

## برآورد عمق توده‌های مغناطیسی با استفاده از مشتقات سیگنال تحلیلی

مسلم فاتحی<sup>۱</sup>، غلامحسین نوروزی<sup>۲\*</sup> و فاطمه حاجی‌ئی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران  
<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۳</sup>شرکت مجریان توسعه معادن آسیا، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۴/۲۹)

### چکیده

سال‌ها است که از سیگنال تحلیلی و مشتقات آن در تفسیر داده‌های مغناطیسی اعم از برآورد مرز، عمق و شیب توده‌ها استفاده می‌شود. در این نوشته رابطه سیگنال تحلیلی و مشتقات آن برحسب پارامترهای موثر بر آن برای توده‌های گوناگون از قبیل کنتاکت، دایک نازک و استوانه افقی، توسعه داده شده است. با استفاده از نسبت بین بیشینه مقدار سیگنال تحلیلی ساده و مشتقات مرتبه اول و دوم آن، روابطی برای برآورد عمق توده‌ها و شاخص ساختاری آنها به دست آمد که دقیقاً مشابه با روابط برآورد عمق و شاخص ساختاری روش تلفیق سیگنال تحلیلی و اویلر (AN-EUL) هستند. همچنین با دانش قبلی نسبت به مدل توده، روابط دیگری برای برآورد عمق هرکدام از مدل‌های کنتاکت، دایک نازک و استوانه افقی به دست آمد. برای بررسی دقت این روابط، از یک مدل دایکی شکل در عمق‌های متفاوت استفاده شد. وابستگی روش تلفیق اویلر و سیگنال تحلیلی به نسبت عمق توده به عرض آن، نتیجه این بررسی‌ها بود. بنابراین وقتی نسبت عمق توده به عرض آن کمتر از ۲ باشد نمی‌توان از این روش برای برآورد عمق استفاده کرد. برای حل این مشکل از روابط برآورد عمق عرضه شده برای مدل‌های متفاوت استفاده شده است. از این روش برای برآورد عمق داده‌های مغناطیسی کانسار آهن علی‌آباد واقع در استان زنجان استفاده شد و نتایج آن با اطلاعات حفاری‌های اکتشافی مورد مقایسه قرار گرفت. ضریب همبستگی بین عمق برآوردی و عمق واقعی برابر با ۸۵ درصد شد.

**واژه‌های کلیدی:** برآورد عمق، مشتقات سیگنال تحلیلی، نسبت عمق توده به عرض آن، کانسار آهن علی‌آباد

## Depth detection of magnetic bodies by using the analytic signal derivative

Moslem Fatehi<sup>1</sup>, Gholamhosein Norouzih<sup>2\*</sup> and Fatemeh Hajiee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Iran

<sup>2</sup>Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, Iran

<sup>3</sup>Asia Mining Development

(Received: 16 February 2012, accepted: 20 July 2013)

### Summary

The analytic signal and its derivatives have been used in magnetic data interpretation such as estimation of the edge, depth and slope of the magnetic bodies for several years. Nabighian (1972, 1974, 1984) extensively described the principles of the analytic signal method for the location of the 2D sources. The analytic signal shape can be used to determine the depth of the magnetic sources. Atchuta et al (1981) used the anomaly width

\*Corresponding author:

norouzih@ut.ac.ir

\*نگارنده رابط:

at half the amplitude to derive the depths. W. R. Roest and his collaborators used the 3D analytic signal amplitude to estimate the magnetic source depth (Roest et al., 1992) and to identify remanent magnetization (Roest and Pilkington, 1993). However, their applications and many conclusions are based on a 2D vertical-magnetic-contact model assumption. Further implementation of this technique was made by Hsu et al. (1996) who developed an enhanced analytic signal applied to a higher order vertical derivative of potential - field anomalies and thus providing a better visualization of the outlines of magnetic bodies. This enhanced analytic signal was adapted as an automatic interpretation tool (Debeglia and Coperl, 1997; Hsu et al., 1998). Hsu et al., 1998 used the enhanced analytic signal to estimate the depth of step models and the thin dike. They also proposed an algorithm for the type of these models afterwards. Bastani and Pedersen (2001) have developed an algorithm for the automatic estimation of the source parameters, including the dip and susceptibility contrast, from the analytic signal in the case of magnetic profiles. Salem and Ravat (2003) proposed a combined method (AN-EUL) based on the Euler equation and the analytic signal. Li (2006) discussed a 3D analytic signal and proposed that, generally, in three dimensions, the analytic signal is dependent on everything that the total magnetic intensity (TMI) itself may depend on i.e. the direction of the inducing field, the direction of the remanent magnetization, the dipping angle of the source body, and the depths to the top and bottom of the source body.

In this study, the equations of analytic signal and its derivatives were developed based on their effective parameters for contact, thin dikes and horizontal cylinder models. Afterwards, using the maximum value of the ratio of analytic signal and its derivatives, an equation for depth and structural index estimation was obtained which was exactly similar to the equations in the AN-EUL method. Then, assuming a priori knowledge about the shape of magnetic body, other equations were obtained for the depth detection of contact, thin dike and horizontal cylinder. To evaluate the precision of these methods, we have used a dike model with constant width located at different depths. In this modeling study, we proved that the estimated depth from the AN-EUL method was dependent on the depth-to-width ratio. Using the AN-EUL method, it is not possible to detect the depth of bodies with their depth-to-width ratio less than two. To solve this problem, we used proposed equations for different models. This method was used for the depth detection of the Aliabad iron deposit, and its results were compared to the results from drilling exploration data. The correlation coefficient between the exact depth and the estimated depth was equal to 85 percent.

