

مقایسه نتایج به دست آمده از اعمال روش AN-EUL روی داده‌های مغناطیسی، داده‌های مغناطیسی منتقل شده به قطب و داده‌های شبه‌گرانی

جمال‌الدین بنی‌عامریان^۱ و بهروز اسکویی^{۲*}

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران
^۲استادیار، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

boskooi@ut.ac.ir, jamaledin.baniamerian@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۳/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۹/۲۲)

چکیده

روش AN-EUL روشی خودکار برای برآورد هم‌زمان عمق، اندیس ساختاری (Structural Index) و مکان منبع‌های مغناطیسی است. اندیس ساختاری شکل کلی منبع را برآورد می‌کند. اساس این روش ترکیب روش‌های سیگنال تحلیلی و واهمامیخت اوپلر (Euler Deconvolution) است. در این روش از جای‌گذاری مشتق‌های مرتبه‌گوناگون معادله اوپلر در معادله سیگنال تحلیلی میدان پتانسیل، روابطی کلی برای محاسبه عمق و اندیس ساختاری منبع در محل منبع به دست می‌آید. در این روش محل منبع با استفاده از محل مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی (AAS0) برآورد می‌شود. یکی از ویژگی‌های اساسی سیگنال تحلیلی این است که شکل منحنی دامنه آن و محل مقدار بیشینه دامنه برای منبع‌های دو بعدی، مانند دایک و استوانه افقی با گسترش طولی بی‌نهایت مستقل از جهت مغناطیس شونده است و مقدار بیشینه دامنه همواره بر روی منبع قرار می‌گیرد. برای این نوع ساختارها شکل دامنه سیگنال تحلیلی متقارن است. اما برای منبع‌های سه بعدی، مانند منبع‌های کروی شکل، به دلیل بستگی شکل منحنی دامنه سیگنال تحلیلی به جهت مغناطیس شونده، شکل منحنی دامنه سیگنال تحلیلی نامتقارن است و مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی دقیقاً روی منبع قرار نمی‌گیرد. بنابراین برآورد مکان منبع با استفاده از محل مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی دارای خطا است که به نوبه خود منجر به خطای محاسبه عمق و اندیس ساختاری منبع می‌شود. با به کار بردن فیلتر انتقال به قطب (Reduction to the pole) و تبدیل شبه‌گرانی (Pseudo gravity transform) برای داده‌های مغناطیسی و به دست آوردن داده‌های مغناطیسی منتقل شده به قطب و داده‌های شبه‌گرانی و سپس استفاده از روش AN-EUL برآورد مکان براساس مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی و در نتیجه محاسبه عمق و اندیس ساختاری منبع با دقت بیشتری صورت می‌گیرد. در این مقاله برای مقایسه دقت نتایج به دست آمده از داده‌های مغناطیسی، داده‌های مغناطیسی منتقل شده به قطب و داده‌های شبه‌گرانی، روش AN-EUL برای داده‌های مصنوعی تولید شده با مدل کره به کار رفته است. به همین منظور با استفاده از مدل‌سازی به روش پیشرو، برای مدل مصنوعی کره مغناطیسی با پارامترهای معین، داده مصنوعی مغناطیسی تولید می‌شود. سپس با استفاده از فیلترهای انتقال به قطب و تبدیل شبه‌گرانی، داده‌های منتقل شده به قطب و داده‌های شبه‌گرانی برای این داده‌های مغناطیسی مصنوعی محاسبه می‌شود. در مرحله بعد روش AN-EUL برای این داده‌ها به کار برده می‌شود و جواب‌های بدست آمده با هم مقایسه می‌شوند. نتایج بدست آمده از سه نوع داده متفاوت برای این مدل نشان می‌دهد که دقت روش برای داده‌های منتقل شده به قطب و داده‌های شبه‌گرانی در مقایسه با داده‌های مغناطیسی اولیه بیشتر است. در نهایت این شیوه برای داده‌های مغناطیسی واقعی نیز به کار رفته است. برای این داده‌های مغناطیسی واقعی نیز همانند داده‌های مصنوعی، با استفاده از فیلترهای انتقال به قطب و تبدیل شبه‌گرانی، بی‌هنجاری منتقل شده به قطب و بی‌هنجاری شبه‌گرانی محاسبه شده و روش AN-EUL برای این داده‌ها به کار برده می‌شود. نتایج بدست آمده برای داده‌های واقعی نشان می‌دهد که مقادیر محاسبه شده از داده‌های منتقل شده به قطب و داده‌های شبه‌گرانی، در مقایسه با مقادیر به دست آمده از داده‌های مغناطیسی اولیه، با هم اختلاف کمتری دارند. تمام مراحل محاسباتی این روش با استفاده از برنامه نویسی رایانه‌ای توسط مولفان

در محیط مطلب صورت گرفته است.

واژه‌های کلیدی: سیگنال تحلیلی، واهمامیخت اوپلر، اندیس ساختاری، انتقال به قطب، تبدیل شبه‌گرانی، عمق منبع

Comparing the results of applying the AN-EUL on magnetic data, reduced to the pole data and pseudo gravity data

Jamaleddin Baniamerian¹ and Behrooz Oskooi^{1*}

¹*Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran*

(Received: 09 June 2009, accepted: 13 December 2009)

Summary

AN-EUL is a new automatic method for the simultaneous approximation of depth, geometry and location of magnetic sources. The principle advantage of this method is its combining both the analytic signal and the Euler Deconvolution methods. It is by substituting the appropriate derivatives of Euler homogeneous equations for the expression of the analytic signal of the potential field in the main equations of this method that the advantage is gained. In this method, the determination of the source location is based on the position of the maximum value of the analytic signal amplitude. For 3D sources, the maximum value of the amplitude of analytic signals (AAS) is not always located directly over the body, and the shape of AAS is dependent on the magnetization direction. Therefore, there are some errors in the determination of location based on the maximum value of AAS for these types of sources. Consequently, the calculation of the depth and structural indices, also have errors when using the maximum value of AAS. By using the reduction to the pole and pseudo gravity transform of the magnetic anomaly, the approximation of the source location and, consequently, the calculation of the depth and structural indices of the source gain high accuracy. In this paper, in order to compare results, the AN-EUL method has been applied to magnetic data, reduced to the pole data and pseudo gravity data due to the magnetic sphere. The results show that the calculations have greater accuracy for reduced to the pole data and pseudo gravity data than for magnetic data. Finally, this method is applied to a series of real magnetic data. By using the reduction to the pole and pseudo gravity filters, the reduced to the pole and pseudo gravity anomalies are calculated. Subsequently, the AN-EUL method is applied to these data, and the results are compared with each other. All of the steps in this paper are performed by using a written code in MATLAB.

Key words: Analytic Signal, Euler Deconvolution, structural index, reduction to the pole, pseudo gravity transform, depth of source

۱ مقدمه

بعد از انتشار اولین مقاله در زمینه استفاده از معادله دیفرانسیل همگن اوپلر برای تفسیر داده‌های مغناطیسی (تامپسون، ۱۹۸۲)، روش واهمامیخت اوپلر به مثابه فنی برای تعیین عمق، موقعیت و شکل منبع‌های مغناطیسی

دوبعدی و سه‌بعدی کاربرد وسیعی یافت، رید و همکاران (۱۹۹۰)، راوات (۱۹۹۶)، هسیو (۲۰۰۲)، کی‌تینگ و پیلکینگتون (۲۰۰۴)، بین دوو و همکاران (۲۰۰۷)، کوپر (۲۰۰۸). روش سیگنال تحلیلی نیز در حکم روشی پر اهمیت در تفسیر داده‌های مغناطیسی مورد توجه بوده

۲ نظریه روش AN-EUL

سیگنال تحلیلی در حالت دوبعدی یک تابع موهومی بوده که قسمت موهومی آن تبدیل هیلبرت قسمت حقیقی آن است (نیفیان، ۱۹۷۲). سیگنال تحلیلی میدان و دامنه آن برای حالت سه‌بعدی با روابط زیر تعریف می‌شوند (بلیکلی، ۱۹۹۵):

$$A(x, y) = \frac{\partial T}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \hat{j} + i \frac{\partial T}{\partial z} \hat{k} \quad (1)$$

