

Study of Chromite Ore in the West of Sabzevar Ophiolite (Foroomad) Using ERT and VLF-EM Geophysical Methods

Alireza Shirzadi¹, Reza Ghanati^{2*}

1. Graduate student of MSc, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran
ar.shirzadi@ut.ac.ir
2. Associate professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran
rghanati@ut.ac.ir

Received: 2023/11/12 - Accepted: 2024/06/26

Abstract

Research and experiences have shown that the geophysical exploration of chromite, compared to many other mineral ores, has been less confident and less successful. In Iran, many promising areas of chromite deposits have been left unplanned due to the lack of a definitive method for exploration and exploitation, which could cause economic prosperity for the area. In the present research, two geophysical methods, namely “electric resistivity tomography” and “very low frequency electromagnetic”, using 9 electromagnetic and 4 resistivity profiles, are used to identify chromite ore's geoelectric and electromagnetic properties. Laboratory studies, including electrical resistivity measurements on the rock cores and mineralogy studies, have been conducted to evaluate the field results better. The resistivity was measured between 2800-3600 for one chromite ore, between 5500-8600 for the other, and between 2000-2300 Ω .m for a serpentinite, which is the chromite ore host rock.

VLF-EM parameters (real magnetic field component) were obtained using different radio signals, including 29.6 and 18.1 kHz. The map of the real component of the vertical magnetic field of VLF-EM and the use of the Karous and Hjelt filter (1983) showed acceptable results in revealing fault zones and joints in serpentinitized ultramafic rocks. The resulting maps showed that the lower resistances are along the faults and discontinuities in the rock, which are sometimes accompanied by chromite ore in their planes.

I applied electrical resistivity tomography with the Wenner alpha array in areas with known chromite deposits, revealing, to some extent, that the zones with higher resistivity were related to chromite-bearing areas. The results of the interpretation of geophysical data were, in some cases, confirmed by the excavations and exploratory boreholes in the study areas. It can be concluded that if the required conditions are met, the methods employed can potentially reveal hidden chromite deposits..

Keywords

Sabzevar ophiolite, Chromite, Exploration, Electrical resistivity tomography (ERT), very low frequency electromagnetic (VLF-EM).

* Corresponding Author



1- Introduction

“Chromite” is one of the most important economic minerals in Iran. Chromite ore has been explored and exploited for several decades in Iran. Currently, chromite is the only economic ore of “chromium” globally. This element is widely used in metallurgical, chemical, and refractory industries, especially in steel. Considering the large size of the global steel industry, this element is essential in the production and trade of steel products. Chromite is mainly formed in two geological environments: large masses of igneous rocks that are cooled slowly underground as large plutons and the other in ophiolites. Since chromite deposits in the first type tend to form layered structures, they are known as “Layered” or “Stratiform” deposits. Deposits in ophiolites are usually pod-shaped or irregular and are known as “Podiform” deposits. Two other chromite deposits are “Beach sands,” resulting from the erosion and transportation of rocks containing chromite, and the other “Laterites,” which are the in-situ weathering products of the underlying peridotites. The last two types form small deposits of chromite [1]. In Iran, chromite deposits are hosted in ophiolitic rocks. The chromite deposit in Iran was discovered for the first time in 1940, one hundred kilometers NW of Sabzevar city, in the “Joghatai” mountain range, near “Foroomad” village. About 1000 tons of chromite was extracted annually for the first years in this area. Subsequent traditional explorations showed that chromite has more economic reserves in nearby localities, and since then, further chromite deposits have been explored and exploited in this mountain range. Currently, most of the chromite ore in Iran is exported in raw (unprocessed) form to international markets and industrialized countries. Chromite ore is mainly mined in open pits, and vast amounts of waste are produced in mines every year, which has aroused some problems. Waste from mining operations has become a big problem for the environment, and cutting and transporting waste material out of mines has significantly increased mining costs. In addition, carrying the waste to the areas around the mines has sometimes led to social tensions. As another problem, excavating the host rock (waste) to reach the ore consumes a lot of time, causes high wear and tear on mining machinery, and increases mining costs. Therefore, the correct identification of the location of the deposit and the targeted excavation of ore can lead to a reduction in the amount of waste and, as a result, is a great help to the environment and the mining economy. Using geophysical methods to locate the ore can reduce environmental damage and increase mining operations' productivity.

Compared to the host rock (Serpentinite), chromite has higher density, lower electrical conductivity, and lower or higher magnetic susceptibility. These features can cause the magnetic, electrical, and gravity anomalies to be potentially appropriate for chromite exploration [2,3,4]. Due to the relatively high density of chromite (4.6 g/cm³), gravity is the most important physical characteristic that can distinguish chromite ore from surrounding rocks. Therefore, gravimetry is potentially the most basic search geophysical method for chromite deposits. Still, in ophiolites, the distribution of chromite ore is generally irregular and scattered. The ore has a relatively small volume, so it is necessary to use other geophysical methods for its exploration.

The current study investigates the efficiency of two geophysical methods, namely: “Electrical resistivity tomography” and “Very low frequency electromagnetic” in chromite deposits in the North of “Foroomad.” Laboratory studies, including electrical resistivity measurements on some cores and mineralogy studies, are conducted to evaluate the field results better. In the study area, in many cases, chromite bodies are concentrated in a certain direction, which seems to be along the faults [5]; therefore, the structural analysis of the area is of great importance due to the presence of joints and faults. In addition, according to the capabilities of ERT and VLF-EM methods in determining fracture zones, the techniques can be used to determine the existence of any relationship between fractures and chromite distribution. In this research, two geophysical methods, ERT and VLF-EM, are used in the west of Sabzevar ophiolite for the exploration of chromite ore, and by examining the geophysical characteristics of the ore and the serpentinized peridotites, it was

found that the two methods can potentially be used for chromite exploration in this area.

2- Methods

Four types of studies were employed in the current research: “ERT” and “VLF-EM” as field methods and “resistivity” and “cinematography” as laboratory studies.

Field measurement of ERT using the Wenner Alpha array was carried out along several profiles on the benches of open pit mines 8, 12, and 13 using RESECS equipment to calculate and visualize the subsurface distribution of electrical resistivity. To do this, the apparent resistivity is calculated from the measured data first, then the real resistivity is estimated using the inversion method. RESIP2DMode software [6,7] calculates forward and inverse modeling and sensitivity patterns. Using real resistivity, geoelectric cross-sections are made and then matched with existing geological structures. Sections of the sensitivity pattern help significantly to verify the accuracy of the resistivity patterns in resistivity sections.

VLF-EM field method is suitable for exploring sheet-like structures with high conductivity, such as faults. This method can be used to determine the existence of faults and fractures and indirectly identify probable chromite bodies in fault planes. VLF-EM study was conducted along several profiles using ABEM WADI equipment on the benches of open pit mines 8, 12, 13, and 20 to reveal the probable faults, which was rewarding. The map of the real component of the vertical magnetic field of VLF-EM and the use of the Karous and Hjelt filter (1983) [8] showed acceptable results in revealing fault zones and joints in serpentized ultramafic rocks.

Laboratory studies, including electrical resistivity measurements, were performed on some rock cores to evaluate the field results better—an electric device measured electric resistivity in the laboratory. The ABEM factory manufactures the device used. First, rock samples were drilled as cores so that the samples had a regular geometric shape and the measurement accuracy would be higher. The samples were placed in water for 24 hours before measurement. Direct electric current is applied to the sample, and the potential difference between the two electrodes is measured. The resistance of the sample is read from the analog needle. Then, the sample's resistivity is calculated theoretically using a formula.

Considering the diverse lithological characteristics of ophiolites, which are generally caused by secondary processes, knowledge of the mineralogical characteristics of rocks can greatly help interpret the results of geophysical surveys. To determine the mineralogical content of the studied rocks, two samples of chromitites and one sample of serpentinite (host rock) were studied by cinematographic method.

3- Findings and Argument

As can be seen in the cross sections of electrical resistivity of mines 8, 12, and 13, the resistivity of chromite ore is higher than the surrounding rocks (serpentinite); so, when other high resistivity constituents are not present, the higher resistivity anomalies can be attributed the presence of chromite in the study area (fig. 1). To interpret the electrical resistivity sections which show anomaly, sensitivity map can be used as a guide. If anomalies are located in the low sensitivity area in the corresponding sensitivity map, the observed anomaly may be of false origin. These anomalies are observed due to the low sensitivity in subsurface materials.

According to field investigations, the anomalies observed in current density pseudo sections (mines 8, 12, 13, and 20) are due to existing faults or joints (sometimes containing water). Current research shows that it is possible to identify faults with the VLF-EM method. Identifying faults is important because chromite bodies are distributed in the fault plane in many localities in the study area. In some other countries, such as Tibet [9], Oman [2], Turkey [4], and America [10], VLF-EM

and ERT studies have been conducted. Despite some complications, chromite exploration has been successful to a large extent.

In order to know the mineralogical content of the studied rocks, two samples of chromite ore and one sample of ore host rocks (serpentinite) were studied in the mineralography laboratory. In chromite ore samples, it was observed that chromite is the main metallic mineral phase and constitutes more than 90 vol% of the sample. The first sample shows a massive texture with serpentine filling the interstices between chromite crystals. In the second sample, Chromitite has a massive texture with a cataclastic (brecciated) overprint, which indicates fault action. Serpentine is observed in spaces between broken pieces of chromite crystals and as a filling of the microfractures inside the chromite crystals. Small amounts of fine sulfide particles (nickel sulfides?), <30 μm , can be seen. In the cataclastic chromitite, there are μm sized particles of hematite in chromites, probably formed as secondary.

In the serpentinite sample, serpentine and relicts of pyroxene crystals are the main components of the rock. Anhedral chromite crystals are observed in a small amount (size of 350 μm), about 0.5-1 vol%. Phases similar to hematite are observed in the microfractures of some chromite crystals. In addition, fine particles of native copper (< 80 μm), fine particles of magnetite (<30 μm), and μm sized sulfide particles (pentlandite) can be seen in the sample.

The results of measuring the electrical resistivity of the samples in the laboratory showed that: a) the resistivity of chromitite samples is higher than that of serpentinite and b) the resistivity of chromitite has an inverse relation to the amount of serpentinite present in chromite ore. The resistivity for massive chromite is between 2800-3600, for cataclastic one between 5500-8600, and for the serpentinite between 2000-2300, $\Omega\cdot\text{m}$. Measurement of resistivity for the two samples of chromite gave different results. Studies in Tibet [9], Oman [2], and Turkey [4] have shown that the resistivity of chromite ore is lower than the host rocks, but the study of chromite ore in the United States [10] showed a higher resistivity for it. Therefore, in each region, knowledge of the characteristics of chromite and surrounding rocks, such as mineralogy, texture, structure, electrical resistivity, changeability, depth of ore, etc., can help interpret geophysical surveys.

Due to the secondary alteration processes in ophiolites, the mineralogy of chromitite and the surrounding rocks can be different in different regions. Especially the amount of magnetite, serpentine, PGM, sulfides, native elements, etc., may be different, and the investigated rocks can have different magnetic, electrical, etc. characteristics in each region. Therefore, this factor significantly impacts the success of using the geophysical methods, and it is better to use these methods with a knowledge of this issue.

According to the above statements, it can be inferred that the geoelectric properties of chromite ore, depending on various geological conditions, can be different from those of the surrounding rocks. This fact makes the geophysical exploration of chromite more complicated than that of other ores, so it is reasonable to employ different methods for chromite exploration.

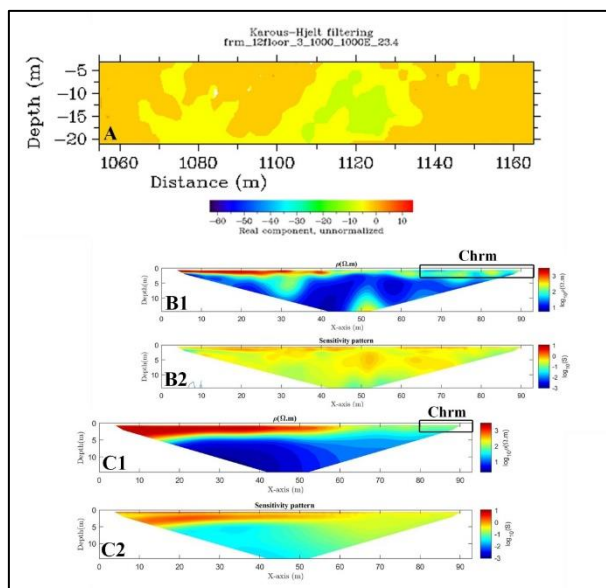


Figure 1. Current density, electric resistivity, and sensitivity cross-sections in mine 12east, bench floor Cross sections A, B1, B2, C1, and C2 show the current density, electrical resistivity of the eastern profile, sensitivity map of the eastern profile, electrical resistivity of the western profile, and sensitivity map of the profile of the west, respectively. The black rectangle in the electric resistivity sections (symbol Chrm) shows the chromite zone.

4- Conclusions

This research showed that the VLF-EM and ERT methods potentially can explore chromite ore. Still, to achieve more reliable results, other geophysical methods are necessary (e.g., gravimetry, magnetometry, and induced polarization) to be employed. In ophiolites, according to the number of secondary alterations, rocks can have different magnetic and electrical properties in each region; therefore, paying attention to this factor significantly impacts success when using geophysical methods. Knowing the geophysical characteristics of chromitite and surrounding rocks in each region can be very effective in interpreting the geophysical data. ERT method can potentially detect chromite ore; this ore showed higher resistivity than the host rock in the study area. The VLF-EM method can be used to identify fault zones and help locate the chromitites bodies that may exist in fault planes.

References

1. Papp, J. F., and Lipin, B. R., 2001; Chromium: U.S. Geological Survey Open-File Report 01–381, 161 p.
2. Ali, M.; and Jahangir Khan, M.; 2013; Geophysical Hunt for Chromite in Ophiolite; Int. j. econ. Environ. geol. Vol: 4(2) 22-28.
3. Mohanty W. K.; Mandal, A.; Sharma, S. P.; Gupta, S.; and Misra, S.; 2011; Integrated geological and geophysical studies for delineation of chromite deposits: A case study from Tangarparha, Orissa, India; Geophysics. Vol. 76, No. 5; P. B173–B185.
4. Bayrak, M.; 2002; Exploration of chrome ore in Southwestern Turkey by VLF-EM; Journal of the Balkan Geophysical Society, Vol. 5, No 2, p. 35-46.
5. Yaghubpur, A.; Hassannejad, A. A.; 2006; The Spatial Distribution of Some Chromite Deposits in Iran, Using Fry Analysis; Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran, v. 17(2), p. 147-152.
6. Fallah Safari, M.; Ghanati, R.; 2022; DC Electrical Resistance Tomography Inversion; Journal of the Earth and Space Physics, 47(4).

7. Ghanati, R.; Azadi, Y.; Fakhimi, R.; 2020; RESIP2DMODE: A MATLAB-Based 2D Resistivity and Induced Polarization Forward Modeling Software; Iranian Journal of Geophysics 13 (4), 60-78.
8. Karous, M.; and Hjelt, S. E.; 1983; Linear Filtering of VLF Dip-Angle Measurements; Geophysical Prospecting 31,782-794.
9. Xi, X.; Yang, H.; He, L.; and Chen, R.; 2013; Chromite mapping using induced polarization method based on spread spectrum technology. Symposium on applying Geophysics to Engineering and Environmental Problems Proceedings, 13–19.
10. Wynn, J. C.; and Hasbrouck, W. P.; 1980; Geophysical studies of chromite deposits in the Josephine ultramafic complex of Northwest California and Southwest Oregon; U.S. Geological Survey, Open-File Report 80-936.

