



Imam Khomeini International University
Vol. 7, No. 4, Winter 2022



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Geophysical Investigation of Magnetometry in Zarnan-Chorehab Zanjan Menitite Iron Deposit

Geravandi E.¹, Modabberi S.^{2*}, Geravandi P.³, Niroomand Sh.², Rajabi A.⁴

- 1- M.Sc Student, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Associate Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran
3- M.Sc, Ahura Holding Industrial-Mining Group, Tehran, Iran
4- Assistant Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 19 Jun. 2021

Accepted: 13 Oct. 2021

Abstract: Zarnan-Chorehab iron deposits are located at 5 km northeast of Zanjan city in the Taron mountains, between Zarnan and Chorehab villages. Mineralogical studies, as well as field observations show that iron mineralization is mostly magnetite type. However, hematite and goethite minerals are also formed to a lesser extent due to weathering and alteration. Iron ores in this area are formed as veins and lenses within Oligocene intrusive bodies. Inside the volcanic rocks, mineralization is also observed in the form of veins with small dimensions. The thickness of the veins can be traced between 0.5 to about 15 meters and their length up to about 200 meters. Iron deposits are one of the main stages of their exploration due to the presence of magnetite minerals with high magnetic properties and hematite with low magnetic properties. For this purpose, geophysical surveys were carried out by magnetometric method in 5240 stations in an area of 8 km² to determine the potential areas of iron mineralization and to investigate the depth of mineralization. In this research, total magnetic maps, pole reversal, analytical signal, and upward continuation were prepared. The results obtained from the drilling finely correspond with the magnetometric survey. Based on the results of these studies, nine anomalies (An1-An9) were identified in the study area, anomalies of An3, An8, and An9 extend to a depth of about 40 m, and other anomalies are supposed to be found to a greater depth. The result of magnetic modeling data determines the position (location and approximate depth) and geometry of the masses causing magnetic anomalies.

Keywords: Geomagnetic method, Depth estimation, Euler method, Modeling of magnetic anomalies, Magnetite exploration.

How to cite this article

Geravandi, E., Modabberi, S., Geravandi, P., Niroomand, Sh., and Rajabi, A. (2022). "Geophysical investigation of magnetometry in Zarnan-Chorehab Zanjan menitite iron deposit". Journal of Mineral Resources Engineering, 7(4): 19-38.

DOI: [10.30479/JMRE.2022.15699.1521](https://doi.org/10.30479/JMRE.2022.15699.1521)

*Corresponding Author Email: modabberi@ut.ac.ir

COPYRIGHTS



©2022 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

INTRODUCTION

Geophysical methods are defined based on the physical properties of the minerals and their geological environs. Geomagnetic method of geophysical exploration can be useful when there are distinctions in magnetic feature of the rocks [1,2]. Geomagnetic studies are one of the low cost and practical methods for mineral exploration, especially for mineral with magnetic property. Correct data collection and interpretation may help to get valuable information about the location, depth and dimensions of hidden ore bodies [3]. In magnetic survey, the physical property of interest is magnetic susceptibility of subsurface materials. Indeed, magnetometry is one of the indirect exploration methods for magnetic minerals such as iron - titanium oxide (magnetite, hematite, ilmenite, ...) and some sulfides, for example pyrrhotite [4,5].

This method can help reduce the exploration costs and optimize the drilling network, by specifying subsurface mineral resources. In order to investigate the potential of iron mineralization in depth and also to delineate ore bodies in Zarnan-Chorehnab, the geomagnetic method was used and data analysis was applied to the exploratory operation and delineation of iron ore deposit.

METHODS

Based on the field observation, preliminary geological and geochemical studies, the study area was selected for conducting geophysical survey to study the potential of iron mineralization. Considering the trend of mineralization and according to the geological map of the area, most geological structures have almost NW - SE as well as East - West trend. Therefore, the survey was performed along the profiles perpendicular to these structures with NE - SW and N - S trend which are each offset 30 to 50 meters and 15 to 25 meters station intervals, so a number of 5240 data measured. The GSM-19T instrument was used to record the magnetic data and subsequently, the necessary corrections were performed, Finally the data was plotted as magnetic field intensity contour map [6]. Reduction to the pole (RTP) filter [7] was applied to find out the pole in order to find anomalies on their origin. The data was interpreted qualitatively and quantitatively by softwares based on the existence or lack of the remnant magnetism [3,8].

FINDINGS AND ARGUMENT

In this survey the statistical analysis was performed in first step before any data preprocessing as well as data distribution type and their parameters are determined. The range of data indicates the absence of outliers and the highest value of earth magnetic field in this range is 62440 NT that can indicate the existence of large regional anomaly in the region. After the corrections were made, residual magnetic field map was prepared however because the locations of anomalies were not identical to the real locations, reduction to the pole filter was applied to resolve this problem [9]. The reduction to pole filter was used in order to reallocate the anomalies in the area. The maximum value of anomalies is 14040 NT and lowest of was found to be -3845 NT. This variation indicates the existence of magnetic minerals in the study area and showing nine anomalies located here.

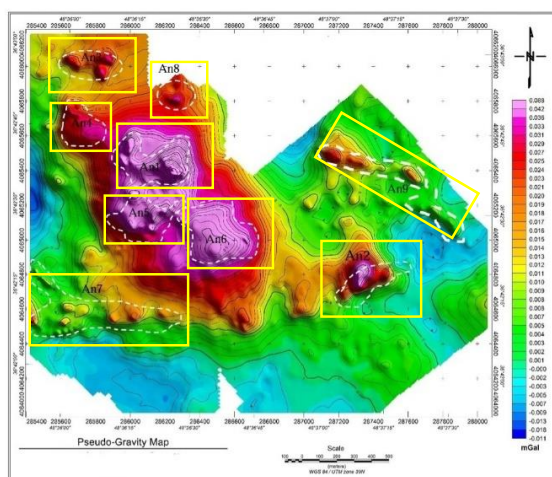


Figure 1. False gravity map

In order to better delineate the magnetic bodies, maps of the analytical signal and prospect areas and false gravity were plotted (Figure 1). In order to investigate qualitative distribution of anomalies and their depth extension, the upward continuation map was plotted. This shows that the anomalies of An3, An8 and An9 were shallower in depth located at about 40 meters, while the An5 anomaly had 50 meters deep extension and anomalies of An2 extends to about 100 meters. The important goals in interpretation of magnetic data are to find the location, depth and form of magnetic anomalies. In this research, analytical signal method was used to estimate the depth of anomalies. The estimated depths are summarized in Table 1. Then, inverse modeling of a simple form of magnetic dyke was performed. Accordingly, the proposed solutions for drilling were performed (Figure 2, Table 2).

Table 1. Depth probability of magnetic anomalies in their different locations

Anomaly	An1	An2	An3	An4	An5	An6	An7	An8	An9
Estimating depth(m)	10-30	5-30	10-20	20-40	10-40	+40	5-20	10-20	10-40

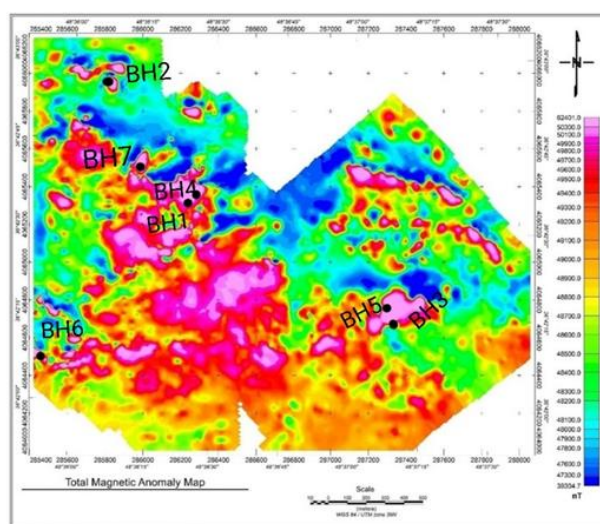


Figure 2. The location of the proposed boreholes on a map of the magnetic total field

Table 2. The coordinates for the recommended boreholes in the Zarnan-Chourehnab area

No.	Longitude	Latitude	Bottom depth (m)	Top depth (m)
BH1	286261	4065373	30	15
BH2	285833	4065960	30	20
BH3	287309	4064729	50	20
BH4	286296	4065390	60	15
BH5	287309	4064786	60	20
BH6	285438	4964531	40	12
BH7	285995	4065566	50	10

CONCLUSIONS

- According to highly magnetic anomalies observed and magnetic field obtained for the models, the study area is shown to have good potential for iron mineralization.
- Based on field observation, geological investigation and magnetometric surveys, nine magnetic anomalies (An1 to An9) were identified which it can be shown as lenses or veins on the magnetic maps.
- The total magnetic intensity map around the anomalies indicate that the mineralisation is not integrated as a large body and dissected by numerous faults in the region. Also the location of anomalies were

determined by applying reduction to the pole and the analytical signal and drawing the relevant maps of a particular anomaly.

- In order to estimate the depth of magnetic anomalies, two methods of Euler depth estimation and integrated method of Euler and Euler analytical signal have been used resulted in reporting An1, An2, An3, An7 and An8 anomalies.
- In this study, hidden ore bodies with high magnetic properties were identified. Based on the results of the classical interpretation (analytic signal map, pole reduction map, and false gravity map) as well as the results of modeling, few locations were proposed to perform drilling operations.

REFERENCES

- [1] Donohue, J., Hil, Q., and Brewster, D. (2012). "Geophysics at the Howsons Iron Project, NSW, Eastern Australia's new magnetite resource". ASEG Extended Abstracts, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1071/ASEG2012ab210>.
- [2] Robinson, E. S., and Coruh, C. (1988). "Basic Exploration Geophysics". John Wiley & Sons, New York, pp. 562.
- [3] Ganiyu, S. A., Badmus, B. S., Awoyemi, M. O., Akinyemi, O. D., and Olurin, O. T. (2012). "Upward continuation and reduction to pole process on aeromagnetic data of Ibadan Area, South-Western Nigeria". Earth Science Research, 2(1): 66.
- [4] Spicer, B., Morris, B., and Ugalde, H. (2011). "Structure of the Rambler Rhyolite, Baie Verte Peninsula, Newfoundland: Inversions using UBC-GIF Grav3D and Mag3D". Journal of Applied Geophysics, 75: 9-18.
- [5] Calagari, A. A. (1992). "Principals of geophysics exploration". Tabesh Press, Tabriz, pp. 588.
- [6] Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., and Keys., D. A. (1988). "Applied geophysics". Cambridge University Press.
- [7] Baranov, V., and Naudy, H. (1964). "Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole". Geophysics, 29: 67-79.
- [8] Jacobsen, B. H. (1987). "A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps". Geophysics, 52: 1138-1148.
- [9] Clark, D. A. (1997). "Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys". Journal of Australian Geology and Geophysics, 17(2): 83-103.



