

Research Article

## Using the singularity method in identifying the alterations in the Zafarghand porphyry copper deposit (Isfahan)

Seyyed Saeed Ghannadpour<sup>1\*</sup>, Samane Esmaelzade Kalkhoran<sup>1</sup>

1- Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic)

**Keywords:** *Singularity, Remote Sensing, Image Processing, ASTER, Zafarghand, Porphyry Cu.*

### 1- Introduction

In recent years, there has been evidence of the growing potential of remote sensing and geochemical studies in early-stage exploration, particularly in identifying hidden ore resources. In geochemical exploration, separating geochemical anomalies from the background is one of the most significant steps. Various non-structural techniques could separate and identify anomalies from the background (Ghannadpour and Hezarkhani, 2016). The application of structural techniques for anomaly separation, including the singularity approach, fractal geometry in various fractal models, and the spatial U-statistic method, is evident in numerous studies. The current study aims to use standard remote sensing techniques for the structural processing of ASTER satellite images in the Zafarghand exploration with structural approaches for geochemical anomaly separation.

### 2- Case study

The Zafarghand copper exploration area is located in southeastern Ardestan, in central Iran, about 110 km northeast of Isfahan. The deposit is situated in the west of Zafarghand, as part of the 1:100,000 Ardestan geological sheet, ranging from 52°23'55"E to 52°26'30"E longitude and 33°10'30"N to 33°11'52"N latitude. To access the area, one can use the Ardestan-Naeen Road in the eastern part, the Ardestan-Isfahan Road in the central section, the Zafarghand-Zefreh Road in the southern part, and the Ardestan-Natanz Road in the northern part of the region. The studied deposit is located at the western margin of the Central Iran structural zone and on the central part of the Urmia-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA) (Fig. 1) (Ghannadpour et al., 2024).

### 3- Material and methods

The study area's mineral potential is assessed by identifying alterations and minerals using ASTER satellite imagery. The singularity approach, renowned for its effectiveness in distinguishing geochemical anomalies from the structural background, has been employed for satellite image processing. This technique estimates element concentrations using square grids and has demonstrated superior performance compared to inverse distance weighting (IDW) in detecting weak anomalies concealed within the background (Wang et al., 2018). Fig. 2 shows a visual representation of the study's steps in the form of a flowchart.

### 4- Results and discussions

A powerful technique employed in satellite image analysis to detect ground alterations involves using band ratios derived from the singularity index. This approach is practical in delineating alterations often associated with specific geological features. In this study, phyllic and propylitic alterations, indicative of particular geological characteristics, have been accurately identified and confirmed using this method. Applying band ratio highlighting based on the singularity index could greatly aid exploration and extraction endeavors related to mineral resources by facilitating the identification and interpretation of ground alterations.

\* Corresponding author: s.ghannadpour@aut.ac.ir

DOI: 10.22055/aag.2024.46480.2446

Received: 2024-03-26

Accepted: 2024-08-20

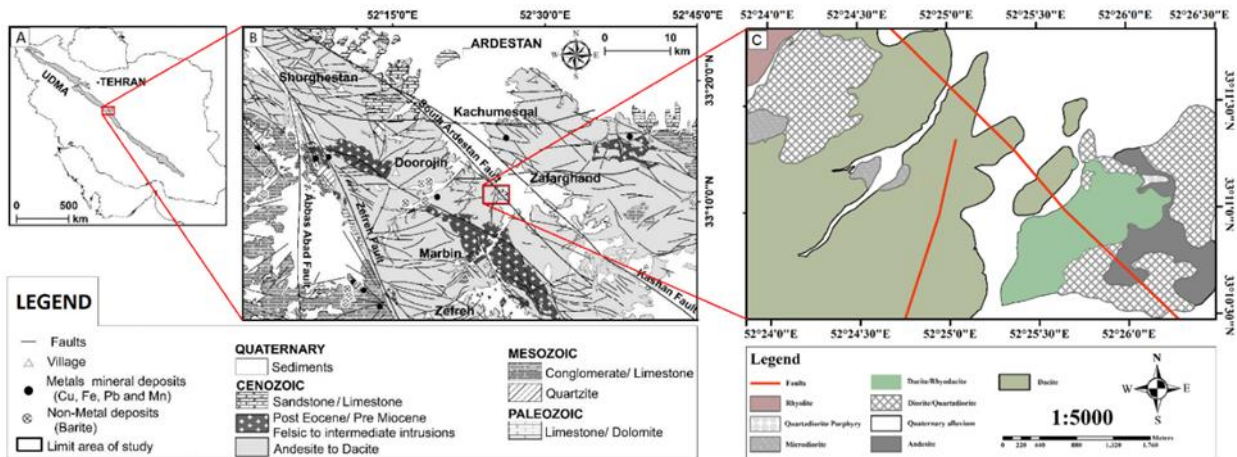


Fig. 1. (a) The location of the Zafarghand exploration area in the central part of the Urmia-Dokhtar arc (UDMA), (b) A part of the simplified geological map of Ardestan and Shahrab with a scale of 1:100,000 and (c) A simplified geological map of the Zafarghand exploration area (based on modifications from (after some changes from (Alaminia et al., 2017))).

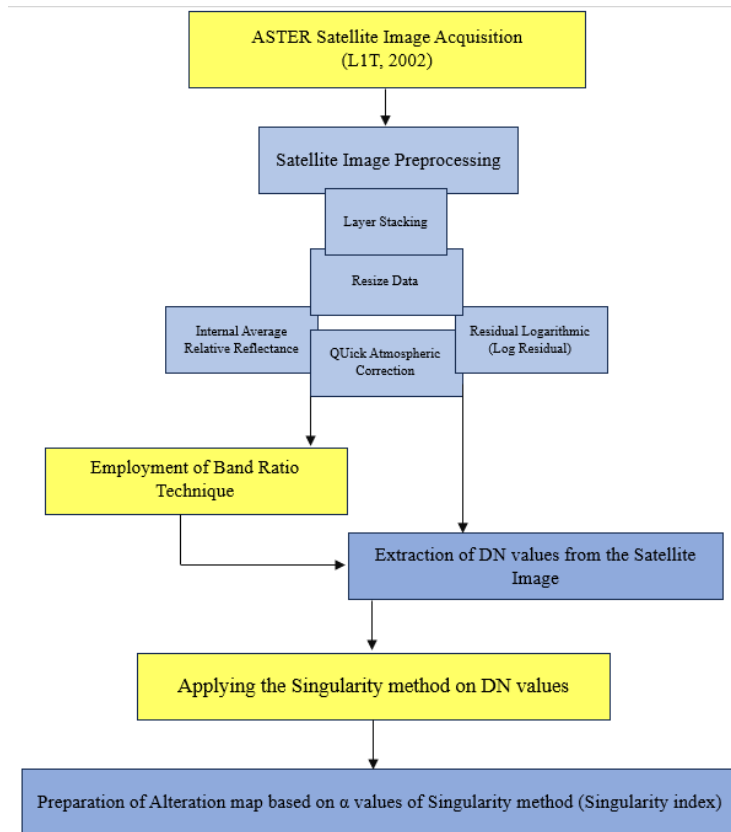


Fig 2. Flowchart of the steps and process of doing the work.

## 5- Conclusion

In this study, the singularity method is used as an effective tool to separate unusual or anomalies values from the background. This research has used this method to process and analyze satellite images to identify and highlight porphyry copper alteration in the Zafarghand exploration area northeast of Isfahan province. The results of this study showed that the singularity method is very effective in processing satellite images with a raster structure due to its structural features for separating anomaly values. These results show that

using the singularity method in analyzing satellite images could significantly help understand and identify land alterations and provide helpful information for exploring and extracting mineral resources.

## 6- References

- Alamina, Z., Bagheri, H., Salehi, M., 2017. Geochemical and geophysical investigations and fluid inclusion studies in the exploration area of Zafarghand (Northeast Isfahan, Iran). *Journal of Economic Geology* 9(2), 29-30. <https://doi.org/10.22067/econg.v9i2.56334>.
- Ghannadpour, S.S., Hasiri, M., Jalili, H., Talebiesfandarani, S., 2024. Satellite Image Processing: Application for Alteration Separation based on U-Statistic Method in Zafarghand Porphyry System (Iran). *Journal of Mining and Environment* 15(2), 667-681.
- Ghannadpour, S.S., Hezarkhani, A., 2016. Exploration geochemistry data-application for anomaly separation based on discriminant function analysis in the Parkam porphyry system (Iran). *Geoscience Journal* 20(6), 837-850.
- Wang, J., Zuo, R., 2018. Identification of geochemical anomalies through combined sequential Gaussian simulation and grid-based local singularity analysis. *Computers & Geosciences* 118, 52-64. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.05.010>.

### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Ghannadpour, S., Esmaelzade Kalkhoran, S., 2025. Using the Singularity Method in Identifying the Alterations in the Zafarghand Porphyry Copper Deposit (Isfahan). *Adv. Appl. Geol.* 855-876.

DOI: 10.22055/aag.2024.46480.2446

URL: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_19399.html](https://aag.scu.ac.ir/article_19399.html)

©2025 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

## بکارگیری روش سینگلاریتی در شناسایی دگرسانی‌های کانسار مس پورفیری ظفرقند (اصفهان)

سید سعید قنادپور\*

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

سمانه اسمعیل زاده کلخوران

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

\* s.ghannadpour@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰

### چکیده

امروزه سنجش از دور زمین‌شناختی با کمترین زمان و هزینه، دسترسی به مناطق دگرسان را بسیار میسر کرده و محل‌های مناسب برای تشکیل کانسارهای گرمایی را مشخص می‌نماید. در مطالعه پیش‌رو، با بهره‌گیری از تکنیک‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای، زون‌های دگرسانی منطقه اکتشافی ظفرقند بارزسازی شده‌اند. منطقه اکتشافی ظفرقند که در شمال شرق اصفهان واقع شده، براساس تقسیم‌بندی زون‌های ساختاری زمین‌شناسی، در زون ایران مرکزی (بخش میانی کمان آتشفشانی ماگمایی ارومیه-دختر) قرار دارد. سیستم پورفیری ظفرقند شامل هاله‌های دگرسانی فیلیک، پتاسیک، پروپیلیتیک، آرژیلیک و کمی سیلیسی است. در این مطالعه، با استفاده از تصاویر سنجنده ASTER، دگرسانی‌های مرتبط شناسایی شده‌اند. با توجه به ماهیت رستری و رقومی بودن تصاویر ماهواره‌ای، مقادیر دیجیتال نامبر هر پیکسل از مجموعه ماتریس تصاویر، به عنوان یک نمونه در شبکه‌ای سیستماتیک در نظر گرفته شده است. الگوریتم روش سینگلاریتی به عنوان یک روش ساختاری مؤثر در جدایش آنومالی‌های ژئوشیمیایی، بر روی مجموعه مقادیر دیجیتال نامبر پیکسل تصاویر ماهواره‌ای سنجنده ASTER پیاده شده است. نتایج این تکنیک نشان می‌دهد که بکارگیری روش سینگلاریتی با توجه به ساختارمند بودن ماهیت تصمیم‌گیری در آن، موفقیت‌آمیز بوده و در تعیین زون‌های دگرسانی منطقه ظفرقند به خصوص دگرسانی‌های پروپیلیتیک و فیلیک بسیار مؤثر عمل کرده است. در نهایت نیز به کمک روش پیشنهادی ارائه شده، یک نقشه دگرسانی از منطقه اکتشافی ظفرقند تهیه شده است. این تحقیق نشان می‌دهد که پردازش تصاویر ماهواره‌ای به کمک روش سینگلاریتی می‌تواند ابزار بسیار مؤثری برای شناسایی و بررسی زون‌های دگرسان باشد. این روش می‌تواند به بهبود فرآیندهای اکتشاف مواد معدنی و کاهش هزینه‌های مرتبط با آن کمک شایانی نماید. در واقع نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده پتانسیل بالای تکنیک پیشنهادی در پردازش تصاویر ماهواره‌ای در زمینه زمین‌شناسی و اکتشافات منابع معدنی است.

