

Research Article

Prospecting and geochemical investigation of promising chromite areas in the northeast of Shahrud; Joghatay-Sabzevar metallogenic belt

MohammadAmin Jafari^{*1}, Hamed Kachar², Ali Zeinali³, Majid Fakhri⁴, Hekmatollah Khanlu⁵, Alireza Zarasvandi⁶

1- Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2- M.Sc. Remote Sensing Eng. Dept., K.N. Toosi University of Technology, Faculty of Geodesy and Geomatics Eng, Tehran, Iran

3- M.Sc. Geology, College of Science University of Tehran, Tehran, Iran

4- Ph.D in Strategic management of passive defence, Supreme National Defence University, Tehran, Iran

5- M.Sc. Geodesy Eng. Islamic Azad University of Shahrood, Faculty of Geodesy and Geomatics Eng, Shahrood, Iran

6- Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Keywords: GIS, Promising mineral areas, Singularity, Cr geochemical anomaly, northeast of Shahrud.

1- Introduction

The study area (Mayamey) comprises four 1:100,000 geological sheets, including Forumad, Jajarm, Davarzan, and Abbasabad. Joghatay-Sabzevar metallogenic belt, located northeast of Shahrood, hosted many Cr, Ni, and Co deposits. The Joghatay-Sabzevar ophiolitic zone is considered a part of central Iran's ophiolites. This ophiolite complex is the largest in North-Eastern Iran. The Sabzevar rock ophiolite units are generally classified into two ophiolitic and non-ophiolitic groups (Soleimani and Shokri, 2016).

Chromite masses are formed in ophiolitic sequences and ultramafic rocks such as harzburgite and dunite (Ali et al., 2020). Therefore, these lithological units and serpentine alteration can be used as an exploration key to identifying chromites (Pournamdari & Hashim, 2014). Mineral potential modelling (MPM) is an endeavour to reduce the search space for further surveys (Lindsay et al., 2016). The MPM is a multi-step process that involves the (1) identification of geological processes required for the creation of mineral deposits, (2) translation of the mappable geological processes into evidential maps, and, eventually, (3) assignment of weights to any combination of the individual evidence layers to identify exploration targets (Zuo et al., 2021). The purpose of this research is to identify the promising mineral areas of chromite using evidence maps 1) host rock, 2) serpentine alteration, 3) Cr geochemical, 4) airborne magnetometer, and 5) faults density. Finally, the type of chromite samples was determined using geochemical diagrams.

2- Material and methods

Fuzzy logic is based on the fuzzy set theory proposed by Zadeh (1965). Fuzzy logic does not use a binary response (presence or absence of evidence as in weights of evidence) but values between 0 (not favourable) and 1 (favourable) (Zadeh, 1965). The fuzzy model for mineral prediction is defined as a generic model: if X is the set of evidential layers X_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), and each layer has r classes defined as ($j = 1, 2, 3, \dots, r$), then n fuzzy sets A_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) in X are defined as

$$\text{Equation 1} \quad A_{ij} = \{(X_{ij})/X_{ij}=X_i\}, (0 \leq \mu_A \leq 1)$$

Where μ_A is the membership value. When x_{ij} is favorable to mineralization, $0.5 < \mu_A < 1$; when and only when it cannot be determined whether x_{ij} is favorable or unfavorable to mineralization, $\mu_A = 0.5$; and

* Corresponding author: MohamadAmin.Jaafari@gmail.com

when x_{ij} is unfavorable to mineralization, $0 < \alpha < 0.5$. The individual evidence layer, calculated using the fuzzy-GAMMA approach, is multiplied by the corresponding evidence layers. Then the final prospectivity map was generated by integrating the weighted evidential maps using Fuzzy-Gamma = 0.85 operators (Bonham-Carter, 1994). Choosing a value of 0.85 for this study reflects the expert opinion for giving an additive possibility value in the final prospectivity map.

This study identifies the promising areas of chromite mineralization, host rock evidence maps (lithological), serpentine alteration resulting from remote sensing data processing, fault density, geophysics-magnetism, and geochemical of Cr have been used. Then, using the Fuzzy-Gamma function and the gamma value of 0.85, the evidence maps were weighted and fuzzified between 0 and 1 and integrated into the GIS environment.

3- Results and Discussion

According to the final map of chromite potential, the access roads and geological conditions of 11 areas were determined as exploration targets. The searches found that out of the 11 designated areas, there were three active mines, six promising regions, and two areas without chromite mineralization. Furthermore, the results of XRF analysis of two control samples, S4 and S5, showed that the grade of chromite in these areas is 40.02% and 52.44%, respectively, which shows the economic grade of chromite, high accuracy, and the correct method of combining the selected observer maps in this study. Also, the geochemical research showed that the amounts of MgO, Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃, and Cr₂O₃ are consistent with the accumulation type chromites, and the samples of the study area are rich in Cr and, to some extent Fe and poor in Al.

4- Conclusion

Since the formation of all chromite deposits in Iran is in the form of Padiform, and on the other hand, these types of chromites are found in the ultramafic part of ophiolitic sequences, the first step in the exploration of this type of deposits is to identify ophiolitic belts.

This research used the Fuzzy-GAMMA method to find the potential of chromite deposits in the ophiolitic belt northeast of Shahrud. The results of this research showed that the use of weighted reference evidence maps an acceptable performance in identifying areas with chromite potential because the areas with identified potential are not much different from the mines of the studied area in terms of the economic grade of chromium element. Therefore, it can be concluded that the potential model produced using weighted evidence maps is suitable and reliable for exploring chromite deposits in the study area.

References

- Ali, R.A., Pitcairn, I.K., Maurice, A.E., Azer, M.K., Bakhit, B.R., Shahien, M.G., 2020. Petrology and geochemistry of ophiolitic ultramafic rocks and chromitites across the Eastern Desert of Egypt: Insights into the composition and nature of a Neoproterozoic mantle and implication for the evolution of SSZ system. *Precambrian Research* 337, 105565. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105565>
- Bonham-Carter, G.F., 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS*. Pergamon Press, Oxford, UK, 398.
- Lindsay, M., Aitken, A., Ford, A., Dentith, M., Hollis, J., Tyler, I., 2016. Reducing subjectivity in multi-commodity mineral prospectivity analyses: Modelling the west Kimberley, Australia. *Ore Geology Reviews* 76, 395-413. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.022>
- Pournamdari, M., Hashim, M., 2014. Detection of chromite bearing mineralized zones in Abdasht ophiolite complex using ASTER and ETM+ remote sensing data. *Arabian Journal of Geosciences* 7(5), 1973-1983. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0927-0>
- Sehsah, H., Eldosouky, A.M., El Afandy, A.H., 2019. Unpaired ophiolite belts in the Neoproterozoic Allaqi-Heiani Suture, the Arabian-Nubian Shield: Evidences from magnetic data. *Journal of African Earth Sciences* 156, 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.05.002>
- Zadeh, LA., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control* 8(3), 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

Zuo, R., Kreuzer, O.P., Wang, J., Xiong, Y., Zhang, Z., Wang, Z., 2021. Uncertainties in GIS-based mineral prospectivity mapping: Key types, potential impacts and possible solutions. *Natural Resources Research* 30(5), 3059-3079. <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09871-z>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Jafari, M., Kachar, H., Zeinali, A., Fakhri, M., Khanlu, H., Zarasvandi, A., 2023. Prospecting and geochemical investigation of promising chromite areas in the northeast of Shahrud; Joghatay-Sabzevar metallogenic belt. *Adv. Appl. Geol.* 13(2), 517-536.

DOI : 10.22055/AAG.2022.41587.2309

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_18237.html

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

پتانسیل یابی و بررسی ژئوشیمیایی مناطق امیدبخش کرومیت در شمال شرق شاهرود؛ کمر بند فلز زایی جغتای-سبزوار

محدامین جعفری*

دانشجوی دکتری، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

حامد کاچار

کارشناس ارشد مهندسی سنجش از دور دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

علی زینالی

کارشناس ارشد زمین شناسی، دانشگاه تهران

مجید فخری

دکتری مدیریت راهبردی پدافند غیر عامل، دانشگاه عالی دفاع ملی

حکمت اله محمدخانلو

کارشناس ارشد ژئودزی دانشگاه آزاد شاهرود

علیرضا زراسوندی

استاد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

MohamadAmin.Jaafari@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۴

چکیده

بخش میامی (شمال شرق شاهرود) که بخشی از پهنه جغتای-سبزوار را تشکیل می‌دهد میزبان ذخایر کرومیت انبانه‌ای (Padiform) متعددی با سنگ میزبان هارزبورژیتی (افیولیتی) هستند که دگرسانی سرپنتینی در آن‌ها به شدت گسترش یافته است. در این مطالعه جهت شناسایی نواحی امیدبخش معدنی کرومیت از نقشه‌های شاهد سنگ میزبان (لیتولوژی)، دگرسانی سرپنتینی حاصل از پردازش داده‌های سنجش از دور (تصویر ASTER)، چگالی گسل‌ها، ژئوفیزیک-مغناطیس هوابرد و ژئوشیمی Cr استفاده شده است. سپس با بهره‌گیری از تابع Fuzzy-Gamma و مقدار گامی ۰/۸۵ نقشه‌های شاهد وزن‌دار شده و بین ۰ و ۱ فازی‌سازی و در محیط GIS با یکدیگر تلفیق شدند. با توجه به نقشه نهایی پتانسیل‌یابی کرومیت، راه‌های دسترسی و شرایط زمین‌شناسی ۱۱ منطقه به عنوان اهداف اکتشافی تعیین شدند. بر اساس پی‌جویی‌های صورت گرفته مشخص شد از ۱۱ منطقه تعیین شده سه معدن فعال، شش نواحی امیدبخش و دو منطقه فاقد کانه‌زایی کرومیت بودند. نتایج آنالیز XRF از دو نمونه شاهد S4 و S5 نشان داد عیار کرومیت در این نواحی به ترتیب ۴۰/۰۲ و ۵۲/۴۴ درصد است که نشان‌دهنده عیار اقتصادی کرومیت، دقت بالا و روش صحیح تلفیق نقشه‌های شاهد در این مطالعه می‌باشد. همچنین مطالعه ژئوشیمی نشان داد که مقادیر Cr_2O_3 ، Fe_2O_3 ، TiO_2 ، Al_2O_3 ، MgO با کرومیت‌های تیپ انبانه‌ای همخوانی دارد و کرومیت‌های منطقه غنی از Cr و تا حدودی Fe و فقیر از Al می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: GIS، نواحی امیدبخش معدنی، سینگولاریتی، آنومالی ژئوشیمی کروم، شمال شرق شاهرود

۱- مقدمه

افیولیت‌ها به طور گسترده بیانگر بخشی از پوسته اقیانوسی و گوشته فوقانی زمین است که از لحاظ زمین‌ساختاری در کمر بند کوهزایی حاشیه قاره‌ها، واقع شده است (Taghipour et al.,)

