



Imam Khomeini International University  
Vol. 10, No. 1, Spring 2025



نشریه مهندسی منابع معدنی  
Journal of Mineral Resources Engineering  
(JMRE)

## Research Paper

# Processing of ASTER Satellite Images Using the Fractal Concentration-Area Method

Ghannadpour S.S.<sup>1\*</sup>, Hasiri M.<sup>2</sup>, Talebiesfandarani S.<sup>3</sup>, Jalili H.<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- M.Sc Student, Dept. of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

Received: 15 Sep. 2023

Accepted: 06 Dec. 2023

**Abstract:** The Zafarghand area is located as a porphyry Cu deposit in the northeast of Isfahan and the southeast of Ardestan, which is a part of the Iran-Central structural zone; More precisely, it is located in the Urmia-Dokhtar volcanic belt. In the porphyry Cu deposits exploration, identifying and determining the alteration zones is of special importance. The aim of the present study is to identify and highlight the alteration zones of Zafarghand area, with the help of fractal geometry in the processing of ASTER sensor satellite images. Accordingly, considering the raster nature and digital form of satellite images, the digital number values of each pixel from the image matrices were considered as samples in a systematic network. Finally, the algorithm of the Concentration-Area (C-A) fractal model was implemented as an efficient method for determining anomaly samples in the set of digital number (DN) values of ASTER satellite image pixels. The alteration zones identified with the help of the aforementioned technique based on their expansion in the region represent the very effective performance of this method. So that, especially in the case of phyllic and propylitic alterations, there is a very high correspondence between the results of satellite image processing and the spread of alterations in field studies. The non-identification of potassic and argillic alterations in the obtained results is also directly related to their limited expansion in the study area. Finally, it could be acknowledged that the application of the fractal C-A method (considering its structural nature) in decision-making has been successful and has proven to be very effective in determining the alteration zones in the Zafarghand area.

**Keywords:** Fractal geometry, C-A model, Image processing, ASTER, Zafarghand.

### How to cite this article

Ghannadpour, S. S., Hasiri, M., Talebiesfandarani, S., and Jalili H. (2025). "Processing of ASTER satellite images using the fractal concentration-area method". Journal of Mineral Resources Engineering, 10(1): 1-19.

DOI: 10.30479/JMRE.2024.19329.1665

\*Corresponding Author Email: [s.ghannadpour@aut.ac.ir](mailto:s.ghannadpour@aut.ac.ir)

### COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

## INTRODUCTION

Fractal geometry is widely used to estimate thresholds and effectively separate the geochemical anomaly from the background. By analyzing the variation in their fractal dimension, anomalous patterns could be identified and distinguished. In areas where there are no anomalies in a specific geochemical variable, and only the background is present, the distributions diagram for that variable will show minimal fluctuations. Consequently, the fractal dimension will be close to 2. However, when the variable surpasses the normal range and enters the realm of anomalies, the appearance of high peaks in its variability causes an increase in the fractal dimension, proportional to the intensity of the anomaly. This allows for the differentiation between background and anomalous values by comparing the fractal dimensions of the two populations. Several studies have examined various algorithms and methods for calculating the fractal dimension. These include variogram analysis, the N-S (Number-Size) model, the C-A (Concentration-Area) model, the C-V (Concentration-Volume) model, the C-P (Concentration-Perimeter) model, the C-N (Concentration-Number) model, and the fractal model of power spectrum-area.

Given the importance of The Zafarghand exploration area, this research focuses on processing satellite images from the ASTER sensor in order to identify surface geochemical alterations in this area. Therefore, the C-A fractal model is utilized for satellite image processing, which is recognized as an effective method in separating geochemical anomalies from the background and as an effective method in decision making.

## CASE STUDY

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

## MATERIALS AND METHODS

In line with the main objective of this study and for highlighting various geological anomalies and important indicator minerals in the assessment of mineral potential in the study area, ASTER satellite images will be utilized. The ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) sensor is mounted on the Terra satellite and was launched into space in 1999.

