

Research Article

## Modeling of porphyry copper-gold deposits in Zaviyeh 1:100000 sheet area using the combination of fuzzy logic and processing of Aster and Sentinel 2A images

Maryam Babazadeh<sup>1</sup>, Seyedeh Narges Sadati<sup>2\*</sup>, Aida Mohebbi<sup>3</sup>

1- Department of Geology, Faculty of Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Associated professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3- Geological Survey and Mineral Exploration of Iran

**Keywords:** *Band ratio, Aster, Sentinel, Alteration, Modeling*

### 1-Introduction

Alteration halos are used as a guide for the exploration of minerals, especially in porphyry systems, and by recognizing and identifying the characteristics of alteration halos, especially the types of phyllic, argillic, propylitic, and potassic alteration, it is possible to understand their relationship with porphyry deposits (Gupta, 2003). Modeling ore deposits has always been one of the most important research topics (Zhang et al., 2017; Fatehi et al., 2017; Moradpouri et al., 2021). Modelling can be considered a method of simplification, generalization, and facilitation to recognize events with common characteristics. According to the definition, if the representative data of a deposit type's most general descriptive features are arranged systematically and standardized, its descriptive model is obtained. Previously, deposits were mostly modeled based on their origin, so many did not have the necessary exploration efficiency. Therefore, the degree of comprehensiveness of an ore model can be evaluated from its degree of comprehensiveness. The degree of comprehensiveness is the ability to include and cover as many known deposits of the same type as possible with a model with full standard features. This research introduces areas prone to mineralization after integrating remote sensing and geological information using fuzzy logic and the Index overlay method.

### 2-Material and methods

This research used Aster and Sentinel 2 sensor images to recognize alteration. Also, geochemical data of 13 elements, including copper, iron, zinc, lead, cobalt, nickel, antimony, gold, silver, sulfur, molybdenum, manganese, and arsenic, were prepared to identify the geochemical patterns in the selected area, and a geochemical map was prepared. Ultimately, the exploration data were integrated using the fuzzy logic method in the GIS environment, the mineral potential map was obtained, and the most optimal mineralized zone was presented for additional explorations. Fuzzy logic and Index overlay methods have been used in this research.

### 3-Results and discussions

In this research, the results of remote sensing data processing, including vegetation cover and all alteration types, were compared with geological units on the map and field visits to check and control accurately. Field studies confirmed the results obtained from satellite images. Considering that in the scope of the study, the goal was to highlight the altered and mineralized areas, after highlighting the alteration results obtained from the processing of satellite images, to find the potential of places prone to mineralization, data integration, and modelling method is used. A potential porphyry copper-gold deposit map is prepared (Fig.1) using geological data, geochemistry of stream sediments, faults, etc.

\* Corresponding author: sadati\_sn@uma.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2023.42851.2341

Received: 2023-01-23

Accepted: 2023-06-20

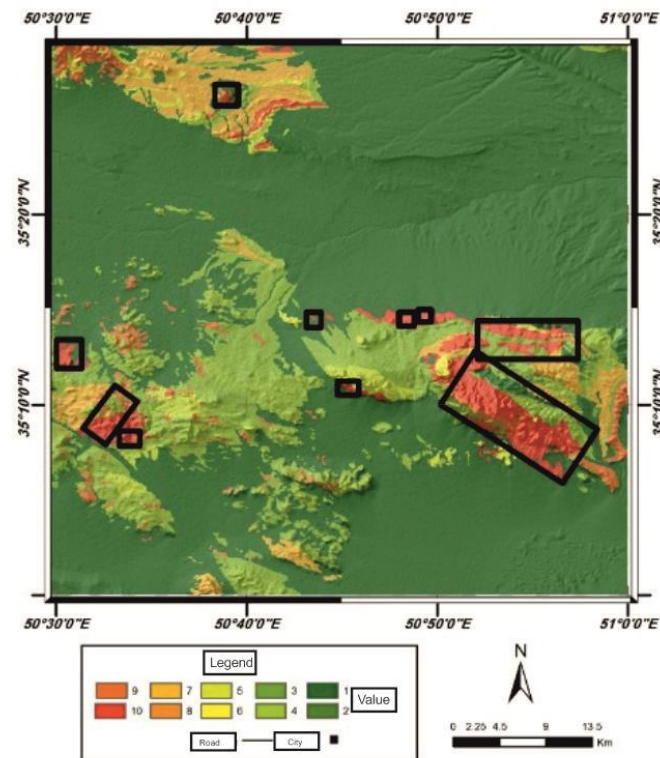


Fig.1. Map of potential porphyry copper-gold deposit based on valued information layers

#### 4-Conclusion

Cenozoic rock units are the most widespread in the region and include Eocene, Oligocene, and Miocene units. In the exposed units in the mining area, the age of the sedimentary-volcanic unit is related to the Eocene, and the semi-deep porphyry unit is associated with the post-Eocene. Changes observed in the study area include propylitic, phyllic, argillic, siliceous, carbonate, and iron oxide alterations. Integration of image processing results with geological layers, geochemical data of stream sediments, and density of lineaments has shown that the southern areas of the 100000 Zaviyeh sheet seem more prone to finding porphyry copper-gold deposits. According to field studies in some regions, malachite staining was observed on the alteration units, especially the phyllic zone.

#### 5-References

- Fatehi, M., Asadi, H., 2017. Application of semi-supervised fuzzy c-means method in clustering multivariate geochemical data, a case study from the Dalli Cu-Au porphyry deposit in central Iran. *Ore Geology Reviews*, 81, 245-255. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.002>.
- Gupta, R.P., 2003. *Remote Sensing Geology*. Springer-Verlag. P. 656. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-05283-9.8>.
- Moradpouri, F., hayati M., 2021. A copper porphyry promising zones mapping based on the exploratory data, multivariate geochemical analysis and GIS integration. *Applied Geochemistry*, 132, 105051, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105051>.
- 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>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Babazadeh, M., Sadati, N., Mohebbi, A., 2023. Modeling of porphyry copper-gold deposits in Zaviyeh 1:100000 sheet area using the combination of fuzzy logic and processing of Aster and Sentinel 2A images. Adv. Appl. Geol. 13(3), 857-876.

DOI: 10.22055/AAG.2023.42851.2341

[https://aag.scu.ac.ir/article\\_18601.html](https://aag.scu.ac.ir/article_18601.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

## مدلسازی کانسارهای مس - طلا پورفیری در محدوده زاویه با استفاده از تلفیق منطق فازی و پردازش تصاویر استر و سنتینل 2A

مریم بابازاده

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

سیده نرگس ساداتی

دانشیار گروه زمین شناسی دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی اردبیل ایران

آیدا محبی

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران

sadati\_sn@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۰

### چکیده

محدوده مورد مطالعه در برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ زاویه قرار دارد و بخش‌هایی از استان تهران، قم و مرکزی را دربرمی‌گیرد. واحدهای زمین شناسی مربوط به دوران مزوزئیک و سنوزوئیک در این پهنه وجود دارد، سنگ‌های آذرین آتشفشانی اتوسن و جوانتر از آن به صورت تناوبی از سنگ‌های اسیدی با ترکیب داسیتی تا ریولیتی و سنگ‌های متوسط تا بازیک آندزیتی تا آندزیت-بازالت می‌باشد. سنگ‌های آذرین موجود در گستره ورقه زاویه بخشی از کمربند ماگمایی ارومیه دختر محسوب می‌شوند که میزبان مناسبی برای کانسارهای مس پورفیری هستند. از آنجا که دگرسانی‌ها راهنمای اکتشافی خوبی برای شناسایی پورفیری‌ها هستند، در این پژوهش با استفاده از تصاویر سنجنده استر و سنتینل ۲ انواع دگرسانی‌های گرمایی موجود در منطقه از قبیل دگرسانی آرژیلیک، فیلیک، پروپیلیتیک، سیلیسی، کربناته و اکسید آهن مورد بررسی قرار گرفته‌اند و با استفاده از تکنیک‌هایی مانند ترکیب رنگی، نسبت باندی و ... انواع دگرسانی‌ها آشکارسازی شده‌اند. نتایج پردازش تصاویر حاصل از سنجنده استر و سنتینل نشان داد که خروجی تصاویر حاصله از ماهواره استر برای شناسایی انواع کانی‌های رسی و خروجی تصاویر سنتینل ۲ در بارسازی اکسیدهای آهن قابلیت اطمینان بالایی دارد. ازسوی دیگر امروزه سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و منطق فازی در تلفیق و مدلسازی داده‌ها نقش بسیار مهمی در اکتشاف و تخمین ذخایر معدنی برای معرفی مناطق امیدبخش معدنی پیدا کرده است. از این رو در این پژوهش پس از تلفیق اطلاعات دورسنجی و زمین‌شناسی با استفاده از منطق فازی و روش Index overlay مناطق مستعد کانه‌زایی شناسایی گردید و بر اساس مشاهدات صحرایی در برخی نقاط تعیین‌شده کانه‌زایی مس به صورت آغستگی‌های مالاکیت مشاهده شد.

**واژه‌های کلیدی:** نسبت باندی، استر، سنتینل، دگرسانی، مدلسازی

### ۱- مقدمه

رنگ و بافت سنگ‌های دیواره همراهِ می‌باشد. شدت و گسترش دگرسانی‌ها به عواملی چون حجم محلول‌های گرمایی و ماگمایی، میزان درز و شکاف و تخلخل، دما و فشار و میزان واکنش‌پذیری سنگ میزبان بستگی دارد (Lindsay et al., 2014, Sadigh et al., 2023). سنگ‌های ولکانیکی به دلیل تخلخل و واکنش‌پذیری بالا نسبت به سنگ‌های پلوتونیک بیشتر مستعد دگرسانی هستند، به طوری که دگرسانی‌های معمول گرمایی (پتاسیک، پروپیلیتیک، سیریسیتیک و آرژیلیک) در

هدف از بررسی زمین‌شناسی یک منطقه معدنی، مطالعه واحدهای سنگی، روابط آن‌ها، زمین‌ساخت، دگرسانی‌ها و ارتباط دادن هر یک از این پدیده‌ها با کانی‌سازی است. با بررسی این حوادث و ویژگی‌ها می‌توان به موقعیت مکانی و زمانی دگرسانی و کانه‌زایی و پی‌جویی آن‌ها در نقاط مشابه دیگر شناخت پیدا کرد. دگرسانی نتیجه کنش و واکنش سیالات گرمایی با سنگ‌های مجاور می‌باشد که با تغییرات شیمیایی، کانی‌شناسی،