(2021). افیولیت‌های ایران مربوط به باز و بسته شدن اقیانوس-های پالئوتتیس و نئوتتیس است که اتصال‌دهنده افیولیت‌های آسیای شرقی (همچون پاکستان و تبت) را به افیولیت‌های خاورمیانه و مدیترانه اتصال می‌دهد (شکل ۱) (Bröcker et al., 2021). برجسته‌ترین افیولیت‌ها در ایران در نواحی ایران

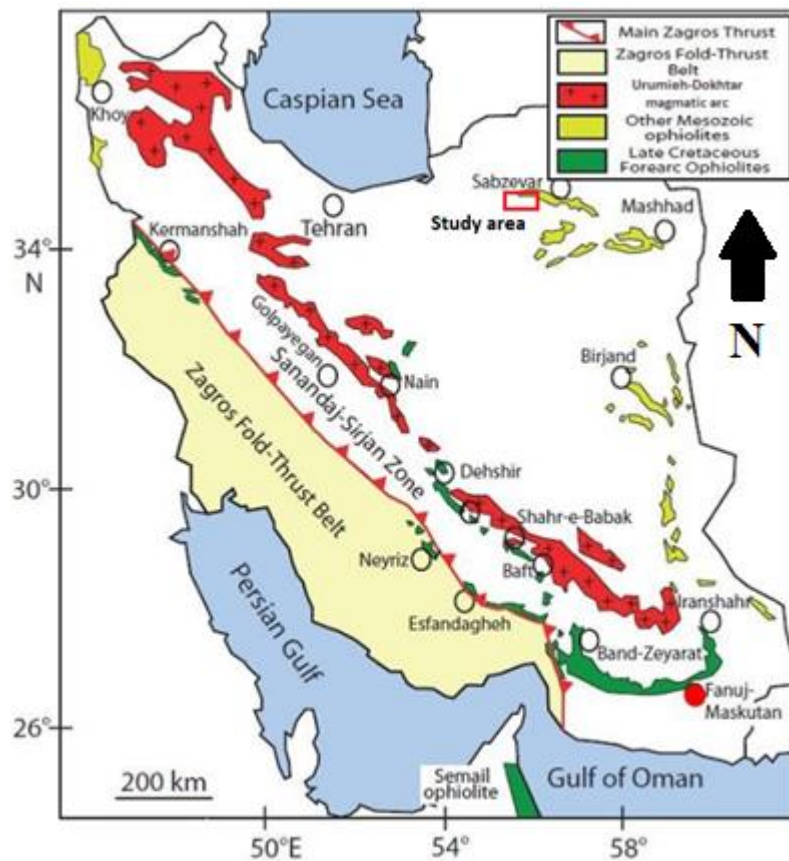
جمله کانسارهای کرومیت ایران می‌توان به کانسارهای اسفندقه، فاریاب، آبدشت صوغان، خواجه جمالی، رضا، میرمحمود، گفت و ... اشاره کرد (Afzal et al., 2019).

اکتشاف منابع معدنی فرآیند پیچیده‌ای است که نیازمند در نظر گرفتن مجموعه داده‌های مکانی مختلف (نظیر تصاویر ماهواره‌ای، زمین شیمی، ژئوفیزیک و ...) از منطقه مورد مطالعه می‌باشد که هدف نهایی آن، اکتشاف نوع خاصی از کانه‌زایی می‌باشد. جهت رسیدن به این هدف، می‌بایست داده‌های مکانی مختلف برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی (Mineral Prospectivity Mapping) جمع‌آوری، آنالیز و تلفیق شوند (Najafi et al., 2014). اکتشاف مواد معدنی، معمولاً از یک مقیاس کوچک (نواحی بزرگ) شروع شده و تا مقیاس‌های بزرگتر (نواحی کوچک) جهت تشخیص و جدا نمودن مناطق دارای پتانسیل، ادامه می‌یابد (Ghezelbash and Maghsoudi, 2018). مدل‌سازی پتانسیل معدنی در حقیقت نوعی تصمیم‌گیری چند معیاره (Multiple Criteria Decision Making) در نظر گرفته می‌شود، زیرا به تصمیم‌گیرنده این اجازه را می‌دهد که یک درک کلی از هدف نهایی را داشته باشد (Najafi et al., 2014).

مراحل اصلی تهیه نقشه پتانسیل معدنی، شامل شناسایی معیارهای تشخیص کانی‌سازی، سازمان‌دهی و آماده‌سازی اطلاعات، وزن‌دهی و تهیه نقشه‌های معیار، تلفیق نقشه‌های معیار و ارزیابی نتایج است (Ghezelbash and Maghsoudi, 2018). همانطور که شناسایی علل مؤثر در کانه‌زایی در به دست آوردن نواحی امید بخش حائز اهمیت است، نحوه تلفیق لایه‌های اطلاعاتی و چگونگی وزن‌دهی به این پارامترها نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، قصد بر آن است تا با استفاده از تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیک-مغناطیس‌هوابرد و دورسنجی و با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نقشه‌های پتانسیل‌دار و مناطق امیدبخش معدنی از منظر وجود کرومیت در منطقه شمال‌شرق شاهرود مشخص و تجزیه و تحلیل‌های ژئوشیمیایی بر روی آن‌ها انجام شود.

مرکزی و زاگرس واقع شده‌اند. افیولیت‌های مرکزی سن مزوزوئیک و پالئوزوئیک دارند (Taghipour et al., 2021). زون افیولیتی سبزوار که بخشی از آن در شمال‌شرق شاهرود واقع شده است به دلیل وجود زمین‌درزه بین ایران مرکزی و کپه داغ در این زون، از اهمیت تکتونیکی فوق‌العاده‌ای برخوردار است (شکل ۱). پوسته اقیانوسی سبزوار توسط گسل‌هایی بر روی پوسته قاره‌ای ایران مرکزی رانده شده است (Rahmani et al., 2020). توده‌های کرومیت در توالی‌های افیولیتی اطلاعات ارزشمندی در مورد فرآیندهای تکتونیکی و پتروژنتیکی در گوشته بالایی ارائه می‌دهند. در بسیاری موارد توده‌های کرومیت غنی از کروم موجود در افیولیت‌ها دارای کانی‌سازی PGE (Platinum Group Elements) هستند. کرومیت‌ها در سراسر جهان از نظر اقتصادی حائز اهمیت هستند (Taghipour et al., 2021). کرومیت‌های ناحیه سبزوار عموماً در مگنتیت و سرپانتینیت میزبانی می‌شود (Eslami et al., 2021). کروم از عناصر نادری است که به همراهی آلومینیم و آهن در پوسته زمین وجود دارد. به طور میانگین غلظت کروم موجود در پوسته ۱۹۰ ppm برآورد شده است (Ukhurebor et al., 2021).

افیولیت به مجموعه‌ای از سنگ‌های مافیک و اولترامافیک گفته می‌شود که ممکن است منظم و لایه‌لایه باشند. افیولیت‌ها در ایران از نظر جغرافیایی به چهار دسته افیولیت‌های الف (شمال ایران ب) افیولیت‌های پهنه زاگرس ج) افیولیت‌های ناحیه مکران در جنوب پهنه سنندج-سیرجان د) افیولیت‌های ایران مرکزی تقسیم‌بندی می‌شوند (شکل ۱) کروم از عناصر نادر در پوسته زمین محسوب می‌شود (Eslami et al., 2021). کرومیت اصلی‌ترین کانی کروم در بین دیگر کانی‌های کروم است که به عنوان کانه اقتصادی محسوب می‌شود (شکل ۲) (Moghaddasi and Yazdi, 2015). با توجه به اهمیت متالورژی ذخایر کرومیت در کمرندهای افیولیت ملانژ ایران و سابقه طولانی استخراج این معادن از گذشته، متأسفانه هنوز روش مدرنی برای اکتشاف این ذخایر جهت کاهش ریسک سرمایه‌گذاری و بهینه‌سازی عملیات اکتشاف وجود ندارد. از



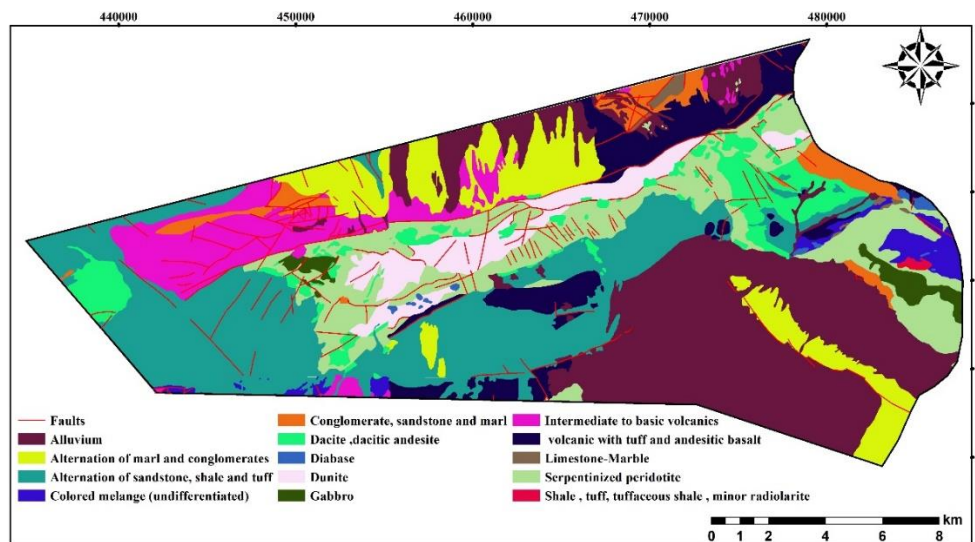
شکل ۱- نقشه ساده شده پراکندگی افیولیت‌های ایران و منطقه مورد مطالعه (Moghaddasi and Yazdi, 2015).

Fig. 1. Simplified distribution map of ophiolites in Iran and study area (Moghaddasi and Yazdi, 2015).

