

تفسیر یک بُعدی و دو بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک به منظور تشخیص ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی در امتداد یک نیم‌رخ شرقی-غربی در منطقه اراک

سید مسعود انصاری^۱، بهروز اسکوئی^{۲*} و مارتین آنسورس^۳

^۱ کارشناس ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

^۳ استاد، دانشکده فیزیک، مرکز تحقیقات ژئوفیزیک، دانشگاه آلبرتا، کانادا

(دریافت: ۸۷/۶/۳۱، پذیرش نهایی: ۸۸/۷/۲۱)

چکیده

در سال ۱۳۸۵ اندازه‌گیری‌های مگنتوتلوریک در گستره‌ی بسامدی وسیعی در شرق شهر اراک به منظور مشخص کردن رسانایی الکتریکی پوسته با تاکید بر مکان‌یابی زون‌های گسلی موجود در منطقه صورت گرفت. مولفه‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در طول یک نیم‌رخ عمود بر امتداد زمین‌شناسی و در ۱۵ نقطه اندازه‌گیری شد. پردازش داده‌ها و وارون‌سازی یک بُعدی برای هر کدام از سایت‌ها صورت گرفت و در ادامه وارون‌سازی دو بُعدی این داده‌ها به انجام رسید. نتایج به دست آمده از وارون‌سازی رسانایی الکتریکی ساختارها را در توافق خوبی با داده‌های زمین‌شناسی مشخص کرده است. مهم‌ترین این نتایج شناسایی شدن مکان دقیق گسل‌های تلخاب و تبرته و یک بلوک رسا در منطقه است.

واژه‌های کلیدی: الکترومغناطیس، مگنتوتلوریک، رسانایی الکتریکی، وارون‌سازی، گسل‌های تلخاب و تبرته، اراک.

1D & 2D Interpretation of The Magnetotelluric data for Detecting Geological Subsurface Structures along an E-W profile in Arak

Ansari, S. M.¹, Oskooi, B.² and Unsworth, M.³

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

² Assistant Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³ Professor, Department of Physics, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada T6G 2J1

(Received: 21 Sept 2008, Accepted: 13 Oct 2009)

Abstract

Reflection and refraction of EM signals at both horizontal and vertical interfaces separate media of different electrical parameters, geoelectromagnetic methods have been developed and employed to recognize the geological features and particularly fault zones in many regions. To achieve higher lateral resolution and also greater depth penetration, the MT method is one of the most effective electromagnetic techniques to imagine the subsurface structures electrically.

In 2006 wide frequency range of magnetotelluric measurements were carried out at the eastern part of the city of Arak in Iran to understand the crustal electrical conductivity of the region by putting emphasis on locating the fault zones. The electric and magnetic field components were acquired along a profile across the geological trend at 15 stations. A robust single site processing followed by the inversion and one dimensional as well as two dimensional modeling was performed. The inversion results revealed electrical

conductivity structures in correlation with geological features. As a significant result, true locations of two major faults, Talkhab and Tabarteh Faults and a conductive block in between were recognized in the Arak area.

Introduction: The area of study is a part of the Arak watershed located in two Central-Iran and Sanandaj-Sirjan Zones. Two parallel faults named Talkhab and Tabarteh pass through the region and divide it into three blocks. The seismicity of the area is controlled by these two parallel faults, especially the Talkhab Fault which is presumed to be the source for seismicity activity in the region (Mirzaei and Ghadimi, 2006). Anomalous crustal conductors are occasionally associated with seismic activity. Fluid is an important factor in the fault zone and many of the active faults are characterized by a great volume of groundwater (Gundmundsson, 2000).

The magnetotelluric method is a passive electromagnetic technique that uses the natural, time varying electric and magnetic field components measured at right angles at the surface of the earth to make inferences about the earth's electrical structure which, in turn, can be related to the geology tectonics and subsurface conditions. Measurements of the horizontal components of the natural electromagnetic field are used to construct the full complex impedance tensor, Z , as a function of frequency. Using the effective impedance, determinant apparent resistivities and phases are computed and used for the inversion. Also the apparent resistivities for both TE and TM mode are computed and used for 2D inversion.

Data Processing, Inversion and Conclusions: MT data were processed using a code from Smirnov (2003) aiming at a robust single site estimate of electromagnetic transfer functions. As the area of study is populated and close to urban noise sources, the recorded data has not good quality which justifies the low coherency between the electric and magnetic channels. We performed 1D inversion of the determinant data using a code from Pedersen (2004) for all sites. Since the quality of the determinant data was acceptable, we performed 2D inversion of the determinant data using a code from Siripunvaraporn and Egbert (2000). Besides an extra 2D inversion of MT data for TE and TM modes was performed using a code from Rodi and Mackie (2001).

The 2D models significantly illustrate two conductive zones, two resistive blocks and a large conductive zone hidden under the Quaternary alluviums along the profile. As significant results, in collaboration with geological information about the presence of the Talkhab and Tabarteh faults the conductivity features can be attributed to the faults. Besides, a probable hidden fault is also recognizable.

Keywords: geoelectromagnetic, magnetotelluric, electrical conductivity, inversion, Talkhab and Tabarteh Faults, Arak.

۱ مقدمه

ساختارهای زیرسطحی است. در روش مگنتوتلوریک از امواج الکترومغناطیسی با بسامد کم برای آشکارسازی ساختارهای زیرسطحی استفاده می‌شود. این امواج بسامدهایی در پهنای 10^{-4} تا 10^3 دارند و از فعالیت‌های ناشی از وقوع آذرخش در مقیاس جهانی و نوسانات مغناطیس سپهری سرچشمه می‌گیرند (وزوف، ۱۹۹۱). این سیگنال‌های الکترومغناطیسی در جو به‌مانند امواج رادیویی

به‌دلیل بازتاب و شکست امواج الکترومغناطیسی (EM) در فصل مشترک‌های افقی و عمودی جداکننده دو محیط با خواص الکتریکی متفاوت، روش‌های الکترومغناطیسی را برای شناسایی عوارض زمین‌شناسی و به‌ویژه زون‌های گسلی به‌کار می‌برند. روش مگنتوتلوریک (MT) به‌دلیل تفکیک‌پذیری جانبی و عمق نفوذ زیاد، یکی از مؤثرترین روش‌های EM برای تصویرسازی الکتریکی از

منجر به آزاد شدن انرژی لرزه‌ای و وقوع زلزله‌های حتی بزرگ مقیاس می‌شوند.

منطقه مورد بررسی قسمتی از حوزه آبریز اراک است که در مرز دو زون ایران مرکزی و سنندج سیرجان جای گرفته است. دو گسل موازی به نام‌های تلخاب و تبرته از منطقه عبور کرده‌اند. رخداد زلزله‌های کوچک مقیاس در اطراف این دو گسل این موضوع را محتمل می‌کند که زلزله‌های بزرگ تری در منطقه به وقوع بپیوندند. بنابراین شناسایی خصوصیات این گسل‌ها باید مورد توجه قرار گیرد.

