

بررسی مخزن زمین‌گرمایی منطقه محلات استان مرکزی با استفاده از برگردان یک‌بُعدی و دو‌بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک

بهروز اسکویی^{۱*}، بهنام محمدی^۱ و محمود میرزایی^۲

^۱ مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانشگاه صنعتی اراک، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۳/۱۷، تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۱/۱۹)

چکیده

در این مقاله بررسی مخزن زمین‌گرمایی با استفاده از داده‌های مگنتوتلوریک در سال ۲۰۱۱ صورت گرفته است. ناحیه مورد بررسی در ۱۵ کیلومتری شهرستان محلات واقع در استان مرکزی است. اندازه‌گیری‌های مگنتوتلوریک در ۱۷ ایستگاه با فواصل ۵۰۰ متر صورت گرفته است. روش میدان طبیعی مگنتوتلوریک شیوه بسیار مفیدی در به نقشه درآوردن ساختار زیرسطح است و به علت عمق نفوذ زیاد، یکی از موثرترین روش‌های الکترومغناطیسی برای شناسایی سامانه‌های زمین‌گرمایی است. پردازش داده‌ها و وارون‌سازی یک‌بُعدی برای هر کدام از ایستگاه‌ها صورت گرفت و در ادامه وارون‌سازی دو‌بُعدی این داده‌ها به انجام رسید. نتایج به‌دست آمده از وارون‌سازی و مدل حاصل از داده‌های دترمینان، رسانایی الکتریکی ساختارها را در توافق خوبی با داده‌های زمین‌شناسی مشخص کرده است. مهم‌ترین این نتایج وجود یک زون رسانا بین دو زون مقاوم است که زون رسانا را می‌توان به مخزن زمین‌گرمایی نسبت داد. این زون در عمق بین ۸۰۰ تا ۲۰۰۰ متر قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: الکترومغناطیس، پردازش، رسانایی الکتریکی، زمین‌گرمایی، مگنتوتلوریک، وارون‌سازی

A study on the geothermal reservoirs in Mahallat area, Markazi Province by 1D and 2D inversion of the magnetotelluric data

Behrouz Oskooi^{1*}, Behnam Mohammadi¹ and Mahmoud Mirzaei²

¹Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²Industrial University of Arak, Iran

(Received: 6 June 2012, accepted: 8 February 2014)

Summary

Magnetotelluric (MT) method is an important passive surface geophysical method which uses the Earth's natural electromagnetic fields to investigate the electrical resistivity structure of the subsurface. In thermal areas, the electrical resistivity is substantially of a different form and generally lower than in areas with colder subsurface temperatures. The selected MT profile in the region crosses over the hydrothermally altered zones and different geological structures. Reflection and refraction of EM signals at both horizontal and vertical interfaces separates the media of different electrical parameters.

*Corresponding author:

boskooi@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

Electromagnetic methods have been developed and employed to recognize the geological features and particularly fault zones in many regions. To achieve a 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. For subsurface mapping purposes, the long period natural-field MT method proved to be very useful. The MT method, due to a high penetration depth, is one of the most effective electromagnetic methods to recognize deep geothermal systems.

In this study, the geothermal reservoirs were conducted using Magnetotelluric (MT) data. Mahallat in Markazi Province was chosen as the case study area and the MT survey was carried out at 17 sites with a 500-meter distance between stations using GMS05 (Metronix, Germany) systems. Three magnetometers and two pairs of non-polarizable electrodes were connected to this five-channel data logger. The experimental setup included four electrodes distributed at a distance of 100 m in north-south (Ex) and east-west (Ey) directions.

Measurements of the horizontal components of the natural electromagnetic field were used to construct the full complex impedance tensor, Z , as a function of frequency. Using the effective impedance, determinant apparent resistivities and phases were computed and used for the inversion. The 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 the study was populated and close to electric noise sources and travertine mines, the recorded data did not have a good quality to justify the low coherency between the electric and magnetic channels. Since it was assumed that the earth structure was largely 2D for the purpose of a 2D inversion, the 3D structure would appear in the data as noise. We performed a 1D inversion of the determinant data using a code from Pedersen (2004) for all sites. The 2D modeling was applied to the data to explain the data if their responses fitted the measured data within their errors. Generally, the better the fit between measured and predicted data, the better the model resolution. The 2D inversion of the TE-, TM-, TE+TM and DET-mode data using a code from Siripunvaraporn and Egbert (2000) were performed. The data were calculated as apparent resistivities and phases. Apparent resistivity and phase data exhibited fairly different characteristics in the TE- and TM-modes. The determinant provides a useful average of the impedance for all current directions. Since the quality of the determinant data was acceptable, 2D modeling of the determinant data would be expected to provide a more reasonable approximation of the true subsurface structure. Therefore, we used the model obtained from the DET-mode data as an interpretation model. The resistivity model obtained from the DET-mode is consistent with the geological model of the Mahallat region down to two kilometers. From surface down to about 400 m depth, there is a conductive layer (<30 ohm-m) showing a variable thickness along the profile, which is hydrogeologically interpreted as the penetrated zone for water. The surface was covered by clay and sand making it a good condition for keeping water. The conductive zone located in the middle part of the profile was interpreted as a geothermal reservoir that its estimated depth ranged from 800 m down to 2000 m. The conductive zone was hidden under the Quaternary alluviums and travertine stones along the profile.

Keywords: Electromagnetic, processing, geothermal, magnetotelluric, inversion

زمین به منزله چشمه استفاده می‌کند. تغییرات در میدان مغناطیسی طبیعی زمین باعث ایجاد امواجی در نوار بسامدی 10^{-4} تا 10^3 هرترتز می‌شود. در روش

۱ مقدمه

روش مگنتوتلوریک (MT) روشی الکترومغناطیسی در حوزه بسامد است که از تغییرات طبیعی میدان مغناطیسی

منابع زمین گرمایی هدف‌های آرمانی برای روش‌های الکترومغناطیسی هستند. زیرا باعث تغییرات شدید در مقاومت الکتریکی زیرسطحی می‌شوند. در نواحی‌ای که منابع زمین گرمایی حضور دارند، مقاومت‌های الکتریکی شکل متفاوتی دارد و به‌طور کلی کمتر از مناطقی است که دمای زیرسطحی کمتری دارند (اسکویی و همکران، ۲۰۰۵). در میان روش‌های گوناگون الکترومغناطیسی، روش مگنتوتلوریک به علت عمق نفوذ زیاد و توانایی در به‌نقشه درآوردن ساختارهای رسانا، یکی از موثرترین روش‌های الکترومغناطیسی برای شناسایی سامانه‌های زمین گرمایی عمیق است. عمق بررسی مگنتوتلوریک بیشتر از روش‌های الکترومغناطیسی دیگر است که آن روش‌ها توانایی شناسایی منابع زمین گرمایی عمیق‌تر از ۱ تا ۲ کیلومتر را ندارند.

در این مقاله کاربرد روش مگنتوتلوریک در تصویرسازی از ساختارهای رسانای زیرسطحی، و به‌ویژه مخزن زمین گرمایی، بررسی شده است. منطقه مورد بررسی، اطراف چشمه آب گرم محلات واقع در استان مرکزی است که به علت حضور چشمه آب گرم، منطقه مستعدی برای حضور مخزن زمین گرمایی است، بنابراین شناسایی مخزن زمین گرمایی باید مورد توجه قرار گیرد.

۲ نظریه روش مگنتوتلوریک

روش مگنتوتلوریک (MT) از میدان‌های الکترومغناطیسی (EM) طبیعی به منظور به‌نقشه در آوردن تغییرات مکانی مقاومت الکتریکی زمین استفاده می‌کند. تغییرات میدان الکترومغناطیسی (EM) طبیعی، جریان‌های الکتریکی را در زمین القا می‌کند. این جریان‌های زیرسطحی میدان‌های ثانویه‌ای تولید می‌کنند و میدان الکترومغناطیسی کلی را در سطح زمین تغییر می‌دهند. میدان‌های EM شامل اطلاعات مفیدی درباره خواص الکتریکی لایه‌های زیرسطحی هستند. به‌وسیله اندازه‌گیری میدان‌های الکتریکی

مگنتوتلوریک به‌طور هم‌زمان، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی متغیر با زمان در دو جهت عمود بر هم اندازه‌گیری شده و با پردازش و تفسیر آنها، خواص الکتریکی ساختارهای زیرسطحی در تطابق منطقی با زمین‌شناسی و زمین‌ساخت نمایش داده می‌شود. روش‌های مگنتوتلوریک را اولین بار تیخونوف در ۱۹۵۰ و کاگنیارد در ۱۹۵۳ و همچنین کانتول و وزوف توسعه دادند. در طول دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ مگنتوتلوریک در حکم یک وسیله شناسایی که می‌توانست تغییرات در ضخامت حوزه‌های ضخیم رسوبی را به‌تصویر بکشد، مورد استفاده قرار گرفت (اورنج، ۱۹۸۹). در آن زمان، تحلیل داده‌ها به مدل‌سازی پیشرو و وارون یک‌بُعدی محدود بود که برای مناطق با ساختار زمین‌شناسی پیچیده قابل اعتماد نبود. در سال‌های اخیر این روش در آشکارسازی ساختارهای زمین‌شناسی کاملاً بهبود یافته است. این امر با پیشرفت در وسایل اندازه‌گیری و وارون‌سازی و تفسیر دو‌بُعدی آن محقق شده است.