۲- زمین‌شناسی

پهنه افیولیتی جغتای-سبزوار قسمتی از افیولیت‌های ایران مرکزی محسوب می‌شود. این مجموعه افیولیتی بزرگترین مجموعه افیولیتی در شمال شرق ایران است. واحدهای سنگی موجود در افیولیت سبزوار به طور کلی در دو گروه افیولیتی و غیرافیولیتی قرار می‌گیرند (Soleimani and Shokri, 2016). پهنه افیولیتی شمال سبزوار عمدتاً شامل سکانس افیولیتی کرتاسه و سنگ‌های رسوبی همراه با سنگ‌های رسوبی آتشفشانی اواخر کرتاسه پسین، سنگ‌های رسوبی میوسن و پلیوسن، نهشته‌های عهد حاضر و همچنین توده‌های نفوذی گابرویی، دیوریتی و گرانیتی است (Solgi and Parmah, 2015). سنگ‌های عمده در افیولیت سبزوار از هارزبورژیت و دونیت تشکیل شده‌اند. دایک‌های دیابازی، گابرویی به تعداد

زیاد به صورت نفوذی‌های دگرسانی شده در سنگ‌های اولترامافیک گسترش دارند. سنگ‌های ولکانیکی شامل بازالت-های بالشی به همراه سنگ‌های رسوبی (سنگ آهک پلاژیک فسیل‌دار و رادیولاریت) تکمیل‌کننده این کمپلکس افیولیتی هستند (Rajabzadeh et al., 2015). واحدهای افیولیتی شمال (پریدوتیت‌های سرپانتینی شده، گابروها، دیابازها و بازالت‌های اقیانوسی) در بین سنگ‌های رسوبی، آتشفشانی و آتشفشانی-رسوبی غیرافیولیتی محصور شده‌اند و با یکدیگر اغلب مرزهایی گسلی تشکیل داده‌اند که کانسارهای مهم کرومیتی را درون سنگ‌های پریدوتیتی سرپانتینی شده که حجم وسیعی از گستره را تشکیل می‌دهند، در دل خود جای داده‌اند (Eslami et al., 2021). نقشه ساده‌شده زمین‌شناسی این پهنه در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه.
Fig. 2. Geological map of the study area.

۳- مواد و روش‌ها

لایه‌های اطلاعاتی استفاده شده در این تحقیق بر اساس اهمیت معیارهای اکتشافی مربوط به کانسارهای کرومیت با سنگ میزبان هارزبورژیتی (افیولیتی) انبانه‌ای انتخاب شده‌اند. پس از بررسی‌های فراوان و استفاده از نظرات متخصصین علوم زمین، در نهایت ۵ معیار اصلی در قالب لایه‌های اطلاعاتی شامل: سنگ میزبان (لیتولوژی)، چگالی گسل‌ها، ژئوشیمی، دگرسانی، مغناطیس‌سنجی موجود در منطقه مورد مطالعه نرم‌افزار ArcGIS باهم تلفیق شدند. مراحل انجام پژوهش در فلوچارت زیر (شکل ۳) نشان داده شده است. در نهایت با استفاده از نمودارهای ژئوشیمیایی به بررسی کرومیت‌های منطقه مورد مطالعه پرداخته شد.

۳-۱- روش شاخص سینگولاریتی (Singularity Index)

در این مطالعه جهت فراهم کردن لایه ژئوشیمی در پهنه شمال-شرق شاهرود از نمونه رسوبات آبراهه‌ای شامل نقشه‌های زمین-شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ فرومد، جاجرم، داورزن و عباس‌آباد که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور تهیه شده‌اند استفاده شده است. لایه ژئوشیمی عنصر کروم در پهنه شمال شرق شاهرود با استفاده از روش شاخص سینگولاریتی (Singularity Index) به دست آمد. تکنیک شاخص سینگولاریتی (SI) قادر به تخمین زدن غلظت فلزات از طریق مشاهده پنجره‌های کوچک مجاور هم است. جهت تخمین سینگولاریتی، از تعدادی پنجره‌ها (r_i) (به شکل مربع) برای

اندازه‌گیری تراکم غلظت (C) حول یک موقعیت خاص (Z_i) استفاده می‌شود (Xiao et al., 2018; Nazarpour et al., 2022). این روش آنومالی‌هایی که بین زمینه پنهان می‌شوند و به اصطلاح Weak Anomaly نامیده می‌شوند و همچنین از طریق وزن‌دهی به شیوه معکوس فاصله (Inverse Distance Weighting) مشخص نمی‌شوند را می‌تواند شناسایی کند (Jafari et al., 2020). مقدار سینگولاریتی برای پنجره‌های کوچک مجاور هم بر اساس (رابطه ۱) بدست می‌آید (Zuo et al., 2015):

$$c \cdot \varepsilon^{(\alpha - E)} = X \quad (\text{رابطه ۱})$$

در (رابطه ۱) X نشان دهنده غلظت عنصر، c مقدار ثابت، α شاخص سینگولاریتی، ε اندازه فاصله نرمال شده و E بعد اقلیدسی می‌باشد (Agterberg, 2012). شاخص سینگولاریتی از شیب خط مستقیم برازش شده با جفت داده‌های c و ε در نمودار لگاریتمی تخمین زده می‌شود (Cheng, 2007).

۳-۲- تلفیق لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از روش منطق فازی

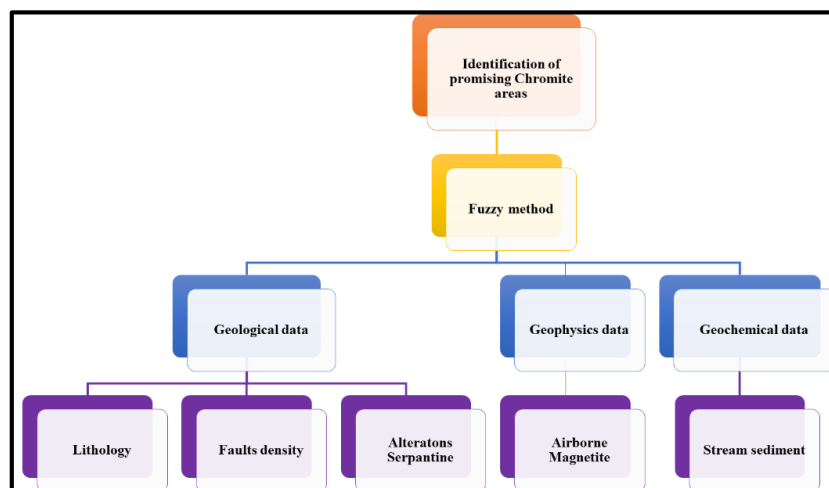
تئوری منطق فازی به عنوان یک روش دانش محور برای اولین بار توسط Zadeh (۱۹۶۵) پیشنهاد شده است. این روش بر اساس تئوری مجموعه فازی می‌باشد که در آن وزن‌دهی به لایه‌های اکتشافی بر مبنای اهمیت هر یک از لایه‌ها بر اساس قضاوت کارشناسان متخصص صورت می‌پذیرد (Hedayat et al., 2022). مبنای این روش به صورت تبدیل داده‌های ورودی

$$F_{Combination} = (SUM \text{ فازی})^\gamma \times (PRODUCT \text{ فازی})^{1-\gamma}$$

عملگر فازی گاما (GAMMA)، ترکیبی از عملگر فازی حاصلضرب جبری (PRODUCT) و عملگر فازی حاصل جمع جبری (SUM) می باشد در آن پارامتر γ (گاما) در محدود صفر تا یک انتخاب می گردد. به طوری که اگر γ (گاما) یک باشد، ترکیب همان حاصل جمع جبری (SUM) خواهد بود و اگر γ (گاما) صفر باشد، ترکیب مساوی حاصلضرب جبری (PRODUCT) است. انتخاب صحیح و آگاهانه γ (گاما)، مقدارهایی در خروجی به وجود می آورد که نقش فزآینده جمع جبری فازی و نقش کاهنده ضرب جبری فازی در آن عمل می کند و کل مجموعه را به حالت تعادل می رساند. روش های مبتنی بر منطق فازی معمولاً کلاس های حد واسط را در نظر نمی گیرند و تمام کلاس های یک لایه اکتشافی را بین ۰ (کمترین کلاس) و ۱ (بیشترین کلاس) ارزش گذاری می کنند به همین علت مناطقی را که به عنوان آنومالی معرفی می کند دارای گستردگی کمتری نسبت به سایر روش ها هستند (Jafari et al., 2021a).

به خروجی های نرمال شده با محاسبه اوزان برای عضوهای فازی بر اساس تئوری مجموعه فازی می باشد (Zhang et al., 2017). مقادیر عضو فازی برای هر یک از پیکسل های لایه های اکتشافی به صورت مقادیر پیوسته در دامنه صفر تا یک می باشند (Abdelkareem and Al-Arif, 2021). در تئوری منطق فازی عضوهای فازی بر اساس فواصل معنادار از ویژگی های مختلف وزن دهی می شوند که برای هر پیکسل یا موقعیت فضایی، یک وزن به خصوص بین صفر تا یک اختصاص داده می شود (Zhang et al., 2017). در مدل سازی پتانسیل معدنی با استفاده از تئوری منطق فازی، پنج عملگر کاربرد فراوانی برای ترکیب لایه های اکتشافی مختلف فازی سازی شده دارند که شامل عملگرهای AND فازی، OR فازی، PRODUCT جبری فازی، SUM جبری فازی و GAMMA فازی می باشند (Bonham-Carter, 1994). در این پژوهش از عملگر فازی گاما (GAMMA) که مطابق (رابطه ۲) بیان می شود مورد استفاده قرار گرفته است:

(رابطه ۲)



شکل ۳- سلسله مراتب استفاده شده در تهیه نقشه های امیدبخش.

Fig. 3. Hierarchy used for promising mapping.

۴- نتایج

۴-۱- لایه سنگ میزبان

همین دلیل برای جداسازی واحدهای سنگی از نقشه های زمین شناسی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ که تشکیل دهنده منطقه مورد مطالعه می باشد استفاده شده است. با توجه به اهمیت لیتولوژی اولترامافیک مثل دونیت و سرپنتینیت در کانه زایی کرومیت،

منشأ اکثر کانسارهای کرومیت موجود در کمربند افیولیتی جغتای-سبزواری با واحدهای سنگی ارتباط تنگاتنگی دارند به

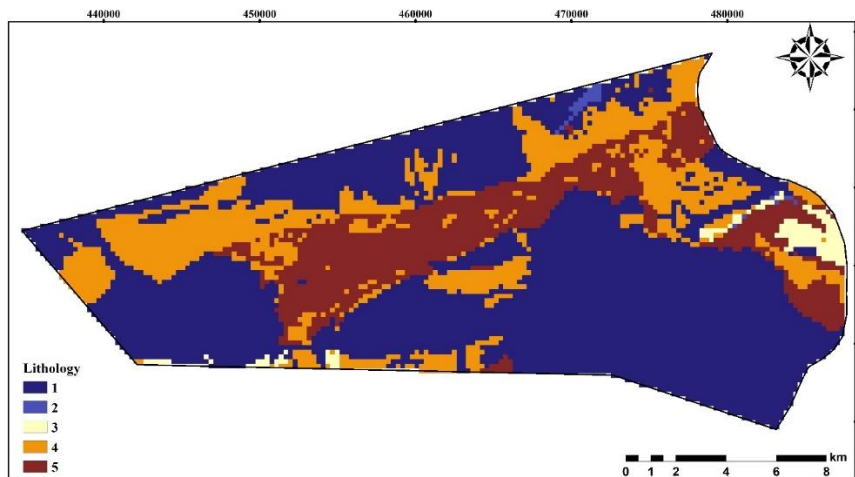
پس از آن واحدهای دیاباز و گابرو (۴)، آمیزه‌های رنگی (۳)، مرمر و سنگ آهک (۲) و آبرفت‌ها-سایر لیتولوژی‌ها (۱) به- ترتیب به علت مؤثر بودن در تشکیل کانسارهای کرومیت (با توجه به نظر متخصص)، وزن‌دهی شدند (شکل ۵).