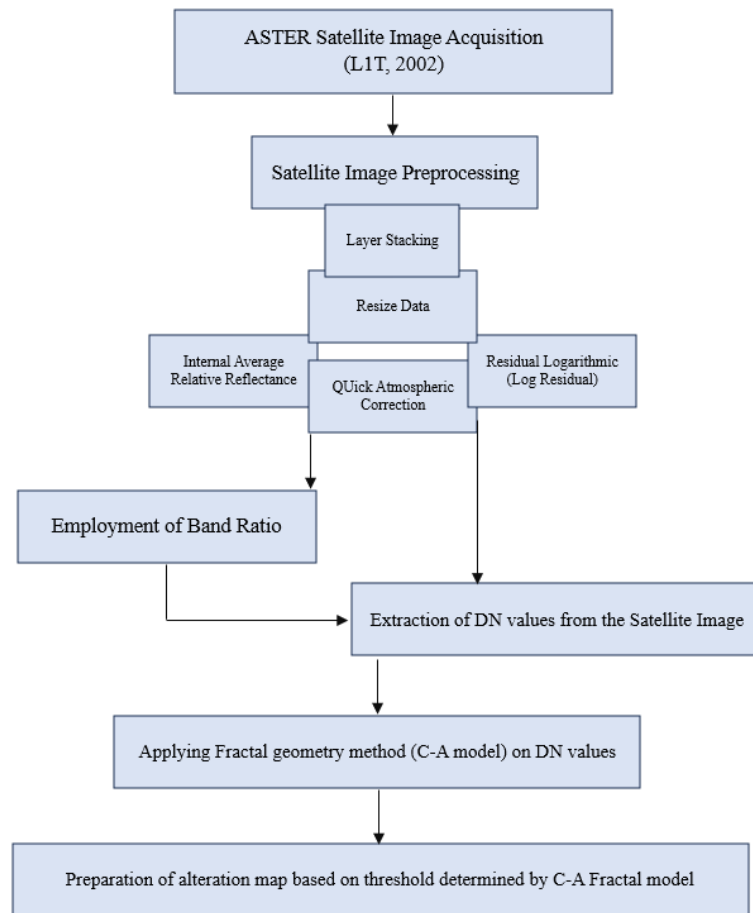
Cheng et al. (1994) proposed the C-A fractal model, which could be used to identify the geochemical anomalies from geological background [2]. The C-A method is based upon a very simple empirical set of equations, which may be used to define the geochemical background and anomalies.

After performing the necessary preprocessing on the satellite images of the ASTER and data preparation, the C-A model algorithm is applied to the brightness values of each pixel, considering their coordinates and area. Finally, for enhancing the desired features, the Band Ratio (BR) method will be employed. Figure 1 illustrates the steps of this study in the form of a flowchart.

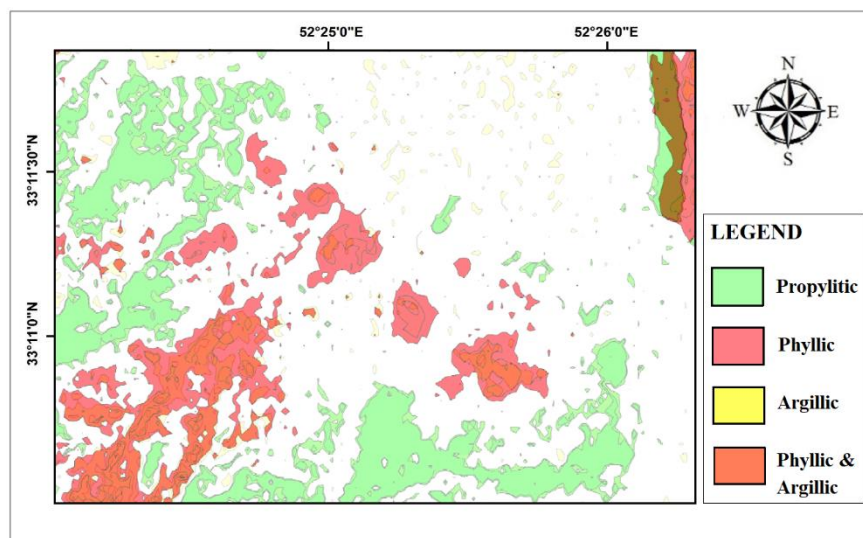
Finally, according to the accuracy observed in the obtained results, a final alteration map of Zafarghand area regarding propylitic, phyllic, and argillic alterations was prepared, which could be seen in Figure 2.

