

روش سیگنال تحلیلی در برآورد پارامترهای منشأ مغناطیسی ساختارهای دو بُعدی

بهروز اسکویی^{۱*}، علی کریمی کلایه^۲ و وحید ابراهیم زاده اردستانی^۳

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

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

^۳ دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و قطب علمی مهندسی نقشه برداری و مقابله با سوانح طبیعی، تهران، ایران

(دریافت: ۸۸۷/۴، پذیرش نهایی: ۸۹/۱۲/۲۴)

چکیده

روش سیگنال تحلیلی را برای تفسیر داده‌های بی‌هنجاری مغناطیسی و گرانی‌سنجی به کار می‌برند. مزیت استفاده از روش سیگنال تحلیلی برای تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، مستقل بودن شکل دامنه سیگنال تحلیلی از پارامترهای جهت‌دار مانند جهت مغناطیدگی و شیب منشأ مغناطیسی است. دامنه سیگنال تحلیلی یک تابع متقارن زنگوله‌ای شکل است که بیشینه آن دقیقاً بالای گوشه بی‌هنجاری قرار گرفته است و پهنای منحنی دامنه آن با عمق سطح رویه بی‌هنجاری نسبت مستقیم دارد. از این ویژگی سیگنال تحلیلی در برآورد کردن پارامترهای منشأ مغناطیسی، مانند عمق و ضخامت استفاده می‌شود. در این مقاله در محیط نرم‌افزار مت‌لب MATLAB به منظور محاسبه سیگنال تحلیلی بی‌هنجاری‌های دو بُعدی، تعیین پارامترهای هندسی منشأ و مدل‌سازی مستقیم برنامه‌نویسی شده و برای بررسی کارایی برنامه‌های نوشته شده، ابتدا آنها را روی داده‌های مصنوعی همراه با نوفه اعمال می‌کنیم. سپس از این روش برای تفسیر داده‌های صحرایی منطقه سرخ دیزج زنجان استفاده کرده‌ایم. به منظور برآورد عمق و ضخامت منشأ مغناطیسی منطقه مورد بررسی، در نقشه مغناطیسی از ۵ نیم‌رخ، عمود بر راستای امتداد بی‌هنجاری مغناطیسی استفاده کرده‌ایم. این نیم‌رخ‌ها در طول جغرافیایی ۳۰۵۹۸۶ m تا ۳۰۶۱۷۶ m و عرض جغرافیایی ۴۰۵۱۸۱۳ m تا ۴۰۵۲۰۱۳ m بر مبنای واحد اندازه‌گیری UTM در نظر گرفته شده‌اند. که نتایج حاصل از این نیم‌رخ‌ها، برآورد عمق و ضخامت بی‌هنجاری است. در پایان نتایج به دست آمده از روش سیگنال تحلیلی را با نتایج حاصل از روش اویلر مقایسه کرده‌ایم.

واژه‌های کلیدی: سیگنال تحلیلی، مغناطیدگی، عمق، مکان افقی، ضخامت

Analytic signal method to estimate the magnetic source parameters of 2D structures

Oskooi, B.¹, Karimi Kalaye, A.² and Ardestani, E. V.³

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

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

³ Associate Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran and Center of Excellence in Survey Engineering and Disaster Management, Tehran, Iran

(Received: 26 Sep 2009, Accepted: 15 Mar 2011)

Abstract

The analytic signal method is usually used to interpret the magnetic and gravity anomalies. The main advantage of using analytic signal method in interpretation of magnetic source parameters from magnetic anomalies is that the amplitude dip of the analytic signal is independent of directional parameters like magnetization and the dip of the source. Using the coefficient of the amplitude to estimate the depth can make the interpretation of the magnetic data easier. By this method the location depth and angle of the anomalies and even the dip thickness and the direction of its extension can be

estimated. The amplitude of the signal is a symmetric bell-shaped function that the maximum of the curve is located exactly above the edge of the source and its width is proportional to the depth of the top of the magnetic source. This analytic signal characteristic is used to estimate the magnetic source parameters like depth location and the thickness.

We use these characteristics of the analytic signal function to estimate the depth, horizontal location and thickness of the magnetic sources. In this study, we use MATLAB in order to write codes for calculating the analytic signal of two dimensional anomalies, determine the geometrical parameters of the source and forward modeling of magnetic anomalies.

For evaluating the efficiency of the codes, first we applied them on the synthetic noise contaminated data. We then used analytic signal method to interpret the field magnetic data from Sorkh-Dizej, Zanjan. To estimate the depth and thickness of the magnetic source, we used 5 profiles perpendicular to the strike of the magnetic anomaly. These profiles are located in the longitude from 305986 m to 306176 m and latitude from 4051813 m to 4052013 m. Finally, we compared the results of analytic signal with the results of Euler method.

To consider the fact that the horizontal and vertical differentials are each other's Hilbert conversion, in each step of 2D analytic signal differentiation of the anomalies of 3D sources can be interpreted by extending 2D analytic signals.

The function of the analytic signal can be calculated easily in frequency region that its real and imaginary parts are horizontal and vertical differentials of the magnetic field in sequence. Another advantage of using analytic signal differential is the interpretation of magnetic and gravity data in common projects by Poisson equation.

The previous data in analytic signal method is not essential while in other methods the interpretation of the magnetic data needs some data such as the geology of the structure and other parameters. For example in Euler deconvolution method, that it is one of the depth estimation methods, knowing the structural index is vital and difficult.

In Sorkhdizaj in Zanjanin an iron mine with apatite content the results of analyzing data by analytic signal method show that the structure of the anomalies is too similar to a thin dike so that the method recognizes the thin dike with high accuracy and low uncertainty. Besides, it is shown that the depth of the top of the anomalies are changing from 10 to 55 m so that the results are too close to the ones obtained by Euler method calculated by Geosoft software. Also dikes with thickness less than 1 m to about 10 m have been estimated.

