



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

Mapping alteration zones associated with Cu mineralization: An approach based on image processing using the singularity method and fuzzy gamma operator

Seyyed Saeed Ghannadpour^{1*}, Morteza Hasiri², Hamid Salehi Shahrabi³, Hadi Jalili³

1. Assistant Professor, Department of Exploration, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

2. M.Sc. Student, Department of Exploration, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

3. Assistant Professor, Iranian Space Research Center (ISRC), Tehran, Iran.

Article info

Article history

Received: 26 May 2024

Accepted: 7 August 2024

Keywords:

Singularity, Image processing, ASTER, Zafarghand, Porphyry copper, Fuzzy gamma operator.



Abstract

Today, remote sensing in geology efficiently identifies alteration zones and suitable locations for hydrothermal deposits. In the present study, satellite image processing techniques are employed to highlight the alteration zones in the Zafarghand exploration area. Zafarghand, located in the northeast of Isfahan, falls within the Central Iran zone according to geological structural zoning (the middle part of the Urumieh-Dokhtar magmatic arc). The Zafarghand porphyry system includes phyllic, potassic, propylitic, argillic, and silicic alteration halos. In this study, ASTER sensor images are used to identify the associated alterations. Due to the raster and digital nature of satellite images, the digital number (DN) values of each pixel in the image matrix are considered as samples in a systematic grid. Ultimately, the singularity method algorithm, as a structural approach for effectively separating geochemical anomalies, is applied to the DN values of ASTER satellite images. Additionally, the fuzzy gamma operator was used to integrate available information layers from the study area, including the lithological layer, fault density, false color composite with ASTER bands 468 (RGB) based on new DN values (calculated α values), and the Cu geochemistry layer. The results from this technique demonstrate that the singularity method, due to its structural nature, is successful in decision-making and effectively identifies alteration zones in the Zafarghand area, particularly propylitic and phyllic alterations. Furthermore, it was observed that the fuzzy gamma operator, using the proposed technique in this study, successfully highlights prospective Cu mineralization areas in the Zafarghand exploration area.

Introduction

Remote Sensing (RS) and geochemical studies have shown increasing capability in the initial stages of mineral deposits exploration, particularly for hidden types. These studies are crucial in the initial stages of mineral exploration, especially for deposits with large halos relative to the ore body. Separating geochemical anomalies from the background is a key step in geochemical exploration (Hezarkhani and Ghannadpour, 2015). There are various methods for anomaly separation that include from nonstructural to structural approaches (Hezarkhani and Ghannadpour, 2015, Ghannadpour and Hezarkhani, 2016a, b, 2017, 2018, 2020, 2022a, b). Structural methods such as the U

spatial statistic, fractal geometry, and the singularity method have been applied in numerous studies (Hezarkhani and Ghannadpour, 2015, Ghannadpour and Hezarkhani, 2016a, b, 2017, 2018, 2020, 2022a, b). This research combines these methods with RS techniques to process ASTER satellite images in the Zafarghand exploration area.

The fuzzy gamma operator integrates information layers from the Zafarghand area, including lithology, fault density, false color composite with ASTER bands 468 (RGB), and Cu geochemistry from the Concentration-Area fractal model. Fuzzy logic, introduced by Lotfi Zadeh, is widely used in mineral mapping for exploration, operating on a scale from 0 to

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.107271>*Corresponding author: Seyyed Saeed Ghannadpour; E-mail: s.ghannadpour@aut.ac.ir

How to cite this article: Ghannadpour, S., Hasiri, M., Salehi Shahrabi, H., Jalili, H., 2024. Mapping alteration zones associated with Cu mineralization: An approach based on image processing using the singularity method and fuzzy gamma operator. Kharazmi Journal of Earth Sciences 10(1), 91- 122. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.107271>



BY NC

1 to represent favorability. It simplifies the assessment and adjustment of membership values and facilitates the creation of favorability maps. By integrating multiple layers with expert knowledge and assigning weights to controlling factors, fuzzy logic effectively identifies potential mineralization areas (Sangaré et al., 2024; Chettah et al., 2024; Shahsavari et al., 2024; Esmailzadeh et al., 2022).

The Zafarghand exploration area (in northeastern Isfahan) is considered as a small part of the Urmia-Dokhtar volcanic arc belt (UDMA) that hosts significant porphyry copper deposits. Initial exploration included geological mapping, rock sampling, and geophysical surveys. Subsequent studies focused on the region's volcanic and volcano-sedimentary rocks, granitoid masses, and andesitic-basaltic dikes (Ghannadpour et al. 2024a, b).

Recent studies highlight the importance of hydrothermal alterations and their relationship with mineralization. This study aims to utilize the singularity method to process ASTER satellite images, identify surface geochemical anomalies, and advance exploration techniques in the Zafarghand exploration area.

Materials and Methods

Dataset

To highlight various alterations and key minerals in the study area, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) satellite images were utilized. The ASTER sensor, launched on the Terra satellite in 1999, provides 14 spectral bands: three in the VNIR range (15-meter resolution), six in the SWIR

range (30-meter resolution), and five in the TIR range (90-meter resolution) (Beiranvand Pour and Hashim, 2014). Each ASTER scene covers an area of 60*60 kilometers. Due to their multiple bands in the SWIR and TIR ranges, ASTER images are extensively employed in geological studies to identify alteration zones (Li et al., 2014). The SWIR bands capture absorption features of Al-O-H, Si-O-H, and Mg-O-H, aiding in their identification. Alone or combined with other RS data, ASTER data is utilized to produce geological maps (Ramachandran et al., 2011).

Singularity Method

The singularity method is applied to estimate element concentrations by increasing square grids that measure concentration density around specific locations (Wang et al., 2018; Xiao et al., 2018). This method identifies weak anomalies that are not detectable through conventional methods. Investigating changes in element concentrations across different areas determines the depletion or enrichment of elements. The singularity index, which indicates how much a region deviates from the background, is calculated by comparing the average concentration in each grid with its size. A singularity index closes to 2 indicates a normal distribution for geochemical maps. While regions with $\alpha > 2$ represent depletion, and $\alpha < 2$ represent enrichment of element concentration in the target region. After preprocessing the ASTER images, the singularity method algorithm will be applied to the brightness values (DN) of each pixel. Finally, the false color composite method will highlight the desired alterations. Figure 1 shows the steps of this study in a flowchart.

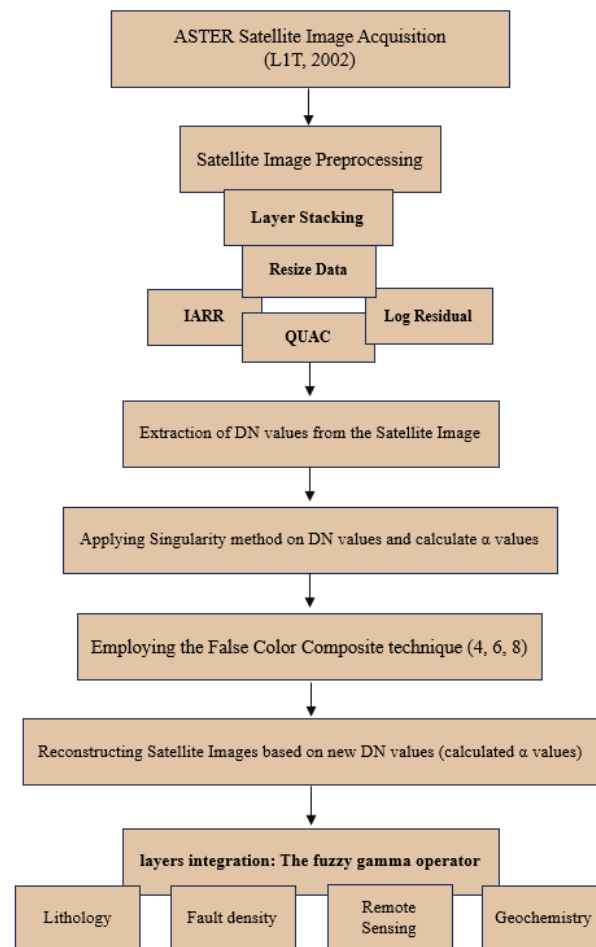


Fig. 1. Flowchart of work steps and process.

Results and Discussion

Preprocessing of Satellite Images

ASTER satellite images were preprocessed before structural methods for anomaly separation were applied. In this study, according to the nature of considered data (Aster satellite images), three pre-processing methods, IARR, Log Residual and QUAC, have been employed.

Application of the Singularity Method

The singularity method, a robust algorithm programmed in MATLAB, was applied to the DN values of bands 4 to 9 in the SWIR range of the Zafarghand area.

It calculated each pixel's singularity index (α). The results indicated a normal distribution of α values, with α values less than 2 representing anomalies ($\alpha < 2$) and values greater than 2 representing the background ($\alpha > 2$).

False Color Composite

A false color composite was created using bands 4, 6, and 8 (R, G and B) from the reconstructed images based on the α values calculated using the singularity method. This composite effectively highlighted alterations: green to light green indicated propylitic alteration, light pink represented phyllic alteration, and pink denoted argillic alteration (Fig. 2).

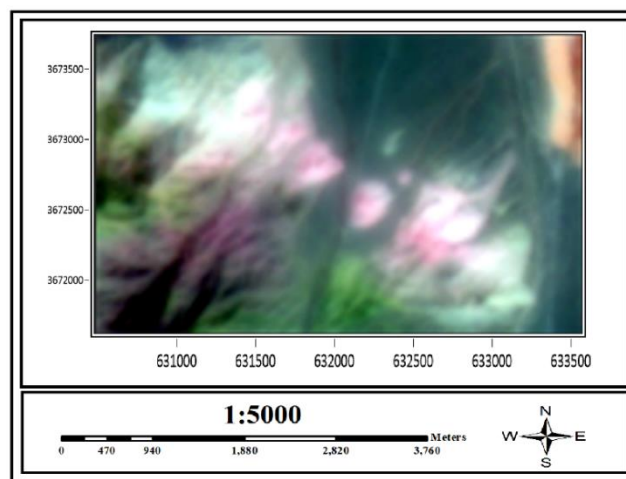


Fig. 2. False Color Composite of ASTER Sensor (R, G, B: 4, 6, 8) Based on Singularity Index Values (WGS 84 / UTM zone 39N).

Fuzzy gamma operator

In this study, the fuzzy gamma operator integrates four key informational layers: lithology, fault density, a false-color composite with ASTER bands 468 (RGB) based on new DN values, and a Cu geochemistry layer from the Concentration-Area fractal method. These layers identify areas with mineral potential. The

lithological layer highlights dacite and rhyodacite for Cu mineralization, and the fault density layer identifies areas favorable for mineralization due to hydrothermal fluid flow. The false color composite detects propylitic and phyllic alterations, aligning well with mineralization zones. The geochemistry layer shows anomalous Cu distributions. Using these layers, Cu potential mapping results are presented in Figure 3.

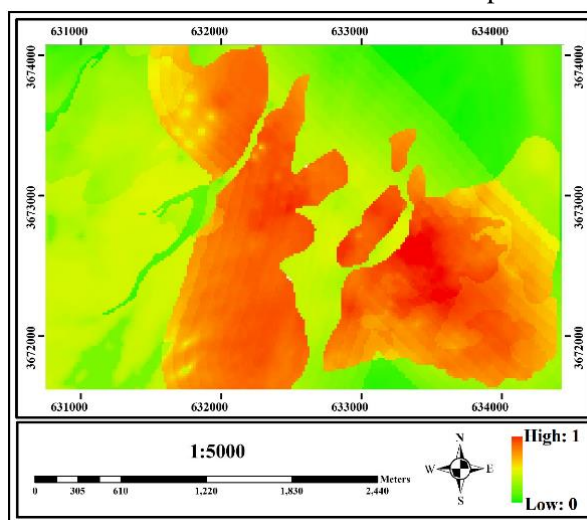


Fig. 3. Output of Fuzzy gamma operator (WGS 84 / UTM zone 39N).

Interpretation and Validation

The identified anomalies closely matched known mineralization and alteration zones in the Zafarghand area, providing a strong validation of proposed approach.

The integrated method of false color composite and singularity, found to be highly reliable, provided a robust identification of alteration zones. The results unequivocally demonstrate the effectiveness of the

singularity method combined with remote sensing techniques in geochemical anomaly detection and mineral exploration.

Conclusions

This study implements the singularity method as an effective tool to separate anomalies values from the background. This method is widely applied in various fields of earth sciences, especially exploratory geochemistry. This research used this method to process satellite images in order to identify porphyry Cu alteration in Isfahan province's northeast Zafarghand exploration area. Due to satellite images' raster and digital characteristics, they are stored as matrices of DN for each pixel. Hence, it is possible to convert the analysis of satellite images into a study similar to systematic data analysis. Obtained results confirm the singularity method's effectiveness in processing satellite images with a raster structure. This is primarily due to the method's unique structural features, such as its ability to facilitate the separation of anomaly values. As a result, the DN values determined by the singularity method algorithm (α values) exhibit a strong spatial correlation.

The study demonstrates that using a false color composite with ASTER bands 468 (RGB) based on new DN values through the fuzzy gamma operator significantly enhances the accuracy and reliability of identifying copper mineralization areas. This operator effectively integrates data layers such as lithology, fault density, false color composite, and Cu geochemistry, providing precise identification of alteration zones. The final map, validated by merging this output with phyllic and propylitic alteration halos, shows a strong correlation with mineralization zones. This method advances remote sensing and mineral exploration strategies, making it useful for future exploration in the Zafarghand area and similar regions.

