

تشخیص گسل نهان صحنه در منطقه کرکسار با استفاده از روش مغناطیسی و VLF

محسن اویسی مؤخر^{۱*}، حسین شاه‌نظری اول^۲ و وحید قاسمی^۳

^۱ استادیار مرکز مطالعات ژئوفیزیک، دانشگاه رازی کرمانشاه، ایران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مرکز مطالعات ژئوفیزیک، دانشگاه رازی کرمانشاه، ایران

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مرکز مطالعات ژئوفیزیک، دانشگاه رازی کرمانشاه، ایران

(دریافت: ۸۵۶/۱۲، پذیرش نهایی: ۸۶/۱۰/۲۵)

چکیده

کاوش‌های مغناطیسی در شرق روستای کرکسار واقع در جاده بیستون به سنقر برای تشخیص گسل صحنه صورت گرفت. در ۲۰۰ ایستگاه، چهار نیم‌رخ میدان مغناطیسی زمین توسط دستگاه مغناطیس سنج پروتون GSM19 اندازه‌گیری شده است. علاوه بر این، داده‌های الکترومغناطیسی با بسامد بسیار کم (VLF) همراه با داده‌های مغناطیسی برداشت شده است. با استفاده از تفسیر داده‌های مغناطیسی بسامد کم موقعیت و پارامترهای گسل نهان صحنه در منطقه مشخص شد. با استفاده از داده‌های مغناطیسی، ژرفای کمر بالایی گسل ۳۷ متر و شیب گسل ۷۴ درجه به‌دست آمد. جهت شیب در طول خط گسله متغیر است و از شمال غرب در شرق به شمال در مرکز و غرب تغییر می‌کند. بسامد مورد استفاده در VLF، ۱۸/۶ کیلوهرتز است. شبه مقاطع مؤلفه حقیقی VLF مسیر شکستگی را مشخص کرده که با نقشه‌های تصویری مغناطیسی کاملاً مطابقت دارد.

واژه‌های کلیدی: گسل صحنه، روش مغناطیسی، روش بسامد کم

Identification of the Sahneh buried fault using magnetic and VLF Methods

Oveysy Moakhar, M^{1.}, Shahnazari Aval, H^{2.} and Ghasemi, V^{3.}

¹Assistant Professor, Geophysics research Center, Razi Unuversity, Kermanshah, Iran

²M.Sc Geophysics student, Geophysics research Center, Razi Unuversity, Kermanshah, Iran

³M.Sc Geophysics student, Geophysics research Center, Razi Unuversity, Kermanshah, Iran

(Received: 3 Sep 2006, Accepted: 15 Jan 2008)

Abstract

Introduction: In this research, magnetic and electromagnetic methods were used to study the fractured structures. Our study was done on the hidden part of the Sahneh fault near Kargasar village in Kermanshah province near the city of Sahneh. The kargasar region is situated at the north of the Zagros orogenic belt and in the Sanandaj-Sirjan zone. A geological map of the region and the site of investigation are shown in figure 1. A study of faults with magnetic and electromagnetic methods depends on magnetic susceptibility and electrical conductivity respectively of their foot wall and hanging wall. The electromagnetic method used in this study is the VLF electromagnetic method.

Sahneh fault characteristics and its seismicity: The convergence of two continents can be accommodated by crustal thickening and by lateral transport of the crust out of the path of the converging continents. Reversed and strike slip faults are the results of the above converging process. Two major faults make the boundary of the north east Zagros which are the main reverse Zagros faults and the main recent Zagros fault (Mirzaei and Gheitanchi, 2002). The Sahneh fault is the middle part of the present main recent fault

(figure 2). Investigations have not shown any direct relation between seismicity of the Sahneh region and the known faults in the region. However, many powerful earthquakes have occurred with a magnitude of 5 to 6.5 on the Richter scale in the Sahneh region which indicates high seismic activity in this region.

Magnetic method in determination of fault parameters, Midpoint method: This method was first introduced by Murthy (Murthy, 1985) which uses total magnetic field and its upward continuation. In total magnetic field and its upward continuation, maximum and minimum points as well as their midpoints are determined. The midpoints are determined as:

$$x_0 = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} \quad , \quad x_h = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} \quad (1)$$

Distance between maximum and minimum is:

$$X_h = x_{\max} - x_{\min} \quad \text{and} \quad X_0 = x_{\max} - x_{\min} \quad (2)$$

Magnetic anomaly of a fault (Figure 3) is given by:

$$F(x) = 2J_f \text{Sin}\theta \left[\text{Cos}Q_f(\theta_B - \theta_A) + \text{Sin}Q_f \text{Ln} \frac{r_B}{r_A} \right]$$

where r_A , r_B , θ_A and θ_B are shown in figure 3.

If φ , i and α are angles of magnetization, inclination and layer strike respectively, then we have:

$$Q_f = I + \varphi - \left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \varphi + \theta - \text{Tan}^{-1}(\text{Sin}\alpha \text{Cot}i) = \theta + \varphi_f$$

$$\varphi_f = \varphi - \text{Tan}^{-1}(\text{Sin}\alpha \text{Cot}gi)$$

By differentiating between the total magnetic field and considering $a = T^2(\text{Cotg}^2\theta + 2\text{Cotg}\theta \text{Cot}\varphi_f - 1)$, we find Z , θ and T as depth, dip and thickness of the fault respectively.

Electromagnetic method: Skin depth of an electromagnetic wave in the ground depends on ground conductivity and frequency of applied wave which is given by (Nabighian, 1988):

$$s_1 \cong 500 \left(\frac{\rho_1}{f}\right)^{\frac{1}{2}}$$

in which ρ_1 and f are specific resistivity and frequency respectively.

Data acquisition: Magnetic and VLF data were acquired by Overhauser GSM-19 magnetometer which measures total magnetic field, its vertical gradient of a point as well as real and imaginary components of the VLF field. GPS of the system gives the points geographical coordinates. There are 45 reading points on four profiles with 200m distance interval and 1.5 km length (N-S direction). The selected VLF frequency is 18.6 KHZ.

Data interpretation, Magnetic: Figure 4 is an image map of the total magnetic field of the study area. The dashed line shows the fault line detected by the magnetic method. The vertical gradient of the total magnetic field also shows the location of the fault line (figure 5).

Midpoint method: We consider the profile 4 of the magnetic data (figure 6). For this profile, 50m upward continuation is proper. Using the midpoint method (relations 1 and 2) the fault parameters are:

$$Z=112\text{m}, T=74\text{m} \text{ and } \theta=74.71^\circ$$

VLF method: The profile 1 VLF imaginary component is given in figure 7. In this figure at 600m, a breakage is recognized which is a trace of the proposed fault. A map view of VLF data of all profiles indicates the location of the fault which is in accordance with magnetic data (figure 8).

Key words: Sahneh fault, Magnetic method, VLF method

۱ مقدمه

از سنگ‌های رسوبی از جنس آهک، سنگ جوش و مارل‌ها است. نهشته‌های کنگلومرایی این منطقه سست و گاهی دارای شیبی کمتر از بیست درجه است. در این واحد افقی‌های مارنی کم ضخامت به صورت کاملاً محلی نیز قابل مشاهده است. سنگ‌های آهکی این منطقه دارای رنگ هوازده خاکستری و رنگ تازه سفید و خاکستری روشن است. سنگ‌ها از لحاظ طبقه‌بندی متوسط لایه و ضخیم لایه‌اند. این سنگ‌های آهکی به شدت بودارند و سطح تماس این واحد با واحدهای زیرین خود گسله است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، گزارش زمین‌شناسی میانراهان، ۱۳۷۰).

