

مقایسه روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی و روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اویلر با استفاده از داده‌های مصنوعی در تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی با خاصیت مغناطیسی

مجتبی رشوند^۱ و بهروز اسکوئی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۲ استادیار، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۸۹/۷/۱۰، پذیرش نهایی: ۹۱/۴/۱۳)

چکیده

این تحقیق به معرفی و مقایسه روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی و روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اویلر برپایه روش سیگنال تحلیلی، در تفسیر داده‌های مغناطیسی می‌پردازد. هر دو روش بدون نیاز به اطلاعات اولیه از پارامترهای چشمه ایجاد بی‌هنجاری مغناطیسی، برآورد مناسبی از موقعیت و شکل چشمه مورد بررسی به دست می‌دهند. روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی روشی خودکار در برآورد هم‌زمان عمق، مکان افقی و شکل چشمه ایجاد بی‌هنجاری مغناطیسی است که در این روش با ترکیب معادلات سیگنال تحلیلی، اویلر، سیگنال تحلیلی ازتقاء یافته و گرادیان افقی سیگنال تحلیلی، معادله خطی در تعیین پارامترهای چشمه دوبعدی عرضه می‌شود. مهم‌ترین مشخصه‌های این روش استفاده از مشتق‌های مراتب پایین مغناطیسی و کارایی آن در تفسیر داده‌ها با کیفیت پایین است. روابط اصلی در روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اویلر با ترکیب معادلات سیگنال تحلیلی و واهمامیخت اویلر و با قرار دادن مشتق‌های مناسب معادله همگن اویلر در رابطه سیگنال تحلیلی داده می‌شوند. در این تحقیق مسئله دقت و کارایی این دو روش (با توجه به شباهت آنها) در تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی ناشی از ساختارهای زمین‌شناسی با خاصیت مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور مقایسه دقت و کارایی هر یک از روش‌ها نتایج حاصل از به‌کارگیری آنها روی داده‌های مصنوعی حاصل از مدل‌سازی به روش پیش‌رو و آلوده به نوفه برای ساختارهای متفاوت در اعماق متفاوت نشان داده شده است. نتایج به دست آمده خطای کمتر روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی در برآورد شکل و مکان افقی و کارایی بیشتر روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اویلر را در تعیین عمق چشمه ایجاد بی‌هنجاری مغناطیسی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بی‌هنجاری مغناطیسی، سیگنال تحلیلی، مشتق پایین مغناطیسی، واهمامیخت اویلر

A comparison between the horizontal gradient of analytic signal method and the analytic signal-Euler deconvolution combined method using synthetic data in interpretation of magnetic geological structures

Rashvand, M.¹ and Oskooi, B.²

¹M.Sc. Student of Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²Assistant Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 02 Oct 2010, Accepted: 03 Jul 2012)

Abstract

The analytic signal method is a semiautomatic method for estimating the location of causative bodies in magnetic and gravity methods. The application of analytic signal for interpretation of two dimensional (2D) structures was introduced by Nabighian (1972). The analytic signal is defined as a complex function in which the real and imaginary parts are a pair of Hilbert transforms. In other words, the analytic signal is a combination of

horizontal and vertical gradients of potential field.

Analytic signal is a symmetric function with amplitude sensitive to parameters of the source. In case of 2D structures, the amplitude of the analytic signal is independent of the directional parameters such as inclination, declination and strike angle (Nabighian, 1972; Atchuta et al., 1981; Roest et al., 1992).

The depth of 2D structures can be estimated using the width of the analytic signal or the ratio of the analytic signal to its higher derivatives (Hsu et al., 1996; Roest et al., 1992). Source's parameters of a dyke such as width, dip, strike, magnetization and depth can be estimated by analytic signal method (Bastani & Pedersen, 2001). The n^{th} -order enhanced analytic signal is defined as the analytic signal of the n^{th} -order vertical derivative of the potential field.

An automated method for estimating the depth, horizontal location and shape of 2D magnetic structures is the horizontal gradient of analytic signal method. This method is capable of interpreting low quality data because of using the first and second order derivatives of potential field in the main equations. The method of analytic signal estimates the horizontal location of the source by approximating the maximum amplitude of the signal; hence noise can affect the estimations. On the other hand, by using the horizontal gradient of analytic signal expressions, all of the source's parameters could be approximated simultaneously.

In this method, equations of the analytic signal, Euler enhanced analytic signal and horizontal gradient of analytic signal are combined to derive a linear equation. Using the first order analytic signal, horizontal gradient of analytic signal and linear inversion method, the depth and horizontal location of 2D magnetic bodies are obtained. The location estimation is independent of the shape of the causative bodies. The causative body's geometry is estimated as a structural index by applying the least squares method.

Data selection for solving the equations or width of windows is based on data quality. The optimum size is defined somehow to detect a signal specific anomaly and also variations of the anomaly in one window. In this study, in order to solve the equations of the horizontal gradient of analytic signal method, the data greater than twenty percent of maximum amplitude of the analytic signal were used.

The analytic signal-Euler deconvolution combined method is an automated method to estimate depth and shape of the sources. This method is used to interpret 2D & 3D magnetic and gravity data. After substituting the appropriate derivatives of the Euler's homogeneous equation in the equation of the analytic signal, major independent equations which are used to estimate the depth and shape of causative bodies, are derived. The horizontal location of causative bodies is estimated by Euler method or locating the maximum amplitude of the analytic signal.