## CONCLUSION

In this study, the application of the concentration-area fractal model as a structural approach for separating anomalous values from the background was employed to process satellite images (ASTER sensor imagery) and highlight the alterations of porphyry copper in the Zafarghand exploration zone in the northeast of Isfahan province. Considering the raster and digital nature of satellite images, and consequently, the existence of a regular matrix of DN values for each image, the C-A fractal model encounters a dataset similar to systematic data (similar to geochemical data). The results showed that based on the structural nature of the C-A fractal model to separate anomalous values, using this method is very effective in processing raster-based satellite images. So that in the obtained results, it was observed that, due to the decision based on



**Figure 1.** The flowchart of various stages and the process of the task execution



**Figure 2.** The alteration map of the promising areas using by the C-A fractal model in the ASTER image processing

the structural nature of this method, the DN values determined by the C-A fractal model in the matrix set of images have a good spatial correlation with each other. It was also observed that the results of the band ratio highlighting method based on the C-A fractal model in the matrix set of images show good agreement with the propylitic and phyllic alterations in the studied area.

## REFERENCES

- [1] Alaminia, A., Bagheri, H., and 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): 295-312. (In Persian)
- [2] Cheng, Q., Agterberg, F. P., and Ballantyne, S. B. (1994). "*The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods*". Journal of Geochemical Exploration, 51: 109- 130.



## پردازش تصاویر ماهواره‌ای ASTER با مدل فرکتالی عیار - مساحت

سید سعید قنادپور<sup>۱\*</sup>، مرتضی حصیری<sup>۲</sup>، سمیه طالبی اسفندارانی<sup>۳</sup>، هادی جلیلی<sup>۳</sup>

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

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران

۳- استادیار، مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۵

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۴

### چکیده

منطقه اکتشافی ظفرقند به عنوان یک کانسار مس پورفیری در شمال شرق اصفهان و جنوب شرق اردستان واقع شده است که بخشی از زون ساختاری ایران- مرکزی به شمار می‌رود و به طور دقیق‌تر در نوار آتشفشانی ارومیه دختر قرار دارد. در اکتشاف کانسارهای مس پورفیری، شناسایی و تعیین زون‌های دگرسانی اهمیت ویژه‌ای دارد. هدف از انجام مطالعه پیش رو، شناسایی و بارزسازی زون‌های دگرسانی منطقه اکتشافی ظفرقند، به کمک هندسه فرکتال در پردازش تصاویر ماهواره‌ای سنجنده استر است. بدین منظور با توجه به ماهیت رستری و رقومی بودن تصاویر ماهواره‌ای، مقادیر دیجیتال نامبر هر پیکسل از مجموعه ماتریس تصاویر، به عنوان یک نمونه در شبکه‌ای سیستماتیک در نظر گرفته شده است. در نهایت نیز الگوریتم مدل فرکتالی عیار- مساحت به عنوان یک روش کارآمد در تعیین نمونه‌های آنومال، بر روی مجموعه مقادیر دیجیتال نامبر پیکسل تصاویر ماهواره‌ای استر پیاده شده است. زون‌های دگرسانی شناسایی شده به کمک تکنیک یاد شده بر اساس گسترش آنها در منطقه، نمایانگر عملکرد بسیار موثر این روش است. به طوری که به ویژه در مورد دگرسانی‌های فیلیک و پروپیلیتیک، مطابقت بسیار بالایی بین نتایج حاصله از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و گسترش دگرسانی‌ها در مطالعات صحرایی وجود دارد. عدم شناسایی دگرسانی‌های پتاسیک و آرژیلیک در نتایج حاصله نیز در ارتباط مستقیم با گسترش محدود آنها در منطقه مورد مطالعه است. در نهایت می‌توان اذعان داشت که به کارگیری مدل فرکتالی عیار- مساحت با توجه به ماهیت ساختاری بودن آن در تصمیم‌گیری، موفقیت‌آمیز بوده و در تعیین زون‌های دگرسانی موجود در منطقه ظفرقند بسیار موثر عمل کرده است.

