

برآورد پارامترهای منابع مغناطیسی دوبعدی از روی تابع‌های ویژه شامل اویلر، سیگنال تحلیلی و پاسخ تحلیلی بی‌هنجاری‌ها

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 استادیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

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

(دریافت: ۹۰/۲/۲۰، پذیرش نهایی: ۹۲/۲/۲۴)

چکیده

مزیت اصلی استفاده از تابع‌های ویژه مانند سیگنال تحلیلی و اویلر واهمامیخت این است که این امکان را فراهم می‌آورد تا برآوردی از موقعیت افقی و عمق توده زیرسطحی بدون نیاز به دانستن پارامترهای بردار مغناطیس زمین صورت گیرد. در این بررسی با استفاده هم‌زمان از تابع‌های سیگنال تحلیلی و اویلر واهمامیخت به برآورد پارامترهای فیزیکی توده‌های مولد زیرسطحی پرداخته شده است. در محاسبات مربوط به این روش نیازی به تعیین سطح مبنای مغناطیس‌سنجی نیست. لذا می‌توان عمق، مرز (موقعیت افقی)، شاخص ساختاری، تباین مغناطیسی و شیب توده را برآورد کرد. این روش روی داده‌های مغناطیس مصنوعی مدل‌های کنتاکت، استوانه و دایک نازک به کار برده شده است. همچنین این روش روی داده‌های مغناطیس زمینی منطقه ژرف‌دره فورموسا (Formosa Canyon, FC) واقع در جنوب غرب کشور تایوان به کار رفته است که نتایج آن با مقاطع لرزه‌نگاری موجود در انطباق است. همچنین این روش روی داده‌های مغناطیس زمینی معدن سنگ‌آهن سورک در استان یزد به کار برده شده است که نتایج حاصل از برآورد عمق و شاخص ساختاری لاگ‌های حفاری موجود را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سیگنال تحلیلی، اویلر واهمامیخت، تابع‌های ویژه، تباین مغناطیسی، شاخص ساختاری، ژرف‌دره فورموسا، سورک، یزد، لاگ حفاری

Estimating source parameters of 2D magnetic sources from special function: euler deconvolution, analytic signal and analytical expression of the anomalies

Alamdar, K.¹, Kamkare-Reouhani, A.² and Ansari, A. H.³

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

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

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

(Received: 10 May 2011, Accepted: 14 May 2013)

Abstract

Generally, the analytic-signal and the Euler-deconvolution techniques have been widely used for estimating subsurface magnetic or gravity source parameters. The main advantage of using these two techniques is that we can delineate geological boundaries and determine depths to sources without considering the ambient earth magnetic parameters. However, in the traditional Euler-deconvolution method, an *a priori* selected structural index is usually used to estimate the causative source position. Unfortunately, the geometric type of a subsurface magnetic source is also a parameter that a geologist or

geophysicist would wish to determine. Moreover, the datum level of a magnetic anomaly usually involved in the traditional Euler-deconvolution method is difficult to determine unambiguously, that results in the dependence of the structural index on the datum level. An incorrect structural index causes spatially diffuse Euler solutions.

Estimation of the depth of a buried structure from the magnetic data has drawn considerable attention. Different numerical methods have been given in the geophysical literature. The most commonly used of these methods are Werner deconvolution and Euler deconvolution. In these methods, the depth determination problem is transformed into the problem of finding a solution to a system of linear equations. The methods are sensitive to errors both in anomaly amplitude resolution and in determination of vertical and horizontal gradients, which are highly sensitive to noise.

A variety of semi-automatic methods, based on the use of derivatives of the magnetic anomalies, have been developed for the determination of causative source parameters, such as locations of boundaries and depths. One of these techniques is the analytic signal method, which was initially used in its complex function form and makes use of the Hilbert transform. It does not require knowledge of the magnetization direction and therefore it is useful in cases of remanent magnetization. Initially, it was successfully applied on profile data. The method was further developed by Roest et al. (1992) for the interpretation of aeromagnetic maps. In the analytic signal method, it is typically assumed that the causative sources are 2D geological structures, such as contacts, dikes and horizontal cylinders. For these models, depths can be obtained either from the width of the analytic signal anomalies or based on the ratio of the analytic signal to its higher derivatives if the source type is assumed. However, correct estimation of the depth is obtained only when the source corresponds to the chosen model. Several attempts have been made to use the analytic signal method to provide both the depth and model type of magnetic sources. However, all these attempts are based on the location of the maximum for defining the source location and the value of the maxima being used to define the type of source.

Few methods have been developed to determine the shape of the buried structure from magnetic data. Barbosa et al. (1999) presented a criterion for determining the correct structural index that is related to the shape of the source and is applied in magnetic interpretation using the Euler deconvolution method.

We propose an interpretational approach using the analytic signal and Euler deconvolution to estimate the magnetic source parameters of a 2D contact, a thin dike and a cylinder. The major advantage of using a joint analysis is that not only we can determine the depths and possible geometric types (structural indices) of magnetic sources, but also we can estimate the structural dips and magnetization contrast. The results can avoid solution bias from an inappropriate magnetic datum level and can determine the horizontal locations, depths, structural types (indices), magnetization contrasts and/or structural dips. The synthetic models show that the feasibility of the proposed method is quite good. However, if the magnetic interference between two adjacent structures is too large, the method fails to solve the magnetic parameters. The maximum amplitudes (peaks) of the analytic signal in the 2D profile can also be used as an auxiliary method for judging the existence of probable solutions at the same locations. In real data, the structural index of a simple 2D model must be assigned for further estimation of the magnetization contrast and structural dip of the model. To demonstrate the feasibility of the proposed method, we analyze a magnetic profile across the Formosa Canyon, south-west Taiwan. For this real data, several different data windows were tried in order to obtain the best depth and structural-index solutions. Results show that good depth and structural-index solutions are placed at the locations where the analytic signal

generally displays maximum amplitudes (peaks). Also the proposed method tested on ground magnetic profile from Surk Iron ore in Yazd Province in which the depth and structural index have broad correlation with exploratory drilling.

Keywords: Analytic signal, Euler deconvolution, Special function, Magnetization contrast, Structural Index, Formosa Canyon, Surk, Yazd, Drilling logging

۱ مقدمه

ساختاری به سطح مبنا نیز بستگی دارد. انتخاب غیر صحیح شاخص ساختاری، منجر به تولید جواب‌های پراکنده خواهد شد (تامسون، ۱۹۸۲؛ ریید و همکاران، ۱۹۹۰؛ راوات، ۱۹۹۶؛ هسو، ۲۰۰۲). سالم و راوات (۲۰۰۳) روش ترکیبی (AN-EU) را براساس معادلات اویلر و سیگنال تحلیلی پایه نهادند. روش آنها مستقل از سطح مبنای مغناطیس‌سنجی است اما این روش فقط قادر به تعیین موقعیت و هندسه توده‌ها خواهد بود. ماشایاندبو و همکاران (۲۰۰۱) با استفاده هم‌زمان از تابع‌های اویلر و سیگنال تحلیلی توانستند پارامترهای مغناطیسی توده‌های دو بُعدی مانند مدل کنتاکت و صفحه نازک را برآورد کنند. باین حال نتایج روش آنها هنوز از سطح مبنای غیر دقیق متأثر است و باید نوع ساختار زیر سطحی قبل از کاربرد آن انتخاب شود. هسو (۲۰۰۲) با استفاده از مشتقات بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، روش معکوس‌سازی ترکیبی را برای شاخص ساختاری و موقعیت توده از روی معادله اویلر پیشنهاد کرد. در این نوشته براساس روش هسو (۲۰۰۲) روشی تفسیری شامل تحلیل هم‌زمان سیگنال تحلیلی و اویلر واهمامیخت عرضه می‌شود که علاوه بر نوع ساختار، موقعیت افقی و عمق، امکان برآورد پارامترهای مغناطیسی بیشتری از توده‌های مولد، مانند تباین مغناطیدگی و شیب ساختاری آن را فراهم می‌کند.

۲ نظریه روش

هسو (۲۰۰۲) فرمول کلی اویلر را به صورت زیر عرضه کرد:

روش‌های سیگنال تحلیلی و اویلر واهمامیخت به نحوی گسترده در برآورد پارامترهای توده‌های زیر سطحی مولد بی‌هنجاری‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی به کار رفته‌اند (نیقیان، ۱۹۷۲، ۱۹۷۴، ۱۹۸۴؛ تامسون، ۱۹۸۲؛ ریید و همکاران، ۱۹۹۰؛ هسو و همکاران، ۱۹۹۶؛ دیجلیا و کوریل، ۱۹۹۷؛ تورستون و اسمیت، ۱۹۹۷؛ هسو و همکاران، ۱۹۹۸؛ اسمیت و همکاران، ۱۹۹۸؛ فدی و فلوریو، ۲۰۰۱؛ سالم و راوات، ۲۰۰۳؛ سالم و اسمیت، ۲۰۰۵؛ سالم و همکاران، ۲۰۰۵؛ ویلیامز و همکاران، ۲۰۰۵؛ اسمیت و سالم، ۲۰۰۵؛ سالم و همکاران، ۲۰۰۸). مزیت اصلی استفاده از این دو تابع این است که می‌توان مرزهای توده‌های زمین‌شناسی به همراه عمق تا بالای آنها را بدون نیاز به اطلاع از پارامترهای بردار مغناطیس محل برداشت برآورد کرد. باین حال در روش اویلر واهمامیخت متداول لازم است تا قبل از اجرای روش، یک شاخص ساختاری که بیانگر هندسه توده است انتخاب شود (تامسون، ۱۹۸۲). ارتباط بین شاخص ساختاری و هندسه توده در جدول ۱ آمده است. متأسفانه نوع هندسه منابع مغناطیسی زیر سطحی پارامتری است که زمین‌شناس یا ژئوفیزیک‌دان درصدد برآورد آن است و نمی‌تواند قبل از برآورد عمق مشخص باشد. به علاوه اینکه تعیین دقیق سطح مبنای بی‌هنجاری‌های مغناطیس‌سنجی (منظور سطحی افقی است که توده مولد زیر آن قرار می‌گیرد و بی‌هنجاری در بالای آن برداشت می‌شود) که در روش اویلر واهمامیخت متداول از آن استفاده می‌شود نیز دشوار است. این مطلب بیانگر آن است که شاخص

مربعات حل می‌شود. همچنین می‌توان معادله (۲) با فرمول دقیق برای مشتق قائم منبع مغناطیسی موردنظر حل کرد. با استفاده توأم از سیگنال تحلیلی و اویلر واهمامیخت و حل پاسخ تحلیلی برای منبع زیرسطحی با هندسه مناسب، این امکان وجود دارد تا پارامترهای دیگر از منبع برآورد شود. در مقاله حاضر، این روش در مورد مدل‌های کنتاکت، دایک نازک و استوانه شرح داده می‌شود.

