

تحلیل تانسور فاز و مدل سازی دو بعدی داده‌های مگنتوتلوریک زمین گرمایی سبلان

احمد افشار^۱، غلامحسین نوروزی^۱، علی مرادزاده^۲

^۱ دانشجوی دانشکده دکتری دانشکده مهندسی معدن، پردیس های فنی، دانشگاه تهران

^۲ استاد دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران

چکیده

تانسور فاز پارامتر بسیار مفیدی است که علی رغم تانسور امپدانس، مستقل از اعوجاج‌های ناشی از بی‌هنجاری‌های سطحی می‌باشد. با نمایش گرافیکی پارامترهای تانسور فاز به صورت بیضی در فرکانس‌های مختلف می‌توان اطلاعاتی از ساختار ژئوالکتریکی بدست آورد. در این مقاله از این روش برای تحلیل ابعادی و تعیین امتداد مناسب برای داده‌های محدوده زمین گرمایی سبلان استفاده شده، و پس از پردازش‌های لازم روی داده‌ها، داده‌های چرخش یافته مورد مدل‌سازی وارون قرار گرفته است. نتایج مدل‌سازی به خوبی موقعیت احتمالی مخزن زمین گرمایی و سنگ پوش را مشخص می‌نماید که این نتایج با اطلاعات چاه‌های موجود و همچنین مطالعات مگنتوتلوریک پیشین سازگاری بسیار بالایی دارد.

واژه‌های کلیدی: داده مگنتوتلوریک، تانسور فاز، زمین گرمایی سبلان

Phase tensor analysis and 2D inversion of Sabalan magnetotelluric data

Ahmad Afshar¹, Gholam-Hossain Norouzi¹, Ali Moradzadeh²

¹ School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran .E-mail: aafshar.m@ut.ac.ir, norouzih@ut.ac.ir, a_moradzadeh@ut.ac.ir

Abstract

Phase tensor is a very useful parameter, despite the impedance tensor, the phase tensor is independent of the distortion caused by shallow structures and it can providing information about the dimensionality of the geoelectrical structures by showing as ellipses. In this paper, phase tensor method was performed on the magnetotelluric data of Sabalan geothermal system in order to dimensional analysis and determining the geological strike. After needed processing and data rotating based on the phase tensor analysis, 2D inversion was done on the magnetotelluric data. The result of inversion successfully showed the geothermal reservoir and its cap rock and it has a good agreement with pervious geophysical studies and wells information.

Keywords: Magnetotellurics data, Phase tensor, Sablan geothermal

۱ مقدمه

ویژگی شاخص سیستم‌های فعال زمین‌گرمایی، وجود یک منبع حاوی سیال‌های داغ هیدروترمال می‌باشد که اغلب سنگ‌های پیرامون منبع، توسط سیال هیدروترمال دچار دگرسانی شده‌اند. آلتراسیون هیدروترمال سبب تغییر در ویژگی‌های فیزیکی (مقاومت ویژه الکتریکی، چگالی، سرعت امواج لرزه‌ای) محیط می‌شود که این تغییرات غیر عادی و بی‌هنجاری‌ها توسط روش‌های مختلف ژئوفیزیکی شامل روش‌های ژئوالکتریکی و الکترومغناطیسی، گرانی، مغناطیسی و لرزه‌نگاری قابل تشخیص می‌باشند. روش‌های الکترومغناطیسی به خصوص روش مگنتوتلوریک (MT) نقش پراهمیتی در تصویرسازی هندسه منابع ژئوترومال ایفا می‌کنند [۱].

