

بررسی ارتباط بین میدان‌های پتانسیل ادامه فراسو شده با عمق قرارگیری توده‌های معدنی با بررسی موردی در معدن سنگ‌آهن گل‌گهر

عبدالحمید انصاری^{۱*}، حسینعلی قاری^۲، کمال علمدار^۳ و سعید مرادی^۴

^۱دانشیار ژئوفیزیک اکتشافی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

^۳دانش‌آموخته کارشناسی ارشد اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

^۴دانش‌آموخته کارشناسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۸/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۷/۶، دسترسی برخط: ۱۳۹۰/۱۲/۲۵)

چکیده

در تبدیل ادامه فراسو میدان پتانسیل اندازه‌گیری شده در سطحی بالاتر از سطح اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شود. در این نوشتار روشی معرفی می‌شود که در آن، فاصله کمینه و بیشینه مربوط به بی‌هنجاری (آنومالی) مغناطیسی و نیز مربوط به نمودارهای ادامه فراسو شده محاسبه و پارامتری به نام شاخص Q (شاخصی که شکل بی‌هنجاری مغناطیسی حاصل را کنترل می‌کند) تعیین می‌شود. سپس با داشتن مقدار Q و روش عرضه شده در این پژوهش، برآوردی از عمق تا توده مولد بی‌هنجاری مغناطیسی حاصل می‌شود. در این تحقیق صحت روش فوق روی داده‌های مدل مصنوعی استوانه افقی و نیز روی داده‌های ۲ نیم‌رخ بی‌هنجاری مغناطیسی شماره ۲ سنگ‌آهن گل‌گهر سیرجان آزمایش شده است. عمق‌های به‌دست آمده از این روش با عمق مدل فرضی و نیز عمق به‌دست آمده از حفاری‌های اکتشافی در منطقه گل‌گهر هماهنگی دارند. بنابراین، می‌توان در پروژه‌های عملی مغناطیس‌سنجی، از این روش در تعیین عمق توده‌های سبب شونده استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: میدان پتانسیل، مغناطیس‌سنجی، ادامه فراسو، شاخص Q، بی‌هنجاری گل‌گهر

Investigation of the relationship between upward continued potential fields and depth of the causative bodies: a case study from Gol-Gohar Iron ore mine

Abdolhamid Ansari^{1*}, Ghari Hosseinali¹, Kamal Alamdar¹ and Saeed Moradi¹

¹Department of Mining and Metallurgy Engineering, Yazd University, Iran

(Received: 21 November 2009, accepted: 28 September 2011, available online: 15 March 2012)

Summary

Gravity and magnetic methods are potential field methods and are currently used for a wide range of applications and scales in geosciences. Traditionally, they have been used for large scale investigations of geologic structures. Smaller-scale applications of gravity and magnetic methods are employed for mining exploration, environmental research, and engineering studies.

Spatial and frequency domain filtering, image processing and managing grids are essential tools in gravity and magnetic data interpretation. A potential field or image processing filter highlights different aspects of potential field data. Filters can emphasize boundaries between geological contacts, highlight deeper or shallower sources, highlight features from different angles, or reduce undesirable effects within the dataset. Filtering procedure can be undertaken in the frequency domain by means of Fourier Transform (FT) or in the spatial domain by convolution. Frequency domain filtering involves converting the dataset into the frequency domain, performing an operation on the data by applying the appropriate filter, and then transforming the data back to the spatial domain. The most commonly used frequency domain filters include reduction to pole, pseudo gravity transformation, analytical continuations, and derivative filters. Convolution methods involve convolving a filter impulse response (filter coefficients) with the dataset.

Gradient methods use the derivatives (gradients) of the field in their calculations and include the Euler deconvolution, analytic signal, and horizontal gradient. In gradient methods, the total field is measured simultaneously at two elevations by using two sensors separated by a fixed distance. The difference in magnetic intensity between the two sensors divided by the distance between them is the vertical gradient. Using a Fast Fourier Transform (FFT) in calculating the derivatives (two horizontal and one vertical) of the field makes these methods more advanced. In the early 1970s, a variety of automatic and semiautomatic methods, based on the use of the gradients of the potential field, were developed as efficient tools for determining geometric parameters, such as the locations of boundaries and the depths of the causative sources.

Researchers have proposed several methods to find the depth using infinitely extended horizontal cylinders, which represent a class of geological structures. Radhakrishna Murthy (1985) interpreted the magnetic anomaly as being caused by dikes and faults using the displacement of the midpoint of the maximum and minimum anomalies if anomalies continued to a height h . In this case, the midpoint shifted a small distance, whereas the maximum and minimum were displaced more pronouncedly than was the midpoint.

In the upward continuation process, the measured potential field is transformed into another surface further away from the source. In this paper, we introduce a method based on relationship between the maximum and minimum values of the measured anomaly and the continued anomaly in different heights.

The general expression for the magnetic anomaly (vertical, horizontal and total) observed at a point P along the x-axis due to an infinitely extended horizontal cylinder is given by

$$\Delta F(x) = C \frac{(z^2 - x^2) \cos Q + 2zx \sin Q}{(z^2 + x^2)^2}, \quad (1)$$

where C and Q are the amplitude coefficient and the index parameter, respectively.

Since at the maximum and minimum values of a function the first derivative is equal to zero, by differentiating equation (1) with respect to x and setting it equal to zero, the extreme points of the $\Delta F(x)$ are determined. Subsequently, the parameter, Q, which controls the anomaly pattern, is determined. Consequently, the depth-to-top of the causative body is estimated from the parameter Q by means of the equation below:

$$Z = \frac{\max U_p - \min U_p}{\tan\left(\frac{Q}{3}\right) - \tan\left(\frac{Q - 270}{3}\right)} - h, \quad (2)$$

This method has been applied successfully to synthetic magnetic data related to horizontal cylinders and to data from two magnetic profiles from magnetic anomaly No. 2 in Gol-Gohar mining areas as well. The determined depth associated with the Gol-Gohar body has a broad correlation with those determined by exploration drilling. Therefore, this method can be applied practically in depth estimation of the magnetic causative body.

