

برآورد عمق و نوع توده‌های مولد بی‌هنجاری مغناطیسی با استفاده از تلفیق تابع‌های ویژه سیگنال تحلیلی و اوایلر واهمامیخت

کمال علمدار^{۱*}، ابوالقاسم کامکار روحانی^۲ و عبدالحمید انصاری^۳

^۱ دانشجوی دکتری اکتشاف معدن، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

^۳ دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

(دریافت: ۹۰/۶/۱۴، پذیرش نهایی: ۹۲/۲/۲۴)

چکیده

تابع‌های ویژه اوایلر و سیگنال تحلیلی نقش اساسی در تفسیر خودکار داده‌های میدان پتانسیل به‌ویژه داده‌های مغناطیس‌سنجی ایفا می‌کنند. در این مقاله با ترکیب این دو تابع روشی خودکار برای تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی دو و سه‌بعدی عرضه شده است. با این روش هر دو عمق و شاخص ساختاری (نوع توده) مربوط به توده‌های زیرسطحی برآورد می‌شود. معادله نهایی از جای‌گذاری مشتقات معادله اوایلر در تابع سیگنال تحلیلی حاصل می‌شود. این روش روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی مدل‌های گوناگون و در اعماق متفاوت به کار برده شده است و در همه موارد، نتایج قابل‌قبولی را به‌دست داده است. همچنین این روش روی داده‌های مغناطیس‌هوایی فلات ییلگارن استرالیای غربی به کار رفته که منجر به بازسازی دایک‌های موجود شده است. ضمناً این روش با موفقیت روی داده‌های مغناطیس‌سنجی زمینی نیم‌رخ در معدن سنگ آهن مرکزی ایران (بافق) به کار رفته و نتایج آن با استفاده از مدل‌سازی معکوس صحت‌سنجی شده است.

واژه‌های کلیدی: اوایلر، سیگنال تحلیلی، میدان پتانسیل، ییلگارن، سنگ آهن مرکزی، مدل‌سازی معکوس

Depth and body type estimation of the magnetic anomalies using analytic signal and Euler deconvolution.

Alamdard, K.¹, Kamkare-reouhani, A.² and Ansari, A. H.³

¹ Ph.D. Student in Mineral Exploration, Mining, Petroleum and Geophysics Department, Shahrood University of Technology, Iran

² Associate Professor, Mining, Petroleum and Geophysics Department, Shahrood University of Technology, Iran

³ Associate Professor, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Iran

(Received: 05 Sep 2011, Accepted: 14 May 2013)

Summary

A variety of semiautomatic methods, based on the use of derivatives of the magnetic anomalies, have been developed for the determination of both of the causative source parameters such as locations of boundaries and depths. One of these techniques is the method of the analytic signal for magnetic anomalies, which was initially used in its complex function form and makes use of the properties of the Hilbert transform. Initially, it was successfully applied on profile data to locate dike like bodies. The method was further developed by Roest et al. (1992) for the interpretation of aeromagnetic maps. Moreover, Bastani and Pedersen (2001) employed the method to estimate many parameters of dike like bodies, including depth, strike, dip, width, and magnetization.

E-mail: kamal.alamdard@gmail.com

دورنگار: ۰۲۷۳-۳۳۹۵۵۰۹

تلفن: ۰۹۱۳۳۵۱۸۸۱۴

*نگارنده رابط:

Also, Salem et al. (2002) demonstrated the feasibility of the method to locate compact magnetic objects often encountered in environmental applications. The success of the analytic signal method results from the fact that source locations of magnetic anomalies are obtained using only a few assumptions. For example, horizontal positions are estimated by the maxima of the amplitude of the analytic signal (AAS). In addition, depths can be obtained from the shape of the AAS or based on the ratio of the AAS to its higher derivatives. However, a correct estimate of the depth is obtained only when the source corresponds to the chosen model. Several attempts have been made to enable the analytic signal method to estimate both the depth and model type of magnetic sources. Furthermore, a number of automated methods only for source location from 2D (profile) magnetic data have been developed, based on either the local wavenumber. The main advantage of using derived quantities such as the local wavenumber (LW) and amplitude of the analytic signal (AS) is that they are generally independent of source magnetization and dip effects, therefore allowing positional parameters such as depth and horizontal location to be determined more directly than from the magnetic field.

Special function such as Euler deconvolution and analytic signal play an important role in potential field data interpretation particularly in the case of magnetic data. In this paper, a new method is proposed based on the combination of these two functions that can lead to automatic interpretation of 2D and 3D magnetic data. In this method both the depth and type of subsurface body will be estimated simultaneously. The final equation is produced with substitution of the Euler deconvolution derivatives in the analytic signal equation. The proposed method has been applied on synthetic and real magnetic data successfully. Also this method is applied on high-resolution aeromagnetic data from Yigarn plateau in Western Australia in which it enhanced the dykes. This method is applied on a ground magnetic profile in Central Iranian Iron ore in Bafgh and the results was tested using inverse modeling.

Keywords: Euler, Analytic signal, Potential field, Yigarn plateau, Central Iran Iron ore, Inverse modeling

۱ مقدمه

ازسوی روئست و همکاران (۱۹۹۲) برای تفسیر نقشه‌های مغناطیس‌سنجی توسعه یافت. باستانی و پدرسون (۲۰۰۱) این تابع را برای برآورد پارامترهای فیزیکی توده‌های دایکی شکل شامل عمق، امتداد، شیب، عرض و مغناطیس‌شدگی به کار بردند. سالم و همکاران (۲۰۰۲) کارایی این روش را در تعیین اشیاء مغناطیسی در تحقیقات محیط زیست معرفی کرد.

موفقیت سیگنال تحلیلی در تفسیر داده‌های مغناطیسی این است که در آن موقعیت توده‌های مولد بی‌هنجاری با حداقل فرض قابل دستیابی است. برای مثال موقعیت افقی توده از روی نقطه بیشینه دامنه تابع سیگنال تحلیلی ((Amplitude of AnalyticSignal) (AAS) تعیین

برای برآورد پارامترهای توده مولد بی‌هنجاری مغناطیسی مانند موقعیت مرزهای توده و عمق تا بالای آن چندین روش تفسیر خودکار بر مبنای استفاده از گرادیان‌های میدان مغناطیسی توسعه یافته است. یکی از این روش‌ها سیگنال تحلیلی است که در اوایل کاربرد خود به صورت تابع مختلط به کار گرفته شد (نبیقان، ۱۹۷۲؛ آتوچا راثو و همکاران، ۱۹۸۱؛ نلسون، ۱۹۸۸؛ پدرسون، ۱۹۸۹؛ روئست و همکاران، ۱۹۹۲، مک لئود و همکاران، ۱۹۹۳؛ ویلیامز و همکاران، ۲۰۰۲، ویلیامز، ۲۰۰۵). تابع سیگنال تحلیلی در ابتدا برای تفسیر داده‌های دوبعدی در امتداد نیم‌رخ مربوط به توده‌های دایکی شکل به کار گرفته شد (نبیقان، ۱۹۷۲، ۱۹۷۴، ۱۹۸۴؛ آتوچا راثو و همکاران، ۱۹۸۱) و در ادامه

T و تبدیل هیلبرت آن تعریف می‌شود. همچنین این تابع را می‌توان به صورت ترکیب مشتق افقی و قائم میدان مغناطیسی کل T بیان کرد (نیقیان، ۱۹۷۲). سیگنال تحلیلی به شکل آخر به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$A(x, y) = \left(\frac{\partial T}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial T}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial T}{\partial z} \hat{k} \right), \quad (1)$$

که در آن، $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ به ترتیب بردارهای واحد در امتداد x, y, z عدد موهومی $\sqrt{-1}$ ، مشتق قائم و $\frac{\partial T}{\partial x}$ و $\frac{\partial T}{\partial y}$ مشتق‌های افقی میدان مغناطیسی هستند. دامنه سیگنال تحلیلی سه‌بعدی از رابطه زیر نتیجه می‌شود:

$$|AAS(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2}, \quad (2)$$

معمولاً در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل از دو اصطلاح «مشتق سیگنال تحلیلی و سیگنال تحلیلی مشتق» به‌طور گسترده زیاد می‌شود. هنگامی که از رابطه مربوط به اندازه سیگنال تحلیلی رابطه (۱) در سه امتداد x, y و z به‌طور تحلیلی (ریاضی) مشتق گرفته شود، روابط مشتق سیگنال تحلیلی نتیجه می‌شود رابطه (۳). اما منظور از سیگنال تحلیلی مشتق این است که در رابطه مربوط به اندازه سیگنال تحلیلی از مشتق داده‌های میدان پتانسیل استفاده شود رابطه (۴). به عبارت دیگر مشتقات مرتبه اول و دوم سیگنال تحلیلی با محاسبه اندازه مؤلفه‌های گرادیان افقی از مشتق قائم میدان پتانسیل T حاصل می‌شود و نه از محاسبه مشتق قائم گرادیان افقی.

$$\frac{\partial |A(x, y)|}{\partial x} = \frac{1}{|A(x, y)|} \left\{ \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x \partial y} \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x \partial z} \frac{\partial T(x, y)}{\partial z} \right\} \quad (3)$$

می‌شود. به علاوه اینکه عمق تا بالای توده مولد نیز از روی شکل AAS (روئست و همکاران، ۱۹۹۲) و همچنین از روی نسبت بین AAS و مشتقات مرتبه بالاتر آن قابل برآورد است (هسو و همکاران، ۱۹۹۶، ۱۹۹۸؛ باستانی و پدرسون، ۲۰۰۱؛ سالم و همکاران، ۲۰۰۲، اسمیت و سالم، ۲۰۰۵، سالم و همکاران، ۲۰۰۸). باین حال در این روش‌ها برآورد عمق صحیح، زمانی حاصل می‌شود که مدل منبع زیرسطحی با مدل مفروض قرابت داشته باشد (تورستون و اسمیت، ۱۹۹۷). تلاش‌های زیادی برای استفاده از سیگنال تحلیلی در برآورد هم‌زمان نوع توده (هندسه) و عمق آن صورت گرفته است (دبگلیا و کارپل، ۱۹۹۷؛ اسمیت و همکاران، ۱۹۹۸؛ هسو و همکاران، ۱۹۹۸؛ تورستون و همکاران، ۱۹۹۹).

