

## مقایسه عملکرد توابع پاسخ مگنتوتلوریک در پایش ساختار ژئوالکتریک یک منطقه

علیرضا محلاتی<sup>۱</sup>، منصوره منتهایی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، [Horde\\_m@yahoo.com](mailto:Horde_m@yahoo.com)  
<sup>۲</sup> آستادیار، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، [mmontaha@ut.ac.ir](mailto:mmontaha@ut.ac.ir)

### چکیده

در این مقاله توانمندی توابع تبدیل مختلف روش MT در پایش مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطح زمین مقایسه شده‌اند. به این منظور مدلی مصنوعی، معرف ساختار ژئوالکتریک مفروضی از یک سیستم زمین گرمایی تقویت شده در نظر گرفته شده و توابع تبدیل MT با استفاده از مدل سازی پیشرو، تولید شده‌اند. در نهایت اطلاعات و حساسیت این توابع تبدیل در مقایسه با یکدیگر بررسی شده‌اند. نتایج حاکی از آن هستند که توابع تبدیل تانسور بازماند فاز و تانسور بازماند مقاومت ویژه ظاهری می-توانند تغییرات هرچند کوچک صورت گرفته در پارامترهای فیزیکی محیط را سرشت‌نمایی کنند. پایش این تغییرات کوچک در حضور نوفه‌ها در شرایط واقعی نیازمند بهبود تفکیک پذیری مکانی روش مگنتوتلوریک است. **واژه‌های کلیدی:** پایش مگنتوتلوریک، توابع پاسخ (تبدیل)، تانسور بازماند فاز، تانسور بازماند مقاومت ویژه ظاهری، سیستم زمین گرمایی تقویت شده (EGS)، ساختار ژئوالکتریک.

## A comparison between Magnetotelluric transfer functions for monitoring the sub-surface electrical resistivity structures

Alireza Mahallati<sup>1</sup>, Mansoureh Montahaei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geophysics, University of Tehran  
<sup>2</sup>Assistant professor, Institute of Geophysics, University of Tehran

### Abstract

Capabilities of various Magnetotelluric transfer functions in monitoring the resistivity structure of the sub-surface have been compared throughout this article. To achieve this purpose, First a synthetic model representing the geoelectric structure of an Enhanced Geothermal System has been introduced. Secondly, Various MT transfer functions are calculated for this model using forward modeling. Eventually, Pros and cons of each transfer function are discussed. The results show that residual phase and residual apparent resistivity tensors are capable of detecting the changes, even if the changes are too small. Monitoring such small variations in the sub-surface in the presence of noises demands the improvement of the spatial resolution of the MT method.

**Keywords:** Magnetotelluric monitoring, Transfer functions, residual phase tensor, residual apparent resistivity tensor, Enhanced Geothermal System(EGS), Geoelectric structure.