بررسی ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی در کانسار آهن منیتیتی زرنان - چوره‌ناب زرنان

الناز گراوندی^۱، سروش مدبری^{۲*}، پوریا گراوندی^۳، شجاع‌الدین نیرومند^۴، عبدالرحمان رجبی^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران
۲- دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران
۳- کارشناسی ارشد، گروه صنعتی-معدنی هلدینگ اهورا، تهران
۴- استادیار، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۱

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۹

چکیده

کانسارهای آهن زرنان- چوره‌ناب در ۵ کیلومتری شمال شرق شهر زرنان و در کوه‌های طارم، بین روستاهای زرنان و چوره‌ناب واقع است. مطالعات کانی‌شناسی و همچنین مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد که کانی‌سازی آهن بیشتر از نوع منیتیتی است، البته کانی‌های هماتیت و گوتیت نیز به صورت کم در اثر هوازدگی و دگرسانی تشکیل شده‌اند. کانه‌زایی آهن در این محدوده به صورت رگه‌ها و عدسی‌هایی در توده نفوذی الیگوسن تشکیل شده است. در سنگ‌های ولکانیکی نیز کانی‌زایی به صورت رگه‌ای با وسعت کم مشاهده می‌شود. ضخامت رگه‌ها بین ۰/۵ تا حدود ۱۵ متر و طول آن‌ها تا حدود ۲۰۰ متر قابل پیگیری است. مطالعات ژئوفیزیکی به روش مغناطیس‌سنجی در ۵۲۴۰ ایستگاه در وسعت ۸ کیلومترمربع برای تعیین نواحی پرتانسیل کانی‌سازی آهن و همچنین بررسی گسترش عمقی کانی‌سازی انجام شد. در این پژوهش نقشه‌های مغناطیس کل، برگردان به قطب، سیگنال تحلیلی و ادامه فراسو تهیه شد. نتایج به دست آمده از حفاری‌های انجام‌شده، انطباق بسیار خوبی با بررسی‌های مغناطیس‌سنجی دارد. بر اساس نتایج به دست آمده از این مطالعات، نه بی‌هنجاری An1- An9 در محدوده مورد مطالعه شناسایی شد که بی‌هنجاری‌های An3، An8 و An9 سطحی‌تر و دارای گسترش عمقی حدود ۴۰ متر هستند و دیگر بی‌هنجاری‌ها گسترش عمقی بیشتری دارند. نتیجه مدلسازی داده‌های مغناطیسی، تعیین موقعیت (محل و عمق تقریبی) و هندسه توده‌های مولد بی‌هنجاری مغناطیسی و موفق بودن مطالعات ژئوفیزیکی در اکتشاف در این منطقه است.

کلمات کلیدی

مغناطیس‌سنجی، تخمین عمق، روش اویلر، مدلسازی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، اکتشاف منیتیت، زرنان - چوره‌ناب.

استناد به این مقاله

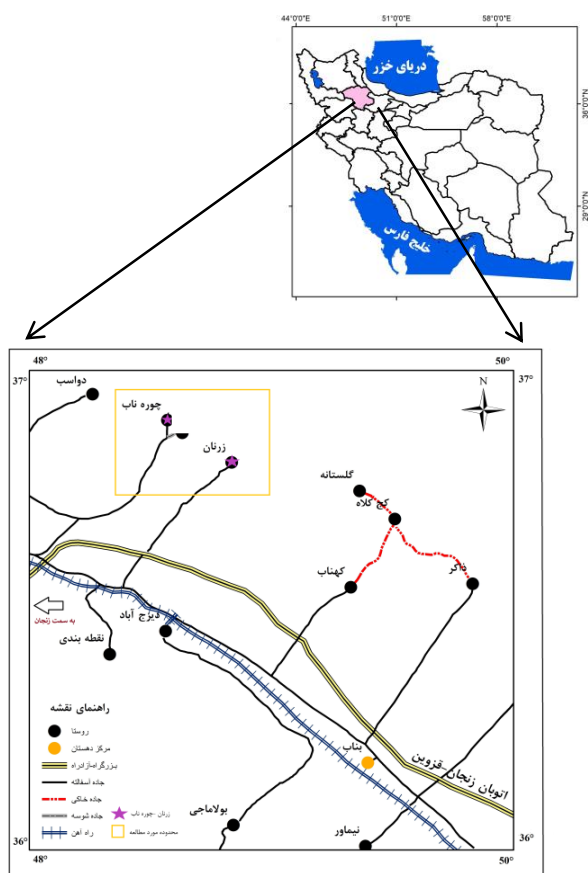
گراوندی، ا.، مدبری، س.، گراوندی، پ.، نیرومند، ش.، رجبی، ع.؛ ۱۴۰۱؛ "بررسی ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی در کانسار آهن منیتیتی زرنان - چوره‌ناب زرنان". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هفتم، شماره ۴، ص ۳۸-۱۹.

DOI: 10.30479/JMRE.2022.15699.1521



۱- مقدمه

ساختاری در آنها جای گرفته است. توده نفوذی در طی بالا آمدن، موجب تغییر شیب لایه‌ها شده و روند کشیدگی رخنمون‌ها از امتدادهای N12W، N58W و در مواردی از N45E پیروی می‌کند.



شکل ۱: نقشه راه‌های دسترسی به محدوده زرنان-چوره‌ناب

با توجه به شکل ۲ و همچنین بازدید صحرایی، عمده واحدهای سنگی در محدوده شامل انواع توف‌ها، ماسه‌سنگ، آندزیت همراه با توف سبز و ماسه‌سنگ، توف برشی به رنگ سبز-لاپیلی توف، توده نفوذی با ترکیب مونزونیت تا کوارتز مونیت، گرانودیوریت است. شکل هندسی کانه‌زایی آهن در این محدوده به صورت رگه‌ای و عدسی است که طول رگه‌ها متغیر و گاه تا حدود ۲۰۰ متر قابل پیگیری است.

۳- روش مطالعه

بر اساس مشاهدات صحرایی و بررسی مقدماتی زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی انجام شده، محدوده مورد مطالعه برای اجرای

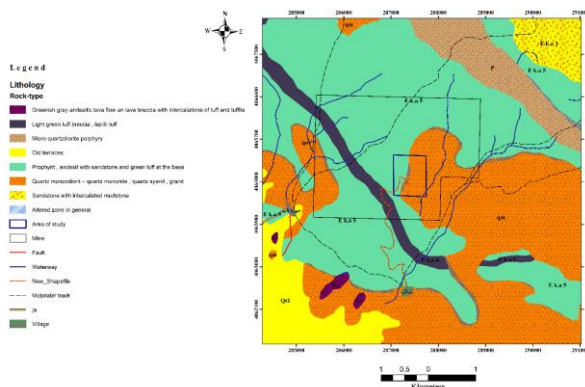
روش‌های ژئوفیزیکی بر مبنای خواص فیزیکی کانی‌ها و شرایط زمین‌شناسی آن متفاوت‌اند و در این بین، روش مغناطیسی در جایی که بین سنگ‌ها تفاوت ویژگی مغناطیسی وجود داشته باشند، مفید خواهد بود. مطالعات ژئومغناطیسی یکی از روش‌های کم‌هزینه و پرکاربرد برای اکتشاف منیتیت است [۲،۱]. برداشت اصولی و تفسیر صحیح داده‌های مغناطیس‌سنجی در کنار دیگر داده‌های اکتشافی، ضمن کاهش هزینه‌ها اطلاعات ارزشمندی در مورد موقعیت، عمق و ابعاد بخش‌های پنهان ذخایر آهن در اختیار پژوهشگر قرار می‌دهد [۳]. عملیات مغناطیس‌سنجی از قدیمی‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی است که برای اکتشاف معدنی در کانسارهای مختلف و به ویژه اکتشاف ذخایر آهن استفاده می‌شود. در روش مغناطیس‌سنجی، خاصیت فیزیکی مورد نظر، مغناطیس‌پذیری (Magnetic Susceptibility) مواد زیرسطحی است. در واقع مغناطیس‌سنجی یکی از روش‌های اکتشافی غیرمستقیم است که به حضور کانی‌های مغناطیسی نظیر اکسید آهن-تیتانیم (منیتیت، تیتانومنیستیت و تیتانوهماستیت) و برخی سولفیدهای آهن همچون پیروتیت حساس است [۵،۴].

این روش با تعیین حدود ماده معدنی در عمق، به کاهش هزینه‌های اکتشافی و بهینه‌سازی شبکه حفاری کمک می‌کند. به این منظور در کانسارهای زرنان-چوره‌ناب، برای بررسی پتانسیل کانه‌زایی آهن در بخش‌های عمیق و شکل ماده معدنی، داده‌برداری به روش مغناطیس‌سنجی انجام گرفت و تحلیل داده‌ها در عملیات اکتشافی و در تعیین زایش کانسار به کار گرفته شد.

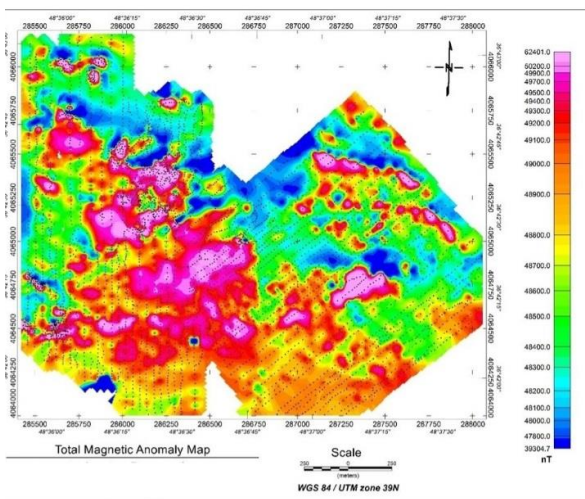
۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

کانسار آهن مورد مطالعه در فاصله حدود ۵ کیلومتری شمال شرق شهر زنجان واقع شده است. ناحیه مورد مطالعه در محدوده‌ای با عرض جغرافیایی $36^{\circ} 43' 16''$ تا $36^{\circ} 41' 52''$ شمالی و طول جغرافیایی $48^{\circ} 35' 50''$ تا $48^{\circ} 38' 10''$ شرقی قرار گرفته است (شکل ۱).

از منظر تکتونیکی، ساختارهای منطقه مطابق با دیگر مناطق البرز غربی، با امتداد شمال غربی-جنوب شرقی است. در ائوسن پایانی و الیگوسن، نهشته‌های ائوسن و قدیمی‌تر چین‌خورده و توده‌های نفوذی کم‌عمق هم امتداد با روند



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه



شکل ۳: نقاط شبکه برداشت (۵۲۴۰ نقطه برداشت) روی نقشه میدان مغناطیسی کل

در مرحله بعد، برای ادامه مراحل پردازش، داده‌ها به وسیله نرم‌افزار Geosoft Oasis montaj تحلیل شدند.