**واژه‌های کلیدی:** سینگلاریتی، سنجش از دور، پردازش تصاویر، سنجنده استر (ASTER)، ظفرقند، مس پورفیری.

### ۱- مقدمه

مطالعات سنجش از دور و مطالعات ژئوشیمیایی در سال‌های اخیر، توانایی خود را در زمینه کشف کانسارها در مراحل اولیه و به خصوص در انواع پنهان آنها، بیش از پیش نمایان ساخته‌اند. این نوع مطالعات به خصوص مطالعات سنجش از دور بیشتر در فازهای اولیه اکتشاف سیستماتیک مشتمل بر فازهای شناسایی و پیجویی مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای کانسارهایی که هاله‌های نسبتاً بزرگی نسبت به توده کانسار برجای می‌گذارند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. جدایش آنومالی‌های ژئوشیمیایی از زمینه یکی از مهم‌ترین و کلیدی‌ترین مراحل در اکتشافات ژئوشیمیایی می‌باشد (Hezarkhani and Ghannadpour, 2015).

روش‌های مختلفی برای جداسازی و تشخیص مناطق آنومال از زمینه وجود دارد که از روش‌های غیرساختاری تا روش‌های ساختاری تغییر می‌کنند (Hezarkhani and Ghannadpour, 2015). در مطالعات متعددی می‌توان بکارگیری روش‌های ساختاری جدایش آنومالی از زمینه همچون روش آماره فضایی U، هندسه فرکتال در مدل‌های فرکتالی مختلف و روش سینگلاریتی را مشاهده کرد (Cheng et al., 1996, Cheng et al., 2000, Hezarkhani and Ghannadpour, 2015, Ghannadpour and Hezarkhani, 2016, 2017, 2018, 2020, 2022, Pourgholam et al., 2024, Heidari et al., 2024, Bazargani Golshan et al., 2024). در پژوهش حاضر سعی

منظور بارزسازی پارامترهای فیزیکوشیمیایی کانی‌سازی و دگرسانی مرتبط در سیستم مس پورفیری ظفرقند مورد تحلیل شیمی کانی‌ها و ایزوتوپ پایدار قرار گرفت (Aminroayaei et al., 2017). Yamini et al., 2017. همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه دیگری به پتروگرافی، ژئوشیمی و دامسنجی دگرسانی در کانی‌سازی سینوونیک مس در این ناحیه پرداختند. محدودیت‌ها و قیدهای ایزوتوپی و ژئوشیمیایی بر نقش اختلاط پوسته جوان و ماگما در کمان ارومیه-دختر با نگاه ویژه بر انکلاوهای میکروگرانولار مافیک و گرانیتوئیدهای ژنتیکی در مجموعه آذرین ظفرقند توسط (Sarjoughian et al., 2018) تعیین گردید. در سال ۲۰۱۶ محدوده اکتشافی ظفرقند به عنوان مطالعه موردی به منظور شناسایی ذخایر معدنی عمیق و کور با استفاده از روش ضرایب فرکانس پیشنهادی جدید در حوزه فرکانسی داده‌های ژئوشیمیایی در نظر گرفته شد (Shahi et al., 2016).

اخیراً مطالعات مختلفی به منظور تعیین مناطق امید بخش در محدوده ظفرقند به انجام رسیده است. همچنین در برخی دیگر مطالعات، این محدوده به عنوان مطالعه موردی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته تا به واسطه موقعیت آن، روش‌های پردازشی مختلف مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرند (Ghannadpour et al., 2024, Esmailzadeh Kalkhoran et al., 2024).

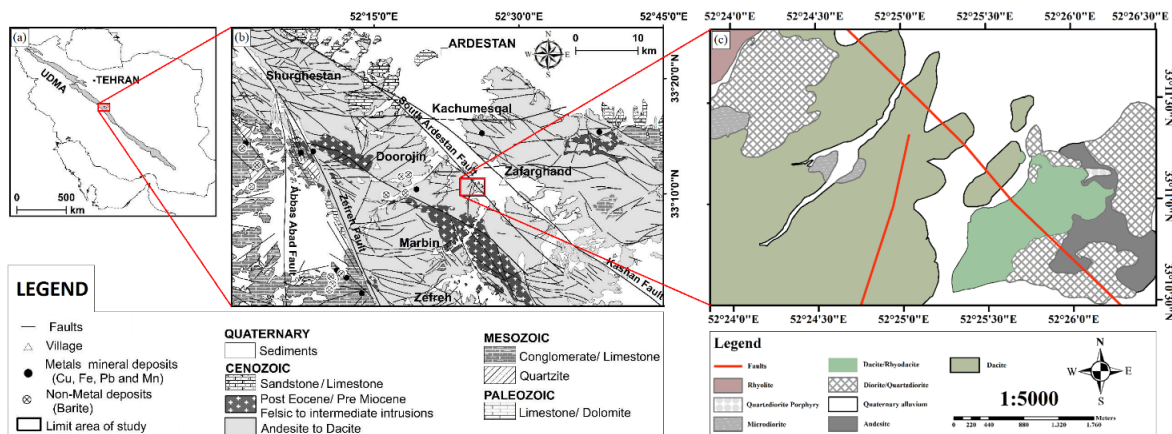
با توجه به اهمیت این کانسار و ضرورت هر چه بیشتر مطالعات تکمیلی، در این پژوهش با هدف شناسایی ناهنجاری ژئوشیمیایی سطحی در این محدوده به پردازش تصاویر ماهواره‌ای سنجنده استر پرداخته خواهد شد. لذا به منظور پردازش تصاویر ماهواره‌ای از روش سینگولاریتی بهره گرفته می‌شود که به عنوان روشی مؤثر و کارآمد در بحث جدایش ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی از زمینه با ماهیت ساختاری شناخته می‌شود. در این زمینه و به خصوص ترکیب روش‌های سنجش از دوری و روش‌های جدایش نظیر مدل‌های فرکتالی، مطالعات متعددی صورت گرفته است که از جمله آنها می‌توان به شناسایی دگرسانی در مناطق اکتشافی جبال‌بارز، تیرکا و سریزد اشاره داشت (Fakhari et al., 2019, Zamyad et al., 2021, Behbahani et al., 2023).

بر آن است تا با ترکیب روش‌های ساختاری جدایش آنومالی‌های ژئوشیمیایی و روش‌های رایج در علم سنجش از دور به پردازش ساختاری تصاویر ماهواره‌ای سنجنده استر در محدوده اکتشافی ظفرقند پرداخته شود. کمربند فلززایی تیتس از شرق اروپا تا خاورمیانه ادامه دارد. ایران به عنوان یکی از بزرگترین نواحی بر روی ۱۷۰۰ کیلومتر از این کمربند واقع شده است و ذخایر بزرگی از مس پورفیری مانند سرچشمه، میدوک، دالی و ... را به خود اختصاص می‌دهد. بخشی از این کمربند را کمان آتشفشانی-ماگمایی ارومیه-دختر (UDMA) شامل می‌شود. منطقه اکتشافی ظفرقند (در شمال شرقی اصفهان) در بخش میانی این کمان واقع شده است (شکل a و b). کارهای اکتشافی اولیه در منطقه به شکل تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ برداشت نمونه‌های سنگی و برداشت مقاطع زمین فیزیکی در منطقه بوده است (ANJC, 2011). پس از آن مطالعات ژئوشیمیایی و پترولوژیکی متعددی چون (Khalatbari Jafari, 1992, Mohammadi, 1995, Latifi, 2000, Bahramiyan, 2007, Nasr Esfahani and Vahabi Moghadam, 2010, Honarmand et al., 2010, Jabari et al., 2010, Yeganeh Far and Ghorbani, 2010, Amidi et al., 1975) بر روی سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی رسوبی میزبان این توده و توده‌های گرانیتوئیدی همجوار یا مشابه و دایک‌های آندزیتی-بازالتی قطع کننده سنگ‌های آتشفشانی ائوسن انجام شده است. سال ۱۳۹۰ پتروژنز توده گرانیتوئیدی ظفرقند توسط Sadeghian و Ghaffary (۲۰۱۷) مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. Aminroayaei Yamini و همکاران (۲۰۱۶) با نگرشی بر تحولات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی منطقه، به بررسی دگرسانی‌های گرمایی این کانسار پرداختند (Aminoroayaei et al., 2016). مطالعات ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی و سیالات درگیر نیز توسط Alaminia و همکاران (۲۰۱۷) انجام شد. Aminoroayaei Yamini و همکاران (۲۰۱۸) همچنین در مطالعه دیگری به تشریح تحولات سیستم ماگمایی این کانسار نیز با در نظر گرفتن پلاژیوکلاز به عنوان شاهد، پرداختند (Aminoroayaei Yamini et al., 2018). در پژوهش دیگری ارتباط کانی‌سازی با پهنه‌های دگرسانی با ساختارهای زمین‌ساختی به کمک مطالعات سنجش از دور توسط Mohammadi و همکاران (۲۰۱۸) مورد بررسی قرار گرفت (Mohammadi et al., 2018). کلریتی شدن بیوتیت به

## ۲- منطقه مورد مطالعه

منظور دستیابی به منطقه می‌توان از راه‌های آسفالت اردستان- نایین در شرق منطقه، اردستان-اصفهان در بخش میانی منطقه، ظفرقند-زفره در بخش جنوبی و اردستان-نطنز در بخش شمالی منطقه استفاده نمود. کانسار مورد مطالعه در منتهی‌الیه بخش غربی زون ساختاری ایران مرکزی و بر روی بخش مرکزی کمان ولکانوپلوتونیزم ارومیه-دختر واقع شده است و همانند سایر ذخایر مس پورفیری ایران و جهان، منشاء ماگمایی داشته است.

منطقه اکتشافی مس ظفرقند در جنوب‌شرقی اردستان در ۱۱۰ کیلومتری شمال شرق اصفهان در ایران مرکزی واقع شده است. این کانسار در غرب ظفرقند به عنوان بخشی از برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان با جغرافیایی  $52^{\circ}23'55''$  تا  $52^{\circ}26'30''$  طول شرقی و  $33^{\circ}10'30''$  تا  $33^{\circ}11'52''$  عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱c) (Alaminia et al., 2017). به



شکل ۱- (a) نمایش موقعیت منطقه اکتشافی ظفرقند در بخش مرکزی کمان ارومیه-دختر (UDMA)، (b) بخشی از نقشه ساده شده زمین‌شناسی اردستان و شهرباب با مقیاس ۱:۱۰۰،۰۰۰ و (c) نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه اکتشافی ظفرقند (با تغییرات از Alaminia و همکاران) (۲۰۱۷).

Fig 1. (a) The location of the Zafarghand exploration area in the central part of the Urmia-Dokhtar arc (UDMA), (b) A part of the simplified geological map of Ardestan and Shahrab with a scale of 1:100,000 and (c) A simplified geological map of the Zafarghand exploration area (based on modifications from (after some changes from Alaminia et al. (2017)).

فراوانی درشت بلورها به شکل حفره‌ای هستند. توده‌های نفوذی دیوریت، کوارتزدیوریت و میکرودیوریت در شمال‌غربی و جنوب‌شرقی منطقه با رنگ خاکستری تیره برون‌زد دارند. توده نیمه نفوذی کوارتزدیوریت پورفیری در جنوب‌شرقی منطقه، وسعت کوچکی را می‌پوشاند.