Key words: Analytic signal, Depth, Horizontal location, Magnetization, Thickness

۱ مقدمه

تحلیلی برابر است با جذر مجموع مربعات مشتق‌های افقی و قائم. دامنه سیگنال تحلیلی یک تابع متقارن، زنگوله‌ای شکل است که مقدار بیشینه آن بالای لبه بی‌هنجاری قرار می‌گیرد و پهنای منحنی دامنه با عمق رویه بی‌هنجاری نسبت مستقیم دارد (رویست و همکاران، ۱۹۹۲). از این ویژگی سیگنال تحلیلی برای برآورد پارامترهای منشأ مغناطیسی مانند عمق، مکان و ضخامت استفاده

تابع سیگنال تحلیلی به تابعی گفته می‌شود که قسمت موهومی آن تبدیل هیلبرت قسمت حقیقی آن است. تابع سیگنال تحلیلی در ابتدا برای بی‌هنجاری‌های مغناطیسی دو بُعدی به صورت مشتق میدان مغناطیسی مختلط که این میدان خود حاصل مشتق پتانسیل مغناطیسی است تعریف شد (نیقیان، ۱۹۷۲). دایک‌های نازک و صفحات نازک از جمله ساختارهای دو بُعدی فرض می‌شوند. دامنه سیگنال

باشد. در این حالت دامنه سیگنال تحلیلی دارای یک بیشینه است و نقطه بیشینه دامنه روی مرکز دایک قرار می‌گیرد. دامنه سیگنال تحلیلی مربوط به یک دایک که امتداد آن عمود بر محور x است به صورت رابطه زیر نوشته می‌شود.

$$|A_0(x)| = \frac{2w |\alpha|}{\sqrt{[d^2 + (x-w)^2][d^2 + (x+w)^2]}} \quad (3)$$

$$\alpha = 2KFC \sin \theta \quad (4)$$

$$C = 1 - \cos^2 i \sin^2 A \quad (5)$$

$$\tan I = \frac{\tan i}{\cos A} \quad (6)$$

در روابط (۳) تا (۶)، $2w$ ضخامت، d عمق تا سطح رویه، θ شیب دایک، K خودپذیری مغناطیسی و F میدان مغناطیسی کلی زمین، i زاویه میل میدان مغناطیسی کلی زمین و A زاویه بین شمال مغناطیسی و جهت مثبت محور x ها است. اگر $w < d$ آن گاه $x = 0$ است. در اینجا مبدأ محور x روی مرکز دایک فرض شده است. با توجه به اینکه مبدأ اندازه‌گیری اختیاری است، در مدل دایک نازک مکان افقی دایک نازک از محل مقدار بیشینه دامنه به دست می‌آید. اندازه مشتق اول دامنه سیگنال تحلیلی معادله (۳) مطابق رابطه زیر است.

$$|A_1(x)| = \frac{4w \sqrt{x^2 + d^2}}{[d^2 + (x-w)^2][d^2 + (x+w)^2]} \quad (7)$$

برای به دست آوردن مکان دامنه‌های بیشینه باید از معادله (۷) نسبت به x مشتق بگیریم. با مشتق‌گیری، دامنه بیشینه سیگنال تحلیلی با توجه به رابطه (۸) در مکان $x = 0$

می‌شود (هسو و همکاران، ۱۹۹۸). با گسترش سیگنال تحلیلی و با توجه به اینکه در هر مرتبه با مشتق‌گیری از سیگنال تحلیلی دو بُعدی مشتق‌های افقی و قائم تبدیل هیلبرت یکدیگرند، از این مفهوم می‌توان آن را برای موارد سه بُعدی نیز گسترش داد و بی‌هنجاری‌های مربوط به منشأهای سه بُعدی را تفسیر کرد. یکی از مزیت‌های استفاده از مشتق‌های سیگنال تحلیلی، ترکیب این روش با روش اولیبر برای تعیین شکل بی‌هنجاری و عمق آن است (سالم، ۲۰۰۲).

۲ نظریه روش

برای یک بی‌هنجاری مغناطیسی، سیگنال تحلیلی سه بُعدی به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (هسو و همکاران، ۱۹۹۶).

$$A_n(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^n}{\partial z^n} G \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^n}{\partial z^n} G \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^n}{\partial z^n} G \right) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $A_n(x, y)$ دامنه سیگنال تحلیلی، G بی‌هنجاری مغناطیسی. اندازه دامنه سیگنال تحلیلی به صورت زیر به دست می‌آید.

$$|A_n(x, y)| = \sqrt{\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^n}{\partial z^n} G \right) \right]^2 + \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^n}{\partial z^n} G \right) \right]^2 + \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^n}{\partial z^n} G \right) \right]^2} \quad (2)$$

۳ مدل دایک نازک

یکی از مدل‌هایی که اغلب در تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل دایک است. دایک نازک به دایکی گفته می‌شود که ضخامت آن نسبت به عمق سطح رویه تا سطح اندازه‌گیری کوچک‌تر

