

شناسایی گسل‌های جنوب آتش‌فشان سبلان روی نیم‌رخ مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک

میلاذ تکلو^۱، بهروز اسکویی^{۲*} و بنفشه حبیبیان دهکردی^۳

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

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

^۳ استادیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۲/۱۲/۷، پذیرش نهایی: ۹۳/۷/۱)

چکیده

سامانه کلی گسل‌های اطراف قله سبلان را می‌توان به دو صورت خطی و کمائی در نظر گرفت. گسل‌هایی با ساختار خطی عمدتاً با راستای NW-SE و N-S در قسمت جنوب قله سبلان مشاهده می‌شوند. گسل‌های کمائی اطراف آتش‌فشان سبلان تقریباً منطبق بر دهانه آتش‌فشان هستند و منجر به نفوذ توده آتش‌فشانی شده‌اند. مدل‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک (زمین‌مغناطیسی) روی نیم‌رخ MM صورت گرفت، به گونه‌ای که این نیم‌رخ هر دو سامانه گسلی منطقه را قطع می‌کند. با بررسی و تفسیر نیم‌رخ مقاومت ویژه MM حاصل از وارون‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک به صورت واضحی مشخص می‌شود که گسل‌ها اثر خود را در نیم‌رخ مقاومت ویژه به صورت جابه‌جایی‌ها و تغییرات ناگهانی در بی‌هنجاری‌های مقاومت ویژه و به صورت زون‌های رسانا با مقاومت ویژه کم در امتداد نیم‌رخ نشان داده‌اند.

واژه‌های کلیدی: سبلان، گسل، مگنتوتلوریک، نیم‌رخ مقاومت ویژه، وارون‌سازی

Detection of southern faults of Sabalan volcano on the resistivity section inferred from the magnetotelluric data inversion

Takalu, M.¹, Oskooi, B.² and Habibian Dehkordi, B.³

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

²Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³Assistant Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 26 Feb 2014, Accepted: 23 Sep 2014)

Summary

The magnetotelluric method is a frequency domain electromagnetic (EM) tool which utilizes natural variations in the Earth's magnetic and electrical field as a source. Variations in the Earth's natural fields supply information, providing the ability to study the electric substructure of the Earth in great depths. The large frequency range of the EM signals eradicates the problematic presence of conductive overburden or sampling frequencies, thereby allowing a deep penetration. Natural magnetotelluric (MT) signals arise from a variety of natural currents, including thunderstorms and solar winds. Total frequency range of the MT data can be from 40 kHz to less than 1^{-4} Hz. Data is acquired in a passive mode using a combination of electric sensors and induction coil magnetometers, and can detect changes of resistivity in great depths (Simpson and Bahr, 2005).

Cagniard (1953) and Tikhonov (1950) developed a theory underlying the

magnetotelluric method independent of each other in the 1950's. They both observed that the electric and magnetic fields associated with telluric currents that flow in the Earth as a result of variations in the Earth's natural electromagnetic field, should relate to each other in a certain way depending on the electrical characteristics of the Earth. The ratio of the horizontal electric field to the orthogonal horizontal magnetic field gives the electromagnetic impedance. The major advantage of the MT method is that it simultaneously measures the electric and magnetic fields in two perpendicular directions. The electric sensors are used to determine the electric field, which is derived from measurements of the voltage difference between electrode pairs of E_x and E_y . Induction coils are used to measure the magnetic field components in 3 orthogonal directions. The ratio of the recorded electric and magnetic fields gives an estimate of the apparent resistivity of the Earth at any given depth.

The elements of the 2x2 impedance (Z) tensor are derived from complex ratios of the orthogonal components of the horizontal electric and magnetic fields in the frequency domain. As all the measurement stations are located over a line in our case, the data only permit the application of a two-dimensional interpretation process that requires the identification of the TE and the TM modes corresponding to electric and magnetic fields parallel to the geologic strike, respectively. As the geological strikes are not known in advance, the components of electromagnetic fields are measured in geomagnetic (or arbitrary) directions and the impedance tensor is rotated to principal axes. The strike direction often changes with depth in the field, accordingly, the rotational angle varies at each frequency. For two-dimensional structures, there are many conditions and consequently many possible schemes to determine the rotational angle (Simpson and Bahr, 2005). Here, we minimized the diagonal elements of the impedance tensor. There are two possible strike directions for a certain frequency and the interpreter identifies the TE and the TM modes using geological and geophysical information.

Volcanic activities of Sabalan started in Eocene and resumed in Pliocene by the eruption of trachy-andesitic lava flow through the main caldera. Four major lithostratigraphic units were defined in the studied area in the following order: Dizu formation (Quaternary alluvium and terrace), Kasra formation (post-caldera, latepliocene), Taos formation (syn-caldera, early Pliocene) and Volhazir formation (pre caldera, Pliocene). The Sabalan fault complex, structurally consists of linear faulting trending NE-SW, N-S and WNW-ESE and arcuate structures forming inner and outer fractures to the caldera (Sahabi, 1378). The MT data were obtained using three sets of MTU-5A equipment, two roving sites within Mt. Sabalan and one remote reference site. The raw time series data were processed using the Phoenix Geophysics, Ltd. SSMT 2000 software, and the resulting EDI files were edited, analyzed and modeled using the Geosystem's WinGlink software. Overall, the obtained MT data were in good quality down to 10^{-2} Hz. However, some MT obtained data were of poor quality despite being retested mainly because of bad weather conditions (i.e. snowy, windy) or because the site was situated along the steep and rocky flanks of Mt. Sabalan. Along the profile MM (on Figure 5) a distinct feature is an almost continuous conductive anomaly ($<30 \Omega\text{-m}$) found between elevations of 3000 to 1000 m asl, except on the eastern side where a resistive block is found from the surface down to lower elevations. There are 8 faults crossing the profile MM. The faults demonstrate themselves along the fault line as displacements, abrupt changes in resistivity anomalies and comparison low resistivity anomalies.

Keywords: Fault, Inversion, Magnetotelluric, Resistivity Section, Sabalan

۱ مقدمه

می‌شود. از سیم پیچ‌های القایی برای اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی HX، HY و HZ در سه جهت عمود برهم استفاده می‌شود. نسبت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ثبت شده برآوردی از مقاومت ویژه ظاهری زمین در هر عمقی را می‌دهد.

