

تعیین محدوده مخزن زمین‌گرمایی سبالان با استفاده از وارون‌سازی یک‌بُعدی و دو‌بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک

بهروز اسکوئی*^۱، میلاد تکلو^۱ و سهیل پرخیال^۲

^۱مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۹/۰۶، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۲/۲۱)

چکیده

منطقه آتشفشان سبالان اولین منطقه‌ای است در ایران که به‌منظور بررسی‌های زمین‌گرمایی در آن برداشت‌های مگنتوتلوریک صورت گرفته است. آخرین برداشت‌های مگنتوتلوریک در دوفاز برنامه‌ریزی شد. در این مقاله با تلفیق داده‌های مگنتوتلوریک این دو فاز محدوده مخزن مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از تفسیر نقشه‌های هم‌مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی یک‌بُعدی و دو‌بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک و همچنین مقاطع مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی دو‌بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک دو مخزن اصلی قابل شناسایی است. مخزن اصلی در محدوده‌ای در قسمت غربی کوه سبالان که از سمت جنوب و جنوب غربی قله سبالان به سمت غرب و دره موئیل کشیدگی دارد و بیش از دو برابر از محدوده مخزن اولیه که در تحقیقات قبلی حاصل شد بزرگ‌تر است و مخزن دیگر با وسعت کوچک‌تر در شیب در قسمت شمالی کوه سبالان جای گرفته است.

واژه‌های کلیدی: آتشفشان سبالان، مگنتوتلوریک، وارون‌سازی، مخزن زمین‌گرمایی

Determination of the boundaries of Sabalan geothermal reservoirs using 1D and 2D inversion of the magnetotelluric data

Behrooz Oskooi^{1*}, Milad Takalu¹ and Soheil Porkhial²

¹ Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

² Islamic Azad University, Karaj Branch, Iran

(Received: November 27, 2013, accepted: May 11, 2015)

Summary

In magnetotelluric (MT) methods, perpendicular and horizontal components of the fluctuations of the magnetic and electrical fields are measured on the earth surface. The earlier MT surveys (for example Singh and Drolia, 1983), provided qualitative information with limited narrow banded

*Corresponding author:

boskooi@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

data and limited quantitative results due to noisy electric field data. Through improving the interpretation schemes and lowering the cost of data acquisition, the MT data has been traditionally obtained in profiles targeting the geological structures and then interpreted with one and two-dimensional inversions. 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 at least as small as possible. It rarely happens that we can find a single strike angle optimal for the full frequency range and all sites. Therefore, the potential impacts of off-profile structures must always be considered. By MT measurements, the electrical conductivity distribution can be determined. Based on the hydrodynamic specification of the geothermal sources, the flow can play the role of an initial parameter in the resistivity contrast of the geothermal source and its surroundings. Using this feature, MT is capable of determining the boundary between a geothermal system and its neighboring medium.

The Mt. Sabalan region lies on the south Caspian Plate, which underthrusts the Eurasian Plate towards the north. It is in turn underthrusts by the Iranian Plate, which produces compression in a northwestern direction. Geological structures in this area are complicated further by a dextral rotational movement caused by the northward underthrusting of the nearby Arabian Plate beneath the Iranian Plate.

The Sabalan geothermal area lies at the northwest slope of Mt. Sabalan, an immense stratovolcano located in the province of Ardebil in northwestern Iran. For the first time in Iran, MT surveys for geothermal investigations have been carried out at around the Sabalan volcano. This study aimed to delineate the shallow as well as deep conductive anomalies related to the geothermal systems in Sabalan area. To investigate the Sabalan geothermal reservoirs more closely and to determine the injection and exploration wells, the magnetotelluric data was scheduled in two phases. MT measurements, in the Sabalan area, could clearly highlight the geothermal reservoir. In this work, the boundaries of the reservoirs were investigated by using integration of MT data. The resistivity sections derived from a 2D inversion in conjunction with exploration wells and geology surveys showed that the Sabalan geothermal system is in agreement with Johnston's (1992) model in which the thicker conductive layers are found in the output areas. Two main reservoirs have been detected by using an interpretation of resistivity maps resulted from 1D and 2D inversions of the MT data. The main reservoir is located on the western side of Mt. Sabalan, which extends from south and southwest of Sabalan summit towards the west and Moeil valley. The dimensions of this reservoir are two times bigger than the estimated volume resulted from earlier researches. The other reservoir with relatively smaller dimensions exists in northern part of Mt. Sabalan.

Keywords: Sabalan volcano, magnetotelluric, inversion, geothermal reservoir

۱ مقدمه

بر اساس رفتار هیدرو دینامیکی منابع زمین گرمایی، این رفتار می تواند در حکم یک پارامتر اولیه در اختلاف مقاومت ویژه منبع زمین گرمایی و محیط پیرامون آن عمل کند (SKM, 2003). با استفاده از این اختلاف مقاومت ویژه، مگنتوتلوریک (MT) به خوبی می تواند مرز بین سامانه زمین گرمایی و محیط پیرامون آن را نشان دهد.

وجود شهرهای آلوده و هوای ناسالم از جمله مهم ترین مشکلات دنیای صنعتی امروز به شمار می رود. بهره برداری از منابع انرژی های زمین گرمایی به منزله یکی از انواع انرژی های تجدید پذیر و فاقد آلودگی های زیست محیطی امروزه مورد توجه بسیاری از کشورها از جمله آمریکا، ایتالیا، استرالیا، ژاپن و ایسلند قرار گرفته است.

مخزن مورد تفسیر قرار گرفته‌اند (فناپی و اسکویی، ۲۰۱۱). به‌منظور رسیدن به عمق نفوذ بیشتر و برنامه‌ریزی برای اهداف حفاری در آینده برداشت‌های بعدی در طی دو مرحله و در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ صورت گرفت. در این تحقیق با استفاده از داده‌های برداشت شده در این دو مرحله، محدوده‌های مخزن زمین‌گرمایی سبلان تعیین می‌شود.