References

- Beiranvand pour, A., Hashim, M. 2014. ASTER, ALI and Hyperion sensors data for lithological mapping and ore minerals exploration. Springer Plus 3, 130.
- Chettah, W., Mezhoud, S., Hadji, R., 2024. Fuzzy Logic-Based Landslide Susceptibility Mapping in Earthquake-Prone

Areas: A Case Study of the Mila Basin, Algeria. Russian Geology and Geophysics 1–19.

- Esmailzadeh, M., Imamalipour, A., Aliyari, F., 2022. Application of Fuzzy Gamma Operator to Generate Mineral Prospectivity Mapping for Cu-Mo Porphyry Deposits (Case Study: Kighal-Bourmolk Area, Northwestern Iran). Journal of Mining and Environment 13, 129–153.
- Ghannadpour, S.S., Hasiri, M., Jalili, H., Talebiesfandarani, S., 2024a. 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., 2024b. 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).
- 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.
- Hezarkhani, A., Ghannadpour, S.S., 2015. *Exploration Information Analysis*. Amirkabir University of Technology Publications, Tehran, Iran.
- 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. pp. 012174.
- 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; Chapter4. pp. 483-508.
- Sangaré, A., Attou, A., Achkouch, L., El cheikh, Y., Rachid, A., Miftah, A., Diakité, D., 2024. Mapping bauxite-associated alterations in the Boke region (NW part of Republic of Guinea), using the airborne gamma-ray spectrometry data *Scientific African* 24, e02184.
- Shahsavari, H., Arefi, H., Farahani, M.D., Alizadeh Pirbasti, M., Reza Shobairi, S.M., 2024. Mapping Groundwater Resource using Multispectral Sentinel 2 and Fuzzy Logic method, Case Study: Salafchegan, Qom, Iran. *Ecological Questions* 35, 1-26.
- 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.
- 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.

CRediT authorship contribution statement

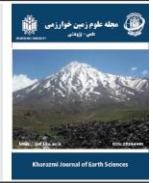
 Seyyed Saeed Ghannadpour	Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Data Curation, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing, Supervision, Project administration
 Morteza Hasiri	Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing
 Hamid Salehi Shahrabi	Software, Investigation, Writing - Review & Editing, Funding acquisition
 Hadi Jalili	Software, Investigation, Writing - Review & Editing, Funding acquisition



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

نقشه برداری زون های دگرسانی مرتبط با کانی سازی مس: رویکردی مبتنی بر پردازش تصاویر با استفاده از روش سینگلاریتی و عملگر فازی گاما

سید سعید قنادپور^{۱*}، مرتضی حصیری^۲، حمید صالحی شهرابی^۳، هادی جلیلی^۲

۱. استادیار، گروه آموزشی اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آموزشی اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.
۳. استادیار، مرکز تحقیقات فضایی ایران (ISRC)، تهران، ایران.

چکیده

امروزه سنجش از دور زمین شناختی در کمترین زمان و با صرف کمترین هزینه، دسترسی به مناطق دگرسان را بسیار میسر کرده و محل های مناسب برای تشکیل کانسارهای گرمابی را مشخص می نماید. در مطالعه پیش رو، به کمک تکنیک پردازش تصاویر ماهواره ای به بازسازی زون های دگرسانی منطقه اکتشافی ظفرقند پرداخته می شود. منطقه اکتشافی ظفرقند، در شمال شرق اصفهان و براساس تقسیم بندی زون های ساختاری زمین شناسی در زون ایران مرکزی (بخش میانی کمان آتشفشانی ماگمایی ارومیه-دختر) قرار دارد. سیستم پورفیری ظفرقند هاله های دگرسانی فیلیک، پتاسیک، پروپیلیتیک، آرژیلیک و کمی سیلیسی را شامل می شود. در این مطالعه با استفاده از تصاویر سنجنده استر، به شناسایی دگرسانی های مرتبط پرداخته شده است. بدین منظور با توجه به ماهیت رستری و رقومی بودن تصاویر ماهواره ای، مقادیر دیجیتال نامبر هر پیکسل از مجموعه ماتریس تصاویر، به عنوان یک نمونه در شبکه ای سیستماتیک در نظر گرفته شده است. در نهایت نیز الگوریتم روش سینگلاریتی به عنوان یک روش ساختاری موثر در جدایش آنومالی های ژئوشیمیایی، بر روی مجموعه مقادیر دیجیتال نامبر پیکسل تصاویر ماهواره ای استر پیاده شده است. علاوه بر این، از عملگر فازی گاما برای ترکیب لایه های اطلاعاتی موجود از محدوده مورد مطالعه استفاده شد که شامل لایه سنگ شناسی (لیتولوژی)، چگالی گسل ها، ترکیب رنگی کاذب با باندهای (RGB) ASTER 468 بر اساس مقادیر جدید DN (مقادیر α محاسبه شده) و لایه ژئوشیمی مس می باشد. نتایج حاصله از تکنیک فوق الذکر نشان می دهد بکارگیری روش سینگلاریتی با توجه به ماهیت ساختاری بودن آن در تصمیم گیری، موفقیت آمیز بوده و در تعیین زون های دگرسانی منطقه ظفرقند به خصوص دگرسانی های پروپیلیتیک و فیلیک بسیار موثر عمل کرده است. همچنین مشاهده گردید که نتیجه عملگر فازی گاما با استفاده از تکنیک پیشنهادی این مطالعه، مناطق امید بخش از نظر کانی سازی مس در محدوده مطالعاتی ظفرقند را به خوبی مشخص کرده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷

واژه های کلیدی

سینگلاریتی، پردازش تصاویر، استر (ASTER)، ظفرقند، مس پورفیری، عملگر فازی گاما.



مقدمه

اکتشاف (مرحله اکتشاف مقدماتی) کاربرد داشته و برای کانسارهایی که هاله های نسبتاً بزرگی نسبت به توده کانسار بر جای می گذارند، اهمیت بیشتری پیدا می کنند. جدایش آنومالی های ژئوشیمیایی از زمینه یکی از مهم ترین و کلیدی ترین مراحل در اکتشافات ژئوشیمیایی می باشد (Hezarkhani and Ghannadpour, 2015). روش های

مطالعات سنجش از دور و مطالعات ژئوشیمیایی در سال های اخیر، توانایی خود را در زمینه کشف کانسارها در مراحل اولیه و به خصوص در انواع پنهان آنها، بیش از پیش نمایان ساخته اند. این نوع مطالعات در مراحل مختلف اکتشاف ذخایر معدنی به ویژه در مراحل اولیه

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.107271>*نویسنده مسئول: سید سعید قنادپور s.ghannadpour@aut.ac.ir

استناد به این مقاله: قنادپور، س.، حصیری، م.، صالحی شهرابی، ح.، جلیلی، ه. (۱۴۰۳). نقشه برداری زون های دگرسانی مرتبط با کانی سازی مس: رویکردی مبتنی بر پردازش تصاویر با استفاده از روش سینگلاریتی و عملگر فازی گاما. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۰، شماره ۱، صفحه ۹۱ تا ۱۲۲.

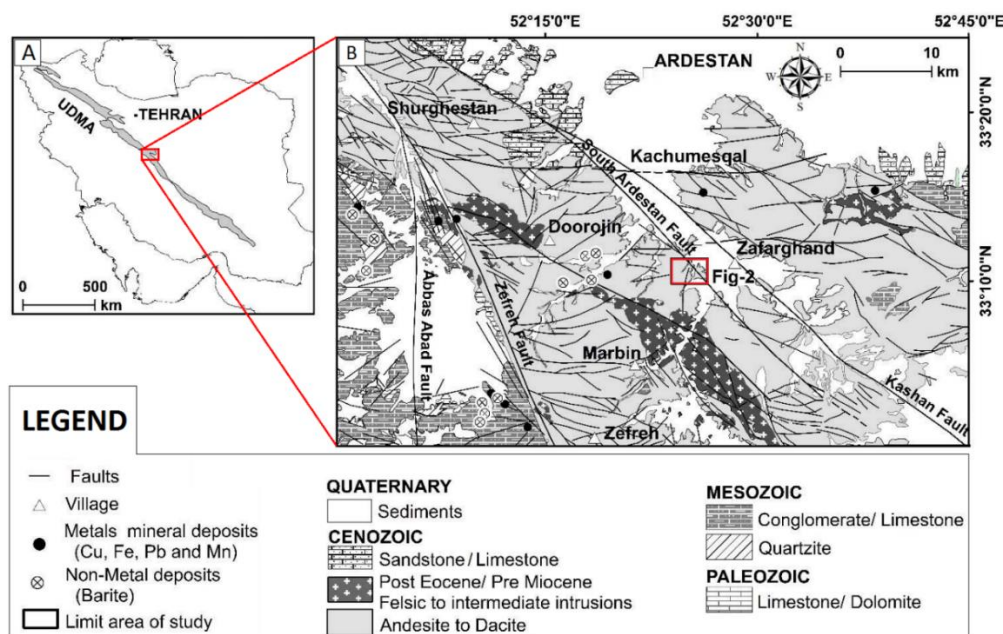
<http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.107271>

مختلفی برای جداسازی و تشخیص مناطق آنومال از زمینه وجود دارد که از روش‌های غیرساختاری تا روش‌های ساختاری تغییر می‌کنند (Hezarkhani and Ghannadpour, 2015; Ghannadpour and Hezarkhani, 2016a, b, 2017, 2018, 2020, 2022a, b; Pourgholam et al., 2024; Heidari et al., 2024; Bazargani Golshan et al., 2024). در مطالعات متعددی می‌توان بکارگیری روش‌های ساختاری جدایش آنومالی از زمینه همچون روش آماره فضایی U، هندسه فرکتال در مدل‌های فرکتالی مختلف و روش سینگولاریتی را مشاهده کرد (Cheng et al., 1996, Cheng et al., 2000, Hezarkhani and Ghannadpour, 2015, Ghannadpour and Hezarkhani, 2016a, b, 2017, 2018, 2020, 2022a, b Pourgholam et al., 2024, Heidari et al., 2024, Bazargani Golshan et al., 2024). در پژوهش حاضر سعی بر آن است تا با ترکیب روش‌های ساختاری جدایش آنومالی‌های ژئوشیمیایی و روش‌های رایج در علم سنجش از دور به پردازش ساختاری تصاویر ماهواره‌ای استر در محدوده اکتشافی ظفرقند پرداخته شود. علاوه بر این، از عملگر فازی گاما برای ترکیب لایه‌های اطلاعاتی به‌دست آمده از محدوده ظفرقند استفاده می‌شود. لایه‌های اطلاعاتی شامل لایه سنگ‌شناسی (لیتولوژی)، چگالی گسل‌ها، ترکیب رنگی کاذب با باندهای (RGB) ASTER 468 بر اساس مقادیر جدید DN (مقادیر α محاسبه‌شده) و نقشه ژئوشیمی مس به‌دست آمده از فرکتال عبار - مساحت می‌باشد. روش منطبق فازی که توسط لطفی زاده (1965) معرفی شد، یک رویکرد مبتنی بر دانش است که به طور گسترده در نقشه‌برداری مواد معدنی برای اکتشاف استفاده می‌شود و بر اساس یک مقیاس پیوسته از 0 تا 1 برای نمایش قابلیت اکتشاف عمل می‌کند. این روش ارزیابی و تنظیم مقادیر عضویت را ساده می‌کند و تسهیل‌گر ایجاد نقشه‌های قابلیت اکتشاف است (Zadeh, 1965). منطق فازی با تلفیق چندین لایه با موضوعات وزنی و دانش کارشناسان، برای شناسایی مناطق پتانسیل‌دار معدنی مناسب است. با اختصاص وزن‌های خاص به عوامل کنترل‌کننده بر اساس مدل‌های مفهومی، این روش نظریه مجموعه‌های کلاسیک را برای تعیین مناطق پتانسیل‌دار تعمیم

می‌دهد (Majid et al., 2023; Chettah Sangaré et al., 2024; et al., 2024; Shahsavari et al., 2024; Moradpour et al., 2022; Barak et al., 2023; Lindsay et al., 2014). کمربند فلززایی تتیس از شرق اروپا تا خاورمیانه ادامه دارد. ایران به عنوان یکی از بزرگترین نواحی بر روی 1700 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 1). کارهای اکتشافی اولیه در منطقه به شکل تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس 1:5000 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 قطع‌کننده سنگ‌های آتشفشانی ائوسن انجام شده است. در یکی از این مطالعات، پتروژنز توده گرانیتوئیدی ظفرقند توسط صادقیان و غفاری (Sadeghian and Ghafari, 2011) مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. امین‌الرعیایی یمینی و همکاران (Aminoroayaei Yamini et al., 2016) با نگرشی بر تحولات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی منطقه، به بررسی دگرسانی‌های گرمایی این کانسار پرداختند. مطالعات ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی و سیالات درگیر نیز توسط اعلمی‌نیا و همکاران (Alaminia et al., 2017) انجام شد. امین‌الرعیایی یمینی و همکاران (Aminoroayaei Yamini et al., 2018) همچنین در مطالعه دیگری به تشریح تحولات سیستم ماگمایی این کانسار نیز با در نظر گرفتن پلاژیوکلاز به عنوان شاهد، پرداختند. در پژوهش دیگری ارتباط کانی‌سازی با پهنه‌های دگرسانی با

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 محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2018) انجام شد. در یکی دیگر از تحقیقات، 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).

