

برآورد مرز بی‌هنجاری‌های مغناطیسی رباط پشت‌بادام به کمک مشتقات میدان پتانسیل و ترکیبات مکانی و فازی بین آنها

عبدالحمید انصاری^{۱*}، مسلم فاتحی^۲ و کمال علمدار^۳

^۱دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد، ایران

^۲دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران، ایران

^۳دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۲/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۳/۳۰)

چکیده

امروزه استفاده از بررسی‌های مغناطیسی، به‌خاطر برداشت سریع، در اکتشاف توده‌های مغناطیسی به‌شکلی گسترده صورت می‌گیرد. به‌همین دلیل، تفسیر داده‌های مغناطیسی اهمیت خاصی پیدا کرده است. ماهیت دوقطبی میدان مغناطیسی باعث پیچیدگی تفسیر داده‌ها می‌شود. تفسیر را می‌توان شامل: مشخص کردن بی‌هنجاری و مرز توده سبب شونده، برآورد عمق و مدل‌سازی توده دانست. هدف این مقاله مرحله اول تفسیر، یعنی مشخص کردن محل توده سبب شونده بی‌هنجاری مغناطیسی و تعیین مرز دقیق آن است. مشتقات میدان مغناطیسی و روابط وابسته به آن، در برآورد مرز توده‌های مغناطیسی کاربرد گسترده دارد. در این مقاله، به بررسی مقایسه‌ای بین صافی‌های برآورد مرز شامل مشتق افقی، مشتق قائم، سیگنال تحلیلی، زاویه تیلت و کسینوس زاویه تنا پرداخته شده است. برای بررسی و مقایسه کارایی صافی‌های ذکر شده، از داده‌های مصنوعی که با استفاده از نرم‌افزار مدل‌ویژن به‌دست آمده‌اند، استفاده شده است. مقدار بیشینه مشتق افقی روی مرز توده قرار می‌گیرد، مشتق قائم روی توده مقدار بیشینه و بیرون از آن کمینه مقدار را دارد. مشتق قائم محدوده توده را وسیع‌تر از مقدار واقعی نشان می‌دهد که با استفاده از صافی مشتق قائم مراتب بالاتر این مشکل برطرف می‌شود و از طرف دیگر باعث ایجاد نوفه‌های مصنوعی می‌شود. از سیگنال تحلیلی نیز در برآورد مرز توده استفاده می‌شود که با افزایش عمق توده، از کارایی آن کم می‌شود. زاویه تیلت که نسبت بین مشتق قائم به مشتق افقی است، روی توده مقدار بیشینه دارد. کسینوس زاویه تنا روی مرز توده مقدار بیشینه را نشان می‌دهد و به‌خوبی مرز توده را تعیین می‌کند. در آخر داده‌های واقعی محدوده‌ای واقع در منطقه رباط پشت‌بادام یزد مورد پردازش قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: برآورد مرز، مشتق افقی، مشتق قائم، سیگنال تحلیلی، زاویه تیلت، کسینوس زاویه تنا

Detection of magnetic body boundary in Robot Posht Badam iron ore deposit by potential field derivatives and their spatial and phase (angular) components

Abdul-Hamid Ansari^{1*}, Moslem Fatehi² and Kamal Alamdar³

¹Faculty of Mining and Metallurgy Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

²Faculty of Mining Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

³Faculty of Mining, petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

(Received: 5 May 2011, accepted: 13 June 2012)

Summary

Magnetic data is routinely presented as contours or color-shaded maps of the total magnetic intensity (TMI). An interpreter's task is to identify features (anomalies) within the map and qualitatively and/or quantitatively interpret them into geologic structures at depth. An interpretation difficulty with TMI anomalies is that they are dipolar (anomalies having positive and negative components) such that the shape and the phase of the anomaly depends in part on the magnetic inclination and the presence of any remanent magnetization. This anomaly complexity makes the interpretation more difficult because the body and its edges do not necessarily coincide with the most obvious mapped feature (e.g., anomaly maxima). The reduction-to-the-pole (RTP) technique transforms TMI anomalies to anomalies that would be measured if the field were vertical. This RTP transformation makes the shape of magnetic anomalies more closely related to the spatial location of the source structure and makes the magnetic anomaly easier to interpret, as anomaly maxima will be located centrally over the body.

Since the early 1970s a variety of automatic or semiautomatic methods, based on the use of the horizontal and/or the vertical gradients (derivatives) of potential-field anomalies, have been developed as efficient tools for the determination of the geometric parameters, such as the locations of the boundaries and the depths of the causative sources. The success of these methods results from the fact that quantitative or semi-quantitative solutions are found with no or few assumptions. To map the edges of the bodies, the horizontal derivatives of the RTP field are often used. The horizontal derivative will peak above a vertical contact. However, a dipping contact, an incorrect inclination used in the RTP transformation or presence of remanent magnetization, will tend to shift the anomaly maxima away from the true location of the contact.

Vertical derivatives are used in the interpretation of potential field anomalies extensively. This filter enhances the details and sharpens anomalies. However, difficulty is that by this filter the noises are increased as signals are enhanced. This filter is normally used with the first and second orders. However, vertical derivatives are recently applied with a non-integer order, in order to produce a good equilibrium between signal and noise. The analytic signal for magnetic anomalies was initially defined as a "complex field deriving from a complex potential" (Nabighian, 1972). This function can be computed easily in the frequency domain; its real part is the horizontal derivative of the field and its imaginary part is the vertical derivative. Analytic signal processing and interpretation requires few initial assumptions regarding the source body geometry and magnetization and is particularly efficient at an early stage of the interpretation even if the constraints are not available. The amplitude of the 3-D analytic signal of the total magnetic field produces maxima over magnetic contact regardless of the magnetization direction. The "theta map" is a processing technique, derived from the analytic signal that highlights the magnetic contact in a TMI image. The method is equally valid for data that has been reduced to the pole or to the equator, but it was developed to process data gathered at low magnetic latitudes, where traditional reduction to the pole is not advisable. The theta map independently detects the edges of the strike and amplitude and is thus the most valuable at low latitudes where north-south-trending anomalies disappear in the TMI data. It can also be used to qualitatively estimate dip. The magnetic tilt angle is a normalized derivative based on the ratio of the vertical and horizontal derivatives of the RTP field. The tilt angle was first described by Miller and Singh (1994), before being further refined by Verduzco (2004) and Getech. The value of the tilt angle above the edges of the contact is zero. This suggests that contours of the magnetic tilt angle can identify the location ($\theta = 0^\circ$) of the contacts.

In this study, we applied the described filters on synthetic and real data that gathered from the iron deposit in Robat Posht Badam in Yazd Province in Iran.

Key words: Edge detection, horizontal derivative, vertical derivative, analytic signal, tilt angle, theta map

۱ مقدمه

برآورد مرز توده‌های زمین‌شناسی (تعیین حدود توده سبب شونده) یکی از مراحل پردازش داده‌های مغناطیسی به شمار می‌رود. به دلیل ویژگی دوقطبی داده‌های مغناطیسی، تعیین حدود توده از روی داده‌های برداشت شده دشوار است، مگر در مواردی که بردار مغناطیس‌شدگی توده قائم و یا افقی است. برای این منظور ایده کلی برآورد مرز توده‌های زمین‌شناسی از روی داده‌های مغناطیسی، محاسبه کمیتی از داده‌ها است که اولاً وابستگی داده‌ها به مختصات در آن به حداقل رسیده باشد و ثانیاً اندازه آن مستقل از ویژگی‌های بردار مغناطیس‌شدگی توده تغییر کند. به کمک صافی برگردان به قطب داده‌های مغناطیسی (RTP) می‌توان مولفه افقی میدان مغناطیسی را حذف کرد. اما این صافی برای داده‌های برداشت شده در عرض‌های جغرافیایی کم مناسب نیست. همچنین برای استفاده از این فیلتر، دانستن زاویه میل مغناطیسی لازم است. به همین منظور باید از روش‌هایی استفاده کرد که به مولفه‌های میدان وابستگی کمتری داشته و در شرایط متفاوت قابل استفاده باشند. در این راستا بهترین کمیت گرادیان (مشتقات) داده‌ها است که در نوشته‌های تخصصی از آن با عنوان تحلیل گرادیان داده‌های مغناطیسی یاد می‌شود. به‌طور کلی و در حالت سه‌بُعدی سه نوع مشتق شامل مشتق افقی نسبت به محور x ، مشتق افقی نسبت به محور y و مشتق قائم قابل تعریف است. علاوه بر این سه نوع مقدار مشتق، از ترکیبات بین آنها نیز در برآورد مرز استفاده می‌شود. ترکیبات مشتق‌های میدان پتانسیل به دو نوع مکانی و فازی قابل تقسیم است. از ترکیبات مکانی مشتق‌های میدان پتانسیل می‌توان به مشتق