در این مقاله روش تفسیری خودکاری عرضه می‌شود که در آن بعضی از محدودیت‌های روش‌های قبلی مرتفع، و امکان برآورد هم‌زمان هندسه توده زیرسطحی و همچنین موقعیت افقی و قائم آن از روی داده‌های مغناطیسی مشاهده‌ای میسر شده است. اساس این روش جای‌گذاری مشتق معادله اوایلر در رابطه سیگنال تحلیلی داده‌های مغناطیسی است. این روش به اختصار AN-EUL نامیده می‌شود. با استفاده از این روش عمق و هندسه توده به‌طور هم‌زمان و در نقاط بیشینه تابع AAS تعیین می‌شود.

۲ نظریه روش

از آنجا که در نظریه روش از مشتق معادله اوایلر و همچنین سیگنال تحلیلی استفاده می‌شود، قبل از پرداختن به بحث اصلی ابتدا تعریف‌ها و اصطلاحات اولیه ذکر می‌شود.

۱-۲ تابع سیگنال تحلیلی

تابع سیگنال تحلیلی مختلط به صورت میدان کل مغناطیسی

۲-۲ تابع اویلر

برای محدوده‌های خارج از توده زیرسطحی، میدان‌های پتانسیل در معادله لاپلاس صدق می‌کنند. از طرفی رابطه لاپلاس برای توده‌های با هندسه خاص همگن است (بلکلی، ۱۹۹۵). تابع‌های همگن نیز در معادله اویلر صدق می‌کنند (تامسون، ۱۹۸۲؛ بلکلی، ۱۹۹۵، راوات، ۱۹۹۶). شکل سه‌بعدی معادله اویلر به صورت رابطه (۵) نوشته می‌شود:

$$x \frac{\partial T}{\partial x} + y \frac{\partial T}{\partial y} + z \frac{\partial T}{\partial z} + \eta T = x_0 \frac{\partial T}{\partial x} + y_0 \frac{\partial T}{\partial y} + z_0 \frac{\partial T}{\partial z} + \eta b, \quad (5)$$

که در آن (x, y, z) مختصات نقطه اندازه‌گیری، (x_0, y_0, z_0) مختصات موقعیت توده زیرسطحی، b میدان مغناطیسی ناحیه‌ای منطقه برداشت و η شاخص ساختاری است که نرخ میرایی بی‌هنجاری مغناطیسی در نقطه مشاهده‌ای را نسبت به افزایش فاصله از منبع نشان می‌دهد. شاخص ساختاری پارامتری است که هندسه و نوع توده زیرسطحی را مشخص می‌کند. برای مثال در مورد مدل همبری (کنتاکت) $\eta=0$ ، مدل دایک قائم و یا لبه سیل $\eta=1$ ، برای مرکز استوانه افقی یا قائم $\eta=2$ و برای کره $\eta=3$ در نظر گرفته می‌شود (تامسون، ۱۹۸۲؛ ریید و همکاران، ۱۹۹۰).

۳-۲ تلفیق دو تابع اویلر و سیگنال تحلیلی

همان‌طور که گفته شد اساس این روش تلفیق دو تابع ویژه سیگنال تحلیلی و اویلر واهمامیخت است که برای این کار مشتق معادله اویلر در تابع سیگنال تحلیلی جای‌گذاری می‌شود. در نتیجه ابتدا از معادله اویلر نسبت به x ، y و z مشتق گرفته می‌شود که به ترتیب روابط زیر نتیجه می‌شوند:

$$\frac{\partial |A(x, y)|}{\partial y} = \frac{1}{|A(x, y)|} \left\{ \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y \partial x} \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y \partial z} \frac{\partial T(x, y)}{\partial z} \right\}$$

$$\frac{\partial |A(x, y)|}{\partial z} = \frac{1}{|A(x, y)|} \left\{ \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial z \partial x} \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial z \partial y} \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial z^2} \frac{\partial T(x, y)}{\partial z} \right\}$$

$$|A_n^y(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial \phi_n^y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_n^y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_n^y}{\partial z} \right)^2} = \frac{\partial^n}{\partial y^n} (|A(x, y)|), \quad (4)$$

$$|A_n^x(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial \phi_n^x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_n^x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_n^x}{\partial z} \right)^2} = \frac{\partial^n}{\partial x^n} (|A(x, y)|),$$

$$|A_n^z(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial \phi_n^z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_n^z}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_n^z}{\partial z} \right)^2} = \frac{\partial^n}{\partial z^n} (|A(x, y)|),$$

که در آن، منظور از بالانویس Z مشتق قائم میدان کل است.

دامنه سیگنال تحلیلی، AAS و مشتقات مرتبه بالاتر آن از چندین راه قابل محاسبه است. مشتقات افقی مستقیماً از روی داده‌های مغناطیسی و با استفاده از روش اختلاف محدود (برای مثال فیلتر تفاضل 3×3) قابل محاسبه است. همچنین هر دو مشتق قائم و افقی را می‌توان در حوزه بسامد و با استفاده از تبدیل فوریه سریع (FFT) محاسبه کرد (بلکلی، ۱۹۹۵).

حال طرفین روابط فوق را به توان دو می‌رسانیم و با هم جمع می‌کنیم و از معادله حاصل جذر می‌گیریم:

$$z_0 \left(\sqrt{\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z \partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)^2} \right)_{x=x_0, y=y_0} = (\eta+1) \left(\sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2} \right)_{x=x_0, y=y_0} \quad (12)$$

طرف راست رابطه فوق دامنه سیگنال تحلیلی ساده $|AAS_0|$ و طرف چپ آن مشتق قائم مرتبه اول سیگنال تحلیلی $|AAS_1|$ است. بنابراین رابطه (۱۲) را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$z_0 |AAS_1|_{x=x_0, y=y_0} = -(\eta+1) |AAS_0|_{x=x_0, y=y_0} \quad (13)$$

رابطه (۱۳) بیانگر این مطلب است که عمق یک منبع بی‌هنگاری مغناطیسی را می‌توان براساس نسبت بین $|AAS_0|$ و $|AAS_1|$ در نقطه روی مرکز منبع برآورد کرد. برای مثال در مورد توده‌های با شاخص ساختاری مشخص چهار رابطه زیر از رابطه نهایی (۱۳) قابل استخراج است:

$$z_0 = \left| \frac{AAS_0}{AAS_1} \right|_{x=x_0, y=y_0} \quad \text{for contact with } \eta=0 \quad (14a)$$

$$z_0 = 2 \left| \frac{AAS_0}{AAS_1} \right|_{x=x_0, y=y_0} \quad \text{for Dyke with } \eta=1 \quad (14b)$$

$$z_0 = 3 \left| \frac{AAS_0}{AAS_1} \right|_{x=x_0, y=y_0} \quad \text{for Cylinder with } \eta=2 \quad (14c)$$

$$z_0 = 4 \left| \frac{AAS_0}{AAS_1} \right|_{x=x_0, y=y_0} \quad \text{for Sphere with } \eta=3 \quad (14d)$$

بنابراین، اگر هندسه توده شناخته شده فرض شود، با استفاده از مشتق معادله اوایلر در سه امتداد و جای‌گذاری در عبارت سیگنال تحلیلی می‌توان رابطه کلی و تعمیم

$$(x-x_0) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + (y-y_0) \frac{\partial^2 T}{\partial y \partial x} + (z-z_0) \frac{\partial^2 T}{\partial z \partial x} = -(\eta+1) \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (6)$$

$$(x-x_0) \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y} + (y-y_0) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + (z-z_0) \frac{\partial^2 T}{\partial z \partial y} = -(\eta+1) \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (7)$$

$$(x-x_0) \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z} + (y-y_0) \frac{\partial^2 T}{\partial y \partial z} + (z-z_0) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -(\eta+1) \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (8)$$