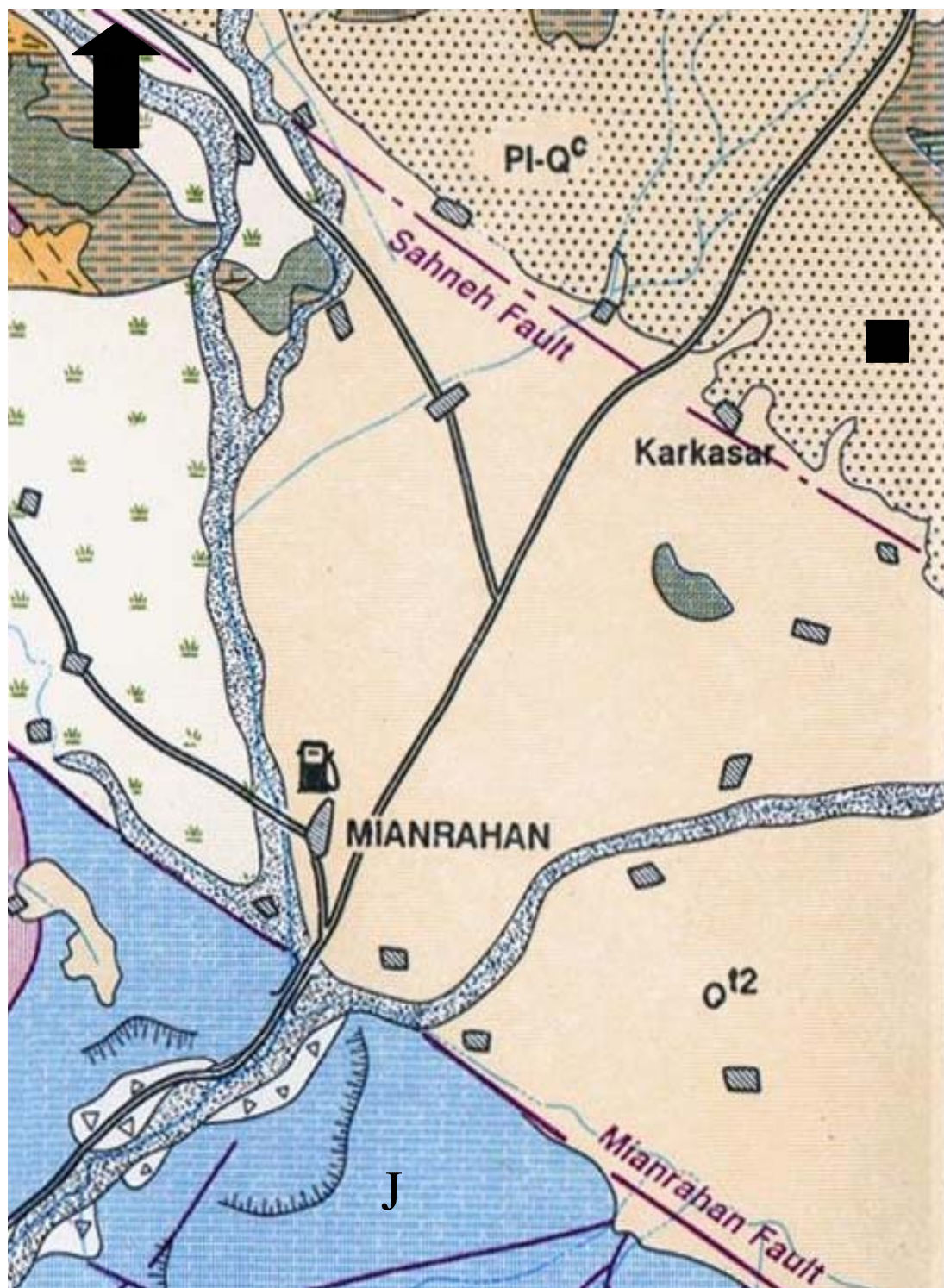
بررسی گسل‌ها به روش مغناطیسی و الکترومغناطیسی به ترتیب بستگی به تباین پذیرفتاری مغناطیسی و رسانایی الکتریکی کمر بالا (Hanging wall) و کمر پایین (Foot wall) گسله دارد.

شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌های مناطق متفاوت جهان با بررسی ژئوفیزیکی به روش مغناطیس‌سنجی صورت گرفته است که در اینجا به‌طور خلاصه به تعدادی از آنها اشاره می‌شود. این بررسی‌ها هم در مناطق رسوبی و هم در مناطق آذرین صورت گرفته است. قریب (۱۹۸۵) در مطالعات ژئوفیزیکی در حوزه قرادیک (Gharadig) مصر که دارای پوشش رسوبی ضخیم است پتانسیل هیدروکربوری زیادی دارد، از روش مغناطیس‌سنجی استفاده کرده و گسترش شکستگی مهم منطقه را شرقی- غربی، غرب- شمال غرب و شرق- شمال شرق به‌دست آورده است. راس و مور (۱۹۸۵) برای

در این پژوهش از روش‌های مغناطیسی و الکترومغناطیسی برای بررسی ساختارهای شکسته استفاده شده است. بررسی‌های ما روی گسل صحنه در منطقه کرکسار صورت گرفت که در اکثر طول مسیر خود به صورت نهان قرار دارد. این گسل در روستای کرکسار واقع در ۳۰ کیلومتری جاده بیستون به سنقر کاملاً در زیر آبرفت نهان شده است و به صورت یک بی‌هنجاری تقریباً عمیق در آمده است. محل کار ژئوفیزیکی محدوده‌ای به مساحت تقریباً ۴۰ هکتار در نزدیکی روستا و در شرق آن است.

منطقه کرکسار از لحاظ موقعیت زمین‌شناسی در بخش شمالی کوهزاد محدوده پهنه کوهزایی زاگرس و در محدوده پهنه سندج- سیرجان واقع شده است. برپایه نظریات موجود در اثر برخورد دو صفحه ایران و عربستان یک منطقه تکنونیزه بین این دو صفحه به‌وجود آمده که این مسئله الهام‌بخش کلیه برداشت‌ها و تحقیقات زمین‌شناسی در این محدوده است. منطقه پیش‌گفته در برگرنده حاشیه دو صفحه قاره‌ای است که با هم تصادم کرده‌اند، لذا این گستره از صفحات بی‌شمار رانده‌ای تشکیل یافته است. اکثر رخنمون‌های موجود در این منطقه حالت رسوبی اولیه خود را حفظ کرده‌اند ولیکن برخی از رخنمون‌ها تحت اثر عملکرد گسل‌های رانندگی، دگرگونی ضعیفی را نشان می‌دهند. در شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه برداشت و مکان نیمرخ‌های برداشت شده مشخص شده است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، گزارش زمین‌شناسی میانراهان، ۱۳۷۰).

از نظر نوع سنگ‌شناسی، منطقه برداشت پوشیده شده



- PL-Q^c: مارن سست، سنگ چوش و ماسه سنگ
- Q²: رسوب‌های عهد حاضر سخت نشده نواحی پست
- J: سنگ آهک قهوه‌ای تا خاکستری

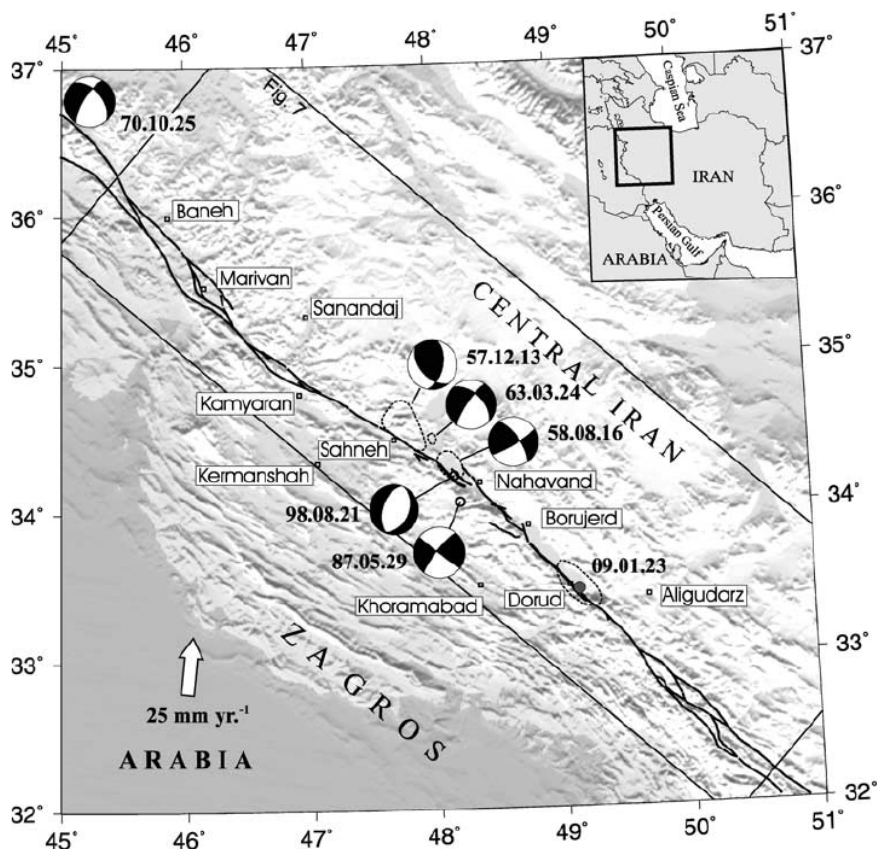
شکل ۱. زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی. محل اجرای عملیات ژئوفیزیکی با مربع توپر مشخص شده است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، گزارش زمین‌شناسی میانراهان، ۱۳۷۰). مقیاس نقشه ۱/۵۰۰۰۰ است.

