

تفسیر بی‌هنجاری مغناطیسی معدن مروارید زنجان با استفاده از روش گرادیان کامل نرمال

میثم عابدی^۱، احمد افشار^۱، غلامحسین نوروزی^۲ و وحید ابراهیم‌زاده اردستانی^{۳*}

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی معدن- اکتشاف، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

^۳ دانشیار، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۳/۳۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۲/۲۴، دسترسی برخط: ۱۳۹۰/۳/۲۵)

چکیده

روش گرادیان کامل نرمال شده (NFG) به صورت گسترده در روش‌های پتانسیل، به‌خصوص روش مغناطیس‌سنجی به کار برده می‌شود. از آنجاکه در تهیه نقشه‌های ادامه فرسو محاسبات در بعد بسامد صورت می‌گیرد، اثر نوفه به شدت باعث تخریب این نقشه‌ها می‌شود؛ در نتیجه، تفسیر داده‌های مغناطیس با استفاده از روش NFG صورت می‌پذیرد. در این روش با استفاده از بسط فوریه سینوسی داده‌های مغناطیسی، مشتقات جهتی این داده‌ها محاسبه می‌شود و با نرمال کردن این خروجی‌ها نسبت به هم، نقشه NFG به‌دست می‌آید. با استفاده از این روش می‌توان موقعیت، عمق مرکز و فاصله تا سطح بالای توده کانسارها را برآورد کرد. یکی از مهم‌ترین پارامترها در تعیین شکل دقیق توده دارای بی‌هنجاری، به‌خصوص در برآورد عمق توده، به کارگیری درست عدد هارمونیک در رابطه NFG می‌باشد. در این مقاله، این روش بر روی داده‌های مصنوعی بدون نوفه و نوفه‌دار آزمایش شده است و بعد از کسب نتایج رضایت‌بخش، به صورت دو و سه‌بعدی روی داده‌های واقعی، یعنی توده مغناطیسی معدن مروارید زنجان اجرا شده است. نتایج حاکی از این است که این روش به خوبی توصیفی کلی از وضعیت نهشته به ما می‌دهد و می‌توان آن را درحکم یک روش سریع، در تفسیر داده‌های مغناطیسی به کار برد. با توجه به خروجی حاصل شده، نهشته معدن مروارید دارای شیب تندی است که فاصله تا سطح بالای توده کانسار کم و تا عمقی حدود ۱۰۰ متر نیز گسترش دارد. نتایج حفاری و کارهای صورت گرفته، نشان از نهشته‌ای با شیب در حدود ۷۸ درجه دارد که عمق آن متغیر است و با میانگین حدود ۶ متر، به خوبی با نتایج به‌دست آمده از روش NFG مطابقت دارد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌های مصنوعی، داده‌های مغناطیسی، NFG دوبعدی، NFG سه‌بعدی، معدن مروارید زنجان

Interpretation of the magnetic anomaly of Zanjan's Morvarid mine using the normalized full gradient method

Maysam Abedi¹, Ahmad Afshar¹, Gholam Hossain Norouzi², and Vahid Ebrahimzade Ardestani^{2*}

¹Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, Iran

²Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 21 June 2010, accepted: 15 March 2011, available online: 15 June 2011)

*Corresponding author:

ebrahimz@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

Summary

The normalized full gradient (NFG) method defined by Berezkin (1967, 1973 and 1998) is used for downward continuation maps. Analytical downward continuation is a method of estimating the field closer to the source, and, consequently, it results in a better resolution of underground rock distribution. However, the usefulness of this process is limited by the fact that the operation is extremely sensitive to noise. With noise free data, downward continuation is well defined; it is unnecessary to continue below the source level. In the presence of noise, the amplification of high frequencies is so strong that it quickly masks the information in the original profile. Low-pass Fourier filtering, while suppressing such noise, also blurs the signal, overcoming the purpose of sharpening by downward continuation.

Despite the above-mentioned problems, most geophysical experts have long been interested in this technique because of its importance to mineral exploration. Furthermore, this method is a fast and cheap way to determine the initial depth of the subsurface features, especially where there is no other geophysical or well-logging data. A good analytical downward continuation process could provide subsurface general images, allowing an enhanced interpretation. Also, analytical downward continuation has the ability to determine accurately both the horizontal and vertical extents of geological sources.

The NFG method nullifies perturbations due to the passage of mass depth during downward continuation. The method depends on the downward analytical continuation of normalized full gradient values of magnetic data. Analytical continuation discriminates certain structural anomalies which cannot be distinguished in the observed magnetic field. It can be used to estimate location, depth to the top, and center of the deposit that is applied also for detecting oil reservoirs and tectonic studies. One of the important parameters to estimate the accurate shape of the deposit is true selection of the harmonic number. In this paper, the correct harmonic number is determined and then this method will be tested for noise-free and noise-corruption synthetic data. Finally, 2D and 3D of this method are applied to real data from Zanjan's Morvarid mine.

The Morvarid mine is located at a distance of 23 km southeast of Zanjan, near Aliabad village. Hematite and magnetite are the major minerals in the mine in which magnetic exploration has been performed to find anomalies around the mine, near outcrops of the region. From the IGRF model, the geomagnetic field of this region is calculated at 47680 nT (inclination = 54.7°, declination= 4.5°).

The results of the method were satisfactory for a dike. After applying the method, a general view of deposit structure was obtained that helped us to make a fast interpretation. 2D and 3D results of NFG method satisfied the results of trenches and drilling in the region are under study, as well. The final result of this method shows that the deposit begins from the low depth to approximately less than 100 meters. This modeling yielded satisfactory results for drilling in the region. The results of the drillings show that the lowest depth of the deposit is about 6 meters.

Finally, 2.5D modeling of the deposit was done using Modelvision software that had the same results. This method can easily be applied for gravity and microgravity data.

Key words: Synthetic models, magnetic data, 2D-NFG, 3D-NFG, Zanjan's Morvarid mine

۱ مقدمه

تهیه این نقشه‌ها استفاده کرد. با استفاده از این روش می‌توان محدوده تقریبی، عمق بالا و مرکز توده را برآورد کرد (آقاجانی و همکاران، ۲۰۰۹).

این روش علاوه بر اکتشافات گرانی‌سنجی، در اکتشاف بی‌هنجاری‌های مغناطیسی نیز کاربرد پیدا کرده است (برزکین و همکاران، ۱۹۹۴؛ اروک و کسینسز، ۲۰۰۸). بنابراین، در این مقاله سعی شده است که از روش NFG برای تفسیر سریع بی‌هنجاری مغناطیسی استفاده شود.

در این مقاله محدوده مناسب عدد هارمونیک به کار رفته در رابطه NFG با سعی و خطا مشخص می‌شود و سپس این روش روی مدل‌های مصنوعی بدون نوفه و نوفه‌دار آزمایش می‌شود. در انتها بعد از کسب نتایج رضایت‌بخش برای مدل‌های مصنوعی، این روش برای تفسیر بی‌هنجاری مغناطیسی معدن مروارید زنجان مورد استفاده قرار می‌گیرد و نتایج آن با ترانسه‌های موجود مقایسه می‌شود.

