است [۲۴-۲۱]. پس از دوره ائوسن، مرحله بعدی فعالیت آتشفشانی کوه سبلان متعلق به دوره میوسن است. از این رو، فرآیند تکامل ماگمایی در بازه زمانی طولانی صورت گرفته

منطقه زمین‌گرمایی سبلان در شمال غرب ایران و در دامنه شمال غربی کوه سبلان که آتشفشانی چینه‌ای و بزرگ است، قرار دارد. مطالعات ژئوفیزیکی در این منطقه از سال ۱۹۹۷ شروع و طی آن ۲۱۲ ایستگاه مگنتوتلوریک برداشت شد [۱]. در نتیجه این برداشت، پنج منطقه امیدبخش شامل موئیل، توس‌گولی، قوتور سویی، دلار و سرعین در زون‌های با مقاومت‌ویژه پایین شناسایی شد (شکل ۱).



شکل ۱: مدل هیدرولوژیکی شمال غربی سبلان (پنج آنومالی با بیضی‌های سیاه نشان داده شده‌اند. منطقه مورد مطالعه در ناحیه دلار واقع شده است.)

بر اساس تفسیر داده‌های سال ۱۹۹۷ توسط طالبی و همکاران، منشأ حرارتی جریان سیالات در بخش‌های جنوب شرقی منطقه زمین‌گرمایی سبلان شناسایی شد [۳، ۲]. شرکت EDC در سال ۲۰۰۷ با بازبینی مجدد داده‌های سال ۱۹۹۷ و با ارائه یک مدل هیدرولوژیکی، جهت جریان سیالات را به قسمت شرقی و جنوب شرقی نسبت داد. برای تأیید مدل پیشنهاد شده، در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ در دو فاز دیگر تعداد ۷۸ ایستگاه برداشت شد. فاز اول با ۵۰ ایستگاه مگنتوتلوریک و به‌طور عمده مناطق با ارتفاع زیاد در شرق و جنوب شرقی دره موئیل را پوشش می‌دهد. فاز دوم با ۲۸ ایستگاه، در مناطق شمالی، شرقی و جنوب قله سبلان است. وارون‌سازی یک و دوبعدی ۹ ایستگاه داده مگنتوتلوریک برداشت شده در دره موئیل در راستای شمال غربی-جنوب شرقی، یک منبع زمین

است [۲۵].

الکترومغناطیسی طبیعی زمین، تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی زیرسطحی را برداشت می‌کند. منبع میدان‌های الکترومغناطیسی مورد استفاده در روش مگنتوتلوریک شامل فعالیت‌های خورشیدی برای امواج با فرکانس پایین‌تر از ۱ هرتز و رعد و برق‌های بزرگ‌مقیاس برای امواج با فرکانس بالاتر از ۱ هرتز است [۲۹، ۳۰].

این فعالیت‌ها، میدان‌های الکترومغناطیسی را در ناحیه بین ایزونفسر و سطح زمین منتشر می‌کنند. مبنای نظری برای تحلیل رفتار میدان‌های الکترومغناطیسی بر اساس معادلات ماکسول^۳ بیان می‌شود. میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی افقی از تابع تبدیل امپدانس با یکدیگر مرتبط هستند [۳۱، ۳۲]. در حوزه فرکانس، امپدانس مختلط (Z)، رابطه بین میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را مطابق رابطه ۱ بیان می‌کند [۳۳-۳۵]:

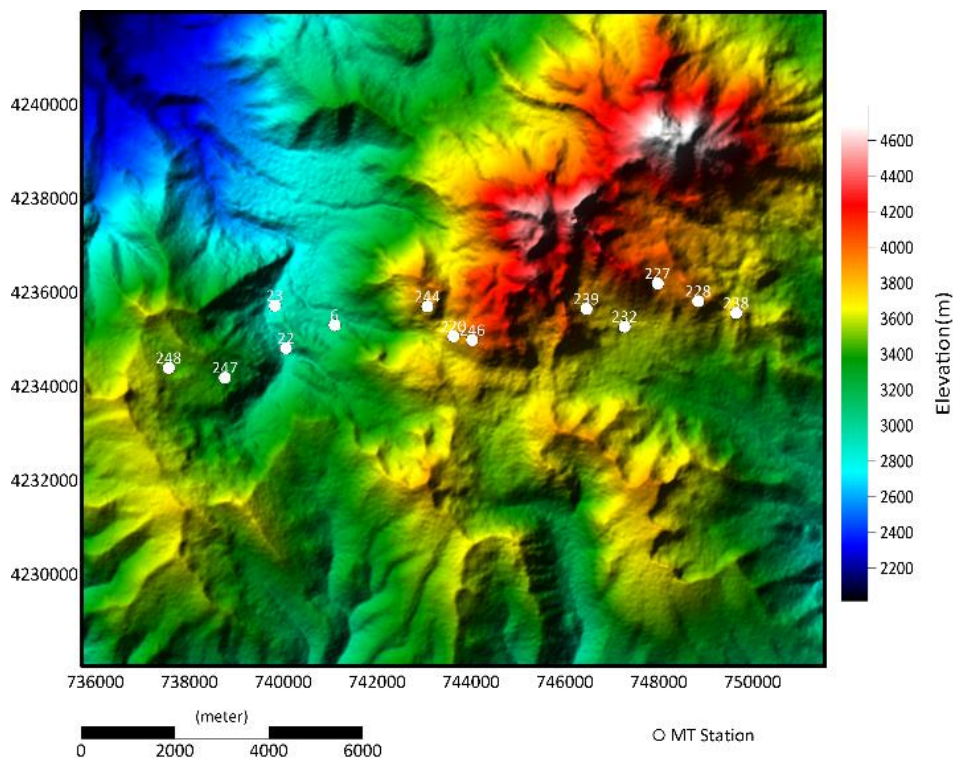
$$\begin{pmatrix} E_x(\omega) \\ E_y(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx}(\omega) & Z_{xy}(\omega) \\ Z_{yx}(\omega) & Z_{yy}(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x(\omega) \\ H_y(\omega) \end{pmatrix} \quad (1)$$