In this study, the accuracy and efficiency of each of the mentioned methods in interpretation of magnetic anomalies are evaluated. Methods were tested for different synthetic datasets provided by forward modeling. 2D magnetic models placed at different depths and random noise added for some models. Derivatives were calculated in frequency domain by using Fourier transform techniques. In this technique, bell-shapedness effect appears at the edges of the profiles. This effect could be corrected by linearly expanding the profiles. Upward continuation filter was applied on some synthetic data to decrease the noise level.

In this paper, the applicability of the horizontal gradient of analytic signal method and the analytic signal-Euler combined method were tested. Both methods estimate the parameters of the causative bodies without any prior information. In both methods, there is not any explicit dependence on directional parameters (e.g. magnetization) in the main equations; hence, as the results show, estimations were not affected by remanent

magnetization. The results also show accurate estimations of the horizontal gradient of analytic signal method for shape and horizontal location and efficient estimations of the analytic signal-Euler deconvolution combined method for depth.

Key words: Analytic signal, Euler deconvolution, Magnetic field derivative, Magnetic anomaly

۱ مقدمه

روش سیگنال تحلیلی، روشی نیمه خودکار به منظور تعیین پارامترهای چشمه (عمق، مکان افقی و شکل) ایجاد بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل است. اولین بار نیقیان (۱۹۷۲) از روش سیگنال تحلیلی در تفسیر ساختارهای دُو بُعدی استفاده کرد. تابع سیگنال تحلیلی، تابعی زوج و متقارن است و پارامترهای چشمه روی بزرگی دامنه سیگنال تحلیلی تأثیر گذارند. سیگنال تحلیلی برای چشمه‌های دُو بُعدی کاملاً مستقل از کمیت‌های جهت‌دار مانند زاویه میل و انحراف میدان، مغناطیس‌شوندگی، زاویه شیب و امتداد است (نیقیان، ۱۹۷۲؛ اتچوتا و همکاران، ۱۹۸۱؛ روئست و همکاران، ۱۹۹۲). از این روش می‌توان در برآورد پارامترهای دایک شامل عمق، شیب، امتداد، پهنا و مغناطیس‌شوندگی استفاده کرد (باستانی و پدرسون، ۲۰۰۱).

روئست و همکاران (۱۹۹۲) برای تعیین عمق مدل‌های دُو بُعدی، از پهنای سیگنال تحلیلی استفاده کرد. استفاده از نسبت سیگنال تحلیلی به مشتق‌های بالاتر آن با فرض معین بودن شکل تقریبی چشمه، روش دیگری در تعیین عمق ساختارهای دُو بُعدی است (هسو و همکاران، ۱۹۹۶) که در این حالت برآورد صحیح عمق مشروط به فرض صحیح شکل مدل است.

سالم و راوات (۲۰۰۳) با جای‌گذاری مشتق‌های معادله اوپلر در معادله سیگنال تحلیلی، روش ترکیبی سیگنال تحلیلی-واهامیخت اوپلر (AN-EUL) را معرفی کردند. در این روش مکان افقی با استفاده از مکان قرارگیری بیشینه سیگنال تحلیلی و عمق و شاخص ساختاری با استفاده از روابط مربوط کاملاً مستقل، محاسبه

می‌شوند. سالم (۲۰۰۵) با ترکیب مشتق‌های معادله اوپلر، معادله سیگنال تحلیلی و معادله سیگنال تحلیلی ارتقاء یافته، روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی را معرفی کرد که در این روش عمق، مکان افقی و شاخص ساختاری چشمه به صورت کاملاً خودکار و هم‌زمان تعیین می‌شوند.

۲ مبانی نظری

نیقیان (۱۹۷۲) روشن ساخت که سیگنال تحلیلی در حالت دُو بُعدی تابعی موهومی و قسمت موهومی آن تبدیل هیلبرت قسمت حقیقی آن است:

$$A(x) = f(x) + if_H(x) \quad (1)$$

سیگنال تحلیلی و دامنه سیگنال تحلیلی میدان اندازه‌گیری شده در حالت دُو بُعدی به ترتیب به صورت روابط (۲) و (۳) تعریف می‌شوند (بلکلی، ۱۹۹۵):

$$A(x) = \frac{\partial T}{\partial x} + i \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2)$$

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

$\frac{\partial T}{\partial z}$ و $\frac{\partial T}{\partial x}$ به ترتیب مشتق افقی و قائم میدان هستند.

سیگنال تحلیلی ارتقاء یافته مرتبه n م عبارت است از سیگنال تحلیلی مشتق قائم مرتبه n م میدان که به صورت رابطه (۴) و دامنه آن به صورت رابطه (۵) معرفی می‌شوند (هسو و همکاران، ۱۹۹۶):

$$A_n(x) = \frac{\partial T_n^z}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial T_n^z}{\partial z} \hat{k} \quad (4)$$

$$|A_n(x)| = \sqrt{\left(\frac{\partial T_n^z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_n^z}{\partial z}\right)^2} \quad (5)$$

تامپسون (۱۹۸۲) معادلهٔ اوپلر را به شکل روابط (۸) و (۹) نشان داد که B میدان منطقه‌ای و n شاخص ساختاری است. ضریب شکل q در رابطه (۷) مشابه با شاخص ساختاری n در معادلهٔ اوپلر است. در جدول ۱ مقادیر شاخص ساختاری و ضریب شکل برای چشمه‌های متفاوت دو بُعدی نشان داده شده است.