۲ زمین‌شناسی منطقه

استان مرکزی از دیدگاه زمین‌شناسی در مرز دو زون ایران مرکزی و سنندج سیرجان تشکیل شده است که حدفاصل این دو زون از فرورفتگی‌هایی در جهت شمال غرب و جنوب شرق تشکیل شده است (شکل ۱). اثرات ترشیاری که دوران فعالیت آتشفشانی در ایران است به روشنی در گستره استان دیده می‌شود. فازهای عمده مهم آتشفشانی ترشیاری غالباً در ائوسن، الیگومیوسن و پلیوسن بوده‌اند. دوره کواترنری با یک دوره رسوب‌گذاری خشکی و یک فاز ولکانیزم همراه است. دو گسل تلخاب و تبرته در شمال و جنوب این حوضه، آن‌را به قطعات و بلوک‌هایی تقسیم کرده‌اند.

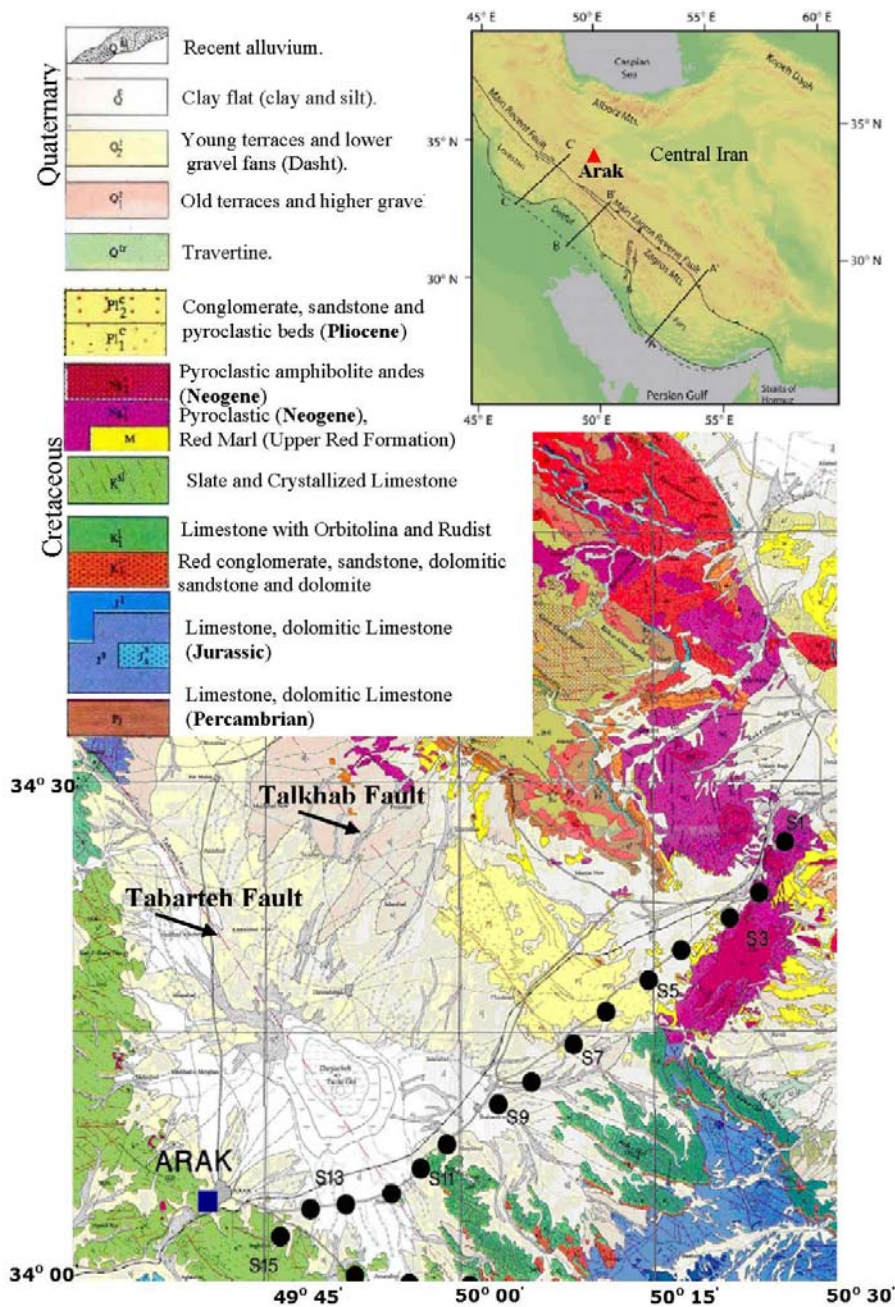
گسل تلخاب جداکننده بلوک آشتیان‌نراق از هفتادقله و گسل تبرته جداکننده هفتادقله از زون سنندج سیرجان است. قدیمی‌ترین بلوک در حوزه را بلوک سنندج سیرجان (ارتفاعات جنوب اراک و ارتفاعات غربی جاده اراک‌فراهان) تشکیل داده است که شامل آهک متبلور، اسلیت آهکی و آهک دولومیتی از زمان ژوراسیک تا پایان کرتاسه است و ممکن است دچار گسل خوردگی و دگرگونی شده و فاقد فعالیت‌های آذرین و آتشفشانی باشد. بعد از آن بلوک هفتادقله (مسیر کوه‌های هفتادقله،

منتقل می‌شوند اما در زمین پخش و به سرعت با عمق میرا می‌شوند. در طول دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ مگنتوتلوریک درحکم یک وسیله شناسایی که می‌توانست تغییرات در ضخامت حوزه‌های ضخیم رسوبی را به تصویر بکشد مورد استفاده قرار گرفت (وزوف، ۱۹۷۲ و اورنج، ۱۹۸۹). آنالیز داده‌ها در آن زمان محدود به مدل‌سازی‌های پیشرو و معکوس یک بُعدی بود که برای مناطقی با ساختار زمین‌شناسی پیچیده قابل اعتماد نبود. در سال‌های اخیر توانایی این روش در آشکارسازی ساختارهای زمین‌شناسی کاملاً بهبود یافته است. این امر با پیشرفت در وسایل اندازه‌گیری و وارون‌سازی و تفسیر دو بُعدی آن محقق شده است. همچنین پیشرفت‌های زیادی در زمینه پردازش داده‌های MT صورت گرفته است که این مرحله برای تبدیل داده‌ها از حوزه زمان به بسامد ضروری است. با توجه به توسعه الگوریتم‌هایی که از روش‌های آماری پایدار (Robust statistics) برای به‌دست آوردن مقاومت ویژه ظاهری استفاده می‌کنند، پردازش این سری‌های زمانی توسعه و بهبود یافته است. این روش‌ها با یک فن خودکار قادر به از بین بردن قسمت‌هایی که در آنها داده‌های نوفه‌دار و نامناسب وجود دارند هستند که این امر منتهی به کاهش بزرگی در چالش‌های پیش روی پردازش داده‌های مگنتوتلوریک شده است (اگبرت، ۱۹۹۷، لارسن و دیگران، ۱۹۹۶).

