

بررسی مرز لایه‌ها و توده‌های زمین‌گرمایی منطقه سبلان با استفاده از برگردان دو بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک

میلااد تکلو^۱، بهروز اسکویی^{۲*} و سهیل پرخیال^۳

^۱ کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، ژئوالکترونیک، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

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

^۳ استادیار، دانشگاه آزاد کرج، ایران

(دریافت: ۹۲/۲/۱۸، پذیرش نهایی: ۹۲/۷/۱۶)

چکیده

به منظور بررسی مخزن زمین‌گرمایی سبلان و هدف‌گذاری چاه‌های جدید اکتشافی و تزریقی، داده‌های مگنتوتلوریک در دو فاز طی سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ برداشت شد. پس از بررسی ابعادی محیط و تصحیح داده‌های خارج از رده که ناشی از نوفه‌های محیطی بودند، معکوس‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک صورت گرفت. نتایج به دست آمده در محدوده سبلان، مخزن زمین‌گرمایی را به شکل مناسبی آشکار کرد. بررسی مقاطع مقاومت ویژه حاصل از برگردان 2D در کنار داده‌های چاه‌های اکتشافی و برداشت‌های زمین‌شناسی نشان داد که سامانه زمین‌گرمایی سبلان با مدل مطالعاتی که جانستون (۱۹۹۲) عرضه کرده است و در آن لایه‌های رسانای ضخیم‌تر معمولاً در نواحی خروجی جریان زمین‌گرمایی یافت می‌شوند، مطابقت دارد.

واژه‌های کلیدی: مگنتوتلوریک، برگردان دو بُعدی، سامانه زمین‌گرمایی، مدل جانستون

The determination of boundaries of layers and geothermal bodies using 2D inversion of magnetotelluric (MT) data, in Sabalan area

Takalu, M.¹, Oskooi, B.² and Porkhial, S.³

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

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

³Assistant Professor, Islamic Azad University Karaj Branch, Iran

(Received: 28 Apr 2013, Accepted: 08 Oct 2013)

Summary

Geophysical methods play a key role in geothermal exploration since many objectives of geothermal exploration can be achieved by these methods. The geophysical surveys are directed at obtaining indirectly, from the surface or from shallow depth, the physical parameters of the geothermal systems. The other geophysical techniques like gravity, magnetic, self-potential studies, and shallow seismic refraction also provided valuable information about the shallow geothermal zone. The earlier magnetotelluric (MT) that was survey carried out (Singh and Drolia, 1983), provided qualitative information with limited narrow band data and limited quantitative result due to noisy electric field data. Due to both limitations in interpretation methods and the cost of data acquisition, magnetotelluric (MT) data have been traditionally obtained in profiles targeted to the geology, and then interpreted with two-dimensional inversion. In such an interpretation, one fits the off-diagonal impedances (Z_{xy} and Z_{yx}), generally after rotating the coordinate system so that the main diagonal components (Z_{xx} and Z_{yy}) are minimum, or

E-mail: boskooi@ut.ac.ir

دورنگار: ۰۲۱-۸۸۶۳۰۴۷۹

تلفن: ۰۲۱-۶۱۱۸۲۳۸

* نگارنده رابط:

at least small. It is seldom possible to find a single strike angle that is optimal for the full frequency range and for all sites, and possible impacts of off-profile structure must always be considered.

MT is an appropriate tool for identification of the deep subsurface structures. In this method, recording the erpendicular to horizontal components the fluctuations of the magnetic and electrical fields are measured at the earth surface. Using these measurements, the electrical conductivity distribution can be determined.

Geothermal resources are ideal targets for EM methods since they produce strong variations in underground electrical resistivity. Geothermal waters have high concentrations of dissolved salts that result in conducting electrolytes within a rock matrix. The resistivities of both the electrolytes and the rock matrix (to a lesser extent) are temperature dependent in such a way that there is a large reduction in the bulk resistivity with increasing temperature. The resulting resistivity is also related to the presence of clay minerals, and can be reduced considerably when clay minerals and clay-sized particles are broadly distributed. On the other hand, resistivity should be always considered with care. Experience has shown that the correlation between low resistivity and fluid concentration is not always correct since alteration minerals produce comparable, and often a greater reduction in resistivity. Moreover, although water-dominated geothermal systems have an associated low resistivity signature, the opposite is not true, and the analysis requires the inclusion of geological and, possibly, other geophysical data, in order to limit the uncertainties (Spichak, and Manzella, 2009). Geothermal energy has been harnessed by using the steam or hot water stored underground at high temperatures and pressures for the generation of electric power in conventional steam turbines, and by the direct use of the heat content of the resources in heat exchangers in industrial or domestic utilizations. Temperature and the circulation of subsurface hydrothermal fluids, both of which are characteristic features of geothermal systems, are capable of generating a surface electrical potential field. Such electric fields are the result of streaming potential, caused by the movement of hydrothermal fluids around the subsurface heat source (Fitterman and Corwin, 1982). Based on hydrodynamic geothermal sources, the flow can play the role of on initial parameter in the resistivity contrast of the geothermal source and its surrounding. using this feature, MT is capable of determining the boundary between geothermal system and the neighboring medium.

In order to investigate more closely Sabalan geothermal reservoirs and determine the injection and exploration wells, the magnetotelluric data was scheduled in two phases. The first phase was carried out at 28 MT stations in 2007. The second phase 50 magnetotelluric stations were taken in 2009. MT measurements, in Sabalan area, could clearly highlight the geothermal reservoir. The results of the MT survey are presented through isoresistivity maps sliced at different elevations to show the resistivity changes with depth, and through cross sections to show the resistivity structures that were modeled. The changes in resistivity with elevation and observed resistivity layers are discussed in detail. Interpretation of these results will help in delineating the arbitrary boundaries geothermal resource at Mt. Sabalan and pinpoint the best drilling targets in the area.

After dimensional analysis using skew parameters (for skew below 0.2) study area shows a two-dimensional behavior. After removing data outside of category that caused by environmental noise, magnetotelluric inversion was performed. The aim designing of the two profiles S01 and S02 including some part of reservoir and we also wanted to S01 profile to pass the exploration wells. Profiles S01 and S02 cover the Moil Valley and the present development block of the Mt. Sabalan Geothermal Project.

