

تخمین ذخیره کانسار آهن با استفاده از مدل سازی سه بعدی داده های

مغناطیس سنجی زمینی

علی بیاتی^۱، اندیشه علی مرادی^۲، حمید سرخیل^۳

^۱ کارشناس ارشد معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، Bayatia37@gmail.com

^۲ استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، Alimoradi@eng.ikiu.ac.ir

^۳ دانشیار گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، Sarkheil@khu.ac.ir

چکیده

مغناطیس سنجی یکی از روش های اکتشاف ژئوفیزیکی است که با مطالعه تغییرات میدان مغناطیسی زمین به مطالعه ساختارهای زیرسطحی می پردازد. در این روش با اندازه گیری خاصیت مغناطیسی سنگ ها و کانی هایی که در میدان مغناطیسی زمین ایجاد بی هنجاری می نمایند می توان محدوده بی هنجاری های مغناطیسی را با دقت قابل قبولی در مراحل اولیه اکتشاف و حتی در مراحل اکتشاف در حین استخراج تعیین و محل حفاری ها را با توجه به نقشه های حاصل از فیلترهای متنوع مغناطیسی تهیه شده، مشخص نمود.

تحقیق حاضر، اکتشاف ژئوفیزیکی بر روی یک کانسار سنگ آهن واقع در نزدیکی شهر زنجان می باشد، در این تحقیق داده های اکتشافی مورد مطالعه از نوع مغناطیس زمینی بوده که پس از برداشت و تصحیحات انجام شده بر روی داده ها، تحلیل ها و مطالعاتی بر روی این محدوده مستعد کانی سازی آهن انجام پذیرفت. محدوده مورد مطالعه دارای وسعت ۶ هکتاری است که در یک مرحله مورد مساحی ژئوفیزیکی - مگنتومتری قرار گرفت، به طوری که برداشت های مگنتومتری بر روی ۱۵۰۰ ایستگاه توسط گروه ژئوفیزیک انجام شد. بعد از برداشت داده های مغناطیس زمینی، این داده ها تصحیح گردیده و سپس مطالعات کمی و کیفی بر روی این داده ها نشان داد که این محدوده دارای نهشته های متعدد آهن می باشد.

در نهایت پس از مطالعات، بررسی ها و تحلیل های انجام شده، هدف اصلی که تعیین محل دقیق بی هنجاری ها، مشخص کردن مرز آن ها و تخمین ذخیره کانسار آهن با استفاده از روش مغناطیس سنجی بود، انجام پذیرفت.

واژه های کلیدی: مغناطیس سنجی، کانسار آهن، تخمین ذخیره، مدل سازی سه بعدی

Reserve estimation of Iron ore deposit using ground magnetic data and 3D modeling

Ali Bayati¹, Andisheh Alimoradi², Hamid Sarkheil³

¹Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

²Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

³Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Karaj, Iran

Abstract

Magnetometry is one of the methods of geophysical exploration that studies subsurface structures by studying the changes in the earth's magnetic field. In this method, by measuring the magnetic properties of rocks and minerals that create anomalies in the earth's magnetic field, the range of magnetic anomalies can be determined with acceptable accuracy in the early stages of exploration and even in the stages of exploration, due to the maps obtained from various magnetic filters.

The present study is a geophysical exploration on an iron ore deposit located near the city of Zanjan. Prone to iron mineralization. The study area has an area of 15 hectares, which was

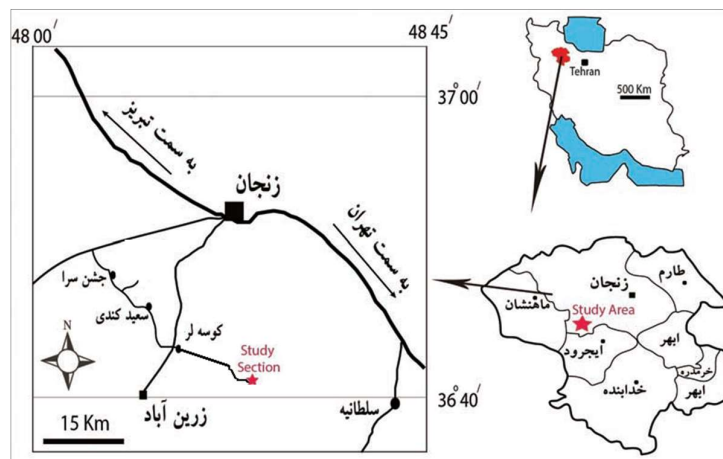
surveyed in one stage geophysical-magnetometric, so that magnetometric surveys were performed on 1500 stations by the geophysical group. After picking up the ground magnetic data, these data were corrected and then quantitative and qualitative studies on these data showed that this range has multiple iron deposits.