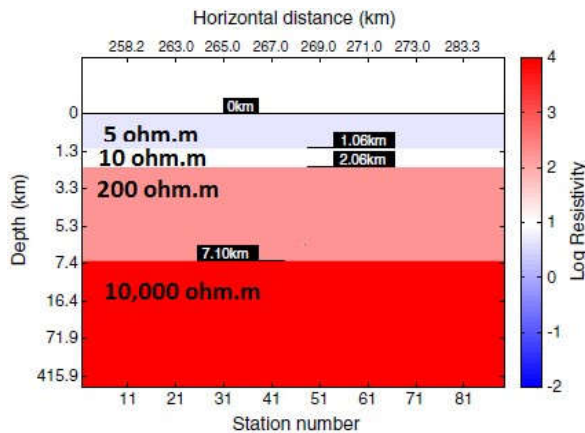
### ۱ مقدمه

مطالعه و پایش تغییرات ساختارهای زیرسطحی و الگوی توزیع آنها با اهداف گوناگونی انجام می شود. به این منظور تا کنون روش های ژئوفیزیکی گوناگونی به کار گرفته شده اند. روش الکترومغناطیسی مگنتوتلوریک (MT)، به دلیل استفاده از چشمه طبیعی و غیر قابل کنترل، تفکیک پذیری مکانی پایین تری نسبت به سایر روش ها دارد. از طرف دیگر تفکیک پذیری زمانی بالای این روش به همراه عمق وسیع مورد کاوش و همچنین عدم نیاز به چشمه مصنوعی سبب شده است تا پژوهشگران در دهه اخیر توانایی های این روش را در پایش تغییرات ساختارهای زیرسطحی مورد سنجش قرار دهند. استفاده از روش MT در پایش ها تاکنون در سه دسته کلی صورت گرفته اند. دسته نخست پایش ها در ارتباط با الگوی توسعه-ی گسل های مصنوعی در سیستم های زمین گرمایی پیشرفته (EGS) می باشند نظیر مطالعات پیکاک و همکاران (۲۰۱۲)، مک-فارلین و همکاران (۲۰۱۴). دسته دوم پایش ها در ارتباط با رصد ویژگی های فیزیکی توده های ماگمایی در محیط های آتشفشانی هستند نظیر مطالعات آبیژاوا و همکاران (۲۰۱۱). دسته سوم پایش ها اما در خصوص ارتباط احتمالی ارتباط میان الگوی مقاومت ویژه الکتریکی زمین با وقوع زمین لرزه ها می باشند نظیر مطالعات کپلر و همکاران (۲۰۱۰).

برای بررسی هرچه بهتر توانایی روش MT در پایش‌ها و سعی در بهبود آن، نخست می‌بایست حساسیت روش MT به تغییرات ایجاد شده در الگوی مقاومت‌ویژه‌الکتریکی زمین بررسی شود. برای این منظور در این پژوهش سعی شده است حساسیت متداول‌ترین توابع پاسخ روش MT که در امر پایش‌ها تا کنون مورد استفاده قرار گرفته‌اند بررسی و با یکدیگر مقایسه شوند.

## ۲ مدل‌سازی‌های عددی

در بخش نخست این پژوهش مدل مصنوعی از یک سیستم زمین‌گرمایی ارتقا یافته شده توسط مگفارلین و همکاران (۲۰۱۴) در نظر گرفته شده است (شکل ۱). در این نوع از منابع زمین‌گرمایی، حجم عظیمی از یک شاره رسانا در محیطی که تخلخل و نفوذپذیری پایین ولی دمای بسیار بالا دارد، تزریق می‌شود تا با القای درز و شکاف و شکستگی‌ها، به‌طور مصنوعی، چرخش سیال داغ در این ناحیه تسهیل گردد. قبل از تزریق ساختار ژئوالکتریک این منطقه لایه‌ای است (شکل ۱). با فرض آنکه در نتیجه این تزریق در محیط الف) یک لایه همسانگرد ( $\rho=1\Omega m$ ) در محدوده عمقی ۳۶۶۰ تا ۴۴۶۰ متری زمین (ب) یک لایه ناهمسانگرد در همان محدوده مدل قبل (با پارامترهای ناهمسانگردی:  $\rho_x=\rho_z=1\Omega m$ ,  $\rho_y=180\Omega m$ ، و  $\alpha_s=30^\circ$ ,  $\alpha_D=40^\circ$ ,  $\alpha_I=0$ ) و (ج) یک کانال ناهمسانگرد (به عرض یک کیلومتر به مرکزیت ایستگاه شماره ۷۰ و با همان پارامترهای ناهمسانگردی حالت ب) ایجاد شده باشند، توابع پاسخ MT با استفاده از کد پک و ورژن (۱۹۹۷) محاسبه و عدم انطباق آنها با پاسخ ساختار لایه‌ای قبل از تزریق، در شکل‌های (۴-۲) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱. مدل زمین پیش از تزریق

در سیستم EGS (مگفارلین و همکاران، ۲۰۱۴).