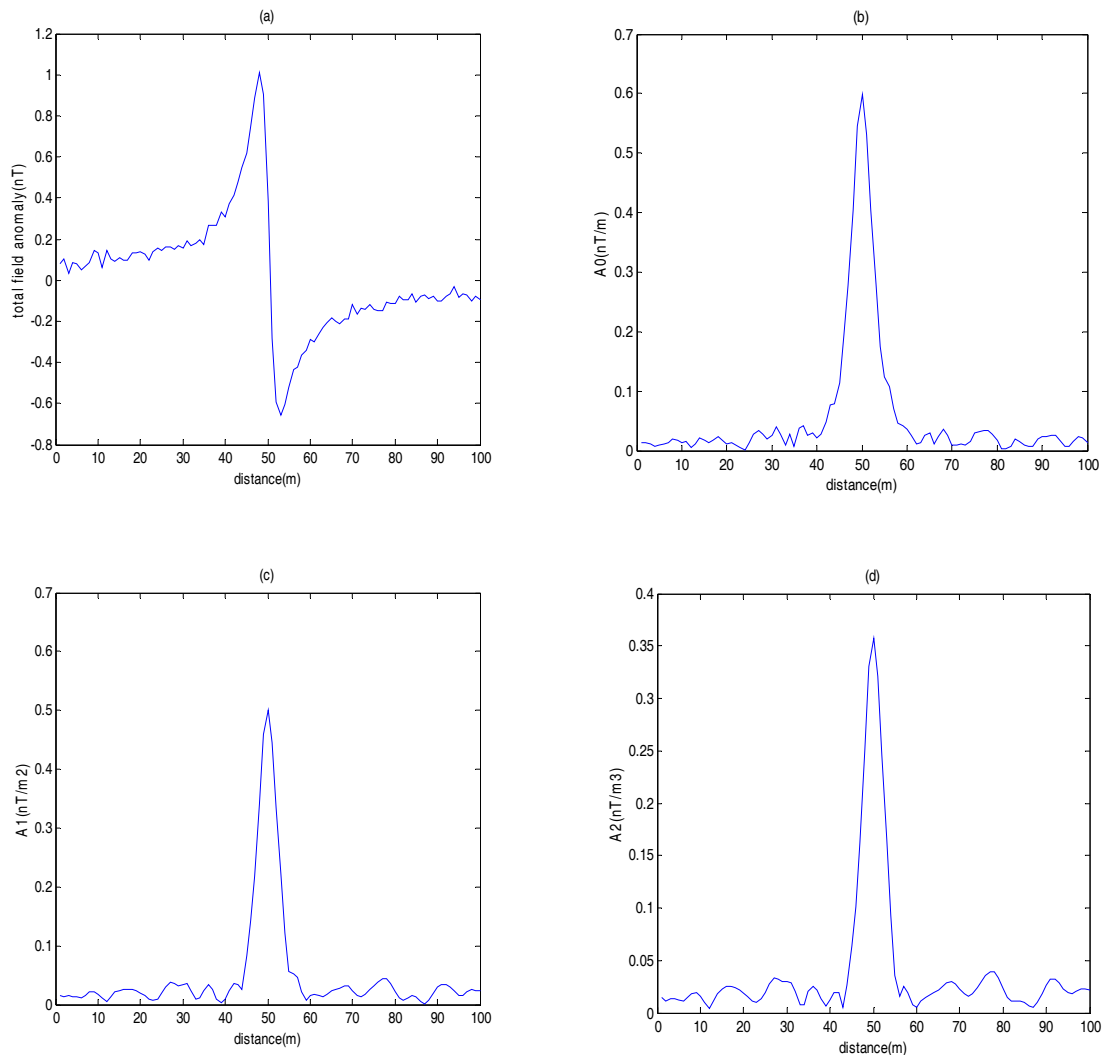
قرار می‌گیرد.

$$(۸) \text{ اگر } w \leq \sqrt{2\sqrt{3}-3}d \cong (0.68d) \text{ آنگاه } x = 0$$

۴ داده‌های مصنوعی نوفه‌دار

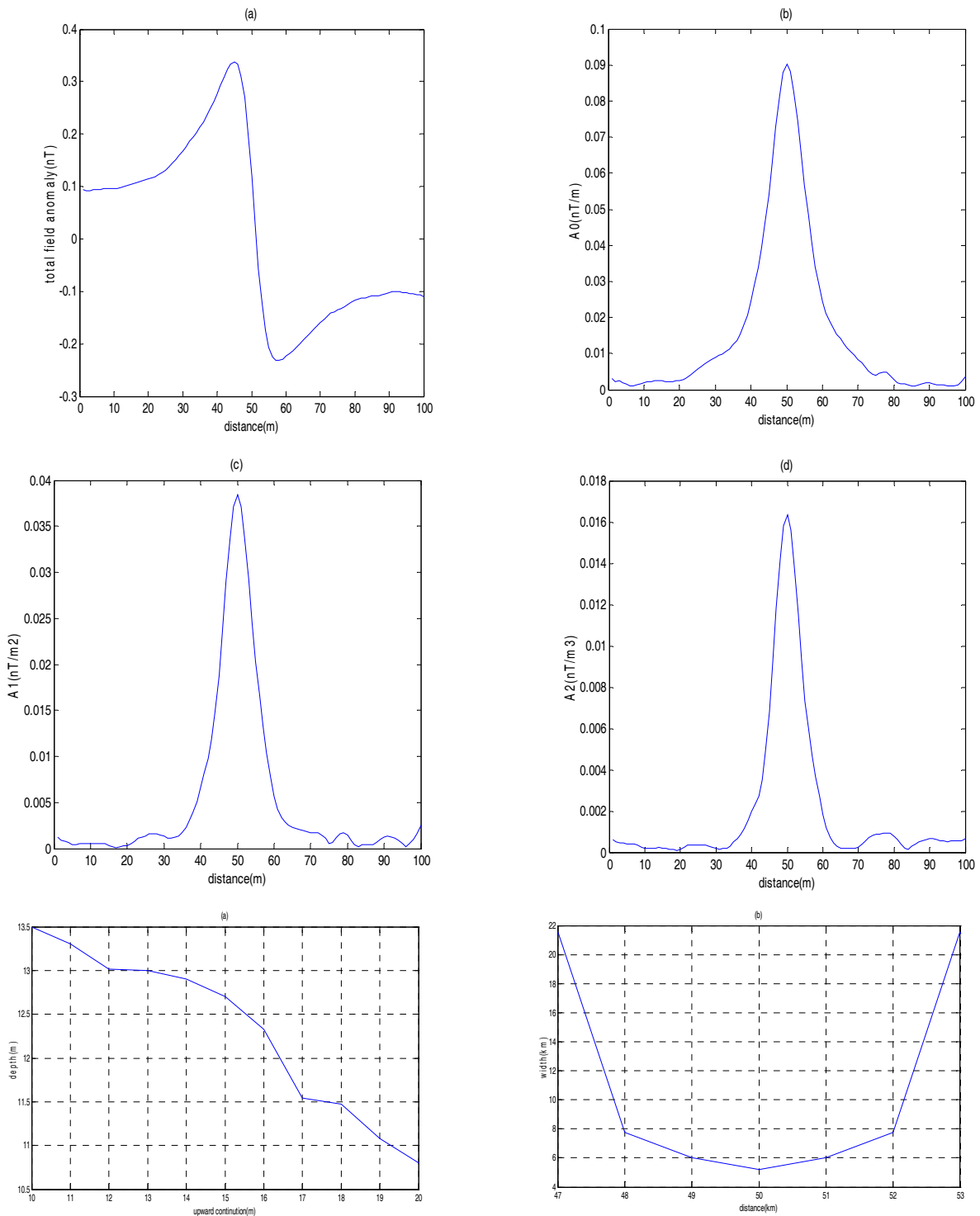
داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده همواره با نوفه همراه‌اند، بنابراین برای شبیه‌سازی داده‌های واقعی باید داده‌هایی تولید شوند که به نوفه آلوده باشند. به عبارت دیگر باید به داده‌های مصنوعی مقداری نوفه اضافه شود. روش سیگنال تحلیلی یک روش مشتق‌گیری است و این روش باعث