کانه‌زایی در منطقه آلوت کردستان را به انجام رساندند و نقشه‌های حاصل به صورت رقومی و ژئوکد شده وارد پایگاه داده‌ها شد و در نهایت نقشه پتانسیل‌سنجی طلا بر اساس روش فازی تهیه کردند. همچنین Salimi (۲۰۰۹) مدلسازی و تلفیق داده‌های اکتشافی در محیط GIS جهت تهیه نقشه پتانسیل مطلوب ذخایر مس پورفیری در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ جبال بارز را انجام دادند و برای ارائه مدل یا تشخیص الگویی مناسب جهت تهیه نقشه پتانسیل مطلوب از ترکیب روش‌های سنتی زونالیت‌ها و نوین لایه‌های وزن دار و منطق فازی در محیط GIS استفاده کردند. مطالعه دیگری توسط Amin Ahmadi (2010) با عنوان پتانسیل‌یابی کانی‌سازی مس در کمربند متالوژنی کرمان با استفاده از تلفیق داده‌های اکتشافی در محیط GIS انجام شد که در آن با مقایسه روش‌های مختلف مدلسازی به این نتیجه رسیدند که مدل روش فازی به دلیل سازگاری با ساختار زمین‌شناسی، با واقعیت تطبیق بیشتری داشته و روش بهتری در پتانسیل‌یابی در محیط GIS می‌باشد. Afzali (2016) از این تکنیک برای مدل‌سازی کانسارهای سرب و روی رباط و حسین‌آباد خمین استفاده کردند و با استفاده از تلفیق داده‌های اکتشافی ژئوفیزیکی، لیتولوژی و عیارسنجی و با توجه به نوع و میزان اطلاعات اکتشافی موجود در منطقه، روش دانش‌محور منطق فازی را مورد استفاده قرار دادند. در سالیان اخیر پژوهشگران زیادی در مطالعات خود نشان داده‌اند که سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و منطق فازی در تلفیق و مدلسازی داده‌ها نقش بسیار مهمی در اکتشاف و تخمین ذخایر معدنی برای معرفی مناطق امیدبخش معدنی پیدا کرده است (Zhang et al., 2017, Fatehi et al., 2017, Moradpouri et al., 2021). مدلسازی رخدادهای طبیعی و روابط علت و معلولی مرتبط با آن‌ها همواره یکی از مهم‌ترین موضوعات مورد پژوهش بوده است (Hasani Pak and Shojaat., 2000). مدلسازی را می‌توان روش ساده‌سازی، کلی‌نگری و سهولت بخشی برای شناخت رخدادهایی دانست که دارای ویژگی‌های مشترک می‌باشند (Carter, 1994). بنابه‌تعریف اگر داده‌های معرف عمومی‌ترین ویژگی‌های توصیفی یک تیپ کانسار به طور سیستماتیک و استاندارد مرتب گردد، مدل توصیفی آن بدست می‌آید. بنابراین در مدل توصیفی کانسارها فقط شناخت ویژگی‌های عمومی و کلی کانسار بدون بررسی روابط علت شناختی آن‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد (Demico and Klir., 2004). از طرف دیگر یک مدل کانساری ممکن است از

آن‌ها به‌خوبی گسترش و توسعه می‌یابد، اما در سنگ‌های پلوتونیک به‌دلیل واکنش‌پذیری کم، بیشتر دگرسانی پتاسیک رخ می‌دهد (Lindsay et al., 2014). هاله‌های دگرسانی به‌عنوان راهنمای اکتشاف مواد معدنی به‌ویژه در سیستم‌های پورفیری به‌کار می‌روند و با تشخیص و شناسایی خصوصیات هاله‌های دگرسانی به‌ویژه انواع دگرسانی فیلیک، آرژیلیک، پروپیلیتیک و پتاسیک می‌توان به ارتباط آن‌ها با کانسارهای پورفیری پی برد (Gupta, 2003). در سال‌های اخیر مطالعات زیادی برای شناسایی دگرسانی‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای صورت گرفته است (Van der Werff and Van der Meer., 2016, Gupta., 2018, Khaleghi et al., 2020). Beiranvand Pour و همکاران (۲۰۱۲) به تفکیک زون‌های دگرسانی مرتبط با کانسارهای مس پورفیری میدوک و سرچشمه در کمربند آتشفشانی ارومیه دختر با استفاده از داده‌های Level-1B سنجنده استر پردا ختند. آن‌ها از روش‌های SAM، MF، LSU و MTMF در محدوده طیفی مادون قرمز طول موج کوتاه استفاده کردند و زون‌های دگرسانی فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک را بارزسازی کردند و مناطق دارای دگرسانی فیلیک را به عنوان مناطق با پتانسیل بالا برای کانه‌زایی مس پورفیری معرفی کردند. Beiranvand Pour و Hashim (۲۰۱۱) به بررسی داده‌های استر با استفاده از روش‌های نسبت بانندی، MNF و PCA بر روی کانسارهای بزرگ مس پورفیری میدوک و سرچشمه در ایران پرداختند. با استفاده از روش PCA پوشش گیاهی و اکسیدهای آهن، کانی‌های رسی و سنگ‌های غنی از سیلیس بارزسازی شد. نتایج این روش در این مطالعه با استفاده از روش‌های نسبت بانندی و MNF تایید شد و اطلاعات مفیدی در ارتباط با محدوده مورد مطالعه از تصاویر خروجی استخراج شد (Beiranvand Pour, B.A., Hashim, M. 2012). Gholami (۲۰۰۲) تحلیل و مدلسازی داده‌های ژئوفیزیکی (IP, Rs, M) و تلفیق آن‌ها با سایر داده‌های اکتشافی در اندیس معدنی مس سوناجیل را انجام داد و در نهایت با مقایسه نتایج ژئوفیزیکی با نقشه‌های حاصل از مطالعات ژئوشیمیایی (به طریق رسوبات آبراهه‌ای) و با در نظر گرفتن نتایج مدلسازی ژئوفیزیکی، مناطقی جهت ادامه کارهای اکتشافی، همچنین نقاطی برای حفاری پیشنهاد داده است. Maroufi Naghdehi (۲۰۰۵) مطالعات ژئوشیمیایی و دورسنجی و تلفیق آن‌ها با اطلاعات زمین‌شناسی در GIS برای مدلسازی طلای تیپ اپی‌ترمال و شناسایی نواحی امیدبخش

یکصد هزار زاویه مربوط به زمان نوزیستی است و سنگ‌های قدیمی‌تر از آن در منطقه مشاهده نمی‌شود. جدایش و پراکندگی برونزدهای سنگ‌های آتشفشانی ائوسن که کهن‌ترین برونزدهای ورقه زاویه را تشکیل می‌دهند به نحوی است که به علت ویژگی‌های آتشفشانی آن و تغییرات سریع رخساره‌های سنگی، ارتباط واحدها را مشکل می‌نماید. گاهی این برونزدها توسط پهنه‌های وسیع از رسوبات جوان جدا می‌شوند و ارتباط دادن واحدها چندان ساده نیست. در گستره ورقه زاویه سنگ‌های آذرین موجود بخشی از کمر بند ماگمایی ارومیه دختر محسوب می‌شوند که برخی از آن‌ها در شرایط قاره ای و برخی در دریایی کم عمق تشکیل شده‌اند (Amidi et al, 1385). سنگ‌های آذرین آتشفشانی ائوسن و جوانتر از آن به صورت تناوبی از سنگ‌های اسیدی با ترکیب داسیتی تا ریولیتی و سنگ‌های متوسط تا بازیگ آندزیتی تا آندزیت-بازالت می‌باشد که می‌توان نمونه‌ای از این تناوب را در مجموعه سنگ‌های اسیدی روشن و آندزیت - بازالتی در مرکز و جنوب غربی ورقه زاویه مشاهده کرد (شکل ۱).

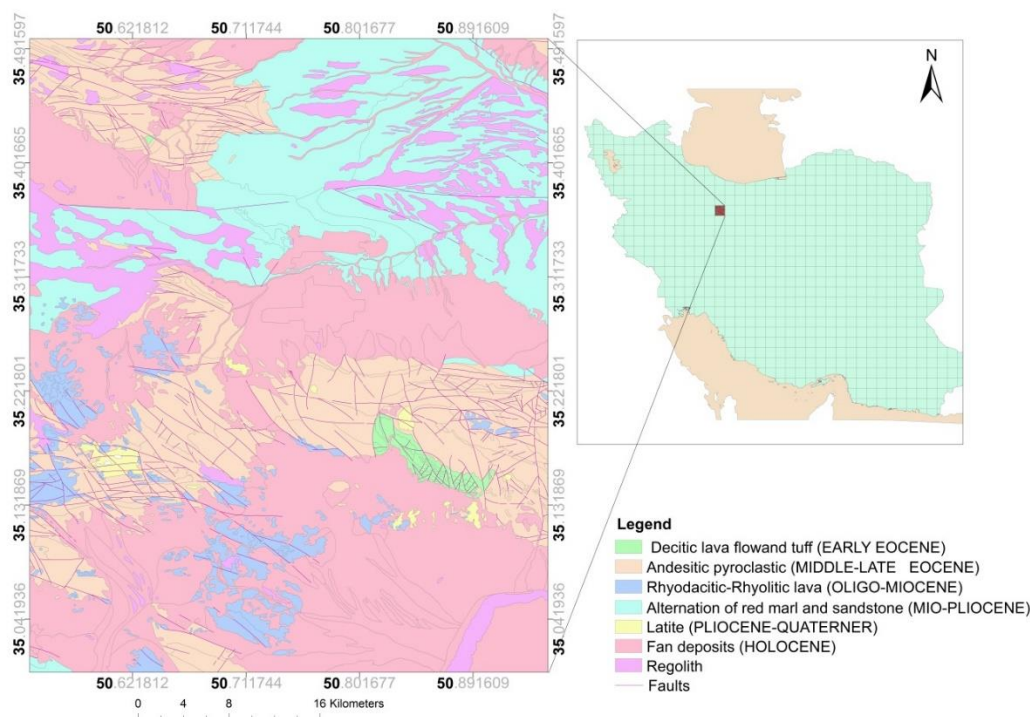
### ۳- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از تصاویر سنجنده استر و سنتینل ۲ برای آشکارسازی دگرسانی‌ها استفاده کردیم. برای آشکارسازی دگرسانی‌ها ابتدا پیش پردازش بر روی تصاویر مذکور صورت گرفت. از آنجا که این تصاویر در سطحی تهیه شده‌اند که نیاز به انجام تصحیحات هندسی نمی‌باشد، تنها تصحیحات رادیومتریک بر روی آن‌ها اعمال گردید. با توجه به ویژگی‌های جغرافیایی در مناطق گرم و خشک ایران بهترین و کارآمدترین روش برای حذف اثرات جوی تصاویر ماهواره‌ای، کالیبراسیون بازتاب نسبی متوسط داخلی (Internal Average Relative Reflectance, IARR) می‌باشد که به خوبی توانسته است کانی‌های موجود در دگرسانی‌های گرمابی را شناسایی کند. در روش IARR یا میانگین نسبی بازتاب‌ها، میانگین بازتاب پیکسل‌های تصویر محاسبه می‌شود و مقادیر شدت بازتابش هر پیکسل بر میانگین پیکسل‌های تصویر تقسیم می‌گردد، عدد به دست آمده برای هر پیکسل طیف بازتاب نسبی و نرمالیزه شده آن پیکسل خواهد بود (Javizadeh et al., 2017). در این پژوهش از روش میانگین بازتاب نسبی درونی (IARR)

نوع ژنتیکی و یا عددی باشد. در مدل ژنتیکی روابط علت و معلولی براساس محتمل‌ترین فرایندهای کانه‌ساز مورد بررسی و توجیه قرار می‌گیرد. در مدل‌های عددی پس از تمیز ویژگی‌های اساسی هر تیپ کانسار به هر یک براساس بررسی‌های آماری چندمتغیره وزن مناسبی داده می‌شود و سپس مجموع این اوزان عددی را به عنوان مشخصه آن تیپ کانسار معرفی می‌کند. بدون مدلسازی تخمین قابل قبولی از احتمال پیدایش یک تیپ کانسار خاص در یک محیط معین امکان پذیر نمی‌باشد (Mihi et al., 2022). قبلاً، مدلسازی کانسارها بیشتر براساس منشأ آن‌ها صورت می‌گرفت و به همین دلیل بسیاری از آن‌ها کارایی اکتشافی لازم را نداشتند. میزان جامعیت یک مدل کانساری را می‌توان از درجه تمام‌شمولی آن ارزیابی کرد. درجه تمام‌شمولی در واقع قابلیت دربرگیری و پوشش هر چه بیشتر کانسارهای شناخته شده هم‌تیپ با مدلی با حداکثر ویژگی‌های مشترک می‌باشد (Demico and Klir., 2004, Dumitras and Moschytz., 2007, Mihi et al., 2022). یکی دیگر از ویژگی‌های مدل‌های قبلی طبقه‌بندی آن‌ها براساس نوع ماده معدنی با ارزش اقتصادی بوده است. چنین مدل‌هایی ممکن است از نظر اقتصاد معدنی ارزشمند باشد، ولی چون کانسارهایی با ژنز مختلف را در برمی‌گیرد، کاربرد اکتشافی چندان ندارد. با توجه به ویژگی‌های خاص زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، پتانسیل‌های معدنی (فلزی و غیرفلزی) وجود دارد که با اکتشافات نیمه تفصیلی قابل ردیابی است. در این پژوهش پس از تلفیق اطلاعات دورسنجی و زمین‌شناسی با استفاده از منطق فازی و روش Index overlay، مناطق مستعد کانه‌زایی معرفی می‌گردد.

