وارون سازی سه بعدی داده‌های مغناطیسی در محدوده کانسار آهن مَروَر میبد

فراز سخائیان[۱]، سید محمد ابطحی فروشانی[۲]، یونس قاسمی پور[۳]، حمزه صادقی سرخنی[۴]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، farazsakha2@gmail.com
[۲] استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، smabtahi@iut.ac.ir
[۳] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، y.ghasemipour@mi.iut.ac.ir
[۴] استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، hamzeh.sadeghi@iut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، ابتدا محل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی با استفاده از انجام مراحل اصلی پردازش و محاسبه سیگنال تحلیلی در محل کانسار آهن مرور مشخص گردید. همچنین با استفاده از واهمامیخت اویلر، عمق احتمالی منابع مغناطیسی تخمین زده شد. سپس، از میانه عمق منابع مغناطیسی تخمین زده شده برای تعریف وزن دهی عمقی در یک وارون سازی سه بعدی داده‌ها، استفاده شد. مدل خودپذیری مغناطیسی به دست آمده، گسترش عمقی و شکل توده‌های با خودپذیری مغناطیسی بالای مرتبط با کانی سازی آهن را نشان می‌دهد. در نهایت، مدل تخمین زده شده خودپذیری مغناطیسی با عیار آهن به دست آمده از آنالیز ژئوشیمیایی نمونه‌های مغزه‌های حفاری اکتشافی مقایسه شد. این مقایسه نشان داد که زون‌های با خودپذیری مغناطیسی بالا، همبستگی فضایی معنی داری با مناطق دارای عیار بالای آهن دارند.

واژه‌های کلیدی: کانسار آهن، وارون سازی سه بعدی، خودپذیری مغناطیسی، واهمامیخت اویلر، گمانه اکتشافی

Three-dimensional inversion of magnetic data in the Marvar iron deposit area

Faraz Sakhaeian[1], Sayyed Mohammad Abtahi Forooshani[2], Younes Ghasemipour[3], Hamzeh Sadeghisorkhani[2]

[1] MSc Student of Exploration, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
[2] Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
[3] PH.D Student of Exploration, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract

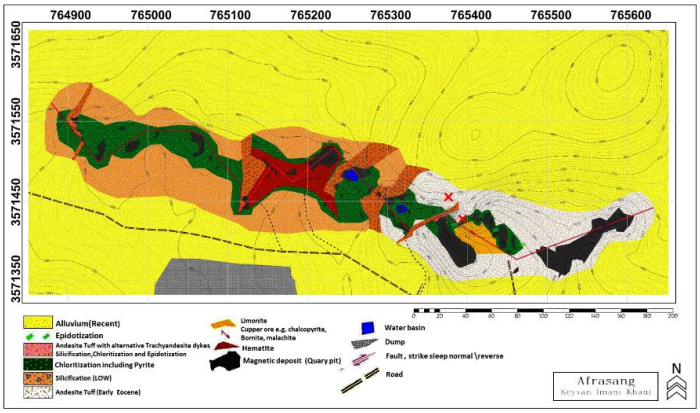
In this research, the location of magnetic anomalies is identified using the main steps of processing and calculating the analytical signal of the magnetic data in the Marvar iron deposit area. Besides, the possible depths of the possible magnetic sources have been estimated via Euler's deconvolution. The median of the estimated depths has been used to define the depth weighting for a three-dimensional data inversion. The resulting estimated magnetic susceptibility model illustrated the depth extension and the shape of the bodies with high magnetic susceptibilities related to iron mineralization. Finally, the estimated magnetic susceptibility model was compared with the grade of iron obtained from the geochemical analysis of exploratory drilling core samples. The comparison showed that zones with high magnetic susceptibility have a meaningful spatial correlation with areas with high iron grades.