**Keywords:** Depth detection, analytic signal derivatives, depth-to-width ratio, Aliabad iron deposit

#### ۱ مقدمه

استفاده شده است. سیگنال تحلیلی یک تابع، کمیت مختلطی است که مولفه حقیقی و موهومی آن به ترتیب مشتق افقی و قائم آن تابعاند. نیقیان (۱۹۷۲، ۱۹۷۴) سیگنال تحلیلی را برای داده‌های میدان پتانسیل در دو بُعد به کار برد. مقدار سیگنال تحلیلی به منزله مجذور مربعات مشتقات میدان پتانسیل تعریف و از آن برای تعیین مرز توده‌های مغناطیسی استفاده شد. روئست و همکاران (۱۹۹۲) روش سیگنال تحلیلی را در سه بُعد به صورت

از زمانی که برداشت‌های مغناطیسی به صورت زمینی و هوایی برای اکتشاف کانسارهای معدنی و ساختارهای زمین‌شناسی مورد استفاده قرار گرفته است، افراد متعددی، روش‌های دستی، و با به روی کار آمدن رایانه‌ها، روش‌های خودکار را برای پردازش داده‌های در دسترس توسعه داده‌اند. سیگنال تحلیلی یکی از روش‌هایی است که از آن به طور گسترده در تفسیر داده‌های میدان پتانسیل

سیگنال تحلیلی سه‌بُعدی پرداخت و بیان کرد که سیگنال تحلیلی سه‌بُعدی غیر وابسته به زاویه میل و انحراف مغناطیس‌شدگی توده و میدان مغناطیسی زمین نیست. در این مقاله رابطه کلی مقدار سیگنال تحلیلی مرتبه‌های متفاوت برحسب پارامترهای موثر بر آن (مانند عمق قرارگیری، شکل توده، مشخصات میدان مغناطیسی و مانند آن) برای توده‌های گوناگون توسعه داده شده است و با استفاده از نسبت بین سیگنال تحلیلی ساده و مرتبه‌های اول و دوم آن، روابطی برای برآورد عمق و شاخص ساختاری توده معرفی شده است. سپس با فرض داشتن دانش قبلی نسبت به مدل توده، روابطی برای برآورد عمق هر توده بیان شد و روی یک مدل دایکی قائم، با عرض ثابت و قرارگیری در عمق‌های متفاوت آزمایش شدند. از نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی مصنوعی برای برآورد عمق داده‌های واقعی مغناطیسی کانسار آهن علی‌آباد استفاده شد. با توجه به حفاری‌های اکتشافی صورت گرفته روی این کانسار، نتایج آن با برآورد عمق به‌دست آمده از مشتقات سیگنال تحلیلی مقایسه شده و اعتبار آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲ روش تحقیق

### ۱-۲ نظریهٔ روش

نیقیان (۱۹۷۲، ۱۹۷۴) از مفهوم سیگنال تحلیلی برای داده‌های میدان پتانسیل دو‌بُعدی استفاده کرد. برای یک میدان پتانسیل اندازه‌گیری شده  $M(x)$  در امتداد محور  $x$  در یک ارتفاع ثابت و ایجاد شده با یک توده دو‌بُعدی که امتداد آن موازی محور  $y$  است، مشتق افقی  $\frac{\partial M(x)}{\partial x}$  و قائم  $\frac{\partial M(x)}{\partial z}$  یک زوج تبدیل هیلبرت هستند. بنابراین می‌توان سیگنال تحلیلی داده‌های میدان پتانسیل در دو بُعد را به‌صورت زیر نوشت:

$$A(x) = \frac{\partial M(x)}{\partial x} + i \frac{\partial M(x)}{\partial z}, \quad (1)$$

برداری که شامل مشتقات افقی و تبدیل هیلبرت آنها می‌شد نوشتند و از مقدار سیگنال تحلیلی برای تفسیر داده‌های سه‌بُعدی (شبکه‌بندی شده) میدان پتانسیل استفاده کردند. روئست و همکارانش از مقدار سیگنال تحلیلی برای برآورد عمق توده‌ها (روئست و همکاران، ۱۹۹۲)، و برای تعیین مغناطیس‌شدگی باقی‌مانده (روئست و پیلکینگتون، ۱۹۹۳)، استفاده کردند، اگرچه کار آنها و بسیاری از نتایج‌شان براساس فرض یک مدل کنتاکت قائم دو‌بُعدی بود. آتچوتا و همکاران (۱۹۸۱) و روئست و همکاران (۱۹۹۲) از نصف عرض دامنه سیگنال تحلیلی، و مکلود و همکاران (۱۹۹۳) از فاصله بین نقاط عطف دامنه سیگنال تحلیلی برای تعیین عمق توده‌های دو‌بُعدی استفاده کردند. این روش کمتر تحت تاثیر تداخلات ایجاد شده از بی‌هنجاری‌های مجاور قرار می‌گیرد. هسو و همکاران (۱۹۹۶) روش سیگنال تحلیلی سه‌بُعدی را توسعه دادند و از مشتقات قائم مرتبه‌های بالاتر سیگنال تحلیلی (سیگنال تحلیلی تعمیم‌یافته)، که مرز توده‌ها را بهتر از سیگنال تحلیلی مشخص می‌کند، استفاده کردند. از سیگنال تحلیلی تعمیم‌یافته درحکم روشی خودکار برای تفسیر داده‌های مغناطیسی استفاده شده است (دبگلیا و کورپل، ۱۹۹۷؛ هسو و همکاران، ۱۹۹۶، ۱۹۹۸). باستانی و پدرسن (۲۰۰۱) به‌منظور برآورد پارامترهای توده‌های مغناطیسی دایکی شکل، یک الگوریتم خودکار به کمک سیگنال تحلیلی برای داده‌های یک نیم‌رخ عرضه کردند. اسمیت و همکاران (۲۰۰۵)، رابطه سیگنال تحلیلی را برای مدل‌های دو‌بُعدی کنتاکت، دایک‌های نازک شیب‌دار و استوانه افقی تعریف کردند و با بهنجار کردن مقدار سیگنال تحلیلی با مقدار بیشینه آن، عمق، شاخص ساختاری و تباین خودپذیری توده‌های گوناگون را به‌دست آوردند. فرض نبود وابستگی شکل و مقدار سیگنال تحلیلی به مشخصات میدان مغناطیسی، از جمله تصورات اشتباه درباره سیگنال تحلیلی بود. لی (۲۰۰۶) به‌طور کامل به

و مقدار سیگنال تحلیلی دو بُعدی داده‌های میدان پتانسیل به صورت زیر خواهد بود:

$$|A_0(x)| = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2} \quad (۲)$$

روئست و همکاران (۱۹۹۲) سیگنال تحلیلی را در سه بعد به صورت یک بردار، که شامل مشتقات افقی و تبدیل هیلبرت آنها می‌شد، نوشتند. بنابراین مقدار سیگنال تحلیلی سه بُعدی میدان پتانسیل  $M(x, y)$  اندازه گیری شده روی یک سطح افقی، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$|A_0(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2} \quad (۳)$$