۲ روش تحقیق

روش مگنتوتلوریک (MT) یکی از روش‌های الکترومغناطیسی در حوزه بسامد است. این روش، فن ژئوفیزیکی سطحی غیرفعال است که از میدان‌های الکترومغناطیسی طبیعی زمین برای بررسی ساختار مقاومت ویژه الکتریکی زیرسطحی استفاده می‌کند (کاگنیارد، ۱۹۵۳). در این روش، امواج الکترومغناطیسی با توجه به بسامد آنها و نیز مقاومت ویژه لایه‌ها، اطلاعاتی از اعماق زمین به‌دست می‌دهند. همانند سایر روش‌های ژئوفیزیکی، تفسیر کیفی و کمی الکترومغناطیسی (EM) نیز در دو دهه اخیر دارای بیشترین پیشرفت بوده است. این پیشرفت‌ها شامل روش‌های برداشت جدید و روش‌های مدل‌سازی پیشرو و وارون است. MT روشی است با چشمه طبیعی که منشا آن امواج الکترومغناطیسی طبیعی ایجاد شده در یون‌سپهر و مغناطیس‌سپهر زمین است (ووزوف، ۱۹۷۲). پردازش داده‌های MT شامل دو مرحله کلی است؛ در مرحله اول داده‌های MT که به‌صورت مولفه‌های میدان الکتریکی (E_x و E_y) و مولفه‌های میدان مغناطیسی (H_x ، H_y و H_z) در حیطه زمان اندازه‌گیری شده‌اند به حیطه بسامد منتقل می‌شوند. مرحله دوم شامل محاسبه مولفه‌های تانسور امپدانس، با استفاده از طیف‌های بسامدی است. با استفاده از تانسور امپدانس که مولفه‌های افقی میدان مغناطیسی را به مولفه‌های افقی میدان الکتریکی مرتبط می‌کند می‌توان پارامترهای مقاومت ویژه

مگنتوتلوریک روشی الکترومغناطیسی است که برای بررسی وضعیت الکتریکی لایه‌های زیرسطحی به کار می‌رود. اساس این روش اندازه‌گیری دو مولفه افقی میدان الکتریکی و سه مولفه میدان مغناطیسی است که با استفاده از تانسور امپدانس به یکدیگر مربوط می‌شوند. این روش روشی طبیعی برپایه القا است که پاسخی معنادار برای ساختارهایی با رسانش الکتریکی زیاد فراهم می‌کند (سیمپسون و باهر، ۲۰۰۵). از طرفی رسانش الکتریکی پارامتر وابسته دمایی است که می‌تواند در بررسی زمین‌گرمایی مورد استفاده قرار گیرد (اسپیچاک و همکاران، ۲۰۰۷).

اولین تحقیقات در مورد انرژی زمین‌گرمایی در ایران در سال‌های ۱۹۷۵ تا ۱۹۷۹ را شرکت ایتالیایی ENEL زیر نظر وزارت نیرو در نواحی شمال و شمال غرب ایران در محدوده‌ای به وسعت ۲۶۰ هزار کیلومترمربع عملی ساخت. در پی این تحقیقات مناطق سبلان، دماوند، خوی، ماکو و سهند با مساحتی بالغ بر ۳۱ هزار کیلومترمربع برای اجرای بررسی‌های تکمیلی و بهره‌برداری از انرژی زمین‌گرمایی شناخته شد.

براساس تحقیقات دفتر انرژی زمین‌گرمایی سازمان انرژی‌های نو ایران، منطقه مشکین‌شهر مناسب‌ترین نقطه برای استفاده از ظرفیت انرژی زمین‌گرمایی در کشور است.

اولین بار برداشت‌های مگنتوتلوریک در منطقه سبلان در ۱۹۹۸ به‌منظور بررسی‌های اولیه منطقه با عمق نفوذ کم (کمترین بسامد بین ۱٫۵ تا ۳ هرتز) صورت گرفت. با استفاده از این داده‌ها نقاطی که پتانسیل زمین‌گرمایی بیشتری داشتند شناسایی و براساس آنها نقاط اکتشافی نیز تعیین شد که عمدتاً غرب منطقه سبلان و به‌خصوص دره موئیل را در بر می‌گیرد (طالبی و همکاران، ۲۰۰۵). البته این داده‌ها با هدف بررسی و تعیین وضعیت مقاومت ویژه در لایه‌های فوقانی مخزن گرمایی به‌ویژه سنگ‌پوش

در واقع با اندازه‌گیری دامنه مولفه‌های افقی عمود بر هم میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در سطح زمین برای بسامدهای مختلف، می‌توان تغییرات عمقی مقاومت را تعیین کرد.

در هر ایستگاه مگنتوتلوریک پنج مولفه E_x ، E_y ، H_x ، H_y و H_z اندازه‌گیری می‌شود. به واسطه شرایط مرزی و اینکه امواج به صورت صفحه‌ای هستند E_z تقریباً برابر صفر است (ژدانوف و کلر، ۱۹۹۸)، لذا اندازه‌گیری کاملاً سه‌بُعدی با این پنج مولفه صورت می‌گیرد.

در یک زمین دو‌بُعدی رسانش الکتریکی در امتداد یک جهت افقی (در صورت مشخص بودن، جهت امتداد زمین‌شناسی) ثابت است و معادلات ماکسول به دو مد قطبش مستقل TE (میدان الکتریکی در جهت موازی با امتداد زمین‌شناسی) و TM (جریان عمود بر امتداد زمین‌شناسی) تفکیک می‌شود. به‌طور کلی مد TE برای تشخیص ساختارهای عمیق و نارسانا و مد TM برای تشخیص ساختارهای کم‌عمق و رسانا مفید است (آسو و همکاران، ۲۰۰۶). تشخیص مدهای TE و TM با استفاده از نمودارهای قطبش در هر سونداژ صورت می‌گیرد.

۱-۲ زمین‌شناسی منطقه

مسائل زمین‌شناسی منطقه سیلان از جمله شرایط زمین‌ساختی، مورفولوژی و زمین‌گرمایی عمدتاً مرتبط با فعالیت‌های آتشفشان سیلان است. فعالیت زمین‌ساختی منطقه پیش‌گفته تحت‌تأثیر حرکات صفحات زمین‌ساختی در محل برخورد صفحات ایران، کاسپین، اوراسیا و عربی قرار گرفته است. در این منطقه فعالیت‌های ماگمایی از ائوسن تا کواترنری قابل مشاهده است. طی فاز کوه‌زایی داین در پالئوسن زیرین حجم عظیمی از ماگما خارج شده و در ادامه یک فاز کششی در سراسر آذربایجان حاکم شده است. کشش مزبور باعث ایجاد بازشدگی قاره‌ای می‌شود و حضور گنبد

ظاهری و فاز امیدانس را به‌منظور تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک استخراج کرد. تحلیل تانسور امیدانس دیدی از درجه ناهمگونی در محیط و توزیع میدان MT در ارتباط با ناهمگونی فراهم می‌کند که همین امر امکان تعیین ساختارهای زمین‌شناسی و محاسبه اندازه و امتداد آنها را فراهم می‌کند (ووزوف، ۱۹۹۱):

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

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

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

که در آن ماتریس Z درحکم ماتریس امیدانس مختلط و T برداری است که به منزله تابع تبدیل ژئومغناطیسی مختلط یا بردار تپیر شناخته و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

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

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

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

که $i, j = x, y$ و Ψ_{E_i} به‌ترتیب فاز میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی است.