$$(x - x_0) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + (z - z_0) \frac{\partial^2 T}{\partial z \partial x} \quad (۸)$$

$$= -(n + 1) \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$(x - x_0) \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z} + (z - z_0) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (۹)$$

$$= -(n + 1) \frac{\partial T}{\partial z}$$

با ترکیب روابط (۸) و (۹)، در نظر گرفتن رابطهٔ لاپلاس و رابطهٔ (۵) می‌توان نوشت:

$$\left[(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 \right] (|A_1(x)|)^2 \quad (۱۰)$$

$$= (n + 1)^2 (|A(x)|)^2$$

رابطه (۷) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\left[(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 \right] \frac{\partial |A(x)|}{\partial x} \quad (۱۱)$$

$$= -(n + 1)(x - x_0) |A(x)|$$

و با ترکیب روابط (۱۰) و (۱۱) و در نظر گرفتن سطح اندازه‌گیری $z=0$ (روی سطح زمین)، رابطهٔ خطی زیر داده می‌شود:

$$\left(\sqrt{|A_1(x)|^2 - \left(\frac{\partial |A(x)|}{\partial x} \right)^2} \right)_x \quad (۱۲)$$

$$= \left(\sqrt{|A_1(x)|^2 - \left(\frac{\partial |A(x)|}{\partial x} \right)^2} \right)_{x_0} - \left(\frac{\partial |A(x)|}{\partial x} \right)_{z_0}$$

در این روابط، $T_n^z = \frac{\partial^n T}{\partial z^n}$ مشتق قائم مرتبه n ام میدان است.

روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی، روشی کاملاً خودکار به منظور تعیین مکان افقی، عمق و شکل چشمه ایجاد بی‌هنجاری‌های مغناطیسی و گرانی در تفسیر داده‌های نیم‌رخ (پروفیلی) است. از مهم‌ترین مزیت‌های این روش، استفاده از مشتق‌های اول و دوم میدان پتانسیل است که قابلیت اعمال آن روی داده‌های با کیفیت پایین را فراهم می‌آورد. از طرفی دیگر برخلاف روش سیگنال تحلیلی (که مکان افقی توسط بیشینه دامنهٔ آن تعیین می‌شود و تأثیر نوفه‌ها سبب خطا در تعیین مکان افقی و عمق می‌شود) در این روش پارامترهای چشمه به صورت کاملاً خودکار و هم‌زمان تعیین می‌شود (رشوند، ۱۳۸۹). دامنهٔ سیگنال تحلیلی ساختارهای زمین‌شناسی دو بُعدی (سطح تماس، دایک و استوانهٔ افقی) به صورت رابطه (۶) نمایش داده می‌شود (سالم، ۲۰۰۵):

$$|A(x)| = \frac{k}{\left[(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 \right]^q} \quad (۶)$$

که در آن، x_0 مکان، z_0 عمق، k ضریب بزرگی مرتبط با مغناطیس شونده‌گی چشمه و q ضریب شکل چشمه است. با مشتق‌گیری از رابطه (۶) می‌توان رابطهٔ بین سیگنال تحلیلی و گرادیان افقی آن را به صورت رابطه (۷) بیان کرد (سالم، ۲۰۰۵):

$$\left[(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 \right] \frac{\partial |A(x)|}{\partial x} \quad (۷)$$

$$= -2q(x - x_0) |A(x)|$$

جدول ۱. مقادیر شاخص ساختاری و ضریب شکل برای چشمه‌های متفاوت دو بُعدی.

نوع ساختار	شاخص ساختاری	ضریب شکل
سطح تماس	۰	۰/۵
دایک	۱	۱
استوانهٔ افقی	۲	۱/۵

رابطه (۱۲) مکان و عمق، (x_0, z_0) ، چشمه ایجاد

بی‌هنجاری را به صورت مستقل از شکل چشمه و با استفاده از سیگنال تحلیلی مرتبه اول، $|A_1(x)|$ ، گرادیان افقی سیگنال تحلیلی، $\frac{\partial |A(x)|}{\partial x}$ و روش معکوس خطی به دست می‌دهد (سالم، ۲۰۰۵).

افقی x_0 می‌توان نوشت:

$$z_0 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z} \right)_{x=x_0} \quad (1-14)$$

$$= (n+1) \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=x_0}$$

$$z_0 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)_{x=x_0} \quad (2-14)$$

$$= (n+1) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{x=x_0}$$

با محاسبه جذر مجموع مربعات روابط (۱-۱۴) و

(۲-۱۴) و استفاده از رابطه (۵)، رابطه (۱۵) به صورت زیر

بیان می‌شود (سالم و راوات، ۲۰۰۳):

$$z_0 |AAS_1|_{x=x_0} = (n+1) |AAS_0|_{x=x_0} \quad (15)$$

که در آن، $|AAS_0|$ و $|AAS_1|$ به ترتیب دامنه سیگنال

تحلیلی و دامنه سیگنال تحلیلی مشتق مرتبه اول قائم

بی‌هنجاری میدان پتانسیل است. به روش مشابه، در طرح

روابط مستقل برای محاسبه عمق و شاخص ساختاری

پس از مشتق‌گیری از رابطه اوایلر (رابطه ۱۶)

نسبت به z به مراحل فوق تکرار و رابطه (۱۷)