با یک نگاه به روابط فوق متوجه می‌شویم که اگر عبارت‌های طرف راست آنها را به توان دو برسانیم و با هم جمع کنیم، معادله نهایی رابطه سیگنال تحلیلی است اما طرف چپ را چون از سه جمله تشکیل شده نمی‌توان به راحتی به توان رساند، جدا از اینکه با این کار معادله نهایی پیچیده تر خواهد شد. به همین منظور یک فرض ساده کننده را به کار می‌گیریم بدین صورت که فرض می‌کنیم موقعیت نقطه مشاهده‌ای دقیقاً در بالای مرکز توده قرار دارد (یعنی نقاط (x, y, z) بر هم منطبق هستند) به عبارت دیگر $x=x_0$ و $y=y_0$. نقطه z_0 را نیز بر سطح تراز (سطح زمین) در نظر می‌گیریم یعنی $z_0=0$. با اعمال دو فرض فوق در روابط (۶) تا (۸) به روابط ساده شده زیر می‌رسیم:

$$z_0 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z \partial x} \right)_{x=x_0, y=y_0} = -(\eta+1) \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=x_0, y=y_0} \quad (9)$$

$$z_0 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z \partial y} \right)_{x=x_0, y=y_0} = -(\eta+1) \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{x=x_0, y=y_0} \quad (10)$$

$$z_0 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)_{x=x_0, y=y_0} = -(\eta+1) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{x=x_0, y=y_0} \quad (11)$$

یافته‌ای را برای برآورد عمق توده‌های مغناطیسی به دست آورد. روابط مشابهی از سوی محققان گوناگون توسعه داده شده که می‌توان از آنها برای برآورد عمق توده‌های مغناطیسی استفاده کرد (سالم و همکاران، ۲۰۰۲؛ باستانی و پدرسون، ۲۰۰۱). اما مزیت اصلی روش عرضه شده در این تحقیق آن است که با جای‌گذاری مشتق اوایلر در تابع سیگنال تحلیلی به معادله نهایی و کلی خواهیم رسید و امکان برآورد نوع توده و عمق تا بالای آن در نقاط روی مرکز میسر می‌شود. رابطه نهایی از این جهت یک رابطه کلی تلقی می‌شود که با وارد کردن عدد شاخص ساختاری مدل‌های گوناگون، می‌توان رابطه برآورد عمق مربوط به آنها را به دست آورد. مزیت دیگر این روش آن است که فقط به توده‌های با هندسه خاص و شاخص ساختاری صحیح محدود نیست و می‌توان آن را برای توده‌های با هندسه‌های متفاوت به کار برد (راوات، ۱۹۹۶).

اگر بار دیگر از معادله اوایلر نسبت به x و y مشتق بگیریم و مراحل قبل را مجدداً تکرار کنیم به رابطه زیر می‌رسیم:

$$z_0 |AAS_2|_{x=x_0, y=y_0} = -(\eta + 2) |AAS_1|_{x=x_0, y=y_0} \quad (15)$$

که در آن، $|AAS_2|$ مشتق قائم مرتبه دوم سیگنال تحلیلی است. با جای‌گذاری رابطه (۱۵) در رابطه (۱۳) روابط زیر نتیجه می‌شود:

$$\eta = \left(\frac{2|AAS_1|^2 - |AAS_2||AAS_0|}{|AAS_2||AAS_0| - |AAS_1|^2} \right)_{x=x_0, y=y_0} \quad (16)$$

$$Z_0 = \left(\frac{|AAS_1||AAS_0|}{|AAS_2||AAS_0| - |AAS_1|^2} \right)_{x=x_0, y=y_0} \quad (17)$$

روابط فوق نشان می‌دهند که هر دو پارامتر شاخص ساختاری و عمق بی‌هنجاری مغناطیسی را

می‌توان به‌طور هم‌زمان و با استفاده از سیگنال تحلیلی و مشتق قائم مرتبه اول و دوم آن در نقطه روی مرکز برآورد کرد. نقطه روی مرکز نیز از روی بیشینه مقدار سیگنال تحلیلی تعیین می‌شود. یکی از مشکلات معادله اوایلر مجهول بودن نوع شاخص ساختاری و در نتیجه لزوم برآورد آن در خلال برآورد عمق توده است. به عبارت دیگر با این مشکل امکان برآورد هم‌زمان عمق و نوع توده وجود ندارد و معمولاً ابتدا نوع توده (پارامتر شاخص ساختاری) برآورد و در معادله اوایلر جای‌گذاری و سپس اقدام به برآورد عمق توده می‌شود. مسلم است هرگونه اشتباه و خطا در برآورد شاخص ساختاری، باعث بروز خطا در نتایج برآورد عمق خواهد شد. در نتیجه راه حل این مشکل برآورد هم‌زمان شاخص ساختاری و عمق توده است. یکی از این روش‌ها تلفیق معادله اوایلر و سیگنال تحلیلی است که هدف اصلی این مقاله نیز هست.

۳ کاربرد روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی

به منظور بررسی کارایی روش موردنظر، در این قسمت آن را روی داده‌های مغناطیسی مدل‌های مصنوعی دو و سه‌بعدی به کار می‌بریم. در مثال اول روش پیش‌گفته روی داده‌های مغناطیسی دو‌بعدی مدل دایک نازک به کار برده شده است. توده دایک در عمق ۶ متری از سطح زمین قرار دارد و ضخامت آن ۶ متر در نظر گرفته شده است. مدل فقط دارای مغناطیس القایی با شدت ۴۵۰۰۰ نانوتسلا و زاویه میل وانحراف به ترتیب برابر با ۷۰ و ۵ درجه است (شکل ۱-الف). شکل ۱-ب منحنی پاسخ مغناطیسی دایک نازک را نشان می‌دهد که از یک دنباله مثبت و یک دنباله منفی تشکیل شده است و بیانگر مایل بودن بردار مغناطیس آن است. شکل ۱-ج مربوط به سیگنال تحلیلی و مشتق قائم

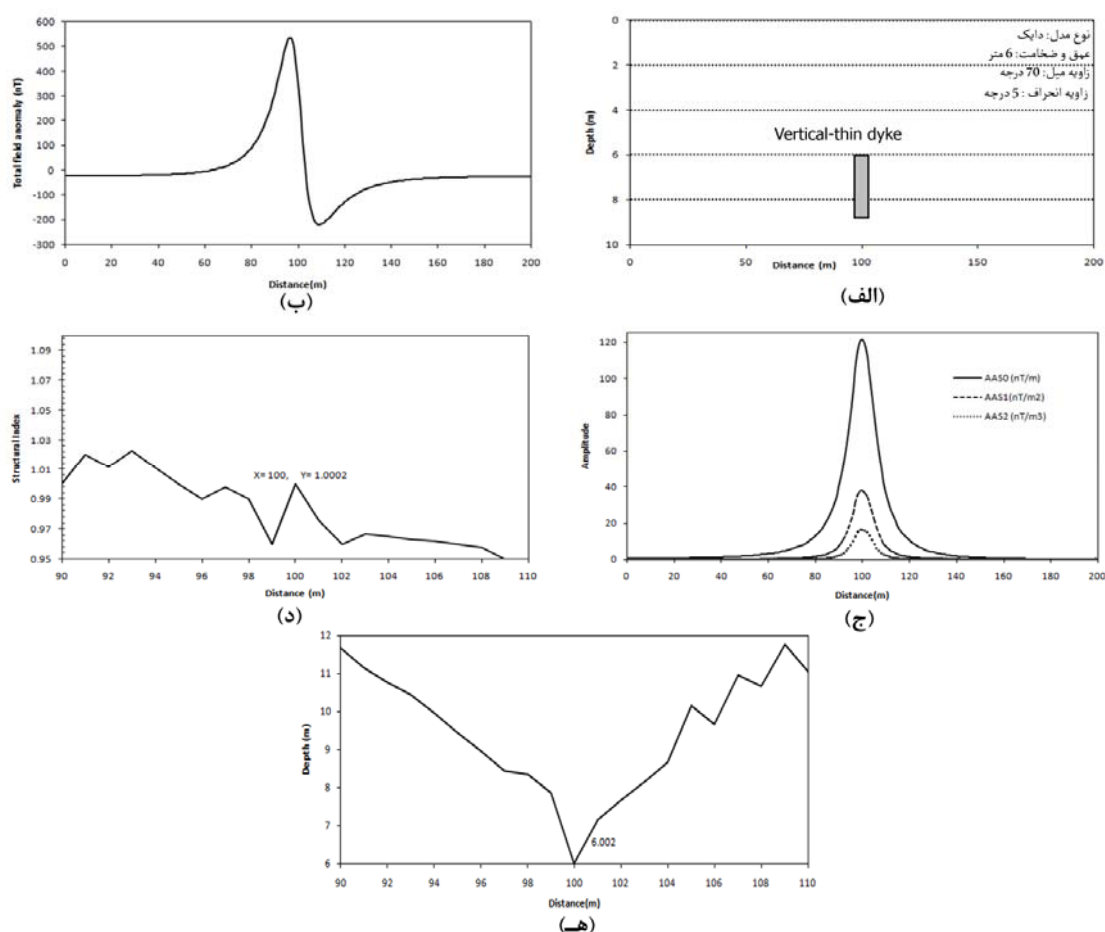
نمایش گرافیکی نتایج حاصل از برآورد عمق و نوع توده مربوط به مثال مصنوعی دوم را نشان می‌دهد. مثال سوم، کاربرد سیگنال تحلیلی و مشتقات آنرا در تعیین حدود توده‌های زیرسطحی نشان می‌دهد. مدل مصنوعی از سه توده منشوری با سطح مقطع مستطیل شکل تشکیل شده که در عمق‌های متفاوت قرار دارند. شکل ۴-الف پاسخ مغناطیسی به همراه سطح مقطع سه توده منشوری را نشان می‌دهد. پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در تولید پاسخ مغناطیسی آنها در جدول ۲ آمده است. شکل ۴-ب مربوط به سیگنال تحلیلی متداول (ساده) داده‌های مغناطیسی شکل ۴-الف است. در این شکل بیشینه مقدار سیگنال تحلیلی روی توده‌ها قرار گرفته اما وجود هم‌پوشانی بین سه توده سبب شده تا حدود توده از هم تفکیک نشود. شکل ۴-ج نقشه مشتق قائم سیگنال تحلیلی قسمت (ب) را نشان می‌دهد. در این شکل حدود دو توده منشوری کم‌عمق‌تر مشخص شده اما موقعیت توده کره همچنان مخفی است. شکل ۴-د نقشه مشتق قائم مرتبه دوم سیگنال تحلیلی را نشان می‌دهد که در آن موقعیت هر سه توده مولد با دقت قابل قبولی برجسته شده است.