روش‌های مگنتوتلوریک همچنین به‌طور موفقیت‌آمیز در کاوش‌های منابع زمین گرمایی، هم به‌صورت نظری و هم به‌صورت عملی به‌کار رفته است. برای نمونه جانستون در ۱۹۹۲ روش مگنتوتلوریک را برای کاوش یک منبع زمین گرمایی ارزیابی کرده است. نتایج ارزیابی‌ها نشان داده است که روش پیش‌گفته یک ابزار توانمند برای کاوش منابع زمین گرمایی است. درحالی‌که یوشی‌جیما روش را برای کشف نواحی مناسب زمین گرمایی در ناحیه هتچوپرو به‌کار برد. نتایج تحقیقات صورت گرفته آنها همبستگی زیادی را با منابع زمین گرمایی نشان می‌داد. همچنین اندازه‌گیری‌های مگنتوتلوریک در نواحی با عوارض زمینگان زیاد به‌کار برده شده و تفسیرهای به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌های مگنتوتلوریک، به‌طور قابل اطمینانی در تعیین محل منابع زمین گرمایی به‌کار رفته است.

(پدرسن و انگل، ۲۰۰۵):

$$Z_{DET} = \sqrt{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}} \quad (۴)$$

با استفاده از امپدانس موثر، مقاومت ویژه ظاهری و فاز محاسبه می‌شود. مزیت استفاده از داده‌های درمیان این است که میانگین مفیدی از امپدانس را برای همه جهت‌های جریان فراهم می‌کند. علاوه بر این، هیچ مُد مشخصی (مُد TE: جریان در جهت موازی با امتداد زمین‌شناسی و مُد TM: جریان عمود بر امتداد) نیاز نیست. همچنین نیازی به تصحیح جابه‌جایی ایستا (static shift correction) نیست و بُعد (dimension) داده‌ها لحاظ نمی‌شود؛ چون امپدانس موثر میانگینی را از همه جهت‌های جریان به دست می‌دهد و باعث تولید مدل‌های یک‌بُعدی و دو‌بُعدی پایدار می‌شود. در یک زمین دو‌بُعدی رسانندگی الکتریکی در امتداد یک جهت افقی (جهت امتداد زمین‌شناسی) ثابت است و معادلات ماکسول باعث جدایی مُدهای TE و TM می‌شود. یک دستگاه مختصات فرضی در نظر گرفته می‌شود که در آن محور X موازی با امتداد ساختار (محور Y در امتداد نیم‌رخ) و نیم‌رخ عمود بر امتداد و محور Z روبه پایین است. در این حالت مولفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی در مُد TE به ترتیب به صورت H_z, H_y, E_x هستند و در این مُد جریان‌های الکتریکی موازی با امتداد ساختار زیرسطحی هستند. مولفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی که با مُد TM توصیف می‌شوند به صورت H_z, H_x, E_y هستند که در این مُد، جریان الکتریکی عمود بر امتداد ساختار است. در یک محیط دو‌بُعدی عنصرهای قطری تانسور امپدانس برابر صفر هستند.

۳ زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد بررسی، محلات از استان مرکزی است. حوزه پیش‌گفته طبق تقسیم‌بندی زمین‌ساختی ایران زمین، در

و مغناطیسی در سطح زمین مقاومت ظاهری برحسب تابعی از بسامد قابل محاسبه است. چون سیگنال‌های با بسامد کم در اعماق بیشتری از زمین نفوذ می‌کنند، می‌توانیم تغییرات مقاومت را با عمق مشخص کنیم.

در روش مگنتوتلوریک میدان‌های الکتریکی متغیر اندازه‌گیری می‌شود و از راه آنها خواص الکتریکی ساختارهای زیرسطحی در توافق خوب با زمین‌شناسی و زمین‌ساخت نمایش داده می‌شود. از اندازه‌گیری‌های مولفه‌های افقی میدان الکترومغناطیسی، تانسور امپدانس مختلط به صورت تابعی از بسامد به شکل رابطه (۱) تعریف می‌شود (کانتول و مادن، ۱۹۶۰):

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix}, \quad (۱)$$

که Z تغییرات افقی و عمودی رسانایی الکتریکی زیرسطحی را در یک ایستگاه اندازه‌گیری مشخص، نشان می‌دهد. تانسور امپدانس اطلاعات مفیدی را درباره بُعد و امتداد ساختارهای رسانا فراهم می‌کند. مقاومت ویژه ρ_a و فاز ϕ ، کمیت‌های مطلوبی هستند که از روابط (۲) و (۳) به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\rho_{ai} = \frac{1}{\mu_0 \omega} |z_i|^2, \quad (۲)$$

$$\phi_i = \text{phase}(z_i), \quad (۳)$$

$$i = xx, xy, yx, yy, DET$$

که μ_0 نفوذ پذیری مغناطیسی خلا، ω بسامد زاویه‌ای و DET نشان‌دهنده داده‌های درمیان است.

سری‌های زمانی اندازه‌گیری شده در نوارهای بسامدی گوناگون به حوزه بسامد تبدیل و برای برآورد تانسور امپدانس به منزله تابعی از بسامد، طیف توان عرضی محاسبه می‌شود. درمیان تانسور امپدانس، امپدانس موثر (Z_{DET}) نامیده و به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود

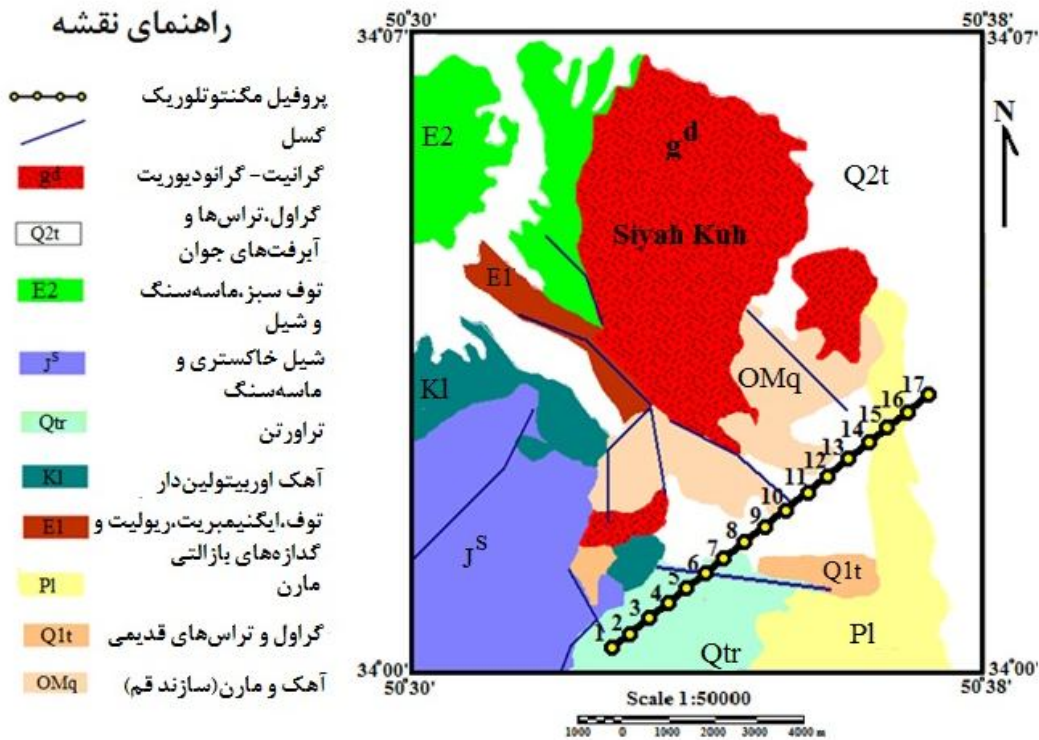
وضعیت مناسبی دارد. رسوبات دوره ائوسن در منطقه مورد بررسی شامل واحدهای کنگلومرای و آذرین است. واحد کنگلومرای عمدتاً به صورت تپه ماهور مشاهده می‌شود که سنگ‌شناسی آن شامل کنگلومرا همراه با ماسه‌سنگ است که تداخل‌هایی از شیل‌ها را دربرمی‌گیرد. واحد آذرین شامل سنگ‌های آذرین سرد شده سطحی از جنس گرانیت و گرانودیوریت مربوط به دوره ائوسن پسین-الیگوسن و گرانودیوریت مربوط به دوره میوسن و آندزیت و بازالت دوره ائوسن است.