به علت اثر تداخلات توده‌های مجاور هم، استفاده از سیگنال تحلیلی ساده برای تعیین مرز توده‌ها کافی نیست (هسو و همکاران، ۱۹۹۶)، به همین علت از مرتبه‌های بالاتر سیگنال تحلیلی (سیگنال تحلیلی تعمیم یافته) برای تعیین دقیق تر مرز توده‌ها استفاده می‌شود. برای توده‌های سه بُعدی، هسو و همکاران (۱۹۹۶) سیگنال تحلیلی تعمیم یافته مرتبه  $j$  را به صورت زیر تعریف کردند، که در آن به جای میدان مغناطیسی از مشتق قائم آن استفاده می‌شود.

$$(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^j M}{\partial z^j}\right) \bar{x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^j M}{\partial z^j}\right) \bar{y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^j M}{\partial z^j}\right) \bar{z} \quad (۴)$$

و مقدار سیگنال تحلیلی سه بُعدی تعمیم یافته مرتبه  $j$  از رابطه زیر به دست می‌آید (هسو و همکاران، ۱۹۹۶).

$$|A_j(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^j M}{\partial z^j}\right)\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^j M}{\partial z^j}\right)\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^j M}{\partial z^j}\right)\right)^2} \quad (۵)$$

مرتبه‌های بالاتر سیگنال تحلیلی اثر تداخلات منبع بی‌هنجاری را کاهش می‌دهد. با وجود این استفاده از مرتبه‌های بالاتر از ۲، به علت اینکه باعث ایجاد نوفه‌های با بسامد بالا می‌شوند، امکان پذیر و موفقیت آمیز نیستند (هسو و همکاران، ۱۹۹۶). علاوه بر تعیین مرز توده‌های مغناطیسی، از مقدار سیگنال تحلیلی می‌توان در برآورد عمق توده‌ها نیز استفاده کرد. مقدار سیگنال تحلیلی به متغیرهای زیر وابسته است (اسمیت و سالم، ۲۰۰۵):

- عمق توده  $z_0$

- شکل ساختار (شاخص ساختاری)

- شیب (تنها برای مدل کنتاکت)

- شدت، زاویه میل و انحراف میدان مغناطیسی

- تباین خودپذیری توده با سنگ میزبان

بنابراین برای برآورد عمق توده‌ها لازم است رابطه عمق توده  $z_0$  برحسب مقدار سیگنال تحلیلی را به گونه‌ای نوشت که دیگر پارامترها روی آن تاثیری نداشته باشند. اسمیت و همکاران (۲۰۰۵)، برای مدل‌های دو بُعدی کنتاکت، دایک‌های نازک شیب‌دار و استوانه افقی، مقدار سیگنال تحلیلی ساده و مرتبه اول آن را با رابطه زیر بیان کردند

$$|A_{j-1}(x)| = \frac{N(n, j) B_n}{((z - z_0)^2 + (x - x_0)^2)^{(j+n)/2}}, \quad j = 1, 2, \dots \quad (۶)$$

که  $(j-1)$  مرتبه مشتق (سیگنال تحلیلی)،  $z_0$  عمق توده و  $n$  شاخص ساختاری آن و مشابه با شاخص ساختاری داده شده در روش اوپلر است. برای کنتاکت  $n=0$   $N(0, j) = 1$  و  $B_0 = 2KFc \sin(d)$  که در آن  $K$  تباین خودپذیری مغناطیسی توده و سنگ‌های دربرگیرنده؛  $F$  شدت میدان مغناطیسی زمین؛ پارامتر  $c$  به صورت رابطه  $c = 1 - \cos^2 i \times \sin^2 a$  که در این رابطه متغیر  $i$  زاویه میل میدان مغناطیسی؛  $d$  زاویه شیب کنتاکت؛ و  $a$  زاویه بین راستای شمال مغناطیسی و جهت مثبت محور  $x$  هستند (نیقیان، ۱۹۷۲). برای مدل‌های لایه‌ای (دایک) نازک  $n=1$   $N(1, j) = j$ ،  $B_1 = 2KFcw$ ، و برای استوانه افقی  $n=2$   $N(2, j) = (4j - 2)$  و  $B_2 = KFS \sin(i) / \sin(I)$  که در آن  $w$  عرض دایک (ضخامت لایه)،  $S$  مساحت سطح مقطع استوانه، و  $\tan I = \tan i / \cos a$  (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۵). در رابطه (۶) به‌ازای هر مدل، مقدار مشخصی از  $N(n, j)$  داده شده و از آن نمی‌توان به صورت یک رابطه کلی استفاده کرد. می‌توان رابطه (۶) را توسعه داد و برای

از رابطه سیگنال تحلیلی مرتبه‌های متفاوت داده شده، به دست آمده‌اند.

با استفاده از روابط (۸)، (۹) و (۱۰) می‌توان روابط دیگری برای برآورد عمق توده‌های گوناگون به دست آورد که استفاده از آنها مستلزم داشتن دانش قبلی درباره مدل توده است. بنابراین روابط برآورد عمق برای مدل‌های کنتاکت، دایک نازک و استوانه افقی به ترتیب به صورت زیر خواهد بود:

$$z_c = \frac{2}{c_3}, \quad z_c = \sqrt{\frac{2}{c_2}}, \quad \text{و} \quad z_c = \frac{1}{c_1} \quad (۱۳)$$

$$z_d = \frac{3}{c_3}, \quad z_d = \sqrt{\frac{6}{c_2}}, \quad \text{و} \quad z_d = \frac{2}{c_1} \quad (۱۴)$$

$$z_h = \frac{4}{c_3}, \quad z_h = \sqrt{\frac{12}{c_2}}, \quad \text{و} \quad z_h = \frac{3}{c_1} \quad (۱۵)$$

در صورت معلوم بودن مدل توده می‌توان از میانگین عمق به دست آمده از سه رابطه داده شده مربوط به هر توده استفاده کرد.

