



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

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



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 a 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

CC O S

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

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 concentrations across different element 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 (α <2) and values greater than 2 representing the background (α >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 Ustatistic 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 Ustatistic 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 bauxiteassociated 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







OPEN CACCESS Kharazmi Journal of Earth Sciences Journal homepage https://gnf.khu.ac.ir

Research Article

نقشهبرداری زونهای دگرسانی مرتبط با کانیسازی مس: رویکردی مبتنی بر پردازش تصاویر با استفاده از روش سینگولاریتی و عملگر فازی گاما

سید سعید قنادپور^{*۱}، مرتضی حصیری^۲، حمید صالحی شهرابی^۳، هادی جلیلی^۳ ۱. استادیار، گروه آموزشی اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران. ۲. دانشجوی کارشناسیارشد، گروه آموزشی اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران. ۳. استادیار، مرکز تحقیقات فضایی ایران (ISRC)، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیدہ
تاريخچه مقاله	امروزه سنجش از دور زمینشناختی در کمترین زمان و با صرف کمترین هزینه، دسترسی به مناطق دگرسان را بسیار میسر کرده و محلهای مناسب
دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶	برای تشکیل کانسارهای گرمابی را مشخص مینماید. در مطالعه پیش رو، به کمک تکنیک پردازش تصاویر ماهوارهای به بارزسازی زونهای دگرسانی
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷	منطقه اکتشافی ظفرقند پرداخته میشود. منطقه اکتشافی ظفرقند، در شمالشرق اصفهان و براساس تقسیمبندی زونهای ساختاری زمینشناسی
واژەھاى كليدى	در زون ایران مرکزی (بخش میانی کمان آتشفشانی ماگمایی ارومیه-دختر) قرار دارد. سیستم پورفیری ظفرقند هالههای دگرسانی فیلیک، پتاسیک،
سينگولاريتى، پردازش	پروپیلیتیک، آرژیلیک و کمی سیلیسی را شامل میشود. در این مطالعه با استفاده از تصاویر سنجنده استر، به شناسایی دگرسانیهای مرتبط پرداخته
تصاویر، استر (ASTER)،	شدهاست. بدین منظور با توجه به ماهیت رستری و رقومی بودن تصاویر ماهوارهای، مقادیر دیجیتال نامبر هر پیکسل از مجموعه ماتریس تصاویر، به
ظفرقند، مس پورفیری،	عنوان یک نمونه در شبکهای سیستماتیک در نظر گرفته شده است. در نهایت نیز الگوریتم روش سینگولاریتی به عنوان یک روش ساختاری موثر در
عملگر فازی گاما.	جدایش آنومالیهای ژئوشیمیایی، بر روی مجموعه مقادیر دیجیتال نامبر پیکسل تصاویر ماهوارهای استر پیاده شده است. علاوه بر این، از عملگر
	فازی گاما برای ترکیب لایههای اطلاعاتی موجود از محدوده مورد مطالعه استفاده شد که شامل لایه سنگشناسی (لیتولوژی)، چگالی گسلها،
	ترکیب رنگی کاذب با باندهای ASTER 468 (RGB) بر اساس مقادیر جدید DN (مقادیر α محاسبهشده) و لایه ژئوشیمی مس میباشد. نتایج
5200,240 1113,240	حاصله از تکنیک فوقالذکر نشان میدهد بکارگیری روش سینگولاریتی با توجه به ماهیت ساختاری بودن آن در تصمیم گیری، موفقیت آمیز بوده و
E126492***	در تعیین زونهای دگرسانی منطقه ظفرقند به خصوص دگرسانیهای 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 خوب مشخص کاده است.

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 در مراحل مختلف اکتشاف ذخایر معدنی به ویژه در مراحل اولیه

اکتشاف (مرحله اکتشاف مقدماتی) کاربرد داشته و برای کانسارهایی که هالههای نسبتاً بزرگی نسبت به توده کانسار برجای میگذارند، اهمیت بیشتری پیدا میکنند. جدایش آنومالیهای ژئوشیمیایی از زمینه یکی از مهم ترین و کلیدی ترین مراحل در اکتشافات ژئوشیمیایی میباشد (Hezarkhani and Ghannadpour, 2015). روشهای