Along the profile S01, resistivity of the top layer varies from 50 to $>250 \Omega\text{-m}$. An

anomalous conductive layer extending from Moil Valley to wells NWS-7D and NWS-8D was observed to about 1000 m above sea level (a.s.l.) This conductive layer has a thickness of about 500-1000 m and is underlain by a moderate to highly resistive layer with resistivity values >50 to $250 \Omega\text{-m}$.

Along the profile S02 two conductive zones ($<30 \Omega\text{-m}$) are detected, one within the well NWS-7D, in the western portion, beneath MT stations 249 and 24, and another one beneath station 216, on the eastern portion. The conductive anomaly on the west is part of the conductive layer observed in P01. A high resistivity block ($>100 \Omega\text{-m}$) is modeled separating the conductive zones, its boundaries marked by steep resistivity gradients. The shallowest portion of this resistive body is found beneath stations 109, 219 and 218, at elevations of about 1500 m a.s.l.

The resistivity sections derived from 2D inversion in conjunction with exploration wells and geology surveys showed that Sabalan geothermal system is in agreement with Johnston's studies (1992) in which the thicker conductive layers are found in the outer areas.

Keywords: Magnetotelluric, 2D Inversion, Geothermal System, Johnston's Model

۱ مقدمه

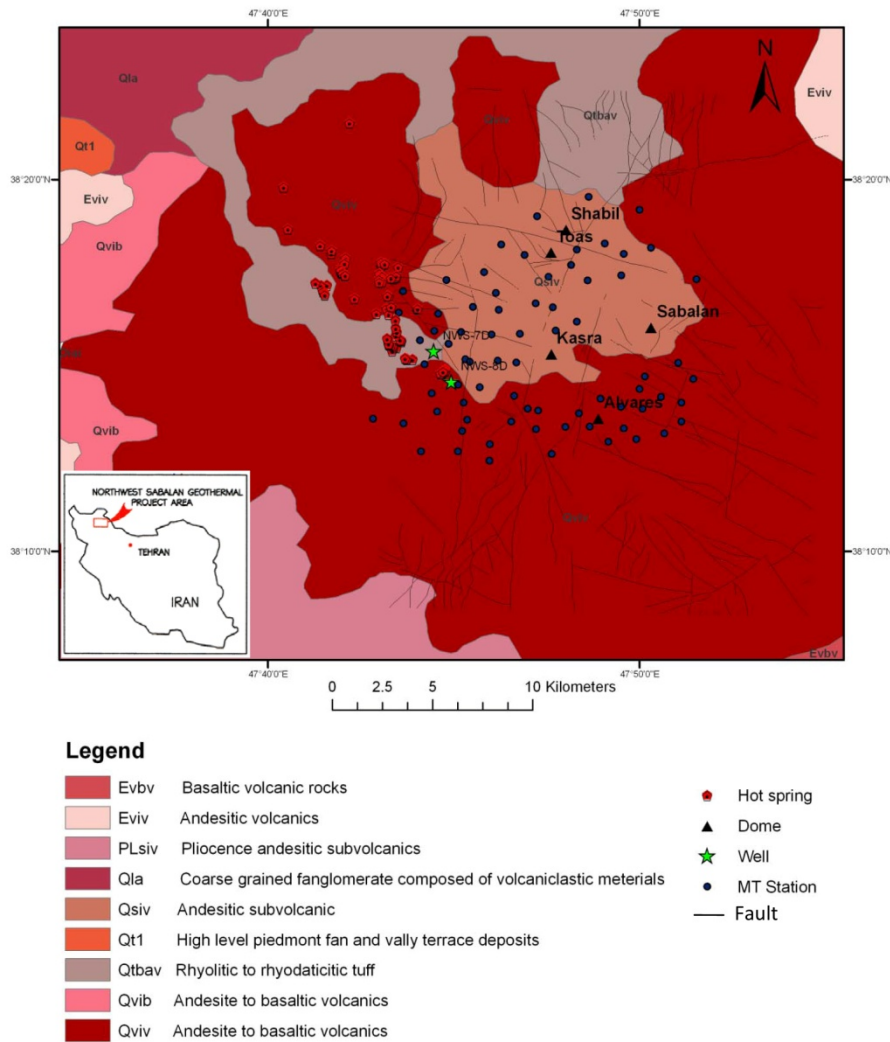
الکتريکی و الکترومغناطیسی غیر قابل دسترس هستند به کار برد (سیمپسون و باهر، ۲۰۰۵).

تحقیقاتی که در این زمینه در سطح جهان صورت گرفته است بسیارند و سابقه طولانی دارند. برداشت‌های مگنتوتلوریک در ایران اولین بار از سوی سازمان انرژی‌های نو (سانا) به منظور بررسی ذخایر زمین‌گرمایی صورت گرفت. اولین بررسی مگنتوتلوریک صورت گرفته در اطراف ناحیه سیلان در استان اردبیل و در نزدیکی شهر مشگین شهر مربوط به سال ۱۹۹۸ است که موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی آن در شکل ۱ آمده است. در عملیات سال ۱۹۹۸، اندازه‌گیری‌های ژئوالکتريکی در ۲۱۲ ایستگاه صورت گرفت که منطقه را به وسعت ۸۶۰ کیلومتر مربع پوشش می‌داد. بازه بسامدی بین ۴ هرتز تا ۳ کیلوهرتز بود. حداقل بسامد مورد استفاده در این عملیات ۴ هرتز بود به همین علت عمق نفوذ امواج الکترومغناطیسی خیلی کم بود و مقاطع حاصل از برگردان دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک در اعماق بیش از ۱ کیلومتر تصویر درستی از عمق و ضخامت مخزن زمین‌گرمایی به دست نمی‌دادند. دومین بررسی