در این مقاله کاربرد روش مگنتوتلوریک در تصویرسازی از ساختارهای زمین‌شناسی زیرسطحی و به‌ویژه توانایی آن در آشکارسازی زون‌های گسلی بررسی شده است. در بعضی موارد مواد رسانای موجود در پوسته با فعالیت‌های لرزه‌ای در ارتباط‌اند. شاره‌ها عامل مهمی در زون گسل خوردگی‌اند و بسیاری از گسل‌های فعال با حجم زیادی از آب‌های زیرزمینی مشخص می‌شوند (گوندوموندسون، ۲۰۰۰). این شاره‌ها همچنین نقش مهمی در فرایند گسیختگی و آزاد شدن تنش‌ها ایفا می‌کنند و

به سنگ‌های موجود، فعالیت شدیدی از زمان بعد از کرتاسه داشته است. واحد اخیر جوان‌ترین بلوک در حوزه آبخیز دشت اراک است. با توجه به وضعیت گسل، درزه، چین‌خوردگی و خصوصاً چینه‌شناسی سه بلوک مشخص شده، پنانسیل آبی بلوک آشتیان‌نراق کمتر از بلوک سنندج سیرجان و بلوک اخیر کمتر از هفتادقله است.

کویر میقان اراک و فرمپهن) شامل سنگ‌های شیلی و ماسه‌سنگ تیره ژوراسیک و آهک کرتاسه است که فاقد پدیده‌های دگرگونی است و شدیداً چین‌خورده و دارای تاقدیس‌ها و ناودیس‌های متوالی است و نظیر سنندج سیرجان فاقد فعالیت آتشفشانی است. باین‌حال بلوک آشتیان‌نراق دارای فعالیت شدید آتشفشانی است و با توجه



شکل ۱. شهر اراک در حد فاصل دو زون ایران مرکزی و سنندج سیرجان (تغییر داده شده از مک کواری ۲۰۰۴). نقشه زمین‌شناسی، مکان ایستگاه‌های مگنتوتلوریک،

مکان گسل‌ها و زون‌ها در منطقه مورد بررسی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰.

یا عمود بر آن (مد مغناطیسی عرضی یا مد (Transverse Magnetic, TM) باشد با هم متفاوت خواهند بود. بر طبق رابطه کاننارد (۱۹۵۳) مقاومت ویژه ظاهری ρ_a و فاز ϕ با روابط زیر از Z مشتق می‌شوند.

$$\rho_a = \frac{1}{2\pi f \mu} |Z|^2 \quad (2)$$

$$\varphi = \tan^{-1}(\arg(Z))$$

داده‌های مگنتوتلوریک با استفاده از کد اسمیرنوف (۲۰۰۳) پردازش شده‌اند که با استفاده از روش‌های پردازشی پایدار (Robust methods) تابع تبدیل ژئومغناطیسی را به دست می‌دهد. شکل ۲ منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری و فاز امیدانس را برای ایستگاه‌های متفاوت برحسب دوره تناوب برای انتشار جریان در دو جهت عمود برهم (مدهای TE و TM) نشان می‌دهد.

با توجه به منحنی‌های مقاومت ویژه در ایستگاه‌های S_1 و S_{10} مشاهده می‌شود که یک جابه‌جایی عمودی بین منحنی‌ها برای انتشار جریان در دو جهت اندازه‌گیری ایجاد شده است که جابه‌جایی ایستا (Static shift) نام دارد. بر طبق وزوف (۱۹۹۱) این جابه‌جایی با میدان الکتریکی تولید شده از بارهای جمع شده روی ناهمگنی‌های سطحی ایجاد می‌شود و در نتیجه باعث کاهش میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده و متعاقب آن کاهش امیدانس و در نهایت کاهش مقاومت ویژه ظاهری می‌شود. برای از بین بردن این جابه‌جایی‌ها از داده‌های دترمینان استفاده شده است که میانگینی از جهت‌های انتشار جریان فراهم می‌کند و همچنین مستقل از جهت امتداد الکترومغناطیسی است. هم‌پوشانی منحنی‌های مقاومت ویژه برای داده‌های دو مد TE و TM در ایستگاه‌های S_7 و S_8 در دوره‌های کم (کمتر از ۱ ثانیه) دلالت بر وجود ساختاری یک بُعدی در این دوره دارد. البته همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود این انطباق در دوره‌های زیاده‌تر از بین می‌رود و ساختارهای آشفته‌تر

۲ برداشت، پردازش و تحلیل بعد داده‌های مگنتوتلوریک

۱-۲ برداشت داده‌ها

۱۵ ایستگاه مگنتوتلوریک در امتداد یک نیم‌رخ با جهت SW-NE در امتدادی عمود بر دو گسل تلخاب و تبرته که سه زون نشان داده شده در شکل ۱ را قطع می‌کنند طراحی شدند. ایستگاه‌های S_1 تا S_7 در زون آتشفشانی آشتیان‌نراق قرار دارند. به‌خاطر کیفیت نامناسب داده‌ها در ایستگاه S_6 این داده‌ها از محاسبات بعدی خارج شدند. ایستگاه‌های S_8 تا S_{12} در زون انتقالی هفتادقله و ایستگاه‌های S_{13} تا S_{15} در زون قدیمی‌تر سنج سیرجان قرار گرفته‌اند. در محل هر ایستگاه دو مؤلفه میدان الکتریکی (E_x و E_y) با استفاده از دو جفت الکتروود و همچنین سه مؤلفه میدان مغناطیسی (H_x , H_y , H_z) با استفاده از سه مغناطیس سنج پیچیده القایی در یک دستگاه مختصات راست‌گرد و در گستره بسامدی ۱۰۰ تا ۰٫۰۱ هرتز اندازه‌گیری شدند. فاصله معمول بین ایستگاه‌های مگنتوتلوریک ۵ کیلومتر است و به دلیل هموار بودن منطقه از تصحیح توپوگرافی صرف‌نظر شده است.

۲-۳ پردازش و تحلیل بعد داده‌ها

تانسور امیدانس MT با استفاده از مؤلفه‌های افقی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به‌منزله تابعی از بسامد بر طبق رابطه زیر به دست می‌آید.

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

مؤلفه‌های تانسور امیدانس در یک زمین دو بُعدی بسته به این که میدان الکتریکی موازی امتداد الکترومغناطیسی (مد الکتریکی عرضی یا مد (Transverse Electric, TE)