۲-۱ مدل کنتاکت یا گسل

روابط محاسبه بی‌هنجاری مغناطیسی کل (M) و مشتقات مربوط به مدل‌های کنتاکت زمین‌شناسی و گسل را نیقیان (۱۹۷۲) عرضه کرده است. مشتق مغناطیسی کنتاکت مغناطیسی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial M}{\partial z} = \alpha \frac{(x-x_0)\cos\beta + (z-z_0)\sin\beta}{r^2} \quad (3)$$

که در آن، $\alpha = 2kFc \sin(d)$ ، $\beta = 2I - d - 90^\circ$ و $r^2 = (x-x_0)^2 + (z-z_0)^2$ پارامتر k تباین مغناطیسی مدل با اطراف، d شیب ساختاری که پادساعت‌گرد نسبت به سطح افقی سنجیده می‌شود، F شدت کل مغناطیسی میدان مغناطیسی اطراف، $c = 1 - \cos^2 i \sin^2 A$ (i زاویه میل بردار مغناطیس زمین و A زاویه بین شمال مغناطیسی و محور x) و $I = \tan^{-1}\left(\frac{\tan i}{\cos A}\right)$ است. با جای‌گذاری رابطه (۳) در طرف راست رابطه (۲) و فرض شاخص ساختاری $N=0$ در مورد مدل کنتاکت) به رابطه زیر خواهیم رسید:

$$(x-x_0)\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial M}{\partial z}\right) + (z-z_0)\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial M}{\partial z}\right) = -\alpha \frac{(x-x_0)\cos\beta + (z-z_0)\sin\beta}{r^2} \quad (4)$$

معادله بالا برای یافتن مقادیر α و β و با استفاده از روش کمترین مربعات حل می‌شود. با داشتن این دو پارامتر می‌توان شیب ساختاری (d) و تباین مغناطیسی توده (kF) مربوط به مدل را برآورد کرد. البته این در صورتی

$$(x-x_0)\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial^n M}{\partial z^n}\right) + (y-y_0)\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial^n M}{\partial z^n}\right) + (z-z_0)\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial^n M}{\partial z^n}\right) = -(N+n)\left(\frac{\partial^n M}{\partial z^n}\right), \quad (1)$$

که در آن، $M(x,y,z)$ بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از منبع مغناطیسی در نقطه (x_0, y_0, z_0) ، N بیانگر شاخص ساختاری معادل یکی از منابع جدول ۱ و n مرتبه مشتق قائم (مرتبه صفر برای بی‌هنجار اصلی مشاهده‌ای) است. اگر در رابطه (۱) مرتبه مشتق (n) مساوی صفر انتخاب شود، رابطه اویلر واهمامیخت متداول نتیجه می‌شود. در صورت انتخاب مقادیر غیر صفر n معادله اویلر بین نقاط مکانی شامل موقعیت توده زیرسطحی و موقعیت برداشت مغناطیس‌سنجی و همچنین مشتقات قائم داده‌های برداشت شده نوشته می‌شود. به عبارت دیگر مشتقات داده‌های میدان پتانسیل نیز تابع‌هایی همگن هستند که در معادله اویلر صدق می‌کنند. با انتخاب مقادیر بزرگ‌تر از صفر در رابطه (۱) می‌توان موقعیت و نوع منبع مغناطیسی را بدون نیاز به دانستن سطح مبنا برآورد کرد. با این حال مشتقات مرتبه بالاتر ممکن است از داده‌های نوفه‌ای متأثر شوند. برای $n=1$ با بی‌هنجاری سروکار داریم که درون میدان ناحیه‌ای از نوع چندجمله‌ای با درجه پایین قرار دارد. بنابراین رابطه (۱) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$(x-x_0)\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial M}{\partial z}\right) + (y-y_0)\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial M}{\partial z}\right) + (z-z_0)\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial M}{\partial z}\right) = -(N+1)\left(\frac{\partial M}{\partial z}\right), \quad (2)$$

به منظور تعیین N و z_0 ، x_0 باید $\frac{\partial M}{\partial z}$ و $\frac{\partial M}{\partial x}$ داده‌های برداشته شده محاسبه و جایگزین رابطه (۲) کنیم. مشتق افقی بی‌هنجاری مغناطیسی M را می‌توان از داده‌های برداشت شده محاسبه کرد. درحالی‌که مشتق قائم داده‌ها با تبدیل هیلبرت یا سیگنال تحلیلی قابل محاسبه است (هسو و همکاران، ۱۹۹۶). رابطه (۲) برای تعیین سه پارامتر مغناطیسی شامل x_0 ، z_0 و N از به روش کمترین

نتیجه می‌شود (مورتی و میشر، ۱۹۸۰):

$$M = \alpha_c \left[\frac{z^2 - x^2}{(z^2 + x^2)^2} \cos \beta + \frac{2xz}{(z^2 + x^2)^2} \sin \beta \right] \quad (۷)$$

که در آن $\alpha_c = 2kF_0 S \frac{\sin i}{\sin i'}$ ، $F_0' = F \frac{\sin i}{\sin i'}$

در این رابطه F شدت کل میدان $i' = \tan^{-1} \left[\frac{\tan i}{\sin \delta} \right]$

مغناطیس زمین، i زاویه میل بردار مغناطیس زمین، δ زاویه بین شمال مغناطیسی و امتداد توده مغناطیسی، S مساحت سطح مقطع توده و $\beta = 2i' - 180^\circ$ است. با توجه به رابطه (۷) مشتق قائم آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial M}{\partial z} = \alpha_c \cos \beta \left[\frac{-6(x-x_0)^2(z-z_0) + 2(z-z_0)^3}{r^6} \right] + \alpha_c \sin \beta \left[\frac{-2(x-x_0)^3 + 6(x-x_0)(z-z_0)^2}{r^6} \right] \quad (۸)$$

با توجه به جدول ۱ مقدار شاخص ساختاری استوانه $N=2$ است. با جای‌گذاری رابطه (۸) در طرف راست رابطه (۲) رابطه زیر نتیجه می‌شود:

$$(x-x_0) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial M}{\partial z} \right) + (z-z_0) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial M}{\partial z} \right) = \alpha_c \left\{ \begin{array}{l} \cos \beta \left[\frac{18(x-x_0)^2(z-z_0) - 6(z-z_0)^3}{r^6} \right] \\ - \sin \beta \left[\frac{6(x-x_0)^3 + 18(x-x_0)(z-z_0)^2}{r^6} \right] \end{array} \right\} \quad (۹)$$

جدول ۱. میزان شاخص ساختاری مدل‌های هندسی مختلف.

شاخص ساختاری	نوع مدل
۰	کنتاکت، گسل با نسبت عمق به پاشنه کم
۱	دایک نازک، گسل با نسبت عمق به پاشنه زیاد
۲	استوانه افقی یا قائم
۳	کره

است که فرض شود، مغناطیس توده فقط از نوع القایی است.

۲-۲ مدل دایک نازک

روابط محاسبه پاسخ مغناطیسی و همچنین مشتقات مربوط به مدل دایک نازک را ماشایاندبو و همکاران (۲۰۰۱) عرضه کرده‌اند. مشتق قائم مربوط به این مدل از رابطه زیر نتیجه می‌شود:

$$\frac{\partial M}{\partial z} = \alpha_d \left\{ \begin{array}{l} \frac{-2(z-z_0)[(x-x_0) \sin \beta - (z-z_0) \cos \beta]}{r^4} \\ - \frac{\cos \beta}{r^2} \end{array} \right\} \quad (۵)$$

که در آن، $\alpha_d = 2kFct \sin(d)$ و t ضخامت دایک است. پارامترهای دیگر همانند مدل کنتاکت است که قبلاً تعریف شد. با جای‌گذاری رابطه (۵) در طرف راست رابطه (۲) و با فرض شاخص ساختاری $N=1$ (برای مدل دایک نازک) به رابطه زیر می‌رسیم:

$$(x-x_0) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial M}{\partial z} \right) + (z-z_0) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial M}{\partial z} \right) = 4\alpha_d (z-z_0) \frac{[(x-x_0) \sin \beta + (z-z_0) \cos \beta]}{r^4} + \frac{2\alpha_d \cos \beta}{r^2} \quad (۶)$$

همانند رابطه (۴) با استفاده از روش کمترین مربعات، رابطه (۶) برای پارامترهای α و β حل می‌شود. سپس از روی این دو پارامتر و با فرض اینکه مغناطیدگی مدل از نوع القایی است، می‌توان شیب ساختاری (d) و حاصل ضرب تباین مغناطیسی مدل و ضخامت آن (kFt) را برآورد کرد.