### ۲- زمین‌شناسی

محدوده مورد مطالعه در برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ زاویه واقع شده که بخش‌هایی از استان‌های مرکزی، تهران و قم را در برمی‌گیرد (شکل ۱). از لحاظ ساختاری بخش عمده محدوده مورد مطالعه در زون ایران مرکزی واقع شده است، همچنین سنگ‌های آتشفشانی مربوط به کمان ماگمایی ارومیه دختر (مجموعه‌ای از سنگ‌های آذرین نفوذی، ولکانیکی و آذرآواری با سن ترشیاری) نیز در این زون به وفور مشاهده می‌شوند. این سنگ‌های آتشفشانی بخشی از یک کمان ماگمایی است که از شمال باختر ایران آغاز و تا کوه‌های بزمان در جنوب خاور ایران ادامه پیدا می‌کند. سنگ‌ها و سازندهای موجود در برکه



شکل ۱- نقشه ایران و موقعیت نقشه زمین شناسی ساده شده برگه ۱۰۰ هزار زاویه بر روی آن (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور) (Amidi et al., 2005)

Fig. 1. Iran map and simplified geological map of Zaviyeh 1:100000 sheet area (Geological survey & mineral explorations of Iran) (Amidi et al., 2005).

سنتینل پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه بارسازی و حذف گردید. سپس در مرحله تلفیق و مدلسازی از بانک اطلاعات داده های زمین شناسی (نقشه یکصد هزار زاویه)، سنجش از دور و ژئوشیمیایی در محیط GIS، استفاده گردید. برای تفکیک واحدهای سنگی موجود در منطقه و شناسایی گسل ها از داده های زمین شناسی استفاده گردید. برای شناسایی و تفکیک دگرسانی های فیلیکی، پروپلیتیکی، آرژیلیکی، اکسید آهن و سیلیسی در منطقه از تصاویر ماهواره ای Aster و Sentinel-2A استفاده شد. همچنین داده های ژئوشیمیایی ۱۳ عنصر شامل مس، آهن، روی، سرب، کبالت، نیکل، آنتیموان، طلا، نقره، گوگرد، مولیبدن، منگنز و آرسنیک برای شناسایی الگوهای ژئوشیمیایی موجود در منطقه انتخاب و نقشه ی ژئوشیمیایی تهیه گردید. در پایان داده های اکتشافی به وسیله ی روش منطق فازی در محیط GIS تلفیق و نقشه ی پتانسیل معدنی حاصل گردید و بهترین زون کانی سازی شده برای اکتشافات تکمیلی ارائه گردید. در این پژوهش از منطق فازی و روش Index overlay، استفاده شده است. در این روش چند لایه اطلاعاتی که هر یک دارای دسته بندی

برای اعمال تصحیح رادیومتری استفاده گردید. در مرحله بعد چون محدوده مورد مطالعه در چند سین تصویر ماهواره ای قرار گرفته است، برای یکپارچه سازی تصویر از موزاییک تصاویر استفاده شده است (همپوشانی طولی و عرضی تصاویر حذف و بخش های غیر مشترک، برای تهیه موزاییک مورد استفاده قرار گرفت)، سپس محدوده مورد مطالعه برای پردازش دقیق تر از تصویر موزاییک شده استخراج و عملیات برش با نرم افزار ENVI انجام گرفت. برای مطالعه دگرسانی ها از محدوده SWIR تصاویر استر استفاده شده است. به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی در محدوده ی SWIR سنجنده استر که قدرت تفکیک مکانی آن ۳۰ متر می باشد، عملیات شارپنینگ اعمال شد و قدرت تفکیک مکانی این سنجنده را از ۳۰ متر به ۱۵ متر افزایش یافت. برای این کار از سه باند اول این سنجنده که قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر دارند، استفاده شد. برای انجام این کار باید عملیات Sharpening از طریق نرم افزار ENVI بر روی تصویر انجام شود تا قدرت تفکیک مکانی محدوده SWIR ۱۵ متر شود. در مرحله بعد برای حذف آثار هم پوشانی طیفی پوشش گیاهی و کانی های شاخص دگرسانی، با استفاده از تکنیک نسبت باندهای ۳ به ۲ در تصویر استر و ۴ به ۸ در تصویر



نمی‌شود. (Adiri et al., 2020). پوشش گیاهی سبز دارای ویژگی جذب با تمرکز ۶۷۴ نانومتر است که ممکن است با برخی از کانی‌ها شباهت طیفی نشان دهد (Van der Werff et al., 2016). از این رو پیکسل‌های حاوی پوشش گیاهی برای جلوگیری از ناهنجاری کاذب پوشانده شدند. شاخص پوشش گیاهی نرمال شده NDVI با استفاده از باند ۳ و ۲ از تصویر سنجنده استر و باند ۴ و ۸ از تصویر سنتینل ۲ آشکارسازی شد. به منظور کاهش تنوع طیفی و نویز، مناطق تحت پوشش گیاهی برای تجزیه و تحلیل بیشتر در تصویر حذف شدند (شکل ۳-۳). سپس جهت پردازش و بازسازی دگرسانی‌ها تکنیک‌های ترکیبات رنگی کاذب و نسبت باندها به کار گرفته شده است که در ادامه به بررسی و شرح هر کدام از این روش‌ها در منطقه مورد مطالعه می‌پردازیم.

#### ۴-۲- ترکیبات رنگی کاذب (FCC)

##### ۴-۲-۱- سنجنده استر

از آنجایی که اغلب تصاویر ماهواره‌ای به شکل چندباندی هستند، تجزیه و تحلیل تنها یک باند نمی‌تواند حداکثر اطلاعات را در اختیار ما قرار دهد. رنگ‌ها کاربرد زیادی در علم سنجش از دور دارند و استفاده از آن‌ها اطلاعات مفهومی و بصری بیشتری از تصویر را در اختیار قرار می‌دهند. برای تهیه تصاویر رنگی مرکب از این شیوه استفاده می‌کنیم، به این صورت که در آن سه باند مختلف به رنگ‌های قرمز، سبز و آبی نسبت داده می‌شوند تا تصاویر را به صورت رنگی در روی صفحه نمایشگر مشاهده کنیم. از این تصاویر جهت نقشه‌برداری واحدهای لیتولوژی نیز می‌توان استفاده کرد. برای آشکارسازی دگرسانی‌ها و واحدهای لیتولوژیکی از ترکیب‌های رنگی متفاوت به دست آمده از تصاویر استر در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ زاویه استفاده کردیم که از بین تصویرهای متعدد ایجاد شده تصویری با ترکیب RGB(۴۶۸) یکی از بهترین و مناسب‌ترین ترکیب‌های رنگی کاذب برای شناسایی مناطق حاوی دگرسانی به ویژه در کانسارهای طلای اپی ترمال و مس پورفیری می‌باشد (Ranjbar, 2002). موقعیت باندهای ۱ تا ۹ سنجنده استر بر روی منحنی‌های استاندارد USGS نشان می‌دهند که کانی‌های ایلیت، مونت مورینیت، کائولینیت و موسکویت (شاخص زون‌های دگرسانی آرژیلیک و فیلیک در باند ۴ محدوده SWIR سنجنده استر، دارای حداکثر انعکاس و در باند ۶ محدوده SWIR، به دلیل وجود پیوند AL-OH دارای انعکاس پایین می‌باشد و کانی‌های اپیدوت و کلریت (شاخص زون پروپیلیتیک) در باندهای ۵ و ۶

متفاوتی می‌باشند و هر دسته ارزش خاص خود را دارد با یکدیگر تلفیق می‌شوند.

برای هر لایه وزن خاصی را با توجه به اهمیت آن لایه در تلفیق وارد می‌کنند. ارزش متوسط هر بخش از لایه نهایی (حاصل تلفیق کلیه لایه‌ها) از رابطه ۱ بدست می‌آید:

$$\bar{S} = \frac{S_{ij} w_i}{w_i} \quad \text{رابطه ۱}$$

در فرمول بالا ارزش وزنی هر محدوده،  $S_{ij}$  وزن کلاس  $j$  در لایه  $i$  و  $w_i$  وزن لایه  $i$  می‌باشد. مشخص شدن وزن هر لایه یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین مرحله انجام پروژه اکتشافی است و آگاهی از روش وزندهی در دقت و اطمینان نتایج نهایی تاثیر بسزایی دارد (Babaei De Marzeh et al., 2013). در مطالعه حاضر میزان مشابهت داده‌های مختلف با هر نوع کانه‌زایی خاص به کمک اطلاعات توصیفی و عددی مشخص می‌گردد. مدل‌های توصیفی حاضر براساس ویژگی‌های محیط پدایش شامل ساخت و بافت آن، نوع سنگ درونگیر، دامنه سن، خاستگاه تکتونیکی، محیط تشکیل و کانسارهای مرتبط با آن و دگرسانی و مشخصات ژئوشیمیایی تهیه و تنظیم شده است. در ادامه برای مدلسازی کانسارهای مس طلای پورفیری انواع داده‌های مربوط به لایه‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی، دگرسانی و ساختاری امتیازدهی شده و در نهایت با تلفیق آن‌ها مناطق مستعد کانه‌زایی معرفی می‌گردد. در ابتدا لایه زمین‌شناسی مورد استفاده به عنوان محیط مناسب کانه‌زایی پلی متال در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ زاویه با استفاده از روش منطق فازی و با استفاده از نرم افزار expert choice برای انواع واحدهای لیتولوژیکی منطقه تهیه گردید و ارزش‌های مذکور بین اعداد ۱ تا ۱۰ رتبه بندی گردیده‌اند، به با اهمیت‌ترین لایه ارزش ۱۰ و به کم اهمیت‌ترین لایه ارزش ۱ تعلق می‌گیرد. به همین ترتیب امتیازدهی برای لایه‌های دگرسانی، سن، گسل، ژئوشیمی رسوبات آبراهه‌ای و ... نیز بر اساس میزان اهمیت آن‌ها با توجه به متون زمین‌شناسی از ۱ تا ۱۰ انجام شد. پس از تلفیق لایه‌های اطلاعاتی فوق نقشه پتانسیل معدنی مربوط به تیپ مس-طلای پورفیری آماده گردید. فلوجارت تلفیق و مدلسازی در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ زاویه بر اساس مدل Carranza و همکاران (۲۰۰۹) در شکل ۲ نمایش داده شده است.