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

که T میدان اندازه‌گیری شده، $\frac{\partial T}{\partial x}$ ، $\frac{\partial T}{\partial y}$ مشتقات افقی میدان، $i = \sqrt{-1}$ و $\frac{\partial T}{\partial z}$ مشتق قائم میدان است. برای حالت دوبعدی $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ خواهد بود. سیگنال تحلیلی در تعیین محل، عمق و مرز منبع‌های مغناطیسی کاربرد دارد و دامنه آن روی جسم یا روی لبه‌های 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 (Dip angle)، زاویه میل و زاویه انحراف میدان و راستا (Strike) و همواره تابعی زوج و متقارن است. این کمیت‌های جهتی فقط روی اندازه دامنه سیگنال تحلیلی تاثیر دارند. مؤثر نبودن کمیت‌های جهتی بر شکل منحنی دامنه، ویژگی بسیار مهم سیگنال تحلیلی در حالت دوبعدی است. این اثر، به خصوص در مناطقی که مقدار و جهت مغناطیس باقی‌مانده معلوم نیست، بسیار مهم است (نیفیان، ۱۹۷۲؛ آتچوتو و همکاران، ۱۹۸۱؛ روئست و همکاران، ۱۹۹۲؛ هسیو و همکاران، ۱۹۹۶؛ سالم و همکاران، ۲۰۰۲؛ کیتینگ و بیلکینگتون، ۲۰۰۴).

در مورد منبع‌های سه‌بعدی شکل دامنه سیگنال تحلیلی

است. نیفیان (۱۹۷۲، ۱۹۷۴، ۱۹۸۴) از سیگنال تحلیلی برای برآورد عمق سطح تماس (Contact) استفاده کرد. آتچوتو و همکاران (۱۹۸۱) با استفاده از مجموعه‌ای از نقاط مشخص روی منحنی دامنه سیگنال تحلیلی، عمق تا سطح دایک‌های ضخیم و نازک آوردند. هسیو و همکاران (۱۹۹۶) از 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) با استفاده از سیگنال تحلیلی روشی را برای محاسبه پارامترهای دایک عرضه کردند. سالم و همکاران (۲۰۰۲) از تابع سیگنال تحلیلی در روش اویلر استفاده کردند و عمق و مکان منبع را برای حالت خاصی که شکل (اندیس ساختاری) معلوم باشد به دست آوردند. سالم و راوات (۲۰۰۳) روش پیشین را تعمیم دادند و از ادغام دو روش واهمامیخت اویلر و سیگنال تحلیلی روش AN-EUL را ابداع کردند. با استفاده از این روش عمق و اندیس ساختاری منبع در محل منبع محاسبه می‌شود؛ که مکان منبع با استفاده از محل مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی برآورد می‌شود. برای منبع‌های سه‌بعدی وابستگی شکل دامنه سیگنال تحلیلی به جهت مغناطیس شوندگی باعث می‌شود که محل منبع با خطای بیشتری تعیین شود، بنابراین خطای محاسبه عمق و اندیس ساختاری نیز افزایش می‌یابد. استفاده از داده‌های شبه‌گرانی و داده‌های مغناطیسی منتقل شده به قطب به جای داده‌های مغناطیسی می‌تواند موجب بهبود کیفیت نتایج شود. در این مقاله روش AN-EUL روی داده‌های مغناطیسی، داده‌های شبه‌گرانی، و داده‌های مغناطیسی منتقل شده به قطب اعمال می‌شود و نتایج به دست آمده از این داده‌ها مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

ساده نشان می‌دهد. معادله (۳) باید برای همه نقاط شبکه یا نیم‌رخ حل شود. پارامترهای x_0, y_0, z_0, B مجهولات این معادلات هستند. چون تعداد معادلات از تعداد مجهولات بیشتر است، برای حل معادلات باید از روش کمترین مربعات استفاده کرد.

روش AN-EUL ترکیبی از دو روش واهمامیخت اوپلر و سیگنال تحلیلی است و معادلات آن از جای‌گذاری مشتق‌های معادله اوپلر در معادله سیگنال تحلیلی به دست می‌آیند. با استفاده از این معادلات می‌توان عمق، اندیس ساختاری و مکان را به طور هم‌زمان محاسبه کرد. این روش برای تفسیر داده‌های نیم‌رخی (دوبعدی) و شبکه‌ای (سه بعدی) به کار برده می‌شود. مزیت مهم این روش نسبت به روش واهمامیخت اوپلر محدود نبودن آن به مدل‌های ایدئال (دارای اندیس ساختاری عدد صحیح) است و اندیس ساختاری ممکن است عددی کسری باشد که توصیف کننده اجسام با شکل دلخواه است. همچنین در این روش نیازی به انتخاب اندیس ساختاری قبل از به کارگیری روش نیست. معادلات کلی روش AN-EUL برای محاسبه عمق و اندیس ساختاری به صورت زیر است (سالم و راوات، ۲۰۰۳):

$$n = \left(\frac{2|AAS_1|^2 - |AAS_2||AAS_0|}{|AAS_2||AAS_0| - |AAS_1|^2} \right)_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} \quad (۴)$$

$$z_0 = \left(\frac{|AAS_1||AAS_0|}{|AAS_2||AAS_0| - |AAS_1|^2} \right)_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} \quad (۵)$$

که $|AAS_0|$ و $|AAS_1|$ و $|AAS_2|$ به ترتیب دامنه سیگنال تحلیلی بی‌هنجاری مغناطیسی، دامنه سیگنال تحلیلی مشتق قائم اول بی‌هنجاری مغناطیسی و دامنه سیگنال تحلیلی مشتق قائم مرتبه دوم بی‌هنجاری مغناطیسی هستند. نقطه (x_0, y_0) موقعیت افقی منبع (epi-centroid) است.

بنابراین با توجه به این روابط دامنه سیگنال‌های تحلیلی

به جهت مغناطیس‌شوندگی بستگی دارد و مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی دقیقاً روی منبع قرار نمی‌گیرد (سالم و همکاران، ۲۰۰۲). با استفاده از انتقال به قطب و تبدیل شبه‌گرانی داده‌های مغناطیسی می‌توان خطای برآورد موقعیت براساس محل مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی را کاهش داد.

شکل ۱-الف بی‌هنجاری مغناطیسی و دامنه سیگنال تحلیلی را برای یک مدل مکعبی با طول ۱۰۰ متر، عرض ۸۰ متر، ارتفاع ۴۰ متر و عمق ۱۰ متر (عمق تا سطح بالایی مکعب) نشان می‌دهد. این مکعب دارای مغناطیس‌شوندگی القایی و باقی مانده، و شدت آن ۱۰ آمپر بر متر است. با توجه به شکل ۱-ب دامنه سیگنال تحلیلی روی لبه‌های مکعب به بیشینه مقدار خود می‌رسد. به این ترتیب می‌توان مرز توده و شکل تقریبی سطح آن را تعیین کرد.