۳-۲ مدل استوانه

معادله پاسخ کل مغناطیسی M مدل استوانه از رابطه زیر

به طور مشابه، با حل معادله (۹) به روش کمترین مربعات می‌توان مقادیر α و β را به دست آورد. همچنین می‌توان حاصل ضرب تباين مغناطیسی توده و سطح مقطع توده (kFS) را نیز تعیین کرد.

۳ کاربرد روش روی مدل‌های مصنوعی

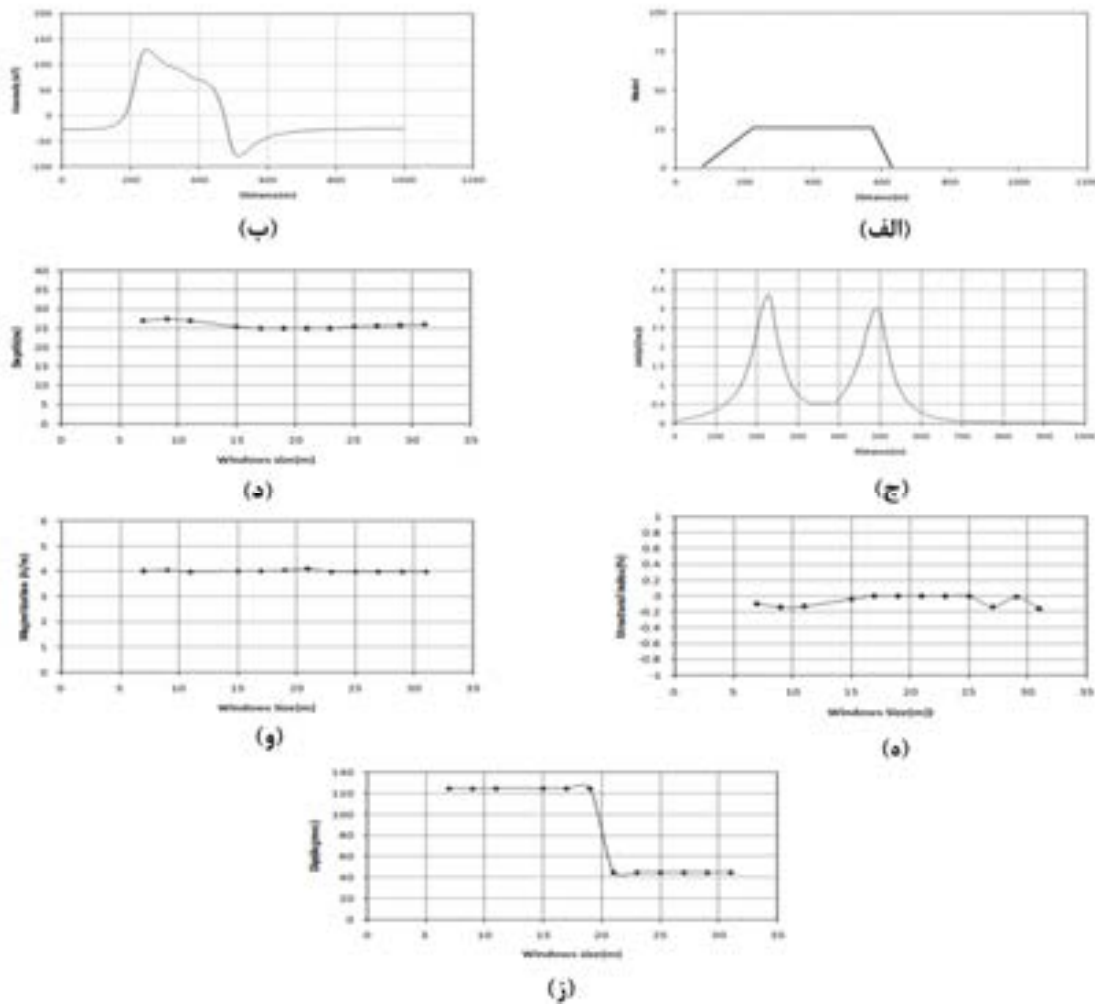
در این قسمت کاربرد روش پیش گفته روی داده‌های مصنوعی مدل‌های هندسی نشان داده می‌شود. مثال اول شامل یک مدل کنتاکت است که در عمق ۲۵ متری از سطح زمین قرار دارد. شدت مغناطیدگی مدل نسبت به اطراف برابر با ۴ آمپر بر متر، شیب پهلوی راست آن ۴۵ و پهلوی چپ آن ۱۳۵ درجه منظور شده است. شدت میدان مغناطیس اطراف ۶۰۰۰۰ نانوتسلا، زاویه میل ۶۰ درجه و زاویه انحراف آن ۱۵ درجه فرض شده است. شکل ۱-الف مقطع عمودی مدل را نشان می‌دهد. شکل ۱-ب پاسخ مغناطیسی مدل کنتاکت را نشان می‌دهد. در شکل ۱-ج منحنی مشتق قائم مرتبه اول سیگنال تحلیلی داده‌های قسمت ب آمده است. در این شکل بیشینه مقدار منحنی (نقاط پیک) منطبق بر گوشه‌های مدل کنتاکت است. به منظور برآورد عمق و سایر پارامترهای مدل از روش عرضه شده در این نوشتار استفاده شده است. همان‌طور که در نظریه روش بدان اشاره شد از روش کمترین مربعات برای حل معادلات مربوط استفاده می‌شود. بدین منظور از پنجره‌ای که ابعاد آن برای مفسر قابل تنظیم است استفاده شده است. جواب‌ها به ازای پنجره‌های با اندازه‌های متفاوت تولید شده‌اند. نتایج مربوط به هر برآورد در مقابل اندازه پنجره مورد استفاده در محاسبات نمایش داده شده است. شکل ۱-د نتایج برآورد عمق مدل را نشان می‌دهد. در این بررسی هر ۱۶ نقطه در امتداد نیم‌رخ برای محاسبات استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۱-د مشاهده می‌شود، با افزایش ابعاد پنجره مورد استفاده، عمق برآورد شده به عمق واقعی مدل

نزدیک‌تر می‌شود. شکل ۱-ه نتیجه برآورد شاخص ساختاری مدل را در مقابل اندازه پنجره مورد استفاده نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱ مقدار شاخص ساختاری کنتاکت صفر است که نتیجه برآورد آن در پنجره‌های با ابعاد ۱۵ تا ۲۵ کاملاً به مقدار واقعی نزدیک است. شکل ۱-و مربوط به برآورد شدت مغناطیدگی مدل است که به ازای پنجره‌های با ابعاد متفاوت نتیجه شده است. این مقدار با مقدار واقعی آن (۴ آمپر بر متر) که در تولید داده‌های مغناطیسی استفاده شده است را تأیید می‌کند. شکل ۱-ز نتایج برآورد شیب توده را نشان می‌دهد. در این شکل جواب‌ها پس از خوشه‌بندی در دو خوشه متفاوت قرار گرفته‌اند که خوشه سمت راست شیب پهلوی راست توده (۴۵ درجه) و خوشه سمت چپ شیب پهلوی چپ (۱۳۵ درجه) آن را نشان می‌دهد و همبستگی زیادی با مقادیر واقعی آن دارد.