### ۲-۱- دگرسانی و کانی‌سازی

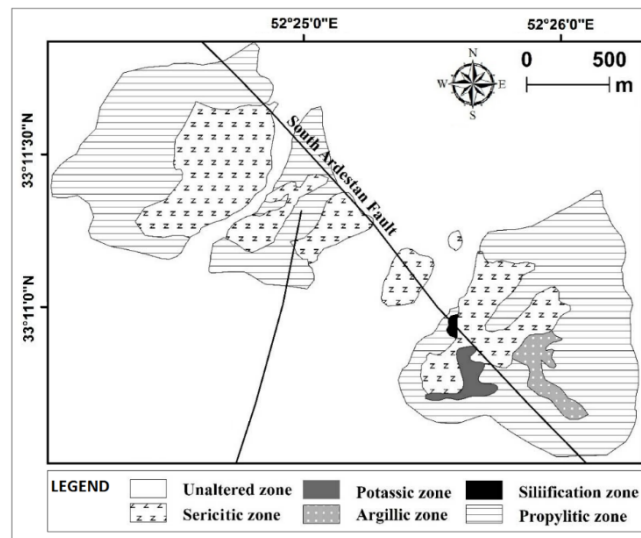
بر اساس مطالعات و بررسی‌های صورت گرفته، انواع دگرسانی‌های منطقه شامل پتاسیک، فلیک، سیلیسی و آرژیلیک و در نهایت پروپیلیتیک می‌باشند. این دگرسانی‌ها اغلب در نزدیک توده‌های نفوذی و سنگ‌های میزبان اطراف گسل جنوب اردستان دیده می‌شود (شکل ۲). در گوشه جنوب‌شرقی محدوده، دگرسانی پتاسیک با رخنمون بسیار محدود در نزدیکی توده کوارتزدیوریت و دگرسانی فلیک در نزدیکی توده‌های نفوذی دیوریت و کوارتزدیوریت پورفیری و نیز سنگ‌های آتشفشانی داسیتی و

بر پایه بررسی‌های صحرایی و سنگ‌نگاری انجام شده در این منطقه، سنگ‌های آذرین اسیدی تا حدواسط شامل سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی متعلق به دوره زمانی ائوسن بالایی و جوانتر رخنمون دارند که در ادامه به شرح واحدهای سنگی پرداخته می‌شود (Alaminia et al., 2017).

ریولیت در منتهی‌الیه گوشه شمال غربی با رنگ خاکستری صورتی برون‌زد نسبتاً کوچکی در سطح زمین دارد (شکل ۱c). بافت این سنگ‌ها پورفیری با خمیره شیشه‌ای جریان‌ی است. داسیت و ریوداسیت‌ها محدوده وسیعی از منطقه را با رنگ خاکستری تا سبز در برمی‌گیرند. (شکل ۱c). این واحد مهمترین سنگ میزبان کانی‌سازی مس در منطقه محسوب می‌شود و بافت پورفیری با خمیره فلسیک دانه‌ریز، بی‌شکل و حفره‌ای دارد. آندزیت‌ها در جنوب غربی و غرب منطقه رخنمون نسبتاً بزرگی دارند (شکل ۱c) و به رنگ خاکستری تیره دیده می‌شوند و به علت

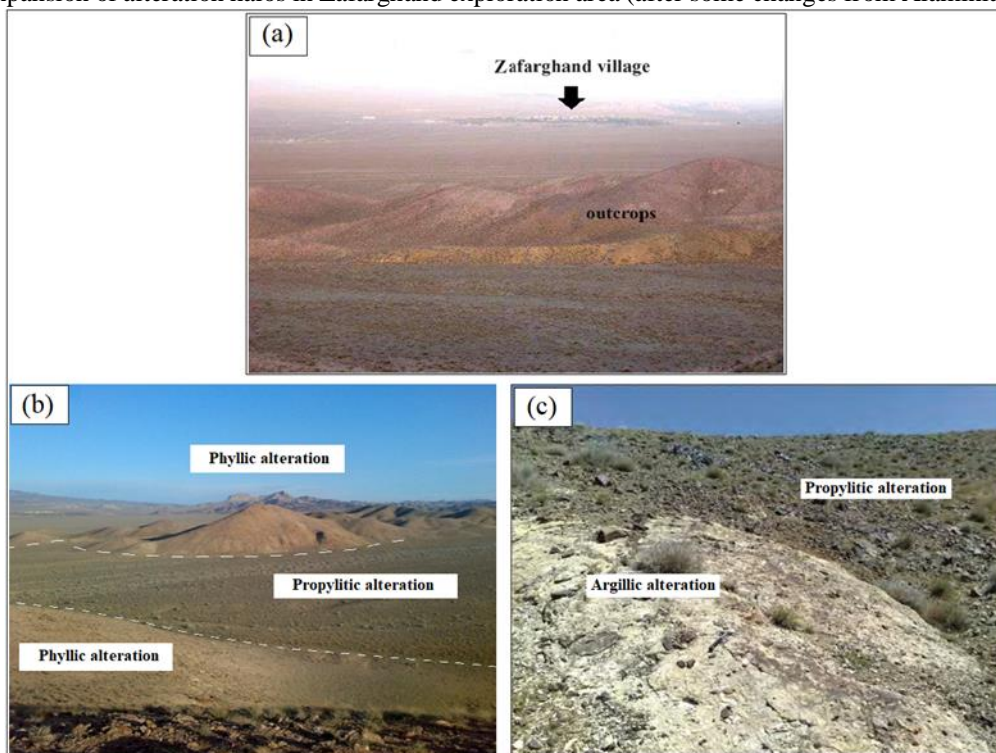
شایان ذکر است که کلریت در سطح وسیعی از منطقه جنوب اردستان به چشم می‌خورد. شکل ۳ نمایی از رخنمون‌های دگرسانی در منطقه اکتشافی ظفرقند را نمایش می‌دهد.

ریوداسیتی قابل مشاهده است. با فاصله گرفتن از فیلیک، دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیک به صورت محدود جایگزین آنها شده است (شکل ۲). دگرسانی پروپیلیتیک در سنگ‌های محدوده بیرونی کانسار گسترش دارد (شکل ۲) (Alaminia et al., 2017).



شکل ۲- گسترش هاله‌های دگرسانی در محدوده اکتشافی ظفرقند (با تغییرات از Alaminia و همکاران (۲۰۱۷)).

Fig 2. The expansion of alteration halos in Zafarghand exploration area (after some changes from Alaminia et al. (2017)).



شکل ۳- رخنمون‌های دگرسانی در منطقه اکتشافی ظفرقند. (a) قسمتی از رخنمون دگرسانی‌ها در منطقه، (b) رخنمون دگرسانی‌های فیلیک و پروپیلیتیک و (c) رخنمون دگرسانی‌های آرژیلیک و پروپیلیتیک (Esmailzadeh Kalkhoran et al., 2024).

Fig 3. The alteration outcrops in the Zafarghand exploration area. (a) Part of the alterations outcrop in the area, (b) Outcrop of phyllic and propylitic alteration and (c) Outcrop of argillic and propylitic alteration (Esmailzadeh Kalkhoran et al., 2024).

### ۳- مواد و روش‌ها

#### ۳-۱- مجموعه داده‌ها

در راستای هدف اصلی در این مطالعه و برای بارزسازی دگرسانی‌های مختلف و کانی‌های شاخص در ارزیابی پتانسیل معدنی در منطقه مورد مطالعه، از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده استر (ASTER) بهره گرفته خواهد شد.

سنجنده استر (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) بر روی ماهواره Terra قرار گرفته و در سال ۱۹۹۹ به فضا پرتاب شده است. داده‌های این سنجنده طبق جدول ۱ دارای ۱۴ باند است (Ghannadpour et al., 2024) که سه باند در محدوده VNIR با توان تفکیک مکانی ۱۵ متر، شش باند در محدوده SWIR با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر و پنج باند در محدوده TIR با توان تفکیک مکانی ۹۰ متر قرار دارد (جدول ۱). هر سین تصویر استر منطقه‌ای به وسعت ۶۰\*۶۰ کیلومتر را پوشش می‌دهد. تصاویر استر به دلیل تعدد باندها در محدوده SWIR و TIR کاربرد زیادی در مطالعات زمین‌شناسی به ویژه تشخیص زون‌های دگرسانی دارند. باندهای SWIR این تصاویر محدوده‌های جذبی Mg-O-H, Si-O-H, Al-O-H را دربر گرفته و می‌توانند در شناسایی آنها مؤثر واقع شوند (Li et al., 2014). در میان باندهای مادون قرمز بازتابی آن، ۶ باند در طول موج ۱/۵ تا ۳ میکرومتر طراحی شده است که برای کاربردهای زمین‌شناسی (خصوصاً کانی‌شناسی) بسیار کاربردی است. ۵ باند مادون قرمز حرارتی نیز برای برآورد دقیق دمای سطح زمین و اندازه‌گیری گسیلمندی پدیده‌های مختلف استفاده می‌شود. از لحاظ رادیومتریکی، تصاویر مرئی و مادون قرمز بازتابی به صورت ۸ بیتی و تصاویر مادون قرمز حرارتی به صورت ۱۲ بیتی طراحی شده که امکان افزایش دقت رادیومتریکی و مکانی باندهای حرارتی آن را فراهم کرده است (Goetz et al., 1975). داده‌های سنجنده استر برای شناسایی دگرسانی‌ها، کانی‌ها و سنگ‌شناسی در مطالعات زمین‌شناسی به کار برده می‌شود. داده‌های سنجنده استر به تنهایی یا به صورت ترکیبی با سایر ماهواره‌های سنجنش از دور و داده‌های زمینی برای تولید نقشه‌های زمین‌شناسی استفاده می‌شوند (Ramachandran et al., 2011). استر قابلیت استفاده ترکیبی با سایر ماهواره‌های سنجنش از دور را نیز دارد. با ترکیب داده‌های استر و سایر ماهواره‌ها و سنجنده‌ها، می‌توان

نقشه‌هایی با دقت بالاتر تولید کرد. در بسیاری از پژوهش‌های سال‌های اخیر، بر استفاده ترکیبی داده‌های سنجنده استر و سایر ماهواره‌های سنجنش از دوری تأکید شده است. بارزترین نمونه چنین ترکیبی در داده‌های لندست و استر دیده می‌شود. تصاویر استفاده شده در این مطالعه؛ تصاویر LIT استر برای سال ۲۰۰۲، که علت انتخاب این تصویر این بوده است که از سال ۲۰۰۸ میلادی، ۶ باند مادون قرمز طول موج کوتاه (SWIR) سنجنده استر به صورت کامل از کار افتاد و داده‌های آن از این سال، بدون باندهای مذکور در سایت‌ها عرضه می‌شود.

#### ۳-۲- روش سینگولاریتی

روش سینگولاریتی روشی جهت تخمین غلظت عناصر به وسیله شبکه‌های مربعی در حال توسعه می‌باشد (Wang et al., 2018). به منظور تخمین غلظت در این روش، از پنجره‌های مربعی شکل برای اندازه‌گیری تراکم غلظت حول یک موقعیت خاص (نمونه مد نظر) استفاده می‌شود (Xiao et al., 2018). این روش قادر به شناسایی آنومالی‌های پنهان شده در زمینه که آنومالی ضعیف نامیده شده و همچنین از طریق وزن‌دهی به شیوه معکوس فاصله (IDW) قابل تشخیص نیستند، می‌باشد. در این روش با بررسی تغییرات غلظت عناصر با تغییر مساحت، تهی‌شدگی یا غنی‌شدگی عناصر مشخص می‌شود. رابطه فرکتالی این متغیرها از رابطه (۱) زیر قابل محاسبه هستند (Cheng, 2006).

$$C(A) = c \cdot A^{\frac{\alpha}{2}-1} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه  $C(A)$  نشان‌دهنده چگالی فلز در مساحت  $A$ ،  $c$  مقدار ثابت و  $\alpha$  مقدار سینگولاریتی محلی می‌باشد (Cheng, 2006).

برای تعیین مقدار  $\alpha$ ، مربع‌هایی با مرکز ثابت در اندازه ضلع‌های  $r_i$  در نظر گرفته می‌شود.

$$r_i = (2i-1)r_{\min} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$r_{\min} = r_1 < r_2 < \dots < r_n = r_{\max}$ ،  $i=1, 2, \dots, n$  که در آن  $n$  تعداد پنجره یا شبکه‌های مربعی،  $r_{\max}$  بزرگترین سایز پنجره در نظر گرفته می‌شود. شایان ذکر است که شاخص سینگولاریتی از شیب خط مستقیم برازش شده با جفت داده‌های  $C(A)$  (میانگین غلظت در هر پنجره) و  $r$  (سایز پنجره) در نمودار لگاریتمی، تخمین زده می‌شود (Cheng, 2007). در واقع با لگاریتم‌گیری از رابطه (۱)، ارتباط بین سایز پنجره یا شبکه  $r_i$



گذاشته‌اند را حذف و در تصاویر دریافتی ایجاد کنتراست می‌نماید.