دوره ژوراسیک در منطقه دربرگیرنده سازند شمشک است و از شیل خاکستری و ماسه‌سنگ تشکیل شده است. همان‌طور که در نقشه زمین‌شناسی منطقه در شکل ۱ مشاهده می‌شود، سنگ‌شناسی منطقه همچنین شامل تراورتن مربوط به دوره چهارم و سنگ‌آهک دوران کرتاسه است. از سازندهای مهم منطقه می‌توان به سازند قم و سازند سرخ بالایی اشاره کرد که به ترتیب دربرگیرنده آهک و مارن دوره الیگوسن-میوسن و مارن سرخ و کنگلومرای میوسن هستند. در مشاهدات صحرایی و بررسی عکس‌های هوایی منطقه مشخص شد که عملکرد حرکات زمین‌ساختی در ادوار گذشته زمین‌شناسی باعث ایجاد گسل‌هایی در واحدهای سنگی منطقه و پیرامون آن شده که وجود همین گسل‌ها و درز و شکاف‌ها، نفوذپذیری منطقه را در وضعیت مناسبی قرار داده است.

۴ برداشت داده‌ها

اندازه‌گیری‌های مگنتوتلوریک در ۱۷ ایستگاه در ارتفاع بین ۱۵۸۱ تا ۱۷۵۱ متر، با فواصل ایستگاهی ۵۰۰ متر و در امتداد نیم‌رخ در راستای جنوب‌غربی-شمال‌شرقی صورت گرفته است. محل ایستگاه‌های برداشت داده‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است. از دستگاه GMS05 ساخت شرکت مترونیکس استفاده شده است. در این تحقیق، به‌منظور برپایی هر ایستگاه از تجهیزاتی شامل

زون آتشفشانی ایران مرکزی واقع گردیده است. این زون یکی از زون‌های فعال و پرتکاپو در طی دوران‌های گوناگون زمین‌شناسی است و به شکل مثلث در مرکز ایران قرار دارد. زون ایران مرکزی از سمت شمال به زون البرز و از قسمت جنوب به زون مکران محدود می‌شود. در زون ایران مرکزی قدیمی‌ترین سنگ‌های دگرگون شده (پروکامبرین) تا آتشفشان فعال و نیمه‌فعال امروزی به چشم می‌خورد. در واقع این منطقه را می‌توان محل قدیمی‌ترین قاره در ایران محسوب داشت که حوادث و رخداد‌های فراوانی به خود دیده است. همان‌طور که متذکر شدیم منطقه مورد بررسی در زون ایران مرکزی واقع شده است. اختصاصات زمین‌شناسی حوزه در ارتباط مستقیم با سرگذشت ایران مرکزی است. واحدهای سنگی حوزه مربوط به دوره‌های پالئوزوئیک، مزوزوئیک و سنوزوئیک است. علاوه بر آن واحد آبرفتی کواترنری نیز در گستره طرح مشاهده می‌شود. واحدهای سنگی دوران اول شامل دوره‌های کامبرین و پرمین هستند. دوره کامبرین در این منطقه در برگیرنده سازندهای سلطانیه-زایگون-لالون و میلا است. پس از آن واحدهای دولومیتی و آهکی با سن پرمین مشاهده می‌شود. واحد آهکی تریاس و کنگلومرای ائوسن از دیگر واحدهای سنگی موجود در حوزه هستند، که واحد کنگلومرای ائوسن ارتفاعات قسمت جنوبی حوزه را دربر می‌گیرد. واحدهای آبرفتی دوره چهارم شامل پادگانه‌های آبرفتی جدید (Q2t) است که گسترش قابل توجهی دارند و در شکل ۱ مشاهده می‌شوند. ژئومورفولوژی منطقه از واحدهای کوهستان-تپه ماهور و دشت تشکیل شده است. واحد کوهستان عمدتاً در نیمه شمالی حوزه و واحد تپه‌ماهور در بخش‌های جنوبی حوزه گسترش دارند. فرسایش نوع سطحی-شیاری خفیف و انحلالی در بخش‌های متفاوت حوزه به چشم می‌خورد. منطقه از نظر نفوذپذیری با توجه به گسترش واحدهای آهکی و دولومیتی و درز و شکاف‌های موجود در آنها،



شکل ۱. نقشه زمین شناسی ساده شده منطقه مورد بررسی همراه با موقعیت ایستگاه های اندازه گیری شده مگنتوتلوریک.

الگوریتم اسمیرنوف (۲۰۰۳) پردازش شدند که با استفاده از روش های پردازشی پایدار (Robust method) تابع تبدیل ژئومغناطیسی به دست می آید. بعضی از بسامدها که حاوی نوفه بودند در بعضی از ایستگاهها حذف شدند و این نوفهها بیشتر به علت وجود خطوط انتقال فشار قوی برق و معادن تراورتن در منطقه به وجود آمدند.

۶ تحلیل بعد داده ها

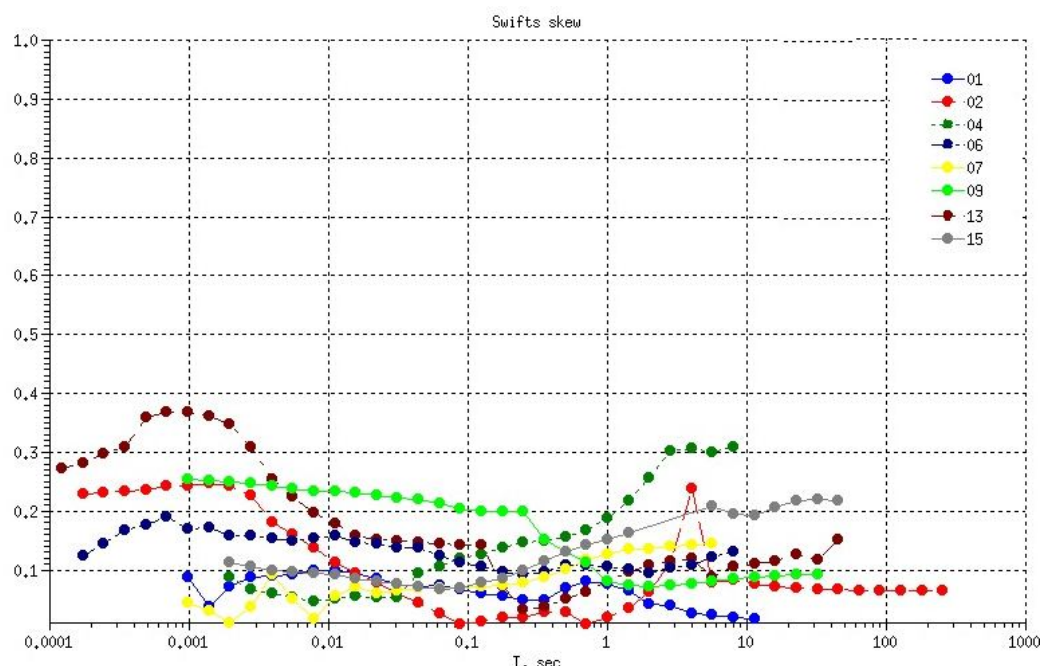
یکی از پارامترهایی که برای تحلیل ابعادی داده های مگنتوتلوریک به کار می رود، اسکيو نام دارد که به صورت نسبت عناصر قطری و غیر قطری تانسور امیدانس به شکل رابطه (۵) تعریف می شود:

$$Skew = \left| \frac{z_{xx} + z_{yy}}{z_{xy} - z_{yx}} \right|, \quad (5)$$

نگاربر داده ها، سه عدد پیچہ القایی مغناطیسی به همراه کابل های مربوط، پنج الکترو د پتانسیل و کابل های مربوط، یک منبع باتری ۱۲ ولتی، دستگاه GPS دستی و قطب نمای زمین شناسی و تراز استفاده شده است. در محل هر ایستگاه دو مولفه میدان الکتریکی (E_x و E_y) با استفاده از دو جفت الکترو د جریان و همچنین سه مولفه میدان مغناطیسی (H_x, H_y, H_z) با استفاده از سه مغناطیس سنج القایی در یک دستگاه مختصات راست گرد و در گستره بسامدی ۰/۱ تا ۸۰۰۰ هرتر اندازه گیری شدند.

۵ پردازش داده ها

به منظور حذف نوفه و آماده سازی قالب داده ها برای اجرای عملیات پردازشی، از نرم افزار PROCMT استفاده شده است. سپس داده های مگنتوتلوریک با استفاده از



شکل ۲. نمایش پارامتر اسکویو برای تعدادی از ایستگاه‌های واقع در امتداد نیم‌رخ اندازه‌گیری.