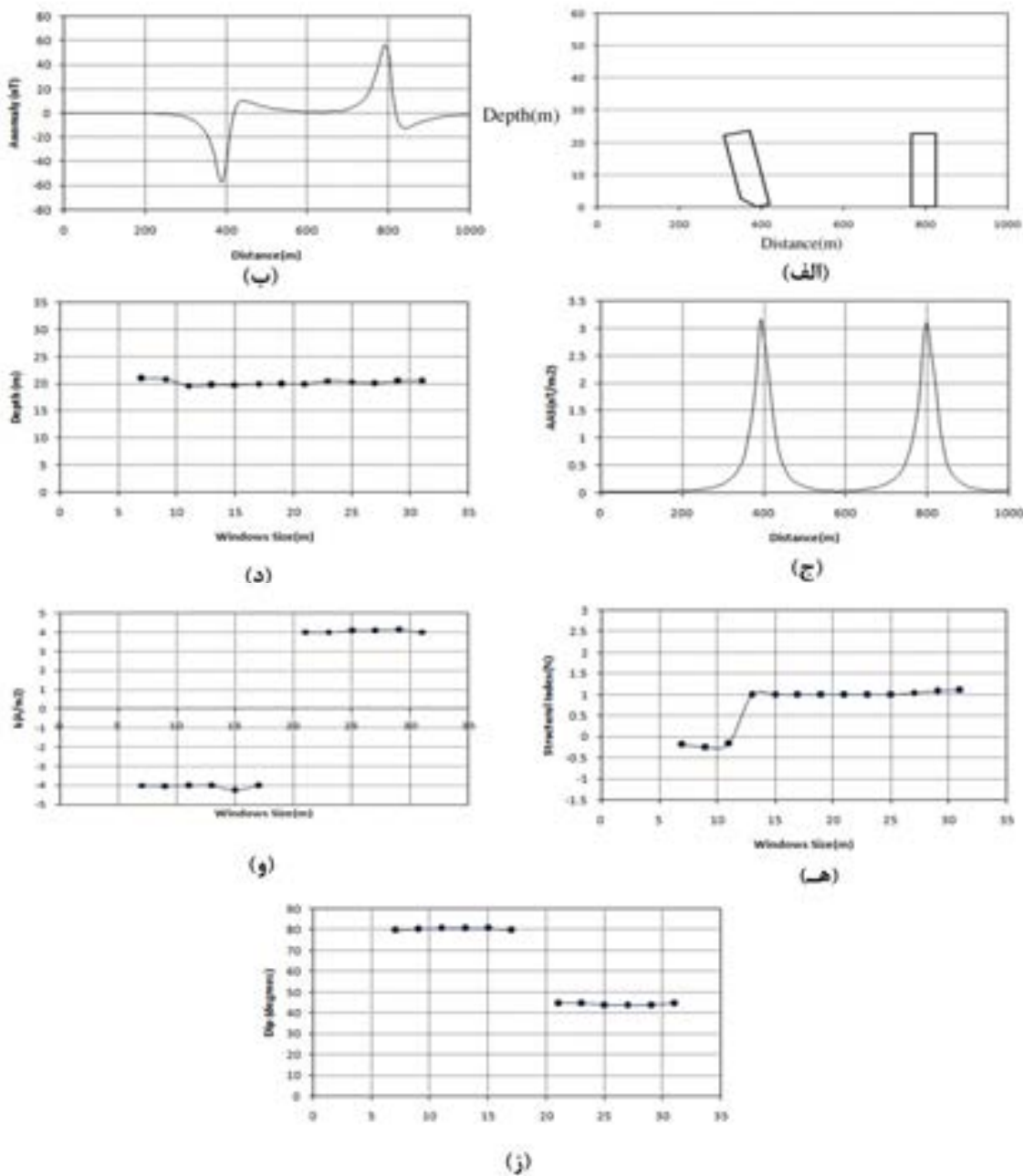
مثال دوم شامل دو دایک نازک با ضخامت‌های یکسان برابر با ۱ متر تشکیل شده است که در عمق ۲۰ متری از سطح زمین قرار دارند. شدت مغناطیدگی دایک نازک سمت راست ۴ و دایک نازک سمت چپ ۴- آمپر بر متر منظور شده است. دایک سمت راست دارای شیب ۴۵ درجه است و دایک نازک سمت چپ شیب ۸۰ درجه دارد. شدت میدان مغناطیس اطراف ۵۵۰۰۰ نانوتسلا، زاویه میل ۸۰ درجه و زاویه انحراف آن ۱۵ درجه فرض شده است. آزمون دایک سمت راست نسبت به راستای قائم صفر و آزمون دایک سمت چپ نسبت به راستای قائم ۱۵ درجه فرض شده است (شکل ۲-الف). شکل ۲-ب پاسخ مغناطیسی دو توده را نشان می‌دهد. شکل ۲-ج مربوط به سیگنال تحلیلی داده‌های قسمت ب است. در این شکل بیشینه مقدار سیگنال تحلیلی موقعیت افقی توده‌های دایک را تعیین می‌کند. شکل ۲-د نتیجه برآورد عمق دو توده را به ازای اندازه پنجره‌های مورد استفاده در روش کمترین مربعات را نشان می‌دهد. همانند

گروه تشکیل شده که مقدار مثبت مربوط به توده سمت راست با مغناطیس‌پذیری مثبت ۴ و مقدار منفی مربوط به توده سمت چپ با مغناطیس‌پذیری ۴- آمپر بر متر است. شکل ۲-ز نتیجه برآورد شیب توده‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل میانگین شیب توده سمت راست ۴۳ و توده سمت چپ ۸۰/۵ درجه برآورد شده که با مقادیر واقعی همبستگی نزدیکی دارد.

مثال قبل در این مورد نیز ابعاد پنجره ۱۵ تا ۲۵ متر بهترین جواب‌ها را تولید کرده‌اند. شکل ۲-ه نتیجه برآورد شاخص ساختاری (هندسه مدل) را نشان می‌دهد که در آن مقادیر برآورد شده به مقدار واقعی در تولید مدل نزدیک است. شکل ۲-و برآورد حاصل ضرب تباین مغناطیسی توده در ضخامت آنها (kt) را نسبت به اطراف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج از دو



شکل ۱. کاربرد روش روی داده‌های مغناطیسی مدل کنتاکت. مدل در عمق ۲۵ متری از سطح زمین قرار دارد، شدت مغناطیدگی آن ۴ آمپر بر متر و شیب طرفین راست و چپ آن به ترتیب ۴۵ و ۱۳۵ درجه در نظر گرفته شده است. شدت میدان مغناطیس اطراف ۶۰۰۰۰ نانوتسلا و زوایای میل و انحراف آن به ترتیب ۶۰ و ۱۵ درجه فرض شده است. (الف) مقطع عمودی مدل. (ب) پاسخ مغناطیسی مدل با پارامترهای فرض شده با استفاده از رابطه عرضه شده نیقیان، (۱۹۷۲). (ج) مشتق قائم مرتبه اول سیگنال تحلیلی داده‌های قسمت (الف). در این شکل دو محل بیشینه گوشه‌های مدل را نشان می‌دهد. (د) نتیجه برآورد عمق مدل به ازای ابعاد پنجره‌های مورد استفاده در محاسبات. (ه) نتیجه برآورد شاخص ساختاری مدل به ازای ابعاد پنجره‌های مورد استفاده. بهترین جواب در ابعاد پنجره ۱۵ تا ۲۵ تولید شده است. (و) نتیجه برآورد شدت مغناطیدگی توده به ازای ابعاد پنجره مورد استفاده در محاسبات. (ز) نتیجه برآورد شیب جوانب توده. خوشه سمت راست شیب پهلوی راست و خوشه سمت چپ شیب پهلوی چپ توده را نشان می‌دهد.



شکل ۲. کاربرد روش روی داده‌های مغناطیسی مدل دایک نازک. مدل از دو دایک نازک تشکیل شده است که هر دو در عمق ۲۰ متری از سطح زمین قرار دارند، شدت مغناطیدگی توده سمت راست ۴ و توده سمت چپ ۴- آمپر بر متر و شیب دایک راست و چپ به ترتیب ۴۵ و ۸۰ درجه در نظر گرفته شده است. شدت میدان مغناطیس اطراف ۵۵۰۰۰ نانتوسلا و زوایای میل و انحراف آن به ترتیب ۸۰ و ۱۵ درجه فرض شده است. (الف) مقطع عمودی مدل. (ب) پاسخ مغناطیسی مدل با پارامترهای فرض شده با استفاده از رابطه عرضه شده ماشایاندبو و همکاران، (۲۰۰۱). (ج) مشتق قائم مرتبه اول سیگنال تحلیلی داده‌های قسمت (الف). در این شکل دو محل بیشینه موقعیت مدل را نشان می‌دهد. (د) نتیجه برآورد عمق مدل به ازای ابعاد پنجره‌های مورد استفاده در محاسبات. (ه) نتیجه برآورد شاخص ساختاری مدل به ازای ابعاد پنجره‌های مورد استفاده. بهترین جواب در ابعاد پنجره ۱۵ تا ۲۵ تولید شده است. (و) نتیجه برآورد حاصل ضرب شدت مغناطیدگی توده‌ها در ضخامت آنها به ازای ابعاد پنجره مورد استفاده در محاسبات. (ز) نتیجه برآورد شیب دو توده دایک نازک. خوشه سمت راست شیب دایک با شیب واقعی ۴۵ درجه و خوشه سمت چپ شیب دایک با شیب واقعی ۸۰ درجه را نشان می‌دهد.

نشان می‌دهد. در شکل ۴-ج منحنی مشتق قائم سیگنال تحلیلی داده‌های قسمت ب آمده است. در این شکل چهار نقطه بیشینه دیده می‌شود که موقعیت توده‌ها را نشان می‌دهد. شکل ۴-د مربوط به برآورد عمق مدل مصنوعی است. نتایج همانند مثال قبل خوشه‌بندی شده است. نتایج برآورد عمق توده‌ها با مقادیر واقعی به کار رفته در تولید مدل مطابقت دارد. شکل ۴-ه نتیجه برآورد شاخص ساختاری توده‌ها آمده است. در این شکل نتایج نماینده سه عدد ۱، ۲ و ۳ هستند که به ترتیب برابر شاخص ساختاری کنتاکت، دایک و استوانه است. همچنین مقدار شاخص ساختاری ۲- نمی‌تواند وجود داشته باشد و اشتباه است. شکل ۴-و برآورد مغناطیدگی توده‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل در مورد توده‌های دایک و کنتاکت مقدار تباین مغناطیدگی و برای استوانه حاصل ضرب مغناطیدگی در سطح مقطع توده آورده شده است. شکل ۴-ز برآورد شیب توده‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۲ آمده، شیب همه توده‌ها برابر ۹۰ درجه فرض شده است که در این شکل نیز میانگین مقادیر برآورد شده ۸۸/۷۵ را نشان می‌دهد. در این شکل ابعاد پنجره ۶ تا ۱۵ متر بهترین جواب‌ها را تولید کرده است.