که در آن:
 ω : فرکانس زاویه‌ای

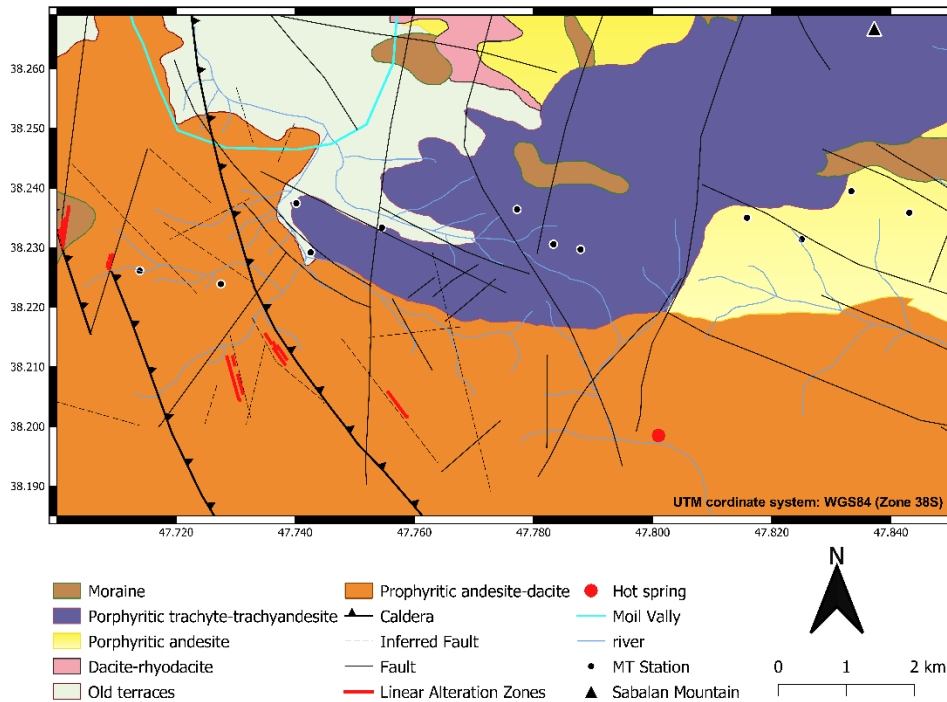
بر اساس بررسی‌های صحرایی، فعالیت آتشفشانی در منطقه سبلان از دوره پلیوسن با فوران گدازه‌های تراکتی-آندزیتی آغاز شده است و ریزش دهانه آتشفشانی در دوره پلیستوسن آغازین از مهم‌ترین رخداد‌های این فعالیت‌ها به‌شمار می‌رود. در ادامه، گدازه‌های جدید از دهانه فروریخته به‌صورت گنبد‌های تراکتی-آندزیتی و تراکتی-داسیتی فوران کرده که موجب شکل‌گیری مخروط بلند سبلان شده است. جدیدترین فوران شامل گدازه‌های ریولیتی بوده که گسترش آن محدود به ناحیه دهانه آتشفشان است [۲۶]. فعالیت‌های اخیر آتشفشان سبلان به دوره هولوسن باز می‌گردد [۲۷]. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، به همراه موقعیت ایستگاه‌های مگنتوتلوریک و تنها چشمه آب‌گرم منطقه (شور-چمن)، در شکل ۳ نشان داده شده است.

۳- روش مگنتوتلوریک

روش مگنتوتلوریک یکی از روش‌های ژئوفیزیکی الکترومغناطیسی است که با بهره‌گیری از میدان‌های



شکل ۲: نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه (داده‌های توپوگرافی با رزولوشن بسیار بالا [۲۰] GMRT) (ایستگاه‌های مگنتوتلوریک با دایره‌های سفید نشان داده شده‌اند. بیش از نیمی از ایستگاه‌ها در ارتفاعی بیشتر از ۴۰۰۰ متر برداشت شده‌اند.)



شکل ۳: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (ایستگاه‌های مگنتوتلوریک با دایره‌های سیاه پر رنگ نشان داده شده‌اند) (تصحیح شده از [۲۸])

شده به وسیله نرم‌افزار SSMT200 از شرکت فونیکس پردازش شده است. که از روشی که به وسیله جونز و جودیکه [۳۶] معرفی شده است، استفاده می‌کند.

۴-۱- تخمین عمق

در این پژوهش، برای برآورد عمق نفوذ داده‌های مگنتوتلوریک از روش تخمین عمق پوست^۴ نیبلت-بوستیک استفاده شده است [۳۷-۳۹]. اعتبار این روش منوط به جداسازی کامل تانسور امپدانس به مدهای TE^۵ و TM^۶ و برابری عمق نفوذ سیگنال‌های یک‌بعدی در هر دو مد است.

عمق نفوذ به مقاومت ویژه الکتریکی ساختارهای زیرسطحی و بیشینه دوره تناوب (کمترین فرکانس) ثبت شده در هر ایستگاه وابسته است. شکل ۴ تخمین عمق با روش نیبلت-بوستیک را برای هر یک از ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تخمین عمق برای هر دو مد TE و TM انجام شده است. در ایستگاه ۲۲۷ کمترین عمق و در ایستگاه‌های ۲۲۰ و ۴۶ بیشترین عمق را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، نتایج به‌دست آمده بیانگر آن است که می‌توان به مدلسازی تا عمق ۱۰ کیلومتر اطمینان داشت.

E : مولفه‌های افقی میدان الکتریکی

H : مولفه‌های افقی میدان مغناطیسی است.

مقاومت ویژه ظاهری و فاز امپدانس از دامنه و فاز تانسور امپدانس محاسبه می‌شوند. مقاومت ویژه ظاهری از رابطه ۲ و مقادیر فاز از رابطه ۳ به‌دست می‌آید:

$$\rho_{ij} = \frac{1}{\omega \mu_0} |Z_{ij}|^2 \quad (2)$$

$$\phi_{ij} = \tanh^{-1} \frac{Im(Z_{ij})}{Re(Z_{ij})} \quad (3)$$

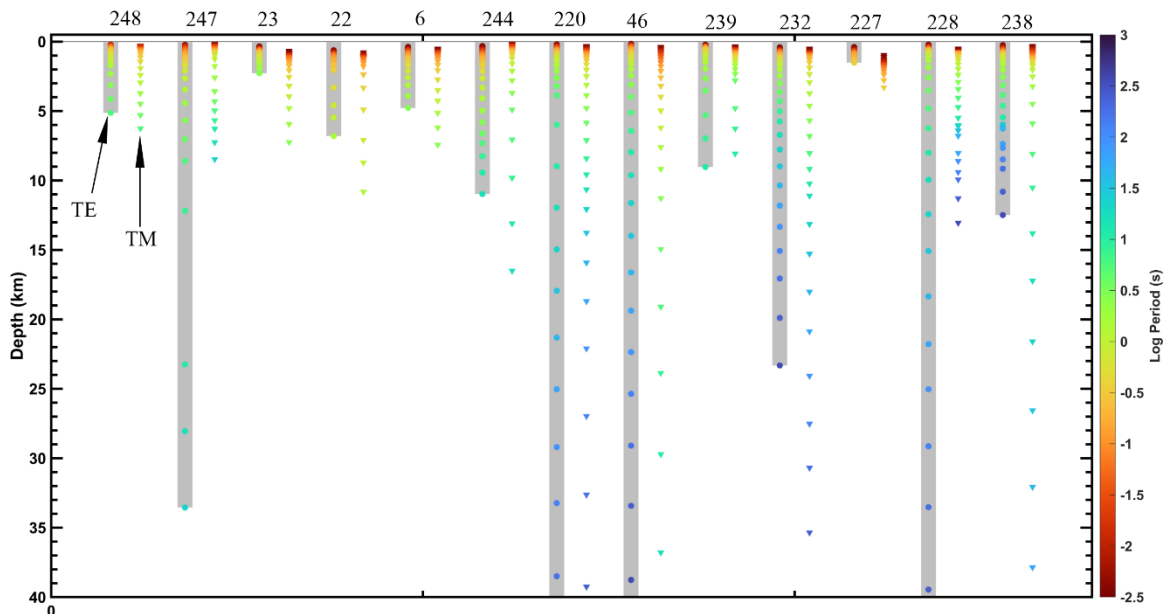
که در آن:

ij : نشان‌دهنده مولفه‌های تانسور امپدانس

μ_0 : نفوذپذیری مغناطیسی خلأ است.

۴- تحلیل داده‌های مگنتوتلوریک برداشت شده

داده‌های مگنتوتلوریک در این مطالعه با استفاده از دستگاه Phoenix MTU-5A برداشت شده‌اند. این دستگاه از یک سامانه استاندارد پنج‌کاناله برای ثبت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی استفاده می‌کند. داده‌های سری زمانی برداشت



شکل ۴: تخمین عمق با روش نیلبت-بوستیک برای هر یک از ایستگاه‌های مگنتوتلوریک (ستون‌های چپ و راست به ترتیب برای مدهای TE و TM هستند).