داده‌های مگنتوتلوریک به‌صورت مقاومت ویژه ظاهری و فاز برحسب بسامد (یا دوره تناوب) از تانسور امیدانس قابل محاسبه هستند (کاگنیارد، ۱۹۵۳):

$$\rho_a = \frac{1}{\omega \mu_0} |Z|^2 = \frac{1}{\omega \mu_0} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2, \quad (6)$$

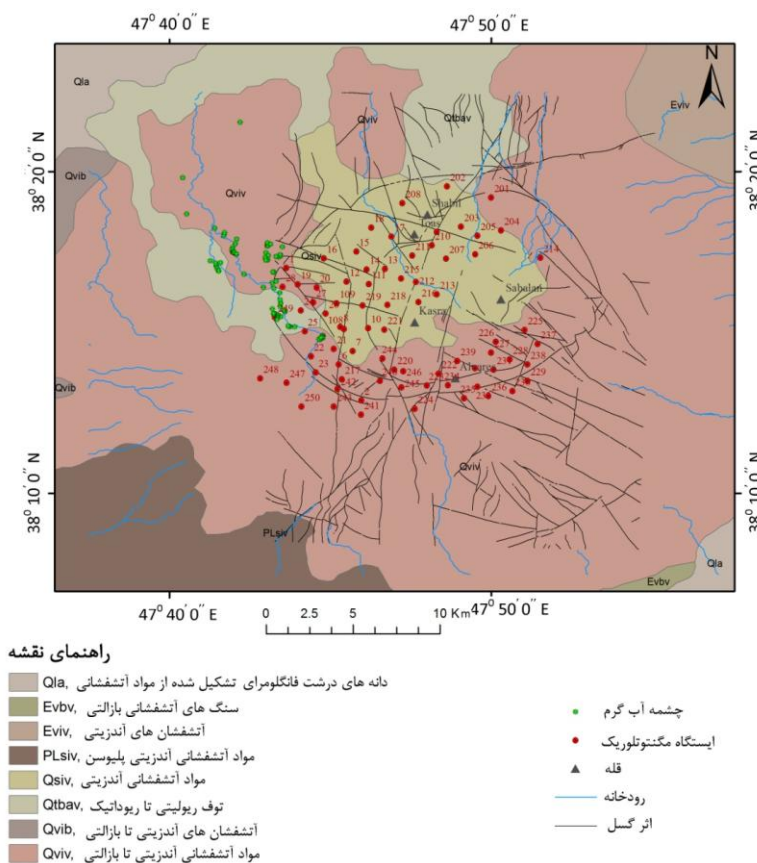
که در آن μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد و ω بسامد زاویه‌ای است.

سبلان که از نوع مرکزی است در محل تقاطع شکستگی‌های اصلی و روی منطقه‌ای بین دو گسل بزرگ قدیمی بنا 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). براساس گزارش شرکت KML (۱۹۹۸) به سازمان انرژی‌های نو ایران ساختار زمین‌شناسی منطقه سبلان عمدتاً امتداد NW-SE دارد. تنوع سنگ‌شناسی رخنمون‌ها در منطقه مورد بررسی مربوط به تشکیل واحدهای سنگی در فازهای متفاوت آتشفشانی است (شکل ۱).

ماگمایی زیر آذربایجان در طول دوره ائوسن را نیز مرتبط با این پدیده می‌دانند.

فعالیت قدیمی آتشفشان سبلان از ائوسن شروع شده است ولی آنچه که کوه سبلان را به وجود آورده است در پلیوسن شروع به فعالیت کرده و تا عصر بعد از آخرین یخبندان ادامه داشته است. مواد سازنده این آتشفشان از یک ماگمای عمقی حاصل می‌شود ولی تحت‌تاثیر فرایندهای کمایش پیچیده‌ای قرار دارد 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



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده شده محدوده کوه سبلان.

۲-۲ اندازه‌گیری داده‌های مگنتوتلوریک

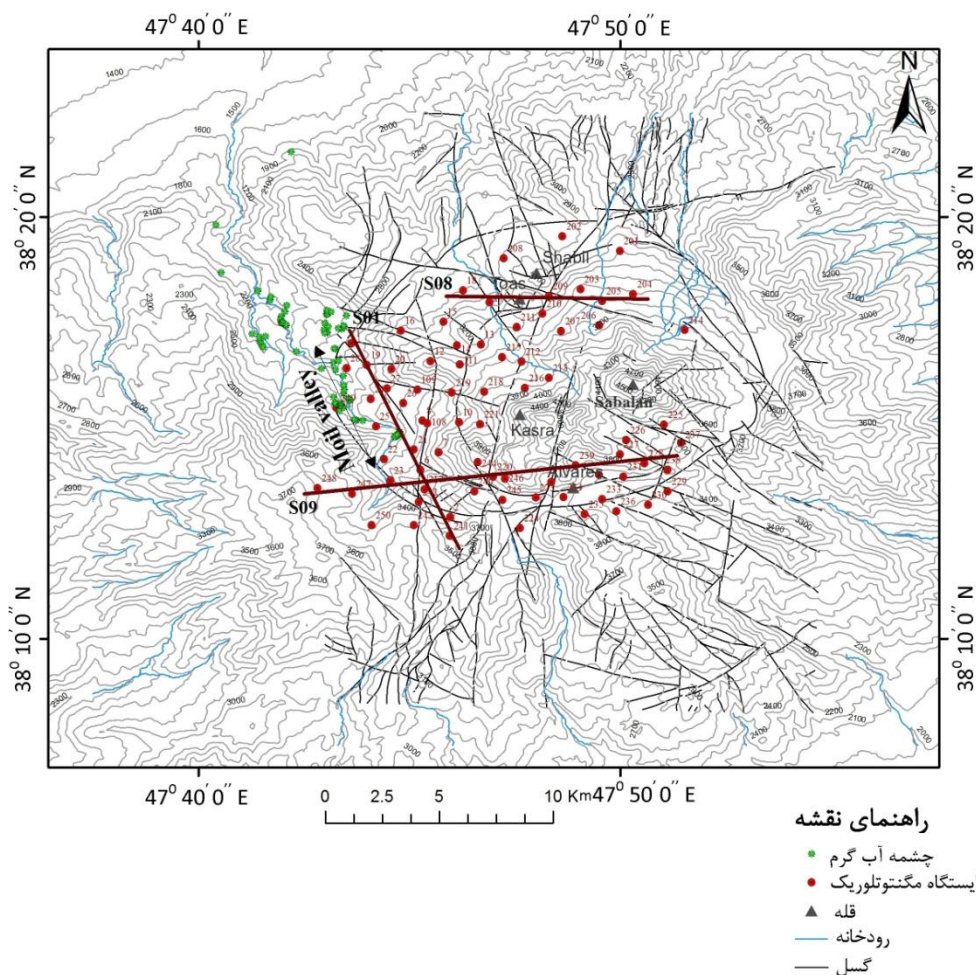
داده‌های مگنتوتلوریک با استفاده از مجموعه تجهیزات Mtu-5a و در بازهٔ بسامد ۰,۰۰۰۵ هرتز تا ۳۲۰ هرتز توسط شرکت EDC برداشت شد (پرخيال و همکاران، ۲۰۱۰). در این تحقیق به منظور تهیه مقاطع دو‌بُعدی مقاومت ویژه و نقشه‌های هم‌مقاومت ویژه و تفسیر داده‌ها از نرم‌افزار WinGLink استفاده شد. بعد از پردازش داده‌ها، داده‌ها در قالب مربوط که قابل فراخوانی با نرم‌افزار WinGLink است آماده‌سازی شد. موقعیت ایستگاه‌ها و نیم‌رخ‌های طراحی شده در شکل ۲ آمده است.