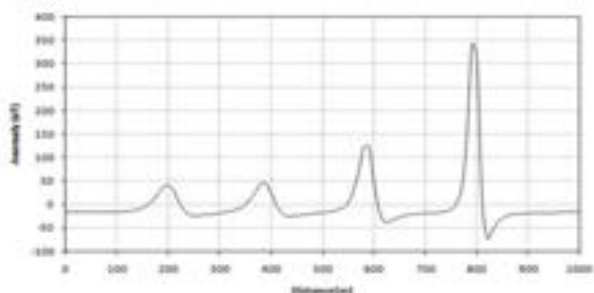
به منظور بررسی اثر نوفه‌های مصنوعی روی کارایی روش پیش‌گفته، در این قسمت این روش روی داده‌های آغشته به نوفه مدل دایک به کار رفته است. مدل دایک در عمق ۱۰ متری از سطح زمین قرار دارد. موقعیت افقی دایک نقطه ۲۵۰ متری است. شدت مغناطیدگی این مدل ۲ آمپر بر متر و زاویه میل و انحراف آن به ترتیب ۴۵ و ۰ درجه انتخاب شده است. داده‌های مغناطیسی، به نوفه مصنوعی با توزیع نرمال و میانگین و انحراف استاندارد ۱ و ۵ نانوتسلا آلوده شده‌اند. شکل ۵-الف پاسخ مغناطیسی مدل پیش‌گفته را نشان می‌دهد. در این شکل اثر نوفه به صورت بی‌نظمی‌های محلی (نوسان) دیده می‌شود. شکل ۵-ب نمودار

مثال سوم کاربرد روش را روی مدل مصنوعی شامل چهار توده استوانه‌ای شکل نشان می‌دهد. مساحت سطح مقطع توده‌ها یکسان و برابر با ۳ متر مربع و از راست به چپ دارای عمق‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ متری هستند (شکل ۳-الف). شدت مغناطیدگی هر چهار توده یکسان و برابر با ۶/۵ آمپر بر متر منظور شده است. شدت میدان مغناطیس اطراف ۶۰۰۰۰ نانوتسلا و زاویه میل و انحراف آن به ترتیب ۸۵ و ۱۰ درجه لحاظ شده است. شکل ۳-ب منحنی پاسخ مغناطیسی توده‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عمق توده از شدت مغناطیس ثبت شده کاسته می‌شود. شکل ۳-ج منحنی مشتق قائم سیگنال تحلیلی داده‌های قسمت ب را نشان می‌دهد. همانند مثال‌های قبل در این شکل نیز چهار محل بیشینه موقعیت افقی چهار استوانه را مشخص می‌کند. شکل ۳-د نتیجه برآورد عمق مدل را به ازای ابعاد پنجره مورد استفاده در برآورد نشان می‌دهد. نتایج قبل از نمایش خوشه‌بندی شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج در چهار خوشه قرار می‌گیرد که از سمت راست به چپ بیانگر میانگین عمق برآورد شده‌اند. شکل ۳-ه نتیجه برآورد شاخص ساختاری مدل را نشان می‌دهد. نتایج برآورد به عدد واقعی مربوط به استوانه ($N=2$) نزدیک است. شکل ۳-و نتیجه برآورد حاصل ضرب مغناطیدگی توده در سطح مقطع آن را نشان می‌دهد. مقدار واقعی این پارامتر در تولید مدل $20 A/m^3$ انتخاب شده است. که همان‌طور که مشاهده می‌شود نتیجه برآورد نیز همین مطلب را تأیید می‌کند، به جز در یک نقطه که مقدار آن منفی به دست آمده و اشتباه است.

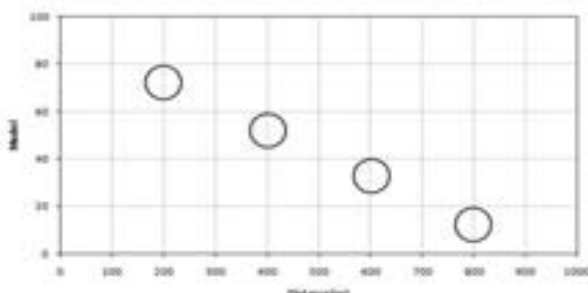
مثال چهارم مربوط به کاربرد روش روی یک مدل مصنوعی ترکیبی متشکل از مدل‌های کنتاکت، دایک و استوانه است. پارامترهای مربوط به هر مدل در جدول ۲ آمده است. شکل ۴-الف مقطع عمودی مدل مصنوعی را نشان می‌دهد. شکل ۴-ب پاسخ مغناطیسی سه توده را

پنجره‌های ۳۰ تا ۴۰ متر عمق برآورد شده ۸/۱ متر و با افزایش ابعاد پنجره، این مقدار کاهش می‌یابد. شکل ۵-د نتیجه برآورد شاخص ساختاری توده دایک را نشان می‌دهد. در این شکل نیز با افزایش ابعاد پنجره مورد استفاده، فاصله بین مقدار برآورد شده و مقدار واقعی افزایش می‌یابد.

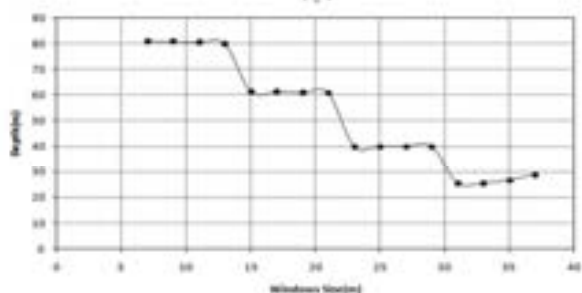
مشتق سیگنال تحلیلی مربوط به این داده‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل بیشینه سیگنال تحلیلی در موقعیت ۲۵۰ متری نیم‌رخ قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اثر بی‌نظمی مربوط به نوفه بیشتر در قسمت‌های کم‌شدت سیگنال تحلیلی دیده می‌شود. شکل ۵-ج نتایج برآورد عمق توده را نشان می‌دهد. در این شکل به ازای



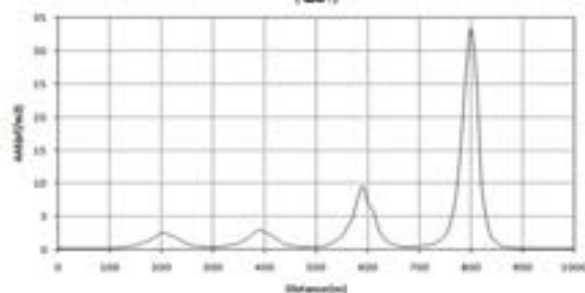
(ب)



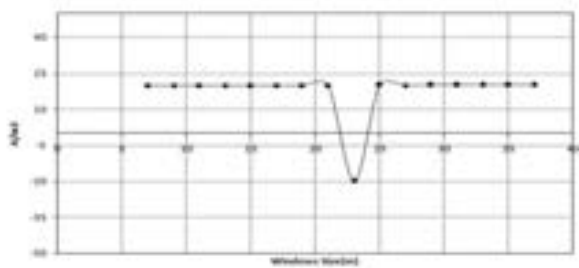
(الف)



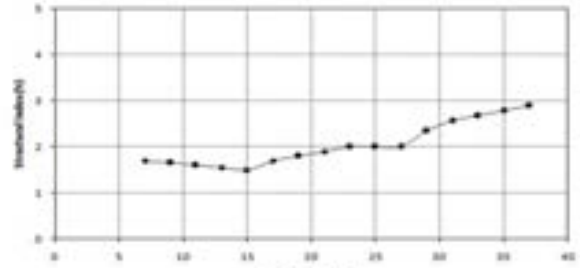
(د)



(ج)

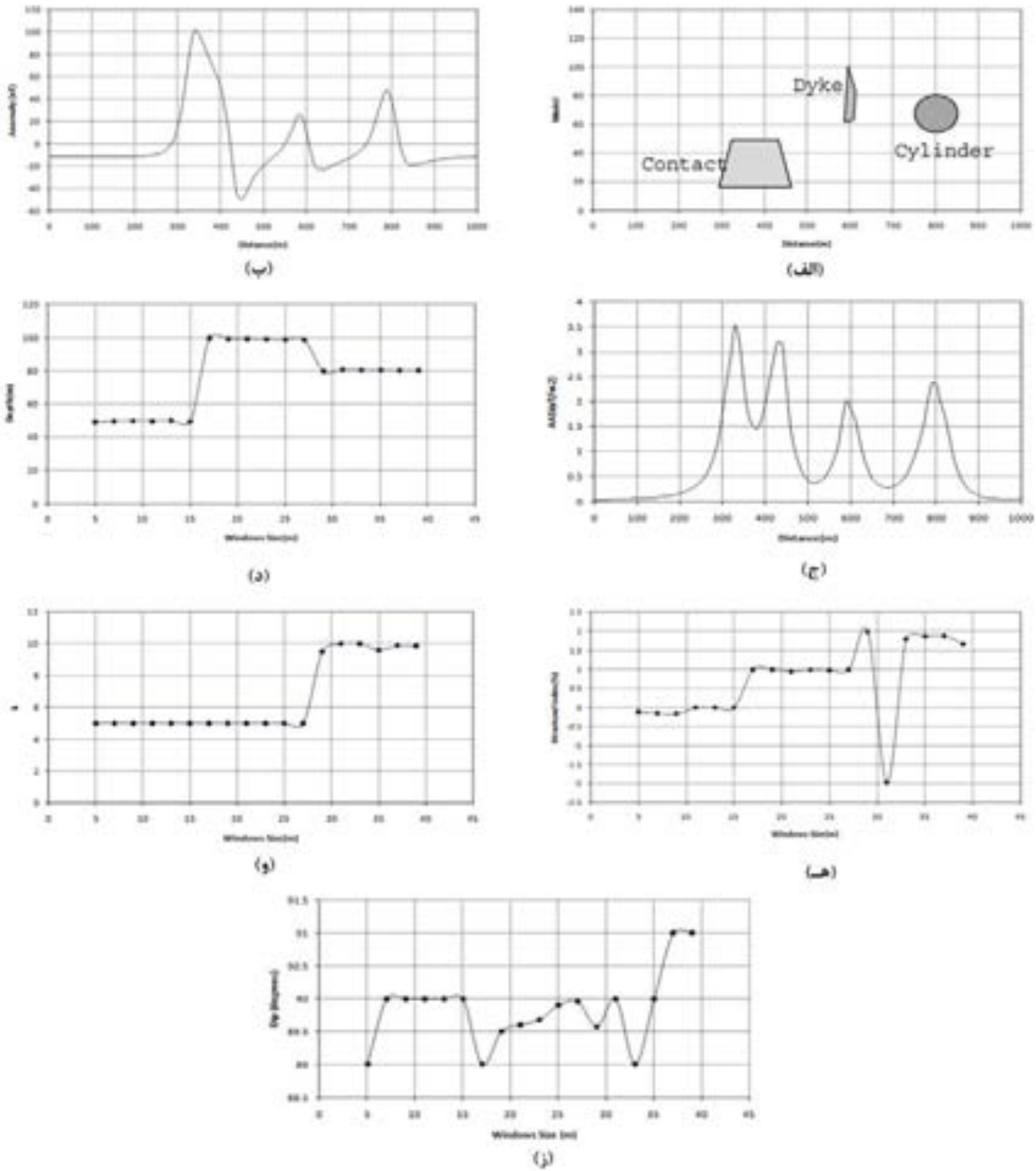


(و)