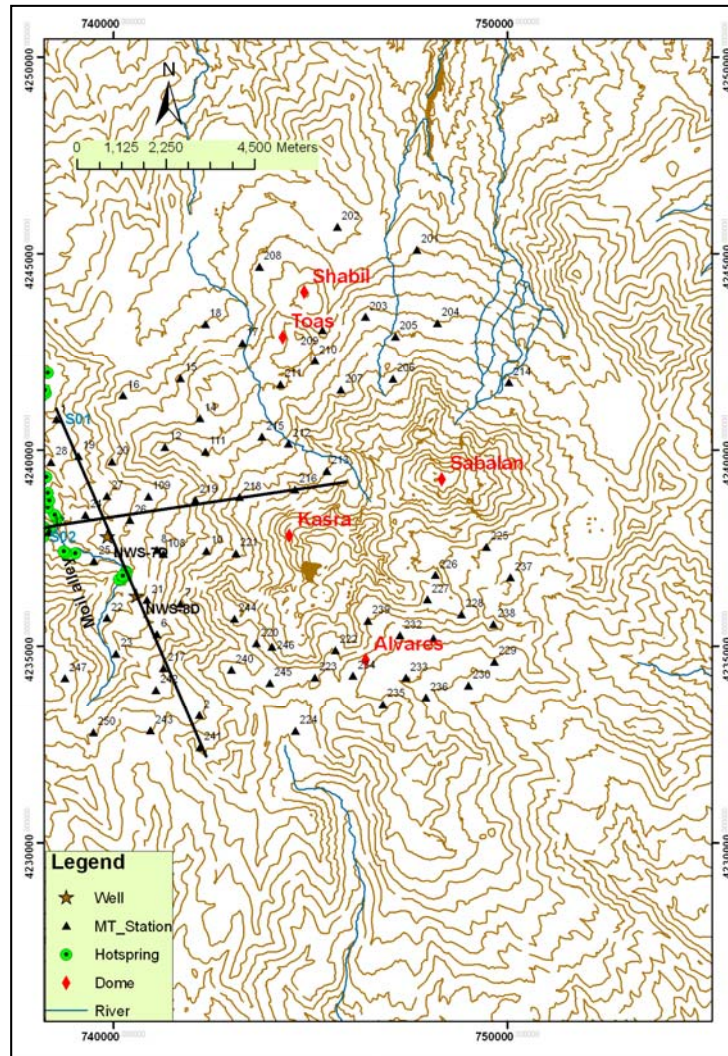
روش مگنتوتلوریک روشی مناسب به منظور شناخت بی‌هنجاری‌های زیرسطحی در اعماق زیاد است. در این روش مولفه‌های عمود بر هم نوسان‌های میدان‌های مغناطیسی و الکتريکی در سطح زمین ثبت می‌شود که با استفاده از آن می‌توان توزیع رسانایی الکتريکی زمین تحت بررسی را به دست آورد. یک سامانه زمین‌گرمایی شامل ۳ بخش اصلی است؛ منبع داغ که در اعماق زیاد قرار دارد، مخزن زمین‌گرمایی که یک محیط کاملاً متخلخل است و یک لایه نفوذناپذیر که در بالای مخزن زمین‌گرمایی قرار دارد و مانع خروج آب موجود در مخزن به سطح زمین می‌شود. مگنتوتلوریک یک روش الکترومغناطیسی است که برای بررسی وضعیت الکتريکی لایه‌های زیرسطحی به کار می‌رود و در سال‌های اخیر در روش‌های تفسیری آن پیشرفت‌هایی صورت گرفته است. این روش دارای طیف وسیعی از کاربردها در زمینه‌های گوناگون، به ویژه در مورد ذخایر زمین‌گرمایی است. مزیت اساسی روش مگنتوتلوریک این است که یک روش طبیعی بر پایه القا است و می‌توان آن را برای تعیین مشخصه‌های ساختارهای عمیق‌تر که به روش‌های دیگر

استفاده از تلفیق داده‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ مقاطع مقاومت ویژه مناسبی از منطقه تهیه و محدوده و میزان مقاومت ویژه مخزن زمین‌گرمایی تعیین شود. این برداشت‌ها در محدودهٔ بسامدی ۰٫۰۳ - ۳۲۰ هرتز صورت گرفته‌اند. پس از بررسی ابعادی محیط با استفاده از پارامتر اسکيو (Skew) که مقدار کم آن (انحراف زیر ۰/۲) برای ایستگاه‌ها نشان‌دهندهٔ محیط دو بُعدی منطقهٔ مورد بررسی است و همچنین تصحیح داده‌های خارج از رده که ناشی از نوفه‌های محیطی بودند، معکوس‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک صورت گرفت.

مگنتوتلوریک در دو فاز برنامه‌ریزی شد. فاز اول در ۲۰۰۷ و شامل ۲۸ ایستگاه بود. این داده‌ها فقط قسمت غربی ناحیه سبلان را تحت پوشش قرار دادند. پدهای اکتشافی D و E پس از برداشت و تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک در فاز اول در نظر گرفته شدند و چاه‌های اکتشافی NWS-8D و NWS-7D به ترتیب در پد E و D مورد حفاری قرار گرفتند. فاز دوم برداشت‌ها در ۲۰۰۹ صورت گرفت که شامل ۵۳ ایستگاه مگنتوتلوریک بود (پرخيال و همکاران، ۲۰۱۰). نقشه توپوگرافی و موقعیت ایستگاه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. در این تحقیق سعی شده است با



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده شده محدودهٔ کوه سبلان.



شکل ۲. نقشه توپوگرافی منطقه سیلان.

۲ نظریه روش MT

پیشرو و معکوس است. یکی از روش‌های EM روش مگنتوتلوریک (MT) یا روشی است با چشمه طبیعی که منشا آن امواج الکترومغناطیس طبیعی ایجاد شده در یون‌سپهر و مغناطیس‌سپهر زمین است. در این روش با استفاده از تانسور امپدانس که مولفه‌های افقی، میدان مغناطیسی را به مولفه‌های افقی میدان الکتریکی مرتبط می‌کند می‌توان پارامترهای مقاومت ویژه ظاهری و فاز امپدانس را به منظور تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک استخراج کرد (ووزوف و نبیقیان، ۱۹۹۱):

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = Z \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

اصول القا در روش الکترومغناطیس (EM) با معادلات ماکسول تشریح می‌شود که در طول ۱۵۰ سال به خوبی شناخته شده است. کاربرد معادلات ماکسول را محققان گوناگونی بررسی و به خوبی ساده‌سازی و تصحیح کرده‌اند. برای مثال از جمله پیشخان این تحقیق می‌توان کاگنبارد (۱۹۵۳) را نام برد. همانند سایر روش‌های ژئوفیزیکی تفسیر کیفی و کمی EM نیز در دو دهه اخیر دارای بیشترین پیشرفت بوده است که این پیشرفت‌ها شامل روش‌های برداشت جدید و روش‌های مدل‌سازی

در حالت مدل یک بُعدی و دو بُعدی که مولفه‌های میدان در راستای امتداد و عمود بر امتداد لایه‌ها برداشت شده باشند، مولفه‌های قطر اصلی تانسور امپدانس مقدار صفر دارد. در حالت مدل دو بُعدی معادلات امواج الکترو مغناطیسی به دو مُد قطبش مستقل TE (میدان الکتریکی در راستای امتداد لایه‌ها) و TM (میدان مغناطیسی در راستای امتداد لایه‌ها) تفکیک می‌شود. مُد TE برای تشخیص ساختارهای عمیق و نارسانا مفید است، در حالی که مُد TM برای تشخیص ساختارهای کم عمق و رسانا مفید است (آسو و همکاران، ۲۰۰۶). مزیت اساسی روش مگنتوتلوریک این است که می‌توان آن را برای تعیین مشخصه‌های ساختارهای عمیق تر که از راه دیگر روش‌های الکتریکی و الکترومغناطیسی غیر قابل دسترس هستند به کار برد. با توجه به اینکه تشخیص محیط هادی و مقاوم در طبیعت به سادگی امکان پذیر نیست، تشخیص مُدهای TE و TM با استفاده از نمودارهای قطبش در هر سونداژ صورت گرفت.