۳-۲ پردازش داده‌های مگنتوتلوریک

یکی از پارامترهای اصلی که برای تحلیل ابعادی داده‌های MT استفاده می‌شود چوله (Skew) است و از رابطهٔ زیر به دست می‌آید (سویفت، ۱۹۶۷):

$$Skew = \frac{|Z_{XX} + Z_{YY}|}{|Z_{XY} + Z_{YX}|} \quad (7)$$

پارامتر چوله میزان نامتقارنی محیط اطراف اندازه‌گیری‌ها را نشان می‌دهد. این پارامتر در مدل‌های دو‌بُعدی و سه‌بُعدی که از نظر محوری متقارن هستند برابر صفر است. فاصله گرفتن چوله از مقدار صفر وجود یک ساختار سه‌بُعدی نامتقارن را نشان می‌دهد.

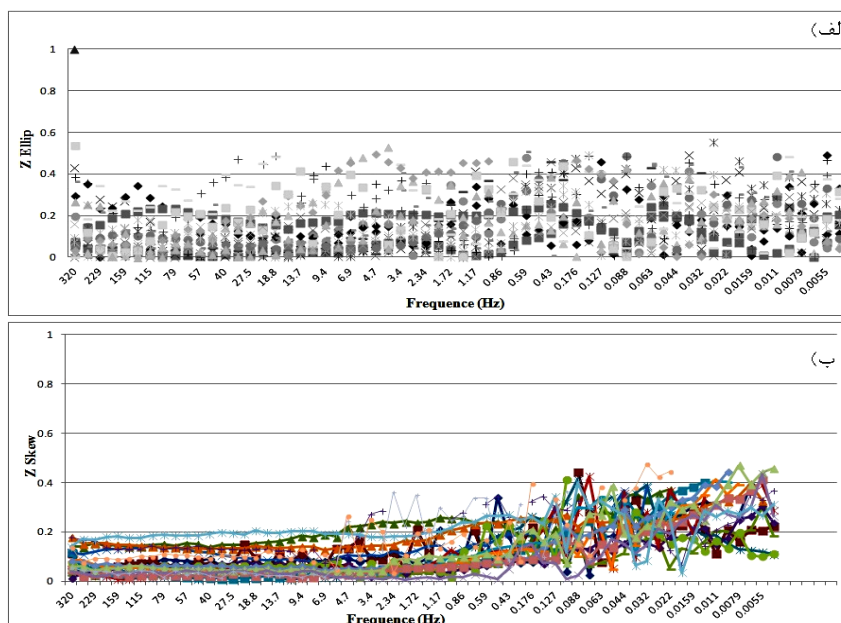


شکل ۲. نقشه توپوگرافی منطقه سبلان.

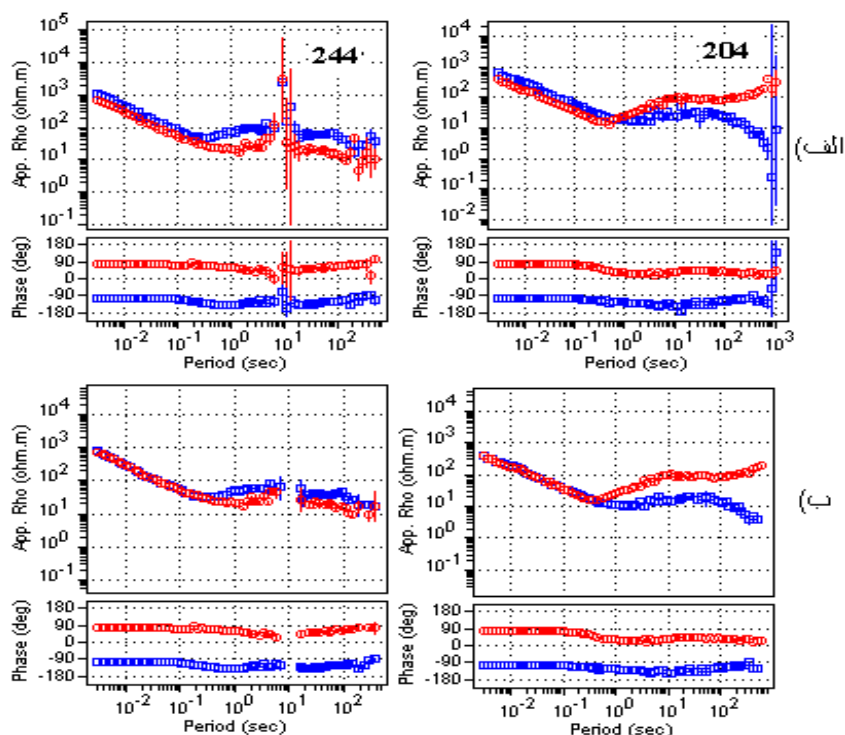
ویرایش و صاف کردن داده‌های نامطلوب یک امر اجتناب‌ناپذیر است زیرا ممکن است نوفه‌های محیطی با ایجاد آشفتگی‌هایی در برخی بسامدهای برداشت اثرات نامطلوبی روی داده‌ها بگذارند. این نوفه‌های محیطی ممکن است عواملی مانند وضع بد هوا، توفان‌های خورشیدی و یا هرگونه عاملی که هنگام برداشت داده‌ها در استنوسفر و جو زمین تغییر ایجاد می‌کند، باشند. به همین علت و برای از بین بردن این آشفتگی‌ها صاف کردن برخی داده‌ها لازم و اجتناب‌ناپذیر است. منطقه سیلان نیز در بیشتر روزهای سال دارای وضع هوای نامطلوب و در بیشتر روزهای سال پوشیده از برف است. هنگام برداشت داده‌های مگنتوتلوریک نیز این شرایط روی برخی داده‌ها اثرات نامطلوبی گذاشته است. به همین علت پردازش داده‌های برداشت شده در این منطقه اجتناب‌ناپذیر است. برای نمونه ایستگاه شماره ۲۰۴ و ۲۴۴ در شکل ۴ قبل از ویرایش و بعد از ویرایش آمده‌اند.

مقدار پارامتر چوله نزدیک به صفر (کمتر از ۰٫۲) نشان‌دهنده این است که محیط اندازه‌گیری دارای ساختار یک‌بُعدی و یا دو‌بُعدی ناآشفته است (ایگرز، ۱۹۸۲). از طرفی پارامتر دیگری که در تعیین بُعد ساختاری منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرد بیضی‌وارگی است.