(هـ)

شکل ۳. کاربرد روش روی داده‌های مغناطیس مصنوعی مدل متشکل از چهار توده استوانه‌ای در اعماق متفاوت. سطح مقطع هر چهار توده یکسان است. شدت میدان مغناطیسی اطراف ۶۰۰۰ نانوتسلا و زاویه و میل و انحراف آن به ترتیب ۸۵ و ۱۰ درجه انتخاب شده است. (الف) مقطع عمودی مدل که موقعیت استوانه‌ها را نشان می‌دهد. (ب) پاسخ مغناطیسی ناشی از مدل مصنوعی. (ج) منحنی مشتق قائم سیگنال تحلیلی داده‌های قسمت (ب). محل‌های بیشینه موقعیت استوانه‌ها را مشخص می‌کند. (د) نمودار برآورد عمق استوانه‌ها تابعی از ابعاد پنجره مورد استفاده. نتایج قبل از نمایش خوشه‌بندی شده‌اند. (ه) نمودار برآورد شاخص ساختاری مدل تابعی از ابعاد پنجره مورد استفاده در برآورد. (و) نتیجه برآورد حاصل ضرب شدت مغناطیسی در سطح مقطع استوانه‌ها.



شکل ۴. کاربرد روش روی داده‌های مغناطیس مصنوعی مدل ترکیبی متشکل از کنتاکت، دایک و استوانه در اعماق متفاوت. سطح مقطع هر توده استوانه ۲ متر مربع منظور شده است. شدت میدان مغناطیسی اطراف ۶۰۰۰۰ نانوتسلا و زاویه و میل و انحراف آن به ترتیب ۷۰ و ۱۲ درجه انتخاب شده است. (الف) مقطع عمودی مدل که موقعیت توده‌ها را نشان می‌دهد. (ب) پاسخ مغناطیسی ناشی از مدل مصنوعی. (ج) منحنی مشتق قائم سیگنال تحلیلی داده‌های قسمت (ب). محل‌های بیشینه موقعیت افقی توده‌ها را مشخص می‌کند. (د) نمودار برآورد عمق توده‌ها تابعی از ابعاد پنجره مورد استفاده. نتایج قبل از نمایش خوشه‌بندی شده‌اند. (ه) نمودار برآورد شاخص ساختاری مدل تابعی از ابعاد پنجره مورد استفاده در برآورد. (و) نتیجه برآورد حاصل ضرب شدت مغناطیدگی در سطح مقطع استوانه‌ها. (ز) منحنی تغییرات شیب توده‌ها تابعی از ابعاد پنجره مورد استفاده.

۴ کاربرد روش روی داده‌های مغناطیسی واقعی

برای بررسی کارایی روش مطرح شده در برآورد پارامترهای منابع مغناطیسی، در این قسمت روش پیش گفته روی داده‌های نیم‌رخ مغناطیس‌سنجی منطقه ژرف‌دره فورموسا (Formosa Canyon, FC) واقع در جنوب غرب کشور تایوان به کار رفته است (شکل ۶-الف). در این شکل منطقه ژرف‌دره فورموسا با FC نشان داده شده است. براساس تفسیرهای مغناطیس‌سنجی و لرزه‌نگاری قبلی صورت گرفته، این منطقه منطبق بر یک ناپوستگی است (هسو و همکاران، ۲۰۰۴). نیم‌رخ لرزه‌نگاری فقط توانسته پی‌سنگ آتشفشانی را در فواصل ۰ تا ۵۰ کیلومتری تعیین کند. برای داده‌های مغناطیس‌سنجی این منطقه (شکل ۶-ب) به ازای چندین پنجره با ابعاد متفاوت، عملیات برآورد صورت گرفت تا بهترین راه حل‌های مربوط به عمق و شاخص ساختاری به دست آید. شکل ۶-ج منحنی مشتق قائم سیگنال تحلیلی داده‌های قسمت ب را نشان می‌دهد. شکل‌های ۶-د و ۶-ه به ترتیب نتایج برآورد عمق و شاخص ساختاری را به صورت تابعی از فاصله نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بهترین جواب‌های مربوط به برآورد عمق و شاخص ساختاری، منطبق بر نقاط بیشینه منحنی سیگنال تحلیلی است. با مقایسه بین منحنی‌های سیگنال تحلیلی و جواب‌های معادله اویلر می‌توان چهار دسته جواب با معنی به ترتیب در فواصل ۱۰۰، ۱۵۰، ۳۵۰ و ۵۵۰ کیلومتری تعیین کرد. میانگین عمق مربوط به این چهار دسته به ترتیب برابر با $۶/۳$ ، $۸/۵$ ، $۷/۱$ و $۳/۸$ کیلومتر از سطح زمین (در روی شکل با عدد شماره گذاری شده‌اند) و شاخص ساختاری مربوط به آنها عبارت از $۰/۷۵۴$ ، $۱/۱۴$ ، $۰/۳۵$ و $۰/۱۴$ است و فرض می‌شود این شاخص‌های ساختاری به ترتیب ۱، ۱، ۰ و ۰ باشند که به ترتیب توده‌های دایکی شکل و کنتاکت را مشخص می‌کنند. شکل ۶-و مربوط

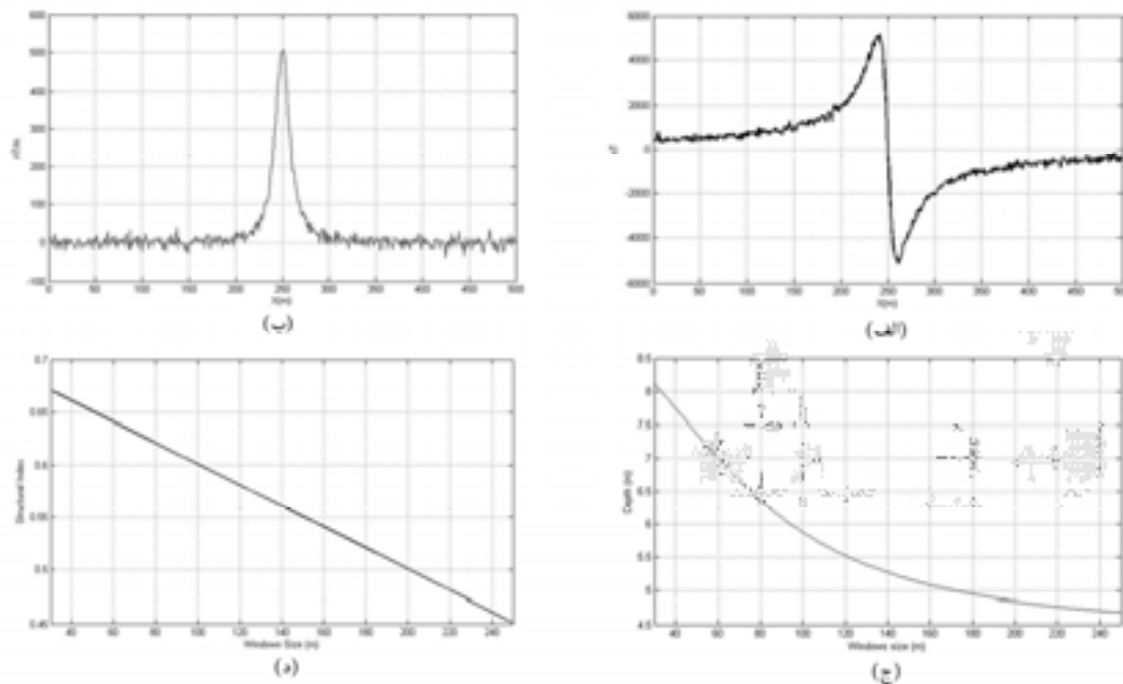
به برآورد مغناطیدگی توده‌ها نسبت به اطراف است. در این شکل راه‌حل شماره ۱ که در قسمت‌های قبل توده دایکی را تعیین کرده بود، تباین مغناطیس‌پذیری (حاصل ضرب مغناطیدگی در ضخامت) آن را برابر با $۸/۵ Am^{-1} Km$ برآورد کرده است. برای منطقه FC تنها راه حل شماره ۳ تولید شده که وجود توده کنتاکت را تعیین کرده و مغناطیدگی آن را $۳/۵ Am^{-1}$ به دست داده است.