۲ ویژگی‌های گسل صحنه و لرزه‌خیزی منطقه گسل صحنه

همگرایی دو صفحه قاره‌ای باعث افزایش ضخامت و سبب حرکت جانبی آنها در مسیری خارج از جهت همگرایی‌شان می‌شود. حاصل این همگرایی ایجاد گسل‌های معکوس و امتداد لغز می‌شود. کمربند رورانده - چین‌خورده زاگرس به‌مثابه قسمتی از کمربند رورانده - چین‌خورده هیمالیا-آلب، یکی از مناطق جوان و فعال برخورد قاره‌ای زمین است. وضعیت زمین‌ساخت مرز شمال شرق زاگرس را دو گسله مهم می‌سازد که عبارت‌اند از: گسل اصلی معکوس زاگرس و گسل جوان اصلی زاگرس (میرزایی و قیطانچی، ۲۰۰۲) (شکل ۲).

یافتن منابع زمین‌گرمایی (hydrothermal) در ایالت یوتای امریکا به جستجوی ساختارهای پایین افتاده (Graben) پرداخته که یکی از روش‌های یافت این ساختارها روش مغناطیسی است. روش دی کانولوشن اوپلر در مغناطیس را رید و همکاران، (۱۹۹۰) به‌منظور شناسایی گسل‌های زیر سطح دریا مورد استفاده قرار داده‌اند. برای بررسی ساختار زیرسطحی محل احداث یک سد، ادبایو و همکاران، (۱۹۹۶) با استفاده از روش مغناطیس‌هوایی گسل احتمالی و جهت آن را به‌دست آوردند.

گسل صحنه یکی از گسل‌های فعال و بسیار مهم ایران است که در استان کرمانشاه قرار دارد. برای شناسایی گسل این منطقه از دو روش ژئوفیزیکی مغناطیسی و بسامد کم (VLF) استفاده شد.



شکل ۲. نقشه قسمتی از گسل جوان اصلی زاگرس (Main Recent Fault). محل وقوع زلزله‌ها با نقطه‌چین و زمان وقوع به تاریخ میلادی در کنار آن آمده است (طالبیان و جکسون، ۲۰۰۲).

۳ روش مغناطیسی در تعیین پارامترهای گسل

۱-۳ روش نقطه میانی

در این روش که مورتی در ۱۹۸۵ (مورتی، ۱۹۸۵) آن را بیان کرد، منحنی میدان و ادامه فراسوی میدان بررسی می‌شود. در منحنی‌های میدان و ادامه فراسوی میدان نقاط ماکزیموم و مینیموم مشخص شده و در هر منحنی نقاط میانی و فاصله ماکزیموم و مینیموم تعیین می‌شود. نقاط میانی از دو منحنی با روابط زیر به دست می‌آید:

$$X_0 = \frac{X_{\max} + X_{\min}}{2} \quad \text{و} \quad X_h = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2} \quad (1)$$

فاصله نقطه ماکزیموم تا مینیموم را نیز در هر دو منحنی می‌توانیم بیابیم:

$$X_0 = X_{\max} - X_{\min} \quad \text{و} \quad X_h = X_{\max} - X_{\min} \quad (2)$$

از طرفی مورتی بی‌هنجاری مغناطیسی روی یک گسل با مغناطش دلخواه (شکل ۳) را به صورت زیر در نظر گرفت (مورتی، ۱۹۸۵).

$$F(x) = 2J_f \text{Sin} \theta \left[\text{Cos} Q_f (\theta_B - \theta_A) + \text{Sin} Q_f \text{Ln} \frac{I_B}{I_A} \right] \quad (3)$$

که I_A و I_B فواصل دو لبه گسل، J_f مغناطش و θ_A و θ_B زوایای بردارهای مکان با افق هستند.

اگر φ زاویه بردار مغناطش، i زاویه میل مغناطیسی و α زاویه خفت (امتداد) لایه باشد آنگاه مطابق تعریف داریم:

$$Q_f = i + \varphi - \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) = \varphi + \theta - \text{Tan}^{-1}$$

$$(\text{Sin} \alpha \text{Coti}) = \theta + \varphi_f$$

$$\varphi_f = \varphi - \text{Tan}^{-1} (\text{Sin} \alpha \text{Cot} g_i)$$

با مشتق‌گیری از تابع میدان $F(x)$ و تعریف $a = T^2 (\text{Cot} g^2 \theta + 2 \text{Cot} g \theta \text{Cot} \varphi_f - 1)$ و ادامه فراسوی میدان، نقاط میانی، فواصل ماکزیموم تا مینیموم

گسل اصلی معکوس زاگرس دارای جهت شمال غربی به جنوب شرقی است که از قسمت غرب ایران شروع و تا شمال بندر عباس ادامه دارد. در حالی که گسل جوان اصلی یک گسل راست امتداد لغز جواتر از گسل اصلی معکوس زاگرس و موازی با آن است. گسل صحنه قسمت میانی گسل اصلی جوان است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که به طور قطع نمی‌توان به ارتباط لرزه‌خیزی منطقه صحنه با گسل مشخصی در منطقه اشاره کرد (میرزایی و قیطانچی، ۲۰۰۲).

جهت گسل صحنه نسبت به سایر قسمت‌های گسل جوان اصلی زاگرس متفاوت است و راستای آن ۳۱۵ درجه شمال شرقی است. از نظر فعالیت لرزه‌ای، اکثر زلزله‌ها در سرتاسر زاگرس پراکنده‌اند و اکثر زلزله‌ها با بزرگی زیاد از قسمت‌های گوناگون گسل جوان اصلی نشات می‌گیرند (میرزایی و قیطانچی، ۲۰۰۲). گسل‌های صحنه و نهاوند با توجه به اسناد تاریخی و اندازه‌گیری‌های دستگاهی، موجب زلزله‌های تخریبی زیادی شده‌اند. در ۲۷ آوریل ۱۰۰۸ زلزله مخربی باعث تخریب روستای دینه‌ور شده است. بزرگی این زلزله هفت در مقیاس امواج سطحی بوده است. کانون این زلزله در محل برخورد دو گسل معکوس اصلی زاگرس و گسل اصلی جوان زاگرس است. در ۱۹۵۷، ۱۹۵۸، ۱۹۶۳ و ۲۰۰۲ میلادی زلزله‌هایی با بزرگی پنج تا شش و نیم در مقیاس امواج سطحی در منطقه گسل صحنه اتفاق افتاده است که بیانگر لرزه‌خیزی شدید منطقه است.

با توجه به اهمیت گسل صحنه، اقدام به مطالعه ژئوفیزیکی این گسل در منطقه روستای کرکسار کردیم. در این بررسی از دو روش مغناطیس‌سنجی و الکترومغناطیسی بسامد کم (VLF) استفاده شده است.

تقریبی بی‌هنجاری زیاد بالاتر نرویم و اگر در منحنی سیگنال تحلیلی پیک ماکزیموم با پیک‌های ریز و سطحی دیگر همپوشانی داشت این پیک‌ها از بین برود (سالم و روات، ۲۰۰۳).