مقاله پژوهشی

مطالعه کانسنگ کرومیت در غرب افیولیت سبزوار (فرومد) با استفاده از اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی ERT و VLF-EM

علیرضا شیرزادی^۱، رضا قناتی^{۲*}

۱. دانش آموخته کارشناسی‌ارشد موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران ar.shirzadi@ut.ac.ir

۲. استادیار موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران rghanati@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶

چکیده

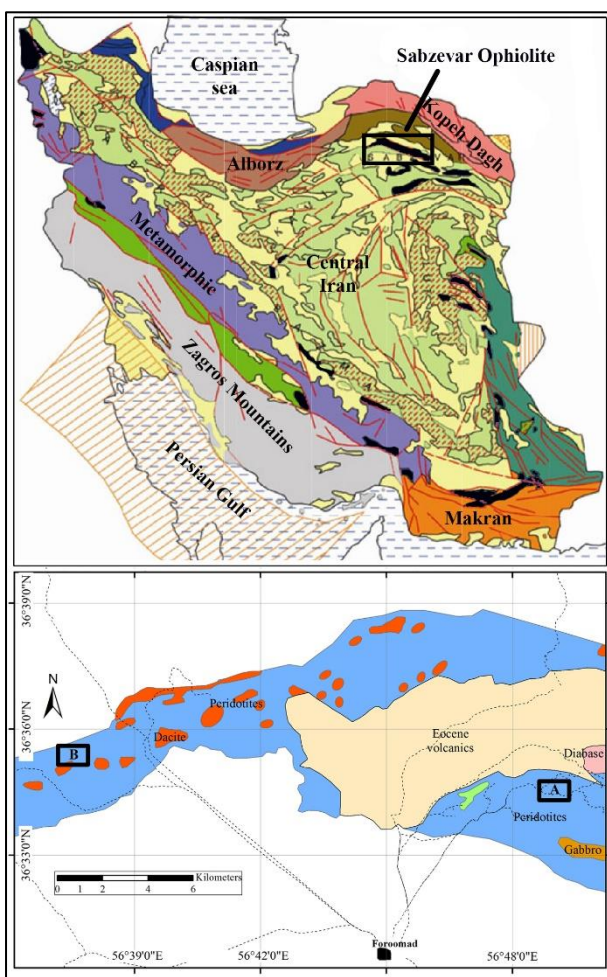
تجربه و تحقیق نشان داده که اکتشاف ژئوفیزیکی کرومیت، در مقایسه با بسیاری از دیگر ذخایر معدنی، قطعیت و موفقیت کمتری داشته است. در ایران پهنه‌های مستعد معدنی متعددی از ذخایر کرومیت وجود دارد که به دلیل نبودن روشی قطعی برای اکتشاف، به صورت بی‌برنامه رها شده و بهره‌برداری از ذخایر احتمالی آن می‌تواند باعث شکوفایی اقتصادی شود. در این تحقیق برای بررسی قابلیت شناسایی کانسنگ کرومیت به روش ژئوالکتریکی و الکترومغناطیسی از دو روش توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی و روش الکترومغناطیسی فرکانس پایین، در قالب ۹ نیم‌رخ الکترومغناطیسی و ۴ نیم‌رخ مقاومت‌ویژه، استفاده شده است. برای ارزیابی بهتر نتایج صحرایی، مطالعات شامل اندازه‌گیری‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی بر روی مغزه‌ها و بررسی‌های مینرالوگرافی در آزمایشگاه انجام شده است. مقاومت‌ویژه برای یک نمونه کرومیت بین ۲۸۰۰ تا ۳۶۰۰ و برای نمونه دیگر بین ۵۵۰۰ تا ۸۶۰۰ و برای سرپانتینیت (سنگ در برگیرنده کرومیت) بین ۲۰۰۰ تا ۲۳۰۰ اهم‌متر در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. در این تحقیق، پارامترهای VLF-EM با استفاده از سیگنال‌های رادیویی مختلف از جمله ۲۹/۶ و ۱۸/۱ کیلوهرتز بدست آمد. شبه مقطع چگالی جریان داده‌های VLF-EM، نتایج خوبی را در تشخیص مناطق گسلی و درزه‌دار سنگ‌های اولترابازیک سرپانتینیتی شده، بدست داد. نقشه‌های بدست آمده نشان داد که زون‌های با مقاومت‌های ویژه الکتریکی کمتر که خود را با چگالی جریان بیشتر نشان می‌دهد، در راستای گسل‌ها و ناپیوستگی‌های توده سنگ است که گاهی در سطوح خود، به همراه ذخایر کرومیت است. به کارگیری روش توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی در مناطق دارای ذخایر کرومیت شناخته شده، در چند مورد، باعث آشکارسازی محدوده‌های حاوی کرومیت شد. به طوری که زون‌های با مقاومت‌ویژه بیشتر، مرتبط با مناطق حاوی کرومیت تشخیص داده شد. نتایج تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی با حفاری‌ها و گمانه‌های اکتشافی در مناطق مورد مطالعه تا حدود قابل قبولی، تایید شد. در صورت فراهم بودن شرایط لازم، استفاده از روش‌های نامبرده، می‌تواند بطور بالقوه، باعث آشکارسازی ذخایر پنهان کرومیت شود.

کلمات کلیدی

کرومیت، افیولیت سبزوار، توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی، روش الکترومغناطیسی فرکانس خیلی پایین.

۱- مقدمه

سنگ میزبان (باطله) برای رسیدن به کانسار، وقت بسیار زیادی صرف می‌کند و موجب استهلاک زیاد ماشین‌آلات معدنی و افزایش هزینه‌ها می‌شود. شناسایی صحیح موقعیت مکانی کانسار در زیر زمین و استخراج هدفمند مواد معدنی می‌تواند منجر به کم شدن حجم باطله‌ها و در نتیجه کمک بسیار بزرگی به محیط زیست و اقتصاد معدنکاری باشد. استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی منجر به کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی و افزایش بهره‌وری معادن می‌شود. با توجه به مطالب بالا، به کارگیری روش‌های اکتشافی و از جمله استفاده از دانش ژئوفیزیک کمک موثری به محیط زیست و اقتصاد ملی است.



شکل ۱- نقشه واحدهای اصلی زمین‌شناسی ایران و نمایش موقعیت افیولیت سبزوار (چهارگوش مشکی) در شمال شرق ایران (نقشه بالا) و نقشه ساده زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (نقشه پایین). افیولیت‌های ایران در نقشه بالا [۹] با رنگ مشکی نشان داده شده است. موقعیت دو منطقه مورد مطالعه در دو چهارگوش مشکی A و B نمایش داده شده است که در پریدوتیت (رنگ آبی) قرار دارد. مقیاس ۶ کیلومتر را نشان می‌دهد. روستای فرومد در نقشه پایین با رنگ مشکی نشان داده شده است.

یکی از کانه‌های مهم اقتصادی موجود در ایران کرومیت است که برای چندین دهه در کشور مورد اکتشاف و بهره‌برداری اقتصادی قرار گرفته است. در حال حاضر، کانی کرومیت تنها کانه اقتصادی عنصر کروم است. این عنصر کاربرد وسیعی در صنایع متالورژی، صنایع شیمیایی، صنایع دیرگداز و به ویژه در صنعت فولاد دارد که با توجه به بزرگ بودن صنعت جهانی فولاد، اهمیت بسیار زیادی در تولید و تجارت فرآورده‌های فولادی دارد. کرومیت به طور عمده در دو محیط زمین‌شناسی توده‌های بزرگ سنگ‌های آذرین که به آرامی در مخازن بزرگ ماگمایی، در زیرزمین، سرد شده‌اند و دیگری افیولیت‌ها تشکیل می‌شود. از آنجا که ذخایر کرومیت در نوع اول تمایل به تشکیل ساختار لایه‌ای دارد، به عنوان ذخایر «لایه‌ای» شناخته می‌شود. ذخایری که در افیولیت‌ها وجود دارد معمولاً به شکل غلافی یا نامنظم‌اند و به عنوان ذخایر نوع «غلافی» شناخته می‌شوند. دو نوع دیگر از ذخایر کرومیت یکی «ماسه‌های ساحلی» حاصل از فرسایش سنگ‌های حاوی کرومیت و دیگری «لاتریت‌ها» که محصولات هوازدگی پریدوتیت‌هاست است. دو نوع اخیر، ذخایر کوچک کرومیت را تشکیل می‌دهد [۱]. در ایران، ذخایر کرومیت در سنگ‌های افیولیتی وجود دارد. شکل ۱ پراکندگی افیولیت‌های ایران را نشان می‌دهد. کانسار کرومیت در ایران برای اولین بار در سال ۱۳۱۹ هجری خورشیدی، در ۱۰۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان سبزوار، در رشته کوه‌های جغتای و در منطقه فرومد کشف شد که سالانه در حدود ۱۰۰۰ تن کرومیت از آن استخراج می‌شود. اکتشافات بعدی نشان داده که ذخایر اقتصادی کرومیت در بعضی دیگر از مناطق این رشته کوه وجود دارد و از آن پس، مورد اکتشاف و بهره‌برداری قرار گرفته است. در حال حاضر، قسمت عمده کرومیت استخراج شده در ایران، به صورت خام (فرآوری نشده)، به بازارهای بین‌المللی و به کشورهای صنعتی صادر می‌شود. باطله‌های حاصل از استخراج مواد معدنی به مشکل بزرگی برای محیط زیست تبدیل شده و به علاوه، حفاری و حمل باطله‌ها هزینه‌های معدنکاری را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده است. در بعضی از مناطق معدنی، حمل باطله‌ها به اطراف معادن، منجر به ایجاد تنش‌های اجتماعی شده است. با توجه به اینکه معادن کرومیت عمدتاً به صورت روباز استخراج می‌شود، هر ساله، مقادیر بسیار زیادی باطله در این معادن تولید می‌شود. حفاری

کوه‌های جغتای نامگذاری شده است. این رشته کوه با امتداد تقریباً شرقی-غربی، به طول حدود ۱۸۵ کیلومتر در شمال شرق ایران و در شمال شهرستان سبزوار واقع شده است (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه، در نزدیکی روستای فرومد و در فاصله ۶۰۵ کیلومتری از تهران قرار دارد. دسترسی به محدوده مورد نظر، از مبدا تهران، با گذر از شهرهای ایوانکی، سمنان، دامغان، شاهرود و میامی است. در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی افیولیت سبزوار، در چهارگوش مشککی، در شمال شرق ایران مشخص شده است.

۲-۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

رشته کوه‌های جغتای از دیدگاه زمین‌شناسی، بقایای سنگ‌های بستر به جای مانده از «اقیانوس سبزوار» است که در کرتاسه پَسین (مایستریشتین) در اثر نیروهای تکتونیکی، بسته شده است [۶]. این رشته کوه، در زمین‌شناسی ایران، با نام «افیولیت سبزوار» شناخته می‌شود. در واژه‌گان زمین‌شناسی، به گوشته بالایی و پوسته به جای مانده از اقیانوس‌های قدیمی که امروزه در قاره‌ها قرار دارند، اُفیولیت نام نهاده‌اند [۷]. سنگ‌های آلترامفیک از جمله: هارزبورگیت، دونیت، لرزولیت و ولریت (بیشتر سرپانتینی شده) از سنگ‌های اصلی افیولیت سبزوار است. سرپانتینی شدن سنگ‌های پریدوتیتی افیولیت‌ها عموماً تحت تاثیر آب‌های داغ، در کف اقیانوس‌ها انجام شده است [۸].

در این منطقه، کرومیت یک کانی ماگمایی اولیه است و در سنگ‌های آذرین اولترامافیک وجود دارد. کانسار کرومیت در این منطقه، به شکل عدسی و یا لایه‌های کوچک و بزرگ و امتداد اصلی آن در راستای شمال شرقی- جنوب غربی است. در این منطقه، کرومیت‌های اولیه (برجا) معمولاً در عدسی‌های دونیت که خود در هارزبورگیت محصور است، یافت می‌شود. پوشش دونیتی ممکن است ضخیم، نازک یا در گاهی موارد وجود نداشته باشد و کرومیت در تماس مستقیم با دیگر پریدوتیت‌های اطراف باشد. دونیت و هارزبورژیت عموماً سرپانتینی شده‌اند. این منطقه به واسطه وجود معادن کرومیت، شناخته شده است. پیکره‌های کرومیتیتی در منطقه مورد مطالعه، در بسیاری موقعیت‌ها با گسل، از مکان اولیه جابه‌جا و پراکنده شده است. در این منطقه، بسیاری از ذخایر کرومیت قبلاً بر اساس مشاهدات سطحی و اکتشافات سنتی، شناسایی شده و برای چندین دهه، مورد بهره‌برداری قرار گرفته است.

کرومیت در مقایسه با سنگ میزبان (سرپانتینیت) دارای چگالی بیشتر و رسانایی الکتریکی کمتر و خودپذیری مغناطیسی کمتر و یا بیشتر است. این ویژگی‌ها باعث ایجاد ناهنجاری‌های مغناطیسی، الکتریکی و گرانشی مناسبی برای اکتشاف کرومیت می‌شود [۴، ۳، ۲]. به دلیل بالا بودن نسبی وزن حجمی کرومیت (حدود ۴/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، چگالی، مهم‌ترین ویژگی فیزیکی است که می‌توان از آن برای تشخیص نهشته‌های کرومیت از سنگ‌های اطراف (سرپانتینیت) استفاده کرد و بنابراین بطور بالقوه اساسی‌ترین روش ژئوفیزیکی برای جستجوی نهشته‌های کرومیت، روش گرانی‌سنجی است اما در افیولیت‌ها توزیع کرومیت‌ها عموماً نامنظم، پراکنده و با حجم نسبتاً کوچک است و از این‌رو لازم است از روش‌های دیگر ژئوفیزیکی نیز برای اکتشاف آن بهره گرفت.

مطالعه کنونی، به بررسی کارایی روش‌های ژئوفیزیکی توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی و روش الکترومغناطیسی فرکانس بسیار پایین در ذخایر کرومیتی منطقه فرومد می‌پردازد. همچنین برای ارزیابی بهتر نتایج صحرایی، مطالعات آزمایشگاهی شامل اندازه‌گیری‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی بر روی مغزه‌ها و بررسی‌های مینرالوگرافی انجام شده است. در منطقه مورد مطالعه، پیکره‌های کرومیتیتی در بسیاری موارد در امتداد خاصی تمرکز یافته است که به نظر می‌رسد در امتداد گسل‌ها بوده [۵] و از این‌رو تحلیل ساختاری این محدوده معدنی، به دلیل وجود زون‌های گسلی اهمیت زیادی برای اکتشاف کرومیت دارد؛ بنابراین با توجه به توانمندی‌های روش‌های ژئوفیزیکی ERT و VLF-EM در مشخص کردن زون‌های شکستگی، می‌توان از آن برای مشخص کردن وجود ارتباط بین شکستگی‌ها و اکتشاف کرومیت استفاده کرد. در این تحقیق دو روش ژئوفیزیکی ERT و VLF-EM در غرب افیولیت سبزوار برای اکتشاف کانسنگ کرومیت به کار گرفته شد و با آشکار کردن ویژگی‌های ژئوفیزیکی پریدوتیت‌های سرپانتینیتی منطقه مورد مطالعه، مشخص شد که می‌توان بطور بالقوه از این دو روش برای اکتشاف کانسنگ کرومیت بهره جست.