ساختارهای زمین‌ساختی به کمک مطالعات دورسنجی توسط محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2018) مورد بررسی قرار گرفت. کلریتی شدن بیوتیت به منظور بارزسازی پارامترهای فیزیکی ژئوشیمیایی کانی‌سازی و دگرسانی مرتبط در سیستم مس پورفیری ظفرقند نیز مورد تحلیل شیمی کانی‌ها و ایزوتوپ پایدار قرار گرفته است (Aminoroayaei Yamini et al., 2016). به علاوه، امین‌الرعایایی و همکاران (Aminoroayaei Yamini et al., 2018) در مطالعه دیگری به پتروگرافی، ژئوشیمی و دامسنجی دگرسانی در کانی‌سازی سینوونژیک مس در این ناحیه پرداختند. مطالعه شواهد ایزوتوپی و



شکل ۱- موقعیت منطقه اکتشافی ظفرقند در بخش مرکزی کمان ارومیه-دختر (UDMA).

Fig. 1. The location of Zafarghand exploration area in the central section of the Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA).

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; Ghannadpour et al., 2024a, b).

زمین‌شناسی اردستان

برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان در بخش جنوبی چهار گوش ۱:۲۵۰۰۰۰ کاشان بین مختصات جغرافیایی $52^{\circ}00'$ تا $52^{\circ}30'$ طول خاوری و $33^{\circ}00'$ تا $33^{\circ}30'$ عرض شمالی در شمال باختری استان اصفهان

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 ASTER پرداخته خواهد شد. لذا به منظور پردازش تصاویر ماهواره‌ای از روش سینگولاریتی بهره گرفته می‌شود که به عنوان روشی موثر و کارآمد در بحث جدایش ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی از زمینه با ماهیت ساختاری شناخته می‌شود. در این زمینه و به خصوص ترکیب روش‌های سنجنش از دوری و فرکتالی، مطالعات متعددی صورت گرفته است که

از گسل‌های مهم در منطقه می‌توان به گسل اصلی میلاجرد- زفره و گسل‌های راندگی گچ‌موش‌آل- گنجان و کوه دوشاخ اشاره کرد که روند کلی شمال باختری- جنوب خاوری و خاوری- باختری را دارند.

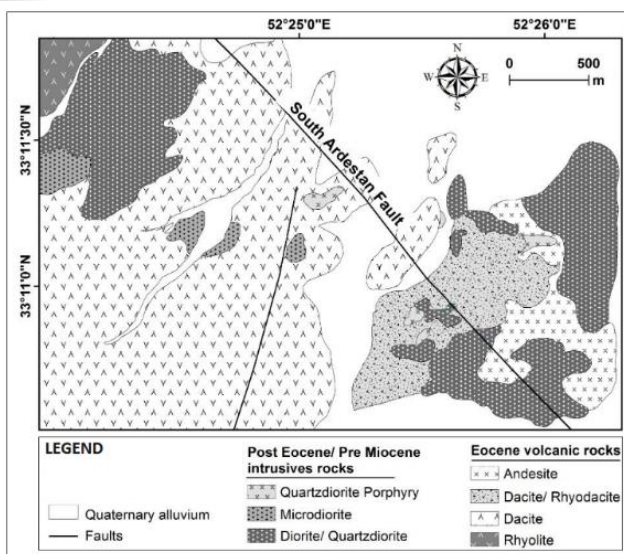
منطقه مورد مطالعه

منطقه اکتشافی مس ظفرقند در جنوب شرقی اردستان در ۱۱۰ کیلومتری شمال شرق اصفهان در ایران مرکزی واقع شده است. این کانسار در غرب ظفرقند به عنوان بخشی از برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان با مختصات 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 ۲) (Alaminia et al., 2017). 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، منشا ماگمایی داشته است (Aliyari et al., 2020; Ostadhosseini et al., 2021).

در محدوده اکتشافی ظفرقند، در مجموع ۲۵۱ نمونه به منظور انجام یک تحلیل و بررسی جامع ژئوشیمیایی، جمع آوری شده است. این نمونه‌ها شامل نمونه‌های خاک (۶۷ عدد) و سنگ (۱۸۴ عدد) می‌باشد. جایگاه نمونه‌های فوق‌الذکر در شکل ۳ نمایش داده شده است. نمونه‌های خاک از اعماق و مکان‌های مختلف در محدوده مورد مطالعه برای ارزیابی آنومالی‌های ژئوشیمیایی موجود در خاک در نظر گرفته شده‌اند. در مورد نمونه‌های سنگی، چندین خط پیمایش هدفمند عمود بر آثار کانی‌سازی مس با فواصل ۱۰۰ متر و نزدیک آثار کانی‌سازی مس با فواصل ۵۰ متر انتخاب شده و تعداد ۱۸۴ نمونه در امتداد مقاطع اکتشافی از کانی‌سازی و سنگ میزبان به روش خرده سنگی برداشت شده است. نمونه‌های سنگی شکسته، خرد و سپس از الک ۲۰۰ مش (۷۵ میکرون) عبور داده شدند. تجزیه عناصر به روش ICP-MS در آزمایشگاه Amdel استرالیا انجام شده است.

قرار گرفته است. بخش اعظم این ناحیه در زون ساختاری ارومیه- دختر واقع شده و محدوده‌ای در جنوب باختری این برکه، زون سنندج- سیرجان را شامل می‌شود. بیشتر رخنمون‌های ناحیه شامل سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری با ترکیب حدواسط تا بازیگ مربوط به فعالیت آتشفشانی ائوسن میانی تا پسین است. سنگ‌های نفوذی این منطقه از نظر زمانی طیف گسترده‌ای داشته و مربوط به یک فاز نیمه ژرف با سن الیگوسن و الیگومیوسن و یک فاز کم ژرفا با سن پلیوسن است که ترکیب نیمه‌اسیدی و اسیدی دارند. توده‌های نفوذی در فازهای گوناگون سبب دگرسانی و کانی‌سازی فلزاتی از جمله مس، مولیبدن، طلا، سرب، روی، آهن و ... در منطقه شده‌اند (Ghorbani, 2002). ورقه یکصد هزارم اردستان در بخش‌هایی از زون‌های ایران مرکزی قرار دارد و بیشتر از سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی- رسوبی وابسته به آن تشکیل شده است، که این سنگ‌ها به‌طور عمده به ترشیری تعلق داشته و توده‌های نفوذی متعددی با ترکیب متوسط تا بازیگ در داخل آنها نفوذ کرده‌اند. به‌طور کلی در این منطقه سنگ‌های رسوبی، آذرین و آذرآواری از پالئوزوئیک تا عهد حاضر برونزد دارند و در این میان فعالیت‌های آتشفشانی ائوسن از گسترش چشمگیری برخوردار است (Esmailzadeh Kalkhoran et al., 2024). به‌طور خلاصه واحدهای سنگی در منطقه به‌شرح زیر می‌باشد (Esmailzadeh Kalkhoran et al., 2024):

- سنگ‌های رسوبی از جمله سنگ‌های آهک و آهک دولومیتی، کنگلومرا، ماسه‌سنگ، شیل، مارن.
- سنگ‌های آذرین که به دو دسته توده‌های ولکانیکی (ریولیت، آندزیت، بازالت) و توده‌های نفوذی (گرانیت، دیوریت، مونزودیوریت، گابرو) تقسیم می‌شوند.
- سنگ‌های آذرآواری شامل توف، ایگنمبریت، توف ریولیتی، توف ماسه‌ای و توف برشی می‌باشد.

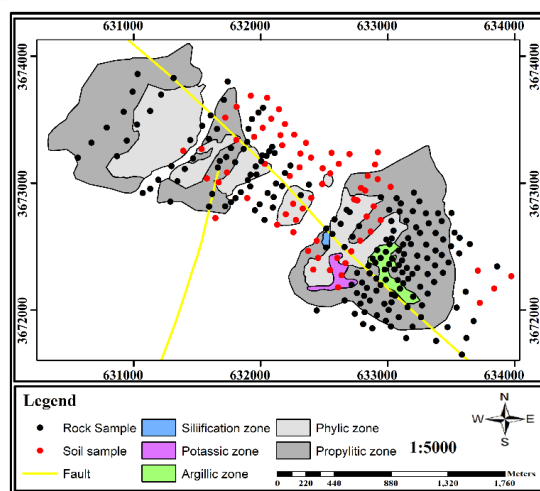


شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه اکتشافی ظفرقند. پس از تغییرات از اعلمی‌نیا و همکاران (Alaminia et al., 2017).
 Fig. 2. Simplified geological map of the Zafarghand exploration area (adapted from Alaminia et al., 2017).

دگرسانی و کانی‌سازی

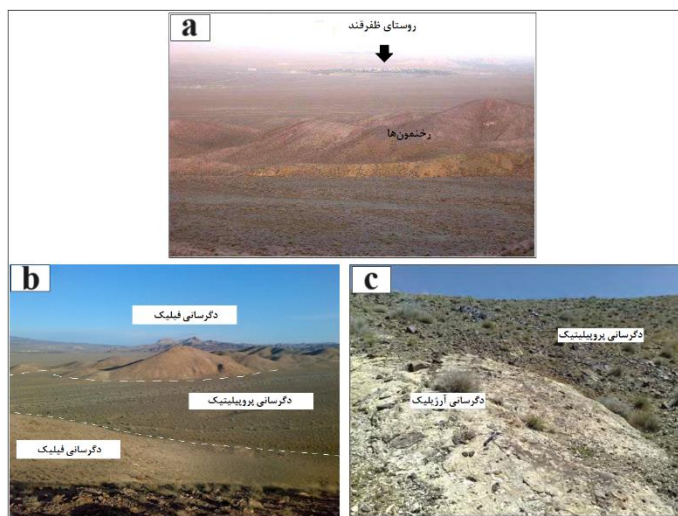
بر اساس مطالعات و بررسی‌های صورت گرفته، انواع دگرسانی‌های منطقه شامل پتاسیک، فیلیک، سیلیسی و آرژیلیک و در نهایت پروپیلیتیک می‌باشند. این دگرسانی‌ها اغلب در نزدیک توده‌های نفوذی و سنگ‌های میزبان اطراف گسل جنوب اردستان دیده می‌شود (شکل ۳). در گوشه جنوب شرقی محدوده، دگرسانی پتاسیک با رخنمون بسیار محدود در نزدیکی توده کوارتز دیوریت و دگرسانی فیلیک در نزدیکی توده‌های نفوذی دیوریت و کوارتز دیوریت پورفیری و نیز سنگ‌های آتشفشانی داسیتی و ریوداسیتی قابل مشاهده است. با فاصله گرفتن از دگرسانی فیلیک، دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیک به صورت محدود جایگزین آنها شده است (شکل ۳). دگرسانی پروپیلیتیک در سنگ‌های محدوده بیرونی کانسار گسترش دارد (شکل ۳) (Alaminia et al., 2017). شایان ذکر است که کلریت در سطح وسیعی از منطقه جنوب اردستان به چشم می‌خورد. شکل ۴ نمایی از رخنمون‌های دگرسانی در منطقه اکتشافی ظفرقند را نمایش می‌دهد.

بر پایه بررسی‌های صحرائی و سنگ‌نگاری انجام شده در این منطقه، سنگ‌های آذرین اسیدی تا حدواسط شامل سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی متعلق به دوره زمانی ائوسن بالایی و جوان تر 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 ۲). بافت این سنگ‌ها پورفیری با خمیره شیشه‌ای جریان‌ی است. داسیت و ریوداسیت‌ها محدوده وسیعی از منطقه را با رنگ خاکستری تا سبز دربرمی‌گیرند (شکل ۲). 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 ۲) و به رنگ خاکستری تیره دیده می‌شوند و به علت فراوانی درشت بلورها به شکل حفره‌ای هستند. توده‌های نفوذی دیوریت، کوارتز دیوریت و میکرو دیوریت در شمال غربی و جنوب شرقی منطقه با رنگ خاکستری تیره برونزد دارند. توده نیمه‌نفوذی کوارتز دیوریت پورفیری در جنوب شرقی منطقه، وسعت کوچکی را می‌پوشاند.



شکل ۳- گسترش هاله های دگرسانی در محدوده اکتشافی ظفرقند. پس از تغییرات از اعلمی نیا و همکاران (Alaminia et al., 2017).

Fig. 3. Expansion of alteration halos in the Zafarghand exploration area (adapted from Alaminia et al., 2017).



شکل ۴- رخنمون های دگرسانی در منطقه اکتشافی ظفرقند. (a) قسمتی از رخنمون دگرسانی ها در منطقه، (b) رخنمون دگرسانی های فیلیک و پروپلیتیک، (c) رخنمون دگرسانی های آرزلیک و پروپلیتیک (Esmailzadeh Kalkhoran et al., 2024).

Fig. 4. The alteration outcrops in the Zafarghand exploration area. a) Part of the alterations outcrop in the area, b) Outcrop of phyllic and propylitic alteration, c) Outcrop of argillic and propylitic alteration (Esmailzadeh Kalkhoran et al., 2024).