مقایسه سونداژهای مقاومت‌ویژه ظاهری و فاز امپدانس، علاوه بر تأکیدی دوباره بر رابطه علیت بین این دو تابع پاسخ (تغییرات سونداژ فاز در بازه زمانی 3-10 s و سونداژ مقاومت‌ویژه ظاهری در بازه زمانی 10-100 s رخ می‌دهند) نشان می‌دهد که با کاهش تغییرات فیزیکی محیط پس از تزریق از مدل‌های الف) تا ج)، تفکیک‌پذیری مقادیر مقاومت‌ویژه امپدانس از مقادیر  $0.61\%$  و  $0.58\%$  در مدل‌های الف) و ب) به مقدار یک درصد در مدل ج) کاهش یافته است. بیضی‌های توابع تبدیل تانسور فاز کالدول و همکاران (۲۰۰۴) و تانسور مقاومت‌ویژه‌ظاهری و کمن و همکاران (۲۰۰۳) نیز برای حالت‌های پیش و پس از تزریق تفاوت محسوسی را نشان نمی‌دهند. برای بررسی تغییرات ایجاد شده در زمین پس از تزریق، هرچند تغییرات کوچک باشند، بیضی‌های بازماند تانسورهای فاز و مقاومت‌ویژه‌ظاهری ابزار مناسب‌تری هستند.

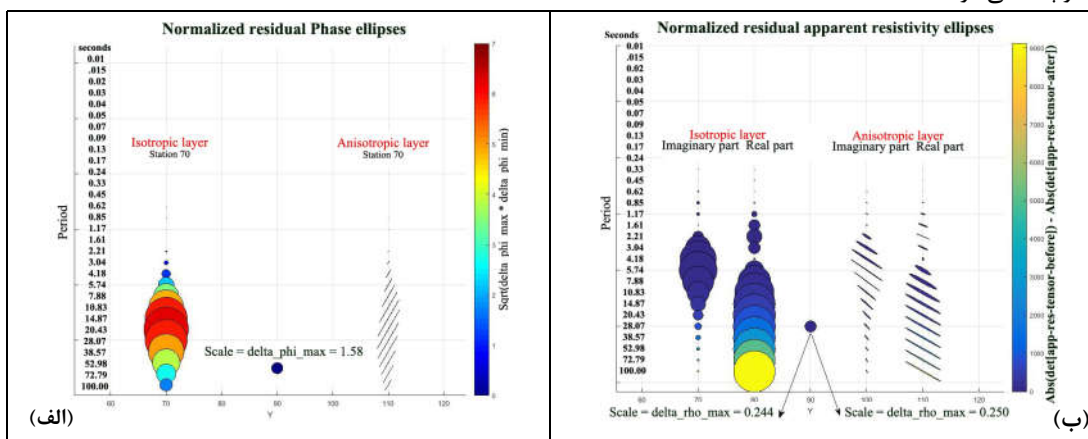
بیضی‌های بازماند نمایش داده شده در شکل‌های (۴-۲) براساس رهیافت هایزه و همکاران (۲۰۰۷) محاسبه شده‌اند:

$$\Delta\Phi_{1,2} = I - \Phi_1^{-1}\Phi_2 \quad (1)$$

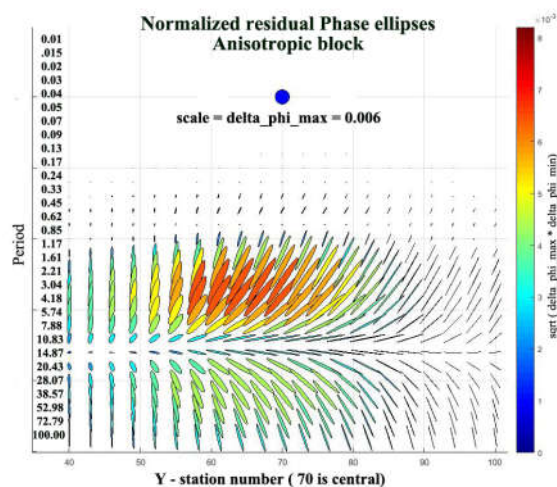
در این رابطه می‌تواند، تانسور مقاومت‌ویژه‌ظاهری و یا تانسور فاز باشد تا در نهایت تانسور بازماند مقاومت‌ویژه‌ظاهری و یا فاز ساخته شود.  $\Phi_1$  تانسور پیش از تزریق و  $\Phi_2$  تانسور پس از تزریق می‌باشد و I تانسور همانی دو در دو می‌باشد. تانسور دو در دو حاصل شده از این رابطه می‌تواند به صورت گرافیکی توسط یک بیضی نشان داده شود.

