

## برآورد عمق، اندیس ساختاری و مکان منبع‌های مغناطیسی با استفاده از روش

## ترکیبی AN-EUL

جمال‌الدین بنی عامریان<sup>۱</sup>، بهروز اسکویی<sup>۲\*</sup> و مهرداد باستانی<sup>۳</sup><sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک- ژئومغناطیس، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران<sup>۲</sup> استادیار، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران<sup>۳</sup> پژوهشگر ژئوفیزیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه ایسلا، سوئد

jamaledin.baniamerian@gmail.com, boskooi@ut.ac.ir, mehrdad.Bastani@geo.uu.se

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۶/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۶/۳۰)

## چکیده

روش AN-EUL روشی خودکار برای برآورد هم‌زمان عمق، مکان و اندیس ساختاری (شکل کلی) منبع‌های مغناطیسی است. این روش ترکیبی از دو روش سیگنال تحلیلی (Analytic Signal) و واهامیخت اوپلر (Euler Deconvolution) است. در این روش از جایگذاری مشتق‌های مناسب معادله اوپلر در معادله سیگنال تحلیلی میدان معادلاتی کلی برای محاسبه عمق و اندیس ساختاری منبع به‌دست می‌آید. مکان منبع (با دقت بسیار خوب برای منبع‌های دوبعدی و با دقت کمتری برای منبع‌های سه‌بعدی) با استفاده از محل مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی برآورد، و روابط محاسبه عمق و اندیس ساختاری در محل منبع محاسبه می‌شود. این روش برای داده‌های نیم‌رخ و شبکه‌ای کاربرد دارد. یکی از ویژگی‌های اساسی سیگنال تحلیلی این است که شکل منحنی دامنه آن و محل مقدار بیشینه دامنه برای منبع‌های دوبعدی مانند دایک و استوانه افقی باگسترش طولی بی‌نهایت مستقل از جهت مغناطیس شوندگی است و مقدار بیشینه دامنه همواره روی منبع قرار می‌گیرد. برای این نوع ساختارها دامنه سیگنال تحلیلی شکلی متقارن دارد. اما برای منبع‌های سه‌بعدی، مانند منبع‌های کروی شکل، به دلیل بستگی شکل منحنی دامنه سیگنال تحلیلی به جهت مغناطیس‌شوندگی، شکل منحنی دامنه سیگنال تحلیلی نامتقارن است، بنابراین مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی دقیقاً روی منبع قرار نمی‌گیرد. از مزیت‌های مهم این روش نسبت به روش واهامیخت اوپلر نبود محدودیت در اعمال انحصاری آن به مدل‌های ایدئال (مدل‌های دارای اندیس ساختاری عدد صحیح) است، یعنی ممکن است برای اندیس ساختاری یک عدد کسری به‌دست آید که توصیف‌کننده اجسام با شکل دلخواه باشد. به دلیل وجود مشتق‌های مرتبه بالای میدان در روابط روش AN-EUL و در نتیجه حساسیت بسیار زیاد آن به بی‌هنجاری‌های سطحی و نوفه‌ها، در این روش برای کاهش اثر بی‌هنجاری‌های سطحی و نوفه‌ها از ادامه فراسوی داده‌ها استفاده می‌شود. ادامه فراسوی داده‌ها دامنه بی‌هنجاری‌های سطحی و نوفه‌ها را تضعیف می‌کند و اثر تقویتی فرایند مشتق‌گیری را کاهش می‌دهد. در این مقاله برای ارزیابی میزان دقت و کارایی روش AN-EUL، این روش روی داده‌های مصنوعی ناشی از مدل‌های مصنوعی گوناگون اعمال و جواب‌های به‌دست آمده با مقادیر واقعی آنها (پارامترهای مدل‌ها) مقایسه می‌شود. به این منظور ابتدا با استفاده از مدل‌سازی به روش پیشرو، برای مدل‌های مغناطیسی ساده از قبیل دایک نازک، کره مغناطیسی (دوقطبی مغناطیسی) و یک منبع سه‌بعدی، داده‌های مصنوعی تولید می‌شود. در مرحله بعد برای برآورد واقعی‌تر داده‌های واقعی، به داده‌های مصنوعی تولید شده نوفه اضافه می‌شود. پس از به‌کارگیری روش AN-EUL برای داده‌های مصنوعی، نتایج به‌دست آمده برای همه مدل‌ها با توجه به پارامترهای مدل، از دقت خوبی برخوردار است. در نهایت این روش برای تفسیر داده‌های مغناطیسی هوابردی برداشت شده در منطقه‌ای واقع در کشور سوئد مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به تحقیقات زمین‌شناسی صورت‌گرفته، در این منطقه، یک توده گرانیتی با چند شکستگی وجود دارد، که در داخل این شکستگی‌ها رگه‌هایی از دیاباز نفوذ کرده است. نتایج به‌دست آمده از روش AN-EUL وجود این بی‌هنجاری‌ها را به خوبی نشان می‌دهد و عمق و اندیس ساختاری این بی‌هنجاری‌ها با

دقت قابل ملاحظه برآورد شده است که با اطلاعات زمین شناسی به دست آمده از سایر روش‌ها (زمین مغناطیسی (مگنتوتلوریک)، گرانی‌سنجی، اندازه‌گیری صحرایی) سازگاری دارد. همه مراحل محاسباتی با استفاده از برنامه‌های رایانه‌ای که نگارندگان با استفاده از نرم‌افزار مطلب نوشته‌اند صورت می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: سیگنال تحلیلی، واهمامیخت اوپلر، اندیس ساختاری، عمق منبع، مشتق‌های افقی و قائم، منبع‌های مغناطیسی

## Estimation of depth, structural index and location of the magnetic sources by using combined method of AN-EUL

Jamaleddin Baniamerian<sup>1</sup>, Behrooz Oskooi<sup>1\*</sup>, and Mehrdad Bastani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran*

<sup>2</sup>*Department of Earth Sciences, Uppsala University, Sweden*

(Received: 06 September 2009, accepted: 21 September 2010)

### Summary

AN-EUL is a new automatic method for simultaneous estimation of depth, location and geometry of magnetic and gravity sources. The principle of this method is a combination of both the analytic signal and Euler Deconvolution methods. The derivation of the main equations of this method is based on the substitution of the appropriate derivatives of the Euler homogeneous equation into the expression of the analytic signal of the potential field. Location of source (Epi-centre) can be approximately estimated based on the position of the maximum value of the amplitude of the analytic signal, and the formulas of depth and structural index (SI) estimation is calculated at this point. This new method is applicable on data along profiles and/or grids. It is one of the basic characteristics of the analytic signal applied on the responses of the two dimensional magnetic sources, such as dike and infinitely long horizontal cylinders, that the shape of the signal amplitude and its location are independent of the magnetization direction. For these types of sources, the shape of the amplitude of the analytic signal is symmetrical, whereas for 3-dimensional sources, like spherical sources, the maximum value of the amplitude of the analytic signal is not always located directly over the body, and, for these sources, the shape of the amplitude of the analytic signal depends on the direction of magnetization and is asymmetric. Therefore, there will be some errors in determining the location of the magnetic source based upon the location of the maximum value of the amplitude of the analytic signal for these types of sources. An important advantage of the AN-EUL method is that it is not restricted only to idealized sources (i.e. having integer structural index). This wider applicability means that SI can be a fractional number that describes sources with arbitrary shapes. Because of the existence of high order derivatives in the AN-EUL method formula, this method is very sensitivity relative to noises and shallow sources; thus, the effects of noises and shallow sources can be reduced by applying an upward continuation filter.

To study the resolution of the AN-EUL, the method has been applied on synthetic data generated from various magnetic models, including a thin dike, a magnetic sphere and a drum shape source. In the next stage, the simulation of real cases, the data were contaminated by random noise. For all of these models, with regard to the models parameters, the results have good accuracy. Finally, the method was applied to an aeromagnetic data set acquired over an area in Sweden to estimate the depth, location,

and shape (structural index) of some of the anomalies. According to the geological studies in this region, there exists a granite intrusive body with certain fractures in which Diabase veins have penetrated. Results of this study show the nature of anomalies very well and give good estimations of the depth and shape of the magnetic sources causing these anomalies. The results agree well with the geological information found by other methods (e.g. MT, Gravity, field observations). All of the processing steps in this paper were performed by using codes wrote in Matlab.

**Key words:** Analytic signal, Euler deconvolution, structural index, horizontal and vertical derivatives, magnetic sources

## ۱ مقدمه

تاکنون برای برآورد پارامترهای منبع‌های مغناطیسی (عمق، مکان، رمز منبع و شکل) براساس استفاده از مشتق‌های میدان روش‌های گوناگونی ابداع شده است. یکی از این روش‌ها روش سیگنال تحلیلی است که نخستین بار نیقیان (۱۹۷۲) برای برآورد عمق سطح تماس (Contact) به کار برد. آتچپوتا و همکاران (۱۹۸۱) با استفاده از مجموعه نقاط مشخصی روی منحنی دامنه سیگنال تحلیلی، روابطی را برای محاسبه عمق تا سطح دایک‌های ضخیم و نازک به دست آوردند. هسیو و همکاران (۲۰۰۷ و ۱۹۹۶) از مفهوم سیگنال تحلیلی ارتقا یافته (Enhanced Analytic Signal) برای تعیین عمق ساختارهای زمین‌شناسی مثل دایک و گسل استفاده کردند. بر همین اساس باستانی و پدرسن (۲۰۰۱) از سیگنال تحلیلی برای محاسبه پارامترهای دایک (عمق، پهنا، مغناطیس‌شوندگی (Magnetization)، زاویه شیب (Dip angle)، امتداد (Strike) استفاده کردند. یکی از دلایل به کارگیری سیگنال تحلیلی در تفسیر داده‌های مغناطیسی، وابسته نبودن آن به کمیت‌های جهت‌ی و امکان تعیین موقعیت منبع با استفاده از بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی است.