۲ روش NFG

گرادیان کامل نرمال شده برای مدل‌سازی دو بُعدی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی شبیه روش گرانی است و برزکین و همکاران (۱۹۹۴) آن را چنین تعریف کرده‌اند:

$$G_H(x, z) = \frac{G(x, z)}{G_{cp}(z)} \quad (1)$$

$$= \frac{\sqrt{\Delta T_x^2(x, z) + \Delta T_z^2(x, z)}}{\frac{1}{M} \sum_0^M \sqrt{\Delta T_x^2(x, z) + \Delta T_z^2(x, z)}}$$

که در آن G_H ، NFG در نقطه (x, y) ، ΔT_x و ΔT_z ، مشتق اول افقی و قائم داده‌های مغناطیسی هستند. $G(x, z)$ ، گرادیان کامل داده‌های مغناطیسی، $G_{cp}(z)$ میانگین گرادیان کامل در عمق z و M تعداد نقاط است. برزکین (۱۹۷۳)، بی‌هنجاری گرانی و در پی آن بی‌هنجاری مغناطیسی را به صورت سری فوریه سینوسی در دامنه $(L, -L)$ چنین بیان کرد:

در مدل‌سازی داده‌های مغناطیسی، یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد توجه در کارهای اکتشافی، تعیین محل و عمق توده هدف است. امروزه روش‌های گوناگونی مانند روش اوپلر، حداقل مربعات، روش واهمامیخت (دیکانولوشن) ورنر و شبکه‌های عصبی برای چنین مدل‌سازی‌هایی وجود دارند (سالم و همکاران، ۲۰۰۴).

در به‌کارگیری روش اوپلر، تعیین ضریب ساختار و طول پنجره برآوردگر از پارامترهای مجهول‌اند که به شدت جواب‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند (سلاجقه و اردستانی، ۱۳۸۵). همچنین در روش شبکه‌های عصبی تحمیلی، انتخاب محدوده عمق و ابعاد بلوک‌سازی در مقاطع دو و سه‌بعدی مجهول است و جواب‌ها با افزایش عمق توده تحت تأثیر قرار می‌گیرد (عابدی و همکاران، ۱۳۸۸). روش ورنر نیز دارای محدودیت‌هایی است.

یکی از بهترین روش‌ها برای تعیین محل توده‌ها، استفاده از روش گرادیان کامل نرمال است که برزکین (۱۹۶۷، ۱۹۷۳ و ۱۹۹۸)، برای داده‌های گرانی و مغناطیسی عرضه کرد. روش NFG برای مدل‌سازی مخازن نفتی (ژیائو، ۱۹۸۱؛ ژیاو و زانگ، ۱۹۸۴؛ زنگ و همکاران، ۲۰۰۲) و همچنین برای روش پتانسیل خودزا (SP) نیز به کار گرفته شده است (سیندرجی و همکاران، ۲۰۰۸).

در تهیه نقشه‌های ادامه فروسو، محاسبات در بعد بسامد و عدد موج صورت می‌گیرد و از آنجا که معمولاً در داده‌های برداشت شده، نوفه وجود دارد؛ اثر این نوفه در تحلیل فوریه داده‌ها به صورت بسامدهایی با دامنه زیاد است که باعث مخدوش شدن محاسبات می‌شود؛ در صورتی که از فیلتر پایین‌گذر نیز استفاده شود می‌توان این اثر مخرب را از بین برد. ولی با این کار مقداری از اطلاعات نیز همراه سیگنال موردنظر از بین می‌رود که این یکی از مشکلات اساسی در تهیه نقشه‌های ادامه فروسو است. بنابراین، می‌توان از روش گرادیان کامل نرمال برای

چون ساختارهای زمین‌شناسی غالباً سه‌بُعدی هستند؛ بنابراین، مدل‌سازی سه‌بُعدی گرادیان کامل نرمال شده اعمال می‌شود. رابطه NFG سه‌بُعدی به صورت زیر است:

$$G_H(x, y, z) = \frac{G(x, y, z)}{G_{cp}(z)} = \frac{\sqrt{\Delta T_x^2(x, y, z) + \Delta T_y^2(x, y, z) + \Delta T_z^2(x, y, z)}}{\frac{1}{M} \sum_0^M \sqrt{\Delta T_x^2(x, y, z) + \Delta T_y^2(x, y, z) + \Delta T_z^2(x, y, z)}} \quad (10)$$

که در آن $\Delta T_x(x, y, z)$ ، $\Delta T_y(x, y, z)$ و $\Delta T_z(x, y, z)$ مشتق اول بی‌هنجاری مغناطیسی ΔT در جهت‌های x ، y و z هستند. $G(x, y, z)$ گرادیان کامل در نقطه (x, y, z) ، G_{cp} میانگین گرادیان کامل در عمق z و M تعداد کل نقاط است. رابطه (۱۰) را می‌توان برای محاسبه گرادیان کامل نرمال در هر سطحی از عمق z به کار گرفت؛ بنابراین، می‌توانیم توزیع توده را در عمق‌های متفاوت به دست آوریم. از آنجا که محاسبات در حالت سه‌بُعدی پیچیده می‌شود، با فرض نیم‌رخ‌هایی موازی روی نقشه بی‌هنجاری، روش گرادیان کامل نرمال دو‌بُعدی را برای هر نیم‌رخ پیاده می‌کنند و سپس به ازای یک عمق مشخص از همه نیم‌رخ‌ها، خروجی حاصل از این روش در عمق مشخص شده را به‌منزله نتایج مدل‌سازی سه‌بُعدی به کار می‌برند.

با استفاده از روش NFG دو‌بُعدی روی یک مقطع، می‌توان مرز توده هدف با زمینه و محدوده تقریبی عمق توده را به دست آورد و همچنین با به‌کارگیری NFG سه‌بُعدی نیز می‌توان توزیع توده را در عمق‌های مختلف مشاهده نمود. بنابراین، می‌توان یک دید سه‌بُعدی از وضعیت توده به دست آورد.

یکی از مهم‌ترین پارامترها در به‌کارگیری روش NFG، انتخاب بهینه عدد هارمونیک N است که تأثیر

$$\Delta T(x, z) = \sum_{n=1}^N B_n \sin \frac{\pi n x}{L} e^{\frac{\pi n z}{L}}, \quad (2)$$

که در آن،

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L \Delta T(x, 0) \sin \frac{\pi n x}{L} dx, \quad (3)$$

L طول نیم‌رخ برداشت مغناطیسی و N تعداد جمله‌ها است. با توجه به معادله (۲) داریم:

$$\Delta T_x(x, z) = \frac{\pi}{L} \sum_1^N n B_n \cos \frac{\pi n x}{L} e^{\frac{\pi n z}{L}}, \quad (4)$$

$$\Delta T_z(x, z) = \frac{\pi}{L} \sum_1^N n B_n \sin \frac{\pi n x}{L} e^{\frac{\pi n z}{L}}, \quad (5)$$

برای حذف اثر نوفه‌های با بسامد زیاد که ناشی از گسترش به سمت پایین‌اند و همچنین حذف اثر گیس، از فاکتور هموارسازی استفاده می‌شود:

$$q_m = \left(\frac{\sin \frac{\pi n}{N}}{\frac{\pi n}{N}} \right)^m, \quad (6)$$

که برای اکتشافات نفتی، $m = 2$ است و معمولاً ۱ یا ۲ در نظر گرفته می‌شود. این پارامتر با آزمایش مدل‌های مصنوعی به دست آمده است. سرانجام داریم:

$$\Delta T(x, z) = \sum_{n=1}^N B_n \sin \frac{\pi n x}{L} e^{\frac{\pi n z}{L}} \left(\frac{\sin \frac{\pi n}{N}}{\frac{\pi n}{N}} \right)^m, \quad (7)$$

$$\Delta T_x(x, z) = \frac{\pi}{L} \sum_1^N n B_n \cos \frac{\pi n x}{L} e^{\frac{\pi n z}{L}} \left(\frac{\sin \frac{\pi n}{N}}{\frac{\pi n}{N}} \right)^m, \quad (8)$$

$$\Delta T_z(x, z) = \frac{\pi}{L} \sum_1^N n B_n \sin \frac{\pi n x}{L} e^{\frac{\pi n z}{L}} \left(\frac{\sin \frac{\pi n}{N}}{\frac{\pi n}{N}} \right)^m. \quad (9)$$

با قرار دادن معادلات (۸) و (۹) در رابطه (۱)، NFG به دست می‌آید. با این روش مرز و مرکز جسم را می‌توان برآورد کرد.

