

بررسی ساختار گسل مشا (جنوب البرز مرکزی) با استفاده از روش مگنتوتلوریک

بهروز اسکویی^{۱*}، مصطفی صیادی^۲ و صفیه امیدیان^۳

^۱ استادیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۹/۲/۱۵، پذیرش نهایی: ۹۱/۴/۱۳)

چکیده

بررسی پدیده‌های زمین‌شناسی و زمین‌ساختی البرز و تحلیل چگونگی روند و منشأ این پدیده‌ها همواره به‌منزله یکی از جذابیت‌های البرز مورد توجه بوده است. البرز مرکزی به دلیل برهم‌کنش‌های متعدد ساختاری و پیچیدگی‌های زمین‌ساختی، چالش‌های بیشتری را دربر داشته است. با بررسی‌های جدید در مورد روند و عملکرد بخش‌هایی از گسل‌های بزرگ و توانمند این منطقه ابهامات فراوانی به‌وجود آمده است. البرز مرکزی به دلیل فشارش مداوم صفحه عربی به صفحه ایران با جهت N10-20E دارای ساختارهای شدیداً گسلیده فشاری و چین‌خورده تقریباً شرقی-غربی و با شیب رو به شمال است. اخیراً در مورد برخی از گسل‌ها روشن شده است که دارای حرکات کششی با شیب رو به جنوب هستند. در این تحقیق با استفاده از روش مگنتوتلوریک، در امتداد یک نیم‌رخ ۲/۵ کیلومتری عمود بر گسل مشا و در جنوب شرق آتشفشان دماوند محل دقیق گسل، منطبق با نقشه زمین‌شناسی شناسایی شده است. از سوی دیگر تغییرات شیب گسل از ۷۵ تا ۸۰ درجه به سمت شمال در اعماق، به حالت تقریباً قائم در نزدیکی سطح رسیده است. که با توجه به تغییر روند مشهود در مدل‌های حاصل از وارون‌سازی، عملکرد گسل در جابه‌جایی واحدهای دارای مقاومت یکسان با در نظر گرفتن شیب گسل به طرف شمال، نرمال است. عملکرد شاخه‌های فرعی گسل و همچنین آبراهه‌های گسلی نیز در این تحقیق در زیر بعضی از ایستگاه‌ها شناسایی شد که نشان از وجود زون‌های خرد شده با مقاومت کم دارد. تغییر شیب صفحه اصلی گسل از نتایج اساسی و بحث‌انگیز تحقیق حاضر و با توجه به پیشینه زمین‌ساختی البرز مرکزی طراحی نیم‌رخ‌های موازی و عمود بر امتداد گسل در این منطقه برای تأیید صحت نتایج فوق پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تحلیل ابعادی، دترمینان، گسل مشا، مگنتوتلوریک

Study of Mosha fault structure (South of the Central Alborz) using magnetotelluric method

Oskooi, B.¹, Sayyadi, M.² and Omidian, S.³

¹Assistant Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²M.Sc. in Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³M.Sc. in Petrology, Faculty of Geology, College of science, University of Tehran, Iran

(Received: 05 May 2010, Accepted: 03 Jul 2012)

Abstract

Magnetotellurics (MT) is an electromagnetic geophysical method of imaging the earth's subsurface by measuring natural variations of the electrical and magnetic fields at the Earth's surface. Investigation depth ranges from 300m below ground by recording higher frequencies down to 10,000m or deeper with long-period soundings. Research applications include experimentation to further develop the MT technique, long-period deep crustal exploration, and earthquake precursor prediction research. Also,

E-mail: boskooi@ut.ac.ir

دورنگار: ۰۲۱-۸۸۶۳۰۵۴۸

تلفن: ۰۲۱-۶۱۱۸۲۳۸

*نگارنده رابط:

Magnetotelluric method is a powerful tool for deep crustal studies of tectonically active mountainous regions such as the Himalaya, where logistic constraints severely limit the use of other artificial source electrical and electromagnetic methods. Topographic variations in mountainous regions distort apparent resistivity curves and thus lead to artifacts in interpreted models. The results of the magnetotelluric soundings provide new insights on the geological structure and tectonics of the mountainous areas. Magnetotelluric method (MT) offers opportunity to detect crustal fluids along faults due to their high conductivity anomaly. Supposing that fluids deposited minerals in the conductive fractures (faults, dykes) decreasing the resistivity, the high seismicity in the area can be explained by the presence of the fluids.

Mosha Fault in northern part of Iran is located in an E-W trend and act as a separator for Alborz mountain chain from Central Iran. This fault is interesting to investigate, because Tehran city (Capital of Iran) has a risk of an earthquake occurrence so that understanding the fault characteristics is very important. Mosha Fault Zone is also an interesting structure due to its key character of mysterious structural relation to the mechanism of the fault zone. Mosha fault has the most complicated tectonic structure in Alborz zone due to big changes that have affected the region basically. These ambiguities come from the increase with new studies about process and work parts of great faults in the area. Central Alborz inclusive structures are reverse faults with nearly East- West crackled dipping towards north. This can be a result due to continuous compression of the Arabian plate to the Iranian plate with N10-20E direction. Latter studies showed that some of the faults recently show tensional behavior or the dip is changing towards to the south, generally.

Based on the seismic and GPS studies, the Uplift, south Caspian subsidence and subsequent folding, reversal of Alborz strike-slip (from dextral to sinistral) and eastward extrusion of central Iran, coarse Zagros molasse deposition, Dead Sea transform reorganization, Red Sea oceanic spreading, and North and East Anatolian fault slip, all apparently began ca. 5 ± 2 Ma, suggesting a widespread tectonic event that was a response to buoyant Arabian lithosphere choking the Neo-Tethyan subduction zone. Basically, some researchers believe that the westward rotation of the stable Caspian block at this time is started and it cause the change of the dextral strike-slip faults mechanism to the sinistral strike-slip one which cause to making pull-apart system in some part and also in the development of new normal faults with a change in dip direction and block motion of pre-existing faults.

In this study, MT measurements were carried out in the period range 0.001- 420 s crossing Mosha fault along a 2.5k m profile with 8 MT sites. In these work we detect geo-electrical resistivity anomalies of the Earth's crust and link them to local seismic activities. And also the fault location on the geological map is investigated. Surprisingly, fault dip changes from 75-80 degrees in depths to nearly vertical (90 degrees), at the surface. With attention to the geological map and occurrence of this kind of variations in resistive parts, it is not as a sign of geological units differences. We strongly believe that the fault plan is rotating from north toward south. It means that the new block movement would be a normal displacement and not reverse type. For completion and supporting up the results, more profiles in both directions -perpendicular and parallel to the fault tenor-would be necessary to be done. The place of two remarkable drainages system in the studied area and along the profile is compatible with two linear near surface trend of low resistance anomalies. The root of Karaj formation is distinguished at depth of 2500m with having 2.2 to 2.4 ohm meter resistivity. It is shown geophysically below the number four completely and in corner of stations number 3 and 5. It seems that in depth, Mosha fault and Karaj formation have the same trend and dip direction. It would be a key point to

understand and decipher the mysterious about the place and circumstance of Karaj pyroclastics emission. We suggest that they are emitted from faulted structures during Eocene. From this point, we will expand our study to a three-dimensional analysis including the complete data set in order to reveal the detailed features of the electrical structure around the focal regions where the great earthquakes maybe threaten the metropolis.