سنجنده استر (Advanced Spaceborne Thermal

مواد و روش ها

Emission and Reflection Radiometer) بر روی ماهواره Terra

مجموعه داده ها

قرار گرفته و در سال ۱۹۹۹ به فضا پرتاب شده است. داده های این سنجنده طبق جدول ۱ دارای ۱۴ باند است (Beiranvand pour and Hashim, 2014) که سه باند در محدوده VNIR با توان تفکیک مکانی ۱۵ متر، شش باند در محدوده SWIR با توان تفکیک مکانی

در راستای هدف اصلی در این مطالعه و برای بارزسازی دگرسانی های مختلف و کانی های شاخص در ارزیابی پتانسیل معدنی در منطقه مورد مطالعه، از تصاویر ماهواره ای استر (ASTER) بهره گرفته خواهد شد.

۱۲ بیتی طراحی شده که امکان افزایش دقت رادیومتریکی و مکانی باندهای حرارتی آن را فراهم کرده‌است (Goetz et al., 1975). داده‌های سنجنده استر برای شناسایی آلتراسیون‌ها، کانی‌ها و سنگ‌شناسی در مطالعات زمین‌شناسی به‌کار برده می‌شود. داده‌های 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 استر و سایر ماهواره‌های سنجنش از دوری تأکید شده است. بارزترین نمونه چنین ترکیبی در داده‌های لندست و استر دیده می‌شود.

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 موثر واقع شوند (Li et al., 2014). در میان باندهای مادون قرمز بازتابی آن، ۶ باند در طول موج ۱/۵ تا ۳ میکرومتر طراحی شده‌است 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

جدول ۱- مشخصات عمومی سنجنده استر (Beiranvand and Hashim, 2014).

Table 1. General specifications of the ASTER Sensor (Beiranvand Pour and Hashim, 2014).

Subsystem	Band No.	Spectral Rang (μm)	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		
	10	8.125-8.475		
TIR	11	8.475-8.825	90	12 bits
	12	8.925-9.275		
	13	10.25-10.95		
	14	10.95-11.65		

کامل از کار افتادند. از این رو، تصاویر استر پس از این سال، بدون داده‌های مربوط به این باندها عرضه می‌شوند و بنابراین برای تحلیل‌هایی که نیاز به این باندها دارند، مناسب نیستند.

در این مطالعه از تصاویر LIT استر مربوط به سال ۲۰۰۲ استفاده شده است. دلیل انتخاب این تصاویر این است که از سال ۲۰۰۸، شش باند مادون قرمز با طول موج کوتاه (SWIR) سنجنده استر به طور

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).

$$C(A) = c \cdot A^{\left(\frac{\alpha}{2}-1\right)} \quad (1)$$

در این رابطه $C(A)$ نشان‌دهنده چگالی فلز در مساحت A ، c مقدار ثابت و α مقدار سینگولاریتی محلی می‌باشد (Cheng, 2006). برای تعیین مقدار α ، مربع‌هایی با مرکز ثابت در اندازه ضلع‌های r_i در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} r_i &= (2i - 1)r_{min} \\ r_{min} &= r_1 < r_2 < \dots < r_n = r_{max}, \\ i &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن n تعداد پنجره یا شبکه‌های مربعی، r_{min} کوچکترین سایز پنجره و 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 Γ (سایز پنجره) در نمودار لگاریتمی، تخمین زده می‌شود (Cheng, 2007). در واقع با لگاریتم‌گیری از رابطه (۱)، ارتباط بین سایز پنجره یا شبکه Γ_i و میانگین غلظت در هر شبکه $[C[A(r_i)]]$ به صورت یک خط راست و مطابق با رابطه (۳) خواهد بود (Wang et al., 2018):

$$\log C[A(r_i)] = c + (\alpha - 2) \log(r_i) \quad (3)$$

مقدار $\alpha-2$ 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 α 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).

فرکتال عیار - مساحت (C-A)

روش فرکتال عیار - مساحت یکی از روش‌های مبتنی بر توزیع چندفرکتالی است. این روش توسط چنگ و همکاران در سال ۱۹۹۴ ارائه شد و برای مطالعه مساحت اشغال شده توسط عیارهای خاص در منطقه مورد مطالعه استفاده می‌شود (Cheng et al., 1994). با افزایش عیار عنصر، مساحت اشغال شده توسط آن کاهش می‌یابد. مدل‌سازی فرکتالی بر اساس مجموعه‌ای از معادلات توان (۴)، شاخص و پارامترهای مورد مطالعه در منطقه مورد بررسی است.

$$M(\delta) \propto \delta^{-\alpha} \quad (4)$$

در هر نقطه‌ای از نمودار لگاریتمی، پارامتر α نمایانگر بعد فرکتالی است. مقدار این پارامتر با توجه به ماهیت چندفرکتالی داده‌ها در علوم زمین متفاوت است. این رویکرد ارتباط بین نتایج داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی را روشن می‌کند. این روش امکان بررسی انواع مختلف داده‌های ژئوشیمیایی، مانند رسوبات رودخانه‌ها، نمونه‌های سنگ و خاک را فراهم می‌سازد. روش فرکتال عیار - مساحت به نظر می‌رسد در تمامی مواردی که توزیع‌های ژئوشیمیایی ویژگی‌های چندفرکتالی را دارا هستند، قابل استفاده باشد. فرمول کلی مدل ارائه شده توسط چنگ و همکاران (۱۹۹۴) مطابق با معادله (۵) است (Cheng et al., 1994):

$$A(\rho \leq v) \propto \rho^{-\alpha_1}; A(\rho \geq V) \propto \rho^{-\alpha_2} \quad (5)$$

می‌شود (Chettah et al., Zadeh, 1965; Sangaré et al., 2024; 2024; Shahsavari et al., 2024). عملگر فازی گاما یک مفهوم حیاتی در مطالعات مناطق امیدبخش است که برای متعادل کردن تمایلات متضاد حاصل جمع و ضرب جبری فازی عمل می‌کند. این تعادل با تنظیم مقدار γ در محدوده ۰ تا ۱ به دست می‌آید، با مقدار خاص بسته به نتیجه موردنظر انتخاب می‌شود. ترکیب فازی گاما شامل حاصل «ضرب جبری فازی» و «مجموع جبری فازی» است که منجر به یک ترکیب فازی «گاما» می‌شود (معادله ۶). پارامتر γ که از صفر تا یک متغیر است، درجه تأثیر را مشخص می‌کند: در γ برابر با یک، ترکیب منعکس‌کننده مجموع جبری فازی است، درحالی‌که در صفر، با محصول جبری فازی همسو می‌شود (Sangare et al., 2024; 2024; Shahsavari et al., 2024; Esmailzadeh et al., 2022; Ziyong et al., 2018; Lindsay et al., 2014; Moon, 1998).

$$\mu_{combination} = (\text{fuzzy algebraic sum})^\gamma \times (\text{fuzzy algebraic product})^{(1-\gamma)} \quad (6)$$

نظر، از روش بارزسازی ترکیب رنگی کاذب بهره گرفته خواهد شد. در نهایت نیز از عملگر فازی گاما جهت تلفیق لایه‌های اطلاعاتی به منظور شناسایی مناطق امید بخش کانی‌سازی مس استفاده می‌شود. در شکل ۵ مراحل انجام این مطالعه در قالب یک فلوچارت نمایش داده شده‌است.

که در آن ρ غلظت عنصر، $A(\rho)$ مساحت مناطق با غلظت ρ ، γ مقدار آستانه، α_1 و α_2 ابعاد فراکتالی هستند و نماد ریاضی ∞ نشان‌دهنده نسبت است (Cheng et al., 1994; Zuo et al., 2013; 2023; Carranza, 2011; Behbahani et al., 2023).

عملگر فازی گاما (Fuzzy Gamma)

منطق فازی که توسط لطفی‌زاده (۱۹۶۵) معرفی شد، یک رویکرد مبتنی بر دانش است که برای مدلسازی عدم قطعیت و عدم دقت در داده‌ها به کار می‌رود. این روش بر اساس مجموعه‌های فازی عمل می‌کند که به جای استفاده از مقادیر دقیق، از درجه عضویت برای نمایش داده‌ها استفاده می‌کند. در این رویکرد، هر داده با یک مقدار عضویت در مجموعه‌ای فازی مرتبط می‌شود که این مقدار بین ۰ و ۱ قرار دارد، و این باعث افزایش انعطاف‌پذیری و دقت در تحلیل داده‌ها

در ادامه و در بخش پردازش و نتایج، پس از انجام پیش‌پردازش‌های موردنظر بر روی تصاویر ماهواره‌ای استر و آماده‌سازی داده‌ها، الگوریتم روش سینگولاریتی بر روی مقادیر روشنایی هر پیکسل با در نظر گرفتن مختصات آنها اعمال خواهد شد و جهت بارزسازی دگرسانی‌های مد

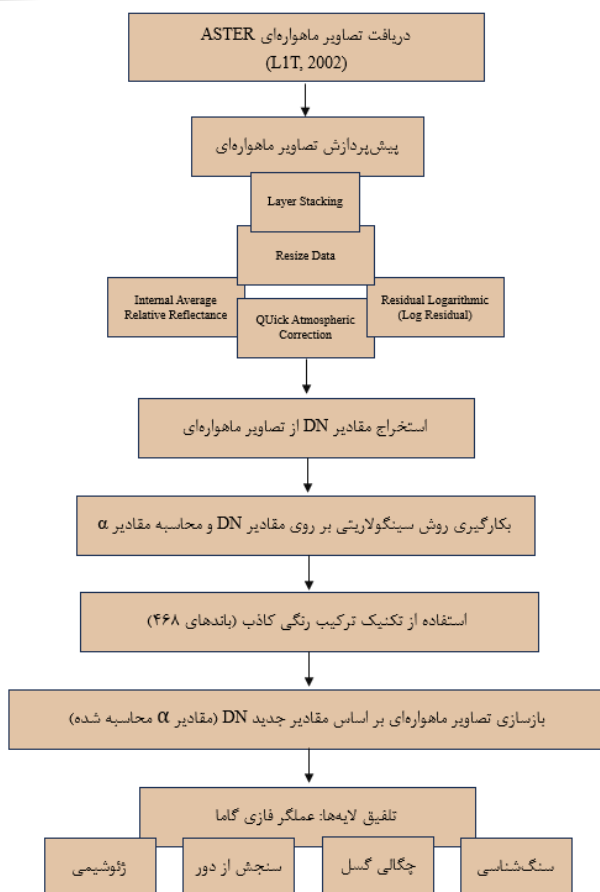


Fig. 5. Flowchart of work steps and process.

شکل ۵- فلوجارت مراحل و روند انجام کار.

پردازش و نتایج

پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

در این قسمت قبل از اعمال روش ساختاری جدایش آنومالی از زمینه، به آماده‌سازی و پیش‌پردازش تصویر ماهواره‌ای 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 گذاشته‌اند را حذف و در تصاویر دریافتی ایجاد کنتراست می‌کند.

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., 2022; Abubakar et al., 2019). برای حذف تأثیرات مربوط به تابش خورشید، عبورپذیری 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 همین‌طور میزان ناچیز بخار آب، مناسب است و در واقع

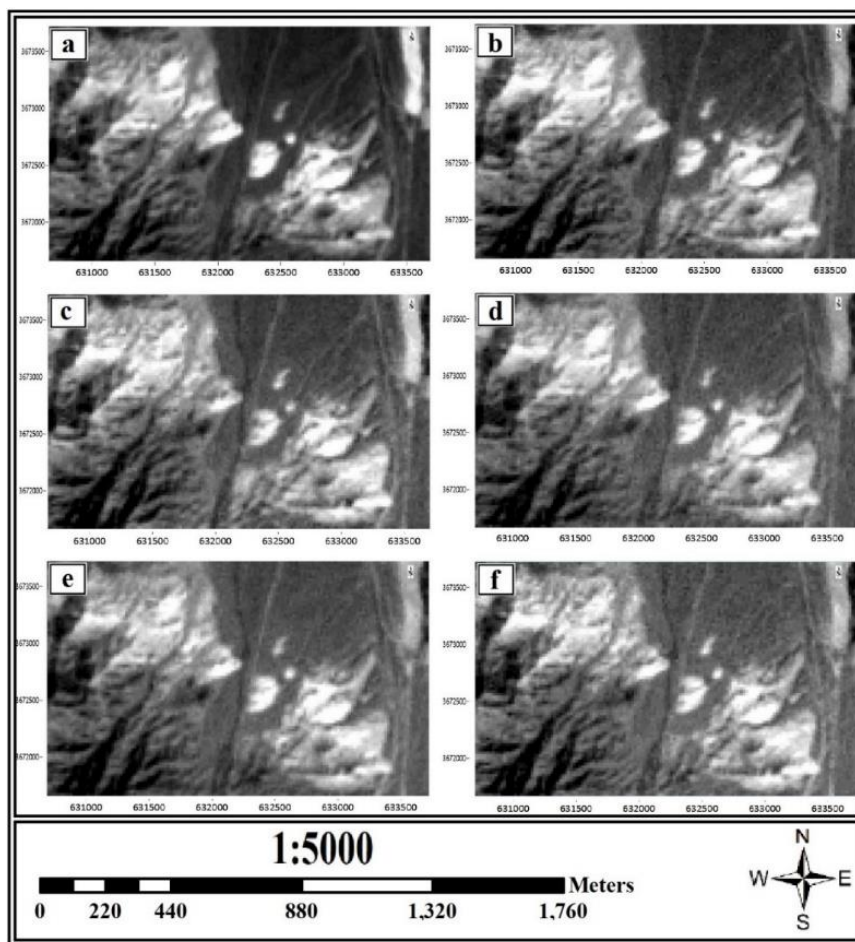
برای منطقه‌ای که هیچ اندازه‌گیری خاص زمینی وجود نداشته باشد نیز می‌تواند مؤثر باشد (Fereydooni et al., 2017). برای حذف اثر جذب و پخش امواج الکترومغناطیسی از روش QUAC (QUick Atmospheric Correction) استفاده شده‌است. این روش یک روش تصحیح اتمسفری برای محدوده مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی است (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).