روش واهمامیخت اوپلر نیز یکی از روش‌های خودکار برای تفسیر داده‌های مغناطیسی است که اساس آن به کارگیری مشتق‌های میدان در معادله همگن اوپلر است. تامپسون (۱۹۸۲) از این روش برای برآورد عمق و اندیس ساختاری ساختارهای دوبعدی استفاده کرد. رید و

همکاران (۱۹۹۰)، راوات (۱۹۹۶)، هسیو (۲۰۰۲)، کی‌تینگ و پیلکینگتون (۲۰۰۴)، بین دوو و همکاران (۲۰۰۷) و کوپر (۲۰۰۸) این روش را تعمیم دادند و به شیوه‌های گوناگون از آن استفاده کردند.

سالم و راوات (۲۰۰۳) با ترکیب این دو روش، روش خودکار جدیدی تحت عنوان AN-EUL ابداع کردند. این روش برخی از محدودیت‌های روش‌های پیشین را ندارد و با استفاده از معادلات آن می‌توان عمق، مکان و اندیس ساختاری منبع‌های مغناطیسی را به‌طور هم‌زمان تعیین کرد. این روش را می‌توان روی داده‌های دوبعدی و سه‌بعدی اعمال کرد. سالم (۲۰۰۵) از معادلات روش AN-EUL بهره برد و مجموعه معادلات جدیدی برای محاسبه مکان، عمق و اندیس ساختاری منبع به دست آورد. در این مقاله از روش AN-EUL برای تفسیر داده‌های مغناطیسی استفاده شده است. به این منظور ابتدا کارایی روش با مدل‌های مصنوعی گوناگونی ارزیابی می‌شود، سپس در مرحله بعد، از این روش برای تفسیر داده‌های واقعی مغناطیسی منطقه‌ای واقع در کشور سوئد استفاده شده است.

## ۲ نظریه روش AN-EUL

همان‌طور که قبلاً ذکر شد اساس روش AN-EUL جای‌گذاری مشتق‌های معادله اوپلر در معادله سیگنال تحلیلی است، بنابراین نظریه هر کدام از این روش‌ها به‌طور مختصر توضیح داده می‌شوند.

## ۱-۲ روش سیگنال تحلیلی

سیگنال تحلیلی یک تابع موهومی است که قسمت موهومی آن تبدیل هیلبرت قسمت حقیقی آن است. مشتق قائم میدان مغناطیسی برابر است با تبدیل هیلبرت مشتق افقی آن. بنابراین سیگنال تحلیلی و دامنه سیگنال تحلیلی میدان اندازه‌گیری شده در حالت دوبعدی به ترتیب با روابط زیر تعریف می‌شوند (نیفیان، ۱۹۷۲):

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

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

که  $\frac{\partial T}{\partial x}$  مشتق افقی و  $\frac{\partial T}{\partial z}$  مشتق قائم میدان است. سیگنال تحلیلی میدان و دامنه آن برای حالت سه‌بعدی با روابط زیر تعریف می‌شود:

$$AAS(x, y) = \frac{\partial T}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \hat{j} + i \frac{\partial T}{\partial z} \hat{k}, \quad (3)$$

$$|AAS(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2}, \quad (4)$$

که  $\frac{\partial T}{\partial y}$  مشتق افقی میدان در جهت  $y$  و  $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$  بردارهای یکه در جهت محورهای مختصات است.

سیگنال تحلیلی در تعیین محل و عمق منبع‌های مغناطیسی کاربرد دارد. دامنه سیگنال تحلیلی بسته به شکل منبع، روی منبع یا روی مرزهای آن به مقدار بیشینه خود می‌رسد. برای منبع‌های دوبعدی (دایک، استوانه افقی، سطح تماس) شکل منحنی دامنه سیگنال تحلیلی کاملاً مستقل از کمیت‌های جهتی مانند جهت مغناطیس شوندگی، زاویه شیب، زاویه میل (Inclination) و زاویه انحراف (Declination) میدان و امتداد بوده و همواره یک تابع زوج و متقارن است، بنابراین مغناطیس باقی‌مانده عامل مزاحمی نخواهد بود و نیازی به دانستن آن نیست. این کمیت‌ها فقط روی اندازه دامنه سیگنال تحلیلی تاثیر

دارند. تاثیر نداشتن کمیت‌های جهتی بر شکل منحنی دامنه، یک ویژگی مهم سیگنال تحلیلی در حالت دوبعدی است. این اثر، به‌خصوص در مناطقی که مقدار و جهت مغناطیس باقی‌مانده معلوم نیست، قابل توجه است (نیفیان، ۱۹۷۲؛ آتچیتا و همکاران، ۱۹۸۱؛ روئست و همکاران، ۱۹۹۲؛ هسیو و همکاران، ۱۹۹۸).

در مورد منبع‌های کروی (سه‌بعدی) شکل دامنه سیگنال تحلیلی به جهت مغناطیس شونده‌گی بستگی دارد و مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی دقیقاً روی منبع قرار نمی‌گیرد. اما با این حال، در بسیاری از موارد خطای تعیین موقعیت افقی منبع با استفاده از مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی زیاد نیست و درصد خطا قابل قبول است (سالم و همکاران، ۲۰۰۲). سیگنال تحلیلی ارتقا یافته مرتبه  $n$  عبارت است از سیگنال تحلیلی مشتق قائم مرتبه  $n$  (هسیو و همکاران، ۱۹۹۶):

$$AAS_n(x, y) = \frac{\partial T_n^z}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial T_n^z}{\partial y} \hat{j} + i \frac{\partial T_n^z}{\partial z} \hat{k}, \quad (5)$$

$$|AAS_n(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial T_n^z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_n^z}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_n^z}{\partial z}\right)^2}, \quad (6)$$

که  $T_n^z = \frac{\partial^n T}{\partial z^n}$ ، مشتق قائم مرتبه  $n$  میدان است.

## ۲-۲ نظریه روش واهمامیخت اوپلر

روش واهمامیخت اوپلر روشی نیمه‌خودکار برای برآورد عمق، شکل و مکان منبع‌های مغناطیسی است. در این روش از معادله دیفرانسیل همگن اوپلر استفاده می‌شود. تابع  $f(x, y, z)$  در صورتی که رابطه زیر برای هر ضریب حقیقی دلخواه  $t$  برقرار باشد همگن از مرتبه  $n$  خواهد بود (بلیکلی، ۱۹۹۵):

$$f(tx, ty, tz) = t^n f(x, y, z), \quad (7)$$

در این صورت تابع  $f$  در معادله دیفرانسیل زیر صدق می‌کند:

$$x_0 \frac{\partial T}{\partial x} + y_0 \frac{\partial T}{\partial y} + z_0 \frac{\partial T}{\partial z} + nB \quad (13)$$

$$= x \frac{\partial T}{\partial x} + y \frac{\partial T}{\partial y} + z \frac{\partial T}{\partial z} + nT,$$

این معادله باید برای همه نقاط شبکه یا نیم‌رخ حل شود. پارامترهای  $n, B, z_0, y_0, x_0$  مجهولات این معادلات هستند. چون تعداد معادلات از تعداد مجهولات بیشتر است، از روش کمترین مربعات برای حل معادلات استفاده می‌شود.

### ۳-۲ معادلات روش AN-EUL

روش AN-EUL یک روش خودکار برای تفسیر داده‌های مغناطیسی است. با استفاده از این روش می‌توان عمق، اندیس ساختاری (شکل منبع) و مکان را به‌طور هم‌زمان به‌دست آورد. یکی از ویژگی‌های مهم این روش محدود نبودن آن به مدل‌های ایدئال (مدل‌های دارای اندیس ساختاری عدد صحیح) است و اندیس ساختاری می‌تواند یک عدد کسری باشد که توصیف‌کننده اجسام با شکل دلخواه است. برای به‌دست آوردن معادلات روش AN-EUL مشتق‌های معادله (۱۳) در جهت‌های متفاوت  $z, y, x$  در نقطه  $(x_0, y_0)$  واقع روی صفحه  $z = 0$  یعنی در نقطه  $(x_0, y_0, 0)$  که دقیقاً در بالای جسم قرار دارد (مکان افقی منبع (Epi-center)) محاسبه می‌شود. در نهایت با استفاده از تعریف دامنه سیگنال تحلیلی و دامنه سیگنال تحلیلی ارتقا یافته روابط کلی زیر برای محاسبه اندیس ساختاری و عمق منبع به‌دست می‌آید (سالم و راوات، ۲۰۰۳):

$$n = \left( \frac{2|AAS_1|^2 - |AAS_2||AAS_0|}{|AAS_2||AAS_0| - |AAS_1|^2} \right)_{x=x_0, y=y_0}, \quad (14)$$

$$z_0 = \left( \frac{|AAS_1||AAS_0|}{|AAS_2||AAS_0| - |AAS_1|^2} \right)_{x=x_0, y=y_0}. \quad (15)$$

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} = n f(x, y, z) \quad (8)$$

معادله دیفرانسیل ۸ معادله دیفرانسیل همگن اولر نامیده می‌شود. بی‌هنجاری میدان مغناطیسی ناشی از بسیاری از منبع‌های ساده مغناطیسی به شکل رابطه زیر است:

$$\Delta T(x, y, z) = \frac{a}{r^n} \quad (9)$$

که  $a$  یک مقدار ثابت و  $r$  فاصله منبع تا نقطه اندازه‌گیری است:

$$r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} \quad (10)$$

باتوجه به روابط (۷) و (۹)،  $\Delta T$  یک تابع همگن از مرتبه  $-n$  است و در معادله اولر صدق می‌کند:

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = -n \Delta T \quad (11)$$

که  $z_0, y_0, x_0$  مختصات محل منبع و  $z, y, x$  مختصات نقاط اندازه‌گیری و تابع همگن  $\Delta T$ ، بی‌هنجاری میدان است. ضریب  $n$  اندیس ساختاری نامیده می‌شود که نشان‌دهنده نرخ تغییرات میدان با فاصله از منبع است. با معلوم بودن  $n$  می‌توان شکل کلی منبع را برآورد کرد. جدول ۱ اندیس ساختاری را برای برخی مدل‌های ساده مغناطیسی نشان می‌دهد.