شیب‌دار است؛ نیم‌رخ BB بر روی خود بی‌هنجاری انتخاب و خروجی آن در شکل ۵ نشان داده شده است. با سعی و خطای صورت گرفته، عدد هارمونیک و توان فاکتور حذف اثر گیس به ترتیب ۱۰ و ۲ در نظر گرفته شد. خروجی روش NFG در شکل ۶ نشان داده شده است و محدوده احتمالی مدل مصنوعی دوم را تقریباً خوب نشان داده است.

چون در داده‌های مغناطیس معمولاً نوفه وجود دارد، در مدل سوم همه داده‌ها را به صورت تصادفی نوفه‌دار می‌کنیم. میانگین نوفه‌ها صفر و انحراف معیار یک در نظر گرفته شده است. بی‌هنجاری حاصل از این مدل در شکل (۷-الف) نشان داده شده است. به دلیل اینکه ساختار مورد نظر شیب ندارد، با پیاده‌سازی روش روی نقشه برگردان به قطب، جواب مناسب‌تری حاصل می‌شود. بدین منظور نیم‌رخ CC روی نقشه، برگردان به قطب (شکل ۷-ب) زده شد که در شکل ۸ منحنی آن نشان داده شده است.

با سعی و خطای صورت گرفته، عدد هارمونیک و توان فاکتور حذف اثر گیس به ترتیب ۱۵ و ۲ در نظر گرفته شد. خروجی روش NFG در شکل ۹ نشان داده شده است و به خوبی محدوده احتمالی مدل مصنوعی سوم را نشان می‌دهد.

نتایج مدل‌سازی‌های صورت گرفته روی داده‌های مصنوعی، قابلیت زیاد این روش را برای تفسیر سریع داده‌های مغناطیسی تأیید می‌کند؛ در نتیجه این روش روی داده‌های واقعی پیاده می‌شود.

به‌سزایی در برآورد عمق دارد. در اکثر مقالات عرضه شده در این زمینه، تعیین این پارامتر با سعی و خطا صورت گرفته است. معمولاً کمترین هارمونیک را ۵ در نظر می‌گیرند و هارمونیک بهینه را با افزایش آن به ازای هارمونیک که خروجی حاصل شده، فشرده‌ترین ساختار را حاصل کند، انتخاب می‌کنند.

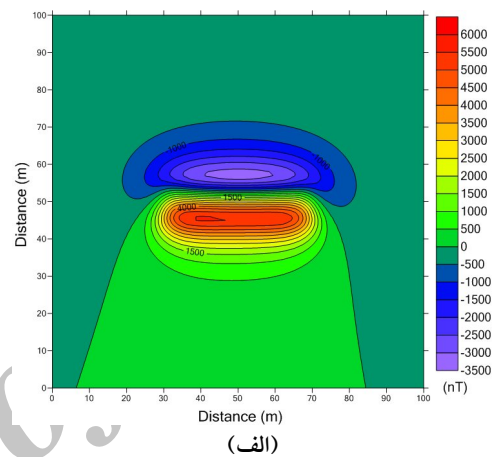
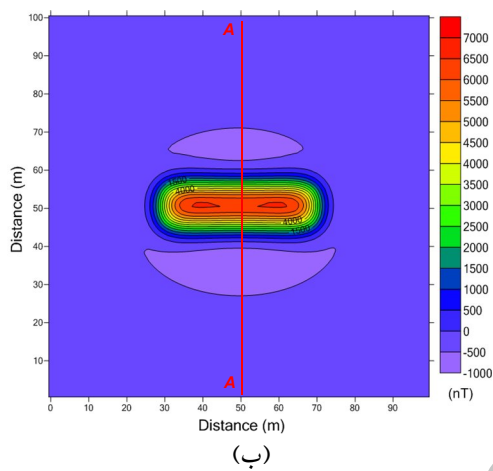
۳ مدل‌سازی داده‌های مصنوعی

برای تحقیق در میزان کارایی روش NFG، سه مدل را بررسی می‌کنیم. ویژگی‌های سه مدل در جدول ۱ آورده شده است. در همه مدل‌ها، ضریب خودپذیری مغناطیسی زمینه صفر در نظر گرفته شده است. بی‌هنجاری حاصل از مدل اول در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. برای اعمال روش NFG و رسیدن به جواب بهتر، نیم‌رخ AA روی نقشه، برگردان به قطب (شکل ۱-ب) زده شد که در شکل ۲ منحنی آن نشان داده شده است. به دلیل اینکه ساختار مورد نظر شیب ندارد، با پیاده‌سازی این روش روی نقشه برگردان به قطب جواب مناسب‌تری حاصل می‌شود. با سعی و خطای صورت گرفته، عدد هارمونیک و توان فاکتور حذف اثر گیس به ترتیب ۲۰ و ۲ در نظر گرفته شد. خروجی روش NFG در شکل ۳ نشان داده شده است و به خوبی محدوده احتمالی مدل مصنوعی اول را نشان می‌دهد.

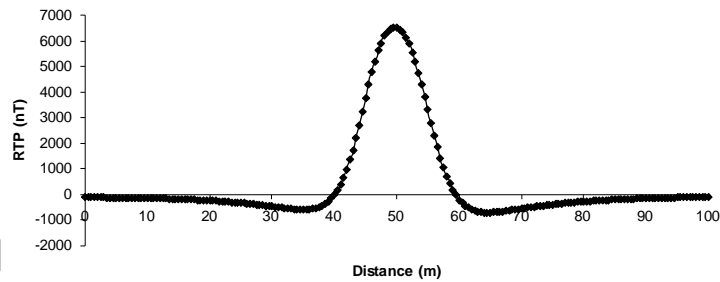
معمولاً، اکثر نهشته‌های معدنی شیب‌دارند؛ بنابراین مدل دوم دارای شیب ۷۵ درجه است تا شبیه‌سازی صورت گرفته به واقعیت نزدیک‌تر باشد. بی‌هنجاری حاصل از این مدل در شکل ۴ آمده است. بدلیل اینکه مدل مورد نظر

جدول ۱. مشخصات مدل‌های مصنوعی.