۲- موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی و کانی‌شناسی

۲-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

افیولیت سبزوار، در فرهنگ علم جغرافیا، با نام رشته

شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی بخشی از افیولیت سبزواری را نشان می‌دهد. در این نقشه، معادن کرومیت در سنگ‌های پریدوتیتی قرار دارد.

۲-۳- کانی‌شناسی کرومیت

کرومیت از دیدگاه علم کانی‌شناسی از خانواده «اسپینل» است. ترکیب شیمیایی عمومی کانی کرومیت $FeCr_2O_4$ است. در این فرمول، درصد وزنی FeO و Cr_2O_3 به ترتیب برابر با ۳۲ و ۶۸ است. در طبیعت، کرومیت‌هایی با فرمول ایده‌آل کمیاب است و عموماً مقداری Mg جایگزین Fe^{+2} و مقداری Al و Fe^{+3} جایگزین Cr می‌شود [۱۰]. بنابراین کرومیت در طبیعت معمولاً با ترکیب «محلول جامد» یافت می‌شود. کرومیت در سیستم بلورشناسی کوبیک متبلور می‌شود. وزن مخصوص آن حدود ۴٫۶ گرم بر مترمکعب و سختی آن در مقیاس کانی‌شناسی «موهس» برابر ۵٫۵ و رنگ آن اغلب سیاه آهنی تا قهوه‌ای مایل به سیاه است. رنگ «خاکه» آن قهوه‌ای تیره است. کرومیت در پریدوتیت‌ها و سایر سنگ‌های اولترابازیک (عموماً سرپانتینی شده) وجود دارد. این کانی از اولین کانی‌هایی است که از ماگمای بازالتی (یا پیکریتی) در حال سرد شدن، تفریق می‌یابد [۱۱]. در منطقه مورد مطالعه، بافت کرومیت عموماً از انواع توده‌ای، پراکنده و یا گروی است (شکل ۲).

جریان مستقیم (DC)، بر اساس اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه الکتریکی مواد زیر سطحی است. در این روش، جریان الکتریکی به وسیله دو الکتروود به زمین وارد شده و سپس اختلاف پتانسیل الکتریکی در نقاط مشخصی با دو الکتروود دیگر، اندازه‌گیری می‌شود؛ سپس می‌توان مقاومت‌ویژه ظاهری را با در نظر گرفتن هندسه آرایه الکتروودی مورد نظر، محاسبه کرد. برای اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه الکتریکی، می‌توان الکتروودهای جریان و پتانسیل را در انواع مختلفی از آرایه‌ها بر روی زمین قرار داد. در تحقیق کنونی، برداشت‌های صحرایی مقاومت‌ویژه الکتریکی با استفاده از دستگاه چندکاناله RESECS انجام شد. روش VLF-EM جزو اندازه‌گیری‌های الکترومغناطیسی (EM) و بر اساس پاسخ زمین به انتشار میدان‌های الکترومغناطیسی بنا نهاده شده است. در بسیاری از روش‌های EM، میدان مغناطیسی ثانویه القایی Hs در صفحه عمودی قرار دارد. از آنجا که میدان‌های اولیه و ثانویه هر دو متناوب اند، حاصل جمع دو میدان، یک بیضی را با زمان، در صفحه عمودی تشکیل می‌دهد. بر این اساس گفته می‌شود که حاصل جمع دو میدان در صفحه عمودی، به شکل بیضی، قطبی شده است. برای یک جسم رسانای خوب، جهت محور بزرگ بیضی قطبش با جهت میدان حاصل از جمع میدان الکترومغناطیسی اولیه و ثانویه منطبق است. مقدار زاویه محور بزرگ بیضی از افق با عنوان زاویه تیلت (θ) شناخته می‌شود. امتداد پیمایش‌ها در منطقه مورد بررسی، عمود بر امتداد ساختار زمین‌شناسی انجام می‌شود. علاوه بر زاویه تیلت، پارامتر مهم دیگر، میزان کشیدگی بیضی قطبش است. میزان کشیدگی بیضی برابر است با حاصل تقسیم قطر کوچک بیضی به قطر بزرگ آن است. زاویه تیلت و کشیدگی بیضی را به ترتیب، مولفه‌های حقیقی و موهومی نیز می‌نامند [۱۲]. منبع مورد استفاده در روش VLF، امواج الکترومغناطیسی تولید شده با فرکانس پایین (۱۵ تا ۲۵ کیلوهرتز) است [۱۳]. روش VLF-EM دارای مزایایی است و از جمله آن که تجهیزات صحرایی آن کوچک و سبک است و به راحتی توسط یک نفر اداره می‌شود و ضمناً نیازی به نصب فرستنده ندارد. با این حال، در یک منطقه خاص، ممکن است هیچ فرستنده مناسبی وجود نداشته باشد که یک بردار مغناطیسی را عمود بر امتداد ساختار زمین‌شناسی ایجاد کند. عیب دیگر این روش این است که عمق نفوذ تا حدودی کمتر از آن چیزی است که با استفاده از یک فرستنده محلی، قابل بررسی است. در این مطالعه سیگنال‌های VLF با استفاده از

شکل ۲- نمونه‌های دستی کرومیت از منطقه مورد مطالعه. نمونه سمت راست، دارای بافت گروی و نمونه چپ، بافت توده‌ای دارد. قسمت‌های تیره در نمونه سمت راست، تجمع گروی از بلورهای کرومیت است و با نام «ندول» خوانده می‌شود. قسمت‌های روشن، تجمعات بلورهای الیون سرپانتینی شده است. این بافت را «پوست‌پلنگی» نیز نامیده‌اند (مقیاس ۱۰ سانتی‌متر را نشان می‌دهد). اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و صحرایی

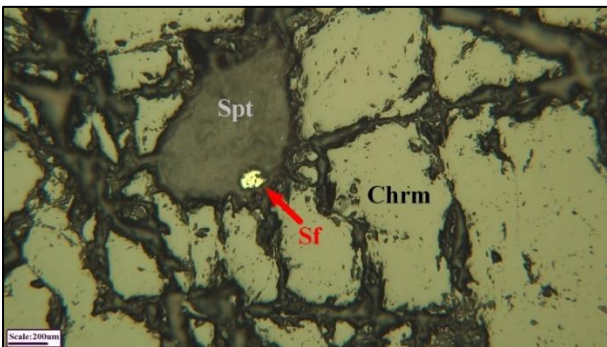


اندازه‌گیری‌های صحرایی شامل برداشت داده‌های توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی و داده‌های الکترومغناطیسی فرکانس بسیار پایین می‌شود. روش مقاومت‌ویژه الکتریکی

آزمایشگاهی و صحرایی

اندازه‌گیری‌های صحرایی شامل برداشت داده‌های توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی و داده‌های الکترومغناطیسی فرکانس بسیار پایین می‌شود. روش مقاومت‌ویژه الکتریکی

(شکل ۴). در این نمونه، کرومیت فاز کانیاپی فلزی اصلی است. مقادیر ناچیز و به مقدار بسیار کم ذرات ریز سولفیدی (به احتمال، سولفیدهای نیکل) در اندازه‌های کوچک تر از ۳۰ میکرون قابل مشاهده است. کرومیت بیشتر با بافت توده‌ای و کمتر با بافت کاتاکلاستیک و خردشده دیده می‌شود. کانی‌های سیلیکاتی در فضای بین بلورهای کرومیت و نیز به صورت پرکننده ریزشکستگی‌های داخل بلوری مشاهده می‌شود. ذرات ریز و میکرونی سولفیدی، عمدتاً به فرم ادخال در زمینه سیلیکاتی تمرکز دارد و در بلورهای کرومیت یافت نمی‌شود.



شکل ۴- بافت میکروسکوپی کرومیت معدن ۱۲ شرقی. در این مقطع، کرومیت فاز اصلی با بافت توده‌ای است (Chrm). در مرکز تصویر، کانی سولفیدی (Sf) در زمینه‌ای از سرپانتین (Spt) مشاهده می‌شود. نور انعکاسی، وضعیت PPL. مقیاس ۲۰۰ میکرومتر را نشان می‌دهد.

• شرح نمونه ۲ (نام سنگ: کرومیتیت)

کرومیتیت شماره ۲ از معدن ۲۰ گرفته شده است. در این نمونه کرومیتیت با بافت کاتاکلاستیک و خردشده، فاز کانیاپی فلزی و تشکیل‌دهنده اصلی نمونه است (شکل ۵). در برخی قسمت‌های نمونه، بطور پراکنده در زمینه بلورهای کرومیت و نیز به شکل رگچه و پرکننده ریزشکستگی‌های بلورهای کرومیت، احتمالاً سولفیدهای نیکل (به احتمال، پنتلاندیت) با رفلکتانس پایین مشاهده می‌شود. تعیین ماهیت دقیق این فاز، نیازمند آنالیز میکروپروب یا S.E.M است. به نظر می‌رسد ذرات ریز و میکرونی- ساب میکرونی هماتیت درگیر در زمینه کرومیت وجود دارد. ذرات ریز و ساب میکرونی سولفیدی (به احتمال، سولفید نیکل نوع پنتلاندیت)، به ندرت، به شکل ادخال در بلورهای کرومیت مشاهده می‌شود.

• شرح نمونه ۳ (نام سنگ: سرپانتینیت)

نمونه شماره ۳ از معدن ۱۲ شرقی گرفته شده است (شکل ۶). نام سنگ سرپانتینیت است و در نزدیکی کرومیت قرار دارد.

دستگاه WADI انجام گرفت. علاوه بر مطالعات صحرائی، بررسی‌های آزمایشگاهی نیز برای بدست آوردن مقاومت ویژه کرومیت و سنگ دربرگیرنده آن (سرپانتینیت) با هدف درک بهتر پاسخ زمین به برداشت‌های صحرائی و در دست داشتن یک ملاک برای سنجش و کنترل داده‌های صحرائی انجام شد که در قسمت‌های بعدی تشریح شده است.

۳-۱- مطالعه مینرالوگرافی

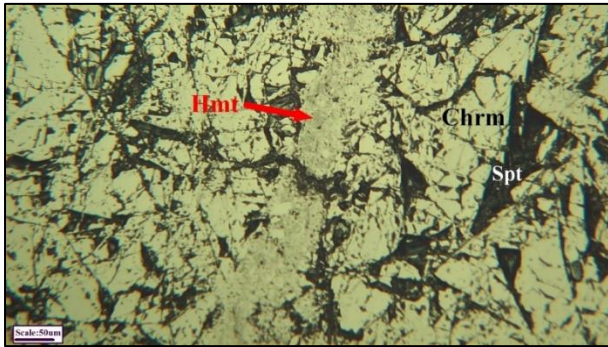
با توجه به ویژگی‌های سنگ‌شناسی متنوع افیولیت‌ها که عموماً در اثر فرایندهای ثانویه ایجاد می‌شود، اطلاع از ویژگی‌های کانی‌شناسی سنگ‌ها می‌تواند کمک زیادی به تفسیر نتایج حاصل از برداشت‌های ژئوفیزیکی کند. از این رو، برای شناخت محتوای کانی‌شناسی سنگ‌های مورد مطالعه، دو نمونه از کرومیتیت‌ها و یک نمونه از سنگ‌های دربرگیرنده کرومیتیت (سرپانتینیت)، مورد مطالعه مینرالوگرافی قرار گرفت (شکل ۳) که نتایج آن در زیر آورده شده است.



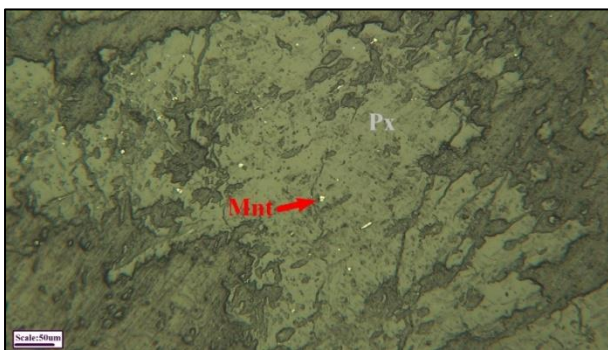
شکل ۳- نمونه‌های مقاطع صیقلی، تهیه شده جهت مطالعه مینرالوگرافی. نمونه کرومیت Chrm1 از معدن ۱۲ شرقی و نمونه Chrm2 از معدن ۲۰ می‌باشد. در این مقاطع، قسمت‌های تیره رنگ، بلورهای کرومیت و قسمت‌های سفید، سرپانتینیت می‌باشد. درصد سرپانتینیت در نمونه‌های Chrm1 نسبت به نمونه Chrm2 بیشتر می‌باشد.

• شرح نمونه ۱ (نام سنگ: کرومیتیت)

کرومیتیت شماره ۱ از معدن ۱۲ شرقی گرفته شده است



شکل ۵- بافت میکروسکوپی کرومیت معدن ۲۰. در این مقطع، کرومیت (Chrm) فاز اصلی با بافت کاتاکلاستیک است. هماتیت (Hmt) در داخل بلورهای کرومیت، بصورت تیره تر مشاهده می شود. سرپانتین برنگ تیره مشاهده می شود (Spt). نور انعکاسی، وضعیت PPL. مقیاس ۵۰ میکرومتر را نشان می دهد.



شکل ۶- بافت میکروسکوپی سرپانتین معدن ۱۲ شرقی. در عکس، ادخال های میکرونی - ساب میکرونی مگنتیت (Mnt) در کانی های غیرفلزی سیلیکاتی (به احتمال پیروکسن، Px) مشاهده می شود. نور انعکاسی، وضعیت PPL. مقیاس ۵۰ میکرومتر را نشان می دهد.

$$\rho = k \times R \quad (1)$$

$$k = A/L \quad (2)$$

که در این روابط:

$R(\Omega)$ مقاومت الکتریکی سنگ

k ضریب هندسی است که به فاصله بین الکترودها و قطر و طول نمونه، بستگی دارد.

مقاومت الکتریکی (R) به وسیله دستگاه اندازه گیری شده و مقاومت ویژه الکتریکی (ρ) از رابطه بالا محاسبه می شود.

برای اندازه گیری های الکتریکی، از سه مغزه استوانه ای شامل دو نمونه کرومیت و یک نمونه سرپانتین استفاده شد. شکل ۷ نمایشی از نمونه سنگ ها و مغزه های تهیه شده را نشان می دهد.