DOI http://doi.org/10.22034/KJES.2024.10.1.107271

***نویسنده مسئول:** سید سعید قنادپور s.ghannadpour@aut.ac.ir ا**ستناد به این مقاله:** قنادپور، س. حصیری، م.، صالحی شهرابی، ح.، جلیلی، ه. (۱۴۰۳). نقشهبرداری زونهای دگرسانی مرتبط با کانیسازی مس: رویکردی مبتنی بر پردازش

تصاویر با استفاده از روش سینگولاریتی 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

DOI: 10.22034/KJES.2024.10.1.107271

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-05-21]

et al., 2023; Chettah Sangaré et al., 2024; Majid) مى دهد (دهد دهد et al., 2024; Shahsavari et al., 2024; Moradpour et al., 2022; Barak et al., 2023; Lindsay et al., 2014). كمربند فلززایی تتیس 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 می شود. منطقه اکتشافی ظفرقند (در شمال شرقی اصفهان) در بخش میانی این کمان واقع شده است (شکل ۱). کارهای اکتشافی اولیه در منطقه به شکل تهیه نقشه زمین شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ برداشت نمونه های 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. در یکی از این مطالعات، پتروژنز توده گرانیتوئیدی ظفرقند توسط صادقیان و غفاری (Sadeghian and Ghafari, 2011) مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. امین الرعایایی یمینی و همکاران (Aminoroayaei Yamini et al., 2016) با نگرشی بر تحولات کانیشناسی و ژئوشیمیایی منطقه، به بررسی دگرسانیهای گرمابی این کانسار پرداختند. مطالعات ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی و سیالات در گیر نیز توسط اعلمي نيا و همكاران (Alaminia et al., 2017) انجام شد. امين الرعايايي يميني و همكاران (Aminoroayaei Yamini et al., الرعايايي 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

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 می توان بکارگیری روشهای ساختاری جدایش آنومالی از زمینه همچون روش آماره فضایی U، هندسه فرکتال در مدلهای فرکتالی مختلف و روش سينگولاريتي 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 تركيب روشهاى ساختارى جدايش آنومالىهاى ژئوشيميايى 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 می شود. لایه های اطلاعاتی شامل لایه سنگشناسی (لیتولوژی)، چگالی گسلها، ترکیب رنگی کاذب با باندهای ASTER 468 (RGB) بر اساس مقادیر جدید DN (مقادیر – محاسبهشده) و نقشه ژئوشیمی مس بهدست آمده از فرکتال عیار lphaمساحت می باشد. روش منطق فازی که توسط لطفی زاده (۱۹۶۵) معرفی شد، یک رویکرد مبتنی بر دانش است که به طور گسترده در نقشهبرداری مواد معدنی برای اکتشاف استفاده می شود و بر اساس یک مقیاس پیوسته از ۰ تا ۱ برای نمایش قابلیت اکتشاف عمل می کند. این روش ارزیابی و تنظیم مقادیر عضویت را ساده می کند و تسهیل گر ايجاد نقشههاى قابليت اكتشاف است (Zadeh, 1965). منطق فازى با تلفیق چندین لایه با موضوعات وزنی و دانش کارشناسان، برای شناسایی مناطق پتانسیلدار معدنی مناسب است. با اختصاص وزنهای خاص به عوامل کنترل کننده بر اساس مدل های مفهومی، این روش نظریه مجموعههای کلاسیک را برای تعیین مناطق پتانسیلدار تعمیم

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 فیزیکوشیمیایی کانیسازی و دگرسانی مرتبط در سیستم مس پورفیری ظفرقند نیز مورد تحلیل شیمی کانیها و ایزوتوپ پایدار قرار گرفته است (Aminoroayaei Yamini et al., 2018). به علاوه، امین الرعایایی و همکاران (Aminoroayaei Yamini et al., 2018) در مطالعه دیگری به پتروگرافی، ژئوشیمی و دماسنجی دگرسانی در کانیسازی سینووژنیک مس در این ناحیه پرداختند. مطالعه شواهد ایزوتوپی و

ژئوشیمیایی بر نقش اختلاط پوسته جوان و ماگما در کمان ارومیه-دختر با نگاه ویژه بر انکلاوهای میکروگرانولار مافیک و گرانیتوییدهای 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).



شكل ۱- موقعيت منطقه اكتشافى ظفرقند در بخش مركزى كمان اروميه-دختر (UDMA). Fig. 1. The location of Zafarghand exploration area in the central section of the Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA).