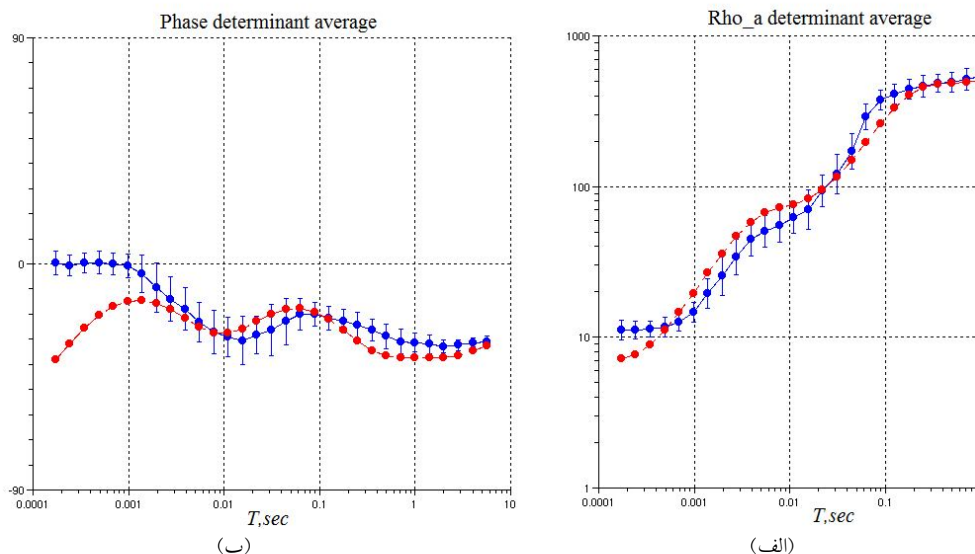
شده‌اند که به ترتیب در شکل ۳-الف و شکل ۳-ب با رنگ آبی نشان داده شده و پاسخ مدل یک‌بُعدی به دست آمده از مرحله نهایی وارون‌سازی داده‌ها با منحنی‌های سرخ‌رنگ نشان داده شده است. نمایش این داده‌ها و پاسخ مدل آنها نشان‌دهنده چگونگی تطبیق مدل به دست آمده با مدل واقعی زمین است. مدل‌های یک‌بُعدی حاصل از وارون‌سازی داده‌ها در شکل ۴ برای ۴ ایستگاه نمایش داده شده‌اند که نشان‌دهنده چگونگی تغییرات در رسانایی لایه‌های زمین در محل هر ایستگاه‌اند.

شکل ۴ نشان‌دهنده تغییرات مقاومت ویژه برحسب عمق است. محور افقی مقاومت ویژه را از ۱۰ اهم‌متر تا ۱۰۰۰۰ اهم‌متر نشان می‌دهد. عمق مورد بررسی برای ایستگاه‌ها تا ۱۰ کیلومتر نشان داده شده است اما عمق موردنیاز برای بررسی تا ۲ کیلومتر است، که جواب‌های به دست آمده از برگردان دو‌بُعدی به‌خوبی این عمق را پوشش می‌دهد. به‌وضوح می‌توان مشاهده کرد که تغییرات چشم‌گیری در لایه‌های زیرسطحی به وقوع پیوسته است که براساس این

که این پارامتر برای ساختار زیرزمینی یک‌بُعدی یا دو‌بُعدی غیرآشفته نزدیک به صفر (کمتر از ۰/۲) است. انحراف اسکویو از صفر، وجود یک ساختار زیرزمینی یک‌بُعدی یا دو‌بُعدی آشفته یا سه‌بُعدی نامتقارن را مشخص می‌کند. منحنی اسکویو برای ایستگاه‌های گوناگون در شکل ۲ نشان داده شده است. برای بیشتر ایستگاه‌ها مقدار اسکویو زیر یک و در اکثر ایستگاه‌ها کمتر از ۰/۲ است، بنابراین می‌توان زمین را در این ایستگاه‌ها حالت یک‌بُعدی یا دو‌بُعدی غیرآشفته در نظر گرفت چنانچه مقدار اسکویو بیشتر از یک باشد، نشان‌دهنده این است که زمین در حالت دو‌بُعدی یا سه‌بُعدی آشفته (نامتقارن) قرار دارد.

۷ وارون‌سازی یک‌بُعدی داده‌ها

وارون‌سازی یک‌بُعدی داده‌های دترمینان با استفاده از الگوریتم پدرسن (۲۰۰۴) صورت گرفته است. داده‌های دترمینان به‌صورت مقاومت ویژه ظاهری و فاز امپدانس به‌منزله ورودی به برنامه وارون‌سازی پدرسن (۲۰۰۴) داده



شکل ۳. وارون‌سازی یک‌بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک محاسبه شده برای ایستگاه S2، (الف) مقاومت ویژه ظاهری، (ب) فاز امپدانس.

می‌شود. با توجه به گستره بسامدی ۰/۱ تا ۸۰۰۰ هرتز، حداکثر عمق نفوذ برای مدل، دو کیلومتر در نظر گرفته شد و مدل‌سازی دو‌بُعدی تقریب منطقی از ساختارهای واقعی زیرسطحی را ارائه می‌دهد.

مقاومت ویژه ظاهری و فاز داده‌ها در مُد TE و TM، مشخصات و ویژگی متفاوتی نشان می‌دهند و مدل‌سازی دو‌بُعدی تقریب منطقی از ساختارهای واقعی زیرسطحی را به‌دست می‌دهد.

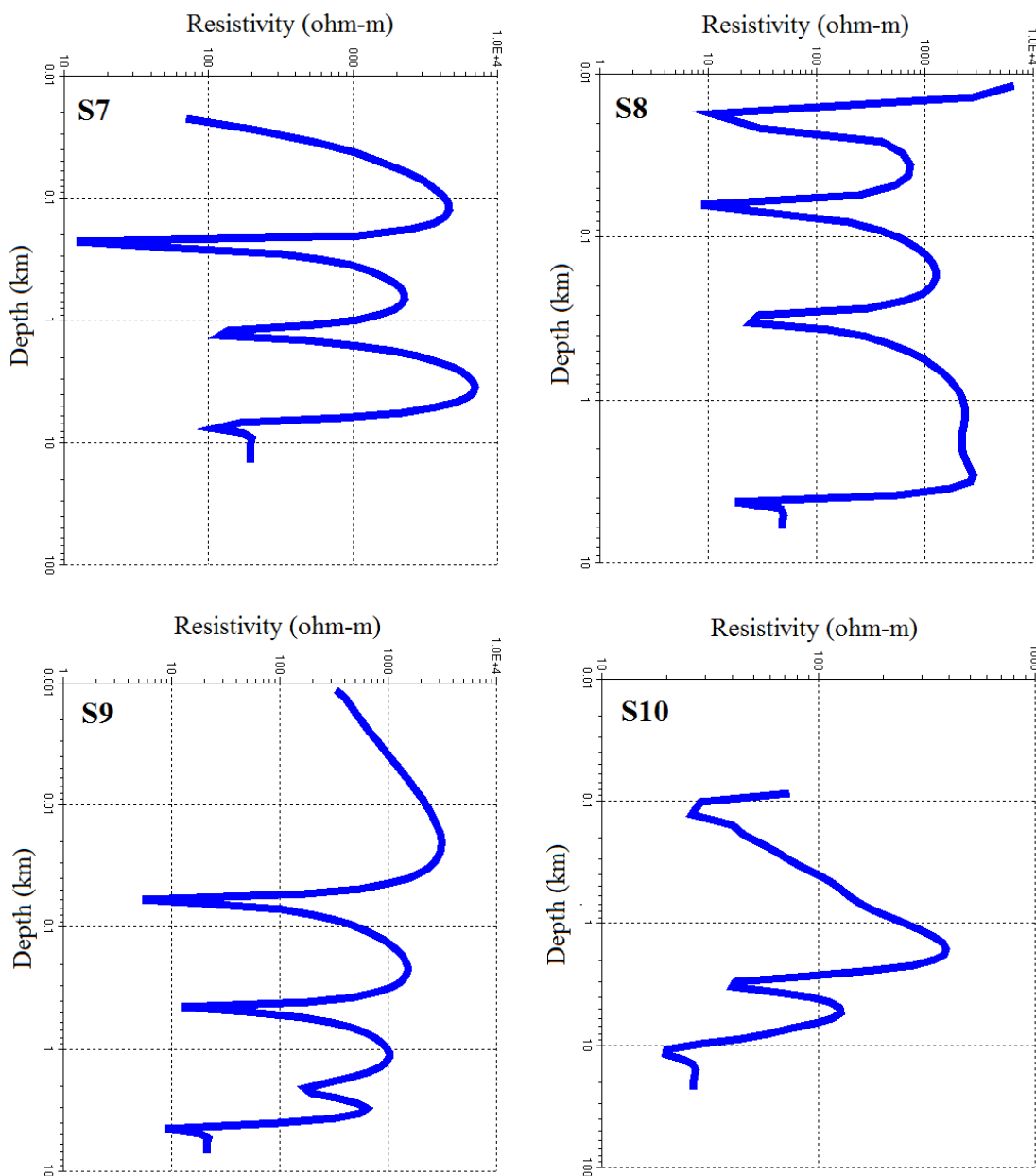
مدل‌های مقاومت ویژه فاز و مقاومت ویژه متناظر و پاسخ‌های مدل حاصل از وارون‌سازی دو‌بُعدی داده‌های مُد TE و TM، وارون‌سازی مشترک داده‌های TE + TM و داده‌های دترمینان به‌ترتیب در شکل‌های ۵ تا ۸ نشان داده شده است که در همه این شکل‌ها قسمت الف شامل داده‌های صحرائی، پاسخ مدل و تفاضل ریاضی بین داده‌های صحرائی و پاسخ مدل است که برای داده‌های مقاومت ویژه و فاز نمایش داده شده است و قسمت ب این شکل‌ها نشان‌دهنده مدل زمینی مقاومت ویژه حقیقی است. مدل مقاومت ویژه حاصل از مُد TE و TM در شکل‌های ۵-ب و ۶-ب مشخصات متفاوتی نشان می‌دهند

نتایج حاصل از برگردان یک‌بُعدی داده‌ها، می‌توان اطلاعات لازم را برای مدل اولیه در برگردان دو‌بُعدی به‌دست آورد و همان‌طور که می‌دانیم تفسیر براساس نتایج برگردان دو‌بُعدی صورت می‌پذیرد.