در هر ایستگاه مگنتوتلوریک پنج مولفه H_x ، E_y ، E_x ، H_z و H_y اندازه گیری می‌شود. به واسطه اینکه شرایط مرزی E_z برابر صفر است، لذا اندازه گیری کاملاً سه بُعدی با این پنج مولفه صورت می‌گیرد.

۳ زمین‌شناسی منطقه سبلان

از نظر زمین‌ساختی منطقه مورد بررسی بخشی از دامنه‌های شمال غربی سبلان یا جزئی از فلات مرتفع آذربایجان است. فعالیت زمین‌ساختی منطقه پیش‌گفته تحت تأثیر حرکت صفحه‌های زمین‌ساختی در محل برخورد صفحات ایران، کاسپین، اوراسیا و عربی قرار گرفته است. فعالیت قدیمی سبلان از ائوسن شروع شده است ولی آنچه که کوه سبلان را به وجود آورده در پلیوسن شروع به فعالیت کرده و تا عصر بعد از آخرین یخبندان ادامه داشته است. مواد سازنده این آتشفشان از

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$H_z = T^T \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (3)$$

که در آن، ماتریس Z به منزله ماتریس امپدانس مختلط و T برداری است که در حکم تابع تبدیل ژئومغناطیسی مختلط یا بردار تپیر شناخته و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T = (A, B)^T \quad (4)$$

که A و B مولفه‌های مختلط بردار تپیر در راستای x و y هستند و Z و T در حکم تابع‌های تبدیل مگنتوتلوریک شناخته می‌شوند. Z_{ij} نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z_{ij} = \frac{E_i}{H_j} e^{i\varphi} \rightarrow \varphi = \Psi_{E_i} - \Psi_{H_j} = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(Z_{ij})}{\text{Re}(Z_{ij})} \quad (5)$$

که $i, j = x, y$ و Ψ_{E_i, H_j} به ترتیب فاز میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هستند. در یک زمین همگن فاز امپدانس برابر مقدار زیر می‌شود:

$$Z = \frac{\omega\mu_0}{k} = \frac{\omega\mu_0}{(-i\omega\mu\sigma)^{1/2}} = \sqrt{\frac{i\omega\mu_0}{\sigma}} \Rightarrow \varphi = \frac{\pi}{4} \quad (6)$$

این بدین معنی است که با توجه به فرایند پخش انتشار امواج صفحه‌ای الکترومغناطیسی در محیط رسانا، میدان الکتریکی به اندازه ۴۵ درجه نسبت به میدان مغناطیسی، تقدّم فاز می‌یابد.

در واقع با اندازه‌گیری دامنه مولفه‌های افقی عمود بر هم میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در سطح زمین برای بسامدهای متفاوت، می‌توان تغییرات عمقی مقاومت را تعیین کرد. هارینارایانا و همکاران (۲۰۰۶) از این تانسور اطلاعاتی در مورد بُعد و امتداد ساختارهای رسانا و همچنین پارامترهای مقاومت ویژه ظاهری و فاز امپدانس، به منظور تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک استخراج کردند:

$$\rho = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z|^2 \quad (7)$$

که در آن μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد و ω بسامد زاویه‌ای است.

آتشفشانی است. در نقشه و نیم‌رخ‌های زمین‌شناسی ناحیه مورد بررسی، رخنمون‌های سنگی قابل توجهی نشان داده نشده است و عمدتاً رسوبات آبرفتی مشاهده می‌شود (شکل ۳).

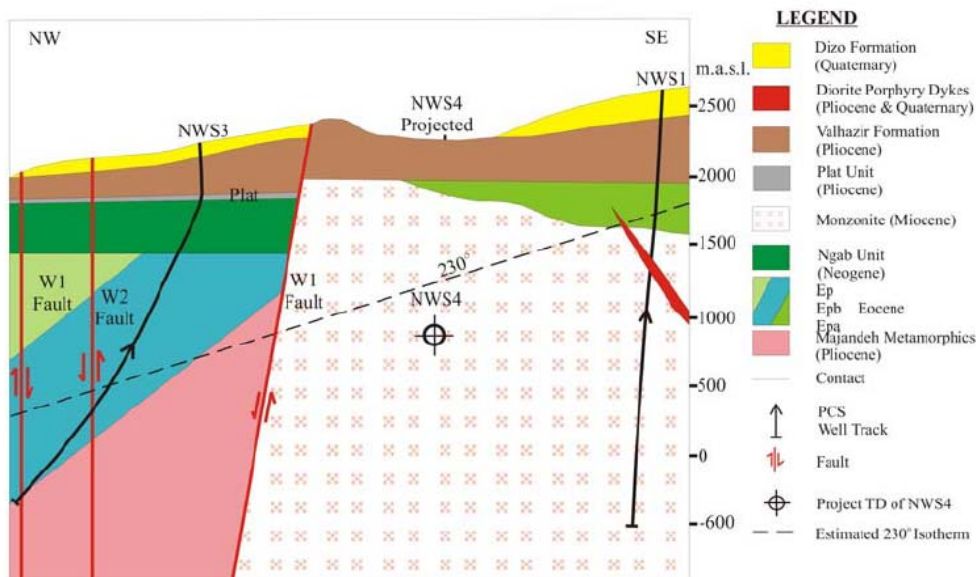
۴ برداشت داده‌های MT در منطقه سیلان

برداشت‌های مگنتوتلوریک در منطقه سیلان با استفاده از مجموعه تجهیزات Mtu-5a صورت گرفت که شامل دو جایگاه گردشی داخل منطقه سیلان و یک جایگاه ثابت مرجع در ولهزیر است. داده‌های مگنتوتلوریک به دست آمده دارای کیفیت خوبی در کمترین بسامد ۰/۰۰۳ هرتز است. در این تحقیق به منظور تهیه مقاطع دو بُعدی زمین‌شناسی و تفسیر داده‌ها از نرم‌افزار WinGLink استفاده شد. این نرم‌افزار قابلیت بسیار خوبی در معکوس‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک دارد. بعد از پردازش داده‌ها، داده‌ها به قالب EDI آماده‌سازی شد که قابل فراخوانی با نرم‌افزار WinGLink است.