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 سنجش از دوری و 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; (Ghannadpour et al., 2024a, b).

زمینشناسی اردستان

برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان در بخش جنوبی چهار گوش ۱:۱۰۰۵۰ و کاشان بین مختصات جغرافیایی '۵۲^۰۰۰ تا '۳۲ ۵۲^۰ طول خاوری و ۳۳^۰ تا '۳۰ ۳۳^۰ عرض شمالی در شمال باختری استان اصفهان

قرار گرفته است. بخش اعظم این ناحیه در زون ساختاری ارومیه- دختر واقع شده و محدودهای در جنوب باختری این برگه، زون سنندج-سیرجان را شامل میشود. بیشتر رخنمونهای ناحیه شامل سنگهای آتشفشانی و آذرآواری با ترکیب حدواسط تا بازیک 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 اليگوسن و اليگوميوسن و يک فاز کم ژرفا با سن پليوسن 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 یکصدهزارم 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 بازیک در داخل آنها نفوذ کردهاند. بهطورکلی 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). به طور خلاصه واحدهای سنگی در منطقه بهشرح زیر می باشد (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.

از گسلهای مهم در منطقه میتوان به گسل اصلی میلاجرد- زفره و گسلهای راندگی گچومثقال- گنیان 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 برگه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان با مختصات جغرافیایی ۵۵'۳۲°۵۲ تا ۵۲°۲۶'۲۶'۲۰ طول شرقی و ۳۰۳'۰۱°۳۳ تا ۵۲°۲۱'۳۰۳ عرض شمالی قرار دارد (شکل ۲) (Alaminia et al., 2017). کانسار مورد مطالعه در منتهی الیه بخش غربی زون ساختاری ایران مرکزی و بر روی بخش مرکزی کمان ولکانوپلوتونیسم 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 ا فواصل ۵۰ متر انتخاب شده و تعداد ۱۸۴ نمونه در امتداد مقاطع ا فواصل ۵۰ متر انتخاب شده و تعداد ۱۸۴ نمونه در امتداد مقاطع رداشت از کانیسازی و سنگ میزبان به روش خرده سنگی برداشت شده است. نمونههای سنگی شکسته، خرد و سپس از الک ۲۰۰ مش آزمایشگاه Amdel استرالیا انجام شده است.

Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-05-21



شکل ۲- نقشه زمین شناسی ساده شده منطقه اکتشافی ظفرقند. پس از تغییرات از اعلمی نیا 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 کوارتزدیوریت و دگرسانی فیلیک در نزدیکی تودههای نفوذی دیوریت و کوارتزدیوریت پورفیری و نیز سنگهای 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 اردستان به چشم می خورد. شکل ۴ نمایی از رخنمونهای دگرسانی در اردستان به چشم می خورد. شکل ۴ نمایی از رخنمونهای دگرسانی در

بر پایه بررسی های صحرایی و سنگنگاری انجام شده در این منطقه، سنگهای آذرین اسیدی تا حدواسط شامل سنگهای آتشفشانی و نفوذى متعلق به دوره زمانى ائوسن بالايي و جوان تر رخنمون دارند كه در ادامه به شرح واحدهای سنگی پرداخته می شود (Alaminia et al., 2017). ریولیت در منتهی الیه 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 دربرمی گیرند (شکل۲). این واحد مهم ترین سنگ میزبان کانی سازی مس در منطقه محسوب می شود 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 می شوند و به علت فراوانی در شت بلورها به شکل حفرهای هستند. تودههای نفوذی دیوریت، کوارتزدیوریت و میکرودیوریت در شمالغربی و جنوبشرقی منطقه با رنگ خاکستری تیره برونزد دارند. توده نیمهنفوذی کوارتزدیوریت یورفیری در جنوب شرقی منطقه، وسعت كوچكى را مىيوشاند.