#### ۴- نتایج و بحث

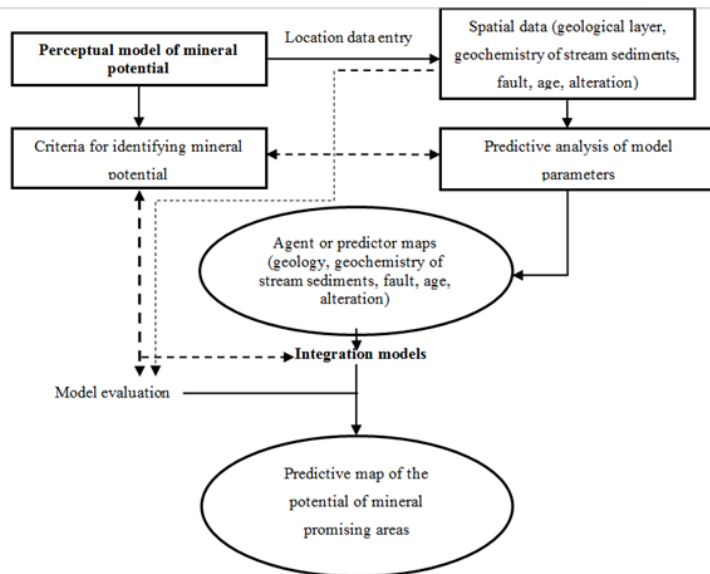
##### ۴-۱- حذف پوشش گیاهی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای

استفاده از سنجش از دور در مناطقی که منطقه مورد مطالعه با پوشش گیاهی پوشیده شده است، محدود است و یا استفاده

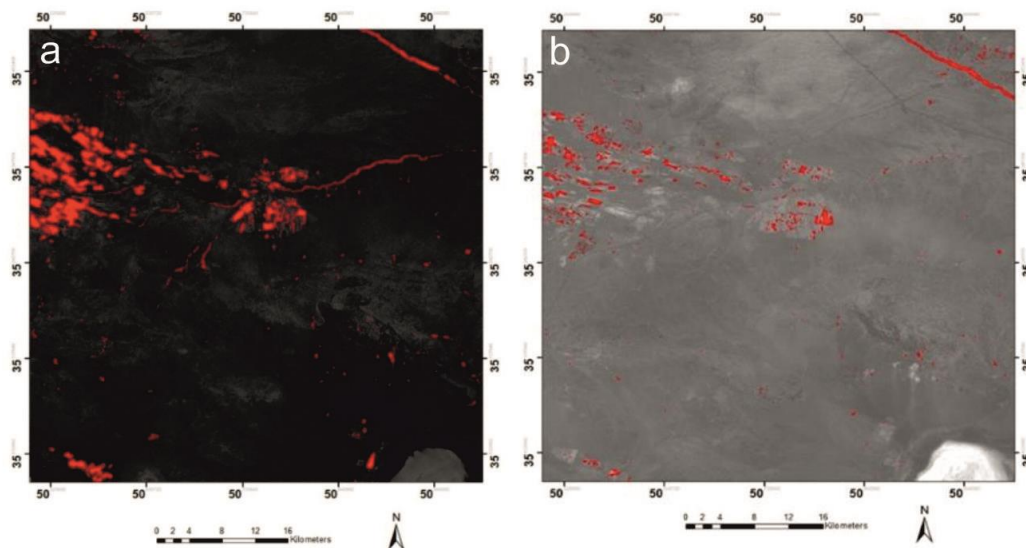


دگرسانی‌ها به رنگ قرمز تا صورتی دیده می‌شود و به علت قرارگیری باند ۶ در کانال سبز که باند انعکاس کانی‌های شاخص زون دگرسانی پروپلیتیک است (دایره سبز در شکل ۴b)، این دگرسانی به رنگ سبز تیره نمایان می‌شود و واحدهای کربناته به رنگ زرد-سبز روشن دیده می‌شوند. استفاده از ترکیب رنگی ۴۶۸ برای به دست آوردن یک دید کلی از دگرسانی‌های موجود در منطقه بسیار مفید می‌باشد (شکل ۴-c).

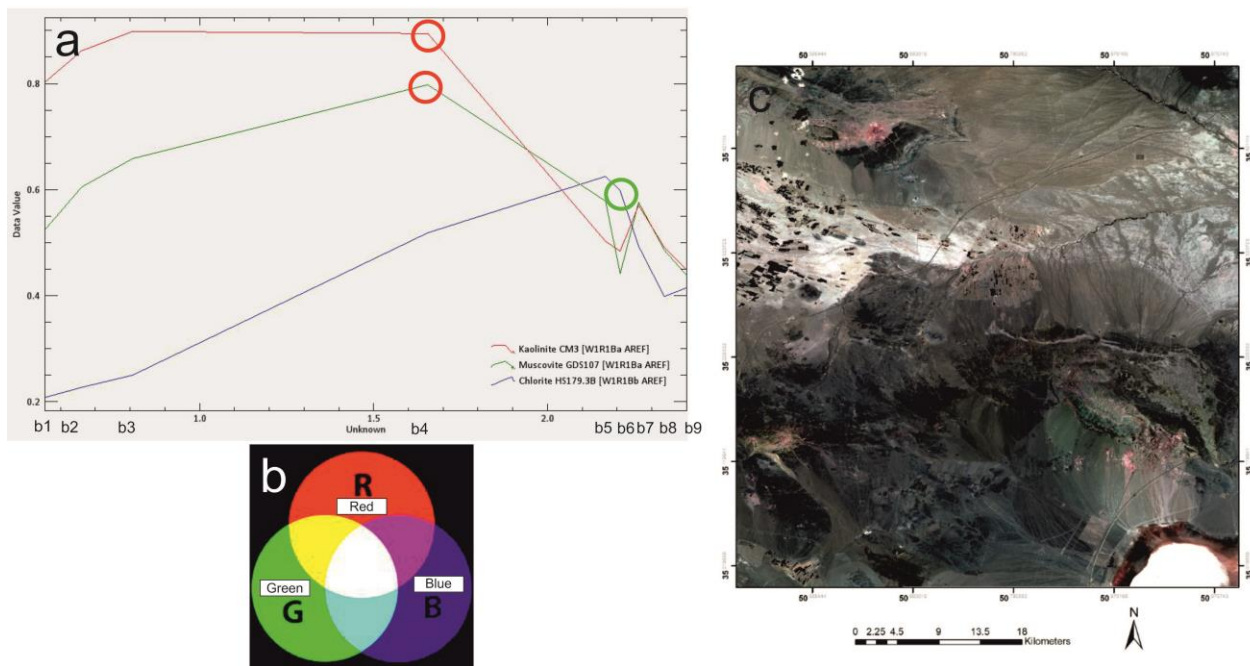
دارای انعکاس بالا و در باند ۸ به دلیل وجود پیوند Mg-OH و Fe-OH دارای انعکاس پایین می‌باشد (Jamshidi et al, 2015) (شکل ۴-a)، پس در ترکیب رنگی کاذب ۴۶۸ در محدوده SWIR، با توجه به ترکیب رنگ‌های اصلی که در شکل ۴ قسمت b نشان داده شده است، به علت قرارگیری باند ۴ در کانال قرمز که باند انعکاس در کانی‌های شاخص زون دگرسانی آرژیلیک و فیلیک است (دایره قرمز در شکل ۴a)، این



شکل ۲- فلوجارت تلفیق و مدلسازی در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ زاویه به منظور معرفی مناطق امید بخش معدنی بر اساس مدل Carranza و همکاران (۲۰۰۹)  
 Fig.2. Flowchart of integration and modeling in 1:100,000 Zavieh sheet for identification of promising mineral areas based on the model of Carranza et al. (2009)



شکل ۳- بارزسازی و حذف پوشش گیاهی (a) با استفاده از روش نسبت باندی ۳/۲ سنجنده استر و (b) نسبت باندی ۸ a/۴ سنجنده Sentinel-2A  
 Fig. 3. Vegetation extraction and elimination the influences of vegetation, (a) Using 3/2 band ratio method of Aster, and (b) 8a/4 band ratio of Sentinel 2A



شکل ۴- (a) موقعیت باندهای جذبی و انعکاسی بازنویسی شده سنجنده استر در دگرسانی‌های شاخص آرژیلیک (کائولینیت)، فیلیک (مسکویت) و پروپیلیتیک (کلریت) دایره قرمز موقعیت باند انعکاسی زون آرژیلیک و فیلک و دایره سبز موقعیت باند انعکاسی زون پروپیلیتیک؛ (b) ترکیب رنگ‌های اصلی و (c) تصویر ترکیب رنگی باندهای ۴۶۸ سنجنده استر

Fig 4- (a) Position of resampling absorption and reflection bands of Aster sensor in argillic, phyllic and propylitic index alterations, The red circle is the position of the reflective band of the argillic and phyllic zone and the green circle is the position of the reflective band of the propylitic zone, (b) combination of primary colors, and (c) color combination image of 468 aster sensor bands

هماتیت، لیمونیت، ژاروسیت و گوتیت) در شکل ۵ c نمایش داده شده است. باند ۱۱ و ۴ بازتاب‌های بالایی را برای کانی‌های حاوی اکسید آهن نمایش می‌دهند، بنابراین در شکل d تصویر ترکیب رنگی RGB(11,4,2) ماهواره Sentinel-2A نمایش داده شده است که در این ترکیب رنگی، مناطق دارای اکسید آهن به رنگ نارنجی تا زرد مشاهده می‌شود.

#### ۴-۳- نسبت باندهای

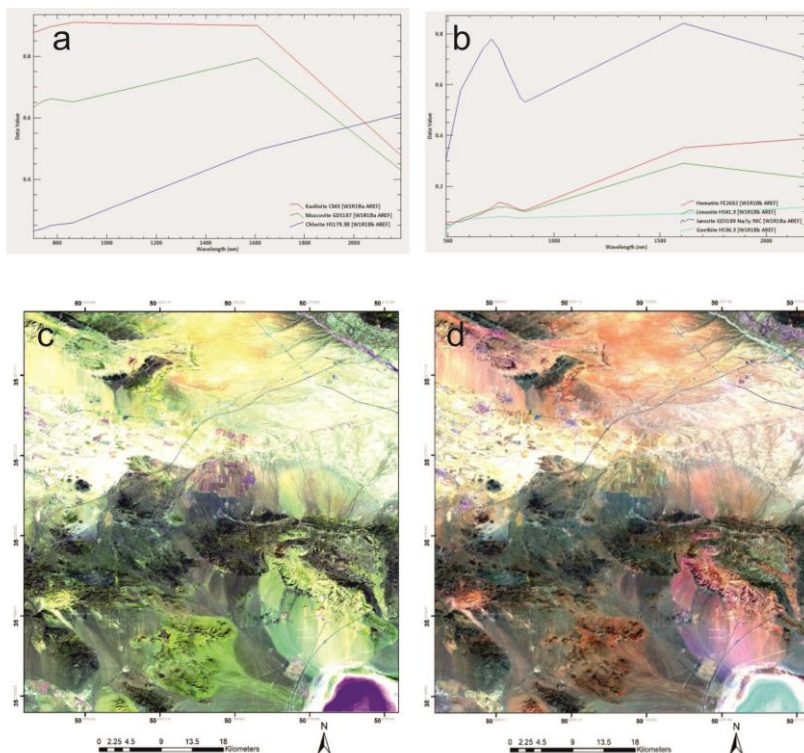
هنگامیکه در یک باند طیفی، درجه روشنایی پیکسل‌ها را تقسیم بر باند دیگری می‌کنند، تصویر نسبت باندهای ایجاد می‌شود که این روش پردازش تصویر برای آشکار کردن تغییراتی که در تصاویرهای تک باندهای قابل مشاهده نیستند، به کار گرفته می‌شود و از این روش برای کمتر کردن اثر روشنایی خورشید، توپوگرافی و شناسایی دگرسانی‌های محدودده مورد مطالعه، پوشش گیاهی، آلودگی‌های صنعتی و بارسازی اطلاعات طیفی تصاویر استفاده می‌شود (Adiri et al., 2020). با توجه به شناخت ویژگی‌های طیفی کانی‌ها، باندهای مناسب (باند بیشترین انعکاس تقسیم بر باند بیشترین جذب) برای شناسایی و بارسازی آن‌ها انتخاب می‌شوند. همچنین روش نسبت باندهای

#### ۴-۲-۲- سنجنده سنتینل

در این پژوهش از تصاویر سنتینل نیز برای شناسایی دگرسانی‌ها با توجه به قدرت تفکیک مکانی بالاتر آن استفاده شده است. بدین منظور سعی شده است تا باندهای متناظر با سنجنده استر که حداکثر و حداقل بازتاب‌ها را در محدوده طول موج سنجنده سنتینل نشان می‌دهد، به کار گرفته شود. اگر تصاویر رنگی کاذب به طور صحیح و مناسب تهیه شوند، تصاویر حاصل قابلیت تفسیر بصری بالایی را خواهند داشت. شکل ۵ قسمت a منحنی بازتاب طیفی برای کانی‌های کائولینیت، مسکویت و کلریت را به ترتیب به عنوان نماینده دگرسانی آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک نشان می‌دهد. همان طوری که این شکل نشان می‌دهد کانی کائولینیت و مسکویت بیشترین بازتاب را در باند ۱۱ و کانی کلریت بیشترین بازتاب را در باند ۱۲ نمایش می‌دهند (Hu et al., 2018). بنابراین در تصویر ترکیب رنگی RGB (11,12,3) ماهواره Sentinel-2A مناطق دارای دگرسانی آرژیلیک و فیلیک با رنگ‌های نارنجی تا صورتی (توناژ قرمز) و زون‌های پروپیلیتیک به رنگ سبز نمایش داده شده است (شکل ۵b). منحنی بازتاب طیفی کانی‌های اکسید آهن

برای آشکارسازی دگرسانی‌ها از حد آستانه  $X+2S$  استفاده کردیم که در آن  $X$  میانگین و  $S$  انحراف معیار است.