در حالت کلی میدان اندازه‌گیری شده کل در هر نقطه  $(x, y, z)$  را می‌توان مجموع میدان ناشی از منبع،  $\Delta T$ ، و میدان زمینه  $B$  دانست که  $B$  مقدار ثابتی دارد:

$$\vec{T} = \Delta \vec{T} + \vec{B}, \quad (12)$$

با جای‌گذاری رابطه (۱۲) در معادله (۱۱) فرمول زیر به‌دست می‌آید:

جدول ۱. رابطه بین اندیس ساختاری، نوع مدل و موقعیت عمق محاسبه شده (هسیو، ۲۰۰۲).

اندیس ساختاری $n$	نوع ساختار مغناطیسی	نقطه‌ای که عمق آن تعیین می‌شود
۰	گسل و سطح تماسی که نسبت عمق به ضخامت آن کوچک است	عمق تا سطح، برای لبه
۱	دایک نازک و سطح تماسی که نسبت عمق به ضخامت آن بزرگ است	عمق تا سطح، عمق تا مرکز
۲	استوانه افقی، استوانه عمودی	عمق تا مرکز
۳	کره مغناطیسی یا دو قطبی مغناطیسی	عمق تا مرکز

است که این روش روی داده‌های مصنوعی اعمال شود. با استفاده از مدل‌سازی به روش پیشرو، داده‌های مصنوعی برای مدل‌های مصنوعی دایک نازک، کره مغناطیسی و یک منبع سه بعدی دلخواه تولید می‌شود. سپس روش AN-EUL روی این داده‌ها اعمال و جواب‌های به دست آمده با مقادیر واقعی آنها مقایسه می‌شود.

#### ۴-۱ مدل مصنوعی دایک نازک

یک دایک نازک با مشخصات ذکر شده در جدول ۲ در نظر گرفته می‌شود. راستای دایک عمود بر نیم‌رخ است. برای برآورد بهتر داده‌های واقعی، به بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از این مدل نوفه‌ای برابر با ۵٪ مقدار دامنه بی‌هنجاری همراه با نوفه تصادفی اضافه شده است. پس از اعمال روش AN-EUL روی داده‌های مغناطیسی ناشی از این دایک، جواب‌های مورد نظر مطابق جدول ۳ به دست می‌آید. شکل ۱ بی‌هنجاری مغناطیسی و دامنه سیگنال‌های تحلیلی مراتب متفاوت را برای این دایک نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده و شکل ۱-ج مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی دقیقاً روی دایک قرار دارد و به این ترتیب محل دایک تعیین و معادلات AN-EUL در این نقطه محاسبه می‌شود. برای کاهش اثر نوفه‌ها، از فیلتر ادامه فراسو استفاده شده است.

که  $AAS1$  و  $AAS2$  دامنه‌های سیگنال تحلیلی مرتبه اول و دوم هستند و  $AAS0$  دامنه سیگنال تحلیلی میدان است. کلیه مشتق‌های میدان را می‌توان به آسانی در حوزه فوریه محاسبه کرد. هیچ کدام از معادلات بالا وابستگی صریح به مغناطیس‌شوندگی ندارند، لذا نیازی به تعیین مغناطیس باقی مانده نخواهد بود. در مورد ساختارهای خطی (دو بعدی) مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی دقیقاً روی منبع قرار می‌گیرد، بنابراین با استفاده از این ویژگی می‌توان محل منبع یعنی نقطه  $x_0$  را تعیین و سپس با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۵) اندیس ساختاری و عمق را محاسبه کرد. همانند سایر روش‌هایی که از مشتق‌های میدان استفاده می‌کنند، دقت این روش تا حد بسیار زیادی به کیفیت داده‌های اندازه‌گیری شده و نوفه‌ها بستگی دارد. برای کاهش اثر نوفه‌ها و بی‌هنجاری‌های سطحی می‌توان از فیلتر پایین‌گذر (Low pass filter) ادامه فراسو (Upward continuation) استفاده کرد. با استفاده از فیلتر ادامه فراسو، داده‌ها به یک سطح بالاتر منتقل می‌شوند و اثر نوفه‌ها و بی‌هنجاری‌های سطحی (عدد موج بالا) تضعیف می‌شود (سالم و راوات، ۲۰۰۳).

#### ۴ اعمال روش روی داده‌های تولید شده با مدل‌های مصنوعی

برای ارزیابی میزان دقت و کارآیی روش AN-EUL لازم

برای داده‌های مصنوعی بدون نوفه، خطای ناشی از محاسبات عددی مشتق‌های میدان به ایجاد ناهنجاری نامطلوب نوفه‌مانند منجر می‌شود. بنابراین برای حذف اثر این ناهنجاری‌ها و به‌دست آوردن جواب‌هایی با دقت زیاد، لازم است که از فیلتر ادامه فراسوی استفاده شود. دامنه بی‌هنجاری پس از استفاده از ادامه فراسودر شکل ۲-۲ ب در مقایسه با دامنه بی‌هنجاری اولیه در شکل ۲-الف به وضوح تضعیف شده است، که این از ویژگی‌های فیلتر ادامه فراسواست (بنی عامریان، ۱۳۸۸).

جدول ۲. مشخصات مدل دایک مورد استفاده برای تولید داده مصنوعی آلوده به نوفه.

مقادیر پارامترها	پارامترهای مدل
۸	عمق (کیلومتر)، $Z_0$
۱۰۰	موقعیت افقی نسبت به مبدا (کیلومتر)، $X_0$
القایی، ۱۰	مغناطیس‌شوندگی (آمپر بر متر)
۴۵	زاویه میل میدان زمین
۰	زاویه انحراف میدان زمین
۴۵	زاویه میل مغناطیس‌شوندگی کل
۰	زاویه انحراف مغناطیس‌شوندگی کل
۹۰	زاویه شیب
۱	فاصله بین نقاط اندازه‌گیری (کیلومتر)
۲۰۰	تعداد نقاط اندازه‌گیری
$Z = 0$	سطح اندازه‌گیری، $Z$
۲	ضخامت (کیلومتر)
۵٪ همراه با نوفه تصادفی	نوفه اضافه شده

با توجه به شکل ۱-ب تضعیف دامنه بی‌هنجاری و نوفه‌ها به خوبی آشکار است. در صورت استفاده نکردن از فیلتر ادامه فراسو، محاسبه دامنه سیگنال‌های تحلیلی منجر به تقویت بسیار شدید نوفه‌ها می‌شود و نتایج به‌دست آمده اعتباری نخواهند داشت. سطح مطلوب برای ادامه فراسوی داده‌ها، اولین ارتفاعی است که بعد از آن میزان تغییرات عمق و اندیس ساختاری جزئی است (سالم و راوات، ۲۰۰۳). ارتفاع ادامه فراسو برای این داده‌ها ۴ متر انتخاب شده است. با توجه به نتایج جدول ۳ برای عمق مقدار  $8/32$  کیلومتر به‌دست آمده که در مقایسه با مقدار واقعی آن (۸ کیلومتر) و خطای تعیین عمق (۲/۶ درصد) دقت محاسباتی خوب است. لازم به ذکر است که این عمق پس از کم کردن ارتفاع ادامه فراسو به‌دست آمده است. اندیس ساختاری برای یک دایک نازک مغناطیسی برابر ۱ است، بنابراین با توجه به مقدار محاسبه شده از روش AN-EUL برای اندیس ساختاری می‌توان گفت که این روش در محاسبه اندیس ساختاری نیز از دقت خوبی برخوردار است (بنی عامریان، ۱۳۸۸).