روش واهمامیخت اوپلر روشی خودکار برای برآورد کردن عمق، شکل و مکان منبع‌های مغناطیسی است. در این روش از معادله دیفرانسیل همگن اوپلر استفاده می‌شود. روش اوپلر روی داده‌های نیم‌رخی (دوبعدی) و همچنین داده‌های شبکه‌ای (سه بعدی) اعمال می‌شود. معادله اوپلر در روش واهمامیخت اوپلر به صورت زیر است (روئست و همکاران، ۱۹۹۲):

$$\begin{aligned} x_0 \frac{\partial T}{\partial x} + y_0 \frac{\partial T}{\partial y} + z_0 \frac{\partial T}{\partial z} + nB \\ = x \frac{\partial T}{\partial x} + y \frac{\partial T}{\partial y} + z \frac{\partial T}{\partial z} + nT \end{aligned} \quad (۳)$$

که نقطه (x_0, y_0, z_0) مختصات محل منبع، ضریب n اندیس ساختاری، \vec{B} میدان زمینه، (x, y, z) مختصات نقطه اندازه‌گیری و T ، میدان پتانسیل است. اندیس ساختاری نشان‌دهنده نرخ تغییرات میدان با فاصله از منبع است و با معلوم بودن آن می‌توان شکل کلی منبع را برآورد کرد. جدول ۱ اندیس ساختاری را برای چند مدل

جدول ۱. اندیس ساختاری برخی از ساختارها.

| اندیس ساختاری n | نوع ساختار |
|-------------------|---|
| ۰ | سطح تماس |
| ۱ | دایک نازک یا خطی از دو قطبی‌ها |
| ۲ | تک قطبی مغناطیسی |
| ۲ | استوانه افقی، استوانه قائم، خطی از دو قطبی‌ها |
| ۳ | کره یا دو قطبی مغناطیسی |
| ۲ | کره گرانی |

جدول ۲. مشخصات مدل کره برای تولید داده مصنوعی.

| اندازه پارامترها | پارامترهای کره |
|------------------|--|
| ۱۰ | عمق تا مرکز کره (متر)، Z_0 |
| (۱۳,۱۸) | موقعیت افقی کره، (x_0, y_0) |
| القایی | مغناطیس‌شوندگی |
| ۱۵ | نسبت مغناطیس‌شوندگی بر چگالی |
| ۱۵ | گشتاور مغناطیسی (آمپر در متر مربع) |
| ۵۰ | زاویه میل میدان زمین، I |
| ۳۰ | زاویه انحراف میدان زمین، D |
| (۱,۱) | فاصله بین نقاط اندازه‌گیری، $(\Delta x, \Delta y)$ |
| (۲۵,۳۰) | تعداد نقاط اندازه‌گیری در هر راستا (N_x, N_y) |

جدول ۳. نتایج به دست آمده از داده‌های مغناطیسی.

| اندازه کمیت | کمیت‌های محاسبه شده |
|-------------|---|
| (۱۱,۱۷) | موقعیت افقی مقدار بیشینه $ AAS_0 $ (نقطه (x_0, y_0)) |
| ۰/۳۱۰ | مقدار $ AAS_0 _{(x_0, y_0)}$ |
| ۰/۱۰۵ | مقدار $ AAS_1 _{(x_0, y_0)}$ |
| ۰/۰۴۴ | مقدار $ AAS_2 _{(x_0, y_0)}$ |
| ۲ | سطح ادامه فراسو |
| ۱۰/۳۱ | عمق به دست آمده پس از کم کردن ارتفاع سطح ادامه فراسو |
| ۳/۲ | اندیس ساختاری (n) |
| ۲/۵ | درصد خطای برآورد عمق |

آوردن جواب‌هایی با دقت زیاد، از فیلتر ادامه فراسو (Upward) استفاده می‌شود.

۴ اعمال روش روی داده‌های مصنوعی

برای مقایسه میزان دقت نتایج به دست آمده از روش AN-EUL برای داده‌های مغناطیسی، داده‌های مغناطیسی منتقل شده به قطب و داده‌های شبه گرانی لازم است که این روش روی داده‌های مصنوعی اعمال شود. با استفاده از مدل‌سازی به روش پیشرو، برای مدل مصنوعی کره مغناطیسی، داده مصنوعی مغناطیسی تولید می‌شود. سپس داده‌های منتقل شده به قطب و داده‌های شبه گرانی برای این داده‌های مغناطیسی مصنوعی محاسبه می‌شود. در نهایت روش AN-EUL روی این داده‌ها اعمال و جواب‌های به دست آمده با هم مقایسه می‌شوند. یک کره مغناطیسی با مشخصات جدول ۲ در حکم مدل فرض می‌شود و روش AN-EUL برای داده‌های مغناطیسی، داده‌های منتقل شده به قطب و داده‌های شبه گرانی به دست آمده از این مدل به کار برده می‌شود.

الف) اعمال روش روی داده‌های مغناطیسی

پس از اعمال روش AN-EUL روی داده‌های مغناطیسی ناشی از این کره، جواب‌های مورد نظر مطابق جدول ۳ به دست می‌آید. شکل ۲ بی‌هنجاری مغناطیسی و دامنه سیگنال تحلیلی را برای این کره نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی دقیقاً روی منبع قرار ندارد. برای کاهش اثر نوفه‌های تولید شده، از ادامه فراسوی داده‌های بی‌هنجاری مغناطیسی استفاده شده است.