۸ وارون‌سازی دو‌بُعدی داده‌ها و تفسیر

وارون‌سازی دو‌بُعدی مُد TE، TM، مُد مشترک TE + TM و داده‌های دترمینان با استفاده از الگوریتم REBOCC صورت گرفت و این الگوریتم در حقیقت وارون‌سازی تقلیل یافته بر پایه روش OCCAM است که سیرپیونواراپورون و اگبرت (۲۰۰۰) آن را معرفی کرده‌اند. داده‌ها به‌صورت فاز و مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شد.

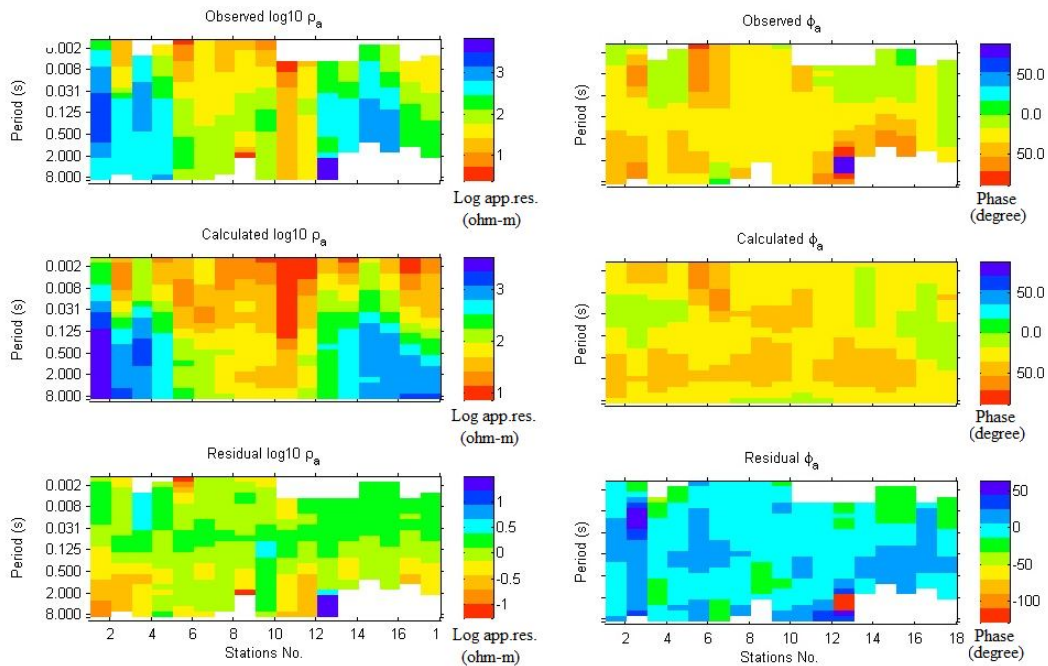
پارامترهای مدل اولیه شامل بلوک‌هایی با طول ۵۰ و پهنای ۳۰ متر هستند. از آنجاکه برای وارون‌سازی دو‌بُعدی، ساختار زمینی، دو‌بُعدی فرض می‌شود، ساختار سه‌بُعدی در داده‌ها درحکم نوفه است. استفاده از همین تقریب دو‌بُعدی، ممکن است باعث ایجاد خطاهای کوچک غیر واقعی شود و به‌منظور اجتناب از این خطاها، روی مقاومت ویژه ظاهری یک خطای کف ۵ درصد تعریف



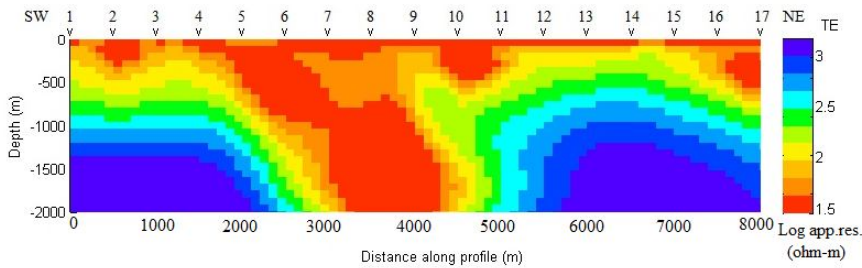
شکل ۴. مدل‌های به دست آمده از وارون‌سازی یک‌بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک در امتداد نیم‌رخ.

از مدل‌های TE و TM است و همان‌طور که قبلاً ذکر شد چون داده‌های دترمینان میانگینی از جهت‌های جریان فراهم می‌کند و مستقل از جهت امتداد الکترومغناطیسی است، پس در استفاده از این داده‌ها نیازی به چرخش تانسور امپدانس و تصحیح جابه‌جایی ایستا نیست، بنابراین مدل حاصل از داده‌های دترمینان مدل قابل‌اعتمادتری برای

اما هر دو مُد TE و TM و مُد TE+TM و مُد دترمینان حضور یک زون رسانای بزرگ را آشکار می‌سازند. وارون‌سازی دو‌بُعدی مشترک داده‌های مُد TE+TM، تصویری کلی از ساختار رسانندگی زیرسطحی را برای هر دو جهت قطبش به‌طور هم‌زمان نشان می‌دهد. مدل مقاومت ویژه حاصل از داده‌های دترمینان، ترکیبی



(الف)



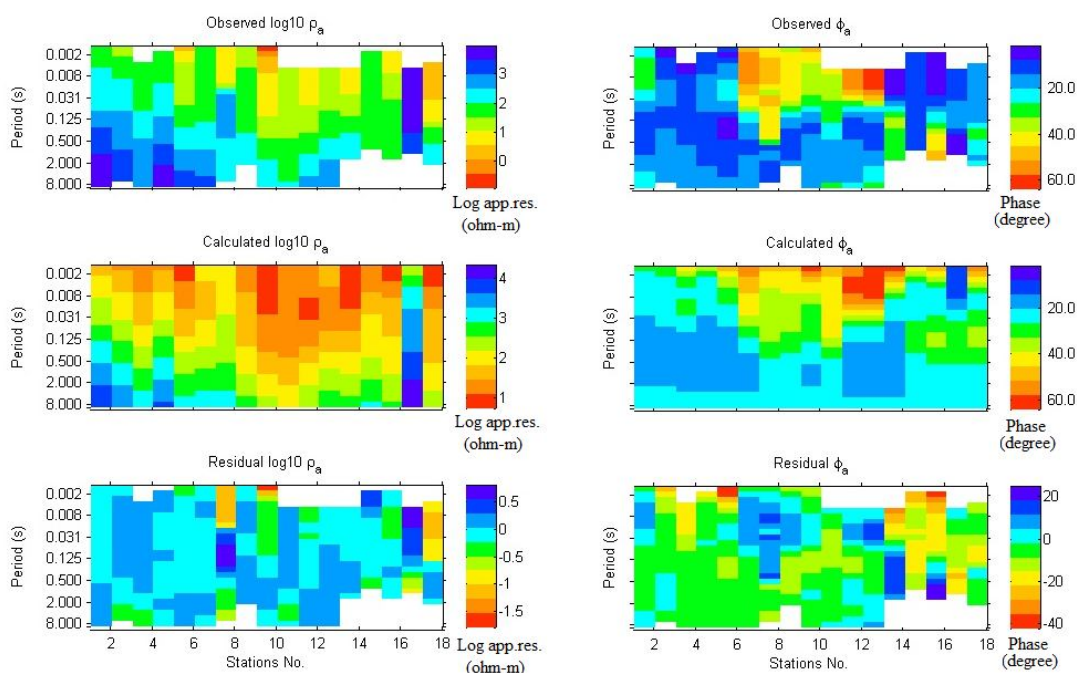
(ب)

شکل ۵. (الف) داده‌های مشاهده شده، پاسخ مدل و مقدار باقیمانده مربوط به مد TE، (ب) مقطع دو‌بُعدی مقاومت ویژه برحسب عمق مربوط به مد TE.