#### ۴-۲ مدل مصنوعی کره مغناطیسی

یک کره مغناطیسی با مشخصات ذکر شده در جدول ۴ در حکم مدل مصنوعی در نظر گرفته می‌شود و روش AN-EUL روی داده‌های به‌دست آمده از این مدل اعمال می‌شود. پس از اعمال روش AN-EUL روی داده‌های مغناطیسی ناشی از این کره مغناطیسی، جواب‌های مورد نظر مطابق جدول ۵ به‌دست می‌آید. شکل ۲ بی‌هنجاری مغناطیسی و دامنه سیگنال تحلیلی را برای این کره نشان می‌دهد. از آنجاکه در روش AN-EUL از مشتق‌های مرتبه بالای میدان استفاده می‌شود این روش حساسیت بسیار زیادی نسبت به نوفه‌ها و بی‌هنجاری‌های سطحی خواهد داشت و موجب تقویت شدید دامنه آنها می‌شود. حتی

مغناطیسی ۵۴۰۰۰ نانوتسلا، با زاویه میل ۶۸ و زاویه انحراف صفر درجه قرار گرفته و دارای مغناطیس باقی مانده ۹۱۳ آمپر بر متر با زاویه میل ۶۱ و زاویه انحراف ۱۰ درجه است. عمق تا نقطه بالای منبع ۵ متر، عمق تا مرکز منبع ۶/۵۸ متر و فاصله نقاط اندازه گیری در جهت  $x$ ،  $y$  برابر یک متر است. منبع در موقعیت افقی (۲۵ و ۲۵) نسبت به مبدا اندازه گیری قرار گرفته است. بی هنجاری مغناطیسی ناشی از این مدل با استفاده از برنامه تالوانی (۱۹۶۵)، محاسبه و سپس نوفه تصادفی به آن اضافه شده است. به منظور کاهش اثر نوفه های اضافه شده، از فیلتر ادامه فراسو استفاده می شود. ارتفاع سطح ادامه فراسو برای این داده ها ۵ متر در نظر گرفته می شود. پس از اعمال روش AN-EUL این شرایط روی داده های مصنوعی منتقل شده به سطح بالاتر، جواب ها مطابق جدول ۶ به دست می آیند. شکل ۳ بی هنجاری مغناطیسی و دامنه سیگنال های تحلیلی را نشان می دهد. نتایج به دست آمده برای عمق، اندیس ساختاری و درصد خطای عمق نشان می دهد که این روش برای داده های آلوده به نوفه نیز دارای دقت قابل قبولی است (بنی عامریان، ۱۳۸۸).

#### ۵ اعمال روش AN-EUL روی داده های واقعی

پس از اعمال روش AN-EUL روی داده های مصنوعی ناشی از مدل های مغناطیسی متفاوت، ملاحظه شد که نتایج به دست آمده برای این مدل ها از دقت خوبی برخوردار است. بنابراین می توان از روش فوق برای تفسیر داده های واقعی استفاده کرد. در اینجا از روش AN-EUL برای تفسیر داده های مغناطیسی هواپردی برداشت شده در منطقه ای واقع در کشور سوئد استفاده شده است.

این عملیات مغناطیسی در منطقه ای با ابعاد ۵۰ کیلومتر، به صورت هواپردی، از سوی سازمان زمین شناسی سوئد (SGU) در سال ۲۰۰۵ صورت گرفته است. جهت خطوط پرواز شرقی- غربی و فاصله بین خطوط حدود

جدول ۳. نتایج به دست آمده برای داده های مصنوعی آلوده به نوفه مربوط به مدل دایک نازک.

مقادیر به دست آمده برای دایک نازک	کمیت های محاسبه شده
۱۰۰	مکان مقدار بیشینه $ AAS_0 $ (نقطه $x_0$ )
۲۹/۱۵	مقدار $ AAS_0 _{x_0}$
۴/۸۵	مقدار $ AAS_1 _{x_0}$
۱/۲	مقدار $ AAS_2 _{x_0}$
۴	سطح ادامه فراسو (کیلومتر)
۸/۳۲	عمق ( $Z_0$ ) (کیلومتر)
۱/۰۵	اندیس ساختاری ( $n$ )
۲/۶	درصد خطای برآورد عمق

از مقایسه مقادیر به دست آمده عمق و اندیس ساختاری برای این مدل (به ترتیب ۷/۱ متر و ۳/۰۹) با مقادیر واقعی آنها، که در جدول ۴ و ۱ ذکر شده است، همچنین با توجه به درصد خطای برآورد عمق (۱/۲ درصد) می توان گفت که روش AN-EUL از دقت نسبتاً زیادی برخوردار است.

#### ۳-۴ مدل منبع سه بعدی با شکل دلخواه

یک مدل بشکه ای شکل عمودی با ارتفاع ۳/۱۶ متر، شعاع خارجی ۰/۹۵ متر و ضخامت ۰/۰۳ متر با ضریب مغناطیس پذیری (SI) ۱۰۷ در نظر گرفته می شود. این مدل یک منبع تقریباً کروی است. این بشکه در میدان



جدول ۵. نتایج به دست آمده برای داده‌های مصنوعی مدل کره.

مقادیر به دست آمده برای کره	کمیت‌های محاسبه شده
(۱۰,۱۶)	موقعیت افقی مقدار بیشینه $ AAS_0 $ (نقطه $(x_0, y_0)$ )
۰/۶۲۷	مقدار $ AAS_0 _{(x_0, y_0)}$
۰/۳۱۴	مقدار $ AAS_1 _{(x_0, y_0)}$
۰/۱۹۶	مقدار $ AAS_2 _{(x_0, y_0)}$
۱	سطح ادامه فراسو
۷/۱	عمق $(z_0)$
۳/۰۹	اندیس ساختاری $(n)$
(۱۰/۱۸, ۱۴/۶۹)	مکان به دست آمده از روش اویلر
۱/۲	درصد خطای برآورد عمق

جدول ۶. نتایج به دست آمده برای مدل منبع سه بعدی.

مقدار پارامترها	پارامترهای کره
۷	عمق تا مرکز کره (متر)، $z_0$
(۱۰,۱۵)	موقعیت افقی کره، $(x_0, y_0)$
القایی و باقی مانده	نوع مغناطیس شونددگی
۱۰	گشتاور دو قطبی مغناطیسی (آمپر در متر مربع)
۱۰	زاویه میل میدان زمین
۵۰	زاویه انحراف میدان زمین
۳۰	زاویه میل مغناطیس شونددگی کل
۲۰	زاویه انحراف مغناطیس شونددگی کل
(۱,۱)	فاصله بین نقاط اندازه گیری (متر) $(\Delta x, \Delta y)$
(۲۰,۲۵)	تعداد نقاط اندازه گیری در هر راستا

۷۵۰ متر، میانگین ارتفاع پرواز ۶۰ متر و فاصله بین نقاط اندازه گیری در امتداد هر خط پرواز ۱۸ متر است. زوایای میل و انحراف در این منطقه به ترتیب ۷۵ و ۴ درجه است. اثر تغییرات روزانه میدان مغناطیسی با استفاده از یک مغناطیس سنج پروتون ثابت تصحیح شده است. به منظور حذف اثر میدان‌های منطقه‌ای (Regional field) و میدان IGRF، یک ترند خطی (Linear trend) از روی داده‌های میدان کل برداشت شده است.

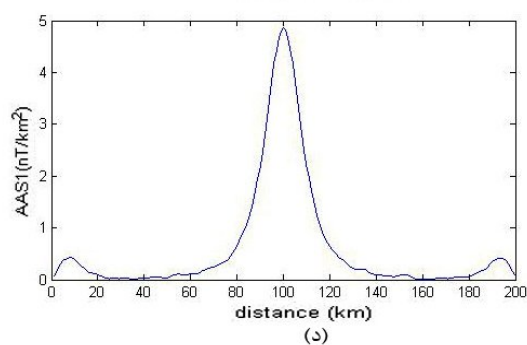
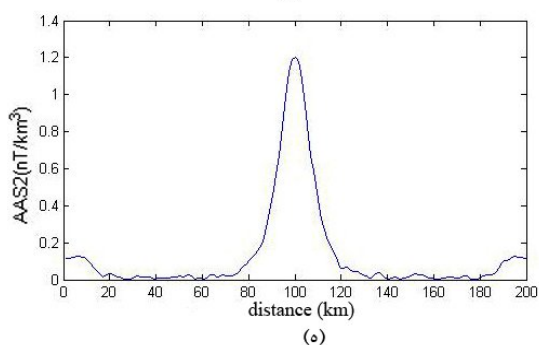
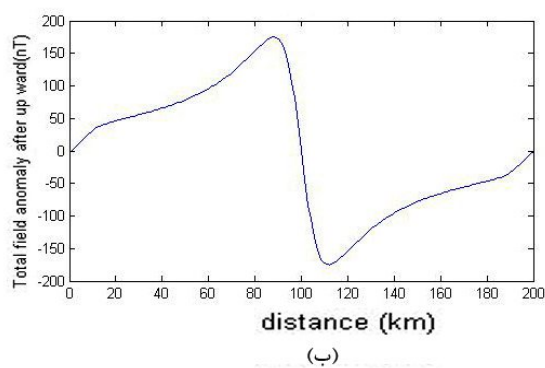
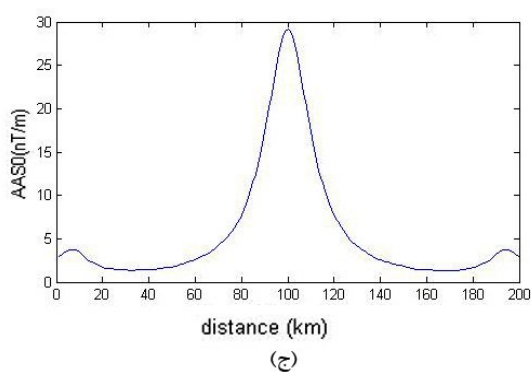
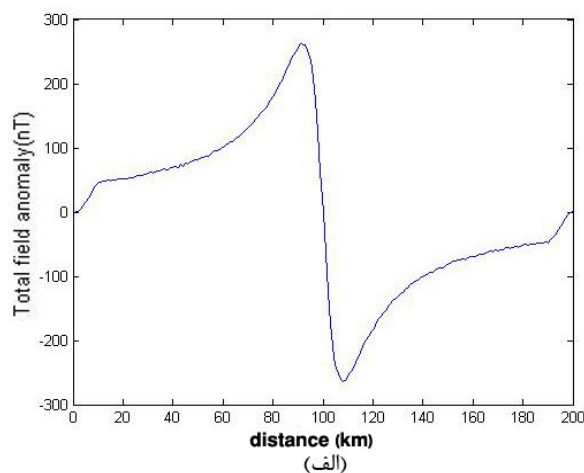
### ۱-۵ زمین‌شناسی منطقه

شکل ۴ نقشه زمین‌شناسی کل منطقه را نشان می‌دهد. محدوده مشخص شده با مستطیل، منطقه بررسی شده را مشخص می‌سازد.