یک ماگمای عمقی حاصل شده ولی تحت تاثیر فرایندهای کم‌ویش پیچیده‌ای قرار داشته که تبلور بخشی، هضم و اختلاط دو ماگما از مهم‌ترین آنها است. بعد از ائوسن، مرحله بعدی فعالیت این کوه متعلق به میوسن است. بنابراین تکامل ماگمایی در طی زمان طولانی صورت گرفته است (دیدون و ژرمن، ۱۹۷۶).

در محدوده مورد بررسی، فعالیت‌های گسترده ماگمایی از ائوسن تا کواترنری قابل رؤیت است. ساختار آتشفشانی سیلان که از نوع مرکزی است، در محل تقاطع شکستگی‌های اصلی و روی منطقه‌ای بین دو گسل بزرگ قدیمی بنا گذاشته شده و در مراحل رشد خود دهانه آتشفشانی ریزشی به قطر ۱۲ کیلومتر به وجود آورده است. فعالیت ماگمایی از ائوسن تا کواترنری ادامه یافته است و برون‌زدی از فعالیت‌های ماگمایی کرتاسه بالایی دیده نمی‌شود. گدازه‌های ائوسن از راه شکستگی‌های ژرف بالا آمده‌اند (نوراللهی و همکاران، ۲۰۰۷).

تنوع سنگ‌شناسی رخنمون‌ها در منطقه مورد بررسی مربوط به تشکیل واحدهای سنگی در فازهای متفاوت



شکل ۳. شبه‌مقطع زمین‌شناسی منطقه سیلان (گزارش شرکت SKM به سازمان انرژی‌های نو (۲۰۰۳)).

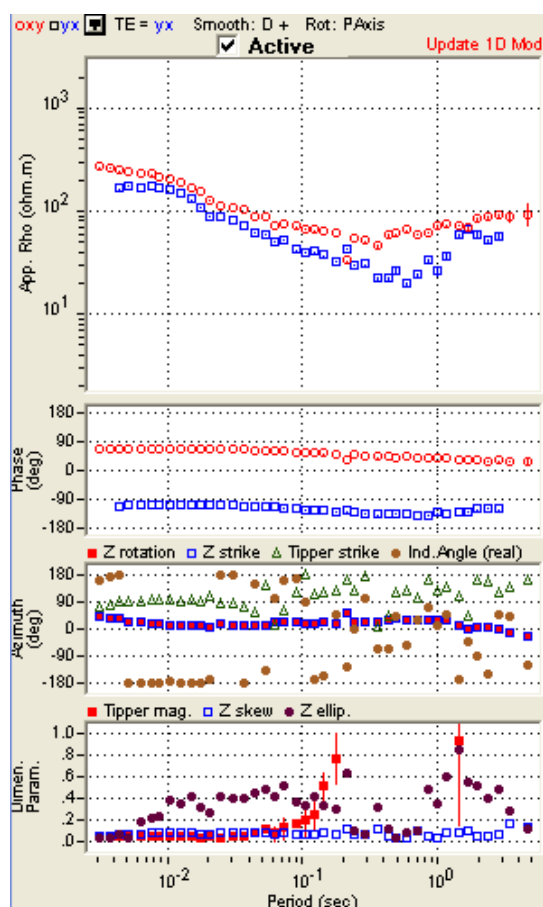
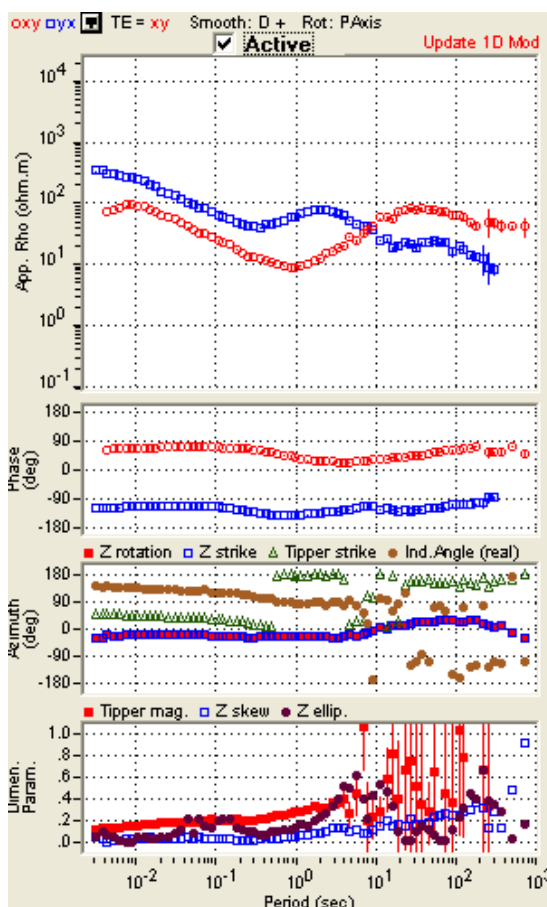
از بررسی پارامتر اسکيو مشخص شد که برای اکثر ایستگاه‌ها این مقدار زیر ۰/۲ است و این نشان‌دهنده آن است که به احتمال بسیار زیاد محیط یک‌بُعدی و دو‌بُعدی غیر آشفته است. در شکل ۴ نمونه‌ای از ایستگاه‌ها و پارامترهای مربوط آمده‌اند.

داده‌های MT به صورت مقاومت ویژه ظاهری و فاز برحسب دوره تناوب نمایش داده می‌شوند (روابط (۱) تا (۷)). حین برداشت، ممکن است نوفه‌های محیطی اثرات نامطلوبی روی داده‌های برداشت شده بگذارند، به همین علت ویرایش و فیلتر کردن داده‌های نامطلوب یک امر ناگزیر است. برای نمونه در شکل ۵ ایستگاه‌های ۲۱۸ و ۱۰۹ قبل از ویرایش و بعد از ویرایش آمده است.