Key words: Potential field, magnetic surveying, upward continuation, Q index, Gol-Gohar anomaly

۱ مقدمه

موفقیت روی داده‌های مغناطیسی مصنوعی مدل استوانه افقی و همچنین، داده‌های مغناطیسی واقعی بی‌هنجاری شماره ۲ معدن گل گهر سیرجان به کار برده شده است.

مهم‌ترین پارامتری که در مرحله تفسیر کمی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی تعیین می‌شود عمق تا توده مولد است. یکی از تبدیلات مهم در تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی، تبدیل ادامه فراسو است. در این تبدیل داده‌های مغناطیسی اندازه‌گیری شده در سطحی بالاتر از سطح اندازه‌گیری محاسبه می‌شود (بلکلی، ۱۹۹۶؛ زنگ و زو، ۲۰۰۱). در واقع در تفسیر اکثر طرح‌های مغناطیسی، از این تبدیل در حکم ابزاری برای کاهش نوفه و تعیین گسترش عمقی توده استفاده می‌شود ولی این کاربرد منجر به برآورد دقیقی از عمق قرارگیری توده نمی‌شود. ردها کریشنا مورتی، (۱۹۸۵) با بررسی مقدار جابه‌جایی بین نقطه میانی بیشینه و کمینه بی‌هنجاری مغناطیسی در ارتفاع‌های متفاوت ادامه فراسو به تفسیر بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از دایک و گسل پرداخت. محدودیت این روش دشواری اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی نقطه میانی بیشینه و کمینه است (میتنی، ۱۹۹۱؛ زنگ و همکاران، ۲۰۰۸).

۲ نظریه روش

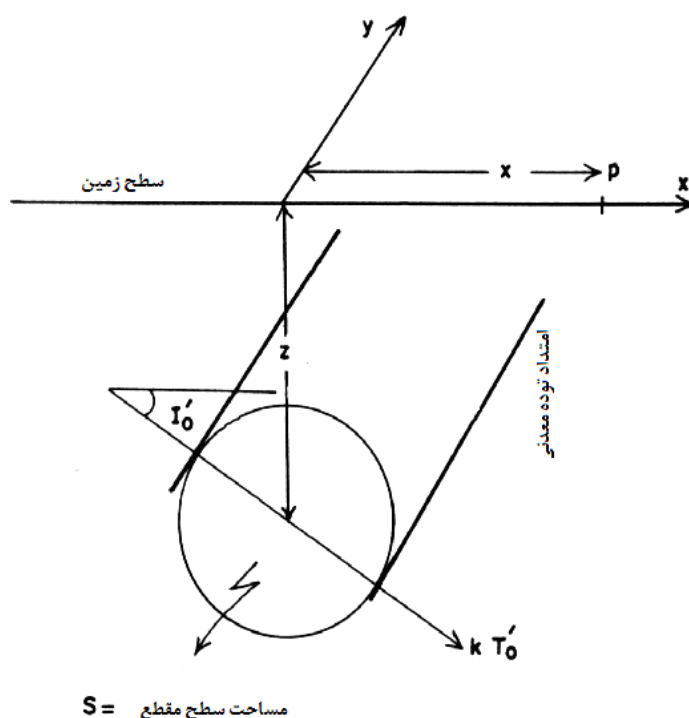
پاسخ مغناطیسی ناشی از یک مدل استوانه افقی با گسترش نامحدود در نقطه P در امتداد محور X از رابطه (۱) نتیجه می‌شود (جیان، ۱۹۷۶).

$$\Delta F(x) = C \frac{(z^2 - x^2) \cdot \cos Q + 2zx \sin Q}{(z^2 + x^2)^2}, \quad (1)$$

که در آن، C و Q به ترتیب ضریب دامنه و پارامتر شاخص (پارامتری که شکل بی‌هنجاری را در حالت‌های متفاوت کنترل می‌کند) هستند و مقادیر آن‌ها برای مؤلفه‌های افقی، قائم و کل پاسخ مغناطیسی مدل استوانه افقی در جدول ۱ آمده است.

در این مورد مدل در عمق Z از سطح زمین قرار دارد و امتداد آن در راستای محور Y تا بی‌نهایت ادامه دارد. مقطع عمودی مدل در صفحه $X-Z$ قرار دارد و مبدأ دستگاه مختصات مستقیماً روی مرکز توده در بالای آن انتخاب می‌شود. مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها در راستای محور X صورت می‌گیرد (شکل ۱).

در این نوشته از جابه‌جایی بین مقادیر بیشینه و کمینه نیم‌رخ مغناطیسی برداشت شده و نیم‌رخ‌های ادامه فراسو در ارتفاع‌های متفاوت به منظور برآورد عمق توده مولد بی‌هنجاری مغناطیسی استفاده می‌شود. این روش با



شکل ۱. هندسه مدل استوانه افقی با امتداد نامحدود که در راستای میدان مغناطیسی زمین مغناطیده شده است.

جدول ۱. مقادیر معادل ضریب دامنه (C) و پارامتر شاخص (Q) در امتداد قائم (ΔV)، افقی (ΔH) و مجموع (ΔT) بی‌هنجاری مغناطیسی برای استوانه افقی.