قنادپور و همکاران



شکل ۳- گسترش هالههای دگرسانی در محدوده اکتشافی ظفرقند. پس از تغییرات از اعلمینیا 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- رخنمونهای دگرسانی در منطقه اکتشافی ظفرقند. a) قسمتی از رخنمون دگرسانیها در منطقه، b) رخنمون دگرسانیهای فیلیک و پروپیلیتیک، c) رخنمون دگرسانیهای آرژیلیک و پروپیلیتیک (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 روشها

مجموعه دادهها

Terra بر روى ماهواره (Emission and Reflection Radiometer قرار گرفته و در سال ۱۹۹۹ به فضا پرتاب شدهاست. دادههای 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 دگرسانیهای مختلف و کانیهای شاخص در ارزیابی پتانسیل معدنی در منطقه مورد مطالعه، از تصاویر ماهوارهای 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 استربرای شناسایی آلتراسیونها، کانیها و سنگشناسی در مطالعات زمینشناسی به کار برده میشود. دادههای استر به تنهایی یا به صورت ترکیبی با سایر ماهوارههای سنجش از دور (دادههای زمینی برای تولید نقشههای زمینشناسی استفاده میشوند و دادههای زمینی برای تولید نقشههای زمینشناسی استفاده میشوند سایر ماهوارههای سنجش از دور را نیز دارد. با ترکیب دادههای استر و سایر ماهوارههای سنجش از دور را نیز دارد. با ترکیب دادههای استر و سایر ماهوارههای سنجش از دور را نیز دارد. با ترکیب دادههای استر و در در بسیاری از پژوهشهای سالهای اخیر، بر استفاده ترکیبی دادههای استر و سایر ماهوارههای سنجش از دوری تأکید شده است. 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 می دهد. تصاویر استر به دلیل تعدد باندها در محدوده SWIR و TIR کاربرد زیادی در مطالعات زمین شناسی به ویژه تشخیص زونهای دگرسانی دارند. باندهای SWIR این تصاویر محدودههای جذبی Ho-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 زمین شناسی (خصوصاً برآورد دقیق دمای سطح زمین و اندازه گیری گسیل مندی پدیدههای مختلف استفاده می شود. از لحاظ رادیومتریکی، تصاویر مرئی و مادون

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
	1	0.52-0.60		
VNIR	2	0.63-0.69	15	8 bits
	3 (N & B)	0.78-0.86		
	4	1.60-1.70		
SWIR	5	2.145-2.185		8 bits
	6	2.185-2.225	<u> </u>	
	7	2.235-2.285		
	8	2.295-2.365		
	9	2.360-2.430		
TIR	10	8.125-8.475		
	11	8.475-8.825		
	12	8.925-9.275	90	12 bits
	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 می شوند و بنابراین برای تحلیل هایی که نیاز به این باندها دارند، مناسب نیستند. در این مطالعه از تصاویر L1T 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 سينگولاريتي

روش سينگولاريتي روشي جهت تخمين غلظت عناصر به وسيله شبکههای مربعی در حال توسعه میباشد (Wang et al., 2018). به منظور تخمین غلظت در این روش، از پنجرههای مربعی شکل برای اندازه گیری تراکم غلظت حول یک موقعیت خاص (نمونه مد نظر) استفاده می شود (Xiao et al., 2018). این روش قادر به شناسایی آنومالی های پنهان شده در زمینه که آنومالی ضعیف نامیده شده و همچنین از طریق وزندهی به شیوه معکوس فاصله (IDW) قابل تشخيص نيستند، ميباشد. در اين روش با بررسي تغييرات غلظت عناصر با تغییر مساحت، تهیشدگی یا غنیشدگی عناصر مشخص می شود. رابطه فرکتالی این متغیرها از رابطه (۱) زیر قابل محاسبه هستند (Cheng, 2006).

$$C(A) = c.A^{(\frac{\alpha}{2}-1)}$$
(1)

در این رابطه (C(A) نشان دهنده چگالی فلز در مساحت C،A 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 می شود.

$$\begin{aligned} r_{i} &= (2i-1)r_{min} \\ r_{min} &= r_{1} < r_{2} < \cdots < r_{n} = r_{max} , \\ i &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \tag{(Y)}$$

که در آن n تعداد پنجره یا شبکههای مربعی، r_{min} کوچکترین سایز پنجره و r_{max} بزرگترین سایز پنجره در نظر گرفته می شود. 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 می شود (Cheng, 2007). در واقع با لگاریتم گیری از رابطه (۱)، ارتباط بین سایز پنجره یا شبکه r_i و میانگین غلظت در هر شبکه ($C[A(r_i)]$) به صورت یک خط راست و مطابق را رابطه (۳) خواهد بود (Wang et al., 2018):

$$logC[A(r_i)] = c + (\alpha - 2)\log(r_i)$$
 (۳)
مقدار ۲-۵ 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 سينگولاريتي محاسبه مي شود.