## ۲-۲ برآورد عمق داده‌های مصنوعی

روابط عرضه شده در بالا برای توده‌های خاص هستند و در طبیعت کمتر کانسارهایی که دارای خاصیت مغناطیسی و دقیقاً یک مدل کنتاکت و یا دایک نازک باشند وجود دارد. به همین علت برای بررسی دقت این روش در پردازش داده‌های واقعی برداشت شده روی توده‌های مغناطیسی، از مدل دایکی شکلی با عرض ۲۰ متر و طول ۱۰۰۰ متر (که می‌توان آن را بی‌نهایت فرض کرد)، و گسترش عمقی ۲۰۰ متر استفاده شده است. ضریب خودپذیری آن ۰.۲ CGS، شدت میدان مغناطیسی زمین ۴۷۴۰۰ نانوتسلا، زاویه میل و انحراف مغناطیسی نیز به ترتیب برابر با ۵۴ و ۴/۵ درجه در نظر گرفته شده است. فاصله خطوط برداشت ۲۰ متر و عمود بر امتداد توده و فاصله نقاط برداشت ۵ متر در نظر گرفته شده است. برای بررسی دقت روابط ذکر شده در برآورد عمق توده‌ها، این

کنتاکت، دایک نازک و استوانه افقی و به‌ازای هر مرتبه سیگنال تحلیلی، آن را به صورت رابطه کلی زیر نوشت:

$$|A_j(x)| = \frac{(n+j)!B_n}{(z^2+x^2)^{(j+n+1)/2}; j=0,1,2,\dots \quad (۷)$$

که  $j$  مرتبه مشتق (مرتبه سیگنال تحلیلی)، و دیگر پارامترهای آن مشابه با رابطه قبل است. از جمله مزیت‌های این رابطه آن است که برای هر سه مدل کنتاکت ( $n=0$ )، دایک نازک ( $n=1$ ) و استوانه افقی ( $n=2$ ) صحیح است. رابطه (۷) نشان می‌دهد که در صورتی که میدان پتانسیل یک تابع همگن از درجه  $n$  باشد، سیگنال تحلیلی آن یک تابع همگن از درجه  $(n+1)$  است. می‌توان با استفاده از مقدار سیگنال تحلیلی ساده ( $j=0$ ) و مرتبه‌های اول ( $j=1$ ) و دوم ( $j=2$ ) آن، و بدون دانش قبلی از مدل توده، عمق و شکل آن را روی لبه‌های توده ( $x=0$ )، برآورد کرد. سیگنال تحلیلی مرتبه‌های متفاوت به‌ازای ( $x=0$ ) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$|A_0(0)| = n! \frac{B_n}{z^{(n+1)}}, \quad (۸)$$

$$|A_1(0)| = (n+1)! \frac{B_n}{z^{(n+2)}}, \quad (۹)$$

$$|A_2(0)| = (n+2)! \frac{B_n}{z^{(n+3)}}, \quad (۱۰)$$

با فرض اینکه مقدار بیشینه سیگنال تحلیلی مرتبه‌های متفاوت دقیقاً روی مرز توده قرار می‌گیرد و با استفاده از نسبت بین آنها، می‌توان روابطی برای برآورد عمق و شاخص ساختاری توده‌ها به صورت زیر به دست آورد:

$$n = \frac{c_3 - 2c_1}{c_1 - c_3}, \quad (۱۱)$$

$$z_0 = \frac{1}{c_3 - c_1}, \quad (۱۲)$$

که  $c_3 = \frac{|A_2(0)|}{|A_1(0)|}$  و  $c_2 = \frac{|A_2(0)|}{|A_0(0)|}$ ،  $c_1 = \frac{|A_1(0)|}{|A_0(0)|}$  هستند.

این روابط (۱۱ و ۱۲) دقیقاً مشابه با روابطی هستند که سالم و همکاران (۲۰۰۳) بر مبنای تلفیق رابطه سیگنال تحلیلی و اوایلر، برای برآورد عمق و شاخص ساختاری توده‌ها معرفی کردند. در این مقاله این روابط بسیار ساده‌تر و فقط

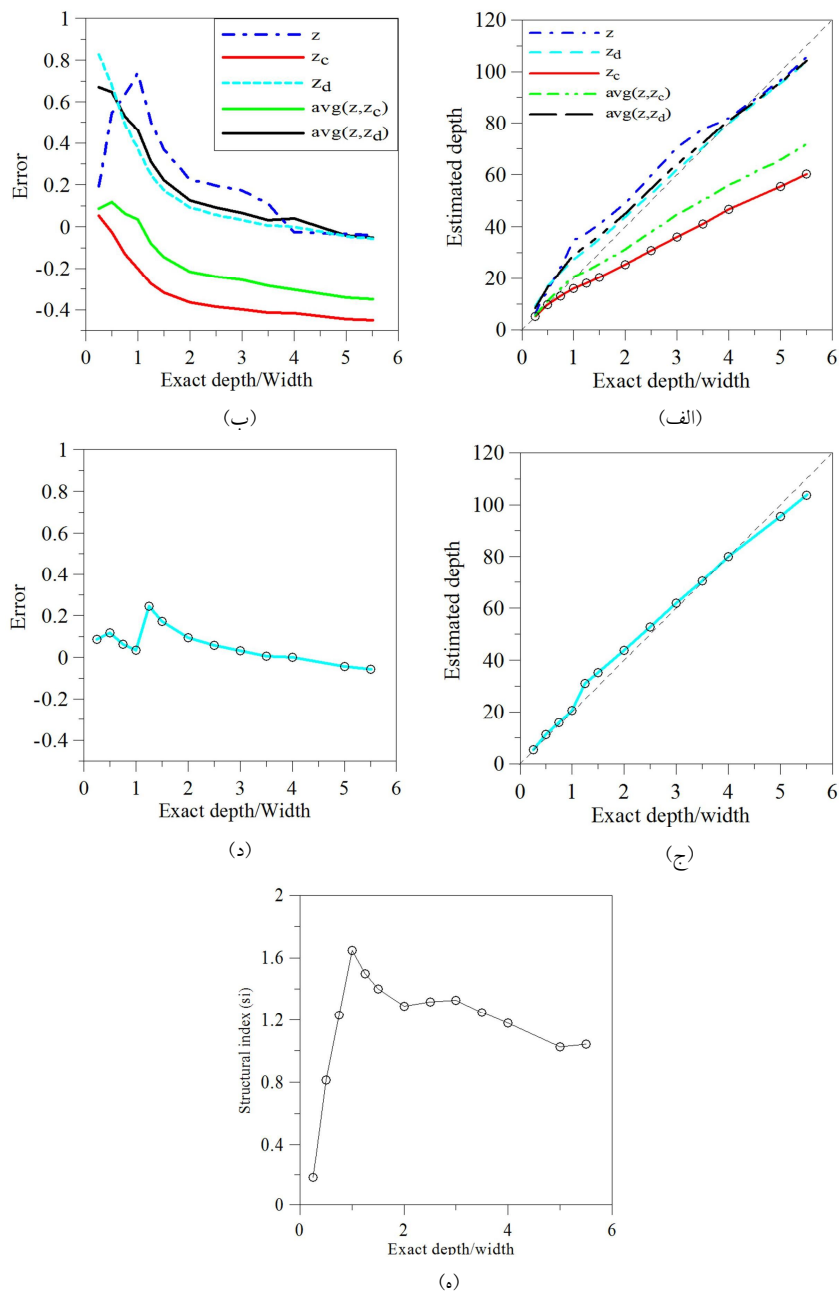
دایک نازک دقیق تر می شود. در شکل ۱ نتایج این بررسی به صورت نمودار نشان داده شده است.