بر روی داده‌های مورد نظر در این مطالعه، تصحیح هندسی انجام شده و این داده‌ها زمین مرجع شده‌اند و تنها نیاز است که بر روی این داده‌ها تصحیح رادیومتریک انجام شود (Beiranvand pour and Hashim, 2011, Oleson et al., 2019, Abubakar et al., 2022). برای حذف تأثیرات مربوط به تابش خورشید، عبور پذیری جو و نیز خطای دستگاهی، تأثیرات توپوگرافی در تصاویر استر از روش باقی‌مانده لگاریتمی (Log Residual) استفاده شده است (Fereydooni et al., 2017). هم‌چنین روش بازتاب متوسط نسبی داخلی (IARR) برای نواحی خشک و نیمه‌خشک به علت پوشش گیاهی اندک و هم‌بند میزان ناچیز بخار آب، مناسب است و در واقع برای منطقه‌ای که هیچ اندازه‌گیری خاص زمینی وجود نداشته باشد نیز می‌تواند مؤثر باشد (Fereydooni et al., 2017). برای حذف اثر جذب و پخش امواج الکترومغناطیسی از روش QUAC (QUick Atmospheric Correction) استفاده شده است. این روش یک روش تصحیح اتمسفری برای محدوده مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی است (Pardel et al., 2019). این روش برای تصحیح اتمسفری تصاویر چندطیفی و ابرطیفی در بازه بین ۴۰۰ تا ۳۰۰۰ نانومتر کاربرد دارد. الگوریتم این روش برای تصحیح تصاویری مناسب است که در گذشته تهیه شده‌اند یا تصاویری که فاقد نمونه‌های اتمسفری و زمینی برای اعمال روش‌های مطلق باشند (Bernstein et al., 2005).

#### ۴-۲- آماده‌سازی تصاویر ماهواره‌ای جهت استخراج

##### داده‌ها

پس از اعمال روش‌های فوق‌الذکر به منظور پیش‌پردازش تصویر استر منطقه ظفرقند در نرم افزار ENVI (نسخه 5.3)، جهت آماده‌سازی تصویر مورد نظر به منظور اعمال الگوریتم روش سینگولاریتی، در ابتدا تصویر سنجنده استر منطقه مورد نظر با مختصات ارائه شده در قسمت زمین‌شناسی، به اصطلاح بریده شده (Resize) و باندهای ۴ تا ۹ محدوده SWIR به منظور استخراج مقادیر دیجیتال نامبر (DN) مربوط به هر پیکسل انتخاب شده‌اند. انتخاب باندهای فوق بر اساس مطالعات صورت گرفته برای کانسارهای مس پورفیری با داده‌های سنجنده استر و جهت بکارگیری آنها در تکنیک بازسازی نسبت بانندی بوده

و میانگین غلظت در هر شبکه ( $C[A(r_i)]$ ) به صورت یک خط راست و مطابق رابطه (۳) خواهد بود (Wang et al., 2018):

$$\log C[A(r_i)] = c + (\alpha - 2) \log(r_i) \quad (\text{رابطه ۳})$$

مقدار  $2 - \alpha$  را می‌توان از شیب خط راست بدست آورد. عملیات فوق‌الذکر برای هر موقعیت در منطقه مورد مطالعه اجرا شده و به طور مشابه برای هر نقطه در مرکز مربع اولیه، یک مقدار سینگولاریتی محاسبه می‌شود.

برای یک نقشه ژئوشیمیایی، مقدار  $\alpha$  یا همان شاخص سینگولاریتی نزدیک به ۲ یک توزیع عادی را نشان می‌دهد. در حالی که مناطقی با سینگولاریتی مثبت ( $\alpha > 2$ ) نمایانگر تهی‌شدگی و سینگولاریتی منفی ( $\alpha < 2$ ) نشان‌دهنده غنی‌شدگی غلظت عناصر در منطقه مورد نظر می‌باشد (Liu et al., 2019).

در ادامه و در بخش پردازش و نتایج، پس از انجام پیش‌پردازش‌های مورد نظر بر روی تصاویر ماهواره‌ای سنجنده استر و آماده‌سازی داده‌ها، الگوریتم روش سینگولاریتی بر روی مقادیر روشنایی هر پیکسل با در نظر گرفتن مختصات آنها اعمال خواهد شد و در نهایت جهت بارزسازی دگرسانی‌های مدنظر، از روش‌های بارزسازی نسبت‌باندی بهره گرفته خواهد شد. در شکل ۴ مراحل انجام این مطالعه در قالب یک فلوجارت نمایش داده شده‌است.

#### ۴- پردازش و نتایج

##### ۴-۱- پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

در این قسمت قبل از اعمال روش ساختاری جدایش آنومالی از زمینه، به آماده‌سازی و پیش‌پردازش تصویر ماهواره‌ای سنجنده استر پرداخته خواهد شد. زیرا به منظور دریافت اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای لازم است پیش از استفاده از آنها پیش‌پردازش‌های رادیومتریک و هندسی بر روی تصاویر صورت گیرد. پیش‌پردازش، شامل عملیاتی می‌شود که لازم است قبل از آنالیز اصلی داده‌ها و استخراج اطلاعات صورت گیرد. تصحیح رادیومتریک و تصحیح هندسی از جمله این عملیات‌ها می‌باشد. تصحیحات هندسی جهت ژئورفرنس کردن تصویر و تصحیحات رادیومتریک شامل عملیاتی برای حذف اثراتی چون عبور نور خورشید از ابر، ذرات معلق موجود در فضا، اکسیژن، نیتروژن و عناصر دیگر که ایجاد پارازیت کرده، می‌باشد. به عبارت دیگر تصحیحات رادیومتریک عواملی که روی طیف‌های دریافتی تأثیر

فرصتی فراهم آورده است تا پیکسل‌ها به عنوان یک نمونه معلوم با مختصات خاص به نمایش درآیند. این نمونه به دلیل ابعاد کوچک منطقه، برای اعمال روش سینگولاریتی و نمایش بهتر تأثیر این روش‌ها بر روی داده‌ها (مقادیر DN هر پیکسل) بسیار مناسب است. در نتیجه، در پژوهش حاضر، حتی با وجود کاهش کیفیت تصویر، دید پیکسل‌ها به عنوان یک نمونه مهم و ممتاز در این تصویر، موقعیت خود را حفظ کرده و به تحلیل و مدل‌سازی دقیق‌تر داده‌ها کمک می‌کند.

است. زیرا باندهای مذکور به توجه به ماهیت جذب و بازتاب از جمله مهمترین باندهای تصاویر ماهواره‌ای سنجنده استر جهت بارزسازی دگرسانی‌های کانسار مس پورفیری محسوب می‌شوند. خروجی ریسایز شده باند شماره ۹ به عنوان یک نمونه در شکل ۵ قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود کیفیت تصویر مورد نظر خیلی بالا نیست و این موضوع به دلیل کوچک بودن منطقه مطالعاتی نسبت به یک سین از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده استر و به تبع کاهش تعداد پیکسل‌هاست کاهش کیفیت تصویر به دلیل ابعاد کوچک منطقه مورد مطالعه،

جدول ۱: مشخصات عمومی سنجنده استر (Ghannadpour et al., 2024).

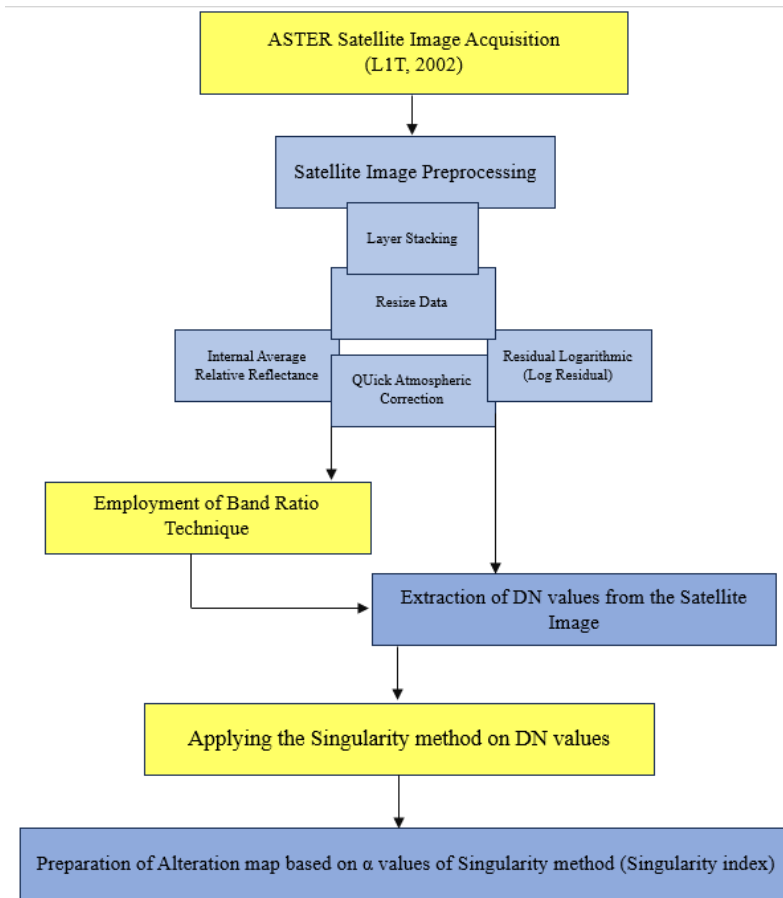
Table 1. General specifications of ASTER Sensor (Ghannadpour et al., 2024).

Subsystem	Band No.	Spectral Rang ( $\mu\text{m}$ )	Spatial Resolutions (m)	Quantization Levels
VNIR	1	0.52-0.60	15	8 bits
	2	0.63-0.69		
	3 (N & B)	0.78-0.86		
SWIR	4	1.60-1.70	30	8 bits
	5	2.145-2.185		
	6	2.185-2.225		
	7	2.235-2.285		
	8	2.295-2.365		
	9	2.360-2.430		
	TIR	10		
11		8.475-8.825		
12		8.925-9.275		
13		10.25-10.95		
14		10.95-11.65		

جدول ۲- مشخصات آماری باندهای محدوده SWIR (باندهای ۴ تا ۹) مربوط به مقادیر DN.

Table 2. The statistical specifications of SWIR range bands (bands 4 to 9) related to DN values.

No.	Band	Average	Variance	Standard deviation
1	4	1.7193	0.0988	0.3143
2	5	1.7164	0.0708	0.2660
3	6	1.6378	0.0551	0.2348
4	7	1.4454	0.0256	0.1601
5	8	1.4314	0.0279	0.1671
6	9	1.4126	0.0219	0.1481



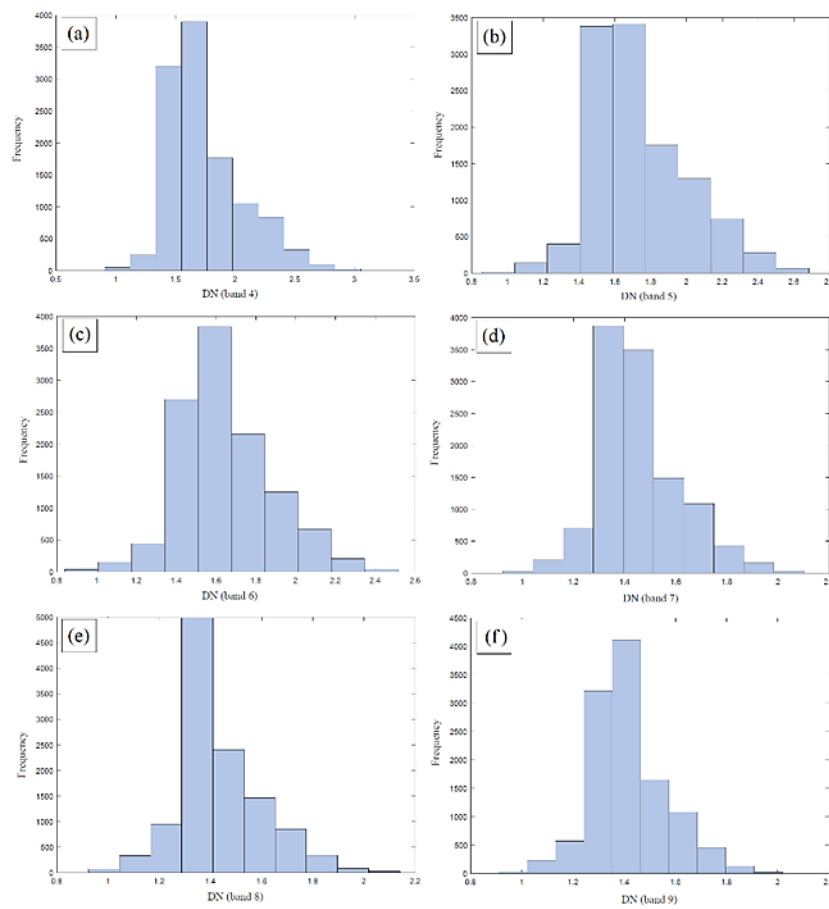
شکل ۴- فلوچارت مراحل و روند انجام کار.