جدول ۱. نتایج برآورد دو پارامتر فیزیکی عمق و شاخص ساختاری توده‌های استوانه قائم مدل مصنوعی مثال دوم.

نوع توده	موقعیت افقی (متر)	عمق (متر)	شاخص ساختاری
استوانه قائم A	۵۰۰	۲۰۲/۳۴۵	۲
استوانه قائم B	۱۰۰۰	۳۰۹/۵	۱/۹۸
استوانه قائم C	۱۵۰۰	۲۰۱/۵۴۳	۲/۰۵

مرتبه اول و دوم آن می‌باشد. در حالت دو بُعدی منحنی سیگنال تحلیلی صرفنظر از نوع توده و امتداد مغناطیس‌شدگی آن تابع زنگوله شکلی را تشکیل می‌دهد که بیشینه مقدار آن روی توده مولد قرار می‌گیرد. در این شکل نقطه بیشینه هر سه منحنی بر هم منطبق و موقعیت توده دایک ($X=100$) را نشان می‌دهد که موقعیت واقعی آن در شکل ۱-الف را کاملاً تأیید می‌کند. شکل ۱-د و ۱-ه به ترتیب برآورد شاخص ساختاری و عمق توده دایک را نشان می‌دهد که برحسب فاصله از مبدأ نیم‌رخ داده شده است. در نقطه $X=100$ که موقعیت افقی توده است مقدار شاخص ساختاری توده $1/002$ و عمق آن $6/002$ متر برآورد شده که مقادیر حقیقی معادل (به ترتیب ۱ و ۶ متر) در تولید بی‌هنجاری مغناطیسی آن را تأیید می‌کند.

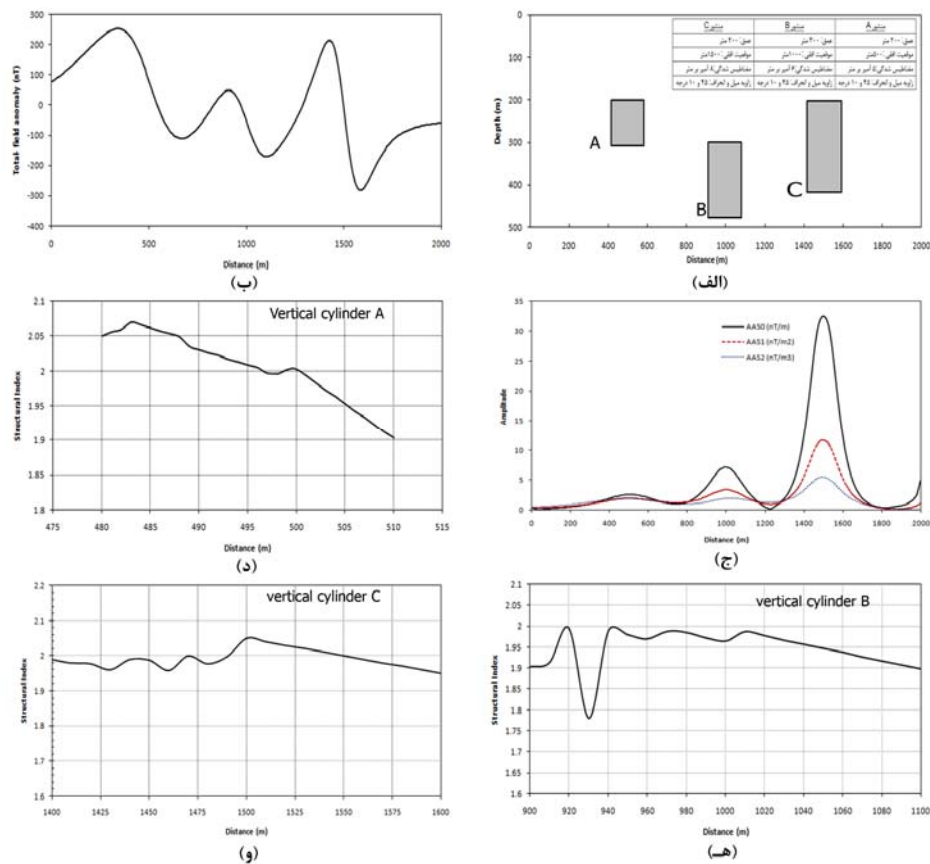
مثال دوم مربوط به کاربرد روش روی مدل مصنوعی متشکل از سه توده استوانه قائم است که مقطع آنها در شکل ۲-الف نشان داده شده است و به ترتیب در موقعیت‌های افقی ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متری قرار دارند. استوانه قائم A و C در عمق ۲۰۰ متری و استوانه B در عمق ۳۰۰ متری از سطح زمین قرار دارد. شدت مغناطیس‌شدگی توده‌های A، B و C به ترتیب ۵، ۶ و ۸ آمپر بر متر فرض شده است. زوایای میل و انحراف مغناطیس‌شدگی هر سه توده یکسان و برابر با ۴۵ و ۱۰ درجه در نظر گرفته شده است. پاسخ مغناطیسی سه توده در شکل ۲-ب آمده است. نمودار سیگنال تحلیلی توده و مشتقات آن در شکل ۲-ج آمده است. در این شکل نقاط بیشینه سیگنال تحلیلی منطبق بر توده‌های استوانه قائم است. نتیجه برآورد شاخص ساختاری توده‌های استوانه قائم A، B و C به ترتیب در شکل‌های ۲-د، ۲-ه و ۲-و آمده است. جدول ۱ نتایج عددی برآورد پارامترهای عمق و شاخص ساختاری توده‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۳



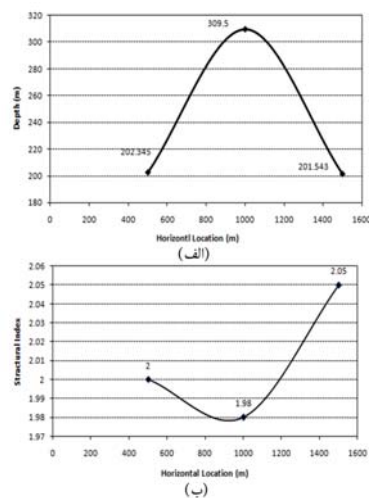
شکل ۱. کاربرد روش روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی دو بُعدی دایک نازک. (الف) مقطع دو بُعدی توده دایک نازک در موقعیت افقی ۱۰۰ متر و در عمق ۱۰۰ متری از سطح زمین. (ب) پاسخ مغناطیسی توده دایک به ازای بردار مغناطیس‌شدگی با شدت ۴۵۰۰۰ نانوتسلا و زاویه میل و انحراف ۷۰ و ۵ درجه. (ج) منحنی سیگنال تحلیلی و مشتقات قائم مرتبه اول و دوم داده‌های قسمت الف. بیشینه سیگنال تحلیلی به صورت تابع زنگوله‌ای شکل روی موقعیت دایک قرار گرفته است. (د) منحنی برآورد شاخص ساختاری توده دایک در مقابل فاصله از مبدأ نیم‌رخ. (ه) نمودار برآورد عمق توده دایک در مقابل فاصله از مبدأ نیم‌رخ. مقادیر عمق و شاخص ساختاری برآورد شده به ترتیب ۶/۰۰۲ متر و ۱/۰۰۲ تعیین شده است.

جدول ۲. پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در توده‌های مولد مدل مصنوعی مثال سوم.