کبالت، نیکل و ... در پهنه افیولیتی شمال شرق شاهرود، این لایه از اهمیت بالایی برخوردار بوده و همچنین این واحد با توجه به اینکه سنگ میزبان بسیاری از کانسارهای موجود در منطقه مورد مطالعه است بیشترین امتیاز را دارا می‌باشد (۵). در شکل ۴ نمایی از افیولیت‌های منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.



شکل ۴- واحدهای سنگ اولترابازیک سرپنتینه شده در منطقه مورد مطالعه.

Fig. 4. Serpentinized ultrabasic rock units in study area.



شکل ۵- نقشه کلاس‌بندی سنگ میزبان.

Fig. 5. Host rock classification map.

۴-۲- لایه ژئوشیمی

عنوان غلظت تخمینی در نظر می‌گیرد (Jafari et al., 2021a; Vaziri et al., 2021). در این حالت آثار بالا دست و پایین دست منطقه نیز در نظر گرفته می‌شوند. تولید این مربع‌های کوچک آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا به مربع بهینه برسد (Xiao

در روش شاخص سینگولاریتی، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، سینگولاریتی یک ماتریس سطر با ستون برابر را ایجاد می‌کند و منطقه مورد مطالعه را به یک سری مربع‌های کوچک تقسیم‌بندی می‌کند سپس غلظت میانگین مربع‌ها را به

گرفت (شکل ۷).

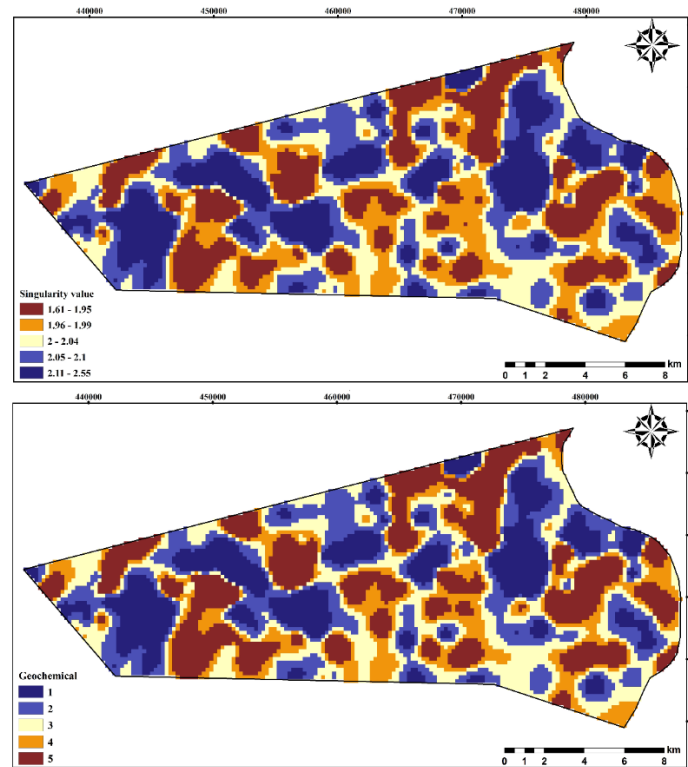
۴-۴- لایه دگرسانی

در تشکیل ذخایر کرومیت دگرسانی سرپنتینی مهمترین دگرسانی بشمار می‌رود. اهمیت این دگرسانی به این دلیل است که سنگ‌های اولترامافیک، به ویژه دونیت و هارزبورژیت، تحت شرایط خاصی در اثر آگیری، کانی‌های گروه سرپنتین را به وجود می‌آورند و به این صورت سیالات حاوی فلزاتی چون کروم، نیکل، کبالت و ... در خلل و فرج سنگ‌ها ته‌نشست می‌شود (Yang et al., 2021). در این مطالعه از روش نسبت بانندی که یکی از رایج‌ترین پردازش تصاویر ماهواره‌ای است برای بارزسازی دگرسانی‌ها استفاده شده است (Sabins, 1999). این روش تقسیم کردن دو باند بر همدگر است. بانندی که میزان انعکاس از هدف مورد بررسی در آن بیشتر است، در صورت و باند دیگر که پدیده جذب برای همان هدف در آن بالاتر است، در مخرج قرار می‌گیرد (El Janati, 2019). با بکارگیری این روش، می‌توان اثرات توپوگرافی و سایه‌ها را در تصویر کاهش داد و نیز اختلاف بین درجات روشنایی را آشکار کرد و نیز برای جدا کردن مرز واحدهای سنگی و تشخیص سنگ‌ها به کار می‌رود (Rouskov et al., 2005). تصویر استفاده شده در این پژوهش متعلق به سنجنده ASTER ماهواره Terra می‌باشد که با ادغام باند (VNIR+SWIR) با بهره‌گیری از نرم‌افزار ENVI پردازش گردید. در جدول ۱ مشخصات تصویر ASTER مورد استفاده در این مطالعه مشخص شده است. گفتنی است از سال ۲۰۰۷ به بعد در سنجنده ASTER باندهای SWIR آن خاموش شده و از جهت زمین‌شناسی، تغییراتی که در بازه زمانی میلیون‌ها سال اتفاق می‌افتد قابل استفاده نمی‌باشد به همین دلیل از تصویر سال‌های قبل برای محدوده مورد مطالعه استفاده شد. برای بارزسازی دگرسانی سرپنتینی از نسبت بانندی (B12/B13) استفاده شده است (Rajendran et al., 2014). همانطور که در شکل ۸ و نقشه زمین‌شناسی منطقه مشخص است در قسمت‌های میانی و شرقی منطقه مورد مطالعه دگرسانی سرپنتینی گسترش بیشتری دارد. بنابراین با توجه به اهمیت لایه دگرسانی، وزن‌دهی این لایه از دگرسانی کم به زیاد (۱ تا ۵) انجام گرفت.

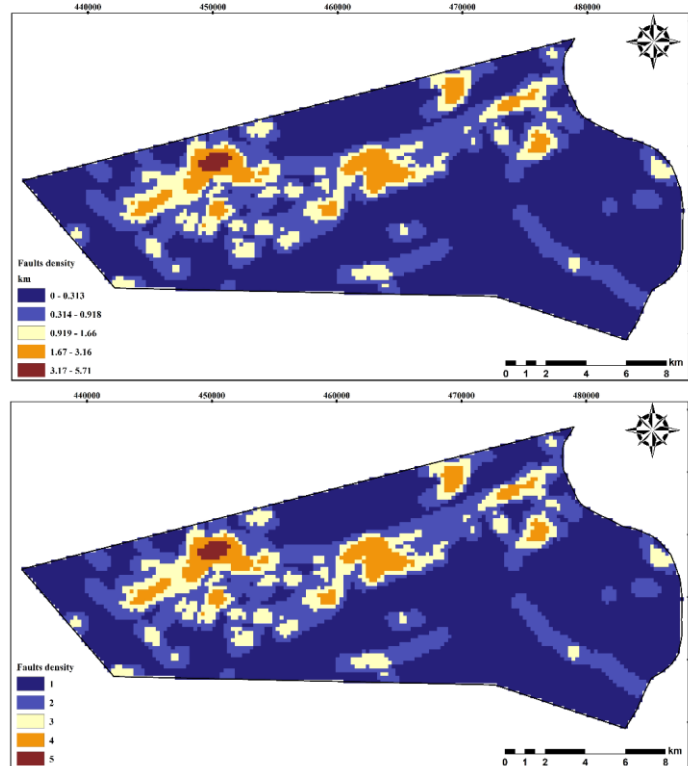
et al., 2018; Borojerdnia et al., 2020). سپس عملیات میانگین متحرک برای پنجره‌های سایزهای 15×15 ، 17×17 ، 19×19 ، 21×21 ، 23×23 انجام شد. طبق مطالعات صورت گرفته از پنجره 19×19 به عنوان ایده‌آل‌ترین پنجره جهت تعیین ضریب سینگولاریتی (α) و تهیه نقشه ژئوشیمی Cr بدست آمد. بر اساس Cheng (۲۰۰۷) حد آستانه معمول در روش سینگولاریتی $\alpha = 1/96$ می‌باشد (Cheng, 2007). کلاس‌بندی لایه زمین‌شیمیایی به ترتیب از کم به زیاد (۱ تا ۵) برای عنصر کروم در نظر گرفته شده است (شکل ۶).

۴-۳- لایه تراکم گسل‌ها

یکی از عوامل کانی‌سازی با توجه به نوع و ماهیت تشکیل ماده معدنی شکستگی‌ها و گسل‌ها می‌باشند که در واقع راهی برای نفوذ سیالات کانه دار هستند. اغلب کانه‌زایی‌ها در مناطق با شکستگی بالا و به‌ویژه در محل تلاقی این شکستگی‌ها اتفاق می‌افتد (Sabins, 1999). توزیع فضایی ذخایر معدنی توسط پارامترهای مختلفی کنترل می‌شود (Prior et al., 2021). مهم‌ترین کنترل‌کننده‌های توزیع کانه‌سازی در مقیاس منطقه‌ای، سنگ‌شناسی سنگ میزبان، توده‌های نفوذی یا اکستروژن و سیستم‌های ساختاری هستند (Baseri and Nezafati, 2021). بنابراین، برای شناسایی مناطق پتانسیل معدنی، شناسایی ویژگی‌های ساختاری از اهمیت بالایی برخوردار است (Malaekheh et al., 2021). فراوانی تقاطع‌های گسلی نقش مهمی در تشکیل نهشته‌های ماگمایی و گرمایی ایفا می‌کند زیرا این تقاطع‌ها فضای مناسبی را برای کانی‌سازی در سنگ بستر ایجاد می‌کند (Berger et al., 2008). با این حال، طول گسل‌ها نیز عامل مهمی در تشکیل ذخایر گرمایی است و منجر به هدایت سیال می‌شود. فراوانی گسل‌ها شامل سازه‌های قبل و بعد از کانی‌سازی کمترین اهمیت را در بین عوامل ذکر شده دارد (Pirajno and Cawood, 2009). بنابر آنچه به علت اهمیت گسل‌ها و ارتباط نزدیک آن‌ها با کانه‌زایی کرومیت و محلول‌های هیدروترمال، یکی از لایه‌های اطلاعاتی به گسل‌ها اختصاص داده شد (Yaghoobpour et al., 2006). با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS چگالی و تقاطع گسل‌های منطقه بر اساس کیلومتر بدست آمد. در همین راستا به لایه چگالی گسل‌ها به ترتیب از تراکم کم به زیاد وزن (یک تا پنج) تعلق



شکل ۶- نقشه ژئوشیمی و کلاس بندی عنصر کروم.
Fig. 6. Geochemical map and classification Cr element.