آماده‌سازی تصاویر ماهواره‌ای جهت استخراج داده‌ها

پس از اعمال روش‌های فوق‌الذکر به منظور پیش‌پردازش تصویر استر منطقه ظفرقند، جهت آماده‌سازی تصویر مورد نظر به منظور اعمال الگوریتم روش سینگولاریتی، در ابتدا تصویر 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 استر و جهت بکارگیری آنها در تکنیک بارزسازی ترکیب رنگی کاذب بوده است. زیرا باندهای مذکور به توجه به ماهیت جذب و بازتاب از جمله مهمترین باندهای تصاویر ماهواره‌ای استر جهت بارزسازی دگرسانی‌های کانسار مس پورفیری محسوب می‌شوند.

خروجی ریسایز شده باندهای ۴ تا ۹ مربوط به محدوده SWIR در شکل ۶ 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 استر و به تبع کاهش تعداد پیکسل‌هاست. اما این موضوع در روند این پژوهش نه تنها مشکلی ایجاد نکرده بلکه دیده شدن پیکسل‌ها در این تصویر به نحوی نمایانگر یک نمونه مجزا با مختصات معلوم به منظور اعمال روش سینگولاریتی و نمایش هر چه بهتر تاثیر این روش‌ها بر روی داده (مقادیر DN هر پیکسل) می‌شود.



شکل ۶- تصویر ریسایز شده سنجنده ASTER برای محدوده SWIR در منطقه ظفرقند (WGS 84 / UTM zone 39N). (a) باند ۴، (b) باند ۵، (c) باند ۶، (d) باند ۷، (e) باند ۸ و (f) باند ۹.

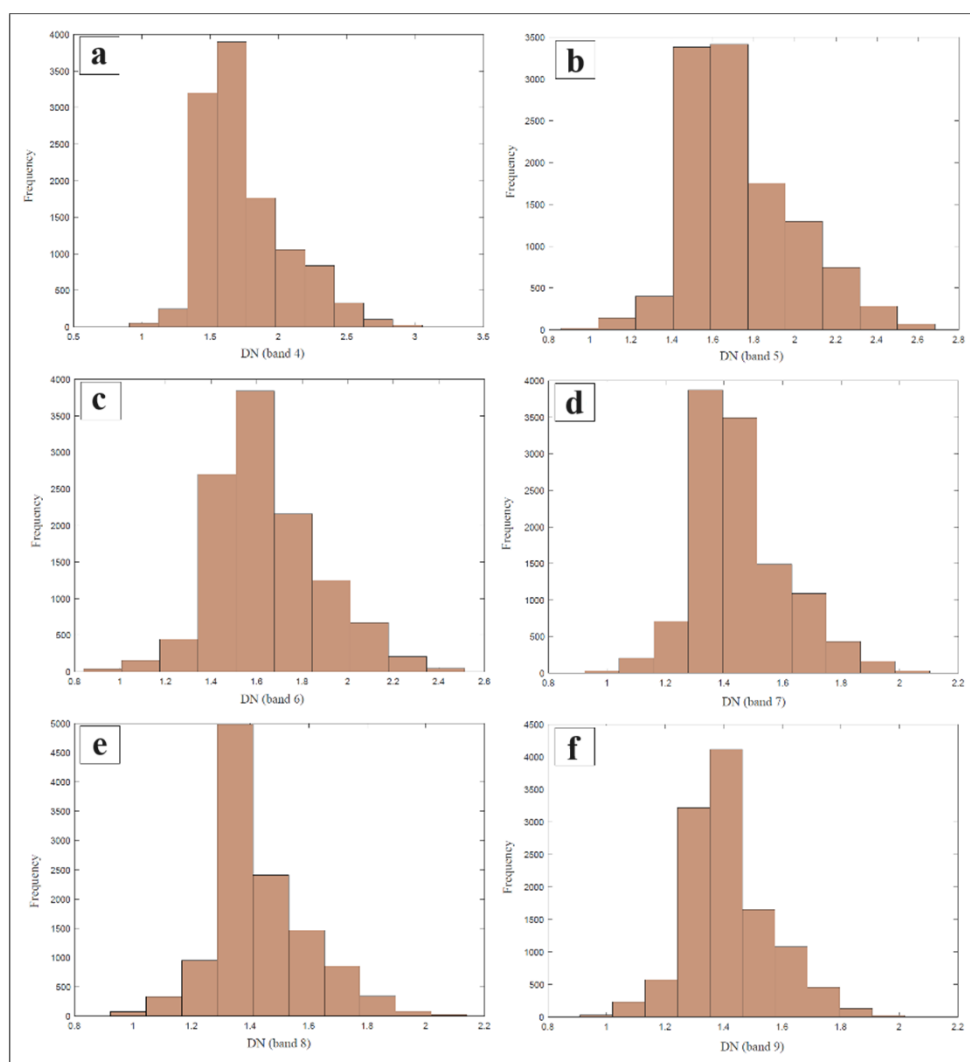
Fig. 6. Resized image ASTER Sensor for the SWIR range in the Zafarghand area (WGS 84 / UTM zone 39N). a) Band 4, b) Band 5, c) Band 6, d) Band 7, e) Band 8 and f) Band 9.

مشخصات اولیه آماری در مورد مقادیر DN برای باندهای ۴ تا ۹ محدوده SWIR و نمودار فراوانی مقادیر DN به ترتیب در جدول شماره ۲ و شکل ۷ قابل مشاهده است.

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

Table 2. Statistical specifications of SWIR bands (Bands 4 to 9) for 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 ۷- 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.

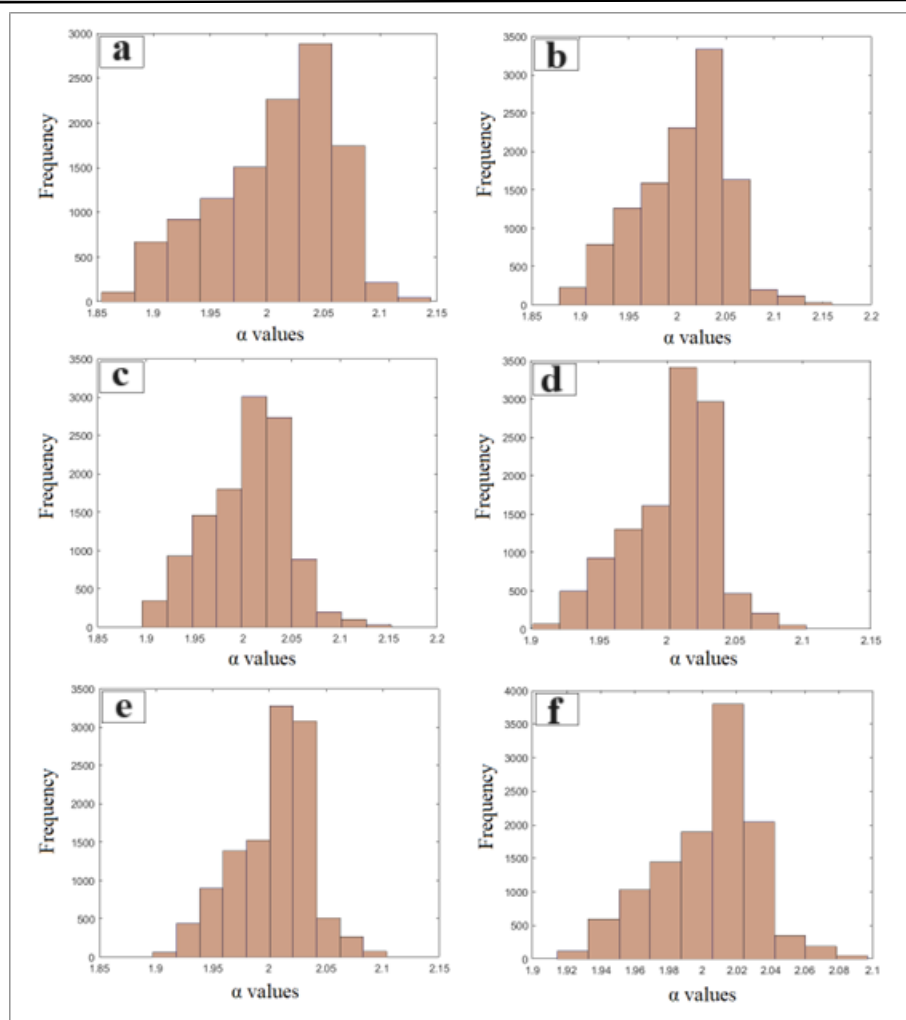
Fig. 7. Histogram of calculated DN values for the SWIR range. a) Band 4, b) Band 5, c) Band 6, d) Band 7, e) Band 8, and f) Band 9.

برنامه مورد نظر ماتریسی از مقادیر مربوط به یک شبکه سیستماتیک از داده‌ها را به همراه n (تعداد پنجره یا شبکه‌های مربعی) و I_{min} (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 مربوط به هر باند، از محدوده SWIR منطقه اکتشافی ظفرقند، به عنوان ورودی در اختیار الگوریتم روش سینگولاریتی قرار گرفته و مقدار I_{min} نیز بر اساس پیکسل سایز تصاویر ماهواره‌ای 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 α مورد نظر برای مرکز هر پیکسل از مجموعه پیکسل‌های ماتریس تصاویر، مورد محاسبه قرار گرفته که مشخصات آماری آنها در جدول ۳ گزارش شده است. نمودار فراوانی مقادیر α نیز در شکل ۸ قابل مشاهده است.

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مقادیر DN از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. لذا در استفاده از جدایش آنومال از زمینه که اکثراً پیش فرض نرمال بودن داده‌ها را شامل می‌شوند، محدودیتی وجود ندارد و در ادامه به کمک روش سینگولاریتی به جدایش مقادیر آنومال از زمینه پرداخته خواهد شد. 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، 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.

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 گرفته است.



شکل ۸- هیستوگرام مقدار α محاسبه شده برای باندهای محدوده SWIR. a) باند ۴، b) باند ۵، c) باند ۶، d) باند ۷، e) باند ۸ و f) باند ۹.
 Fig. 8. Histogram of calculated α values for the SWIR bands. a) Band 4, b) Band 5, c) Band 6, d) Band 7, e) Band 8, and f) Band 9.

جدول ۳- مشخصات آماری مقادیر α محاسبه شده برای باندهای محدوده SWIR.

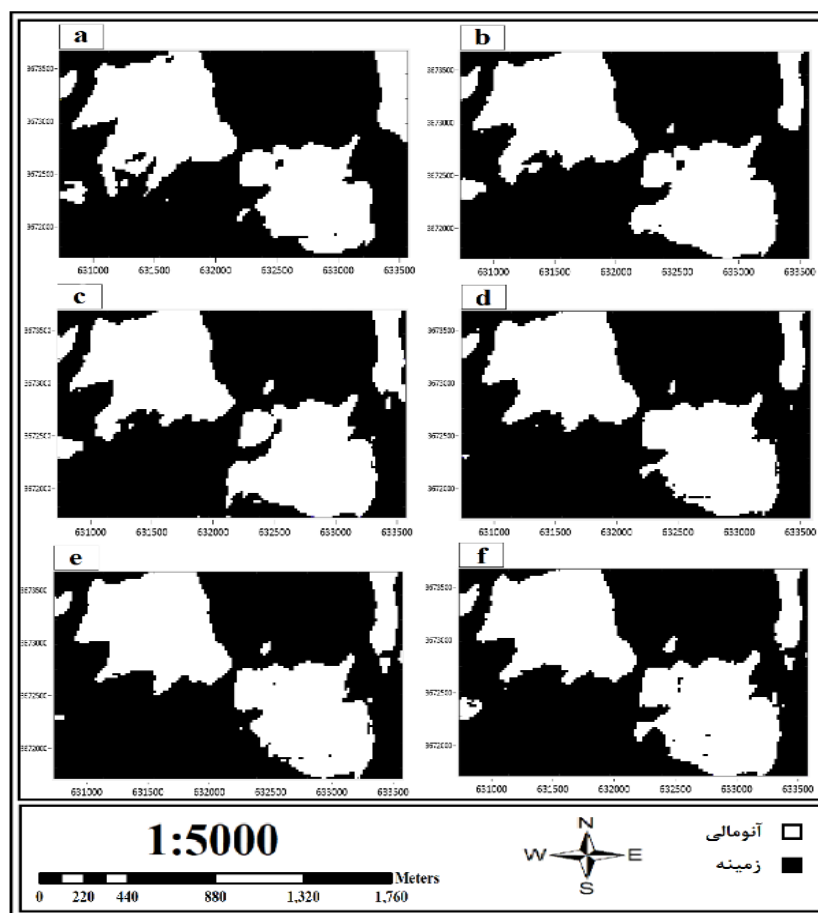
Table 3. Statistical characteristics of calculated α values for the SWIR range bands.