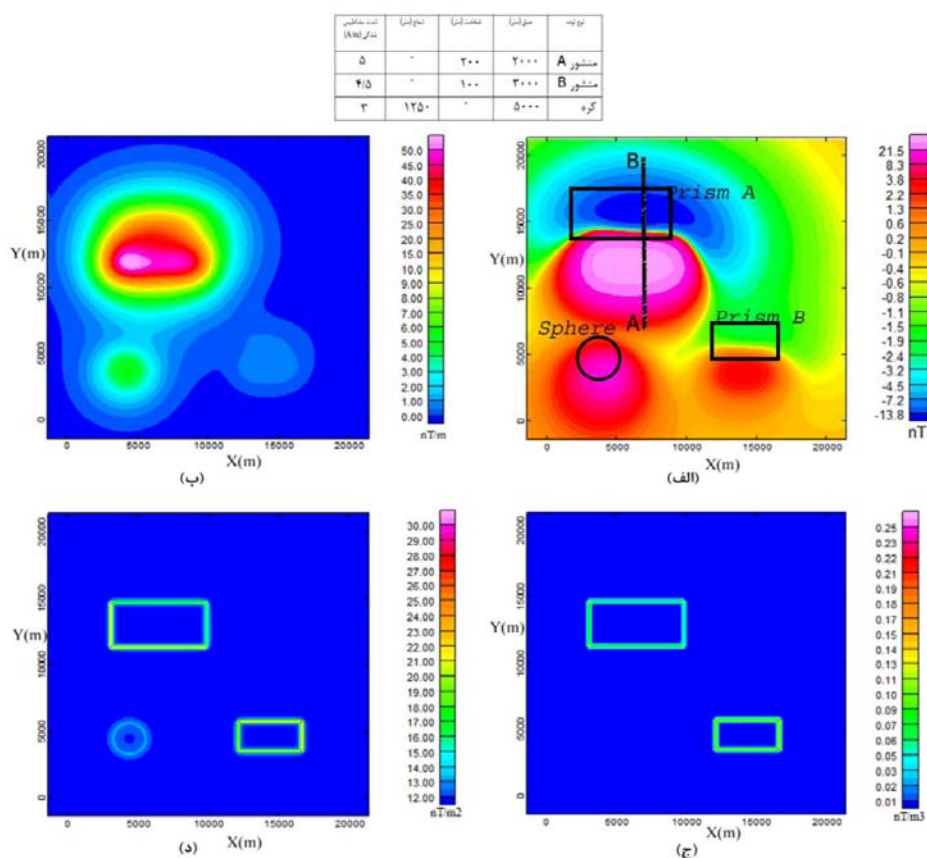
نوع توده	موقعیت طولی (X) (متر)	موقعیت عرضی (Y) (متر)	عمق (متر)	ضخامت (متر)	شعاع (متر)	شدت مغناطیس‌شدگی (A/m)
منشور A	۸۰۰۰	۱۵۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰	—	۵
منشور B	۱۵۰۰۰	۴۰۰۰	۳۰۰۰	۱۰۰	—	۴/۵
کره	۳۷۵۰	۳۷۵۰	۵۰۰۰	—	۱۲۵۰	۳



شکل ۲. کاربرد روش روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی دوبعدی مدل مصنوعی مشکل از سه توده استوانه قائم. (الف) مقطع دوبعدی توده‌های استوانه قائم در موقعیت افقی ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متر و در اعماق مختلف. (ب) پاسخ مغناطیسی مدل مصنوعی به ازای شدت مغناطیس‌شدگی به ترتیب ۶، ۵ و ۸ آمپر بر متر و زاویه میل و انحراف ۴۵ و ۱۰ درجه. (ج) منحنی سیگنال تحلیلی و مشتقات قائم مرتبه اول و دوم داده‌های قسمت (الف). نقاط بیشینه سیگنال تحلیلی به صورت تابع زنگوله‌ای شکل موقعیت توده‌های سه گانه را نشان می‌دهد. (د) منحنی برآورد شاخص ساختاری استوانه قائم A در مقابل فاصله از مبدأ نیم‌رخ. (هـ) منحنی برآورد شاخص ساختاری استوانه قائم B در مقابل فاصله از مبدأ نیم‌رخ. (و) منحنی برآورد شاخص ساختاری استوانه قائم C در مقابل فاصله از مبدأ نیم‌رخ. جدول ۱ نتایج عددی برآورد عمق و شاخص ساختاری سه توده را نشان می‌دهد.



شکل ۳. نمایش نتایج برآورد عمق و نوع توده مربوط به مدل مصنوعی مثال دوم.



شکل ۴. کاربرد روش روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی سه‌بعدی مدل مصنوعی مشکل از دو توده منشوری و یک توده کره. (الف) پاسخ مغناطیسی مدل مصنوعی به ازاء بردار مغناطیس‌شدگی با شدت ۶۰۰۰۰ نانوتسلا و زاویه میل و انحراف ۶۵ و ۳ درجه. سطح مقطع توده‌ها با کادر سیاه‌رنگ مشخص شده است. پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در جدول ۲ آمده است. نیم‌رخ AB مقطع شمالی جنوبی مورد استفاده در شکل ۴ را نشان می‌دهد. (ب) نقشه سیگنال تحلیلی داده‌های مغناطیسی قسمت الف. بیشینه سیگنال تحلیلی موقعیت توده‌های سه‌گانه را نشان می‌دهد. اما به‌علت هم‌پوشانی بین توده‌ها، برآورد مرز به‌صورت متداخل است. (ج) نقشه مشتق قائم مرتبه اول داده‌های سیگنال تحلیلی قسمت (ب). در این شکل موقعیت توده‌های منشوری برجسته شده اما کره به‌علت عمق بیشتر همچنان مخفی است. (د) نقشه مشتق قائم مرتبه دوم سیگنال تحلیلی داده‌های قسمت الف. در این شکل هر سه توده نسبت به اطراف برجسته شده است.

شاخص ساختاری توده منشوری شکل ۴

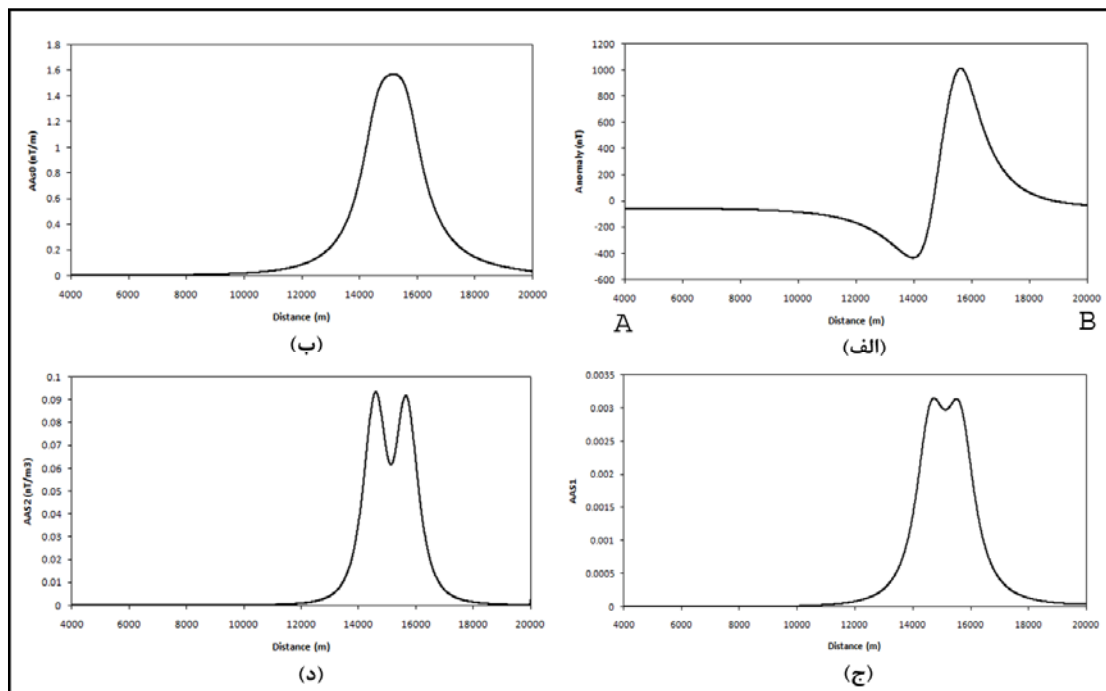
به‌ترتیب ۱۹۸۹/۸۴ متر و ۱/۸۸۹۳ برآورد شده است.