۲-۴- تحلیل بُعدیت

در این پژوهش، برای تعیین ابعاد ساختارهای زیرسطحی از روش تانسور فاز استفاده شد. این روش نخستین بار توسط کالدول و همکاران در سال ۲۰۰۴ معرفی شد و می‌توان از آن برای تعیین بُعدیت ساختارهای زیرسطحی و همچنین تعیین راستا استفاده کرد. مقدار و جهت میدان الکتریکی زمانی تغییر می‌کند که تحت تأثیر یک ساختار رسانای کوچک مقیاس قرار گیرد. این پدیده به نام آشفتگی گالوانیکی شناخته می‌شود و داده‌های تانسور فاز، به دلیل آن که نسبت بخش موهومی به بخش حقیقی تانسور امپدانس هستند، تحت تأثیر این آشفتگی قرار نمی‌گیرند. سه مؤلفه تانسور امپدانس شامل بیشترین فاز، کمترین فاز و زاویه چولگی می‌توانند به صورت بیضی و در قالب نقشه یا شبه مقطع نمایش داده شوند. در ساختارهای یک‌بعدی تانسور فاز به شکل دایره، در ساختارهای دو بعدی به شکل بیضی با زاویه چولگی کم و در ساختارهای سه بعدی به شکل بیضی با مقادیر چولگی زیاد نمایش داده می‌شود [۴۵-۴۰].

شکل ۵ آنالیز تانسور فاز همراه با زاویه چولگی برای ایستگاه‌های مگنتوتلوریک منطقه را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، برای تمامی ایستگاه‌ها در بازه زمانی 10^{-3} تا 10^0 ثانیه، مقادیر چولگی بین -3 و 3 قرار دارند و شکل تانسور فاز عمدتاً به شکل دایره است که

بیانگر ساختارهای یک و دوبعدی است. در بازه زمانی کمتر از 10^0 ثانیه، چولگی از -3 تا 3 فراتر می‌رود و شکل تانسور فاز به صورت بیضی در می‌آید که نشان دهنده ساختارهای سه‌بعدی در این بازه زمانی است.

۳-۴- وارون‌سازی دوبعدی

در این مطالعه، برای حل مسئله دوبعدی از کد MARE2DEM استفاده شده است [۱۳]. این کد در ابتدا برای مدل‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک دریایی توسعه یافت و در ادامه برای داده‌های مگنتوتلوریک خشکی نیز به کار گرفته شد. MARE2DEM بر پایه روش اجزای محدود تطبیقی طراحی شده است و برای کمینه‌سازی تابع هدف از روش اکام سریع بهره می‌گیرد. روش اکام سریع برای کمینه‌سازی تابع هدف U به فرم رابطه ۴ است:

$$U = \|Rm\|^2 + P\|m - m^*\|^2 + \mu^{-1}\|W(d - f(m))\|^2 \quad (4)$$

که در آن:

R: عملگر ناهمواری^۷

m: پارامتر مدل

P: ماتریس وزنی قطری

m*: مدپیش فرض^۸

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{d_i - F_i(m)}{s_i} \right]^2} \quad (5)$$

که در آن:

n : تعداد داده‌ها

s_i : ماتریس عنصری متناظر با w_{ii}^{-1} است.

با توجه به نتایج حاصل از مدل‌های پیشرو، برای مدل اولیه یک نیم‌فضای همگن با مقاومت ویژه ۱۰ اهم‌متر انتخاب شد. مش‌های مثلثی مورد استفاده در مدلسازی، به صورت تطبیقی و از ۳- کیلومتر بالاتر از سطح دریا برابر ۱۵۰ متر، از ۳- تا ۰ کیلومتر برابر ۳۰۰ متر، از ۰ تا ۳ کیلومتر برابر ۶۰۰ متر و از ۳ تا ۱۲ کیلومتر زیر سطح زمین برابر ۱۲۰۰ متر انتخاب شد. مقاومت ویژه لایه هوا برابر 10^{12} اهم‌متر در نظر گرفته شد. نسبت وزن‌دهی فضایی افقی به عمودی مقدار ۳ انتخاب گردید که این مقدار بر اساس روش سعی و خطا تعیین شده است. همچنین، وزن‌دهی تابع جریمه ناهمسانگردی برابر ۱ و مقدار وزن‌دهی قطع تابع جریمه برابر ۰٫۱ در نظر گرفته شد.

فرآیند وارون‌سازی با انتخاب مد ادغام‌شده (TE+TM) و با مقدار خطای عملی بر روی داده‌های فاز در هر دو مد برابر ۵ درصد (معادل ۱٫۴ درجه) در نظر گرفته شده است. همچنین، خطای عملی بر روی داده‌های مقاومت ویژه در مد TM برابر