گسل‌ها می‌توانند تا اعماق زیادی در پوسته زمین، موجب جابه‌جا شدن لایه‌ها شوند. از این رو روش MT می‌تواند ابزار بسیار مفیدی در بررسی آنها باشد. مجموعه گسل‌های منطقه سبلان به دو شکل کلی خطی و کمّانی گسترش یافته است (سحابی و همکاران، ۱۹۹۹). شکاف‌ها و شکستگی‌هایی که این گسل‌ها دارند باعث شده است که این منطقه، مستعد بسیار خوب ذخایر زمین‌گرمایی در کشور باشد. تاکنون گسل‌های منطقه سبلان با استفاده از داده‌های مگنتوتلوریک بررسی نشده است ولی در ایران و کشورهای گوناگون دنیا سازوکار گسل‌های اصلی زیادی با استفاده از داده‌های مگنتوتلوریک مورد بررسی قرار گرفته است (اسکویی و همکاران، ۲۰۱۳؛ بکن و همکاران، ۲۰۱۱؛ کارسیوگلو و همکاران، ۲۰۱۳). البته در منطقه سبلان اولین داده‌های مگنتوتلوریک در ۱۹۹۸ به تعداد ۲۱۲ سونداژ برداشت شد (حفیظی و همکاران، ۱۳۸۳) و بررسی میدان زمین‌گرمایی سبلان سابقه چندین ساله دارد. در ادامه و در سال‌های بعد، برداشت داده‌های مگنتوتلوریک در این منطقه با بازه بسامدی ۰/۰۰۳ هرتز تا ۳۲۰ هرتز در ۸۱ ایستگاه به‌منظور بررسی‌های بیشتر میدان زمین‌گرمایی سبلان صورت گرفت که نتایج آن در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است.

۲ زمین‌شناسی منطقه

مسائل زمین‌شناسی منطقه سبلان از جمله شرایط زمین‌ساختی، ساختارشناسی و زمین‌گرمایی عمدتاً مرتبط با فعالیت‌های آتش‌فشان سبلان است. از نظر زمین‌ساختی

گسل‌ها پدیده‌هایی زمین‌شناسی هستند که موجب جابه‌جا شدن بی‌هنجاری‌ها و لایه‌های سطحی و زیرسطحی در امتداد شکستگی‌ها می‌شوند. در یک منطقه نیم‌رخ مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک می‌تواند تا حد زیادی تصویر درستی از لایه‌ها و بی‌هنجاری‌های زیرسطحی را تا عمق چندین کیلومتر نشان دهد. در این نیم‌رخ‌ها در برخی مواقع از آنجا که گسل‌ها ممکن است به سبب شکاف بین دو دیواره محل تجمع آب باشند، می‌توانند دارای بی‌هنجاری مقاومت ویژه در امتداد خط گسل باشند. از طرفی تغییرات و جابه‌جایی‌ها در لایه‌ها و بی‌هنجاری‌ها می‌تواند کمک بسیار شایانی در تحلیل و تعیین موقعیت گسل‌های هر منطقه کند.

روش MT ابزار الکترومغناطیسی در حوزه بسامد است که از تغییرات طبیعی در میدان مغناطیسی و الکتریکی زمین به مثابه منبع استفاده می‌کند. تغییرات در میدان مغناطیسی طبیعی زمین در یک بازه بسامدی وسیع این توانایی را فراهم می‌آورد که بررسی‌های زیرسطحی الکتریکی زمین تا اعماق زیاد صورت گیرد. سیگنال‌های طبیعی MT از انواع گوناگونی از جریان‌های طبیعی منشا می‌گیرند، مانند رعد و برق‌ها و بادهای خورشیدی. کل بازه بسامدی MT می‌تواند از ۴۰ کیلوهرتز تا کمتر از ۰,۰۰۰۱ هرتز باشد (سیمپسون و باهر، ۲۰۰۵).

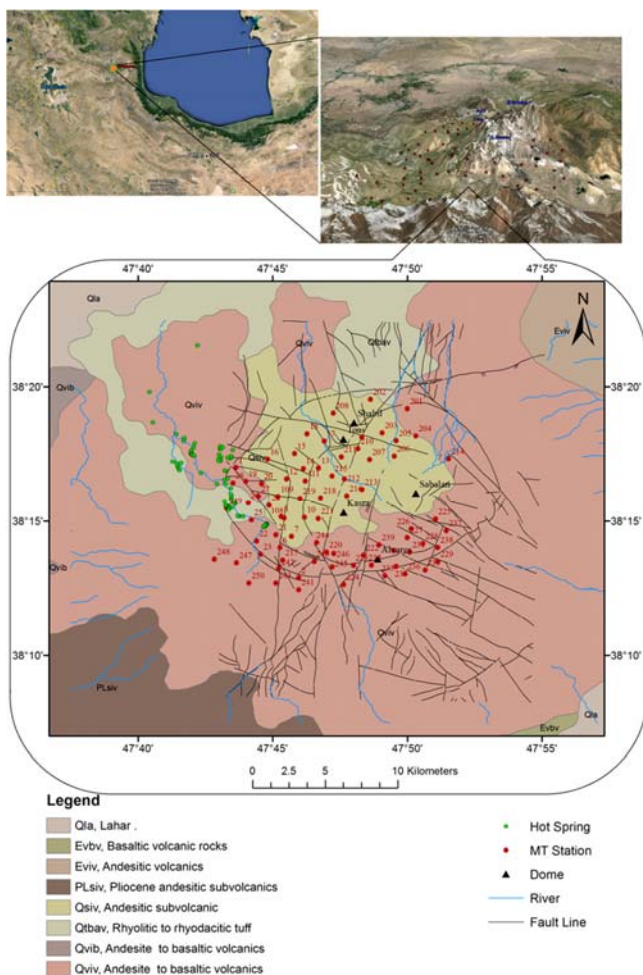
کانیارد (۱۹۵۳) و تیخونو (۱۹۵۰) نظریه‌ی روش MT را مستقل از روش‌های دیگر در دهه ۱۹۵۰ توسعه دادند. نسبت میدان الکتریکی افقی به میدان مغناطیسی قائم امیدانس (پاگیری) الکترومغناطیسی را می‌دهد. مزیت اصلی روش MT این است که اندازه‌گیری‌های هم‌زمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در دو جهت عمود برهم صورت می‌گیرد. از حس‌گرهای الکتریکی برای تعیین میدان الکتریکی که از راه اندازه‌گیری‌های اختلاف ولتاژ بین جفت الکترودهای EX و EY حاصل می‌شود، استفاده

منطقه مورد بررسی بخشی از دامنه‌های سبلان است که جزئی از فلات مرتفع آذربایجان است. فعالیت زمین‌ساختی منطقه پیش‌گفته تحت‌تأثیر حرکات صفحه‌های زمین‌ساختی در محل برخورد صفحه‌های کاسپین، اوراسیا و عربی قرار گرفته است.

تنوع سنگ‌شناسی رخنمون‌ها در منطقه مورد بررسی مربوط به تشکیل واحدهای سنگی در فازهای گوناگون آتشفشانی است. در نقشه‌های زمین‌شناسی سبلان به‌ویژه در ناحیه مورد بررسی در دره موئیل، رخنمون‌های سنگی قابل توجهی نشان داده نشده است و عمدتاً رسوبات

آبرفتی مشاهده می‌شود.