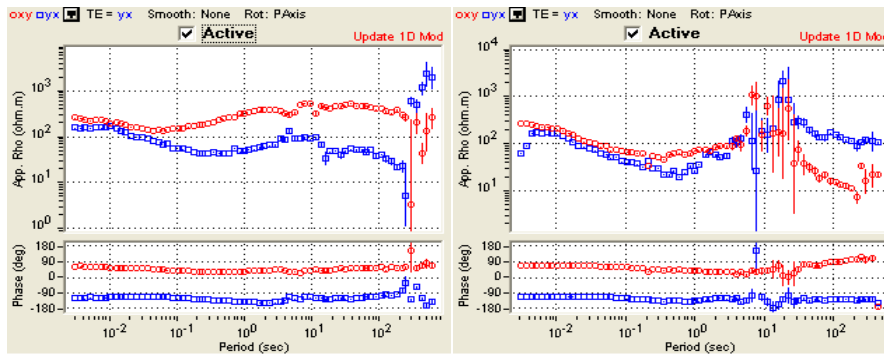
۵ فرآوری، برگردان و تفسیر داده‌های MT یکی از پارامترهای اصلی که برای تحلیل ابعادی داده‌های MT استفاده می‌شود اسکيو (Skew) است که به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\text{Skew} = \frac{|Z_{xx} + Z_{yy}|}{|Z_{xy} - Z_{yx}|} \quad (۸)$$

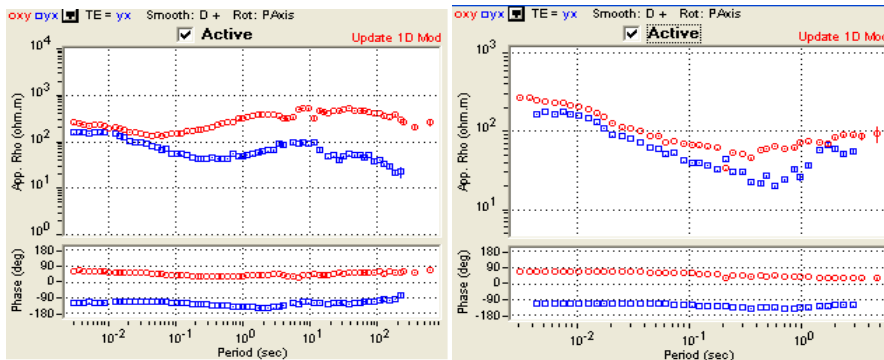
این کمیت یک اندازه‌گیری از نامتقارنی محیط صورت می‌دهد. در یک مدل دو‌بُعدی و یک مدل سه‌بُعدی که از نظر محوری متقارن است این پارامتر برابر صفر است. انحراف اسکيو از صفر وجود یک ساختار سه‌بُعدی نامتقارن را مشخص می‌کند. اگر مقدار پارامتر اسکيو نزدیک به صفر (کمتر از ۰,۲) باشد بیانگر این مطلب است که ساختار یک‌بُعدی و یا دو‌بُعدی غیر آشفته است.



شکل ۴. به ترتیب از راست به چپ: داده‌های ایستگاه‌های ۲۱۸ و ۲۱۷ (در همه ایستگاه‌ها در قاب پایین مربع آبی رنگ نشان‌دهنده Skew است).



(الف)



(ب)

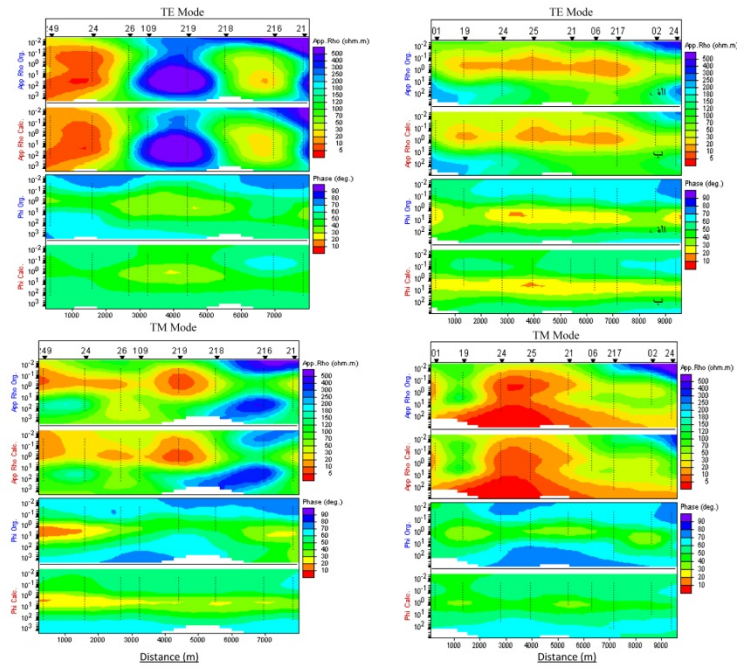
شکل ۵. به ترتیب از راست به چپ: ایستگاه ۲۱۸ و ۱۰۹، (الف) قبل از ویرایش و (ب) بعد از ویرایش.

در شکل ۶ شبه مقاطع حاصل از برگردان داده‌های MT در طول نیم‌رخ‌های S01 و S02 برای هریک از مُدهای TE و TM به صورت جداگانه آورده شده است. این مقاطع تطابق خوب داده‌های صحرائی و پاسخ مدل را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده صحت وارون‌سازی است.

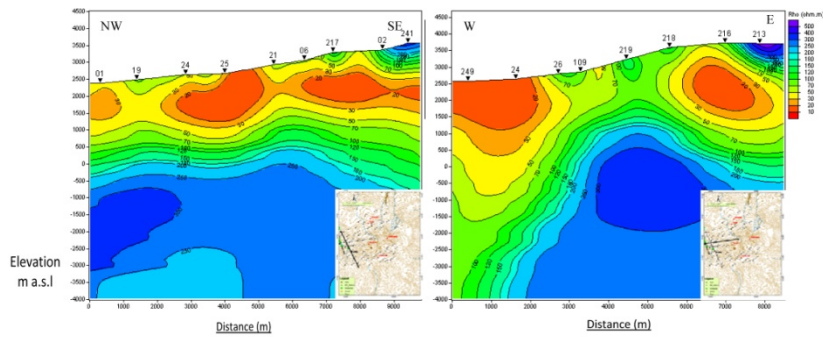
شکل ۷ نتایج حاصل از برگردان دو بُعدی را در طول نیم‌رخ‌های S01 و S02 به صورت ترکیب مُدهای TE و TM را نشان می‌دهد. در نیم‌رخ S01 مقاومت ویژه لایه‌های بالایی از ۵۰ اهم‌متر تا بیشتر از ۲۵۰ اهم‌متر متفاوت است. یک لایه رسانای ناهنجار که در دره موئیل تا پدهای D و E گسترده‌گی دارد زیر ایستگاه‌های ۲۵ و ۲۱۷ از سطح تا حدود ۱۰۰۰ متر از سطح دریا مشاهده شد. این لایه رسانا که حدود ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر ضخامت دارد از زیر با یک لایه با مقاومت ویژه متوسط تا بالا با مقادیر بیشتر از ۵۰ تا ۲۵۰ اهم‌متر محدود شده است.