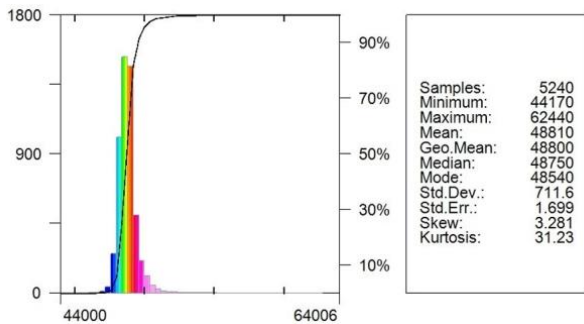
۳-۲- پردازش داده‌های میدان مغناطیسی متوسط زمین و مولفه‌های آن در محدوده مورد مطالعه

تغییرات میدان مغناطیسی زمین با طول و عرض جغرافیایی و زمان، با روابط محاسبات تجربی کاملی محاسبه شده‌اند. از آنها با عنوان میدان‌های مرجع مغناطیسی بین‌المللی (IGRF) یاد می‌شود و در مراحل پردازش از آنها استفاده شده است. این اطلاعات در به دست آوردن مقادیر میدان واقعی و تصحیحات ناحیه‌ای بسیار مناسب‌اند. پارامترهای میدان مغناطیسی منطقه مورد مطالعه با استفاده از مختصات جغرافیایی نقطه‌ای

عملیات داده‌برداری ژئوفیزیکی به روش مغناطیس‌سنجی برای بررسی پتانسیل کانه‌زایی آهن انتخاب شد. با توجه به روند کانی‌سازی و همچنین با توجه به نقشه زمین‌شناسی محدوده، اغلب ساختارهای زمین‌شناسی تقریباً روند شمال غربی- جنوب شرقی و همچنین شرقی- غربی دارند، بنابراین پروفیل‌های برداشت، عمود بر این ساختارها و با امتدادهای شمال شرقی- جنوب غربی و شمالی- جنوبی طراحی شدند (شکل ۳). در طراحی انجام شده، فاصله خطوط برداشت در بخش شرقی، نقاط برداشت در پروفیل‌های با راستای شمال شرقی- جنوب غربی و فاصله پروفیلی ۳۰ تا ۵۰ متر و فاصله ایستگاهی ۱۵ تا ۲۵ متر در نظر گرفته شد و به این ترتیب تعداد ۵۲۴۰ داده قرائت شد. برای ثبت داده‌های مغناطیس، از دستگاه مگنتومتر پروتون GSM_19T استفاده شد. پس از برداشت داده‌ها، تصحیحات ضروری بر روی داده‌ها انجام و در نهایت نقشه شدت میدان مغناطیسی کل [۶] ترسیم شد، سپس فیلتر برگرداندن به قطب [۷] برای قرار گرفتن ناهنجاری‌ها بر روی منش ایجادکننده ناهنجاری‌ها اعمال گردید، سپس با توجه به داشتن یا نداشتن اندازه مغناطیس باقیمانده و امکانات نرم‌افزاری مناسب تفسیرهای کیفی و کمی انجام گرفت [۸،۳]. برای انجام محاسبات و تهیه نقشه‌های میدان مغناطیسی، کلیه داده‌های برداشتی دستگاه و GPS به صورت منظم فایل‌بندی شدند. در این مرحله، قرائت‌های انجام‌شده شامل تاریخ، زمان برداشت، موقعیت دقیق برداشت و مقدار شدت مغناطیسی ثبت شده در یک بانک اطلاعاتی (نرم‌افزار Excel) وارد شد. نحوه ورود داده‌ها و فایل‌بندی اطلاعات به شکلی انجام گرفت که قابل استفاده در سایر برنامه‌های رایانه‌ای نیز باشد.

۳-۱- پردازش داده‌های مغناطیسی

یکی از مراحل مهم در مطالعات مغناطیس‌سنجی تصحیح و پردازش داده‌ها است. به دلیل وسعت کم منطقه مورد مطالعه، همچنین ناچیز بودن اثر ارتفاع و نبود توپوگرافی از جنس سنگ‌های با خاصیت مغناطیسی بالا، از انجام این تصحیحات بر روی داده‌ها صرف‌نظر شد. میدان مغناطیسی در طی روز دستخوش دو دسته تغییرات شامل تغییرات در روزهای آرام و دیگری تغییرات در روزهای مشغوش است. با توجه به اینکه کل تغییرات ایستگاه مبنا کمتر از ۵۰ نانو تسلا بود و این مقدار در مقایسه با بی‌هنجاری‌های مغناطیسی این محدوده ناچیز است، از تصحیح روزانه صرف‌نظر شد.



شکل ۴: هیستوگرام توزیع داده‌های برداشت شده (محور افقی: داده‌های برداشت شده بر حسب نانوتسلا، محور قائم: فراوانی) و جدول پارامترهای آماری

از منطقه، از سیستم IGRF به دست آمده است که در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱: پارامترهای میدان مغناطیسی زمین در محدوده زرنا-چوره‌ناب

شدت کل میدان مغناطیسی (F)	زاویه انحراف (I)	زاویه میدان مغناطیسی (D)
48259.8 nT	55.542°	5.113°

۳-۳- بررسی آماری داده‌ها

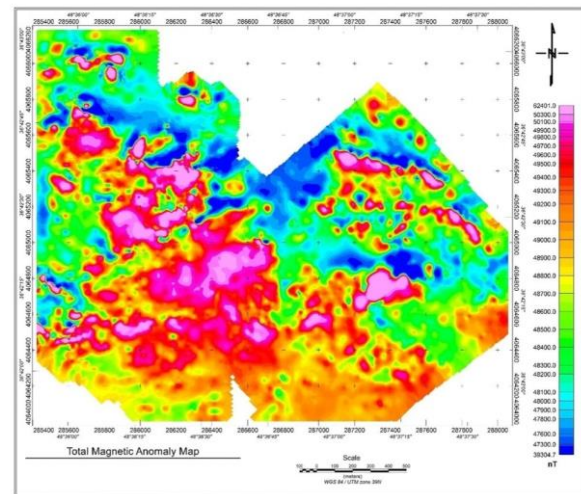
پیش از شروع پردازش داده‌های مغناطیس‌سنجی لازم است که داده‌های برداشت شده، پردازش آماری و نوع توزیع داده‌ها و همچنین پارامترهای آن مشخص شود تا در صورت وجود داده‌های خارج از ردیف، آنها را حذف کرد.

همان‌طور که هیستوگرام داده‌ها نشان می‌دهند (شکل ۴)، داده‌ها توزیع نرمال دارند و بازه تغییرات داده‌ها نشان‌دهنده عدم وجود داده خارج از ردیف است. با توجه به جدول اطلاعات آماری میانگین داده‌ها مقدار ۴۸۸۱۰ نانوتسلا و بیشترین مقدار متوسط میدان مغناطیسی زمین در این محدوده ۶۲۴۴۰ نانوتسلا است. این امر نشان‌دهنده وجود توده‌های نفوذی بزرگ (بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای) در منطقه است.

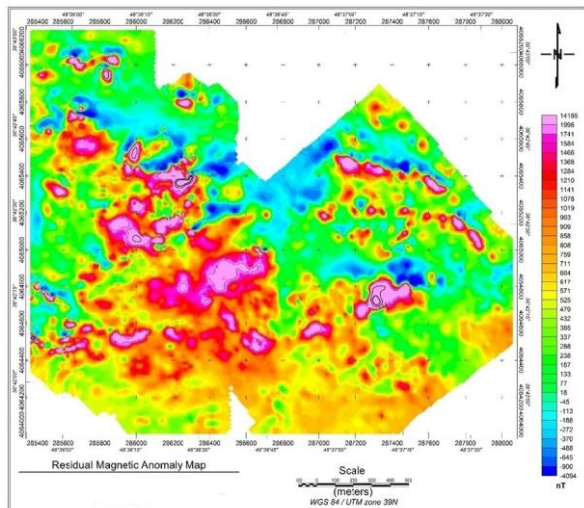
۴- پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیسی در محدوده مورد مطالعه

۴-۱- نقشه شدت میدان مغناطیسی کلی باقیمانده

پس از انجام تصحیحات و پردازش‌های مورد نیاز بر روی داده‌های برداشتی، نقشه میدان مغناطیسی کلی تهیه شد که در شکل ۵-الف نشان داده شده است. نقشه شدت کل میدان مغناطیسی، یک برداشت کلی از داده‌های مغناطیسی فراهم می‌کند و برای تفسیرهای کلی استفاده می‌شود [۹]. با حذف اثر اسکالر میدان مغناطیسی زمین و اثر بی‌هنجاری ناحیه‌ای، نقشه میدان مغناطیسی باقیمانده برای داده‌های این محدوده تهیه شد. به دلیل اثر زاویه میل میدان زمین، محل بی‌هنجاری‌ها بر روی نقشه بی‌هنجاری باقیمانده، نسبت به جای واقعی خود جابه‌جایی دارند که این مشکل با تبدیل برگرداندن قطب حل می‌شود (شکل ۵-ب).



(الف)



(ب)

شکل ۵: الف) نقشه میدان بی‌هنجاری مغناطیسی کلی، ب) نقشه میدان بی‌هنجاری مغناطیسی باقیمانده به همراه کنتورهای میدان مغناطیسی ۶۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۲۰۰۰ نانوتسلا

۴-۲- نقشه برگردان قطب (RTP)

پس از تصحیح تغییرات زمانی، تصحیح در پردازش داده‌های مغناطیسی، انتقال داده‌ها به قطب شمال مغناطیسی ($I=90$) اعمال می‌شود. این تصحیح اثر زاویه میل^۲ و زاویه انحراف^۳ میدان مغناطیسی زمین را حذف می‌کند.

استفاده از فیلتر برگردان به قطب برای دستیابی به محل واقعی بی‌هنجاری‌ها در مناطق مورد بررسی انجام می‌شود [۱۰]. از آنجا که میل و انحراف مغناطیسی باعث می‌شوند تا بی‌هنجاری‌های مغناطیسی نسبت به منبع ایجادکننده خود انحراف داشته باشند، فیلتر مربوط به تصحیح زاویه میل و انحراف مربوطه بر روی داده‌های مغناطیسی اعمال می‌شود و در نهایت، بر اساس داده‌های مغناطیسی انتقال داده به قطب، تفسیر اصلی انجام می‌گیرد [۱۱]. برای رفع این مشکل از تبدیل برگردان قطب استفاده شده است (شکل ۶). با استفاده از این فیلتر، میدان مغناطیسی از یک عرض مغناطیسی که در آن بردار میدان زمین مایل و شیب‌دار است، به قطب مغناطیسی که میدان قائمی است، منتقل می‌شود [۱۲]. این تبدیل، اثر میدان مغناطیس محیط را کاهش می‌دهد و تشخیص درست‌تری از موقعیت بی‌هنجاری فراهم می‌کند [۱۳]. از آنجا که اثر زاویه میل میدان در این نقشه برطرف شده است، بنابراین بخشی از بی‌هنجاری‌های منفی ممکن است مربوط به شیب‌دار بودن توده‌های مغناطیسی باشد ولی بخش عمده آن ممکن است حاصل شکستگی‌های ساختاری (درزه، گسل و

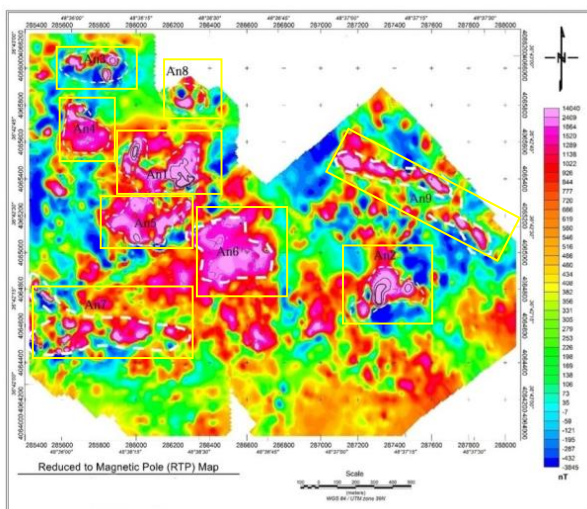
همبری زمین‌شناسی) باشد که روی نقشه برگردان به قطب با خط چین نشان داده شده است (شکل ۷).

همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار بی‌هنجاری حدود ۱۴۰۴۰ نانوتسلا و کمترین مقدار آن ۳۸۴۵- نانوتسلا است که این تغییرات زیاد نشانگر وجود کانی‌سازی منیتیتی در این محدوده است. روی تصویر دیگری از نقشه برگردان به قطب (شکل ۷) محل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی با خط چین سفید رنگ نشان داده شده است. تفسیر نهایی بر روی داده‌های برگردان شده به قطب انجام می‌گیرد [۱۱]. سه بی‌هنجاری $An6, An5, An1$ بی‌هنجاری‌های با شدت بالای این محدوده‌اند. علاوه بر این سه بی‌هنجاری نسبتاً قوی، شش بی‌هنجاری دیگر با شدت متوسط تا نسبتاً ضعیف بر روی نقشه مشخص شده است.

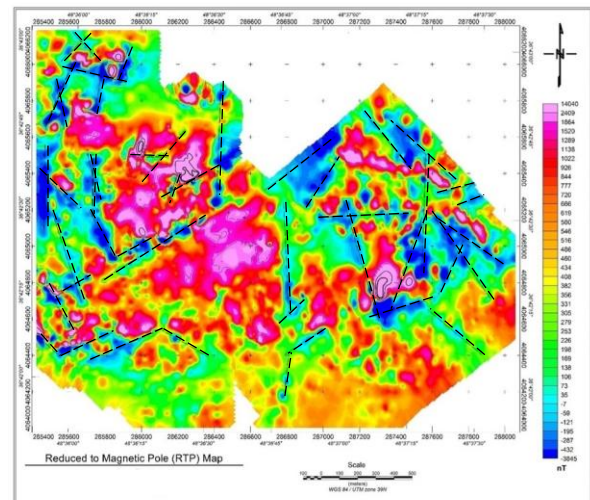
۴-۳- نقشه سیگنال تحلیلی (AAS)

این روش یکی از روش‌های کمی تفسیر داده‌های میدان پتانسیل است. سیگنال تحلیلی، روشی نیمه‌خودکار برای تعیین پارامترهای چشمه (عمق، مکان افقی و شکل) ایجاد بی‌هنجاری‌های میدان است. این روش، روشی پراهمیت در تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی است [۱۴].

سیگنال تحلیلی با استفاده از مشتق در جهات مختلف اثر روند منطقه‌ای (از نوع درجه اول) را در سه جهت حذف می‌کند و با حذف اثر بی‌هنجاری‌های سطحی توده مغناطیسی

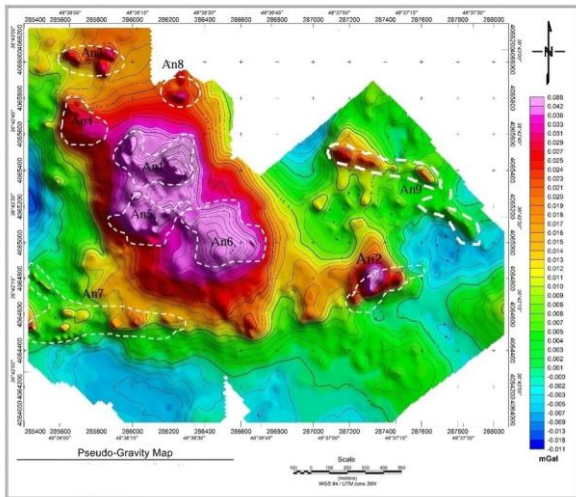


شکل ۷: نقشه بی‌هنجاری مغناطیسی برگردان به قطب (خط چین‌های سفید موقعیت بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مشخص شده است).



شکل ۶: نقشه میدان مغناطیسی باقیمانده پس از تبدیل برگردان به قطب به همراه کنتورهای ۶۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۲۰۰۰ نانوتسلا (خط چین، خطواره‌های مغناطیسی (محل احتمالی شکستگی یا گسل) است).

گرانی کاذب به همراه دیگر نقشه‌های تفسیری برای پیشنهاد نقاط مناسب برای حفاری استفاده می‌شود.



شکل ۹: نقشه گرانی کاذب

۴-۵- نقشه گسترش به بالا در محدوده (ادامه فراسو)

روش ادامه فراسو، میدان پتانسیل اندازه‌گیری شده در یک سطح را به میدانی که می‌تواند بر روی یک سطح دیگر و دور از چشمه‌های سطحی اندازه‌گیری شود، تبدیل می‌کند. فیلتر فراسو برعکس فیلتر مشتق اول قائم عمل می‌کند، به طوری که بی‌هنجاری‌های مربوط به منشاهای عمیق را تقویت و بی‌هنجاری‌های مربوط به سطح را تضعیف کرده [۱۶] و تاثیر منابع محلی را کم می‌کند [۲].

روش ادامه فراسو اثر بی‌هنجاری‌های سطحی با بسامد بالا را حذف و به این طریق اثر بی‌هنجاری‌های عمیق را بهتر آشکار می‌سازد [۳]. در این روش، داده‌های مغناطیسی اندازه‌گیری شده به وسیله رابطه ۱ از سطح برداشت داده‌ها بر روی سطوح ترازای بالاتر از سطح برداشت تصویر می‌شوند [۱۷].

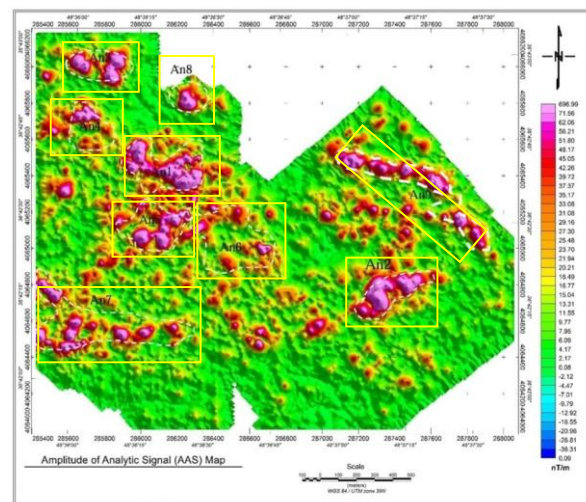
$$P(x, y, -z) = - \int_0^{\infty} \frac{\bar{P}(r)zrdr}{(r^2+z^2)^{1.5}} \quad (1)$$

که در آن:

$P(x, y, -z)$: مقدار هم‌ارز میدان در یک نقطه بر روی سطح دیگری در بالای سطح مبنا با فرض مثبت بودن Z به طرف پایین است.

$\bar{P}(r)$: مقدار میانگین میدان P در اطراف دایره‌ای به شعاع r است و به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

را بهتر نشان می‌دهد. در این فیلتر مرز منشاهای مغناطیسی بر نقاط بیشینه نقشه سیگنال تحلیلی منطبق است. از مشکلات این روش یکی فاصله توده مغناطیسی نسبت به سطح زمین است که هرچه نزدیک‌تر باشد پاسخ مناسب‌تر است و دیگری اختلاف اثر خودپذیری توده مغناطیسی و سنگ‌های اطراف است که هرچه اختلاف بیشتر باشد، نقشه سیگنال تحلیلی واضح‌تر است. این نقشه‌ها بر اساس ریشه دوم جمع توان دوم گرادیان‌های قائم و افقی میدان مغناطیسی تهیه شده است. نقشه شدت سیگنال تحلیلی (AAS) در شکل ۸ نشان داده شده است. به طور کلی این نقشه نسبت به نقشه بی‌هنجاری مغناطیسی، مرز توده‌های مغناطیسی را بهتر نشان می‌دهد [۱۵] و در مرکز بی‌هنجاری مقدار آن بیشینه می‌شود. روی نقشه سیگنال تحلیلی نیز بی‌هنجاری‌های $An3, An2, An1$ با شدت بسیار خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۸: نقشه سیگنال تحلیلی در محدوده زرنان - چوره‌ناب (خط چین‌ها مرز بی‌هنجاری است.)

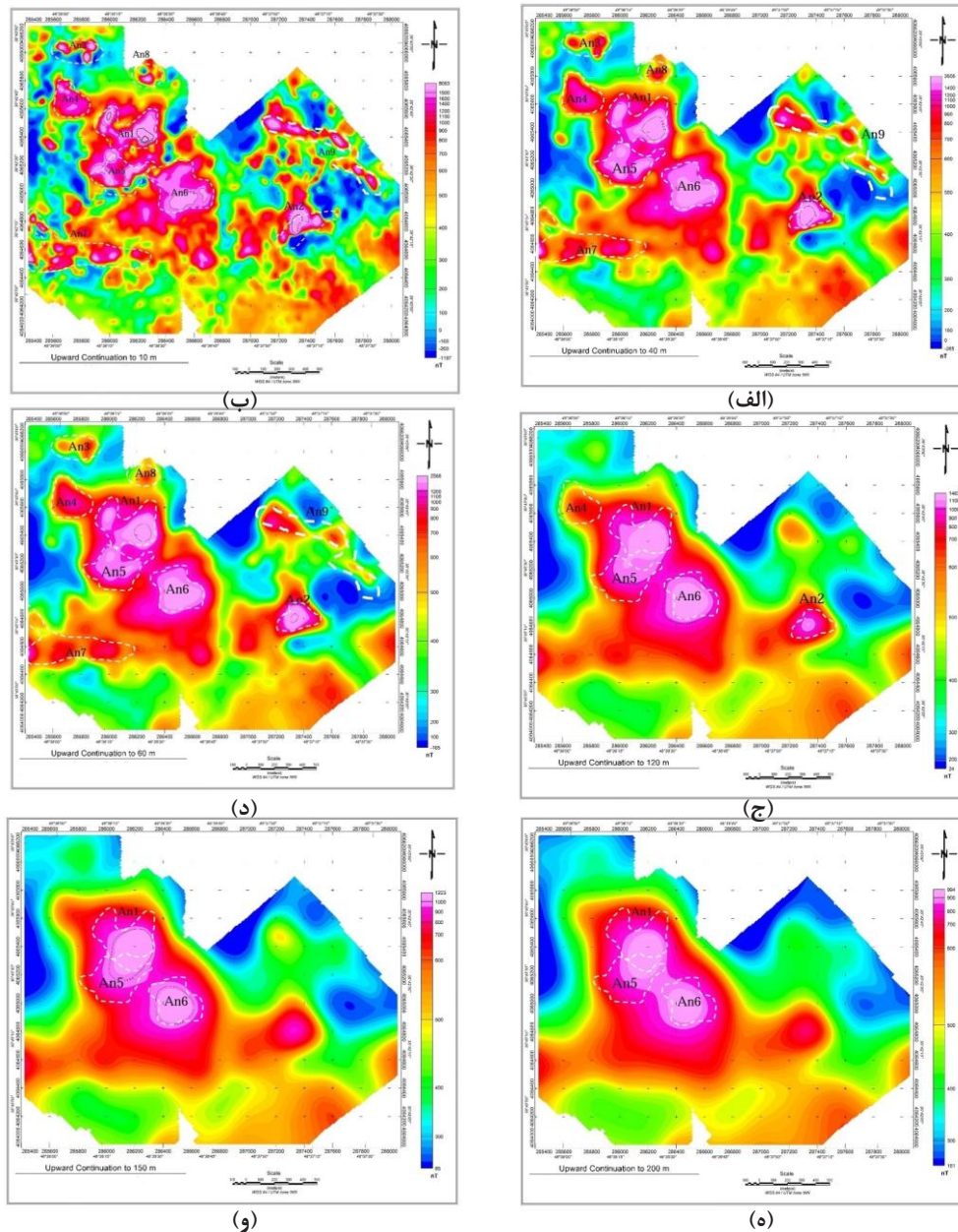
۴-۴- نقشه گرانی کاذب

نقشه گرانی کاذب برای داده‌های محدوده مورد نظر در شکل ۹ نشان داده شده است. با این تبدیل، بی‌هنجاری مغناطیسی که ماهیت برداری دارد، به بی‌هنجاری گرانی تبدیل می‌شود. از آنجا که داده‌های گرانی ماهیت اسکالر دارند، تفسیر آنها راحت‌تر و بیشینه گرانی روی مرکز ماده معدنی مورد نظر قرار می‌گیرد. در این نقشه بی‌هنجاری شدت بالا نشان‌دهنده نواحی امیدبخش برای کانی‌سازی احتمالی است. همچنین از نقشه