روش مگنتوتلوریک یک روش غیر فعال ژئوفیزیکی است که با استفاده همزمان از جریان‌های القایی و میدان‌های مغناطیسی، مقاومت ویژه را در عمق به تصویر می‌کشد. در زمین یک بعدی، رسانایی الکتریکی فقط در عمق تغییر می‌کند ولی در زمین دوبعدی، رسانایی الکتریکی در یک جهت افقی موسوم به امتداد ثابت است ولی در امتداد عمود بر آن و در جهت عمق تغییر می‌کند [۲]. تحلیل ابعادی داده‌های مگنتوتلوریک در انتخاب روش مناسب برای وارون‌سازی و تفسیر بسیار سودمند می‌باشد [۳]. هرچند بررسی اولیه تانسور امپدانس اطلاعاتی از بعد ژئوالکتریکی ساختارهای زیر سطحی فراهم می‌کند ولی بدلیل اثر ناهمگنی‌های سطحی، تانسور امپدانس به تنهایی توانایی تشخیص ابعاد صحیح ساختار ناحیه‌ای و این که آیا

داده‌ها متأثر از آشفتگی گالوانیک (Galvanic distortion) شده‌اند یا نه، را ندارد. بنابراین انجام تحلیل ابعادی در تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک ضروری است [۲، ۳]. روش‌های متنوع گرافیکی و مبتنی بر ثابت چرخشی (Rotational invariant) تانسور امپدانس برای تحلیل ابعادی وجود دارد [۴، ۵، ۶]. در برخی روش‌ها از تابع انتقال میدان مغناطیسی زمین برای تحلیل ابعادی استفاده شده است [۷]. کالدول و همکاران (۲۰۰۴) تانسور فاز را به منظور تحلیل ابعادی و کسب اطلاعات از ساختار ناحیه‌ای، معرفی کردند زیرا تانسور فاز تحت تاثیر ناهمگنی‌های محلی کم عمق قرار نمی‌گیرد [۳، ۸]. در مطالعه حاضر ابتدا روش تانسور فاز برای تحلیل ابعادی و تعیین امتداد ژئوالکتریکی مجموعه داده‌های MT یک پروفیل منتخب از محدوده سبلان استفاده شده و در ادامه بعد از انجام پردازش‌های لازم، مدل‌سازی داده‌ها با توجه به بعد ساختارهای زیرسطحی انجام خواهد شد.

۲ روش شناسی

رابطه بین بردارهای میدان مغناطیسی افقی (H) و الکتریکی (E) در یک ایستگاه MT در حوزه فرکانس به صورت زیر ارائه می‌شود [۲]:

$$E \quad (۱)$$

که در آن Z تابع انتقال مختلط است و تانسور امپدانس نامیده می‌شود که در دستگاه مختصات (X, Y, Z) داریم:

$$\begin{bmatrix} E \\ E \end{bmatrix} \quad (۲)$$

تانسور فاز (Φ) مگنتوتلوریک به صورت زیر تعریف می‌شود [۲، ۸]:

$$\Phi \quad (۳)$$

که در آن X بخش حقیقی و Y بخش موهومی تانسور امپدانس هستند [۲]. با استفاده از تجزیه مقدار تکین (Singular Value Decomposition (SVD)) پارامترهای تحلیل ابعادی تانسور فاز به صورت زیر بدست می‌آید [۸]:

$$\beta = 1/2 \tan^{-1} \left(\frac{\phi_{xy} - \phi_{yx}}{\phi_{xx} + \phi_{yy}} \right), \quad \alpha = 1/2 \tan^{-1} \left(\frac{\phi_{xy} + \phi_{yx}}{\phi_{xx} - \phi_{yy}} \right) \quad (۴)$$

که در آن β زاویه چولگی (Skew angle) و α بیضویت (Ellipticity) تانسور فاز است. برای نمایش تانسور فاز از یک بیضی استفاده می‌شود که $\alpha - \beta$ زاویه امتداد قطر بزرگ بیضی، و اندازه قطرهای بزرگ و کوچک بیضی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\phi_{max}, \quad \phi_{min} = \sqrt{\phi_1^2 + \phi_3^2} \pm \sqrt{\phi_1^2 + \phi_3^2 - \phi_2^2} \quad (۵)$$

که در آن ϕ_1 و ϕ_2 و ϕ_3 عبارتند از:

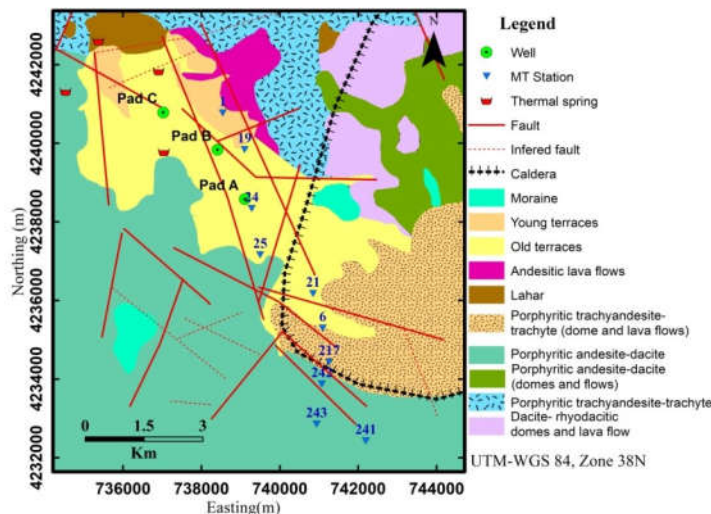
$$\phi_1 = (\phi_{xx} + \phi_{yy}) / 2, \quad \phi_2 = \sqrt{\phi_{xx}\phi_{yy} - \phi_{xy}\phi_{yx}}, \quad \phi_3 = (\phi_{xy} - \phi_{yx}) / 2 \quad (۶)$$

تانسور فاز ویژگی‌های مفیدی دارد: اگر Z در ماتریس 2×2 حقیقی ضرب شود (در اثر آشفتگی امپدانس ناحیه‌ای دلیل وجود ساختارهای محلی)، Φ ثابت می‌ماند. همچنین ماتریس چولگی آن برای ساختارهای دوبعدی برابر صفر است [۲]. برای ساختارهای یک بعدی تانسور فاز به شکل دایره بوده و برای ساختارهای دوبعدی، اندازه قطرهای بزرگ و کوچک بیضی متفاوت و $|\beta| \leq 3^\circ$ است. همچنین با ترسیم نمودار گلسرخی زاویه $\alpha - \beta$ می‌توان امتداد ژئوالکتریک را بدست آورد [۲، ۳، ۸].

۳ معرفی محدوده مطالعه و داده‌های MT

محدوده مورد مطالعه در استان اردبیل، غرب کوه سبلان و در دره مویل واقع شده است. بدلیل وجود چشمه‌های متعدد آب گرم، محدوده سبلان از سال ۱۳۵۶ به طور گسترده مورد اکتشافات متعدد ژئوفیزیکی جهت کشف و مدل‌سازی منبع زمین

گرمایی قرار گرفته است [۹]. در شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی محدوده به همراه موقعیت ایستگاه‌های MT نشان داده شده است. کوه سیلان غالباً توسط سنگ‌های نفوذی و گدازه‌های آذرین پوشیده شده است و به طور کلی می‌توان. محدوده را به چهار بخش: رسوبات یخچالی، رسوبات کواترنری، جریان‌های تراکی آندزیتی پس از کالدرا با سن پلیستوسن و گنبد‌های تراکی داسیتی تا آندزیتی همزمان با کالدرا و توف و جریان‌های تراکی آندزیتی قبل از کالدرا تقسیم کرد [۱۰]. از نظر تکتونیک، سیستم‌های گسل امتداد لغز با روند شمال غربی- جنوب شرقی، گسل‌های نرمال شمالی- جنوبی و گسل‌های فشارشی شمال شرقی- جنوب غربی ساختارهای غالب منطقه می‌باشند [۱۰]. در این مطالعه ۱۰ ایستگاه از داده‌های MT محدوده سیلان جهت بررسی‌های بیشتر انتخاب شده است (شکل ۱). این داده‌ها توسط شرکت فیلیپینی EDC با هدف تعیین مرکز ذخیره زمین گرمایی و هدایت حفاری‌ها در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ برداشت شده است [۱۱].