کانی های غیرفلزی تشکیل دهنده اصلی این نمونه است. بلورهای «بی شکل» کرومیت، به مقدار کم، در اندازه های کوچک تر از ۳۵۰ میکرون، پراکنده در زمینه غیرفلزی در حد ۰٫۵ تا ۱ درصد حجمی مشاهده می شود. در ریزشکستگی های برخی بلورهای کرومیت، فاز کانیاپی دیگری با ویژگی های اُپتیکی مشابه با هماتیت مشاهده می شود. علاوه بر این، در امتداد سطوح کلیواژ و نیز زمینه برخی بلورهای غیرفلزی سیلیکاتی (به احتمال، پیروکسن)، ذرات ریز مس عنصری (کوچک تر از ۸۰ میکرون)، ذرات ریز مگنتیت (کوچک تر از ۳۰ میکرون) و ذرات میکرونی سولفیدی (پنتلندیت) به شکل ادخال و اینکلوزن یافت می شود. براساس نتایج مینرالوگرافی، شواهد مربوط به خردشدگی دانه های کرومیت به خوبی آشکار و در میکروسکوپ قابل مشاهده است و گسلی بودن این کرومیت را اثبات می کند. در مطالعه مینرالوگرافی، تشکیل مس عنصری و دیگر فازهای کمیاب مانند اکسیدها و سولفیدها، به صورت ثانویه در کرومیتیت و سرپانتینیت های منطقه مورد مطالعه به اثبات رسید. بعداً مشاهده خواهد شد، سرپانتینیت ها نسبت به کرومیتیت رسانایی بالاتری دارد. سوالی که مطرح می شود این است که تا چه حد وجود فازهای ثانویه عنصری و اکسیدی توانسته در میزان رسانایی الکتریکی و پلاریزاسیون القایی این سنگ ها تاثیر داشته باشد؟

پاسخ به این سوالات می تواند کمک قابل توجهی به تفسیر نتایج حاصل از برداشت های صحرائی نماید. ولا و امرسون [۱۴] در مقاله خود، عوامل موثر در مقاومت ویژه الکتریکی و شارژپذیری سنگ های حاوی مگنتیت و هماتیت را معرفی کرده اند. از جمله این عوامل درصد حجمی، چگونگی توزیع، سیستم تبلور، ویژگی مرز دانه ها و بافت این دو کانی و به ویژه ویژگی های سنگ میزبان است. از این مطلب می توان نتیجه گرفت که ویژگی های فیزیکی سنگ های مورد مطالعه، با توجه به تاریخچه تشکیل و تحول این سنگ ها، می تواند متنوع باشد. در نهایت، شناختی که از طریق مطالعه مینرالوگرافی و مطالعات آزمایشگاهی نمونه ها بدست می آید، می تواند منجر به پیش بینی روش های موثرتر ژئوفیزیکی در اکتشاف کانسار شده و باعث بالا رفتن میزان بهره وری عملیات اکتشافی شود.

۲-۲- اندازه گیری و محاسبه مقاومت ویژه در آزمایشگاه

مقاومت ویژه الکتریکی، مشخصه ذاتی مواد است که مستقل از شکل هندسی نمونه است و معمولاً آن را با ρ (Ωm) نشان داده می شود.

- ρ : مقاومت ویژه (اهم‌متر)
- Vp : پتانسیل الکتریکی (میلی‌ولت)
- I : جریان (میلی‌آمپر)
- A : سطح مقطع نمونه (مترمربع)
- L : طول نمونه (متر)

نتایج حاصل از اندازه‌گیری نمونه‌ها در جدول ۱ و به صورت گرافیکی، در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری مقاومت‌های الکتریکی نمونه‌های مورد مطالعه، می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های کرومیتیت از سرپانتینیت بیشتر است و مقاومت ویژه الکتریکی کرومیتیت با مقدار سرپانتینیت موجود در بین دانه‌های کرومیت، نسبت عکس دارد. رسانایی الکتریکی سنگ‌های سرپانتینیتی شده جمع‌آوری شده از پشته‌های اقیانوس هند، ۳ تا ۴ برابر بیشتر از پریدوتیت‌های بدون سرپانتین، هورنبلند گابرو و بازالت است. این رسانایی بالاتر می‌تواند نه در اثر حضور سرپانتین بلکه در اثر وجود کانی‌های اکسیدی مانند مگنتیت که به همراه سرپانتین وجود دارد، ایجاد شده باشد [۱۵].

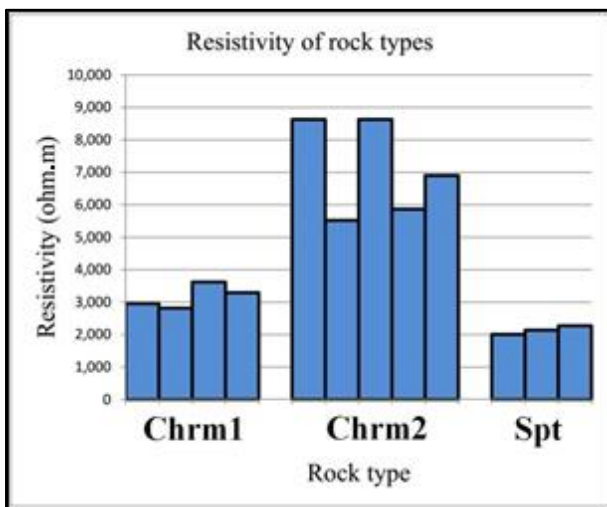


شکل ۷- مغزه‌های تهیه شده از سنگ‌های مورد مطالعه. نمونه‌های کرومیتیت با نماد Chrm1 و Chrm2 و نمونه سرپانتینیت با نماد Spt مشخص شده است. مغزه‌های تهیه شده با پیکان‌های قرمز نشان داده شده است. طول نمونه‌های بزرگتر با حرف L و قطر آن با D مشخص شده است.

روش تک محوری، روشی برای تعیین مقاومت ویژه الکتریکی مواد در آزمایشگاه است که به وسیله دستگاه تعیین مقاومت ویژه الکتریکی انجام می‌شود. دستگاه به کار رفته در این تحقیق، ساخت شرکت ABEM، یک ابزار آزمایشگاهی برای تعیین مقاومت ویژه الکتریکی سنگ‌ها است. برای استفاده از دستگاه، بهتر است ابتدا از سنگ‌ها مغزه‌گیری شود تا نمونه‌ها شکل هندسی منظمی داشته باشد. بدین ترتیب، دقت اندازه‌گیری بیشتر می‌شود. تغییر در درصد اشباع از آب، بر مقدار مقاومت ویژه الکتریکی سنگ اثر می‌گذارد. لازم است نمونه‌ها قبل از اندازه‌گیری، به مدت ۲۴ ساعت در داخل آب قرار داده شود. سطوح نمونه باید در زمان اندازه‌گیری، خشک باشد و از این رو بلافاصله قبل از اندازه‌گیری با اسفنج اشباع از آب تمیز شود. برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه، نمونه سنگ بین دو الکترود قرار می‌گیرد. معمولاً برای اطمینان از اتصال مناسب نمونه و الکترود از اسفنج مرطوب استفاده می‌شود. یک جریان مستقیم به نمونه وارد شده و اختلاف پتانسیل بین دو الکترود اندازه‌گیری می‌شود. مقاومت نمونه از عقربه آنالوگ خوانده می‌شود. سپس مقاومت ویژه نمونه، با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$\rho = \frac{Vp \text{ (mV)}}{I \text{ (mA)}} \times \frac{A \text{ (m}^2\text{)}}{L \text{ (m)}} \quad (3)$$

که در آن:



شکل ۸- نمایش گرافیکی مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها. مقاومت‌های ویژه الکتریکی نمونه‌های کرومیتیت شماره ۱ و کرومیتیت شماره ۲ با نماد Chrm1 و Chrm2 و نمونه سرپانتینیت با نماد Spt نمایش داده شده است. مقاومت ویژه الکتریکی نمونه Chrm2 بیشترین و برای Spt کمترین است. مقدار مقاومت ویژه برای نمونه Chrm1 بین ۲۸۰۰ تا ۳۶۰۰ اهم متر، برای نمونه Chrm2 بین ۲۳۰۰ تا ۵۵۰۰ اهم متر و برای نمونه سرپانتینیت بین ۲۰۰۰ تا ۲۳۰۰ اهم متر است.

جدول ۱ - جدول مقاومت ویژه الکتریکی محاسبه شده نمونه‌ها. این جدول از ستون چپ به راست به ترتیب شامل نام نمونه، طول نمونه، سطح مقطع نمونه، مقدار جریان، ولتاژ و مقاومت ویژه الکتریکی است. نمونه‌های کرومیتیت شماره ۱ و ۲ به ترتیب، با نماد Chrm2 و Chrm1 و نمونه سربانتینیت با نماد Spt نمایش داده شده است.

Sample	Length (m)	Area (m ²)	Current (A)	vp			Resistivity (ohm.m)
				Div	Range (A)	mv	
chrm1	0.076	0.00107	1.00E-05	21	1.00E-01	2.1	2,957
chrm1	0.076	0.00107	5.00E-06	10	1.00E-01	1	2,816
chrm1	0.065	0.00107	5.00E-06	11	1.00E-01	1.1	3,622
chrm1	0.065	0.00107	5.00E-06	10	1.00E-01	1	3,292
chrm2	0.062	0.00107	1.00E-06	5	1.00E-01	0.5	8,629
chrm2	0.062	0.00107	5.00E-06	16	1.00E-01	1.6	5,523
chrm2	0.062	0.00107	1.00E-06	5	1.00E-01	0.5	8,629
chrm2	0.062	0.00107	5.00E-06	17	1.00E-01	1.7	5,868
chrm2	0.062	0.00107	1.00E-06	4	1.00E-01	0.4	6,903
spt1	0.08	0.00107	1.00E-05	15	1.00E-01	1.5	2,006
spt1	0.08	0.00107	5.00E-06	8	1.00E-01	0.8	2,140
spt1	0.08	0.00107	1.00E-05	17	1.00E-01	1.7	2,274

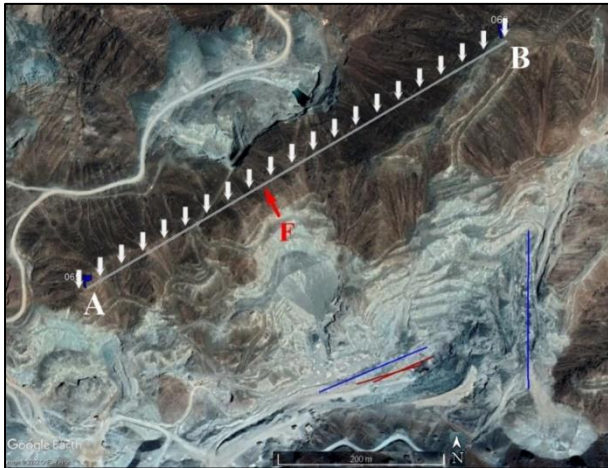
جدول ۲ - مشخصات نیمرخ‌های طراحی و داده برداری شده به روش VLF-EM

طول (متر)	فرکانس (کیلوهرتز)	فاصله ایستگاهی (متر)	امتداد	موقعیت
۱۰۵	۲۹٫۶	۳ و ۶	NW-SE	معدن ۸، پله ۱
۲۰۶	۲۹٫۶ و ۱۸٫۱	۹٫۶ و ۱۲	NS	معدن ۱۲، پله ۷
۱۱۰	۲۳٫۴	۳٫۰	NE-SW	معدن ۱۲، پله کف
۵۲۰	۲۹٫۶	۱۰٫۰	NE-SW	معدن ۱۲ غربی
۹۵	۲۱٫۷	۳٫۰	NE-SW	معدن ۱۳، پله کف
۷۸	۲۹٫۶	۳٫۰	NS	معدن ۲۰، پله ۱

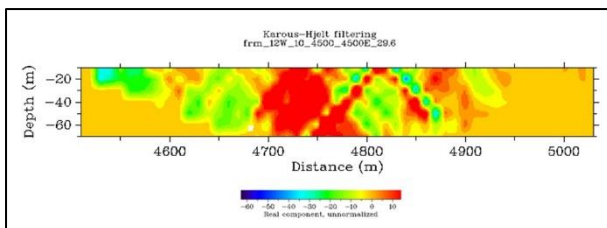
اندازه‌گیری توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی با استفاده از آرایه ونر آلفا، مجموعاً در امتداد ۴ نیمرخ و به ترتیب در معدن ۸، پله ۱، معدن ۱۲ شرقی، پله کف (دو نیمرخ) و معدن ۱۳، پله کف، با فاصله ایستگاهی ۲ و ۲٫۳ متر با استفاده از

۳-۳- مطالعات صحرایی به روش‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و روش الکترومغناطیس فرکانس بسیار پایین

مطالعه الکترومغناطیسی VLF در امتداد ۵ نیمرخ با فاصله ایستگاهی متفاوت با استفاده از تجهیزات ABEM WADI در معدن ۸ پله ۱، معدن ۱۲ شرقی پله ۷، معدن ۱۲ شرقی پله کف، معدن ۱۳ پله کف و معدن ۲۰ پله ۱ انجام شد (جدول ۲). از آنجا که این ابزار قادر است در یک زمان، تنها یک فرکانس را اندازه‌گیری کند، اندازه‌گیری‌ها در طول نیمرخ‌ها در یک فرکانس خاص انجام می‌شود. فرکانس‌ها با توجه به قدرت آن‌ها و مناسب بودن جهت آن‌ها نسبت به نیمرخ‌ها انتخاب شده است. چگالی ظاهری جریان (به درصد) با استفاده از ناهنجاری‌های واقعی VLF-EM به وسیله فیلتر خطی کاروس و هجلیت [۱۶] در قالب نرم‌افزار KHFFILT; Version 1.1a (c) 2004 محاسبه شده است. بطور کلی، چگالی جریان‌های بالا مربوط به مواد رسانا و چگالی جریان‌های پایین مربوط به موادی با مقاومت ویژه بالاست است. در نمودارهای ترسیم شده، چگالی جریان بر حسب مولفه حقیقی محاسبه شده است. در نمودارهای چگالی جریان که به وسیله نرم‌افزار KHFFILT محاسبه شده، عبارت نرمال نشده که در زیر مقیاس این نمودارها درج شده است، بدین معنی است که در محاسبات انجام شده، «عمق پوستی» در نظر گرفته نشده است.



شکل ۹- پلان مسیر نیمرخ VLF-EM در ارتفاعات مشرف به معدن ۱۲ غربی. پیکان‌های سفید رنگ مسیر برداشت VLF-EM را در ارتفاعات مشرف به معدن ۱۲ غربی نشان می‌دهد (خط AB). مسیر نیمرخ‌های پله ۷ و پله کف، با خطوط آبی مشخص است. مسیر نیمرخ‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی در پله کف، با خطوط قرمز مشخص است. موقعیت گسل کشف شده به روش VLF-EM با نماد F نشان داده شده است. مقیاس در پایین تصویر، دویست متر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- شبه مقطع چگالی جریان، در امتداد خط‌الراس ارتفاعات مشرف به معدن ۱۲ غربی. فاصله ایستگاه‌های برداشت شده VLF-EM برابر با ۱۰ متر و فرکانس برداشت VLF-EM برابر با ۲۹٫۶ کیلوهرتز است. در فاصله ۲۲۰ متری مقطع، از چپ، ناهنجاری قابل ملاحظه‌ای، به رنگ قرمز مشاهده می‌شود که به گسل، نسبت داده شد. مقیاس چگالی جریان از +۱۰ (قرمز) تا -۶۰ (آبی) است.