در مثال چهارم کارایی تابع سیگنال تحلیلی و مشتقات آن در تعیین توده‌های زیرسطحی ترکیبی بررسی شده است. در این مثال علاوه بر مشتق قائم مشتق افقی سیگنال تحلیلی نیز محاسبه شده است. مدل مصنوعی از سه توده منشوری A، B و C تشکیل شده که پارامترهای فیزیکی آن در جدول ۳ آمده است. شکل ۶-الف پاسخ مغناطیسی توده‌ها را نشان می‌دهد. زاویه میل و انحراف بردار

همچنین در این مثال به‌منظور آزمون کارایی روش در مورد داده‌های سه‌بعدی مقطع شمالی - جنوبی AB از توده منشوری A تهیه شد که در شکل ۵-الف آمده است. شکل‌های ۵-الف، ۵-ب و ۵-ج به‌ترتیب نمودار سیگنال تحلیلی و مشتقات قائم مرتبه اول و دوم داده‌های مقطع (الف) را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها بیشینه مقدار سیگنال تحلیلی لبه‌های توده منشوری را نشان می‌دهد. به‌طوری‌که با افزایش مرتبه مشتق، دقت آن بهبود می‌یابد. با توجه به روش مورد استفاده در این مقاله، عمق و

سیگنال تحلیلی قسمت ب را نشان می‌دهد که در آن موقعیت توده‌ها با دقت زیادی، نسبت به اطراف برجسته شده است. شکل‌های ۶-د و ۶-و به ترتیب نقشه مشتق افقی سیگنال تحلیلی نسبت به امتداد x و y را نشان می‌دهد که در آنها لبه‌های قائم و افقی توده‌های منشوری تعیین شده است.

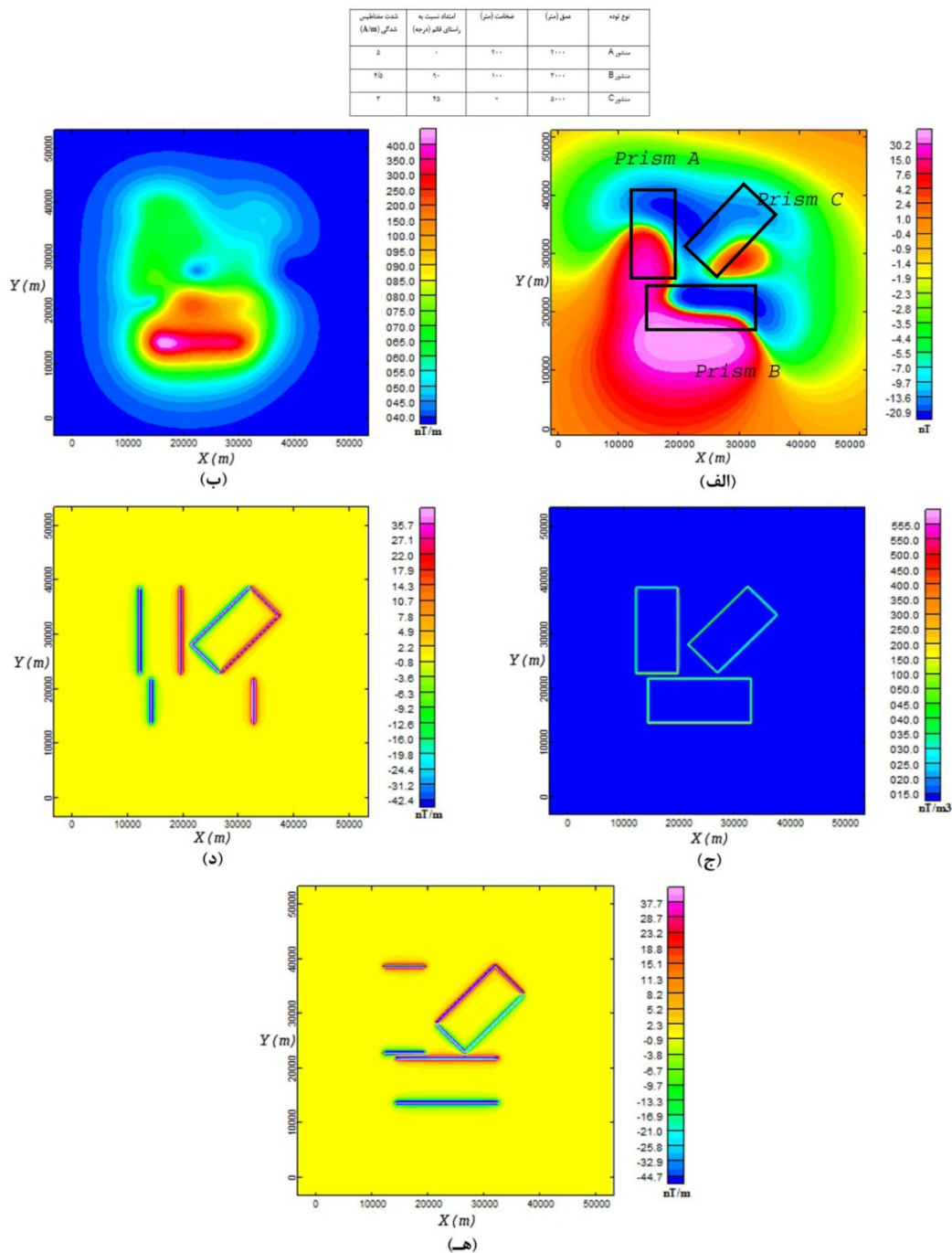
مغناطیس‌شدگی توده‌ها به ترتیب ۶۵ و ۲۰ درجه فرض شده است. شکل ۶-ب نقشه سیگنال تحلیلی ساده داده‌های مغناطیسی قسمت الف را نشان می‌دهد. در این شکل به دلیل هم‌پوشانی توده‌ها که عمده‌تاً از فاصله و امتداد قرارگیری آنها نتیجه می‌شود، مرز توده‌ها متداخل تعیین شده است. شکل ۶-ج نقشه مشتق قائم مرتبه دوم



شکل ۵. کاربرد روش روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی دوبعدی مقطع شمالی - جنوبی AB منشور A شکل ۳. (الف) نیم‌رخ مغناطیسی مقطع مغناطیسی پیش‌گفته به طول ۲۰ کیلومتر. (ب) منحنی سیگنال تحلیلی داده‌های مغناطیسی قسمت الف. (ج) منحنی مشتق قائم مرتبه اول سیگنال تحلیلی قسمت (ب). در این شکل بیشینه مقدار تابع لبه‌های توه منشوری را مشخص می‌کند. (د) منحنی مشتق قائم مرتبه دوم سیگنال تحلیلی قسمت (ب). نتایج برآورد عمق و شاخص ساختاری مقطع AB در خروجی برنامه رایانه‌ای تهیه شده آمده است که به ترتیب ۱۹۸۹/۸۴ متر و ۱/۸۸۹۳ برآورد شده است.

جدول ۳. پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در مدل مصنوعی مثال چهارم.

نوع توده	موقعیت طولی (X) (متر)	موقعیت عرضی (Y) (متر)	عمق (متر)	ضخامت (متر)	امتداد نسبت به راستای قائم (درجه)	شدت مغناطیس‌شدگی (A/m)
منشور A	۱۸۰۰۰	۳۰۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰	۰	۵
منشور B	۲۵۰۰۰	۱۵۰۰۰	۳۰۰۰	۱۰۰	۹۰	۴/۵
منشور C	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۵۰۰۰	-	۴۵	۳



شکل ۶. کاربرد روش روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی سه‌بُعدی مدل مصنوعی مشکل از سه توده منشوری. پارامترهای فیزیکی مورد استفاده در تولید پاسخ مغناطیسی مدل در جدول ۳ آمده است. (الف) پاسخ مغناطیسی مدل مصنوعی به ازای بردار مغناطیس‌شدگی با شدت ۶۰۰۰۰ نانوتسلا و زاویه میل و انحراف ۶۵ و ۲۰ درجه. سطح مقطع توده‌ها با کادر سیاه‌رنگ مشخص شده است. (ب) نقشه سیگنال تحلیلی داده‌های مغناطیسی قسمت الف. بیشینه سیگنال تحلیلی موقعیت توده‌های سه‌گانه را نشان می‌دهد. اما به‌علت هم‌پوشانی بین توده‌ها در نتیجه فاصله و امتداد آنها، برآورد مرز به‌صورت متداخل است. (ج) نقشه مشتق قائم مرتبه دوم داده‌های سیگنال تحلیلی قسمت ب. در این شکل موقعیت توده‌های منشوری برجسته شده است. (د) نقشه مشتق افقی سیگنال تحلیلی داده‌های قسمت الف نسبت به محور X . در این شکل مرزهای قائم توده برجسته شده است. (ه) نقشه مشتق افقی سیگنال تحلیلی داده‌های قسمت الف نسبت به محور Y . در این شکل مرزهای افقی توده برجسته شده است.