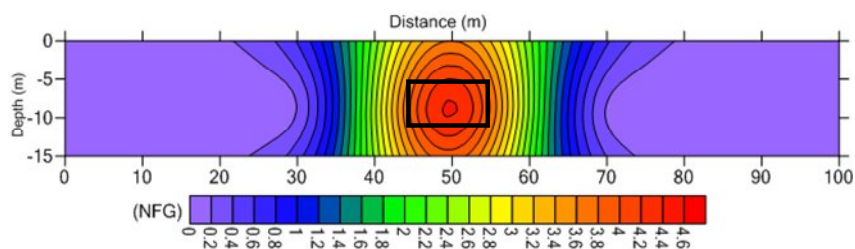
مدل	(ضخامت*عرض*طول) (m)	کمترین عمق (m)	عمق نهایی (m)	شیب ساختار (درجه)	خودپذیری مغناطیسی (cgs)	زاویه انحراف (درجه)	زاویه میل (درجه)
۱	۴۰*۱۰*۵	۵	۱۰	-	۰,۱	۴	۵۴
۲	۵۰*۱۰*۳۲	۲	۳۴	۷۵	۰,۰۸	۴,۲	۵۲
۳	۱۰*۱۰*۱۰	۱	۱۱	-	۰,۰۵	۳,۸	۵۳



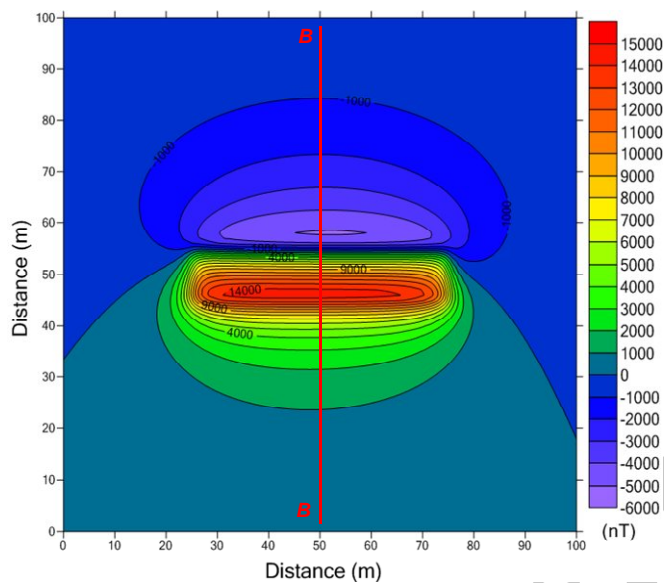
شکل ۱. مدل اول، (الف) بی‌هنجاری مغناطیسی، (ب) نقشه برگردان به قطب.



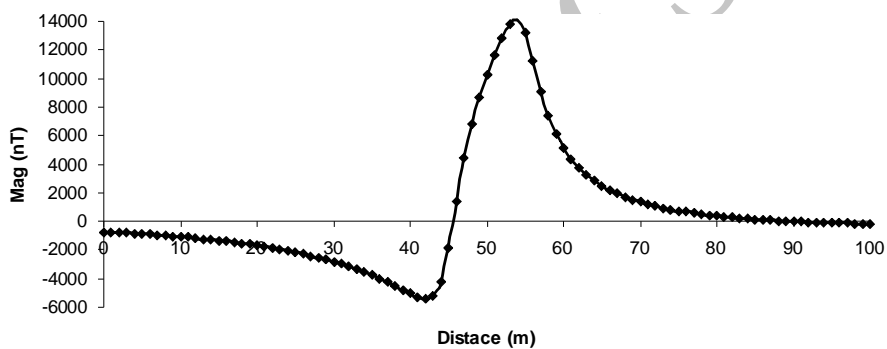
شکل ۲. منحنی بی‌هنجاری بازمانده مدل اول در طول نیم‌رخ AA



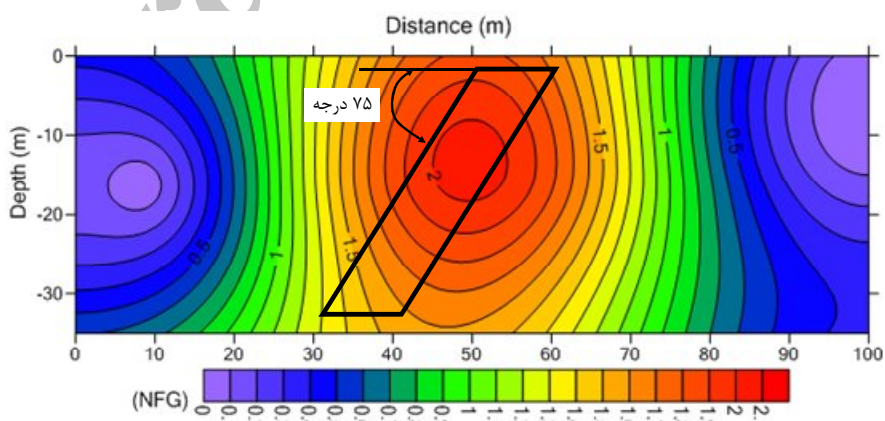
شکل ۳. نقشه NFG حاصل از مدل اول.



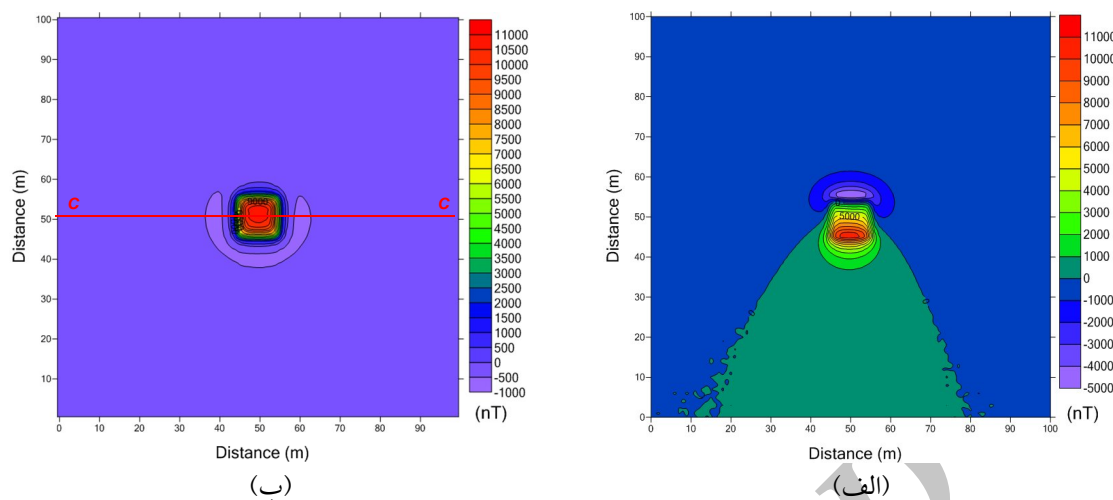
شکل ۴. مدل دوم، بی‌هنجاری مغناطیسی حاصل از مدل.



شکل ۵. منحنی بی‌هنجاری با زماند مدل دوم در طول نیم‌رخ BB.



شکل ۶. نقشه NFG حاصل از مدل دوم.



شکل ۷. مدل سوم، (الف) بی‌هنجاری مغناطیسی، (ب) نقشه برگردان به قطب.