آنومالی	ضریب دامنه (C)	پارامتر شاخص (Q)
ΔV	$2kT'_0S$	$I'_0 - 90^\circ$
ΔH	$2kT'_0S \sin \alpha$	$I'_0 - 180^\circ$
ΔT	$2kT'_0S \frac{\sin I_0}{\sin I'_0}$	$2I'_0 - 180^\circ$

منظور از زاویه میل و شدت مؤثر مقادیر مربوط به مغناطیس‌شدگی القایی توده است درحالی‌که زاویه میل و شدت حقیقی مربوط به مغناطیس‌شدگی کل توده است (کارا و همکاران، ۲۰۰۳)

$$I'_0 = \tan^{-1}(\tan I_0 / \sin \alpha), \quad (2)$$

$$T'_0 = T_0 \sin I_0 / \sin I'_0, \quad (3)$$

در جدول ۱، K ضریب خودپذیری مغناطیسی، S مساحت سطح مقطع مدل استوانه افقی و α امتداد استوانه افقی است که به‌طور ساعت‌گرد نسبت به جهت شمال سنجیده می‌شود. مقادیر I'_0 و T'_0 به ترتیب بیانگر شدت و زاویه میل مؤثر است که رابطه آن‌ها با مقادیر حقیقی زاویه میل و انحراف در معادلات (۲) و (۳) آمده است.

$$Xh,1 = (Z + h) \tan(Q/3), \quad (8)$$

$$Xh,2 = (Z + h) \tan(Q - \pi/3), \quad (9)$$

با استفاده از روابط (۵)، (۶)، (۸) و (۹) دو رابطه برای برآورد پارامتر شاخص مدل استوانه افقی به ترتیب زیر نتیجه می‌شود:

$$Q = 3 \tan^{-1}[(Xh,1 - X_{0,1})/h], \quad (10)$$

$$Q = 3 \tan^{-1}[(Xh,2 - X_{0,2})/h] + \pi, \quad (11)$$

که در آن، x_{01} و x_{02} به ترتیب فواصل نقاط بیشینه و کمینه شدت بی‌هنجاری و $Xh,1$ و $Xh,2$ به ترتیب فواصل نقاط بیشینه و کمینه شدت بی‌هنجاری ادامه فراسو هستند.

مقدار پارامتر شاخص حاصل از روابط (۱۰) و (۱۱)

بین ۰ تا ۹۰ درجه تعیین خواهد شد، لذا، مقدار حقیقی این پارامتر با استفاده از دستورالعمل‌های زیر نتیجه می‌شود:

- در صورتی که قسمت مثبت بی‌هنجاری در طرف مثبت محور X قرار داشته باشد مقدار Q بدون تغییر استفاده خواهد شد.

- در صورتی که قسمت مثبت بی‌هنجاری در طرف منفی محور X قرار داشته باشد مقدار Q با علامت قرینه استفاده خواهد شد.

- در صورتی که قسمت منفی بی‌هنجاری در طرف مثبت محور X قرار داشته باشد مقدار Q با عدد ۱۸۰ درجه جمع خواهد شد.

- در صورتی که قسمت منفی بی‌هنجاری در طرف منفی محور X قرار داشته باشد مقدار Q با عدد ۱۸۰- درجه جمع خواهد شد.

در نهایت با تعیین پارامتر Q طبق دستورالعمل فوق، با استفاده از رابطه زیر برآوردی از عمق توده حاصل خواهد شد.

همان‌طور که گفته شد، اساس روش، اندازه‌گیری جابه‌جایی افقی بین بیشینه و کمینه مقدار بی‌هنجاری مغناطیسی مشاهده‌ای و نیم‌رخ‌های ادامه فراسو در ارتفاع‌های متفاوت است. برای بررسی رابطه بین عمق توده و این میزان جابه‌جایی از رابطه (۱) استفاده می‌شود. برطبق تعاریف ریاضی در مبحث تعیین نقاط اکسترمم توابع، مقدار مشتق مرتبه اول تابع در نقاط اکسترمم (بیشینه و کمینه) صفر است. در نتیجه با مشتق گرفتن از رابطه (۱) نسبت به X و مساوی صفر قرار دادن به رابطه زیر می‌رسیم (کارا و همکاران، ۲۰۰۳):

$$X^3 - (3.Z.\tan Q).X^2 - (3.Z^2).X + Z^3.\tan Q = 0 \quad (4)$$

با حل این معادله درجه سه جواب‌های زیر نتیجه خواهد شد (کارا و همکاران، ۲۰۰۳):

$$X_{01} = Z \tan\left(\frac{Q}{3}\right), \quad (5)$$

$$X_{02} = Z \tan\left[\frac{Q-\pi}{3}\right], \quad (6)$$

$$X_{03} = Z \tan\left[\frac{Q+\pi}{3}\right], \quad (7)$$

که در آن، مقادیر x_{01} و x_{02} به ترتیب بیانگر فواصل وقوع بیشینه و کمینه مقدار تابع رابطه (۱) هستند. جواب سوم x_{03} در نقطه‌ای بسیار دور از مبدأ واقع می‌شود در نتیجه عملاً در محاسبات نقشی ندارد.

حال اگر بی‌هنجاری مشاهده‌ای ناشی از رابطه (۱) تا ارتفاع h به طرف بالا منتقل شود آن‌گاه موقعیت بیشینه و کمینه آن نسبت به نیم‌رخ مشاهده‌ای جابه‌جا خواهد شد (برگرون و همکاران، ۱۹۹۰؛ زو و زنگ، ۲۰۰۰). برای بی‌هنجاری ادامه فراسو جواب‌های معادله مشتق به صورت روابط زیر نوشته می‌شود (زنگ و همکاران، ۲۰۰۸):

آن $29/4^\circ$ به دست آمد که مقدار میانگین آن 30° است. عمق محاسبه شده از رابطه (۱۲) برابر $Z=290/02$ متر است. همان طور که مشاهده می شود عمق به دست آمده هماهنگی نزدیکی با عمق واقعی مدل دارد. قابل ذکر است که مقدار تفاوت مختصر بین عمق محاسبه شده با عمق واقعی مدل ناشی از خطای دید موجود در تعیین محل و خواندن مقادیر بیشینه و کمینه است.