μ : ضریب لاگرانژ

W : عدم قطعیت داده‌ها

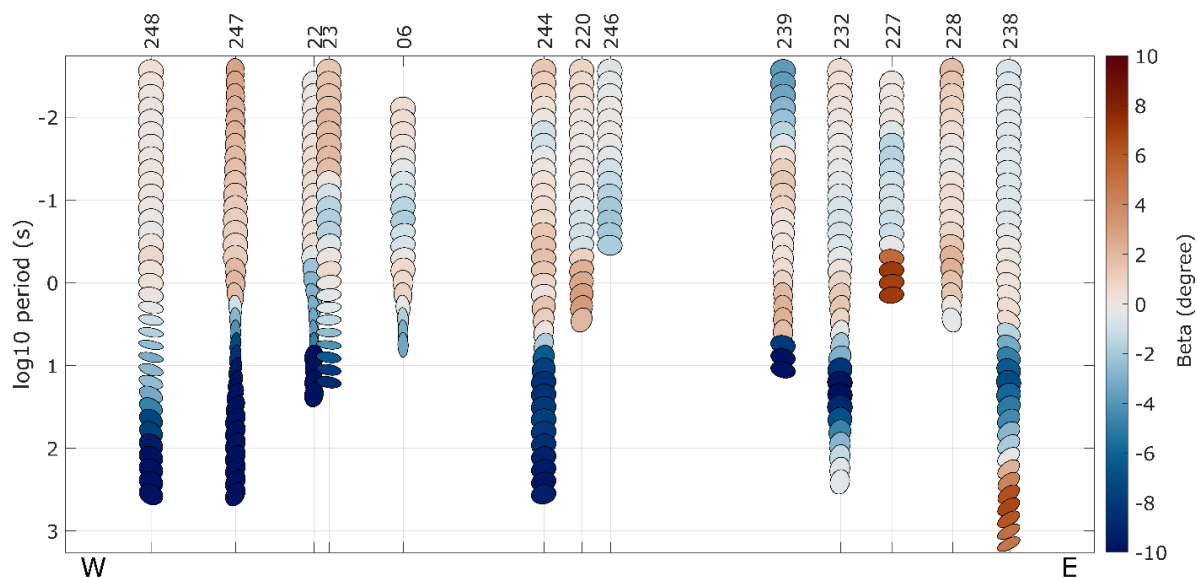
d : بردار داده‌ها

$f(m)$: پاسخ مدل پیشرو است (برای مشاهده فرمول به

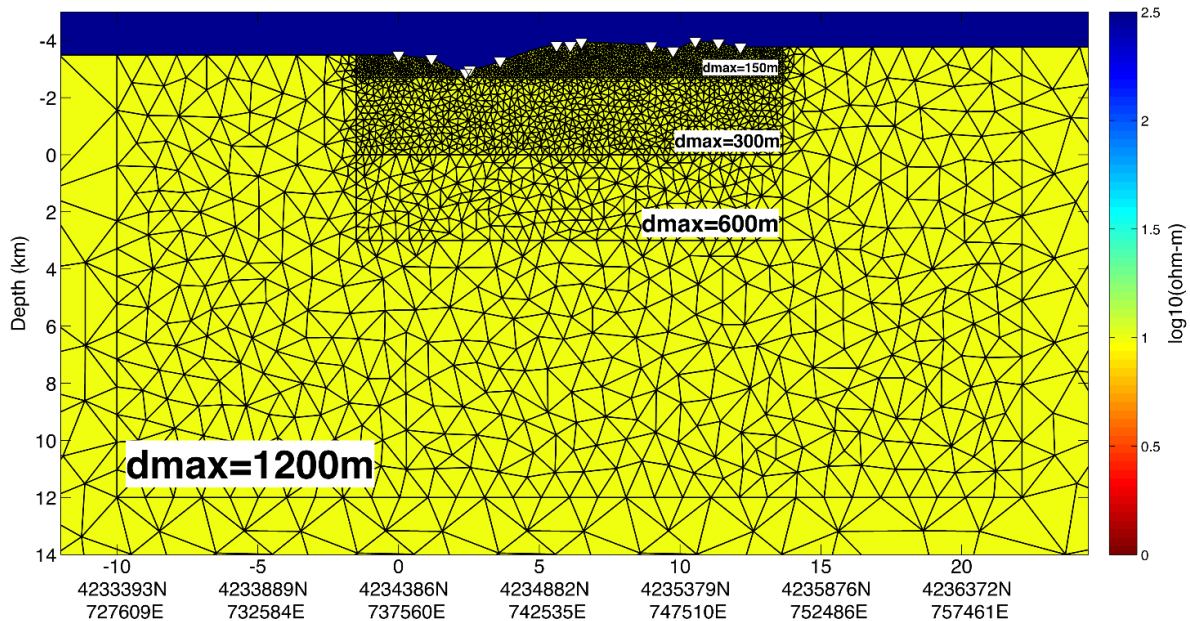
منبع شماره [۱۳] مراجعه شود).

در این رابطه، عبارت نخست از سمت چپ بیانگر ناهمواری مدل، عبارت دوم انحراف مدل و عبارت سوم انطباق پاسخ مدل با بردار داده‌ها همراه با در نظر گرفتن عدم قطعیت است.

شکل ۶ مدل اولیه مورد استفاده برای وارون‌سازی در این مطالعه را نشان می‌دهد. این مدل به صورت انعطاف‌پذیر از شبکه‌های مثلثی بدون ساختار تشکیل شده است که امکان ایجاد اشکال دلخواه را فراهم می‌سازد. این ویژگی امکان مدلسازی ساختارهای پیچیده مانند توپوگرافی را به سادگی فراهم می‌سازد. در کد MARE2dEM برای مدلسازی، اثرات توپوگرافی با بهره‌گیری از روش عناصر محدود (FEM) و مش‌هایی که از تغییرات ارتفاعی پیروی می‌کنند، لحاظ می‌شود. همچنین لایه هوا به عنوان یک پارامتر ثابت^{۱۰} در نظر گرفته شده است. برای انتخاب مدل اولیه مقاومت ویژه، چهار مقدار شامل ۱۰، ۷۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ اهم‌متر انتخاب و مدل پیشرو برای هر یک از آن‌ها اعمال شد. نتایج حاصل نشان داد که مدل پیشرو با مقاومت ویژه ۱۰ اهم متر دارای کمترین مقدار برازش (RMS^{۱۱}) است. مقدار برازش به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود:



شکل ۵: شبه مقطع مقادیر زاویه چولگی با استفاده از روش تانسور فاز



شکل ۶: مدل اولیه استفاده شده برای وارون‌سازی (مقدار مقاومت ویژه برابر ۱۰ اهم متر انتخاب شده است. ایستگاه‌های مگنتوتلوریک با مثلث‌های سفید نشان داده شده‌اند.)

۶- نتایج مدل‌سازی

۶-۱- تفسیر کلی مقطع نهایی حاصل از مدل‌سازی

شکل ۸ مقطع نهایی حاصل از وارون‌سازی دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک را نشان می‌دهد. در این شکل، محل گسل‌های شناسایی شده در منطقه [۴۶] با خطوط خط‌چین سیاه مشخص شده است. در نزدیکی سطح زمین لایه‌ای با مقاومت ویژه الکتریکی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم‌متر و ضخامت ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر مشاهده می‌شود (در شکل ۸ با نماد R1 نشان داده شده است). این لایه در محدوده ایستگاه‌های ۲۴۴ تا ۲۴۷ بر اثر وقوع گسل‌ها (گسل‌های شماره ۱، ۲ و ۳ در شکل ۸) قابل مشاهده نیست.

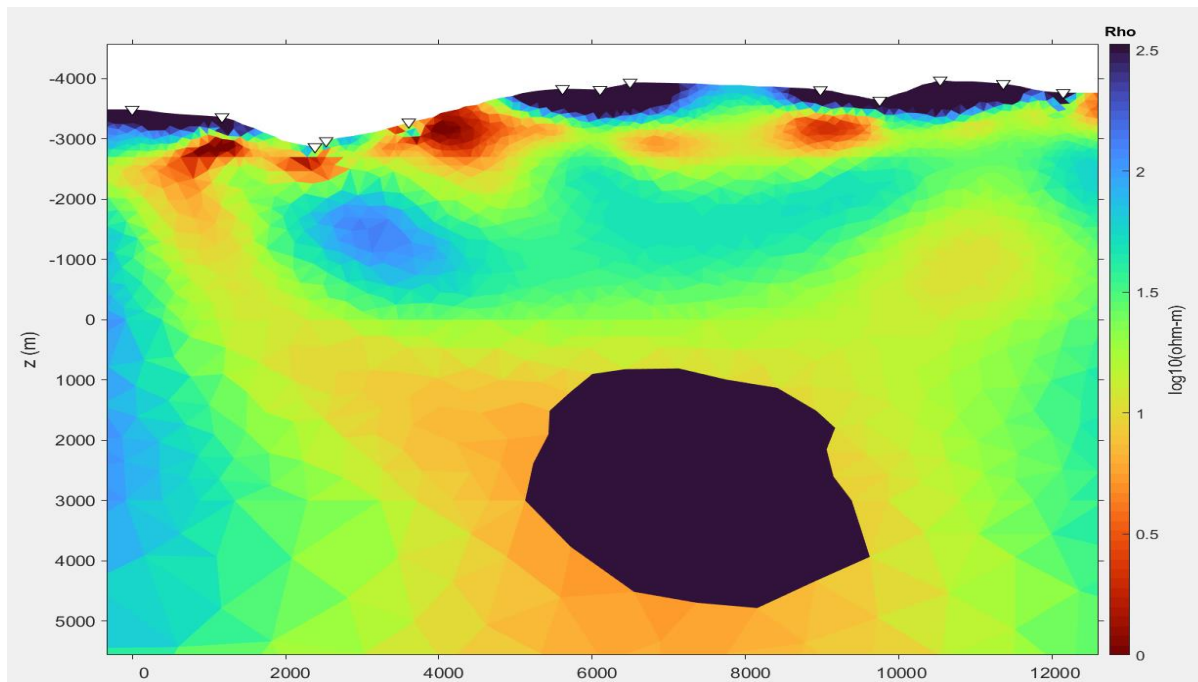
در زیر این لایه، یک لایه رسانا با مقاومت ویژه ۱ تا ۳۰ اهم‌متر و ضخامت ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متر در امتداد پروفیل مشاهده می‌شود (در شکل ۸ با نماد C1 نشان داده شده است). در عمق بیشتر، لایه‌ای با مقاومت ویژه الکتریکی بالا در محدوده ۷۵ تا ۱۳۰ اهم‌متر مشاهده می‌شود (در شکل ۸ با نماد R2 نشان داده شده است). این لایه در بخش غربی پروفیل و زیر ایستگاه‌های ۲۴۷ و ۲۴۸ به دلیل وقوع یک گسل بزرگ (گسل شماره ۱ در شکل ۸) قابل مشاهده نیست.