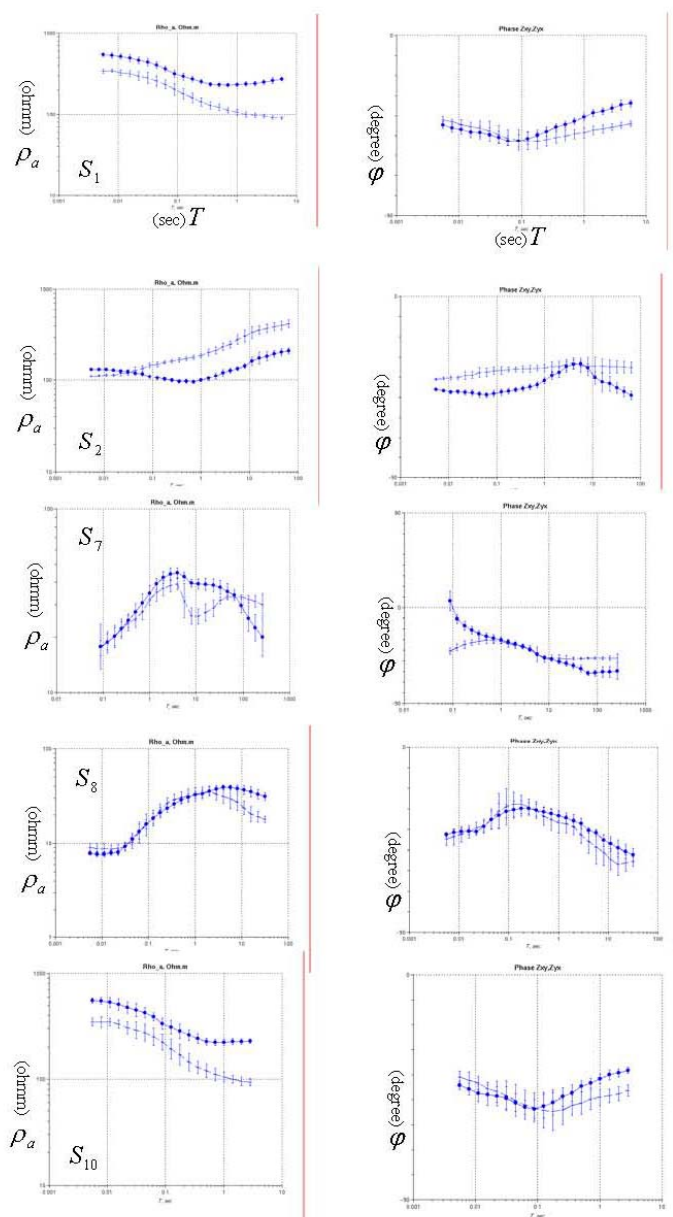
سه‌بُعدی نامتقارن را مشخص می‌کند. اگر مقدار پارامتر اسکيو نزدیک به صفر (کمتر از ۰٫۲) باشد بیانگر این مطلب است که ساختار زیرزمین یک‌بُعدی یا دو‌بُعدی غیرآشفته است. این منحنی‌ها برای سایت‌های متفاوت در منطقه اراک برحسب دوره در طول نیم‌رخ در شکل ۳ نشان شده است. در اکثر سایت‌ها این مقدار کمتر از ۰٫۲ است و در نتیجه زمین منطقه را می‌توان $1D$ یا $2D$ غیرآشفته در نظر گرفت.

دو‌بُعدی و سه‌بُعدی مشاهده می‌شود.

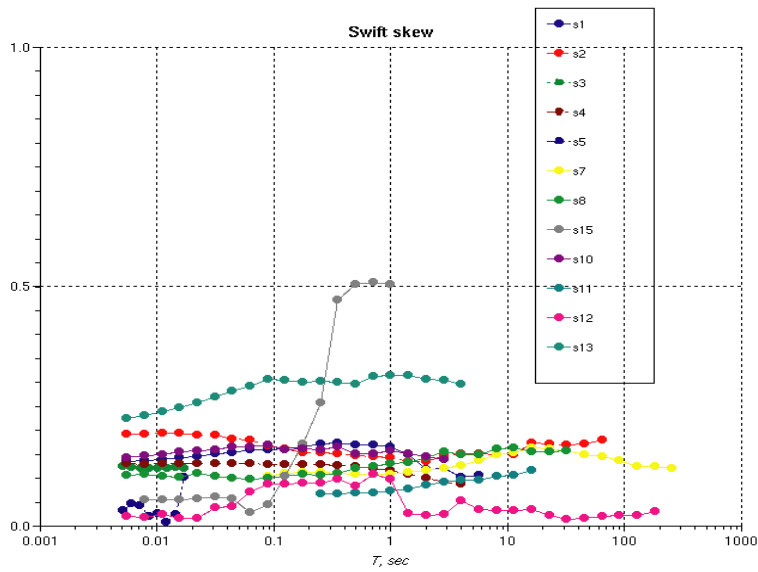
یکی از پارامترها که برای تحلیل ابعادی داده‌های MT به کار می‌رود اسکيو (Skew) است که به صورت رابطه زیر بیان می‌شود،

$$Skew = \left| \frac{Z_{xx} + Z_{yy}}{Z_{xy} - Z_{yy}} \right| \quad (۳)$$

این کمیت یک اندازه‌گیری از تقارن محیط صورت می‌دهد. انحراف اسکيو از صفر وجود یک ساختار



شکل ۲. منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری و فاز سونداژهای MT برای بعضی از ایستگاه‌ها در نیم‌رخ اندازه‌گیری. سمبل \oplus برای مد TE و سمبل \ominus برای مد TM در نظر گرفته است.



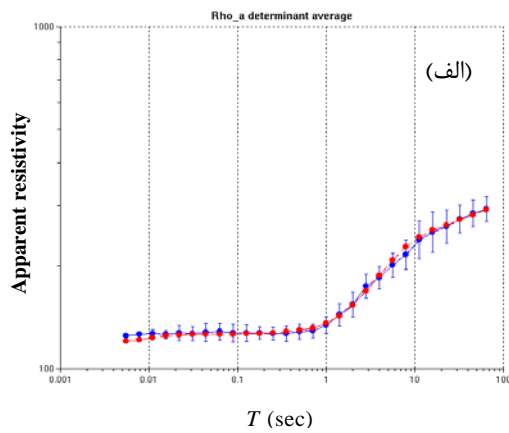
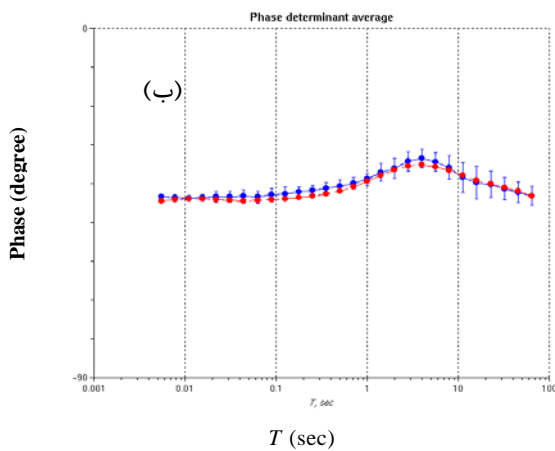
شکل ۳. نمایش پارامتر اسکيو برای سایت‌های واقع در امتداد پروفیل اندازه‌گیری.

شده‌اند. منحنی‌های سرخ رنگ پاسخ مدل یک‌بُعدی به‌دست آمده از مرحلهٔ نهایی وارون‌سازی داده‌ها هستند. نمایش این داده‌ها و پاسخ مدل آنها نشان‌دهندهٔ چگونگی تطبیق مدل به‌دست آمده با مدل واقعی زمین است. مدل‌های یک‌بُعدی حاصل از وارون‌سازی داده‌ها در شکل ۵ برای ۴ ایستگاه نمایش داده شده‌اند که نشان‌دهنده چگونگی تغییرات در رسانایی لایه‌های زمین در محل هر ایستگاه‌اند.