۳-۲-۳- مطالعه به روش‌های توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی و الکترومغناطیس فرکانس بسیار پایین در معدن ۸

برداشت الکترومغناطیسی VLF و مقاومت‌ویژه الکتریکی در نیمرخ‌ی به طول ۱۰۲ متر و با امتداد شمال‌غرب- جنوب‌شرق انجام شد (شکل ۱۱ و ۱۲). مطالعه VLF-EM با فاصله ایستگاهی ۳ و ۶ متر و با فرکانس ۲۹٫۶ کیلوهرتز و مطالعه مقاومت‌ویژه الکتریکی با فاصله الکترودی ۲٫۳ متر و با آرایه و نر آلفا انجام شد. در این معدن، اندازه‌گیری‌های VLF-EM و مقاومت‌ویژه الکتریکی، بر روی پله اول انجام شد. کرومیت به

تجهیزات RESECS انجام شد تا توزیع مقاومت‌ویژه الکتریکی واقعی در زیر سطح، محاسبه و به تصویر کشیده شود (جدول ۳). برای اینکار، ابتدا مقاومت‌ویژه ظاهری از داده‌های اندازه‌گیری شده پردازش می‌شود و سپس با استفاده از روش وارون‌سازی، مقاومت‌ویژه حقیقی برآورد می‌شود. در این تحقیق، برای مدل‌سازی پیشرو و وارون و محاسبه الگوی حساسیت از نرم‌افزار RESIP2DMode استفاده شده است [۱۷]، با استفاده از مقاومت‌های ویژه وارون‌سازی شده، مقاطع ژئوالکتریکی ساخته می‌شود و سپس مقاطع ژئوالکتریکی با ساختارهای زمین‌شناسی موجود در منطقه مطابقت داده می‌شود. مقاطع الگوی حساسیت، به صحت‌سنجی مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی کمک قابل ملاحظه‌ای می‌کند.

جدول ۳- مشخصات نیمرخ‌های طراحی و داده‌برداری شده به روش توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی

موقعیت	امتداد نیمرخ	فاصله الکترودی (متر)	طول (متر)
معدن ۸، پله ۱	NW-SE	۲٫۳	۱۰۵
معدن ۱۲، پله کف دو نیمرخ	NE-SW	۲٫۰	۱۱۰
معدن ۱۳، پله کف	NE-SW	۲٫۰	۹۵

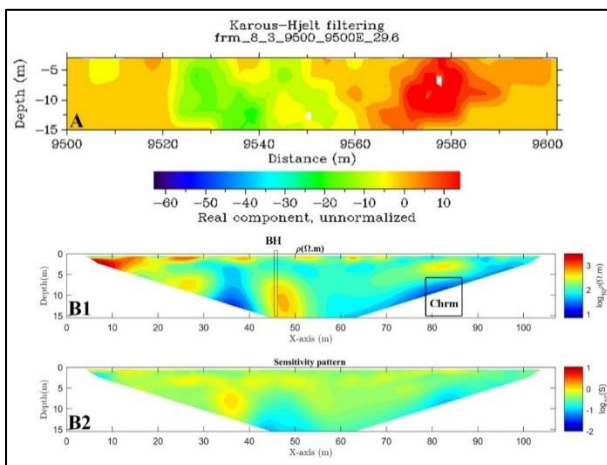
۳-۳-۱- مطالعه VLF-EM در محدوده معدن ۱۲ غربی

از آنجا که روش VLF-EM روش مناسبی برای اکتشاف ساختارهای صفحه مانند دارای رسانایی زیاد است، برای یافتن گسلی احتمالی، از این روش، به عنوان روش تکمیلی استفاده شد. برای انجام اینکار، برداشت VLF-EM در امتداد خط‌الراس ارتفاعات مشرف به معدن ۱۲ غربی انجام شد (شکل ۹). فاصله ایستگاه‌های برداشت داده‌ها برابر ۱۰ متر و طول نیمرخ برداشت شده حدود ۵۲۰ متر و فرکانس برداشت ۲۹٫۶ کیلوهرتز انتخاب شد. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود در فاصله حدود ۲۲۰ متری شبه مقطع چگالی جریان (از سمت چپ)، ناهنجاری قابل توجهی به رنگ قرمز مشاهده می‌شود که به نظر می‌رسد در اثر یک شکستگی قابل توجه، ایجاد شده باشد. با توجه به مشاهده بالا، ناهنجاری موجود در مقطع چگالی جریان، به عنوان گسل مورد نظر معرفی شد. موقعیت گسل کشف شده به روش VLF-EM با نماد F بروی شکل ۱۰ نشان داده شده است. اطلاعات زمین‌شناسی، گسل مورد نظر را تایید می‌کند.

پس از برداشت و پردازش داده‌ها، مقطع چگالی جریان و مقاومت ویژه الکتریکی با نرم‌افزارهای نامبرده در بالا، ترسیم شد. شکل ۱۳ مقطع مقاومت ویژه الکتریکی وارون سازی شده و مقطع پارامتر حساسیت را برای مقایسه در زیر شبه مقطع VLF-EM نشان می‌دهد.

الف - حفاری اکتشافی

جهت اطلاع از ماهیت ناهنجاری مشاهده شده در مقطع مقاومت ویژه، حفاری اکتشافی در معدن ۸، بروی پله یک، در سه نقطه، هر کدام به عمق ۱۵ متر، انجام شد (شکل ۱۳). موقعیت حفاری در شکل ۱۳ با نماد BH نشان داده شده است (مقطع B1). بررسی نمونه‌ها برای شناسایی سنگ‌های حفاری شده و یافتن آثار احتمالی کرومیت با ذره‌بین دستی انجام شد. بررسی نمونه‌ها نشان داد که نوع سنگ‌های حفاری شده سرپانتینیت و فاقد کرومیت بوده و یا دارای درصد بسیار پایینی از کرومیت (۱ تا ۳ درصد) است.

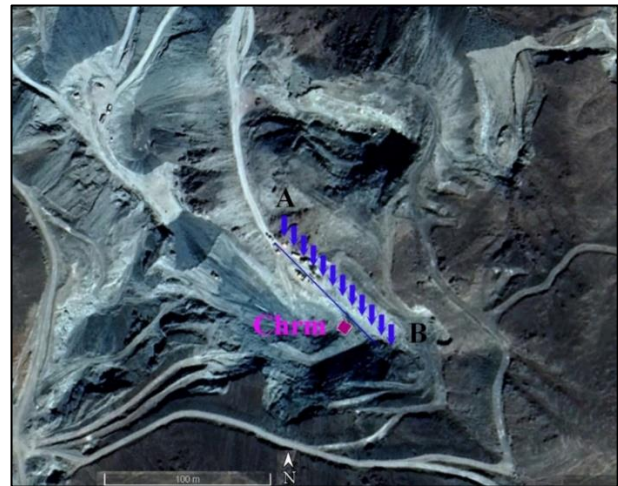


شکل ۱۳- شبه مقطع چگالی جریان، مقطع مقاومت ویژه الکتریکی و مقطع پارامتر حساسیت، در معدن ۸، پله یک. فاصله ایستگاه‌های برداشت شده VLF-EM برابر با ۳ متر و فاصله الکترودی مقاومت ویژه الکتریکی ۲/۳ متر است. فرکانس برداشت VLF-EM برابر با ۲۹/۶ کیلوهرتز است. محدوده قرمز رنگ در مقطع VLF-EM با موقعیت گسل و کرومیت منطبق است. موقعیت کرومیت در مقطع مقاومت ویژه الکتریکی با چهارگوش مشکی و با نماد Chrm و گمانه اکتشافی حفاری شده با نماد BH نمایش داده شده است.

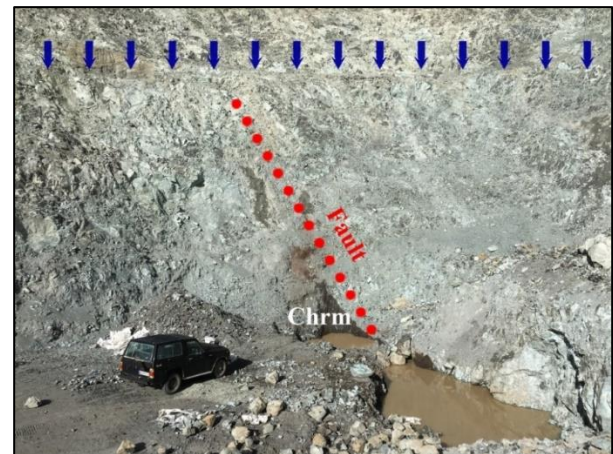
ب- تفسیر مقاطع VLF-EM و مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی در معدن ۸

همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود در سمت راست مقطع چگالی جریان (مقطع A)، یک ناهنجاری قابل توجه، در

ضخامت حدود ۲/۵ تا ۱ متر، در دیواره پله ۱، با شیب زیاد (حدود ۸۰ درجه) و با راستای عمود بر نیمرخ، تا نقطه‌ای نامعلوم (اکتشاف نشده) ادامه دارد. ضخامت کرومیت در پله کف، به حدود ۴ متر می‌رسد. کرومیت در این منطقه در زمینه‌ای از پریدوتیت‌های سرپانتینی شده (حدود ۸۰ درصد سرپانتین) قرار دارد.



شکل ۱۱- پلان نیمرخ VLF-EM و مقاومت ویژه الکتریکی در معدن ۸، پله یک. پیکان‌های آبی رنگ، مسیر برداشت VLF-EM و مقاومت ویژه را در معدن ۸ نشان می‌دهد (خط AB). کرومیت با چهارگوش قرمز با نماد Chrm نشان داده شده است. مقیاس در پایین تصویر، یکصد متر را نشان می‌دهد. تصویر از گوگل ارث

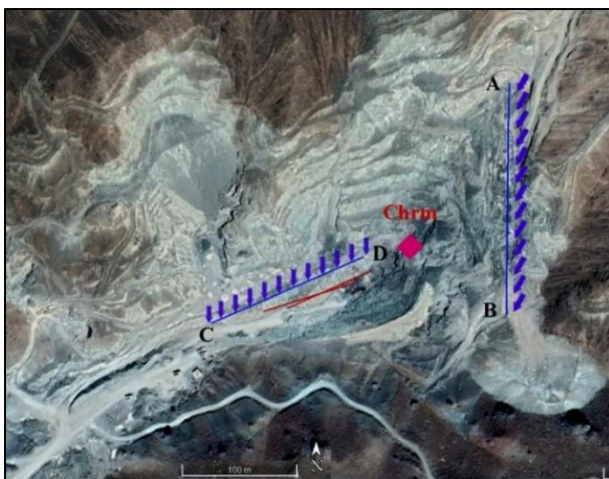


شکل ۱۲- نمایی از وضعیت کرومیت در معدن ۸، در پله کف و دیواره پله یک. پیکان‌های آبی رنگ، نشان‌دهنده مسیر برداشت VLF-EM و مقاومت ویژه الکتریکی بروی پله ۱ است (مسیر AB در شکل ۱۱). دایره‌های قرمز رنگ نشان‌دهنده مسیر گسل است. به پراکندگی آب و رطوبت در اطراف گسل توجه شود. در مرکز شکل، نماد Chrm نشان‌دهنده کرومیت (به رنگ قهوه‌ای) است. در سمت راست شکل، امتداد استخراج کرومیت که با آب‌های سطحی پُر شده، مشخص است.

ناهنجاری، در نقطه مورد نظر، حفاری اکتشافی انجام و نمونه‌های آن مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نمونه با ذره‌بین دستی، نشان داد که در منطقه حفاری شده کرومیت قابل توجهی وجود ندارد. برای تفسیر مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی و تحلیل عدم قطعیت نتایج، می‌توان از نقشه مقاطع حساسیت به خوبی بهره جست. ناهنجاری نامبرده در مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی را می‌توان در متر ۴۵ نقشه مقطع حساسیت نیز مشاهده کرد. با توجه به اینکه محدوده مورد نظر در نقشه مقطع حساسیت، نسبت به اطراف، حساسیت کمتری دارد، می‌توان نتیجه گرفت که ناهنجاری مشاهده شده در مقطع مقاومت‌ویژه، معنی واقعی نداشته بلکه در اثر چگونگی پراکندگی پارامتر حساسیت در مواد زیر سطحی بوجود آمده باشد. تجربه حفاری در معدن ۸ نشان می‌دهد که می‌توان برای تفسیر صحیح‌تر نقشه‌های مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی از نقشه مقطع حساسیت بخوبی بهره جست.

۳-۳-۳- مطالعه به روش‌های توپوگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی و الکترومغناطیس فرکانس بسیار پایین در معدن ۱۲ شرقی

در معدن ۱۲ شرقی، در پله ۷ و پله کف، نیمرخ‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و VLF-EM در جهت و ترازهای مختلف طراحی و داده‌ها در امتداد آن برداشت شد (شکل ۱۵ و ۱۶).



شکل ۱۵- مسیر نیمرخ VLF-EM و مقاومت‌ویژه الکتریکی در معدن ۱۲ شرقی. مسیر نیمرخ VLF-EM در پله ۷ (AB) و پله کف (CD) با پیکان‌های آبی رنگ مشخص شده است. دو خط قرمز رنگ، مسیر نیمرخ مقاومت‌ویژه الکتریکی را نشان می‌دهد. کرومیت با چهارگوش قرمز با نماد Chrm نشان داده شده است. مقیاس در پایین تصویر، یکصد متر را نشان می‌دهد.

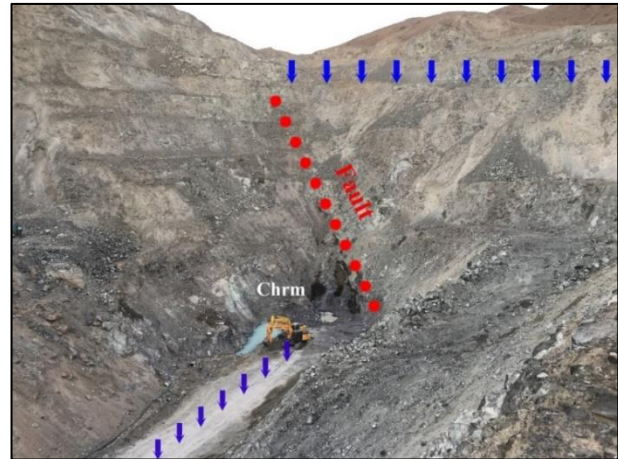
متر ۷۸ مقطع (از چپ به راست)، به رنگ قرمز با چگالی جریانی در حدود ۸ تا ۱۰ درصد مشاهده می‌شود. این محدوده با گسل مجاور کرومیت منطبق است. با توجه به اینکه روش VLF-EM ساختارهایی با شرایط الف) مقاومت‌ویژه الکتریکی کم، ب) طول زیاد و پ) شیب زیاد را به خوبی تشخیص می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که ناهنجاری مشاهده شده در مقاطع نامبرده در اثر گسل مجاور با کرومیت شکل گرفته باشد. آب موجود در گسل باعث شده که مقاومت‌ویژه الکتریکی در صفحه گسل کمتر از محیط اطراف بوده و از این رو در مقطع VLF-EM به شکل نمایش داده شده (شکل ۱۳) مشاهده و قابل شناسایی باشد.



شکل ۱۴ - حفاری اکتشافی در معدن ۸، بروی پله یک. در این معدن، حفاری اکتشافی در سه نقطه، هر کدام به عمق ۱۵ متر، برای اطلاع از ماهیت ناهنجاری مشاهده شده در اطراف متر ۴۵ مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی انجام شد. پیکان قرمز در سمت چپ شکل، نمونه‌های یودری گرفته شده در هر ۳ متر از عمق را نشان می‌دهد. ارتفاع دکل دستگاه حفاری ۶ متر است.