No.	Band	Average	Minimum	Maximum	Variance
1	4	2.0077	1.8543	2.1447	0.0029
2	5	2.0059	1.8786	2.1594	0.0021
3	6	2.0046	1.8962	2.1525	0.0017
4	7	2.0042	1.9013	2.1025	0.0011
5	8	2.0043	1.8973	2.1037	0.0011
6	9	2.0030	1.9144	2.0970	0.0008

سیاه رنگ مربوط به مقادیر α بزرگتر از ۲ به عنوان مقادیر زمینه هستند که توسط روش سینگولاریتی بر روی تصاویر ماهواره‌ای استر تعیین شده‌اند. 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، مستقیماً از مقادیر α نیز بهره گرفته شده و تصویر بازسازی شده بر اساس مقادیر α نیز در شکل ۱۰ آورده شده است.

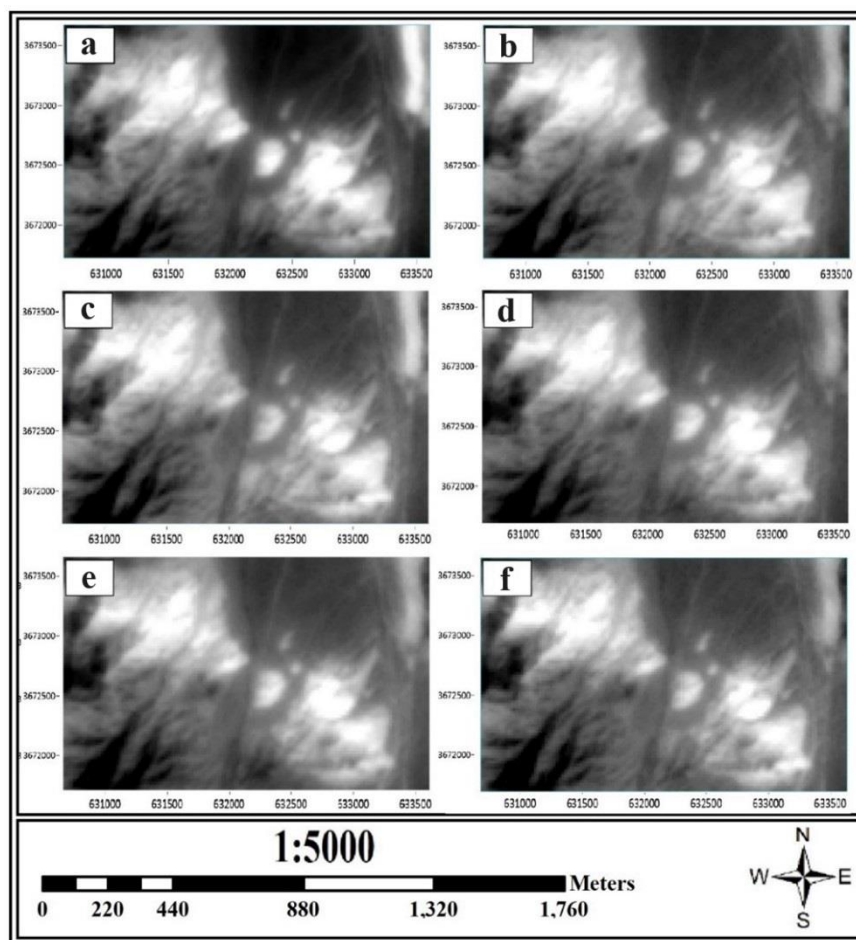
در شکل شماره ۸ مشاهده می‌شود که مقادیر α محاسبه شده توسط روش سینگولاریتی، تقریباً از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. همانطور که در گذشته نیز مطرح شد، مقادیر α کوچکتر از ۲ به عنوان مقادیر آنومال و مقادیر α بزرگتر از ۲ به عنوان مقادیر زمینه در نظر گرفته می‌شوند. بر این اساس تصاویر باینری محدوده ظفرقند مربوط با باندهای محدوده SWIR تهیه شده که در شکل ۹ قابل مشاهده هستند.

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، پیکسل‌های روشن مربوط به مقادیر α کوچکتر از ۲ به عنوان مقادیر آنومال و پیکسل‌های تیره یا



شکل ۹- نقشه باینری مقادیر سینگولاریتی کوچکتر از ۲ ($\alpha < 2$) منطقه ظفرقند (WGS 84 / UTM zone 39N). a) باند ۴، b) باند ۵، c) باند ۶، d) باند ۷، e) باند ۸ و f) باند ۹.

Fig. 9. Binary map of singularity values less than 2 ($\alpha < 2$) in the Zafarghand area (WGS 84 / UTM zone 39N). a) Band 4, b) Band 5, c) Band 6, d) Band 7, e) Band 8, and f) Band 9.



شکل ۱۰- نقشه باینری مقادیر سینگولاریتی کوچکتر از ۲ ($\alpha < 2$) منطقه ظفرقند (WGS 84 / UTM zone 39N). a) باند ۴، b) باند ۵، c) باند ۶، d) باند ۷، e) باند ۸ و f) باند ۹.

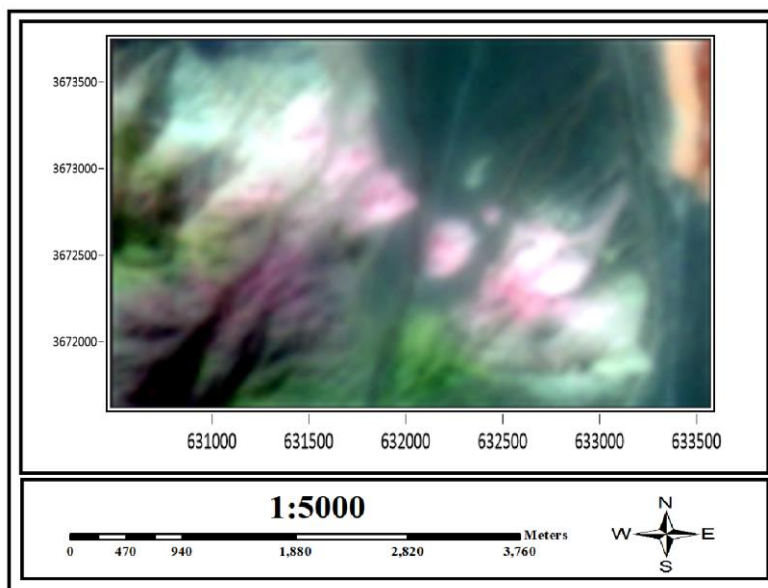
Fig. 10. Binary map of Singularity values less than 2 ($\alpha < 2$) in the Zafarghand area (WGS 84 / UTM zone 39N). a) Band 4, b) Band 5, c) Band 6, d) Band 7, e) Band 8, and f) Band 9.

و به‌کارگیری تصاویر ترکیبی رنگی میسر است. در این حالت سه باند از داده‌ها به کانال‌های قرمز، سبز، آبی سیستم نمایش تصویر ارسال شده و تصویری رنگی نمایش داده می‌شود (Aboelkhair et al., 2010). استفاده از رنگ‌ها اطلاعات بصری و مفهومی بیشتری از تصویر را در اختیار ما قرار می‌دهند. آنالیزهای تجربی نشان داده‌اند که تصویری با ترکیب RGB=468 در تصاویر استر مناسب‌ترین ترکیب رنگی برای شناسایی دگرسانی در اغلب کانسارها به‌ویژه مس پورفیری و طلای اپی‌ترمال می‌باشد. کانی‌های رسی، سریسیت، اپیدوت و کلسیت بازتاب بالایی در باند ۴ استر دارند. کلریت و اپیدوت به دلیل وجود Fe- و Mg-

ترکیب رنگی کاذب

ایجاد تصاویر رنگی، یکی از روش‌های پردازشی رایج در بررسی‌های دورسنجی است. از آنجایی که اغلب تصاویر ماهواره‌ای در فرمت‌های چند باندهی موجودند، بررسی داده‌های یک باند در یک برهه از زمان حداکثر اطلاعات را ارائه نمی‌دهد. آگاهی از روابط متقابل بین طول موج‌های مختلف برای شناسایی عوارض و انواع مختلف پوشش زمین بسیار مهم است و نمایش دادن بیش از یک باند به طور همزمان بر روی سیستم پردازش تصاویر و تهیه نسخه چاپی چند باندهی سودمند و ثمربخش خواهد بود. این کار اغلب از طریق تهیه کامپوزیت‌های رنگی

باند‌های ۴، ۶ و ۸ شده است. در واقع رنگ قرمز به تصویر بازسازی شده باند ۴ بر اساس روش سینگولاریتی اختصاص شده و به همین ترتیب رنگ‌های سبز و آبی نیز به تصاویر بازسازی شده باند‌های ۶ و ۸ اختصاص داده شده است و در نهایت تصویر رنگی کاذب منطقه اکتشافی ظفرقند بر اساس مقادیر جدید DN هر پیکسل (یعنی مقادیر α) تهیه و در شکل ۱۱ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۱- ترکیب رنگی کاذب سنجنده استر (R, G, B: ۴، ۶، ۸) بر اساس مقادیر شاخص سینگولاریتی (WGS 84 / UTM zone 39N).

Fig. 11. False color composite of ASTER sensor (R, G, B: 4, 6, 8) based on Singularity index values (WGS 84 / UTM zone 39N).

به شکل جزئی‌تر می‌توان اذعان داشت که مناطق مشخص شده با رنگ سبز روشن در اطراف هاله‌های صورتی روشن رنگ در مرکز محدوده، مرتبط با دگرسانی پروپیلیتیک است که مطابقت بسیار مناسبی را با دگرسانی‌های پروپیلیتیک نشان داده شده در شکل ۳ دارند. همچنین قابل ذکر است که مناطق صورتی رنگ روشن که در مرکز تصویر به عنوان آلتراسیون فیلیک دیده می‌شود در ارتباط بسیار مناسبی با دگرسانی‌های فیلیک مشخص شده در شکل ۳ هستند.

مقادیر DN مشخص شده در شمال شرقی و جنوب غربی شکل ۱۱ نمایانگر دگرسانی‌های آرژیلیکی و تا حدودی پروپیلیتیکی در محدوده هستند و عدم تطابق آنها با شکل ۳، ناشی از عدم نمونه‌برداری از مناطق شمال شرقی و جنوب غربی منطقه است.

OH جذب بالایی در باند ۸ (محدوده ۲/۳۳-۲/۳۵ میکرومتر) دارند (Mars et al., 2006). دگرسانی آرژیلیک با رنگ صورتی، دگرسانی پروپیلیتیکی با رنگ سبز تیره و همچنین دگرسانی فیلیک با رنگ قرمز تا قهوه‌ای مشخص می‌شوند (Malekshahi et al., 2019). لذا در این پژوهش از تصاویر بازسازی شده بر اساس مقادیر α محاسبه شده به کمک روش سینگولاریتی اقدام به ایجاد تصویر رنگی کاذب به کمک

در تصویر حاصل شده به عنوان خروجی تکنیک ترکیب رنگی کاذب در مورد مقادیر α محاسبه شده به کمک روش سینگولاریتی در تهیه تصاویر ماهواره‌ای، رنگ سبز تا سبز روشن (متمایل به سفید) نمایانگر دگرسانی پروپیلیتیکی می‌باشد. رنگ صورتی روشن (متمایل به سفید) نشان‌دهنده دگرسانی فیلیک و رنگ صورتی نیز معرف دگرسانی آرژیلیک در محدوده مطالعاتی می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، مناطق امید بخش (محدوده‌های آنومال) مشخص شده توسط روش ادغامی از ترکیب رنگی کاذب و روش سینگولاریتی، مطابقت مطلوبی با زون‌های کانی‌زایی و دگرسانی محدوده اکتشافی ظفرقند دارند (شکل ۳).

لذا شایان ذکر است که شکل ۳ بر اساس نمونه‌برداری‌های صحرایی از سطح منطقه تهیه شده است و به همین دلیل با توجه به عدم برداشت نمونه از مناطق شمال شرقی و جنوب غربی محدوده، شاهد عدم نمایش دگرسانی‌ها در این دو محدوده در شکل ۳ هستیم. اما بر اساس مطالعات تکمیلی سنجش از دوری در محدوده مطالعه، صحت وجود چنین دگرسانی‌هایی با کمک روش‌های مختلفی در پردازش تصاویر ماهواره‌ای در قسمت شامل شرقی و جنوب شرقی منطقه تایید شده است.

مدل فرکتال عیار - مساحت

پیش‌پردازش داده‌های ژئوشیمیایی گام مهمی در تحلیل و تفسیر صحیح نتایج به‌شمار می‌آید. این فرآیند شامل شناسایی و جایگزینی داده‌های سنسورد، جایگزینی داده‌های پرت و نرمال‌سازی داده‌ها برای تضمین دقت و اعتبار تحلیل‌ها است.