مرزها را مشخص تر می‌سازد، پس برای جداسازی مرز لیتولوژی‌ها و تشخیص سنگ‌ها به کار می‌رود. در این پژوهش



شکل ۵- (a) موقعیت باندهای جذبی و انعکاسی بازنویسی شده سنجنده سنتینل در دگرسانی‌های شاخص آرژیلیک (کائولینیت)، فیلیک (مسکویت) و پروپیلیتیک (کلریت)، (b) موقعیت باندهای جذبی و انعکاسی بازنویسی شده سنجنده سنتینل در دگرسانی‌های شاخص اکسید آهن (هماتیت، لیمونیت، زاروسیت، گوتیت)، (c) تصویر ترکیب رنگی RGB(11,12,3) ماهواره Sentinel-2A در برجه ۱:۱۰۰۰۰۰ زاویه، و (d) تصویر ترکیب رنگی RGB(11,4,2) ماهواره Sentinel-2A در برجه ۱:۱۰۰۰۰۰ زاویه

Fig 5- (a) Position of resampling absorption and reflection bands of Sentinel sensor in argillic(Kaolinite), phyllic(Muscovite) and propylitic(Chlorite) index alterations; (b) Position of resampling absorption and reflection bands of Sentinel sensor in iron oxides index alterations(Hematite, Limonite, Jarosite, Goethite), (c) Color combination image (RGB) (11, 12, 3) of Sentinel-2A satellite in 1:100000 Zaviyeh sheet, and (d) Color combination image (RGB) (11, 4, 2) of Sentinel-2A satellite in 1:100000 Zaviyeh sheet

سنگ‌های آذرین درونی جوان تر از ائوسن در محدوده برجه زاویه گسترش زیادی ندارند و بیشترین برونزدهای آن در شرق تخت چمن به صورت توده‌هایی برونزد دارند. این توده‌ها ترکیب سنگ‌شناسی متغیر بین کوارتز دیوریت، گرانودیوریت تا تونالیت دارند و دارای سن الیگوسن- میوسن هستند. با توجه به مشاهدات صحرایی در اتوبان تهران- ساوه به سمت نجف آباد (کوه زیره) دگرسانی آرژیلیک به همراه دگرسانی فیلیک و سیلیسی در واحدهای نفوذی و ولکانیکی منطقه مشاهده شده است، در بازدیدهای میدانی از این منطقه مس به صورت آغشتگی مالاکیت مشاهده شد(شکل c۶) و با توجه به آلتراسیون

#### ۴-۳-۱- سنجنده استر

برای بارزسازی دگرسانی آرژیلیک از نسبت باندی ۴/۵ استفاده شد و حد آستانه برای بارزسازی این دگرسانی، جوامع بالای  $X+2S$  می‌باشد و در شکل ۶-a به عنوان بخش‌هایی که دارای دگرسانی آرژیلیک می‌باشد با اعمال تکنیک حد آستانه به رنگ قرمز نشان داده شده است. پردازش تصاویر سنجنده استر با استفاده از روش نسبت باندی در شکل ۶-b و مقایسه آن با نقشه زمین‌شناسی و بازدیدهای صحرایی نشان داد که این دگرسانی منطبق بر سنگ‌های کوارتز دیوریتی و گرانودیوریتی و دم‌های لاتیتی و معادل‌های ولکانیکی آن‌ها می‌باشد(شکل ۶-b).

اصلی می‌باشد. کربناتی‌شدن سنگ‌های سیلیکاتی به دو طریق فرایند متاسوماتیسم و در اثر تخریب شبکه کانی‌های قبلی صورت می‌پذیرد. پردازش تصاویر سنجنده استر با استفاده از روش نسبت بانندی نشان داد که این دگرسانی منطبق بر واحدهایی از جنس سنگ‌های آندزیت-بازالت، دیوریت، ریولیت و مارن ماسه ای می‌باشد (شکل ۴۷).

#### ۴-۳-۲- سنجنده سنتینل

برای بارزسازی کانی‌های رسی مربوط به دگرسانی آرژیلیک و فیلیک با استفاده از منحنی رفتار طیفی از نسبت بانندی ۱۱/۱۲ استفاده و حدآستانه برای بارزسازی کانی‌های رسی، جوامع بالای  $X+2S$  می‌باشد و در شکل ۸a به عنوان بخش‌هایی که دارای آنومالی کانی‌های رسی می‌باشد با رنگ سبز نشان داده شده است. همچنین بررسی منحنی رفتار طیفی نشان می‌دهد که در این نسبت بانندی دگرسانی پروپیلیتیک با پیکسل‌های تیره نمایش داده می‌شوند، بنابراین مقادیر کمتر از این حد آستانه نشان دهنده دگرسانی پروپیلیتیک است. برای بارزسازی اکسید آهن از نسبت بانندی ۶/۲ استفاده شد و حدآستانه برای بارزسازی اکسید آهن نیز جوامع بالای  $X+2S$  می‌باشد و در شکل ۸b به عنوان بخش‌هایی که دارای این آنومالی می‌باشد با رنگ قرمز نشان داده شده است. از آنجا که برای تشخیص کانی‌های کوارتز و کربناته از محدوده طول موج حرارتی استفاده می‌شود و سنجنده سنتینل فاقد باند در این محدوده طول موجی است استفاده از آن برای شناسایی دگرسانی‌های کربناته و سیلیسی کارایی ندارد.

#### ۴-۴- تلفیق لایه‌های اطلاعاتی برای مدلسازی عناصر

##### پلی‌متال همراه با کانسارهای مس - طلای پورفیری

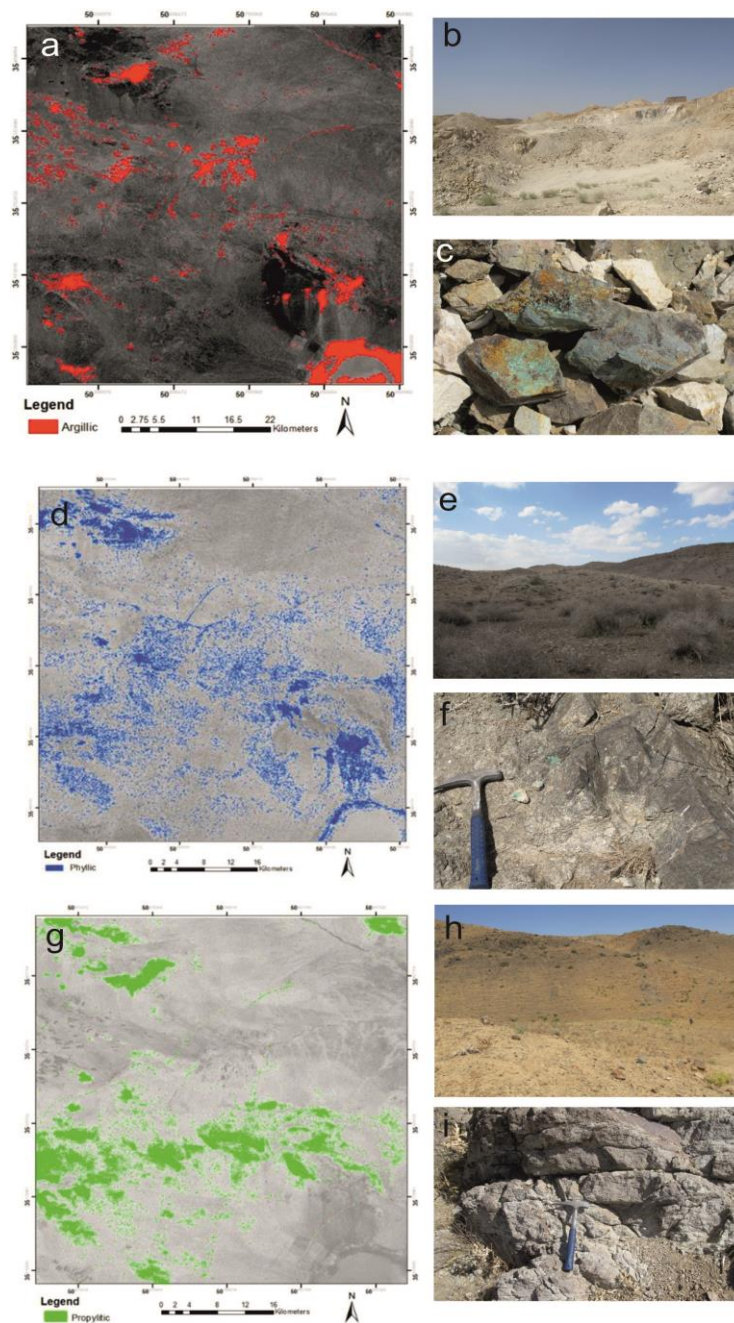
در این پژوهش نتایج حاصل از پردازش داده‌های دورسنجی که شامل پوشش گیاهی و انواع دگرسانی‌ها بود، جهت بررسی و کنترل دقیق با واحدهای روی نقشه و بازدیدهای صحرایی مقایسه شد. همان‌طور که در قسمت‌های پیشین تشریح شد، مطالعات صحرایی نتایج به‌دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای را تأیید کرد. با توجه به اینکه در محدوده مورد مطالعه، هدف بارزسازی مناطق دگرسان شده و کانی‌سازی شده بود، پس از بارزسازی نتایج دگرسانی به‌دست آمده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای، جهت پتانسیل یابی مکان‌های مستعد کانه‌زایی از روش تلفیق و مدلسازی داده‌ها با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی رسوبات آبراهه‌ای، گسل و... استفاده شد

گسترده آرژیلیتی و سیلیسی احتمال کانه‌زایی مس وجود دارد. برای بارزسازی دگرسانی فیلیک از نسبت بانندی ۵+۷/۶ استفاده شد و در شکل ۶-d به عنوان بخش‌هایی که دارای دگرسانی فیلیک می‌باشد با رنگ آبی نشان داده شده است. این دگرسانی منطبق بر واحدهایی از جنس سنگ‌های پیروکسن آندزیت، ایگنیمبریت-ریوداسیت و ایگنیمبریت-توفی و بعضاً گرانودیوریت با دگرسانی سریسیتی می‌باشد و همراه با آغشتگی مالاکیت است (شکل ۶e). برای بارزسازی دگرسانی پروپیلیتیک از نسبت بانندی ۹/۸ استفاده شد و با استفاده از تکنیک حد آستانه و در شکل ۶-f بخش‌هایی که دارای دگرسانی پروپیلیتیک می‌باشد با رنگ سبز نشان داده شده است. این نوع دگرسانی در ذخایر نوع پورفیری خارجی ترین زون دگرسانی می‌باشد. پردازش تصاویر سنجنده استر و سنتینل با استفاده از روش نسبت بانندی نشان داد که این دگرسانی منطبق بر واحدهایی اغلب از جنس سنگ‌های آندزیت پورفیری و پیروکسن آندزیت و آندزیت-بازالت می‌باشد (شکل ۶g,h).