از طرفی یکی از اختلالاتی که به واسطه حضور توده‌های رسانای سطحی ایجاد می‌شود و در حکم جابه‌جایی عمودی در منحنی‌های مقاومت ویژه و فاز بین جایگاه‌های همسایه یا بین دو منحنی در یک جایگاه، بدون تغییر در شکل دو منحنی، جابه‌جایی ایستا تعریف می‌شود که در این تحقیقات در حین برگردان دو بُعدی با نرم‌افزار WinGlink از بین برده می‌شود.

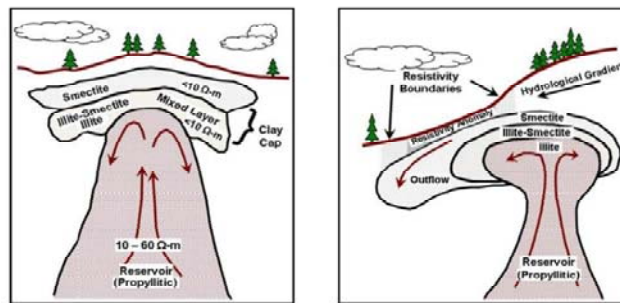
پس از اِعمال مراحل پردازشی، وارون‌سازی دو بُعدی حالت TE+TM با نرم‌افزار WinGlink صورت گرفت. داده‌های MT در محدوده بسامدی ۰,۰۰۳ تا ۳۲۰ هرتز بررسی شد و بیشینه عمق نفوذ برای مدل حدود ۱۳ کیلومتر به دست آمد. دو نیم‌رخ S01 و S02 به منظور بررسی‌های مخزن زمین گرمایی طراحی شدند. نیم‌رخ S01 به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که چاه‌های اکتشافی NWS-7D و NWS-8D را قطع می‌کند.



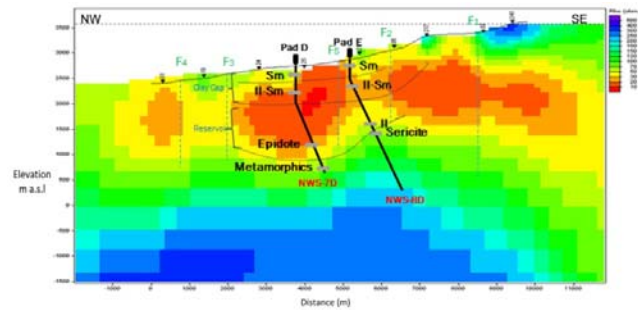
شکل ۶. نتایج حاصل از برگردان داده‌های MT در امتداد نیم‌رخ S01 (شکل سمت راست) و نیم‌رخ S02 (شکل سمت چپ)، (الف) داده‌های صحرایی و (ب) پاسخ مدل (در هر مقطع شکل بالا مقاومت ویژه ظاهری و شکل پایین فاز امپدانس).



شکل ۷. مقطع نهایی مقاومت ویژه الکتریکی (TE+TM) در امتداد: نیم‌رخ S01 (شکل سمت چپ) و نیم‌رخ S02 (شکل سمت راست).



شکل ۸. مدل نظری سامانه زمین‌گرمایی جانستون (۱۹۹۲).



شکل ۹. ارتباط مقاومت ویژه با کانی‌های آلتراسیون شده در طول نیم‌رخ S01 (خطوط نقطه‌چین نشان‌دهنده گسل هستند).

داده‌های MT، یک لایه رسانا با مقاومت ویژه کمتر از ۲۰ اهم‌متر از ارتفاع نزدیک به سطح زمین تا ارتفاع حدود ۱۰۰۰ متر از سطح دریا مشاهده می‌شود که می‌توان آن را جریان زمین‌گرمایی تفسیر کرد. با بررسی مقاطع دیده می‌شود که این جریان زمین‌گرمایی با توجه به شیب منطقه در نیم‌رخ‌ها به سمت دره موئیل امتداد دارد. از طرفی این لایه رسانا در برخی نواحی در زیر ایستگاه‌های ۲۴، ۲۵ و ۲۴۹ بیرون‌زدگی دارد (شکل ۷). با دقت روی موقعیت چشمه‌های آب گرم منطقه دیده می‌شود که در نزدیکی این ایستگاه‌ها چشمه‌های آب گرم زیادی قرار گرفته است که می‌توان آن را محل خروجی جریان زمین‌گرمایی تفسیر کرد. در مطالعاتی که از سوی جانستون و همکاران صورت گرفت مدل نظری سامانه زمین‌گرمایی حاصل شد که در آن لایه‌های رسانای ضخیم‌تر معمولاً در نواحی خروجی جریان زمین‌گرمایی یافت می‌شوند (شکل ۸). در نیم‌رخ‌های S01 و S02 این زون‌های رسانا حدود ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ متر زیر پد D ضخامت دارند. علاوه بر آن ارتباط آن با داده‌های چاه NWS-7D نشان می‌دهد که در این چاه، لایه رسانا با زون‌های Sm (اسمکتیت) و Il-Sm (ایلیت-اسمکتیت) منطبق است؛ درحالی‌که زون اپیدوت با افزایش مقادیر مقاومت ویژه (اهم‌متر >30) منطبق است (شکل ۹). باز از همین انطباق می‌توان به این نتیجه رسید که مدل زمین‌گرمایی سیلان با مدل نظری جانستون سازگاری دارد که در آن کانی‌های آلتراسیون یافته

همچنین در نیم‌رخ S02 دو زون رسانا با مقاومت ویژه کمتر از ۳۰ اهم‌متر به دست آمد، یکی درون پد اکتشافی D در بخش غربی‌تر زیر ایستگاه ۲۴۹ و ۲۴ و دیگری زیر ایستگاه ۲۱۶ در بخش شرقی نیم‌رخ. بی‌هنجاری رسانا در غرب بخشی از لایه رسانایی است که در نیم‌رخ S01 مشاهده شد. مرزهای یک بلوک با مقاومت ویژه بیشتر از ۱۰۰ اهم‌متر که زون‌های رسانا را جدا کرده است، به صورت کنتورهای مقاومت ویژه با شیب تند مشخص شده است. بخش سطحی‌تر این توده مقاوم زیر ایستگاه‌های ۲۱۹، ۲۱۰ و ۲۱۸ در ارتفاعات حدود ۱۵۰۰ متر از سطح دریا قرار گرفته است.