بیان می‌شود (جزئیات بیشتر: بنی‌عامریان و اسکویی،

۱۳۹۰)

$$x_0 \frac{\partial T}{\partial x} + z_0 \frac{\partial T}{\partial z} + nB = x \frac{\partial T}{\partial x} + z \frac{\partial T}{\partial z} + nT \quad (16)$$

$$(n+2) |AAS_1|_{x=x_0} = z_0 |AAS_2|_{x=x_0} \quad (17)$$

دامنه سیگنال تحلیلی مشتق مرتبه دوم قائم

بی‌هنجاری میدان پتانسیل است. روابط کلی برای برآورد

عمق و شکل چشمه با جای‌گذاری معادله (۱۷) در معادله

(۱۵) معرفی می‌شوند (سالم و راوات، ۲۰۰۳):

$$n = \left(\frac{2 |AAS_1|^2 - |AAS_2| |AAS_0|}{|AAS_2| |AAS_0| - |AAS_1|^2} \right)_{x=x_0} \quad (18)$$

انتخاب مناسب تعداد داده‌ها یا طول پنجره‌ها

برای حل معادلات، بر پایه کیفیت داده‌ها استوار است.

طول بهینه پنجره‌ها حالتی است که تعداد داده‌های انتخاب

شده به حدی کم باشند که بتوان سیگنال بی‌هنجاری

مشخصی را شناسایی کرد و تا حدی بزرگ باشند که

بتوان تغییرات کافی از بی‌هنجاری موردنظر را در طول

یک پنجره مشاهده کرد. در این تحقیق به منظور حل

روابط روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی از داده‌هایی با

حداقل بزرگی در حدود ۲۰ درصد مقدار بیشینه دامنه

سیگنال تحلیلی استفاده شده است.

تعیین شکل بی‌هنجاری با استفاده از رابطه (۱۱) و

مفهوم کمترین مربعات به صورت رابطه (۱۳) داده می‌شود

(سالم، ۲۰۰۵).

$n =$

$$\frac{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial |A(x_i)|}{\partial x} \right] \left[\frac{(x_0^c - x_i)}{(x_i - x_0^c)^2 + (z_0^c)^2} \right]}{\sum_{i=1}^N \left[\frac{x_0^c - x_i}{(x_i - x_0^c)^2 + (z_0^c)^2} \right]} - 1 \quad (13)$$

در این رابطه N تعداد داده‌های انتخاب شده، x_0^c ، مکان

افقی برآورد شده و z_0^c عمق برآورد شده است.

روش ترکیبی سیگنال تحلیلی- واهمامیخت اوایلر،

روشی خودکار برای تعیین عمق و شکل چشمه ایجاد

بی‌هنجاری‌های مغناطیسی و گرانی در تفسیر داده‌های

نیم‌رخ (دو بُعدی) و شبکه‌ای (سه بُعدی) است که روابط

اصلی آن با جای‌گذاری مشتق‌های معادله اوایلر در معادله

سیگنال تحلیلی معرفی می‌شود. با مشتق‌گیری از معادله

(۸) نسبت به x, z و در نظر گرفتن مقادیر

به منظور جلوگیری از اثر گیسس (پدیده رینگی شدن ابتدا و انتهای یک سیگنال به دلیل قطع ناگهانی) هنگام اعمال تبدیل فوریه، فیلتر تپر (Taper) خطی (استفاده از گسترش خطی نیم‌رخ در هنگام مشتق‌گیری‌ها به منظور حذف اثر لبه‌های نیم‌رخ) استفاده شده است. این فیلتر با استفاده از شیب به دست آمده از نمودار بی‌هنجاری میدان کل، نقاط انتهایی نیم‌رخ را تا طول معین که معمولاً درصدی از طول کل نیم‌رخ است (معمولاً ۱۰٪)، گسترش می‌دهد و پس از محاسبات، قسمت گسترش یافته حذف می‌شود.

به منظور کاهش اثر نوفه‌های حاصل از فرایند مشتق‌گیری (مشتق‌گیری فیلتری بالاگذر است) که دامنه نوفه‌ها را به شدت افزایش می‌دهد، از ادامه فراسو داده‌ها به سطحی بالاتر (ادامه فراسو فیلتری پایین‌گذر است)، استفاده می‌شود. در روش ترکیبی سیگنال تحلیلی-واهمامیخت اوایلر برآورد مکان افقی با استفاده از روش اوایلر صورت گرفته است (بنی‌عامریان، ۱۳۸۸). برای بررسی هر یک از روش‌ها، نتایج حاصل از اعمال آنها روی مدل‌های مصنوعی (جدول ۲) تولید شده، در جدول‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است.

$$z_0 = \left(\frac{|AAS_1| |AAS_0|}{|AAS_2| |AAS_0| - |AAS_1|^2} \right)_{x=x_0} \quad (19)$$

در این روش به منظور تعیین مکان افقی ساختارهای دو بُعدی می‌توان از مکان بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی و یا روش اوایلر (با فرض شاخص ساختاری دلخواه) استفاده کرد.

۳ مقایسه دقت و کارایی روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی با روش ترکیبی سیگنال تحلیلی-واهمامیخت اوایلر

به منظور مقایسه دقت و کارایی روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی با روش ترکیبی سیگنال تحلیلی-واهمامیخت اوایلر، نتایج حاصل از به‌کارگیری این روش‌ها روی چهار سری داده مصنوعی بدون نوفه و دو سری داده مصنوعی تولید شده همراه با نوفه تصادفی حاصل از مدل‌سازی به روش پیش‌رو نشان داده شده است.