Finally, after studies, studies and analyzes, the main goal was to determine the exact location of the anomalies, determine their boundaries and estimate the iron ore reserve using the magnetometric method.

Keywords: Magnetometry, Iron deposit, Reserve estimation, 3D modeling

۱. مقدمه

کاوش‌های مغناطیسی متضمن اندازه‌گیری میدان مغناطیسی است. روش‌های مغناطیسی نظیر روش‌های گرانی، رادیواکتیو و معدود روش‌های الکتریکی کم اهمیت یکی از روش‌های چشمه طبیعی یا غیرفعال است که در آن تغییرات ناحیه‌ای در مغناطیس سنگ‌های نزدیک به سطح زمین باعث تغییرات جزئی و کوچک در میدان مغناطیسی اصلی زمین می‌شوند. روش‌های مغناطیسی و گرانی از چندین جهت مشابه یکدیگرند. در هر دو روش کوشش بر این است که اختلاف‌های اندک در میدان نیروی نسبتاً بزرگ اندازه‌گیری شود. میدان‌های اصلی در دو حالت نسبت به مکان و تاحدودی به زمان متغیرند و در هر دو روش امکان تعیین میدان‌های مطلق وجود دارد. در عین حال چندین تفاوت مشخص اساسی بین کاوش‌های مغناطیسی و گرانی وجود دارد. هدف از عملیات مغناطیس‌سنجی، شناخت عوارض زیرسطحی زمین به کمک اندازه‌گیری میدان مغناطیسی می‌باشد. قدمت زیادی که این روش نسبت به روش‌های دیگر دارد، باعث شده تا ابزارهای بسیار دقیق‌تر و کاربردی‌تری برای این روش ساخته شوند و متخصصان بیشتری از این روش استفاده کنند و در نتیجه، بسیاری از مشکلات در زمینه پردازش و تفسیر داده‌ها رفع شوند. محدوده اکتشافی مورد مطالعه در ۳۰ کیلومتری شهر زنجان در مسیر جاده زنجان به بیجار قرار دارد. محدوده مورد مطالعه در شمال شرق ورقه یکصد هزار حلب واقع شده است. شکل ۱ موقعیت قرارگیری و راه‌های دسترسی به محدوده اکتشافی را نمایش می‌دهد.

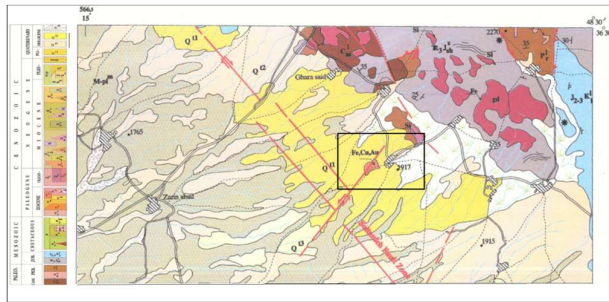


شکل ۱. موقعیت قرارگیری و راه‌های دسترسی به محدوده اکتشافی.

زمین‌شناسی منطقه

در منطقه مورد مطالعه، واحدهای زمین‌شناسی بیشتر متعلق به پرکامبرین پسین-کامبرین پیشین و از قدیم به جدید شامل شیل‌های اسلیتی رسی میکادار سازند کهر، شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های سرخ رنگ سازند بایندور، دولومیت‌ها

و شیل‌های سبز رنگ سازند سلطانیه، شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های سازند باروت، ماسه‌سنگ‌های سرخ رنگ سازند لالون، واحد کوارتزی سفیدرنگ (کوارتزیت بالایی)، سنگ‌های آهکی سازند میلا و در پایان ماسه‌سنگ‌های سازند دورود است. به دلیل فعالیت زیاد فرآیندهای زمین‌ساختی در منطقه مورد مطالعه، همراه با این سازندها، رخنمون‌هایی از تهنسست‌های جوان‌تر مانند سازندهای کرج و فجن نیز به میزان کمتر در منطقه برنورد دارد. سازند سلطانیه در ۳۵ کیلومتری جنوب باختر زنجان، ۹۸۵ متر ستبراً دارد، که بیشتر از لایه‌های متوسط تا ستبرلایه دولومیت و لایه‌های نازک شیل تشکیل شده است. لایه‌های دولومیتی سازند سلطانیه از استروماتولیت، گرهک‌ها و نوارهای چرتی بسیاری تشکیل شده است.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده.