۴ کاربرد روی داده‌های مغناطیسی واقعی

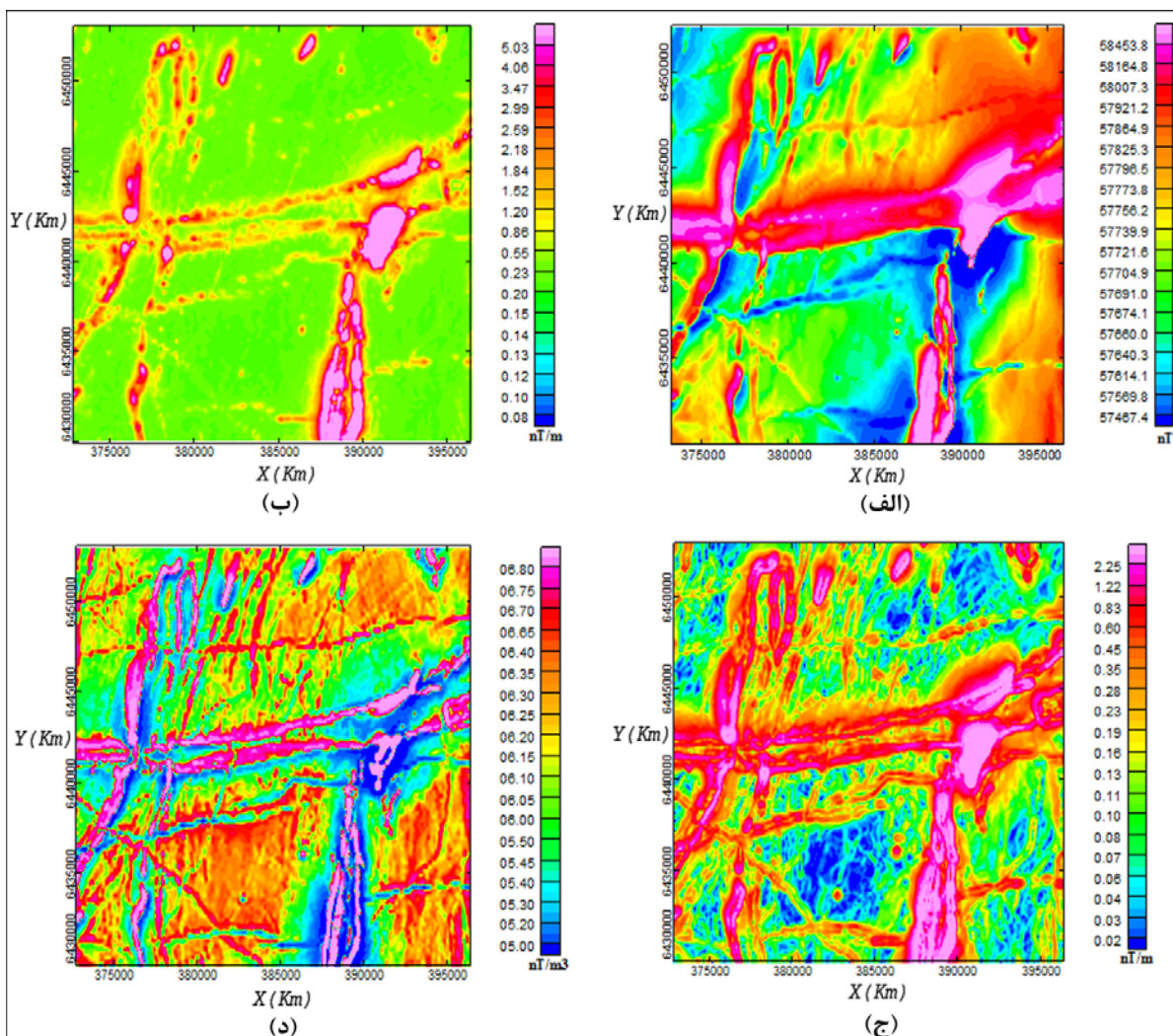
در این قسمت دو مثال واقعی از کاربرد روش پیش‌گفته، روی داده‌های واقعی در تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیس‌سنجی در حالت‌های دو و سه‌بعدی آورده شده است. مثال اول از داده‌های مغناطیس‌سنجی هوایی کشور استرالای غربی انتخاب شده است. هدف از عرضه این مقاله، بررسی کارایی سیگنال تحلیلی مرتبه زیاد در تعیین توده‌های زیرسطحی است. داده‌های مغناطیس‌سنجی هوایی مربوط به فلات ییلگران (Yilgranplateau) که در ارتفاع ۲ کیلومتری از سطح زمین و با خطوط پرواز ۱/۵ کیلومتری تهیه شده است که در آن از مغناطیس‌سنج بخار سزیم برای برداشت داده‌های مغناطیس‌سنجی استفاده شده است. فلات ییلگران در واقع یک کراتون بزرگ است. این کراتون به مرور زمان و با خروج توده‌های آتشفشانی و ایجاد زون‌های فرورانش، رشد کرده است. سن این منطقه آرکنن پسین است. منطقه مورد بررسی شامل چند دایک با روند تقریبی شرقی - غربی است که به صورت منفی یا مثبت مغناطیس شده‌اند. بی‌هنجاری مغناطیسی با روند شمالی - جنوبی مربوط به کمر بند گرین‌استون است. دایک‌های متعدد این منطقه همگی سن پالئوژوئیک دارند. دایک بزرگ‌تر مرکز نقشه دایک جیمبرلانا نام دارد. زاویه میل بردار مغناطیس زمین ۶۵- درجه اندازه‌گیری شده است. شکل ۷-الف نقشه مغناطیس منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد. بی‌هنجاری‌های مغناطیسی کشیده به دلیل وجود دایک‌های منطقه است که در اکثر موارد ذخایر زیرکنیم در آنها یافته شده است. شکل ۷-ب نقشه سیگنال تحلیلی داده‌های مغناطیسی قسمت الف را نشان می‌دهد. ویژگی بارز این منطق وجود دایک‌هایی است که با شدت‌های متفاوت مغناطیس شده‌اند. به عبارت دیگر دامنه تغییرات شدت مغناطیس دایک‌ها بسیار گسترده است. این ویژگی سبب می‌شود تا استفاده از سیگنال

تحلیلی تنها منجر به شناسایی دایک‌های با شدت زیاد شود و بقیه با شدت کمتر که ممکن است از لحاظ زمین‌شناسی مورد توجه باشند پوشیده بمانند. شکل ۷-ج نقشه مشتق افقی کل داده‌های مغناطیسی قسمت الف را نشان می‌دهد. در این شکل نیز بیشینه مقادیر موقعیت دایک‌ها را مشخص می‌کند اما همچنان، تعادل بین خروجی آن وجود ندارد. شکل ۷-د نقشه مشتق قائم مرتبه دوم سیگنال تحلیلی را نشان می‌دهد. در این شکل با ایجاد تعادل بین خروجی فیلتر حدود هر دو دایک‌های کم‌شدت و پرشدت نسبت به اطراف برجسته شده است.

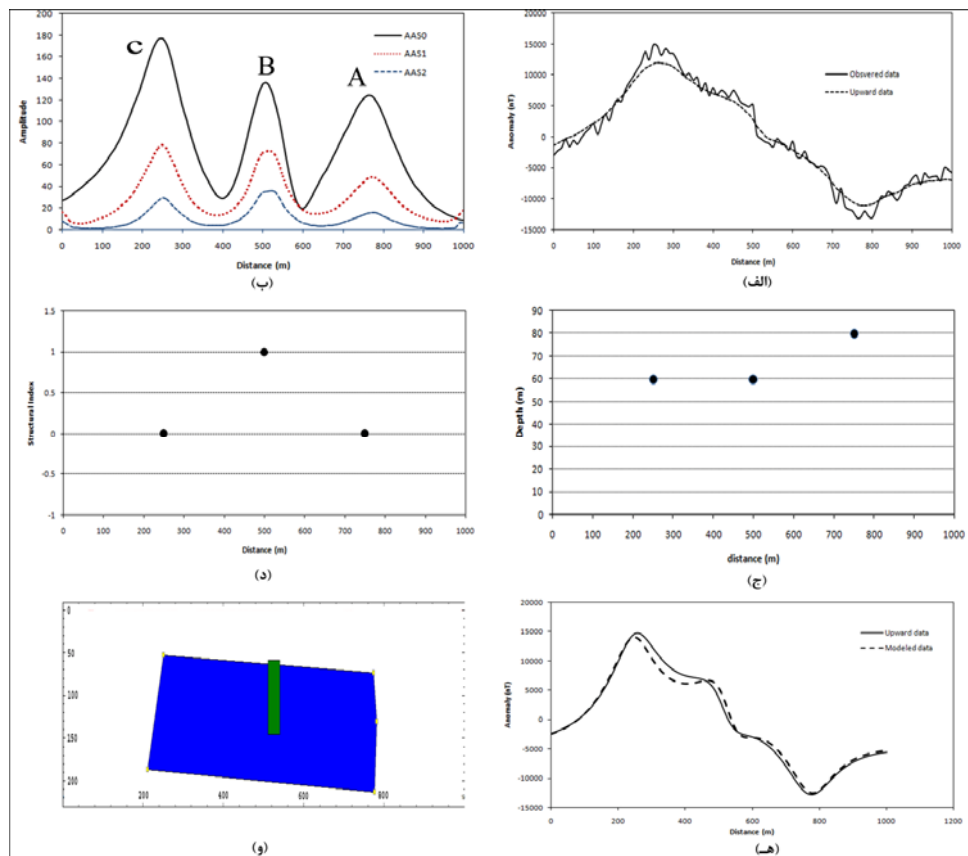
مثال دوم مربوط به یک نیم‌رخ مغناطیس‌سنجی معدن سنگ آهن مرکزی شهرستان بافق است. این معدن در ۱۰۰ کیلومتری استان یزد قرار دارد. شکل ۸-الف داده‌های مغناطیسی نیم‌رخ پیش‌گفته به طول ۱ کیلومتر را نشان می‌دهد که دارای یک قطب مثبت و یک قطب منفی غالب است. علاوه بر این دو قطب، در نقطه وسط این نیم‌رخ نیز یک بی‌هنجاری مشاهده می‌شود. چون این نیم‌رخ به صورت زمینی برداشت شده است، نوفه‌های بسامد زیاد بسیاری، داده‌ها را آغشته کرده است. به همین منظور قبل از اعمال روش، داده‌ها تا ارتفاع ۱۲ متری ادامه فراسو شدند که نتایج در شکل ۸-الف آمده است. شکل ۸-ب منحنی‌های سیگنال تحلیلی و مشتقات آن را نشان می‌دهد که همان‌طور که انتظار می‌رفت دارای سه نقطه بیشینه (سه قله) است. نقاط بیشینه از سمت راست با حروف A، B و C نام‌گذاری شده است. شکل‌های ۸-ج و ۸-د مربوط به نتایج برآورد عمق و شاخص ساختاری توده زیرسطحی با استفاده از روش پیش‌گفته است که در نقاط بیشینه سیگنال تحلیلی قرار دارد. بر طبق نتایج حاصل، عمق توده در دو نقطه B و C، برابر با ۶۰ متر