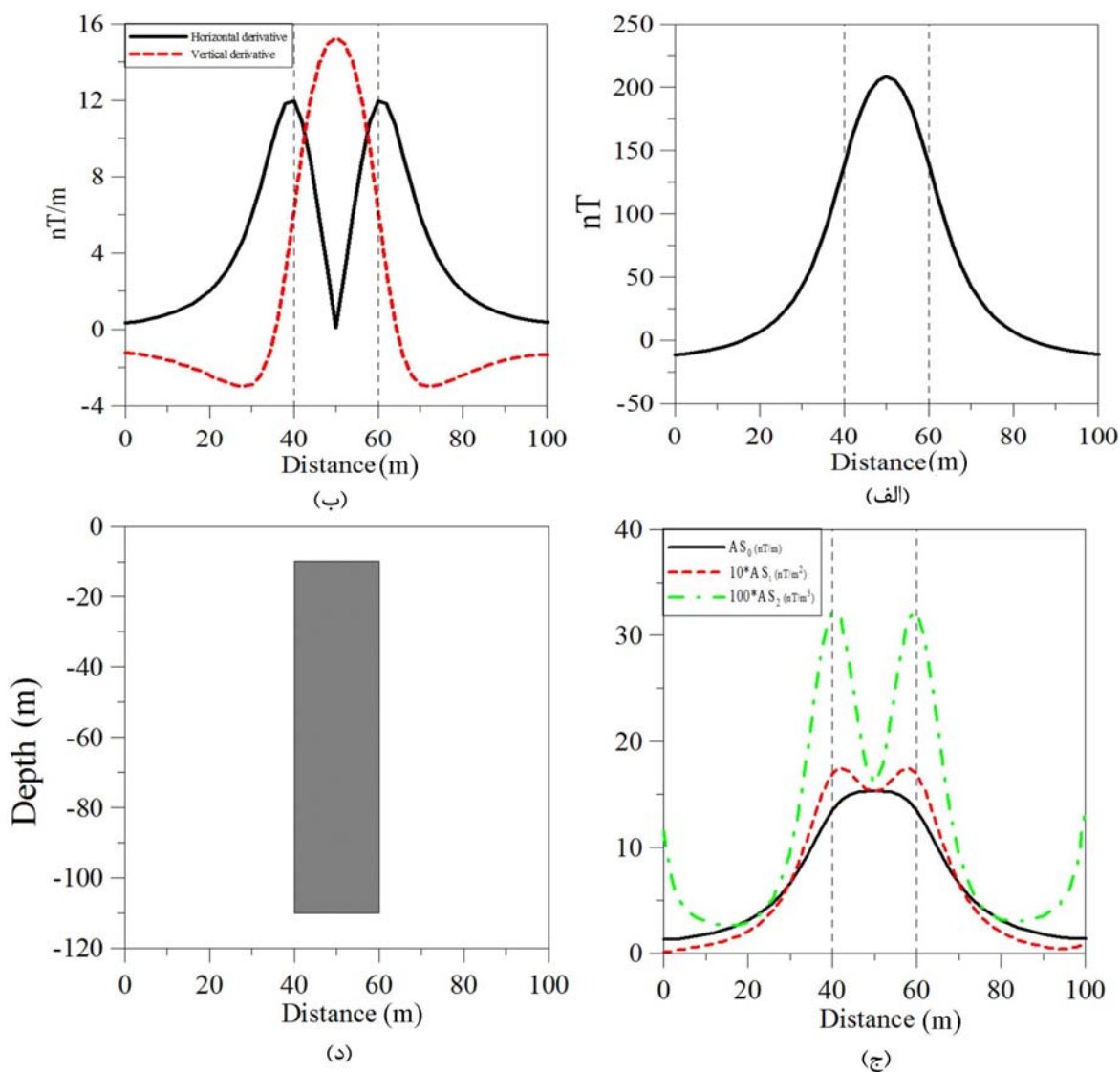
افقی کل و سیگنال تحلیلی اشاره کرد. ترکیبات فازی مشتق‌های میدان پتانسیل عبارت از کسینوس زاویه تتا و زاویه تیلت است.

مشتق افقی جهت‌دار شدت تغییرات میدان مغناطیسی در یک جهت خاص را نشان می‌دهد. مشتق افقی کل نیز بیانگر شدت تغییرات میدان مغناطیسی در دو بعد است. مشتق افقی کل بیشینه مقداری را بر روی مرز توده‌های مغناطیسی نشان می‌دهد. مشتق قائم نیز که یک صافی بالا گذر است مرز توده‌ها را با مقداری برابر با صفر مشخص می‌کند. می‌توان از مراتب بالاتر مشتق قائم نیز استفاده کرد که اگر کیفیت داده‌ها مناسب باشد تفکیک بهتر صورت می‌گیرد. سیگنال تحلیلی که اولین بار توسط نیقیان (۱۹۷۲) به عنوان یک ترکیب مختلط معرفی شد نیز جهت برآورد مرز توده‌ها استفاده می‌شود و بیشینه مقداری را روی لبه توده‌ها نشان می‌دهد. در سال‌های اخیر به طور گسترده از سیگنال تحلیلی و مراتب بالاتر آن برای تفسیر داده‌های میدان مغناطیسی استفاده شده است (دبگلیا و همکاران، ۱۹۹۷؛ هسو و همکاران، ۱۹۹۶).

کسینوس زاویه تتا یک روش پردازش بر گرفته از سیگنال تحلیلی است که توسط ویجنز و همکاران (۲۰۰۵) معرفی شد. کسینوس زاویه تتا بیشینه مقداری برابر با یک بر روی مرز توده نشان می‌دهد. از کسینوس زاویه تتا همچنین می‌توان در تعیین شیب‌دار بودن توده نیز استفاده کرد زیرا شکل نمودار از حالت متقارن خارج شده و انحرافش در جهت شیب توده زیاد می‌شود. زاویه تیلت مغناطیسی یک مشتق به‌هنجار شده بر اساس نسبت مشتق قائم به مشتق افقی از میدان مغناطیسی برگردان به قطب شده است. زاویه تیلت را ابتدا میلر و همکاران (۱۹۹۴)

است. برای این منظور از نرم‌افزار Model vision pro استفاده شده است. همچنین از صافی‌های برآورد مرز، برای تعیین موقعیت توده مولد بی‌هنجاری مغناطیسی منطقه رباط پشت‌بادام واقع در استان یزد استفاده شده است.

عرضه کردند و در ۲۰۰۴ وردزکو و همکاران آن را مورد استفاده قرار دادند. مقدار زاویه تیلت روی توده مثبت، روی لبه توده صفر و بیرون از محدوده توده منفی است. به‌منظور بررسی توانایی و مقایسه بین صافی‌های برآورد مرز ذکر شده، از مدل‌سازی مصنوعی استفاده شده



شکل ۱. (الف) بی‌هنجاری مغناطیسی برگردان به قطب شده یک دایک قائم با ضخامت ۲۰ متر، گسترش عمقی ۱۰۰ متر، واقع در عمق ۱۰ متر و با ضریب خودپذیری ۰/۰۲SI. (ب) مشتق افقی (منحنی سیاه) و مشتق قائم میدان مغناطیسی (منحنی سرخ‌رنگ). (ج) سیگنال تحلیلی ساده (منحنی سیاه‌رنگ)، مرتبه اول (منحنی سرخ‌رنگ) و مرتبه دوم (منحنی سبز‌رنگ). (د) محدوده توده مغناطیسی.