ب) اعمال روش روی داده‌های مغناطیسی منتقل شده

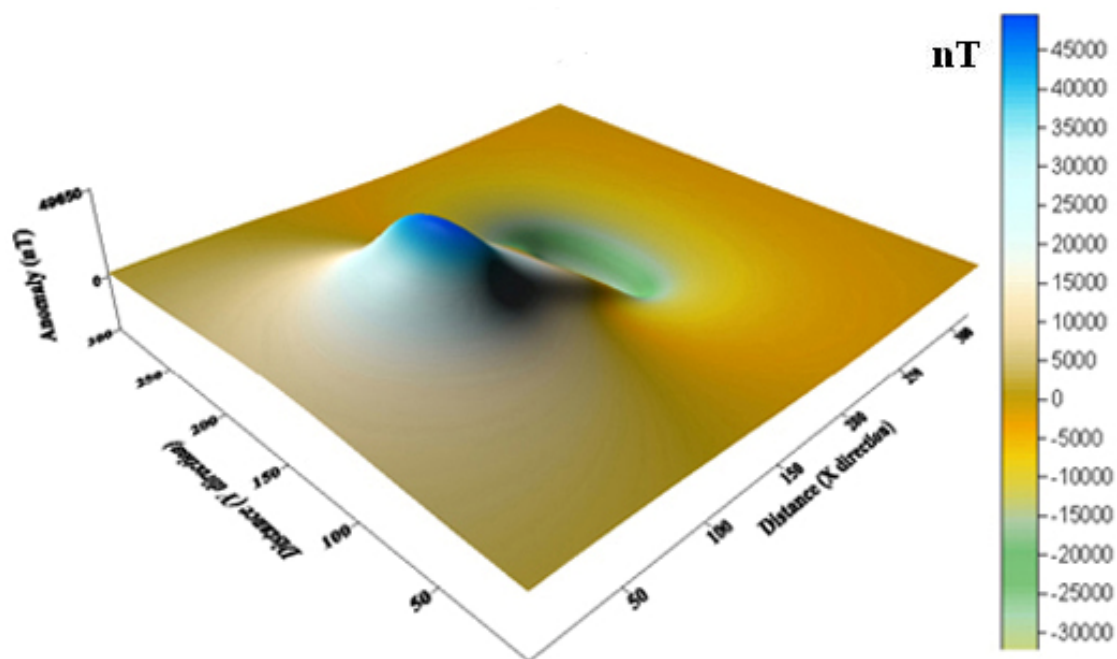
به قطب

انتقال به قطب داده‌ها، باعث می‌شود که شکل بی‌هنجاری

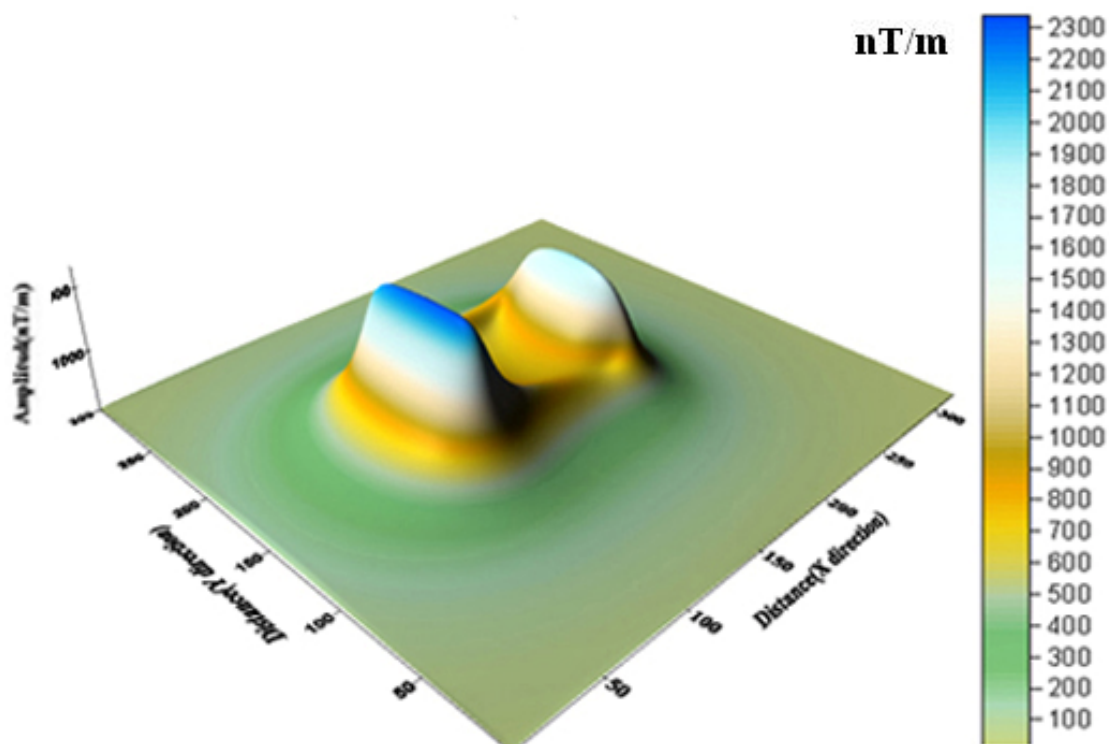
باید در مختصات افقی منبع محاسبه شود. کلیه مشتق‌های میدان با استفاده از فن FFT محاسبه می‌شوند. هیچ کدام از معادلات بالا وابستگی صریح به مغناطیس‌شوندگی ندارند، لذا مغناطیس باقی مانده، عامل مزاحمی نخواهد بود. اگر چند منبع مغناطیسی موجود باشد، به منظور جلوگیری از اثر تداخلی بی‌هنجاری‌های منبع‌های مجاور، بهتر است بی‌هنجاری ناشی از هر منبع، به‌طور جداگانه بررسی شود. همان‌طور که قبلاً بیان شد، در مورد ساختارهای خطی (دوبعدی) 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 کرد و سپس با استفاده روابط (۴) و (۵) عمق و اندیس ساختاری را محاسبه کرد.

برای منبع‌های کروی (سه‌بعدی) مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی دقیقاً روی منبع قرار نمی‌گیرد که این امر منجر به خطا در تعیین موقعیت و در نتیجه خطای محاسبه عمق و اندیس ساختاری می‌شود. انتقال به قطب و تبدیل شبه گرانی داده‌های مغناطیسی موجب می‌شود که بیشینه مقدار دامنه سیگنال تحلیلی تقریباً روی منبع قرار بگیرد، بنابراین خطای برآورد موقعیت براساس محل مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی کاهش می‌یابد و در نتیجه عمق و اندیس ساختاری با دقت بیشتری محاسبه می‌شود.

همانند سایر روش‌هایی که از مشتق‌های میدان استفاده می‌کنند، دقت این روش تا حد بسیار زیادی به کیفیت داده‌های اندازه‌گیری شده و نوفه‌ها (noise) بستگی دارد. از آنجا که در روش AN-EUL از مشتق‌های مرتبه بالای میدان استفاده می‌شود، این روش حساسیت بسیار زیادی نسبت به نوفه‌ها و بی‌هنجاری‌های سطحی دارد و موجب تقویت دامنه آنها می‌شود. حتی برای داده‌های مصنوعی بدون نوفه، خطای ناشی از محاسبات عددی مشتق‌های میدان، منجر به ایجاد ناهنجاری نامطلوب نوفه‌مانند می‌شود. بنابراین برای حذف اثر این ناهنجاری‌ها و به دست



(الف)



(ب)

شکل ۱. (الف) بی‌هنجاری مغناطیسی مدل مکعبی و (ب) دامنه سیگنال تحلیلی بی‌هنجاری مغناطیسی. دامنه سیگنال تحلیلی روی لبه‌ها بیشینه است.

۲- در روش AN-EUL به دلیل استفاده از مشتق‌های مرتبه بالا، بسامدهای زیاد به شدت تقویت و حتی خطای ناشی از محاسبات عددی مشتق‌ها منجر به ایجاد ناهنجاری‌های نامطلوب نوفه‌مانند می‌شود. با توجه به اینکه تبدیل شبه‌گرانی ماهیت یک فیلتر پایین‌گذر را دارد، تا حدی از این اثر تقویتی روش AN-EUL می‌کاهد و حتی در بعضی از موارد باعث می‌شود که نیازی به استفاده از ادامه فراسو نباشد.

شکل ۴ بی‌هنجاری شبه‌گرانی و دامنه سیگنال‌های تحلیلی آن را برای مدل کره مغناطیسی نشان می‌دهد. نسبت چگالی بر مغناطیس‌شوندگی برای این مدل ۱۵ کیلوگرم بر آمپر-متر مربع فرض شده است. جدول ۵ نتایج به‌دست آمده را پس از اعمال روش AN-EUL روی داده‌های شبه‌گرانی نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر جدول ۵، مقدار بیشه دامنه سیگنال تحلیلی دقیقاً روی منبع قرار گرفته است. همچنین از فیلتر ادامه فراسو استفاده نشده است. لازم به ذکر است که اندیس ساختاری برای کره‌گرانی دو است.

۵ اعمال روش روی داده‌های واقعی

پس از اعمال روش روی داده‌های مصنوعی تولید شده با مدل مصنوعی و مقایسه بین نتایج به‌دست آمده از داده‌های مغناطیسی، داده‌های مغناطیسی منتقل شده به قطب و داده‌های شبه‌گرانی می‌توان این شیوه را برای داده‌های واقعی نیز به‌کاربرد. شکل ۵-الف بی‌هنجاری مغناطیسی مربوط به منطقه‌ای را نشان می‌دهد که در این مقاله بررسی شده است. به منظور کاهش اثر بی‌هنجاری‌های سطحی و نوفه‌ها، فیلتر ادامه فراسو روی این داده‌ها اعمال می‌شود و بی‌هنجاری مغناطیسی به ارتفاع ۴۰ متری از سطح برداشت منتقل می‌شود. شکل ۵-ب بی‌هنجاری مغناطیسی را پس از ادامه فراسو نشان می‌دهد.