محاسبات تمامی مشتق‌های میدان در فضای بسامد و با استفاده از شیوه‌های تبدیل فوریه صورت گرفته است.

جدول ۲. پارامترهای مدل‌های مصنوعی بدون نوفه.

پارامترهای مدل	مدل استوانه ۲	مدل استوانه ۱	مدل دایک ۲	مدل دایک ۱
موقعیت افقی نسبت به مبدأ (کیلومتر)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
عمق تا سطح (کیلومتر)	۱۰	۱۵	۸	۶
سطح اندازه‌گیری	روی زمین	روی زمین	روی زمین	روی زمین
مغناطیس‌شوندگی (آمپر بر متر)	القایی و بازماند	القایی	القایی و بازماند، ۱۰	القایی، ۱۰
گشتاور مغناطیسی در واحد طول	۱۰	۲۰	-	-
ضخامت (کیلومتر)	-	-	۳	۲
زاویه شیب	-	-	۹۰	۴۵
زاویه میل میدان زمین	۸۰	۵۰	-۵۰	۴۵
زاویه انحراف میدان زمین	۴۰	۲۰	۲۰	۲۰
زاویه میل مغناطیس‌شوندگی کل	۲۰	۵۰	۴۰	۴۵
زاویه انحراف مغناطیس‌شوندگی کل	۳۰	۲۰	۳۰	۲۰

جدول ۳. نتایج حاصل از اعمال روش گرادیان سیگنال تحلیلی و روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اویلر برای مدل دایک ۱.

کمیت‌های محاسبه شده برای مدل دایک ۱	نتایج به‌دست آمده از روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت (بنی‌عامریان، ۱۳۸۸)	نتایج به‌دست آمده از روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی
عمق (کیلومتر)	۶/۰۲	۶/۰۹
شاخص ساختاری	۱/۰۱	۱/۰۱
مکان افقی (کیلومتر)	۹۷/۲۸	۱۰۰/۹۸
درصد خطای برآورد عمق	۰/۳۳	۱/۵
درصد خطای برآورد شاخص ساختاری	۱	۱
درصد خطای برآورد مکان افقی	۲/۷۲	۰/۹۸
میانگین درصد خطا	۱/۳۵	۱/۱۶

میدان، دامنه سیگنال‌های تحلیلی و دامنه گرادیان سیگنال تحلیلی را برای مدل دایک مورد نظر نشان می‌دهد. شکل ۳ بی‌هنجاری میدان کل ناشی از مدل استوانه افقی ۳ و شکل ۴ بی‌هنجاری کل حاصل از این مدل را پس از ادامه فراسو به ارتفاع ۵ کیلومتر، مشتق افقی میدان، مشتق قائم میدان، دامنه سیگنال‌های تحلیلی، و دامنه گرادیان سیگنال تحلیلی را برای مدل استوانه افقی مورد نظر نشان می‌دهد.

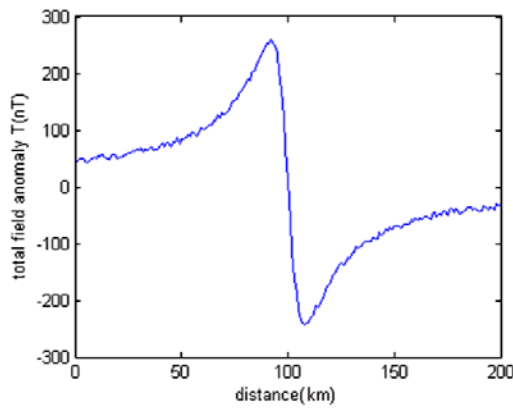
به سبب نزدیکی داده‌های تولید شده به داده‌های واقعی، ۵ درصد نوفه تصادفی به دو سری از داده‌های تولید شده (مدل دایک ۳ و استوانه ۳ با پارامترهای جدول ۷) اضافه شده است و نتایج حاصل از اعمال‌ها در جدول‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. شکل ۱ بی‌هنجاری میدان کل ناشی از مدل دایک ۳ و شکل ۲ بی‌هنجاری میدان کل حاصل از این مدل را پس از ادامه فراسو به ارتفاع ۴ کیلومتر، مشتق افقی میدان، مشتق قائم

جدول ۴. نتایج حاصل از اعمال روش گرادیان سیگنال تحلیلی و روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اویلر برای مدل دایک ۲.

کمیت‌های محاسبه شده برای مدل دایک ۲	نتایج به‌دست آمده از روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اویلر (بنی‌عامریان، ۱۳۸۸)	نتایج به‌دست آمده از روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی
عمق (کیلومتر)	۸/۰۷۹	۸/۱۴
شاخص ساختاری	۱/۰۲۹	۱/۰۱
مکان افقی (کیلومتر)	۱۰۳/۰۹	۱۰۰/۹۹
درصد خطای برآورد عمق	۰/۹۸	۱/۷۵
درصد خطای برآورد شاخص ساختاری	۲/۹	۱
درصد خطای برآورد مکان افقی	۳/۰۹	۰/۹۹
میانگین درصد خطا	۲/۳۲	۱/۲۴

جدول ۵. نتایج حاصل از اعمال روش گرادیان سیگنال تحلیلی و روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اوپلر برای مدل استوانه ۱.