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 (α>۲) نمایانگر تهیشدگی و سینگولاریتی منفی (α <٢) نشاندهنده غنی شدگی غلظت عناصر در منطقه مورد نظر $(\alpha$ مى باشد (Liu et al., 2019).

فركتال عيار – 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 می شود (Cheng et al., 1994). با افزایش عیار عنصر، مساحت اشغال شده توسط آن کاهش می یابد. مدلسازی فرکتالی بر اساس مجموعهای از معادلات توان (۴)، شاخص و پارامترهای مورد مطالعه در منطقه مورد بررسی است. (۴)

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

در هر نقطهای از نمودار لگاریتمی، پارامتر ۵ نمایانگر بعد فرکتالی است. مقدار این پارامتر با توجه به ماهیت چندفر کتالی دادهها در علوم زمین متفاوت است. این رویکرد ارتباط بین نتایج دادههای زمین شناسی، ژئوشیمیایی و کانی شناسی را روشن می کند. این روش امكان بررسى انواع مختلف دادههاى ژئوشيميايي، 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):

$$A(\rho \le v) \propto \rho^{-\alpha_1}; A(\rho \ge V) \propto \rho^{-\alpha_2} \tag{(a)}$$

قنادپور و همکاران

نقشهبرداری زونهای دگرسانی مرتبط با کانیسازی مس: رویکردی ...

ho که در آن ho غلظت عنصر، (ho) مساحت مناطق با غلظت ho که در آن ho غلظت عنصر، (ho) مساحت مناطق با غلظت ho معدار آستانه، ho و ho_2 و ho_2 ابعاد فراکتالی هستند و نماد ریاضی ho ، ho مقدار آستانه، 11, ho_2 و ho_1 (Cheng et al., 1994; Zuo et al., 2013;) نشان دهنده نسبت است (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

Chettah et al., Zadeh, 1965; Sangaré et al., 2024;) میشود (Chettah et al., Zadeh, 1965; Sangaré et al., 2024; Shahsavari et al., 2024 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 \cdot تا 1 به دست میآید، با مقدار خاص بسته به نتیجه موردنظر انتخاب میشود. ترکیب فازی گاما شامل حاصل «ضرب جبری فازی» است که منجر خاص بسته به نتیجه موردنظر انتخاب میشود. ترکیب فازی گاما شامل داصل «ضرب جبری فازی» و «مجموع جبری فازی» است که از صفر تا یک منجر ترکیب فازی «که از صفر تا در کیب فازی» است که منجر حصل «ضرب جبری فازی» و «مجموع جبری فازی» است که از می ترکیب فازی گاما شامل ترکیب منعکس کننده مجموع جبری فازی است، در حالی که در صفر، با یک متغیر است، درجه تأثیر را مشخص میکند: در γ برابر با یک، ترکیب منعکس کننده مجموع جبری فازی است، در حالی که در صفر، با Sangare et al., 2024; Esmailzadeh et al., 2022; Ziyong .(et al., 2018; Lindsay et al., 2014; Moon, 1998

(6)

 $\mu_{combination} = (fuzzy \ algebraic \ sum)^{\gamma} \times (fuzzy \ algebraic \ product)^{(i-\gamma)}$

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 می شود. در شکل ۵ مراحل انجام این مطالعه در قالب یک فلوچارت نمایش داده شده است.

در ادامه و در بخش پردازش و نتایج، پس از انجام پیش پردازشهای 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



شكل ۵- فلوچارت مراحل و روند انجام كار.

پردازش و نتایج

پیش پردازش تصاویر ماهوارهای

در این قسمت قبل از اعمال روش ساختاری جدایش آنومالی از زمینه، به آمادهسازی و پیش پردازش تصویر ماهوارهای استر پرداخته خواهد شد. زیرا به منظور دریافت اطلاعات از تصاویر ماهوارهای لازم است پیش از استفاده از آنها پیش پردازشهای رادیومتریک و هندسی بر روی تصاویر صورت گیرد. پیش پردازش، شامل عملیاتی می شود که لازم است قبل از آنالیز اصلی دادهها و استخراج اطلاعات صورت گیرد. تصحيح راديومتريك و تصحيح هندسي از جمله اين عملياتها ميباشد. تصحيحات هندسي جهت ژئورفرنس كردن تصوير و تصحيحات رادیومتریک شامل عملیاتی برای حذف اثراتی چون عبور نور خورشید از ابر، ذرات معلق موجود در فضا، اکسیژن، نیتروژن و عناصر دیگر که

Fig. 5. Flowchart of work steps and process.