بالا اثر بی‌هنجاری‌های با طول موج کوتاه را حذف، دامنه بی‌هنجاری را تضعیف و اختلالات را کاهش می‌دهد، بنابراین مانند یک روش پایین گذر عمل می‌کند [۱۸]. این نقشه‌ها ضمن اینکه اثر نویزهای سطحی را حذف می‌کنند، راه ساده‌ای برای بررسی کیفی گسترش حجمی بی‌هنجاری‌ها و نیز گسترش عمقی آنها هستند. بررسی گسترش عمقی بی‌هنجاری‌ها به وسیله نقشه‌های ادامه فراسو نشان می‌دهد

$$\bar{P}(r) = \frac{1}{2\pi} \int P(r, \varphi) d\varphi \quad (2)$$

برای گسترش عمقی یا به عبارت دیگر تعیین ریشه‌دار یا سطحی بودن عوامل بی‌هنجاری‌ها، نقشه ادامه فراسو در ارتفاع ۱۰ تا ۲۰۰ متر تهیه و در شکل ۱۰ آورده شده است. این شکل شامل نقشه‌هایی است که با استفاده از پردازش ادامه فراسو (Upward) تهیه شده‌اند. فیلتر ادامه به سمت



شکل ۱۰: نقشه ادامه فراسو؛ الف) نقشه ادامه فراسو ۱۰ متر، ب) نقشه ادامه فراسو ۴۰ متر، ج) نقشه ادامه فراسو ۶۰ متر، د) نقشه ادامه فراسو ۱۲۰ متر، ه) نقشه ادامه فراسو ۱۵۰ متر، و) نقشه ادامه فراسو ۲۰۰ متر

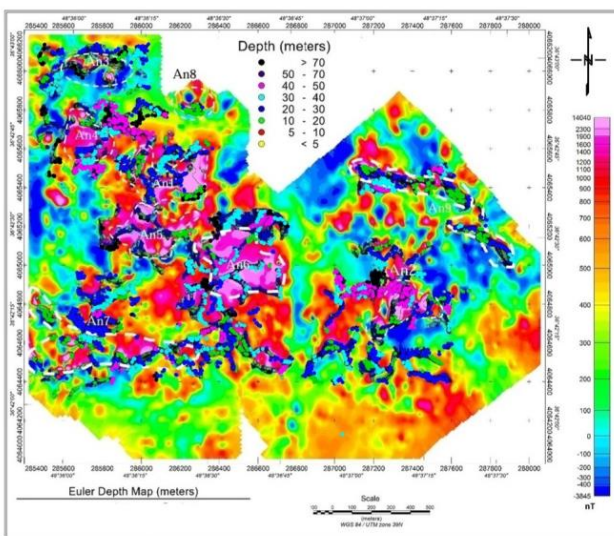
۵- تخمین عمق

یکی از اهداف مهم تفسیر داده‌های مغناطیسی تعیین محل، عمق و شکل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی است. برای تعیین مرزها و عمق بی‌هنجاری، روش‌هایی بر پایه مشتقات میدان به کار گرفته شد [۱۶]. برای تخمین عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی، تلاش‌های فراوانی انجام گرفته است. ابتدا [۱۹] مساله تخمین عمق بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را مطرح کرد. روش‌های موفق قدیمی بر پایه واهمامیخت تدوین شده بودند. ورنر روشن ساخت که رابطه ساده‌شده‌ای برای تعیین عمق یک دایک دوبعدی نازک، به شکل خطی نسبت به پارامترهای دایک می‌توان به دست آورد [۲۰]. روش ورنر را برای تحلیل ناپیوستگی‌های مغناطیسی با استفاده از مشتقات قائم و افقی شدت میدان مغناطیسی کل بسط دادند [۲۱]. روشی را بر مبنای معادله همگن اویلر بنا نهاد که دیگران [۲۶-۲۲] آن را تکمیل کردند. برخی از روش‌های مدل‌سازی بر اساس رابطه میان بی‌هنجاری مغناطیسی و ویژگی‌های منبع مغناطیسی با فرض شکل‌های ساده عمل می‌کنند [۲۷]. از روش‌های خودکار مانند طیف توانی، دکانولوشن اویلر و دکانولوشن ورنر برای تفسیر سریع و تخمین عمق بی‌هنجاری‌ها استفاده می‌شود [۲۸، ۲۱]. در این پژوهش برای تخمین عمق بی‌هنجاری‌ها، روش دکانولوشن اویلر به کار گرفته شده است شکل ۱۱-الف. از آنجا که تخمین عمق اویلر بر اساس مشتقات اول (جهتی و قائم)

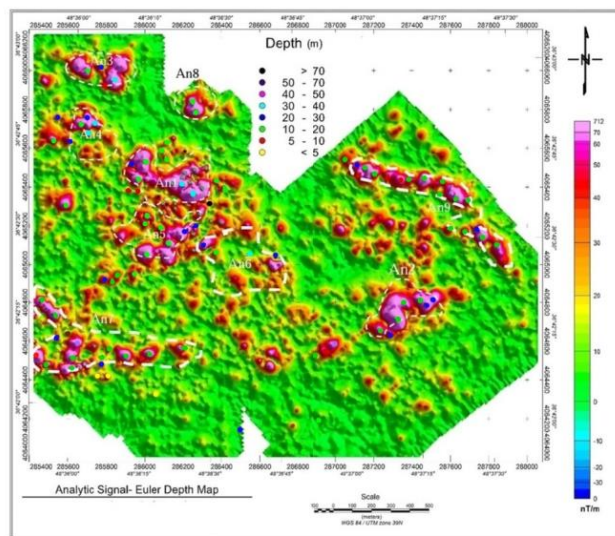
که بی‌هنجاری‌های An3، An8، An9 سطحی‌تر و دارای گسترش عمقی حدود ۴۰ متر هستند و بی‌هنجاری An5 در حدود ۵۰ متر است و بی‌هنجاری An2 تا نقشه فراسوی ۱۲۰ متر ادامه دارد که موید ریشه‌دار بودن عامل این بی‌هنجاری تا عمق حدود ۱۰۰ متر است.

این نقشه‌ها بیانگر ادامه بی‌هنجاری An7 به سمت غرب محدوده‌اند و در ادامه فراسوی ۶۰ متر هم مشاهده می‌شوند. مجموعه بی‌هنجاری‌های An1، An4، An5، An6 را می‌توان در عمق‌های بیشتر، یک بی‌هنجاری واحد با گسترش عمقی حدود ۱۵۰ متر در نظر گرفت که در محل بی‌هنجاری An1 شدت بیشتری دارد.

برای بررسی اثر گسل بین آنومالی‌ها می‌توان با توجه به موقعیت گسل زنگان نسبت به ناحیه مورد مطالعه که در شمال شهر زنگان واقع شده، فاصله خطواره گسلش به وسیله آخرین گزارش سازمان زمین‌شناسی (کتاب دانشنامه گسل‌های ایران ۱۳۹۳) از ناحیه مورد مطالعه ۲٫۴ کیلومتر است. با توجه به مشاهدات ساز و کار کانونی بررسی شده به وسیله مراکز مختلف، شیب این گسل حدوداً ۷۰ درجه به سمت شمال (به سمت An1، An5، An6 مورد مطالعه) است، بنابراین احتمال می‌رود این گسل طی حرکات تکتونیکی عاملی بر بیرون‌زدگی منیتیت در این ناحیه باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۱۱: الف) تخمین عمق به روش دیکانولوشن اویلر، ب) نقشه تخمین عمق به روش تلفیقی سیگنال تحلیلی- اویلر

(همبری، گسل، بی‌هنجاری)، تخمین عمق انجام می‌گیرد و امکان دارد مربوط به بی‌هنجاری‌ها نباشد، بنابراین در این پژوهش از روش تلفیقی سیگنال تحلیلی- اویلر استفاده شده است.

۵-۱-۱- تعیین عمق به روش سیگنال تحلیلی و دکانولوشن اویلر

سیگنال تحلیلی یکی از روش‌هایی است که در آن به طور گسترده از تفسیر داده‌های میدان پتانسیل استفاده شده است. سیگنال تحلیلی یک تابع، کمیت مختلطی است که مولفه حقیقی و موهومی آن به ترتیب مشتق افقی و قائم آن تابع‌اند. اولین بار [۲۸] از روش سیگنال تحلیلی در تفسیر ساختارهای دوبعدی استفاده کرد، بنابراین سیگنال تحلیلی و دامنه سیگنال تحلیلی میدان اندازه‌گیری شده در حالت دوبعدی به ترتیب با روابط زیر تعریف می‌شود [۲۸]:

$$AAs(x) = \frac{\partial T}{\partial X} + i \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3)$$

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

که در آن:

$$\frac{\partial T}{\partial X} : \text{مشتق افقی میدان}$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} : \text{مشتق قائم میدان است.}$$

سیگنال تحلیلی در تعیین محل و عمق منبع‌های مغناطیسی کاربرد دارد. اساس روش تلفیق سیگنال تحلیلی و دکانولوشن اویلر، بر تلفیق مشتقات سیگنال تحلیلی و معادله اویلر است. این روش برخلاف روش اویلر، فقط بر روی بیشینه سیگنال تحلیلی که منطبق بر مرکز بی‌هنجاری است، عمق بی‌هنجاری را تخمین می‌زند. عمق‌های تخمین زده شده برای منابع بی‌هنجاری مطابق دایره‌های رنگی در شکل ۱۰ الف-ب نشان داده شده است و به طور خلاصه عمق‌های تخمین زده شده برای هر یک از بی‌هنجاری‌ها در جدول ۳ آورده شده است. در این نقشه، رنگ هر دایره محل و عمق حدودی بی‌هنجاری در آن نقطه است. بر این اساس بی‌هنجاری‌های An1، An2، An3، An7، An8 دارای عمق کمتر یا به عبارت دیگر روباره کمتری و دیگر بی‌هنجاری‌ها نسبتاً عمیق‌تر هستند.