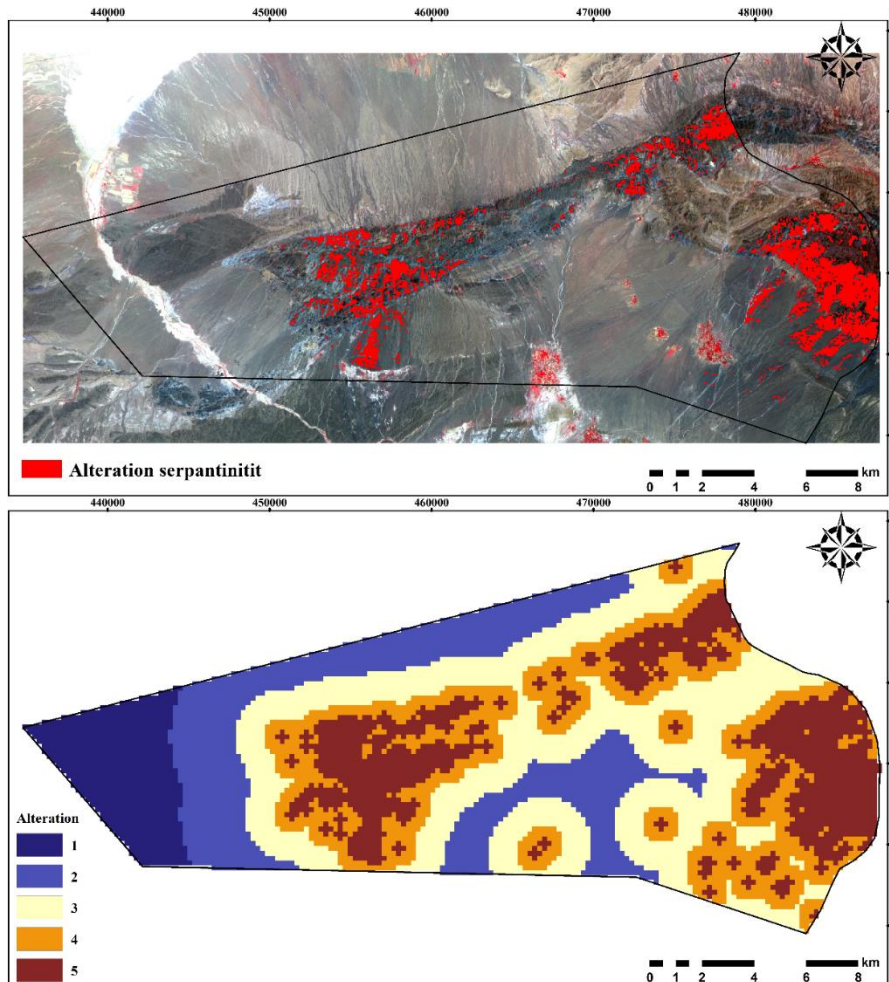


شکل ۷- نقشه چگالی گسل ها و کلاس بندی.
Fig. 7. Fault density map and its classification.

جدول ۱. مشخصات تصویر ASTER مورد استفاده.

Table 1. Specifications of ASTER image used.

Image code	AST_L1T_00307132003071226_20150430025523_115700
Date of shooting	3/7/2003



شکل ۸- نقشه دگرسانی سرپنتینی و کلاس بندی آن.

Fig. 8. Serpentine alteration map and its classification.

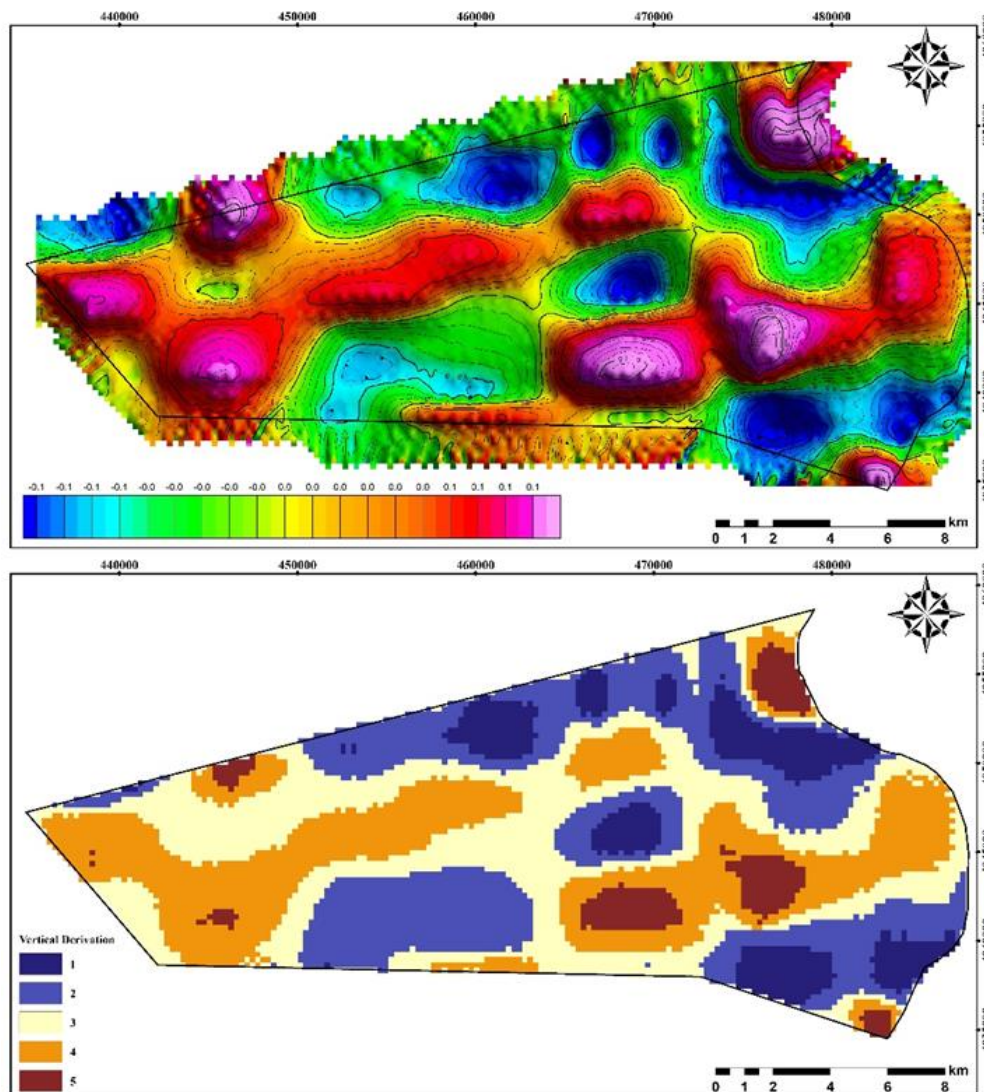
۴-۵- لایه مغناطیس سنج هوابرد

نقشه مغناطیسی مجموعه‌ای از ناهنجاری‌هایی را نشان می‌دهند که نتیجه تغییرات بزرگ در جزئی از کانی‌های مغناطیسی است، که در داخل سنگ‌های نزدیک به سطح وجود دارد. از این رو تفسیر دقیق داده‌های میدان مغناطیسی بسیار دشوارتر از تفسیر سایر داده‌های میدان پتانسیل است. بنابراین، عملیات مغناطیس‌سنجی از متداول‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی است که برای فعالیتهای اکتشافی در زمینه‌های مختلف و به ویژه اکتشاف ذخایر فلزی مثل طلا، نقره، کروم و ... مورد استفاده قرار گرفته است (Adebiyi et al., 2022).

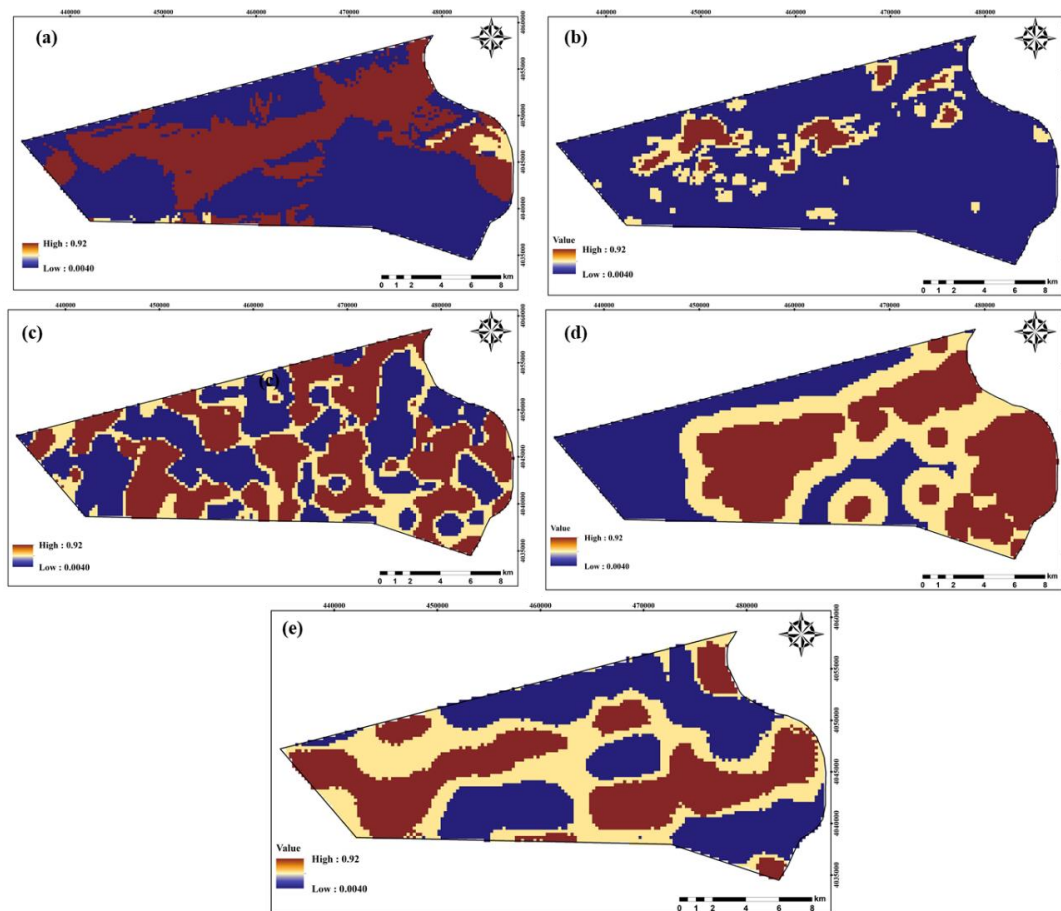
این پژوهش با استفاده از داده‌های مغناطیس هوایی پهنه افیولیتهی شمال شرق شاهرود، نقشه شدت کل میدان مغناطیس منطقه تهیه و سپس با بکارگیری مقادیر ۵۵/۹۱ درجه برای زاویه میل و ۴/۷۸ درجه برای زاویه انحراف مغناطیسی، فیلتر برگردان به قطب (RTP) بر روی نقشه شدت کل میدان اعمال شد تا داده‌ها به شرایط میدان مغناطیسی زمین در قطب شمال برگردند. استفاده از فیلتر قائم میدان پتانسیل نقش بسیار مهمی در بارزسازی ساختارهای زیرسطحی دارد و سبب وضوح بهتر اشکال آنومال به ویژه در لبه‌های آنها خواهد شد (Jafari et al., 2022). استفاده از فیلترهای فازی برای شناسایی لبه در