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 تصحيح راديومتريک 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 همین طور میزان ناچیز بخار آب، مناسب است و در واقع

برای منطقهای که هیچ اندازه گیری خاص زمینی وجود نداشته باشد نیز می تواند مؤثر باشد (Fereydooni et al., 2017). برای حذف اثر جذب و پخش امواج الکترومغناطیسی از روش QUAC (QUick) QUick) و مادون قرمز نزدیک و مادون تصحیح اتمسفری برای محدوده مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون 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 (al., 2005).

آمادهسازي تصاوير ماهوارهاي 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 می شوند.

خروجی ریسایز شده باندهای ۴ تا ۹ مربوط به محدوده SWIR در شکل ۶ قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می شود 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 پیکسل هاست. اما این موضوع در روند این پژوهش نه تنها مشکلی ایجاد نکرده بلکه دیده شدن پیکسل ها در این تصویر به نحوی نمایانگر یک نمونه مجزا با مختصات معلوم به منظور اعمال روش سینگولاریتی و نمایش هر چه بهتر تاثیر این روش ها بر روی داده (مقادیر DN هر پیکسل) می شود.



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.

Table 2. Statist	ical specification	s of SWIR bands (B	ربوط به مقادیر DN. ands 4 to 9) for DN	۹ (باندهای ۲ تا ۹) م values.	ندهای محدوده VIK
	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 a .SWIR) باند ۴، b) باند ۶، c) باند ۶، d) باند ۷، e) باند ۸ و 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 r_{min} (سایز کوچکترین مربع یا مربع اولیه) به عنوان ورودی دریافت می کند و مقدار شاخص سینگولاریتی را به عنوان خروجی در اختیار کاربر قرار می دهد. 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 r_{min} نیز بر اساس پیکسل سایز تصاویر ماهوارهای استر در محدوده SWIR، برابر با ۳۰ پیکسل سایز تصاویر ماهوارهای استر در محدوده Ryik، برابر با ۳۰ متر تعریف شده است. شایان ذکر است که مقدار n برابر با ۲۰ در نظر پیکسل های ماتریس تصاویر، 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 می کنند. لذا در استفاده از جدایش آنومال از زمینه که اکثراً پیش فرض نرمال بودن داده ها را شامل می شوند، 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 پیکسل های تصویر و میانگین مقدار DN مختص به آن، به نظر می رسد به منظور جداسازی مقادیر آنومال از زمینه، عملکرد قابل قبولی را داشته باشد. زیرا تصاویر ماهواره ای 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 شبکه های مورد نظر رافزایش تعداد مربع ها فراهم می نمایند.

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.

قنادپور و همکاران



شکل ۸- هیستوگرام مقدار α محاسبه شده برای باندهای محدوده a .SWIR) باند ۴، b) باند ۶، c) باند ۶ (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.

Statistical characteristics of calculated α values for the SWIR eange 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	

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

Table 3.

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 حالته 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 lpha نیز در شکل ۱۰ آورده شده است.

در شکل شماره Λ مشاهده می شود 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 می شوند. 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 می شود، پیکسل های روشن مربوط به مقادیر lpha کوچکتر از ۲ به عنوان مقادیر آنومال و پیکسلهای تیره یا

شکل ۹- نقشه باینری مقادیر سینگولاریتی کوچکتر از ۲ (α <۲) منطقه ظفرقند (WGS 84 / UTM zone 39N). a) باند ۴، b) باند ۴، c) باند ۷، P) باند ۷، e) باند ۸ و f) باند ۹.

1 760

Fig. 9. Binary map of singularity values less than 2 (α < 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 (α <۲) منطقه ظفرقند (WGS 84 / UTM zone 39N). a) باند ۴، b) باند ۵، c) باند ۶، b) 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.