هماتیت مروارید علی‌آباد نشان می‌دهد که ترکیب این توده از کوارتز مونزوسینیت، مونزوسینیت تا کوارتز مونزونیت و مونزونیت تغییر می‌کند (شکل ۱۱). در بررسی مقاطع نازک سنگ‌شناسی که از این توده آذرین برداشت شده است، بافت سنگ گرانولار و کانی‌های پلاژیوکلاز شکل‌دار (آلبیت - اولیگوکلاز)، فلدسپات‌های آلکان (بیشتر اورتوز آرژلیتی)، کوارتز (در حدود ۷٪ تا ۱۵٪ حجم سنگ) و کانی‌های مافیک (شامل بیوتیت کلریتیزه و کلینوپروکسن از نوع اوژیت) کانی‌های اصلی تشکیل دهنده سنگ هستند (افشار، ۱۳۸۸).

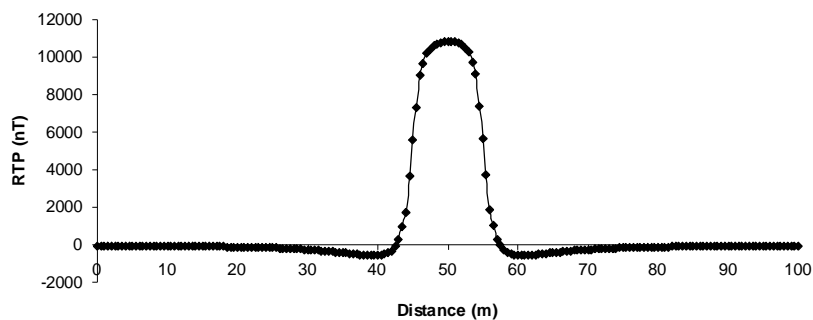
در شکل (۱۲-الف)، بی‌هنجاری مغناطیسی بازماند آورده شده است. همان‌طور که می‌بینیم، بعد از اجرای فیلتر برگردان به قطب (شکل ۱۲-ب)، اثر دوقطبی مغناطیسی از بین نرفته است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که نهشته آهن موردنظر دارای شیب است؛ البته در محل توده احتمالی، گسلی وجود دارد که باعث تشدید این بی‌هنجاری منفی شده است. به همین دلیل در این بی‌هنجاری، نیم‌رخ شمالی - جنوبی AB برای مدل‌سازی روی خود داده‌های واقعی در نظر گرفته شده که نمودار آن در شکل ۱۳ آورده شده است.

۴ مدل‌سازی داده‌های واقعی

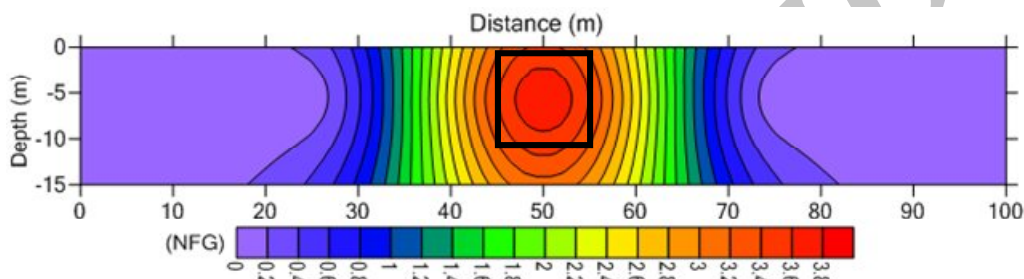
معدن سنگ آهن مروارید در جنوب شرقی زنجان در کوه‌های طارم (شکل ۱۰) قرار دارد. راه دسترسی آن از ۲۳ کیلومتری آزادراه زنجان قزوین شروع می‌شود و از زیرگذر به طرف شمال، ۸ کیلومتر از جاده آسفالت تا روستای مروارید ادامه می‌یابد. طول جاده مخصوص معدن از نزدیکی روستای مروارید تا محل ساختمان معدن، ۱/۵ کیلومتر است. این ذخایر از روستای سرخه‌دیزج شروع می‌شود و تا قسمت غربی روستای مروارید ادامه می‌یابد که ذخایر متعددی از سنگ آهن در آن وجود دارد؛ کلیه ذخایر و رگه‌های این منطقه در امتداد شرقی - غربی و در فواصلی از یکدیگر، دارای رخنمون‌اند.

گستره مورد بررسی در پهنه زمین‌شناسی ساختاری البرز و زیرپهنه طارم قرار دارد. این زیرپهنه که پهنای آن تا دره رودخانه قزل‌اوزن ادامه دارد، روند شمال‌غربی - جنوب‌شرقی دارد. این محدوده از سنگ آغشته‌های آذرآواری و گدازه‌ای ائوسن تشکیل می‌شود که توده آذرین نفوذی علی‌آباد - مروارید در داخل آن نفوذ کرده است.

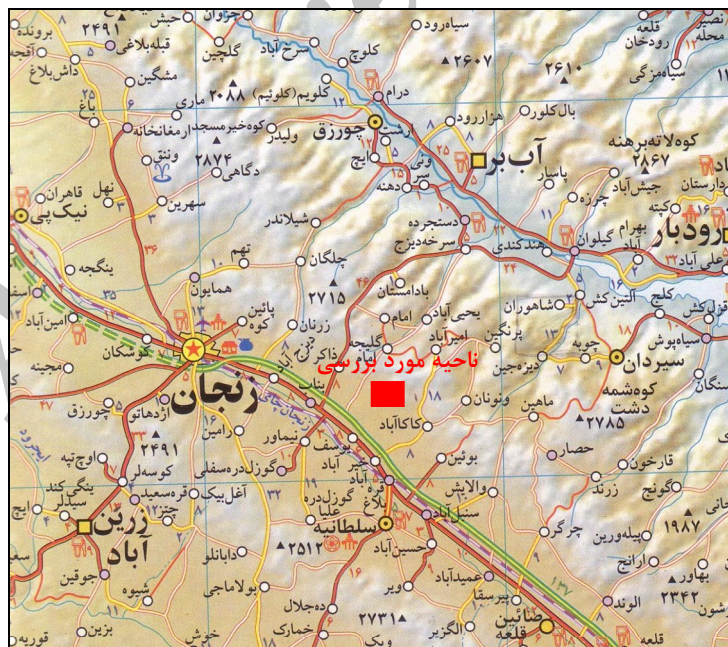
نتایج سنگ‌شناسی توده آذرین نفوذی مثبتیت -



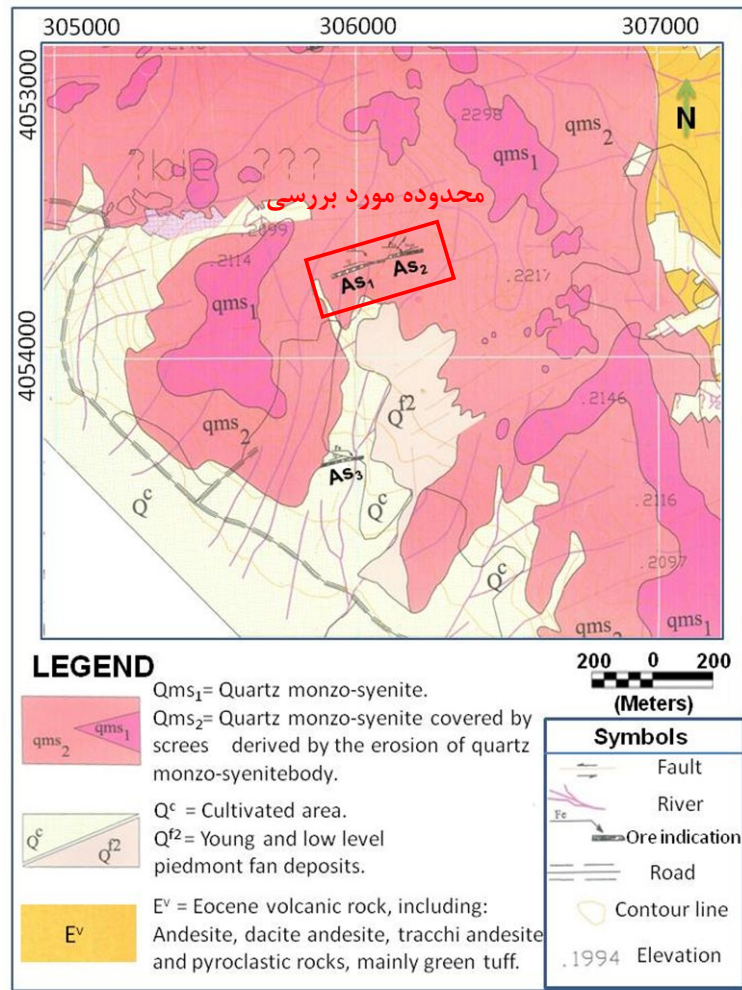
شکل ۸. منحنی بی‌هنجاری با زماند مدل سوم در طول نیم‌رخ CC.