برای بارزسازی اکسید آهن از نسبت بانندی ۲/۱ استفاده شد و با اعمال حد آستانه همان‌طوری که در شکل ۷a نشان داده شده است، بخش‌هایی که دارای این آنومالی می‌باشد با رنگ قرمز نمایان شده است. دگرسانی هماتی یا اکسید آهن بر اثر عبور سیال‌های اکسیدکننده تشکیل می‌شوند که اغلب موجب تشکیل کانی‌هایی می‌شوند که نسبت  $Fe^{3+}/Fe^{+2}$  بالا می‌باشد و مشاهده اکسید آهن به‌شکل آغشتگی در سطح سنگها در منطقه نشانگر شرایط اکسیداسیون می‌باشد (Mazhari et al., 2017, Soydan et al., 2021). پردازش تصاویر سنجنده استر و سنتینل با استفاده از روش نسبت بانندی به همراه مشاهدات صحرایی نشان داد که این دگرسانی منطبق بر واحدهایی از جنس سنگ‌های ولکانیکی و سنگ‌های مارن ماسه ای و مارن گچ دار می‌باشد (شکل ۷b). برای بارزسازی دگرسانی سیلیسی از نسبت بانندی ۱۳/۱۲ استفاده شد و مقادیر بالاتر از حدآستانه تعریف‌شده به‌عنوان بخش‌هایی که دارای دگرسانی سیلیسی می‌باشد با رنگ سبز نشان داده شده است (شکل ۷c). یافته‌های حاصل از این تحقیق حاکی از حضور این دگرسانی در واحدهایی از جنس سنگ‌های ریوداسیت-داسیت و ایگنیمبریت می‌باشد (شکل ۷d). برای بارزسازی دگرسانی کربناته از نسبت بانندی ۱۳/۱۴ استفاده شد و با اعمال تکنیک حدآستانه در شکل ۷e به عنوان بخش‌هایی که دارای دگرسانی کربناته می‌باشد با رنگ قرمز نشان داده شده است. در این نوع دگرسانی کلسیت کانی

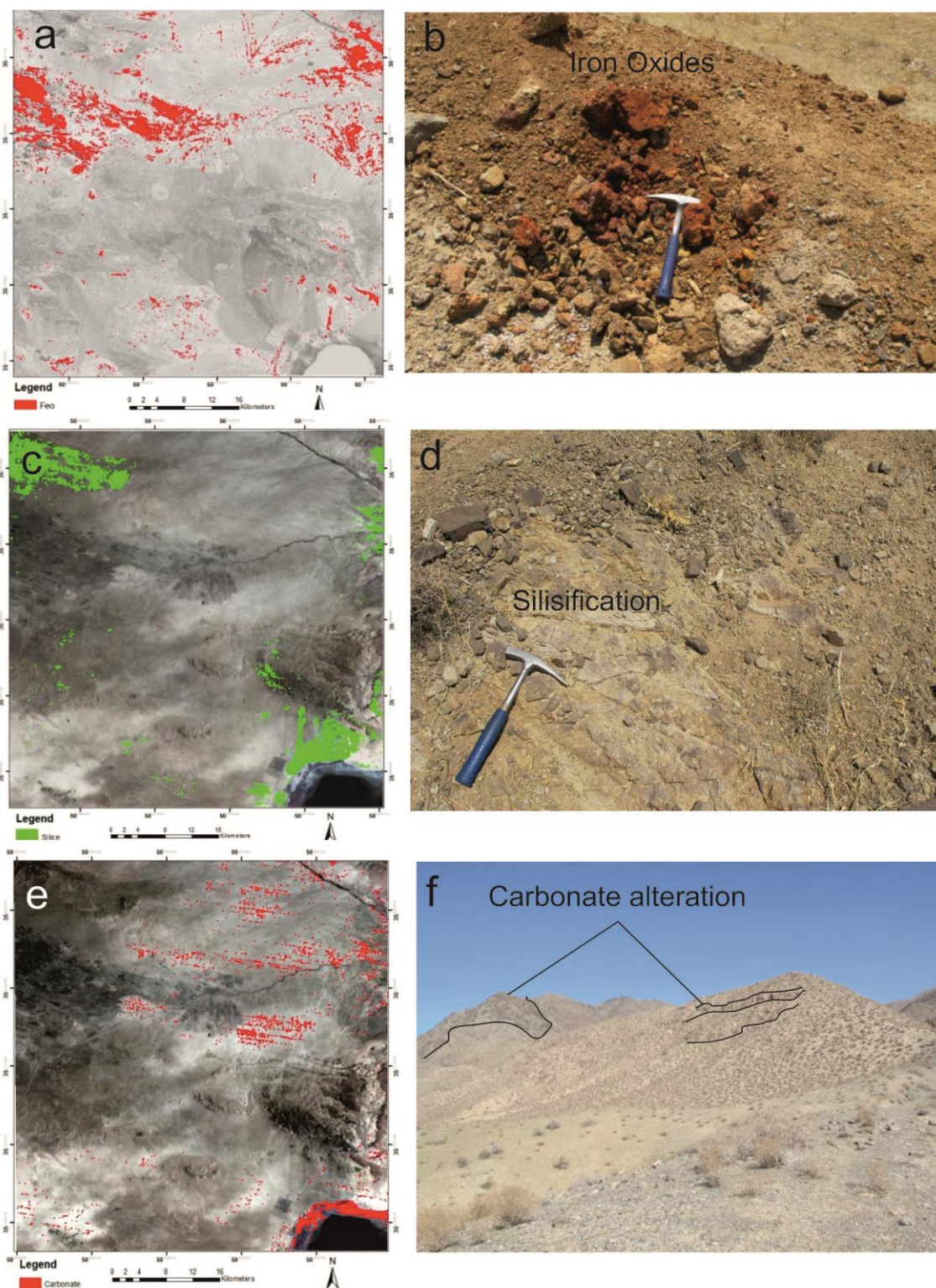


که در ادامه به شرح و نحوه امتیازبندی داده‌ها جهت تلفیق و مدلسازی نهایی پرداخته می‌شود.



شکل ۶ - (a) نسبت بانندی ۴/۵ برای بارزسازی دگرسانی آرژیلیک، (b) دگرسانی آرژیلیکی در واحدهای ولکانیکی به شدت دگرسان شده، (c) آغشتگی مالاکیت بر روی ولکانیک‌های دگرسان، (d) نسبت بانندی ۵+۷/۶ برای بارزسازی دگرسانی فیلیک، (e) دگرسانی سیلیسی-آرژیلیکی و فیلیکی در گرانودیوریت به شدت دگرسان شده، (f) نمایی نزدیک از آغشتگی مالاکیت در گرانودیوریت دگرسان شده، (g) تصویر نسبت بانندی ۹/۸ برای بارزسازی دگرسانی پروپلیتیک و (h) سنگ‌های ولکانیکی با دگرسانی پروپلیتیک، i نمایی نزدیک از دگرسانی پروپلیتیک

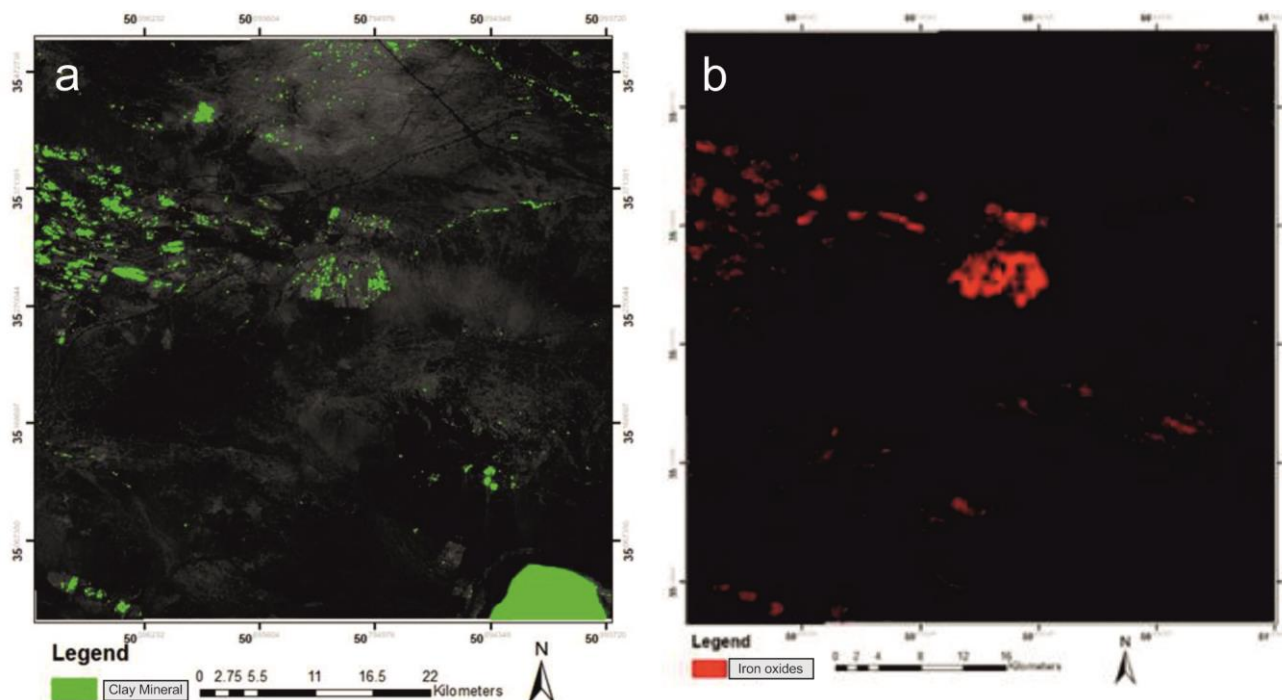
Fig. 6. (a) 4/5 band ratio to highlight argillic alteration, (b) malachite on altered volcanics: (c): siliceous-argillic and phyllic alteration in granodiorite is severely altered; (d): A close-up view of malachite impregnation in altered granodiorite; (e,f) volcanic rocks with propylitic alteration and malachite impregnation; (g) 9/8 band ratio to highlight propylitic alteration, (h) propylitic alteration in volcanic rocks, and (i) A close-up view of propylitic alteration



شکل ۷- (a) نسبت باندهای ۴/۵ برای بارزسازی اکسید آهن، (b) تصویر صحرایی از دگرسانی اکسید آهن در سنگ‌های ولکانیکی، (c) نسبت باندهای ۱۳/۱۲ برای بارزسازی دگرسانی سیلیسی، (d) نمای نزدیک از دگرسانی سیلیسی بر روی واحد ریوداسیت، (e) نسبت باندهای ۱۳/۱۴ برای بارزسازی دگرسانی کربناته و (f) نمای از دگرسانی کربناته بر روی واحدهای آندزیتی

Fig.7. (a) 4/5 band ratio to highlight iron oxide alteration, (b) field image of iron oxide alteration in volcanic rocks, (c) 13/12 band ratio to highlight silicic alteration, (d) A close-up view of silicic alteration on rhyodacite unit, (e) 13/14 band ratio to highlight carbonate alteration and (f) A view of carbonate alteration on andesitic units.





شکل ۸- (a) نسبت باندهای ۱۱/۱۲ ماهواره Sentinel-2A برای بارزسازی کانی‌های رسی و (b) نسبت باندهای ۶/۲ ماهواره Sentinel-2A برای بارزسازی اکسید آهن

Fig. 8. (a) 11/12 band ratio Sentinel-2A for characterizing clay minerals, (b) band ratio 6/2 Sentinel-2A for characterizing iron oxides.

این اساس به رگه‌های معدنی و سنگ‌های گرانیت - کوارتز مونزونیت که میزبان مرسوم این تیپ کانسارها هستند، بیشترین امتیاز و به سنگ‌های مافیک و اولترامافیک کمترین امتیاز تعلق گرفت.