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

۴ تحلیل ابعادی و مدل‌سازی داده‌ها

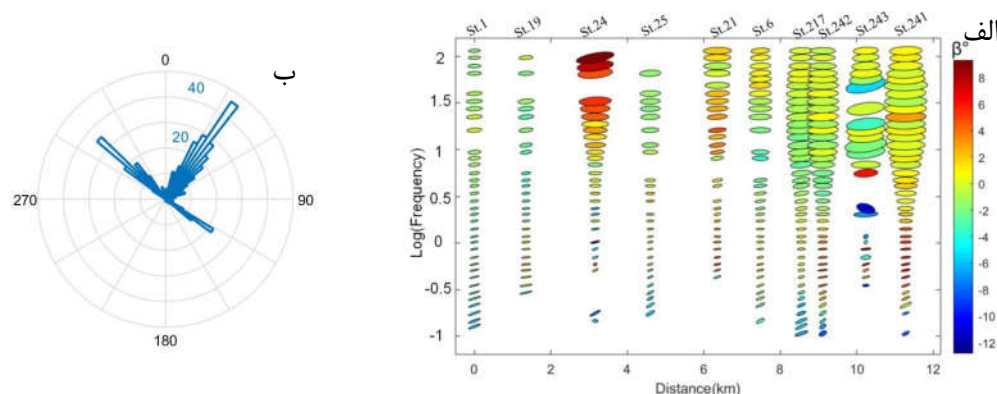
نتایج تحلیل ابعادی به کمک تانسور فاز برای داده‌های هر یک از ایستگاه‌های MT انجام و مطابق شکل ۲ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۲-الف مشاهده می‌شود در محدوده فرکانسی 0.1-100 Hz شرایط ساختار دوبعدی ($|\beta| \leq 3^\circ$) غالباً صادق است. در فرکانس‌های زیاد (عمق‌های کم) امتداد ژئوالکتریکی تقریباً شمالی (زاویه قطر بزرگ با محور x در جهت مثلاًتی) می‌باشد ولی با کاهش فرکانس (افزایش عمق) ساختار اصلی شمال شرقی - جنوب غربی است که نمودار گلسرخي زاویه $\alpha - \beta$ (شکل ۲-ب) با وجود ابهام ۹۰ درجه، موید این مطلب است. بنابراین می‌توان گفت که امتداد ساختار ژئوالکتریکی عمیق زیر سطحی منطقه در راستای N35E می‌باشد که این امتداد تقریباً عمود بر پروفیل انتخابی است. پس از تعیین امتداد ساختار، داده‌های تانسور امپدانس به این امتداد چرخش یافته است و داده‌های هر دو مد قطبش الکتریک و مغناطیس عرضی (TM, TE) همه ایستگاه‌های MT به صورت توام با الگوریتم وارون‌سازی رودی مکی (۲۰۰۱) توسط نرم افزار WinGLink مدل شد [۱۲] و نتیجه مدل‌سازی در شکل ۳ نشان داده شده است.

در مقطع حاصل از مدل‌سازی یک لایه رسانا ($\rho \leq 25 \Omega m$) از سطح تا حدود ارتفاع ۱۲۰۰ متر (در محل چاه A) مشاهده می‌شود که با توجه به اطلاعات حفاری، این لایه رسانا هم ارز کانی‌های حاصل از آلتراسیون (زون البت و اسمکتیت) است که در مدل مفهومی سنگ پوش مخزن زمین گرمایی می‌باشد. مقاومت بین ۵۰ تا ۲۰۰ اهم متر را می‌توان مخزن زمین گرمایی، و مقاومت بالای ۲۰۰ اهم متر احتمالاً مربوط به توده‌های نفوذی آذرین باشد.