### کلمات کلیدی

هندسه فرکتال، مدل C-A، پردازش تصاویر، استر (ASTER)، ظفرقند.

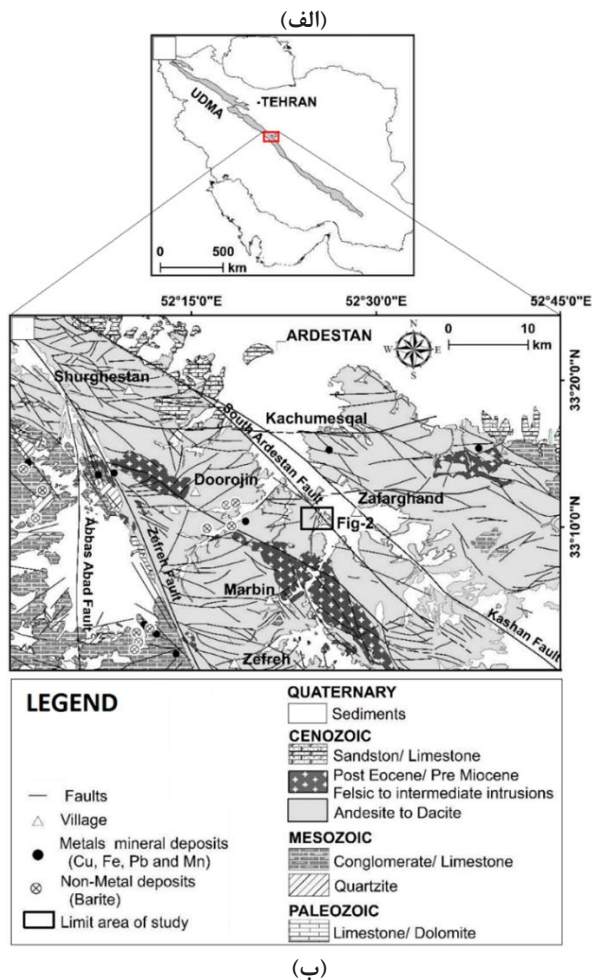
### استناد به این مقاله

قنادپور، س. س.، حصیری، م.، طالبی اسفندارانی، س.، جلیلی، ه.؛ ۱۴۰۴؛ "پردازش تصاویر ماهواره‌ای ASTER با مدل فرکتالی عیار - مساحت". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره دهم، شماره ۱، ص ۱۹-۱.

DOI: 10.30479/JMRE.2024.19329.1665



## ۱- مقدمه



شکل ۱: الف) نمایش موقعیت منطقه اکتشافی ظفرقند در بخش مرکزی کمان ارومیه- دختر (UDMA) و ب) بخشی از نقشه ساده شده زمین‌ارستان و شهراب با مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ (پس از اندکی تغییرات از [۱]) (موقعیت فرارگیری شکل ۲ نیز در این شکل نشان داده شده است).

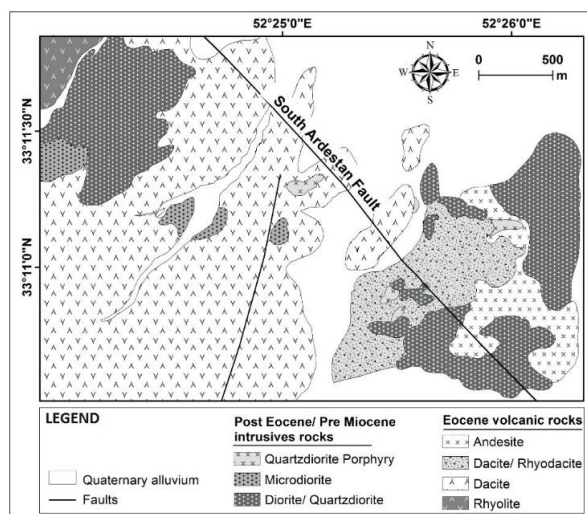
و قیده‌های ایزوتوپی و ژئوشیمیایی بر نقش اختلاط پوسته جوان و ماگما در کمان ارومیه- دختر با نگاه ویژه بر انکلاوهای میکروگرانولار مافیک و گرانیتوئیدهای ژنتیکی در مجموعه آذرین ظفرقند [۱۸] تعیین گردید. در سال ۲۰۱۷ محدوده اکتشافی ظفرقند به عنوان مطالعه موردی برای شناسایی ذخایر معدنی عمیق و کور با استفاده از روش ضرایب فرکانس پیشنهادی جدید در حوزه فرکانسی داده‌های ژئوشیمیایی در نظر گرفته شد [۱۹].