از نوع دایک و همبری و اعماق آنها همان اعماق حاصل از روش سیگنال تحلیلی منظور شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بین منحنی صحرایی و منحنی نظری مدل، برازش مناسبی ایجاد شده است (شکل ۸-ه). شکل ۸-و مدل حاصل از مدل‌سازی معکوس را نشان می‌دهد. توده آبی‌رنگ همبری مغناطیسی و توده سبزرنگ دایک است.

و در نقطه A، ۸۰ متر برآورد شده است. همچنین شاخص ساختاری در نقاط A و C، برابر با صفر (از لحاظ نظری معادل همبری مغناطیسی) و در نقطه B، یک (معادل دایک) برآورد شده است. به‌منظور صحت‌سنجی نتایج، اقدام به مدل‌سازی معکوس نیم‌رخ قسمت الف شد. در این راستا نقطه شروع مدل‌سازی را نتایج حاصل از این روش تشکیل داد؛ بدین ترتیب که توده



شکل ۷. کاربرد روش روی داده‌های مغناطیس هوایی فلات ییلگارن استرالای غربی. (الف) نقشه میدان کل مغناطیسی منطقه مورد بررسی به وسعت 645×395 کیلومتر. بی‌هنجاری‌های مغناطیسی نوعاً به دلیل وجود دایک‌های مغناطیسی است. (ب) نقشه سیگنال تحلیلی داده‌های سمت الف. در این شکل فقط توده‌های با شدت بالای مغناطیسی برجسته شده‌اند. (ج) نقشه مشتق افقی کل داده‌های مغناطیسی قسمت (الف). (د) نقشه مشتق قائم مرتبه دوم سیگنال تحلیلی داده‌های قسمت (الف). در این شکل با تعادل بین خروجی توده‌های دایک کم‌شدت و پرشدت برجسته شده‌اند.



شکل ۸. کاربرد روش روی نیم‌رخ مغناطیس‌سنجی معدن سنگ آهن مرکزی. (الف) داده‌های مغناطیس‌سنجی زمینی مربوط به بی‌هنجاری مغناطیسی معدن سنگ آهن مرکزی به طول ۱ کیلومتر. (ب) منحنی سیگنال تحلیلی و مشتقات آن. در این شکل سیگنال تحلیلی در سه نقطه پیک نشان داده است. (ج) نتیجه برآورد عمق نیم‌رخ قسمت (الف). (د) نتیجه برآورد شاخص ساختاری نیم‌رخ قسمت الف. (ه) نتیجه مدل‌سازی معکوس نیم‌رخ قسمت الف با استفاده از نتایج حاصل از روش طرح شده در مقاله. (و) مدل زمین‌شناسی حاصل از اجرای مدل‌سازی معکوس.

۵ نتیجه‌گیری

دقت زیادی نسبت به اطراف مشخص می‌کند. همچنین نتایج آن به صورت متعادل است که باعث می‌شود تا توده‌های با شدت مغناطیس‌شدگی کم در بین توده‌های قوی‌تر پوشیده نشوند. این روش روی داده‌های مغناطیس‌سنجی مصنوعی در حالت‌های دو و سه‌بعدی با کار برده شده است. نکته مورد توجه اینکه چون در این روش از مشتق مرتبه دوم استفاده می‌شود، باید داده‌های مورد استفاده از نوع با کیفیت باشند یا اینکه قبل از اعمال این روش، داده‌ها ادامه فراسو شوند. این روش روی داده‌های مغناطیس هواپرد فلات ییلگرام استرالیای غربی به کار برده شد که منجر به تعیین توده‌های دایک با

در این مقاله با استفاده از مشتقات معادله اوپلر نسبت به امتداد X ، Y و Z و چند مرحله ساده‌سازی و همچنین با استفاده از اصطلاح سیگنال تحلیلی تعمیم یافته یا مشتقات سیگنال تحلیلی، روشی عرضه شد که کاربرد آن منجر به برآورد عمق و نوع توده‌های زمین‌شناسی زیرسطحی می‌شود. علاوه بر آن در این روش مانند روش اوپلر واهمامیخت متداول موقعیت افقی توده نیز از روی نقاط بیشینه سیگنال تحلیلی برآورد می‌شود. کاربرد این روش روی داده‌های مغناطیس واقعی و مصنوعی نشان داد که مشتق قائم مرتبه دوم سیگنال تحلیلی مرزهای توده را با

- Nelson, J. B., 1988, Comparison of gradient analysis techniques for two-dimensional magnetic sources: *Geophysics*, **53**, 1088-1095.
- Pedersen, L. B., 1989, Relations between horizontal and vertical gradients of potential fields, *Geophysics*, **54**, 662-673.
- Ravat, D., 1996a, Analysis of the Euler method and its applicability in environmental magnetic investigations, *J. Environmental. Eng. Geophys.*, **1**, 229-238.
- 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.
- 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.
- Smith, R. S., Thurston, J. B., Dai, T. F. and MacLeod, I. N., 1998, ISPI—the improved source parameters imaging method: *Geophys. Prosp.*, **46**, 141-151.
- Smith, R. S. and Salem, A., 2005, Imaging depth, and susceptibility from magnetic data: The advanced source-parameter imaging method: *Geophysics*, **70**, 31-38.
- Salem, A., Ravat, D., Smith, R. and Ushijima, K., 2008, Interpretation of magnetic data using tilt angle derivatives: *Geophysics*, **70**, L7-L12.
- Thompson, D. T., 1982, “EULDPH” a new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data: *Geophysics*, **47**, 31-37.
- Thurston, J. B. and Smith, R. S., 1997, Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, susceptibility contrast using the SPI method, *Geophysics*, **62**, 807-813.
- Thurston, J., Guillon, J. C. and Smith, R., 1999, Model-independent depth estimation with the SPI method, 69th Ann. Internat. Mtg. Soc. of Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 403-406.
- Williams, S. E., Fairhead, J. D. and Flanagan, G., 2002, Realistic models of basement topography for depth to magnetic basement testing, 72th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 814-817.
- Williams, S. E., Fairhead, J. D. and Flanagan, G., 2005, Comparison of grid Euler deconvolution with and without 2D constraints using a realistic 3D magnetic basement model: *Geophysics*, **70**, L13-L21.

شدت‌های متفاوت مغناطیس‌شدگی شد. نتایج حاصل از کاربرد این روش روی داده‌های مغناطیس‌دو بُعدی مربوط به یک نیم‌رخ مغناطیس‌سنجی معدن سنگ آهن مرکزی شهرستان بافق در مدل‌سازی معکوس تأیید شد.

مراجع

- Atchuta Rao, D., Ram Babu, H. V. and Sanker Narayan P. V., 1981, Interpretation of magnetic anomalies due to dikes, The complex gradient method, *Geophysics*, **46**, 1572-1578.
- Bastani, M. and Pedersen, L. B., 2001, Automatic interpretation of magnetic dikes parameters using the analytic signal technique, *Geophysics*, **66**, 551-561.
- Blakely, R. J., 1995, Potential theory in gravity and magnetic applications, Cambridge Univ. Press.
- Debeglia, N. and Corpe, J., 1997, Automatic 3-D interpretation of potential field data using analytic signal derivatives, *Geophysics*, **62**, 87-96.
- 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, Depth to magnetic source using the generalized analytic signal: *Geophysics*, **63**, 1947-1957.
- 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 latitudes, *Expl. Geophys.*, **24**, 679-688.
- 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.
- Nabighian, M. N., 1974, Additional comments on the analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: *Geophysics*, **39**, 85-92.
- Nabighian, M. N., 1984, Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential-field data via generalized Hilbert transforms: fundamental relations, *Geophysics*, **49**, 780-786.