تقویت دامنه نوفه‌ها می‌شود. به همین دلیل در روش سیگنال تحلیلی از مشتقات مرتبه‌های سه و بالاتر استفاده نمی‌شود. در داده‌های مصنوعی نوفه‌دار، جواب‌ها نادرست و ناپایدار هستند. برای کاهش اثر نوفه در ایجاد ناهنجاری، از فیلتر ادامه فراسو استفاده می‌کنیم. در نتیجه با استفاده از این روش جواب‌ها پس از ارتفاع معینی پایدار می‌شوند و تغییرات کمتری مشاهده می‌شود. در این مثال به داده‌ها ۵ درصد نوفه اضافه شده است. شکل‌های (۲) و (۳) نمودارهای مربوط به این دایک را نشان می‌دهند.



شکل ۲. نمودارهای دایک با اضافه کردن نوفه ($S/N=35$)، **a** بی‌هنجاری میدان مغناطیسی کلی، **b** سیگنال تحلیلی، **c** سیگنال تحلیلی درجه اول، **d** سیگنال تحلیلی درجه دوم.

با اعمال روش فیلتر ادامه فراسو، نمودارهای شکل (۲) به صورت نمودارهای شکل ۳ به دست می آید.



شکل ۳. نمودارهای دایک شکل ۲ بعد از اعمال فیلتر فراسو بی‌هتجاری میدان مغناطیسی کلی، b سیگنال تحلیلی، c سیگنال تحلیلی درجه اول، d سیگنال تحلیلی، e برآورد عمق پس از اعمال روش ادامه فراسو، f ضخامت دایک.

۵ استفاده از روش سیگنال تحلیلی روی داده‌های واقعی

بر اساس نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰، ۱ طارم، از لحاظ موقعیت زمین‌شناسی، قدیمی‌ترین واحدهای رخنمون یافته شده در محدوده مورد بررسی، بخش آمند سازند کرج (ائوسن) است. سری ائوسن رشته‌کوه‌های البرز را در منطقه طارم به دو عضو کردکند و آمند تقسیم کرده‌اند. عضو کردکند شامل ماسه‌سنگ، توف و مادستون است که بخش زیرین سازند کرج را تشکیل می‌دهند و عضو آمند شامل سنگ‌های ولکانیکی و توف به‌طور عادی روی نهشته‌های کردکند قرار دارند. در این منطقه رسوبات کوارتز، جوان‌ترین واحد زمین‌شناسی را تشکیل می‌دهند. این رسوبات شامل تراست‌های آبرفتی، رسوبات آهکی آب شیرین، رسوبات مخروط افکنه‌ای و نهشته‌های آبرفتی دوره کواترنر هستند. شکل ۴ موقعیت محدوده مورد بررسی در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰، ۱ طارم را نشان می‌دهد. معدن آهن آپاتیت‌دار سرخ دیزج در ۳۲ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان زنجان و در ۲ کیلومتری جنوب غربی روستای سرخ دیزج قرار گرفته است. این معدن در داخل سنگ‌های ولکانیکی-زیر ولکانیکی قرار دارد (شکل ۵-۱). این کانسار از سه رخنمون اصلی تشکیل شده است که شکل کانه‌زایی را می‌توان به‌صورت توده‌ای، رگه‌ای و رگچه‌ای مشاهده کرد. رگه‌ها و توده‌ها با امتداد شمال شرقی-جنوب غربی با شیب ۴۰ تا ۵۰ درجه به سمت شمال و با ضخامت چند میلی‌متر تا ۱۶ متر و طول ۵۰ تا ۲۰۰ متر را می‌توان روی زمین مشاهده کرد. کانی‌شناسی این کانسار شامل مگنتیت، کانی‌های عناصر نادر خاکی (مونازیت)، اورانیت، کالکوپیریت، اپیدوت، ترمولیت، اکتینولیت، اسفن، سریسیت، کلریت و کانی‌های رُسی هستند. عیار کلی آهن Fe_2O_3 در این منطقه، ۷۲ تا ۹۲ درصد ذکر شده است. از جمله بافت‌هایی که در این