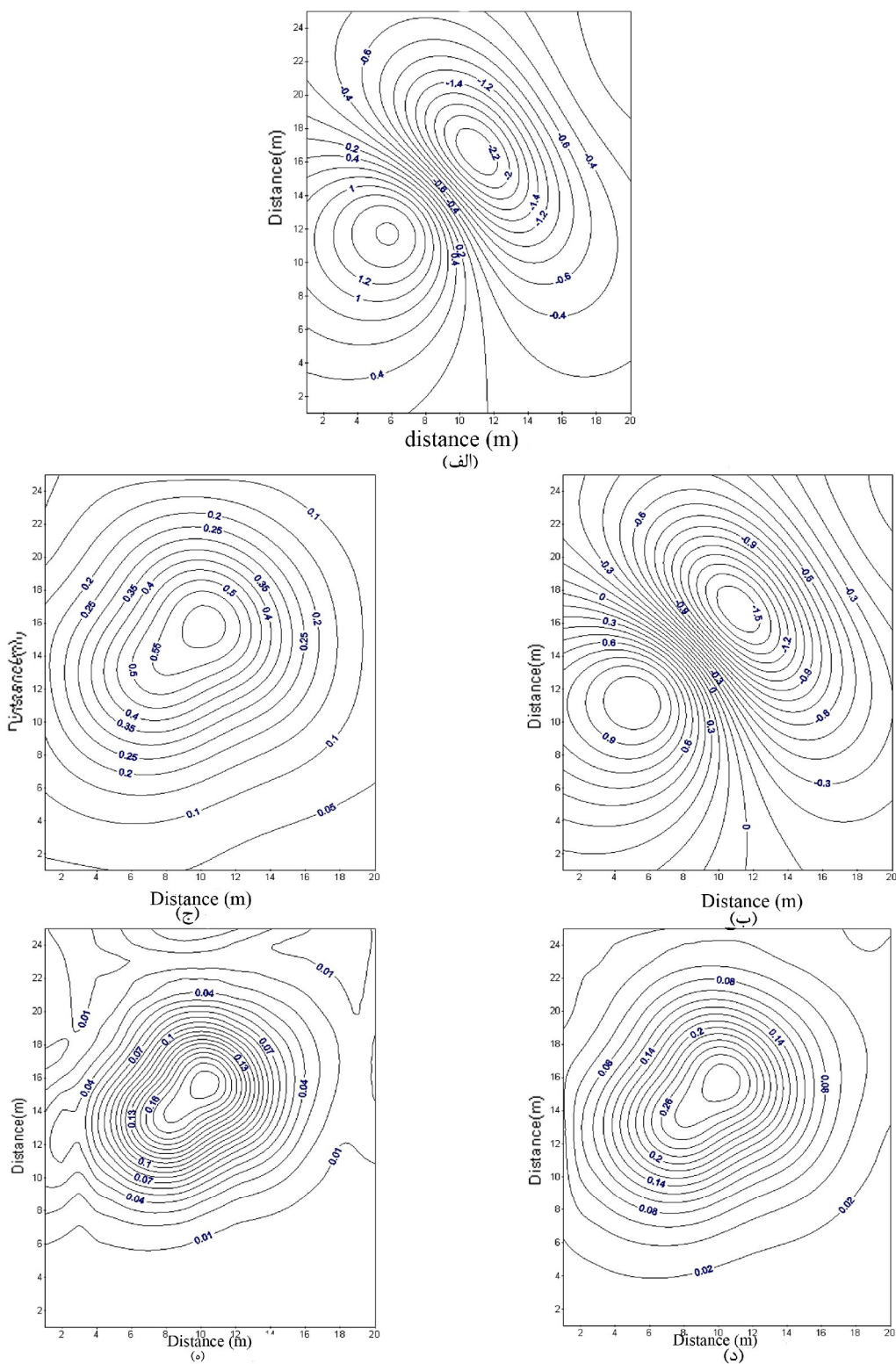
جدول ۴. مشخصات مدل کره مورد استفاده برای تولید داده مصنوعی.

نسبت به توده ریولیتی و رگه‌های دیاباز قدیمی‌تر است. گرانیت و ریولیت دارای ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی یکسانی هستند، با این تفاوت که گرانیت سنگ آذرین درونی و ریولیت سنگ آذرین بیرونی است.

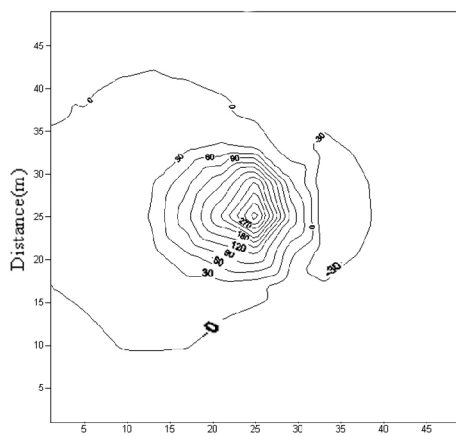
در منطقه مورد بررسی یک توده گرانیتی با چند شکستگی وجود دارد که در داخل این شکستگی‌ها رگه‌هایی از دیاباز (Diabase) نفوذ کرده است. این توده گرانیتی در مجاورت یک توده ریولیتی قرار دارد و در کناره این توده ریولیتی یک توده سینی‌تی وجود دارد. توده گرانیتی



شکل ۱. (الف) بی‌هنجاری مغناطیسی کل ناشی از داده‌های مصنوعی آلوده به نوفه دایک نازک، (ب) بی‌هنجاری مغناطیسی کل پس از ادامه فراسو، (ج) دامنه سیگنال تحلیلی، (د) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه اول، (ه) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه دوم.

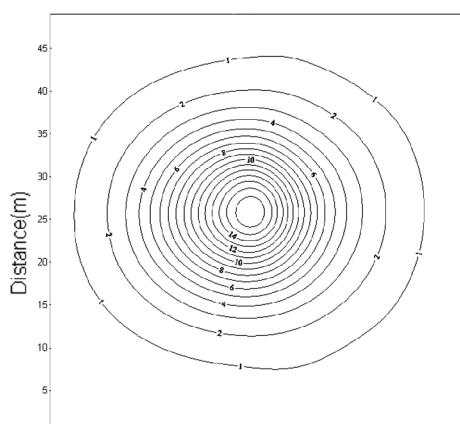


**شکل ۲.** (الف) بی‌هنجاری مغناطیسی کل ناشی از مدل مصنوعی کره. فاصله بین پریندها (۰/۲) نانوتسلا، (ب) بی‌هنجاری مغناطیسی پس از ادامه فراسو. فاصله بین پریندها (۰/۱) نانوتسلا، (ج) دامنه سیگنال تحلیلی (AAS0) فاصله بین پریندها (۰/۰۵) نانوتسلا بر متر، (د) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه اول (AAS1). فاصله بین پریندها (۰/۰۲) نانوتسلا بر متر مربع، (ه) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه دوم (AAS2) فاصله بین پریندها (۰/۰۱) نانوتسلا بر متر مکعب.



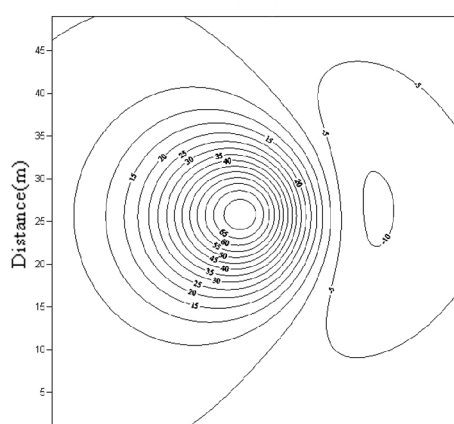
Distance(m)

(الف)



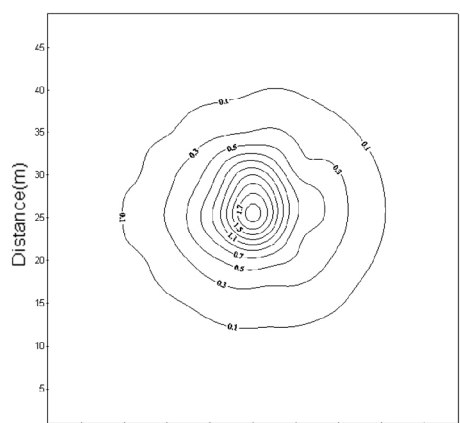
Distance(m)

(ب)



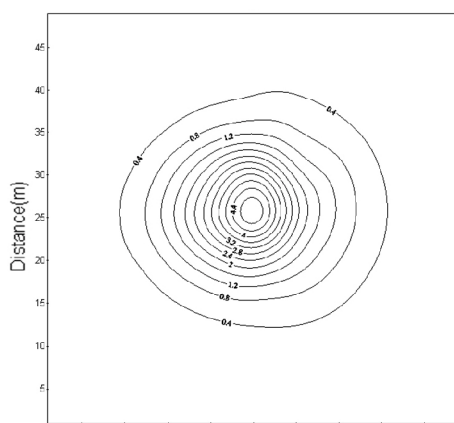
Distance(m)

(ج)



Distance(m)

(د)



Distance(m)