Fig 4. Flowchart of work steps and processes.



شکل ۵ - تصویر ریسایز شده سنجنده ASTER برای محدوده SWIR در منطقه ظفرقند (باند ۹).

Fig 5. A resized image of the ASTER sensor for the SWIR range in the Zafarghand area (band 9).



شکل ۶- هیستوگرام مقدار DN محاسبه شده برای محدوده SWIR. (a) باند ۴، (b) باند ۵، (c) باند ۶، (d) باند ۷، (e) باند ۸ و (f) باند ۹.  
 Fig 6. The histogram of calculated DN values for the SWIR range. (a) band 4, (b) band 5, (c) band 6, (d) band 7, (e) band 8 and (f) band 9.

میزان جذب برای همان هدف در آن بالاتر باشد در مخرج کسر قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه کانی‌های شاخص زون حاوی دگرسانی آرژیلیک دارای جذب حداکثری در باندهای ۵ و ۶ و انعکاس در باندهای ۴ و ۷ می‌باشد، لذا از نسبت باندی آرژیلیک استفاده کرده‌ایم. جهت بارسازی زون‌های حاوی دگرسانی فیلیک، با توجه به جذب حداکثری در باند ۶ و انعکاس حداکثری در باند ۷، جهت آشکارسازی فیلیک استفاده شد، در همین راستا، به منظور آشکارسازی زون‌های حاوی دگرسانی پروپیلیتیک نیز با توجه به ویژگی‌های جذبی شاخص در باندهای ۷ و ۸ و همچنین انعکاس شاخص در باندهای ۶ و ۹ از نسبت مربوط به پروپیلیتیک بهره گرفته شد (Grove et al., 1992, Hunt et al., 1971, Salisbury et al., 1992, Vicente et al., 2011).

شایان ذکر است ترکیب نسبت باندهای انتخابی فوق‌الذکر بر اساس نسبت‌های گزارش شده در جدول ۳ برای تعیین

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، مقادیر DN از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. لذا در استفاده از جدایش آنومالی از زمینه که اکثراً پیش‌فرض نرمال بودن داده‌ها را شامل می‌شوند، محدودیتی وجود ندارد.

#### ۳-۴- تکنیک بارسازی نسبت باندی

روش نسبت باندی یکی از تکنیک‌های رایج در پردازش تصاویر ماهواره‌ای است. روش نسبت‌گیری باندها می‌تواند برای بارسازی اختلاف طیفی بین باندها استفاده شود و همچنین اثرات سایه و اختلاف روشنایی زمین ناشی از توپوگرافی را از بین می‌برد (Hewson et al., 2005). با شناخت خواص انعکاسی پدیده‌ها از روی نمودار طیفی آنها، می‌توان به کمک روش فوق پدیده‌های مختلفی همچون مرز واحدهای سنگی و دگرسانی‌ها را بارز ساخت. در این روش، باندی که میزان انعکاس آن از هدف مورد نظر بیشتر باشد در صورت کسر و باندی که

مشخصات اولیه آماری نسبت‌های باندی مذکور به همراه نمودار فراوانی آنها به ترتیب در جدول ۴ و شکل ۷ قابل مشاهده هستند.

دگرسانی‌های مربوط به کانی‌سازی هیدروترمال با نگاه ویژه به کانسارهای مس پورفیری بکار گرفته خواهد شد ( El-Qassas et al., 2023, Shahi et al., 2014, Mhangara, 2005 ).

جدول ۳- نسبت‌های باندی مورد استفاده جهت تعیین دگرسانی‌ها (مس پورفیری).

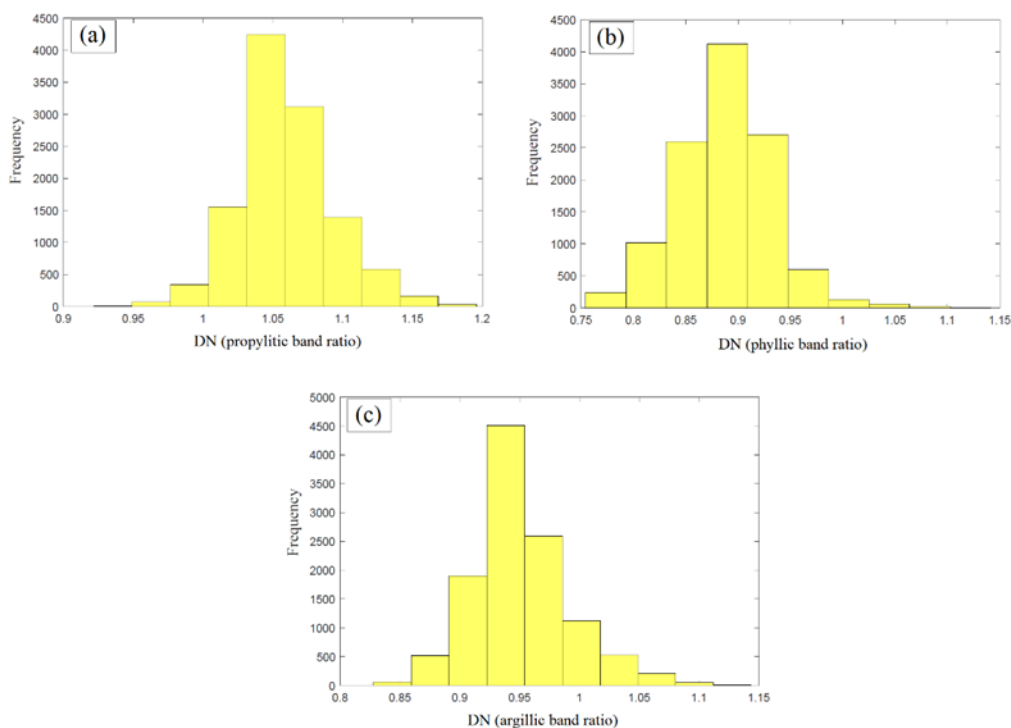
Table 3. The band ratios used for determining alterations (porphyry copper).

No.	Alteration type	Band ratio
1	Propylitic	$\frac{b_6+b_9}{b_7+b_8}$
2	Phyllic	$\frac{b_7}{b_6}$
3	Argillic	$\frac{b_4+b_7}{b_5+b_6}$

جدول ۴- مشخصات آماری مقادیر DN مربوط به نسبت باندی‌های جدول ۳.

Table 4. The statistical characteristics of DN values corresponding to the band ratios of Table 3.

No.	Alteration Type	Average	Variance	Standard deviation
1	Propylitic	1.0594	0.0011	0.0333
2	Phyllic	0.8874	0.0021	0.0457
3	Argillic	0.9508	0.0016	0.0405



شکل ۷- هیستوگرام مقدار DN محاسبه شده برای نسبت‌های باندی گزارش شده در جدول ۳. (a) دگرسانی پروپیلیتیک، (b) دگرسانی فیلیک و (c) دگرسانی آرژیلیک.

Fig 7. The histogram of calculated DN values for the band ratios reported in Table 3. (a) Propylitic alteration, (b) Phyllic alteration, and (c) Argillic alteration.

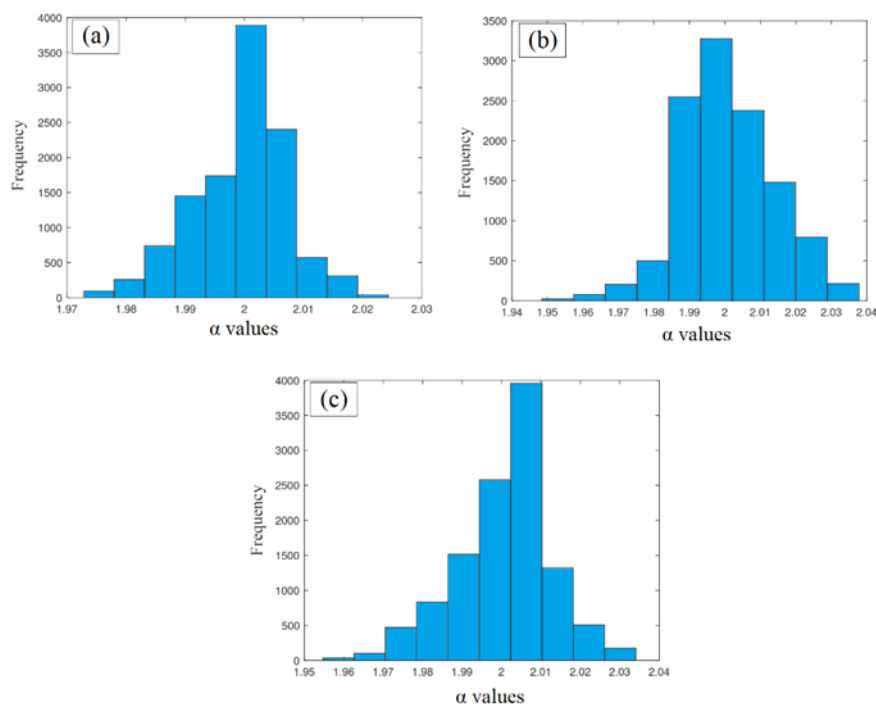
گرفته است. برنامه مورد نظر ماتریسی از مقادیر مربوط به یک شبکه سیستماتیک از داده‌ها را به همراه  $n$  (تعداد پنجره یا شبکه‌های مربعی) و  $rmin$  (سایز کوچکترین مربع یا مربع اولیه) به عنوان ورودی دریافت می‌کند و مقدار شاخص سینگولاریتی را به عنوان خروجی در اختیار کاربر قرار می‌دهد. سپس در مرحله دوم، مقادیر دیجیتال نامبر نسبت‌های باندی معرفی شده در قسمت قبل، از محدوده SWIR منطقه اکتشافی ظفرقند، به عنوان ورودی در اختیار الگوریتم روش سینگولاریتی قرار گرفته و مقدار  $rmin$  نیز بر اساس پیکسل سایز تصاویر ماهواره‌ای سنجنده استر در محدوده SWIR، برابر با ۳۰ متر تعریف شده است. شایان ذکر است که مقدار  $n$  برابر با ۷۰ در نظر گرفته شده است. در نهایت نیز پس از اجرای الگوریتم روش سینگولاریتی، مقادیر  $\alpha$  مورد نظر برای مرکز هر پیکسل از مجموعه پیکسل‌های ماتریس تصاویر، مورد محاسبه قرار گرفته که مشخصات آماری آنها در جدول ۵ گزارش شده است. نمودار فراوانی مقادیر  $\alpha$  نیز در شکل ۸ قابل مشاهده است.

در شکل ۷ مشاهده می‌شود که توزیع مقادیر دیجیتال نامبر مربوط به نسبت باندی‌های مربوط به بارزسازی دگرسانی‌های کانی‌زایی منطقه مورد مطالعه نیز از توزیع نرمال پیروی می‌کنند و نیازی به نرمال‌سازی داده نیست. لذا می‌توان در مرحله بعد به کمک روش سینگولاریتی به جدایش مقادیر آنومال از زمینه پرداخت.