به منظور بررسی اثر نوفه های محیطی روی نتایج روش پیش گفته، مدل استوانه افقی دیگری به شعاع 150 متر در عمق 300 متری را در نظر می گیریم. بی هنجاری مغناطیسی مدل به ازای زاویه میل و انحراف به ترتیب 70° و 30° درجه تولید شده و نوفه ای با توزیع استاندارد و میانگین و انحراف استاندارد به ترتیب برابر با $0/5$ و 1 نانو تسلا به آن اضافه شده است. شکل ۳ نقشه پاسخ مغناطیسی مدل استوانه افقی را به صورت خط توپر نشان می دهد. نیم رخ مربوط به ادامه فراسو در ارتفاع 50 متری نیز در شکل ۳ و با خط چین نشان داده شده است. مطابق با شکل ۳ اختلاف بین نقاط بیشینه نیم رخ های بی هنجاری مشاهده ای و ادامه فراسو $(X_{o,1} - X_{h,1})$ برابر با $0/19$ متر و اختلاف بین نقاط کمینه دو نیم رخ $(X_{o,2} - X_{h,2})$ برابر با $0/39$ متر تعیین شده است. از رابطه (۱۰) مقدار $Q=32/6^\circ$ و از رابطه (۱۱) مقدار آن $Q=28.34^\circ$ به دست آمد که مقدار میانگین آن $30/47^\circ$ است. عمق محاسبه شده از رابطه (۱۲) برابر $Z=283/22$ متر است. اختلاف بین مقدار عمق برآوردی با عمق واقعی مدل می تواند به سه دلیل ایجاد شود. دلیل اول اضافه شدن نوفه به داده های مغناطیسی است. دلیل دوم می تواند ناشی از کوچک تر بودن ابعاد توده (شعاع توده) در مقایسه با عمق آن باشد و دلیل سوم خطای موجود در تعیین و خوانش نقاط بیشینه و کمینه نیم رخ مغناطیسی و ادامه فراسو شده است.

$$Z = \frac{\max Up - \min Up}{\tan(\frac{Q}{3}) - \tan(\frac{Q-270}{3})} - h, \quad (12)$$

که در آن، Z عمق توده مولد، $\max Up$ بیشینه مقدار ادامه فراسو، $\min Up$ کمینه مقدار ادامه فراسو، Q پارامتر شاخص که با روابط (۱۰) و (۱۱) تعیین می شود و h ارتفاع ادامه فراسو مربوط به نیم رخ مورد تفسیر است.

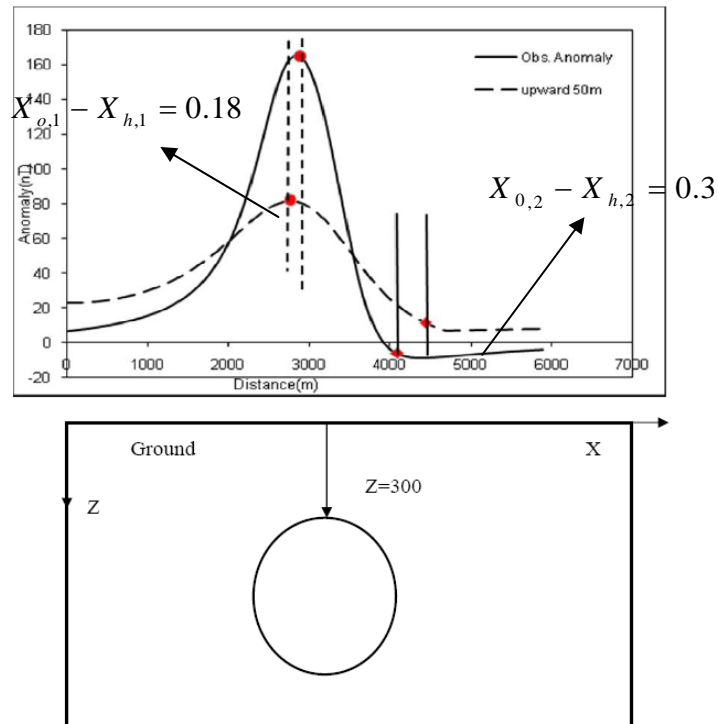
با توجه به اینکه در فرمول فوق Q باید بر حسب درجه باشد لذا، باید در همه مراحل محاسبات مقدار زاویه را بر حسب درجه قرار دهیم و هر جا لازم باشد رادیان را به درجه تبدیل کنیم.

ضمناً چون فقط یک مقدار Q بین 90° تا 0° درجه قابل قبول است لذا، باید دقت لازم را داشته باشیم تا اعداد خارج از محدوده وارد فرمول ها نشوند.