انجام می‌گیرد، بنابراین در تمام جاهایی که مشتقات تغییراتی دارند، تخمین عمق انجام می‌گیرد و امکان دارد مربوط به بی‌هنجاری‌ها نباشد، بنابراین در این مطالعات از روش تلفیقی سیگنال تحلیلی- اویلر استفاده شده است (شکل ۱۱-ب).

۵-۱- تئوری روش تخمین عمق اویلر

دکانولوشن اویلر به عنوان یک روش قدرتمند برای برآورد عمق و هندسه منابع مغناطیسی مدفون به کار می‌رود. این روش نیاز به اطلاعاتی از منبع مغناطیدگی ندارد و از مدل‌های زمین‌شناسی مستقل است [۲۱]. به طور کلی روش دکانولوشن اویلر به دو حالت سه‌بعدی و هم به صورت دوبعدی به طور گسترده در تفسیر اتوماتیک داده‌های میدان پتانسیل (مغناطیس و گرانی) استفاده می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان موقعیت و عمق ساختارهای زمین‌شناسی که موجب بی‌هنجاری مغناطیسی یا گرانی شده‌اند را روی نقشه‌های دوبعدی تخمین زد. شکل استاندارد روش اویلر مطابق رابطه زیر است:

$$(x - x_0) \frac{\partial f}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial f}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial f}{\partial z} = N(B - f)$$

که در آن:

x_0, y_0, z_0 : مختصات چشمه میدان پتانسیل (f) است که در ایستگاه (x, y, z) اندازه‌گیری شده است.

B : مقدار زمینه میدان پتانسیل

N : شاخص ساختاری بی‌هنجاری میدان است و مقدار آن

برای شکل‌های مختلف مطابق جدول ۲ است.

برای حل رابطه اویلر و تخمین عمق و موقعیت منشا بی‌هنجاری، داده‌ها به وسیله یک پنجره متحرک انتخاب می‌شوند و برای هر موقعیت پنجره، مجموعه‌ای از معادلات خطی به وسیله روش حداقل مربعات مانده‌ها حل می‌شود. از آنجا که تخمین عمق اویلر بر اساس مشتقات اول (جهتی و قائم) انجام می‌گیرد، بنابراین در محل تغییرات مشتق‌ها

جدول ۲: مقدار شاخص ساختاری (SI) تخمین عمق اویلر

ساختار	کره یا دوقطبی	استوانه	دایک، سیل	کنتاکت
S.I داده مغناطیسی	۳	۲	۱	۰
S.I داده گرانی	۲	۱	۰	-۱

جدول ۳: عمق احتمالی بی‌هنجاری مغناطیسی در محل‌های مختلف آنها

An9	An8	An7	An6	An5	An4	An3	An2	An1	بی‌هنجاری
۱۰-۴۰	۱۰-۲۰	۵-۲۰	+۴۰	۱۰-۴۰	۲۰-۴۰	۱۰-۲۰	۵-۳۰	۱۰-۳۰	عمق تخمینی (متر)

مدل‌های سه‌بعدی است و هرگاه ساختارهای زمین‌شناسی اجازه دهد، بهتر است از آن استفاده کنیم [۲۹].

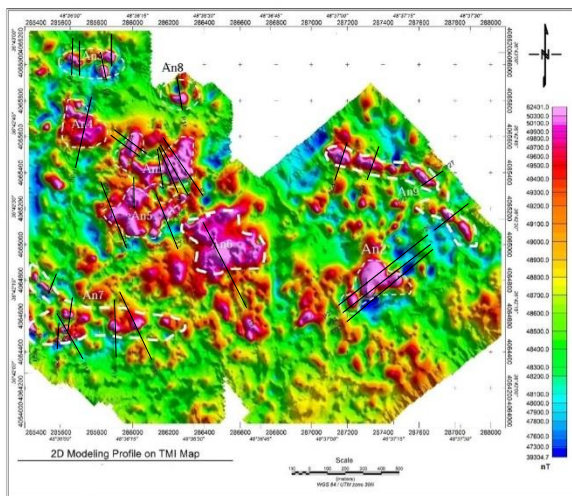
۳-۶- روش تحقیق

در ابتدا برای انجام مدل‌سازی دوبعدی، پروفیل‌هایی در راستای عمود بر بی‌هنجاری‌ها تهیه شده، سپس مدل‌سازی وارون به صورت پارامتری و با فرض شکل ساده دایک مغناطیسی انجام شده است.

محل پروفیل‌های تهیه شده برای مدل‌سازی روی نقشه میدان مغناطیسی کلی نشان داده شده است. مدل‌سازی با فرض شکل هندسی دایک شیب‌دار انجام شده و نتایج آن در شکل ۱۲ به

جدول ۴: نتایج اندازه‌گیری‌های خودپذیری مغناطیسی در محدوده

نمونه	خودپذیری مغناطیسی (SI)	توضیحات
۱	۰٫۳۲	رخنمون
۲	۱٫۳۳	سینه کار Z1
۳	۰٫۳۸	سینه کار Z2
۴	۰٫۸۴	رخنمون جنوب محدوده
۵	۰٫۴۹	رخنمون
۶	۰٫۳۷	اندزیت پورفیری



شکل ۱۲: موقعیت پروفیل‌های تهیه شده برای مدل‌سازی دوبعدی

۶- مدل‌سازی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی

۶-۱- آزمایش‌های خودپذیری مغناطیسی

هدف از تفسیر بی‌هنجاری مغناطیسی، به دست آوردن خودپذیری مغناطیسی، شکل و عمق بی‌هنجاری مدفون درون زمین است [۲۶]. از آنجا که نتایج مدل‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی غیریکتا است یعنی این‌که از لحاظ تئوری بی‌نهایت مدل می‌توان به یک بی‌هنجاری برازش کرد و مدل آن را به دست آورد، بنابراین برای کنترل نتایج مدل‌سازی ابتدا بر روی چند نمونه تهیه شده از معدن، آزمایش خودپذیری مغناطیسی به وسیله دستگاه Terraplus-KT10 با دقت اندازه‌گیری خودپذیری مغناطیسی 10^{-6} SI انجام شده است (جدول ۴). مطابق این جدول بالاترین مقدار خودپذیری مغناطیسی ۱٫۳۳ و کمترین مقدار ۰٫۳۲ (در واحد SI) برای نمونه‌های سنگ آهن به دست آمده است. نمونه ۶ مربوط به یک نمونه سنگ آندزیتی در یکی از بی‌هنجاری‌های شمال محدوده است.

۶-۲- مدل‌سازی وارون بی‌هنجاری‌های مغناطیسی

هرچند با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی (ویژگی فیزیکی) شکل کلی توده‌های مغناطیسی به دست می‌آید ولی در این پژوهش به دو دلیل از مدل‌سازی دوبعدی (پارامتری) استفاده می‌شود:

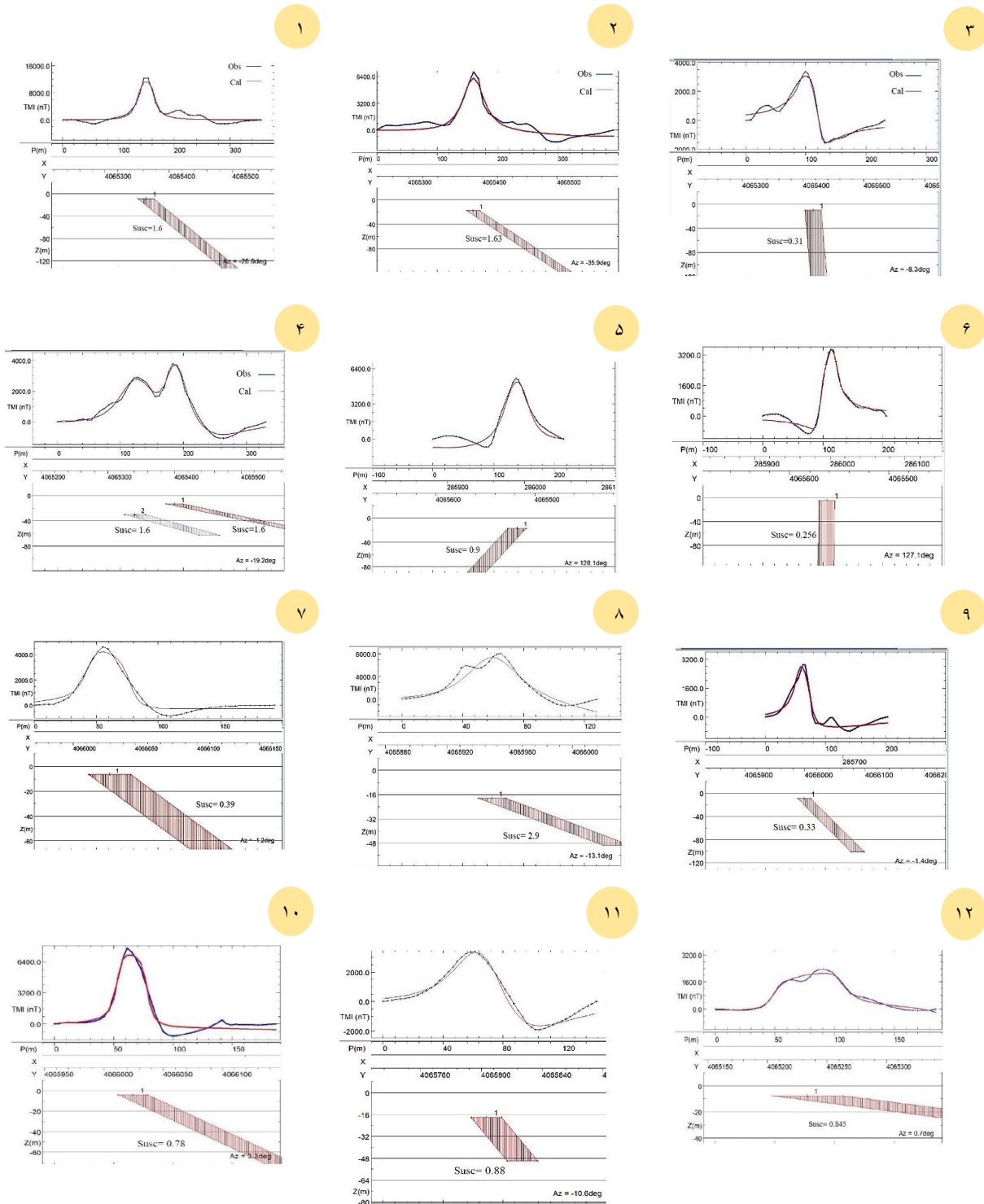
۱- نرم‌افزار Mag3d تهیه شده توسط دانشگاه UBC بیشتر برای خودپذیری مغناطیسی کمتر از یک استفاده می‌شود و در صورت وجود خودپذیری مغناطیسی بالای یک و به دلیل غیرخطی بودن روابط مدل‌سازی، کارایی چندانی ندارد.

۲- مدل‌سازی سه‌بعدی همواره مرزهای دقیقی از توده‌ها را نمی‌دهد.