فعالیت‌های اولیه سبلان از ائوسن آغاز شده است ولی فعالیت اصلی که کوه سبلان را به‌وجود آورده، در پلیوسن شروع شده و تا بعد از آخرین یخبندان ادامه داشته است. مواد سازنده این آتشفشان از ماگمای عمقی حاصل شده است ولی تحت‌تأثیر فرایندهای پیچیده‌ای قرار داشته که هضم و آمیخته شدن دو ماگما و تبلور بخشی از مهم‌ترین آنها است. تکامل ماگمایی سبلان در طی زمان طولانی صورت گرفته است (دیدون و ژرمن، ۱۹۷۶).



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های MT و نقشه زمین‌شناسی ساده شده محدوده سبلان.

(۱۹۹۹) مورد بررسی قرار داده‌اند. به‌طور کلی گسل‌های منطقه را در دو گروه گسل‌های خطی و گسل‌های کمائی طبقه‌بندی کرده‌اند:

ساختارهای خطی که عمده ساختارهای خطی سبلان با راستای NW-SE و NE-SW دیده می‌شوند. یک گسل مهم و طویل در منطقه با راستای ذکر شده در غرب و شمال غرب کوه سبلان عامل اصلی تشکیل دره موئیل (با روند شمال غرب - جنوب شرق) است.

ساختار کمائی که این گسل کمائی اطراف آتش‌فشان سبلان کم‌ویش منطبق با دهانه آتش‌فشان و در محل تغییر ناگهانی شیب توپوگرافی قابل مشاهده است. تشکیل این گسل با فعالیت آتش‌فشانی مرتبط است و منجر به نفوذ توده آتش‌فشانی شده است. مجموعه این گسل‌ها در شکل ۱ روی نقشه ساده شده زمین‌شناسی منطقه آورده شده است.

در شکل ۳ منحنی جهت‌نمای امتداد گسل‌ها در ناحیه مورد بررسی آمده است. امتدادهای اصلی به سمت NW و NE هستند. این مجموعه گسل‌ها از نقشه‌های زمین‌شناسی و رقومی شده میدان زمین‌گرمایی سبلان حاصل شده‌اند (KML, ۱۹۹۸).

	Period	Epoch		Formation	Rock Sequence	PETROLOGICAL DESCRIPTION
		EARLY	LATE			
QUATERNARY	HOLOCENE	DIZUE		[Symbol]		رسوبات آبرفتی، مخروط لانه
		KASRA	[Symbol]		گدازه و روانه‌های گدازه ای از جنس تراکی آندزیت همراه توف، لاهار و برش‌های آذرآواری	
		TOUS	[Symbol]		گدازه و روانه‌های گدازه ای از جنس تراکی داسیت و تراکی آندزیت	
TERTIARY	PLIOCENE	VALHAZIR		[Symbol]		گدازه و گدازه‌های تراکی آندزیتی تیره شده
					توف، لاهار و برش‌های آذرآواری	

شکل ۲. ستون چین‌شناسی منطقه سبلان (سحابی، ۱۳۷۸).

بر اساس واحدهای سنگی- زمانی موجود، کارشناسان خارجی سازمان انرژی‌های نو ایران چهار واحد اصلی سنگ‌چین‌ها را تقسیم‌بندی (بوگی و همکاران، ۲۰۰۰) و تحت عنوان سازند با نام‌های محلی معرفی کرده‌اند. وضعیت و ترتیب این سازندها در شکل ۲ (سحابی، ۱۳۷۸) آمده است. شرح و معرفی کامل چهار سازند یادشده به قرار زیر است:

سازند دیزو: بخش اصلی سازند دیزو را رسوبات ناپیوسته آذرآواری با ضخامت متغیر تشکیل می‌دهد. بیشترین توسعه این سازند در دره موئیل و دره دیزو است. ضخامت این مجموعه آبرفتی در نقاط گوناگون از ۱۰ تا ۱۵۰ متر متغیر است.

سازند کسری: سازند کسری عمدتاً با رخنمون‌هایی از گدازه‌های آتش‌فشانی از جنس تراکی-آندزیت همراه است که بیشتر در قسمت‌های مرتفع سبلان قرار دارند و بعد از تشکیل دهانه به وجود آمده‌اند. پراکندگی سنگ‌های تشکیل‌دهنده سازند کسری در جنوب شرقی است و همین سازند ایجادکننده بخش‌های مرتفع کوه سبلان است.

سازند توس: بخش اعظم سازند توس را روانه‌های گدازه‌ای از جنس تراکی- داسیت، تراکی-آندزیت و ریولیت تشکیل می‌دهد که به‌صورت گنبد‌های پراکنده و لاهار رخنمون دارند. بیرون زدگی‌های سازند توس در بخش‌های شمالی قرار گرفته‌اند.

سازند ولهزیر: سازند ولهزیر از روانه‌های گدازه‌های تراکی - آندزیتی، توف و برش‌های آذرآواری تشکیل شده است. سنگ‌های این سازند با ضخامتی حداقل ۱۰۰۰ متر شامل گدازه‌های تراکی - آندزیتی، توف و آذرآواری‌ها است. از مهم‌ترین ویژگی‌های سازند ولهزیر گسترش دگرسانی گرمایی در سنگ‌های تراکی-آندزیتی است.

سامانه گسلی و خط‌واره‌ها را سحابی و همکاران

Z_{ij} نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z_{ij} = \frac{E_i}{H_j} e^{i\varphi} \rightarrow \varphi = \Psi_{E_i} - \Psi_{H_j} = \tan^{-1} \frac{Im(Z_{ij})}{Re(Z_{ij})} \quad (3)$$

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 است:

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

این تانسور اطلاعاتی درباره رسانایی، امتداد و بُعد ساختارهای رسانا فراهم می‌کند.