Key words: Dimensional analysis, Determinant data, Magnetotelluric, Mosha fault

۱ مقدمه

تهران را در مرز کوه و دشت شهر تهران تشکیل می‌دهد. به عقیده نبوی (۱۳۵۵) این گسل در حاشیه جنوبی رشته کوه البرز تا شهر سمنان ادامه دارد.

این گسل موجب راندگی رشته کوه البرز بر روی ایران مرکزی و در شمال تهران موجب راندگی سازند کرج بر روی آبرفت‌های کواترنر دشت تهران شده است. در درهٔ مشاء این گسل موجب راندگی واحدهای پرکامبرین و کامبرین بر روی سازند کرج شده است و شاخه‌های آن در درهٔ کن آبرفت‌های کواترنر را بریده‌اند که نشانه‌ای از فعال بودن این گسل در عهد حاضر است. قدیمی‌ترین فعالیت گسل نیز مربوط به پرکامبرین است (شکل ۱-ب).

۲ کلیات تحقیقات پیشین

در مورد بخش مرکزی، که نزدیک به دره و روستایی به همین نام قرار دارد، تاکنون تحقیقات متعددی برای شناخت سازوکار راندگی مشا صورت گرفته است که بیشتر آنها بر پایه تحلیل اطلاعات ساختاری استوار بوده است. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، تاکنون عقیده عمومی روی عملکرد معکوس سامانه‌های گسلی البرز به واسطه فشارش صفحه عربی متمرکز بوده است، ولی تحقیقات چند دهه اخیر نشان می‌دهد که عامل‌های متعددی در تغییر عملکرد این گسل و نظریه‌های پذیرفته شده قبلی مؤثر باشند.

بررسی‌های ساختاری و لرزه‌زمین‌ساختی جکسون و همکاران (۲۰۰۲) و آلن و همکاران (۲۰۰۳) تأیید کرده

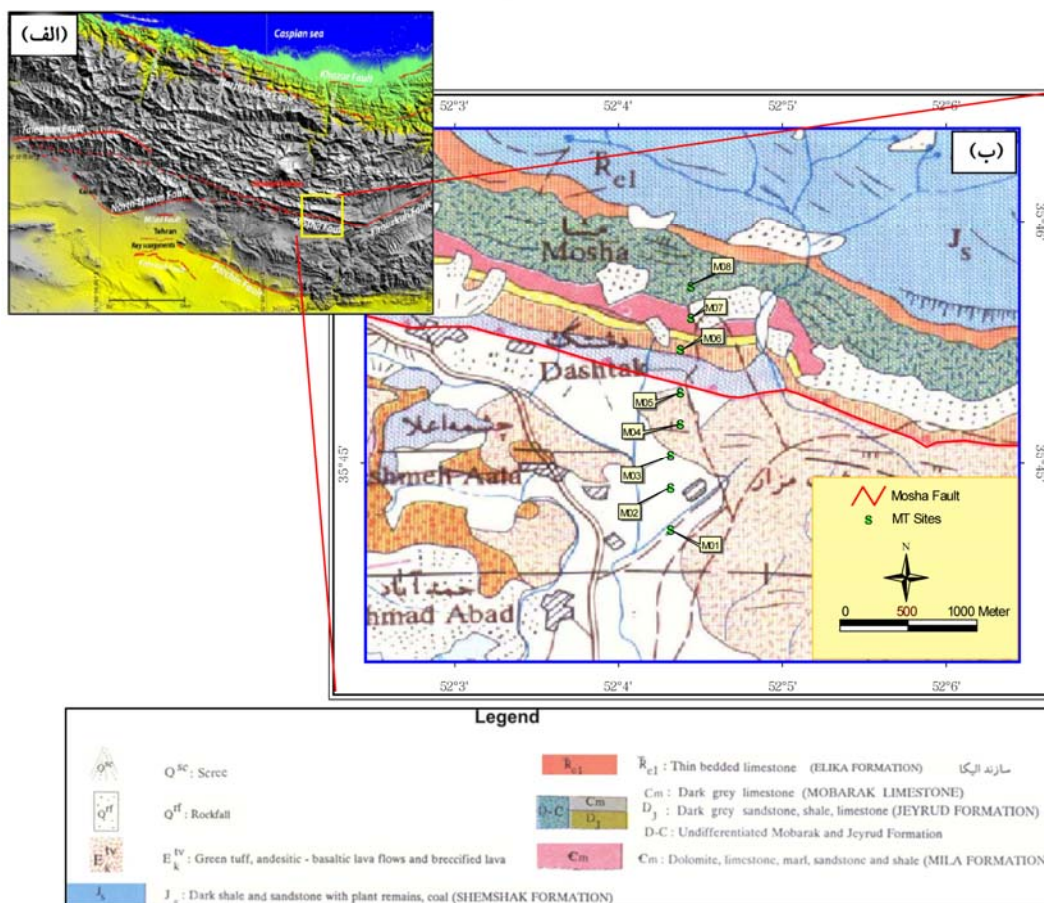
گسل مشا با طولی بالغ بر ۴۰۰ کیلومتر، به منزلهٔ یکی از گسل‌های جنب و فعال البرز مرکزی شناخته شده است. روند کلی این گسل مطابق با روند پی‌سنگ گسلیده و شدیداً چین‌خورده البرز که متأثر از فشارش مداوم صفحه عربستان به ایران (N10-20E) است، شرقی-غربی در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱-الف). روند کلی ساختارهای بزرگ مقیاس نشان می‌دهد که تراست‌ها و ساختارهای معکوس همواره از بدیهی‌ترین نتایج این فشارش مداوم بوده است.

اعتقاد بر این است که سامانهٔ گسل مشا از سه گسل اصلی طالقان (غرب البرز مرکزی)، مشا (البرز مرکزی) و فیروزکوه (شرق البرز مرکزی) تشکیل شده است. البته گاهی به واسطه موقعیت جغرافیایی و عملکرد متفاوت، به صورت مجزا در نظر گرفته می‌شوند و در مواردی به دلیل اینکه این گسل‌ها سازندگان یک زون برشی بزرگ مقیاس هستند، از نظر ساختاری یک سامانه واحد و شاخص حد جنوبی و مرز جداکننده حفاصل رشته کوه‌های البرز مرکزی در شمال ایران از بخش‌های هموار ایران مرکزی در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱-الف).

این گسل در هر بخش از روند خود سازوکار متفاوتی دارد به نحوی که در بخش غربی با روند جنوب شرق، معکوس راست‌گرد و در بخش مرکزی معکوس و با روند شرقی غربی و در بخش شرقی با راستای شمال شرق-جنوب غرب، فشاری بُرشی چپ‌گرد است. بخش شرقی در ناحیه لواسان تهران گسل دو شاخه شده و گسله شمال

در البرز پدید آمده است. ریتز و همکاران (۲۰۰۶) اعتقاد دارند نتیجه فعالیت این دو سازوکار توأم، حاکم شدن رژیم تثنی ترافشاری است که با نرخ 2 ± 5 میلی متر حرکت در سال، دارای روند NNE-SSW است. در حالی که بررسی های چندسال اخیر کاملاً بر این پایه بوده که شیب گسل ها و تراس های البرز مرکزی به سمت شمال بوده است (بربریان و ایتز، ۱۹۹۹؛ باچمانو، ۲۰۰۱؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۳، نقشه های زمین شناسی منتشر شده از سوی سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور)، یافته های اخیر ریتز و همکاران (۲۰۰۳، ۲۰۰۶) خلاف این واقعیت را نشان می دهد.