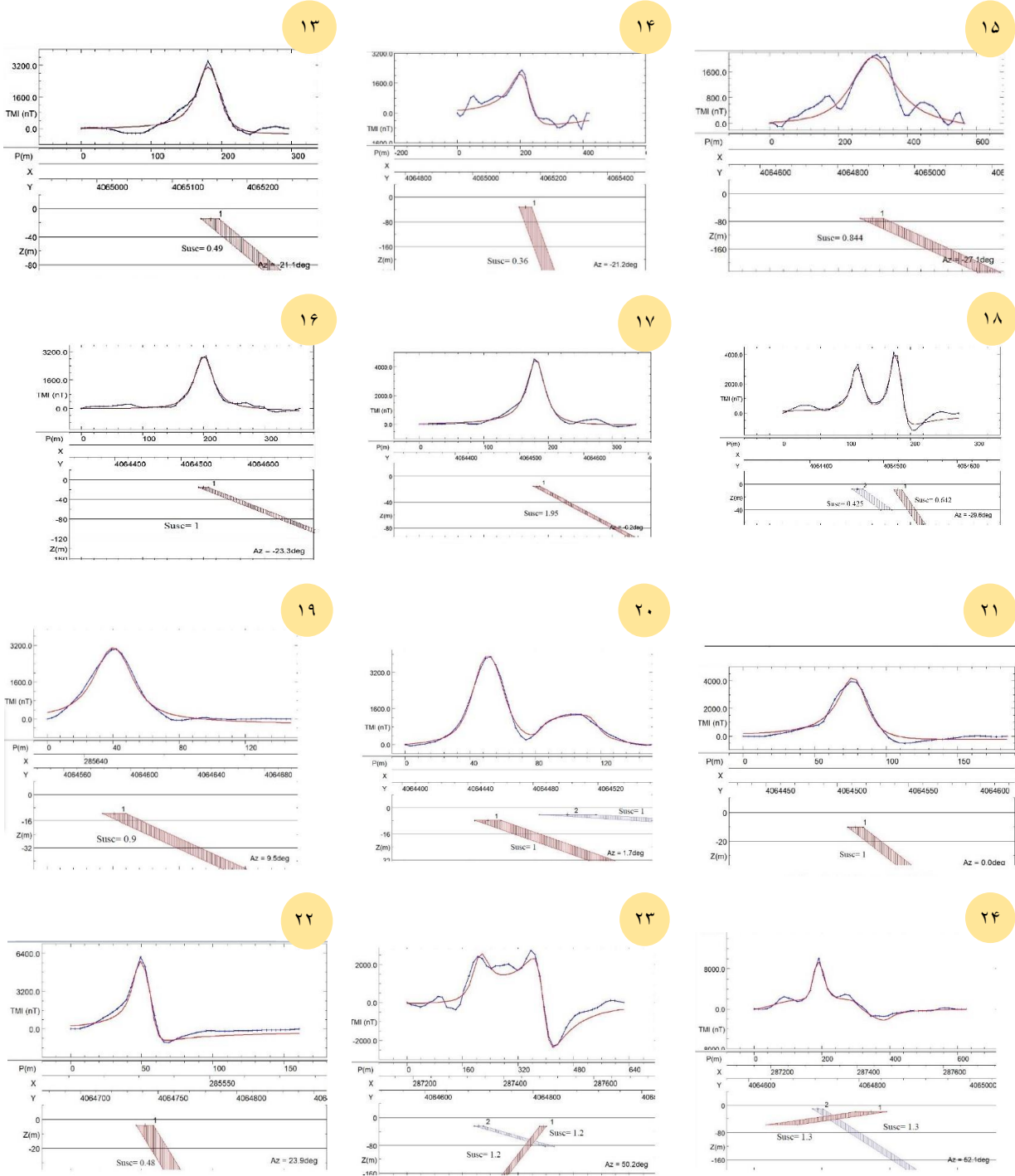
بنابراین با توجه به این موارد و سهولت استفاده از نتایج و همچنین جواب‌های نسبتاً نزدیک به واقعیت، از مدل‌سازی دوبعدی استفاده می‌شود. در مدل‌های دوبعدی، طول ساختارهای زمین‌شناسی اغلب بیشتر از عرض آنهاست و بی‌هنجاری تولید شده از آن نیز به طور مشابه طویل است. مدل کردن منشا بی‌هنجاری‌های دوبعدی بسیار راحت‌تر از

در مدل‌سازی داده‌های مغناطیسی هرچه برازش بین میدان‌های مغناطیسی مشاهده و محاسبه شده بهتر باشد، خطای مدل‌سازی کمتر است. خلاصه مشخصات در جدول ۵ آورده شده است.

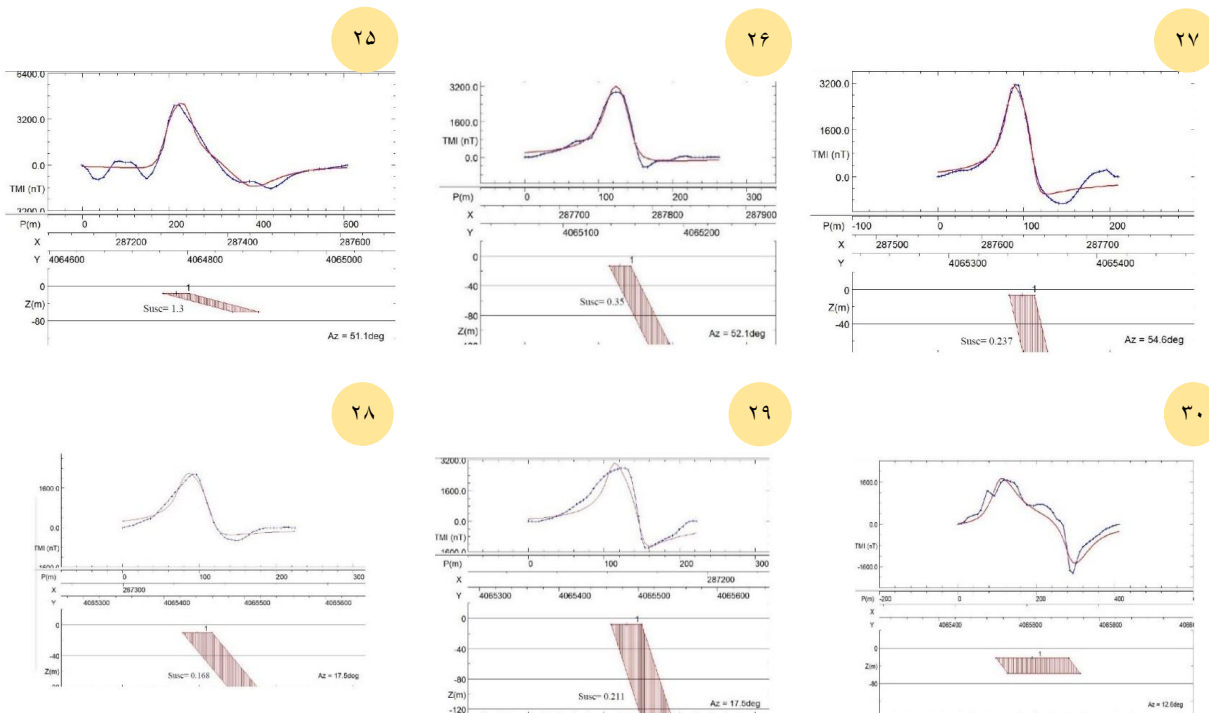
ترتیب برای پروفیل‌های ۱ تا ۳۰ آورده شده است. در این شکل‌ها منحنی سیاه‌رنگ میدان مغناطیسی مشاهده شده (Observed) و منحنی قرمز رنگ پاسخ مدل (Calculated) را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: مقطع عمقی حاصل از مدل‌سازی به ترتیب برای پروفیل‌های ۱ تا ۳۰



شکل ۱۳ (ادامه): مقطع عمقی حاصل از مدل‌سازی به ترتیب برای پروفیل‌های ۱ تا ۳۰



شکل ۱۳ (ادامه): مقطع عمقی حاصل از مدل‌سازی به ترتیب برای پروفیل‌های ۱ تا ۳۰

۷- نتیجه‌گیری

- محدوده مورد نظر پتانسیل خوبی برای کانی‌سازی آهن دارد که با توجه به شدت بی‌هنجاری مغناطیسی مشاهده شده و خودپذیری مغناطیسی به دست آمده برای مدل‌ها، به صورت کلی می‌توان گفت که احتمال کانی‌سازی آهن به ویژه توده منیتیتی در این محدوده بسیار بالاست.

- بر اساس برداشت‌های صحرایی و بررسی‌های زمین‌شناسی و مطالعات مغناطیس‌سنجی نه بی‌هنجاری مغناطیسی An1 تا An9 مشخص شده است. این بی‌هنجاری‌ها به صورت عدسی و رگه‌هایی در نقشه‌های مغناطیسی قابل مشاهده است.

- با بررسی نقشه شدت مغناطیسی کل در محدوده مورد بررسی در خصوص پراکندگی آنومالی‌های این منطقه به علت یکپارچه نبودن کانی‌سازی و وجود گسل‌های فراوان در منطقه است. با اعمال فیلتر برگرداندن به قطب و سیگنال تحلیلی و ترسیم نقشه‌های حاصله محل واقعی آنومالی مشخص گردید. - برای تخمین عمق توده‌های مغناطیسی مولد بی‌هنجاری‌ها،

از دو روش تخمین عمق اویلر و روش تلفیقی سیگنال تحلیلی - اویلر استفاده شد که بر اساس آن بی‌هنجاری‌های An1-An2- An3-An7-An8 در عمق کمتر قرار گرفته‌اند یا به عبارت دیگر روباره کمتری دارند.

- در مدل‌سازی انجام گرفته، توده‌هایی با خاصیت مغناطیسی بالا شناسایی شد. بر اساس نتایج تفسیر کلاسیک (نقشه سیگنال تحلیلی، نقشه کاهش به قطب و نقشه گرانی کاذب) و همچنین نتایج مدل‌سازی به پیشنهاد تعدادی نقطه برای انجام عملیات حفاری اقدام شد. مختصات نقاط حفاری پیشنهادی در جدول ۶ ارائه شده است. همچنین موقعیت نقاط حفاری پیشنهادی در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

۸- سپاس‌گزاری

از مدیرعامل هلدینگ اهورا آقای مهندس ابراهیم نیک‌آیین برای حمایت مالی این پژوهش کمال تشکر را داریم.