۲-۳ تصحیح منحنی میدان (پاول، ۱۹۶۷)

در بخش قبل دیدیم که مطابق شکل ۳ نقطه $x = 0$ درست در بالای شیب گسل قرار دارد در حالی که در عمل وقتی داده برداری می‌کنیم، از مکان خط گسله بی‌اطلاعیم و نمی‌توانیم نقطه صفر منحنی را در آنجا قرار دهیم. همان‌طور که در شکل ۳ دیدیم منحنی‌های گسل دارای دو پیک ماکزیموم و مینیموم هستند که خط گسله بین این دو پیک قرار دارد. بنابراین در ابتدا نقطه مبدأ را بین این دو پیک انتخاب، سپس با روش‌های ریاضی مکان اصلی آن را پیدا می‌کنیم و تفسیر را ادامه می‌دهیم. معادله یک بلوک گسل را می‌توانیم در حالت کلی به صورت زیر نشان دهیم:

$$F(x) = C[\text{Sin}Q_f \lambda(x) + \text{Cos}Q_f \phi(x)] \quad (۴)$$

به دست می‌آید و پارامترهای گسل به صورت زیر معین می‌شود:

$$\phi_f = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{-h}{X_h - X_0}\right) \quad \text{و}$$

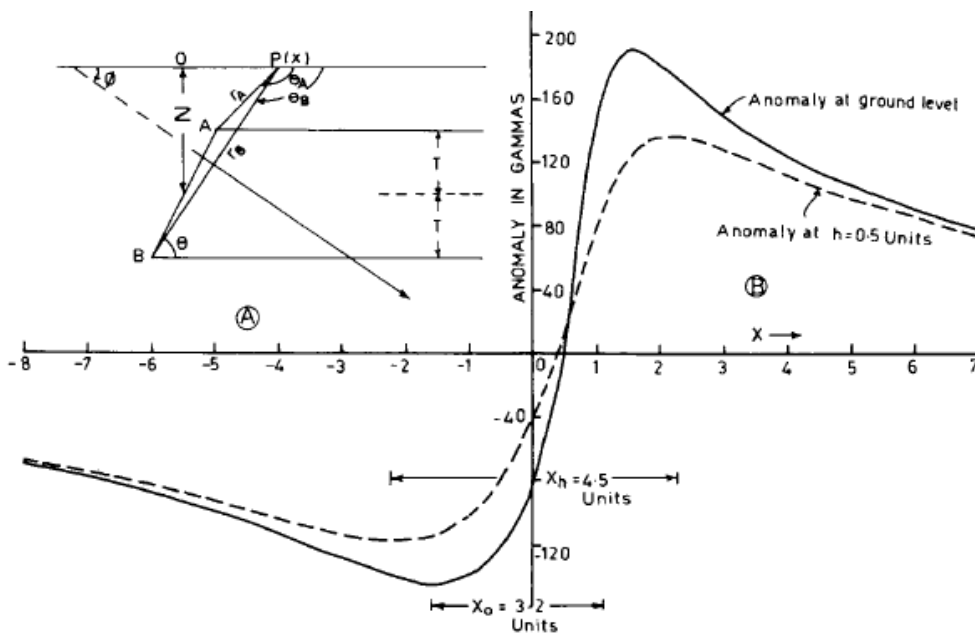
$$Z = \frac{(X_h^2 - X_0^2)\text{Sin}^2\phi_f}{8h} - \frac{h}{2} \quad \text{و}$$

$$a = \frac{X_0^2 - 4Z^2\text{Cosec}^2\phi_f}{4} \quad \text{و}$$

$$\text{Tan}(2\theta + \phi_f) = \frac{-aR}{a + Z^2(1 + R\text{Cot}\phi_f)} \quad \text{و}$$

$$T^2 = \left| \frac{a}{\text{Cot}^2\theta + 2\text{Cot}\theta\text{Cot}\phi_f^{-1}} \right|$$

که Z ژرفای تا وسط شیب گسل، θ شیب گسل و T ضخامت گسل است. R نسبت مشتق افقی منحنی میدان به مشتق عمودی منحنی میدان در نقطه $x = 0$ و h مقدار ادامه فراسوی میدان است. تجربه نشان داده است که ادامه فراسوی مناسب باید دارای شرایط خاصی باشد. یکی از این شرایط این است که ما از ژرفای برآورد شده و



شکل ۳. نمایی از مدل بلوک بالا آمده گسل (عادی). محور افقی فاصله و محور عمودی شدت میدان کل برحسب گاما (نانو تسلا) است (مورتنی، ۱۹۸۵).

یکسان، سیگنال تحلیلی یکسانی دارند به طوری که پیک توابع سیگنال تحلیلی متقارن است و مستقیماً بالای لبه اجسام پهن و بالای مرکز جسم باریک قرار می‌گیرد. تفسیر نقشه‌های سیگنال تحلیلی به طور ساده نمایش قابل فهمی از هندسه منبع مغناطیسی را ارائه کرده است. قدر مطلق سیگنال تحلیلی برابر ریشه دوم مجموع توان دوم‌های مشتق عمودی و دو مشتق افقی میدان مغناطیسی است و به صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$[A(X, Y)] = \left[\left(\frac{dB}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dB}{dy} \right)^2 + \left(\frac{dB}{dz} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

این سیگنال بیشینه‌ای را روی تپان‌های مغناطیسی نشان می‌دهد. نکته قابل توجه این است که مکان این بیشینه مستقل از جهت میدان مغناطیسی محیط و همچنین جهت مغناطش توده پدیدآورنده بی‌هنجاری است. مکان این بیشینه‌ها نشانگر مکان توده‌های پدیدآورنده بی‌هنجاری است. بیشتر روش‌های مغناطیسی ارائه شده محققین، بر این فرض استوار هستند که مفسر، جهت میدان مغناطیسی و جهت مغناطش توده مغناطیسی را می‌داند. زاویه میل و زاویه انحراف میدان مغناطیسی فعلی زمین را به راحتی می‌توان اندازه‌گیری کرد. اما هنگامی که اطلاع چندانی از جهت بردار مغناطش جسم وجود نداشته باشد، معمولاً فرض می‌شود که مغناطش جسم صرفاً القائی است و هیچ پسماند مغناطیسی در توده مورد نظر وجود ندارد. اما باید در نظر داشت، در بیشتر مواقع این فرض نادرست است. بنابراین با به کارگیری سیگنال تحلیلی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در سه بعد، تلاش در رفع این کاستی می‌شود. برتری فن سیگنال تحلیلی بر دیگر فنون در این است که شکل این سیگنال روی ساختارهای خطی مستقل از پارامترهای میدان مغناطیسی زمین و همچنین جهت بردار مغناطش جسم است. بنابراین با استفاده از اندازه (قدر مطلق) سیگنال تحلیلی می‌توان ویژگی‌های توده مورد نظر

که $\phi(X)$ و $\lambda(X)$ توابعی از X و معرف فاصله نقطه برداشت از لبه بالایی و پایینی گسل (نقاط A و B در شکل ۳) هستند. همچنین Q_f تابعی شامل زاویه میل و امتداد و شیب است. در این تابع اگر X_1, X_2, \dots, X_n نقاطی از یک سمت منحنی و Y_1, Y_2, \dots, Y_n نقاطی از سمت دیگر منحنی باشند به طوری که داشته باشیم:

$$F(X_1) + F(Y_1) = F(X_2) + F(Y_2) = \dots = F(X_n) + F(Y_n)$$

آنگاه

داریم: $X_1 Y_1 = X_2 Y_2 = \dots = X_n Y_n$ برای تصحیح، محور را ما بین دو پیک منحنی انتخاب می‌کنیم. این محور حقیقی نیست. با وجود این نقاط $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$ منحنی طوری انتخاب می‌کنیم که شرط $F(X_1) + F(Y_1) = F(X_2) + F(Y_2) = \dots = F(X_n) + F(Y_n)$ صادق باشد. طبیعی است که چون محور هنوز تصحیح نشده است، ممکن است شرط $X_1 Y_1 = X_2 Y_2 = \dots = X_n Y_n$ برقرار نباشد. حال فرض کنیم محور اصلی و تصحیح شده به اندازه Δ با محور انتخابی فاصله داشته باشد. باید بهترین مقدار را برای Δ انتخاب کنیم. اگر شرط‌های ذکر شده را به کار ببریم بهترین مقدار برای Δ به صورت زیر به دست می‌آید (پاول، ۱۹۶۷).

$$\Delta = \frac{\left(\sum_1^n x_n y_n \right) \left(\sum_1^n (y_n - x_n) \right) - n \left(\sum_1^n (x_n y_n) \right) (y_n - x_n)}{n \left(\sum_1^n (y_n - x_n)^2 \right) - \left(\sum_1^n (y_n - x_n) \right)^2} \quad (5)$$

۳-۳ روش سیگنال تحلیلی (مکلود و همکاران، ۱۹۹۳)

این تابع، پارامتر قابل اندازه‌گیری نیست و کاملاً از جهت مغناطش سنگ‌ها و جهت میدان مغناطیسی زمین، مستقل است این بدان معنا است که همه اجسام دارای هندسه

موهومی (غیر هم‌فاز) میدان مغناطیسی ناشی از موج الکترومغناطیسی با بسامد کم نفوذ یافته به درون زمین را نیز همزمان با میدان مغناطیسی زمین اندازه بگیرد. این دستگاه میدان مغناطیسی زمین را با دقت ۰/۰۱ نانوتسلا اندازه می‌گیرد. علاوه بر این دستگاه یاد شده با اتصال به GPS می‌تواند ارتفاع از سطح دریا، طول و عرض جغرافیایی هر نقطه را تعیین کند. نیم‌رخ‌های اندازه‌گیری به صورت شمالی- جنوبی انتخاب شدند. تعداد چهار نیم‌رخ به طول تقریبی یک کیلومتر و فاصله صد متر از یکدیگر انتخاب شدند. به طور متوسط در هر نیم‌رخ ۴۵ ایستگاه برای خوانش همزمان میدان مغناطیسی و VLF در نظر گرفته شد که به فاصله ۲۰ متر از یکدیگر قرار داشتند. با تنظیم دستگاه، بسامد VLF قابل استفاده در منطقه برداشت، ۱۸/۶ کیلوهرتز بود. در این نیم‌رخ‌ها علاوه بر داده‌های میدان کل مغناطیسی، داده‌های گرادیان نیز برداشت شد. در گرادیومتری فاصله دو دریابه (سنسور) ۶۰ سانتی‌متر انتخاب شد.