سنگ میزبان (شکل a۱۱)، چگالی گسل‌های منطقه (شکل b۱۰)، ژئوشیمی کروم (شکل c۱۰)، دگرسانی سرپنتینی (شکل d۱۰) و مغناطیس‌سنجی (شکل e۱۰) بین صفر تا یک فازی-سازی شدند. مقدار گامای استفاده شده در این فرآیند ۰/۸۵ است (۰/۸۵=γ). در این مطالعه لایه‌های اکتشافی فازی‌سازی شده با استفاده از عملگر فازی-گاما تلفیق شدند و نقشه پتانسیل معدنی کرومیت مطابق شکل ۱۱ بدست آمد.

داده‌های میدان پتانسیل مفید است. با اعمال این فیلتر، آنومالی-های سطحی نمود بیشتری پیدا می‌کند. بدین‌وسیله می‌توان رفتار توده‌های مغناطیسی را در سطح، بهتر مورد بررسی قرار دارد (Gunn et al., 1997). با توجه به نقشه مشتق قائم مرتبه اول منطقه مورد مطالعه از آنومالی کم به زیاد به ترتیب وزن‌دهی این لایه از ۱ تا ۵ صورت گرفت (شکل ۹). با توجه به مطالعات صورت گرفته در منطقه، اطلاعات لازم برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی کرومیت در قالب لایه‌های



شکل ۹- نقشه مغناطیس‌سنجی و کلاس‌بندی آن.
Fig. 9. Magnetometric map and its classification.



شکل ۱۰- نقشه‌های شواهد فازی سازی شده. (a) سنگ میزبان، (b) چگالی گسل‌ها، (c) ژئوشیمی کروم، (d) دگرسانی سرپنتینی، (e) مغناطیس‌سنجی.

Fig. 10. Fuzzified evidence maps. (a) Host rock, (b) Faults density, (c) Cr geochemical, (d) Serpentine alteration, (e) Magnetometry.

جدول ۲. نتایج آنالیز XRF نمونه‌های کرومیت.

Table 2. XRF results of chromite samples.

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃
S1	5.36	11.57	1.98	14.8	14.8	0.16	0.05	49.09
S2	10.07	6.61	0.15	15.05	21.03	0.14	0.09	40.02
S3	4.04	11.36	0.93	13.36	16.18	0.1	0.19	52.44
*S4	2.26	10.98	0.88	12.68	16.54	0.11	0.12	53.96
*S5	9.36	6.62	0.46	16.85	19.98	0.16	0.14	41.88

* Chromite Deposits

۴-۶- ژئوشیمی اکسیدهای اصلی

در این پژوهش با بهره‌گیری از GIS و تلفیق لایه‌های اطلاعاتی نظیر دگرسانی سرپنتینی، چگالی گسل‌ها، مغناطیس‌سنجی هوابرد، ژئوشیمی کروم و سنگ میزبان، نواحی امیدبخش کرومیت مطابق شکل ۱۱ بدست آمد و بر اساس عوامل مختلف مثل راه‌های دسترسی، مناسب بودن از نظر شرایط زمین‌شناسی و ... نقاط با پتانسیل با ۱۱ پلیگون اولویت‌بندی و برای بازدید صحرایی تعیین شد. بر اساس پی‌جویی‌های صورت گرفته

مشخص شد سه معدن فعال (نقاط ۳، ۵ و ۱۱)، شش نواحی امیدبخش معدنی (نقاط ۲، ۴، ۷، ۸، ۹ و ۱۰) و دو منطقه فاقد کانه‌زایی (نقاط ۱ و ۶) کرومیت بود. جهت پی بردن به عیار مناسب و اقتصادی عنصر کروم از دو معدن فعال موجود در منطقه با نام‌های اختصاری S4 و S5 و سه محدوده مستعد کانه‌زایی با نام‌های اختصاری S1، S2 و S3 نمونه شاهد برداشت شد و برای آنالیز و مقایسه به آزمایشگاه ارسال شدند. در شکل ۱۲ نمونه‌های پرعیار کرومیت‌های کشف شده در

منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

در جدول ۲ نتایج بررسی آنالیز (XRF) X-ray fluorescence) در نمونه‌های برداشت شده مشخص شده است. نتایج آنالیز نشان می‌دهد معادن S4 و S5 به ترتیب حاوی ۴۱/۸۸٪ و ۵۳/۹۶٪ Cr_2O_3 و مناطق امیدبخش معدنی S1، S2، و S3 حاوی ۴۹/۰۹٪، ۴۰/۰۲٪ و ۵۲/۴۴٪ Cr_2O_3 است که اثبات کننده عدم وجود تفاوت معنی‌دار از منظر عیار و ارزش اقتصادی ما بین نواحی امیدبخش معرفی شده با نمونه‌های معدن فعال بوده و بطور کلی بیانگر روش صحیح تلفیق و انتخاب درست نقشه‌های معیار می‌باشد.

اعتقاد بر این است که ترکیب شیمیایی بلورهای کرومیت در نهشته‌های کرومیتیتی می‌تواند شاخصی از انواع مختلف ماگما باشد. مقدار TiO_2 در کرومیت‌های منطقه میامی ناچیز است (با میانگین ۰/۱۱۸ درصد)، که یکی از ویژگی‌های کرومیت آلپی است. بنابر شکل ۱۳a کرومیت‌ها منطقه در گستره کرومیت انبانی قرار دارند. با توجه به نتایج بدست آمده از تجزیه‌های شیمیایی و انتقال آن‌ها روی نمودار مثلی ACF محل و موقعیت کانی کرومیت از نظر ترکیب کانی‌شناختی و بر حسب اکسیدهای Al_2O_3 ، Cr_2O_3 و Fe_2O_3 در سنگ مشخص شده است (شکل ۱۳b). چنانچه در شکل ۱۳b نیز مشاهده می‌شود، کانی کرومیت منطقه ترکیبی در حد فروکرومیت دارد که غنی از کروم بوده و از نظر آلومین (Al_2O_3) در حد پایینی قرار دارد.

همبستگی مثبت میان $Cr_2O_3 - CaO$ (شکل ۱۳c) به دلیل پایین بودن نقطه ذوب Ca نسبت به کرومیت است، به همین دلیل کلسیم به صورت گدازه در ماگما باقی می‌ماند و در فازهای بعدی وارد ترکیب پلاژیکولاز و پیروکسن می‌شود. همبستگی ضعیف میان $Cr_2O_3 - SiO_2$ (شکل ۱۳d) حاکی از

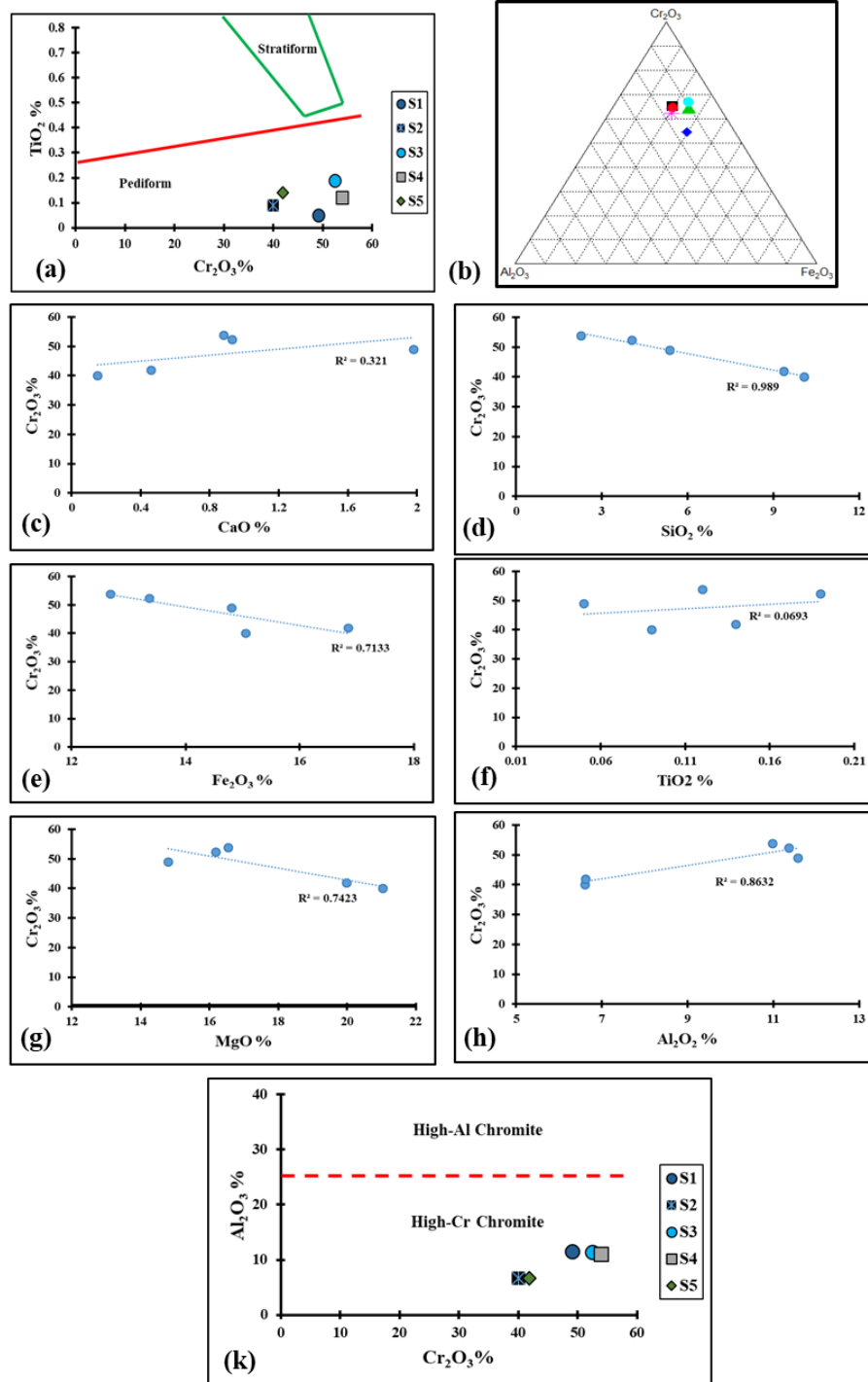
آن است که در اتاقک ماگمایی منطقه میامی تبلور سیلیکاتی بر خلاف تبلور کرومیت عملکردده است لذا عنصر Cr نتوانسته در ساختار کانی‌های سیلیکاتی وارد شود و به صورت اکسید، کانی کرومیت را تشکیل دهد. همبستگی ضعیف $Cr_2O_3 - Fe_2O_3$ (شکل ۱۳e) نشان‌دهنده این است که مگنتیت با کرومیت‌های درون محفظه ماگمایی تبلور هم‌زمان نداشته است. به همین علت کرومیت‌های منطقه میامی فقیر از Fe می‌باشند.