۲ ترکیبات مکانی مشتق‌های داده‌های مغناطیسی

۱-۲ مشتق افقی بی‌هنجاری میدان مغناطیسی

از مشتقات میدان پتانسیل در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل به‌نحو گسترده استفاده می‌شود. کمیت نرده‌ای $M(x, y)$ که به‌شکل یکنواخت تغییر می‌کند، و روی یک سطح افقی اندازه‌گیری می‌شود، در نظر می‌گیریم. مشتق‌های افقی $M(x, y)$ به آسانی با استفاده از روش تفاضل متناهی ساده و اندازه‌گیری‌های مجزای $M(x, y)$ برآورد می‌شوند. برای مثال، اگر مقادیر M_{ij} نشان‌دهنده اندازه‌گیری‌های مجزای $i, j = 1, 2, 3, \dots$

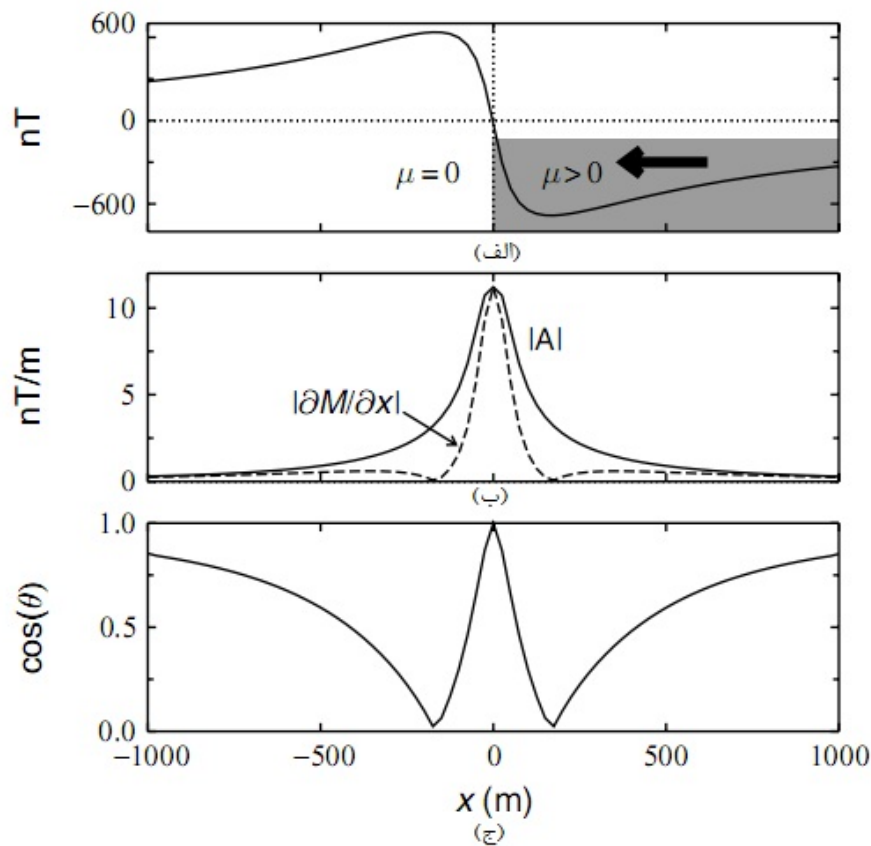
$M(x, y)$ در فواصل یکنواخت Δx و Δy باشند، در این صورت، مشتق‌های افقی $M(x, y)$ در نقاط i, j به تقریب با روابط زیر داده می‌شود (بلیکلی، ۱۹۹۵):

$$M'(x) = \frac{\partial M(x, y)}{\partial x} \approx \frac{M_{i+1, j} - M_{i-1, j}}{2\Delta x}, \quad (1)$$

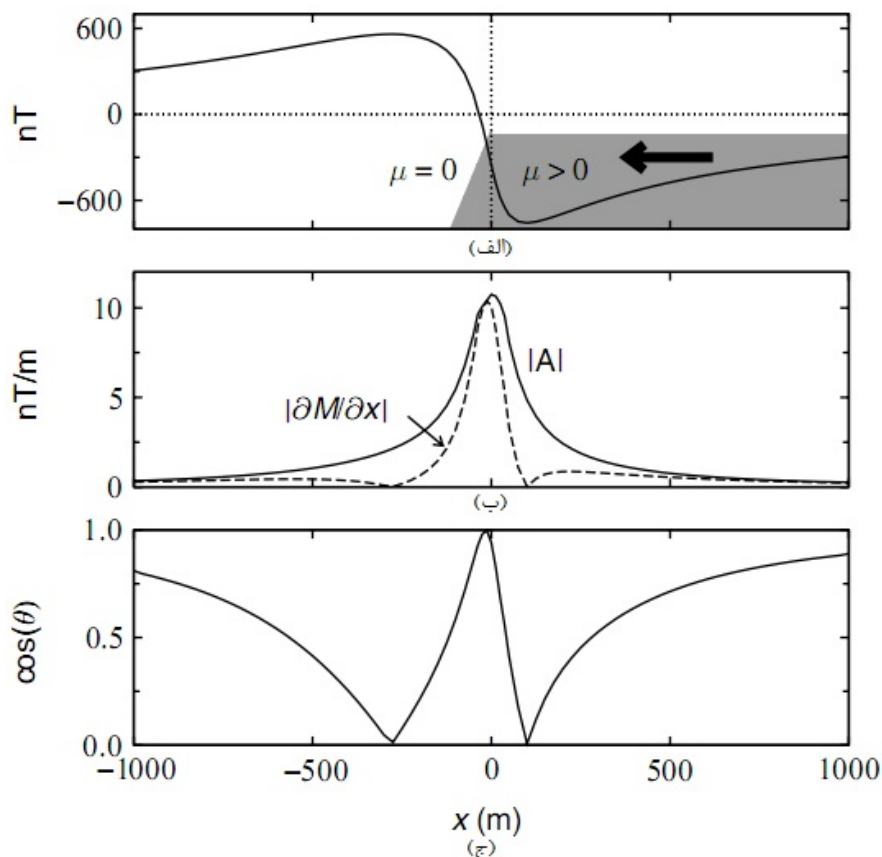
$$M'(y) = \frac{\partial M(x, y)}{\partial y} \approx \frac{M_{i, j+1} - M_{i, j-1}}{2\Delta y}, \quad (2)$$

و مشتق افقی کل با استفاده از برآیند مشتقات جهت‌دار به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{\partial M}{\partial h} = \sqrt{(M'(x))^2 + (M'(y))^2}, \quad (3)$$



شکل ۲. نیم‌رخ کسینوس زاویه تنا روی یک کنتاکت قائم. (الف) شدت میدان مغناطیسی کل حاصل از یک کنتاکت قائم. قسمت سایه‌خورده (سمت راست نیم‌رخ) از مواد با خاصیت مغناطیسی مثبت و قسمت سفید(سمت چپ تصویر) از مواد با خاصیت مغناطیسی صفر تشکیل شده‌اند. (ب) دامنه سیگنال تحلیلی $|A|$ و مشتق افقی $|\partial M / \partial x|$. دامنه سیگنال تحلیلی روی لبه کنتاکت بیشینه است. مقدار مشتق افقی نیز روی لبه، بیشینه است و در طرفین به صفر نزدیک می‌شود. (ج) نیم‌رخ کسینوس زاویه تنا. کسینوس زاویه تنا مقدار بیشینه‌ای (برابر با ۱) روی لبه، و مقدار کمینه‌ای (نزدیک به صفر) را در طرفین لبه کنتاکت نشان می‌دهد (ویجنز و همکاران، ۲۰۰۵).



شکل ۳. (الف) نیم‌رخ شدت میدان مغناطیسی کل روی کنتاکی دو بُعدی با شیب ۷۰ درجه بین یک بلوک با خاصیت مغناطیسی مثبت (سمت راست - قسمت تیره‌رنگ) و زمینه با خاصیت مغناطیسی صفر (قسمت سفید). (ب) دامنه سیگنال تحلیلی $|A|$ ، و مقدار مشتق افقی $|\partial M / \partial x|$. دامنه سیگنال تحلیلی متقارن است و به کمک آن نمی‌توان به شیب‌دار بودن کنتاکت پی‌برد. (ج) نیم‌رخ کسینوس زاویه تان، مقادیر حداقل کسینوس زاویه تان ($\cos\theta = 0$) و مقدار بیشینه آن ($\cos\theta = 1$) به جهت شیب کنتاکت (سمت چپ) منحرف شده‌اند (ویجنز و همکاران، ۲۰۰۵).

ادامه فراسو است. روش مشتق‌گیری قائم در واقع استفاده از شدت میدان به‌دست آمده از روش ادامه فراسو در دو ارتفاع متفاوت است. اگر مقادیر شدت کل بی‌هنجاری مغناطیسی M را در N نقطه یک شبکه، با فاصله مساوی در یک سطح مشاهده، داشته باشیم، و روش گسترش رو به بالا را برای پیدا کردن بی‌هنجاری M_z در ارتفاع z و $M_{z+\Delta z}$ در ارتفاع $Z + \Delta Z$ در بالای مرکز این سطح به کار گیریم، مشتق قائم برای این بی‌هنجاری از رابطه زیر به‌دست می‌آید (بلیکلی، ۱۹۹۵):

مشتق افقی روی مرز توده، بیشینه مقدار را نشان می‌دهد. از این خاصیت می‌توان در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل استفاده کرد. نکته‌ای که باید توجه داشت این است که در تفسیر داده‌های مغناطیس، باید از این صافی، روی نقشه برگردان به قطب شده استفاده شود.