است که تراس های این ناحیه دارای مؤلفه امتداد لغز چپ گرد هستند، همان گونه که دیویدسون و همکاران (۲۰۰۴) با استناد به شواهد متعدد تغییر رژیم سازوکار این ناحیه را از راست گرد به چپ گرد در طی 2 ± 5 سال اخیر نشان دادند. ورنانت و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از سامانه موقعیت یاب جهانی، نرخ کوتاه شدگی البرز را با توجه به فشارش رو به شمال ایران مرکزی به اوراسیا، 2 ± 4 میلی متر در سال برآورد کردند و در همین حین گروه جکسون و همکاران (۲۰۰۲) با بررسی سازوکار لرزه های این منطقه روشن ساختند که علاوه بر این فعالیت پیوسته کوتاه شدگی (به دلیل شروع چرخش راست گرد حوضه خزر جنوبی نسبت به اوراسیا) حرکت چپ گرد غالبی نیز



شکل ۱. (الف) موقعیت کلی البرز مرکزی، گسل مشا و محدوده مورد بررسی (کادر زردرنگ) روی تصویر رادار بخشی از ایران و (ب) نقشه زمین شناسی با نمایی نزدیک از کادر زردرنگ در (الف). موقعیت ایستگاه های برداشت داده مگنتوتلوریک با رنگ سبز و گسل مشا با خط سرخ نمایش داده شده است.

تعریف می‌شود.

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \quad (۳)$$

در حالت‌های زمین یک‌بُعدی و دو‌بُعدی مولفه‌های قطری تانسور امپدانس مقداری تقریباً برابر با صفر داشته و مولفه‌های غیر قطری تانسور امپدانس در حالت یک‌بُعدی مقداری برابر و در حالت دو‌بُعدی مقداری متفاوت خواهند داشت. در یک دستگاه مختصات چرخیده شده تانسور امپدانس به صورت $Z' = RZR^T$ تعریف می‌شود که R ماتریس چرخشی تحت زاویه α است و R^T ترانزپوز ماتریس چرخشی خواهد بود.

$$R = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (۴)$$

با توجه به اینکه ساختار رسانایی زمین غیرهمگن و ناهمسانگرد است به‌جای کمیت مقاومت واقعی، از کمیت مقاومت ظاهری در توصیف مقاومت ویژه زمین استفاده می‌شود:

$$\rho_{a_{xy,yx}} = \frac{1}{\mu_0 \omega} |Z_{xy,yx}|^2 = \frac{1}{\mu_0 \omega} \left| \frac{E_{xy,yx}}{H_{xy,yx}} \right|^2 \quad (۵)$$

در حالت کلی عناصر تانسور امپدانس به‌صورت

اصلاح شده زیر در خواهند آمد:

$$\begin{aligned} S_1 &= Z_{xx} + Z_{yy} & D_1 &= Z_{xx} - Z_{yy} \\ S_2 &= Z_{xy} + Z_{yz} & D_2 &= Z_{xy} - Z_{yz} \end{aligned} \quad (۶)$$

از طرفی پارامتر چاولگی سوپت (K) که از نسبت

دامنه‌های تانسور امپدانس به‌دست می‌آید به‌صورت مقابل تعریف خواهد شد:

$$K = \frac{|S_1|}{|D_1|} = \frac{|Z_{xx} + Z_{yy}|}{|Z_{xy} - Z_{yx}|} \quad (۷)$$

و زاویه‌ای که تحت آن زاویه رابطه $|Z'_{xy}|^2 + |Z'_{yx}|^2$ بیشترین یا کمترین مقدار خود را بگیرد امتداد اصلی

بررسی‌های آنها روی رسوبات عهد حاضر با بررسی تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی، مدل سه‌بُعدی ارتفاعی، بررسی‌های صحرایی، بررسی ترانزپوزها و اطلاعات دیرینه لرزه‌زمین ساخت گذشته همراه با نقشه سینماتیک داده‌های GPS نشان می‌دهد که تحرکات ساختاری در البرز مرکزی دستخوش تغییرات بارزی شده است. بررسی روی گسل‌های طالقان و فیروزکوه حاکی از این حقیقت است که نه فقط شیب این گسل‌ها به سمت جنوب، بلکه دارای سازوکار نرمال نیز است و در مورد گسل مشا شیب رو به شمال و عملکرد نرمال را تشخیص داده‌اند. امیدیان و همکاران (۱۳۸۷)، امیدیان (۱۳۸۶) و حسن‌زاده و همکاران (۲۰۰۶) یک سامانه تراکشی را در هسته البرز مرکزی به‌منزله عامل احتمالی زایش دماوند در این منطقه معرفی کرده‌اند.

با توجه به اینکه از نظر زمین‌شناسی پاسخ به این مسئله و یافتن شواهد غیر زمین‌شناسی بسیار حائز اهمیت است، لذا ما در این تحقیق بر آن شدیم تا صحت اطلاعات عرضه شده در طی سالیان متمادی را با روش ژئوفیزیکی مگنتوتلوریک بررسی کنیم. به همین دلیل بخش مرکزی گسل مشا برای این بررسی انتخاب شد.

۳ نظریه روش مگنتوتلوریک

اساس روش مگنتوتلوریک (MT) بر پایه معادلات ماکسول و روابط بین مولفه‌های میدان الکتریکی (E_x, E_y, E_z) و میدان مغناطیسی (H_x, H_y, H_z)، میدان‌های الکترومغناطیسی در حوزه بسامد (ω) بنا شده است.

$$E_x(\omega) = Z_{xx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{yy}(\omega)H_y(\omega) \quad (۱)$$

$$E_y(\omega) = Z_{yx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{yy}(\omega)H_y(\omega) \quad (۲)$$

و پارامترهای امپدانس (Z) با توجه به روابط بالا تعریف شده که شکل کلی تانسور امپدانس به‌صورت مقابل

ساختارها جریان می‌یابد) ایجاد می‌کند، و حالت TE که متناظر با موج قطبیده شده E است منحنی‌های MT طولی (جریان تلوریکتی در امتداد ساختارها جریان می‌یابد) ایجاد می‌کند. تفاوت اساسی بین این دو حالت در این است که حالت TM ساختارها را باردار می‌کند و بی‌هنجاری‌های آن دارای طبیعت گالوانیکی هستند ولی حالت TE ساختارها را باردار نمی‌کند و بی‌هنجاری‌های آن دارای طبیعت القایی هستند.