۶ تفسیر داده‌ها

۱-۶ نقشه‌های مغناطیسی

با استفاده از چهار نیم‌رخ برداشت شده نقشه‌های تصویری مربوط به میدان کل را ترسیم کرده‌ایم. این نقشه‌ها در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است. همان‌طور که در نقشه‌ها مشخص است، بی‌هنجاری مشخص شده در شکل‌ها کمر بالای گسل و خط گسله را نشان می‌دهد (خط نقطه‌چین).

علاوه بر میدان مغناطیسی کل روی این منطقه داده‌های گرادیان را نیز برداشت کردیم. خاصیت خوب داده‌های گرادیان این است که چون گرادیان نوعی مشتق‌گیری است، در نتیجه در تعیین دقیق محل خط گسله بسیار کاربرد دارد. در شکل ۶ نقشه سه‌بعدی داده‌های گرادیان را می‌بینیم.

را بدون استفاده از فرض‌های اولیه در مورد بردار مغناطش آن، تعیین کرد. بنابراین استفاده از این روش در مناطقی که دارای پسماند مغناطیسی زیادی هستند، می‌تواند مفید واقع شود. یکی دیگر از کاربردهای روش سیگنال تحلیلی، به‌دست آوردن عمق بی‌هنجاری است.

۳-۴ تخمین ژرفای از منحنی سیگنال تحلیلی

برآورد ژرفای گسل‌ها و همبری‌ها از روش سیگنال تحلیلی، پاسخ دقیق‌تری به‌دست می‌دهد. اگر پهنای منحنی سیگنال تحلیلی را در نصف مقدار ماکزیموم h فرض کنیم آنگاه ژرفای یک همبری یا خط گسله از رابطه زیر به‌دست می‌آید (پاول، ۱۹۶۷).

$$z = \frac{h}{3.46} \quad (6)$$

که h پهنای منحنی سیگنال تحلیلی در نصف ماکزیموم است.

۴ ژرفای پوسته الکتریکی

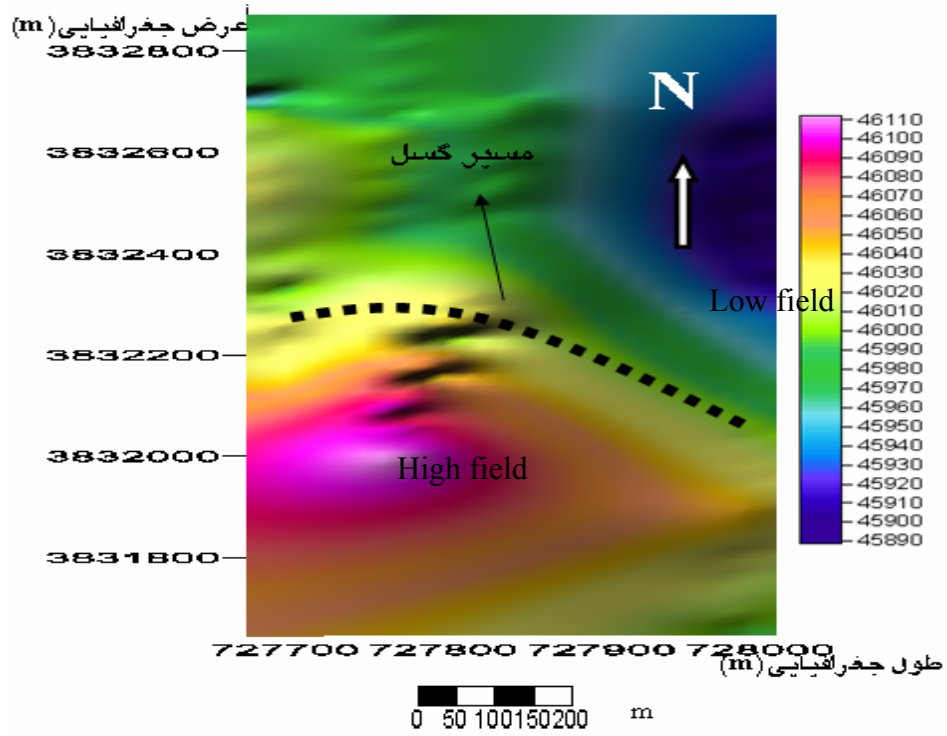
ژرفای پوسته الکتریکی، کمیتی بیانگر ژرفای نفوذ موج الکترومغناطیسی به داخل زمین است و به رسانش و بسامد بستگی دارد. ژرفای پوسته برای بسامدهای VLF تقریباً برابر است با:

$$g_1 \cong 500 \left(\frac{\rho_1}{f} \right)^2 \quad (7)$$

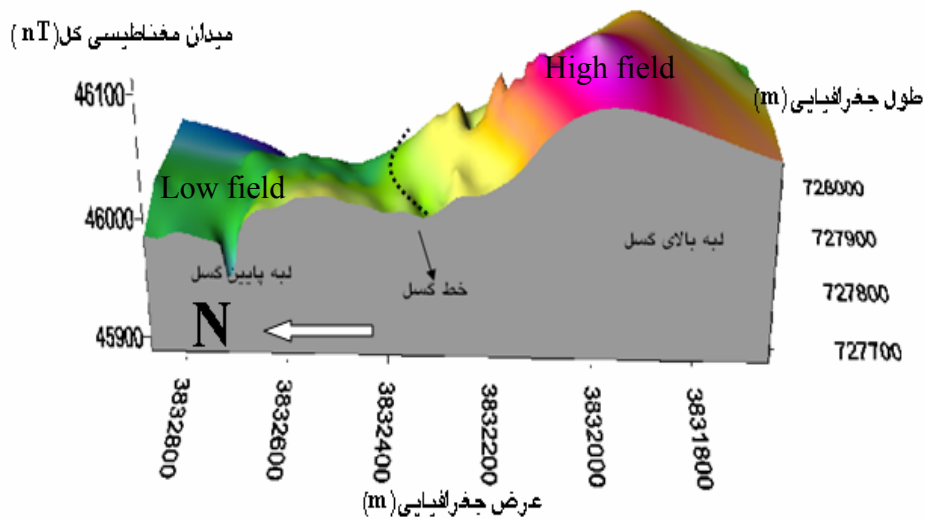
که ρ_1 مقاومت ویژه لایه سطحی و f بسامد موج VLF است (نیقیان، ۱۹۸۸).