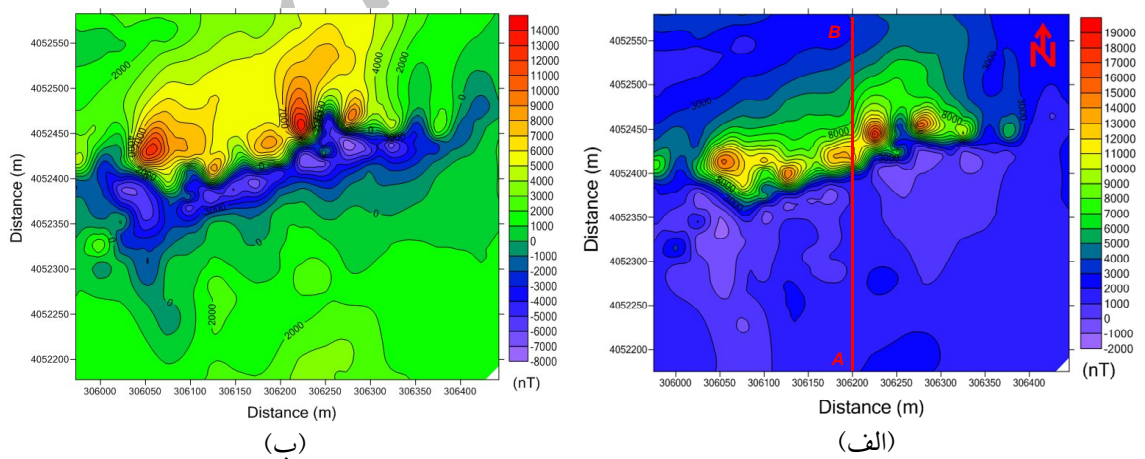
شکل ۹. نقشه NFG حاصل از مدل سوم.



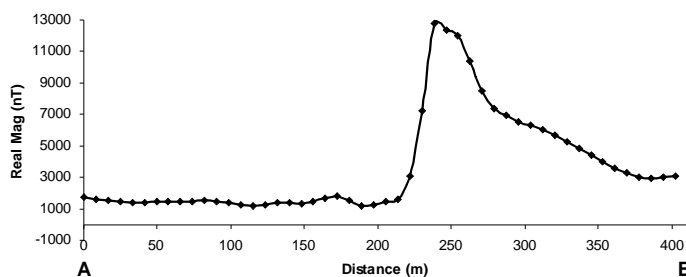
شکل ۱۰. نقشه جغرافیایی منطقه مورد بررسی.



شکل ۱۱. نقشه زمین شناسی منطقه مورد بررسی.



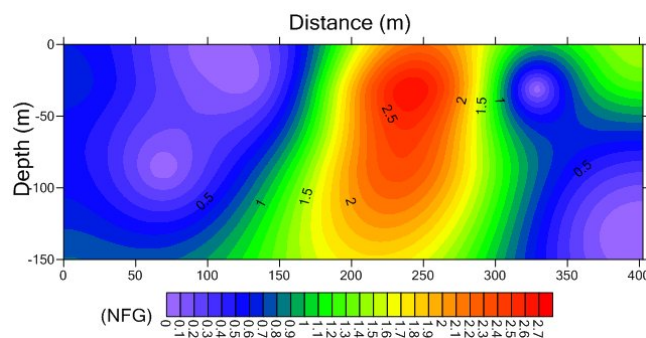
شکل ۱۲. داده های واقعی، (الف) بی هنجاری مغناطیسی، (ب) نقشه برگردان به قطب.



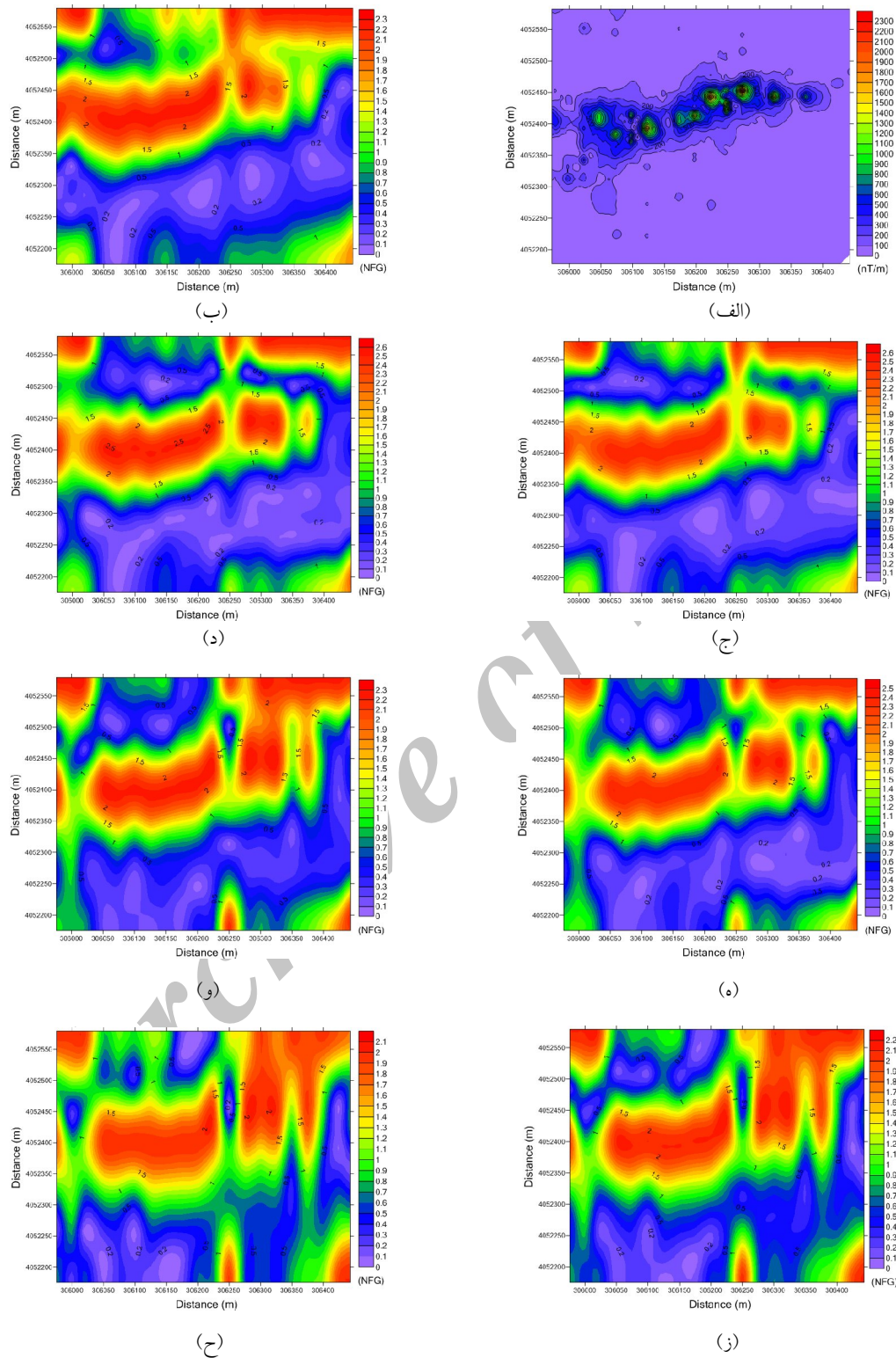
شکل ۱۳. منحنی بی‌هنجاری بازماند داده‌های واقعی در طول نیم‌رخ AB