Keywords: Iron deposit, 3D inversion, Magnetic Susceptibility, Euler deconvolution, exploratory drilling

۱ مقدمه

امروزه با کاهش عیار و تناژ ذخایر جهانی آهن، اکتشاف منابع معدنی جدید و عمیق این فلز راهبردی، مورد توجه روز افزون جهانی قرار دارد. در همین راستا، نیاز به توسعه روش‌های پیشرفته اکتشاف آهن برای افزایش احتمال کشف و کاهش هزینه‌های حفر گمانه‌های اکتشافی، یک ضرورت انکار ناپذیر است. در این میان، کانسارهای آهن مگنتیتی به دلیل تباین خودپذیری مغناطیسی بالایی که در مقایسه با سنگ‌های میزبان نشان می‌دهند همواره هدف مطلوبی برای روش مغناطیس سنجی محسوب شده است (تلفورد و همکاران ۱۹۹۰). برای مثال، از جدیدترین موارد اکتشاف کانسارهای آهن می‌توان به وارونسازی داده‌های مغناطیسی منطقه منکو واقع در شمال غربی چین توسط یانگ و همکاران (۲۰۲۱) اشاره کرد. در ایران نیز در سال‌های اخیر نظری و همکاران (۱۴۰۰)، معصومی و همکاران (۱۳۹۶) و فاتحی و همکاران (۱۳۹۳) با انجام وارون سازی داده‌های مغناطیسی،

مدل خودپذیری مغناطیسی به دست آمده را برای اهداف اکتشافی مورد استفاده قرار دادند.
در پژوهش حاضر به پردازش و وارون‌سازی سه بعدی داده‌های مغناطیسی در محدوده کانسار آهن مَروَر واقع در شهرستان میبد استان یزد پرداخته شده است. محدوده مذکور در ورقه یک صد هزارم عقدا واقع شده است و واحدهای سنگی تشکیل دهنده آن، مرکب از گدازه‌ها و توف‌های آندزیتی، داسیتی و ریوداسیتی ائوسن به رنگ‌های خاکستری تا سبز می‌باشد (شکل ۱). همچنین رخنمون‌های پراکنده‌ای از سنگ آهن عمدتاً مگنتیتی و در بعضی قسمت‌ها هماتیتی دیده می‌شود. روند کلی این رخنمون‌ها شرقی-غربی بوده و اکثر رخنمون‌های ماده معدنی دارای ضخامت ۲ متر و کشیدگی ۵ متر می‌باشند. همچنین تعدادی گمانه اکتشافی نیز در محدوده حفر شده است که محل آن‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است.

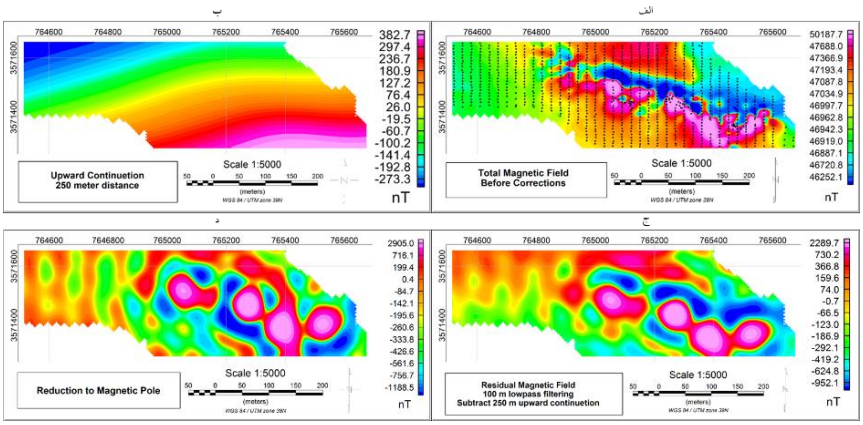


شکل ۱. نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰ منطقه، × قرمز محل گمانه‌های اکتشافی در محدوده را نشان می‌دهد.

انجام نمونه برداری در محدوده توسط شرکت افراسنگ در سال ۱۳۹۸ با نمونه برداری در مسیر پروفیل‌هایی با جهت شمالی-جنوبی انجام شده است. فاصله متوسط نمونه برداری در هر پروفیل حدود ۱۰ متر و فاصله بین پروفیل‌ها در حدود ۳۰ متر می‌باشد. داده‌ها پس از انجام تصحیح شبانه روزی در اختیار نویسندگان قرار گرفته است.