۵ داده‌برداری

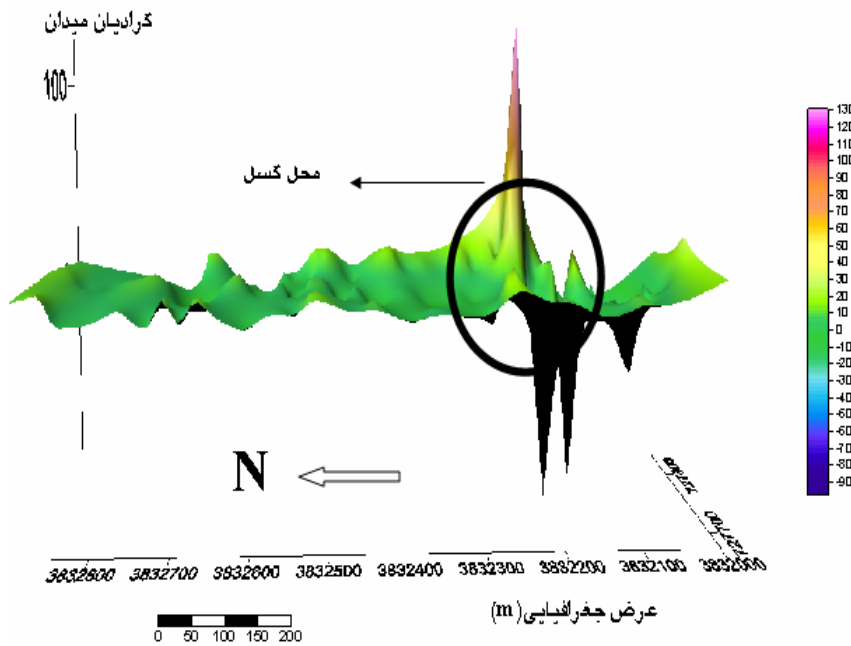
دستگاه داده‌برداری، مغناطیس‌سنج (مگنتومتر) پروتون و مدل آن GSM-19 و ساخت کانادا است. این دستگاه نوعی مغناطیس‌سنج/گرادیومتر است. این دستگاه همچنین می‌تواند یک سیم‌پیچ اضافی، مؤلفه‌های حقیقی (هم‌فاز) و



شکل ۴. نقشه تصویری میدان مغناطیسی کل.



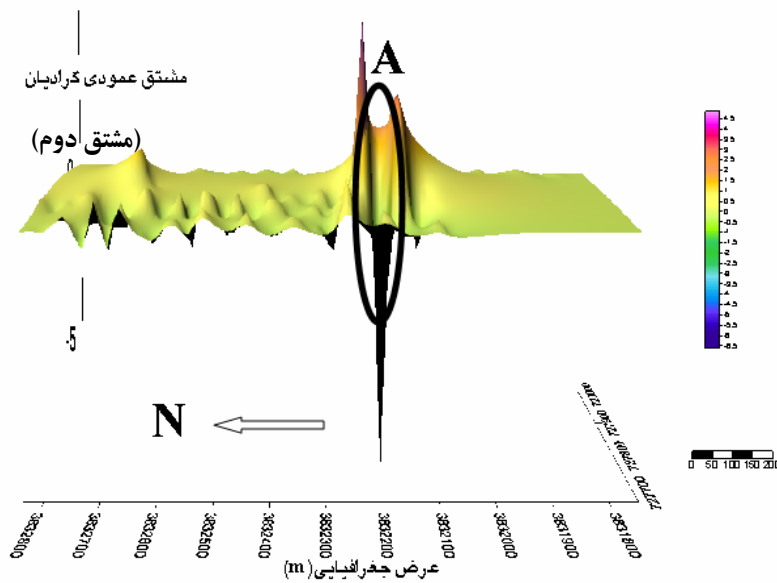
شکل ۵. نمایش سه بعدی داده‌های میدان کل.



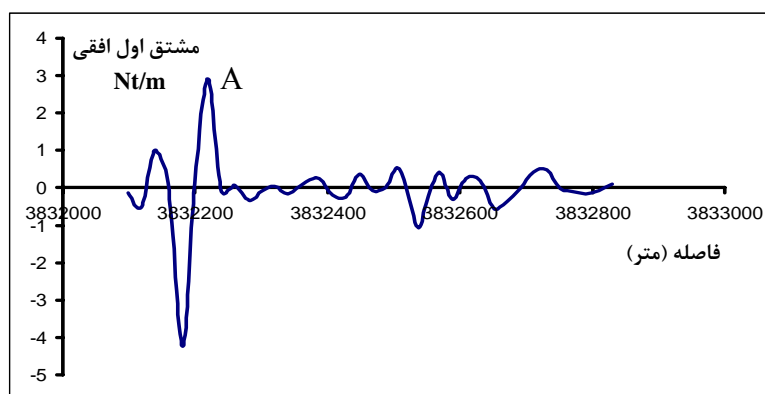
شکل ۶. نقشه سه بعدی داده‌های گرادیان (مشتق اول عمودی).

نیم‌رخ دوم (شکل ۷) به خوبی مکان گسلش را نشان می‌دهد و با نقشه‌های میدان کل کاملاً منطبق است. منحنی‌های مشتق افقی و سیگنال تحلیلی گرادیان نیم‌رخ دوم نیز به خوبی مکان گسل را نشان می‌دهند (نقطه A در شکل‌های ۸ و ۹).

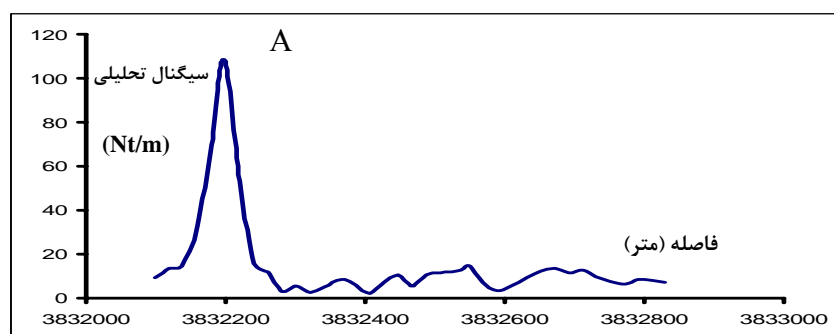
نقشه گرادیان (مشتق اول عمودی) با نقشه میدان کل کاملاً همخوانی دارد. در نقشه گرادیان، در فاصله تقریبی ۳۸۳۲۲۰۰ تا ۳۸۳۲۳۰۰ گسلش دیده می‌شود که با نقشه میدان مغناطیسی کل کاملاً توافق دارد. منحنی مشتق قائم گرادیان (مشتق دوم) میدان در



شکل ۷. نقشه مشتق دوم عمودی.



شکل ۸. منحنی مشتق افقی در طول نیمرخ دوم.



شکل ۹. منحنی سیگنال تحلیلی در طول نیمرخ دوم.

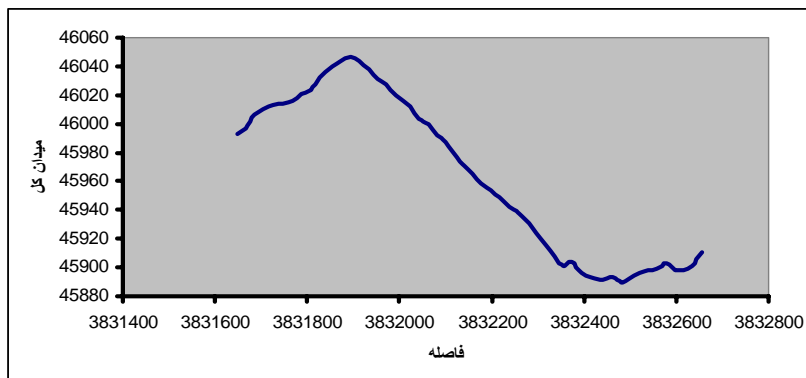
۲-۶ تعیین پارامترها از روش نقطه میانی

نیمرخ چهارم میدان مغناطیسی کل (شکل ۱۰) به صورت زیر است:

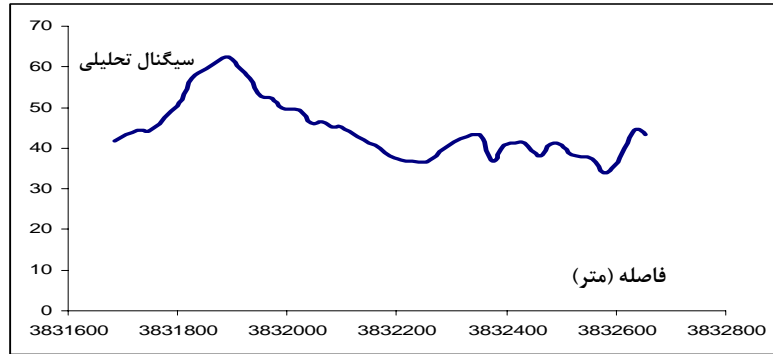
عمیق ترین مکان گسل در این نیمرخ قرار دارد و ما می توانیم با منحنی سیگنال تحلیلی، ژرفا را برآورد کنیم. منحنی سیگنال تحلیلی این منحنی در شکل ۱۱ آورده شده است. ژرفایی که از این منحنی به دست می آید تقریباً

۳۸/۵۶ متر است.