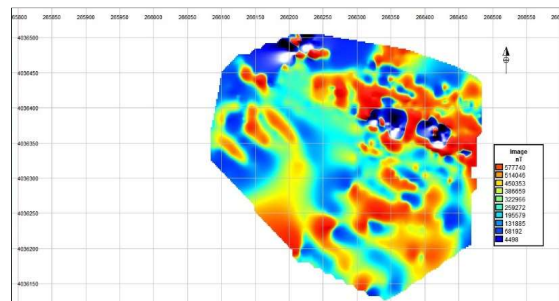
۲. روش تحقیق

تفسیر و مدل‌سازی داده‌های مغناطیسی یکی از روش‌های کارآمد برای به دست آوردن خودپذیری مغناطیسی، شکل و ژرفای توده‌های مغناطیسی پنهان است [۷]. تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی و گرانی به دلیل مبهم بودن این بی‌هنجاری‌ها سخت و پیچیده است [۸]. هدف اصلی و مهم تفسیر داده‌های مغناطیسی، تخمین پارامترهای مدل ساختارهای مدفون است، به همین منظور روش‌های متعددی برای تفسیر پیشنهاد شده است. پس از برداشت داده‌ها، تصحیحات ضروری بر روی داده‌ها انجام پذیرفته و نهایتاً نقشه شدت میدان مغناطیسی کل ترسیم می‌شود [۱۸]. سپس فیلتر برگردان به قطب برای قرارگرفتن بی‌هنجاری‌ها بر روی منشأ ایجادکننده بی‌هنجاری‌ها اعمال می‌گردد [۱۳]، بعد از آن با توجه به داشتن یا نداشتن اندازه مغناطیس باقی‌مانده و امکانات نرم‌افزاری مناسب تفسیرهای کیفی و کمی انجام می‌گیرد.

طراحی شبکه برداشت

تعداد ۱۵۰۰ ایستگاه مگنتومتری بر محدوده ای مستطیلی حدود ۱۵ هکتار به صورت برداشت‌های منظم و متراکم برداشت گردید که در ادامه کلیه نقشه‌های حاصل از تعبیر و تفسیر در این تحقیق ارائه شده است.

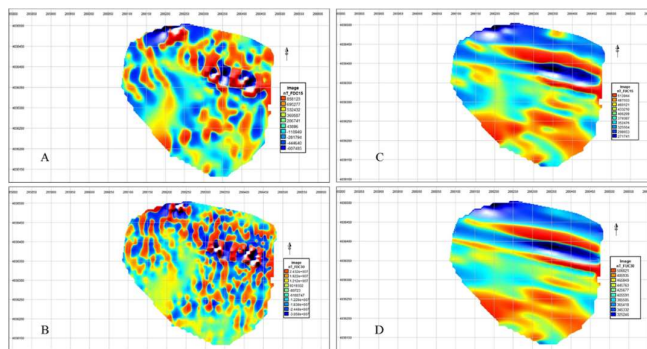
تمامی اندازه‌گیری‌های مغناطیس‌سنجی (داده‌ها) از نظر تغییرات زمان به صورت تناوب ۲ ساعت تصحیح شده و مقادیر شدت میدان مغناطیس در هر نقطه محاسبه و نقشه آن رسم گردید. شکل ۳



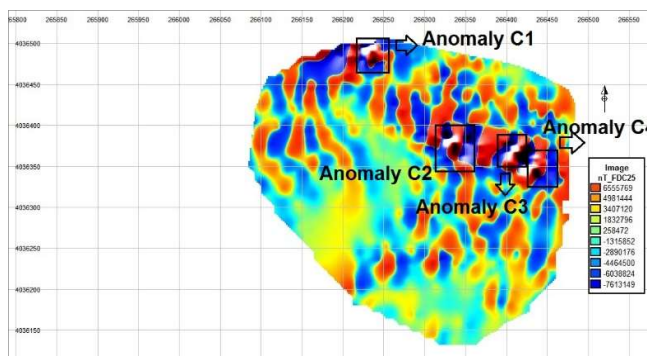
شکل ۳. نقشه شدت میدان کل مغناطیسی محدوده اکتشافی پس از اعمال تصحیحات روزانه و IGRF.