ترکیب رنگی کاذب

ایجاد تصاویر رنگی، یکی از روشهای پردازشی رایج در بررسیهای دورسنجی است. از آنجایی که اغلب تصاویر ماهوارهای در فرمتهای چند باندی 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 باندی سودمند و ثمربخش خواهد بود. این کار اغلب از طریق تهیه کامپوزیتهای رنگی

و به کارگیری 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. شده و تصویری رنگی نمایش داده میشود (,2010 (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 به ویژه مس پورفیری و طلای اپی ترمال می باشد. کانی های رسی، سریسیت، اپیدوت و کلسیت بازتاب بالایی در باند ۴ استر دارند. کلریت و اپیدوت به دلیل وجود Fe و -RG

OH جذب بالایی در باند ۸ (محدوده ۲/۳۵–۲/۳۵ میکرومتر) دارند (Mars et al., 2006). دگرسانی آرژیلیک با رنگ صورتی، دگرسانی پروپیلیتیک با رنگ سبز تیره و همچنین دگرسانی فیلیک با رنگ قرمز تا قهوهای مشخص می شوند (Malekshahi et al., 2019). لذا در این پژوهش از تصاویر بازسازی شده بر اساس مقادیر lpha محاسبه شده به كمك روش سينگولاريتي اقدام به ايجاد تصوير رنگي كاذب به كمك

باندهای ۴، ۶ و ۸ شده است. در واقع رنگ قرمز به تصویر بازسازی شده باند ۴ بر اساس روش سینگولارتی 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 می باشد.



شکل ۱۱– ترکیب رنگی کاذب سنجنده استر (R، R، G، R؛ ۴، ۵، 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). در تصویر حاصل شده به عنوان خروجی تکنیک ترکیب رنگی کاذب در مورد مقادیر lpha محاسبه شده به کمک روش سینگولاریتی در تهیه تصاویر ماهوارهای، رنگ سبز تا سبز روشن (متمایل به سفید) نمایانگر دگرسانی پروپیلیتیک میباشد. رنگ صورتی روشن (متمایل به سفید) نشاندهنده دگرسانی فیلیک و رنگ صورتی نیز معرف دگرسانی آرژیلیک در محدوده مطالعاتی میباشد.

> همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، مناطق امید بخش (محدوده های آنومال) مشخص شده توسط روش ادغامی از ترکیب رنگی کاذب و روش سینگولاریتی، مطابقت مطلوبی با زون های کانیزایی و دگرسانی محدوده اکتشافی ظفرقند دارند (شکل ۳).

به شکل جزئی تر می توان 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 می شود 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 نمونه برداری از مناطق شمال شرقی و جنوب غربی منطقه است.

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**

پیش پردازش دادههای ژئوشیمیایی گام مهمی در تحلیل و تفسیر صحیح نتایج به شمار می آید. این فر آیند شامل شناسایی و جایگزینی دادههای سنسورد، جایگزینی دادههای پرت و نرمال سازی دادهها برای تضمین دقت و اعتبار تحلیل ها 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 ۳/۴ 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 A ۱۲) تا مقایسه مقادیر با تفاوتهای زیاد در Hezarkhani and Ghannadpour, 2015;) اندازه آسان تر شود Ghannadpour and Hezarkhani, 2021; Armand et al., 2015; Zhou and Li, 2006). برای بهدست آوردن نمودار فرکتال عيار - مساحت و محاسبه عيار هر بلوک از درونيابيIDP (IDP Distance to a power) استفاده شد. روش درون یابی IDP یک روش درونیابی فضایی است که برای تخمین مقادیر متغیرها در مکانهای ناشناخته با استفاده از مقادیر نقاط نمونه گیری شناخته شده به کار میرود. این روش بر اساس تأثیر بیشتر نقاط نزدیک به مکان موردنظر استوار است. مراحل کلی شامل جمع آوری و پیش آوری دادهها، حذف خطاها و ناهنجارىها، تعيين شعاع جستجو و محاسبه وزنها بر اساس فاصله و پارامتر P است. با مقداردهی P به ۲، این روش به IDW تبدیل

می شود. مقدار متغیر در نقطه موردنظر با میانگین وزنی مقادیر نقاط نمونه گیری محاسبه می شود (Ruffhead, 2023). با استفاده از نرم افزار 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 ۲۱ C).