۲۰ درصد و در مد TE برابر ۲۵ درصد انتخاب شد. مقدار اولیه عدم برازش برابر ۳۶٫۴۵ بود که پس از ۱۴ تکرار به مقدار ۱٫۲۳ کاهش یافت.

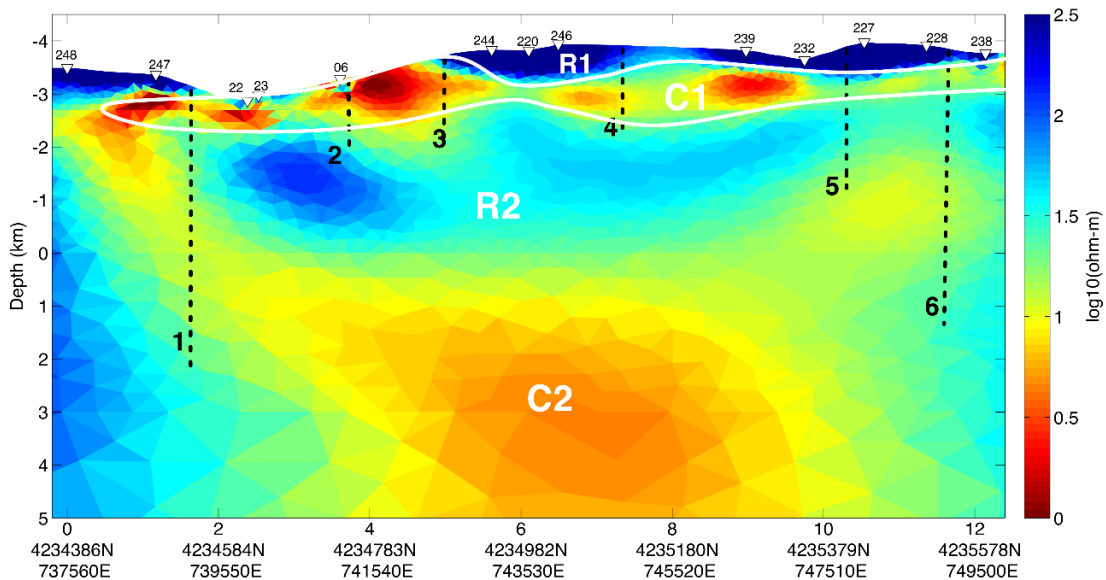
۵- تحلیل حساسیت مدل نهایی

به منظور ارزیابی ساختارهای موجود در مدل نهایی و بررسی پاسخ داده‌ها در صورت حذف ویژگی‌های تفسیر شده، یک تحلیل حساسیت ساده انجام شد. در این تحلیل، مدل مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی با جایگزینی جداگانه برخی ویژگی‌های انتخابی (مانند جایگزینی یک ناحیه مقاوم بجای یک ناحیه رسانا) با یک ناهنجاری ۱۰۰۰ اهم‌متری تغییر داده شد (شکل ۷).

سپس پاسخ مدل پیشرو پس از اعمال این تغییرات محاسبه و تغییرات مقدار عدم برازش ارزیابی شد. در امتداد پروفیل مورد مطالعه مشاهده گردید که جایگزینی ویژگی مقاوم باعث افزایش نسبی ۱۹ درصدی مقدار عدم برازش شده است. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که ناهنجاری با مقاومت ویژه پایین که در عمق ۴۵۰۰ تا ۸۰۰۰ متری توسط مدل‌سازی دوبعدی شناسایی شده است، اعتبار مناسبی دارد.



شکل ۷: مقطع نهایی حاصل از وارون سازی (که در آن برای انجام تحلیل حساسیت ساختار رسانای قرار گرفته در عمق ۴۵۰۰-۸۰۰۰ متر با مقدار مقاومت ویژه الکتریکی بین ۱ تا ۷ اهم متر با مقدار ۱۰۰۰ اهم متر جایگزین شده است).



شکل ۸: مقطع نهایی حاصل از وارون سازی دوبعدی (گسل های استنباطی با خطوط شکسته سیاه رنگ نشان داده شده اند).

این لایه در بخش های غربی و شرقی پروفیل به دلیل وقوع گسل خوردگی های بزرگی (گسل های شماره ۱ و ۶) تا سطح زمین امتداد یافته است.

در ادامه و از عمق ۳۵۰۰ متر به پایین، یک لایه رسانا با مقاومت ویژه ۰٫۳ تا ۱۲ اهم متر در امتداد پروفیل مشاهده می شود (در شکل ۸ با نماد C2 نشان داده شده است).

۶-۲- تحلیل یافته‌ها

تاکنون مدل‌های متعددی برای توصیف ساختار سامانه‌های زمین‌گرمایی ارائه شده است که هر یک با تمرکز بر جنبه‌ای خاص، بخشی از واقعیت‌های حاکم بر این پدیده را تعیین می‌کنند. با وجود تنوع در رویکردها، می‌توان گفت که هر سامانه زمین‌گرمایی به‌طور کلی از سه مؤلفه اصلی شامل منبع حرارتی، مخزن و سیال تشکیل شده است [۴۹-۴۷].

وجود یک منبع حرارتی قوی، نخستین شرط در شکل‌گیری سامانه‌های زمین‌گرمایی به‌شمار می‌رود. بررسی پراکندگی مکانی سامانه‌های زمین‌گرمایی فعال در سطح جهان نشان می‌دهد که اغلب آن‌ها در مناطق آتشفشانی جوان و دارای فعالیت‌های تکتونیکی شدید واقع شده‌اند. این مشاهدات بیانگر ارتباط نزدیک و تنگاتنگ میان سامانه‌های زمین‌گرمایی و پدیده‌های آتشفشانی است که می‌توان فعالیت‌های آتشفشانی و صعود ماگما به نواحی نزدیک به سطح زمین را مهم‌ترین عامل در تأمین انرژی حرارتی این سامانه‌ها در نظر گرفت [۴۷].

افزون بر این، فرآیندهای تکتونیکی نظیر گسل‌خوردگی‌های منطقه‌ای و جهانی و نیز تغییرات ناشی از دگرگونی سنگ‌ها می‌توانند با افزایش گرادیان زمین‌گرمایی، زمینه‌ساز شکل‌گیری سامانه‌های زمین‌گرمایی شوند. دومین مؤلفه ضروری در این سامانه‌ها، وجود یک مخزن مناسب است که ویژگی‌هایی چون تخلخل، نفوذپذیری، جنس و ساختار سنگ‌های دربرگیرنده در تعیین کیفیت آن نقش اساسی ایفا می‌کند.

در نتیجه، سیال حاضر در سامانه که انتقال‌دهنده انرژی حرارتی است، نقشی کلیدی در عملکرد سامانه‌های زمین‌گرمایی ایفا می‌کند. این سیال می‌تواند از منابع مختلفی همچون آب‌های جوی، ماگمایی، فسیل و دگرگونی تأمین شود، هرچند در اغلب موارد، آب‌های جوی به‌عنوان منبع اصلی سیالات در نظر گرفته می‌شوند [۴۷].

بر اساس نظر پژوهشگران متعدد، شکل‌گیری آتشفشان سبلان با فرورانش صفحه عربی به زیر صفحه اوراسیا ارتباط مستقیم دارد، فرآیندی که آغاز آن به اوایل دوره سنوزوئیک بازمی‌گردد و برخورد اولیه دو صفحه در دوره میوسن میانی تا پایانی رخ داده است. این وضعیت تکتونیکی، زمینه‌ساز پیدایش فعالیت‌های آتشفشانی گسترده در منطقه و در نهایت شکل‌گیری سامانه زمین‌گرمایی سبلان شده است [۲۶، ۵۰].