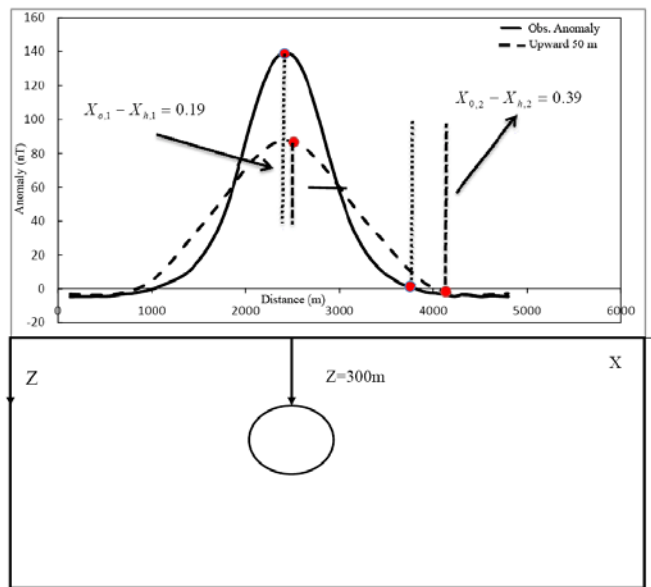
۳ کاربرد روی داده های مغناطیسی مصنوعی مدل استوانه افقی

در این قسمت روش پیش گفته روی پاسخ مغناطیسی یک مدل استوانه افقی به کار برده می شود. بی هنجاری مغناطیسی مدل به ازای زاویه میل و انحراف به ترتیب 70° و 30° درجه تولید شده است. مدل پیش گفته با شعاع 300 متر در عمق 300 متری از سطح زمین قرار دارد و امتداد آن با راستای شمال زاویه 35° درجه می سازد. شکل ۲ مقطع شمالی-جنوبی پاسخ مغناطیسی مدل را به صورت خط توپر نشان می دهد. نیم رخ ادامه فراسو مربوط به مدل در ارتفاع 50 متری با خط چین نشان داده شده است.

از روی شکل اختلاف بین نقاط بیشینه نیم رخ های بی هنجاری مشاهده ای و ادامه فراسو $(X_{o,1} - X_{h,1})$ برابر با $0/18$ متر و اختلاف بین نقاط کمینه دو نیم رخ $(X_{o,2} - X_{h,2})$ برابر با $0/3$ متر تعیین شده است. از رابطه (۱۰) مقدار $Q=30.6^\circ$ و از رابطه (۱۱) مقدار



شکل ۲. نیم‌رخ بی‌هنجاری مغناطیسی روی یک استوانه افقی به شعاع ۳۰۰ متر در عمق ۳۰۰ متری.



شکل ۳. نیم‌رخ بی‌هنجاری مغناطیسی روی یک استوانه افقی به شعاع ۱۵۰ متر در عمق ۳۰۰ متری در حالتی که داده‌ها با نوفه آلوده شده‌اند.

را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، عمق روباره در نیمه جنوبی نیم‌رخ ۸ حدود ۱۲۷ متر و در نیمه جنوبی نیم‌رخ ۱۴ بین ۸۰ تا ۹۵ متر به دست آمده است. در این قسمت کاربرد روش پیش‌گفته در برآورد عمق در راستای یکی از خطوط برداشت (نیم‌رخ شماره ۸) مغناطیس‌سنجی منطقه گل‌گهر آمده است. نکته‌ای که در انتخاب نیم‌رخ‌ها باید بدان توجه کرد این است که نیم‌رخ‌های مشاهده‌ای دارای کمینه و بیشینه مشخص باشند. شکل ۶ نیم‌رخ مغناطیس‌سنجی شماره ۸ را نشان می‌دهد. در ابتدا این نیم‌رخ در ارتفاع‌های متفاوت ادامه فراسو شد (شکل ۷) که نتایج نقاط بیشینه و کمینه و همچنین، مقادیر پارامتر Q در جدول ۲ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار شدت میدان با افزایش ارتفاع ادامه فراسو کاهش می‌یابد. در مرحله بعد با استفاده از مقادیر Q و رابطه (۱۲) عمق توده مولد تعیین شد که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. مقدار عمق برآوردی از این روش مربوط به این نیم‌رخ با میانگین‌گیری از مقادیر جدول ۳ نتیجه می‌شود که برابر است با:

$$Z = \frac{139.037 + 128.808 + 132.302 + 130.934}{4} \quad (13)$$

$$= 132.0203$$

و در مقایسه با عمق واقعی توده (۱۲۷ متر که در حفاری‌ها تعیین شده است) دقت برآورد قابل قبول است. اعمال این روش روی داده‌های خط برداشت ۱۴ نیز عمق توده معدنی را ۸۴ متر به دست داده است. لازم به ذکر است که دلیل وجود اختلاف در مقدار عمق محاسبه شده با عمق واقعی، مربوط به خطای ناشی از تعیین محل و خوانش پارامترهای رابطه (۱۲) است. از سوی دیگر باید در نظر داشت که عمق محاسبه شده با این روش عمق متوسط در طول خط برداشت است درحالی‌که عمق به دست آمده در حفاری اکتشافی مربوط به یک نقطه معین روی خط برداشت است.

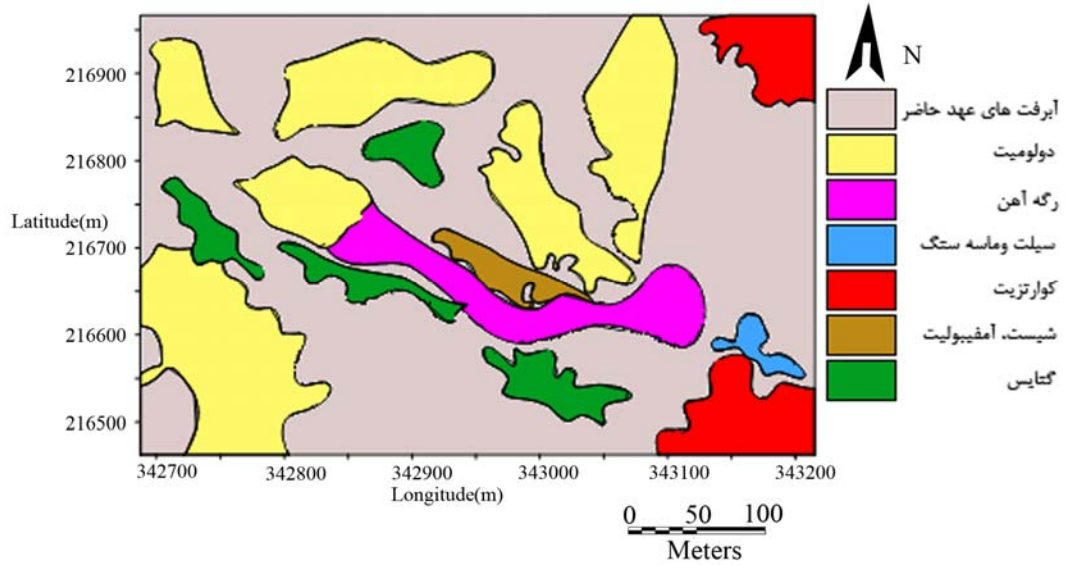
۴ کاربرد روی داده‌های مغناطیسی بی‌هنجاری شماره ۲ گل‌گهر سیرجان