۲-۲ مشتق قائم بی‌هنجاری میدان مغناطیسی

مشتق قائم میدان مغناطیسی نمایانگر میدانی است که در آن اثرهای ناحیه‌ای و تداخل بین بی‌هنجاری‌های مجاور از بین رفته باشد. اساس روش مشتق قائم برگرفته از روش

استفاده کرد. با افزایش مرتبه مشتق قائم، بی‌هنجاری‌ها برجسته‌تر می‌شوند اما چون این فیلتر از نوع فیلتر بالاگذر است، به طور ناخواسته هم زمان با سیگنال‌های موجود در تصویر، نوفه‌ها نیز برجسته می‌شوند. این پدیده به ویژه در مشتقات مراتب بالاتر ظاهر خواهد شد (علمدار و انصاری، ۱۳۸۷). مشتق دوم قائم نتیجه مستقیم معادله لاپلاس است، زیرا اگر M یک پتانسیل باشد، داریم (بلیکلی، ۱۹۹۵):

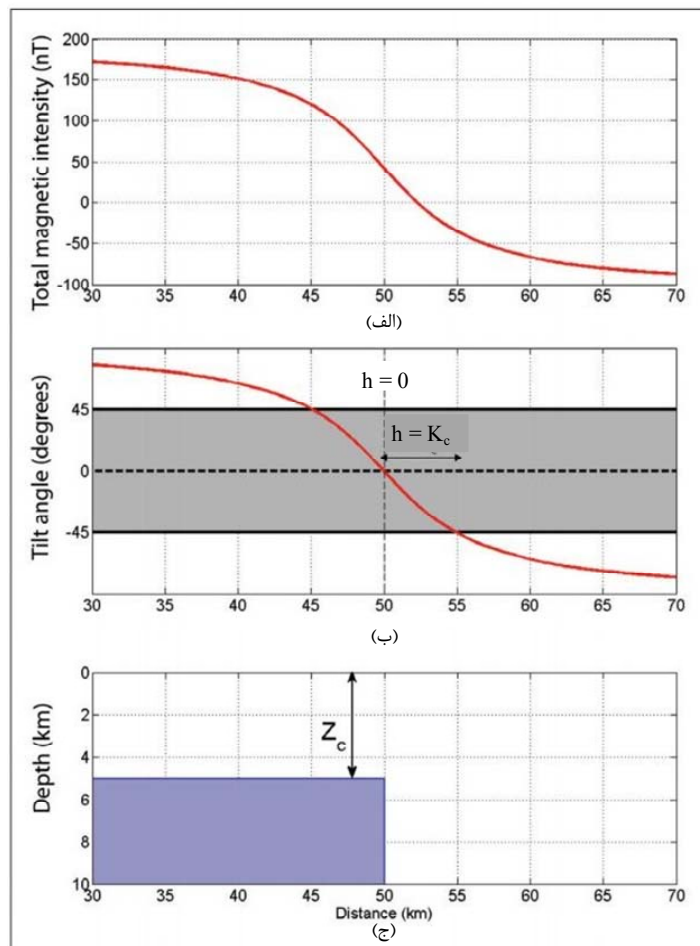
$$\nabla^2 M = 0, \tag{۵}$$

و

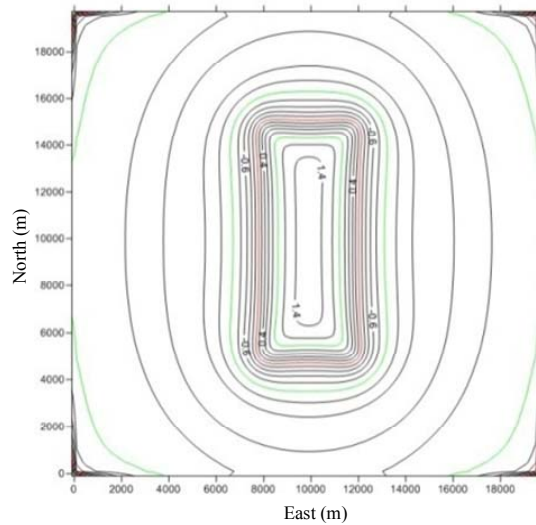
$$\frac{\partial^2 M}{\partial z^2} = -\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 M}{\partial y^2}. \tag{۶}$$

(۴)

$\frac{\partial}{\partial z} M(x, y, z) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{M(x, y, z) - M(x, y, z - \Delta z)}{\Delta z}$
 در این رابطه فرض بر این است که z به طرف پایین افزایش می‌یابد؛ یعنی $\Delta z > 0$. مشتق قائم در واقع یک صافی بالاگذر است، زیرا سیگنال‌های با بسامدهای زیاد را نسبت به سیگنال‌های با بسامدهای پایین افزایش می‌دهد و این خاصیت، پایه و اساس کاربرد فرآیند مشتق قائم است که اثرهای ناحیه‌ای با طول موج بلند را حذف کرده و اثر بی‌هنجاریهای سطحی را تقویت می‌کند. مشتق قائم تقریباً یک نیاز اساسی در تفسیر داده‌های مغناطیسی است. مشتق قائم مرتبه اول در برآورد مرز توده محدودیت‌هایی دارد که برای رفع آنها می‌توان از مراتب بالاتر مشتق قائم



شکل ۴. رابطه بین زاویه تیلت و موقعیت توده. (الف) بی‌هنجاری میدان مغناطیسی کل روی یک کنتاکت قائم. (ب) زاویه تیلت. (ج) موقعیت توده در زیر زمین (سالم و همکاران، ۲۰۰۷).



شکل ۵. بررسی زاویه تیلت روی مدل مصنوعی قرار گرفته در عمق ۵۰۰ متری و با ضریب خودپذیری مغناطیسی SI ۰/۰۱. پربند سرخ‌رنگ برابر با صفر است و مرز توده را نشان می‌دهد.

۳-۲ سیگنال تحلیلی

تحلیلی روی لبه‌های توده قرار می‌گیرد. در بیشتر مواقع برای برجسته‌سازی مرز توده‌ها از سیگنال تحلیلی مرتبه بالاتر استفاده می‌شود. مشتق n ام سیگنال تحلیلی (سیگنال تحلیلی مرتبه n ام) $A_n(x, y)$ ، و دامنه آن، $|A_n(x, y)|$ ، با استفاده از مشتق قائم مرتبه n ام M بیان می‌شود (هسو و همکاران، ۱۹۹۶):

$$(10)$$

$$A_n(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^n M}{\partial z^n} \right) \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^n M}{\partial z^n} \right) \hat{j} + i \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^n M}{\partial z^n} \right) \hat{k}, \quad (11)$$

$$|A_n(x, y)| = \sqrt{A^2}.$$

$$A^2 = \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^n M}{\partial z^n} \right) \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^n M}{\partial z^n} \right) \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^n M}{\partial z^n} \right) \right)^2$$

در شکل ۱، بی‌هنجاری مغناطیسی برگردان به قطب شده، مشتق قائم، مشتق افقی و سیگنال تحلیلی مرتبه‌های گوناگون حاصل از یک دایک قائم با ضخامت ۲۰ متر، گسترش عمقی ۱۰۰ متر، واقع در عمق ۱۰ متر و با ضریب خودپذیری SI ۰/۰۲ نشان شده است. شکل ۱-الف میدان مغناطیسی برگردان به قطب شده را نشان می‌دهد. در شکل ۱-ب مشتق قائم و افقی نشان داده شده است. مشتق افقی بیشینه مقداری را روی مرزهای توده نشان می‌دهد و مشتق

سیگنال تحلیلی در ابتدا به منزله یک ترکیب مختلط از میدان پتانسیل، که مؤلفه حقیقی آن مشتق افقی، و مؤلفه موهومی آن مشتق قائم میدان پتانسیل است، تعریف شد (نیقیان، ۱۹۷۲). با استفاده از تعریف، رابطه سیگنال تحلیلی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$A(x, y) = \frac{\partial M}{\partial x} + i \frac{\partial M}{\partial y}, \quad (7)$$