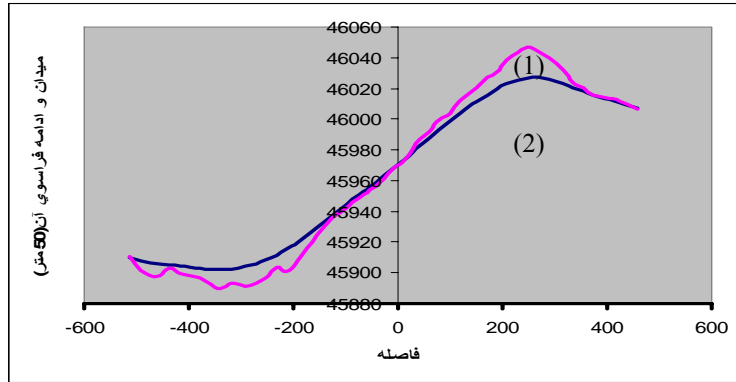
برای به دست آوردن پارامترها طبق بخش ۳-۲ ابتدا محورها را تصحیح می کنیم. مناسب ترین ادامه فراسو را ۵۰ متر برآورد کردیم. منحنی میدان و ادامه فراسوی ۵۰ متری آن در شکل ۱۲ آورده شده است. نقاط بسیاری را برای تصحیح محور میدان روی منحنی در نظر می گیریم. نمودار و منحنی این نقاط در شکل ۱۳ آورده شده است.



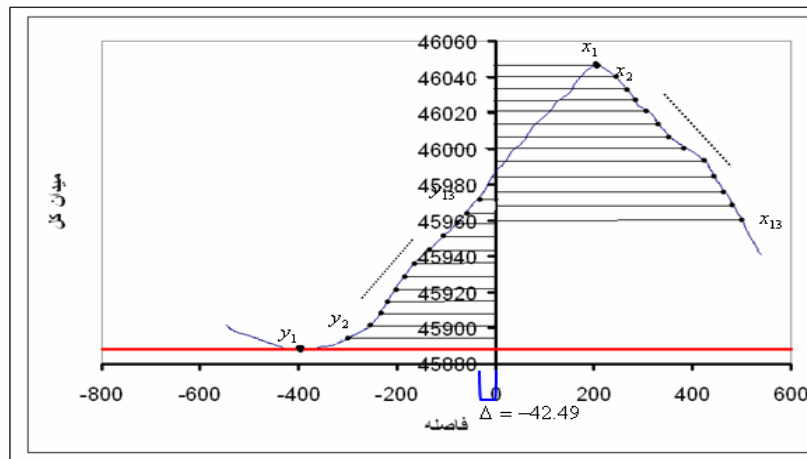
شکل ۱۰. شدت کل میدان مغناطیسی در طول نیمرخ چهارم.



شکل ۱۱. منحنی سیگنال تحلیلی نیم‌رخ چهارم.



شکل ۱۲. (۱) منحنی میدان و (۲) ادامه فراسوی میدان.



شکل ۱۳. منحنی میدان و نقاط مشخص شده در آن.

با استفاده از رابطه (۷) می‌توانیم ژرفای پوسته الکتریکی در منطقه کرکسار را به‌دست آوریم. با توجه به مقاوم بودن ساختار مورد بررسی و بسامد متوسط، ژرفای پوسته الکتریکی در کمترین حالت ۲۵ متر و در بیشترین حالت در قسمت‌های بسیار مقاوم به ۱۳۴ متر نیز رسیده است. بنابراین با توجه به یک مقاومت میانگین ژرفای الکتریکی پوسته را ۸۰ متر در نظر گرفتیم. در شکل ۱۵ شبه مقطع مؤلفه حقیقی نسبت به ژرفای نیم‌رخ سوم را مشاهده می‌کنیم، شیبدار بودن ساختار به خوبی در این شکل مشخص است. مکان تقریبی شکستگی در شکل با دایره‌ای مشخص شده است. اگر شبه مقطع‌های اول تا چهارم را کنار هم بگذاریم می‌توانیم مسیر تقریبی گسل را مشخص سازیم. اگر مسیر به‌دست آمده از این شکل‌ها را با نقشه تصویری میدان مغناطیسی مقایسه کنیم، می‌بینیم که با هم مطابقت دارند (شکل ۱۶).

۸ نتیجه‌گیری

در این مقاله بررسی‌های مغناطیسی و الکترومغناطیسی انجام شده در روی گسل صحنه در منطقه کرکسار آورده شده است. روش مغناطیسی یکی از روش‌های کارآمد در به تصویر کشیدن گسل‌ها است. با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدان مغناطیسی کل نقشه تصویری میدان مغناطیسی کل در منطقه را ترسیم کردیم. در تشخیص گسل صحنه از صافی‌های مشتق افقی، مشتق عمودی و گرادیان میدان استفاده کردیم و مسیر گسل را نمایان ساختیم. در بخش برآورد پارامترها به روش مغناطیسی از روش نقطه میانی استفاده کرده‌ایم و برای نیم‌رخ چهارم میدان نتایج زیر به‌دست آمد:

$$Z \cong 112 \text{ m}$$

$$T \cong 74 \text{ m}$$

$$\text{شیب} = 74.71^\circ$$

با توجه به رابطه (۵) مقدار Δ برابر با ۴۲/۴۹- متر می‌شود. بعد از تصحیح میدان با توجه به منحنی میدان و ادامه فراسوی آن، نقاط ماکزیموم و مینیموم و پارامترهای گسل به‌دست می‌آید.

$$\text{و } h = 50 \text{ m} \quad x_h = -46.5 \text{ m} \quad X_0 = 588 \text{ m}$$

$$X_h = 633 \quad x_0 = -50 \text{ m}$$

و برای پارامترها داریم:

$$\phi_f = -85.99 \quad Z \cong 112 \text{ m} \quad a \cong 74056.93 \text{ m}$$

با توجه به منحنی‌های مشتق افقی و عمودی در نقطه مبدأ داریم:

$$R = 2.28 \quad \Rightarrow T \cong 74 \text{ m}$$

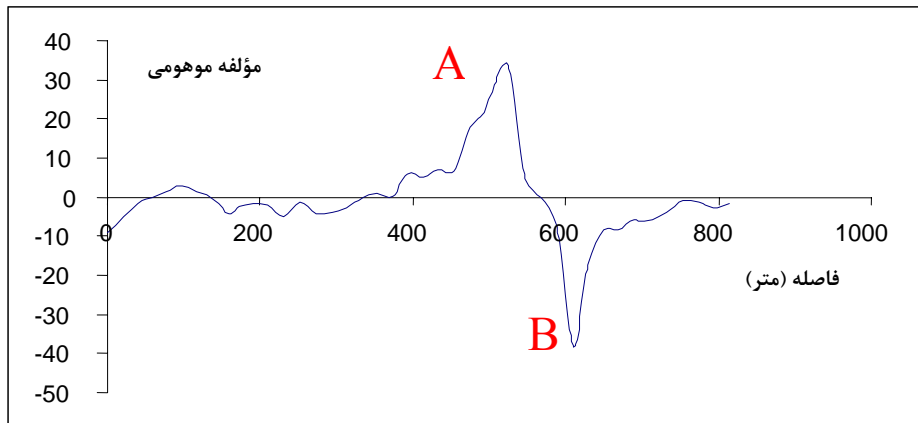
بنابراین ژرفای کمر بالایی گسل عبارت است از: $h = Z - T = 37 \text{ m}$ که این ژرفای با ژرفا به‌دست آمده از سیگنال تحلیلی مطابقت می‌کند (شکل ۹). با توجه به روابط فوق، شیب صفحه گسل برابر با ۷۴/۷۱ درجه است. جهت شیب در طول خط گسله متغیر است و از شمال غرب در شرق به شمال در مرکز و غرب تغییر می‌کند (شکل ۴).