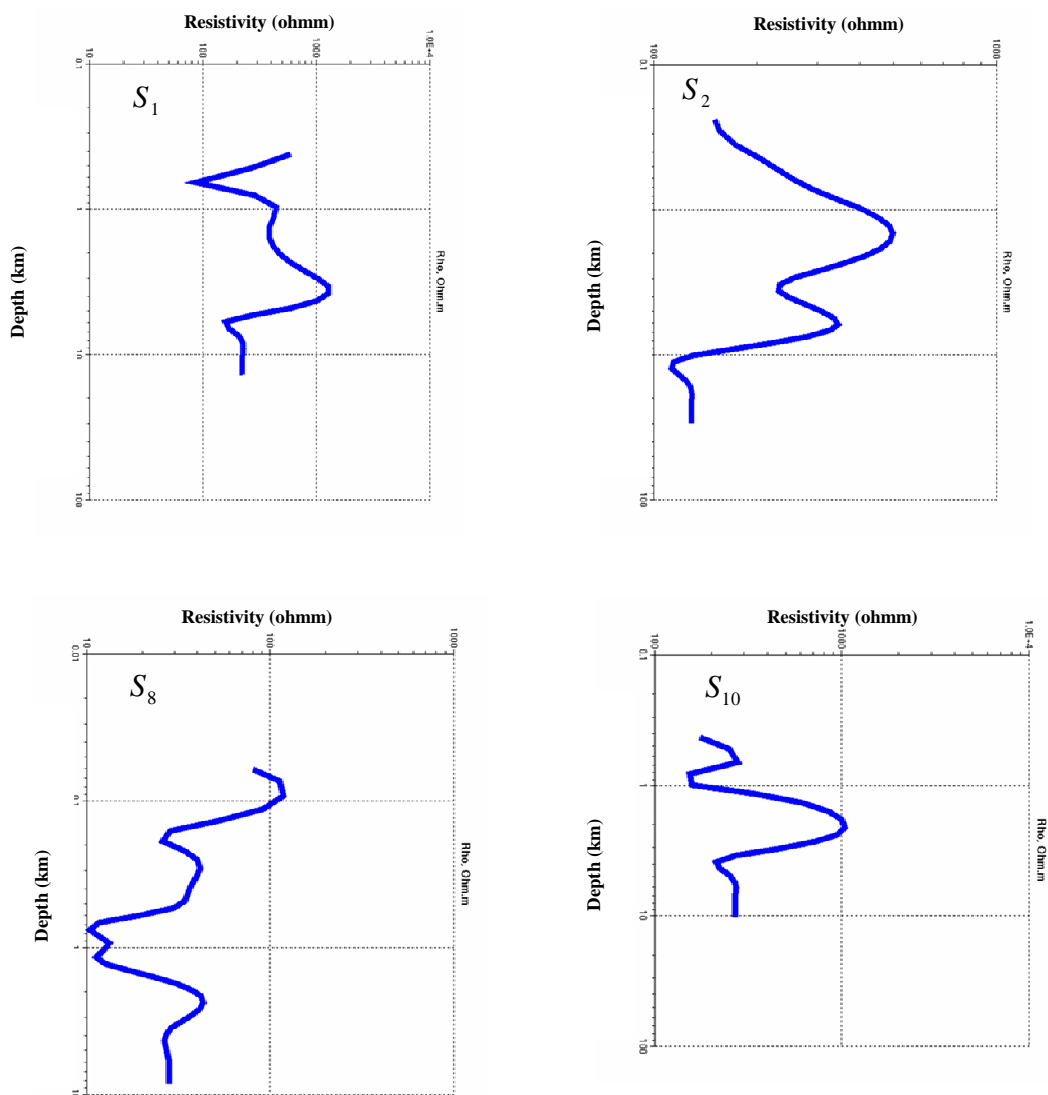
۴ وارون‌سازی و تفسیر داده‌ها

۴-۱ وارون‌سازی یک‌بُعدی

وارون‌سازی یک‌بُعدی داده‌های دترمینان با استفاده از رهیافت عرضه شده از سوی پدرسن (۲۰۰۴) صورت گرفته است. داده‌های دترمینان به‌صورت مقاومت ویژه ظاهری و فاز امپدانس به‌منزلهٔ ورودی به برنامهٔ وارون‌سازی پدرسن (۲۰۰۴) داده شده‌اند که به ترتیب در قسمت‌های الف و ب شکل ۴ با رنگ آبی نشان داده



شکل ۴. وارون‌سازی یک‌بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک محاسبه شده برای سایت S_2 در امتداد نیم‌رخ الف (مقاومت ویژه ظاهری و ب) فاز امپدانس.