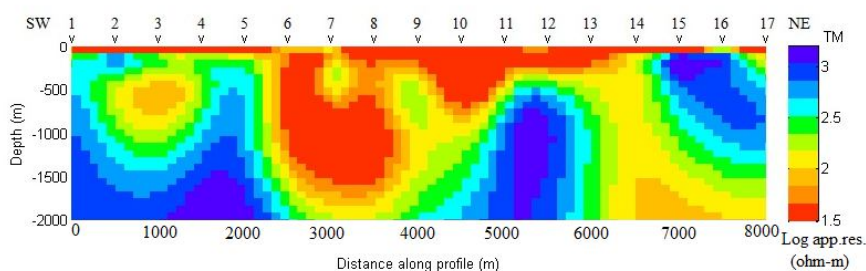
آبرفتی (از ایستگاه ۸ تا ۱۴)، تراورتن‌های قدیمی‌تر وجود دارد. در مقطع دو‌بُعدی مقاومت ویژه در شکل ۸-ب، سه زون a، b و c مشاهده می‌شود. در زون a که از رسوبات آبرفتی و تراورتن تشکیل شده است، شاهد دو گسل هستیم که نیم‌رخ مگنتوتلوریک را قطع کرده‌اند. این دو گسل در نزدیکی ایستگاه‌های ۶ و ۱۱ قرار دارند، جریان‌ها و حضور آب در این گسل‌ها و شکستگی‌ها موجب ایجاد توده‌های رسنای سطحی کوچکی بین ایستگاه‌های ۴ تا ۶ و بین ایستگاه‌های ۹ تا ۱۲ شده است که این توده‌ها از زمین تا عمق تقریبی ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر

تفسیر می‌باشد. شکل ۸-ب مدل زمینی مقاومت ویژه حقیقی را در امتداد پروفیل نشان می‌دهد که بیانگر وجود یک زون رسنا بین ایستگاه‌های ۶ تا ۱۰ و در عمق بین ۸۰۰ تا ۲۰۰۰ متر می‌باشد و می‌توان آن را به مخزن زمین گرمایی نسبت داد.

براساس نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی، رسوبات تراورتن از قبل از ایستگاه یک مگنتوتلوریک تا رسوبات مارنی حوالی ایستگاه ۱۴ ادامه دارند. اما رسوبات آبرفتی جوان‌تر (گراول و تریس‌های جوان) بخشی از تراورتن‌های منطقه را پوشانده‌اند. به عبارت دیگر، در زیر رسوبات



(الف)



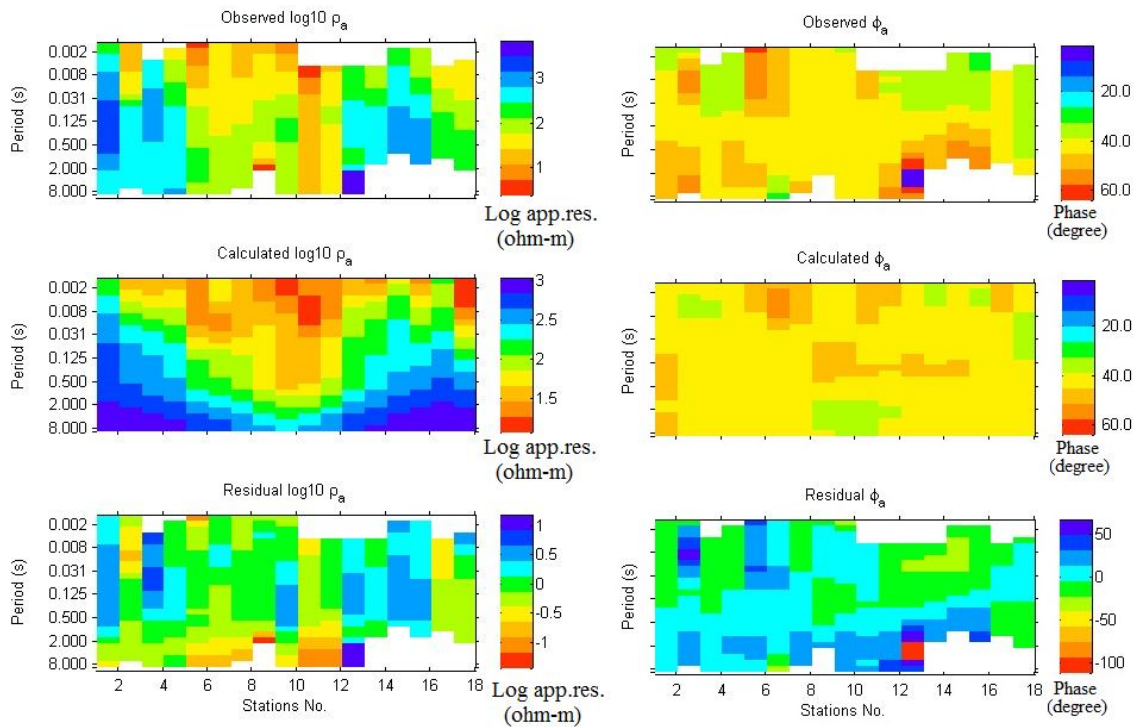
(ب)

شکل ۶. (الف) داده های مشاهده شده، پاسخ مدل و مقدار باقی مانده مربوط به مد TM، (ب) مقطع دو بُعدی مقاومت ویژه برحسب عمق مربوط به مد TM.

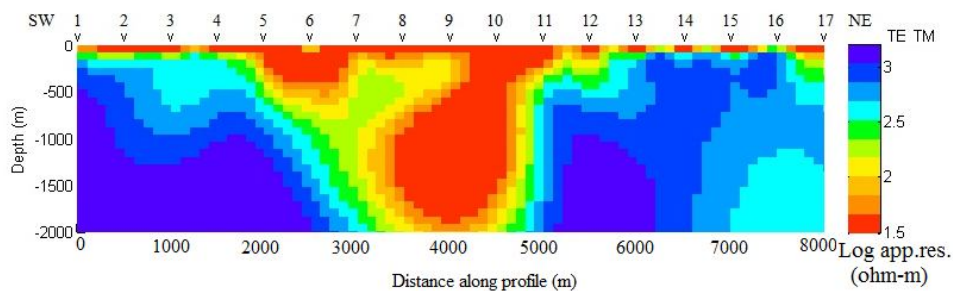
رسم کرد (شکل ۹)، که با مقایسه مقطع حاصل از برگردان دو بُعدی داده های مگنتوتلوریک با مقطع زمین شناسی می توان به خوبی به شباهت بارز و چشم گیر بین این دو پی برد. با توجه به مقطع زمین شناسی، می توان مشاهده کرد که رسوبات تراورتن از قبل از ایستگاه یک مگنتوتلوریک تا رسوبات مارنی حوالی ایستگاه ۶ ادامه دارد. از ایستگاه ۶ به بعد شاهد حضور رسوبات مارنی و تراس آبرفتی جوان هستیم که تا انتهای نیم رخ ادامه دارد و روی سطح زمین نیز به خوبی قابل مشاهده است.

مشاهده می شوند. این توده های رسانا مقاومت ویژه کمتری نسبت به اعماق دارند. در بعضی از نقاط در سطح زمین، شاره های آزاد و چرخان از راه درز و شکاف ها و گسل ها به سطح زمین راه یافته و چشمه های آب گرم متعددی را در منطقه به وجود آورده اند.

با توجه به نقشه زمین شناسی منطقه (شکل ۱) و مقطع دو بُعدی مقاومت ویژه حاصل از داده های دترمینان، می توان مقطع زمین شناسی در امتداد نیم رخ اندازه گیری را



(الف)