۷ داده‌های بسامد کم

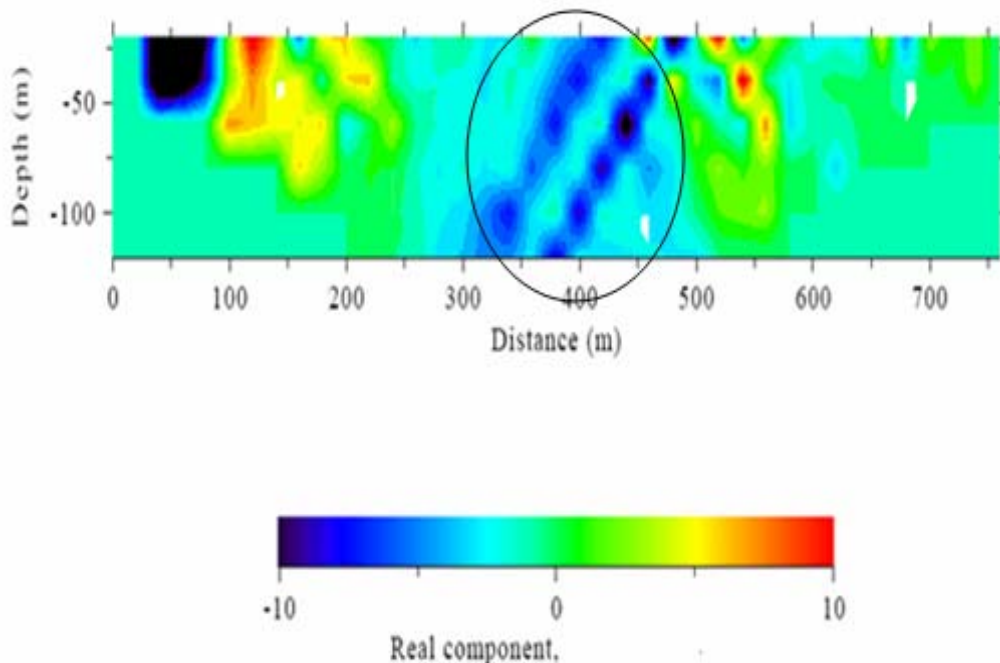
منحنی مؤلفه موهومی نیم‌رخ اول VLF در شکل ۱۵ آورده شده است. گسل را می‌توان دو همبری در نظر گرفت، همبری اول از مقاوم به رسانا و همبری دوم از رسانا به مقاوم است بنابراین انتظار داریم که دو پیک مثبت و منفی ببینیم که در شکل ۱۴ کاملاً مشخص است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود می‌توانیم دو همبری را در نقاط A و B تشخیص دهیم که کاملاً متضاد یکدیگرند و یک شکستگی در این منطقه را نشان می‌دهند. تفسیر داده‌های VLF عموماً کیفی است و شکستگی را به‌صورت یک ناحیه نشان می‌دهد.

را رسم کردیم و مکان شکستگی را در آن نمایش دادیم. نقشه‌های مغناطیسی و بسامد کم (VLF) در مورد مسیر گسل کاملاً با هم مطابقت می‌کنند.

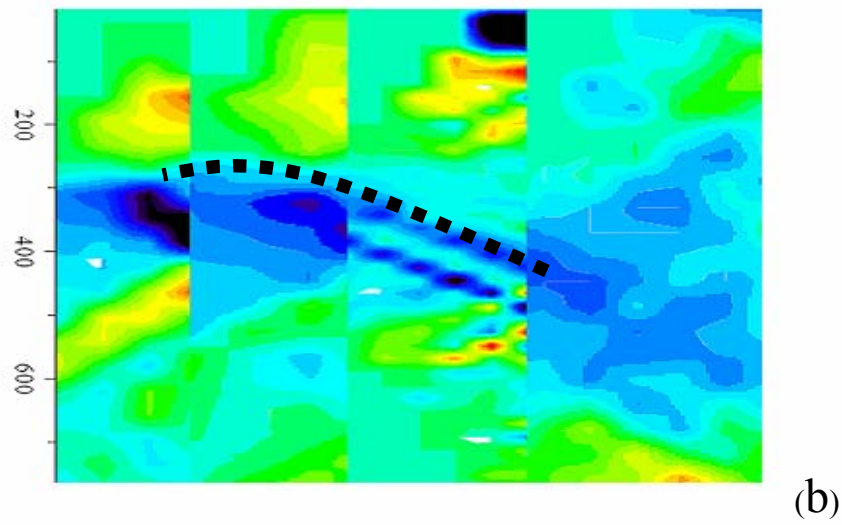
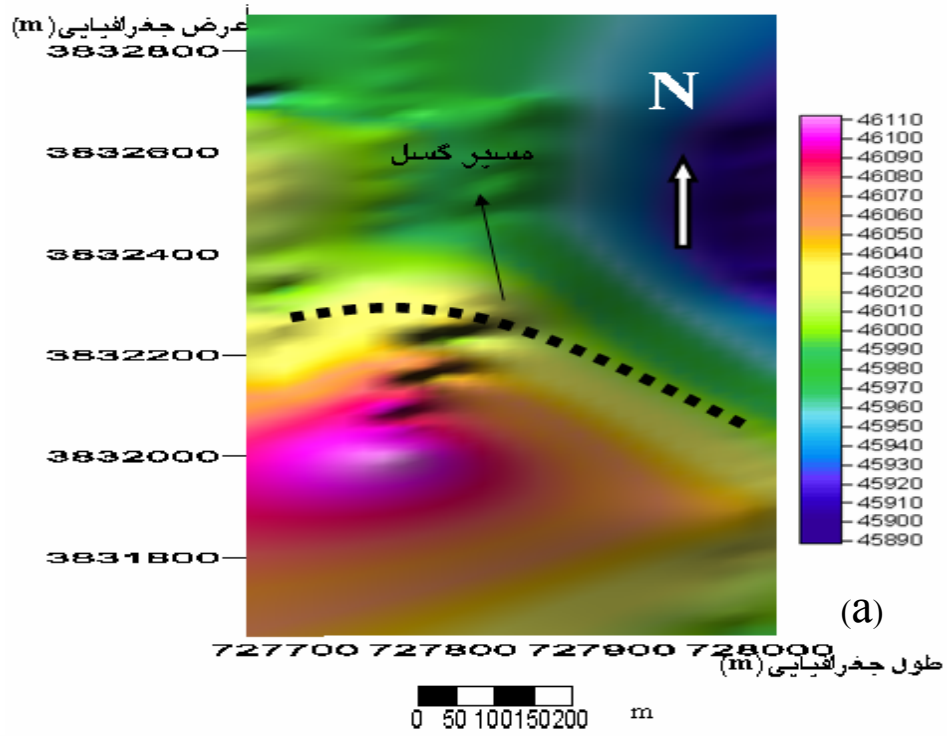
در بخش الکترومغناطیسی به دلیل مقاومت زیاد ناحیه به ژرفای نفوذ خوبی در حدود ۸۰ متر دست پیدا کردیم. نقشه‌های ژرفایی از مؤلفه حقیقی میدان عمودی مغناطیسی



شکل ۱۴. مؤلفه موهومی (outphase) نیم‌رخ اول VLF.



شکل ۱۵. شبه مقطع مؤلفه حقیقی نسبت به ژرفا در نیم‌رخ سوم.



شکل ۱۶. مقایسه شبه مقطع‌ها (a) نقشه تصویری مغناطیس (b) VLF.

منابع

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، گزارش زمین‌شناسی میانراهان، ۱۳۷۰.

- Adebayo, A., Olorunfemi, M. O., and Ojo, J. S., 1996, An integration of aeromagnetic and electrical resistivity methods in dam site investigation: *Geophysics*, **61**, 349-356.
- Ghareeb, M. A., 1985, A geophysical study on the abu Gharadig basin, Egypt. *Geophysics*, **50**, 5-15.
- Macleod, I. N., Jones, K., and Dai, T. F. 1993, 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitude. *Exploration Geophysics*, **24**, 679-688.
- Mirzaei, N., and Gheitanchi, M. R., 2002, Seismotectonics of Sahneh fault, middle segment of main recent fault, Zagros mountains, western Iran. *J. Earth Space Phys.*, **28**(2), 1-8.
- Murthy, R. I. M., 1985, The midpoint method: magnetic interpretation of dikes and faults: *Geophysics*, **50**, 834-839.
- Nabighian, M. N., 1988, *Electromagnetic methods in applied geophysics-theory*. Vol. 1,2. Chapter 7., Soc. Exploration of Geophysics.
- Powell, D. W., 1967, Fitting observed profiles to a magnetized dyke or faults-step model: *Geophys. Prospect.*, **15**, 208-220.
- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millet, A. J., and Somerton, I. W., 1990, Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, **55**, 80-91.
- Ross, H. P., and Moore, N. M., 1985, Geophysical investigations of the Cove fort-Sulphurdale geothermal system, Utah. *Geophysics*, **50**, 1732-1745.
- Salem, A., and Ravat, D., 2003, A combined analytic signal and Euler method (AN-EUL) for automatic interpretation of magnetic data. *Geophysics*, **68**, 1952-1961.
- Talebian, M., and Jackson, J., 2002, Offset on the Main Recent Fault of NW Iran and implications for the late Cenozoic tectonics of the Arabia-Eurasia collision zone. *Geophys. J. Int.*, **150**, 422-439.