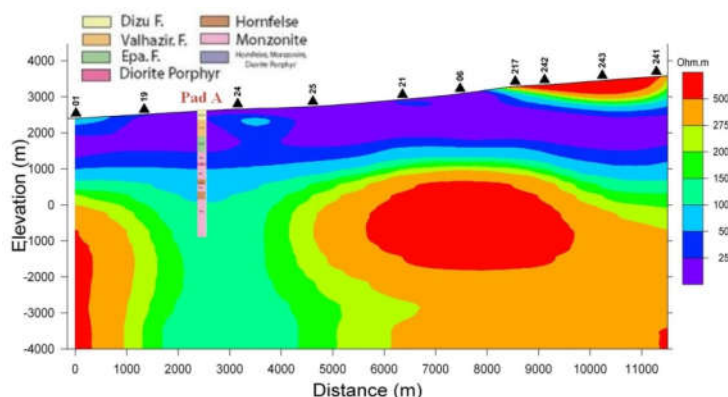
۵ نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش تحلیل ابعادی تانسور فاز برای پردازش پروفیلی از داده‌های محدوده سیلان استفاده شد. نتایج روش تانسور فاز نشان دادند که برای فرکانس‌های ۰/۱ تا ۱۰۰ هرتز می‌توان ساختار را دوبعدی در نظر گرفت و همچنین امتداد آن تقریباً در راستای عمود بر پروفیل انتخابی است. با توجه به این تحلیل‌ها، داده‌های کم کیفیت حذف و داده‌ها به امتداد به

دست آمده چرخش یافتند. در نهایت مدل سازی دوبعدی روی داده ها انجام شد که نتایج بدست آمده با اطلاعات گمانه ها و مطالعات مگنتوتلوریک قبلی سازگاری بسیار خوبی دارد.



شکل ۲. الف- نمودارهای تانسور فاز برای ایستگاه های MT پروفیل انتخاب شده. ب- نمودار گلسرخی زاویه $\beta - \alpha$ برای داده های MT پروفیل



شکل ۳- نتایج مدل سازی وارون داده های محدوده سبلان برای پروفیل انتخاب شده و اطلاعات زمین شناسی چاه A

منابع

- Lichoro, C.M., Árnason, K., and Cumming, W.: 'Resistivity imaging of geothermal resources in northern Kenya rift by joint 1D inversion of MT and TEM data', *Geothermics*, 2017, 68, pp. 20-32
- Booker, J.R.: 'The magnetotelluric phase tensor: a critical review', *Surv Geophys*, 2014, 35, (1), pp. 7-40
- Sarvandani, M.M., Nejati, A., and Ghaedrahmati, R.: 'Comparison of various dimensionality methods on the Sabalan magnetotelluric data', *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 128, pp. 179-190
- Bahr, K.: 'Geological noise in magnetotelluric data: a classification of distortion types', *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1991, 66, (1-2), pp. 24-38
- Weaver, J.T., Agarwal, A.K., and Lilley, F.: 'Characterization of the magnetotelluric tensor in terms of its invariants', *Geophysical Journal International*, 2000, 141, (2), pp. 321-336
- Lilley, F.: 'Diagrams for magnetotelluric data', *Geophysics*, 1976, 41, (4), pp. 766-770
- Romo, J.M., Gomez-Trevino, E., and Esparza, F.J.: 'An invariant representation for the magnetic transfer function in magnetotellurics', *Geophysics*, 1999, 64, (5), pp. 1418-1428
- Caldwell, T.G., Bibby, H.M., and Brown, C.: 'The magnetotelluric phase tensor', *Geophysical Journal International*, 2004, 158, (2), pp. 457-469
- SKM: 'Resource review of the Northwest Sabalan geothermal project', in Editor (Ed.) (Eds.): 'Book Resource review of the Northwest Sabalan geothermal project' (2005, edn.), pp. 61
- Hojati, N., Porkhial, S., Rezaeian, M., and Faridi, M.: 'Geothermal Energy Studies and Evaluation the Potential of Sabalan Volcano in the NW of Iran'. Proc. Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015 pp. Pages
- Ghaedrahmati, R., Moradzadeh, A., Fathianpour, N., Lee, S.K., and Porkhial, S.: '3-D inversion of MT data from the Sabalan geothermal field, Ardabil, Iran', *Journal of Applied Geophysics*, 2013, 93, pp. 12-24
- Rodi, W., and Mackie, R.L.: 'Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion', *Geophysics*, 2001, 66, (1), pp. 174-187