سری‌های زمان اندازه‌گیری شده در باندهای بسامدی متفاوت، به حوزه بسامد تبدیل و برای برآورد تانسور امپدانس در حکم تابعی از بسامد، طیف توان عرضی محاسبه می‌شود. دترمینان تانسور امپدانس موسوم به امپدانس موثر، به صورت زیر تعریف می‌شود (پدرسن و انگل، ۲۰۰۵):

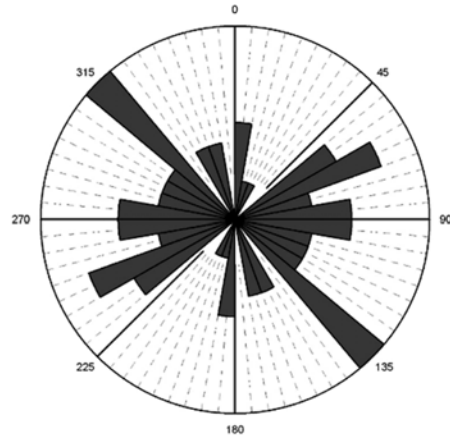
$$Z_{det} = \sqrt{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}} \quad (5)$$

با استفاده از دترمینان امپدانس مقاومت ویژه ظاهری محاسبه می‌شود؛

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

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

در یک زمین دوبعدی رسانندگی الکتریکی در امتداد یک جهت افقی (در صورت مشخص بودن؛ جهت امتداد زمین‌شناسی) ثابت است و معادلات ماکسول به دو مُد قطبش مستقل TE (میدان الکتریکی در جهت موازی با امتداد زمین‌شناسی) و TM (جریان عمود بر امتداد زمین‌شناسی) تفکیک می‌شود. روی زمین یک دستگاه مختصات فرضی در نظر گرفته می‌شود که در آن محور X



شکل ۳. منحنی جهت‌نمای امتداد گسل‌ها در ناحیه مورد بررسی.

۳ نظریه روش مگنتوتلوریک

این روش، روش ژئوفیزیکی سطحی غیرفعال است که از میدان‌های الکترومغناطیسی طبیعی زمین برای بررسی ساختار مقاومت ویژه الکتریکی زیرسطحی استفاده می‌کند (کانیارد، ۱۹۵۳). در این روش امواج الکترومغناطیسی با توجه به بسامد آنها و نیز مقاومت ویژه لایه‌ها، اطلاعاتی از اعماق زمین به دست می‌دهند. 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. تحلیل تانسور امپدانس، دیدی از درجه ناهمگونی در محیط و توزیع میدان MT در ارتباط با ناهمگونی فراهم می‌کند که همین امر اجازه تعیین ساختارهای زمین‌شناسی و محاسبه اندازه و امتداد آنها را می‌دهد (ووزوف، ۱۹۹۱):

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

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

که در آن، Z امپدانس ظاهری را در یک ایستگاه اندازه‌گیری مشخص، نشان می‌دهد.

که در آن، \mathbf{m} بردار پارامترهای مدل، \mathbf{d} بردار داده‌ها، $\mathbf{F}(\mathbf{m})$ تابع پیشرو، \mathbf{W}_m و \mathbf{W}_d به ترتیب ماتریس‌های وزنی برای پارامترهای مدل و داده‌ها، \mathbf{m}_0 یک مدل اولیه است. پس از خطی‌سازی با استفاده از بسط مرتبه اول سری تیلور، حل تکراری برای پارامترهای مدل در تکرار k ام به صورت زیر به دست می‌آید:

$$m_{k+1} = [\lambda^2 W_m + J_k^T W_d J_k]^{-1} J_k^T W_d [d - F(m_k)] + J_k (m_k - m_0) + m_0 \quad (9)$$

که در آن، λ ژاکوبی یا ماتریس حساسیت است.

۴ برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک در روش MT، ویژگی‌های تانسور مقاومت ویژه سنگ‌ها از راه اندازه‌گیری‌های زمان طبیعی مولفه‌های قائم میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی تعیین می‌شود. در این اندازه‌گیری‌ها دو مولفه میدان الکتریکی (E_x و E_y) و سه مولفه میدان مغناطیسی (H_x ، H_y و H_z) اندازه‌گیری می‌شود که میدان‌های الکتریکی با دو مجموعه از الکترودهای غیرقطبش شونده و میدان مغناطیسی با دو مجموعه سیم‌پیچ‌های القایی عمود برهم اندازه‌گیری می‌شوند. نحوه چیدمان الکترودهای الکتریکی و سیم‌پیچ‌های الکترومغناطیسی در برداشت داده‌های MT در شکل ۴ آمده است.

داده‌های مگنتوتلوریک در منطقه سیلان با استفاده از مجموعه تجهیزات MTU-5A در بازهٔ بسامد ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۰۳ هرتز تا ۳۸۰ هرتز برداشت شد. موقعیت ایستگاه‌ها و نیم‌رخ طراحی شده در شکل ۵ آمده است.

پردازش داده‌ها شامل دو مرحله کلی است. در مرحله اول داده‌های MT به حوزه بسامد منتقل می‌شوند. مرحله دوم شامل محاسبه مولفه‌های تانسور امپدانس، با استفاده از طیف‌های بسامدی است. تابع پاسخ را می‌توان برای محاسبه مدل‌ها مورد استفاده قرار داد. برای محدود کردن نوفه‌ها می‌توان از برداشت کردن داده‌ها در چند نوبت

موازی با امتداد ساختار (محور Y در امتداد نیم‌رخ) و نیم‌رخ عمود بر امتداد و محور Z رو به پایین است. در این وضعیت مولفه‌های میدان مغناطیسی و الکتریکی در مُد TE به ترتیب به صورت H_z ، H_y و E_x هستند و در این مُد جریان‌های الکتریکی موازی با امتداد ساختار زیر سطحی است. مولفه‌های میدان مغناطیسی و الکتریکی که در مُد TM توصیف می‌شوند و به ترتیب به صورت H_x ، H_z ، E_y هستند. در یک زمین یک‌بُعدی و دو بُعدی که مولفه‌های میدان در راستای امتداد و عمود بر امتداد لایه‌ها برداشت شده باشند مولفه‌های قطر اصلی تانسور امپدانس مقدار صفر دارند. به‌طور کلی مُد TE برای تشخیص ساختارهای عمیق و نارسانا و مُد TM برای تشخیص ساختارهای کم‌عمق و رسانا مفید است (آسو و همکاران، ۲۰۰۶). تشخیص مُدهای TE و TM با استفاده از نمودارهای قطبش در هر سونداژ صورت گرفت.

در این مقاله از نرم‌افزار WinGlink که نرم‌افزاری تجاری است و کاربرد بسیار خوبی در وارون‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک دارد، استفاده شده است. در این نرم‌افزار برای وارون‌سازی دو بُعدی داده‌های مگنتوتلوریک از روش رودی و مکی (۲۰۰۱) استفاده می‌شود. این روش بر پایه روش منظم‌سازی تیخونو (تیخونوف و آرسنین، ۱۹۷۷) است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Psi(m) = \Psi_d(m) + \lambda^2 \Psi_m(m) \quad (7)$$

که در آن، Ψ تابع هدف است که بایستی کمینه شود، \mathbf{m} بردار پارامترهای مدل، Ψ_d نبود برازش، Ψ_m پایدارکننده بیانگر ناهمواری مدل و λ پارامتر منظم‌سازی است که در آن مقادیر اندازه مدل و نبود برازش را در کمینه کردن تابع هدف کنترل می‌کند.