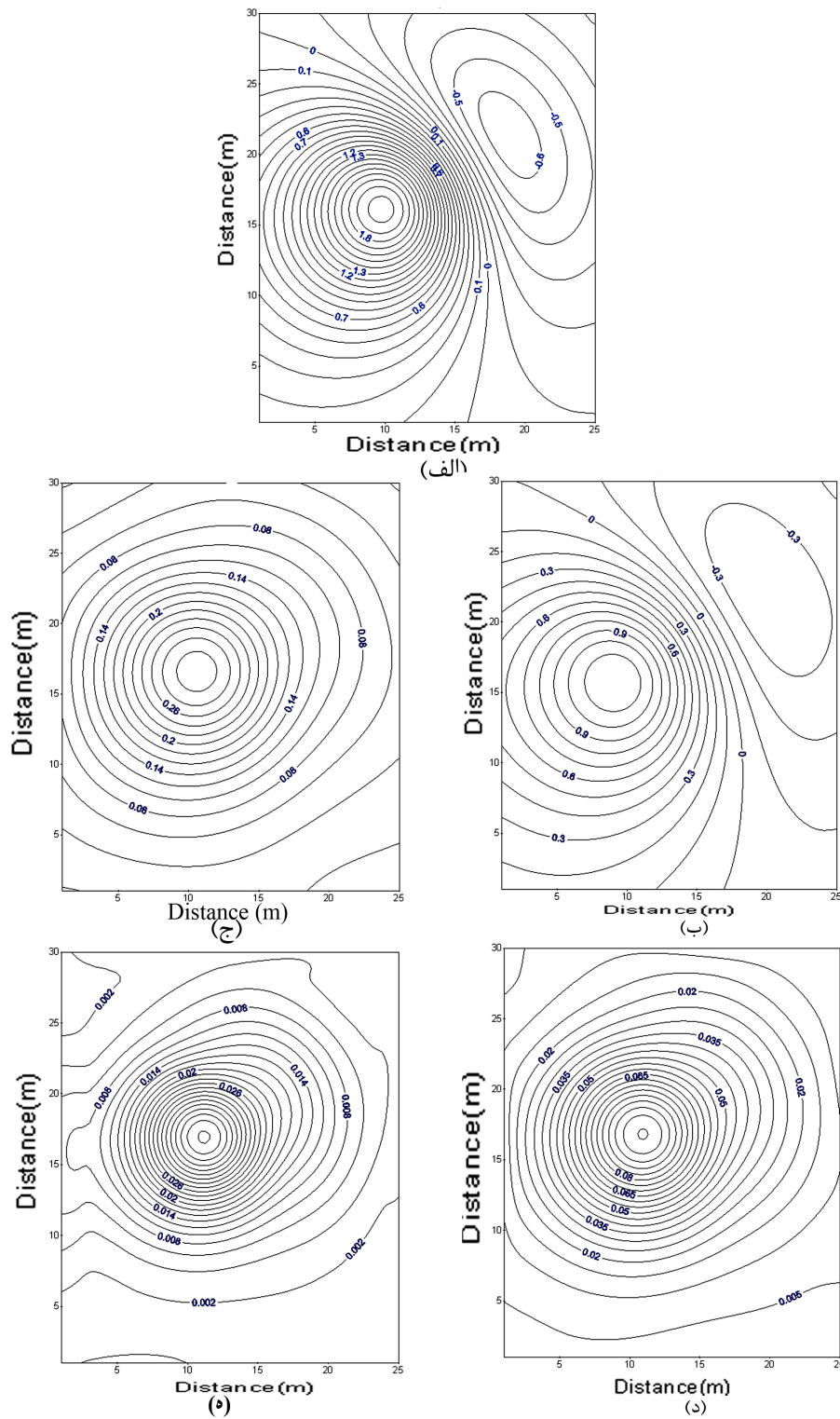
مغناطیسی و دامنه سیگنال تحلیلی آن متقارن‌تر شود؛ در نتیجه مقدار بیشه دامنه سیگنال تحلیلی تقریباً روی منبع قرار می‌گیرد. بنابراین با اعمال عملگر انتقال به قطب روی داده‌های مغناطیسی، می‌توان موقعیت افقی منبع‌های سه‌بعدی را، براساس محل مقدار بیشه دامنه سیگنال تحلیلی با دقت بیشتری به‌دست آورد و در نتیجه عمق و اندیس ساختاری با دقت بیشتری محاسبه می‌شوند.

پس از انتقال به قطب بی‌هنجاری مغناطیسی و استفاده از روش AN-EUL جواب‌ها مطابق جدول ۴ به‌دست می‌آیند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، مقدار بیشه دامنه سیگنال تحلیلی دقیقاً روی مرکز کره قرار گرفته و دقت جواب‌ها نسبت به حالت قبل بیشتر است. شکل ۳ بی‌هنجاری مغناطیسی و دامنه سیگنال‌های تحلیلی را پس از انتقال به قطب، برای کره نشان می‌دهد. توجه به این نکته مهم است که در عرض‌های جغرافیایی پایین، این عملگر قابل استفاده نیست، زیرا موجب ناپایداری شدید داده‌ها می‌شود.

ج) اعمال روش روی داده‌های شبه‌گرانی

با استفاده از تبدیل شبه‌گرانی می‌توان بی‌هنجاری‌گرانی ناشی از یک جسم مغناطیسی را به‌دست آورد. تبدیل شبه‌گرانی همانند یک فیلتر پایین‌گذر، تا حدی موجب کاهش اثر نوفه‌ها و تضعیف دامنه طول موج‌های کوتاه می‌شود (بلیکلی، ۱۹۹۵). مزایای استفاده از داده‌های شبه‌گرانی در تفسیر داده‌های مغناطیسی با استفاده از روش AN-EUL عبارت است از:

۱- برای منبع‌های سه‌بعدی استفاده از تبدیل شبه‌گرانی، باعث حذف اثر جهت مغناطیس‌شوندگی می‌شود؛ بنابراین برآورد مکان منبع، براساس استفاده از محل مقدار بیشه دامنه سیگنال تحلیلی، از دقت بیشتری برخوردار خواهد بود.



شکل ۲. (الف) بی‌هنجاری مغناطیسی کره. فاصله بین پریندها ۰/۱ نانوتسلا، (ب) بی‌هنجاری مغناطیسی پس از ادامه فراسو. فاصله بین پریندها ۰/۱ نانوتسلا، (ج). دامنه سیگنال تحلیلی (AAS0). فاصله بین پریندها ۰/۲ نانوتسلا بر متر، (د) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه اول (AAS1). فاصله بین پریندها ۰/۰۰۵ نانوتسلا بر متر مربع و (ه) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه دوم (AAS2). فاصله بین پریندها ۰/۰۰۲ نانوتسلا بر متر مکعب.

جدول ۴. نتایج به دست آمده از داده‌های مغناطیسی منتقل شده به قطب.

| اندازه کمیت | کمیت‌های محاسبه شده |
|-------------|---|
| (۱۳,۱۸) | موقعیت افقی مقدار بیشینه $ AAS_0 $ (نقطه (x_0, y_0)) |
| ۰/۴۳۵ | مقدار $ AAS_0 _{(x_0, y_0)}$ |
| ۰/۱۴۴ | مقدار $ AAS_1 _{(x_0, y_0)}$ |
| ۰/۰۶۵ | مقدار $ AAS_2 _{(x_0, y_0)}$ |
| ۲ | سطح ادامه فراسو |
| ۹/۸۸ | عمق (z_0) |
| ۲/۹۵ | اندیس ساختاری (n) |
| ۱ | درصد خطای برآورد عمق |

جدول ۵. نتایج به دست آمده از داده‌های شبه‌گرانی.

| اندازه کمیت | کمیت‌های محاسبه شده |
|-------------|---|
| (۱۳,۱۸) | موقعیت افقی بیشینه $ AAS_0 $ (نقطه (x_0, y_0)) |
| ۰/۰۰۳ | مقدار $ AAS_0 _{(x_0, y_0)}$ |
| ۰/۰۰۰۹ | مقدار $ AAS_1 _{(x_0, y_0)}$ |
| ۰/۰۰۰۳۶ | مقدار $ AAS_2 _{(x_0, y_0)}$ |
| ۰ | سطح ادامه فراسو |
| ۹/۹ | عمق (z_0) |
| ۲ | اندیس ساختاری (n) |
| ۱ | درصد خطای برآورد عمق |

جدول ۶. نتایج به دست آمده از داده‌های مغناطیسی.

| منبع | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی | عمق (متر) | اندیس ساختاری |
|--------|---------------|---------------|----------------------------------|-----------|---------------|
| منبع ۱ | ۴۷۴۵۴۰ | ۴۲۰۸۴۴۰ | ۱۵/۱۶ | ۱۷۷ | ۲/۶۶ |
| منبع ۲ | ۴۷۴۳۷۰ | ۴۲۰۸۴۸۰ | ۲۰/۳۱ | ۱۴۷ | ۲/۹۳ |
| منبع ۳ | ۴۷۴۶۰۰ | ۴۲۰۸۵۰۰ | ۱۵/۶۶ | - | - |

جدول ۷. نتایج به دست آمده از داده‌های مغناطیسی منتقل شده به قطب.

| منبع | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی | عمق (متر) | اندیس ساختاری |
|--------|---------------|---------------|----------------------------------|-----------|---------------|
| منبع ۱ | ۴۷۴۵۶۰ | ۴۲۰۸۴۶۰ | ۲۶/۷۹ | ۱۶۵ | ۲/۷ |
| منبع ۲ | ۴۷۴۳۸۰ | ۴۲۰۸۵۰۰ | ۲۱/۵۷ | ۱۳۱ | ۲/۸۳ |

کاهش نامتقارنی بی‌هنجاری مغناطیسی باشد که این نامتقارنی منجر به تعیین سه منبع مجزا در شکل ۵-ج شده است. پس از محاسبه روابط روش AN-EUL در این نقاط مقادیر عمق و اندیس ساختاری مطابق جدول ۷ به دست می‌آیند. با توجه به شکل ۶-ب و مختصات محل نقاط بیشینه و مقایسه آنها با مختصات ذکر شده در جدول ۶، ملاحظه می‌شود که نقاط بیشینه یک جابه‌جایی نسبی به سمت مرکز بی‌هنجاری داشته‌اند.