انتخاب روش سینگولاریتی با توجه به شکل مربعی پیکسل‌های تصویر و میانگین مقدار DN مختص به آن، به نظر می‌رسد به منظور جداسازی مقادیر آنومال از زمینه، عملکرد قابل قبولی را داشته باشد. زیرا تصاویر ماهواره‌ای بر اساس ماهیت رستری که دارند (Liu and Mason, 2016)، مربع مورد نظر و دیجیتال نامبر مختص به آن مربع (پیکسل) مورد نظر را برای الگوریتم روش سینگولاریتی و گسترش شبکه‌های مورد نظر (افزایش تعداد مربع‌ها) فراهم می‌نمایند.

#### ۴-۴- بکارگیری الگوریتم روش سینگولاریتی بر مقادیر DN

در این قسمت به منظور بکارگیری روش سینگولاریتی، در ابتدا الگوریتم این روش در نرم‌افزار متلب مورد برنامه‌نویسی قرار



شکل ۸- هیستوگرام مقدار  $\alpha$  محاسبه شده برای نسبت‌های باندی گزارش شده در جدول ۳. (a) دگرسانی پروپلیتیک، (b) دگرسانی فلیک و (c) دگرسانی آرژیلیک.

Fig 8. The histogram of calculated  $\alpha$  values for the band ratios reported in Table 3. (a) Propylitic alteration, (b) Phyllic alteration, and (c) Argillic alteration.

جدول ۵: مشخصات آماری مقادیر  $\alpha$  محاسبه شده برای نسبت‌های بانندی.

Table 5. The statistical characteristics of calculated  $\alpha$  values for band ratios.

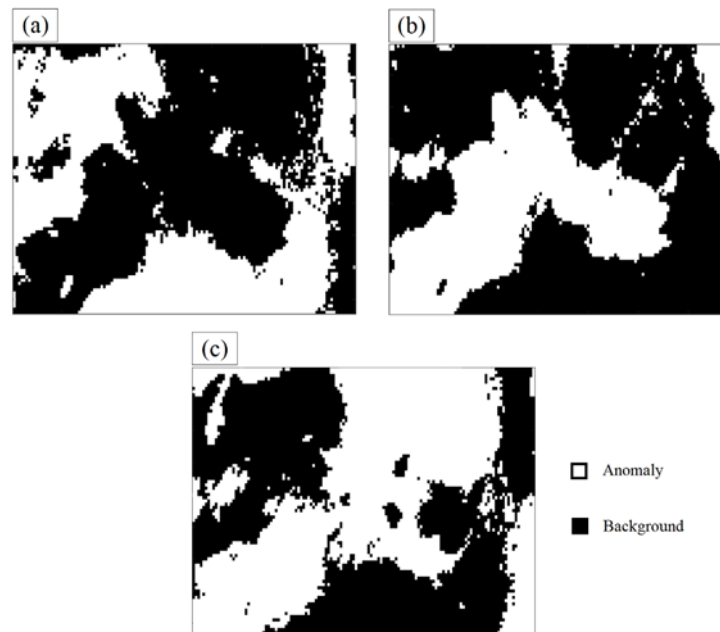
Band ratio	Average	Minimum	Maximum
$\frac{b_6+b_9}{b_7}$	1.9995	1.9728	2.0243
$\frac{h_7+h_6}{b_7}$	2.0007	1.9484	2.0378
$\frac{h_7}{b_4+b_7}$	2.0008	1.9546	2.0341

(یعنی همان مقادیر آنومال) در ارتباط نزدیکی با دگرسانی‌های پروپیلیتیک و فیلیک نمایش داده در شکل ۳ می‌باشند. البته تصاویر باینری با توجه به دو حالت بودن در نمایش پیکسل‌ها و استفاده از دو رنگ سیاه و سفید، قادر به نمایش شدت‌های متوسط این دگرسانی‌ها نیستند. لذا جهت نمایش هر چه بهتر عملکرد این روش ترکیبی در برآورد دگرسانی‌های پروپیلیتیک و فیلیک منطقه مورد مطالعه، از مقادیر  $\alpha$  بهره گرفته شده و جهت درونیابی مقادیر  $\alpha$  به منظور تهیه نقشه دگرسانی از روش معکوس فاصله استفاده شده است.

در نهایت نیز به کمک نرم‌افزار Surfer تصاویر مناطق امیدبخش منطقه ظفرقند بر اساس جدایش صورت گرفته به کمک روش سینگولاریتی، رسم شده‌اند (شکل ۱۰).

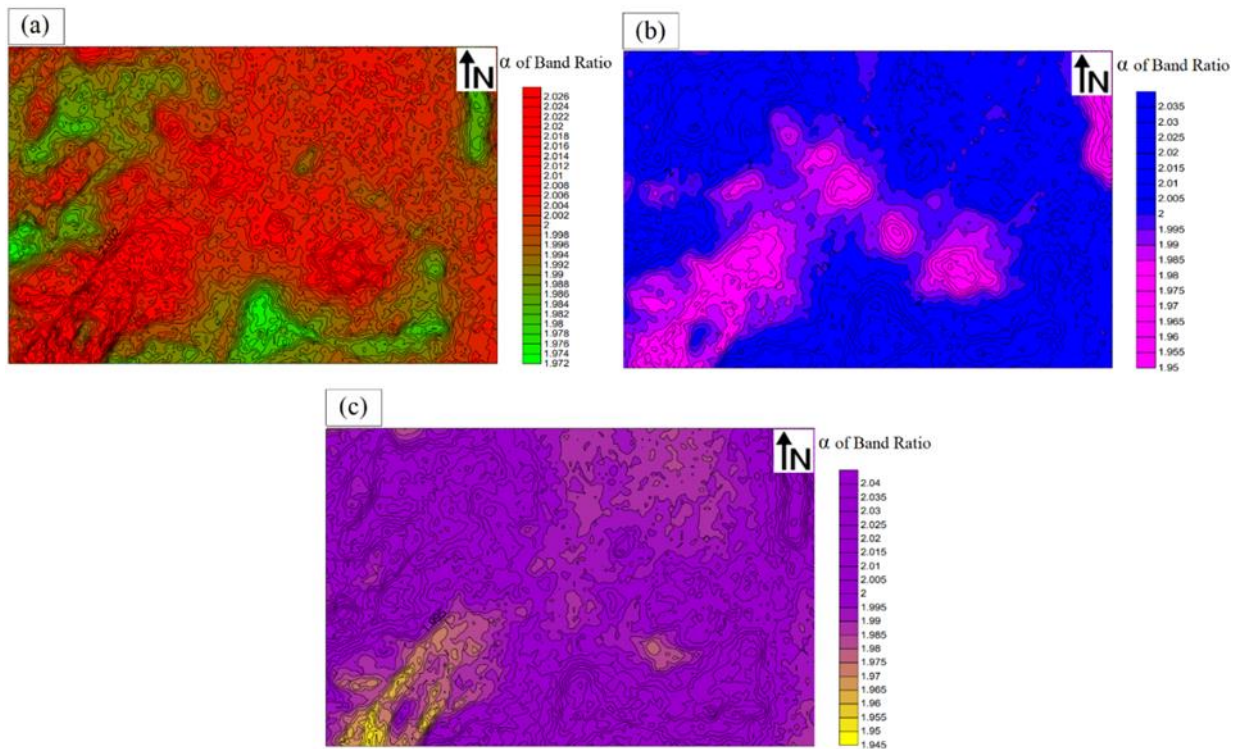
در شکل شماره ۸ مشاهده می‌شود که مقادیر  $\alpha$  محاسبه شده توسط روش سینگولاریتی از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. همانطور که در گذشته نیز مطرح شد، مقادیر  $\alpha$  کوچکتر از ۲ به عنوان مقادیر آنومال و مقادیر  $\alpha$  بزرگتر از ۲ به عنوان مقادیر زمینه در نظر گرفته می‌شوند. در شکل ۸ نیز مشاهده می‌شود که تقریباً در مقدار  $\alpha=2$  نمودار زنگوله‌ای شکل فراوانی مقدار  $\alpha$ ، دارای تقارن نسبی می‌باشد (نمودار فراوانی در محور  $\alpha=2$  تقریباً متقارن است). بر این اساس تصاویر باینری محدوده ظفرقند مربوط به سه دگرسانی پروپیلیتیک، فیلیک و آرژیلیک تهیه شده که در شکل ۹ قابل مشاهده هستند.

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، مقادیر یا پیکسل‌های روشن که مربوط به نقاط هدف تعیین شده توسط روش سینگولاریتی بر روی تصاویر ماهواره‌ای استر می‌باشد



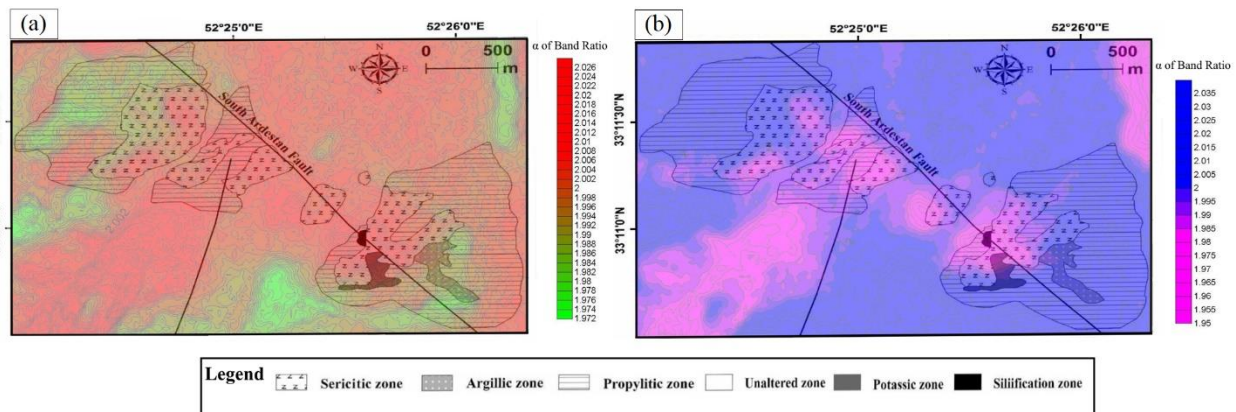
شکل ۹- نقشه باینری مقادیر سینگولاریتی کوچکتر از ۲ ( $\alpha < 2$ ) منطقه ظفرقند. (a) دگرسانی پروپیلیتیک، (b) دگرسانی فیلیک و (c) دگرسانی آرژیلیک.

Fig 9. A binary map of singularity values smaller than 2 ( $\alpha < 2$ ) in the Zafarghand area. (a) Propylitic alteration, (b) Phyllic alteration, and (c) Argillic alteration.



شکل ۱۰- تصویر مناطق امیدبخش محدوده ظفرقند به کمک روش سینگولاریتی. (a) نسبت بانندی پروپیلیتیک، (b) نسبت بانندی فیلیک و (c) نسبت بانندی آرژیلیک.

Fig 10. An image of promising areas within the Zafarghand region using the singularity method. (a) band ratio of propylitic, (b) phyllic and (c) argillic alterations.



شکل ۱۱- نقشه مناطق امیدبخش تعیین شده به کمک روش سینگولاریتی و منطبق بر نقشه دگرسانی محدوده ظفرقند. (a) نسبت بانندی پروپیلیتیک و (b) نسبت بانندی فیلیک.

Fig 11. A map of determined promising areas using the singularity method, consistent with the alteration map of the Zafarghand region. (a) Propylitic and (b) phyllic band ratios.