ولی چه زمانی باید از عمق به دست آمده با استفاده از رابطه مربوط به دایک های نازک و چه زمانی از رابطه مربوط به کنتاکت استفاده کرد؟ شاخص ساختاری به ازای عمق های ۵ و ۱۰ متر (عمق های کمتر از نصف عرض توده)، کمتر از یک شده است و عمق به دست آمده از رابطه کنتاکت دقت بیشتری دارد. بنابراین یک روش تعیین رابطه برآورد عمق، شاخص ساختاری است به گونه ای که اگر  $n < 1$ ، از میانگین عمق به دست آمده از رابطه کنتاکت و رابطه (۱۲)، اگر  $1 < n < 2$  از رابطه دایک نازک و یا از میانگین عمق حاصل از رابطه (۱۲) و دایک نازک، و در صورتی که  $n > 2$ ، می توان از رابطه استوانه افقی، و یا از میانگین عمق حاصل از رابطه (۱۲) و استوانه افقی استفاده کرد. با وجود این چنین فرضی به طور کامل صحیح نیست چرا که شاخص ساختاری به ازای عمق های

مدل در عمق های متفاوتی در نظر گرفته و با استفاده از روابط مربوط به کنتاکت، دایک نازک، و رابطه برآورد عمق غیر وابسته به مدل توده (رابطه ۱۲)، عمق آن برآورد شده است. نتایج در جدول ۱ نشان داده شده است. همان طور که از نتایج مشاهده می شود عمق به دست آمده از رابطه (۱۲) پایدار نیست و دقت آن در عمق های متفاوت متغیر است. در نتیجه نمی توان از آن به منزله رابطه ای عام برای برآورد عمق استفاده کرد. نسبت عمق توده به عرض آن  $(z/w)$ ، پارامتر بسیار مهمی در دقت عمق برآورد شده است. به گونه ای که برای عمق های کم  $(z/w)$  عمق های برآورد شده با استفاده از رابطه پیش گفته برای کنتاکت (رابطه ۱۳):  $z_c$  و یا میانگین عمق حاصل از کنتاکت و رابطه (۱۲) به صورت  $(z_c + z)/2$ ، دقت بیشتری نسبت به دیگر روابط دارند. با افزایش عمق، از دقت عمق برآورد شده با رابطه کنتاکت کاسته می شود و عمق حاصل از رابطه

جدول ۱. نتایج برآورد عمق روی داده های مصنوعی حاصل از یک مدل دایکی شکل با عرض ۲۰ متر و واقع در عمق های متفاوت  $z$ ،  $z_c$  و  $z_d$  به ترتیب عمق به دست آمده از روابط ۱۲، ۱۳ و ۱۴ هستند.

شاخص ساختاری	خطای $z_d, z$	میانگین $z_d, z$	خطای $z_c, z$	میانگین $z_c, z$	خطای $z$	$z$	خطای $z_d$	$z_d$	خطای $z_c$	$z_c$	عمق/عرض
0.18	0.67	8.3	0.09	5.4	0.19	6.0	0.83	9.1	0.05	5.3	0.25
0.81	0.65	16.5	0.12	11.2	0.55	15.5	0.68	16.8	-0.03	9.7	0.5
1.23	0.53	22.9	0.06	15.9	0.64	24.6	0.49	22.4	-0.13	13.0	0.75
1.65	0.46	29.2	0.03	20.7	0.74	34.8	0.37	27.4	-0.20	16.0	1
1.50	0.31	32.7	-0.08	23.0	0.50	37.6	0.25	31.1	-0.27	18.2	1.25
1.40	0.22	36.6	-0.15	25.6	0.37	41.0	0.17	35.2	-0.32	20.5	1.5
1.29	0.13	45.0	-0.22	31.3	0.22	49.0	0.09	43.7	-0.36	25.5	2
1.32	0.09	54.6	-0.24	38.0	0.20	59.8	0.06	52.8	-0.38	30.8	2.5
1.33	0.07	64.0	-0.26	44.6	0.17	70.3	0.03	61.9	-0.40	36.1	3
1.25	0.03	72.3	-0.28	50.2	0.11	77.7	0.01	70.5	-0.41	41.0	3.5
1.18	0.04	81.0	-0.20	64.3	-0.03	82.0	0.00	80.0	-0.42	46.6	4
1.03	-0.04	95.8	-0.34	65.8	-0.03	96.5	-0.04	95.5	-0.44	55.5	5
1.04	-0.05	104.2	-0.35	71.6	-0.04	105.5	-0.06	103.7	-0.45	60.3	5.5



شکل ۱. نمودار نتایج برآورد عمق با استفاده از روابط بیان شده. (الف) عمق برآورد شده با استفاده از روابط غیر وابسته به مدل توده ( $z$ )، کنتاکت ( $z_c$ )، دایک نازک ( $z_d$ )، و میانگین آنها ( $z_c, z$  و  $z_d, z$ ). (ب) درصد خطای عمق برآورد شده در الف. (ج) عمق برآورد شده با استفاده از روش بیان شده در این مقاله. (د) خطای برآورد عمق قسمت ج. (ه) شاخص ساختاری برآورد شده با استفاده از رابطه (۱۱). داده‌های این نمودار در جدول ۲ نشان داده شده است.