کمیت‌های محاسبه شده برای مدل استوانه ۱	نتایج به‌دست آمده از روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اوپلر (بنی عامریان، ۱۳۸۸)	نتایج به‌دست آمده از روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی
عمق (کیلومتر)	۱۵/۰۰۹	۱۵/۴۱
شاخص ساختاری	۲/۰۲۲	۲/۰۲
مکان افقی (کیلومتر)	۹۹/۴	۱۰۰/۹۹
درصد خطای برآورد عمق	۰/۰۶	۲/۷۳
درصد خطای برآورد شاخص ساختاری	۱/۱	۱
درصد خطای برآورد مکان افقی	۰/۶	۰/۹۹
میانگین درصد خطا	۰/۵۸	۱/۵۷



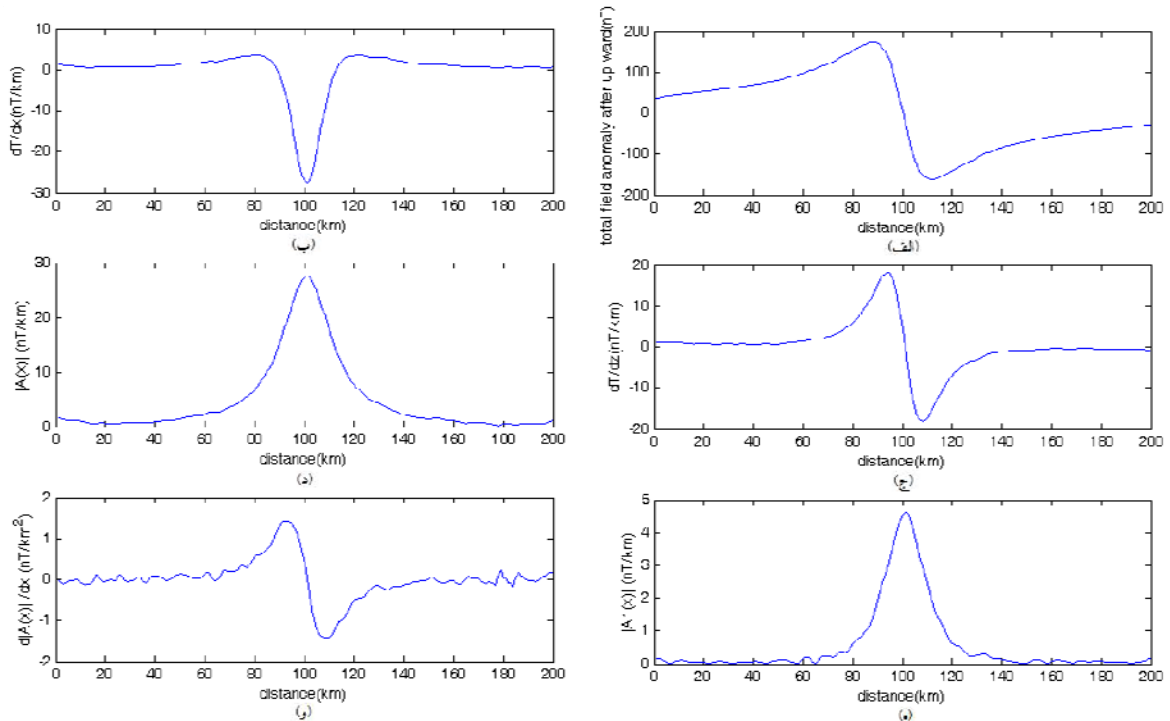
شکل ۱. بی‌هنجاری میدان کل ناشی از مدل دایک ۳ همراه با ۵ درصد نوفه تصادفی.

جدول ۶. نتایج حاصل از اعمال روش گرادیان سیگنال تحلیلی و روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اوپلر برای مدل استوانه ۲.

کمیت‌های محاسبه شده برای مدل استوانه ۲	نتایج به‌دست آمده از روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اوپلر (بنی عامریان، ۱۳۸۸)	نتایج به‌دست آمده از روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی
عمق (کیلومتر)	۱۰/۰۰۱	۱۰/۱۲
شاخص ساختاری	۲	۲/۰۱
مکان افقی (کیلومتر)	۹۹/۴۵	۱۰۰/۹۹
درصد خطای برآورد عمق	۰/۰۱	۱/۲
درصد خطای برآورد شاخص ساختاری	۰	۰/۵
درصد خطای برآورد مکان افقی	۰/۵۵	۰/۹۹
میانگین درصد خطا	۰/۱۸	۰/۸۹

جدول ۷. پارامترهای مدل‌های مصنوعی همراه با نوفه.