فیلترهای مغناطیسی

برای محاسبه کمی و کیفی بی‌هنجاری‌ها، لازم است فرضیه‌های ساده‌ای در مورد منبع آن‌ها قرار داده شود، چرا که اطلاعات در مورد زمین‌شناسی آن‌ها، موقعیت ماده معدنی و پدیده‌های ساختاری بسیار اندک است [۵]. بدین منظور فیلترهایی بر روی داده‌های برداشت شده اعمال می‌شود تا بتوان با کم‌ترین خطای ممکن به نتایج مطلوب دست پیدا کرد. البته هیچ‌کدام از این عملیات فیلتر کردن به طور کامل آنومالی‌های مطلوب را از غیرمطلوب جدا نمی‌کنند [۲]. شکل ۴



شکل ۴. A و B فیلترهای گسترش رو به پایین (فروسو)، C و D فیلترهای گسترش به بالا (فراسو) برای عمق‌های ۱۵ و ۳۰ متر.



شکل ۵. موقعیت بی‌هنجاری‌های مغناطیسی C1, C2, C3, C4، بر روی نقشه گسترش به پایین (فروسو) در عمق ۲۵ متری.

جدول ۱. مختصات بی‌هنجاری‌های مغناطیسی C1, C2, C3 و C4 در محدوده اکتشافی.

عمق (متر)	عمق قرارگیری	Y-Location	X-Location	آنومالی ژئوفیزیکی
تا ۴۰ متری از سطح زمین	شروع از ۲۵ متری	266233	4036491	C1
تا ۴۰ متری از سطح زمین	شروع از ۲۵ متری	266334	4036379	C2
تا ۴۰ متری از سطح زمین	شروع از ۲۵ متری	266413	4036370	C3
تا ۴۰ متری از سطح زمین	شروع از ۲۵ متری	266431	4036348	C4

مدل‌سازی داده‌های مغناطیسی

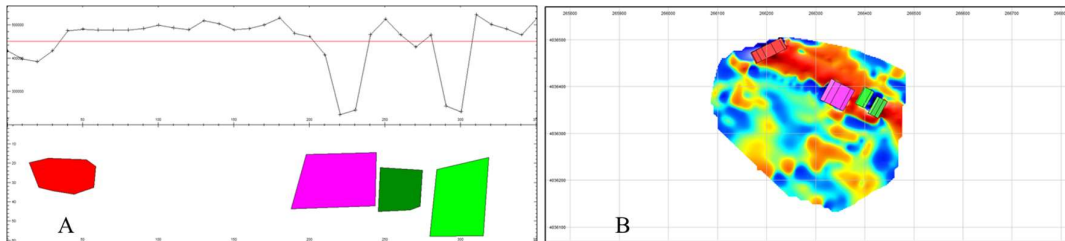
با توسعه و پیشرفت محاسبات عددی، وارون‌سازی داده‌های ژئوفیزیکی از دوبعد تا سه و چهاربعد (بعد چهارم، بعد زمان است) می‌تواند انجام گیرد [۶]. اغلب ساختارهای زمین‌شناسی در طبیعت سه‌بعدی هستند، از طرفی، بیشتر ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده تنها می‌توانند به وسیله مدل‌های زیرسطحی سه‌بعدی ژئوفیزیکی یا زمین‌شناسی نشان

داده شوند [۴]، بنابراین به روش‌های تفسیر سه‌بعدی به طور واضح نیاز پیدا می‌شود و نهایتاً نتایج با دقت دقیق‌تری ارائه می‌شود [۱۷].

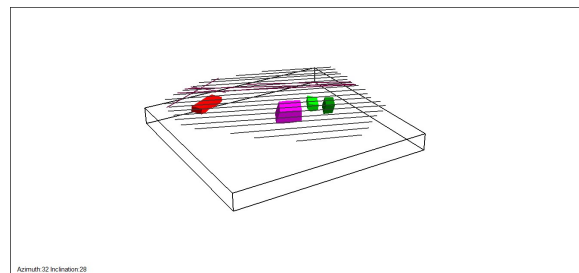
قبل از انجام فرآیند مدل‌سازی، پروفیل‌هایی در راستای عمود به بی‌هنجاری‌ها انتخاب شد و مطالعات و بررسی‌ها در این راستاها انجام گرفت. مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار مدل‌ویژن پرو ۸،۰۰ و داده‌های برداشت شده و بعد از اندازه‌گیری پذیرفتاری نمونه‌های برداشت از معدن در حال استخراج مورد انجام گرفت.