با توجه به اهمیت این کانسار و ضرورت هرچه بیشتر مطالعات تکمیلی، در این پژوهش با هدف شناسایی ناهنجاری ژئوشیمیایی سطحی در این محدوده به پردازش تصاویر

کمربند فلزایی تتیس از شرق اروپا (رومانی، اسلواکی و ترکیه) تا خاورمیانه (ایران، پاکستان و افغانستان) 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 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 ۱). در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری در مورد این منطقه انجام گرفته است که در ادامه به شرح مختصری از آنها پرداخته خواهد شد [۱].

فعالیت‌های اکتشافی اولیه در منطقه به شکل تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰,۰۰۰ برداشت نمونه‌های سنگی و برداشت مقاطع زمین فیزیکی در منطقه بوده است [۲].

پس از آن مطالعات ژئوشیمیایی و پترولوژیکی متعددی مانند [۳-۱۱] 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. سال ۱۳۹۰ پترورژنر توده گرانیتوئیدی ظفرقند توسط صادقیان و قفاری مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت [۱۲]. امین‌الرعایایی یمینی و همکاران با نگرشی بر تحولات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی منطقه به بررسی دگرسانی‌های گرمایی این کانسار پرداختند [۱۳]. مطالعات ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی و سیالات درگیر نیز در این محدوده توسط اعلامی نیا و همکاران در سال ۱۳۹۶ به انجام رسید [۱]. امین‌الرعایایی یمینی و همکاران همچنین در مطالعه دیگری به تشریح تحولات سیستم ماگمایی این کانسار با در نظر گرفتن پلاژیوکلاز به عنوان شاهد، پرداختند [۱۴]. در پژوهش دیگری ارتباط کانی‌سازی با پهنه‌های دگرسانی با ساختارهای زمین‌ساختی به وسیله مطالعات دورسنجی توسط محمدی و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۱۵]. در سال ۲۰۱۶ میلادی، کلریتی شدن بیوتیت برای بازسازی پارامترهای فیزیکوشیمیایی کانی‌سازی و دگرسانی مرتبط در سیستم مس پورفیری ظفرقند مورد تحلیل شیمی کانی‌ها و ایزوتوپ پایدار قرار گرفت [۱۶]. امین‌الرعایایی و همکاران در مطالعه دیگری به پتروگرافی، ژئوشیمی و دماسنجی دگرسانی در کانی‌سازی سینوژنیک مس در این ناحیه پرداختند [۱۷]. محدودیت‌ها



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه اکتشافی ظفرقند (پس از تغییرات از [۱۱])

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 برون زد دارند. توده نیمه نفوذی کوارتز دیوریت پورفیری در جنوب شرقی منطقه، وسعت کوچکی را می‌پوشاند (شکل ۲). در این ناحیه کانی‌سازی‌های متعددی از مس، طلا، آهن، سرب، روی و منگنز گزارش شده است. از جمله کانسارها و نشانه‌های معدنی موجود در منطقه، می‌توان به کهنک، زفره، نیسیان، کوه دورجین، کوه برونی، کچومثال، سرب و روی شورغستان و آهن جنوب باختر اردستان، اشاره کرد [۲۳، ۱].

## ۲-۱- دگرسانی و کانی‌سازی

بخش عمده‌ای از واحدهای سنگی منطقه ظفرقند تحت تاثیر محلول‌های هیدروترمال به شدت دگرسان شده و محدوده دگرسانی به وجود آمده، وسعتی حدود ۷ کیلومتر مربع را شامل می‌شود که بخشی از آن به وسیله رسوبات پوشیده شده است. نمای دوری از دگرسانی‌های منطقه در شکل ۳ قابل مشاهده است [۲۴].