حالت‌های TE و TM حساسیت‌های متفاوتی نسبت به ساختارهای نزدیک سطح و عمیق دارند و در تقریب دو بُعدی اجسامی که در حالت واقعی سه بُعدی هستند با دقت‌های متفاوت عمل می‌کنند. در حالی که حالت TM به ساختارهای نزدیک سطح حساس‌تر است و حالت TE به ساختارهای عمیق حساس‌تر است. حالت TM در مقابل اثرات سه بُعدی ساختارهای رسانا پایدارتر است در حالی که حالت TE در مقابل اثرات سه بُعدی ساختارهای پایدارتر است در حالی که حالت TE در مقابل اثرات سه بُعدی که توسط ساختارهای نارسا‌تر ایجاد می‌شود پایدارتر است. حالت TM در مقابل جابه‌جایی ایستایی (استاتیک) حاصل از بی‌هنجاری‌های سه بُعدی نزدیک سطح تاثیرناپذیرتر از حالت TE است (بردیچوسکی و همکاران، ۱۹۸۸). حالت TETM ترکیبی از حالت‌های TE و TM است و مولفه‌های میدان را در دو امتداد مماس و عمود بر امتداد ساختار در نظر می‌گیرد. در حالت Det امپدانس به صورت دترمینان امپدانس است، مزیت استفاده از داده‌های دترمینان این است که یک مقدار میانگینی از امپدانس‌ها در همه جهت‌های جریان فراهم می‌کند و به‌علاوه به تشخیص حالت (TE و TM) و همچنین به تصحیحات جابه‌جایی ایستا (Static shift) نیازی نیست و آنالیز بعد (Dimensionality analysis) برای مدل‌های طبیعی یک بُعدی 1D و دو بُعدی 2D با استفاده از این داده‌ها به سادگی امکان‌پذیر است (اسکویی، ۲۰۰۶).

سوئیت نامیده می‌شود، در صورتی که مقدار $k < 0/1$ باشد ساختار زمین به صورت یک بُعدی یا دو بُعدی ساده در نظر گرفته می‌شود و در نتیجه امتداد لایه‌ها با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\tan 4\theta = 2 \operatorname{Re}(S_2 D_1^*) / |D_1|^2 - |S_2|^2 \quad (8)$$

زمانی که پارامتر چاولگی سوئیت از حدود تعیین شده فراتر رود از پارامتر دیگری برای تعیین چاولگی به نام چاولگی باهر استفاده می‌شود

$$\eta = \sqrt{\frac{|[D_1, S_2] - [S_1, D_2]|}{|D_2|}} \quad (9)$$

و استرایک منطقه در این حالت و زمانی که مقدار این پارامتر تحت بازه $0 \leq \eta \leq 0.2$ قرار گیرد از رابطه روبه‌رو به دست می‌آید:

$$\tan(2\theta) = \frac{[S_1, S_2] - [D_1, D_2]}{[S_1, S_2] + [D_1, D_2]} \quad (10)$$

و در صورتی که مقدار اسکویو باهر در بازه $0.2 \leq \eta \leq 0.3$ باشد از رابطه انحراف فازی در تعیین استرایک منطقه استفاده می‌کنیم.

حالت TE مربوط به میدان الکتریکی مماسی و حالت TM مربوط به میدان مغناطیسی مماسی است. هر دو مولفه نسبت به ساختار رسانایی، مماس هستند و روابط زیر را برقرار می‌کنند:

$$(11) \quad E_x \text{ و } B_x \text{ قطبش TM} \quad E_y \text{ و } B_y \text{ قطبش TE}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} &= \mu \sigma E_x & -\frac{\partial E_z}{\partial y} + \frac{\partial E_y}{\partial z} &= i\omega B_x \\ -\frac{\partial E_x}{\partial z} &= i\omega B_y & \frac{\partial B_x}{\partial z} &= i\mu \sigma E_y \\ -\frac{\partial E_x}{\partial y} &= i\omega B_z & \frac{\partial B_x}{\partial y} &= i\mu \sigma E_z \end{aligned}$$

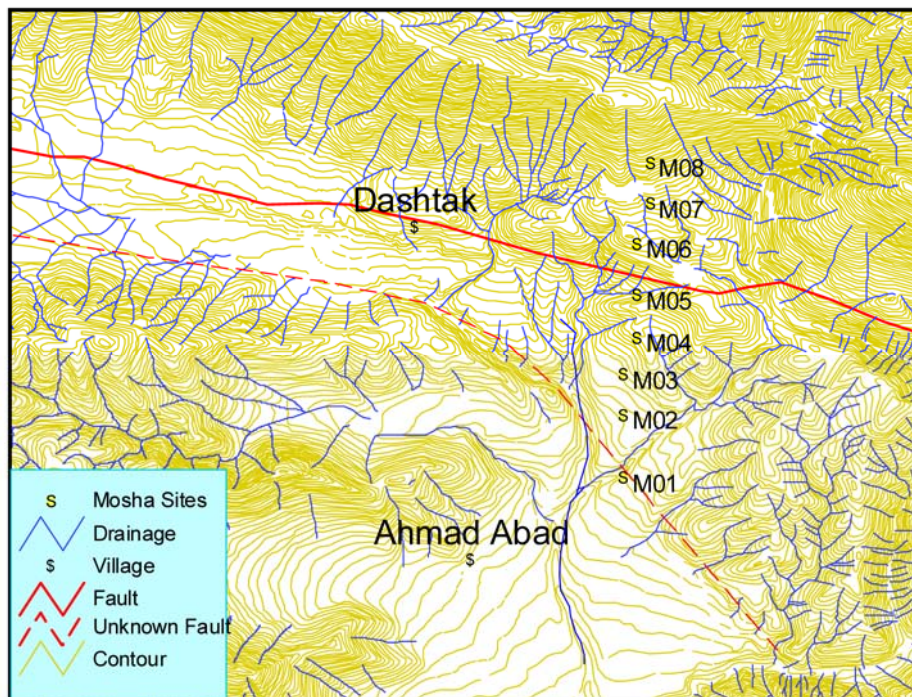
حالت TM که مربوط به موج قطبیده شده B است منحنی‌های MT عرضی (جریان تلوریکتی در عرض

$$Z_{Det} = \sqrt{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}} \quad (12)$$

پوشش می‌دهد، انتخاب شد. در شکل ۱-ب و شکل ۲ به ترتیب نمایی از محدوده مورد بررسی همراه با ایستگاه‌های اندازه‌گیری درروی نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی آورده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، گسل مشا از بین ایستگاه‌های ۵ و ۶ می‌گذرد و به ترتیب دو عارضه آبراهه اصلی و گسل فرعی بین ایستگاه‌های اول و دوم و نزدیکی ایستگاه اول واقع هستند. دستگانه‌های مورد استفاده در این تحقیق، دستگانه مگنتوتلوریک MTU2000 متعلق به دانشگاه افسالای سوئد است که از سوی بخش ژئومغناطیس مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران امانت گرفته شده بود. با توجه به محدوده دینامیکی بزرگ این دستگانه می‌توان سیگنال‌های الکترومغناطیسی را در گستره بسامدی وسیع با قابلیت تحلیل حداکثر و کنترل کیفیت مناسب داده‌ها برداشت کرد.

۴ تحقیقات صحرایی و برداشت داده‌ها

اساس این بخش بر یافتن مناسب‌ترین محل برای نصب و استقرار دستگانه‌های اندازه‌گیری مگنتوتلوریک و برداشت داده‌ها بود. به همین دلیل با بررسی تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های زمین‌شناسی در زیر راندگی مشا در نزدیکی منطقه دشتک محل مناسبی برای طراحی نیم‌رخ انتخاب شد. چون این برداشت‌ها باید در مناطق تا حد امکان هموار و دور از نوفه برداشت شود. برای کنترل‌های میدانی سه روز بازدید صحرایی صورت گرفت. در نهایت در طول نیم‌رخ ۳ کیلومتری طراحی شده، ۸ ایستگاه در راستای شمال-جنوب (عمود بر روند گسل) که رسوبات آذرآواری سازند کرج را در جنوب گسل و سازندها و رسوبات مربوط به دوران پالئوزوئیک را در شمال آن



شکل ۲. نقشه توپوگرافی و محل آبراهه‌های محدوده مورد بررسی. موقعیت ایستگاه‌های برداشت داده و محل گسل اصلی مشا در بین ایستگاه‌های ۵ و ۶، گسل فرعی زیرین و آبراهه اصلی منطقه در بین ایستگاه‌های ۱ و ۲ در شکل نمایش داده شده است.