مسئله معکوس منظم شده مطابق نظریه تیخونف در رابطه (۷) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\Psi(m) = \|W_d [d - F(m)]\|^2 + \lambda^2 \|W_m [m - m_0]\|^2 \quad (8)$$

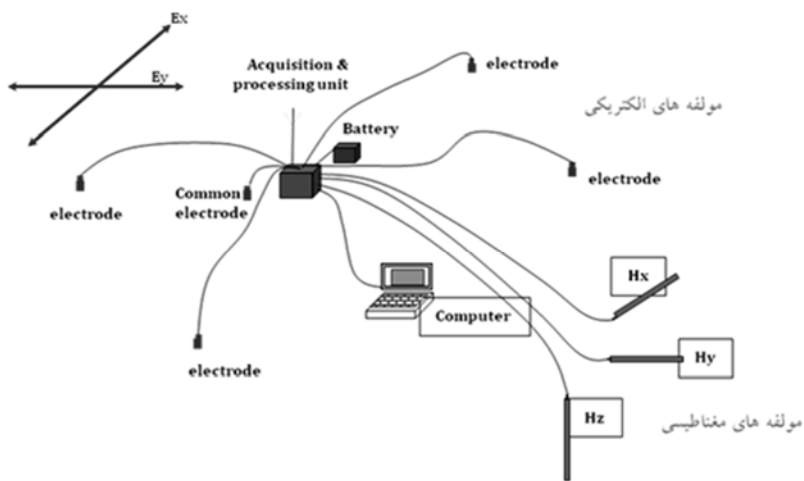
استفاده کرد. با این کار می‌توان برای محدود کردن پارامترهای مدل تابع‌های پاسخ از آنها استفاده کرد. این عملیات شامل بررسی روی مقادیر اولیه به‌دست آمده و انحراف نمونه‌ها و نسبت سیگنال به نوفه است (ووزوف، ۱۹۹۱).

در لایه‌های همگن یا افقی و به دور از نوفه مقاومت ویژه ظاهری به‌راحتی با استفاده از اندازه‌گیری دامنه‌های E_x و E_y در یک زمان و بسامد و مربع نسبت که در مقادیر به‌دست آمده نیز ضرب شده است، به‌دست می‌آید. این عملیات را می‌توان برای همه بخش‌های بسامد، به‌منظور تعیین مقادیر منحنی عملی ساخت (پدرسن و انگل، ۲۰۰۵). نیم‌رخ MM با طول تقریبی ۱۲ کیلومتر به‌صورت شرقی-غربی و در قسمت جنوبی آتش‌فشان سبلان در نظر گرفته شد و مدل‌سازی روی ۱۳ ایستگاه در امتداد آن صورت گرفت. برای نمونه در شکل ۶ داده‌های چهار ایستگاه ۲۲۰، ۲۳۸، ۲۴۴ و ۲۴۸ به‌صورت مقاومت ویژه و فاز برحسب بسامد آورده شده است. باید توجه داشت که این داده‌ها بعد از ویرایش و حذف برخی از عنصرهای تانسور امپدانس در برخی ایستگاه‌ها به علت وجود نوفه‌های محیطی که در اثر شرایط بد آب‌وهوایی در هنگام برداشت داده‌های MT در منطقه وجود داشته‌اند، در وارون‌سازی

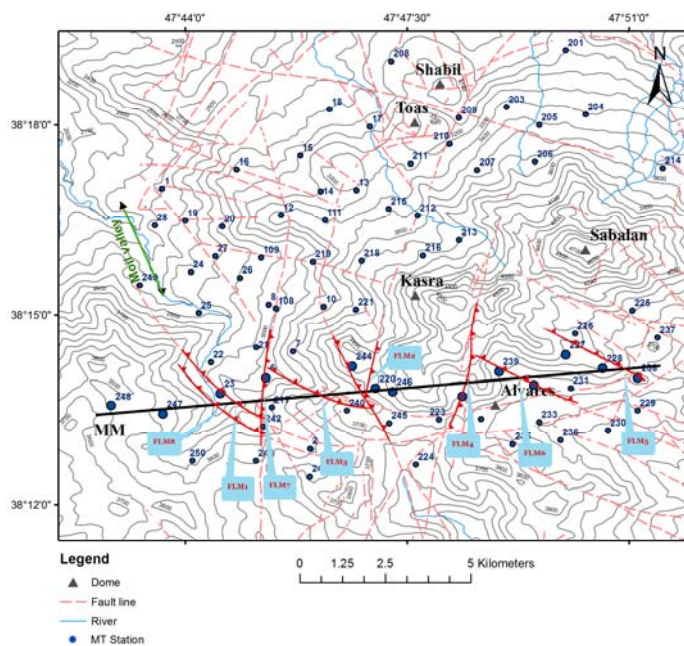
مورد استفاده قرار گرفته است.

به‌منظور تحلیل ابعادی داده‌های MT مقادیر چاوله (skew) (که ضرورت استفاده از آن را سویفت (۱۹۶۷) برای تعیین بعد از تانسور امپدانس ثابت کرده است) برای همه جایگاه‌ها و بسامدها صورت گرفت. حداکثر خطای ۵٪ روی امپدانس لحاظ شد که برای ۱۳ ایستگاه در شکل ۷ نشان داده شده است. این کمیت امکان اندازه‌گیری نامتقارنی محیط را فراهم می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که برای بیشتر بسامدها این مقدار زیر ۰/۲ است. این نشان‌دهنده آن است که ساختار عمدتاً یک‌بُعدی و دو‌بُعدی است.