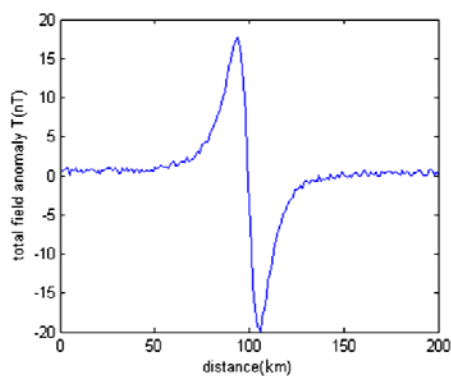
پارامترهای مدل	مدل استوانه ۳	مدل دایک ۳
موقعیت افقی نسبت به مبدأ (کیلومتر)	۱۰۰	۱۰۰
عمق تا سطح (کیلومتر)	۱۰	۸
سطح اندازه‌گیری	روی زمین	روی زمین
مغناطیس‌شوندگی (آمپر بر متر)	القایی و بازماند	القایی، ۱۰
گشتاور مغناطیسی در واحد طول	۱۵	-
ضخامت (کیلومتر)	-	۲
زاویه شیب	-	۹۰
زاویه میل میدان زمین	۵۰	۴۵
زاویه انحراف میدان زمین	۲۰	۰
زاویه میل مغناطیس‌شوندگی کل	۳۰	۴۵
زاویه انحراف مغناطیس‌شوندگی کل	۱۰	۰
میزان نوفه اضافه شده	۵٪ تصادفی	۵٪ تصادفی



شکل ۲. (الف) بی‌هنجاری میدان کل پس از ادامه فراسو به ارتفاع ۴ کیلومتر، (ب) مشتق افقی میدان، (ج) مشتق قائم میدان، (د) و (ه) دامنه سیگنال‌های تحلیلی و (و) دامنه گرادیان سیگنال تحلیلی برای مدل دایک ۳ همراه با ۵ درصد نوفه تصادفی.

جدول ۸. نتایج حاصل از اعمال روش گرادیان سیگنال تحلیلی و روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اولیر برای مدل دایک ۳.

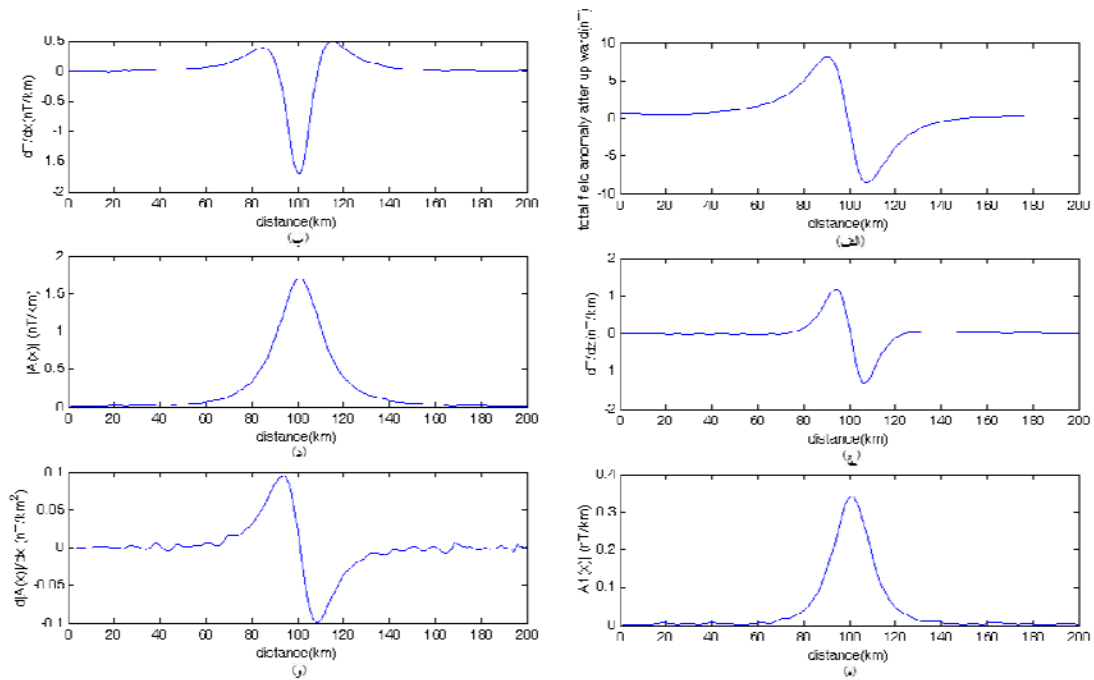
نتایج به دست آمده از روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی	نتایج به دست آمده از روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اولیر (بنی عامریان، ۱۳۸۸)	کمیت‌های محاسبه شده برای مدل دایک ۳ (سطح ادامه فراسو ۴)
۸/۵۴	۸/۳۲	عمق (کیلومتر)
۱/۰۱	۱/۰۵	شاخص ساختاری
۱۰۰/۹۳	۹۹/۰۳	مکان افقی (کیلومتر)
۶/۷۵	۴	درصد خطای برآورد عمق
۱	۵	درصد خطای برآورد شاخص ساختاری
۰/۹۳	۰/۹۷	درصد خطای برآورد مکان افقی
۲/۸۹	۳/۳۲	میانگین درصد خطا



شکل ۳. بی‌هنجاری میدان کل ناشی از مدل استوانه افقی ۳ همراه با ۵ درصد نوفه تصادفی.

جدول ۹. نتایج حاصل از اعمال روش گرادیان سیگنال تحلیلی و روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اولیر برای مدل استوانه افقی ۳.