شده قرار گرفته است. در ایستگاه‌های هفت و هشت ساختارها در سطح به صورت ساختارهای دو بُعدی ساده و در اعماق میانی به صورت ساختارهای دو بُعدی همراه با آشفتگی گالوانیک هستند.

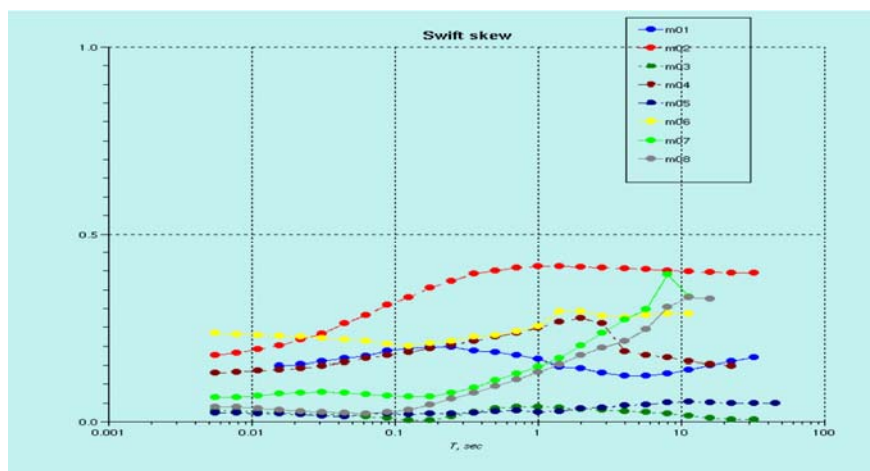
وارون سازی یک بُعدی داده‌های دترمینان با استفاده از رهیافت عرضه شده پدرسن (۲۰۰۴) صورت گرفته است. در این برنامه خطای میانگین مربعی کل (Total Mean-Square Error) مدل برآورد شده در تعریف سطح برش (Truncation Level) استفاده می‌شود تا تعادل معقولی بین قدرت تفکیک و واریانس مدل به دست آید. این تعادل عمدتاً با داده‌ها تعیین می‌شود و فرضیات بیشتری به جز اینکه جملات گرایست (Bias Terms) باید به خوبی برآورد شوند، لازم نیست.

پردازش داده‌های MT با رهیافت اسمیرنوف صورت گرفت. برای تحلیل ابعادی یک برنامه رایانه‌ای تدوین شد که مشخص می‌کند که در یک عمق خاص چه نوع ساختاری از نظر ابعادی و با چه مقاومت ویژه‌ای وجود دارد. در این قسمت نتایج حاصل از برگردان یک بُعدی داده‌های دترمینان برای همه ایستگاه‌ها به طور خلاصه آورده شده است.

۵ تحلیل ابعادی داده‌های صحرایی منطقه مورد نظر

با بررسی چاولگی سویت و باهر در منطقه مورد بررسی مشخص می‌شود که ساختارهای زمین در این منطقه بیشتر دو بُعدی و همراه با آشفتگی گالوانیک (Galvanic Distortion) است که اغلب در اندازه گیری‌های مگنتوتلوریک مشاهده می‌شود و علت آن وجود بی‌هنجاری‌های محلی سه بُعدی محلی مدفون در سطح زمین است. این نوع آشفتگی مستقل از بسامد است و روی بی‌هنجاری‌های بزرگ مقیاس ناحیه‌ای و وابسته به بسامد تأثیر می‌گذارند. هدف اصلی از آنالیز آشفتگی‌ها، حذف اثر آنها از نتایج است.

توصیف چاولگی سویت در شکل ۳ نشان می‌دهد که در ایستگاه اول و دوم ساختارهای زمین به صورت یک ساختار دو بُعدی نازک همراه با تغییرات رسانایی جانبی روی یک ساختار دو بُعدی منطقه‌ای تحت یک دستگاه مختصات چرخیده شده است. در ایستگاه‌های سوم و پنجم ساختارهای زمین در این مناطق به صورت ساختارهای دو بُعدی ساده است. در ایستگاه چهارم ساختارهای زمین به صورت ساختارهای سه بُعدی هستند. در ایستگاه ششم زمین در این منطقه به صورت ساختارهای دو بُعدی همراه با آشفتگی گالوانیک ضعیف تحت یک مختصات چرخیده



شکل ۳. نمایشی از مقادیر چاولگی سویت در ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده روی گسل مشا.

۴-۵ ایستگاه چهارم: ساختارها در این ایستگاه به صورت یک ساختار دو بُعدی نازک روی یک ساختار دو بُعدی ضخیم تحت یک دستگاه مختصات چرخیده شده است و امتداد لایه‌ها از آزیموت ۱۰۰ درجه در عمق ۴۰۰۰ متر به آزیموت ۵۰ درجه در عمق ۹۰۰۰ متری می‌چرخد.

۵-۵ ایستگاه پنجم: با توجه به اینکه چاولگی سويفت در تمام اعماق کمتر از ۰/۱ است. در نتیجه ساختارها در این ایستگاه به صورت یک بُعدی در نظر گرفته می‌شوند و استرایک در این ایستگاه تحت آزیموت ۹۰ درجه قرار می‌گیرد.

۶-۵ ایستگاه ششم: ایستگاه ششم روی سازندهای متشکل از شیل و ماسه سنگ‌های سرخ و سبزرنگ همراه با میان لایه‌های سنگ آهک تشکیل شده است. مقدار چاولگی سويفت در تمام تناوب‌ها بیشتر از ۰/۱ و از طرفی چاولگی باهر کمتر از ۰/۱ است، در نتیجه ساختارهای زمین‌شناسی به صورت ساختارهایی با آشفتگی محلی ضعیف تحت یک دستگاه مختصات چرخیده شده قرار می‌گیرد. استرایک از آزیموت ۱۳۰ به آزیموت ۵۰ درجه در تناوب ۰/۰۲ ثانیه چرخیده و تا دوره ۰/۶ ثانیه دارای آزیموت ثابت ۸۰ درجه است و دوباره ساختارهای زمین چرخیده و در آزیموت ۱۳۰ درجه قرار می‌گیرند و این روند تا تناوب ۲ ثانیه ادامه می‌یابد و دوباره ساختارهای زمین به آزیموت ۷۵ درجه می‌چرخند. منحنی دترمینان مقاومت و فاز با مدل پاسخ انطباق خوبی را آشکار می‌سازد و مدل مقاومت ویژه یک بُعدی چهار توده رسانا با مقاومت‌های ویژه ۸۰، ۱۵۰، ۱۵۰۰ و ۲۰ اهم‌متر را به ترتیب در اعماق ۶۰۰۰، ۵۰۰، ۲۰۰ و ۱۲۰۰۰ متری نشان می‌دهد.