داشته است، تأیید می‌شود. برای اینکه نحوه توزیع توده را در عمق‌های گوناگون به‌دست آوریم، با استفاده از رابطه (۱۰)، نقشه NFG سه‌بعدی در اعماق متفاوت رسم شد که خروجی آن قابل مقایسه با خروجی روش سیگنال تحلیلی (شکل ۱۵-الف) است. در شکل‌های (۱۵-ب تا ۱۵-ح) این نقشه برای عمق‌های صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ متر نشان داده شده است. در هر کدام از این شکل‌ها محدوده توده دارای NFG زیادی است و با رنگ سرخ ترازبندی شده است؛ البته ترازهای سرخ‌رنگ در لبه نقشه همان اثر نوفه است و جزء محدوده نهشته زیرسطحی مورد نظر نیست. با توجه به نتایج روش NFG دو‌بعدی، می‌توان حدس زد که عمق بی‌هنجاری مغناطیسی کم است و این توده تا عمقی کمتر از ۱۰۰ متر ادامه دارد. نتایج حاصل از حفاری حاکی از محدوده عمقی حدود ۶ متر است که با خروجی این روش مطابقت دارد.

با سعی و خطای صورت گرفته، عدد هارمونیک و توان فاکتور حذف اثر گیس به ترتیب ۱۲ و ۲ در نظر گرفته شد که خروجی حاصل از آن برای نیم‌رخ AB در شکل ۱۴، نشان داده شده است. با استفاده از خروجی حاصل شده و محدوده با مقادیر زیاد NFG، می‌توان این توصیف کلی را از وضعیت نهشته زیرسطحی داشت که دارای شیبی نزدیک به قائم است و عمق کمی دارد که تا کمتر از ۱۰۰ متر نیز گسترش دارد. نتایج حاصل از سایر روش‌ها مانند شبکه عصبی پیش‌خور اعمال شده روی داده نیز حاکی از نهشته‌ای است که دارای عمقی در حدود ۶ متر است و تا عمق نزدیک به ۸۰ متر گسترش دارد. خودپذیری مغناطیسی در حدود ۰٫۱۸ در واحد c.g.s و شیب نیز در حدود ۷۸ درجه است (افشار، ۱۳۸۸؛ افشار و همکاران، ۱۳۸۹). بنابراین، خروجی حاصل از روش NFG با نتایج کار دیگران که با ترانسه‌های زده شده نیز تطابق خوبی

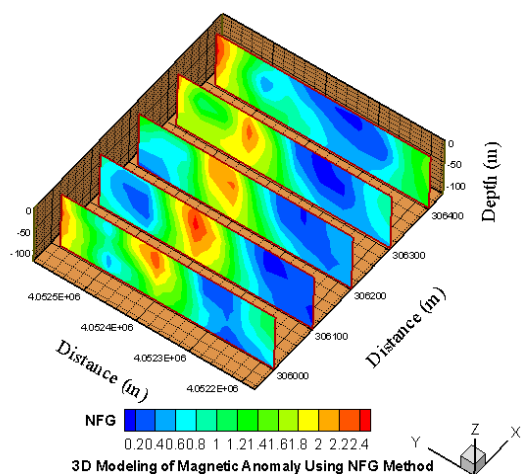


شکل ۱۴. نقشه NFG حاصل از مدل واقعی در طول نیم‌رخ AB



شکل ۱۵. نقشه سیگنال تحلیلی و NFG برای عمق‌های متفاوت، (الف) نقشه سیگنال تحلیلی، (ب) نقشه NFG سه‌بعدی در عمق صفر متر، (ج) نقشه NFG سه‌بعدی در عمق ۲۰ متر و (د) نقشه NFG سه‌بعدی در عمق ۴۰ متر، (ه) نقشه NFG سه‌بعدی در عمق ۶۰ متر، (و) نقشه NFG سه‌بعدی در عمق ۸۰ متر، (ز) نقشه NFG سه‌بعدی در عمق ۱۰۰ متر و (ح) نقشه NFG سه‌بعدی در عمق ۱۲۰ متر.

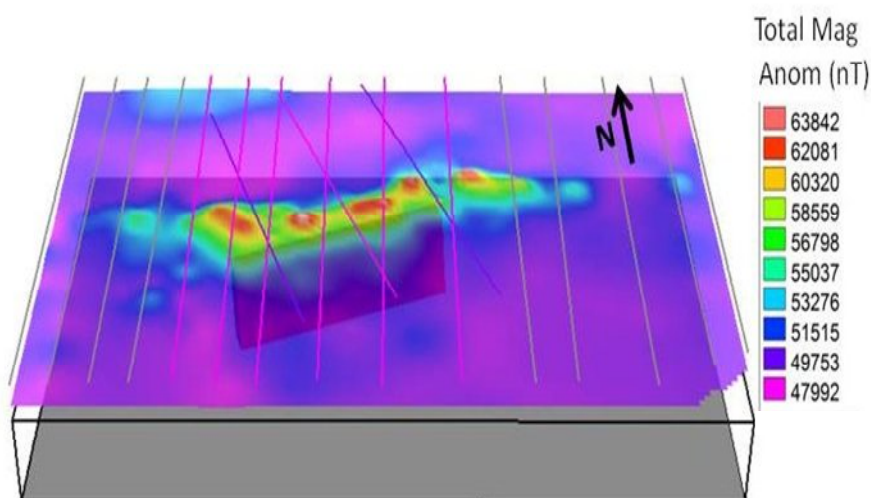
نکته مهم در به‌کارگیری روش مغناطیسی، تصحیح اثر مغناطیس بازماند (Remanent) است و تا حدودی خروجی مدل‌سازی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این تحقیق به دلیل نبود نتایج آنالیز دستگاهی در منطقه مروارید زنجان، اثر این عامل بررسی نشده است و در صورت اعمال این تصحیح، مدل‌سازی صورت گرفته، به شکل واقعی نهشته مغناطیسی نزدیک‌تر خواهد شد.



شکل ۱۶. نمای سه‌بُعدی از خروجی NFG 3D.