۶ نتیجه‌گیری

پس از تفسیر نیم‌رخ‌های S01 و S02 با توجه به اطلاعات چاه‌های NWS-8D (گزارش شرکت SKM به سازمان انرژی‌های نو، ۲۰۱۰) و NWS-7D (گزارش شرکت SKM به سازمان انرژی‌های نو، ۲۰۰۹) نتایج قابل توجهی حاصل شد که در ادامه مورد اشاره و بحث قرار می‌گیرند. زون‌های رسانای سطحی با مقاومت ویژه کم که در زیر ایستگاه‌های ۲۴ و ۲۵ در نیم‌رخ S01 و زیر ایستگاه‌های ۲۴ و ۲۴۹ در نیم‌رخ S02 به دست آمده‌اند با تحقیقاتی که جانستون عرضه کرده است، مطابقت دارد. با توجه به روند کلی مقاطع حاصل از برگردان دو بُعدی داده‌های MT، در همه مقاطع حاصل از برگردان دو بُعدی

- prospecting, *Geophysics*, **8**, 605-635.
- Didon, J. and Gemain, Y. A., 1976, La Sabalan, volcan Plio-Quaternaire de L'Azerbajjn orientat (Iran), Etude geologique et petrographique de L'edifice et de son environnement regional. These 3 eeme cycle, Univ. Sceintifique et Medicale de Grenoble, France.
- Energy Development Corporation, 2009, Petrology of Well NWS-7D. October 2009.
- Energy Development Corporation, 2010, Petrology of Well NWS-8D. February 2010.
- Fitterman, D. V. and Corwin, R. F., 1982, Inversion of self-potential data from the Cerro Prieto geothermal field, Mexico, *Geophysics*, **47**, 938-945.
- Harinarayana, T., Abdul Azeez, K. K., Murthy, D. N. and Veeraswamy, K., 2006, Exploration of geothermal structure in Puga geothermal field, Ladakh Himalayas, India by magnetotelluric studies, *Journal of Applied Geophysics*, **58**, 280-295.
- 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.
- Porkhial, S., Rigor, D., Bayrante, B., Domingo, B., 2010, Magnetotelluric survey of NW Sabalan geothermal project, Iran Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia.
- Noorollahi, Y., Itoi R. and Tanaka, T., 2007, Well testing and reservoir properties analyzing in Sabalan geothermal field al, North Western Iran, in: 5th International Symposium on Earth Science and Technology, 3-4 Dec. 2007, Fukuoka-Japan, 247-253.
- Simpson, F. and Bahr, K., 2005, Practical Magnetotellurics Cambridge University Press, Cambridge.
- Singh, S. B., Drolia, R. K., Sharma, S. R. and Gupta, M. L., 1983, Application of resistivity surveying to geothermal exploration in the Puga Valley, India, *Geoexploration*, **21**(1), 1-11.
- SKM report to SUNA: NW Sabalan geothermal project: MT survey RE-analysis, 2003, revision 2, REP No: AP00079-RPT-GE-109, 28 October 2003.
- Spichak, V. and Manzella, A., 2009, Electromagnetic sounding of geothermal, *Journal of Applied Geophysics*, **68**, 459-478.
- Vozoff, k. and Nabighian, M. N., 1991, M. C. (ed.). *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Vol.2: application, part B. Tusla, Society of Exploration Geophysics, 641-711.

متفاوت با مقادیر مقاومت ویژه ارتباط دارد، و به همین صورت می‌توان به این نتیجه رسید که کانی‌هایی با دمای بالاتر مثل اپیدوت و ایلیت خالص مقادیر مقاومت ویژه کمتر از ۲۰ اهم‌متر دارند. به همین صورت می‌توان با بررسی اطلاعات چاه NWS-8 به این نکته رسید که زون‌های Sm, Cl, Il-Sm در ناحیه با مقاومت ویژه کمتر از ۲۰ اهم‌متر قرار گرفته‌اند، درحالی‌که ایلیت و سریست با کنتورهای مقاومت ویژه بیشتر از ۳۰ اهم‌متر منطبق هستند. این نتایج با نتایج بررسی‌های چاه NWS-7 که در آن لایه رسانا با زون Sm (اسمکتیت) منطبق است، سازگاری دارد (شکل ۹). در نیم‌رخ S02 نواحی رسانا با یک بلوک مقاوم سطحی در ارتفاع حدود ۱۵۰۰ متر از یکدیگر جدا می‌شوند. بر طبق مدل نظری جانستون و مطابقت با داده‌های چاه در این نواحی، کانی‌های آلتراسیونی دمای بالاتر مثل اپیدوت، با افزایش مقاومت ویژه منطبق هستند. از طرفی همچنین این توده مقاوم می‌تواند یک توده نفوذی باشد که با فعالیت آتشفشانی در این ناحیه از قبیل گنبد کسری منطبق است. بررسی گسل‌های اصلی روی نقشه نشان می‌دهد که بیشتر این ساختارها با ناپیوستگی‌ها یا تغییراتی در لایه‌های مقاومت ویژه منطبق هستند. برای نمونه گسل‌های F1, F2, F3 و F4 و F5 روی نیم‌رخ S01 در شکل ۹ آمده است.

تشکر و قدردانی

از سازمان انرژی‌های نو وزارت نیرو برای در اختیار گذاشتن داده‌های مگنتوتلوریک تشکر می‌شود.

مراجع

- Asaue, H., Koike, K., Yoshinaga, T. and Takakura, Sh., 2006, Magnetotelluric resistivity modeling for 3D characterization of geothermal reservoirs in the Western side of Mt. Aso, SW Japan, *Journal of Applied Geophysics*, **58**, 296-312.
- Cagniard, L., 1953, Basic theory of magnetotelluric method in geophysical