۷-۵ ایستگاه هفتم: با توجه به چاولگی سويفت تا عمق ۱۶۰۰ متر ساختارها به صورت یک ساختار یک بُعدی

۱-۵ ایستگاه اول: با توجه به اینکه در تمامی اعماق زمین در این ایستگاه مقدار چاولگی سويفت و باهر فراتر از حدود تعیین شده هستند و بررسی اختلاف زوایای بردارهای تلوریک نشان می‌دهد که ساختارها در این ایستگاه به صورت یک ساختار دو بُعدی نازک روی یک ساختار دو بُعدی ضخیم تحت یک دستگاه مختصات چرخیده شده قرار می‌گیرند و بررسی استرایک منطقه در این ایستگاه نشان می‌دهد که امتداد لایه‌ها از آزیموت ۱۳۵ درجه در عمق ۲۰۰ متری به آزیموت ۵۰ درجه در عمق ۳۵۰ متری چرخیده است.

۲-۵ ایستگاه دوم: با توجه به مقادیر چاولگی سويفت و باهر در این ایستگاه و از طرفی بررسی اختلاف زوایای بردارهای تلوریک در این ایستگاه مشخص می‌سازد که ساختارها در این ایستگاه به صورت یک ساختار دو بُعدی نازک روی یک ساختار دو بُعدی ضخیم تحت یک دستگاه مختصات چرخیده شده است و استرایک منطقه تقریباً تحت آزیموت ۹۰ درجه قرار می‌گیرد.

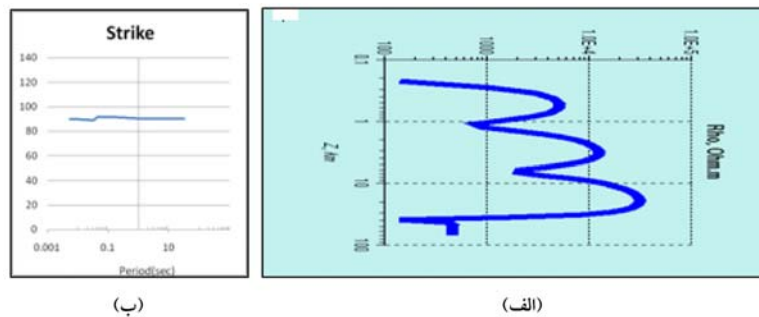
۳-۵ ایستگاه سوم: این ایستگاه روی سازندهای توف و توفیت‌های سبزرنگ (دوران پالئوسن و ائوسن) قرار گرفته است. با بررسی چاولگی سويفت مشخص شده که در تمامی اعماق، ساختارها به صورت یک ساختار دو بُعدی ساده و امتداد لایه‌ها شرقی غربی هستند. منحنی‌های دترمینان مقاومت ویژه با مدل پاسخ انطباق خوبی دارند و مدل مقاومت ویژه ID، سه توده رسانا با مقاومت‌های ویژه ۱۵۰، ۵۵۰، ۲۰۰۰ اهم متر را به ترتیب در اعماق ۲۵۰، ۱۰۰۰ و ۶۰۰۰ متری نشان می‌دهد. توده رسانای چهارم در عمق ۴۰ کیلومتری قابل شناسایی است. از شکل ۶-ج، زاویه استرایک منطقه ۹۰ درجه و یا شرقی- غربی برداشت می‌شود که با روند ساختارهای بزرگ مقیاس منطقه هماهنگ است.

۶ وارون سازی دو بُعدی

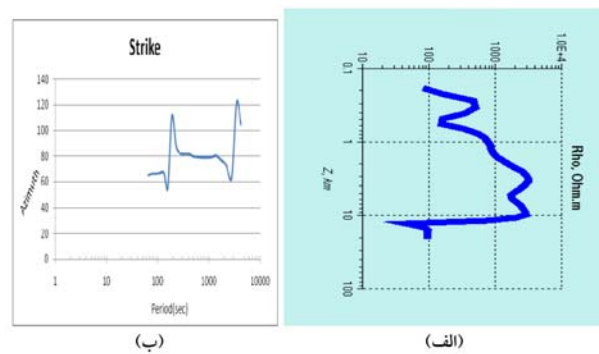
برگردان داده‌ها براساس چگونگی بُعد ساختارهای موجود در منطقه عملیاتی که با استفاده از بررسی‌های زمین‌شناسی، زمین‌ساخت و داده‌های MT صورت گرفت. با توجه به اینکه ساختارهای منطقه عمدتاً ID و 2D تشخیص داده می‌شوند، برگردان داده‌ها ابتدا به صورت یک بُعدی و سپس براساس نتایج برگردان یک بُعدی مدل‌های اولیه برای برگردان دو بُعدی داده‌ها برآورد شد. داده‌های MT در امتداد یک نیم‌رخ جنوبی-شمالی به صورت دو بُعدی برگردان شدند و برای حصول اطمینان از کیفیت مدل‌ها، مدل حالت باقی‌مانده (Residual model) که حاصل اختلاف بین مدل‌های مشاهده (Observed model) شده و مدل محاسبه شده (Calculated model) است بایستی حالتی تقریباً یکنواخت و برابر با مقدار صفر را نشان دهد که برای نمونه در حالت دترمینان آورده شده است.

در نظر گرفته می‌شود و از این عمق به بعد با توجه به اینکه مقدار چاولگی سويفت و باهر از حدود تعیین شده فراتر می‌روند و از طرفی اختلاف زوایای بردارهای تلوریک برابر با ۹۰ درجه است ساختارها را در این اعماق به صورت یک ساختار دو بُعدی نازک همراه با تغییرات رسانایی جانبی روی یک ساختار دو بُعدی تحت یک دستگاه مختصات چرخیده شده در نظر می‌گیریم.

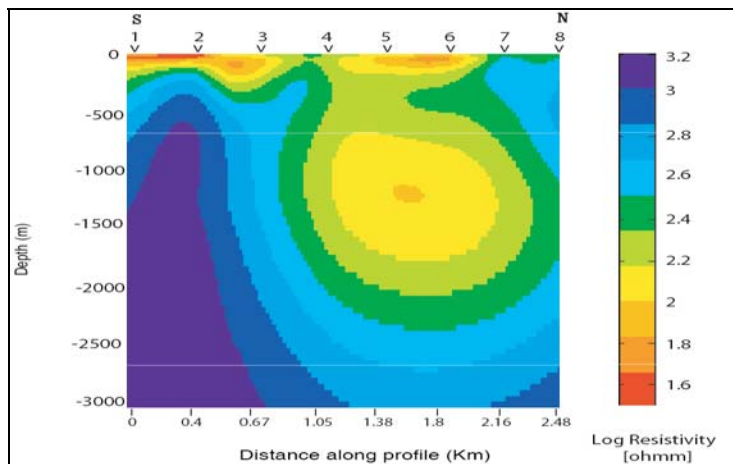
۸-۵ ایستگاه هشتم: با توجه به چاولگی سويفت تا عمق ۱۶۰۰ متر ساختارها به صورت یک ساختار یک بُعدی در نظر گرفته می‌شود و از این عمق به بعد با توجه به اینکه مقدار چاولگی سويفت و باهر از حدود تعیین شده فراتر می‌روند و از طرفی اختلاف زوایای بردارهای تلوریک برابر با ۹۰ درجه است، ساختارها را در این اعماق به صورت یک ساختار دو بُعدی نازک همراه با تغییرات رسانایی جانبی روی یک ساختار دو بُعدی تحت یک دستگاه مختصات چرخیده شده در نظر می‌گیریم.



شکل ۴. شکل‌های (الف) و (ب) به ترتیب مدل مقاومت ویژه وارون و زاویه استرایک منطقه را در ایستگاه سوم نمایش می‌دهد.