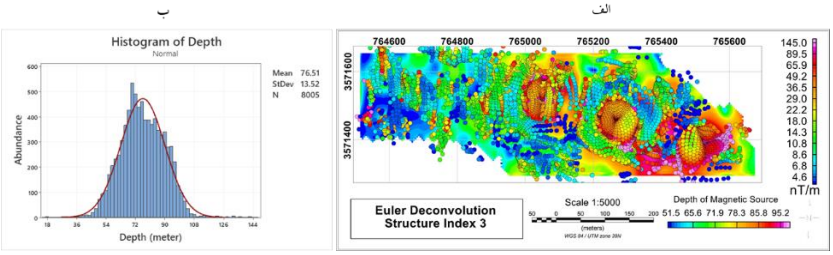
۲ روش تحقیق

برای انجام پردازش‌های لازم بر داده‌های مغناطیسی موجود در محدوده، ابتدا با استفاده از نرم افزار Geosoft Oasis montaj و اعمال روش حداقل انحنا، میدان مغناطیسی روی شبکه مربعی منظم ۶×۶ متر مربع در کل محدوده مورد مطالعه محاسبه و درون یابی شد. شکل ۲-الف، شدت کل میدان مغناطیسی (TMI) برآورد شده در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. سپس برای تصحیح میدان مغناطیسی اصلی زمین، مقدار IGRF محدوده که در زمان برداشت داده‌ها ۴۷۱۴۳ نانوتسلا بوده است، از داده‌های موجود حذف گردید. در ادامه با توجه به فواصل ۳۰ متری بین پروفیلی و برای اطمینان ازحذف دگرنامی، فیلتر پایین گذر۱۰۰ متری بر داده‌ها اعمال شد. همچنین استفاده از ادامه فراسوی داده‌ها تا ارتفاع ۲۵۰ متری، اثر ناحیه‌ای را در داده‌ها نشان داد که اثر یاد شده از داده‌ها حذف گردید. شکل‌های ۲-ب و ۲-ج، به ترتیب اثر ناحیه‌ای و داده‌های باقیمانده پس از حذف اثر ناحیه و اعمال فیلتر دگرنامی را نشان می‌دهند. همچنین برای تعیین محل اصلی بی‌هنجاری‌ها تبدیل به قطب داده‌ها صورت گرفته که نتیجه آن در شکل ۲-د نمایش داده شده است. با تبدیل به قطب، وجود بی‌هنجاری‌هایی با مقادیر بالاتر از ۲۵۰۰ nT در محدوده مشاهده شد که احتمال وجود کانسار آهن مگنتیتی را در محدوده مورد مطالعه تایید می‌کند.



شکل ۲ – الف– نقشه شدت کل میدان مغناطیسی اندازه گیری شده. موقعیت نقاط برداشت با نقاط سیاهرنگ نمایش داده شده اند. ب- نقشه اثر ناحیه‌ای محاسبه شده با ادامه فراسوی ۲۵۰ متری ج- نقشه مقادیر مغناطیسی محدوده پس از اعمال فیلتر پایین گذر با حد ۱۰۰ متری و حذف مقادیر زمینه بدست آمده از ب، د- نقشه برگردان به قطب محدوده محاسبه شده از ج.