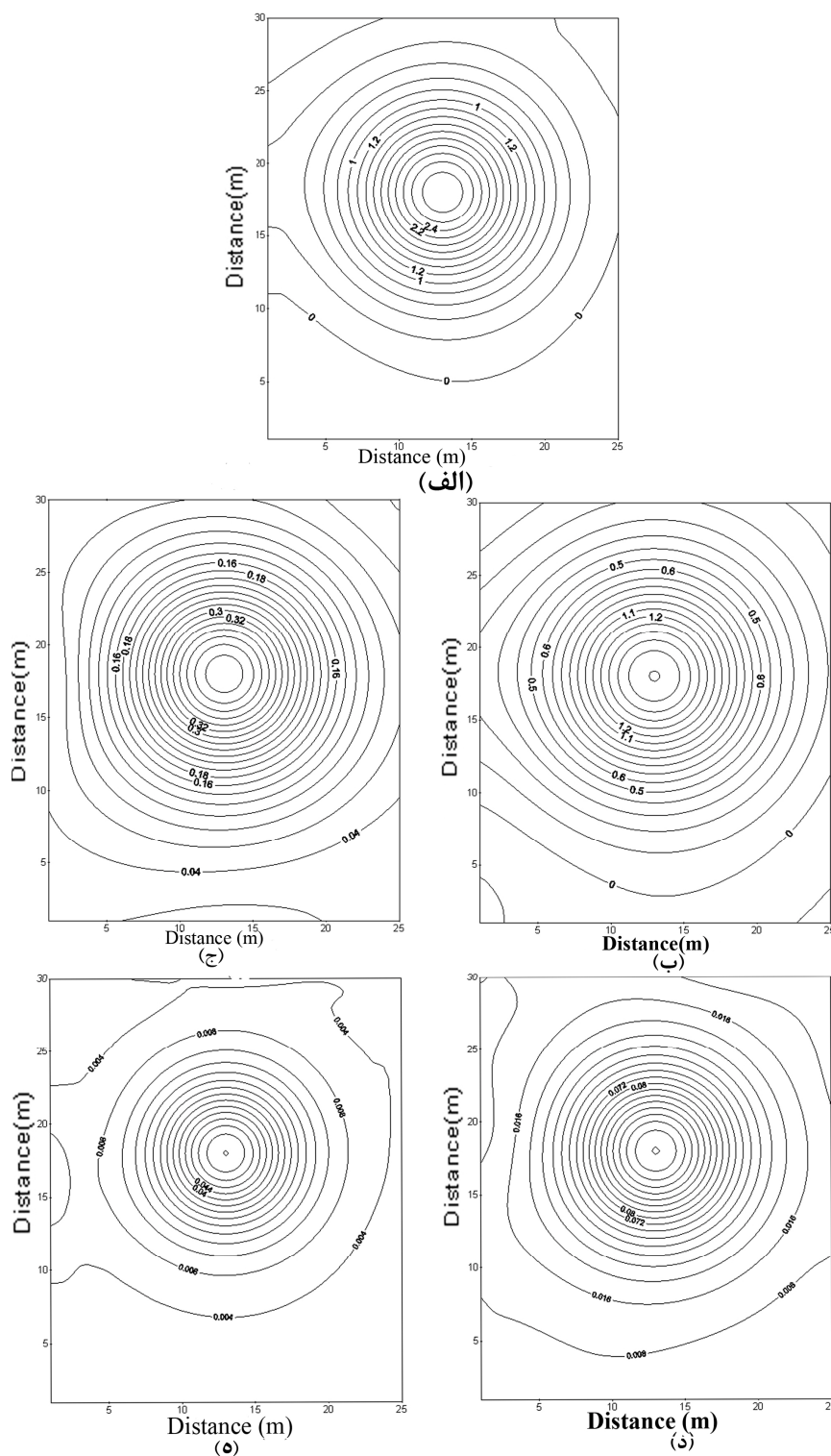
در مرحله آخر، روش AN-EUL روی داده‌های شبه گرانی اعمال می‌شود. تبدیل شبه گرانی بی‌هنجاری مغناطیسی باعث حذف وابستگی‌های جهتی دامنه سیگنال تحلیلی می‌شود و در نتیجه تعیین موقعیت منبع بر مبنای محل بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی با دقت بهتری نسبت به حالت اول صورت می‌گیرد. چون تبدیل شبه گرانی ماهیت فیلتر پایین‌گذر را نیز دارد، بنابراین ارتفاع سطح ادامه فراسو نسبت به داده‌های مغناطیسی و داده‌های مغناطیسی منتقل شده به قطب کمتر خواهد بود که این یک مزیت تبدیل شبه گرانی در مقایسه با انتقال به قطب است. شکل ۷-الف بی‌هنجاری شبه گرانی و شکل ۷-ب دامنه سیگنال تحلیلی بی‌هنجاری شبه گرانی را برای این داده‌های واقعی نشان می‌دهد. پس از محاسبه روابط روش AN-EUL در نقاط مشخص شده در شکل ۷-ب با مختصات بیان شده در جدول ۸، عمق و اندیس ساختاری مطابق جدول ۸ به دست می‌آید. لازم به ذکر است که ارتفاع سطح ادامه فراسو برای داده‌های شبه گرانی ۲۰ متر انتخاب شده است.

تضعیف بی‌هنجاری‌های سطحی در این شکل مشهود است. پس از محاسبه سیگنال تحلیلی بی‌هنجاری مغناطیسی، دامنه آن به صورت شکل ۵-ج خواهد بود. با استفاده از یک تابع (Function) نوشته شده در نرم‌افزار مطلب، سه نقطه بیشینه برای دامنه سیگنال تحلیلی بی‌هنجاری مغناطیسی به دست می‌آید. در واقع محل این بیشینه‌ها (که در شکل ۵-ج) با نقاطی مشخص شده‌اند) موقعیت تقریبی منبع‌ها را نشان می‌دهد. پس از محاسبه روابط (۴) و (۵) در این نقاط، اندیس ساختاری و عمق منبع‌ها مطابق جدول ۶ به دست می‌آیند. همچنین مختصات نقاطی که در آنجا دامنه سیگنال تحلیلی بیشینه است (در واقع محل تقریبی منبع‌ها) در این جدول ذکر شده است. مقادیری که برای عمق و اندیس ساختاری منبع ۳ به دست می‌آید قابل قبول نیست و احتمالاً نقطه ۳ یک منبع مجزا نیست.