در این پژوهش، برای ایجاد یک مجموعه داده بدون سنسورد، از روش جایگزینی ساده استفاده شد. ۹ داده سنسورد شناسایی شد که برای جایگزینی مقادیر زیر حد تشخیص دستگاه از ضریب $3/4$ استفاده شد. از آنجا که بیشتر روش‌های آماری فرض می‌کنند که توزیع داده‌ها نرمال است، داده‌های اولیه ژئوشیمیایی با استفاده از یک تابع تبدیل مناسب نرمال شدند. داده‌های خام ژئوشیمیایی به لگاریتم (تبدیل \ln) تبدیل شدند (شکل ۱۲ A) تا مقایسه مقادیر با تفاوت‌های زیاد در اندازه آسان‌تر شود (Hezarkhani and Ghannadpour, 2015; Ghannadpour and Hezarkhani, 2021; Armand et al., 2015; Zhou and Li, 2006). برای به‌دست آوردن نمودار فرکتال عیار - مساحت و محاسبه عیار هر بلوک از درون‌یابی (IDP Inverse Distance to a power) استفاده شد. روش درون‌یابی IDP یک روش درون‌یابی فضایی است که برای تخمین مقادیر متغیرها در مکان‌های ناشناخته با استفاده از مقادیر نقاط نمونه‌گیری شناخته‌شده به کار می‌رود. این روش بر اساس تأثیر بیشتر نقاط نزدیک به مکان موردنظر استوار است. مراحل کلی شامل جمع‌آوری و پیش‌آوری داده‌ها، حذف خطاها و ناهنجاری‌ها، تعیین شعاع جستجو و محاسبه وزن‌ها بر اساس فاصله و پارامتر P است. با مقداردهی P به ۲، این روش به IDW تبدیل

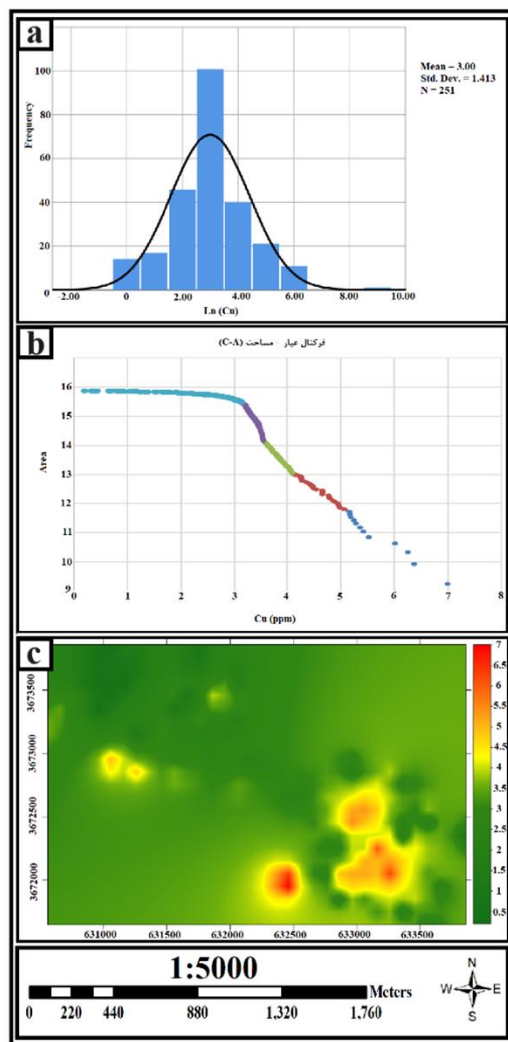
می‌شود. مقدار متغیر در نقطه موردنظر با میانگین وزنی مقادیر نقاط نمونه‌گیری محاسبه می‌شود (Ruffhead, 2023). با استفاده از نرم افزار MATLAB نمودار فرکتال عیار - مساحت عنصر مس محدوده ظفرقند به دست آمد (شکل ۱۲ B) و در انتها با استفاده از نرم افزار Surfer نقشه آنومالی مس محدوده مطالعاتی تهیه شد (شکل ۱۲ C).

مدل عملگر فازی گاما

در این پژوهش، از عملگر فازی گاما برای تلفیق چهار لایه اطلاعاتی که شامل لایه سنگ‌شناسی (لیتولوژی)، لایه چگالی گسل‌ها، ترکیب رنگی کاذب با باندهای ASTER 468 (RGB) بر اساس مقادیر جدید DN (مقادیر α محاسبه‌شده) و لایه ژئوشیمی مس به‌دست آمده از روش فرکتال عیار - مساحت، استفاده شده است. هر یک از این لایه‌ها نقش مهمی در شناسایی مناطق با پتانسیل معدنی ایفا می‌کنند. لایه سنگ‌شناسی (لیتولوژی) اطلاعات جامعی از لیتولوژی محدوده مطالعاتی ارائه می‌دهد که در این لایه اطلاعاتی، داسیت و ریوداسیت به علت میزبانی کانی‌سازی مس در محدوده مطالعاتی بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۱۳ - a)، در حالی که لایه چگالی گسل‌ها به دلیل نقش مهمی که در عبور سیالات هیدروترمال و تجمع مواد معدنی ایفا می‌کنند، به شناسایی مناطق مستعد کانی‌سازی کمک می‌کند (شکل ۱۳ - b). ترکیب رنگی کاذب با باندهای ASTER 468 (RGB) بر اساس مقادیر جدید DN (مقادیر α محاسبه‌شده) به شناسایی دگرسانی‌های پروپیلیتیک و فیلیک می‌پردازد این در حالی است که مناطق امیدبخش (محدوده‌های آنومال) به‌دست آمده از روش تلفیقی ترکیب رنگی کاذب و روش سینگلاریتی، به‌طور مطلوبی با زون‌های کانی‌زایی و دگرسانی در محدوده اکتشافی ظفرقند همخوانی دارند (شکل ۱۳ - c) و نهایتاً، لایه ژئوشیمی مس که با استفاده از مدل فرکتال عیار - مساحت تهیه شده است، توزیع غلظت‌های آنومال مس را نشان می‌دهد (شکل ۱۳ - d). پس از ایجاد لایه‌های اطلاعاتی مختلف با استفاده از عملگر فازی گاما، پتانسیل‌یابی برای فلز مس انجام شد که نتیجه آن در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

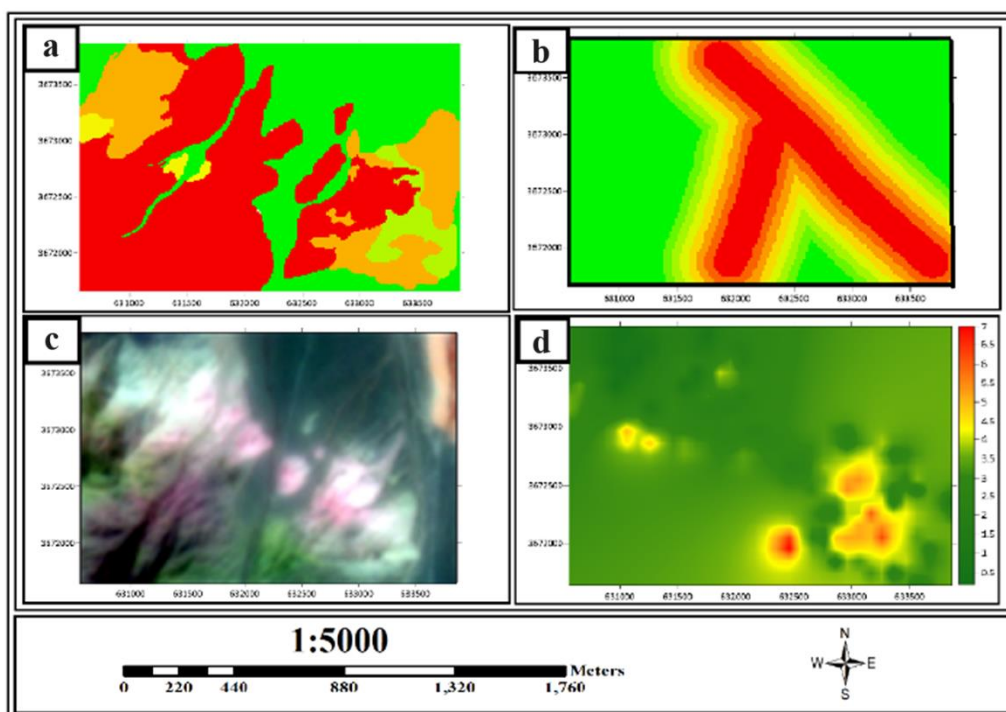
گاما با هاله‌های دگرسانی مطابقت دارد و این امر اعتبار نتایج را تایید می‌کند. نقشه نهایی به‌دست آمده، به طور موثری مناطق با پتانسیل معدنی بالا را مشخص کرده و می‌تواند به عنوان یک ابزار کارآمد برای برنامه‌ریزی‌های اکتشافی بیشتر در منطقه ظفرقند مورد استفاده قرار گیرد.

برای اعتبارسنجی خروجی‌های به‌دست آمده از عملگر فازی گاما، نقشه نهایی محدوده اکتشافی ظفرقند در شکل ۱۵ تهیه شد که این نقشه از ادغام خروجی عملگر فازی گاما (شکل ۱۴) و هاله‌های دگرسانی فیلک و پروپیلیتیک (شکل ۳) حاصل شده است. این تلفیق نشان می‌دهد که مناطق امیدبخش شناسایی شده با استفاده از عملگر فازی



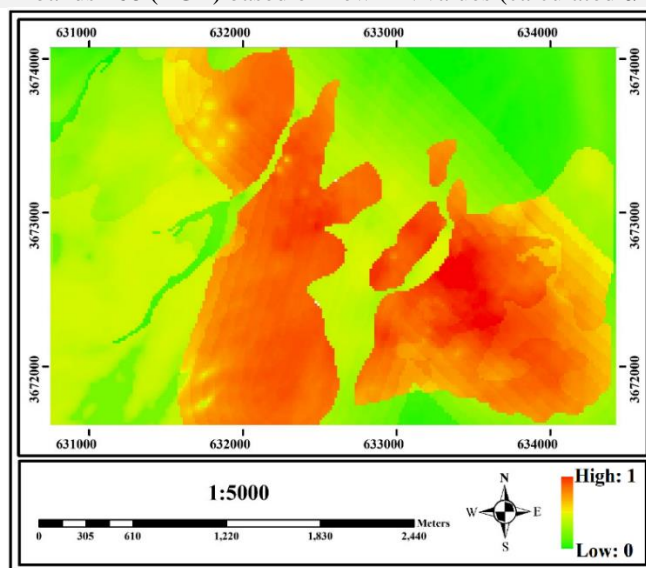
شکل ۱۲- پیاده سازی فرکتال عیار - مساحت عنصر مس محدوده ظفرقند (WGS 84 / UTM zone 39N). (a) هیستوگرام داده های نرمال شده، (b) نمودار فرکتال عیار - مساحت عنصر مس و (c) نقشه آنومالی مس با استفاده از درون‌یابی IDP.

Fig. 12. Implementation of the concentration-area fractal model for Cu in the Zafarghand area (WGS 84 / UTM zone 39N). a) Histogram of normalized data, b) Concentration-area fractal plot for Cu, and c) Cu anomaly map using IDP interpolation.



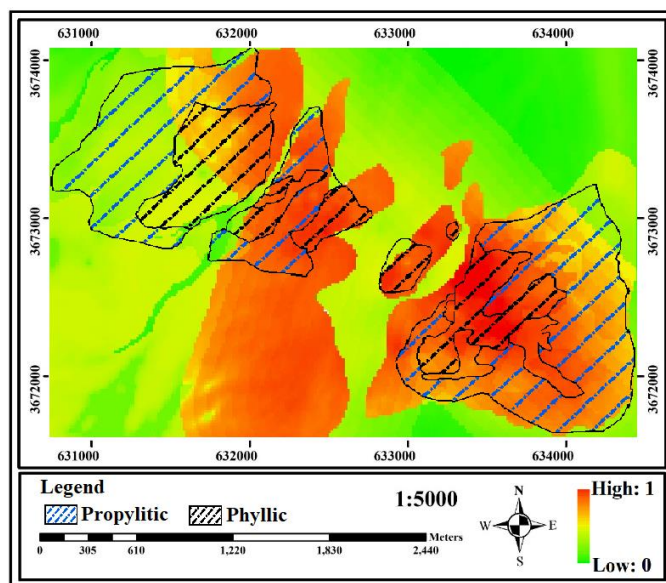
شکل ۱۳- لایه‌های اکتشافی مورد استفاده در عملگر فازی گاما (WGS 84 / UTM zone 39N). (a) لایه سنگ‌شناسی (لیتولوژی)، (b) لایه چگالی گسل‌ها، (c) ترکیب رنگی کاذب با باندهای ASTER 468 (RGB) بر اساس مقادیر جدید DN (مقادیر α محاسبه‌شده) و (d) لایه ژئوشیمی مس.

Fig. 13. Exploratory layers used in Fuzzy gamma operator (WGS 84 / UTM zone 39N). a) lithology layer, b) fault density layer, c) False color composite with ASTER bands 468 (RGB) based on new DN values (calculated α values), and d) Cu geochemistry layer.



شکل ۱۴- خروجی عملگر فازی گاما (لایه‌های اطلاعاتی در شکل ۱۳) (WGS 84 / UTM zone 39N).

Fig. 14. Output of fuzzy gamma operator (Data layers in Figure 13) (WGS 84 / UTM zone 39N).



شکل ۱۵- نقشه نهایی محدوده اکتشافی ظفرقند که از ادغام خروجی عملگر فازی گاما (نشان داده شده در شکل ۱۴) و هاله‌های دگرسانی فیلیک و پروپیلیتیک (برگرفته از شکل ۳) حاصل شده است (WGS 84 / UTM zone 39N).

Fig. 15. The final map for the Zafarghand exploration area, resulting from the integration of fuzzy gamma operator (shown in Figure 14) and the phyllic and propylitic alteration (derived from Figure 3) (WGS 84 / UTM zone 39N).