تبلور هم‌زمان مگنتیت با کرومیت درون محفظه ماگمایی و نیز حضور مقادیر چشمگیر Fe در ساختار بلورین کانه کرومیت است. به همین دلیل کرومیت‌های منطقه میامی غنی از آهن بوده و به عبارتی غنی از Cr به‌شمار می‌روند. به علت درجه بالای ذوب Ti، مقداری از این عنصر در ترکیب اولیون وارد شده و نیز هنگام تبلور و ته‌نشست کرومیت و اولیون، مقداری Ti نیز جانشین Fe و وارد کانسنگ شده و موجب بالارفتن درصد Ti در آن می‌شود که این روند باعث همبستگی میان $Cr_2O_3 - TiO_2$ می‌شود (شکل ۱۳f). همبستگی ضعیف $Cr_2O_3 - MgO$ (شکل ۱۳g) احتمالاً به علت وارون بودن تبلور فازهای سیلیکاتی مانند فورستریت با فاز ناسیلیکاتی کرومیت است. در واقع تبلور دو عنصر Cr و Mg بر خلاف یکدیگر انجام می‌شود. عنصر Mg در ساختار سیلیکات‌هایی مانند اولیون‌ها و پیروکسن‌ها شرکت کرده و Cr کانه کرومیت را تشکیل داده و از ماگمای مادر جدا کرده است. همبستگی مثبت و بسیار بالا $Cr_2O_3 - Al_2O_3$ (شکل ۱۳h) احتمالاً به این علت است که حین تشکیل لایه‌های کرومیت (تبلور) آلودگی ماگما توسط مواد غنی از Al و Si از طریق هضم سنگ‌های دیواره‌ای اتاقک ماگمایی رخ داده است و سبب افزایش Al در کرومیت شده است. طبق شکل ۱۳k کرومیت‌های منطقه میامی در گسترده سرشار از کروم قرار می‌گیرند.



شکل ۱۲- نمونه‌های کرومیت پرعیار در منطقه مورد مطالعه

Fig. 12. High-grade chromite sample in the study area.



شکل ۱۳- دیاگرام نمونه‌های کرومیت. (a) نمودار $Cr_2O_3 - TiO_2$ (Zaccarini et al., 2001)، (b) ترکیب کانی‌شناختی (ACF) (Suita and Strieder, 1996)، (c) نمودار همبستگی $Cr_2O_3 - CaO$ ، (d) نمودار همبستگی $Cr_2O_3 - SiO_2$ ، (e) نمودار همبستگی $Cr_2O_3 - Fe_2O_3$ ، (f) نمودار همبستگی $Cr_2O_3 - TiO_2$ ، (g) نمودار همبستگی $Cr_2O_3 - MgO$ ، (h) نمودار همبستگی $Cr_2O_3 - Al_2O_3$ ، (k) نمودار همبستگی $Cr_2O_3 - Al_2O_3$ (Leblance and Violette, 1983).

Fig. 13. Diagrams of chromite samples. (a) Diagram of $Cr_2O_3 - TiO_2$ (Zaccarini et al., 2001), (b) Mineralogical composition (ACF) (Suita and Strieder, 1996), (c) Diagram of $Cr_2O_3 - CaO$ correlation diagram, (d) Diagram of $Cr_2O_3 - SiO_2$ correlation, (e) Diagram of $Cr_2O_3 - Fe_2O_3$ correlation, (f) Diagram of $Cr_2O_3 - TiO_2$ correlation, (g) Diagram of $Cr_2O_3 - MgO$ correlation, (h) Diagram of $Cr_2O_3 - Al_2O_3$ correlation, (k) Diagram of $Cr_2O_3 - Al_2O_3$ correlation, Diagram of Al_2O_3/Cr_2O_3 (Leblance and Violette, 1983).

۵- نتیجه گیری

از آن جا که طرز تشکیل همه ذخایر کرومیت ایران به شکل انبانه‌ای است و از طرفی این نوع کرومیت‌ها در بخش اولترامافیکی توالی‌های افیولیتی یافت می‌شوند، بنابراین اولین گام در پی‌جویی این نوع ذخایر شناسایی کمربندهای افیولیتی است، بنابراین در این نواحی با تحلیل، ترکیب و تلفیق شواهد به دست آمده از منابع مختلفی از داده‌های فضایی (مانند زمین-شناسی، ژئوفیزیک، ژئوشیمی، سنجش از دور) می‌توان به مدلسازی پتانسیل معدنی در هر مقیاسی، از ناحیه‌ای تا محلی، برای شناسایی مناطق امیدبخش پرداخت. پنهان بودن آنومالی‌های ژئوشیمیایی در زمینه باعث عدم توانایی بسیاری از روش‌ها در شناخت الگوهای آنومالی ژئوشیمیایی می‌شود. استفاده از روش‌های پنجره متحرک راه مؤثری در شناخت الگوهای پیچیده ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی است و روش شاخص سینگولاریتی از جمله این روش‌ها بشمار می‌رود. با توجه به اینکه روش شاخص سینگولاریتی (SI) شیب تغییرات نسبی را در فواصل کم مورد ارزیابی قرار می‌دهد، روش مناسبی در شناسایی آنومالی‌های پنهان و ضعیف است که در مطالعه حاضر مورد استفاده قرار گرفته است.

در این مطالعه با بهره‌گیری از لایه‌های اطلاعاتی دگرسانی سرپنتینی، چگالی گسل‌ها، سنگ میزبان، مغناطیس‌سنجی هوابرد، رسوبات آبراهه‌ای و روش منطق فازی در محیط GIS توانستیم در شمال شرق شاهرود ۱۱ محدوده (پلیگون) را به عنوان مناطق با امیدبخش معدنی کرومیت معرفی کنیم. از بین ۱۱ محدوده‌ای که بازدید صحرایی و پی‌جویی در آن‌ها صورت گرفت در ۹ محدوده نمونه‌های کرومیت با عیار بالا کشف شد که این مناطق یا معدن فعال بودند و یا مناطقی بودند که دارای پتانسیل بالا در کانه‌زایی کرومیت بشمار می‌رفت. فقط ۲ محدوده از مناطقی که معرفی شد فاقد شواهد کانه‌زایی کرومیت

بود. بر اساس مشاهدات میدانی مشخص شد از بین نواحی امیدبخش معدنی معرفی شده ۳ محدوده در معدن فعال قرار گرفت، ۶ محدوده امیدبخش معدنی (فاقد آثار معدن‌کاری) و ۲ محدوده هیچگونه شواهدی مبنی بر کانه‌زایی کرومیت در آن پیدا نشد. بر اساس صحت‌سنجی صورت گرفته و بررسی درصد خطا و اطمینان حاصله از روش بکار گرفته در شناسایی نواحی امیدبخش کرومیت در این مطالعه مشخص شد ۱۸/۱۹ درصد روش کار و داده‌های مورد استفاده دارای خطا و ۸۱/۸۱ درصد مقدار اطمینان و دقت آن بشمار می‌رود. بنابراین می‌توان اینگونه نتیجه گرفت با تمام محدودیت‌ها به‌خصوص در بخش داده‌ها مثلاً بهره‌گیری از داده‌های مغناطیس هوابرد با فاصله برداشت ۷/۵ کیلومتر که می‌توانست از فاصله برداشت کم‌تری در این پژوهش استفاده شود یا نمونه‌برداری ژئوشیمیایی به صورت سیستماتیک اما باز هم این روش و داده‌های مورد استفاده در مطالعه حاضر توانست به‌طور قابل قبولی مناطقی که شواهد کانه‌زایی کرومیت در آن وجود دارد را پیش‌بینی کند.

مطالعات ژئوشیمی نشان داد که مقادیر Al_2O_3 ، MgO ، TiO_2 ، Fe_2O_3 و Cr_2O_3 با کرومیت‌های تیپ انبانه‌ای همخوانی دارد و کرومیت‌های منطقه غنی از Cr و تا حدودی Fe و فقیر از Al می‌باشند. در این پژوهش از روش Fuzzy-GAMMA برای تولید نقشه‌های شاهد به منظور پتانسیل‌یابی ذخایر کرومیت در کمر بند افیولیتی شمال شرق شاهرود استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار از لحاظ شناسایی مناطق با پتانسیل کرومیت عملکرد قابل قبولی از خود نشان دادند چرا که مناطق با پتانسیل مشخص شده از نظر عیار اقتصادی کروم تفاوت چندانی با معادن منطقه مورد مطالعه ندارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل پتانسیل تولید شده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار برای هدف‌های اکتشافی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در منطقه مورد مطالعه، مناسب و قابل اعتماد می‌باشند.