در همهٔ حالت‌های بالا پارامتر $m = 2$ در نظر گرفته شده است و خروجی روش به این پارامتر حساس نیست. دو نکته اساسی در به‌کارگیری روش گرادیان نرمال وجود دارد؛ اول اینکه خروجی روش NFG به میزان زیادی به انتخاب پارامتر عدد هارمونیک وابسته است و در صورتی که این پارامتر درست انتخاب نشود باعث برآورد نادرست محدوده عمقی می‌شود. نکته دوم در به‌کارگیری این روش، وجود شرط اساسی نسبت طول نیم‌رخ به عمق زیاد توده است. برزکین (۱۹۷۸ و ۱۹۸۸) و اردستانی (۲۰۰۴) به این نکته اشاره کرده‌اند که برای نسبت‌های بالاتر از ۱۰ بار، نتایج مدل‌سازی مناسب است و برای نسبت‌های کمتر، از دقت این روش کاسته می‌شود. در همهٔ حالت‌ها این نسبت رعایت شده است.

نمای سه‌بُعدی از مدل‌سازی صورت گرفته، در شکل ۱۶، آورده شده و به‌خوبی گسترش طولی، عمقی و شیب نهشته را نمایان کرده است. همچنین برای اینکه دقت مدل‌سازی نشان داده شود، خروجی حاصل از مدل‌سازی ۲/۵ بُعدی با نرم‌افزار Modelvision نیز در شکل ۱۷، نشان داده شده که به‌خوبی نتایج روش NFG سه‌بُعدی را تأیید کرده است.



شکل ۱۷. نمای سه‌بُعدی از مدل‌سازی 2.5D با نرم‌افزار Modelvision (افشار، ۱۳۸۸).

۵ نتیجه گیری

با استفاده از روش گرادیان کامل نرمال شده، مرزهای تقریبی توده مغناطیسی با زمینه و عمق مرکز و بالای توده مغناطیسی مشخص می‌شود. برای رسیدن به جواب مناسب، لازم است که طول نیم‌رخ نسبت به عمق تا سطح بالای نهشته به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود. این روش برای مدل‌های مصنوعی نوفه‌دار و بدون نوفه آزمایش شد و بعد از اینکه نتایج رضایت‌بخشی به دست آمد، در مورد داده‌های بی‌هنجاری مغناطیسی معدن مروارید زنجان به کار برده شد. البته باید توجه شود که این روش، کاملاً تفسیری است و با استفاده از آن دیدی کلی از وضعیت احتمالی ساختار زیرسطحی به دست می‌آید. خروجی حاصل از روش روی داده‌های واقعی معدن مروارید زنجان، حاکی از این است که توده موردنظر با شیب تند، کم‌عمق است و عمق نهایی توده نیز کمتر از ۱۰۰ متر است. این خروجی با نتایج مدل‌سازی ۲/۵ بعدی با نرم‌افزار Modelvision نیز تطابق خوبی دارد. نتایج حفاری، عمق میانگین بالای توده تا سطح زمین را حدود ۶ متر مشخص کرده است که با نتایج روش NFG مطابقت دارد. خروجی روش NFG کمک شایانی برای حفاری‌های زاویه‌دار و در جهت عمود بر شیب کانسار احتمالی است که به‌طور قابل‌توجهی موجب کاهش هزینه حفاری می‌شود.

یکی از مشکلات اساسی در مدل‌سازی داده‌های مغناطیسی، برآورد ضریب خودپذیری مغناطیسی است که رابطه‌ای مستقیم با بی‌هنجاری مغناطیسی دارد؛ ولی روش پیشنهادی NFG مستقل از این مقدار است. به دلیل ماهیت داده‌های پتانسیل، این روش برای داده‌های گرانی‌سنجی نیز قابل اجرا است.

تشکر و قدردانی

از دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران برای در اختیار قرار دادن داده‌ها تشکر می‌کنیم.

منابع

- افشار، ا.، ۱۳۸۸، مدل‌سازی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی معدن مروارید زنجان با شبکه عصبی و مقایسه آن با روش‌های کلاسیک: پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
- افشار، ا.، عابدی، م.، نوروزی، غ. ح.، ابراهیم‌زاده اردستانی، و.، لوکس، ک.، ۱۳۸۹، مدل‌سازی دوبعدی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی با استفاده از شبکه عصبی پیشخور: مجله ژئوفیزیک ایران، ۴(۱)، ۷۲-۸۳.
- سلاجقه، ف.، ابراهیم‌زاده اردستانی، و.، ۱۳۸۵، برآورد عمق ناهنجاری‌های گرانی به کمک معادله همگن اوایلر، مجله فیزیک زمین و فضا: ۳۲(۲)، ۷۱-۸۱.
- عابدی، م.، افشار، ا.، ابراهیم‌زاده اردستانی، و.، نوروزی، غ. ح.، لوکس، ک.، ۱۳۸۸، مدل‌سازی سه‌بعدی بی‌هنجاری‌های گرانی با استفاده از شبکه عصبی تحمیلی، مجله ژئوفیزیک ایران، ۳(۲)، ۷۷-۹۰.
- Aghajani, H., Moradzadeh, A., and Zeng, H., 2009, Normalized full gradient of gravity anomaly method and its application to the mobrun sulfide body: Canada: World Applied Science Journal, 6(3), 392-400.
- Ardestani, V. E., 2004, Detection of near-surface anomalies through 2-D normalized full gradient of gravity data: J. Earth & Space Physics, 30(2), 1-6.
- Berezkin, W. M., 1967, Application of the full vertical gravity gradient to determination to sources causing gravity anomalies (in Russian): Expl. Geophys., 18, 69-76.
- Berezkin, W. M., 1973, Application of gravity exploration to reconnaissance of oil and gas reservoir (in Russian): Neda Publishing House Russia.
- Berezkin, V. M., Filatov, V. G., and Bulychev, E. V., 1994, Methodology of the aeromagnetic data interpretation with the aim of direct detection of oil and gas deposits (in Russian): Geofizika, 5, 38-43.
- Berezkin, W. M., 1998, Full gradient method in geophysical prospecting (in Russian): Neda Publishing House Russia.
- Oruk, B., and Keskinsezer, A., 2008, Detection of causative bodies by normalized full gradient

- Xiao, Y., 1981, Normalized full gradient method of gravity anomalies (in Chinese): Oil Geophy. Prosp., **16**(3), 47-57.
- Xiao, Y., and Zhang, L., 1984, Application of normalized full gradient method of gravity anomalies to oil and gas exploration (in Chinese): Oil Geophys. Props., **19**(3), 247-254.
- Zeng, H., Meng, X., Yao, CH., Li, X., Lou, H., Guang, Z., and Li, Z., 2002, Detection of reservoirs from normalized full gradient of gravity anomalies and its application to Shengli oil field east China: Geophy., **67**, 1138-1147.
- of aeromagnetic anomalies from east Marmara region, NW Turkey: Journal of Applied Geophysics, **65**, 39-49.
- Salem, A., Ravat, D., Mushayandebvu, M. F., and Ushijima, K., 2004, Linearized least-squares method for interpretation of potential-field data from sources of simple geometry: Geophysics, **69**(3), 783-788.
- Sindirgi, P., Pamuk, U. O., and Ozyalin, S., 2008, Application of normalized full gradient method to self potential (SP) data: Pure Appl. Geophys., **165**, 409-427.

Archive of SID