مدل‌های بی‌هنجاری‌ها

پس از رسم نقشه‌ها و اعمال تمامی فیلترهای نام‌برده شده بر روی نقشه برگردان به قطب، پروفیل‌هایی برای مدل‌سازی بر روی بی‌هنجاری‌های نمایان شده رسم گردید، سپس با مطالعه و بررسی بر روی این پروفیل‌ها و مطابقت آن‌ها با نمودارهای موجود، توده ماده‌ی معدنی مدل‌سازی شده و شیب و آزیموت آن نیز محاسبه گردید. شکل ۶



شکل ۶. A نمودار پروفیل بی‌هنجاری‌ها و مدل‌های ساخته شده و B مدل بی‌هنجاری‌های محدوده بر روی نقشه برگردان به قطب.



شکل ۷. تصویر سه‌بعدی از مدل‌سازی بی‌هنجاری‌های محدوده مورد مطالعه (زاویه انحراف ۲۸ درجه).

پس از مدل‌سازی و تعیین پارامترهای کانسار اعم از طول، عرض، ضخامت، عمق قرارگیری، شکل، شیب، شیب آزیموت و... نوبت به محاسبات تخمین ذخیره می‌رسد. تمامی پارامترها به دست آمده و حجم و تناژ ماده معدنی محاسبه شده است. جدول ۲

جدول ۲. مشخصات پارامترهای بی‌هنجاری‌های منطقه و تخمین ذخیره تناژ نهایی.

نام بی‌هنجاری	رنگ	Suseptibility (SI)*10 ⁻³	طول (m)	عرض (m)	عمق (m)	ضخامت (m)	حجم (m ³)	تناژ (T)
C1	Red	5400	50	20	15	12	12000	55.440
C2	Pink	5100	60	20	20	20	24000	110.880
C3	Green	4720	30	30	30	20	18000	83.160
C4	Blue	4850	40	20	25	30	24000	110.880

۳. نتیجه‌گیری

بر اساس برداشت‌های مغناطیس‌سنجی زمینی و بررسی‌های زمین‌شناسی نتایج به دست آمده از مغناطیس‌سنجی زمینی، در محدوده معدنی مورد مطالعه، چهار بی‌هنجاری مغناطیسی ظاهر شد. این بی‌هنجاری‌ها به صورت منقطع و توده‌ای در امتداد هم و با جهات مختلف در نقشه‌های مغناطیسی قابل مشاهده است. در بین این بی‌هنجاری‌ها، بی‌هنجاری شمال غربی به صورت یک زون پیوسته با امتداد شمال شرقی - جنوب غربی دیده می‌شود و بی‌هنجاری‌های محدوده به صورت یک زون منقطع و مرکب از تعدادی بی‌هنجاری کوچک‌تر قابل مشاهده است. نتایج اولیه به دست آمده از حفاری‌های عمقی، انطباق بسیار خوبی با بررسی‌های انجام شده در سطح را نشان می‌دهد. تاکنون تا عمق ۲۰ متر، ذخیره‌ای بیش از ۲ هزار تن سنگ آهن مگنتیتی در منطقه مورد تأیید قرار گرفته است و اکتشافات هنگام استخراج ادامه دارد.

گسترش سطحی بی‌هنجاری‌ها در نقشه گسترش رو پایین (فیلتر پایین گذر) نشان داده شده است که با توجه به این نقشه، بخش اصلی بی‌هنجاری‌ها مربوط به عمق ۲۵ متری و پایین‌تر می‌باشند. بی‌هنجاری اصلی محدوده که با روند شمالی - جنوبی در مرکز ناحیه قابل مشاهده است، با فیلتر ادامه فراسو از ارتفاع ۲۵ متری تا ارتفاع ۴۰ متری از سطح زمین، مدل‌سازی شده است. این مسئله نشان می‌دهد که بی‌هنجاری مرکز منطقه تا عمق ۴۵ متری وجود دارد.

نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی واحدهای سنگی منطقه نشان می‌دهد که بی‌هنجاری مغناطیسی در محدوده با کانی‌سازی آهن در این منطقه مرتبط است. میزان پایین پذیرفتاری مغناطیسی توده‌های نفوذی رخنمون‌یافته در منطقه و آلتراسیون ضعیف آن‌ها نشان می‌دهد که این توده‌ها نقش اصلی در کانی‌سازی آهن را ایفا نکرده‌اند و توده نفوذی مولد کانی‌سازی با فاصله و به احتمال زیاد در اعماق بیشتر قرار دارد که می‌توان گفت در نتیجه گسل‌ها اتفاق افتاده است.