زون‌های دگرسانی از مرکز سیستم پورفیری به سمت حاشیه‌ها به ترتیب شامل فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک هستند. البته در بخش‌هایی از منطقه دگرسانی پتاسیک هم مشاهده می‌شود. این دگرسانی‌ها همان‌طور که در شکل ۴ قابل مشاهده هستند، اغلب در نزدیک توده‌های نفوذی و سنگ‌های

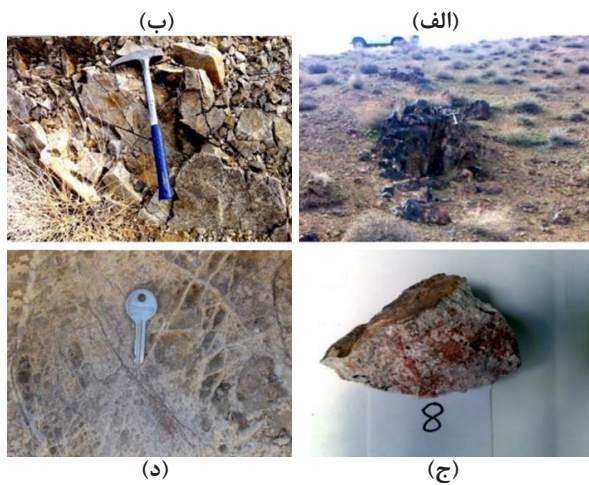
ماهواره‌ای سنجنده ASTER پرداخته خواهد شد. بنابراین برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای از مدل فرکتالی عیار- مساحت (C-A) بهره گرفته می‌شود که به عنوان روشی موثر و کارآمد در بحث جدایش ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی از زمینه با ماهیت ساختاری شناخته می‌شود. در این زمینه و به ویژه ترکیب روش‌های سنجنش از دوری و فرکتالی، مطالعات متعددی صورت گرفته است که از جمله آنها می‌توان به شناسایی دگرسانی در مناطق اکتشافی جبالبارز، تیرکا و سریزد اشاره داشت [۲۲-۲۰].

## ۲- 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 زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان با جغرافیایی  $52^{\circ}23'55''$  تا  $52^{\circ}26'30''$  طول شرقی و  $33^{\circ}10'30''$  تا  $33^{\circ}11'52''$  عرض شمالی قرار دارد (شکل ۲) [۱]. برای دستیابی به منطقه می‌توان از راه‌های آسفالت اردستان- نایین در شرق منطقه، اردستان- اصفهان در بخش میانی منطقه، ظفرقند- زفره در بخش جنوبی و اردستان- نطنز در بخش شمالی منطقه استفاده کرد. کانسار مورد مطالعه در انتها الیه بخش غربی زون ساختاری ایران مرکزی و بر روی بخش مرکزی کمان ولکانوپلوتونیسیم ارومیه- دختر واقع شده و همانند سایر ذخایر مس پورفیری ایران و جهان، منشا ماگمایی داشته است.

بر پایه بررسی‌های صحرایی و سنگ‌نگاری انجام شده در این منطقه، سنگ‌های آذرین اسیدی تا حد واسط شامل سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی متعلق به دوره زمانی ائوسن بالایی و جوانتر رخمون دارند که در ادامه به شرح واحدهای سنگی پرداخته می‌شود [۱].

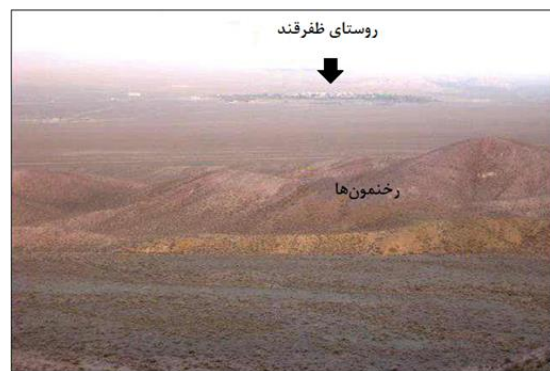
ریولیت در انتها الیه گوشه شمال غربی با رنگ خاکستری صورتی برون‌زد نسبتاً کوچکی در سطح زمین دارد (شکل ۲). بافت این سنگ‌ها پورفیری با خمیره شیشه‌ای جریان‌ی است. داسیت و ریوداسیت‌ها محدوده وسیعی از منطقه را با رنگ خاکستری تا سبز در برمی‌گیرند (شکل ۲). این واحد مهم‌ترین سنگ میزبان کانی‌سازی مس در منطقه محسوب می‌شود و بافت پورفیری با خمیره فلسیک دانه‌ریز، بی‌شکل و حفره‌ای دارد. آندزیت‌ها در جنوب غربی و غرب منطقه رخمون نسبتاً بزرگی دارند (شکل ۲) و به رنگ خاکستری تیره دیده می‌شوند