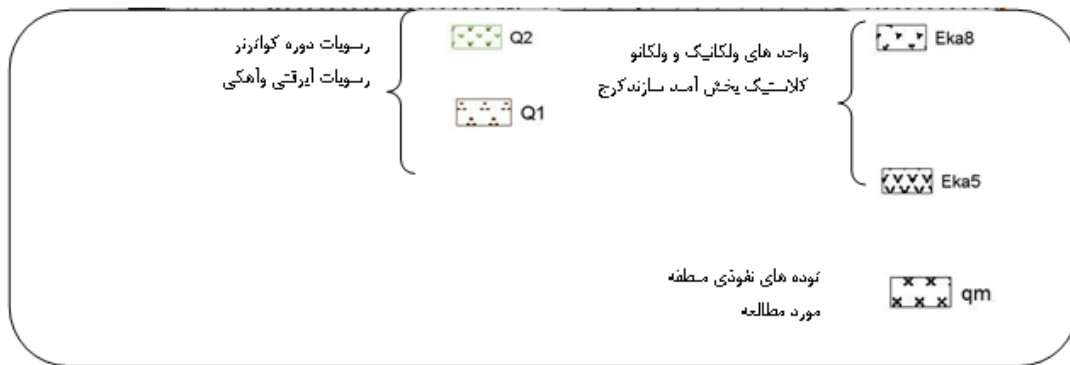
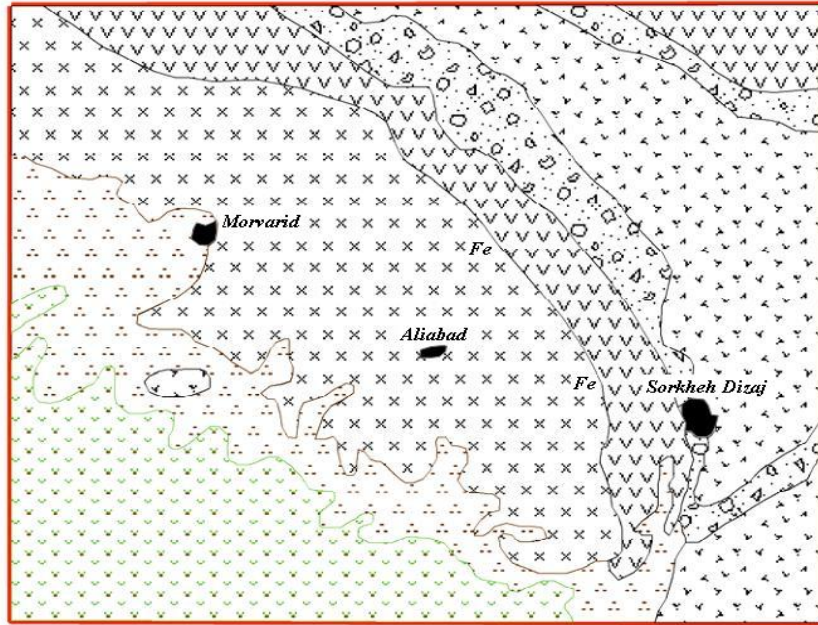
منطقه مشاهده می‌شود بافت‌های نواری و لایه‌ای، جریان‌ی آهن آپاتیتی و بافت رگه و رگچه‌ای است و آپاتیت به‌صورت کانی درشت‌بلور هگزاگونال بی‌پیرامیدال و سوزنی‌شکل به رنگ صورتی تا سفید در کان‌سنگ آهن و به‌صورت پگماتیستی در حاشیه گرانیت دیده می‌شود (نباتیان، ۱۳۸۷).

در منطقه سرخ دیزج زنجان اندازه‌گیری میدان مغناطیسی کلی در دو ناحیه شمالی و جنوبی صورت گرفته است که در این مقاله داده‌های مغناطیسی جنوبی بررسی شده‌اند. برای بررسی داده‌های مغناطیسی ابتدا داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای ژئوسافت شبکه‌بندی شده سپس بی‌هنجاری‌های مغناطیسی با استفاده از نیم‌رخ‌هایی عمود بر امتداد بی‌هنجاری مورد بررسی قرار گرفته است. با مشخص کردن داده‌های مربوط به هر نیم‌رخ داده‌ها را از میدان مغناطیسی منطقه‌ای که از IGRF به دست آمده‌اند کم کرده سپس مانند داده‌های مصنوعی با استفاده از برنامه نوشته شده، نمودارهای مربوط به سیگنال تحلیلی و مشتقات آن را رسم می‌کنیم. در منطقه مورد بررسی میدان مغناطیسی منطقه‌ای 47890 nT و زاویه میل مغناطیسی ۵۵ درجه و زاویه انحراف ۴/۵ درجه است. تعداد نقاط اندازه‌گیری ۳۰۰۴ عدد، فاصله نیم‌رخ‌ها ۵۰ متر، تعداد نیم‌رخ‌ها ۶۰ عدد و فاصله بین نقاط اندازه‌گیری ۲۰ متر است.

از آنجا که درجه تفکیک‌پذیری و میزان دقت روش سیگنال تحلیلی به کیفیت داده‌های مغناطیسی بستگی دارد و داده‌های واقعی با نوفه همراه‌اند و با توجه به اینکه اساس روش سیگنال تحلیلی مشتق‌گیری است و فرایند مشتق‌گیری دامنه نوفه‌ها را تقویت می‌کند، بنابراین برای کاهش اثر نوفه‌ها از فیلتر ادامه فراسو استفاده شده است تا پس از به دست آوردن یک ارتفاع مناسب عمق و ضخامت، بی‌هنجاری محاسبه شود. مشخصات پنج نیم‌رخ

گرفته شده و در جدول امشخص شده است. عرض‌های جغرافیایی پنج نیم‌رخ مورد بررسی یکسان اما طول جغرافیایی نیم‌رخ‌ها در فواصل معینی روی یک خط قرار گرفته‌اند.

مورد بررسی روی بی‌هنجاری، در طول جغرافیایی m ۳۰۵۹۸۶ تا ۳۰۶۱۷۶m و عرض جغرافیایی ۴۰۵۱۸۱۳m تا ۴۰۵۲۰۱۳m بر مبنای واحد اندازه‌گیری UTM در نظر