در این شکل، دو مقطع B1 و B2 به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی مواد زیر سطحی و مقطع پارامتر حساسیت است. همانطور که در سمت راست مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی دیده می‌شود در متر ۸۳ و در محدوده کرومیت، مقاومت‌ویژه نسبت به اطراف بیشتر است (حدود ۸۰۰ اهم‌متر) که با توجه به وجود کرومیت، می‌توان ناهنجاری فوق را به وجود کرومیت نسبت داد. در سمت چپ مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی و در حدود ۴۱ متری، ناهنجاری دیگری با مقاومت‌ویژه بالاتر نسبت به اطراف مشاهده می‌شود (حدود ۹۰۰ اهم‌متر). از آنجا که در سطح، آثاری از کرومیت در این محدوده مشاهده نشد برای پی‌بردن به ماهیت این

صحرایی مشخص شده که دو ناحیه نامبرده در محدوده درزه‌ها و گسل‌های حاوی آب قرار دارند. از آنجا که فصل برداشت داده‌ها در اردیبهشت و در زمان بارش‌های فصلی بوده است، مشاهده آب و مسیر رطوبت در سطح زمین به خوبی امکان‌پذیر بود. در مقاطع VLF-EM انطباق خوب درزه‌ها با شکستگی‌های حاوی آب، نشان می‌دهد که برای پیدا کردن زون‌های گسلی می‌توان از روش VLF-EM استفاده کرد. بدین ترتیب با شناسایی گسل‌هایی پوشیده، می‌توان به اکتشاف کرومیت کمک کرد. در صورتی که گسل‌های نامبرده حاوی کرومیت باشند، می‌توان با حفر گمانه‌های اکتشافی، موقعیت کرومیت‌های اصلی را در اطراف آن شناسایی کرد.

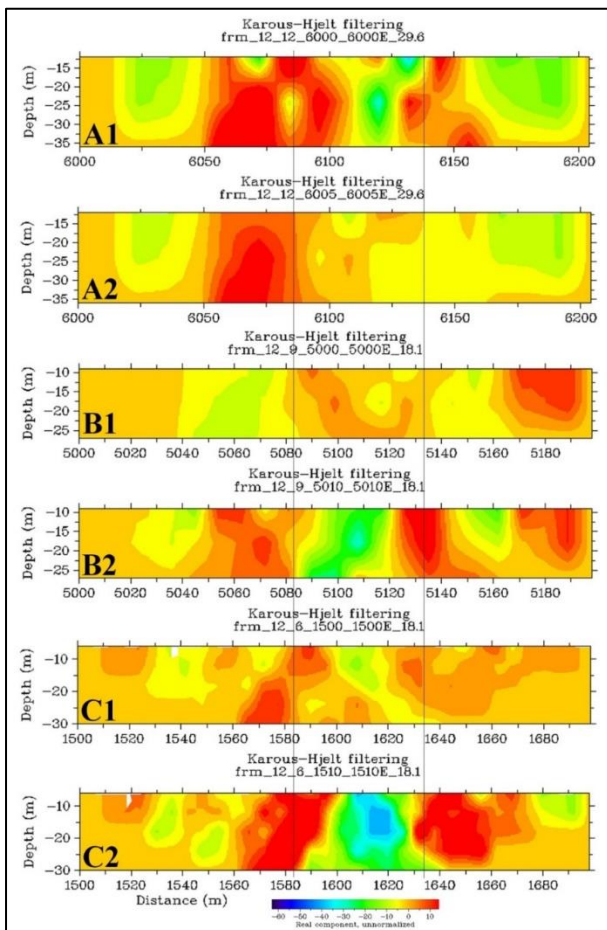


شکل ۱۶- نمایی از وضعیت نیمرخ‌های طراحی شده در معدن ۱۲ شرقی. پیکان‌های آبی رنگ در بالای شکل نشان‌دهنده مسیر برداشت VLF-EM در پله ۷ (مسیر AB در شکل ۱۵) و پیکان‌های آبی رنگ در پایین شکل نشان‌دهنده مسیر برداشت VLF-EM در پله کف (مسیر CD در شکل ۱۵) است. دایره‌های قرمز رنگ نشان‌دهنده مسیر گسل است. به پراکندگی آب و خیسی در اطراف گسل توجه شود. نماد Chrm نشان‌دهنده کرومیت به رنگ قهوه‌ای در مرکز شکل است.

الف- مطالعه در معدن ۱۲ شرقی، پله ۷

به عنوان یک قانون کلی می‌توان گفت که با توجه به شرایط زمین‌شناسی و گسلی بودن منطقه مورد مطالعه، بسیاری از پیکره‌های کرومیت‌های اولیه (برجا) با گسل‌ها از موقعیت اول جابه‌جا شده و به موقعیت‌های دیگری انتقال یافته است؛ بنابراین در بسیاری از نقاط، کرومیت در داخل پهنه‌های گسلی، پراکنده است. در این منطقه، یکی از روش‌های سنتی اکتشاف کرومیت بر همین پایه استوار بوده است؛ بدین صورت که با مشاهده کرومیت در زون‌های گسلی در سطح زمین، اقدام به حفاری زون گسلی و دنبال کردن کرومیت تا اعماق نموده‌اند. بنابراین در صورت وجود شرایط مناسب، می‌توان برای اکتشاف کرومیت، از روش VLF-EM برای آشکارسازی زون‌های گسلی استفاده کرد.

به دلیل وجود پرتگاه و نبود سطح کافی و عدم امکان طراحی نیمرخ‌ها بروی پله‌های دیگر، مطالعه VLF-EM ابتدا بر روی پله ۷ انجام شد. برای شناسایی گسل‌های احتمالی در پله ۷ معدن ۱۲ شرقی با توجه به اهمیت زیاد این معدن، شش نیمرخ VLF-EM با فواصل ایستگاهی ۶، ۹ و ۱۲ متر و به طول ۲۰۶ متر برداشت شد (شکل ۱۷). همانطور که در شکل مشاهده می‌شود دو ناهنجاری مهم به رنگ قرمز در اطراف متر ۸۲ و ۱۳۵ (از چپ به راست) مشاهده می‌شود. در بررسی



شکل ۱۷- شبه مقاطع چگالی جریان در معدن ۱۲ شرقی، پله هفت. در دو مقطع A1 و A2، فاصله ایستگاه‌های برداشت ۱۲ متر و فرکانس برداشت ۲۹٫۶ کیلوهرتز است. در دو مقطع B1 و B2، فاصله ایستگاه‌های برداشت ۹ متر و فرکانس برداشت ۱۸٫۱ کیلوهرتز است. در دو مقطع C1 و C2، فاصله ایستگاه‌های برداشت ۶ متر و فرکانس برداشت ۱۸٫۱ کیلوهرتز است. موقعیت ناپیوستگی‌های حاوی آب (درزه و گسل)، با دو خط عمودی مشکی، بر روی شکل مشخص شده است و با محدوده‌های چگالی جریان بالاتر (قرمز رنگ)، انطباق خوبی نشان می‌دهد.

مقطع B1 مربوط به مقاومت‌ویژه الکتریکی نیمرخ شرقی و تصویر C1، مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی نیمرخ غربی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود مقطع شرقی طوری طراحی شد که طول بیشتری از کرومیت را نسبت به غربی دربر می‌گیرد. در زیر هر یک از مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی، نقشه مقاطع حساسیت الکتریکی ترسیم شده است.

در مقطع غربی از ابتدای نیمرخ تا متر ۵۸ و در نیمرخ شرقی تا متر ۴۳، تا عمق حدود ۲/۵ تا ۳ متری با مقاومت‌ویژه بالا و حداکثر به رنگ قرمز و با مقاومت حدود $3000 \Omega m$ مشاهده می‌شود. چنین مقاومت‌ویژه بالایی با توجه به شناختی که از توپوگرافی محدوده وجود دارد، به احتمال قوی در اثر نزدیکی دیواره پله اول به نیمرخ است (حدود ۳ متر فاصله). در مقطع غربی از متر ۸۰ تا آخر، وجود کرومیت به عمق حدود ۳ متر با منطقه‌ای به رنگ سبز تا زرد و با مقاومت‌ویژه حدود ۴۰۰ اهم‌متر مشخص است. در مقطع شرقی از متر ۶۵ تا آخر، وجود کرومیت به عمق حدود ۴ متر با منطقه‌ای به رنگ زرد (مقاومت‌ویژه الکتریکی حدود ۵۰۰ اهم‌متر) مشخص است. به نظر می‌رسد آب و رطوبتی که در انتهای معدن از مسیر گسل به پله کف نفوذ کرده تا حدودی از مقاومت‌ویژه الکتریکی واقعی کرومیت کاسته است.

در مقطع غربی و شرقی به ترتیب از متر ۶۴ و ۵۰ به طول حدود ۱۰ و ۱۲ متر، منطقه‌ای با مقاومت‌ویژه بالاتر و به رنگ زرد (مقاومت‌ویژه حدود ۴۰۰ تا ۵۰۰ اهم‌متر) مشخص است. در این محدوده، عرض پله کف تا حدودی بیشتر می‌شود و بنابراین تا حدودی از تاثیر دیواره بر داده‌ها، کاسته شده است.

پ- تفسیر مقاطع VLF-EM و مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی در معدن ۱۲ شرقی، پله کف

در مقطع چگالی جریان مربوط به پله کف از معدن ۱۲ شرقی، یک ناهنجاری به رنگ قهوه‌ای در متر ۸۶ متری مشاهده می‌شود. در بررسی صحرایی مشخص شده که ناحیه نامبرده در محدوده گسل قرار دارد. ناهنجاری دیگری به رنگ قهوه‌ای در متر ۴۶ متری مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه گسلی در این محدوده مشاهده نشد، این ناهنجاری، به احتمال، مربوط به درزه‌های بزرگ است.

برای تفسیر مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی در این معدن، می‌توان همانند آنچه در مورد معدن ۸ توصیف شد، از نقشه

از آنجا که منطقه مورد مطالعه کوهستانی و پرشیب بوده و به علاوه در بعضی مناطق، حفاری‌های معدنی بزرگ و عمیق متعددی در آن انجام شده است، استفاده از آرایه‌های با طول زیاد، به دلیل نامناسب بودن توپوگرافی برای نیمرخ‌های طولانی، با امکانات موجود، از نظر اجرایی ممکن نیست. در این پله به دلیل اختلاف ارتفاع زیاد با کرومیت (حدود ۶۰ متر) و عدم امکان استفاده از نیمرخ‌هایی با طول زیاد، برداشت مقاومت‌ویژه الکتریکی برای بررسی پاسخ کرومیت به این روش، انجام نشد.

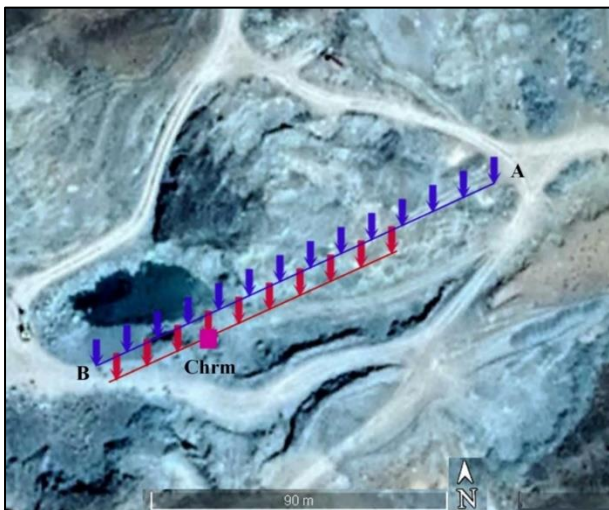
ب- مطالعه در معدن ۱۲ شرقی، پله کف

با توجه به آشکار بودن ذخیره کرومیت در پله کف این معدن و امکان استفاده از این شرایط، برای مشاهده پاسخ کرومیت به دو روش نامبرده، دو نیمرخ مقاومت‌ویژه الکتریکی و یک نیمرخ VLF-EM در پله کف، طراحی و داده‌ها در امتداد آن برداشت شد (شکل ۱۵ و ۱۶). کرومیت در زمان داده‌برداری، از پایین‌ترین تراز، در پله کف و از دیواره پله اول به کمک ماشین‌آلات در حال استخراج است. در شکل ۱۸، محدوده‌هایی که با علامت چهارگوش مشکی و نماد Chrm بر روی دو مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی علامتگذاری شده، محدوده گسترش کرومیت را در پله کف، نشان می‌دهد. مقطع A از شکل ۱۸، نشان‌دهنده نقشه چگالی جریان و دو مقطع B1 و C1 نشان‌دهنده مقاومت‌ویژه الکتریکی مواد زیر سطحی است. دو مقطع B2 و C2 نقشه‌های الگوی حساسیت، به ترتیب برای مقاطع B1 و C1 است.

برای شناسایی گسل‌های احتمالی در پله کف، یک نیمرخ VLF-EM با فواصل ایستگاهی ۳ متر و به طول ۱۶۵ متر برداشت شد. همانطور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود یک ناهنجاری به رنگ قهوه‌ای در متر ۸۶ متری (از چپ به راست) مشاهده می‌شود. در بررسی صحرایی مشخص شده که ناحیه نامبرده در محدوده گسل قرار دارد. ناهنجاری دیگری به رنگ قهوه‌ای در متر ۴۶ متری مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه گسلی در این محدوده مشاهده نشد، این ناهنجاری احتمالاً مربوط به درزه‌های بزرگ است.

دو نیمرخ مقاومت‌ویژه بنام‌های نیمرخ غربی و نیمرخ شرقی در کف معدن، هر کدام به طول ۹۴ متر و با زاویه‌ای در حدود ۲۰ درجه نسبت به امتداد کرومیت، مشخص و داده‌برداری با آرایه ونر و با فاصله الکترودی ۲ متر انجام شد. در شکل ۱۸

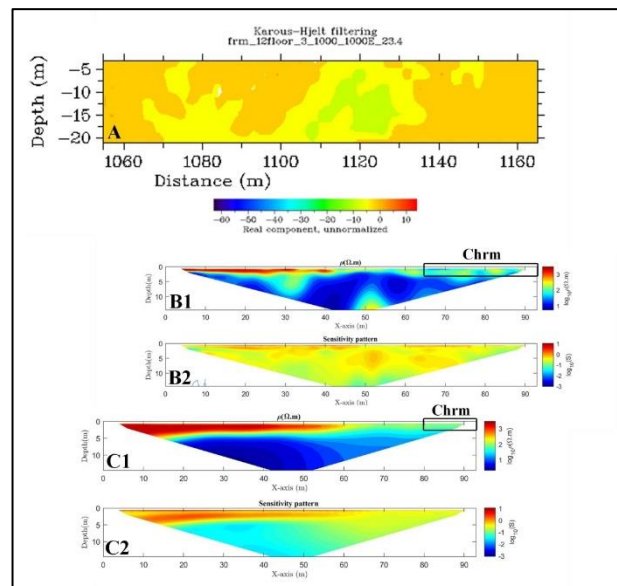
مقاومت ویژه الکتریکی در پله کف انجام شد. وجود کرومیت کم عیار (عیار حدود ۲۰ درصد Cr_2O_3) در فاصله ۶۴ تا ۷۸ متری نیمرخ و از عمق ۷ تا ۱۸ متری، قبلا با حفاری اکتشافی به اثبات رسیده است. کرومیت کم عیار با بافت نواری، با شیب حدود ۴۰ تا ۷۰ درجه و با امتدادی تقریبا به موازات نیمرخها، در عمق نامبرده، وجود دارد. کرومیت در این منطقه در زمینه‌ای از پریدوتیت‌های سرپانتینی شده (حدود ۸۰ درصد سرپانتین) وجود دارد. نیمرخ الکترومغناطیسی VLF-EM و نیمرخ مقاومت ویژه الکتریکی، به ترتیب به طول ۱۴۰ و ۹۴ متر و با امتداد شمال شرقی- جنوب غربی طراحی و برداشت داده‌ها انجام شد (شکل ۱۹). مطالعه VLF-EM با فاصله ایستگاهی ۳ متر و با فرکانس ۲۱٫۷ کیلوهرتز و مطالعه مقاومت ویژه با فاصله الکترودی ۲٫۰ متر و با آرایه و نر انجام شد.