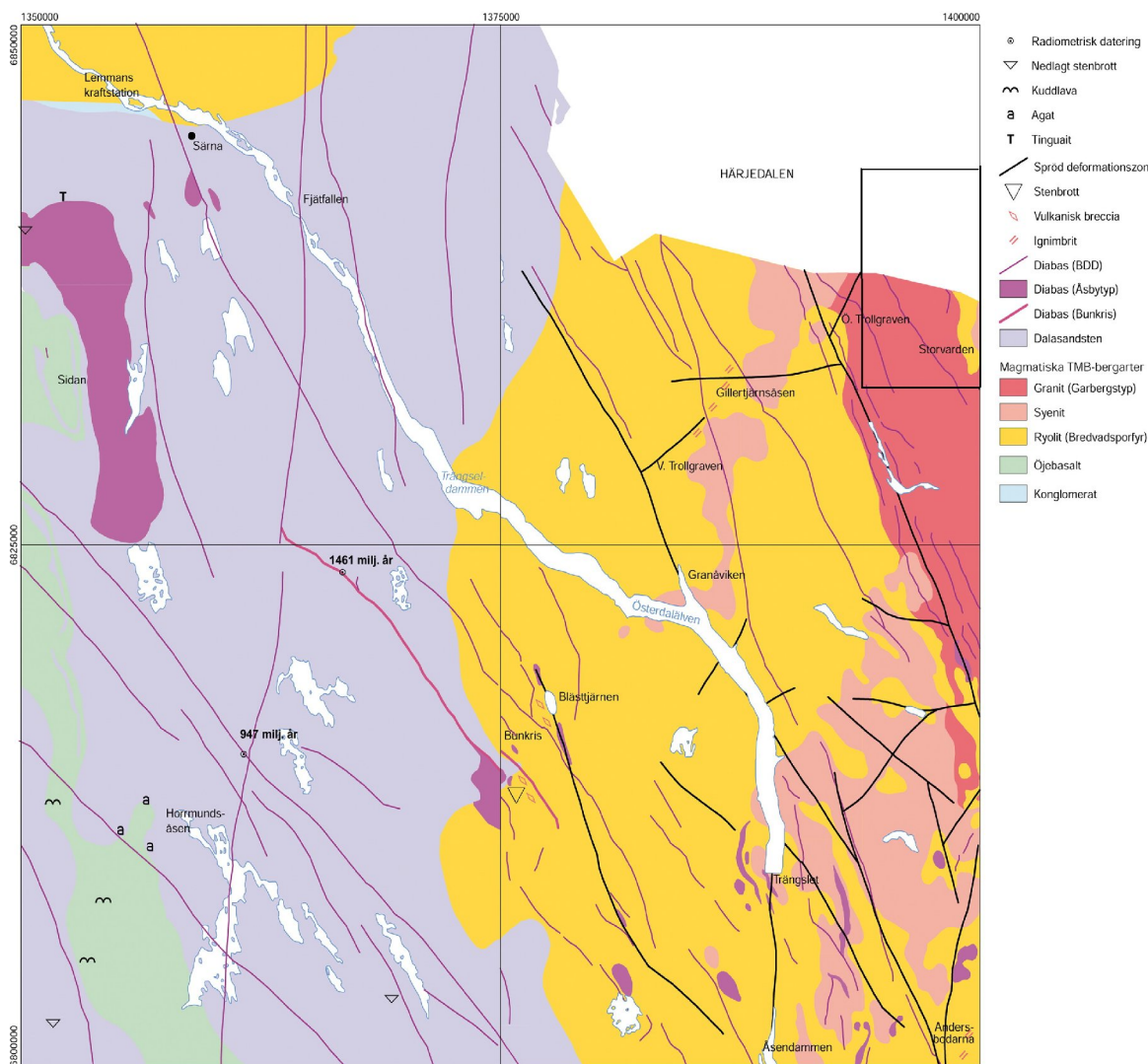
(ه)

شکل ۳. (الف) بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از مدل مصنوعی منبع سه‌بعدی. فاصله بین پربندها ۲۰ نانوتسلا، (ب) بی‌هنجاری مغناطیسی پس از ادامه. فراسو فاصله بین پربندها ۵ نانوتسلا، (ج) دامنه سیگنال تحلیلی (AAS0) فاصله بین پربندها ۲ نانوتسلا بر متر، (د) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه اول (AAS1). فاصله بین پربندها ۰/۲ نانوتسلا بر متر مربع، (ه) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه دوم (AAS2) فاصله بین پربندها ۰/۱ نانوتسلا متر مکعب.

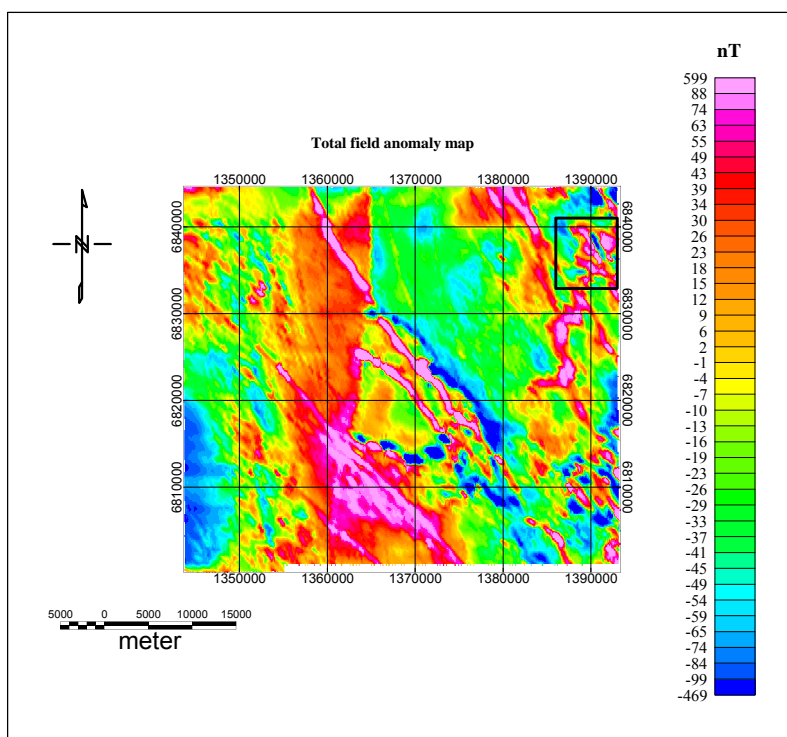
## ۲-۵ شبکه‌بندی داده‌ها

برای دیدن یک نمای دوبعدی از داده‌های برداشت شده، لازم است که داده‌ها شبکه‌بندی شوند. به این ترتیب مقادیر بی‌هنجاری شدت میدان کل در یک شبکه مربعی از طول و عرض جغرافیایی در دستگاه مختصات محلی کشور سوئد (RT90)، به روش درونیابی داده‌های اولیه به دست

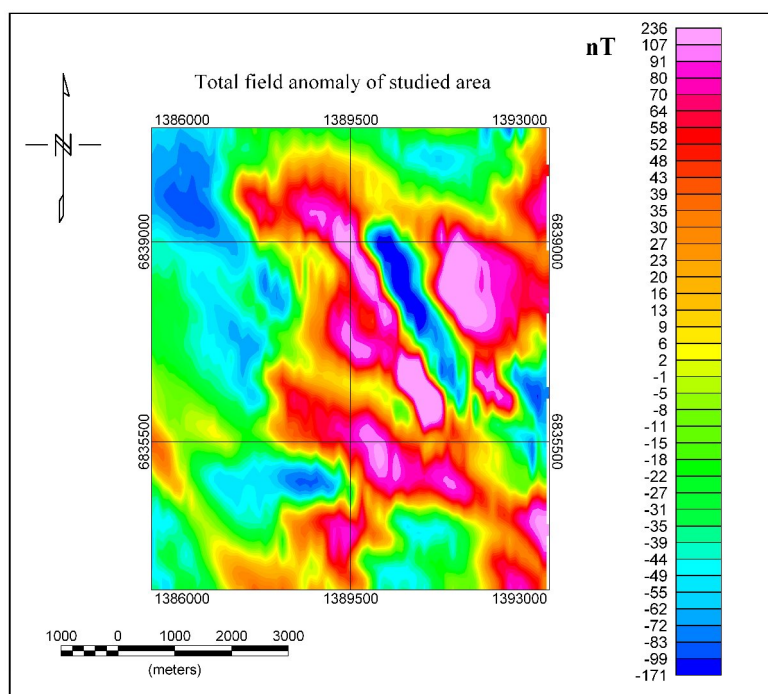
می‌آید. شبکه‌بندی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار ژئوسافت، با فاصله شبکه‌ای ۱۰۰ متر صورت گرفته است. شکل ۵ بی‌هنجاری مغناطیسی شدت میدان کل را پس از شبکه‌بندی داده‌ها نشان می‌دهد. شکل ۶ بی‌هنجاری شدت میدان کل منطقه مورد بررسی را با جزئیات بیشتر نشان می‌دهد.



شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ (سازمان زمین‌شناسی سوئد SGU، ۲۰۰۵).