بر اساس نتایج به دست آمده از نرم افزار expert choice امتیازدهی لایه‌های زمین‌شناسی بر مبنای ۱ تا ۱۰ انجام گردید و در شکل ۱۰a نمایش داده شده است. برای امتیازدهی به لایه ژئوشیمی با توجه به اینکه در مرکز توده کانسارهای مس - طلای پورفیری عناصر Ag، Au و Cu متمرکز هستند و در پیرامون آن بیشتر مولیبدن به همراه Zn، Pb و Mn و K متمرکز می‌شود (مشروط بر آن که دگرسانی پیریتی - سریسیتی پایانی قوی باشد) و همچنین با در نظر گرفتن این نکته که در خاک‌های برجای بالای توده کانسار، طلا ممکن است غنی‌شدگی نشان دهد می‌توان گفت عناصر مس، طلا، نقره، مولیبدن، سرب، روی و منگنز مشخصه ژئوشیمی این دسته از کانسارها هستند و عناصر مس و طلا ارزش بیشتری دارند. از این رو شکل ۱۰b نمایشگر حوضه‌های آبریز بالا دست نمونه‌های رسوبات آبراه‌های است که مجموعه عناصر مذکور دارای آنومالی

#### ۴-۴-۱- امتیازبندی داده‌ها در مدلسازی کانسارهای

##### مس - طلای پورفیری

در تحقیق حاضر مدلسازی براساس مدل‌های (Cox and Singer, 1986) انجام گرفته است که در این مدل میزان مشابهت داده‌های مختلف با هر نوع کانه‌زایی خاص به کمک اطلاعات توصیفی و عددی مشخص می‌گردد. مدل‌های توصیفی حاضر براساس ویژگی‌های محیط پیدایش شامل ساخت و بافت آن، نوع سنگ درونگیر، دامنه سن، خاستگاه تکتونیکی، محیط تشکیل و کانسارهای مرتبط با آن و دگرسانی و مشخصات ژئوشیمیایی تهیه و تنظیم شده است. در ادامه برای مدلسازی کانسارهای مس طلای پورفیری انواع داده‌های مربوط به لایه‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی، دگرسانی و ساختاری امتیازدهی شده و در نهایت با تلفیق آن‌ها مناطق مستعد کانه‌زایی معرفی می‌گردد. در ابتدا لایه زمین‌شناسی مورد استفاده به عنوان محیط مناسب کانه‌زایی پلی‌متال در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ زاویه با استفاده از روش منطق فازی و با استفاده از نرم افزار expert choice برای انواع واحدهای لیتولوژیکی منطقه تهیه گردید (شکل ۹) و ارزش‌های مذکور بین اعداد ۱ تا ۱۰ رتبه بندی گردیده اند. بر

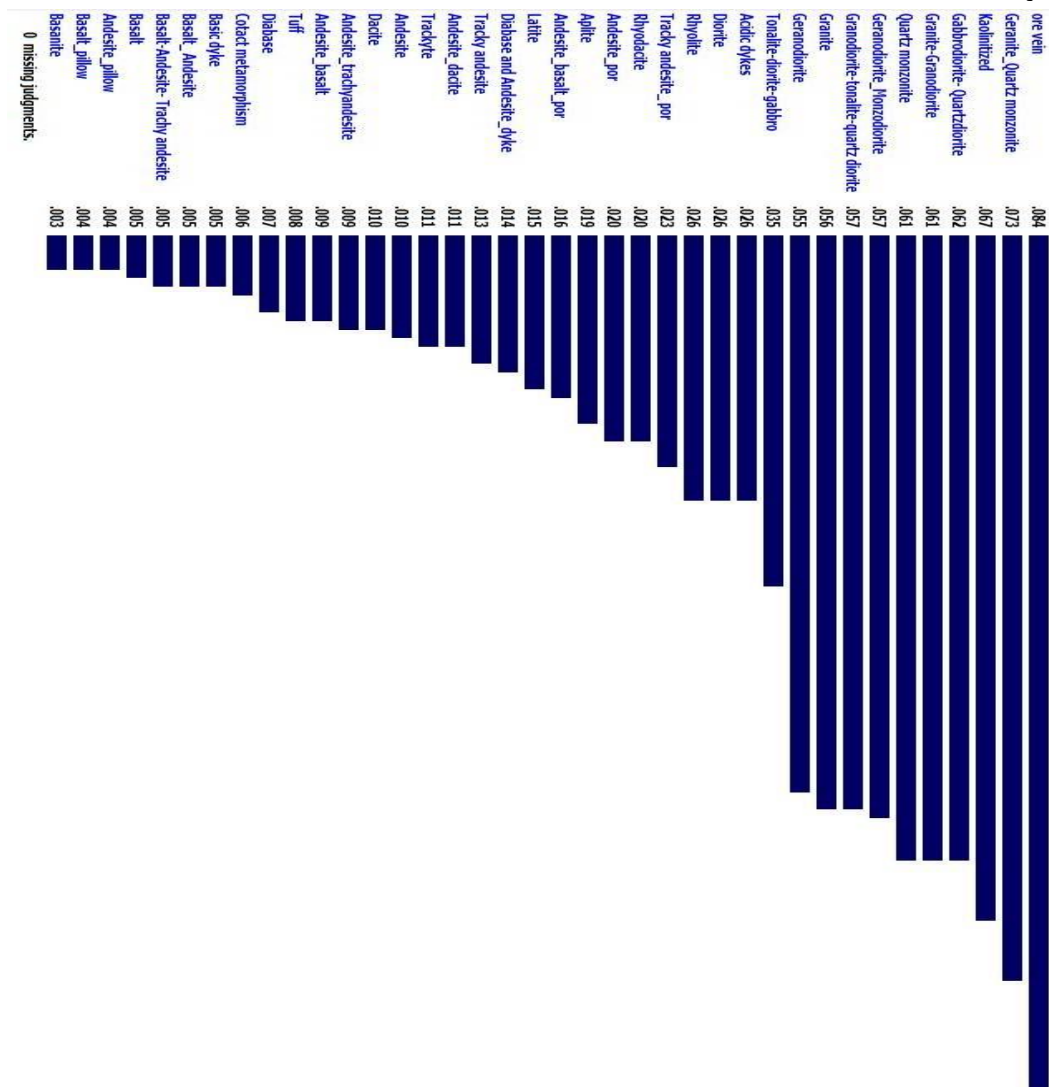


در نهایت برای مدلسازی کانه‌زایی مس- طلائی پورفیری از نسبت‌های زیر استفاده شد:

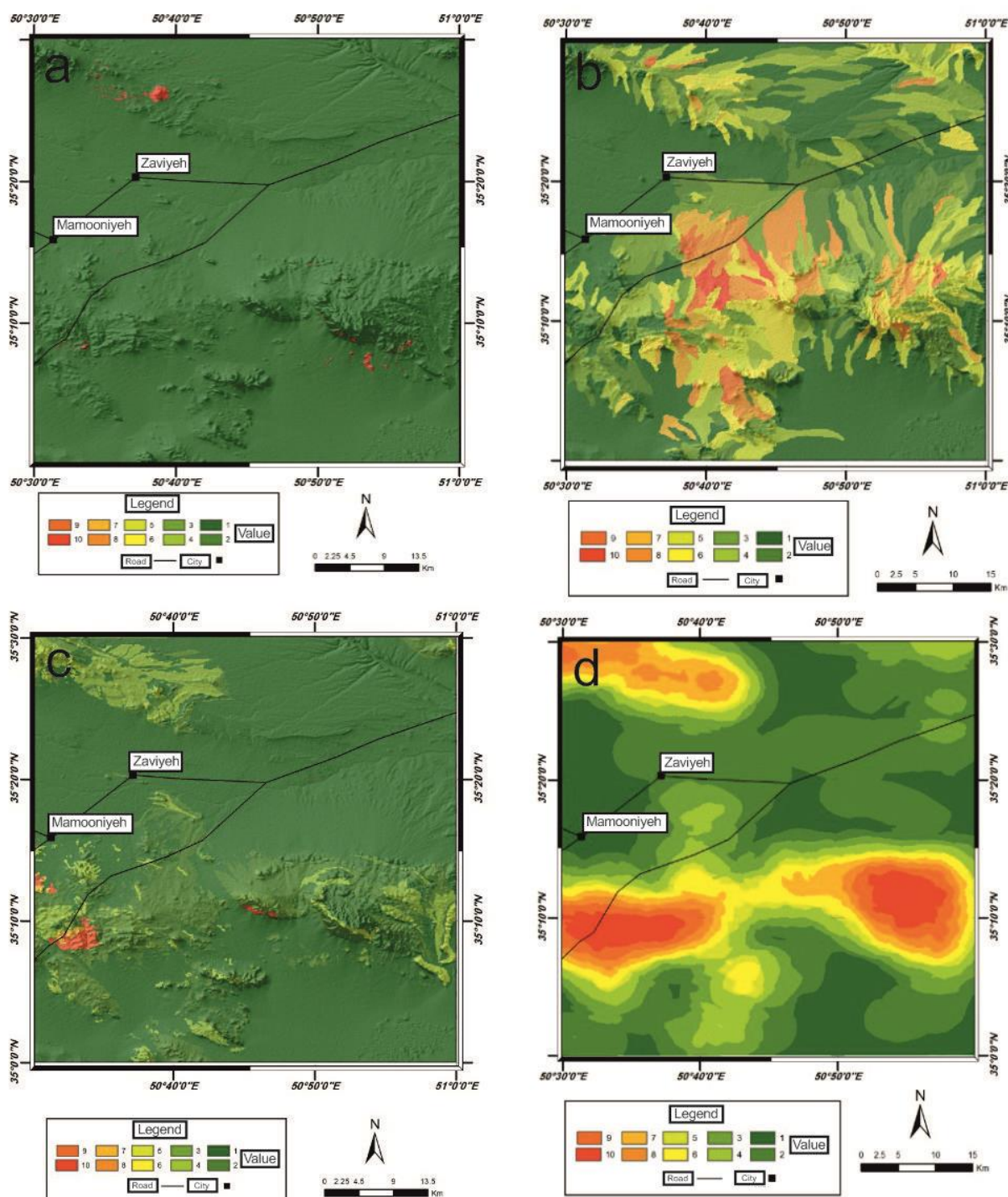
زمین شناسی \*۳ + لایه ژئوشیمی \*۲ + لایه دگرسانی \*۳ + لایه ساختار \*۱

پس از تلفیق لایه‌های اطلاعاتی فوق نقشه پتانسیل معدنی مربوط به تیپ مس-طلائی پورفیری آماده گردید (شکل ۱۱). البته باید توجه داشت که مطالعات صحرایی باید نتایج به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای را تأیید کند تا بتوان از این نتایج برای پردازش تصویرهای ماهواره‌ای مشابه برای بارزسازی دگرسانی‌ها و... در مناطق دیگر نیز استفاده کرد.

می باشند. امتیازبندی لایه‌های دگرسانی در کانسارهای مس- طلائی پورفیری با تلفیق مناطق دگرسانی آرژیلیک، آرژیلیک پیشرفته، پروپلیتیک، فیلیک و اکسید آهن در شکل ۱۰ c نمایش داده شده است. همچنین نقشه چگالی همه گسل‌های زمین‌شناسی و دورسنجی به‌طور جداگانه با شعاع تاثیر ۵۰۰ متر تهیه گردیده است. این دو لایه با روش Overlay با هم تلفیق گردیده‌اند. در تلفیق از عملگر جمع استفاده شد و با توجه به اینکه ضریب اطمینان در گسل‌های زمین شناسی بالاتر می باشد، به نقشه چگالی زمین شناسی ضریب ۳ و به لایه دیگر ضریب ۱ داده شده است. فایل رستر نهایی را در شکل ۱۰ d می توان مشاهده کرد.