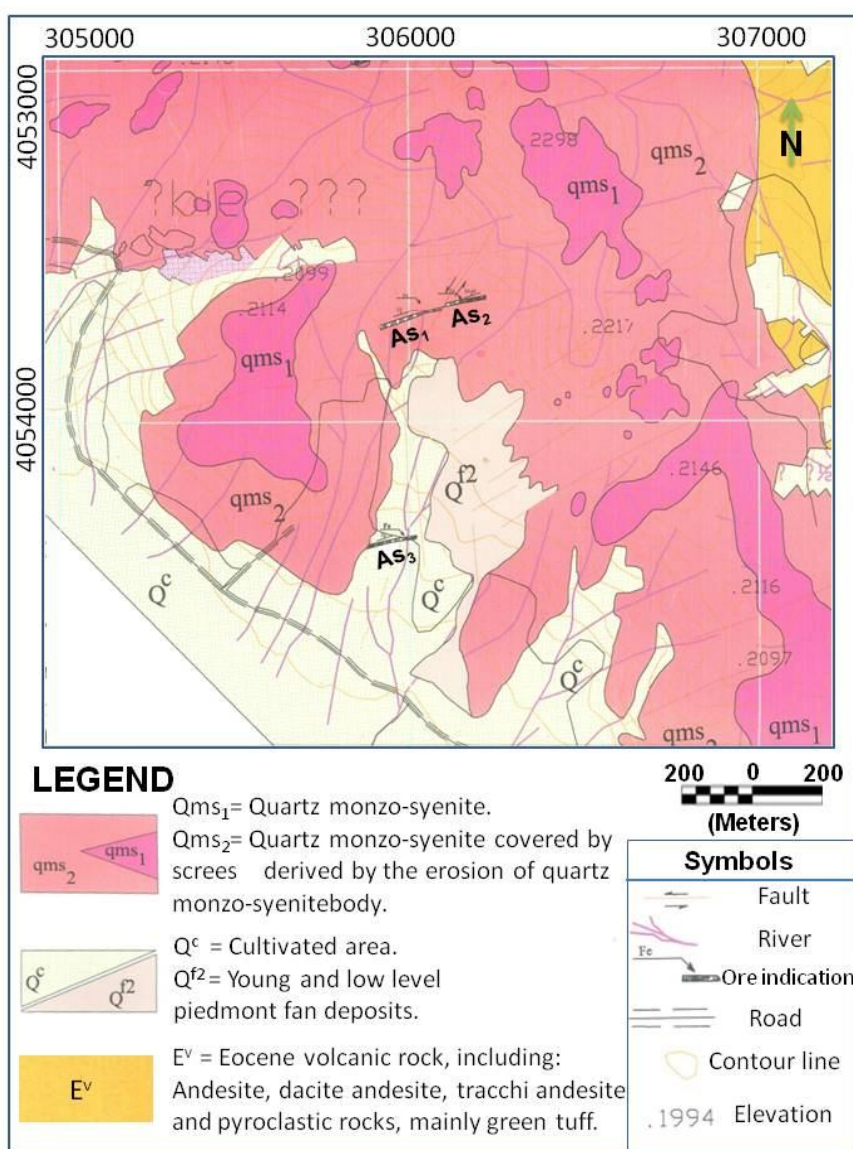
کمتری است. مورد دیگری که می‌توان از آن برای انتخاب رابطه برآورد عمق استفاده کرد، منحنی سیگنال تحلیلی مرتبه‌های متفاوت است. سیگنال تحلیلی ساده

۱۵ و ۲۰ بیشتر از یک شده است درحالی‌که برای این عمق‌ها، مقدار حاصل از میانگین عمق به‌دست آمده از رابطه کنتاکت و رابطه (۱۲)،  $(z_c, z)$  دارای خطای



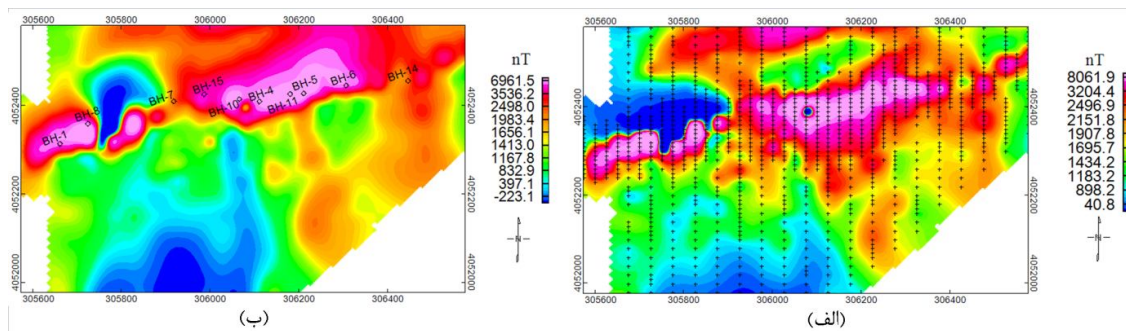
تحلیلی مرتبه دوم دو بیشینه بدهد از میانگین مقادیر  $z_c$  و  $z$  (روابط (۱۲) و (۱۳)) و درغیراین صورت از رابطه دایک نازک (رابطه (۱۴):  $z_d$ ) و یا میانگین  $z$  و  $z_d$  (روابط (۱۲) و (۱۴))، برای برآورد عمق استفاده می‌شود. عمق برآورد شده و خطای مربوط به آن با استفاده از این فرض‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

به‌ازای عمق‌های کمتر از نصف عرض دایک ( $z(w/2)$ ) دو بیشینه می‌دهد و با افزایش عمق فقط یک بیشینه روی محور مرکزی دایک نشان می‌دهد. با وجود این سیگنال تحلیلی مرتبه دوم تقریباً به‌ازای عمق‌های کمتر از عرض دایک، دو بیشینه می‌دهد. بنابراین تعداد بیشینه‌های منحنی سیگنال تحلیلی مرتبه دوم، معیار دیگری برای انتخاب رابطه برآورد عمق است. در صورتی که منحنی سیگنال



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی به همراه توپوگرافی منطقه اکتشافی مروارید [گزارش زمین‌شناسی معدن مروارید، شرکت مجریان توسعه معادن آسیا، ۱۳۸۵].





شکل ۳. نقشه میدان مغناطیسی کانسار آهن علی‌آباد (الف) و برگردان به قطب آن (ب). موقعیت ایستگاه‌های برداشت و گمانه‌های حفاری به ترتیب روی نقشه‌های (الف) و (ب) نشان داده شده است.

مرورید-علی‌آباد در داخل آن نفوذ کرده است. نتایج سنگ‌شناسی توده آذرین نفوذی مرورید - علی‌آباد نشان می‌دهد که ترکیب این توده از کوارتز مونوزوسینیت، مونوزوسینیت تا کوارتز مونوزونیت و مونوزونیت تغییر می‌کند. ناحیه مورد بررسی (مرورید- علی‌آباد) روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰,۰۰۰ زنجان، و در محدوده برگه ۱:۱۰۰,۰۰۰ طارم قرار دارد. تحقیقات صحرائی در گستره معدنی مرورید-علی‌آباد نشان می‌دهد که کانه آهن مگنتیت به صورت رگه‌هایی در داخل توده آذرین سینومونوزونیتی و توف‌های سبز میزبان تزریق شده است [گزارش زمین‌شناسی معدن مرورید، شرکت مجریان توسعه معادن آسیا، ۱۳۸۵]. شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد بررسی را نشان می‌دهد که از نقشه ۱:۵۰۰ منطقه، برگرفته شده است. در این مقاله پردازش‌های مغناطیسی و برآورد عمق روی بی‌هنجاری‌های ASI، AS2 صورت گرفته است.