معدن سنگ آهن گل‌گهر در ۴۵ کیلومتری جاده سیرجان- شیراز واقع است و با برخورداری از شش بی‌هنجاری با وسعت محلی ۷۰۰ هکتار یکی از ذخایر مهم سنگ آهن ایران است، که در مجموع بیش از ۱/۱۳۵/۰۰۰/۰۰۰ تُن ذخیره دارد. توده شماره ۲ یکی از توده‌های مهم این معدن است.

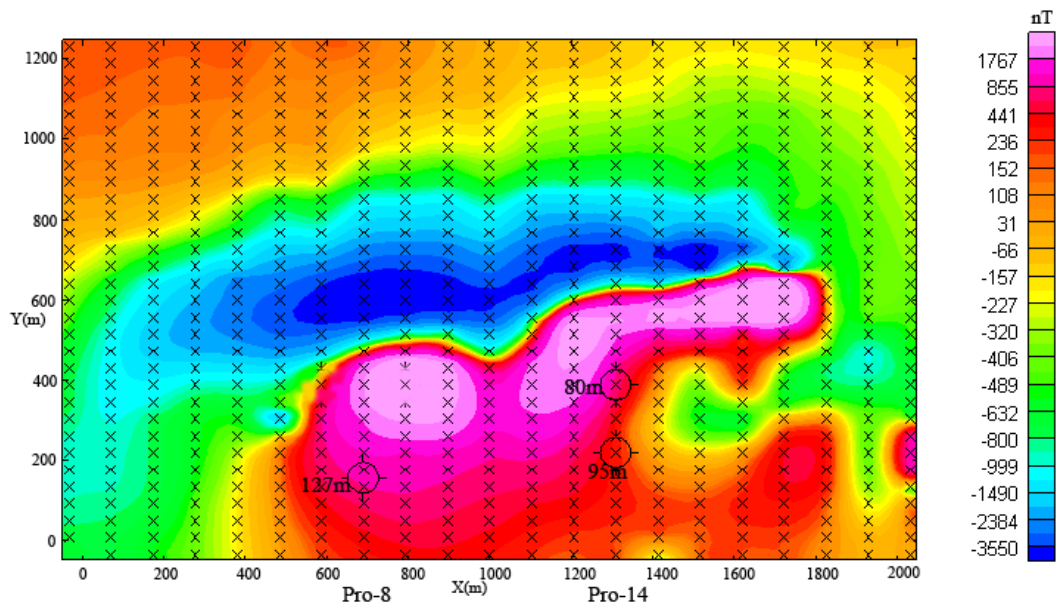
ناحیه گل‌گهر عمدتاً از آبرفت‌های عهد حاضر پوشیده شده است و ارتفاعات معدودی که رخنمون دارند شامل سنگ‌های دگرگونی پالئوزوئیک در جنوب و جنوب غرب معدن و سنگ‌های رسوبی مزوزوئیک و سنوزوئیک در شرق معدن هستند. سنگ‌های پالئوزوئیک شامل کمپلکس گل‌گهر است که این مجموعه قدیمی‌ترین مجموعه دگرگونی این منطقه را تشکیل می‌دهد.

ذخایر شش‌گانه سنگ آهن در این کمپلکس قرار گرفته است. بخش تحتانی این کمپلکس شامل تناوبی از گنایس، میکاشیست، آمفیولیت و کوارتز شیست است. روی این بخش تناوبی از مرمرهای دولومیتی، کلسیتی، میکاشیست، شیست سبز و گرافیت شیست قرار گرفته است. این مجموعه به یک واحد مرمری دولومیتی یا کلسیتی که در سراسر کمربند سنندج - سیرجان به نام کرسفید نامیده می‌شود مربوط است. بیرون‌زدگی رسوبات مزوزوئیک عمدتاً در شمال شرق معدن قابل مشاهده است. در شکل ۴ نقشه زمین‌شناسی ساده شده ناحیه گل‌گهر آمده است.