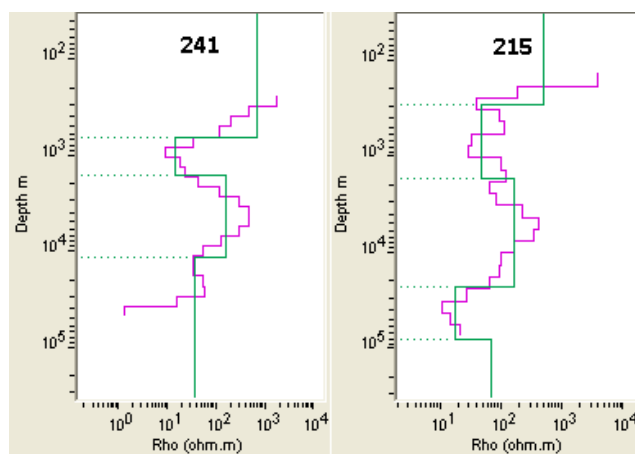
این پارامتر نیز مانند پارامتر چولگی در محیط‌هایی با ساختارهای یک‌بُعدی و دو‌بُعدی نزدیک به صفر است (ایگرز، ۱۹۸۲). در شکل ۳ نمودارهای مربوط به بیضی‌وارگی و چولگی آورده شده است. در همه ایستگاه‌ها با بررسی این پارامترها مشخص شد که در اکثر ایستگاه‌ها برای پارامتر بیضی‌وارگی این مقدار زیر ۰٫۴ و برای پارامتر چولگی زیر ۰٫۲ است. با استفاده از مقادیر به‌دست آمده، به احتمال زیاد محیط مورد بررسی یک‌بُعدی و دو‌بُعدی ناآشفته است. از طرفی داده‌های MT به‌صورت مقاومت ویژه ظاهری و فاز برحسب دوره تناوب نمایش داده می‌شوند (روابط (۱) تا (۶)). در این شکل این داده‌ها به‌صورت مدهای TE و TM نشان داده شده‌اند.



شکل ۳. (الف) مقادیر بیضی‌وارگی و (ب) مقادیر چولگی برای ۲۹ ایستگاه مگنتوتلوریک در بسامدهای مختلف.



شکل ۴. ایستگاه ۲۰۴ و ۲۴۴، (الف) قبل از ویرایش و (ب) بعد از ویرایش.



شکل ۵. وارون‌سازی یک بعدی داده‌های MT برای ایستگاه‌های ۲۱۵ و ۲۴۱. خط صورتی نشان‌دهنده وارون‌سازی یک بعدی اکام بر اساس کانستیبیل (۱۹۸۷) و خط سبز نشان‌دهنده وارون‌سازی نهایی حاصل از وارون‌سازی اکام است.

همسایه یا بین دو منحنی در یک ایستگاه، بدون تغییر در شکل دو منحنی خود را نشان می‌دهد جابه‌جایی ایستا تعریف می‌شود (استرنبرگ و همکاران، ۱۹۸۸) که در

یکی از ناهمگونی‌هایی که به واسطه حضور توده‌های رسانای سطحی ایجاد می‌شود و به صورت جابه‌جایی عمودی در منحنی‌های مقاومت ویژه و فاز بین سایت‌های

گرفته شد. در پایان نیز به منظور تعیین محدوده‌های مخزن زمین‌گرمایی، نقشه‌های هم‌مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی دو بُعدی در کنار یکدیگر قرار داده شدند.

در شکل ۶ نقشه‌های هم‌مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی یک بُعدی در اعماق متفاوت از سطح دریا نشان داده شده است. در این شکل در اعماق بالاتر، ۲۹۰۰ و ۲۷۰۰ متر از سطح دریا، در اطراف قلّه سبلان ناحیه‌ای با مقاومت ویژه خیلی کم دیده می‌شود که در اعماق پایین‌تر، ۲۵۰۰ و ۲۳۰۰ متر از سطح دریا، این ناحیه به تدریج با مقاومت ویژه بالاتر از ۵۰ اهم‌متر و بالاتر پوشیده می‌شود. در این ارتفاعات، در اطراف دره موئیل و شیب ناحیه‌ای با مقاومت ویژه کم (کمتر از ۱۰ اهم‌متر) دیده می‌شود که تا ارتفاع ۱۷۰۰ متری نیز وجود دارد ولی از ارتفاع ۱۵۰۰ متر به پایین به تدریج ناپدید می‌شود و منطقه عمدتاً با لایه‌های با مقاومت ویژه بالاتر از ۲۵۰ اهم‌متر به خصوص در زیر قلّه سبلان و همچنین کوه کسری پوشیده می‌شود.

شکل ۷ شبه‌مقاطع حاصل از وارون‌سازی داده‌های MT در طول نیم‌رخ‌های S01، S08 و S09 را نشان می‌دهد که در این مقاطع تطابق خوب داده‌های صحرائی و پاسخ مدل نشان‌دهنده صحت وارون‌سازی است. البته در برخی ایستگاه‌ها مثل ایستگاه ۲۰۹ در نیم‌رخ S08 اختلافاتی دیده می‌شود که می‌توان آن را با توجه به توپوگرافی و وضع بسیار بد هوای منطقه به وجود نوفه‌های محیطی در محل اندازه‌گیری‌ها نسبت داد. در شکل ۸ مقاطع نهایی مقاومت ویژه الکتریکی (TE+TM) در امتداد نیم‌رخ‌های S01، S02 و S03 نشان داده شده است.

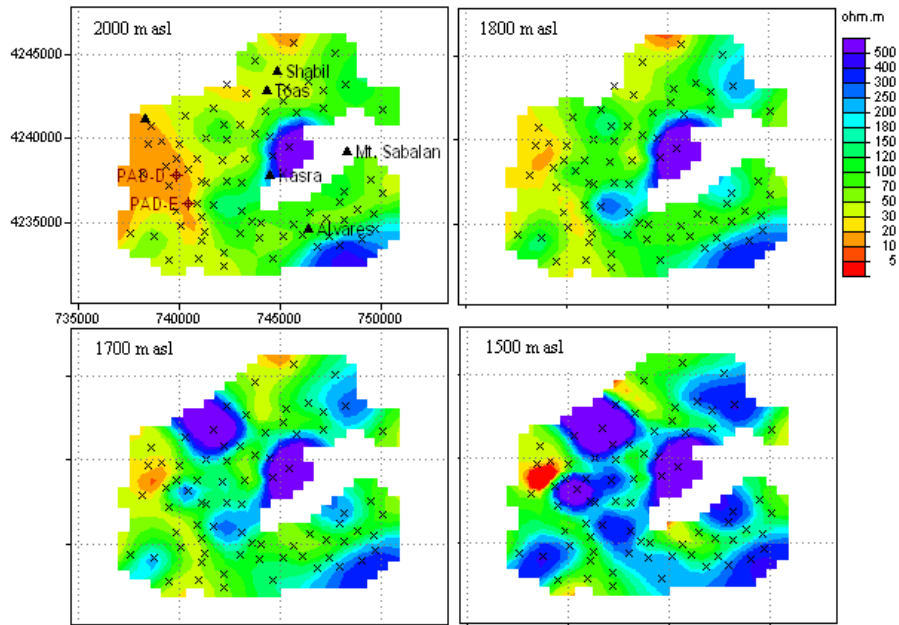
در این نیم‌رخ‌ها محور قائم به صورت ارتفاع از سطح دریا برحسب متر است. در نیم‌رخ S01 مقاومت ویژه لایه‌های بالایی از ۵۰ اهم‌متر تا بیشتر از ۲۵۰ اهم‌متر متفاوت است.