در مثال بعد کاربرد این روش روی داده‌های نیم‌رخ مغناطیس‌سنجی زمینی مربوط به معدن سنگ آهن سورک در استان یزد آزمایش می‌شود. مجموعه معادن سنگ آهن سورک در ۱۵۰ کیلومتری غرب تا شمال غرب شهر یزد در استان یزد و در مجاورت روستای سورک واقع شده است. براساس مطالب عنوان شده در گزارش‌ها، منطقه مورد بررسی ۴۰ کیلومتر مربع وسعت دارد و آن را به چهار بی‌هنجاری تقسیم می‌کنند. در شکل شماره ۷ موقعیت جغرافیایی بی‌هنجاری ۱ به صورت کروکی نشان داده شده است. نهشته‌های آواری کربناته تریاس، مجموعه آمیزه رنگین افیولیتی، سنگ‌های آتشفشانی و آواری - آتشفشانی ائوسن، توده‌های نفوذی بعد از ائوسن و نهشته‌های کواترنری مهم‌ترین سازندهای سنگی این مجموعه محسوب می‌شوند. ماده معدنی در بیشتر موارد از نوع مگنتیت و گاهی آغشته با همتایت (مگمیت) است. شکل ۸ کاربرد این روش روی داده‌های مغناطیسی این محدوده نشان داده شده است. شکل‌های ۸-الف و ۸-ب به ترتیب منحنی‌های داده‌های مغناطیس‌سنجی و سیگنال تحلیلی مربوط به آن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در این مورد موقعیت توده از روی پیک سیگنال تحلیلی نقطه ۲۵۰ متری است. نتایج برآورد عمق و شاخص ساختاری توده در این محدوده در شکل‌های ۸-ج و ۸-د آمده است. با توجه به نتایج روش پیش گفته، متوسط عمق توده در این محدوده بین ۳۰ تا $۳۳/۵$ متر

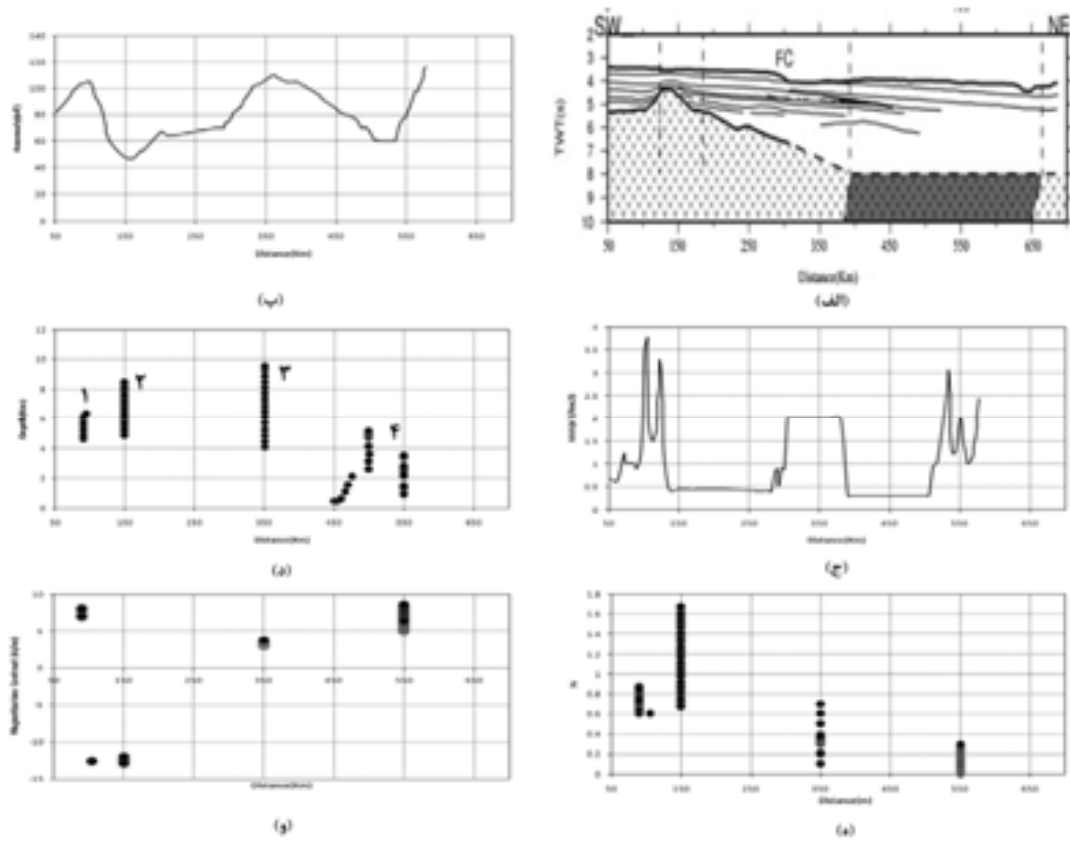
برآورد می‌شود. همچنین شاخص ساختاری توده نیز بین ۰/۰۱ تا ۰/۶۷ برآورد شده که مربوط به توده‌ای با هندسه دایک و کنتاکت است. جدول ۳ نمونه‌ای از لاگ حفاری اکتشافی مربوط به این نقطه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود عمق برخورد به ماده معدنی حدود ۴۵ متری است.

جدول ۲. پارامترهای مربوط به مدل ترکیبی مثال چهارم.

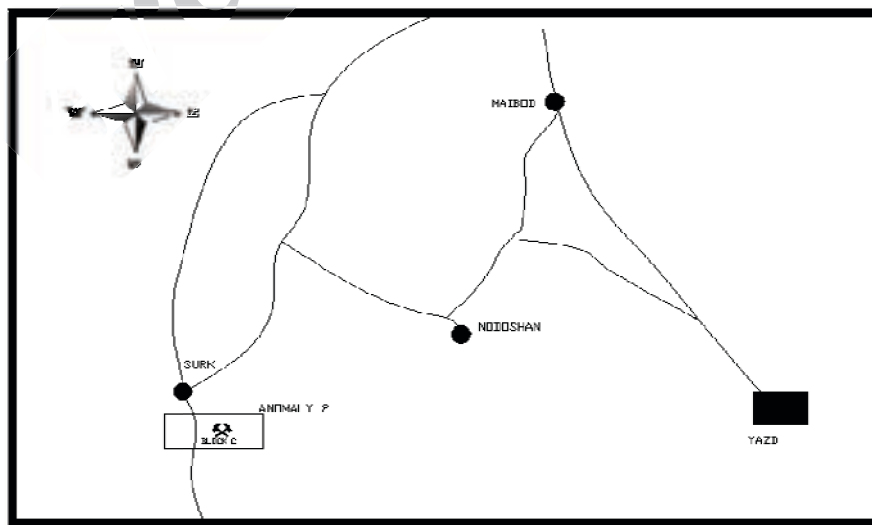
نوع مدل	عمق (متر)	ضخامت (متر)	شیب (درجه)	سطح مقطع (متر مربع)	مغناطیدگی (آمپر بر متر)
کنتاکت	۵۰	-	۹۰	-	۵
دایک	۱۰۰	۱	۹۰	-	۵
استوانه	۸۰	-	۹۰	۲	۵



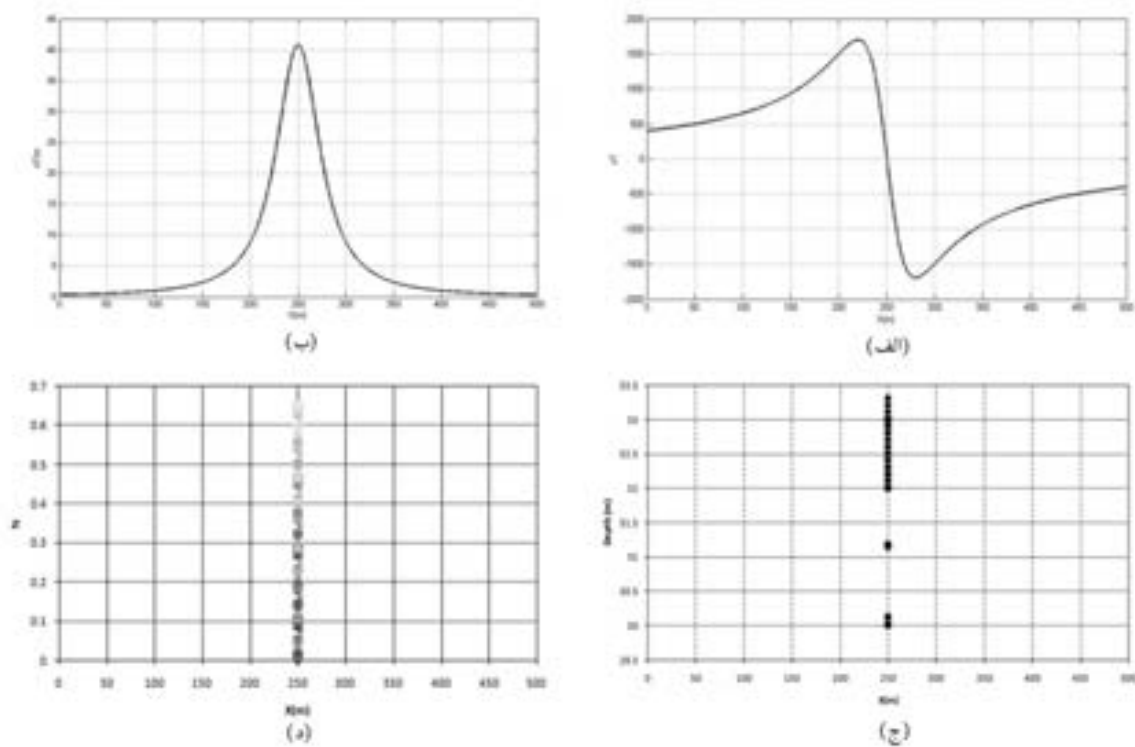
شکل ۵. کاربرد روش روی داده‌های مغناطیسی آعشته به نوفه دایک. (الف) پاسخ مغناطیسی دایک در عمق ۱۰ متر از سطح زمین. شدت مغناطیدگی مدل ۲ آمپر بر متر و زاویه میل و انحراف آن به ترتیب ۴۵ و ۰ درجه انتخاب شده است. داده‌ها توسط نوفه مصنوعی با توزیع نرمال و میانگین و انحراف استاندارد برابر ۱ و ۵ نانوتسلا آعشته شده‌اند. (ب) منحنی مشتق قائم سیگنال تحلیلی داده‌های قسمت (الف). (ج) نتایج گرافیکی برآورد عمق توده دایک قسمت (الف). (د) نتایج برآورد شاخص ساختاری (نوع توده) مربوط به داده‌های نوفه‌ای قسمت (الف).