شکل ۵ نقشه هم‌مقدار مغناطیسی بی‌هنجاری شماره ۲ گل‌گهر را نشان می‌دهد که در آن، مقادیر میدان مغناطیس مرجع (IGRF) از مقادیر اندازه‌گیری کم شده است. اعداد روی نقشه نتایج حفاری‌های اکتشافی صورت گرفته است که هر کدام عمق تا بالای توده مولد منطقه گل‌گهر



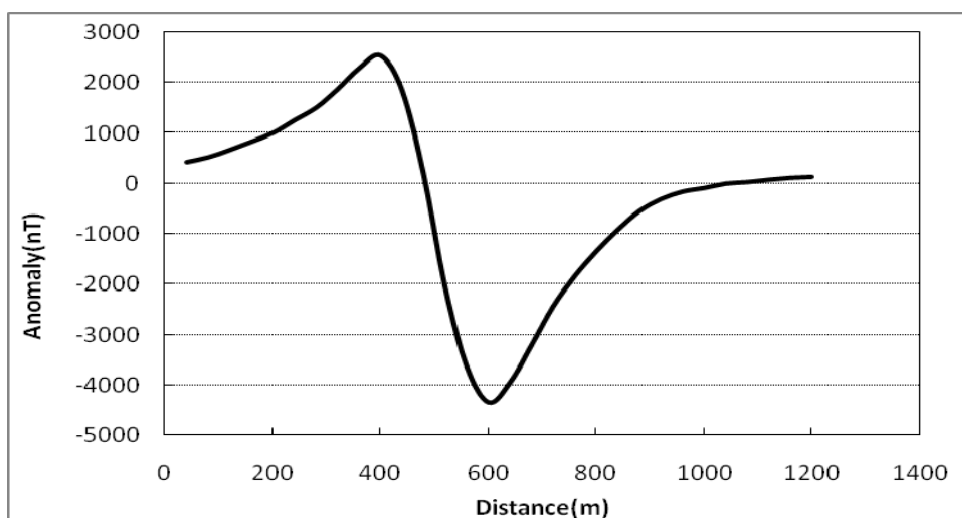
شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه مورد بررسی.



شکل ۵. نقشه هم‌مقدار مغناطیسی مربوط به توده شماره ۲ معدن آهن گل گهر سیرجان (مقادیر میدان ناحیه‌ای IGRF از مقادیر اندازه‌گیری کسر شده است). دایره‌های مشخص شده و اعداد کنار آن‌ها محل حفاری‌های اکتشافی و ضخامت روباره آبرفتی بر روی توده سنگ آهن را نشان می‌دهند.

جدول ۲. تعیین پارامتر Q به ازای مقادیر متفاوت ارتفاع ادامه فراسو برای نیم‌رخ مغناطیس‌سنجی ۸ منطقه گل‌گهر.

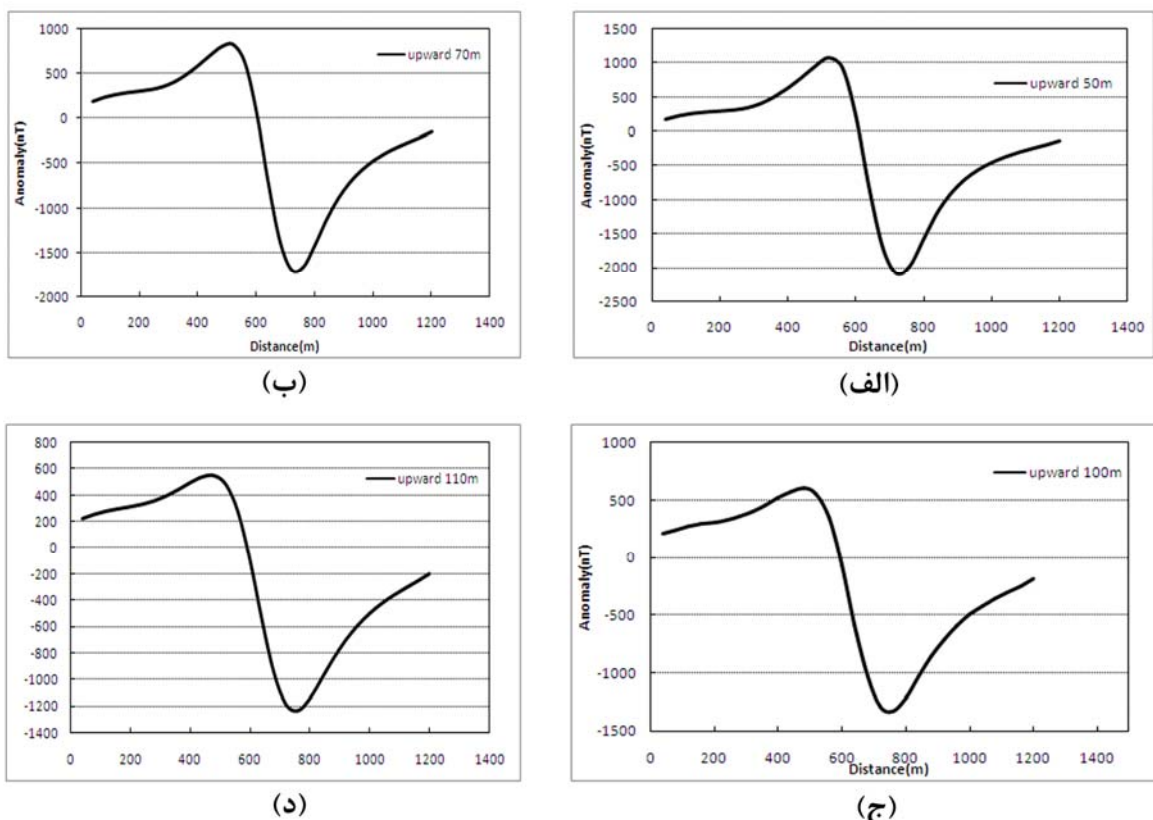
مقدار ادامه فراسو $h(m)$	بیشینه ادامه فراسو $X_{h,1}(m)$	کمینه ادامه فراسو $X_{h,2}(m)$	بیشینه بی‌هنجاری $X_{0,1}(m)$	کمینه بی‌هنجاری $X_{0,2}(m)$	Q
۵۰	۳۶۰	۶۴۰	۴۰۰	۶۰۰	۲/۵۵۵۸۹۹
۷۰	۳۲۰	۶۴۰	۴۰۰	۶۰۰	۲/۳۵۶۱۹۴
۱۰۰	۳۲۰	۶۴۰	۴۰۰	۶۰۰	۲/۰۲۴۲۳۳
۱۱۰	۲۸۰	۶۴۰	۴۰۰	۶۰۰	۲/۴۸۶۵۴۷



شکل ۶. نیم‌رخ مغناطیس‌سنجی شماره ۸ منطقه گل‌گهر.