شکل ۱۹- پلان مسیر نیمرخ VLF-EM و مقاومت ویژه الکتریکی در معدن ۱۳، پله کف. پیکان‌های آبی رنگ، مسیر نیمرخ VLF-EM (مسیر AB) و پیکان‌های قرمز رنگ مسیر مقاومت ویژه الکتریکی را نشان می‌دهد. کرومیت با چهارگوش قرمز و با نماد Chrm نشان داده شده است. مقیاس در پایین تصویر، ۹۰ متر را نشان می‌دهد.

در شکل ۲۰، مقاطع A، B1 و B2 به ترتیب، نشان‌دهنده شبه مقطع چگالی جریان، مقاومت ویژه الکتریکی و نقشه حساسیت مواد زیر سطحی است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود در مقطع چگالی جریان، دو ناهنجاری یکی در سمت چپ، در متر ۲۱ (از چپ بر راست)، به رنگ نارنجی تا قرمز با چگالی جریانی در حدود ۸ تا ۱۰ درصد و دیگری در سمت راست مقطع، در متر ۸۸، به رنگ نارنجی تا قرمز با چگالی جریانی در حدود ۸ تا ۱۰ درصد مشاهده می‌شود. دو ناهنجاری مشاهده شده در مقاطع نامبرده در اثر درزه‌های آبدار

مقاطع حساسیت بهره جست. در شکل ۱۸، دو ناهنجاری در متر ۳۲ و ۵۲ از مقطع B1 مشاهده می‌شود. می‌توان این دو ناهنجاری را در متر ۳۲ و ۵۲ نقشه مقطع حساسیت نیز مشاهده کرد. با توجه به اینکه محدوده‌های مورد نظر در نقشه مقطع حساسیت، نسبت به اطراف، دارای حساسیت کمتری‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که ناهنجاری مشاهده شده در مقطع مقاومت ویژه، معنی واقعی نداشته بلکه در اثر چگونگی پراکندگی تابع حساسیت، در مواد زیر سطحی به وجود آمده است. در سمت چپ هر دو مقطع مقاومت ویژه الکتریکی، تراز سرپانتینیت (برنگ آبی)، در سطح پایین تری نسبت به سمت راست مقطع (محدوده کرومیت) قرار دارد که می‌تواند نشانه‌ای از وجود کرومیت در محدوده‌های شناخته شده این کانه باشد.



شکل ۱۸- مقطع چگالی جریان، مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی و مقطع حساسیت در معدن ۱۳ شرقی، پله کف. فاصله ایستگاه‌های برداشت چگالی جریان ۳ متر و فاصله الکترودی برداشت مقاومت ویژه الکتریکی ۲ متر می‌باشد. فرکانس برداشت چگالی جریان ۲۳/۴ می‌باشد. مقطع A نشان دهنده چگالی جریان، مقطع B1 نشان دهنده مقاومت ویژه الکتریکی پروفیل شرقی، مقطع B2 نشان دهنده نقشه حساسیت پروفیل شرقی، مقطع C1 نشان دهنده مقاومت ویژه الکتریکی پروفیل غربی و مقطع C2 نشان دهنده نقشه حساسیت پروفیل غربی می‌باشد. چهارگوش‌های مشکی در مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی، با نماد Chrm، موقعیت کرومیت را نشان می‌دهد.

۳-۳-۴- مطالعه به روش‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و VLF-EM در معدن ۱۳

در معدن ۱۳ اندازه‌گیری‌ها به روش VLF-EM و

دیگری در سمت راست مقطع، در متر ۸۸، به رنگ نارنجی تا قرمز با چگالی جریان در حدود ۸ تا ۱۰ درصد مشاهده می‌شود. دو ناهنجاری مشاهده شده در مقاطع نامبرده در اثر درزه‌های حاوی آب موجود در محدوده مورد مطالعه، ایجاد شده است.

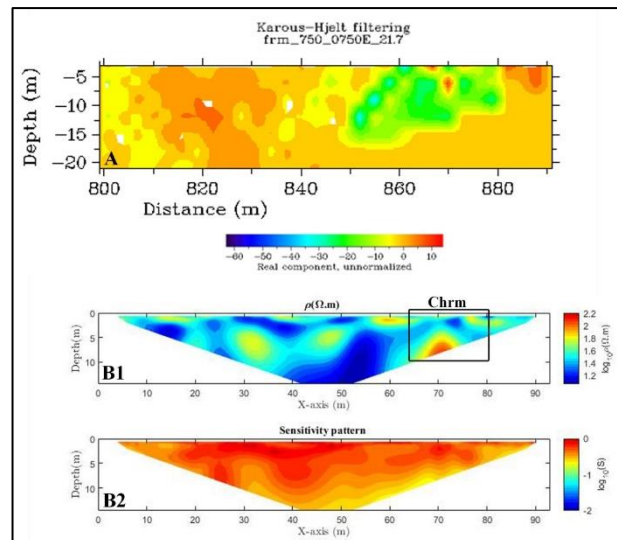
در سمت راست مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی و در متر ۶۵ و در محدوده کرومیت اکتشاف شده، مقاومت‌ویژه الکتریکی نسبت به اطراف بیشتر است که با توجه به وجود کرومیت اکتشاف شده، می‌توان ناهنجاری فوق را به وجود کرومیت نسبت داد. در سطح زمین و در متر ۱۵، ۴۰ و ۶۰ با توجه به شناختی که نسبت به توپوگرافی محدوده مورد نظر وجود دارد، وجود مناطقی با مقاومت‌ویژه بالاتر نسبت به اطراف، به احتمال قوی، در اثر تاثیر دیواره‌ها بر داده‌های برداشت شده است. پایین بودن مقادیر مقاومت‌ویژه در این معدن را می‌توان به بالا بودن سطح آب‌های زیرزمینی نسبت داد (۳ تا ۴ متر از سطح زمین).

۳-۳-۵- مطالعه به روش VLF-EM در معدن ۲۰

در معدن ۲۰، به دلیل اختلاف نسبتاً زیاد ارتفاع پله اول با کرومیت (حدود ۲۵ متر) و به دلیل محدود بودن امکانات دستگاهی موجود و حاکم بودن شرایط کوهستانی و عدم امکان استقرار نیمرخ مقاومت‌ویژه الکتریکی با طول زیاد، برداشت مقاومت‌ویژه برای بررسی کانسار کرومیت با این روش، انجام نشد.

مطالعه VLF-EM در پله اول این معدن انجام شد. از نظر ساختار زمین‌شناسی، این معدن در «آمیزه تکتونیکی» قرار دارد. کرومیت در این نوع ساختار، عموماً از نوع گسلی بوده و در صفحه گسل پراکنده است (شکل ۲۱ و ۲۲). اکتشاف کرومیت در این معدن به روش سنتی با کوهگردی و پیدا کردن رگه معدنی و سپس دنبال کردن رگه معدنی از سطح به عمق، انجام شده است. برای مشخص شدن پاسخ زون گسلی به برداشت VLF-EM یک نیمرخ با فواصل ایستگاهی ۳ متر، فرکانس ۲۹٫۶ کیلوهرتز و به طول ۸۶ متر داده برداری شد (شکل ۲۱). همانطور که در مقطع شکل ۲۳ مشاهده می‌شود یک ناهنجاری مهم، به رنگ قرمز در متر ۲۵ تا ۳۵ (از چپ به راست) مشاهده می‌شود. ناحیه قرمز رنگ در محدوده زون گسلی حاوی کرومیت قرار دارد.

موجود در محدوده مورد مطالعه، ایجاد شده است. آب موجود در درزه‌ها باعث شده که مقاومت‌ویژه الکتریکی در صفحه درزه‌ها، کمتر از محیط اطراف بوده و به همین دلیل با روش VLF-EM به شکل ناهنجاری‌های قهوه‌ای رنگ، مشاهده می‌شود.



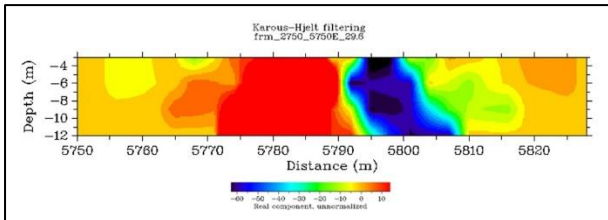
شکل ۲۰- شبه مقطع چگالی جریان و مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی و مقطع پارامتر حساسیت در معدن ۱۳، پله کف. فاصله ایستگاه‌های برداشت چگالی جریان ۳ متر و فاصله الکترودی مقاومت‌ویژه الکتریکی ۲ متر است. فرکانس برداشت چگالی جریان ۲۱٫۷ کیلوهرتز است. مقطع A نشان‌دهنده چگالی جریان، مقطع B1 نشان‌دهنده مقاومت‌ویژه الکتریکی و مقطع B2 نشان‌دهنده نقشه حساسیت است. چهارگوش مشکی در مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی، با نماد ChrM، موقعیت کرومیت اکتشاف شده را نشان می‌دهد.

در سمت راست مقطع مقاومت‌ویژه الکتریکی و در متر ۶۵ و در محدوده کرومیت اکتشاف شده، مقاومت‌ویژه الکتریکی نسبت به اطراف بیشتر است که با توجه به وجود کرومیت اکتشاف شده، می‌توان ناهنجاری فوق را به وجود کرومیت نسبت داد. در سطح زمین و در متر ۱۵، ۴۰ و ۶۰ (از چپ)، همانطور که قبلاً در مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی معدن ۱۲ شرقی نیز مشاهده شد، وجود مناطقی با مقاومت‌ویژه بالاتر نسبت به اطراف، به احتمال قوی، در اثر تاثیر دیواره پله‌های معدن بر داده‌ها باشد.

الف- تفسیر شبه‌مقطع VLF-EM و مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی و پارامتر حساسیت در معدن ۱۳، پله کف

در مقطع چگالی جریان، دو ناهنجاری یکی در سمت چپ، در متر ۲۱ (از چپ به راست)، به رنگ نارنجی تا قرمز و

می‌شود یک ناهنجاری مهم، به رنگ قرمز در مترها ۲۵ تا ۳۵ (از چپ به راست) مشاهده می‌شود. ناهنجاری قرمز رنگ، در محدوده زون گسلی حاوی کرومیت قرار دارد و از این‌رو، این مشاهده، توانایی شناسایی زون‌های گسلی حاوی ذخایر کرومیت را با روش VLF-EM، تایید می‌کند.

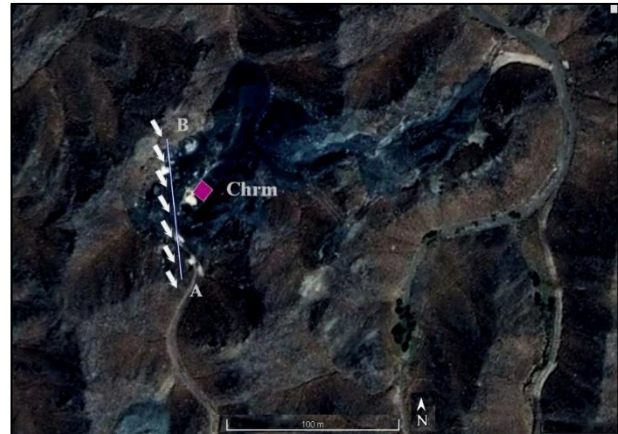


شکل ۲۳- شبه مقطع چگالی جریان در معدن ۲۰، پله یک. فاصله ایستگاه‌های برداشت ۳ متر و فرکانس برداشت ۲۹/۶ کیلوهرتز است. در این شکل، پهنه گسل حاوی کرومیت، در محدوده قرمز رنگ قرار دارد.

۴- بحث

مطالعات انجام شده در کشورهای مختلف نشان داده است که اکتشاف کانسنگ کرومیت به دلیل ویژگی‌های زمین‌شناسی، چالش برانگیز بوده و عموماً پاسخ ژئوفیزیکی نسبتاً ضعیفی ایجاد می‌کند [۳]. از این‌رو اکتشاف ژئوفیزیکی کرومیت در مقایسه با بسیاری از دیگر ذخایر معدنی قطعیت و موفقیت کمتری داشته است. در ایران، ذخایر معدنی کرومیت در افیولیت‌ها وجود دارد (شکل ۱). در این تحقیق دو روش ژئوفیزیکی ERT و VLF-EM در غرب افیولیت سبزوار برای اکتشاف کانسنگ کرومیت به کار گرفته شد تا ضمن بررسی میزان کارایی این دو روش، ویژگی‌های ژئوفیزیکی این کانسنگ در منطقه مورد مطالعه با ویژگی‌های نهشته‌های مشابه در کشورهای دیگر مقایسه شود؛ بنابراین به طور گذرا به برخی از مطالعات انجام شده در کشورهای دیگر اشاره شده است.

در یک تحقیق، در جنوب کشور تبت با استفاده از روش‌های گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی و الکتریکی به اکتشاف کرومیت اقدام شده است. در این مطالعه، روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی اطلاعات مورد نیاز برای محدود کردن دامنه جستجو را بدست داده‌اند. در حالی که روش توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی همراه با روش قطبش القایی، امکان یافتن محل نهشته‌های کرومیت را ممکن ساخته است [۱۹]. در این تحقیق، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان داده که کرومیت و سنگ میزبان دارای مقاومت‌ویژه الکتریکی و قطبش‌های القایی مختلفی است و در نتیجه نواحی با



شکل ۲۱- مسیر نیمرخ VLF-EM در معدن ۲۰، پله یک. پیکان‌های سفید رنگ، مسیر برداشت VLF-EM را در این معدن نشان می‌دهد (مسیر AB). موقعیت کرومیت با چهارگوش قرمز با نماد Chrm، نشان داده شده است. مقیاس در پایین تصویر، یکصد متر را نشان می‌دهد (تصویر از گوگل ارث).



شکل ۲۲- نمایی از توده کرومیتیت در حال حفاری در معدن ۲۰، پله یک. پیکان‌های آبی نشان‌دهنده مسیر برداشت VLF-EM در پله ۱ است (مسیر AB در شکل ۲۱). دایره‌های قرمز رنگ نشان‌دهنده مسیر پهنه گسلی است. نماد Chrm نشان‌دهنده کانسار کرومیت است. در مرکز شکل، محل استخراج کرومیت که با آب‌های سطحی پُر شده، مشاهده می‌شود.