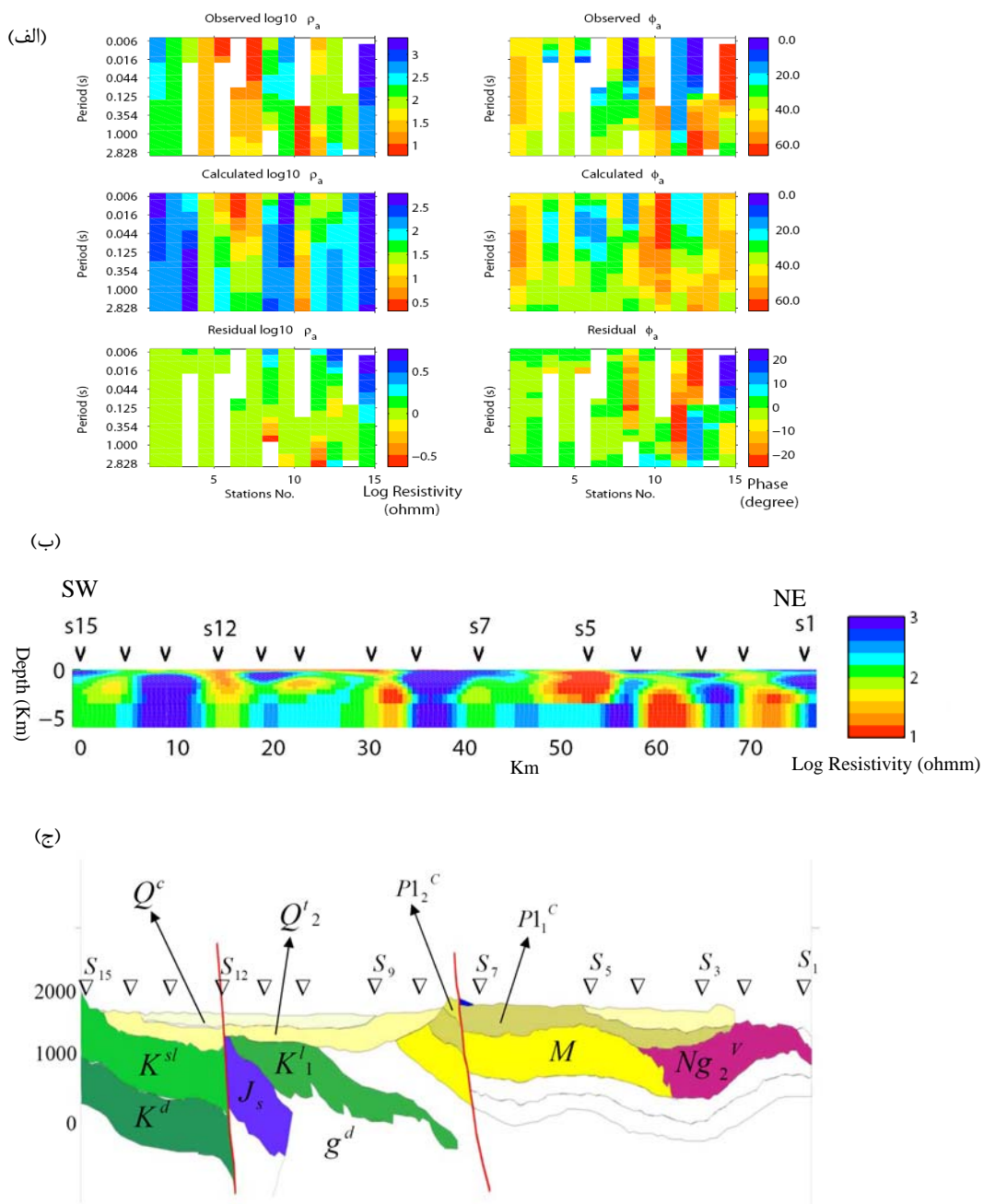


شکل ۵. مدل‌های به دست آمده از وارون‌سازی یک‌بُعدی داده‌های مکتوتلوریک در امتداد نیم‌رخ.

الف، قاب بالایی شامل داده‌های صحرائی براساس دوره و ایستگاه اندازه‌گیری شده، قاب دوم پاسخ مدل زمینی (پاسخ آخرین مدل حاصل از برگردان) قاب سوم تفاضل ریاضی بین مقدار داده‌های مشاهده شده در صحرا و مقدار داده‌های محاسبه شده از مدل نهایی است. شکل ۶-ب مدل زمینی مقاومت ویژه حقیقی و قسمت ج مقطع زمین‌شناسی در امتداد نیم‌رخ مربوط است.

۴-۲ وارون‌سازی و تفسیر دو بُعدی داده‌ها

داده‌های مقاومت ویژه و فاز امپدانس با استفاده از دو الگوریتم مدل‌سازی متفاوت برگردان شدند. در ابتدا به مدل‌های به دست آمده از وارون‌سازی از الگوریتم REBOCC می‌پردازیم. این الگوریتم درحقیقت وارون‌سازی تقلیل یافته برپایه روش OCCAM است که سیریونواراپورن و اگبرت (۲۰۰۰) آن را معرفی کرده‌اند. در شکل‌های مربوط به برگردان دو بُعدی در شکل ۶-



شکل ۶. الف) داده‌های مشاهده شده، پاسخ مدل و مقدار باقی‌مانده، ب) مقطع دو بُعدی مقاومت ویژه برحسب عمق و ج) مقطع زمین‌شناسی در امتداد نیم‌رخ Q^c : صفحات رسی (کوآترنری)، Q'_2 : تراس‌های جوان و مخروطه‌افکنه‌های گراولی (کوآترنری)، $P1_1^c$: کنگلومرا، ماسه‌سنگ و صفحات آذرآواری (پلیوسن)، $P1_2^c$: مواد آذرآواری غیرمتراکم و کنگلومراهای آتشفشانی (پلیوسن)، M : مارن‌های قرمز مربوط به سازند قم (میوسن)، K_1^l : سنگ آهک همراه با اوربیتولینا (کرتاسه)، K^{sl} : سنگ آهک اسلیتی (کرتاسه)، K^d : سنگ آهک دولومیتی (کرتاسه)، J_s : ماسه‌سنگ (ژوراسیک)، g^d : گرانودیوریت، کوآرتزیدیوریت (میوسن)، Ng_2^v : مواد آذرآواری و آندزیت‌ها (نوژن).

در مدل نهایی نشان داده شده در شکل ۶-ب در قسمت‌های فوقانی یک ساختار با مقاومت ویژه زیاد در محل سایت‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ دیده می‌شود که در توافق با زون آتشفشانی آشتیان‌نراق، دلیلی بر وجود مواد آذرآواری و آندزیت‌ها، آندزیت‌های بازالتی از دوره نئوژن و سنوزوئیک است. در فاصله بین ایستگاه‌های اول و دوم یک زون با رسانایی متوسط مشاهده می‌شود که در عمق تقریبی ۲ کیلومتر به بیشترین رسانایی خود رسیده است و قابل نسبت دادن به مارن‌های قرمز میان‌لایه‌ای از سازند قم است. این اثر در فاصله بین ایستگاه‌های ۳ و ۴ هم قابل مشاهده است. زون نشان داده شده در محل ایستگاه ۵ نشانه خوبی از سازندهای رسی مربوط به دوران کواترنری است. به‌خاطر کیفیت بد داده‌ها در ایستگاه ۶، داده‌های مربوط به این ایستگاه در مدل‌سازی دو بُعدی وارد نشده است. ایستگاه ۷ که در مجاورت گسل تلخاب قرار دارد یک لایه مقاوم را در سطح نشان می‌دهد که با رفتن به عمق، تبدیل به عارضه‌ای با مقاومت ویژه کمتر می‌شود. ایستگاه ۸ روی یک سازند مقاوم قرار گرفته است. احتمالاً اطلاعات مربوط به این ایستگاه روی نقشه زمین‌شناسی وارد نشده است. ایستگاه ۹ در مرز سازندهای رسی و سنگ آهک قرار گرفته است که یک عارضه رسانا از سطح تا اعماق در آن به تصویر کشیده شده است (تراس‌های جوان و رس همراه با سیلت) که می‌تواند دلیلی بر وجود یک گسل پنهان در امتداد نیم‌رخ باشد. سایت ۱۲ که روی گسل تبرته قرار گرفته است یک زون رسانای گسترش یافته تا عمق تقریبی ۳ تا ۴ کیلومتر با جهت شیب شمال شرقی را نشان می‌دهد که شامل شاره‌هایی همراه با کانی‌های رسی و سیلت است. در محل سایت‌های ۱۳ تا ۱۵ مجدداً سازندهای مقاومی از جنس مخروطه‌افکنه‌های گراولی از دوران کواترنری و سنگ آهک‌های اسلیتی و دولومیتی مربوط به کرتاسه پایینی در این مقطع قابل

تشخیص هستند.

وارون‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک در مدهای TE، TM و ترکیب آنها با استفاده از کد وارون‌سازی رودی و مک‌کی (۲۰۰۱) نیز صورت گرفته است. همان‌طوری که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، بسامدهای به‌شدت نوفه‌دار از داده‌های مشاهده شده حذف شده‌اند تا نتایج قابل اطمینان‌تری از وارون‌سازی آنها به‌دست آید. با توجه به وضعیت زمین‌شناسی منطقه، راستای $N45^{\circ}E$ به‌منزله امتداد الکترومغناطیسی در نظر گرفته شد و داده‌ها براساس آن چرخش داده شدند. بعد از اعمال تصحیحات ایستا، داده‌های حوزه بسامد MT به یک مدل دو بُعدی ژئوالکتریکی تبدیل شدند. بعد از وارون‌سازی مدل نشان داده شده در شکل ۸ به‌دست آمده است که تعادلی قابل قبول بین برازش با داده‌های MT و همواری مدل به‌دست می‌دهد.