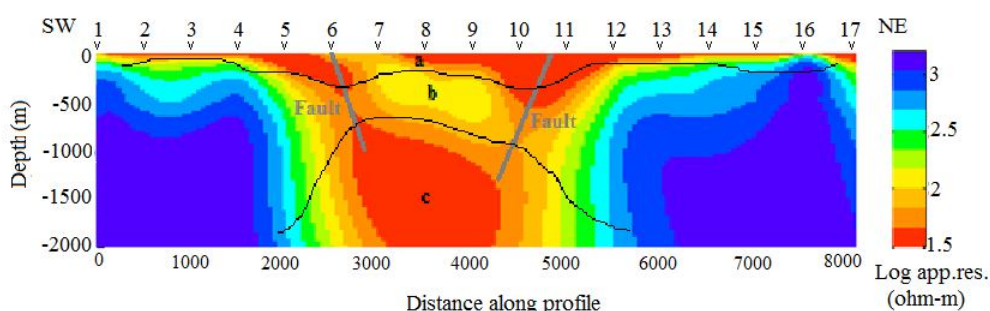
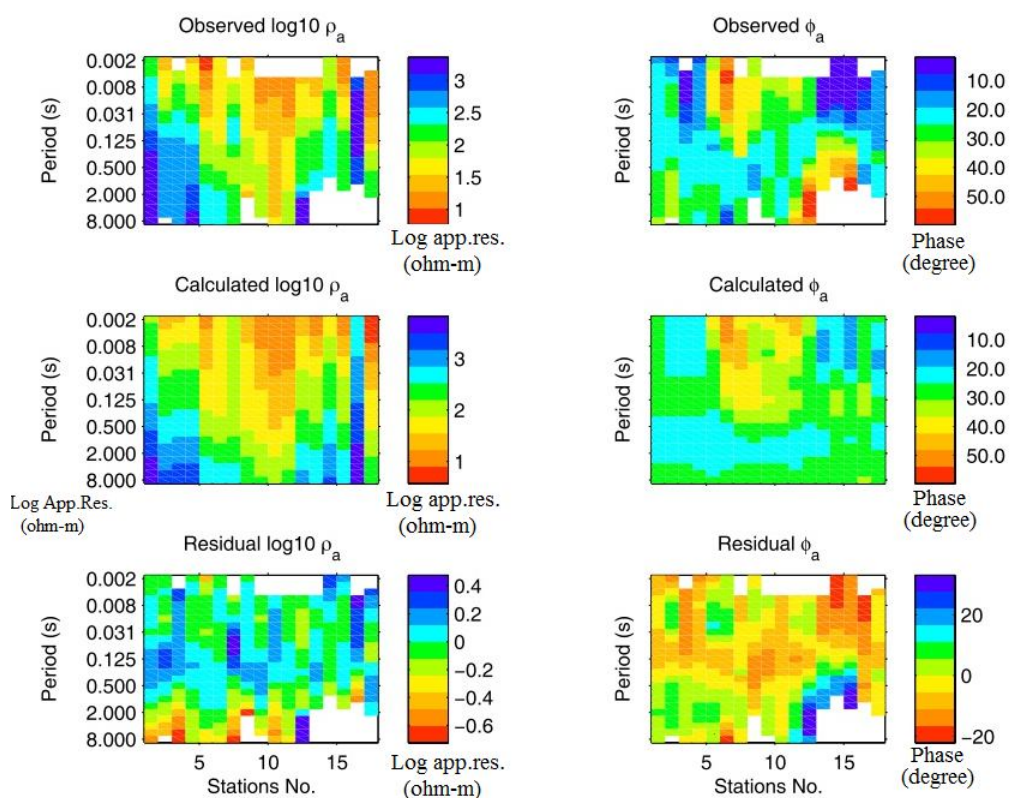


(ب)

شکل ۷. (الف) داده‌های مشاهده شده، پاسخ مدل و مقدار باقی‌مانده مربوط به مدل $TM+TE$ ، (ب) مقطع دو‌بُعدی مقاومت ویژه برحسب عمق مربوط به مدل $TM+TE$.

اثوسن است که در ناحیه شمالی زیر تراس‌های جوان و رسوبات آهکی قابل مشاهده است. KI آهک اوریتولین‌دار مربوط به دوره کرتاسه است که در زیر رسوبات تراورتن و بین ایستگاه‌های ۳ و ۶ واقع شده است. J_s شیل خاکستری و ماسه‌سنگ دوره ژوراسیک است که مربوط به سازند شمشک و در ناحیه جنوبی زیر رسوبات تراورتن قابل مشاهده است.

$Q2t$ تراس‌ها و آبرفت‌های جوان دوره کواترنری است که حد فاصل ایستگاه‌های ۶ تا ۱۷ (انتهای نیم‌رخ) مشاهده می‌شوند، Qtr تراورتن دوره کواترنری است که حد فاصل ایستگاه‌های ۱ و ۶ احاطه شده است، OMq سنگ آهک با میان‌لایه‌هایی از مارن دوره میوسن و مربوط به یکی از سازندهای مهم منطقه یعنی سازند قم است که بین دو گسل قرار دارد. E2 توف و گدازه‌های بازالتی دوره



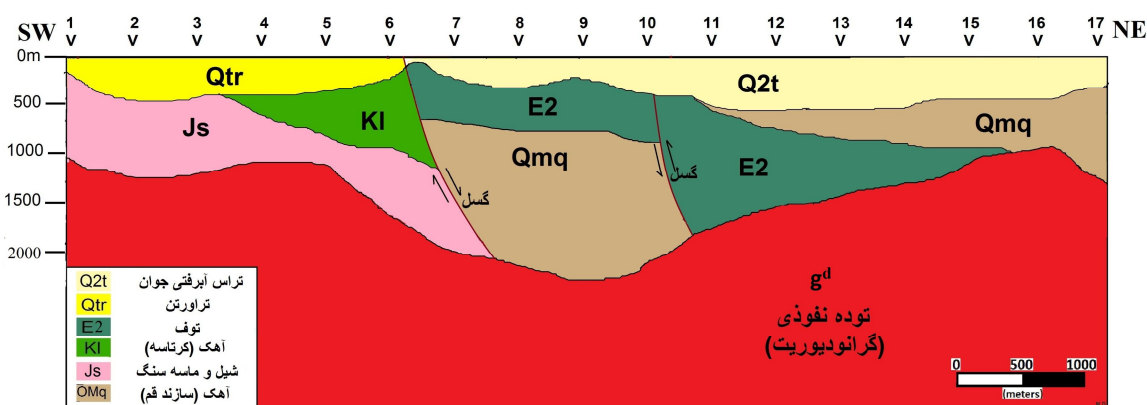
شکل ۸. (الف) داده های مشاهده شده، پاسخ مدل و مقدار باقی مانده مربوط به مُد دترمینان، (ب) مقطع دو بُعدی مقاومت ویژه برحسب عمق مربوط به داده های دترمینان، نمایش زون های a, b, c و نمایش دو گسل در محل ایستگاه ۶ و بین ایستگاه های ۱۰ و ۱۱.

شده در امتداد نیم رخ در شکل ۹ و مقطع مقاومت ویژه حاصل از داده های دترمینان (شکل ۸-ب) و توضیحات مفصلی که راجع به هر دو ذکر شد، می توان به نتایج زیر دست یافت.

^d توده نفوذی آذرین از جنس گرانیت و گرانودیوریت است که در اعماق زیر ۱۰۰۰ متر واقع شده است. همچنین حضور دو گسل حوالی ایستگاه های ۶ و ۱۰ نیز قابل مشاهده است. در نهایت با مقایسه مقطع زمین شناسی رسم

شواهد زمین‌شناسی، این زون مقاوم مربوط به توف، و گدازه‌های بازیک دوره ائوسن است. زون c، مخزن زمین گرمایی است که به احتمال زیاد به سبب غنی بودن آب‌های منطقه از کلسیت و به علت حضور آب‌های موجود در لایه‌های آهکی مربوط به سازند قم (OMq)، پاسخ رسانایی نشان داده و از جنس سنگ آهک دوره میوسن است. این مخزن در حد فاصل تقریبی ایستگاه‌های ۶ تا ۱۰ و در عمق بین ۸۰۰ تا ۲۰۰۰ متر واقع شده است. این توده رسانا نشان‌دهنده چرخش شاره‌هایی است که ممکن است در عمق، با منبع سامانه زمین گرمایی در ارتباط باشد و منشأ حرارتی آن احتمالاً ماگمایی است که در اعماق زمین قرار دارد. در نقشه زمین‌شناسی شکل ۱ می‌توان یک توده نفوذی آذرین از جنس گرانودیوریت مربوط به دوره ائوسن را در قسمت شمالی نیم‌رخ مشاهده کرد که به احتمال زیاد، قسمتی از منبع زمین گرمایی مورد بررسی است که به سطح زمین آمده و به‌طور قطع از گرمای این توده برون‌زده کاسته شده است. با احتمال زیاد، توده نفوذی بسیار بزرگی در اعماق ناحیه زمین گرمایی محلات وجود دارد. نکته قابل توجه در خصوص توده پیش‌گفته این است که جدیدترین

همان‌طور که قبلاً ذکر شد در در مقطع دو‌بُعدی مقاومت ویژه در شکل ۸-ب، سه زون a، b و c مشاهده می‌شود. زون a رسانایی زیادی دارد و از سطح زمین شروع می‌شود و حداکثر تا عمق ۱۰۰ متر ادامه می‌یابد؛ رسانایی در این زون متغیر است. این زون حاوی رسوبات و آبرفت‌های جوان موجود در منطقه است که سفره‌های آب را در خود دارد و به همین علت است که پاسخ رسانایی دارد. در این زون شاهد دو گسل هستیم که نیم‌رخ مگنتوتلوریک را قطع کرده‌اند. این دو گسل در نزدیکی ایستگاه‌های ۶ و ۱۰ قرار دارند، جریان شاره‌ها و حضور آب در این گسل‌ها و شکستگی‌ها، موجب ایجاد توده‌های رسانای سطحی کوچکی بین ایستگاه‌های ۴ تا ۶ و بین ایستگاه‌های ۹ تا ۱۲ شده است که این توده‌ها از زمین تا عمق تقریبی ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر مشاهده می‌شوند. زون b، ناحیه مقاومی است که روی مخزن زمین گرمایی واقع شده و مقاومت ویژه بالایی نسبت به مخزن دارد و معمولاً بدون تخلخل است. به این ناحیه سنگ‌پوش می‌گویند. این لایه مقاوم باعث می‌شود که آب‌های موجود در مخزن پس از گرم شدن راه نفوذی به بالا نداشته باشند و به ناچار با فشار از درزها و شکاف‌ها و گسل‌های موجود به طرف سطح زمین راه یابند. طبق



شکل ۹. مقطع زمین‌شناسی رسم شده در امتداد نیم‌رخ. Q2t تراس‌ها و آبرفت‌های جوان دوره کواترنری، Qtr تراورتن دوره کواترنری، OMq آهک و مارن دوره میوسن، E2 توف و گدازه‌های بازالتی دوره ائوسن، KI آهک اوریپتولین‌دار مربوط به دوره کرتاسه، gd توده نفوذی (گرانودیوریت)، Js شیل خاکستری و ماسه‌سنگ دوره ژوراسیک.