نتایج به دست آمده از روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی	نتایج به دست آمده از روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اولیر (بنی عامریان، ۱۳۸۸)	کمیت‌های محاسبه شده برای مدل استوانه افقی ۳ (سطح ادامه فراسو ۵)
۱۰/۲۶	۹/۴۱	عمق (کیلومتر)
۱/۹۹	۱/۹۵	شاخص ساختاری
۱۰۰/۹۲	۱۰۱/۰۶	مکان افقی (کیلومتر)
۲/۶	۵/۹	درصد خطای برآورد عمق
۰/۵	۲/۵	درصد خطای برآورد شاخص ساختاری
۰/۹۲	۱/۰۶	درصد خطای برآورد مکان افقی
۱/۳۴	۳/۱۵	میانگین درصد خطا



شکل ۴. (الف) بی‌هنجاری میدان کل پس از ادامه فراسو به ارتفاع ۵ کیلومتر، (ب) مشتق افقی میدان، (ج) مشتق قائم میدان، (د) و (ه) دامنه سیگنال‌های تحلیلی و (و) دامنه گرادیان سیگنال تحلیلی برای مدل استوانه افقی ۳ همراه با ۵ درصد نوفه تصادفی.

۴ نتیجه‌گیری

در روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی عمق، مکان افقی و شاخص ساختاری چشمه ایجاد بی‌هنجاری به صورت هم‌زمان برای داده‌های نیم‌رخ برآورد می‌شود، در حالی که روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اوپلر برآوردی از عمق و شاخص ساختاری را برای داده‌های نیم‌رخ و شبکه‌ای به دست می‌دهد و مکان افقی با استفاده از یک روش کمکی تعیین می‌شود.

با استفاده از هر دو روش بدون نیاز به اطلاعات اولیه از مشخصات چشمه، برآورد قابل‌قبولی از پارامترهای چشمه ایجاد بی‌هنجاری مغناطیسی عرضه شد. هیچ‌یک از روابط اساسی داده شده برای این دو روش وابستگی صریح به پارامترهای جهت‌دار همچون مغناطیس‌شوندگی ندارند. بنابراین، همان‌طور که نتایج مدل‌ها با مغناطیس باقی‌مانده (دایک ۲، استوانه ۲ و استوانه ۳) نشان داد، می‌توان از هر یک از این دو روش با وجود مغناطیس

باقی‌مانده (به‌منزله عامل مزاحم) برای برآورد پارامترهای ساختارهای زمین‌شناسی دو بُعدی با خاصیت مغناطیسی استفاده کرد.

نتایج حاصل از مدل‌های بدون نوفه خطای کمتر روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اوپلر را در برآورد عمق ساختارهای مربوط نشان داد. در حالی که هر دو روش با دقتی نسبتاً برابر، برآوردی از شکل چشمه ایجاد بی‌هنجاری به دست دادند. در این مدل‌ها، روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی برآورد مناسبی از مکان افقی به دست داده است.

نتایج حاصل از اعمال روش‌ها روی مدل‌های آلوده به نوفه، دقت نسبتاً مشابهی را برای هر دو روش در برآورد عمق چشمه ایجاد بی‌هنجاری نشان می‌دهد. در این مدل‌ها روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی با دقت بیشتری شکل چشمه ایجاد بی‌هنجاری را برآورد کرده است. به‌کارگیری مشتق‌های مرتبه سوم میدان در روش ترکیبی

- تفسیر داده‌های مغناطیسی دو بُعدی، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۷(۳)، ۸۷-۹۹.
- رشوند، م.، ۱۳۸۹، استفاده از مشتق‌های سیگنال تحلیلی در تفسیر داده‌های مغناطیسی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- 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.
- Hsu, S. K., Sibuet, J. C. and Shyu, C. T., 1996, High-resolution detection of geologic boundaries from potential anomalies: An enhanced analytic technique, *Geophysics*, **61**, 373-386.
- Nabighian, M. N., 1972, The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation, *Geophysics*, **37**, 507-517.
- Roest, A., Verhoef, J. and Pilkington, M., 1992, Magnetic interpretation using 3-D analytic signal, *Geophysics*, **57**, 116-125.
- Salem, A., 2005, Interpretation of magnetic data using analytic signal derivatives, *Geophysical Prospecting*, **53**, 75-82.
- 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.
- Thompson, D. T., 1982, EULDPH- a new technique for making computer- assisted depth estimates from magnetic data, *Geophysics*, **47**, 31-37.

سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اوایلر سبب تأثیر بیشتر نوفه‌ها روی نتایج حاصل از این روش در برآورد شکل چشمه ایجاد بی‌هنجاری شده است.

بررسی نتایج عرضه شده، به پیشنهاد استفاده از روش ترکیبی حاصل از هر دو روش، اعمال روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی در ابتدا به منظور یافتن مقادیر دقیق‌تر شاخص ساختاری (شکل چشمه) و مکان افقی و استفاده از روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اوایلر به دنبال آن برای تعیین عمق چشمه ایجاد بی‌هنجاری مغناطیسی، منجر می‌شود، که می‌تواند به مثابه روشی کارا با دقتی مناسب برای داده‌های نیم‌رخ، یا در حکم روشی کمکی برای داده‌های شبکه‌ای (بررسی نیم‌رخ‌های موردی) در تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی به کار گرفته شود.

تشکر و قدردانی

از آقای جمال‌الدین بنی‌عامریان برای همکاری و راهنمایی‌های علمی، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- بنی‌عامریان، ج.، ۱۳۸۸، روش ترکیبی سیگنال تحلیلی - واهمامیخت اوایلر (AN-EUL) در تفسیر داده‌های مغناطیسی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- بنی‌عامریان، ج. و اسکویی، ب.، ۱۳۹۰، ترکیب روش‌های سیگنال تحلیلی و واهمامیخت اوایلر (AN-EUL) برای