مراجع

- Abdelkareem, M., Al-Arifi, N. 2021. Synergy of remote sensing data for exploring hydrothermal mineral resources using GIS-based Fuzzy Logic approach. *Remote Sensing* 13(22), 4492. <https://doi.org/10.3390/rs13224492>
- Adebiyi, L.S., Eluwole, A.B., Fajana, A.O., Salawu, N.B., Falade, S.C., Dopamu, K.O., Alejlowo, E.A., 2022. Integrated geophysical methods for delineating crustal structures and hydrothermal alteration zones for mineral exploration projects in parts of west-central, Nigeria. *Modeling Earth Systems and Environment* 8(3), 2977-2989. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01275-5>

- Afzal, P., Yusefi, M., Mirzaie, M., Ghadiri-Sufi, E., Ghasemzadeh, S., Daneshvar Saein, L. 2019. Delineation of podiform-type chromite mineralization using geochemical mineralization prospectivity index and staged factor analysis in Balvard area (SE Iran). *Journal of Mining and Environment* 10(3), 705-715. <https://doi.org/10.22044/jme.2019.8107.1678>
- Agterberg, F.P., 2012. Multifractals and geostatistics. *Journal of Geochemical Exploration* 122, 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.04.001>
- Baseri, F., Nezafati, N. 2021. Structural and Chemical Controllers of the North and Northwest of Torud Based on Involved Fluid Studies, Structural and Geochemical Analyses. *Tehnički Glasnik* 15(3), 339-349. <https://doi.org/10.31803/tg-20201216121436>
- Berger, B.R., Ayuso, R.A., Wynn, J.C., Seal, R.R., 2008. Preliminary model of porphyry copper deposits. US geological survey open-file report 1321, 55.
- Bonham-Carter, G.F., 1994. Geographic Information Systems for geoscientists modeling with GIS, *Computer methods in the geoscientists* 13, 398.
- Borojerdnia, A., Rozbahani, M.M., Nazarpour, A., Ghanavati, N., Payandeh, K., 2020. Application of exploratory and Spatial Data Analysis (SDA), singularity matrix analysis, and fractal models to delineate background of potentially toxic elements: A case study of Ahvaz, SW Iran. *Science of the Total Environment* 740, 140103. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140103>
- Bröcker, M., Omrani, H., Berndt, J., Moslempour, M.E. 2021. Unravelling metamorphic ages of suture zone rocks from the Sabzevar and Makran areas (Iran): Robust age constraints for the larger Arabia–Eurasian collision zone. *Journal of Metamorphic Geology* 39(9), 1099-1129. <https://doi.org/10.1111/jmg.12603>
- Cheng, Q., 2007. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. *Ore Geology Reviews* 32(1-2), 314-324. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.10.002>
- El Janati, M., 2019. Application of remotely sensed ASTER data in detecting alteration hosting Cu, Ag and Au bearing mineralized zones in Taghdout area, Central Anti-Atlas of Morocco. *Journal of African Earth Sciences* 151, 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.12.002>
- Eslami, A., Malvoisin, B., Brunet, F., Kananian, A., Bach, W., et al., 2021. Podiform magnetite ore (s) in the Sabzevar ophiolite (NE Iran): oceanic hydrothermal alteration of a chromite deposit. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 176(6), 1-23. <https://doi.org/10.1007/s00410-021-01799-0>
- Freitas Suito, M.T.D., Srieder, A.J., 1996. Cr-spinels from Brazilian mafic-ultramafic complexes: metamorphic modifications. *International Geology Review* 38(3), 245-267. <https://doi.org/10.1080/00206819709465333>
- Garuti, G., Bea, F., Zaccarini, F., Montero, P. 2001. Age, geochemistry and petrogenesis of the ultramafic pipes in the Ivrea Zone, NW Italy. *Journal of Petrology* 42(2), 433-457. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.2.433>
- Ghezelbash, R., Maghsoudi, A., 2018. A hybrid AHP-VIKOR approach for prospectivity modeling of porphyry Cu deposits in the Varzaghan District, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 11(11), 275. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3624-1>
- Gunn, P.J., Maidment, D., Milligan, P.R., 1997. Interpreting aeromagnetic data in areas of limited outcrop. *AGSO Journal of Australian geology and geophysics* 17, 175-186.
- Hedayat, B., Ahmadi, M.E., Nazerian, H., Shirazi, A., Shirazy, A. 2022. Feasibility of Simultaneous Application of Fuzzy Neural Network and TOPSIS Integrated Method in Potential Mapping of Lead and Zinc Mineralization in Isfahan-Khomein Metallogeny Zone. *Open Journal of Geology* 12(3), 215-233. <https://doi.org/10.4236/ojg.2022.123012>
- Jafari, MA., Nazarpour, A., Rostami Paydar, G., 2021a. Application of Singularity Index (SI), Fuzzy-Gamma and AHP methods for Pb-Zn Prospecting in the Khondab sheet, Malayer-Isfahan Metallogenic Zone, Iran. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 31(4), 79-96. <https://doi.org/10.22071/gsj.2021.250481.1848>
- Jafari, M.A., Nzarpour, A., Kananian, A., 2020. Comparison accuracy of Fuzzy-GAMMA and analytical hierarchy process (AHP) two methods with the potential detection of Cu metal in Malayer-Aligoudarz-Esfahan metallogenic zone. *Journal of Advanced Applied Geology* 10(3), 314-327. <https://doi.org/10.22055/aag.2020.30222.2011>

- Jafari, M., Amini, M., Nazarpour, A., Golriz, M., 2022. Identification of hidden mineral deposits using airborne magnetic data in the Malayer-Esfahan metallogenic belt (MEMB), Iran. *Advanced Applied Geology*, 12(3), 502-519. <https://doi.org/10.22055/aag.2021.36501.2199>
- Leblanc, M., Violette, J.F., 1983. Distribution of aluminum-rich and chromium-rich chromite pods in ophiolite peridotites. *Economic Geology* 78(2), 293-301. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.78.2.293>
- Malaekheh, A., Ghassemi, M.R., Afzal, P., Solgi, A., 2021. Fractal modeling and relationship between thrust faults and carbonate-hosted Pb-Zn mineralization in Alborz Mountains, Northern Iran. *Geochemistry* 81(4), 125803. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2021.125803>
- Moghaddasi, S.J., Yazdi, J., 2015. Geology and formation of titaniferous placer deposits in Upper Jogaz Valley area, Fanuj, Sistan and Baluchestan province, Iran. *Journal of Economic Geology* 7(2), 327-341. <https://doi.org/10.22067/econg.v7i2.28197>
- Najafi, A., Karimpour, M.H. and Ghaderi, M., 2014. Application of fuzzy AHP method to IOCG prospectivity mapping: A case study in Taherabad prospecting area, eastern Iran, *International journal of applied earth observation and geoinformation* 33, 142-154. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.05.003>
- Nazarpour, A., Paydar, G.R., Mehregan, F., Hejazi, S.J., Jafari, M.A., 2022. Application of geographically weighted regression (GWR) and singularity analysis to identify stream sediment geochemical anomalies, case study, Takab Area, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 235, 106953. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.106953>
- Pirajno, F., Cawood, P.A., 2009. Hydrothermal processes and mineral systems (No. 553.7 PIR). Springer/Geological Survey of Western Australia. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8613-7_11
- Prior, Á., Benndorf, J., Mueller, U., 2021. Resource and grade control model updating for underground mining production settings. *Mathematical Geosciences* 53(4), 757-779. <https://doi.org/10.1007/s11004-020-09881-2>
- Rahmani, F., Mackizadeh, M.A., Noghreyan, M., Marchesi, C., Garrido, C.J., 2020. Petrology and geochemistry of mafic and ultramafic cumulate rocks from the eastern part of the Sabzevar ophiolite (NE Iran): Implications for their petrogenesis and tectonic setting. *Geoscience Frontiers* 11(6), 2347-2364. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.02.004>
- Rajabzadeh, M.A., Ghasemkhani, E., Khosravi, A., 2015. Biogeochemical study of chromite bearing zones in Forumad area, Sabzevar ophiolite, Northeastern Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 151, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.01.002>
- Rajendran, S., Nasir, S., 2014. Hydrothermal altered serpentinitized zone and a study of Ni-magnesioferrite-magnetite-awaruite occurrences in Wadi Hibi, Northern Oman Mountain: discrimination through ASTER mapping *Ore Geology Reviews* 62, 211-226. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.03.016>
- Rouskov, K., Popov, K., Stoykov, S., Yamaguchi, Y., 2005. Some applications of the remote sensing in geology by using of ASTER images. In Scientific Conference "SPACE, ECOLOGY, SAFETY", pp. 167-173.
- Sabins, F.F., 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews* 14, 157-183. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(99\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4)
- Soleimani, M., Shokri, B.J., 2016. Intrinsic geological model generation for chromite pods in the Sabzevar ophiolite complex, NE Iran. *Ore geology reviews* 78, 138-150. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.03.013>
- Solgi, E., Parmah, J., 2015. Analysis and assessment of nickel and chromium pollution in soils around Baghejar Chromite Mine of Sabzevar Ophiolite Belt, Northeastern Iran. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 25(7), 2380-2387. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63853-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63853-5)
- Taghipour, B., Shabani, S., Somarin, A.K., 2021. Geochemistry of platinum-group elements in the podiform chromitites and associated peridotites of the Nain ophiolites, Central Iran: Implications for geotectonic setting. *Acta Geochimica*, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s11631-021-00464-4>
- Tan, R.R., Aviso, K.B., Huelgas, A.P., Promentilla, M.A.B., 2014. Fuzzy AHP approach to selection problems in process engineering involving quantitative and qualitative aspects. *Process Safety and Environmental Protection* 92(5), 467-475. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2013.11.005>
- Ukhurebor, K.E., Aigbe, U.O., Onyancha, R.B., Nwankwo, W., Osibote, O.A., Paumo, H.K., Ama, O.M., Adetunji, C.O., Siloko, I.U., 2021. Effect of hexavalent chromium on the environment and removal

- techniques: a review. *Journal of Environmental Management* 280, p.111809. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111809>
- Vaziri, A., Nazarpour, A., Ghanavati, N., Babajnejad, T., Watts, M.J., 2021. An integrated approach for spatial distribution of potentially toxic elements (Cu, Pb and Zn) in topsoil. *Scientific Reports* 11(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00994-z>
- Xiao, F., Chen, J., Hou, W., Wang, Z., Zhou, Y., Erten, O., 2018. A spatially weighted singularity mapping method applied to identify epithermal Ag and Pb-Zn polymetallic mineralization associated geochemical anomaly in Northwest Zhejiang, China. *Journal of Geochemical Exploration* 189, 122-137. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.03.017>
- Yaghoubpour, A., Hassannejad, A.A., 2006. The spatial distribution of some chromite deposits in Iran, using Fry analysis.
- Yang, C., Liu, S.A., Zhang, L., Wang, Z.Z., Liu, P.P., Li, S.G., 2021. Zinc isotope fractionation between Cr-spinel and olivine and its implications for chromite crystallization during magma differentiation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 313, 277-294. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.08.005>
- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets. *Information and control* 8(3), 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zhang, N., Zhou, K., Du, X., 2017. Application of fuzzy logic and fuzzy AHP to mineral prospectivity mapping of porphyry and hydrothermal vein copper deposits in the Dananhu-Tousuquan island arc, Xinjiang, NW China. *Journal of African Earth Sciences* 128, 84-96. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.12.011>
- Zuo, R., Wang, J., Chen, G., Yang, M., 2015. Identification of weak anomalies: A multifractal perspective. *Journal of Geochemical Exploration* 148, 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.05.005>