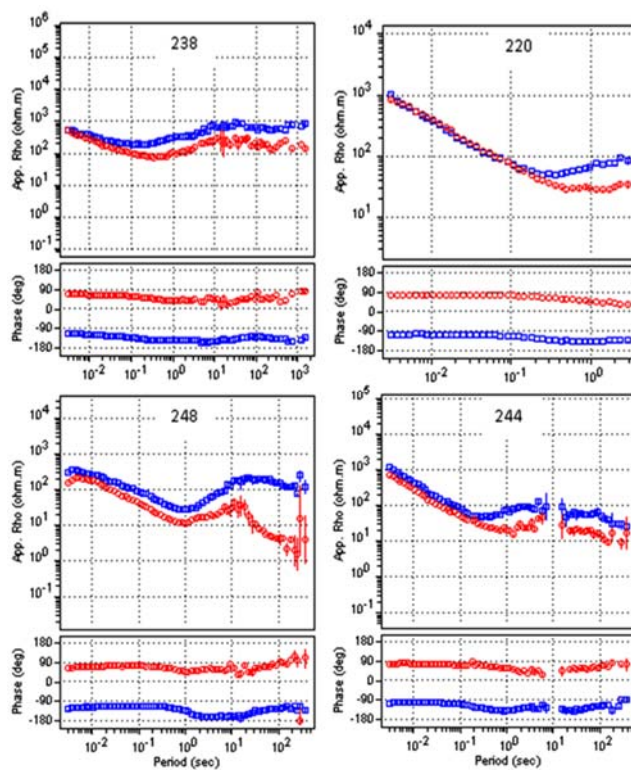
با مقایسه شبه‌نیم‌رخ مقاومت ویژه و فاز اندازه‌گیری شده در محل ایستگاه (داده‌های صحرائی) با شبه‌نیم‌رخ مقاومت ویژه و فاز محاسبه شده (پاسخ مدل) در شکل ۸ می‌توان صحت وارون‌سازی را بررسی کرد. به طوری که تفاوت بسیار این نیم‌رخ‌ها با یکدیگر می‌تواند نشانه صحیح نبودن وارون‌سازی باشد. شبه‌نیم‌رخ‌های حاصل از برگردان داده‌های MT در طول نیم‌رخ MM برای هر یک از مُدهای TE و TM به‌صورت جداگانه آورده شده است، این نیم‌رخ‌ها تطابق خوب داده‌های صحرائی و پاسخ مدل را روشن می‌سازد و نشان‌دهنده صحت وارون‌سازی است.



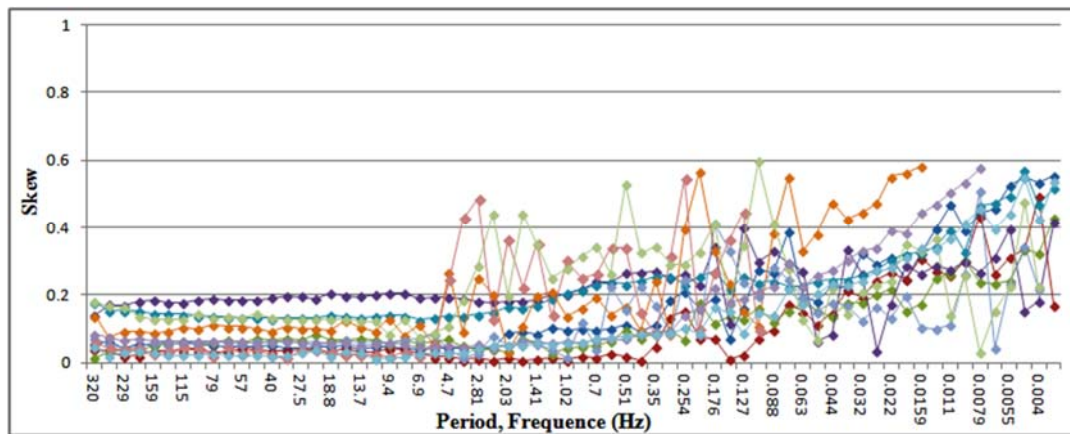
شکل ۴. نحوه چیدمان الکترودها و سیم پیچ‌ها در برداشت داده‌های MT.



شکل ۵. نقشه توپوگرافی منطقه و موقعیت ایستگاه‌ها، گسل‌ها و نیم‌رخ MM.



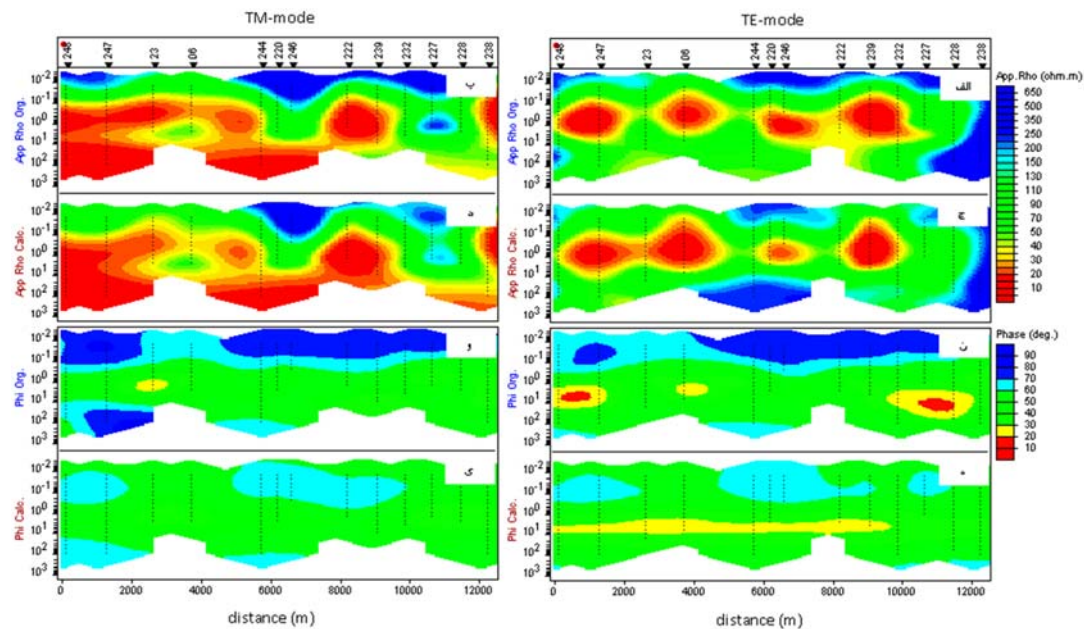
شکل ۶. عنصرهای تانسور امپدانس Zyx و Zxy برای ایستگاه‌های ۲۲۰، ۲۳۸، ۲۴۴ و ۲۴۸ (در هر شکل در قسمت مقاومت ویژه و فاز: مربع آبی‌نگ: YX دایره سرخ‌نگ: XY).



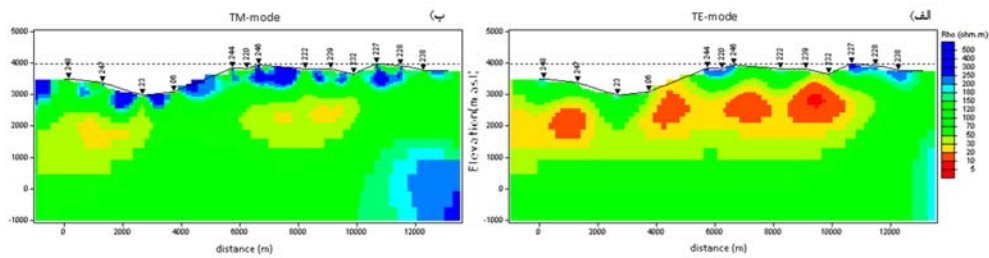
شکل ۷. مقادیر چاولگی برای ۱۳ ایستگاه MT.