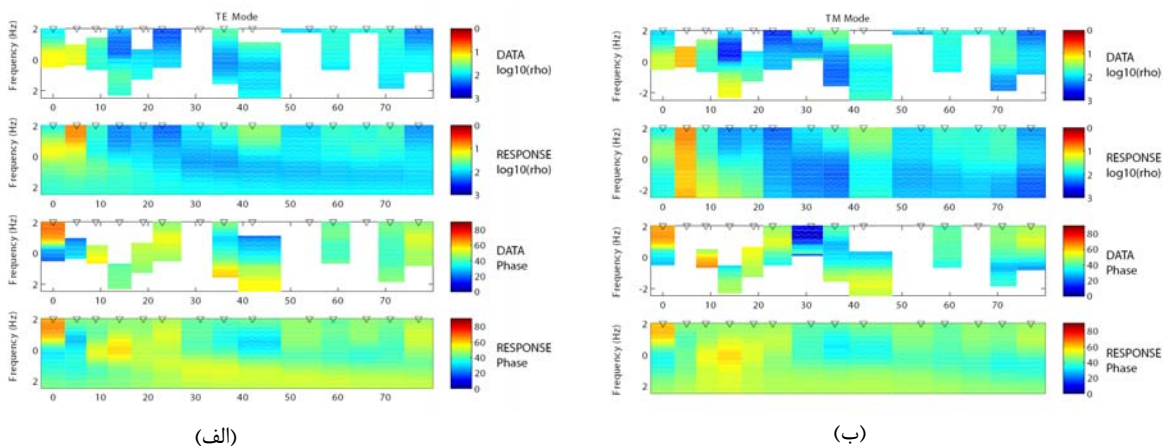
با توجه به مقطع به‌دست آمده از وارون‌سازی داده‌ها در شکل ۸ دو زون مقاوم R_1 و R_2 با مقاومت ویژه‌های بیشتر از ۵۰۰ اهم‌متر در دو طرف نیم‌رخ مشاهده می‌شوند که در بخش شمال شرقی (R_1) نیم‌رخ از سطح تا عمق فراتر از ۲۰ کیلومتر و در بخش جنوب غربی نیم‌رخ (R_2) از عمق حدود ۳ کیلومتری تا ۱۰ کیلومتر به سمت اعماق گسترش یافته‌اند. این دو زون مقاوم را می‌توان در حکم مجموعه‌های پی‌سنگی قدیمی سنگ آهک و سنگ آهک دولومیتی و متعلق به دوران پرکامبرین تفسیر کرد.

با حرکت از این دو زون مقاوم به سمت مرکز نیم‌رخ مقاومت ویژه توده‌ها و لایه‌های سنگی به کمتر از ۳۰۰ اهم‌متر می‌رسد، سپس به زونی با مقاومت ویژه کمتر و مربوط به دوران مزوزوئیک شامل توالی لایه‌های سنگ آهک و شیل و مارن و کنگلومرا خواهیم رسید. مناطق مشخص شده با علامت‌های A و B به‌منزله زون گذار (transition zone) در نظر گرفته می‌شوند. با عبور از این

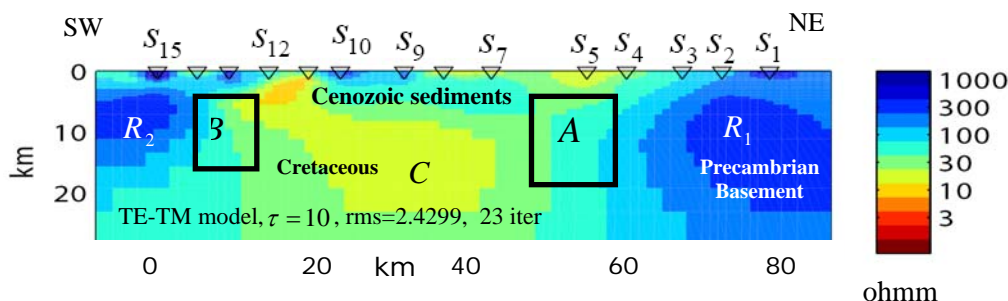
رسانای موجود در گسل تلخاب تفسیر می‌شود. عارضه قابل‌توجه دیگری با مقاومت ویژه ۱۰ اهم‌متر در زیر ایستگاه S_{12} قرار گرفته است که قابل نسبت دادن به شماره‌های همراه با کانی‌های رسی در گسل تبرته است. این عارضه با محیطی پوشش داده شده است که ادامه بلوک C به سمت بالا است. بلوک C با مقاومت ویژه پایین امتداد و جهت شیب شمال غربی- جنوب شرقی (در روی صفحه کاغذ) را برای گسل تبرته مشخص می‌کند. زون‌های مقاوم و رسانا با توجه به مقطع به‌دست آمده از وارون‌سازی داده‌ها در جدول ۱ به تفکیک آورده شده است.

دو منطقه به سمت مرکز نیم‌رخ، به ساختارهایی متعلق به دوران مزوزوئیک بالایی یعنی کرتاسه، و در نهایت در نزدیک سطح به ساختارهای رسوبی سنوزوئیکی نزدیک می‌شویم.

نکته قابل توجه در این شکل وجود یک بلوک رسانای عمیق C ($20\Omega m$) است که مرکز آن در محل ایستگاه S_9 است و از عمق تقریبی ۸ تا ۲۰ کیلومتر گسترش یافته است. به نظر می‌رسد که این زون با دو گسل موازی تلخاب و تبرته قطع شده است. در ایستگاه S_7 با حرکت از سطح به عمق، مقاومت ویژه کاهش یافته است و با رسیدن به عمق ۱۰ کیلومتری به مقدار تقریبی ۲۰ اهم‌متر می‌رسد. این محل درحکم مکان وجود شماره‌ها و مواد



شکل ۷. شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری و فاز (داده‌های مشاهده شده و پاسخ مدل) در امتداد نیم‌رخ اندازه‌گیری برای مدهای (الف) TE و (ب) TM بر حسب فرکانس.



شکل ۸. مقطع مقاومت ویژه برحسب عمق، حاصل از وارون‌سازی مشترک داده‌های TE و TM: بعد از ۲۳ تکرار مقدار 2.4299 برای r.m.s به‌دست آمده است. هموارشدگی مدل با پارامتر قاعده‌مهندسازی (τ) کنترل می‌شود.

جدول ۱. تفکیک زون های مقاوم و رسانا با توجه به مقطع بدست آمده از وارن سازی داده ها.

| زون | مقاومت ویژه (Ohm-m) | عمق تا سطح فوقانی (Km) | ضخامت (Km) | ساختار زمین شناسی |
|-----|------------------------|---------------------------|---------------|---|
| A | ۱۰۰-۳۰ | ۵ | ۱۲ | سنگ آهک، شیل، مارن و کنگلومرا مربوط به دوران مزوزوئیک |
| B | ۱۰۰-۲۰ | ۵ | ۱۰ | سنگ آهک، شیل، مارن و کنگلومرا مربوط به دوران مزوزوئیک |
| C | ۲۰ | ۸ | ۱۲ | شاره های همراه به کانی های رسی با ساختارهای متعلق به دوران کرتاسه |
| R1 | ۵۰۰ | سطح | فرا تر ۲۰ | پی سنگ های قدیمی سنگ آهک و سنگ آهک دولومیتی، متعلق به دوران پرکامبرین |
| R2 | ۵۰۰ | ۳ | ۷ | پی سنگ های قدیمی سنگ آهک و سنگ آهک دولومیتی، متعلق به دوران پرکامبرین |

۵ نتیجه گیری

در این مقاله روش اکتشافی مگنتوتلوریک به منظور آشکار سازی ساختارهای زیر سطحی در امتداد یک نیم رخ شرقی غربی در شرق شهر اراک به کار رفته است. نتایج نهایی نشان دهنده این است که با به کار بردن روش پیشرفته مگنتوتلوریک، اطلاعات بسیار سودمندی به دست خواهد آمد. در این روش تباین در خواص الکتریکی مواد ساختارهای زمین شناسی را مشخص می کند.