نتیجه‌گیری

همبستگی مکانی مناسبی با یکدیگر می‌باشند. علاوه بر این، از طریق تکنیک ترکیب رنگی کاذب بر پایه شاخص سینگولاریتی، می‌توان دگرسانی‌های موجود در تصاویر را به خوبی مشخص و برجسته کرد. این دگرسانی‌ها معمولاً با ویژگی‌های خاص زمین‌شناسی مرتبط می‌باشند، مانند دگرسانی‌های پروپیلیتیک و فیلیک، که در این مطالعه به خوبی شناسایی و مورد تایید قرار گرفته‌اند. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از روش سینگولاریتی در تحلیل تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند به طور قابل توجهی به درک و شناسایی دگرسانی‌های زمینی کمک کند و اطلاعات مفیدی را برای اکتشاف و استخراج منابع معدنی فراهم آورد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از ترکیب رنگی کاذب با باندهای (RGB) ASTER 468 بر اساس مقادیر جدید (مقادیر α محاسبه شده) از طریق عملگر فازی گاما، دقت و قابلیت اطمینان در شناسایی مناطق کانی‌سازی مس را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. روش منطق فازی، به‌ویژه عملگر فازی گاما، به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در ترکیب لایه‌های اطلاعاتی مختلف و برجسته‌سازی مناطق پتانسیل‌دار شناخته شده است. همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده

در این مطالعه، روش سینگولاریتی به عنوان یک ابزار مؤثر برای جدایش مقادیر غیرعادی یا آنومال از زمینه استفاده شده است. این روش به طور گسترده در حوزه‌های مختلف علوم زمین به خصوص ژئوشیمی اکتشافی و زمین‌شناسی اقتصادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش، از این روش برای پردازش و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای، به منظور شناسایی و بارزسازی دگرسانی مس پورفیری در منطقه اکتشافی ظفرقند در شمال شرق استان اصفهان استفاده شده است. با توجه به ویژگی‌های رستری و رقومی تصاویر ماهواره‌ای، این تصاویر به صورت ماتریس‌هایی از مقادیر دیجیتال (DN) برای هر پیکسل ذخیره می‌شوند. از این‌رو، می‌توان تحلیل تصاویر ماهواره‌ای را به یک مسئله مشابه با تحلیل داده‌های سیستماتیک تبدیل کرد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که روش سینگولاریتی به دلیل ویژگی‌های ساختاری خود برای جداسازی مقادیر آنومال، در پردازش تصاویر ماهواره‌ای با ساختار رستری بسیار مؤثر است. بدین ترتیب، مقادیر DN که توسط الگوریتم روش سینگولاریتی مشخص شده‌اند (مقادیر α)، دارای

نهایی محدوده اکتشافی ظفرقند از ادغام خروجی عملگر فازی گاما و هاله‌های دگرسانی فلیک و پروپیلیتیک تهیه شد (شکل ۱۵)، که نشان‌دهنده تطابق مطلوب این مناطق با زون‌های کانی‌زایی و دگرسانی است. این روش نوین پیشنهادی، با ارائه یک شناسایی جامع و دقیق از مناطق پتانسیل‌دار، به‌طور قابل‌توجهی باعث پیشرفت روش‌های سنجش از دور و استراتژی‌های اکتشاف مواد معدنی شده و می‌تواند به عنوان یک ابزار کارآمد در برنامه‌ریزی‌های اکتشافی بیشتر در منطقه ظفرقند و مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

References

- Aliyari, F., Afzal, P., Lotfi, M., Shokri, S., Feizi, H., 2020. Delineation of geochemical haloes using the developed zonality index using multivariate and fractal analysis in the Cu-Mo porphyry deposits. *Applied Geochemistry* 121, 104694.
- ANJC (Alamut Naghsh-e Jahan Company)., 2011. Initial exploration report of Zafarghand copper index, Isfahan, Iran. pp. 270. (in Persian).
- 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. (in Persian).
- 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. *Journal of Earth Sciences Research* 7 (25), 75-90.
- Aboelkhair, H., Ninomiya, Y., Watanabe, Y., Sato, I., 2010. Processing and interpretation of ASTER TIR data for mapping of rare-metal-enriched albite granitoids in the Central Eastern Desert of Egypt. *Journal of African Earth Sciences* 58 (1), 141-151.
- Abubakar, A.J., Hashim, M., Beiranvand Pour, A., 2019. Remote Sensing satellite imagery for prospecting geothermal systems in an aseismic geologic setting: Yankari Park. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 80, 157-172.
- Amidi, S. M., 1975. Contribution à l'étude stratigraphique, pétrologique et pétrochimique des roches magmatiques de la région Natanz-Nain-Surk (Iran central), These, universite scientifique ET medicale de Grenoble, France, pp. 316.

شده است، این رویکرد با ارائه شناسایی دقیق‌تر و جزئی‌تر از مناطق دگرسانی، برای پیشرفت روش‌های سنجش از دور و بهبود استراتژی‌های اکتشاف مواد معدنی بسیار مهم است. لایه‌های اطلاعاتی مختلفی که شامل لایه سنگ‌شناسی (لیتولوژی)، چگالی گسل‌ها، ترکیب رنگی کاذب با باندهای ASTER 468 (RGB) بر اساس مقادیر جدید DN و لایه ژئوشیمی مس به‌دست آمده از روش فرکتال عیار - مساحت با استفاده از عملگر فازی گاما ترکیب شده‌اند. نتیجه این تلفیق در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. برای اعتبارسنجی این نتایج، نقشه

- Aminoroayaei Yamini, M., Tutti, F., Amin Al-Raeayaei Yamini, M. R., Ahmadian, J., 2018. Plagioclase as Evidence of Magmatic Evolution in the Zafarghand Porphyry Copper Deposit, Northeast of Isfahan. *Economic Geology* 10 (1), 61-76. (in Persian).
- 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.
- Armand, R., Cherubini, C., Tuduri, J., Pastore, N., Pourret, O., 2015. Rare earth elements in French stream waters - Revisiting the geochemical continental cycle using FOREGS dataset. *Journal of Geochemical Exploration*. 157, 132-142.
- 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. *ELSEVER: Journal of Asian Earth Sciences* 42 (6), 1309-1323.
- 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 QUAC Atmospheric Correction (QUAC) algorithm for VNIR-SWIR multi- and hyperspectral imagery, in: Shen, S.S and Lewis, P.E. (Ed.), *International Society for Optics and Photonics. SPIE Proceedings*, pp. 668-678.
- 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* 172 (172), 1-14.
- Barak, S., Imamalipour, A., Abedi, M., 2023. Application of Fuzzy Gamma Operator for Mineral Prospectivity Mapping, Case Study: Sonajil Area. *Journal of Mining and Environment* 14 (3), 981–997.
- Beiranvand pour, A., Hashim, M. 2014., ASTER, ALI and Hyperion sensors data for lithological mapping and ore minerals exploration. *Springer Plus* 3 (130).
- Cheng, Q., Agterberg, F.P., Ballantyne, S.B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration* 51 (2), 109-130.
- 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.
- Cheng, Q., Agterberg, F.P., Bonham-Carter, G.F. 1996. A spatial analysis method for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical Exploration* 56, 183–195.
- Cheng, Q., Yaguang, X., Eric, G., 2000. Integrated spatial and spectrum method for geochemical anomaly separation. *Natural Resources Research* 9 (1), 43–52.
- Chettah, W., Mezhoud, S., Hadji, R., 2024. Fuzzy Logic-Based Landslide Susceptibility Mapping in Earthquake-Prone Areas: A Case Study of the Mila Basin, Algeria. *Russian Geology and Geophysics* 1–19.
- Carranza E.J.M., 2011. Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values. *Journal of Geochemical Exploration* 110 (2), 167–185.
- 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).
- Esmailzadeh, M., Imamalipour, A., Aliyari, F., 2022. Application of Fuzzy Gamma Operator to Generate Mineral Prospectivity Mapping for Cu-Mo Porphyry Deposits (Case Study: Kighal-Bourmolk Area, Northwestern Iran). *Journal of Mining and Environment* 13, 129–153.
- 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. *Iranian Journal of Earth Sciences* 11 (1), 80-92.
- Fereydooni, H., Mojeddifar, S., 2017. A directed matched filtering algorithm (DMF) for discriminating hydrothermal alteration zones using the ASTER remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 63, 1-13.
- Ghannadpour, S.S., Hasiri, M., Jalili, H., Talebiesfandarani, S., 2024a. 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., 2024b. 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).
- 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.
- Ghorbani, M., 2002. A preface to economic geology of Iran, National Geoscience Database of Iran.
- Ghannadpour, S.S., Hezarkhani, A., 2021. Investigation of Geochemical Correlation Between Radioactive and Rare Earth Elements: Case Study of Baghak Mine, NE Iran. *Journal of Mining and Environment* 12, 569-587.
- 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.
- Heidari, S.M., Afzal, P., Sadeghi, B., 2024. Molybdenum and gold distribution variances within Iranian copper porphyry deposits. *Journal of Geochemical Exploration* 261, 107471.
- Hezarkhani, A., Ghannadpour, S.S., 2015. Exploration Information Analysis. Amirkabir University of Technology Publications, Tehran, Iran.
- 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.
- 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, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
- Latifi, R., 2000. Geological, Petrological, and Geochemical Study of Intrusive Bodies in the South and Northwest of Zafarghand. Master's thesis, Department of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
- 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.
- 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. pp. 012174.
- Lindsay, M.D., Betts, P.G., Ailleres, L., 2014. Data fusion and porphyry copper prospectivity models, southeastern Arizona. *Ore Geology Reviews* 61, 120–140.
- Malekshahi, Sh., Rasa, I., Rashidnejad Omran, N., Lotfi, M., 2019. Investigation of satellite image processing results for alteration with field evidences in Sarkouh porphyry copper deposit. *Iranian Remote Sensing & GIS* 10, 1-26. (In Persian).
- 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* 7, 29-47. (In Persian).
- Moradpour, H., Rostami Paydar, G., Feizizadeh, B., Blaschke, T., Beiranvand Pour, A., Valizadeh Kamran, K., Muslim, A.M., Shawkat Hossain, M., 2022. Fusion of ASTER satellite imagery, geochemical and geology data for gold prospecting in the Astaneh granite intrusive, West Central Iran. *International Journal of Image and Data Fusion* 13, 71–94.
- Majid, S.I., Kumar, M., Kumar, P., Verma, N.K., 2023. GIS-Based Flood Susceptibility Mapping of Srinagar District, India Using Weights-of-Evidence (WofE), Frequency Ratio (FR) and Fuzzy Gamma Operator (FGO). *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 51, 2421–2446.
- Mars, J.C., Rowan, L.C., 2006, Regional mapping of phyllic and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms. *Geosphere* 2 (3), 161–186.
- Mohammadi, S., 1995. Investigation of Volcanism in the Ardestan Region (Central Iran). Master's thesis, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
- Moon, W.M., 1998. Integration and fusion of geological exploration data: A theoretical review of fuzzy logic approach. *Geosciences Journal* 2, 175–183.
- Nasr Esfahani, A., Vahabi Moghadam, B., 2010. Tectonic and Magmatic Setting of the Felsic Volcanic Rocks in South Ardestan (Northeast of Isfahan). *Petrology, University of Isfahan* 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, pp. 16.
- Ostadosseini, A., Barati, M., Afzal, P., Lee, I., 2021. Geochemical and microthermometric characteristics of the Davaran Manto-type copper deposit, Central Iran. *Neues Jahrbuch Mineralogie* 197, 145-164.
- 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). *Journal of Geospatial Information Technology* 7(2).
- 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; Chapter4. pp. 483-508.
- Ruffhead, A.C., 2023. Enhancement of inverse-distance-weighting 2D interpolation using accelerated decline. *Reports on Geodesy and Geoinformatics* 116, 9–14.
- Sadeghian, M., Ghafari, M., 2011. Petrogenesis of the Zafarghand Granitoid Massif (Southeast of Isfahan). *Petrology* 2 (6), 47-70.
- 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.
- Sangaré, A., Attou, A., Achkouch, L., El cheikh, Y., Rachid, A., Miftah, A., Diakité, D., 2024. Mapping bauxite-associated alterations in the Boke region (NW part of Republic of Guinea), using the airborne gamma-ray spectrometry data. *Scientific African* 24, e02184.
- Shahsavari, H., Arefi, H., Farahani, M.D., Alizadeh Pirstasti, M., Reza Shobairi, S.M., 2024. Mapping Groundwater Resource using Multispectral Sentinel 2 and Fuzzy Logic method, Case Study: Salafchegan, Qom, Iran. *Ecological Questions* 35, 1-26.
- 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.
- 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.
- 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* 31 (4).
- Zuo. R., Xia, Q., Zhang, D.A. 2013. comparison study of the C-A and S-A models with singularity analysis to identify geochemical anomalies in covered areas. *Applied Geochemistry* 33, 165–172.
- Ziyong, Z., Hangyu, Y., Xiaodan, G., 2018. Fuzzy fusion of geological and geophysical data for mapping hydrocarbon potential based on GIS. *Petroleum Geoscience* 24, 131–141.
- Zhou, J., Li, X., 2006. GeoPlot: An Excel VBA program for geochemical data plotting. *Computers and Geosciences* 32, 554–560.
- Zadeh, L.Z., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control* 8 (3), 338-353.