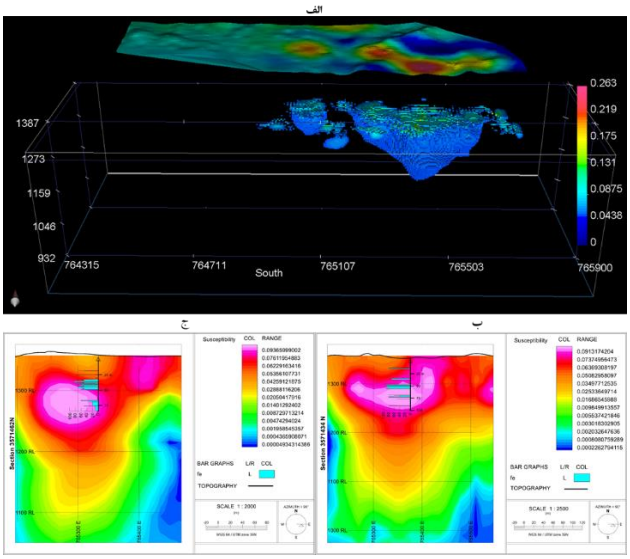
برای تعیین محل قرار گیری منابع مغناطیسی در محدوده، سیگنال تحلیلی داده‌های باقیمانده با استفاده از داده‌های تبدیل به قطب شده نشان داده شده در نقشه شکل ۲-د، محاسبه شد. همچنین با هدف تخمین عمق تقریبی منابع مغناطیسی، واهمامیخت اویلر با اندیس ساختاری ۳ با فرض کروی بودن منابع مغناطیسی انجام شد. در این پردازش از پنجره متحرک ۴ در ۴ نقطه برای محاسبه واهمامیخت اویلر استفاده شد و حد تلورانس تغییرات نیز برابر ۳ درصد در نظر گرفته شد. شکل ۳-الف نقشه محل و عمق منبع مغاطیسی تخمین زده شده با واهمامیخت اویلر بر روی پس زمینه سیگنال تحلیلی برای محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مراکز تجمع منابع مغناطیسی عمدتاً انطباق مناسبی با مناطق با سیگنال تحلیلی بالا نشان می‌دهند. همچنین مقایسه شکل ۳-الف با نقشه شکل ۱، تمرکز منابع مغناطیسی و بیشینه سیگنال تحلیلی بر محدوده توده‌های مگنتیتی و آندزیت کلریتی شده را تایید می‌کند. شکل ۳-ب نیز هیستوگرام عمق منابع مغناطیسی تخمین زده شده را نشان می‌دهد. بر این اساس، میانه عمق منابع مغناطیسی در حدود ۷۵ متر از سطح زمین به دست آمده است.



شکل ۳. الف- نقشه سیگنال تحلیلی و واهماویخت اویلر اندیس ۳، ب- هیستوگرام عمق منابع مغناطیسی تخمین زده شده با استفاده از واهمامیخت اویلر در الف.

هرچند استفاده توام از سیگنال تحلیلی و واهمامیخت اویلر، تصویر کلی در مورد عمق و محل منابع مغناطیسی می‌دهد، اما برای تعیین شکل و گسترش عمقی توده‌ها ناگزیر از انجام وارون سازی سه بعدی داده‌های بی‌هنجاری باقیمانده مغناطیسی که در شکل ۲-ج نمایش داده شده است، هستیم. وارون سازی داده‌های یاد شده با استفاده از الگوریتم لی اولدنبرگ و توسط نرم‌افزار UBC Mag3D صورت گرفت (UBC,2007). در این مدلسازی، از مش با ابعاد ۱۰۷×۹۰×۲۵۱ بلوک استفاده شده است و محدوده تغییرات خودپذیری مغناطیسی بین صفر تا ۱ در دستگاه یکاهای SI تعیین شده است. همچنین مقدار عمق توده هدف در وزن دهی به عمق برابر ۷۵ متر، به اندازه میانه عمق تخمین زده شده به وسیله واهمامیخت اویلر با اندیس ساختاری ۳ در نظر گرفته شد. با فرض خطای نمونه برداری ۲ نانوتسلا، مدل نهایی پس از طی ۴۴ تکرار و زمان ۳ ساعت و ۳۰ دقیقه در کامپیوتری با دو هسته با فرکانس ۲/۷۰ گیگا هرتز و حافظه دسترسی تصادفی (RAM) ۸ گیابایتی، با RMS خطای عدم انطباق با داده‌های اندازه گیری شده برابر ۱/۳۷ به دست آمد. شکل ۴-الف، مدل سه بعدی خودپذیری مغناطیسی تخمین زده

شده در محدوده را در مناطق با مقادیر بالاتر از ۰/۰۵ در یکای SI نشان می‌دهد. همچنین تغییرات عیار آهن در طول چاه‌های اکتشافی که محل آن‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است، با مقاطع قائم در راستای شرقی غربی مدل سه بعدی خودپذیری مغناطیسی در محل چاه‌ها مقایسه شده است. شکل‌های ۴-ب و ۴-ج، انطباق خوبی بین محل حداکثر تمرکز عیار آهن با مناطق دارای بیشینه خودپذیری مغناطیسی تخمین زده شده را نشان داده اند.