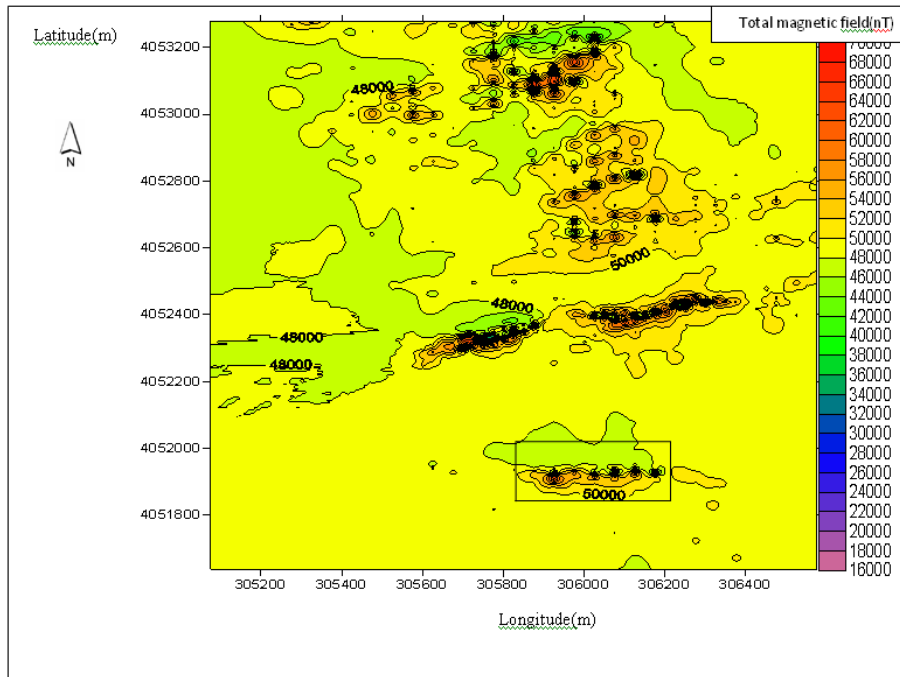


شکل ۴. موقعیت منطقه مورد بررسی سرخ دیزج زنجان در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ طارم (نابتیان، ۱۳۸۷).

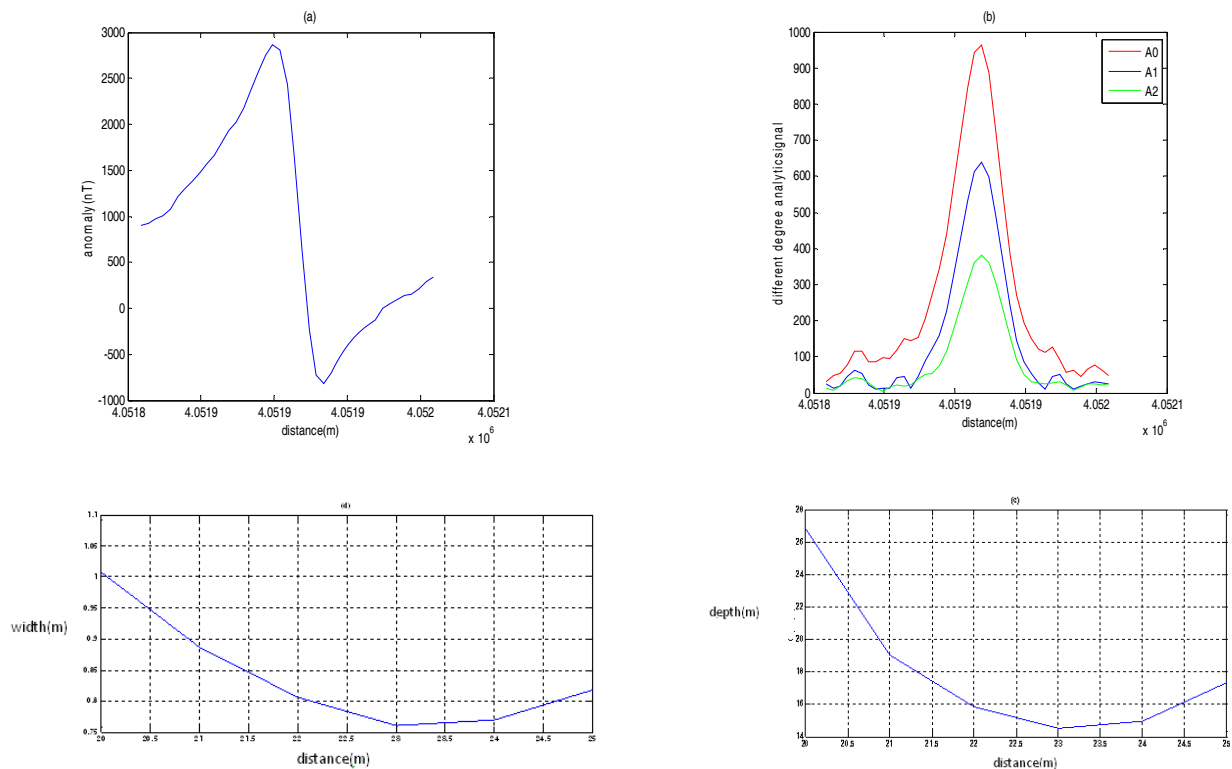
نیم‌رخ‌های E,D,C,B,A

جدول ۱. مشخصات پنج نیم‌رخ بررسی شده.