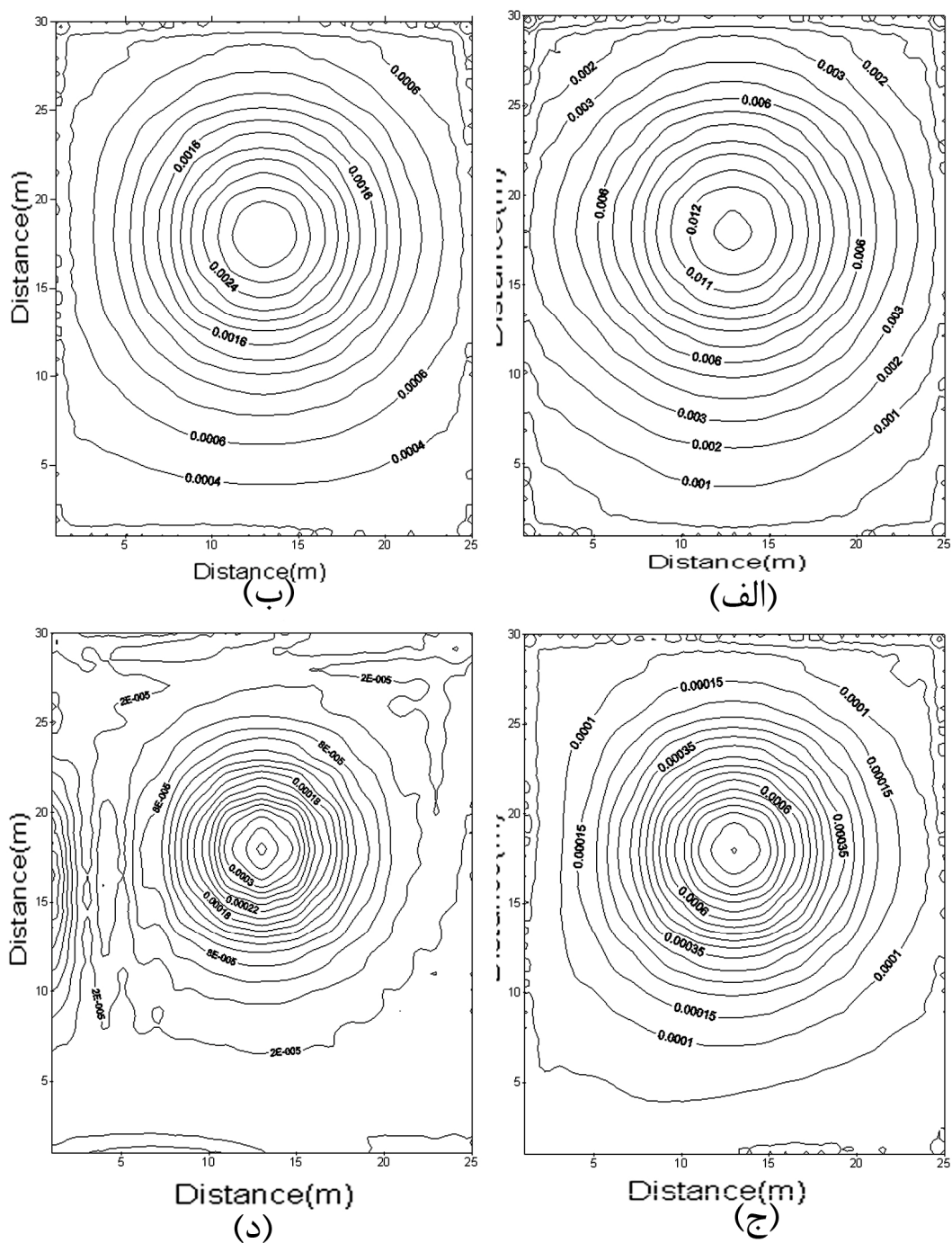
به منظور کاهش میزان جابه‌جایی (shift) نقاط بیشینه نسبت به محل منبع و در نتیجه برآورد بهتر محل منبع‌ها، داده‌های مغناطیسی (داده‌های مغناطیسی منتقل شده به ارتفاع ۴۰ متری) به قطب مغناطیسی منتقل می‌شوند، شکل ۶-الف. پس از محاسبه سیگنال تحلیلی بی‌هنجاری مغناطیسی منتقل شده به قطب، شکل دامنه سیگنال به صورت شکل ۶-ب به دست می‌آید. محل نقاط بیشینه یا به عبارت دیگر محل منبع‌ها در این شکل مشخص شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در این شکل فقط دو نقطه بیشینه وجود دارد که این ممکن است به دلیل

جدول ۸. نتایج به دست آمده از داده‌های شبه گرانی.

| منبع | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی | عمق (متر) | اندیس ساختاری |
|--------|---------------|---------------|----------------------------------|-----------|---------------|
| منبع ۱ | ۴۷۴۵۵۰ | ۴۲۰۸۴۶۰ | ۰/۰۰۰۱۷ | ۱۶۳ | ۱/۷۲ |
| منبع ۲ | ۴۷۴۳۹۰ | ۴۲۰۸۵۰۰ | ۰/۰۰۰۲۲ | ۱۲۹ | ۱/۸۴ |



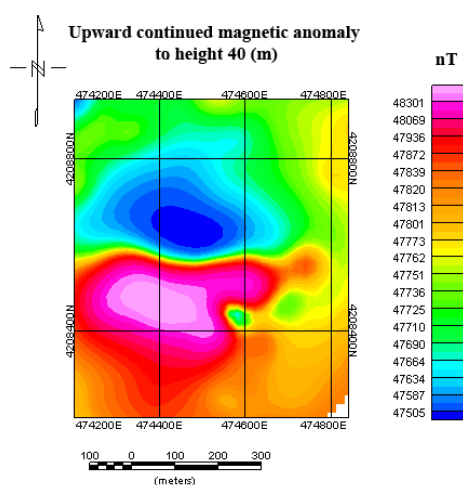
شکل ۳. (الف) بی‌هنجاری مغناطیسی کره پس از انتقال به قطب. فاصله بین پریندها ۰/۲ نانوتسلا است، (ب) بی‌هنجاری مغناطیسی منتقل شده به قطب پس از ادامه فراسو (فاصله بین پریندها ۰/۱ نانوتسلا است)، (ج) دامنه سیگنال تحلیل (AAS0). فاصله بین پریندها ۰/۰۲ نانوتسلا بر متر است، (د) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه اول (AAS1). فاصله بین پریندها ۰/۰۰۸ نانوتسلا بر متر مربع است و (ه) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه دوم (AAS2) فاصله بین پریندها ۰/۰۰۴ نانوتسلا بر متر مکعب است.



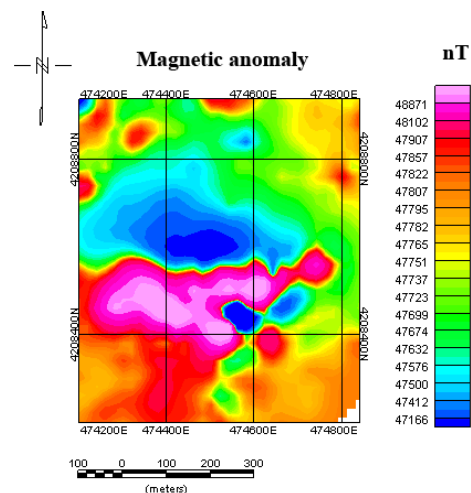
شکل ۴. (الف) بی‌هنجاری شبه‌گرانی کره. فاصله بین پربندها ۰/۰۰۱ میلی‌گال، (ب) دامنه سیگنال تحلیلی (AAS0). فاصله بین پربندها ۰/۰۰۰۲ میلی‌گال بر متر، (ج) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه اول (AAS1). فاصله بین پربندها ۰/۰۰۰۰۵ میلی‌گال بر متر مربع. (د) دامنه سیگنال تحلیلی مرتبه دوم (AAS2) فاصله بین پربندها ۰/۰۰۰۰۲ میلی‌گال بر متر مکعب.

یکدیگر دارند. بر مبنای این نتایج و با در نظر گرفتن نتایج گرفته شده از داده‌های مصنوعی، می‌توان گفت که مکان، عمق و اندیس ساختاری محاسبه شده از داده‌های منتقل شده به قطب و داده‌های شبه گرانی برای این داده‌های واقعی طبیعتاً در مقایسه با مکان، عمق و اندیس ساختاری به‌دست آمده از داده‌های مغناطیسی اولیه، از دقت بهتری برخوردار هستند.