جهتگیری بیضی بازماند معرف هر تانسور، راستایی را نشان می‌دهد که تغییرات پارامترهای فیزیکی محیط در آن بیشینه هستند اما با توجه به پاسخ‌های متضاد توابع تبدیل مقاومت‌ویژه‌ظاهری و فاز در مواجهه با افزایش و یا کاهش مقاومت ویژه الکتریکی، بیضی‌های بازماند آنها به‌صورت متعامد نسبت به یکدیگر جهت یافته‌اند (پاسخ‌های مدل ب در شکل ۲). در مواردی که شکل هندسی این تانسور دایره است، تغییرات در پارامترهای فیزیکی محیط به‌صورت هم‌سو یکسان ایجاد شده‌اند

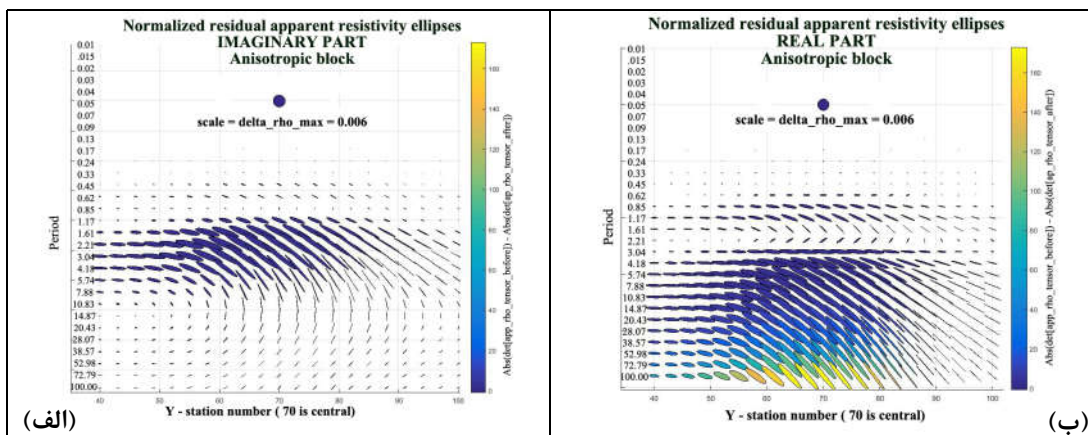
(پاسخ‌های مدل الف در شکل ۲). توجه به این نکته لازم است که توابع تبدیل MT در مواجهه با تقابل مقاومت‌ویژه در سقف و کف لایه به‌طور مجزا پاسخ داده‌اند. به این علت با افزایش دوره تناوب در ابتدا اندازه بیضی‌های بازماند بزرگ شده و سپس کوچک می‌شوند.



شکل ۲. بیضی‌های (الف) بازماند تانسور فاز و (ب) مقاومت‌ویژه ظاهری در ایستگاه میانی در حضور لایه‌های همسانگرد و ناهمسانگرد.



شکل ۳. بیضی‌های بازماند تانسور فاز در ایستگاه‌های ۴۰ تا ۱۰۰ در حضور توده ناهمسانگرد با عرض یک کیلومتر.



شکل ۴. بخش‌های حقیقی و موهومی بیضی‌های بازماند تانسور مقاومت‌ویژه ظاهری در ایستگاه میانی در حضور توده ناهمسانگرد.

در حالتی تزریق صورت گرفته در سیستم EGS منجر به تغییر پارامترهای فیزیکی محیط در ناحیه‌ای محدود به ابعاد یک کانال تغییر می‌کنند (مدل ج)، با افزایش دوره تناوب، بیضی‌های بازماند تانسور فاز و بخش موهومی تانسور مقاومت‌ویژه

ظاهری بزرگتر شده و تغییرات در پارامترهای فیزیکی محیط در رنگ زمینه بیضی‌ها نیز نمود می‌یابد. اما در مورد بیضی‌های بازماند بخش حقیقی مقاومت‌ویژه ظاهری، اگرچه در ابتدا با افزایش دوره تناوب جهتگیری این بیضی‌ها راستای مقاوم‌تر و یا رساناتر شدن ساختار ژئوالکتریک منطقه را نشان می‌دهد اما در دوره‌های تناوبی بالاتر حضور این کانال باعث اعوجاج گالوانی این دسته از توابع پاسخ MT شده و به این علت شکل و راستای بیضی‌ها تغییر نکرده و تعیین زیرلایه‌ی کانال به این وسیله میسر نمی‌باشد.