## ۳-۲ برآورد عمق داده‌های مغناطیسی کانسار آهن

### علی‌آباد

معدن سنگ آهن مرورید در جنوب‌خاوری زنجان، درکوه‌های طارم قرار دارد. راه دسترسی آن از ۲۳ کیلومتری آزادراه زنجان- قزوین شروع می‌شود و از زیرگذر به طرف شمال، ۸ کیلومتر جاده آسفالت تا روستای مرورید ادامه می‌یابد. این ذخایر از روستای سرخه‌دیزج شروع و تا قسمت باختری روستای مرورید ادامه دارد که ذخایر متعددی از سنگ آهن در آن موجود است. همه ذخایر و رگه‌های این منطقه در امتداد شرق- غرب و با فاصله از یکدیگر دارای رخنمون است. گستره مورد بررسی در پهنه زمین‌شناسی ساختاری البرز و زیرپهنه طارم قرار دارد. این زیرپهنه که پهنای آن تا دره رودخانه قزل‌اوزن ادامه می‌یابد، روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق دارد. گستره مورد بررسی از سنگ آغشته‌های آذرآواری و گدازه‌ای اتوسن تشکیل شده که توده آذرین نفوذی

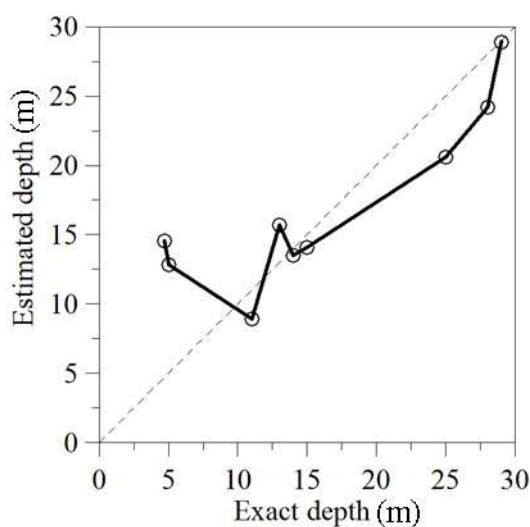
جدول ۲. عمق برآورد شده و خطای مربوط به آن برای مدل مصنوعی.

عمق واقعی	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	100.0	110.0
عمق برآوردی	5.4	11.2	15.9	20.7	31.1	35.2	43.7	52.8	61.9	70.5	80.0	95.5	103.7
درصد خطا	8.7	11.8	6.2	3.5	24.6	17.3	9.3	5.7	3.1	0.7	0.0	-4.5	-5.7

جدول ۳. نتایج برآورد عمق روی نیم‌رخ‌های عمود بر امتداد کانسار آهن علی‌آباد که از محل گمانه‌ها می‌گذرند.

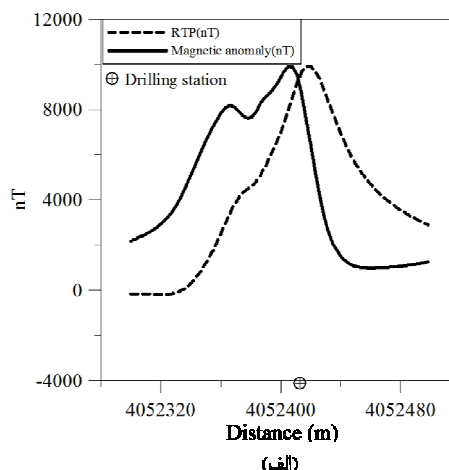
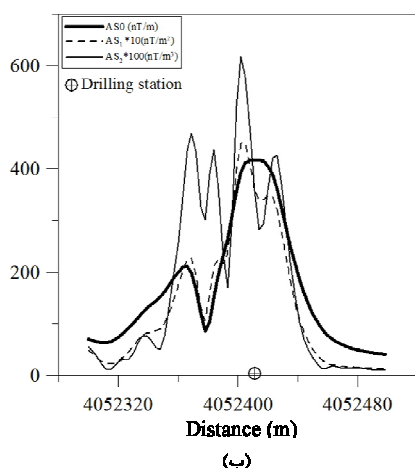
گمانه	x	y	عمق واقعی	Zc	zd	z	n	عمق برآورد شده	درصد خطا
BH-1	305662	4052313	4.7	14.6	25.3	19.5	0.46	14.6	209.6
BH-8	305725	4052358	28	12.6	21.6	26.7	1.56	24.2	-13.6
BH-7	305918	4052409	25	11.7	20.0	23.1	1.37	20.6	-17.6
BH-15	305987	4052425	15	13.2	22.8	20.0	0.71	14.1	-6.1
BH-10	306066	4052414	13	13.1	22.5	23.3	1.08	15.7	20.7
BH-4	306111	4052409	14	13.5	23.4	18.5	0.50	13.5	-3.6
BH-11	306181	4052425	29	15.5	26.6	31.4	1.44	28.9	-0.3
BH-5	306211	4052427	5	11.9	20.5	18.8	0.80	12.8	156.5
BH-14	306446	4052455	11	11.5	20.1	11.3	0.00	8.9	-18.9

شدت میدان مغناطیسی و برگردان به قطب آن (شکل ۵ - الف)، سیگنال تحلیلی ساده، مرتبه اول و مرتبه دوم آن (شکل ۵ - ب) نشان داده شده است. هرچند سیگنال تحلیلی ساده فقط یک مقدار بیشینه روی توده از خود نشان داده است، سیگنال تحلیلی مرتبه دوم دو مقدار بیشینه روی توده نشان می‌دهد و باید از رابطه کنتاکت برای برآورد عمق استفاده کرد.



شکل ۴. نمودار عمق برآورد شده برحسب عمق واقعی توده. خط بریده نمودار ایده‌آل را نشان می‌دهد.