این تحقیقات در حین برگردان دو بُعدی با نرم‌افزار WinGlink از بین برده می‌شود. این نرم‌افزار به صورت اختیاری ایستای جابه‌جایی مقاومت ویژه ظاهری مدهای TE و TM را برگردان می‌کند. لذا لازم است که تغییر و تعدیل مقادیر صورت گیرد. برای هر اندازه‌گیری MT، روابط ایستای جابه‌جایی برای پارامترهای برگردان اضافه می‌کند. در نتیجه هدف رابطه ایستای جابه‌جایی، انتقال منحنی مقاومت ویژه ظاهری پیش‌بینی شده نزدیک‌تر به منحنی مشاهده شده است، داده خارج از روند بین داده‌های مشاهده شده و مصنوعی با ایستایی جابه‌جایی صورت گرفته روی داده مصنوعی محاسبه می‌شود. در انتهای برگردان، داده‌های مصنوعی خروجی با تصحیح ایستایی جابه‌جایی ایجاد شده‌اند تا مقایسه با داده‌های محاسبه شده آسان شود.

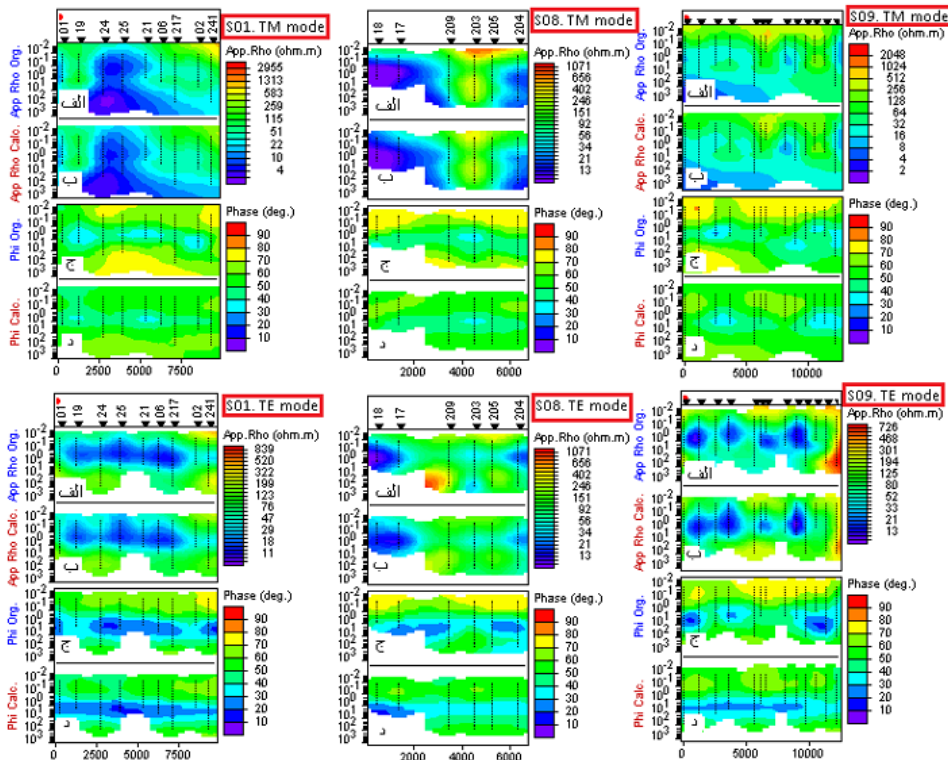
۲-۴ وارون‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک

وارون‌سازی یک بُعدی داده‌های MT با استفاده از الگوریتم مدل‌سازی اکام که کانستیبیل (۱۹۸۷) عرضه کرده است در نرم‌افزار WinGlink صورت گرفت (شکل ۵).

نقشه‌های هم‌مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی یک بُعدی داده‌ها به دست آمد و پس از آن وارون‌سازی دو بُعدی داده‌ها با نرم‌افزار WinGlink صورت گرفت. در این نرم‌افزار از الگوریتم وارون‌سازی دو بُعدی مک‌کی (۱۹۹۳) استفاده می‌شود. داده‌های MT در محدوده بسامدی ۰,۰۰۰۵ تا ۳۲۰ هرتر بررسی شد و بیشینه عمق نفوذ برای مدل‌ها حدود ۱۳ کیلومتر به دست آمد. به طور کلی به منظور پوشش منطقه برای به دست آوردن نقشه‌های هم‌مقاومت ویژه ۹ نیم‌رخ طراحی و سه نیم‌رخ S01، S08 و S09 که مناطق شیب در شمال، دره موئیل در غرب و آلوآرز را در جنوب و جنوب غربی پوشش می‌دادند به منظور بررسی‌های مخزن زمین‌گرمایی در نظر