جدول ۳. عمق‌های برآوردی به ازای ارتفاع‌های متفاوت ادامه فراسو مربوط به نیم‌رخ مغناطیس‌سنجی ۸ منطقه گل‌گهر.

مقدار ادامه فراسو $h(m)$	Q	مقدار عمق $Z(m)$
۵۰	۲/۵۵۵۸۹۹	۱۳۹/۰۳۷
۷۰	۲/۳۵۶۱۹۴	۱۲۹/۸۰۸
۱۰۰	۲/۰۲۴۲۳۳	۱۳۲/۳۰۲
۱۱۰	۲/۴۸۶۵۴۷	۱۳۰/۹۳۴



شکل ۷. نمودارهای ادامه فراسو در ارتفاع‌های متفاوت مربوط به نیم‌رخ ۸ منطقه گل گهر، (الف) نیم‌رخ ادامه فراسو در ارتفاع ۵۰ متری، (ب) نیم‌رخ ادامه فراسو در ارتفاع ۷۰ متری، (ج) نیم‌رخ ادامه فراسو در ارتفاع ۱۰۰ متری و (د) نیم‌رخ ادامه فراسو در ارتفاع ۱۱۰ متری.

۵ نتیجه‌گیری

انتخابی برای برآورد عمق، دارای بیشینه و کمینه مشخصی باشند. انتخاب اولین ارتفاع ادامه فراسو به فاصله نیم‌رخ‌های برداشت بستگی دارد و معمولاً برابر با $\frac{2}{3}$ فاصله نمودار ادامه فراسو دارای بیشینه و کمینه مشخص است فن ادامه فراسو نیز می‌تواند ادامه پیدا کند. اعمال این روش روی داده‌های مدل استوانه افقی مصنوعی بدون نوفه کارایی روش را به خوبی نشان داد. اضافه شدن نوفه‌ای با توزیع مشخص به داده‌های مغناطیسی مدل استوانه افقی، نتایج برآورد عمق را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین، یکی دیگر از عوامل اختلاف عمق برآوردی با عمق واقعی در این روش می‌تواند به کوچک‌تر بودن ابعاد توده در

تبدیل ادامه فراسو یکی از فن‌های تعبیر و تفسیر داده‌های میدان پتانسیل است و می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد مشخصات توده معدنی به دست دهد. بررسی رابطه عمق توده‌ها با بی‌هنجاری میدان پتانسیل ادامه فراسو شده می‌تواند اطلاعات مفیدی در پروژه‌های مغناطیس‌سنجی عملی به دست دهد. در این پژوهش یکی از این روش‌ها بررسی شد. در این روش رابطه‌ای بین عمق توده سبب شونده بی‌هنجاری و مقادیر بیشینه و کمینه میدان فراسو شده برقرار می‌شود و بدین صورت عمق تا توده مولد بی‌هنجاری مغناطیسی تعیین خواهد شد. مبانی این روش ساده و عملکرد آن دو بُعدی است. نکته‌ای که در استفاده از این روش باید به آن توجه کرد این است که نیم‌رخ‌های

- Kara, I., Özdemir, M., and Kanli, A., 2003, Magnetic interpretation of horizontal cylinders using displacement of the maximum and minimum by upward continuation: *Journal of the Balkan Geophysical Society*, **6**(1), 16-20.
- Minty, B., 1991, Simple microlevelling for aeromagnetic data: *Exploration Geophysics*, **22**(3), 591-592.
- Radhakrishna Murthy, I. V., 1985, The midpoint method: magnetic interpretation of dikes and Faults: *Geophysics*, **50**, 834-839.
- Xu, D., and Zeng, H., 2000, Preferential continuation and its application to Bouguer gravity anomaly in China: *Geosciences (in Chinese)*, **14**(2), 215-222.
- Zeng, H., Xu, D., and Tan, H., 2008, A model study for estimating optimum upward-continuation height for gravity separation with application to a Bouguer gravity anomaly over a mineral deposit, Jilin province, northeast China: *Geophysics*, **72**(4), 145- 150.
- Zeng, H., and Xu, D., 2001, Discussion on continuation for potential-field anomaly enhancement (R. Pawlowski, *Geophysics*, **66**(2), 390-398): *Geophysics*, **66**, 695-697.

مقایسه با عمق قرارگیری آن نسبت داده شود. کاربرد این روش روی دو نیم‌رخ مغناطیس‌سنجی بی‌هنجاری شماره ۲ معدن گل‌گهر که در آن‌ها عمق توده سبب شونده بی‌هنجاری مشخص است قابلیت این روش را در تعیین عمق تایید کرد. اختلاف جزئی بین مقادیر محاسبه شده و مقادیر واقعی، ناشی از خطای تعیین نقطه بیشینه و کمینه بی‌هنجاری زمینی و ادامه فراسو شده و همچنین، وجود نوفه‌های محیطی حین برداشت داده‌ها است.

منابع

- Blakely, J. R., 1996, *Potential theory in gravity and magnetic applications*: Cambridge University Press, 441 pp.
- Bergon, C. J., Morris, T. L., and Ioup, J. W., 1990, Upward and downward continuation of airborne electromagnetic data, presented at SEG 60th Annual International meeting, 696-699.
- Jian, S., 1976, An automatic method of direct interpretation of magnetic profiles: *Geophysics*, **41**, 531-541.