شکل ۵. شکل‌های (الف) و (ب) به ترتیب مدل مقاومت ویژه وارون و منحنی استرایک منطقه، در ایستگاه هشتم را نمایش می‌دهد.



شکل ۶. نمایش مدل حاصل از برگردان داده‌های TM.

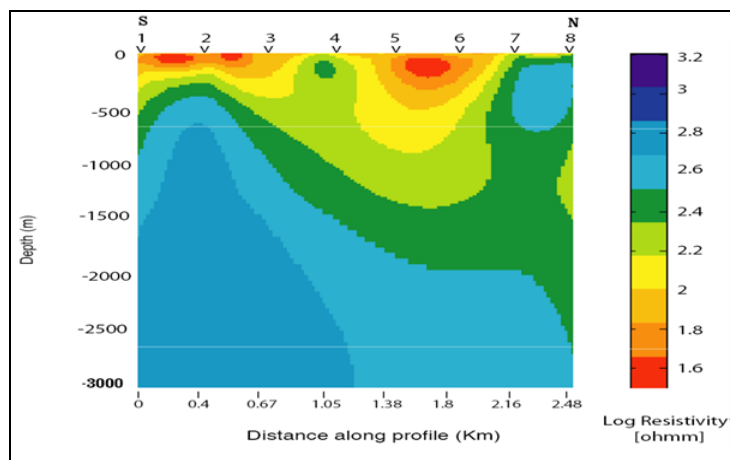
۱-۶ مدل حاصل از برگردان داده‌های TM

داده‌های TM، در این حالت مولفه میدان مغناطیسی در راستای استرایک زمین‌شناسی منطقه و مولفه میدان الکتریکی عمود بر امتداد گسل است. یک زون تقریباً رسانای سطحی از محل ایستگاه ۱ تا ایستگاه ۶ قابل تفکیک بوده است و در محل ایستگاه‌های ۵ و ۶ یک توده رسانای نسبتاً عمیق قابل شناسایی است که تا عمق ۲۵۰۰ متر ادامه دارد. بررسی ساختارهای مقاومتی ویژه یک افتادگی را در این ناحیه نسبت به ایستگاه‌های ابتدایی به سمت شمال منطقه نشان می‌دهد (شکل ۶). همچنین مطابق با نتایج حاصل از مدل TE محل گسل مشا در زیر ایستگاه

۵، ۶ و محل گسل احتمالی و آبراهه در زیر ایستگاه‌های ۱ و ۲ به صورت زون‌های رسانا مشخص شده است.

۲-۶ مدل حاصل از برگردان ترکیبی داده‌های TE و TM (TETM)

حالت TETM که در شکل ۷ نمایش داده شده است، یک زون تقریباً رسانا بین ایستگاه‌های ۵ و ۶ تا عمق حدوداً ۵۰۰ متر نشان می‌دهد و با بررسی ساختارهای مقاومتی زیرین یک افتادگی در زیر این دو ایستگاه نسبت به ایستگاه‌های ابتدایی با شیب به سمت شمال را نشان می‌دهد.

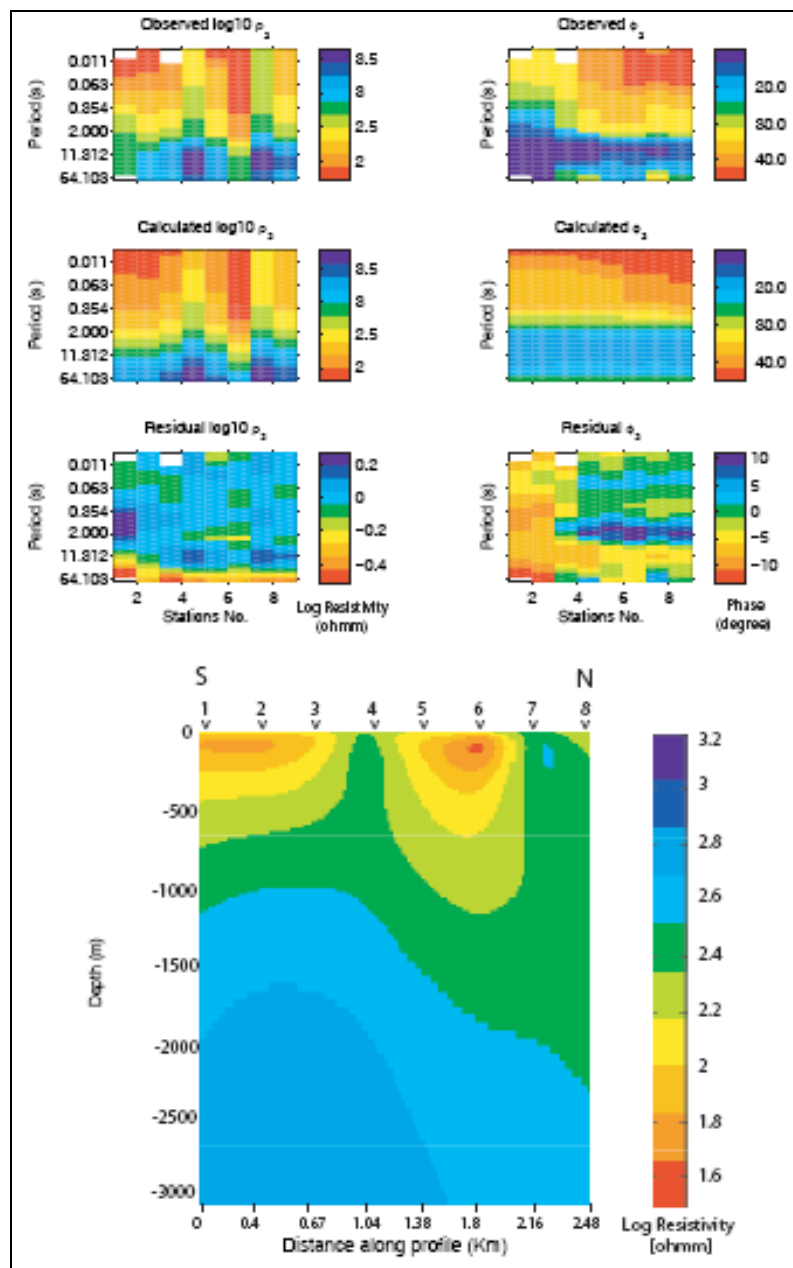


شکل ۷. مدل ترکیبی منتج از داده‌های TE و TM.

۳-۶ مدل حاصل از برگردان داده‌های دترمینان

حالت Det یک زون رسانا را بین ایستگاه‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد که با استفاده از بررسی اختلاف عمق ساختارهای با مقاومت یکسان شیب گسل را به سمت شمال منطقه نشان می‌دهد و تا عمق حدوداً ۲۰۰۰ متر دارای شیب تقریباً قائم و از این عمق به بُعد از شیب گسل کاسته شده

و به حدود ۷۵ درجه می‌رسد. چون سازند واقع در جنوب گسل (سازند کرج) جوان‌تر از سازندهای شمالی گسل (سازندهای مربوط به دوران پالئوزوئیک) است و از آنجا که در دیواره شمالی یک افتادگی دیده می‌شود، می‌توان نوع گسل را نرمال حدس زد (شکل ۸).



شکل ۸. نمایشی از داده‌های دترمینان و مدل حاصل از برگردان دوبعدی این داده‌ها.