ساختارهای گوناگون مورد بررسی قرار داد. در این مقاله با استفاده از ترکیب هر دو مُد TE و TM، نیم‌رُخ مقاومت ویژه نهایی مدل‌سازی شد و مورد بررسی و تفسیر قرار گرفت.

در شکل ۹ نیم‌رُخ‌های مقاومت ویژه حاصل از برگردان دو بُعدی داده‌های MT برای هر یک از دو مُد TE و TM به صورت جداگانه آمده است. همان‌طور که اشاره شد هر یک از این مُدها را می‌توان برای بررسی



شکل ۸. شبه‌نیم‌رُخ فاز و مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی داده‌های MT روی نیم‌رُخ MM، برای مُدهای TE و TM (الف) مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده برای مُد TE، (ب) مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده برای مُد TM، (ج) مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شده برای مُد TE، (د) مقاومت ویژه ظاهری محاسبه شده برای مُد TM، (ه) فاز اندازه‌گیری شده برای مُد TE، (و) فاز اندازه‌گیری شده برای مُد TM، (ه) فاز محاسبه شده برای مُد TE و (ی) فاز محاسبه شده برای مُد TM.



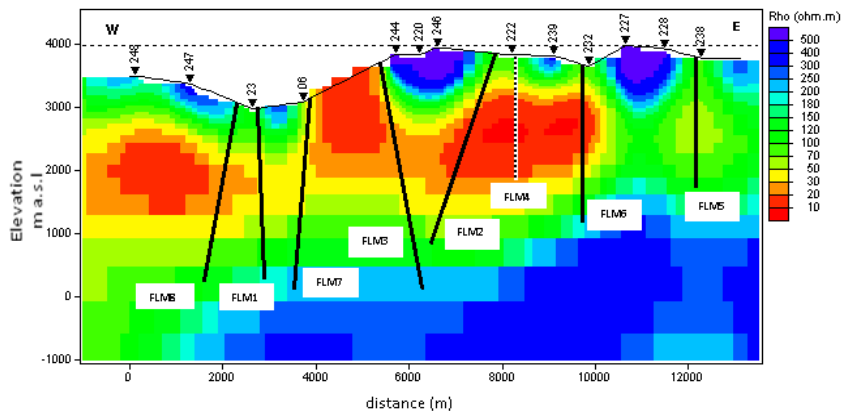
شکل ۹. نیم‌رخ مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی داده‌های MT روی نیم‌رخ MM برای (الف) مد TE و (ب) مد TM.

ایستگاه ۲۳۲ نیز از طرفی با نفوذ آب‌های سطحی به عمق با کنتورهای مقاومت ویژه کم نمایان است و هم باعث جابه‌جایی و انتقال بی‌هنجاری با مقاومت ویژه کم، اثر خود را روی نیم‌رخ گذاشته است. گسل‌های دیگر با جابه‌جایی بی‌هنجاری‌های مقاومت ویژه و در برخی نواحی انتقال بی‌هنجاری‌ها با مقاومت ویژه کم از عمق ۳۰۰۰ متر از سطح دریا به سطح نمایان شده‌اند (بین ایستگاه‌های ۶ و ۲۴۴).

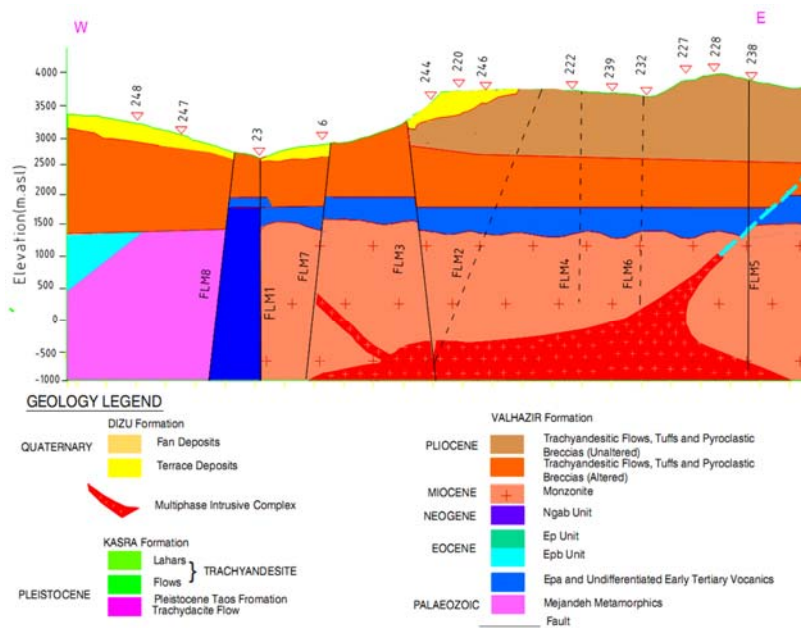
شکل ۱۱ نیم‌رخ زمین‌شناسی از منطقه در محل نیم‌رخ MM را نشان می‌دهد. این نیم‌رخ با تلفیق داده‌های زمین‌شناسی منطقه و نیم‌رخ مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی داده‌های MT به دست آمده است. جریان زمین‌گرایی را که در شکل ۱۰ با مقاومت ویژه کمتر از ۲۰ اهم‌متر از ارتفاع نزدیک به سطح زمین تا ارتفاع حدود ۱۰۰۰ متر از سطح دریا مشاهده می‌شود، با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه می‌توان جریان تراکی-آندزیتی دگرگون یافته‌ای دانست که از قسمت جنوبی کوه سیلان به قسمت‌های غربی و شمال غربی منطقه سیلان کشیدگی دارد. از طرفی در نیم‌رخ مقاومت ویژه، در اعماق بیشتر توده نفوذی با مقاومت ویژه زیاد دیده می‌شود. همچنین این توده مقاوم ممکن است توده‌ای نفوذی باشد که با فعالیت آتش‌فشانی در این ناحیه از قبیل گنبد کسری منطبق است (تکلو و همکاران، ۱۳۹۲). این توده در نیم‌رخ زمین‌شناسی به صورت توده نفوذی نشان داده شده است. سازندهای زمین‌شناسی منطقه نیز به خوبی در این نیم‌رخ مشخص شده‌اند.

موقعیت گسل‌های اصلی FLM1، FLM2، FLM3، FLM4، FLM5، FLM6، FLM7، FLM8 و FLM8 که نیم‌رخ MM را قطع می‌کنند روی نقشه توپوگرافی منطقه (شکل ۵) نشان داده شده است.