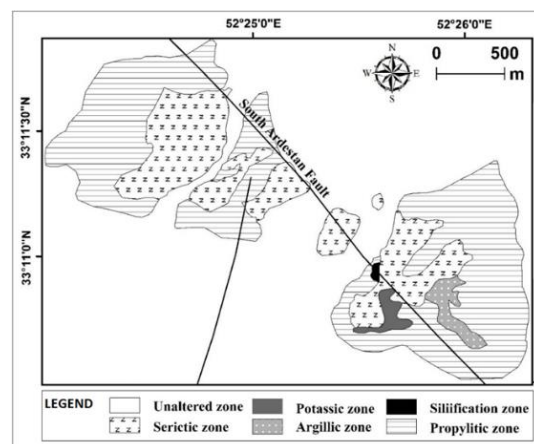
شکل ۵: تصاویر صحرایی از دگرسانی‌های منطقه مورد مطالعه؛ (الف) رگه‌های سیلیسی شامل کانی‌سازی مس در سنگ‌های گرانودیوریت با دگرسانی شدید پتاسیک (نمای دور) [۲۵]، (ب) سنگ‌های دیوریتی با دگرسانی شدید پتاسیک (نمای نزدیک) [۲۵]، (ج) نمونه‌های دستی داسیت پورفیری با دگرسانی شدید فیلیک [۲۵] و (د) استوک‌ورک‌های هماتیت-کوارتز در دگرسانی فیلیک در منطقه جنوبی ظفرقند [۲۴]

با فاصله گرفتن از فیلیک، دگرسانی‌های سیلیسی و آرژیلیکی به صورت محدود جایگزین آنها شده است و دگرسانی پروپیلیتیک در سنگ‌های محدوده بیرونی کانسار گسترش دارد (شکل ۶-الف). شکل‌های ۶-الف و ۶-ب نمایی از رخنمون دگرسانی‌های فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک را نشان می‌دهد. نمونه‌های دستی در دگرسانی آرژیلیک به رنگ سفید و عمدتاً در واحدهای داسیتی و ریوداسیتی قابل مشاهده هستند (شکل ۶-ب). در زیر میکروسکوپ سنگ‌ها شامل کائولینیت، ایلیت، کلریت، اپیدوت، کوارتز و کانی‌های کدر هستند (شکل ۶-ج). کانی‌های شاخص دگرسانی پروپیلیتیک شامل آلبیت، کوارتز، کلریت، کلسیت و اپیدوت‌اند که به رنگ سبز در واحدهای گرانودیوریت، داسیت و ریوداسیت مشاهده می‌شوند (شکل ۶-ب). پلاژیوکلازها بیشتر به کلریت و به طور بخشی به کلسیت و اپیدوت تبدیل شده‌اند، هر چند که پلاژیوکلاز سالم وجود دارد. آمفیبول به طور کامل به کلریت و اپیدوت تبدیل شده به طوری که تنها شبحی از آنها باقی مانده است. بیوتیت‌ها به کلریت و کانی‌های سولفید مس دگرسان شده‌اند (شکل ۶-د) [۱۳].

میزبان در اطراف گسل جنوب اردستان دیده می‌شود [۱]. دگرسانی پتاسیک در منطقه جنوبی ظفرقند در گرانودیوریت (شکل ۵-الف) و دیوریت‌ها (شکل ۵-ب) قرار گرفته و استوک ورک‌های کوارتز، رگه‌های سیلیسی شامل کانی‌زایی مس و مقدار کمی مالاکیت به صورت رگچه (شکل ۵-الف) در این دگرسانی قابل مشاهده است. دگرسانی فیلیک در منطقه، به وسیله شدت کوارتز-سریسیت، استوک ورک‌های وسیع کوارتزی و اکسید آهن (عمدتاً هماتیت) در داسیت‌های پورفیری (شکل ۵-ج) و کوارتز دیوریت‌ها مشخص می‌شود. در این دگرسانی برخی رگچه‌های اکسید آهن و کوارتز تا ضخامت ۲ سانتی‌متر قابل رویت است. شکل ۵-د استوک ورک‌های هماتیت-کوارتز موجود در دگرسانی فیلیک را نشان می‌دهد [۲۵، ۲۴].