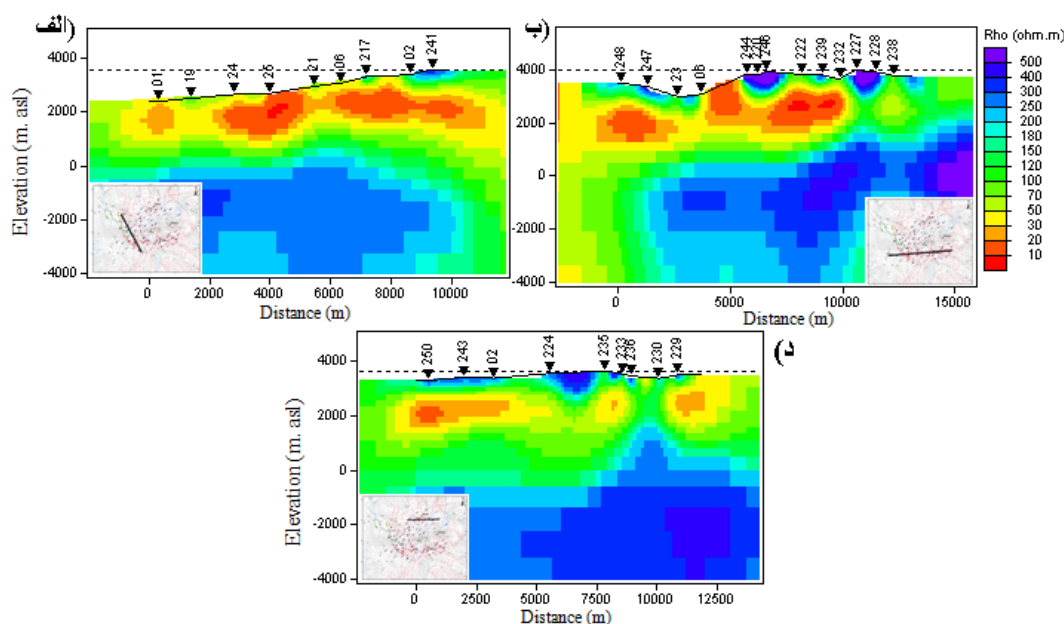


شکل ۶. نقشه های هم مقاومت ویژه حاصل از وارون سازی یک بُعدی داده های MT در ارتفاعات مختلف (برحسب ارتفاع از سطح دریا).



شکل ۷. نتایج حاصل از وارون سازی داده های MT در امتداد پروفیل های S01، S08 و S09. (الف) داده های صحرایی مقاومت ویژه ظاهری، (ب) پاسخ مدل

مقاومت ویژه ظاهری، (ج) داده های صحرایی فاز و (د) پاسخ مدل فاز.



شکل ۸. مقطع نهایی مقاومت ویژه الکتریکی (TE+TM) در امتداد: (الف) پروفیل S01، (ب) پروفیل S08 و (د) پروفیل S09.

ارتفاع‌های ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر یافت شد. البته در قسمت شرقی نیم‌رخ، یک بلوک مقاوم از عمق زیاد تا ارتفاعات بالاتر دیده می‌شود. البته به علت در اختیار نبودن مختصات چشمه‌های آب گرم در این ناحیه، به صورت صریح نمی‌توان در مورد بیرون‌زدگی لایه رسانا در این نیم‌رخ و در بین ایستگاه‌های ۶ و ۲۴۴ اظهار نظر کرد، ولی پیش‌بینی می‌شود که در این محل نیز وجود چشمه‌های آب گرم باعث بیرون‌زدگی لایه رسانا باشد.

۲-۵ تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک

سامانه مخزن زمین‌گرمایی سبلان با تحقیقاتی که جانستون (۱۹۹۲) عرضه کرد مطابقت دارد (تکلو و همکاران، ۱۳۹۲). ویژگی اصلی سامانه زمین‌گرمایی که جانستون به‌دست داده است وجود یک لایه ضخیم رسانا در قسمت‌های خروجی جریان زمین‌گرمایی است که به صورت بیرون‌زدگی آشکار می‌شود. با توجه به نقشه‌های هم‌مقاومت ویژه و روند کلی مقاطع حاصل از

یک لایه رسانا که در دره موئیل قرار دارد زیر ایستگاه‌های ۲۶ و ۲۱۷ از سطح تا عمق حدود ۱۰۰۰ متر از سطح دریا مشاهده می‌شود. این لایه رسانا که حدود ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر ضخامت دارد از زیر با لایه‌ای با مقاومت ویژه متوسط تا بالا (بین ۵۰ تا ۲۵۰ اهم‌متر) محدود شده است. از طرفی لایه رسانا در بین ایستگاه‌های ۲۶ و ۲۱ یعنی در محلی که چشمه‌های آب گرم زیادی قرار دارند بیرون‌زدگی دارد (موقعیت چشمه‌های آب گرم منطقه در شکل ۲ آمده است).

ویژگی قابل ذکر در نیم‌رخ S08 سه بی‌هنجاری با مقاومت ویژه کمتر از ۳۰ اهم‌متر زیر ایستگاه‌های ۱۸، ۲۰۹ و ۲۰۴ است که بین ارتفاعات ۱۲۰۰ تا ۲۸۰۰ متر قرار دارند. این نیم‌رخ با افزایش مقاومت ویژه (بیش از ۷۰ اهم‌متر) از زیر محدود شده است.

ویژگی آشکار در نیم‌رخ S09 بی‌هنجاری رسانای تقریباً ادامه داری با مقاومت ویژه بالای ۳۰ اهم‌متر است که بین

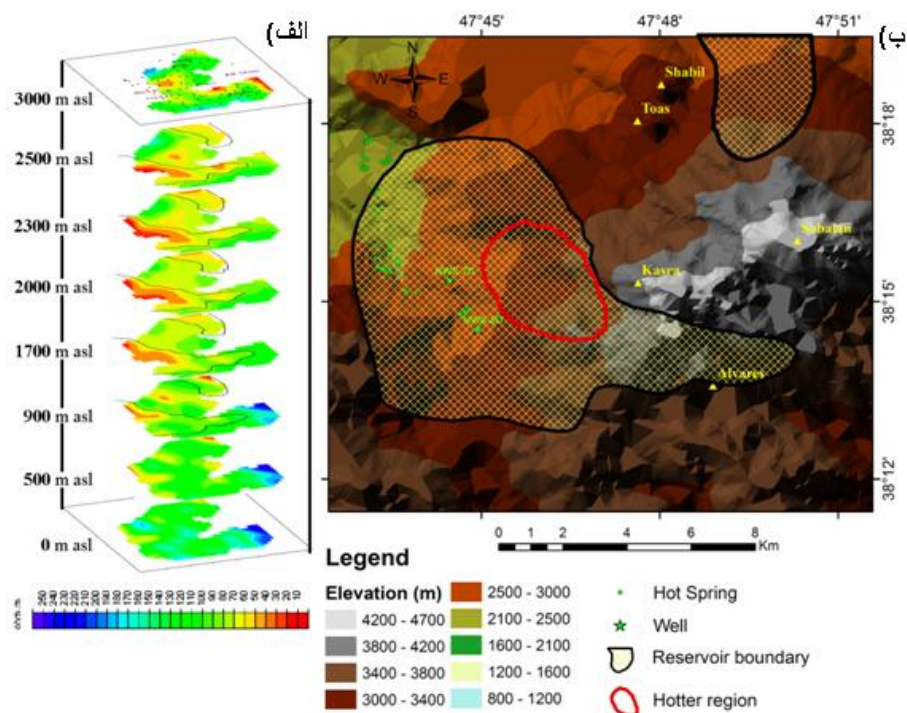
وارون‌سازی دُو‌بُعدی نیز در ارتفاعات متفاوت تهیه شد (شکل ۹-الف).

در نقشه‌های هم‌مقاومت ویژه نیز در ارتفاعات بالاتر (حدود ۳۰۰۰ متری از سطح دریا) و در سطح زمین، این لایهٔ رسانا در قسمت‌های غربی قلهٔ سبلان در درهٔ موئیل دیده می‌شود که به سمت آلوارز در جنوب قلهٔ سبلان کشیدگی دارد. از طرفی ناحیهٔ دیگری نیز با این ویژگی در شیب و توآس در شمال قلهٔ سبلان به دست آمد.