الف- تفسیر مقاطع VLF-EM در معدن ۲۰، پله ۱

از نظر ساختاری، کرومیت این معدن در پهنه گسلی قرار گرفته است. همان‌طور که در شبه مقطع شکل ۲۳ مشاهده

انجام شده است [۲۱]. علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی، اندازه‌گیری‌های صحرایی در سه کانسار کرومیت با روش‌های مختلف ژئوفیزیکی برای تعیین روش‌های تشخیصی احتمالی انجام شده است. در این تحقیق، کانسار کرومیت خودپذیری مغناطیسی کم و چگالی بالایی نشان داده است. مطالعه لرزه‌ای نشان داده که کرومیتیت با بافت توده‌ای، افزایش سرعت قابل توجهی نسبت به پریدوتیت اطراف، حداقل در مورد امواج S_v نشان داده که ممکن است در اکتشاف کرومیت در اعماق متوسط، قابل استفاده باشد. روش‌های الکتریکی، مقاومت‌ویژه الکتریکی بالا و اثرات پلاریزاسیون القایی متوسط را برای کانسار کرومیت توده‌ای در مقیاس صحرایی نشان داده در حالی که کانی کرومیت در آزمایشگاه عملاً بدون قطبش بوده است. در این تحقیق، طیف‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی مختلط، هم در مقیاس آزمایشگاهی و هم صحرایی، شکل مشخصی را نشان داده است که به نظر می‌رسد مشخصه کرومیت باشد. این اثر ممکن است به وسیله کانی‌های همراه با کرومیت ایجاد شده و نیاز به مطالعه بیشتر در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی داشته باشد. در این مطالعه، سنگ‌های سرپانتینیتی پیچیدگی‌هایی ایجاد کرده (از جمله تغییرات قوی و نامنظم در خودپذیری مغناطیسی، چگالی و قطبیدگی) که در برخی موارد، عاملی برای از بین بردن هرگونه علامت تشخیصی برای کرومیت بوده است.

محققان در مطالعه پنج کمپلکس افیولیتی در ایران به وسیله «آنالیز فرای» و از جمله افیولیت سبزوار، نتیجه گرفته‌اند که امتداد ذخایر کرومیت در این کمپلکس‌ها عموماً با امتداد گسل‌های منطقه، همخوانی دارد [۵].

از مطالعات انجام شده در کشورهای تبت، عمان و ترکیه می‌توان دریافت که کانسنگ کرومیت در مقایسه با سنگ‌های دربرگیرنده، از نظر مقاومت‌ویژه الکتریکی کمتر بوده است اما مطالعه این کانسنگ در کشور آمریکا، مقاومت بیشتری را نسبت به سنگ‌های اطراف نشان داده است. علاوه بر مقاومت‌ویژه، مطالعه پلاریزاسیون القایی بر روی کانسنگ کرومیت در کشورهای آلبانی، تبت، یوگسلاوی، ترکیه و آمریکا انجام شده است. مطالعه در کشور تبت نشان داد که مناطقی با شارژ کم، ممکن است حاوی کانسنگ کرومیت باشد؛ اما مطالعات مشابه در افیولیت جوزفاین، پلاریزاسیون القایی متوسط را برای کانسار کرومیت نشان داده است. در این مطالعه

مقاومت‌ویژه کم و قابلیت شارژ کم، ممکن است حاوی کرومیت باشد. سپس برداشت ژئوفیزیکی انجام و در نهایت مکانی‌هایی با مقاومت‌ویژه الکتریکی و پاسخ IP پایین برای حفاری پیشنهاد شده است و نتایج حفاری ثابت کرده که این روش نتایج خوبی دربر داشته است.

در تحقیق دیگری در کشور عمان [۲]، روش‌های ژئوفیزیکی در افیولیت سیمایل برای بررسی امکان وجود کانسار کرومیت به کار گرفته شده است. از آنجا که کرومیت در این افیولیت در مقایسه با سنگ میزبان (هارزبورژیت و سرپانتینیت) چگال‌تر و رساناتر بوده و از نظر مغناطیسی «خودپذیری» کمتری داشته است، انتظار می‌رفته که کانسارهای کم‌عمق، سیگنال‌های گرانشی، مغناطیسی و مقاومت‌ویژه الکتریکی مطلوبی تولید کند. این مطالعه ژئوفیزیکی با استفاده از روش‌های گرانشی، مغناطیس‌سنجی و مقاومت‌ویژه الکتریکی، احتمال وجود کانسار کرومیت را پیش‌بینی کرده است. سپس برای تایید این پیش‌بینی، حفاری اکتشافی پیشنهاد و انجام شده و در نهایت حفاری‌ها وجود یک لایه کرومیتیت را تایید کرده است.

در کشور آلبانی برای اکتشاف کرومیت، روش‌های گرانشی، مغناطیس‌سنجی و الکتریکی (قطبش القایی) به کار گرفته شده است. بر اساس این مطالعات و تفسیر ژئوفیزیکی، نقاط حفاری پیشنهاد و حفاری انجام شده که منجر به کشف ذخایر بزرگ کانسار کرومیت شده است [۲۰].

در کشور یوگسلاوی سابق، روش‌های ژئوفیزیکی گرانشی، مغناطیس‌سنجی و الکتریکی (قطبش القایی) به کار گرفته شده که منجر به تشخیص ناهنجاری و شناسایی ذخایر کرومیت شده است [۲۰].

در یک تحقیق، در جنوب‌غربی کشور ترکیه، مطالعات به روش VLF-EM، قطبش القایی، گرانشی، مغناطیس‌سنجی و پتانسیل خودزا انجام شده است. در این تحقیق، غالب نتایج ژئوفیزیکی به کار رفته، مقادیر مقاومت‌ویژه کم (کمتر از Ωm) را در جهت شمال شرقی منطقه شناسایی کرده که این جهت با امتداد کانسارهای شناخته شده کرومیت در این منطقه یکسان بوده است [۴].

در کشور آمریکا، مطالعات آزمایشگاهی پتروفیزیکی بر روی سنگ‌های مجموعه اولترامافیک «جوزفاین» در شمال کالیفرنیا،

بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ویژگی‌های ژئوالکتریکی کانسنگ کرومیت، بسته به شرایط متنوع زمین‌شناسی، می‌تواند نسبت به سنگ‌های اطراف، متفاوت باشد و همین واقعیت موجب پیچیده‌تر بودن اکتشاف کرومیت با روش‌های ژئوفیزیکی نسبت به کانسارهای دیگر شده است.

علاوه بر پیچیدگی‌هایی که به طور ذاتی در اکتشاف کرومیت وجود دارد، در برخی موارد، شرایط توپوگرافی می‌تواند باعث محدودیت‌هایی در اجرای عملیات ژئوفیزیکی شود. حفاری‌های معدنی و ایجاد پله و پرتگاه در معادن در حال بهره‌برداری از مواردی است که برای روش‌های بالا محدودیت مکانی ایجاد می‌کند. کار با روش توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی در مناطق معدنی کوهستانی و پُرشیب، به علت عدم امکان استقرار آرایه‌هایی با طول زیاد، می‌تواند دارای محدودیت باشد. در روش مقاومت‌ویژه الکتریکی لازم است الکترودها به زمین تماس داشته باشد، بنابراین وجود خاکریز و دپوی باطله‌ها در اطراف و در داخل محدوده‌های معدن در حال بهره‌برداری از مواردی است که می‌تواند برای این روش محدودیت ایجاد کند. کاربرد روش VLF-EM نیز همانند روش مقاومت‌ویژه الکتریکی در مناطقی با توپوگرافی کوهستانی تُند، دارای محدودیت است و شکستگی‌ها و گسل‌های موازی با خط‌الراس ارتفاعات، در حال حاضر با امکانات موجود در این تحقیق با VLF-EM، قابل شناسایی نیست.

۵- نتیجه‌گیری

این تحقیق نشان داد که روش‌های VLF-EM و توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی، بطور بالقوه، توانایی اکتشاف کانسنگ کرومیت را دارد اما لازم است برای رسیدن به نتایج قطعی‌تر، روش‌های ژئوفیزیکی به صورت تکمیلی (گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی، ژئوالکتریک و نظایر آن) مورد استفاده قرار گیرد. در افیولیت‌ها با توجه به میزان تغییرات ثانویه، سنگ‌ها می‌تواند در هر منطقه دارای ویژگی‌های مغناطیسی و الکتریکی متفاوتی باشد از اینرو توجه به این عامل تاثیر بسزایی در موفقیت به کارگیری روش مقاومت‌ویژه الکتریکی و روش VLF-EM دارد و بهتر است به کارگیری روش‌های فوق با اطلاع از این شرایط انجام شود. در هر منطقه، اطلاع از ویژگی‌های ژئوفیزیکی کرومیتیت و سنگ‌های اطراف می‌تواند در تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی بسیار موثر باشد. می‌توان از روش VLF-EM برای شناسایی زون‌های گسلی و اکتشاف کرومیت‌های

تاکید شده است که سنگ‌های سرپانتینیتی پیچیدگی‌هایی را در مطالعه ایجاد کرده که در برخی موارد، عاملی برای از بین بردن هرگونه علامت برای تشخیص کرومیت بوده است. مطالعه VLF-EM در کشور ترکیه نشان داده که مقادیر مقاومت‌ویژه کم با امتداد کانسارهای شناخته شده کرومیت در منطقه مورد مطالعه، یکسان بوده است. مطالعه گسل‌ها در تعدادی از کمپلکس‌های افیولیتی در ایران انجام شده و نتایج نشان داده است که امتداد ذخایر کرومیت در این کمپلکس‌ها عموماً با امتداد گسل‌های منطقه، همخوانی دارد [۵]. تحقیق اخیر در واقع نشان می‌دهد که امکان مکان‌یابی کرومیت به روش VLF-EM به دلیل قرار گرفتن کانسنگ کرومیت در پهنه‌های گسلی با مقاومت ویژه کمتر است. در مقایسه با تحقیقات دیگر، تحقیق کنونی نشان می‌دهد که کانسنگ کرومیت در غرب افیولیت سبزوار، مقاومت‌ویژه بیشتری نسبت به سنگ‌های اطراف نشان می‌دهد.

در افیولیت‌ها با توجه به شدت فرآیندها و تغییرات ثانویه که عموماً پریدوتیت‌ها و سنگ‌های الترامفیک را تحت تاثیر قرار می‌دهد، کانی‌شناسی کرومیتیت و سنگ‌های اطراف می‌تواند در مناطق مختلف، متفاوت باشد (به ویژه مقدار کانی‌های مگنتیت، سرپانتین، عناصر خانواده پلاتین، عناصر خالص و سولفیدها و نظایر آن) و سنگ‌های مورد بررسی می‌تواند در هر منطقه دارای ویژگی‌های مغناطیسی و الکتریکی متفاوتی باشد از این رو این عامل تاثیر بسزایی در موفقیت به کارگیری روش مقاومت‌ویژه الکتریکی و روش VLF-EM دارد و بهتر است به کارگیری روش‌های فوق با اطلاع از این موضوع انجام شود. یکی از پارامترهای مهم تشخیص کانسارها با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، تفاوت پارامتر فیزیکی کانسار مورد بررسی، نسبت به محیط اطراف است. کرومیتیت‌ها دارای بافت‌های متفاوت از جمله افشان، نواری، گُروی و توده‌ای بوده و از درصدهای متفاوتی از کرومیت و سرپانتین تشکیل شده است و می‌تواند مقاومت‌ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی متفاوتی نسبت به سنگ‌های اطراف داشته باشد. در بخش مطالعات آزمایشگاهی مشاهده شد که اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه برای دو نمونه از کرومیتیت، نتایج بسیار متفاوتی بدست می‌دهد. بنابراین در هر منطقه، اطلاع از ویژگی‌های کرومیتیت و سنگ‌های اطراف مانند کانی‌شناسی و بافت، زمین‌شناسی، مقاومت‌ویژه الکتریکی، شارژپذیری، عمق ماده معدنی از سطح زمین و نظایر آن می‌تواند در تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی بسیار موثر باشد.

11. Roberts, S.; 1988; *Ophiolitic Chromitite Formation: A Marginal Basin Phenomenon?* Economic Geology, Vol. 83, pp. 1034-1036.
 12. Paterson, N. R.; and Ronka, V.; 1971; *Five years of surveying with the very low frequency electro magnetics method.* Geoexploration, 9, 1- 26.
 13. Kearey, P.; Brooks, M.; and Hill, I.; 2002; *An Introduction to Geophysical Exploration*, 3rd Edition; Wiley-Blackwell; 288 Pages.
 14. Vella, L.; and Emerson, D.; 2012; *Electrical Properties of Magnetite and Hematite-Rich Rocks and Ores*, ASEG Extended Abstracts, 1, 1-4, DOI: 10.1071/ASEG2012ab232.
 15. Stesky, R. M. and W. F. Brace; 1973; *Electrical conductivity of serpentized rocks to 6 kilobars*, J. Geophys. Res., 78, 7614-7621.
 16. Karous, M.; and Hjelt, S. E.; 1983; *Linear Filtering of VLF Dip-Angle Measurements*; Geophysical Prospecting 31,782-794.
 17. Fallahsafari, M.; Ghanati, R.; 2022; *DC Electrical Resistance Tomography Inversion*; Journal of the Earth and Space Physics, 47(4).
 18. Ghanati, R.; Azadi, Y.; Fakhimi, R.; 2020; *RESIP2DMODE: A MATLAB-Based 2D Resistivity and Induced Polarization Forward Modeling Software*; Iranian Journal of Geophysics 13 (4), 60-78.
 19. Xi, X.; Yang, H.; He, L.; and Chen, R.; 2013; *Chromite mapping using induced polarization method based on spread spectrum technology.* Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems Proceedings, 13-19.
 20. Kospiri, A.; Kosho, P.; And Vukzaj, N.; 1999; *Case Histories of the Application of Geophysical Methods to Chromite Exploration in the Balkans*, Second Balkan Geophysical Congress and Exhibition.
 21. Wynn, J. C.; and Hasbrouck, W. P.; 1980; *Geophysical studies of chromite deposits in the Josephine ultramafic complex of Northwest California and Southwest Oregon*; U.S. Geological Survey, Open-File Report 80-936.
- گسلی و کشف گسل‌های پنهان برای شناسایی ساختار زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه و اکتشاف کرومیت استفاده کرد.
- منابع**
1. Papp, J. F., and Lipin, B. R., 2001; *Chromium*: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-381, 161 p.
 2. Ali, M.; and Jahangir Khan, M.; 2013; *Geophysical Hunt for Chromite in Ophiolite*; Int. j. econ. environ. geol. Vol: 4(2) 22-28.
 3. Mohanty W. K.; Mandal, A.; Sharma, S. P.; Gupta, S.; and Misra, S.; 2011; *Integrated geological and geophysical studies for delineation of chromite deposits: A case study from Tangarparha, Orissa, India*; Geophysics. Vol. 76, No. 5; P. B173-B185.
 4. Bayrak, M.; 2002; *Exploration of chrome ore in Southwestern Turkey by VLF-EM*; Journal of the Balkan Geophysical Society, Vol. 5, No 2, p. 35-46.
 5. Yaghubpur, A.; Hassannejad, A. A.; 2006; *The Spatial Distribution of Some Chromite Deposits in Iran, Using Fry Analysis*; Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran, v. 17(2), p. 147-152.
 6. Lench, G.; Mihm, A.; and Alavi-Tehrani, N.; 1977; *Petrography and geology of the ophiolite belt north of Sabzvar/Khorasan (Iran)*; Neues Jahrbuch fur Geology un Palaontologie Monatshefte v. 131, p. 156-178.
 7. Dilek, Y.; 2003; *Ophiolite concept and its evolution*; Geological Society of America; Special Paper 373.
 8. Fruh-Green, G.; Plas, A.; and Lecuyer, C., 1996; *Petrologic and stable isotope constraints on hydrothermal alteration and serpentinization of the EPR shallow mantle at hess deep site 895*, Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results, 747, 255.
 9. Nogol-e Sadat, M, A, A; and Almasian, M; 1993; *Tectonic map of Iran, Scale 1:1000,000*; Geological Survey of Iran.
 10. Klein, C.; Hurlbut, C. S.; 1985; *Manual of Mineralogy (after James D. Dana)*, 20th Edition, Publisher: Wiley; p 596.