### ۳ نتیجه‌گیری

این نتایج حاکی از آن هستند که اگرچه تفکیک‌پذیری مقادیر مقاومت‌ویژه امپدانس با تقلیل تغییرات پارامترهای فیزیکی محیط، قبل و پس از تزریق به طور چشمگیری کاهش یافته است اما در این مدل‌ها، تفکیک‌پذیری بیضی‌های بازماند تانسور فاز و تانسور مقاومت‌ویژه ظاهری تغییرات چندانی نداشته‌اند و این توابع تبدیل توانسته‌اند تغییرات هرچند کوچک صورت گرفته در پارامترهای فیزیکی محیط را سرشت‌نمایی کنند.

با مقایسه مقیاس بیضی‌های بازماند شکل‌های دو تا چهار، کوچک بودن تغییرات در حضور کانال ناهمسانگرد، در مقایسه با تغییرات در حضور لایه‌های همسانگرد و ناهمسانگرد مشخص می‌شود. در صورتی که ابعاد کانال ناهمسانگرد واقع‌بینانه‌تر نیز در نظر گرفته شود یا به عبارتی، کانال ناهمسانگرد به توده‌ی ناهمسانگرد تبدیل شود تغییرات ایجاد شده در توابع پاسخ کوچک‌تر نیز می‌شود. در شرایط واقعی و حضور نوفه‌ها، پایش تغییراتی چنین کوچک با مشکل مواجه خواهد شد. در نتیجه به نظر می‌رسد برای بهره بردن هرچه بیشتر از مزیت‌های روش MT در پایش‌ها، می‌بایست رزولوشن مکانی این روش به طریقی بهبود داده شود.

بخش حقیقی بیضی‌های بازماند مقاومت‌ویژه‌ظاهری رفتار برآیند میراکنندگی ساختارهای حاضر در کره القا را نشان می‌دهد. این بخش از تانسور مقاومت‌ویژه‌ظاهری متأثر از اثر اعوجاج گالوانی است. بخش موهومی این تانسور اما همانند تانسور بازماند فاز، تاثیرات ناپیوستگی‌ها بر فاز را نشان می‌دهد و هنگام ورود و خروج از کانال، تغییر شکل داشته و به این طریق محدوده عمقی تغییرات ایجاد شده را می‌تواند تخمین زده شود.

### منابع

- Peacock, J. R., Thiel, S., Reid, P., Heinson, G., 2012, Magnetotelluric monitoring of a fluid injection: *Geophysical Research Letters*, **39**, L18403.
- MacFarlane, J., Thiel, S., Pek, J., Peacock, J., Heinso, G., 2014, Characterisation of induced fracture networks within an enhanced geothermal system using anisotropic electromagnetic modelling: *Journal of Volcanology and Geothermal Research.*, **288**, 1-7.
- Aisawa, K., Kanda, W., Ogawa, Y., Iguchi, M., Yokoo, A., Yakiware, H., Sugano, T., 2011, Temporal changes in electrical resistivity at Sakurajima volcano from continuous magnetotelluric observations: *Journal of volcanology and Geothermal Research*, **199**, 165-175.
- Kappler, K. N., Morrison, H. K., Egbert, G. D., 2010, Long-term monitoring of ULF electromagnetic fields at Parkfield, California: *Journal of Geophysical Research*, **115**, B04406.
- Pek, J., Verner, T., 1997, Finite-difference modelling of magnetotelluric fields in two-dimensional anisotropic media: *Geophysical Journal International*, **128**(3), 505-521.
- Caldwell, T. G., Bibby, H. M., Brown, C., 2004, The magnetotelluric phase tensor: *Geophysical Journal International*, **158**, 457-469.
- Weckmann, U., Ritter, O., Haak, V., 2003, Images of the magnetotelluric apparent resistivity tensor: *Geophysical Journal International*, **155**, 456-468.
- Heise, W., Caldwell, T. G., Bibby, H. M., Brown, C., 2006, Anisotropy and phase splits in magnetotellurics: *Physics of the Earth and planetary Interiors*, **158**, 107-121.