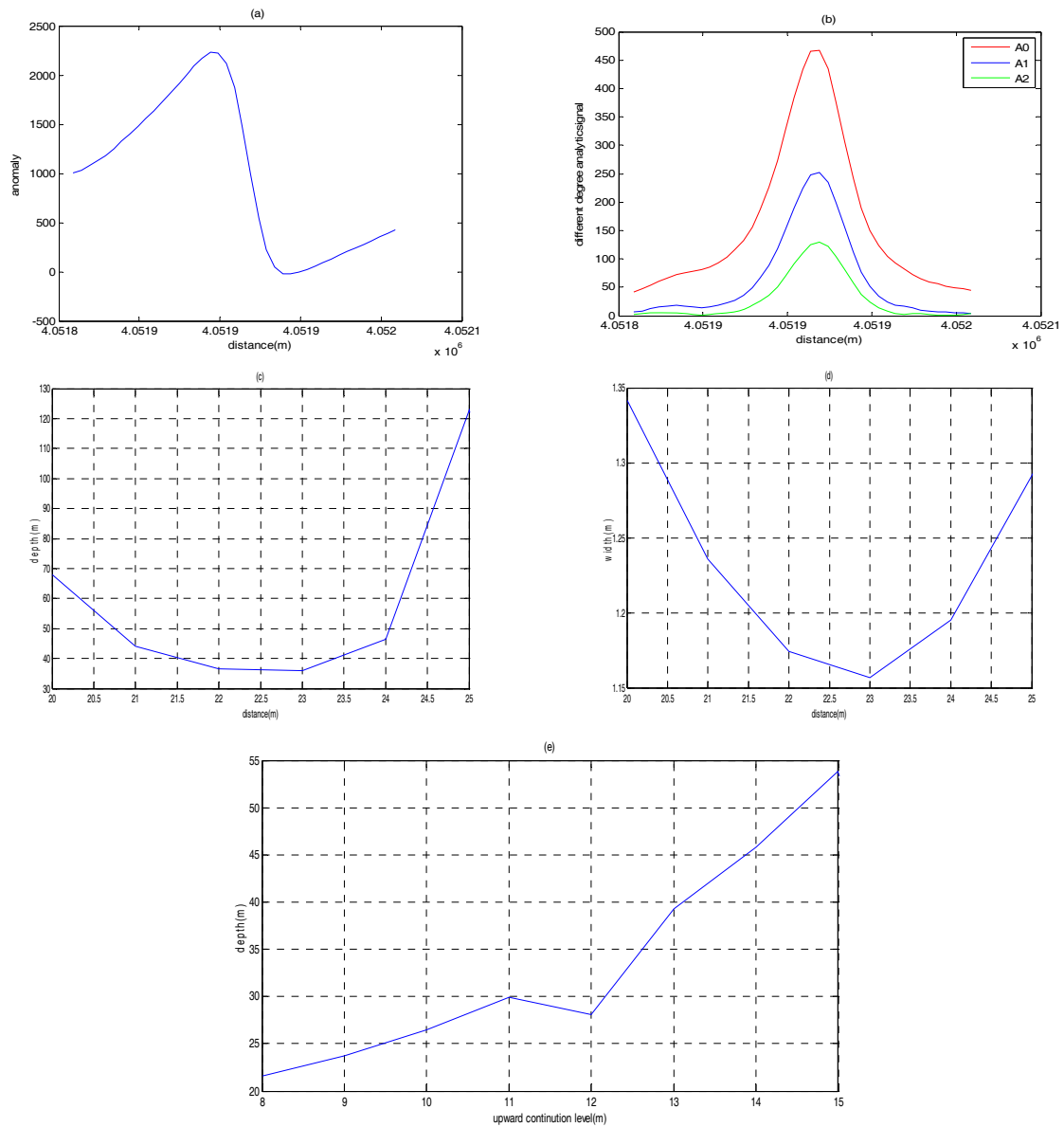
شماره نیم‌رخ	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
A	۳۰۶۱۷۶	۴۰۵۱۸۱۳-۴۰۵۲۰۱۳
B	۳۰۶۱۵۶	۴۰۵۱۸۱۳-۴۰۵۲۰۱۳
C	۳۰۶۱۳۶	۴۰۵۱۸۱۳-۴۰۵۲۰۱۳
D	۳۰۶۱۱۶	۴۰۵۱۸۱۳-۴۰۵۲۰۱۳
E	۳۰۵۹۸۶	۴۰۵۱۸۱۳-۴۰۵۲۰۱۳



شکل ۵. نقشه میدان مغناطیسی کلی منطقه سرخ دیزج زنجان در مقیاس ۱:۱۵۰۰۰ (منطقه مورد بررسی در داخل کادر مشخص شده است).



شکل ۶. نمودار نیم‌رخ B. a نمودار بی‌هنجاری مغناطیسی، b سیگنال تحلیلی، سیگنال تحلیلی درجه اول، سیگنال تحلیلی درجه دوم، c تغییرات عمق، e ضخامت دایک قبل از اعمال فیلتر ادامه فراسو.



شکل ۷. نمودار نیم‌رخ **A**. نمودار بی‌هنجاری مغناطیسی، **b** سیگنال تحلیلی، سیگنال تحلیلی درجه اول، **c** سیگنال تحلیلی درجه دوم، **d** تغییرات عمق، **e** ضخامت دایک بعد از اعمال فیلتر ادامه فراسو به اندازه ۱۰ متر بالاتر از سطح اندازه‌گیری، **e** تغییرات عمق با افزایش سطح ادامه فراسو.

جدول ۲. نتایج به‌دست آمده از نیم‌رخ‌های **A·B·C·D·E**.

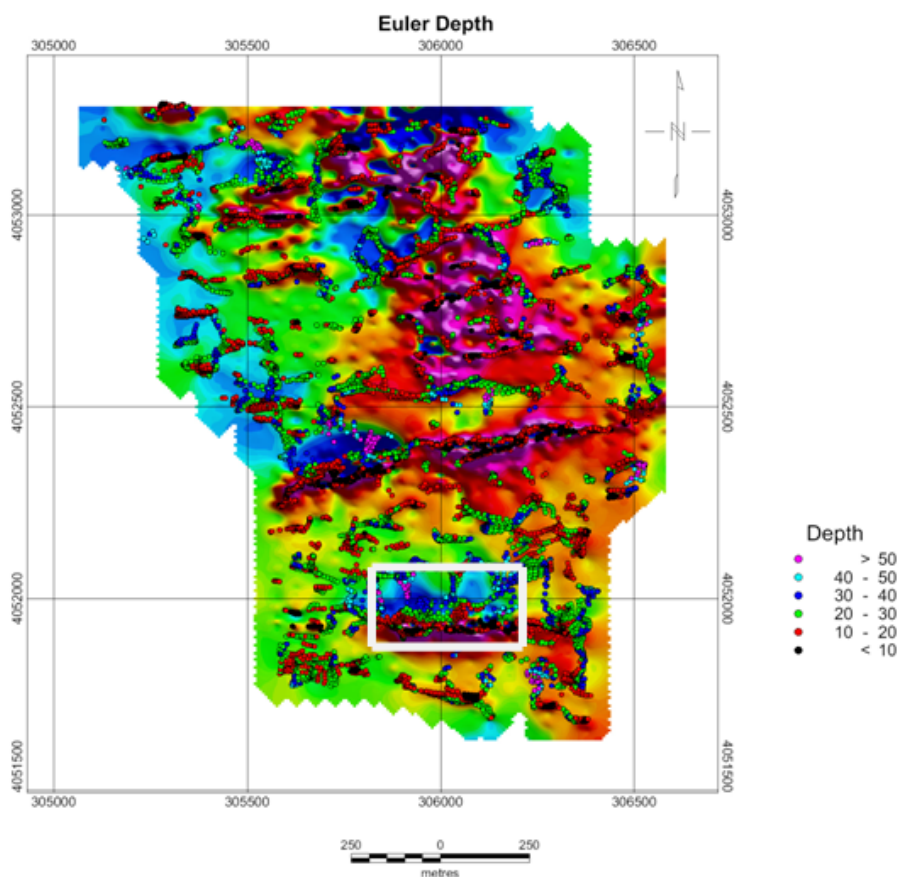
شماره نیم‌رخ	عمق (m)	ضخامت (m)
A	۳۵/۴	۴/۹
B	۳۸/۳	۲/۲
C	۳۹/۶	۲/۲
D	۵۳/۳	۱/۲
E	۳۷/۷	۲/۱