شکل ۶. کاربرد روش روی داده‌های واقعی نیم‌رخ مغناطیس‌سنجی منطقه ژرف‌دره فورموسا کشور تایلند. روی شکل این منطقه با FC مشخص شده است. (الف) نیم‌رخ لرزه‌نگاری روی منطقه مورد بررسی. خط‌چین نتایج تفسیر لرزه‌نگاری است که قسمت فوقانی پی‌سنگ را نشان می‌دهد. (ب) داده‌های مغناطیس‌سنجی مربوط به منطقه مورد بررسی. (ج) منحنی مشتق قائم سیگنال تحلیلی داده‌های قسمت (ب). (د) منحنی عمق برآورد شده نسبت به فاصله. (ه) منحنی برآورد شاخص ساختاری تابعی از فاصله برحسب کیلومتر. (و) منحنی برآورد تباين مغناطیگی نسبت به اطراف تابعی از فاصله برحسب کیلومتر.



شکل ۷. کروکی راه دسترسی به معدن سنگ آهن سورک در استان یزد.



شکل ۸. کاربرد روش روی داده‌های واقعی نیم‌رخ مغناطیس‌سنجی معدن سنگ آهن سورک در استان یزد. (الف) نیم‌رخ داده‌های مغناطیس‌سنجی مربوط به منطقه مورد بررسی. (ج) منحنی مشتق قائم سیگنال تحلیلی داده‌های قسمت (ب). (د) منحنی عمق برآورد شده نسبت به فاصله. (ه) منحنی برآورد شاخص ساختاری تابعی از فاصله برحسب متر.

در این روش از نقاط بیشینه منحنی سیگنال تحلیلی به منزله روشی کمکی در تعیین موقعیت توده‌ها و حضور منابع مستعد مغناطیسی در کنار منحنی برآورد عمق می‌توان استفاده کرد. همچنین این روش روی داده‌های مغناطیسی دایک آلوده به نوفه مصنوعی با توزیع نرمال نیز به کار رفته است. نوفه‌های مصنوعی باعث کاهش کارایی این روش خواهند شد. در این مثال با افزایش ابعاد پنجره مورد استفاده، فاصله بین مقدار کمیت برآورد شده و مقدار واقعی آن افزایش می‌یابد. این روش روی داده‌های واقعی نیم‌رخ مغناطیس‌سنجی منطقه ژرف‌دره فورموسا (Formosa Canyon) کشور تایوان به کار رفته است.

۵ نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از تابع‌های سیگنال تحلیلی و اوایلر واهمامیخت روش تفسیری مشتق پایه برای تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی توده‌های دو بُعدی مانند کنتاکت، استوانه و دایک نازک عرضه شده است. مزیت این روش این است که علاوه بر موقعیت افقی (مرز) و عمق توده، امکان برآورد شیب، شاخص ساختاری و تباین مغناطیدگی توده با اطراف نیز فراهم می‌شود. کاربرد روش روی مدل‌های مصنوعی در حالت‌های گوناگون کارایی روش پیش‌گفته را تأیید می‌کند. با این حال در مواردی که توده‌های مجاور هم‌پوشانی دارند، روش کارایی خود را از دست می‌دهد.

جدول ۳. لاگ حفاری اکتشافی مربوط به گمانه شماره در معدن سنگ آهن سورک در استان یزد.

From	To	Total	C.R(m)	RQD(m)	DESCRIPTION	CODE
0.00	18.30	18.30	0.00	0.00	without core	
18.30	21.73	3.43	1.84	0.34	Waste(micro-alterations of semi-consolidated bands of mud-stone - sand-stone with earthy color)	4.00
21.73	24.78	3.05	1.66	0.56	Waste(micro-alterations of semi-consolidated bands of mud-stone - sand-stone with earthy color)	4.00
24.78	27.78	3.00	1.80	0.00	Waste(micro-alterations of semi-consolidated bands of mud-stone - sand-stone with earthy color)	4.00
27.78	30.79	3.01	1.00	0.13	Waste(micro-alterations of semi-consolidated bands of mud-stone - sand-stone with earthy color)	4.00
30.79	36.71	5.92	0.05	0.00	Core wash with upper horizons characteristics (Crushed zone)	3.00
36.71	39.51	2.80	0.40	0.00	Low grade iron ore(mushtekovite) without sulfide presence in a brecciated carbonate host rock(crushed zone)	105.00
39.51	42.81	3.30	3.20	1.62	Low grade iron ore(mushtekovite) without sulfide presence in a brecciated carbonate host rock(crushed zone)	105.00
42.81	44.93	2.12	2.25	2.10	medium grade iron ore(mushtekovite) with low sulfide(pyrite) and associated carbonate minerals	106.00
44.93	46.68	1.75	1.35	0.12	high grade iron ore(magnetite) with high sulfide(pyrite)	001.00
46.68	48.83	2.17	2.00	1.55	high grade iron ore(magnetite) with high sulfide(pyrite)	001.00
48.83	50.34	1.69	1.23	0.48	high grade iron ore(magnetite) with high sulfide(pyrite)	001.00
50.34	52.80	2.28	2.00	0.51	high grade iron ore(magnetite) with high sulfide(pyrite)	001.00
52.80	54.78	1.98	1.33	0.70	high grade iron ore(magnetite) with high sulfide(pyrite)	001.00
54.78	57.07	2.29	2.00	0.84	high grade iron ore(magnetite) with high sulfide(pyrite)	001.00
57.07	59.66	2.59	2.40	1.45	medium grade iron ore(mushtekovite) with low sulfide(pyrite) and associated carbonate minerals	106.00
59.66	63.54	3.88	1.50	0.14	Waste(low serpentinized carbonates with green color) in Crushed zone	6.00

Depth to magnetic source using the generalized analytic signal, *Geophysics*, **63**, 1947-1957.

- Hsu, S., K. Sibuet, J., C. and Shyu, C., T. 1996, High-resolution detection of geologic boundaries from potential-field anomalies: an enhanced analytic signal technique, *Geophysics*, **61**, 373-386.
- Hsu, S. K., Yeh, Y. C., Doo, W., B. and Tsai, C. H., 2004, New bathymetry and magnetic lineation identifications in the northernmost South China Sea and their tectonic implications *Marine Geophysical Researches*, **25**, 29-44.
- Murthy, K. S. R. and Mishra, D. C., 1980, Fourier transform of the general expression for the magnetic anomaly due to a long horizontal cylinder, *Geophysics*, **45**, 1091-1093.
- Mushayandebvu, M. F., van Driel, P., Reid, A. B., and Fairhead, J. D., 2001, Magnetic source parameters of two-dimensional structures using extended Euler deconvolution: *Geophysics*, **66**, 814-823.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از پروفسور هسو از دانشکده ژئوفیزیک دانشگاه ملی مرکزی کشور تایوان به خاطر مشاوره و راهنمایی‌های مربوط، تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

- Debeglia, N. and Coppel, J., 1997, Automatic 3-D interpretation of potential field data using analytic signal derivatives, *Geophysics*, **62**, 87-96.
- Fedi, M. and Florio, G., 2001, Detection of potential field source boundaries by enhanced horizontal derivation method, *Geophysical Prospecting*, **49**, 40-58.
- Hsu, S. K., 2002, Imaging magnetic sources using Euler's equation, *Geophysical Prospecting*, **50**, 15-25.
- Hsu, S. K., Coppens, D., and Shyu, C. T., 1998,

- enhanced local wavenumber (ELW) method, *Geophysics*, **70**, L7-L12.
- Salem, A. and Smith, R. S., 2005, Depth and structural index from the normalized local wavenumber of 2D magnetic anomalies, *Geophysical Prospecting*, **53**, 83-89.
- Salem, A., Williams, S., Fairhead, D., Smith, R. and Ravat, D., 2008, Interpretation of magnetic data using tilt angle derivatives, *Geophysics*, **73**, L1-L10.
- Smith, R. S. and Salem, A., 2005, Imaging depth, and susceptibility from magnetic data: The advanced source-parameter imaging method, *Geophysics*, **70**, 31-38.
- Smith, R. S., Thurston, J. B., Dai, T. F. and MacLeod, I. N., 1998, iSPITM – the improved source parameter imaging method, *Geophysical Prospecting*, **46**, 141-151.
- 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, and susceptibility contrast using the SPI (TM) method, *Geophysics*, **62**, 807-813.
- 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**, 13-21.
- 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**, 957-966.
- Ravat, D., 1996, Analysis of the Euler method and its applicability in environmental magnetic investigations, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **1**, 229-238.
- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millett, 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 the 3-D analytic signal, *Geophysics*, **57**, 116-125.
- 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.
- Salem, A., Ravat, D., Smith, R. and Ushijima, K., 2005, Interpretation of magnetic data using an