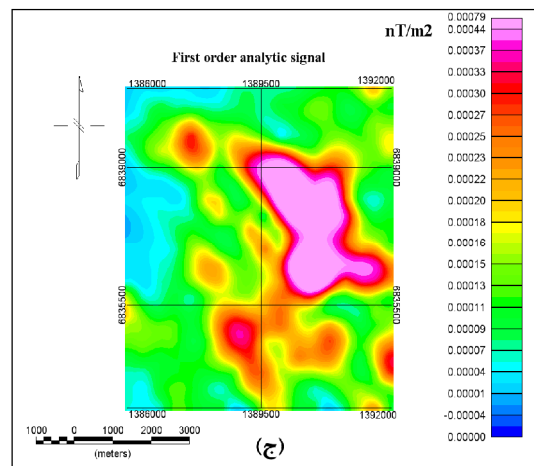
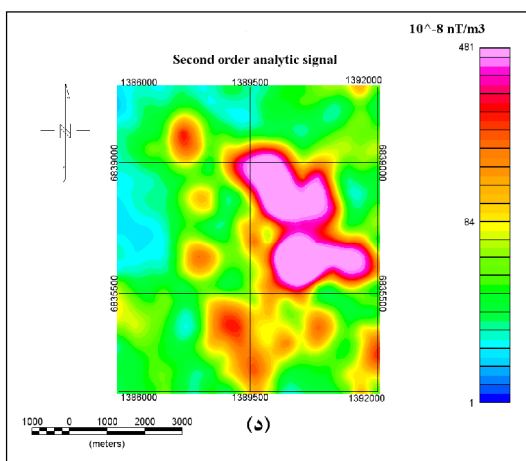
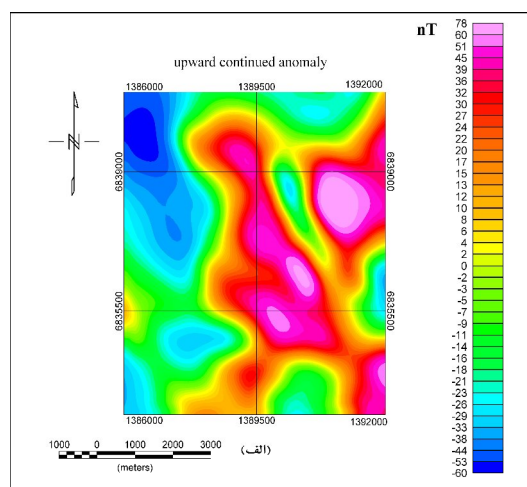
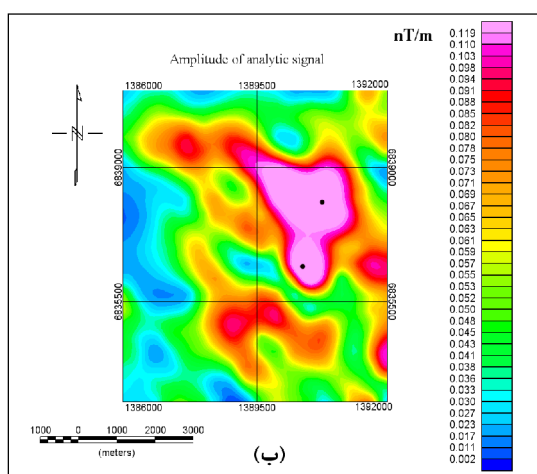
شکل ۵. بی‌هنجاری میدان مغناطیسی کل در سراسر منطقه عملیاتی. قسمت داخل کادر منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد (بنی‌عامریان، ۱۳۸۸).



شکل ۶. بی‌هنجاری شدت میدان مغناطیسی در منطقه بررسی شده (بنی‌عامریان، ۱۳۸۸).

تحلیلی را پس ادامه فراسوی داده‌ها به ارتفاع ۳۲۰ متری از سطح برداشت نشان می‌دهد. دامنه سیگنال تحلیلی (شکل ۷-ب) دارای دو بیشینه قابل قبول است که با استفاده از مختصات آنها موقعیت تقریبی منبع‌ها برآورد می‌شود. محل بیشینه‌های دامنه سیگنال تحلیلی و در واقع محل تقریبی منبع‌ها در شکل ۷-ب مشخص شده است. پس از محاسبه روابط روش AN-EUL در این نقاط، نتایج موردنظر مطابق جدول ۷ به دست می‌آیند.

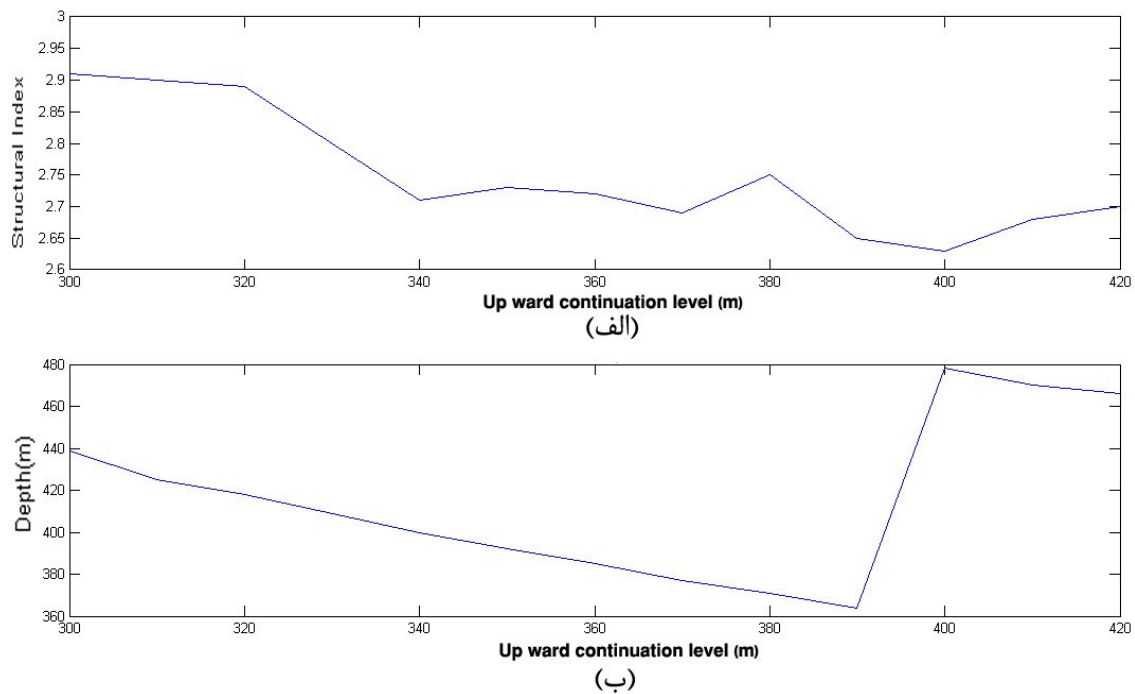
۳-۵ تفسیر داده‌ها با استفاده از روش AN-EUL قبل از محاسبه سیگنال‌های تحلیلی و اعمال روش AN-EUL، به منظور کاهش اثر توده‌های سطحی و نوفه‌ها، با استفاده از فیلتر ادامه فراسو، داده‌ها به سطح بالاتر منتقل می‌شوند. ارتفاع مناسب برای ادامه فراسوی داده‌ها ۳۲۰ متر است، زیرا به ازای ارتفاع‌های بیشتر از این، میزان تغییرات عمق و اندیس ساختاری به دست آمده جزئی است. شکل ۷ بی‌هنجاری مغناطیسی و دامنه سیگنال‌های



شکل ۷. الف) بی‌هنجاری میدان مغناطیسی کل پس از ادامه فراسو، ب) دامنه سیگنال تحلیلی بی‌هنجاری میدان مغناطیسی، محل منبع‌ها با نقطه مشخص شده است، ج) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه اول، د) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه دوم.

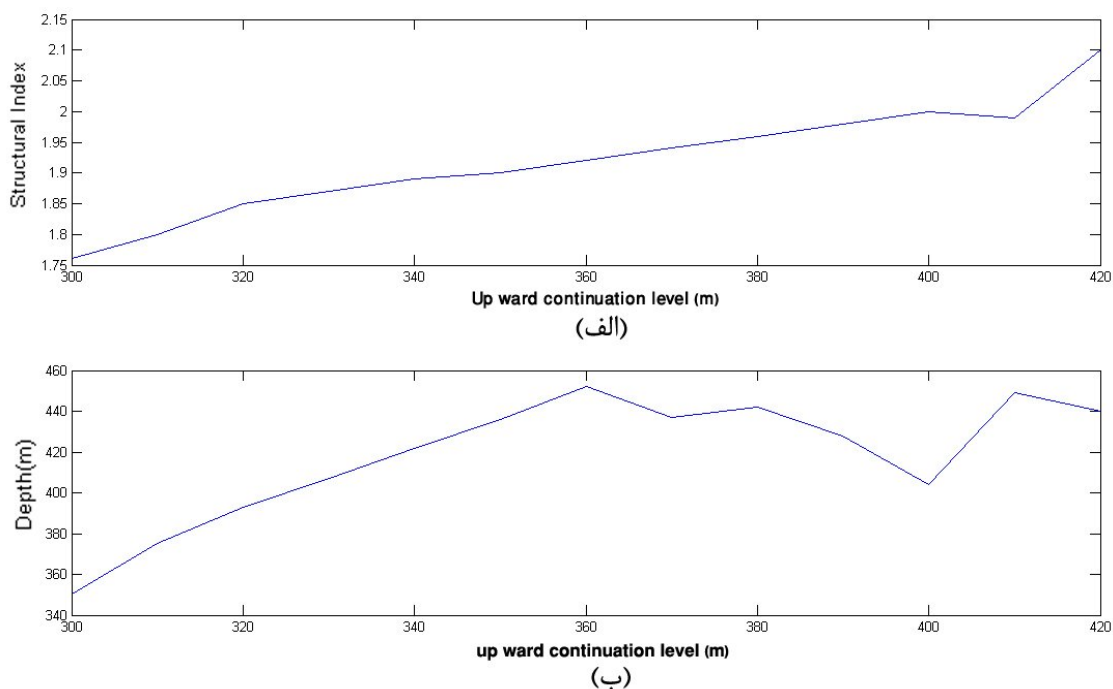
جدول ۷. نتایج به‌دست آمده از اعمال روش AN-EUL روی داده‌های واقعی.