۶ مقایسه نتایج حاصل از روش سیگنال تحلیلی با روش اویلر

برای اطمینان بیشتر از نتایج مربوط به داده‌های مغناطیسی منطقه سرخ دیزج زنجان که با برنامه نوشته شده به روش سیگنال تحلیلی به دست آمده، نتایج حاصل را با نتایج به دست آمده از روش اویلر که با استفاده از نرم‌افزار ژئوسافت محاسبه شده است، مقایسه می‌کنیم. با مقایسه این دو روش نتیجه گرفته می‌شود که نتایج حاصل از هر دو روش بسیار به هم نزدیک است. برآورد عمق روش اویلر در شکل ۸ که با کادر سفیدرنگ مشخص شده است از ۳۰ متر تا کمی بالاتر از ۵۰ متر را نشان می‌دهد که این نتایج با نتایج جدول ۲ کاملاً مطابقت دارد.

۷ نتیجه‌گیری

مزیت عمده استفاده از فنون سیگنال تحلیلی برای تعیین پارامترهای منشأ مغناطیسی از بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، مستقل بودن شکل دامنه سیگنال تحلیلی از پارامترهای جهت‌دار مانند جهت مغناطیدگی و شیب منشأ است. استفاده از ضریب دامنه برای برآورد عمق می‌تواند تفسیر داده‌های مغناطیسی را آسان‌تر کند. با استفاده از روش سیگنال تحلیلی می‌توان مکان، عمق و گوشه‌های بی‌هنجاری را برآورد کرد. دامنه سیگنال تحلیلی یک تابع متقارن زنگوله‌ای شکل است که مقدار بیشینه آن دقیقاً بالای لبه بی‌هنجاری قرار گرفته است و پهنای منحنی دامنه با عمق رویه بی‌هنجاری نسبت مستقیم دارد.



شکل ۸. نتایج به دست آمده از روش اویلر، کادر سفیدرنگ، منطقه‌ای که نتایج حاصل از دو روش سیگنال تحلیلی و اویلر با یکدیگر مقایسه شده اند.

- Depth to magnetic source using the generalized analytic signal, *Geophysics*, **63**, 1947-1957.
- Nabighian, M. N., 1972, The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation, *Geophysics*, **37**, 507-517.
- Roest, W. R., Verhoef, J., and Pilkington, M., 1992, Magnetic interpretation using 3-D analytic signal, *Geophysics*, **57**, 116-125.
- Salem, A., Ravat, D., Gamey, T. J., and Ushijima, K., 2002, Analytic signal approach and its applicability in environmental magnetic investigations, *J. Appl. Geophys.*, **49**, 231-244.
- از این ویژگی سیگنال تحلیلی در برآورد پارامترهای منشأ مغناطیسی مانند عمق، مکان و ضخامت استفاده می‌شود. در روش‌های دیگر تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی به داشتن اطلاعات زیادی در زمینه زمین‌شناسی ساختار و پارامترهای دیگر نیاز است. مثلاً در روش واهمامیخت (دی‌کانولوشن) اوپلر که یکی از روش‌های برآورد عمق محسوب می‌شود، دانستن اندیس ساختاری یک امر مهم و تا حدودی مشکل است. در صورتی که در روش سیگنال تحلیلی نیاز چندانی به دانستن اطلاعات قبلی نیست. در منطقه سرخ دیزج زنجان که معدن آهن آپاتیت‌دار در ۳۲ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان زنجان و در ۲ کیلومتری جنوب غربی روستای سرخ دیزج قرار گرفته است، از تحلیل داده‌ها با استفاده از روش سیگنال تحلیلی نتایج زیر به‌دست آمده است: ۱- شکل ساختار بی‌هنجاری‌ها بسیار شبیه به دایک نازک است، بنابراین با توجه به اینکه کاربرد روش سیگنال تحلیلی برای دایک‌های نازک، دقت زیادی دارد، نتایج به‌دست آمده می‌تواند دقیق باشد و یا خطای کمتری داشته باشد. ۲- عمق سطح رویه بی‌هنجاری‌ها تقریباً از ۱۰ متر تا ۵۵ متر تغییر می‌کند که این نتایج با نتایج به‌دست آمده از روش اوپلر که با استفاده از نرم‌افزار ژئوسافت محاسبه شده است، بسیار نزدیک است. ۳- ضخامت دایک‌ها کمتر از یک متر و حداکثر ده متر است.

منابع

نباتیان، ق.، ۱۳۸۷، کانی‌شناسی، ژئوشیمی و ژنز کانسار آهن آپاتیت‌دار سرخ دیزج جنوب شرق زنجان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

Hsu, S. K., Sibuet, J. C., and Shyu, C. T., 1996, High-resolution detection of geologic boundaries from potential anomalies, An enhanced analytic signal technique, *Geophysics*, **61**, 373-386.

Hsu, S. K., Coppens, D., and Shyu, C. T., 1998,