۷ بحث و نتیجه گیری

نکته عمومی که در همه مدل‌ها ملاحظه می‌شود، شناسایی حریم گسترش سازند کرج است. تاکنون در بین زمین‌شناسان اتفاق نظری مبنی بر خروج و انباشت حجم عظیمی از توف‌های سبز کرج به صورت مواد آذرآواری به دست نیامده و از سویی میزان گسترش عمقی این سازند مبهم و همچنین محل خروج آن در هاله‌ای از ابهام قرار دارد. همان‌طور که در نقشه زمین‌شناسی شکل ۱ ب دیده می‌شود، ایستگاه چهارم به‌طور کامل و لبه ایستگاه‌های سوم و پنجم به صورت حاشیه‌ای روی این سازند مستقر شده‌اند. با توجه به بررسی مگنتوتلوریک به نظر می‌رسد که این سازند در محدوده مقاومت ویژه ۱۵۰ تا ۲۵۰ اهم متر قرار دارد و از اعماق بیش از ۲۵۰۰ متر ریشه گرفته است. شیب و امتداد عمقی خروج آن با توجه به مدل‌های به دست آمده منطبق با شیب گسل مشا در نظر گرفته می‌شود و به نظر می‌رسد که از بخش‌های عمیق‌تری در قسمت‌های شمالی و در جهت شکستگی‌های بزرگ منطقه به سمت سطح فرار کرده و یا ته نشین شده است.

با توجه به پیشینه زمین‌شناسی منطقه، مشاهدات زمین‌شناسی و تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی این‌گونه به نظر می‌رسد که این بخش از گسل مشا و محل قرارگیری آن در بخش نمایش داده شده روی نقشه با نتایج تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی مطابقت دارد. زیرا آشفستگی‌های ناشی از زون‌های رسانا به‌طور مشخص در بین ایستگاه‌های ۵ و ۶ نمایان شده‌اند. زون خرد شده ناشی از فعالیت گسل مشا و همچنین فعالیت گسل فرعی و آبراهه گسلی در زیر ایستگاه‌های ۵ و ۶ و احتمالاً ایستگاه‌های ۱ و ۲ تا ۳ به صورت نواحی با مقاومت کم و به صورت زون‌های رسانا نمایش داده شده است.

از روند تغییرات تدریجی این زون رسانا، در حکم زون خرد شده ناشی از فعالیت گسل، مشخص می‌شود که از خمش صفحه گسل با شیب زیاد بین ۷۵ تا ۸۰ درجه از

اعماق در رسیدن به سطح کاسته شده و تقریباً به حالت قائم نزدیک شده است. از سوی دیگر همان‌گونه که انتظار داریم در بخش‌های سطحی به دلیل شکنندگی پوسته زمین و ایجاد مدل‌های ساختاری مربوط به افزایش فعالیت گسل‌ها در سطح، عوارضی از آشفستگی‌های ناشی از شکستگی‌های متعدد و بزرگ نمایان است.

با توجه به مدل‌های به دست آمده و بررسی حرکات زیرسطحی و با استناد به تغییر مکان زون‌های مقاوم و رسانا نسبت به شیب گسل، عملکرد نرمال گسل مشا برای بخش‌های کم عمق بدیهی است و به نظر می‌رسد که سازوکار آن فقط در بخش‌های سطحی و نزدیک به سطح که نشان‌دهنده فعالیت‌های جدید آن در مقیاس زمین‌شناسی اند، نرمال و کششی است. در مورد عملکرد پیشین گسل، با توجه به توالی حوادث زمین‌ساختی فعالیت معکوس را گزارش می‌دهد. ولی در مورد حرکات امتدادلغز گسل که اکنون روند حاکم بر تحولات ساختاری البرز مرکزی است، نمی‌توان نظر داد.

لازم است برای قطعیت بخشیدن به نتایج کنونی و همچنین برآورد مستندتر از حرکات جوان و جدید این گسل که با لغزش‌های امتدادی غالب‌تری نسبت به حرکات شیب‌لغز ممکن است همراه باشد، برداشت‌های مگنتوتلوریک در امتداد حداقل دو نیم‌رخ به موازات نیم‌رخ‌های فعلی و عمود بر گسل طراحی و برداشت شود.

منابع

امیدیان، ص، ۱۳۸۶، تعیین جایگاه تکتونیکی آتشفشان دماوند براساس شواهد ژئوشیمیایی و ساختاری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران.

امیدیان، ص،، قریب، ف،، حسن‌زاده، ج. و الیاسی، م،، ۱۳۸۷، بارزسازی گسل‌های نرمال در اطراف آتشفشان دماوند با بهره‌گیری از ابزارهای دورسنجی و مدل

- Shafei, R., Soleymani, S. and Vernant, P., 2006, Active transtension inside Central Alborz: a new insight into northern Iran-southern Caspian geodynamics, *Geology* **34**(6), 477-480.
- Vernant, P. h., Nilforoushan, F., Chéry, F., Bayer, R., Djamour, Y., Masson, F., Nankali, H., Ritz, J. F., Sedighi, M. and Tavakoli, F., 2004, Deciphering oblique shortening of Central Alborz in Iran using geodetic data, *Earth and Planetary Science Letters*, **223**, 177-185.
- ساختماری ریدل، در زیر چاپ.
- Allen, M. B., Ghassemi, M. R., Shahrabi, M. and Qorashi, M., 2003, Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran, *Journal of Structural Geology*, **25**, 659-672.
- Bachmanov, D. M., 2001, Age zoning of coarse molasse in the outer zagros and migration of the recent orogeny, *Geotektonika*, **35**(4), 505-509.
- Berberian, M. and Yeats, R. S., 1999, Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian plateau, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **89**(1), 120-139.
- Berdichevsky, M. N, Dmitriev, V. L., Feldman, I. S., Beresina, N. L., Demidov, A. L. and Jakovlev, S. P., 1988, Interpretation of deep MT sounding in the Tungus syneclise, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz. Zemli*, **7**, 73-79.
- Davidson, J., Hassanzadeh, J., Berzins, R., Stockli, D. F., Bashukuh, B., Turin, B. and Pandamouz, A., 2004, The geology of Damavand volcano, Alborz mountains, northern Iran, *Geological Society of America Bulletin*, **116** (1/2), 16-29.
- Hassanzadeh, J., Omidian, S. and Davidson, J., 2006, A late Pliocene tectonic switch from transpression to transtension in the Haraz sector of central Alborz: implications for the origin of Damavand volcano, *Philadelphia Annual Meeting, Geological Society of America*, 171-28.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M. and Berberian, M., 2002, Active tectonics of the South Caspian Basin, *Geophysical Journal International*, **148**, 214-245.
- Oskooi, B., 2006, 1D interpretation of the magnetotelluric data from travale geothermal field in Italy, *J. Earth Space Phys.*, **32**(2), 1-16.
- Pedersen, L. B., 2004, Determination of the regularization level of truncated singular-value decomposition inversion: The case of 1D inversion of MT data: *Geophysics*, **52**, 261-270.
- Ritz, J. F., Balescu, S., Soleymani, S., Abbassi, M., Nazari, H., Fegghi, K., Shabani, E., Tabassi, H., Farbod, Y., Lamothe, M., Michelot, J. L., Massault, M., Chery, J. and Vernant, P., 2003, Determining the long-term slip rate along the Mosha Fault, Central Alborz, Iran, 4th. International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, (See 4), Tehran, Iran.
- Ritz, J. F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R.,