نیقیان (۱۹۸۴)، روئست و همکاران (۱۹۹۳) رابطه سیگنال تحلیلی را برای بی‌هنجاری‌های مغناطیسی سه‌بعدی توسعه دادند:

$$A(x, y) = \frac{\partial M}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial M}{\partial y} \hat{j} + i \frac{\partial M}{\partial z} \hat{k}, \quad (8)$$

که دامنه آن از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$A(x, y) = \frac{\partial M}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial M}{\partial y} \hat{j} + i \frac{\partial M}{\partial z} \hat{k}. \quad (9)$$

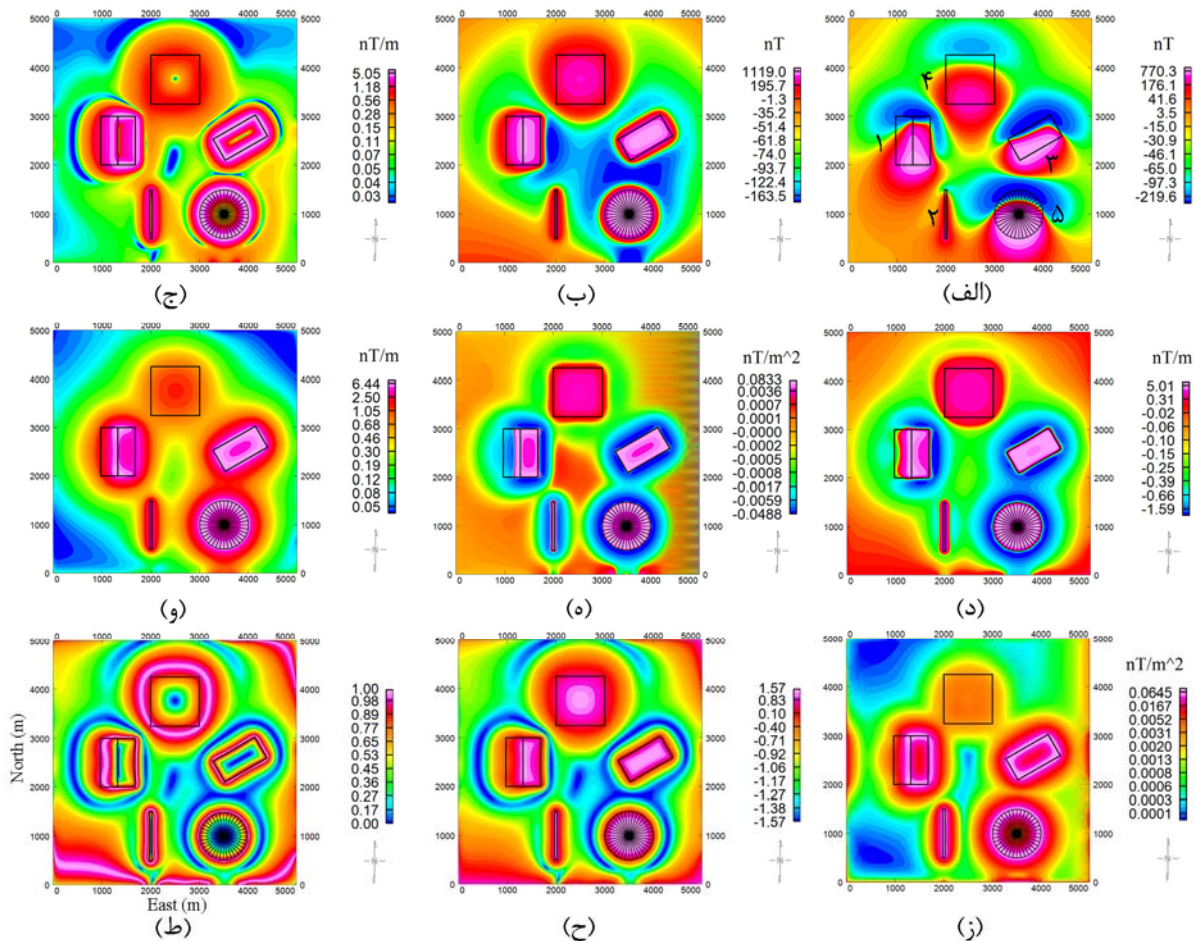
مشتقات افقی و قائم، تبدیل هیلبرت یکدیگرند (نیقیان ۱۹۷۲)، بنابراین می‌توان به سادگی مشتق قائم را به عنوان تبدیل هیلبرت مشتق افقی محاسبه کرد. بیشینه مقدار سیگنال تحلیلی دقیقاً روی توده قرار می‌گیرد و در صورتی که در اثر توده‌های مجاور تداخلی ایجاد نشود و توده به اندازه کافی عریض باشد، بیشینه مقدار سیگنال

۳ ترکیبات فازی مشتق‌های داده‌های مغناطیسی

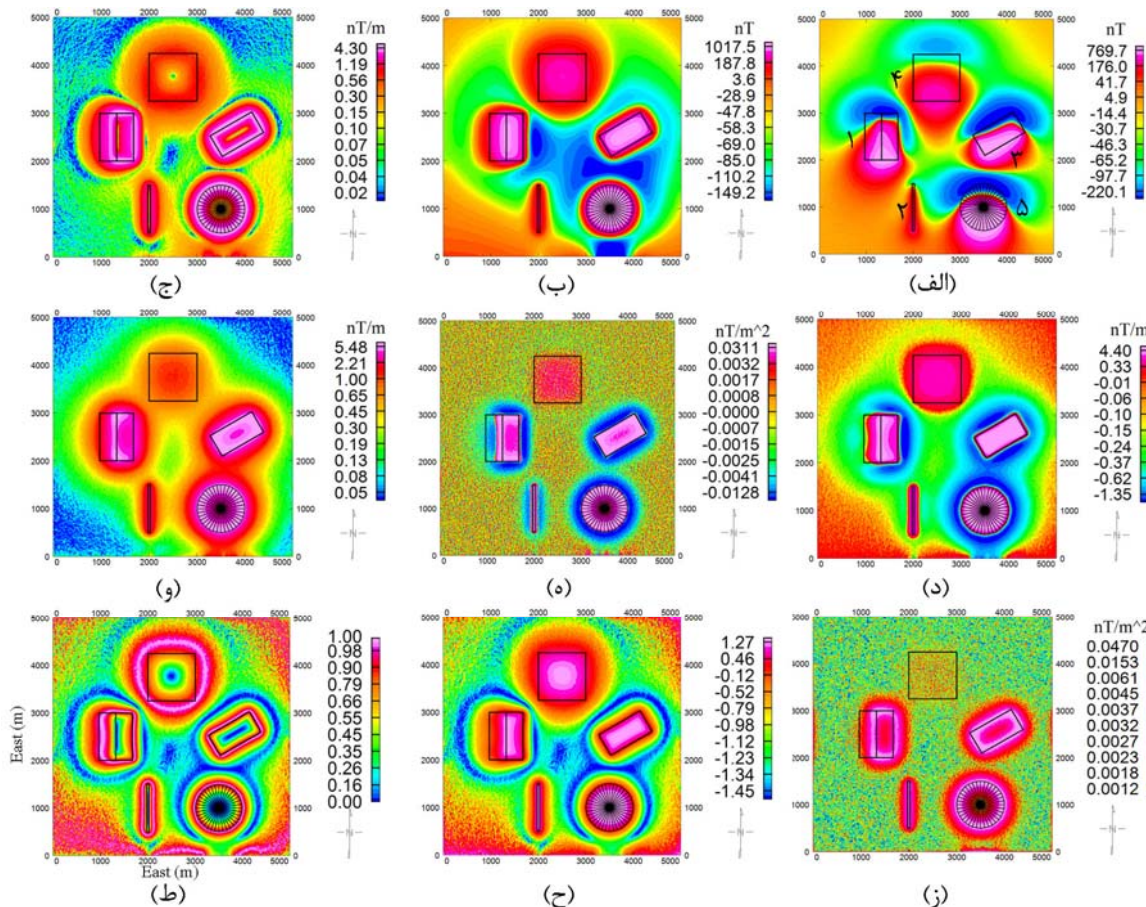
۱-۳ کسینوس زاویه تنا

صافی کسینوس زاویه تنا را درحکم یک صافی فازی می‌شناسند. در این روش زاویه بین بردار مشتق افقی کل و بردار سیگنال تحلیلی محاسبه می‌شود. کسینوس زاویه تنا برابر با نسبت اندازه گرادیان افقی به سیگنال تحلیلی است و از آن با عنوان گرادیان افقی به‌هنجارشده نیز یاد می‌شود. با تعریف \hat{k} به‌مثابه بردار واحد تصویر بردار سیگنال تحلیلی در جهت افقی، کسینوس زاویه تنا از رابطه زیر به‌دست می‌آید (ویجنز و همکاران، ۲۰۰۵):