براساس نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی و نتیجه حاصل از وارون‌سازی می‌توان به‌خوبی به ساختار زمین‌گرمایی در منطقه پی برد. به علت مستقل بودن داده‌های دترمینان از جهت جریان و جهت امتداد الکترومغناطیسی و نبود نیاز به چرخش تانسور امپدانس و تصحیح جابه‌جایی ایستا، مدل حاصل از داده‌های دترمینان مدل قابل‌اعتمادتری برای تفسیر است، بنابراین از همین مدل برای تفسیر داده‌ها استفاده می‌شود.

با مقایسه مقطع دو بُعدی مقاومت ویژه و مقطع زمین‌شناسی در شکل ۹، می‌توان به این نتیجه رسید که در سطح زمین لایه‌های رسنایی وجود دارند که می‌توان آنها را به رسوبات و آبرفت‌های جوان و تراورتن‌های دوره کواترنری نسبت داد. حضور دو گسل عمیق در منطقه عامل خوبی برای نفوذ آب به اعماق زمین و متعاقباً بالا آمدن به سطح زمین پس از گرم شدن در مخزن زمین‌گرمایی است. لایه مقاوم در زیر لایه سطحی مربوط به سنگ‌پوش و از جنس توف و گدازه‌های بازالتی دوره ائوسن است. مخزن در زیر این ناحیه قرار دارد که به علت وجود آب پاسخ رسنایی زیادی داده است. این مخزن از سنگ آهک دوره میوسن تشکیل شده است و در عمق ۸۰۰ تا ۲۰۰۰ متر قرار دارد. حجم و ضخامت زیاد تراورتن‌ها در منطقه، احتمالاً حاکی از قدمت زیاد سامانه زمین‌گرمایی منطقه است. به عبارت دیگر، منبع زمین‌گرمایی در این سامانه، یک توده آذرین نفوذی بزرگ است که احتمالاً آخرین مراحل سرد شدن خود را طی می‌کند و آب چشمه‌های آب‌گرم محلات به آخرین مراحل سرد شدن ماگمای مذاب در منطقه مربوط می‌شود. با توجه به تحقیقات مگنتوتلوریک، زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی، به نظر می‌رسد که نهشته‌های آهکی تا اعماق، مخزن زمین‌گرمایی را تشکیل داده و توده نفوذی آذرین که منبع گرما برای ساختار زمین‌گرمایی است در این اعماق وجود دارد. در نهایت می‌توان گفت که

سنگ‌های آتشفشانی منطقه به ائوسن تعلق دارد. بنابراین در صورت قطعیت این موضوع، می‌باید توده نفوذی پیش‌گفته از ائوسن تاکنون گرمای خود را ازدست داده باشد. در صورتی که گرمای منبع زمین‌گرمایی محلات ناشی از سرد شدن توده نفوذی باشد، می‌باید توده نفوذی در زمانی بسیار جدیدتر از دوره ائوسن تشکیل شده باشد. چنانچه توده نفوذی متعلق به ائوسن باشد، می‌توان بی‌هنجاری گرمایی موجود در محلات را ناشی از فروپاشی عناصر پرتوزا در توده نفوذی دانست.

۹ نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش مگنتوتلوریک به منظور بررسی مخزن زمین‌گرمایی در ۱۵ کیلومتری شهر محلات استفاده شده است. نیم‌رخ در راستای جنوب‌غربی - شمال‌شرقی و با حدفاصل ایستگاهی ۵۰۰ متر طراحی و داده برداری در گستره بسامدی ۰/۱ تا ۸۰۰۰ هرتز انجام شد. در روش مگنتوتلوریک به علت تباین در خواص الکتریکی مواد، ساختارهای زمین‌شناسی و زون‌های رسنا به‌خوبی مشخص می‌شوند. برداشت داده‌های مگنتوتلوریک در این منطقه اطلاعاتی را درباره ساختار مقاومت ویژه فراهم می‌کند که به توزیع و وسعت شاره‌های آزاد اشاره می‌کند.

وارون‌سازی دو بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک با استفاده از الگوریتم REBOCC صورت گرفته است که مدل مقاومت ویژه به‌دست آمده از این الگوریتم برای مدهای TE، TM، مُد مشترک TE + TM و دترمینان، ساختار مقاومت ویژه سطحی را تا عمق ۲ کیلومتر به‌تصویر کشیده است. مدل مقاومت مربوط به مُد TE و TM با هم اختلاف اندکی داشته و مدل مقاومت داده‌های مشترک و داده‌های دترمینان مشابه بوده و انطباق خوبی با مدل زمین واقعی نشان می‌دهند.

- Oskooi, B., 2004, A broad view on the interpretation of electromagnetic data (VLF, RMT, MT, CSTMT): PhD Thesis, Uppsala University, Sweden.
- Oskooi, B., Pedersen, L. B., Smirnov, M., Arnasson, K., Esteinsson, H., and Manzella, A., and the DGP working group, 2005, The deep geothermal structure of The Mid-Atlantic Ridge deduced from MT data in SW Iceland: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **150**, 183-195.
- Pedersen, L. B., 2004, Determination of the regularization level of truncated singular-value decomposition inversion: The case of 1D inversion of MT data: *Geophys. Prospect*, **52**, 261-270.
- Pedersen, L. B., and Engels, M., 2005, Routine 2D inversion of magnetotelluric data using the determinant of the impedance tensor: *Geophysics*, **70**, G33-G41.
- Siripunvaraporn, W., 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: *Geophysics. J. Int.*, **152**, 1-7.
- Smith, L., 2001, Analysis of controlled-source magnetotelluric data from deep geothermal resources in Iceland: M. Sc. Thesis, Department of Geology and Geophysics, University of Edinburgh.
- Swift, C. M., 1967, A magnetotelluric investigation of electrical conductivity anomaly in the southwestern United States: PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Tikhonov A. N., 1950, On determining electrical characteristics of the deep layers of the Earth's crust: *Doklady*, **73**, 281-285.
- Volpi, G., Manzella, A., Fiordelisi, A., 2003, Investigation of geothermal structures by magnetotellurics (MT): An example from the Mt. Amiata area, Italy: *Geothermics*, **32**, 131-145.
- Vozoff, K., 1991, The magnetotelluric method, in *Electromagnetic methods in applied geophysics*: M. N. Nabighian, Ed., Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, **2(B)**, 641-711.
- Wannamaker, P.E., 1986, Electrical conductivity of water-undersaturated crustal melting: *J Geophys. Res.* **91(B6)**, 6321-6327.
- روش‌های اکتشافی الکترومغناطیسی به‌خوبی می‌توانند ساختارهای زیرسطحی و زمین‌شناسی یک منطقه زمین‌گرمایی را به تصویر بکشند و نتایج به‌دست آمده در این مقاله موید این نکته است.
- تشکر و قدردانی**
- از همکاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و کارشناسان بخش ژئومغناطیس به خاطر کمک و در دسترس قرار دادن امکانات لازم برای اجرای طرح، تشکر و قدردانی می‌کنیم.
- منابع**
- Cagniard, L., 1953, Basic theory of the magnetotelluric method in geophysical prospecting: *Geophysics*, **8**, 605-635.
- Cantwell, T., and Madden, T. R., 1960, Preliminary report on crustal magnetotelluric measurements: *Geophysics*, **65(12)**, 4202-4205.
- Correia, A., and Safanda, J., 2002, Geothermal modeling along a two-dimensional crustal profile in southern Portugal. *J. Geodyn.*, **34**, 47-61.
- Johnston, J. M., Pellerin, L., and Hohmann, G. W., 1992, Evaluation of electromagnetic methods for geothermal reservoir detection: *Geothermal Resource Council Transactions*, **16**, 241-245.
- Li, X., and Pedersen, L. B., 1991, The electromagnetic response of an azimuthally anisotropic half space: *Geophysics*, **56**, 1462-1473.
- Long, C. L., and Kaufman, H. E., 1980, Reconnaissance geophysics of a known geothermal resource area, Weiser, Idaho, and Vale, Oregon: *Geophysics*, **45**, 312-322.
- Orange, A. S., 1989, Magnetotelluric exploration for hydrocarbons: *Proc. IEEE*, **77**, February.
- Oskooi, B., Pedersen, L. B., and Smirnov, M., 2002, The DGP Working Group, Deep geothermal prospecting in Iceland: The 16th Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, Santa Fe, New Mexico.