همانند سایر سامانه‌های زمین‌گرمایی، در سامانه سبلان

نیز سیالات گرمایی از منابع متعددی تأمین می‌شوند که در میان آن‌ها، آب‌های جوی نسبت به منابعی همچون آب‌های ماگمایی یا دگرگونی سهم بیشتری دارند. آب‌های جوی عمدتاً از طریق بارش‌های جوی به‌شکل باران یا برف وارد سامانه شده و به مخزن زمین‌گرمایی نفوذ می‌کنند [۵۱، ۵۲].

ناحیه سبلان به‌عنوان یکی از مناطق آتشفشانی فعال کشور، تحت تأثیر تنش‌های تکتونیکی گسترده قرار دارد که منجر به توسعه شبکه‌ای پیچیده از گسل‌ها، درزها و شکستگی‌ها در مقیاس‌های مختلف شده است. ساختار این شکستگی‌ها، بستر مناسبی برای نفوذ و جابه‌جایی سیالات جوی به درون پوسته زمین فراهم می‌سازد و نقش اساسی در تغذیه مخزن زمین‌گرمایی ایفا می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۳ نیز نشان داده شده است، آتشفشان سبلان با مجموعه‌ای از گسل‌ها و شکستگی‌های ساختاری همراه است که با تسهیل نفوذ آب‌های سطحی، به حفظ پویایی سامانه زمین‌گرمایی منطقه کمک می‌کنند [۲۲، ۲۶، ۵۳-۵۱].

در این راستا تحقیقات متعددی پیرامون سامانه زمین‌گرمایی سبلان انجام شده است. فنایی خیرآباد و اسکویی در سال ۲۰۱۱ به‌منظور تحلیل ویژگی‌های ژئوالکتریکی ناحیه زمین‌گرمایی سبلان، به مدلسازی و تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک پرداختند. آن‌ها یک پروفیل به طول تقریبی ۱۳ کیلومتر، عمود بر روند ساختاری غالب در جنوب مشکین‌شهر انتخاب کرده و داده‌های حاصل از ۱۴ ایستگاه را مدلسازی کردند. نتایج حاصل از مدلسازی‌های یک‌بعدی و دوبعدی، وجود زون‌های متناوب مقاومت‌ویژه بالا، پایین و مجدداً بالا را نشان داده که با الگوهای جهانی ارائه‌شده در نواحی زمین‌گرمایی مطابقت دارد [۸، ۵۴].

در مطالعه‌های دیگر، قاندرحمتی و همکاران در سال ۲۰۱۳ با هدف دستیابی به مدل سه‌بعدی دقیق مقاومت‌ویژه، از داده‌های مگنتوتلوریک میدان زمین‌گرمایی شمال‌غرب سبلان استفاده کردند. این پژوهش با بهره‌گیری از تحلیل پارامترهایی نظیر بردار تیپر، نمودارهای قطبی امپدانس و مؤلفه‌های چرخشی تانسور امپدانس، ساختاری پیچیده و سه‌بعدی را آشکار ساخت که نیازمند مدلسازی سه‌بعدی بود. نتایج به‌دست‌آمده پس از مقایسه با مدل‌های دوبعدی پیشین، با اطلاعات زمین‌شناسی سطحی و داده‌های حفاری ادغام و تفسیر شد. مهم‌ترین خروجی این تحقیق، تعیین هندسه دقیق منبع زمین‌گرمایی با گستره‌ای در حدود ۷ کیلومتر مربع در بخش مرکزی ناحیه

از سوی دیگر، زون مقاوم R1 در امتداد پروفیل می‌تواند با توده‌های نفوذی موجود در منطقه مرتبط باشد. همچنین زون مقاوم R2 احتمالاً ناشی از افزایش میزان ایلیت خالص و اپیدوت به‌عنوان محصولات دگرسانی در دمای بالا باشد [۵۶، ۵۷].

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از داده‌های حاصل از ۱۳ ایستگاه مگنتوتلوریک به‌منظور تصویرسازی ساختارهای ژئوالکتریک در جنوب قله آتشفشانی سبلان استفاده شده است. تحلیل ابعادی داده‌ها، ساختار پیچیده‌ای برای منطقه مورد مطالعه نشان داد. نتایج حاصل از وارون‌سازی همسانگرد دوبعدی با استفاده از روش اجزای محدود تطبیقی، وجود یک توده رسانا در مرکز منطقه را آشکار ساخت. وجود این توده رسانا با استفاده از تحلیل حساسیت تأیید شد. شناسایی این توده رسانا در جنوب قله آتشفشانی سبلان بیانگر آن است که منشأ حرارتی سامانه زمین‌گرمایی منطقه سبلان از جنوب گسترش یافته و سیالات بسیار گرم از طریق گسل‌های موجود به سمت شمال شرق منطقه انتقال می‌یابند. همچنین مدل ارائه شده با گسل‌های شناسایی شده در مطالعات پیشین تطابق بسیار خوبی دارد و گسترش عمقی آن‌ها را نیز تأیید می‌کند.

۸- سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله بدین‌وسیله از شرکت انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق برای در اختیار قرار دادن داده‌های مگنتوتلوریک و مجوز انتشار این مقاله کمال تشکر و قدردانی را دارند. همچنین از سرکار خانم دکتر بنفشه حبیبیان دهکردی و دو داور دیگر که با ارائه نظراتشان باعث ارتقای مقاله شده‌اند، سپاسگزاریم.

۹- مراجع

- [1] KML, (1997). "Sabalan geothermal project, Stage1-Surface exploration, final exploration report". Kingston Morrison Limited Co., Report 2505- RPT- GE- 003 for the Renewable Energy Organization of Iran, Tehran, pp. 83.
- [2] Talebi, B., Khosrawi, K., and Ussher, G. (2005). "Review of resistivity surveys from the NW Sabalan geothermal field, Iran". World Geothermal Congress, April 24-29, Antalya, Turkey.

مورد مطالعه بود، اگرچه تطابق این مدل‌ها با ساختارهای تکتونیکی منطقه بررسی نشده است [۵].

همچنین، اسکویی و همکاران در سال ۲۰۱۶ به مطالعه داده‌های مگنتوتلوریک میدان زمین‌گرمایی سبلان در شمال غرب ایران پرداختند تا ناهنجاری‌های رسانی در اعماق مختلف مرتبط با سامانه زمین‌گرمایی را شناسایی کنند. بر اساس تفسیر یک‌بعدی و دوبعدی داده‌ها، دو مخزن حرارتی اصلی در منطقه معرفی شد. مخزن عمده در بخش غربی آتشفشان سبلان قرار داشته و از نواحی جنوبی و جنوب‌غربی قله به سمت دره مویل گسترش می‌یابد [۸].

وجود زون رسانی C1 در مقطع نهایی حاصل از مدل‌سازی دو بعدی نشان دهنده فعالیت‌های زمین‌گرمایی در این منطقه است و با مدل مفهومی ارائه شده توسط جانستون و همکاران هم‌خوانی دارد [۴۸]. در آن مطالعه، لایه‌های رسانی ضخیم معمولاً در نواحی خروجی سیال یافت می‌شوند. جانستون و همکاران روش‌های مختلف الکترومغناطیسی را برای اکتشاف منابع زمین‌گرمایی ارزیابی کرده و دریافتند که شناسایی مخزن زمین‌گرمایی با استفاده از روش مگنتوتلوریک، در بهترین حالت نیز با محدودیت‌هایی از جمله تضاد مقاومت‌ها، وضوح داده‌ها و میزان خطای اندازه‌گیری مواجه است. با این حال، تحلیل آن‌ها بر پایه فرض وجود یک سطح افقی بین لایه رسانا و مخزن دما بالا صورت گرفته است. اگر در فرایند تفسیر مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی، محدودیت‌های ناشی از هیدرولوژی سامانه زمین‌گرمایی در نظر گرفته شوند، می‌توان مدلی منسجم و هماهنگ از مقاومت‌ویژه ایجاد کرد که هدف زمین‌گرمایی را با دقت و اطمینان بیشتری مشخص کند [۵۵]. همچنین وجود زون C1 می‌تواند به‌صورت مذاب جزئی یا گردش تقویت‌شده سیالات رسانی زمین‌گرمایی در مسیرهای ایجادشده توسط گسل‌ها تفسیر شود [۲، ۸].