در شکل ۳ نقشه میدان مغناطیسی و برگردان به قطب منطقه مورد بررسی، نقاط برداشت و موقعیت گمانه‌های اکتشافی حفر شده در این منطقه نشان داده شده است. متوسط میدان مغناطیسی در این منطقه ۴۷۴۰۰ نانوتسلا و زاویه میل و انحراف مغناطیسی به ترتیب ۵۴ و ۴/۵ درجه است. برآورد عمق با استفاده از روش مشتقات سیگنال تحلیلی روی نیم‌رخ‌هایی عمود بر امتداد توده که از محل گمانه‌های اکتشافی گذر می‌کنند، صورت گرفته است. با فرضیات بیان شده در قسمت‌های قبل، روی ۹ نیم‌رخ برآورد عمق صورت گرفت که نتایج آن در جدول ۳ و نمودار عمق برآورد شده برحسب مقدار عمق واقعی در شکل ۴ نشان داده شده است. ضریب همبستگی بین عمق برآوردی و عمق واقعی تقریباً برابر با ۸۵ درصد است. روی نیم‌رخ‌هایی که شاخص ساختاری برآوردی کمتر از ۱ بوده، از رابطه برآورد عمق کنتاکت و برای n های بزرگ‌تر از یک از رابطه (۱۲) استفاده شده است. روی نیم‌رخ گمانه BH-10، با وجود آنکه شاخص ساختاری بیشتر از یک است (۱/۰۸)، عمق به دست آمده از رابطه کنتاکت به مقدار واقعی نزدیک‌تر است. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، علاوه بر شاخص ساختاری برای انتخاب روش برآورد، باید به نمودارهای سیگنال تحلیلی مرتبه‌های متفاوت نیز توجه داشت. برای این نیم‌رخ نمودار



شکل ۵. نیم‌رخ شمالی جنوبی و عمود بر امتداد توده در محل گمانه BH-10. (الف) نیم‌رخ میدان مغناطیسی و برگردان به قطب آن. (ب) نیم‌رخ مرتبه‌های متفاوت سیگنال تحلیلی. محل گمانه اکتشافی روی هر دو نمودار نشان داده شده است.

### ۳ نتیجه‌گیری

متفاوت این نسبت، یکسان نیست. به‌ازای شاخص‌های ساختاری کمتر از یک، عمق حاصل از رابطه مربوط به کنتاکت و یا میانگین عمق حاصل از رابطه کنتاکت و رابطه مستقل از مدل توده دقت بیشتری دارد و زمانی که این نسبت ( $z/w$ ) افزایش می‌یابد، شاخص ساختاری بیشتر از یک می‌شود و دقت عمق حاصل از رابطه دایک نازک و یا میانگین عمق حاصل از رابطه دایک نازک و رابطه مستقل از مدل توده، دقت بیشتری دارد. عمق برآورد شده با استفاده از روابط کنتاکت و یا دایک نازک از رابطه مستقل از مدل توده دقیق‌تر است. با توجه به اینکه برای تعیین رابطه برآورد عمق، لازم است از نمودار سیگنال تحلیلی نیز استفاده شود، استفاده از این روش برای داده‌های شبکه‌بندی شده توصیه نمی‌شود، اگرچه می‌توان فقط با استفاده از مقدار  $n$ ، روش برآورد عمق را تعیین کرد ولی در این صورت، دقت برآورد کمتر خواهد شد. این روش روی داده‌های مغناطیسی برداشت شده روی کانسار علی‌آباد واقع در استان زنجان اعمال شد و برای اعتبارسنجی و بررسی دقت نتایج، از اطلاعات حفاری‌های اکتشافی صورت گرفته در منطقه استفاده شد که ضریب همبستگی بین عمق حقیقی و عمق برآوردی با این روش ۸۵ درصد به‌دست آمد.

برآورد عمق توده‌های مغناطیسی، یکی از اهداف پردازش داده‌های مغناطیسی است. امروزه روش‌های متعددی برای برآورد عمق توده‌های مغناطیسی وجود دارد و تلاش اکثر آنها این است که بدون نیاز به دانش قبلی نسبت به وضعیت توده، عمق توده را برآورد کنند. در این مقاله ابتدا رابطه کلی سیگنال تحلیلی برای توده‌های گوناگون تعمیم داده شد و سپس با استفاده از آن یک رابطه کلی و غیر وابسته به مدل توده برای برآورد عمق، و رابطه‌ای نیز برای برآورد شاخص ساختاری آن به‌دست آمد که دقیقاً مشابه با روابط برآورد عمق و شاخص ساختاری در روش تلفیق اویلر و سیگنال تحلیلی (AN-EUL) است. سپس با فرض داشتن دانش قبلی نسبت به مدل توده، روابطی برای برآورد عمق مدل‌های کنتاکت، دایک نازک و استوانه افقی عرضه شد. برای بررسی دقت این روش‌ها از مدل دایکی‌شکلی با ضخامت ثابت و در عمق‌های متفاوت استفاده شد. نتایج این بررسی روشن ساخت که نسبت عرض توده به عمق ( $z/w$ ) عامل بسیار مهمی در برآورد عمق و دقت آن است و رابطه مستقل از مدل توده به این نسبت بستگی دارد و دقت این روش به‌ازای مقادیر

## منابع

- MacLeod, I. N., Jones, K., and Dai, T. F., 1993, 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes: *Exploration Geophysics*, **24**, 679–687.
- Nabighian, M. N., 1972, The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use of 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.
- Roest, W. R., Verhoef, J., and Pilkington, M., 1992, Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal: *Geophysics*, **57**, 116-125.
- Roest, W. R., and Pilkington, M., 1993, Identifying remanent magnetization effects in magnetic data: *Geophysics*, **58**, 653–659.
- 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.
- Smith, R. S., Salem, A., and Lemieux, J., 2005, An enhanced method for source parameter imaging of magnetic data collected for mineral exploration: *Geophysical Prospecting*, **53**, 655–665.
- گزارش زمین شناسی معدن مروارید، شرکت مجریان توسعه معادن آسیا، آبان ۱۳۸۵.
- Atchuta Rao, D., RamBabu, H., and Sanker Narayan, P. Y., 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 dike parameters using the analytical signal technique: *Geophysics*, **66**, 551-561.
- Debeglia, N., and Coppel, I., 1997, Automatic 3-D interpretation of potential field data using analytic signal derivatives: *Geophysics*, **62**, 87-96, 1346.
- Hsu, S. K., Coppens, D., and Shyu, C. T., 1998, 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 geological boundaries from potential - field anomalies: An enhanced analytic signal technique: *Geophysics*, **61**, 373–386.
- Li, X., 2006, Understanding 3D analytic signal amplitude: *Geophysics*, **71**, L13-L16.