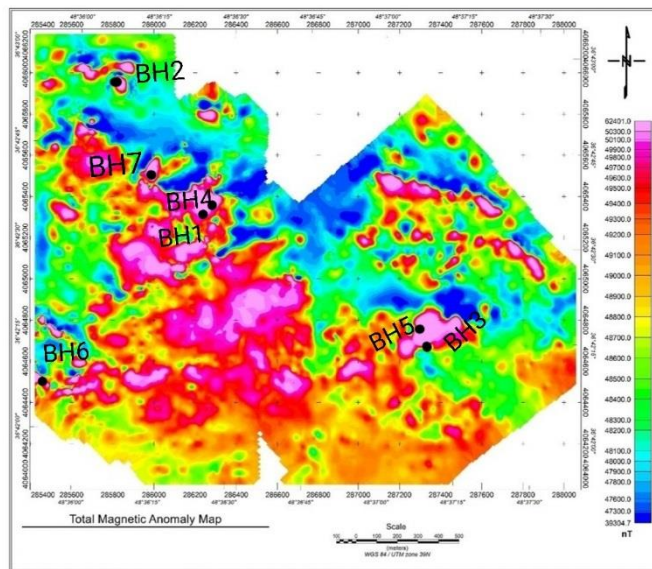
جدول ۵: نتایج مدل‌سازی دوبعدی پروفیل‌های ۱ تا ۳۰ در شکل ۱۳

پروفیل	آنومالی	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	زاویه امتداد مدل با شمال آزیموت	خود پذیری (SI)	شیب مدل	گسترش طولی
۱	۱	۲۸۶۲۵۰	۴۰۶۵۳۶۴	۱۵۱	۱/۶	۲۹	۳۰
۲		۲۸۶۲۹۸	۴۰۶۵۳۸۷	۱۴۴	۱/۶۳	۳۳	۳۰
۳		۲۸۶۱۴۷	۴۰۶۵۴۱۶	۱۷۲	۰/۳۱	۸۵	۳۰
۴		۲۸۶۲۱۱	۴۰۶۵۳۴۱	۱۶۱	۱/۶	۱۵	۳۰
۴		۲۸۶۱۹۰	۴۰۶۵۴۰۰	۱۶۱	۱/۶	۱۲	۳۰
۵		۲۸۵۹۹۰	۴۰۶۵۵۱۸	۱۲۸	۰/۹	۱۳۳	۳۵
۶		۲۸۵۹۹۶	۴۰۶۵۵۶۳	۱۲۷	۰/۲۵۶	۹۱	۳۰
۷	۳	۲۸۵۸۱۷۹	۴۰۶۶۰۲۹	۱۷۹	۰/۳۹	۳۶	۴۰
۸		۲۸۵۵۳۳	۴۰۶۵۹۴۹	۱۶۷	۲/۹	۲۱	۴۰
۹		۲۸۵۷۰۱	۴۰۶۵۹۹۹	۱۷۹	۰/۳۳	۴۶	۳۵
۱۰		۲۸۵۶۵۵	۴۰۶۶۰۲۴	۳	۰/۷۸	۲۸	۳۵
۱۱	۸	۲۸۶۲۶۲	۴۰۶۵۸۰۳	۱۶۹	۰/۸۸	۵۳	۳۵
۱۲	۵	۲۸۶۰۰۲	۴۰۶۵۲۳۴	۱	۰/۸۴۵	۷	۴۰
۱۳		۲۸۶۱۷۴	۴۰۶۵۱۵۰	۱۵۹	۰/۴۹	۴۰	۵۰
۱۴		۲۸۵۸۱۴	۴۰۶۵۱۵۶	۱۵۹	۰/۳۶	۷۰	۴۰
۱۵	۶	۲۸۶۵۰۰	۴۰۶۴۸۸۹	۱۵۳	۰/۸۴۴	۲۵	۴۰
۱۶	۷	۲۸۶۰۱۴	۴۰۶۴۵۳۴	۱۵۷	۱	۲۶	۴۰
۱۷		۲۸۵۸۹۳	۴۰۶۴۵۲۶	۰	۱/۹۵۲	۲۸	۲۰
۱۸		۲۸۵۶۵۲	۴۰۶۴۶۵	۱۵۰	۰/۴۲۵	۳۶	۴۰
۱۸		۲۸۵۶۲۱	۴۰۶۴۵۱۹	۱۵۰	۰/۶۴۲	۶۴	۴۰
۱۹		۲۸۵۶۴۳	۴۰۶۴۵۹۰	۹	۰/۹	۲۵	۳۵
۲۰		۲۸۵۵۸۰	۴۰۶۴۵۰۱	۲	۱	۴	۴۰
۲۰		۲۸۵۵۷۹	۴۰۶۴۵۵۲	۲	۱	۱۹	۴۰
۲۱		۲۸۵۴۵۷	۴۰۶۴۵۱۳	۰	۱	۳۸	۴۰
۲۲		۲۸۵۵۳۲	۴۰۶۴۷۴۱	۲۴	۰/۴۸۸	۵۹	۴۵
۲۳		۲	۲۸۷۳۴۵	۴۰۶۴۶۹۹	۵۰	۱/۲	۱۶
۲۳	۲۸۷۴۸۷		۴۰۶۴۸۱۸	۵۰	۱/۲	۱۲۸	۲۰
۲۴	۲۸۷۳۰۸		۴۰۶۴۷۲۵	۵۲	۱/۳	۲۹	۲۰
۲۴	۲۸۷۴۳۲		۴۰۶۴۸۲۱	۵۲	۱/۳	۱۷۲	۲۰
۲۵	۲۸۷۳۰۸		۴۰۶۴۷۸۳	۵۱	۱/۳	۱۵	۲۰
۲۶	۹	۲۸۷۷۶۵	۴۰۶۵۱۴۷	۵۲	۰/۳۵	۶۳	۲۰
۲۷		۲۸۷۶۳۸	۴۰۶۵۳۴۹	۵۴	۰/۲۳۷	۷۷	۲۰
۲۸		۲۸۷۳۲۹	۴۰۶۵۴۴۱	۱۷	۰/۱۶۸	۵۵	۲۰
۲۹		۲۸۷۱۶۸	۴۰۶۵۴۸۵	۱۷	۰/۲۱۱	۷۲	۲۰
۳۰	۴	۲۸۵۷۲۳	۴۰۶۵۶۳۳	۱۷	۰/۲۵	۵۰	۵۰

جدول ۶: مختصات گمانه‌های پیشنهادی در محدوده زرنان-چوره‌ناب

شماره گمانه	X	Y	عمق بالایی (m)	عمق پایینی (m)
BH1	۲۸۶۲۶۱	۴۰۶۵۳۷۳	۱۵	۳۰
BH2	۲۸۵۸۳۳	۴۰۶۵۹۶۰	۲۰	۳۰
BH3	۲۸۷۳۰۹	۴۰۶۴۷۲۹	۲۰	۵۰
BH4	۲۸۶۲۹۶	۴۰۶۵۳۹۰	۱۵	۶۰
BH5	۲۸۷۳۰۹	۴۰۶۴۷۸۶	۲۰	۶۰
BH6	۲۸۵۴۳۸	۴۰۶۴۵۳۱	۱۲	۴۰
BH7	۲۸۵۹۹۵	۴۰۶۵۵۶۶	۱۰	۵۰

در این جدول عمق سر منابع (Top Depth) بیشترین عمق حاصل از روش‌های مختلف گرفته شده است.



شکل ۱۴: موقعیت گمانه‌های پیشنهادی بر روی نقشه میدان کل

Newfoundland: Inversions using UBC-GIF Grav3D and Mag3D". Journal of Applied Geophysics, 75: 9-18.

۹- مراجع

- [۵] کلاگری، ع. ا.؛ ۱۳۸۴؛ "اصول اکتشافات ژئوفیزیکی". دانشگاه تبریز.
- [6] Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., and Keys., D. A. (1988). "Applied geophysics". Cambridge University Press.
- [7] Baranov, V., and Naudy, H. (1964). "Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole". Geophysics, 29: 67-79.
- [8] Jacobsen, B. H. (1987). "A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps". Geophysics, 52: 1138-1148.
- [9] Liu, S., and Mackey, T. (1998). "Using images in a
- [1] Donohue, J., Hil, Q., and Brewster, D. (2012). "Geophysics at the Howsons Iron Project, NSW, Eastern Australia's new magnetite resource". ASEG Extended Abstracts, 1-6.
- [۲] رایبسنون، ای. اس.، کیت، ک.؛ ترجمه حیدریان شهری، م. ر.؛ ۱۳۸۴؛ "مبانی اکتشافات ژئوفیزیک". دانشگاه فردوسی مشهد.
- [3] Ganiyu, S. A., Badmus, B. S., Awoyemi, M. O., Akinyemi, O. D., and Olurin, O. T. (2012). "Upward continuation and reduction to pole process on aeromagnetic data of Ibadan Area, South-Western Nigeria". Earth Science Research, 2(1): 66.
- [4] Spicer, B., Morris, B., and Ugalde, H. (2011). "Structure of the Rambler Rhyolite, Baie Verte Peninsula,

- [20] Hartman, R. R., Teskey, D. J., and Friedberg, J. L. (1971). "A system for rapid digital aeromagnetic interpretation". *Geophysics*, 36: 891-918.
- [21] Thompson, D. (1982). "EULDPH -A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data". *Geophysics*, 47: 31-37.
- [22] Reid, A. B., Allsop, J. M., Granser, H., Milletts, A. J., and Somerton, I. W. (1990). "Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution". *Geophysics*, 55: 80-91.
- [23] Barbosa, V. C. F., Silva, J. B. C., and Medeiros, W. E. (1999). "Stability Analysis and improvement of structural index estimation in Euler deconvolution". *Geophysics*, 64: 48-60.
- [24] Hansen, D. T., and Suci, L. (2002). "Multiple source Euler deconvolution". *Geophysics*, 67: 525-535.
- [25] FitzGerald, D., Reid, A., and McInerney, P. (2004). "New discrimination techniques for Euler deconvolution". *Computers and Geoscience*, 30: 461-469.
- [26] Cooper, G. R. J., and Cowan, D. R. (2006). "Enhancing potential field data using filters based on the local phase". *Computers & Geoscience*, 32(10): 1585-1591.
- [27] Quesnel, Y., Langlais, B., Sotin, C., and Galdano, A. (2008). "Modelling and inversion of local magnetic anomalies". *Journal of Geophysical Engineering*, 5: 387-400.
- [28] 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.
- [29] حسین زاده گویا، ن.؛ ۱۳۸۷؛ "تئوری پتانسیل در گرانی و مغناطیس کاربردی". انتشارات دانشگاه تهران.
- [10] Clark, D. A. (1997). "Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys". *Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(2): 83-103.
- [11] Nakatsuka, T., and Okuma S. (2006). "Reduction of magnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevations". *Exploration Geophysics*, 37(1): 121-128.
- [12] Gunn, P. J., Madment, D., and Miligan, P. R. (1997). "Interpretation of aeromagnetic data in area of limited outcrop". *Journal of Australian Geology and Geophysics (AGSO)*, 17(2): 175-185.
- [13] Mansouri, E., Feizi, F., and Karbalaei Ramezani, A. (2015). "Identification of magnetic anomalies based on ground magnetic data analysis using multifractal modelling: a case study in Qoja Kandi, East Azerbaijan Province, Iran". *Nonlinear Processes Geophysics*, 22: 579-587.
- [14] Cooper, G. R. J., and Cowan, D. R. (2008). "Edge enhancement of potential field data using normalize statistics". *Geophysics*, 73(3): H1-H4.
- [15] Smith, R. S., Salem, A., and Lemieux, J. (2005). "An enhanced method for source parameter imaging of magnetic data collected for mineral exploration". *Geophysical Prospecting*, 53: 655-665.
- [16] Blakely, R. (1995). "Potential theory in gravity and magnetic applications". Cambridge University Press.
- [17] Henderson, R. G., and Zietz, I. (1949). "The upward continuation of anomalies in total magnetic intensity fields". Presented at St. Louis Meeting of the Society, U. S. Geological Survey.
- [18] Tarlowski, C., Gunn, P. J., and Mackey, T. (1997). "Enhancements of the magnetic map of Australia". *Journal of Australia Geology and Geophysics*, 17(2): 77-82.
- [19] Peters, L. J. (1949). "The direct approach to magnetic interpretation and its practical application". *Geophysics*, 14(3): 290-320.

¹ International Geomagnetic Reference

² Inclination

³ Declination

⁴ Upward continuation