زون رسانی C2 و ارتباط آن با لایه‌های کم‌عمق که تحت تأثیر گسل‌های شماره ۱ و ۶ قرار دارند، نشان‌دهنده جهت اصلی ورود و خروج آب‌های سطحی در منطقه است. وجود چنین زون‌های در سایر بخش‌های سبلان نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات اسکویی و همکاران در سال ۲۰۱۶ و قائد رحمتی و همکاران در سال ۲۰۱۳ نشان داده‌اند که زون‌های رسانا در عمق‌های بیشتر، مؤید جهت اصلی جریان خروجی تفسیرشده در منطقه سبلان به سمت غرب (دره مویل) و شمال (شبیل) هستند [۵، ۸].

- 18(3): 375-385. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11770-021-0905-3>.
- [13] Key, K. (2016). "Mare2dem: a 2-D inversion code for controlled-source electromagnetic and magnetotelluric data". *Geophysical Journal International*, 207(1): 571-588. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw290>.
- [14] Zhou, Z., Xiao, T., Zhou, J., Zhu, X., Yang, B., Gong, C., Liu, J., and Wang, Y. (2024). "Three-dimensional marine magnetotelluric parallel forward modeling in conductive and magnetic anisotropic medium using finite-element method based on secondary field". *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(10): 1750. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12101750>.
- [15] Yu, N., Chen, Z., Wu, X., Kong, W., Chen, H., Li, T., and Feng, X. (2024). "Unstructured grid finite element modeling of the three-dimensional magnetotelluric responses in a model with arbitrary conductivity and magnetic susceptibility anisotropies". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3360986>.
- [16] Qin, C., He, W., Wang, X., and Zhao, N. (2024). "3-D joint inversion of MT and CSEM data based on adaptive finite element forward modeling". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 2006715. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3468395>.
- [17] Yu, N., Wu, X., Liu, X., Li, R., and Gao, L. (2023). "Hybrid mesh for magnetotelluric forward modeling based on the finite-element method". *Scientific Reports*, 13: 532. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27758-2>.
- [18] Li, J., Guo, R., Liu, J., Wang, Y., and Wang, X. (2023). "An efficient algebraic multi-resolution sampling approach to 3-D magnetotelluric modelling". *Geophysical Journal International*, 235(1): 166-177. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggad207>.
- [19] Chen, H., Ren, Z., and Tang, J. (2023). "MTAINV3D: A three-dimensional adaptive magnetotelluric inversion tool using unstructured grids". *Journal of Physics: Conference Series*, 2651(1): 012060. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2651/1/012060>.
- [20] Ryan, W. B. F., Carbotte, S. M., Coplan, J.O., O'Hara, S., Melkonian, A., Arko, R., Weissel, R. A., Ferrini, V., Goodwillie, A., Nitsche, F., Bonczkowski, J., and Zemsky, R. (2009). "Global multi-resolution topography synthesis". *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(3): 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008GC002332>.
- [21] Ghalamghash, J., Mousavi, S. Z., Hassanzadeh, J., and Schmitt, A. K. (2016). "Geology, zircon geochronology, and petrogenesis of Sabalan volcano (northwestern Iran)". *Journal of Volcanology and Geothermal*
- [3] Talebi, B. (2006). "Numerical modeling of the NW Sabalan geothermal field, Iran". Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, January 30-February 1, California, USA.
- [4] خوجم‌لی، ا.، مرادزاده، ع.، دولتی‌ارده‌جانی، ف.، رحمانی، م.، پرخیال، س.؛ ۱۳۹۴؛ "ارزیابی تعیین بُعد ساختارهای ژئوالکتریک زیرسطحی و مدل‌سازی وارون یک و دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک منطقه زمین‌گرمایی شمال غرب سبلان". مجله ژئوفیزیک ایران، دوره نهم، شماره ۳، ص ۴۴-۳۰.
- [5] Ghaedrahmati, R., Moradzadeh, A., Fathipour, N., Lee, S. K., and Porkhial, S. (2013). "3-D inversion of MT data from the Sabalan geothermal field, Ardabil, Iran". *Journal of Applied Geophysics*, 39: 12-24. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.006>.
- [6] Munoz, G., Weckmann, U., Pek, J., Kovacikova, S., and Klanica, R. (2018). "Regional two-dimensional magnetotelluric profile in West Bohemia/Vogtland reveals deep conductive channel into the earthquake swarm region". *Tectonophysics*, 727: 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.01.012>.
- [7] Cruces-Zabala, J., Ritter, O., Weckmann, U., Tietze, K., and Schmitz, M. (2020). "Magnetotelluric imaging of the Mérida Andes and surrounding areas in Venezuela". *Geophysical Journal International*, 222(3): 1570-1589. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa266>.
- [8] Oskooi, B., Takalu, M., Montahaei, M., and Rahmani, M. (2016). "A Recent Magnetotelluric Investigation of the Sabalan Geothermal Field in North-Western Iran". *Bulletin of Geophysics and Oceanography, Part A*: 261-274. DOI: <https://doi.org/10.4430/bgta0174>.
- [9] Zhu, X., Liu, J., Cui Y., and Gong, C. (2022). "A scalable parallel algorithm for 3-D magnetotelluric finite element modeling in anisotropic media". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3078735>.
- [10] Yu, N., Li, R., Kong, W., Gao, L., Wu, X., and Wang, E. (2022). "A hybrid grid-based finite-element approach for three-dimensional magnetotelluric forward modeling in general anisotropic media". *Computers and Geosciences*, 159: 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105035>.
- [11] Gallardo-Romero, E. U., and Ruiz-Aguilar, D. (2022), "High order edge-based finite elements for 3D magnetotelluric modeling with unstructured meshes". *Computers and Geosciences*, 158: 104971. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104971>.
- [12] Cheng, S., Zhang, Z.-Y., Zhou, F., Li, M., Chen, H., Shi, F.-S., Huang, L.-P., and Li, Y. (2021). "3D Step-by-step inversion strategy for audio magnetotellurics data based on unstructured mesh". *Applied Geophysics*,