وارون سازی دو بُعدی داده های مگنتوتلوریک با استفاده از دو کد وارون سازی صورت گرفته است که به ترتیب نتایج حاصل با زمین شناسی منطقه به خوبی مطابقت دارد. مدل به دست آمده از کد وارون سازی REBOCC ساختار مقاومت ویژه زیر سطحی را تا عمق ۵ کیلومتر به تصویر کشیده است. در وارون سازی داده ها با این روش از دترمینان داده ها در حکم ورودی استفاده شده است که میانگینی از همه جهت های جریان فراهم کرده و همچنین مستقل از جهت امتداد الکترومغناطیسی است. مدل دو بُعدی واحدهایی با مقاومت ویژه زیاد مانند کنگلومرا، سنگ آهک، یک سازند رسی و دو گسل مهم و همچنین یک گسل پنهان را در طول نیم رخ مشخص کرده است. در محل ایستگاه ۷ یک سازند مقاوم در سطح مشاهده شده است. با رفتن به عمق، مقاومت ویژه کاهش

پیدا می کند و به رسانایی متوسط می رسد که دلیلی بر وجود گسل مدفون شده تلخاب در زیر رسوبات کواترنری است. در فاصله بین سایت های ۸ و ۹ یک واحد رسانا دیده می شود که قابل نسبت دادن به گسل پنهان موجود در منطقه است. یکی از نتایج مهم بررسی این مقطع، تشخیص گسل تیره با جهت شیب شمال شرق است. وارون سازی داده های مگنتوتلوریک با کد وارون سازی رودی و مک کی (۲۰۰۱) نیز صورت گرفت و به منزله نتیجه مقطع نشان داده شده در شکل ۸ به دست آمد. برای به دست آوردن این مقطع از داده های MT در مدهای TM و TE به منزله ورودی استفاده شده و وارون سازی مشترک (Joint inversion) صورت گرفته است. سازندهای زمین شناسی از دوران های گوناگون تا عمق ۲۰ کیلومتری روی این مقطع قابل تشخیص هستند. دو زون مقاوم در دو طرف نیم رخ و همچنین یک زون خرد شدگی در مرکز مشخص شده است. مهم ترین عارضه موجود در این زون، شکستگی بلوک رسانای C است که در اثر ترکیب شاره های ایجاد شده از بی آب شدن (Dehydration) کانی ها در فرایندهای دگرگونی و آب های جوئی ایجاد شده است. این بلوک رسانا با تخلخل زیاد با رسوبات مربوط به واحدهای سنوزوئیک و

- Fiordelisi, A. and Rieven, S., 1996, Robust smooth magnetotelluric transfer functions, *Geophys. J. Int.*, **124**, 801–819.
- McQuarrie Nadine, 2004, Crustal scale geometry of the Zagros fold–thrust belt, Iran, *Journal of Structural Geology*, **26**, 519–535.
- Orange, A. S., 1989, Magnetotelluric exploration for hydrocarbons, *Proc. IEEE*, **77**, February.
- Pedersen, L. B. and Engels, M., 2005, Routine 2D inversion of magnetotelluric data using the determinant of the impedance tensor. *Geophysics*, **70**, G33-G41.
- Rodi, W., and Mackie, R., 2001, Nonlinear conjugate gradient algorithm for twodimensional magnetotelluric inversion, *Geophysics*, **66**, 174-187.
- Siripunvaraporn, W. and Egbert, G., 2000, An Efficient Data-Subspace Inversion Method for 2-D Magnetotelluric Data, *Geophysics*, **65**, 791-803.
- Smirnov, M. Yu., 2003, Magnetotelluric data processing with a robust statistical procedure having a high breakdown point. *Geophys. J. Int.*, **152**, 1-7.
- Swift, C. M., 1967, A magnetotelluric investigation of electrical conductivity anomaly in the southwestern United States, PhD Thesis Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Unsworth, M. J., Malin, P. E., Egbert, G. D., Booker, J. R., 1997, Internal structure of the San Andreas fault at Parkfield, California. *Geology*, **25**(4), 359–362.
- Vozoff, K., 1991, The Magnetotelluric Method in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, M. N. Nabighian, Ed. (SEG, Tulsa), **2**, chapter 8.

آبرفت‌های کواترنری پوشیده شده است. سازند رسی مشاهده شده در محل ایستگاه ۵ با مقاومت تقریبی ۱۰ اهم‌متر در هر دو مقطع به‌خوبی مشاهده می‌شود. مهم‌ترین نتیجه از وارون‌سازی، مشخص شدن محل و جهت شیب گسل تبرته است. نتیجه مفیدی که از این تحقیق گرفته شد این است که، داده‌های مگنتوتلوریک علاوه بر تصویرسازی از ساختارهای زیرسطحی، اطلاعات قابل اعتمادی در مورد هیدرولوژی منطقه به‌دست می‌دهند. همان‌طور که در مقطع به‌دست آمده مشاهده می‌شود، با حرکت از ایستگاه S_7 به سمت غربی نیم‌رخ زون رسنای C ضخیم‌تر می‌شود و پتانسیل آبی منطقه افزایش می‌یابد که این امر در توافق با اطلاعات زمین‌شناسی و محلی است. آب‌های نفوذی در سنگ بستر شکسته می‌شوند و در امتداد صفحه گسل‌ها عاملی برای آزاد شدن استرس‌ها و رخداد زلزله‌ها هستند.

منابع

- میرزایی، م. و قدیمی، ف.، ۱۳۸۵، گزارش زمین‌شناسی: بررسی گسل‌های تبرته و تلخاب، دانشگاه اراک.
- Byerlee, J., 1990, Friction, over pressure and fault normal compression, *Geophys. Res. Lett.* **17**, 2109-2112.
- Egbert, G. D., 1997, Robust multiple-station magnetotelluric data processing, *Geophys. J. Int.*, **130**, 475-496.
- Etheridge, M. A., Wall, V. J., Cox, S. F. and Vernon, R. H., 1984, High fluid pressures during regional metamorphism and deformation: implication for mass transport and deformation mechanisms. *J. Geophys. Res.* **89**, 4344–4358.
- Gundmundsson, A., 2000, Active fault zones and groundwater flow. *Geophys. Res. Lett.* **27**, 2993–2996.
- Hickman, S., Sibson, R., Bruhn, R., 1995, Introduction to special section: mechanical involvement of fluids in faulting. *J. Geophys. Res.* **100**, 12831–12840.
- Larsen, J. C., Mackie, R. L., Manzella, A.,