بعد از انجام عملیات ژئوفیزیکی و ارائه گزارش‌های نهایی تمامی محدوده‌های گزارش شده‌ی دارای بی‌هنجاری کاملاً صحیح بوده و حفاری‌هایی که در این مناطق انجام شد تماماً به ماده معدنی با عیار بالا منجر گردید.

منابع

1. Alimoradi, A., Angorani, S., Ebrahimzadeh, M., Shariat Panahi, M., (2011). Magnitic inverse modeling of a dike using the artificial neural network approach, the journal of near surface geophysics (EAGE), 9, 339-347.
2. A. Moradzadeh, FD. Ardejani, BJ Shokri, H. Sarkheil, M. Osanloo, 2007. A method for coal waste disposal site selection for prevention of environmental impacts, IMWA Symp. 2007: Water in Mining Environments, Italy, 239-243.\
3. A. Sharafi, H. Sarkheil, MK. Hafizi, 2014. Inverse Least-Squares Modeling of Induced Polarization and Resistivity Data to Explore Copper Deposits in the Sarbisheh Ophiolites, Iran, International Journal of Emerging Science and Engineering (IJESE), ISSN: 2319-6378, Volume-2 Issue-12.
4. Behnam, S., Ramazi, H., (2019). Interpretation of geomagnetic data using power spectrum and 3D modeling of Gol-e-Gohar magnetic anomaly, Journal of Applied Geophysics.

5. Blakely, R. J., (1996), "Potential theory in gravity and magnetic application", Cambridge university press.
6. China: Li, S., Li, Y., (2012). Inversion of magnetic anomaly affected by strong remanent magnetization over rugged terrain: A case study from Daye.
7. Damaceno, J., Lopesde Castro, D., (2017). Magnetic and gravity modeling of a Paleogene diabase plug in Northeast Brazil.
8. Ford, K., Keating, P., and Thomas, M. D., (2004). Overview of Geophysical signature Associated with Canadian or Deposits, Geological Survey of Canada, 601 Booth Street, Ottawa, Ontario, K1A0E8.
9. H. Sarkheil, B. Vaseghi, and K. Ziarati, 2014. Analysis of discontinuities and ground waters in the SHORGOL-SALMAS quarry stone mine using geophysical methods, Conference Proceedings, 6th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition, Apr 2014, Volume 2014, p.1 – 5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20140298>.
10. H. Sarkheil, M. Habibi Rad, 2015. 4D Electrical Resistivity Tomography Monitoring of Talesh Mahaleh-Rasht Coastal Aquifer Polluted by Caspian Seawater, Conference Proceedings, Near Surface Geoscience 2015 - 21st European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Sep 2015, Volume 2015, p.1 – 5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201413795>.
11. H. Sarkheil, 2016. 4D Magnetic Susceptibility Modelling of Soil Pollution along Tehran-Karaj Highway, along with Fractal Analysis of Pollution, Conference Proceedings, Near Surface Geoscience 2016 - 22nd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Sep 2016, Volume 2016, cp-495-00151. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201602052>.
12. H. Sarkheil, H. Hassani, 2009. A new design for geoelectric surveying and inverse 1D and 2D modeling: the case of Karongah lead-zinc mine, 9th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM), Bulgaria.
13. Loke, M. H., & Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method1. *Geophysical prospecting*, 44(1), 131-152.
14. Mickus, K., (2006). Magnetic method: Department of Geosciences, Southwest Missouri State University, and Springfield, MO 65804.
15. NGA/BGS - . NGDC, January 2010 - .<http://www.ngdc.noaa.gov>.
16. Sarkheil, H., 2020. Evaluation of Plant Roots Ability to Remove Lead and Zink Mining Drainage Contamination by Geoelectric Surveys, September 2020 Near Surface Geoscience'20 (EAGE), Serbia.
17. Sasaki, Y., Myeong-Jong, Y., Jihyang C, (2014). 2D and 3D separate and joint inversion of airborne ZTEM and ground AMT data Synthetic model studies. *Journal of Applied Geophysics*.
18. Telford, W. M., Geldart, L. P., and Sheriff, R. C., (1991). *Applied Geophysics: 2nd edition*, Cambridge University Press.