بازون‌های کانی‌زایی و دگرسانی محدوده اکتشافی ظفرقند دارند (شکل ۳). به شکل جزئی‌تر می‌توان ادعان داشت که مناطق امیدبخش در شکل ۱۰ که مربوط به نسبت بانندی مرتبط با دگرسانی پروپیلیتیک است، مطابقت بسیار مناسبی را با

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، مناطق امیدبخش (محدوده‌های آنومال) مشخص شده توسط مقادیر شاخص سینگولاریتی برای نسبت بانندی‌های مربوط به دگرسانی‌های پروپیلیتیک، فیلیک و آرژیلیک، مطابقت مطلوبی

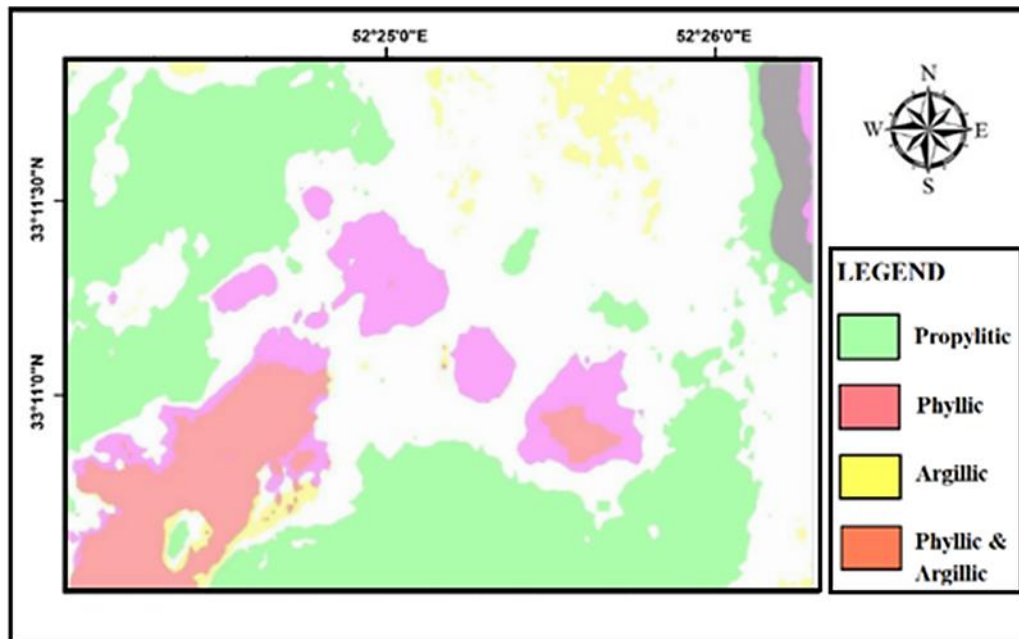


مناطق شمال شرقی و جنوب غربی منطقه است. لذا با توجه به تهیه نقشه دگرسانی منطقه (شکل ۳) بر اساس نمونه برداری صورت گرفته، این عدم تطابق، منطقی به نظر می‌رسد. همچنین قابل ذکر است که عدم وجود مقادیر روشن در شکل ۱۰ به دلیل وسعت بسیار محدود دگرسانی آرژیلیک در منطقه اکتشافی ظفرقند است (همانطور که با نگاهی به شکل ۳ نیز این موضوع تایید می‌گردد).

در نهایت نیز بر اساس دقت مشاهده شده در نتایج حاصله، یک نقشه دگرسانی نهایی از مناطق امیدبخش منطقه ظفرقند در مورد دگرسانی‌های پروپلیتیک، فیلیک و آرژیلیک تهیه شده و در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.

دگرسانی‌های پروپلیتیک نشان داده شده در شکل ۳ دارند. همچنین قابل ذکر است که مناطق هایلایت شده در شکل ۱۰ b به عنوان مقادیر DN مربوط به نسبت بانندی دگرسانی فیلیک در ارتباط بسیار مناسبی با دگرسانی‌های سریسیتیکی مشخص شده در شکل ۳ را دارند. برای درک هر چه بیشتر این موضوع، تصویر نهایی حاصل از دگرسانی‌های پروپلیتیک و فیلیک (شکل ۱۰ a و b) به صورت همپوشانی با نقشه دگرسانی شکل ۳، تهیه شده و در شکل ۱۱ قابل مشاهده می‌باشند (به ترتیب قسمت a و b از شکل ۱۱).

البته شایان ذکر است که مقادیر DN مشخص شده در شمال شرقی و جنوب غربی تصاویر در قسمت a و b از شکل ۱۰ و عدم تطابق آنها با شکل ۳، ناشی از عدم نمونه برداری از



شکل ۱۲- نقشه مناطق امیدبخش تعیین شده به کمک سینگولاریتی در پردازش تصاویر سنجه استر.  
Fig 12. A map of promising areas determined using singularity in ASTER sensor image processing.

## ۵- نتیجه‌گیری

و اکتشاف مواد معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این رو، از این روش برای تحلیل تصاویر ماهواره‌ای، به منظور شناسایی و بارزسازی دگرسانی مس پورفیری در منطقه اکتشافی ظفرقند در شمال شرق استان اصفهان استفاده شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که روش سینگولاریتی به دلیل ویژگی‌های ساختاری خود، در پردازش تصاویر ماهواره‌ای با ساختار رستری بسیار مؤثر واقع شده است. در واقع، با توجه به ویژگی‌های

در پژوهش حاضر، به بررسی استفاده از روش سینگولاریتی در پردازش و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی و بارزسازی دگرسانی‌های مس پورفیری در منطقه اکتشافی ظفرقند در اصفهان پرداخته شد. روش سینگولاریتی به عنوان یک ابزار مؤثر برای جدایش مقادیر غیرعادی یا آنومال از زمینه مطرح می‌باشد و به طور گسترده در حوزه‌های مختلف علوم مانند زمین‌شناسی

شاخص سینگولاریتی، قادر است دگرسانی‌های مختلفی که معمولاً با ویژگی‌های خاص زمین‌شناسی همچون دگرسانی‌های پروپیلیتیک و فیلیک مرتبط هستند را به دقت شناسایی کند و تأیید کند. این نتایج تأیید می‌کنند که استفاده از روش سینگولاریتی می‌تواند به طور قابل توجهی به درک عمیق‌تر و شناسایی دقیق‌تر دگرسانی‌های زمینی کمک کند.

همچنین شایان ذکر است که روش سینگولاریتی بر خلاف روش‌های متداول جدایش آنومالی از زمینه (برای مثال مدل‌های مختلف فرکتالی)، علاوه بر تعیین حدود آستانه‌ای، با اختصاص یک مقدار جدید تحت عنوان شاخص سینگولاریتی، امکان ترکیب با دیگر روش‌ها را فراهم می‌سازد. این برتری باعث می‌شود تا با اعمال یک روش تکمیلی بر روی مقادیر جدید شاخص سینگولاریتی، دقت تعیین حدود آستانه‌ای و به تبع، جدایش آنومالی از زمینه، هر چه بیشتر افزایش یابد. لذا استفاده ترکیبی از این روش با دیگر روش‌های جدایش آنومالی از زمینه در مباحث ژئوشیمی و همچنین ترکیب با تکنیک‌های بارزسازی و پردازش تصاویر در مباحث سنجش از دوری پیشنهاد می‌گردد.

رستری و رقومی تصاویر ماهواره‌ای، این تصاویر اغلب به صورت ماتریس‌هایی از مقادیر دیجیتال (DN) برای هر پیکسل ذخیره می‌شوند. از این رو، می‌توان تحلیل تصاویر ماهواره‌ای را به یک مسئله مشابه با تحلیل داده‌های سیستماتیک تبدیل کرد. تحلیل تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از روش سینگولاریتی می‌تواند به درک بهتر از داده‌ها کمک کند. مقادیر دیجیتال که توسط روش سینگولاریتی مشخص می‌شوند (مقادیر  $\alpha$ )، به دلیل ویژگی‌های ساختاری خود، دارای همبستگی مکانی مناسبی با یکدیگر هستند. این بدین معنی است که مقادیر آنومال یا غیرعادی که توسط این روش شناسایی می‌شوند، به طور معمول در نواحی مشابه یا با ویژگی‌های مشابه در تصاویر مکانی قرار دارند. این همبستگی مکانی امکان می‌دهد که مناطق دگرسانی یا مناطقی که ممکن است ویژگی‌های خاصی داشته باشند، با دقت بیشتری شناسایی شوند و به خوبی مورد بررسی قرار گیرند. استفاده از روش سینگولاریتی در پردازش تصاویر ماهواره‌ای به وضوح نقش مهمی در شناسایی و برجسته کردن دگرسانی‌های زمینی ایفا می‌کند. این روش، با بارزسازی نسبت‌های بانندی بر اساس

## منابع

- ANJC (Alamut Naghsh-e Jahan Company), 2011. Initial exploration report of Zafarghand copper index, Isfahan, Iran. 270pp. (in Persian).
- Alaminia, Z., Bagheri, H., Salehi, M., 2017. Geochemical and geophysical investigations and fluid inclusion studies in the exploration area of Zafarghand (Northeast Isfahan, Iran). *Journal of Economic Geology* 9(2), 29-30. <https://doi.org/10.22067/econg.v9i2.56334>.
- Aminoroayaei Yamini, M., Tutti, F., Ahmadian, J., 2016. Hydrothermal Alteration of Porphyry Copper Deposit in the Southwest of Zafarghand with Emphasis on Mineralogical and Geochemical Changes in the Area. *Researches in Earth Sciences* 7(1), 75-90. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20088299.1395.7.1.6.7>.
- Abubakar, A.J., Hashim, M., Beiranvand Pour, A., 2019. Remote sensing satellite imagery for prospecting geothermal systems in an aseismic geologic setting: Yankari Park. *Applied Earth Observation and Geoinformation* 80, 157-172. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.005>.
- Amidi, S.M., 1975. Contribution à l'étude stratigraphique, pétrologique et pétrochimique des roches magmatiques de la région Natanz-Nain-Surk (Iran central), Ph.D Thesis, Université Scientifique et Médicale de Grenoble.
- Aminoroayaei Yamini, M., Tutti, F., Aminoroayaei Yamini, M.R., Ahmadian, J., Wan, B., 2017. Examination of chloritization of biotite as a tool for reconstructing the physicochemical parameters of mineralization and associated alteration in the Zafarghand porphyry copper system, Ardestan, Central Iran: mineral-chemistry and stable isotope analyses. *Mineralogy and Petrology* 111, 747-759. <https://doi.org/10.1007/s00710-016-0486-7>.
- Aminoroayaei Yamini, M., Tutti, F., Aminoroayaei Yamini, M.R., Ahmadian, J., 2018. Plagioclase as Evidence of Magmatic Evolution in the Zafarghand Porphyry Copper Deposit, NE of Isfahan. *Journal of Economic Geology* 10(1), 61-76.
- Aminoroaya Yamini, M., Tutti, F., Haschke, M., Ahmadian, j., Murata, M., 2017. Synorogenic copper mineralization during the Alpine-Himalayan orogeny in the Zafarghand copper exploration district,