کمیت‌های محاسبه شده	منبع ۱	منبع ۲
مختصات مقدار بیشینه $ AAS_0 $ ، نقطه $(x_0, y_0)$ (مختصات محل تقریبی منبع)	$X = 1390500$ $Y = 6836100$	$X = 1391300$ $Y = 6838100$
مقدار $ AAS_0 _{(x_0, y_0)}$	۰/۱۸۵	۰/۱۹۱
مقدار $ AAS_1 _{(x_0, y_0)}$	$9/04 \cdot 10^{-4}$	$7/06 \cdot 10^{-4}$
مقدار $ AAS_2 _{(x_0, y_0)}$	$5/54 \cdot 10^{-6}$	$3/52 \cdot 10^{-6}$
عمق (متر)	۴۱۸	۳۹۳
اندیس ساختاری ( $n$ )	۲/۸۹	۱/۸۵
موقعیت به‌دست آمده از روش اویلر	$X = 1390800$ $Y = 6836500$	$X = 1391200$ $Y = 6838100$



شکل ۸. (الف) تغییرات اندیس ساختاری، (ب). تغییرات عمق. منبع ۱.





شکل ۹. الف) تغییرات اندیس ساختاری، (ب). تغییرات عمق. منبع ۲.

رگه‌های دیابازی باشد. مقادیر به دست آمده برای اندیس ساختاری نشان می‌دهد که، منبع ۱ می‌تواند یک توده تقریباً سه‌بعدی و منبع ۲ یک ساختار نفوذی تقریباً خطی باشد (بنی عامریان، ۱۳۸۸).

#### ۶ نتیجه‌گیری

روش AN-EUL روشی خودکار برای برآورد عمق، اندیس ساختاری و محل منبع مغناطیسی است. معادلات این روش از جای‌گذاری مشتق‌های گوناگون معادله همگن اولر در معادله سیگنال تحلیلی به دست می‌آیند. با استفاده از این معادلات می‌توان عمق و اندیس ساختاری را در محل منبع محاسبه کرد. دامنه سیگنال تحلیلی روی منبع تقریباً بیشینه است، بنابراین موقعیت منبع را می‌توان با استفاده از محل مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی به تقریب تعیین کرد. در این روش برای کاهش اثر نوفه‌ها و بی‌هنجاری‌های سطحی از ادامه فراسوی داده‌ها به یک

شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب نمودار تغییرات عمق و اندیس ساختاری را با افزایش ارتفاع سطح ادامه فراسو برای منبع‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهند. با توجه به این نمودارها و نتایج جدول ۷ اندیس ساختاری منبع‌های ۱ و ۲ به ترتیب  $(2/7 \pm 0/2)$  و  $(1/9 \pm 0/15)$  و عمق آنها  $(420 \pm 50)$  و  $(400 \pm 50)$  متر برآورد می‌شود که با اطلاعات زمین‌شناسی به دست آمده از سایر روش‌ها (زمین مغناطیسی (مگنتوتلوریک)، گرانی‌سنجی، اندازه‌گیری صحرائی) سازگاری دارد.

با توجه به نقشه زمین‌شناسی، به نظر می‌رسد که رگه‌هایی از دیاباز با گسترش شمال غربی- جنوب شرقی در داخل یک توده عظیم گرانیتی نفوذ کرده است. بنابراین، چون خودپذیری مغناطیسی دیاباز بیشتر از گرانیت است (دیاباز  $SI \times 10^{-5} = 1600 - 100$ ) و گرانیت  $SI \times 10^{-5} = 10 - 5000$ ) بی‌هنجاری‌های مغناطیسی آشکار شده در این محدوده ممکن است به دلیل وجود این

استفاده می‌شود، در نتیجه این روش حساسیت زیادی نسبت به نوفه‌ها و بی‌هنجاری‌های سطحی دارد و دقت جواب‌های به‌دست آمده بستگی زیادی به کیفیت داده‌های اندازه‌گیری شده دارد.

### تشکر و قدردانی

نگارندگان به خاطر در اختیار قرار گرفتن داده‌های واقعی و نقشه‌های زمین‌شناسی، نهایت سپاس و قدردانی را از سازمان زمین‌شناسی سوئد (SGU) به‌جا می‌آورند.

### منابع

بنی‌عامریان، ج.، ۱۳۸۸، روش ترکیبی سیگنال تحلیلی و واهمامیخت اوپلر (AN-EUL) در تفسیر داده‌های مغناطیسی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، موسسه 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.
- Bin Doo, W., Hsu, S. K., and Yeg, Y. 2007, A derivative-based interpretation approach to estimating source parameters of simple 2D magnetic sources from Euler deconvolution, the analytic-signal method and analytical expressions of the anomalies: *Geophysical Prospecting*, **55**, 255-264.
- Cooper, G., 2008, Euler deconvolution with improved accuracy and multiple different structural indices: *Journal of China University of Geosciences*, **19**, (1), 72-76.
- Blakely, R. J., 1995, *Potential theory in gravity and magnetic applications*: Cambridge University Press.
- Hsu, S. K., Sibuet, J. C., and Shyu, C. T., 1996, High-resolution detection of geologic boundaries from potential anomalies, an enhanced analytic signal technique: *Geophysics*, **61**, 373-386.
- Hsu, S. K., Coppens, D., and Shyu, C. T., 1998, Depth to magnetic source using the generalized analytic signal: *Geophysics*, **63**,

ارتفاع بالاتر استفاده می‌شود. ارتفاع مطلوب برای ادامه فراسو، اولین ارتفاعی است که بعد از آن، دامنه تغییرات عمق و اندیس ساختاری ناچیز باشد. بررسی داده‌های مصنوعی و داده‌های مصنوعی آلوده به نوفه مربوط به مدل‌های متفاوت نشان می‌دهد که روش AN-EUL برای محاسبه عمق و اندیس ساختاری از کارایی و دقت مناسبی برخوردار است. تعیین محل منبع (با استفاده از محل مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی) برای ساختارهای دوبعدی با دقت بیشتری نسبت به منبع‌های سه‌بعدی صورت می‌گیرد. همچنین مشکل تعیین اندیس ساختاری که در روش واهمامیخت اوپلر وجود دارد، با استفاده از این روش بر طرف می‌شود، یعنی به تعیین اندیس ساختاری، قبل از برآورد محل و عمق منبع نیازی نیست. در نهایت اعمال این روش روی داده‌های مغناطیسی هواپردی برداشت شده در منطقه مورد بررسی واقع در کشور سوئد، وجود دوبی‌هنجاری با اندیس‌های ساختاری  $(2/7 \pm 0/2)$  و  $(1/9 \pm 0/15)$  و عمق‌های  $(420 \pm 50)$  و  $(400 \pm 50)$  متر را نشان می‌دهد که این نتایج با اطلاعات زمین‌شناسی به‌دست آمده از سایر روش‌های ژئوفیزیکی (زمین‌مغناطی برقی (مگنتوتلوریک)، گرانی‌سنجی، اندازه‌گیری‌های صحرائی) مطابقت دارد. اصولاً همه روش‌های تفسیر دارای ضعف و کاستی‌هایی هستند. با توجه به نتایج و بررسی‌های صورت گرفته در این تحقیق، نقاط ضعف روش AN-EUL را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

در روش AN-EUL برای کاهش اثر نوفه‌ها و بی‌هنجاری‌های سطحی از فیلتر ادامه فراسو استفاده می‌شود. ادامه فراسوی داده‌ها به سطح بالاتر باعث می‌شود که جابه‌جایی افقی مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی بیشتر شود و محل مقدار بیشینه دامنه سیگنال‌های تحلیلی بر هم منطبق نباشد و در نتیجه دقت محاسبات کاهش یابد. از طرفی در روش AN-EUL از مشتق‌های مرتبه بالای میدان

- interpretation in three dimensions using Euler deconvolution: *Geophysics*, **55**, 80-91.
- Roest, W. R., Verhoef, J., and Pilkington, M., 1992, Magnetic interpretation using 3-D analytic signal: *Geophysics*, **57**, 116-125.
- Salem, A., Ravat, D., Gamey, T. J., and Ushijima, K., 2002, Analytic Signal approach and its applicability in environmental magnetic investigations: *J. Appl. Geophys.*, **49**, 231-244.
- 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., 2005, Interpretation of magnetic data using analytic signal derivatives: *Geological Survey of Sweden (SGU), and Geophysical Prospecting*, **53**, 75-82.
- Talwani, M., 1965, Computation with the help of a digital computer of magnetic anomalies caused by arbitrary shape: *Geophysics*, **30**, 797-817.
- Thompson, D. T., 1982, "EULDPH" a new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data: *Geophysics*, **47**, 31-37.
- 1947-1957.
- Hsu, S. K., 2002, Imaging magnetic sources using Euler's equation: *Geophysical Prospecting*, **50**, 15-25.
- Hsu, S. K., Yeh, Y., and Doo, B., 2007, A derivative-based interpretation approach to estimating source parameters of simple 2D magnetic sources from Euler deconvolution the analytic-signal method and analytical expressions of the anomalies: *Geophysical Prospecting*, **55**, 255-264.
- Keating, P., and Pilkington, M., 2004, Euler deconvolution of the analytic signal and its application to magnetic interpretation: *Geophysical Prospecting*, **52**, 165-182.
- 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.
- 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., Millet, A. J., and Somerton, I. W., 1990, Magnetic