شکل ۱۰ نتایج حاصل از برگردان دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک به صورت ترکیب مد‌های TE و TM را در طول نیم‌رخ MM تا عمق ۴/۵ کیلومتری نشان می‌دهد. ویژگی آشکار در این نیم‌رخ تقریباً بی‌هنجاری رسنای ادامه‌داری با مقاومت ویژه کمتر از ۳۰ اهم‌متر است که بین ارتفاع‌های ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر از سطح دریا دیده می‌شود، بجز در قسمت شرق نیم‌رخ که یک بلوک با مقاومت ویژه رسنا نشان‌دهنده جریان زمین‌گرایی است که از جنوب غربی منطقه سیلان به دره موئیل در غرب سیلان کشیدگی دارد (تکلو و همکاران، ۱۳۹۲). با توجه با ساختار گسل‌های منطقه و همچنین بررسی گسل‌های عبوری از روی نیم‌رخ MM و بررسی نیم‌رخ عرضی حاصل از وارون‌سازی دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک مطابقت بسیار خوب گسل‌های عبوری روی نیم‌رخ با بی‌هنجاری‌ها و شکستگی‌های ایجاد شده روی نیم‌رخ حاصل شد. روی این نیم‌رخ، گسل‌های FLM1 و FLM5 به ترتیب در نزدیکی ایستگاه‌های ۲۳۸ و ۲۳ با نفوذ آب‌های سطحی به عمق در امتداد آن از راه شکستگی‌های این گسل به صورت بی‌هنجاری با مقاومت ویژه بین ۳۰ تا ۱۰۰ اهم‌متر اثر خود را نشان داده‌اند. می‌توان گفت گسل FLM6 در نزدیکی



شکل ۱۰. نیم‌رخ نهایی مقاومت ویژه الکتریکی (TE+TM) در امتداد نیم‌رخ MM.



شکل ۱۱. نیم‌رخ زمین‌شناسی منطبق بر نیم‌رخ مگنتوتلوریک MM.

۵ نتیجه‌گیری

گسل‌های جنوب آتش‌فشان سیلان را آشکار کرده است. از مدل‌سازی در امتداد یک نیم‌رخ مگنتوتلوریک شامل ۱۳ ایستگاه MT نیم‌رخ مقاومت ویژه حاصل از وارون‌سازی این داده‌ها تا عمق تقریبی ۴/۵ کیلومتر حاصل شد. سامانه گسل‌های منطقه سیلان به‌طور کلی به دو صورت کمّانی و خطی است. این گسل‌ها در ۸ منطقه نیم‌رخ MT را قطع می‌کنند. بررسی و تفسیر نیم‌رخ مقاومت ویژه به‌خوبی نشان

روش MT ابزار بسیار مفیدی در بررسی ساختارهای زیرسطحی و آشکارسازی این ساختارها با استفاده از مدل‌سازی مقاومت ویژه تا اعماق زیاد است. گسل‌ها از جمله این ساختارها هستند و می‌توانند تا اعماق زیادی در پوسته زمین موجب جابه‌جا شدن لایه‌ها شوند. در این پژوهش معکوس‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک به‌خوبی

- Geothermal Congress, Japan.
- Cagniard, L., 1953, Basic theory of the magnetotelluric method in geophysical 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.
- 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.
- Oskooi, B., Pedersen, L. B. and Koyig, H. A., 2013, Magnetotelluric signature for the Zagros collision, *Geophysical Journal International*, **196**(3), 1299-1310.
- Pedersen, L. B. and Engels, M., 2005, Routine 2D inversion of magnetotelluric data using the determinant of the impedance tensor, *Geophysics*, **70**, G33-G41.
- Karcioğlu, G., Tank, S. B., Gürer, A., Çiftçi, E. T., Kaya, T. and Tuncer, M. k., 2013, Upper crustal electrical resistivity structures in the vicinity of the Çatalca fault, Istanbul, Turkey by magnetotelluric data, *Acta Geodaetica Et Geophysica Hungarica*, **42**(4), 383-397.
- Rodi, W. L. and Mackie, R. L., 2001, Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion, *Geophysics*, **66**, 174-187.
- Sahabi, F., Khoshlessan, M. R. and Barnett, P. R., 1999, Geothermal exploration of mount Sabalan, NW. Iran. *Geothermal Resource Council Transactions*, **23**, 479-484.
- Simpson, F. and Bahr, K., 2005, *Practical magnetotellurics*, Cambridge University Press.
- 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. and Arsenin, V. Y., 1977, Solution of ill-posed problems, V. H. Winston and Sons.
- Tikhonov, A. N., 1950, On determining electrical characteristics of the deep layers of the Earth's crust, *Doklady*, **73**, 281-285.
- Vozoff, k. and Nabighian., M. N., 1991, M.C.(ed.), *Electromagnetic methods in applied geophysics, application, Part B*. Tusla, Society of Exploration Geophysics, **2**, 641-711.
- داد که برخی از گسل‌های این ناحیه (FLM1, FLM5 و FLM6) با حضور خطی زون مقاومت ویژه در امتداد خط گسل که می‌تواند محل ورود آب‌های سطحی در امتداد شکستگی‌های گسل باشد، به‌خوبی خود را نشان داده‌اند. گسل‌های دیگر در این نیم‌رخ با جابه‌جایی‌های ناگهانی لایه‌ها و بی‌هنجاری‌های مقاومت ویژه منطبق‌اند. این ویژگی‌ها و ساختارها در نیم‌رخ زمین‌شناسی منطبق بر نیم‌رخ MT نیز به نحوی کاملاً قابل مقایسه به نمایش درآمده است.
- ### مراجع
- حافظی، م. ک.، رحیمی، ع. و ایوبی، م.، ۱۳۸۳، مدل‌سازی دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک و کاربرد آن در ذخایر زمین‌گرمایی منطق مشگین شهر، م. علوم زمین، **۱۲**(۵۴)، ۲۰-۲۷.
- سحابی، ف.، ۱۳۷۸، بررسی آتشفشان سیلان با توجه خاص بر روند تشکیل منابع زمین‌گرمایی مشگین شهر -استان اردبیل، مجله علوم زمین، پژوهشکده علوم زمین -سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، **۳۱-۳۲**، ۱-۲.
- تکلو، م.، اسکوئی، ب. و پرخیال، س.، ۱۳۹۲، بررسی مرز لایه‌ها و توده‌های زمین‌گرمایی منطقه سیلان با استفاده از برگردان دوبعدی داده‌های مگنتوتلوریک، م. فیزیک زمین و فضا، **۳۹**(۴)، ۹۷-۱۰۸.
- 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.
- Becken, M., Ritter, O., Bedrosian, Pa. and Weckman, U., 2011, Correlation between deep fluids, tremor And creep along the central San Andreas fault, *Nature*, **480**, 87-90.
- Bogie, I., Cartwright, A. J., Khosrawi, K., Talebi, b. and Talebi, F., 2000, The Meshkin Shar geothermal prospect, Iran. *Proceedings, World*