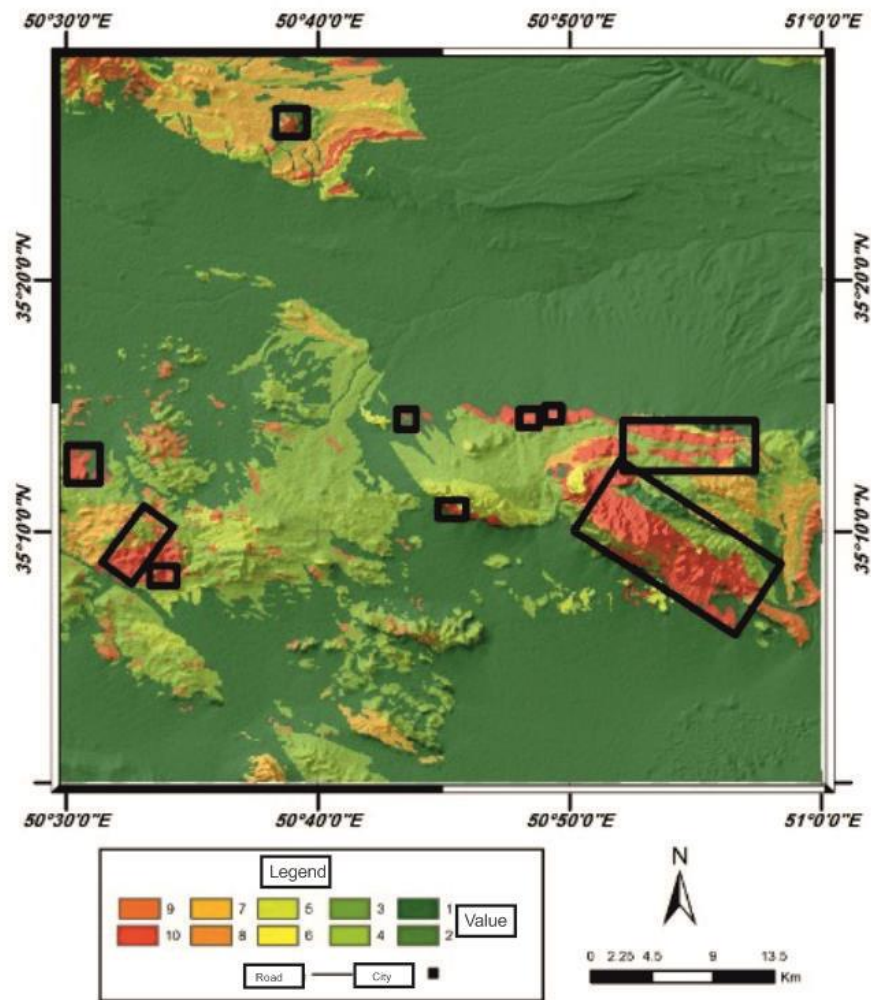


شکل ۹- لایه زمین‌شناسی ارزش‌گذاری شده برای کانه‌زایی مس- طلائی پورفیری  
Fig.9. valued geological layer for porphyry copper-gold mineralization



شکل ۱۰- (a) لایه زمین‌شناسی ارزش گذاری شده برای کانه‌زایی مس - طلای پورفیری (b) پراکندگی عناصر مشخصه تیپ مس - طلای پورفیری در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ زاویه، (c) پراکندگی مناطق دگرسانی مرتبط با مدل مس- طلای پورفیری در زون اکتشافی زاویه و (d) نقشه چگالی خطواره‌ها

Fig.10. (a) valued geological layer for porphyry copper-gold mineralization, (b) distribution of characteristic elements of porphyry copper-gold type in 1:100,000 Zaviyeh sheet, (c) distribution of alteration zones related to porphyry copper-gold model In the Zaviyeh exploration zone, and (d) line density map



شکل ۱۱- نقشه پتانسیل معدنی مربوط به تیپ مس- طلای پورفیری بر اساس لایه های اطلاعاتی ارزش گذاری شده

Fig.11. Map of potential porphyry copper-gold deposit based on valued information layers

### ۵- نتیجه گیری

واحدهای سنگی سنوزویک بیشترین گسترش را در منطقه دارد و شامل واحدهای ائوسن، الیگوسن و میوسن می باشد. در واحدهای رخنمون یافته در منطقه معدنی سن واحد رسوبی - آتشفشانی مربوط به ائوسن و همچنین واحد نیمه عمیق پورفیری مربوط به پس از ائوسن می باشد. دگرسانی های مشاهده شده در محدوده مورد مطالعه شامل دگرسانی های پروپیلیتیک، فیلیک، آرژیلیک، سیلیسی، کربناتی و اکسید آهن می باشد. در این پژوهش برای شناسایی مناطق مختلف دگرسانی، از داده های سنجنده ی استر و سنتینل به دلیل توانایی ها و قابلیت های این سنجنده ها در تشخیص زون های دگرسانی استفاده شد. برای پردازش تصویر از نسبت باندهی ۴/۵ سنجنده استر برای آشکارسازی دگرسانی آرژیلیک و از نسبت

باندی ۹/۸ برای بارز سازی دگرسانی پروپیلیتیک استفاده شد که نتایج رضایت بخشی حاصل شد. برای بارز سازی دگرسانی فیلیک از نسبت باندهی ۵+۷/۶ استفاده شد که برای استخراج این نوع دگرسانی مفید بود. استفاده از نسبت باندهی ۶/۲ ماهواره سنتینل برای بارزسازی اکسیدهای آهن در منطقه مورد مطالعه بهتر از سنجنده استر بود. قدرت تفکیک طیفی بهتر و تنوع باندهای استر در محدوده فروسرخ طول موج های کوتاه، بررسی دقیق تر رفتار طیفی کانی های شاخص زون های دگرسان شده را ممکن و میسر ساخته است که از برتری های انکارناپذیر این سنجنده بر سایر سنجنده های چند طیفی می باشد. در حالی که سنجنده سنتینل در طول موجی مرئی و مادون قرمز نزدیک دارای باندهای بیشتری نسبت به سنجنده سنتینل است که موجب کارایی بهتر این سنجنده در شناسایی اکسیدهای آهن

تصویر، با لایه‌های زمین‌شناسی، داده‌های ژئوشیمی رسوبات آبراهه‌ای و تراکم خطواره‌ها نشان داده که مناطق جنوبی برگه ۱۰۰۰۰۰ زاویه برای پی‌جویی کانسارهای مس-طلای پورفیری مستعدتر به نظر می‌رسد و با توجه به مطالعات صحرائی در برخی مناطق آغشتگی مالاکیت بر روی واحدهای دگرسانی به ویژه فیلیک مشاهده گردید.

می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که پیاده‌سازی روش‌های پردازش تصاویر بر روی داده‌های استر و سنتینل ۲ می‌تواند به بارزسازی کانی‌های زون‌های دگرسانی گرمابی که در ارتباط با کانسارهای پلی‌متال پورفیری و همچنین لیتولوژی‌های مربوط به سنگ میزبان هستند، در مقیاس ناحیه‌ای و محلی منجر شود. تلفیق نتایج حاصل از پردازش

## مراجع

- Afzali, N., 2016. modeling of lead and zinc deposits in RObat and Hossein Abad Khomein using the integration of geophysical exploration data, lithology and grading, Msc thesis, Arak University of Technology, Faculty of Mining and Materials.
- Amidi, S. M., Shahrabi, M. Navaei, M., 2005. Geological map of 1:100000 Zavieh, Geological survey and Mineral Exploration of Iran.
- Amin Ahmadi, M., 2010. Potential of copper mineralization in the metallogenic belt of Kerman using exploration data integration in the GIS environment, Msc Thesis, Isfahan University of Technology, Faculty of Mining.
- Babaei De Marzeh, M., Qari, Hassan Ali, Gholam Nejad, J., 2013. Review and comparison of evaluation methods of exploratory layers in GIS, Earth Sciences conference, <https://civilica.com/doc/182427/certificate/print/>.
- Beiranvand Pour, A., Hashim, M., 2012. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews* 44, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.09.009>.
- Carranza, E. J. M., Owusu, E., Hale, M., 2009. Mapping of prospectivity and estimation of number of undiscovered prospects for lode-gold, southwestern Ashanti Belt, Ghana, *Mineralium Deposita* 44, 915-938. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00126-009-0250-6>.
- Carter, B., 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS*: Elsevier Science pp.150-398.
- Cox, D.P, Singer, D.A, 1986. *Mineral Deposit Models*. Donald A. Ill. Series., U.S. Geological Survey Bulletin, P. 393.
- Demicco, R.V., Klir, G.J., 2004. *Fuzzy logic in geology*. Elsevier Academic Press San Diego, 347 p.
- Dumitras, A, Moschytz, G, 2007. Understanding fuzzy logic: an interview with Lotfi Zadeh (DSP history). *Signal Process Mag IEEE* 24,102–105.
- Fatehi, M., Asadi, H., 2017. Application of semi-supervised fuzzy c-means method in clustering multivariate geochemical data, a case study from the Dalli Cu-Au porphyry deposit in central Iran. *Ore Geology Reviews* 81, 245-255. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.002>.
- Gholami, S., 2002. Analysis and modeling of geophysical data (IP, Rs, M) and their integration with other exploratory data in Sonajil copper mineral index, Msc thesis, University of Tehran.
- Gupta, R.P., 2003. *Remote Sensing Geology*. Springer-Verlag 3, 180-190. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-05283-9>.
- Gupta, R.P., 2018. *Remote sensing geology*, 3rd Edn. Springer, Berlin, Germany, P. 656. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-55876-8>.
- Hasani Pak, A, A Shojaat. B., 2000, *Modeling of metal-non-metal deposits and its exploration applications*, Tehran University Publications. P. 520.
- Hu, Y., Xu, B., Wan, X., Wu, G., Yi, G., 2018. Hydrothermally altered mineral mapping using synthetic application of Sentinel-2A MSI, ASTER and Hyperion data in the Duolong area, Tibetan Plateau, China. *Ore Geology Reviews* 101, 384-397. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.07.017>.
- Jamshidi, V., Maanijou, M., 2015. Remote sensing study of hashtjin area deposits using satellite imagery of Etm+ and aster sensor. Msc thesis in economic geology. Bu-Ali Sina University (in Persian).

- Javizadeh, S., Ebrahimi, M., Sekandari, M., 2017. Satellite image processing in geology and mining, academic publication P. 246.
- Khaleghi, M., Ranjbar, H., Abedini, A., Calagari, A.A., , 2020. synergetic use of the sentinel-2, aster, and landsat-8 data for Hydrothermal alteration and iron oxide mineral mapping in mine schale. *Acta Geodyn. Geomater* 17, 3(199), 311–328. <https://doi.org/10.13168/AGG.2020.0023>
- Lindsay, M., Betts, P., Ailleres, L., 2014. Data fusion and porphyry copper prospectivity models, southeastern Arizona. *Ore Geology Reviews* 61, 120-140. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.02.001>.
- Maroufi Naghdehi, K., 2005. Geochemical and remote sensing studies and their integration with geological information in GIS for epithermal type gold modeling and identification of promising mineralization areas in the Alot region of Kurdistan, Msc thesis, Sahand University of Technology, Faculty of Mining Engineering,
- Mazhari, N., Malekzadeh Shafaroudi, A., Ghaderi, M., 2017. Detecting and mapping different types of iron mineralization in Sangan mining region, NE Iran, using satellite image and airborne geophysical data. *Geoscience Journal* 21, 137–148. <https://doi.org/10.1007/s12303-016-0018-9>.
- Mihi, A., Ghazela1, R., wissa, D., 2022. Mapping potential desertification-prone areas in North-Eastern Algeria using logistic regression model, GIS, and remote sensing techniques. *Environmental Earth Sciences* 81, 385. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10513-7>
- Moradpouri, F., Hayati, M., 2021. A copper porphyry promising zones mapping based on the exploratory data, multivariate geochemical analysis and GIS integration. *Applied Geochemistry* 132, 105051. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105051>.
- Ranjbar, H., Honarmand, M., Moezifar, Z., Roonwal, G.S., 2002. Application of Crosta technique for porphyry copper alteration mapping, using ETM+ data: A case study of Meiduk and SAR Cheshmehareas, Kerman, Iran., *Exploration and Mining Geology* 11, 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2003.11.001>.
- Sadigh, S., Mirmohammadi, M., Asghari, O., Porwal, A., 2023. Spatial distribution of porphyry copper deposits in Kerman Belt, Iran, *Ore Geology Reviews* 153, 105251. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105251>.
- Salimi, A., 2009. Modeling and integration of exploratory data in the GIS environment to prepare a map of the optimal potential of porphyry copper deposits in Jebel Barez 1:100,000 sheet, Msc thesis, Shahrood University of Technology
- Soydan, H., Koz, A., ebne Düzgün, H., 2021. Secondary Iron Mineral Detection via Hyperspectral Unmixing Analysis with Sentinel-2 Imagery. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* 101, 102343, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102343>.
- Van der Werff, H., Van der Meer, F.: 2016. Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI provide data continuity for geological remote sensing. *Remote Sensing* 8, 883. <https://doi.org/10.3390/rs8110883>.
- 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>