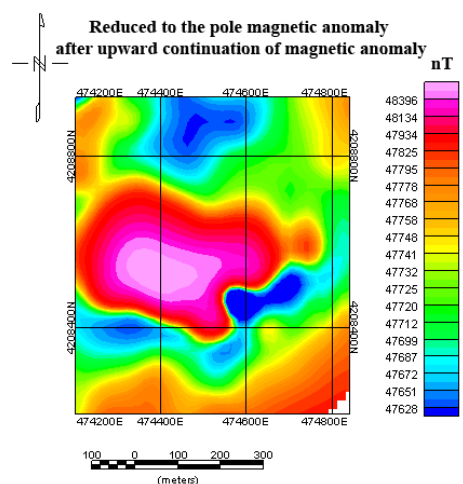
با توجه به مقادیر به‌دست آمده برای محل بیشینه‌های دامنه سیگنال تحلیلی‌های بی‌هنجاری مغناطیسی، بی‌هنجاری مغناطیسی منتقل شده به قطب و بی‌هنجاری شبه گرانی، ملاحظه می‌شود که مختصات به‌دست آمده برای محل منبع‌ها بر مبنای استفاده از داده‌های منتقل شده به قطب و داده‌های شبه گرانی در مقایسه با مختصات به‌دست آمده از داده‌های مغناطیسی، اختلاف کمتری با



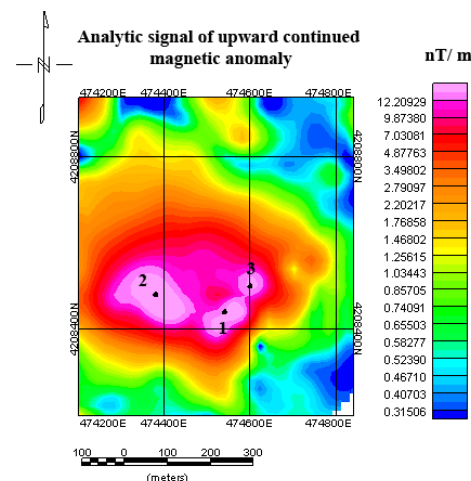
شکل ۵-ب. بی‌هنجاری مغناطیسی پس از ادامه فراسو.



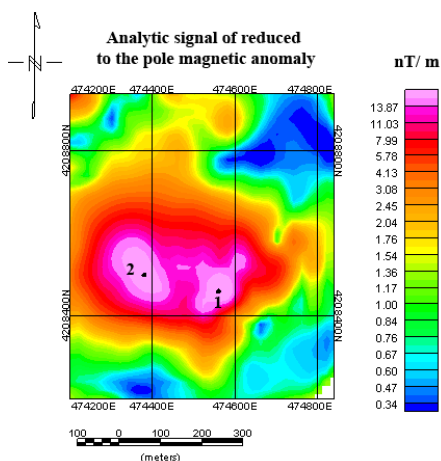
شکل ۵-ف. بی‌هنجاری مغناطیسی.



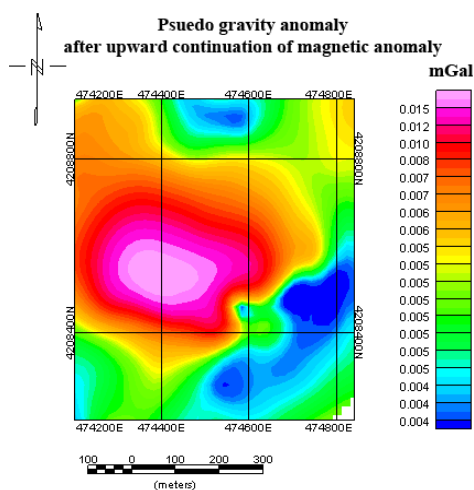
شکل ۶-الف. بی‌هنجاری مغناطیسی منتقل شده به قطب.



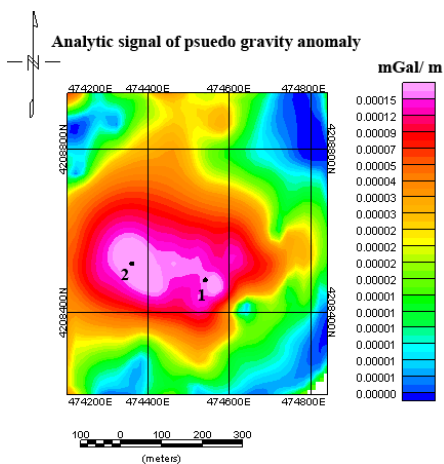
شکل ۵-ج. دامنه سیگنال تحلیلی بی‌هنجاری مغناطیسی. نقطه‌ها، محل بیشینه‌ها (محل تقریبی منبع‌ها) را نشان می‌دهند.



شکل ۶-ب. دامنه سیگنال تحلیلی بی‌هنجاری مغناطیسی منتقل شده به قطب. نقطه‌ها محل بیشینه‌ها (محل تقریبی منبع‌ها) را نشان می‌دهند.



شکل ۷-الف. بی‌هنجاری شبه گرانی پس از ادامه فراسو به ارتفاع ۲۰ متری.



شکل ۷-ب. دامنه سیگنال تحلیلی آنوالی شبه گرانی. نقطه‌ها، محل بیشینه‌ها (محل تقریبی منبع‌ها) را نشان می‌دهند.

۶ نتیجه‌گیری

منابع

- روش AN-EUL روشی خودکار برای برآورد عمق، شکل و محل منبع‌های مغناطیسی است. این روش برای داده‌های نیم‌رخ و شبکه‌ای کاربرد دارد. معادلات این روش از ترکیب مشتق‌های معادله همگن اولر و معادله سیگنال تحلیلی به دست می‌آید. با استفاده از این معادلات می‌توان عمق و اندیس ساختاری را در محل منبع محاسبه کرد. دامنه سیگنال تحلیلی روی منبع بیشینه است؛ بنابراین، موقعیت منبع را می‌توان با استفاده از محل مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی به‌طور برآورد شده تعیین کرد. در این روش برای کاهش اثر بی‌هنجاری‌های سطحی و نوفه‌ها، از ادامه فراسوی داده‌ها استفاده می‌شود.
- در روش AN-EUL معادلات برآورد عمق و اندیس ساختاری در محل منبع محاسبه می‌شوند و فرض بر این است که مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی روی منبع قرار دارد، در حالی که در مورد منبع‌های سه‌بعدی مقدار بیشینه دامنه سیگنال تحلیلی دقیقاً روی منبع قرار نمی‌گیرد و دارای انحراف افقی است. بنابراین، این عامل می‌تواند منجر به خطای محاسبه عمق و اندیس ساختاری شود. با استفاده از انتقال به قطب داده‌های مغناطیسی و تبدیل شبه‌گرانی، می‌توان خطای برآورد موقعیت منبع و در نتیجه خطای محاسبه عمق و اندیس ساختاری را تا حدی کاهش داد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مقادیر به دست آمده برای عمق، اندیس ساختاری و موقعیت منبع با استفاده از داده‌های شبه‌گرانی و داده‌های منتقل شده به قطب، دقت بیشتر و خطای کمتری دارد. اعمال روش روی داده‌های واقعی و مقایسه نتایج به دست آمده از داده‌های گوناگون نیز حاکی از این است که استفاده از داده‌های منتقل شده به قطب و داده‌های شبه‌گرانی در روش AN-EUL می‌تواند منجر به نتایج بهتری شود.
- بنی‌عامریان، ج.، ۱۳۸۸، روش ترکیبی سیگنال تحلیلی و واهمامیخت اولر (AN-EUL) 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.
- Blakely, R. J., 1995, *Potential theory in gravity and magnetic applications*: Cambridge University Press.
- Bastani, M., 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.
- Hsu, S. K., 2002, Imaging magnetic sources using Eulers equation: *Geophysical Prospecting*, **50**, 15-25.
- 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.
- 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.
- Nabighian, M. N., 1974, Additional comments on the analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: *Geophysics*, **39**, 85–92.

- 1992, Magnetic interpretation using 3-D analytic signal: *Geophysics*, **57**, 116–125.
- Salem, A., and Ravat, D., 2003, A combined analytic signal and Euler method (AN-EUL) for automatic interpretation of magnetic data: *Geophysics*, **68**, 1952–1961.
- Salem, A., Ravat, D., Gamey, T. J., and Ushijima, K., 2002, Analytic signal approach and its applicability in environmental magnetic investigations: *J. Appl. Geophys.*, **49**, 231–244.
- Thompson, D. T., 1982, EULDEPH: A new technique for making Computer-assisted depth estimates from magnetic data: *Geophysics*, **47**, 31-37.
- Nabighian, M. N., 1984, Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential-field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations: *Geophysics*, **49**, 780–786.
- Ravat, D., 1996, Analysis of the Euler method and its applicability in environmental magnetic investigations: *J. Environmental Eng., Geophys.*, **1**, 229–238.
- Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Millet, A. J., and Somerton, I. W., 1990, Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution: *Geophysics*, **55**, 80–91.
- Roest, W. R., Verhoef, J., and Pilkington, M.,