مدل عملگر فازی گاما

در این پژوهش، از عملگر فازی گاما برای تلفیق چهار لایه اطلاعاتی که شامل لایه سنگ شناسی (لیتولوژی)، لایه چگالی گسل ها، ترکیب رنگی کاذب با باندهای ASTER 468 (RGB) بر اساس مقادیر جدید (مقادیر α محاسبه شده) و لایه ژئوشیمی مس به دست آمده از DN روش فركتال عيار – مساحت، استفاده شده است. هر يك از اين لايهها 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 کانی سازی مس در محدوده مطالعاتی بیشترین امتیاز را به خود اختصاص دادهاند (شکل ۱۳–a)، در حالیکه لایه چگالی گسلها به دلیل نقش مهمی که در عبور سیالات هیدروترمال و تجمع مواد معدنی ایفا می کنند، به شناسایی مناطق مستعد کانیسازی کمک می کند (شکل 1۳ – b). ترکیب رنگی کاذب با باندهای ASTER 468 محاسبه شده) به (RGB) ابر اساس مقادیر جدید α (مقادیر α (RGB) شناسایی دگرسانیهای پروپیلیتیک و فیلیک می پردازد این در حالی است که مناطق امیدبخش (محدودههای آنومال) بهدست آمده از روش تلفیقی ترکیب رنگی کاذب و روش سینگولاریتی، بهطور مطلوبی با زونهای کانیزایی و دگرسانی در محدوده اکتشافی ظفرقند همخوانی دارند (شکل ۲۳– c) و نهایتاً، لایه ژئوشیمی مس که با استفاده از مدل فركتال عيار - مساحت تهيه شده است، توزيع غلظتهاي أنومال مس را نشان میدهد (شکل ۲۳ – 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.

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 فیلیک و پروپیلیتیک (شکل ۳) حاصل شده است. این تلفیق نشان میدهد که مناطق امیدبخش شناساییشده با استفاده از عملگر فازی

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.



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 (RGB) ASTER 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 (لایه های 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 هاله های 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).

نتيجهگيرى

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 افتصادی مورد استفاده قرار می گیرد. 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 مشابه با تحلیل دادههای سیستماتیک تبدیل کرد. نتایج حاصل از این مشابه با تحلیل دادههای سیستماتیک تبدیل کرد. نتایج حاصل از این مسالعه نشان داد که روش سینگولاریتی به دلیل ویژگیهای ساختاری ساختار رستری بسیار مؤثر است. بدین ترتیب، مقادیر (N) که توسط

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 می اشند، مانند دگرسانی های 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 اًورد. نتایج این مطالعه نشان میدهد که استفاده از ترکیب رنگی کاذب با باندهای ASTER 468 (RGB) بر اساس مقادیر جدید DN (مقادیر محاسبه شده) از طریق عملگر فازی گاما، دقت و قابلیت اطمینان در lphaشناسایی مناطق کانیسازی مس را بهطور قابل توجهی افزایش میدهد. روش منطق فازی، بهویژه عملگر فازی گاما، بهعنوان یک ابزار قدرتمند در ترکیب لایههای اطلاعاتی مختلف و برجستهسازی مناطق پتانسیل دار شناخته شده است. همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده

نهایی محدوده اکتشافی ظفرقند از ادغام خروجی عملگر فازی گاما و هالههای دگرسانی فیلیک 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، به طور قابل توجهی باعث پیشرفت روشهای سنجش از دور و استراتژیهای اکتشاف مواد معدنی شده و می تواند به عنوان یک ابزار کارآمد در برنامه ریزیهای 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).
- 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. (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 دقیق تر و جزئی تر از مناطق دگرسانی، برای پیشرفت روش های سنجش از دور و بهبود استراتژی های اکتشاف مواد معدنی بسیار مهم است. لایه های اطلاعاتی مختلفی که شامل لایه سنگ شناسی (لیتولوژی)، چگالی گسل ها، ترکیب رنگی کاذب با باندهای (ASTER 468 (RGB) مده از روش فر کتال عیار – جدید DN و لایه ژئوشیمی مس به دست آمده از روش فر کتال عیار – مساحت با استفاده از عملگر فازی گاما ترکیب شده اند. نتیجه این تلفیق در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. برای اعتبار سنجی 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

قنادپور و همکاران

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 Ustatistic 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

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-05-21]

17.

porphyry system (Iran). Geoscience Journal 20 (6), 837-850.

- Ghannadpour, S.S., Hezarkhani A., 2016b. Introducing 3D Ustatistic 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., Bahadaran, 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.
- Ostadhosseini, 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-distanceweighting 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 bauxiteassociated 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.
- 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.