شکل ۴. نتایج مدلسازی وارون سه بعدی داده‌های مغناطیسی نمایش داده شده در شکل ۲-ج. الف) مدل سه بعدی خودپذیری مغناطیسی برای مقادیر بالاتر از ۰/۰۵در دستگاهای یکاهای SI. ب)و ج) به ترتیب مقایسه نمودار عیار آهن بدست آمده از گمانه‌های ب- DH-01، ج- DH-02، با مقاطع قائم در راستای شرقی غربی از مدل تخمین زده شده سه بعدی خودپذیری مغناطیسی، هستند.

۳ نتیجه‌گیری

محل قرارگیری بیشینه سیگنال تحلیلی و مناطق با خودپذیری بالای مغناطیسی تخمین زده شده در وارون‌سازی سه بعدی داده‌ها، انطباق مناسبی با زون‌های آلتراسیون کلریتی حاوی پیریت در محدوده نشان می‌دهد. با توجه به افتادگی شیب محدوده دارای خودپذیری بالا در شکل‌های ۴-ب و ۴-ج، به نظر می‌رسد آنچه به عنوان سنگ‌های کلریتی شده در سطح قابل مشاهده است، در عمق دارای شیب بوده و با افتادگی به سوی شرق در عمق زمین ادامه دارند و به کانی سازی اصلی مگنتیتی در عمق بین ۵۰ تا ۱۰۰ متری از سطح زمین می‌رسند. به این ترتیب در چندین محدوده با خودپذیری مغناطیسی بالا، پیشنهاد انجام گمانه‌های اکتشافی بیشتر در سایر مناطق دارای خودپذیری مغناطیسی بالا و عمود بر افتادگی شیب توده‌های کلریتی قابل ارائه است. با توجه به شکل‌های ۴-ب و ۴-ج، افتادگی شیب توده با خودپذیری بالا به سمت غرب است. بنابراین می‌توان حفاری گمانه اکتشافی مایل در جهت عمود بر افتادگی شیب کانسار پیشنهاد نمود. همچنین به دلیل بالا بودن خودپذیری مغناطیسی و تایید آن توسط گمانه‌های اکتشافی موجود، احتمال وجود کانسار مگنتیتی در محدوده تایید می‌شود اما امکان وجود امتداد هماتیتی برای توده‌های یاد شده نیز در مناطق دارای میدان مغناطیسی پایین رد نمی‌شود.

منابع

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. & Keys, D.A. 1990. Applied Geophysics. *Cambridge University Press. New York.*

Yang, J., Liu, S. and Hu, X., 2020. Inversion of high-amplitude magnetic total field anomaly: An application to the Mengku iron-ore deposit, northwest China. *Scientific Reports*, *10*(1), pp.1-17.

Nazari, H., Esmailzadeh, M., Hajizadeh, F. and Joulidehsar, F., 2021. Three-dimensional inversion of magnetic data using compaction constraint: a case study—Sharif Kandi, West Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*(14), pp.1-10.

Masoumi, A., Ansari, H. and Aslani, E., 2017. A study on inverse modelling of magnetic data for Korkora 1, Shahrak iron mine in Kurdistan province. *Journal of Mineral Resources Engineering*, *2*(1), pp.37-47.

Fatehi, M., Norouzi, G., Asghari, O. and Hajiei, F., 2014. The 3D modeling of magnetic anomaly of Morvarid Zanjan deposit and method validation by using drilling data. *Iranian Journal of Geophysics*, *8*(2), pp.56-69.

Department of Earth MAG3D; A Program Library for Forward Modelling and Inversion of Magnetic Data over 3D Structures..UBC, 2005 *& Ocean Sciences, University of British Columbia, Vancouver.*