- [642-28394-9_13](https://doi.org/10.1190/1.1437915).
- [32] Cagniard, L. (1953). "Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting". *Geophysics*, 18: 605-635. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1437915>.
- [33] Cantwell, T. (1960). "Detection and analysis of low-frequency magnetotelluric signals". Ph.D. Thesis, Department of Geology and Geophysics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, pp. 170.
- [34] Simpson, F., and Bahr, K. (2005). "Practical Magnetotellurics". Cambridge University Press, London, pp. 276. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511614095>.
- [35] Chave, A. D., and Jones, A. G. (2012). "The Magnetotelluric Method: Theory and Practice". Cambridge University Press, London, pp. 571. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139020138>.
- [36] Jones, A. G., and J'odicke, H. (1984). "Magnetotelluric transfer function estimation improvement by a coherence based rejection technique: Magnetotelluric transfer function estimation improvement by a coherence-based rejection technique". Society of Exploration Geophysicists, SEG Technical Program Expanded Abstracts. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1894081>.
- [37] Niblett, E. R., and Sayn-Wittgenstein, C. (1960). "Variation of electrical conductivity with depth by the magnetotelluric method". *Geophysics*, 25: 998-1008. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1438799>.
- [38] Bostick, F. X. (1977). "A simple almost exact method of MT analysis". Workshop on Electrical Methods in Geothermal Exploration, U.S. Geol. Sur. Contract. No. 14080001-8-359. In: Workshop on Electrical Methods in Geothermal Exploration, University of Utah Rpt., U.S.G.S contact 14-08-0001-g-359. Ward S.H., ed., pp. 183.
- [39] Jones, A. G. (1983). "On the equivalence of the "Niblett" and "Bostick" transformation in the magnetotelluric method". *Journal of Geophysics*, 53: 72-73.
- [40] Caldwell, T. G., Bibby, H. M., and Brown, C. (2004). "The magnetotelluric phase tensor". *Geophysical Journal International*, 158: 457-469. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02281.x>.
- [41] Bahr, K. (1988). "Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor - regional induction and local telluric distortion". *Journal of Geophysics-Zeitschrift Fur Geophysik*, 62: 119-127.
- [42] Bibby, H. M. (1986). "Analysis of multiple-source bipole-quadrupole resistivity surveys using the apparent resistivity tensor". *Geophysics*, 51(4): 972-983. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1442155>.
- Research, 327: 192-207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.05.001>.
- [22] Bogie, I., Cartwright, A. J., Khosrawi, K., Talebi, B., and Sahabi, F. (2000). "The Meshkin Sharhr Geothermal Prospect, Iran". Proceedings, 2000 World Geothermal Congress, Japan.
- [23] Seyedrahimi-Niaraq, M., Doulati Ardejani, F., Noorollahi, Y., and Porkhial, S. (2017). "Development of an updated geothermal reservoir conceptual model for NW Sabalan geothermal field, Iran". *Geotherm Energy*, 5: 14. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40517-017-0073-0>.
- [24] Seyedrahimi-Niaraq, M., Doulati Ardejani, F., Noorollahi, Y., Porkhial, S., Itoi, R., and Jalili Nasrabadi, S. (2019). "A three-dimensional numerical model to simulate Iranian NW Sabalan geothermal system". *Geothermics*, 77: 42-61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.08.009>.
- [۲۵] درویش زاده، ع؛ ۱۳۶۷؛ "اصول آتشفشان شناسی". انتشارات دانشگاه تهران.
- [۲۶] سحابی، ف؛ ۱۳۷۸؛ "بررسی آتشفشان سیلان با توجه خاص بر روند تشکیل منابع زمین گرمایی مشکین شهر - استان اردبیل". *مجله علوم زمین، پژوهشکده علوم و زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، شماره ۳۲-۳۱، ص ۲-۱*.
- [27] Karakhanian, A., Djrashian, R., Trifonov, V., Philip, H., Arakelian, S., and Avagian, A. (2002). "Holocene-historical volcanism and active faults as natural risk factors for Armenia and adjacent countries". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113: 319-344. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00264-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00264-5).
- [28] EDC (Energy Development Corporation), (2010. 2009). "MT survey of NW Sabalan geothermal project, NW Iran". Report submitted to SUNA, pp. 13.
- [29] Berdichevsky, M. N., and Dmitriev, V. I. (2008). "Models and Methods of Magnetotellurics". Springer Berlin Heidelberg, pp. 564. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77814-1>.
- [30] Unsworth, M., and Rondenay, S. (2012). "Mapping the Distribution of Fluids in the Crust and Lithospheric Mantle Utilizing Geophysical Methods". *Lecture Notes in Earth System Sciences*, Springer, Berlin, Heidelberg, 535-598. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-28394-9_13.
- [31] Unsworth, M., and Rondenay, S. (2012). "Mapping the Distribution of Fluids in the Crust and Lithospheric Mantle Utilizing Geophysical Methods". In: *Lecture Notes in Earth System Sciences* (pp. 535-598). Springer Berlin Heidelberg. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3->

- [53] Galamghash, J., Mousavi, Z., Hassanzadeh, J., and Schmitt, A. K. (2013). "Sabalan Volcano, Northwest Iran: Geochemistry and U—Pb zircon geochronology". In Conference: GSA Annual Meeting in Denver: 125th Anniversary of GSA, The Geological Society of America, 27-30 October, Denver-USA.
- [54] Fanaee Kheirabad, G. A., and Oskooi, B. (2011). "Magnetotelluric interpretation of the Sabalan geothermal field in the northwest of Iran". Journal of the Earth and Space Physics, 37(3): 667616. DOR: <https://doi.isc.ac/dor/20.1001.1.2538371.1390.37.3.18.3>.
- [55] Anderson E., Crosby D., and Ussher G. (1999). "Geothermal systems revealed by deep resistivity". In: Proceedings 21th New Zealand Geothermal Workshop, Auckland, New Zealand, 107-112.
- [56] Cumming, W., and Mackie, R. (2010) "Resistivity imaging of geothermal resources using 1D, 2D and 3D MT inversion and TDEM static shift correction illustrated by a glass mountain case history". In: Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia.
- [57] Muñoz, G. (2014). "Exploring for Geothermal Resources with Electromagnetic Methods". Surveys in Geophysics, 35(1): 101-122. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9236-0>.
- [43] Heise, W., Bibby, H. M., Caldwell, T. G., Bannister, S. C., Ogawa, Y., Takakura, S., and Uchida, T. (2007). "Melt distribution beneath a young continental rift: The Taupo volcanic zone, New Zealand". Geophysics Research Letter, 34: L14313. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007GL029629>.
- [44] Booker, J. R. (2014). "The Magnetotelluric Phase Tensor: A Critical Review". Survey Geophysics, 35: 7-40. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9234-2>.
- [45] Hill, J. H., Caldwell, T. G., Heise, W., Chertkoff, D. G., Bibby, H. M., Burgess, M. K., Cull, J. P., and Cass, R. A. F. (2009). "Distribution of melt beneath Mount St Helens and Mount Adams inferred from magnetotelluric data". Nature Geoscience, 2: 785-789. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo661>.
- [46] EDC (Energy Development Corporation), (2007). "MT survey of NW Sabalan geothermal project, NW Iran". Report submitted to SUNA, pp. 19.
- [47] Nicholson, K. (1993). "Geothermal Fluids". Springer Berlin Heidelberg, pp. 263. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-77844-5>.
- [48] Johnston, J. M., Pellerin, L., and Hohmann, G. W. (1992). "Evaluation of electromagnetic methods for geothermal reservoir detection". Geothermal Resources Council - Transactions, 16: 241-245.
- [49] Cumming, W. (2009). "Geothermal resource conceptual models using surface exploration data Proceedings". Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford, CA Stanford University.
- [50] Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H., and Tanaka, T. (2008). "GIS integration model for geothermal exploration and well siting". Geothermics, 37(2): 107-131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2007.12.001>.
- [51] معصومی، ر.؛ ۱۳۹۶؛ "ارزیابی میداین زمین گرمایی بر اساس یافته های زمین شناسی و ژئوشیمی سیالات در اطراف آتشفشان سبلان". علوم طبیعی، پایان نامه دکتری، تبریز، ۲۰۱ صفحه.
- [52] کرمی، ع.؛ ۱۳۹۵؛ "مطالعه ساختاری - مورفولوژی آتشفشان سبلان در پیوند با منابع زمین گرمایی". پایان نامه کارشناسی ارشد، تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان، ۳۳ صفحه.

¹ Pitfall² Adaptive finite element³ Maxwell's equations⁴ Skin depth⁵ Transverse Electric⁶ Transverse Magnetic⁷ Roughness⁸ Prejudice⁹ Finite Elements method¹⁰ Fixed parameter¹¹ Root mean square