در اعماق بیشتر (ارتفاع ۲۰۰۰ متری از سطح دریا) مخزن زمین گرمایی قرار دارد که تا ارتفاع حدود ۹۰۰ متری از سطح دریا عمق دارد و در واقع از این عمق به پایین به تدریج به یک لایه با مقاومت ویژه متوسط تا بالا (بیش از ۱۰۰ اهم‌متر) برخورد می‌کنیم که از زیر مخزن زمین گرمایی را محدود کرده است. محدودهٔ مخزن زمین گرمایی در شکل ۹-ب مشخص شده است.

وارون‌سازی دُو‌بُعدی داده‌های MT، در همهٔ مقاطع مقاومت ویژه، 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 زمین گرمایی تفسیر کرد.

این جریان زمین گرمایی با توجه به شیب منطقه در همهٔ نیم‌رُخ‌ها، در دو ناحیهٔ جداگانه دیده می‌شود. یکی در قسمت شمالی قلهٔ سبلان در شیب و توآس و دیگری در قسمت جنوب، جنوب غربی و غرب قلهٔ سبلان که به سمت درهٔ موئیل امتداد دارد. از طرفی این لایهٔ رسانا در برخی نواحی بیرون‌زدگی دارد. با بررسی چشمه‌های منطقه و قرارگیری این چشمه‌ها در محل این بیرون‌زدگی‌های لایهٔ رسانا، می‌توان این قسمت‌ها را محل خروجی جریان زمین گرمایی تفسیر کرد. به‌منظور درک بیشتر سامانه زمین گرمایی سبلان نقشه‌های هم‌مقاومت ویژه حاصل از



شکل ۹. (الف) نقشه‌های هم‌مقاومت ویژه به دست آمده از وارون‌سازی دُو‌بُعدی داده‌های MT و (ب) مرز تعیین شده مخزن زمین گرمایی سبلان.

- Cagniard, L. 1953, Basic theory of magnetotelluric method in geophysical prospecting: *Geophysics*, **8**, 605–635.
- Constable, S. C., Parker, R. L., and Constable, C. G., 1987, Occam's Inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data: *Geophysics*, **52**, 289–300.
- Didon, J. and Gemain, Y.A., 1976, La Sabalan, volcan Plio-Quaternaire de L'Azerbajin 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.
- Eggers D. E., 1982. An eigenstate formulation of the magnetotelluric impedance tensor: *Geophysics*, **47**, 1204–1214.
- Fanaee kheirabadi, Gh., and Oskooi, B., 2011, Magnetotelluric interpretation of the Sabalan geothermal field in the northwest of Iran: *Journal of the Earth & Space Physics*, **37**, No. 3, 2011, 1–11.
- Johnston, J. M., Pellerin, L. and Hohmann, G. W. 1992, Evaluation of electromagnetic methods for geothermal reservoir detection: *Geothermal Resource Council Transactions*, Vol 16, 241–245.
- KML, 1998, Sabalan geothermal project, Stage1—Surface exploration, final exploration report: Kingston Morrison Limited Co., report 2505-RPT- GE- 003 for the Renewable Energy Organization of Iran, Tehran, 83pp.
- Mackie R. L. and Madden T. R., 1993: Three-dimensional magnetotelluric inversion using conjugate gradients: *Geophysical J. Int.*, **115**, 215–229.
- Noorollahi Y., Itoi R., and Tanaka T., 2007, Well Testing and Reservoir Oroperties 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.
- Porkhial, S., Rigor, D., Bayrante, B., and Domingo, B., 2010, Magnetotelluric Survey of NW Sabalan Geothermal Project, Iran: *Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia*.
- 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: *Geoprospection* **21** (1), 1–11.
- SKM Report to SUNA: NW Sabalan Geothermal Project: MT Survey RE-Analysis, Revision 2,

۳ نتیجه گیری

با بررسی و تفسیر نقشه‌های هم‌مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی یک‌بُعدی داده‌های MT، مقاطع مقاومت ویژه و بررسی نقشه‌های هم‌مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی دوبُعدی داده‌های MT در ارتفاعات متفاوت از سطح زمین تا ارتفاع صفر از سطح دریا مشخص شد که مخزن زمین‌گرمایی سبلان دارای دو محدوده اصلی است. مخزن بزرگ‌تر در قسمت غربی و جنوب غربی محدوده سبلان قرار دارد و محدوده آن از جنوب و جنوب غربی در آوارز به سمت غرب در دره موئیل امتداد دارد که قسمت بالایی آن در ارتفاع حدود ۲۰۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد و از پایین تا عمق حدود ۹۰۰ متری از سطح دریا محدود می‌شود. همچنین محدوده مخزن مجزای دیگری در شیب و توآس در شمال مشخص شد که از مخزن اصلی در غرب سبلان جدا است. این مخزن نیز از نظر عمق مانند مخزن اصلی است و محدوده کوچک‌تری را در بر می‌گیرد.

تشکر و قدردانی

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

منابع

تکلو، م.، اسکویی، ب. و پرخیال، س.، ۱۳۹۲، بررسی مرز لایه‌ها و توده‌های زمین‌گرمایی منطقه سبلان با استفاده از برگردان دوبُعدی داده‌های مگنتوتلوریک: *مجله فیزیک زمین و فضا*، دوره ۳۹، شماره ۴.

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: *J. Applied Geophysics*, **58**, 296–312.

- Talebi, B., Khoswari, K., and Ussher, G. H., 2005, Review of Resistivity Surveys from the NW Sabalan Geothermal Field, Iran: Proceedings from the 2005 World Geothermal Congress, Antalya, Turkey.
- Vozoff K., 1972, The magnetotelluric method in exploration of sedimentary basins: *Geophysics*, **37**, 98–141.
- Vozoff, K., and Nabighian, M.C., (ed.) 1991, *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Vol.2: Application, Part B. Tulsa: Society of Exploration Geophysics, 641–711.
- Zhdanov, M. S. and Keller, G. V., 1998, The geoelectrical methods in geophysical exploration: *Methods In Geochemistry and Geophysics*, **31**, 261–346.
- REP No: AP00079-RPT-GE-109, 28 October 2003.
- Spichak, V., Zakharova, O., and Rybin, A., 2007, Estimation of the sub-surface temperature by means of magnetotelluric sounding: Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, p. SGP-TR-183.
- Sternberg, B. K., Washburn, J. C. and Pellerin, L., 1988, Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic sounding: *Geophysics*, **53**, 1459–1468.
- Swift C. M. Jr., 1967, A Magnetotelluric Investigation of an Electrical Conductivity Anomaly in the Southwestern United States: Ph.D. thesis, Mass. Inst. of Tech.