قائم روی توده مقدار مثبت و در بیرون توده مقدار نزدیک به صفر را نشان می‌دهد. در شکل ۱-ج سیگنال تحلیلی از مرتبه‌های گوناگون نشان داده شده است. سیگنال تحلیلی مرتبه اول مقدار بیشینه‌ای روی توده نشان داده است و با استفاده از آن نمی‌توان به‌خوبی مرز توده را تشخیص داد؛ درحالی‌که سیگنال تحلیلی مرتبه‌های اول و دوم به‌خوبی مرز توده را با مقادیر بیشینه نشان می‌دهند. با افزایش نسبت عمق به ضخامت توده، سیگنال تحلیلی مرتبه‌های بالاتر نیز فقط یک مقدار بیشینه روی مرکز توده نشان می‌دهند و با استفاده از آنها نیز نمی‌توان مرز توده را به‌خوبی تعیین کرد. در شکل ۱-د نیز موقعیت توده نشان داده شده است.



شکل ۶. بررسی روش‌های تخمین مرز بر روی مدل مصنوعی با مشخصات در جدول (۱). خطوط مشکی محدوده و شماره‌ها، شماره مدل است. (الف) شدت بی‌هنجاری میدان مغناطیسی کل. (ب) نقشه برگردان به قطب (الف). دیگر صافی‌ها بر روی این نقشه اعمال شده‌اند. (ج) مشتق افقی. (د) مشتق قائم مرتبه اول. (ه) مشتق قائم مرتبه دوم. (و) سیگنال تحلیلی ساده. (ز) سیگنال تحلیلی مرتبه اول. (ح) تانژانت زاویه تیلت. (ط) کسینوس زاویه تنا.



شکل ۷. مانند شکل ۶ ولی برای مدل نوفه‌دار.

اما برای یک کنتاکت شیب‌دار، به دلیل بی‌تقارنی مقدار مشتق افقی، حداقل مقدار نیم‌رخ $\cos\theta$ نامتقارن خواهد بود (شکل ۳). این اطلاعات از دامنه سیگنال تحلیلی در شکل ۳-ب قابل دریافت نیست. نامتقارنی دامنه سیگنال تحلیلی کم است و به کمک آن نمی‌توان شیب‌دار بودن کنتاکت را حدس زد اما از نمودار $\cos\theta$ (شکل ۳-ج)، به‌خوبی می‌توان شیب‌دار بودن و جهت شیب توده را برآورد کرد. مشتق افقی نیز مقدار کمی به طرف شیب کنتاکت انحراف دارد و به کمک آن می‌توان به شیب‌دار بودن کنتاکت پی‌برد و جهت شیب را نیز مشخص کرد. کشیدگی نیم‌رخ $\cos\theta$ ، بین مقادیر $\cos\theta = [0,1]$ به سمت پایین شیب کنتاکت اتفاق می‌افتد

$$\cos\theta = \frac{\bar{A}\bar{S}}{|A|\cdot|S|} = \frac{\sqrt{(\partial M/\partial x)^2 + (\partial M/\partial y)^2}}{|A(x,y)|}, \quad (12)$$

کسینوس زاویه تتا روی مرز توده‌های مغناطیسی مقدار بیشینه‌ای برابر با یک نشان می‌دهد.

شکل ۲ میدان مغناطیسی (شکل ۲-الف)، مشتق افقی و سیگنال تحلیلی (شکل ۲-ب)، و کسینوس زاویه تتا را روی یک کنتاکت با امتداد طولانی نشان می‌دهد (نیم‌رخ‌های نشان داده شده عمود بر امتداد کنتاکت هستند). کسینوس زاویه تتا روی لبه‌های کنتاکت قائم، پیکم متقارنی (مقدار بیشینه‌ای) را که بین دو مقدار کمینه قرار گرفته است نشان می‌دهد (شکل ۲-ج).

یک فاصله برابر با عمق توده ($h = z_c$) از لبه‌ها می‌گذرد.

در شکل ۴-ج موقعیت توده نشان داده شده است.

در شکل ۵ نقشه خطوط پربندی تاثرات زاویه تیلت روی یک منشور قائم که طول، عرض، ضخامت و عمق آن به ترتیب ۱۰۰۰۰ و ۴۰۰۰ و ۵۰۰۰ و ۷۰۰ متر است، نشان داده شده است. خط صفر که مرز توده را تعیین می‌کند با رنگ سرخ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با این روش مرز توده به خوبی مشخص شده است. بنابراین می‌توان گفت که روش زاویه تیلت روشی مفید برای برآورد مرز توده‌های مغناطیسی است.

۴ بررسی روش‌های برآورد مرز روی داده‌های

مصنوعی

قابلیت‌های روش‌های برآورد مرز ذکر شده روی مدل مصنوعی با مشخصات آورده شده در جدول ۱، مقایسه شده است (شکل ۶). در این مدل شدت میدان مغناطیسی، زاویه میل و انحراف مغناطیسی به ترتیب برابر با 47000 nT ، 50° و 3° درجه و ضریب خودپذیری مغناطیسی مدل برابر با $SI \ 0/1$ در نظر گرفته شده است. میدان مغناطیسی با استفاده از یک شبکه برداشت مربعی و با فاصله نقاط برداشت ۲۰ متر به دست آمده است. شکل ۶-الف، بی‌هنجاری مغناطیسی ایجاد شده از سه مدل منشوری قائم (۲، ۳ و ۴)، یک مدل استوانه‌ای قائم (۵) و یک مدل منشوری شیب‌دار (۱) با شیب 45° درجه و به سمت غرب را نشان می‌دهد. مرز توده‌ها با خطوط مشکی مشخص شده است. هدف از ایجاد چند مدل، بررسی وابستگی صافی‌های عرضه شده به امتداد، شکل، شیب و عمق قرارگیری توده‌های مغناطیسی است. عمق قرارگیری مدل ۴، ۵۰۰ متر و دیگر مدل‌ها ۱۰۰ متر است و با توجه به عمیق بودن مدل ۴ نسبت به دیگر مدل‌ها، شدت میدان مغناطیسی حاصل از این مدل کمتر است. شکل ۶-ب، نقشه برگردان به قطب نقشه الف است. چون فاصله

و با کاهش عمق توده شیب نمودار در جهت شیب توده افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۳-ج دیده می‌شود، نقطه $\cos \theta = 1$ کمی به طرف جهت شیب توده منحرف شده است (ویجنز و همکاران ۲۰۰۵).

۳-۲ روش زاویه تیلت

تاثرات زاویه تیلت برابر با نسبت مشتق قائم به مشتق افقی از میدان مغناطیسی برگردان به قطب شده است. این روش، با فرض یک مدل کنتاکت قائم، مغناطیس‌شدگی القائی قائم و نبود مغناطیس‌شدگی باقی‌مانده شرح داده می‌شود. زاویه تیلت را ابتدا میلر و سینگ (۱۹۹۴) عرضه کردند. وردزکو و همکاران (۲۰۰۴) رابطه زاویه تیلت را به صورت زیر تعریف کردند:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\partial M}{\partial z} / \frac{\partial M}{\partial h} \right), \quad (13)$$

که $\frac{\partial M}{\partial h}$ و $\frac{\partial M}{\partial z}$ به ترتیب مشتق قائم و افقی مرتبه اول میدان مغناطیسی (M) هستند.

زاویه تیلت خواص جالبی دارد که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (سالم و همکاران، ۲۰۰۷):

بدون توجه به مقدار مشتق قائم و مشتق افقی کل، مقدار زاویه تیلت بین $(+90, -90)$ قرار دارد. مقدار زاویه تیلت روی توده مثبت، روی لبه‌های توده نزدیک به صفر و به طور دقیق‌تر صفر است و در محدوده بیرونی توده مقدار زاویه تیلت منفی است.