- Central Iran: petrography, geochemistry and alteration thermometry. *Geological Journal* 52(2), 263-281.
- Bahramiyan, S., 2007. Petrological and geochemical study of the intrusive mass of Baghm, Northeast of Isfahan. Master's thesis, Faculty of Natural Sciences, Department of Geology, University of Tabriz, East Azerbaijan, Iran. <http://dx.doi.org/10.29252/ijcm.28.2.489>.
- Bazargani Golshan, M., Arian, M., Afzal, P., Daneshvar Saein, L., Aleali, M., 2024. Outlining of high-quality parts of coal by concentration-volume fractal model in North Kochakali coal deposit, Central Iran. *Journal of Mining and Environment* 15(2), 557-579.
- Beiranvand Pour, A., Hashim, M., 2011. Identification of hydrothermal alteration mineral for exploration of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran. *Asian Earth Sciences* 42(6), 1309-1323. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseas.2011.07.017>.
- Bernstein, L.S., Adler-Golden, S.M., Sundberg, R.L., Levine, R.Y., Perkins, C.T., Berk, A., Ratkowski, J.A., Felde, G., Hoke, M.L., 2005. Validation of the QUick Atmospheric Correction (QUAC) algorithm for VNIR-SWIR multi- and hyperspectral imagery. *Proceedings Volume 5806, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XI*, Orlando, Florida, United States. <http://dx.doi.org/10.1117/12.603359>.
- Behbahani, B., Harati, H., Afzal, P., Lotfi, M., 2023. Determination of alteration zones applying fractal modeling and Spectral Feature Fitting (SFF) method in Saryazd porphyry copper system, central Iran. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 1-20. <http://dx.doi.org/10.19111/bulletinofmre.1264604>.
- Cheng, Q., 2006. GIS-based multifractal anomaly analysis for prediction of mineralization and mineral deposits. In: Harris, J., (Ed.), *GIS Applications in Earth Sciences*, Geological Association of Canada Special Paper, PP. 289-300.
- 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>.
- Cheng Q, Agterberg FP, Bonham-Carter, GF., 1996. A spatial analysis method for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical Exploration* 56, 183-195. [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/1996JCEp..56..183C/doi:10.1016/S0375-6742\(96\)00035-0](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1996JCEp..56..183C/doi:10.1016/S0375-6742(96)00035-0).
- Cheng Q, Yaguang X. Eric G., 2000. Integrated spatial and spectrum method for geochemical anomaly separation. *Natural Resources Research* 9(1), 43-52. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1010109829861>.
- El-Qassas, R.A.Y., Abu-Donia, A.M., Omar, A.E.A., 2023. Delineation of hydrothermal alteration zones associated with mineral deposits, using remote sensing and airborne geophysics data. A case study: El-Bakriya area, Central Eastern Desert, Egypt. *Acta Geodaetica et Geophysica* 5, 71-107. <https://doi.org/10.1007/s40328-023-00405-y>.
- Esmailzadeh Kalkhoran, S., Ghannadpour, S.S., Moeini Rad, A., Jalili, H., 2024. Comparing the Performance of ASTER and LANDSAT 8 Satellite Images in Identifying Iron Oxide and Porphyry Copper Alterations in Zafarghand Region of Isfahan Province. *Journal of Mineral Resources Engineering* 9(1), 41-65.
- Esmailzadeh Kalkhoran, S., Ghannadpour, S.S., Jalili, H., Moeini Rad, A. 2024. Investigating porphyry copper alterations and spectral behavior of related minerals using ASTER satellite images in the Zafarghand region, Isfahan. *Advanced Applied Geology, Articles in Press (In Persian with English Abstract)*.
- Fakhari, S., Jafarirad, A., Afzal, P., Lotfi, M., 2019. Delineation of hydrothermal alteration Zones for porphyry systems utilizing ASTER data in Jebal-Barez area, SE Iran. *Earth Sciences* 11, 80-92. <https://doi.org/10.30495/ijes.2019.664780>.
- Fereydooni, H., Mojeddifar, S., 2017. A directed matched filtering algorithm (DMF) for discriminating hydrothermal alteration zones using the ASTER remote sensing data. *Applied Earth Observation and Geoinformation* 63, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.04.010>.
- Goetz, A.F.H., Billingsley, F.C., Gillespie, A.R., Abrams, M.J., Squires, R.L., Shoemaker, E.M., Lucchitta, I., Elston, D.P., 1975. Applications of ERTS Image and Image Processing to Regional Problems and Geologic Mapping in Northern Arizona. *NASA/JPL Technical Reports 32-1597*, NASA: Pasadena, CA, USA.

- Grove, C.I., Hook, S.J., Paylor III, E.D., 1992. Laboratory reflectance spectra of 160 minerals, 0.4 to 2.5 micrometers. Jet Propulsion Laboratory Publication, Pasadena, California 92-2.
- Ghannadpour, S.S., Hasiri, M., Talebiesfandarani, S., & Jalili, H. (2024). Processing of ASTER satellite images using fractal concentration-area method. *Journal of Mineral Resources Engineering* 9(3), 10.30479/jmre.2024.19329.1665. (In Persian with English Abstract). [https://jmre.journals.ikiu.ac.ir/article\\_3314.html](https://jmre.journals.ikiu.ac.ir/article_3314.html)
- Ghannadpour, S.S., Hasiri, M., Jalili, H., Talebiesfandarani, S., 2024 Satellite Image Processing: Application for Alteration Separation based on U-Statistic Method in Zafarghand Porphyry System (Iran). *Journal of Mining and Environment* 15(2), 667-681.
- Ghannadpour, S.S., Esmailzadeh Kalkhoran, S., Jalili, H., Behifar, M., 2024 Delineation of mineral potential zone using U-statistic method in processing satellite remote sensing images. *International Journal of Mining and Geo-Engineering* 57(4), 445-453.
- Ghannadpour, S.S., Hezarkhani, A., 2022a. A new method for determining geochemical anomalies: UN and UA fractal models. *International Journal of Mining & Geo-Engineering* 56(2), 181-190.
- Ghannadpour, S.S., Hezarkhani, A., 2022b. Delineation of geochemical anomalies for mineral exploration using combining U-statistic method and fractal technique: UN and UA models. *Applied Earth Science* 131(1), 32-40.
- Ghannadpour, S.S., Hezarkhani, A., 2020. Mineral potential mapping for Au and As using Gap statistic method in multivariate mode. *Carbonates and Evaporites* 35, 2. <https://doi.org/10.1007/s13146-019-00546-8>.
- Ghannadpour, S.S., Hezarkhani, A., 2018. Providing the bivariate anomaly map of Cu–Mo and Pb–Zn using combination of statistic methods in Parkam district, Iran. *Carbonates and Evaporites* 33(3), 403–420.
- Ghannadpour, S.S., Hezarkhani, A., 2017. Comparing U-statistic and nonstructural methods for separating anomaly and generating geochemical anomaly maps of Cu and Mo in Parkam district, Kerman, Iran. *Carbonates and Evaporites* 32(2), 155–166.
- Ghannadpour, S.S., Hezarkhani, A., 2016a. Exploration geochemistry data-application for anomaly separation based on discriminant function analysis in the Parkam porphyry system (Iran). *Geoscience Journal* 20(6), 837–850.
- Ghannadpour, S.S., Hezarkhani A., 2016b. Introducing 3D U-statistic method for separating anomaly from background in exploration geochemical data with associated software development. *Journal of Earth System Science* 125(2), 387–401.
- Hewson, R.D., Cudahy, T.J., Mizuhiko, S., Ueda, K., Mauger, A. j., 2005. Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill-Curnamona province of Australia. *Remote Sensing of Environment* 99, 159-172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.04.025>.
- Hezarkhani, A., Ghannadpour, S.S., 2015. Exploration Information Analysis. Amirkabir University of Technology Publications.
- Heidari, S.M., Afzal, P., Sadeghi, B., 2024. Molybdenum and gold distribution variances within Iranian copper porphyry deposits. *Journal of Geochemical Exploration*, 107471.
- Honarmand, M., Moeid, M., Jahangiri, A., Bahadran, N., 2010. Investigation of Geochemical Characteristics of the Intrusive Suite of Natanz, North of Isfahan. *Petrology* 1(3), 65-88.
- Hunt, G. R. Salisbury, J. W., 1971. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. II. Carbonates. *Modern Geology* 2, 23-30.
- Jabari, A., Ghorbani, M., Koopkeh, Y., Tarabi, Gh., Shirdashtzadeh, N., 2010. Petrography and Mineral Chemistry of the Outer West Dikes (Southeast of Ardestan, Iran): Evidence of Magmatic Mixing. *Petrology* 1(2), 17-30.
- Khalatbari Jafari, M., 1992. Plutonism in the Ardestan Region. Master's thesis, Shahid Beheshti University, Iran.
- Latifi, R., 2000. Geological, Petrological, and Geochemical Study of Intrusive Bodies in the South and Northwest of Zafarghand. Master's thesis, University of Isfahan, Iran.
- Liu, J.G., Mason, P.J., 2016. Image Processing and GIS for Remote Sensing: Techniques and Applications. John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2016; ISBN 1118724208.
- Liu, Y., Xia, Q., Carranza, E.J.M., 2019. Integrating sequential indicator simulation and singularity analysis to analyze uncertainty of geochemical anomaly for exploration targeting of tungsten polymetallic

- mineralization, Nanling belt, South China. *Journal of Geochemical Exploration* 197, 143-158. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.11.012>.
- Li, Q., Zhang, B., Lu, L., Lin, Q., 2014. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in Baogutu porphyry deposit, China, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 17, 012174.
- Mhangara, P., 2005. Testing the ability of ASTER (Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer) to tap hydrothermal alteration zones: a case study of the Haib Porphyry Copper-Molybdenum Deposit. Namibia. MSc dissertation, Stellenbosch University.
- Mohammadi, S., Nedaei, A.R., Aalami Nia, Z., 2018. Analysis of the relationship between mineralization and alteration zones with tectonic structures using remote sensing studies in south Ardestan area (northeastern Isfahan). *Geotectonics* 2(7), 29-47. <http://dx.doi.org/10.22077/JT.2020.2434.1013>.
- Mohammadi, S., 1995. Investigation of Volcanism in the Ardestan Region (Central Iran). Master's thesis, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
- Nasr Esfahani, A., Vahabi Moghadam, B., 2010. Tectonic and Magmatic Setting of the Felsic Volcanic Rocks in South Ardestan (Northeast of Isfahan). *Petrology* 1(2), 95-108.
- Oleson, R., Doescher, Ch., 2022. Advance Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Level 1 Precisin Terrain Corrected Registered At-sensor Radiance Product (AST\_L1T). Department of the Interior U.S Geological Survey, 16.
- Pardel, F., Ebrahimi, A., Azizi, Z., 2019. The effect of atmospheric correction methods on the relationship between vegetation indices and canopy cover (Case study: Marjan rangelands of Borujen). *Geospatial Information Technology* 7(2), <http://dx.doi.org/10.29252/jgit.7.2.133>.
- Pourgholam, M.M., Afzal, P., Adib, A., Rahbar, K., Gholinejad, M. 2024. Recognition of REEs anomalies using an image Fusion fractal-wavelet model in Tarom metallogenic zone, NW Iran. *Geochemistry* 84(2), 126093.
- Ramachandran, R., Justice, C.O, Abrams, M.J., 2011. The practice of international policies in the ASTER collaboration, In *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*. Eds., Springer: New York, NY, USA; Chapter 4, 483-508.
- Sadeghian, M., Ghaffary, M., 2011. Petrogenesis of the Zafarghand Granitoid Massif (Southeast of Isfahan). *Petrology* 2(6), 47-70.
- Salisbury, J. W., D'Aria, D. M., 1992. Emissivity of terrestrial materials in the 8–14  $\mu\text{m}$  atmospheric window. *Remote Sensing of Environment* 42(2), 83-106. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90092-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90092-X).
- Sarjoughian, F., Lentz, D., Kananian, A., Ao, S., Xiao, W., 2018. Geochemical and isotopic constraints on the role of juvenile crust and magma mixing in the UDMA magmatism, Iran: evidence from mafic microgranular enclaves and cogenetic granitoids in the Zafarghand igneous complex. *International of Journal of Earth Sciences* 107, 1127-1151. [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2018IJEaS.107.1127S/doi:10.1007/s00531-017-1548-8](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2018IJEaS.107.1127S/doi:10.1007/s00531-017-1548-8).
- Shahi, H., Kamkar-Rouhami, A., 2014. A GIS-based weights of evidence model for mineral potential mapping of hydrothermal gold deposits in Torbat-e-Heydarieh area. *Journal of Mining and Environment* 5(2), 79-89. <https://doi.org/10.22044/jme.2014.324>.
- Shahi, H., Ghavami, R., Kamkar Rouhani, A., 2016. Detection of deep and blind mineral deposits using new proposed frequency coefficients method in frequency domain of geochemical data. *Journal of Geochemical Exploration* 169, 29-39. [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2016JCEp.162...29S/doi:10.1016/j.gexplo.2015.12.006](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2016JCEp.162...29S/doi:10.1016/j.gexplo.2015.12.006).
- Vicente, L.E. and de Souza Filho, C.R., 2011. Identification of mineral components in tropical soils using reflectance spectroscopy and advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment* 115(8), 1824-1836. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.023>.
- Wang, J., Zuo, R., 2018. Identification of geochemical anomalies through combined sequential Gaussian simulation and grid-based local singularity analysis. *Computers & Geosciences* 118, 52-64. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.05.010>.
- 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>.
- Yeganeh Far, H., Ghorbani, M.R., 2010. Geochemical Characteristics and Petrogenesis of Basement Rocks in Southern Ardestan. 29th Geological Congress, Geological Survey and Mineral Exploration Organization of Iran, Tehran, Iran.
- Zamyad, M., Afzal, P., Pourkermani, M., Nouri, R., Jafari, M.R., 2021. Combination of Spectral Feature Fitting (SFF) and Concentration-Number (C-N) Fractal Modeling for Identification Alteration in Tirka Area, NE Iran. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 31(4), 57-68. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.10237429.1400.31.4.3.2>.