شکل ۴، رابطه بین زاویه تیلت و موقعیت یک کنتاکت قائم (موقعیت افقی و عمق) را نشان می‌دهد. بی‌هنجاری مغناطیسی (شکل ۴-الف) برای یک نیم‌رخ شمالی-جنوبی از یک توده با امتداد شرقی-غربی با زاویه میل مغناطیسی 90° درجه محاسبه شده است. شکل ۴-ب نیم‌رخ زاویه تیلت را نشان می‌دهد. نیم‌رخ زاویه تیلت روی لبه‌های توده از صفر می‌گذرد و از خطوط $\pm 45^\circ$ در

پیش گفته روی این نقشه اعمال شد که نتایج قابل قبولی به دست نیامد. به همین دلیل ابتدا داده‌ها به قطب مغناطیسی انتقال یافت و سپس ۲۰ متر به سمت بالا گسترش داده شد (شکل ۷-ب). دیگر صافی‌ها نیز روی این نقشه اعمال شدند. این عمل معمولاً در تفسیر داده‌های مغناطیسی برای حذف نوفه‌های سطحی صورت می‌گیرد. دیگر نقشه‌ها نیز مانند شکل ۶ هستند و به ترتیب عبارت‌اند از مشتق افقی (شکل ۷-ج)، مشتق قائم مرتبه اول (شکل ۷-د)، مشتق قائم مرتبه دوم (شکل ۷-ه)، سیگنال تحلیلی ساده (شکل ۷-و)، سیگنال تحلیلی مرتبه اول (شکل ۷-ز)، تانژانت زاویه تیلت (شکل ۷-ح) و کسینوس زاویه تتا (شکل ۷-ط). هرچند از دقت این روش‌ها به علت وجود نوفه کاسته شده، اما باز به خوبی مرز توده‌ها مشخص شده است. البته در نقشه سیگنال تحلیلی مرتبه اول و مشتق قائم مرتبه دوم تقریباً اثر مدل ۴ مشخص نیست.

جدول ۱. مشخصات مدل مصنوعی شامل ۴ منشور مستطیل و یک استوانه.

شماره مدل	۱	۲	۳	۴	۵
مشخصات مدل					
عرض (متر)	۵۰۰	۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	شعاع
طول (متر)	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	استوانه ۵۰۰
ضخامت (متر)	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
«مرکز مدل» X (متر)	۱۵۰۰	۲۰۰۰	۳۸۳۴	۲۵۰۰	۳۵۰۰
«مرکز مدل» Y (متر)	۲۵۰۰	۱۰۰۰	۲۵۶۳	۳۷۵۰	۱۰۰۰
«عمق واقعی مدل» Z (متر)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۵۰۰	۱۰۰
آزیموت (درجه)	۰	۰	۶۰	۹۰	۰
شیب توده (درجه)	۳۳۰	۰	۰	۰	۰

توده‌ها از همدیگر زیاد است، با استفاده از نقشه برگردان به قطب نیز می‌توان به وجود این پنج توده پی برد، اما نمی‌توان مرز توده‌ها را به خوبی روشن ساخت و درباره شیب‌دار بودن منشور شماره (۱) نظر قطعی داد. شکل ۶-ج، مشتق افقی کل داده‌های برگردان به قطب شده را نشان می‌دهد. مقدار بیشینه مشتق افقی مرز توده‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۶-د مشتق قائم مرتبه اول میدان مغناطیسی برگردان به قطب است. این صافی نیز به خوبی محدوده توده را با مقادیر مثبت نشان می‌دهد. شکل ۶-ه مشتق قائم مرتبه دوم است. این صافی محدوده توده را بسته‌تر و دقیق‌تر از مشتق قائم مرتبه اول نشان می‌دهد و به خصوص محدوده مدل شماره ۴ که عمق آن بیشتر است را دقیق‌تر نشان داده است. سیگنال تحلیلی ساده در شکل ۶-و نشان داده شده است. سیگنال تحلیلی ساده روی توده‌هایی که عریض هستند مقادیر بیشینه‌ای روی مرز توده نشان داده است. مدل عمیق‌تر به خوبی روی این نقشه قابل مشاهده نیست. سیگنال تحلیلی مرتبه اول (شکل ۶-ز) مرز توده را دقیق‌تر نشان می‌دهد. سیگنال تحلیلی روی مدل شماره ۱ که شیب‌دار است بیشینه‌ای دقیقاً روی لبه‌های بالایی توده نشان داده است. شکل ۶-ح نقشه تانژانت زاویه تیلت را نشان می‌دهد. این صافی نیز به خوبی مرز توده‌ها را مشخص می‌سازد و مزیت آن در برجسته کردن اثر مدل ۴ است. شکل ۶-ط، نقشه حاصل از صافی کسینوس زاویه تتا است. بیشینه کسینوس زاویه تتا نیز مرز توده‌ها را نشان می‌دهد. در این نقشه نیز اثر مدل ۴ برجسته شده، هرچند مرز توده را گسترده‌تر از مقدار واقعی نشان داده است. همچنین مقدار بیشینه آن روی مدل شیب‌دار ۱ به سمت جهت شیب توده منحرف شده است.

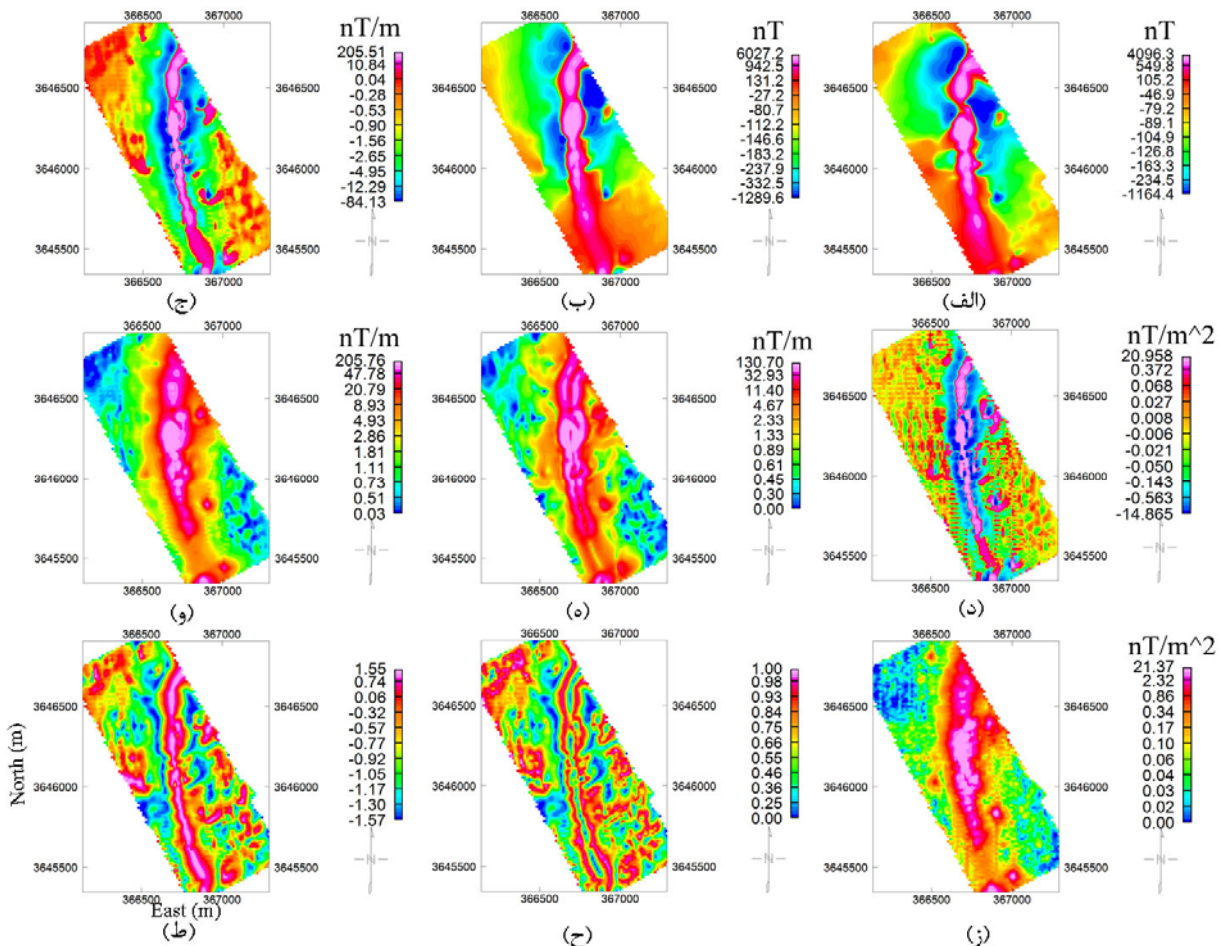
در شکل ۷ قابلیت صافی‌های برآورد مرز ذکر شده در صورت وجود نوفه نیز بررسی شده است. برای این منظور به مدل شکل ۶، ۲۰ درصد نوفه اضافه شد. شکل ۷-الف میدان مغناطیسی حاصل را نشان می‌دهد. ابتدا صافی‌های

۵ اعمال صافی‌های برآورد مرز روی داده‌های واقعی

کانسار آهن رباط پشت‌بادام

کانسار آهن رباط پشت‌بادام در ۲۱۰ کیلومتری شمال شرقی شهرستان یزد، ۱۵۸ کیلومتری شمال شرقی معدن سنگ آهن چغارت و ۷۰ کیلومتری شمال شرقی معدن سنگ آهن چادرملو قرار دارد. از نظر تقسیمات کشوری معدن در محدوده شهرستان اردکان، دهستان رباطات قرار دارد. این کانسار آهن در طول جغرافیایی $55^{\circ}34'24''$ و عرض جغرافیایی $32^{\circ}56'34''$ واقع شده است. زاویه میل و

انحراف مغناطیسی در این منطقه به ترتیب برابر با ۵۰ و ۳ درجه و شدت میدان مغناطیسی برابر با ۴۷۰۰۰ نانوتسلا است که با کمک سامانه IGRF تعیین شده‌اند. نزدیک‌ترین آبادی به معدن، روستای علی‌آباد و رباط پشت‌بادام هستند که به ترتیب در فواصل ۵ و ۷ کیلومتری معدن قرار دارند. آب‌وهوای منطقه، خشک و صحرایی با خصوصیات اقلیمی کویری، دارای زمستان‌های معتدل تابستان‌های بسیار گرم است و بارندگی در فصول زمستان و اوایل بهار صورت می‌دهد.



شکل ۸ (الف) بی‌هنجاری میدان مغناطیسی کانسار آهن رباط پشت‌بادام که ۵ به سمت بالا گسترش داده شده است. (ب) نقشه برگردان به قطب (الف). در این نقشه و دیگر نقشه‌ها رنگهای روشن محدوده تقریبی توده را نشان می‌دهند. دیگر صافی‌ها بر روی این نقشه اعمال شده‌اند. (ج) مشتق قائم مرتبه اول. (د) مشتق قائم مرتبه دوم. (ه) مشتق افقی کل. به دلیل کم عرض بودن توده، مشتق افقی کل مرز توده را به خوبی نشان نمی‌دهد. (و) سیگنال تحلیلی ساده. (ز) سیگنال تحلیلی مرتبه اول. (ح) کسینوس زاویه تنا. (ط) زاویه تیلت.

۴ نتیجه‌گیری

به دلیل ماهیت دوقطبی میدان مغناطیسی، تفسیر و پردازش داده‌ها اهمیت خاصی دارد. از مشتقات میدان پتانسیل شامل مشتق افقی جهت‌دار، مشتق افقی کل، مشتق قائم مرتبه اول و مرتبه‌های بالاتر و سیگنال تحلیلی مرتبه‌های گوناگون می‌توان در برآورد مرز توده‌های معدنی استفاده کرد. مقدار مشتق افقی کل روی لبه توده بیشینه و در دیگر نقاط برابر با صفر (کمینه مقدار) است. سیگنال تحلیلی بدون وابستگی به مولفه‌های میدان مغناطیسی بیشینه مقداری را روی لبه‌های توده آشکار می‌سازد. همچنین می‌توان از صافی‌های فازی مانند زاویه تیلت و کسینوس زاویه تتا در برآورد مرز توده‌های مغناطیسی استفاده کرد. صافی‌های نام‌برده روی داده‌های مصنوعی، که با استفاده از نرم‌افزار مدل‌ویژن به‌دست آمد، و داده‌های واقعی رباط پشت‌بادام اعمال شده‌اند. با اعمال صافی‌های معرفی شده در این مقاله روی داده‌های کانسار آهن رباط پشت‌بادام، می‌توان بی‌هنجاری را به‌صورت توده‌ای با عرض تقریبی بین ۵۰ تا ۱۰۰ متر و با روند شمالی-جنوبی و با شیب قائم تفسیر کرد.

منابع

- بلیکلی، د.، (۱۹۹۵)، تئوری پتانسیل در گرانی و مغناطیس کاربردی، ترجمه حسین‌زاده گویا، ن.، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
- علمدار، ک.، انصاری، ع.، ۱۳۸۷، استفاده از فیلتر مشتق قائم با مرتبه‌های متفاوت در تفسیر بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل، مجله ژئوفیزیک ایران، ۲(۲)، ۳۹-۴۹.
- Debeglia, N., and Coppel, J., 1997, Automatic 3-D interpretation of potential field data using analytic signal derivatives: *Geophysics*, **62**(1), 87-96.
- Hsu, s. k., and Sibuet, j. c., and Shyu, c. t., 1996, High-resolution detection of geologic boundaries from potential-field anomalies, an

امکان کار در تمام روزهای سال وجود دارد. شبکه برداشت مغناطیس‌سنجی متشکل از ۳۱ نیم‌رخ است که روند آنها شمال شرقی-جنوب غربی و فاصله آنها از یکدیگر ۵۰ متر است. شکل ۸، بررسی‌های مغناطیس‌سنجی روی این کانسار را نشان می‌دهد. به‌منظور حذف نوفه‌های سطحی، ابتدا داده‌های نقشه میدان مغناطیسی ۵ متر به سمت بالا گسترش داده شده است (شکل ۸-الف). برای از بین بردن خاصیت دوقطبی میدان، از صافی برگردان به قطب (RTP)، استفاده شده است (شکل ۸-ب). به کمک این نقشه می‌توان محدوده تقریبی و روند شمالی جنوبی توده را تشخیص داد. مشتق قائم مرتبه اول میدان مغناطیسی (شکل ۸-ج)، روی توده مقادیر مثبت (رنگ‌های روشن)، و در دیگر نقاط مقادیر نزدیک به صفر آشکار ساخته است. مشتق قائم مرتبه دوم (شکل ۸-د) محدوده توده را بسته‌تر نشان می‌دهد. مشتق افقی کل (شکل ۸-ه)، به دلیل کم‌عرض بودن توده، مرز آن را به‌خوبی نشان نمی‌دهد؛ هرچند می‌توان به کمک این صافی نیز محدوده تقریبی توده را مشخص کرد. سیگنال تحلیلی ساده (شکل ۸-و) در دو محدوده مقادیر بیشینه دارد. به کمک این نقشه می‌توان بی‌هنجاری مغناطیسی را به‌صورت دو توده مجزای شمالی و جنوبی تفسیر کرد. سیگنال تحلیلی مرتبه اول (شکل ۸-ز) نیز روی توده، مقدار بیشینه نشان می‌دهد. کسینوس زاویه تتا (شکل ۸-ح) روی مرز توده مقدار بیشینه نشان می‌دهد. مقادیر زاویه تیلت (شکل ۸-ط)، روی توده مثبت و بیرون از محدوده توده منفی است. به کمک زاویه تیلت می‌توان به خوبی مرز توده را مشخص کرد. با استفاده از نتایج حاصل از صافی‌های اعمال شده روی داده‌های کانسار آهن رباط پشت‌بادام، می‌توان بی‌هنجاری را به‌صورت توده‌ای با عرض تقریبی بین ۵۰ تا ۱۰۰ متر و با روند شمالی-جنوبی و با شیب قائم تفسیر کرد.

- Roest, W. R., Verhoef, J., and Pilkington, M., 1992, Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal: *Geophysics*, **57**, 116-125.
- Salem, A., and Williams, S., 2007, Tilt-depth method: A simple depth estimation method using first order magnetic derivatives: *The Leading Edge*, **26**, 1502-1505.
- Verduzco, B., Fairhead, J., Green, C., and MacKenzie, C., 2004, New insights into magnetic derivatives for structural mapping: *The Leading Edge*, **23**, 116-119.
- Wijns, C., Perez, C., and Kowalczyk, P., 2005, Theta map: Edge detection in magnetic data: *Geophysics*, **70**(4), L39-L43.
- enhanced analytic signal technique: *Geophysics*, **61**(2), 373-386.
- Miller, H. G., and Singh, V., 1994, Potential field tilt—A new concept for location of potential field sources: *J. Appl. Geophys.*, **32**, 213-217.
- 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., 1984, Toward the three-dimensional automatic interpretaion of potential field data via generalized Hilbert transforms, *Fundamental relations: Geophysics*, **53**, 957-966.