شکل ۳: قسمتی از رخنمون دگرسانی‌ها در منطقه اکتشافی ظفرقند [۲۴]



شکل ۴: گسترش هاله‌های دگرسانی در محدوده اکتشافی ظفرقند (پس از تغییرات از [۱])

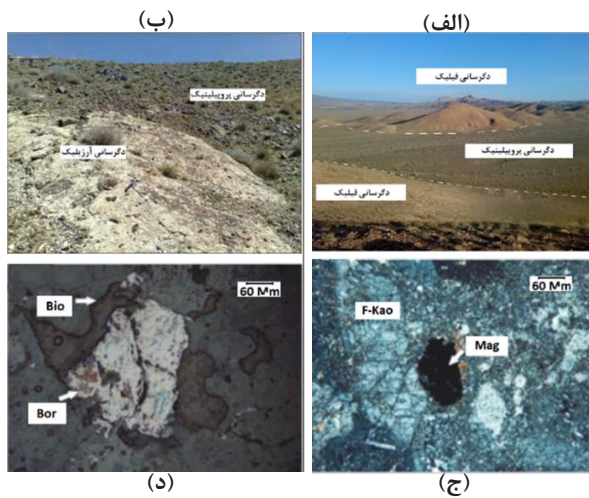


### ۳- مواد و روش‌ها

#### ۳-۱- مجموعه داده‌ها

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

سنجنده استر (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) بر روی ماهواره Terra قرار گرفته و در سال ۱۹۹۹ به فضا پرتاب شده است. داده‌های این سنجنده طبق جدول ۱ دارای ۱۴ باند است [۲۶] که سه باند در محدوده VNIR با توان تفکیک مکانی ۱۵ متر، شش باند در محدوده SWIR با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر و پنج باند در محدوده TIR با توان تفکیک مکانی ۹۰ متر قرار دارد. 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 [۲۷]. در میان باندهای مادون قرمز بازتابی آن، ۶ باند در طول موج ۱٫۵ تا ۳ میکرومتر طراحی شده است که برای کاربردهای



شکل ۶: تصاویر میکروسکوپی و صحرایی از سنگ‌های منطقه اکتشافی ظفرقند [۱۳، ۱]: (الف) رخنمون دگرسانی‌های فیلیک و پروپیلیتیک، (ب) رخنمون دگرسانی‌های آرزلیک و پروپیلیتیک، (ج) تصویر میکروسکوپی از داسیت‌های زون آرزلیک در نور پلاریزه و (د) تصویر میکروسکوپی در نور انعکاسی مربوط به تبدیل بیوتیت به سولفید مس در زون پروپیلیتیکی (F-Kao): فلدسپار تجزیه شده به کائولینیت، Mag: مگنتیت، Bio: بیوتیت و Bor: بورنیت

زمین‌شناسی (به ویژه کانی‌شناسی) بسیار کاربردی است. ۵ باند مادون قرمز حرارتی نیز برای برآورد دقیق دمای سطح زمین و اندازه‌گیری گسیل‌مندی پدیده‌های مختلف استفاده می‌شود.

جدول ۱: مشخصات عمومی سنجنده استر [۲۶]

محدوده طیف الکترومغناطیس	شماره باند	محدوده طیفی (μm)	قدرت تفکیک مکانی (m)	قدرت تفکیک رادیومتری
VNIR	۱	۰٫۵۲-۰٫۶۰	۱۵	۸ بیتی
	۲	۰٫۶۳-۰٫۶۹		
	۳ (N & B)	۰٫۷۸-۰٫۸۶		
SWIR	۴	۱٫۶۰-۱٫۷۰	۳۰	۸ بیتی
	۵	۲٫۱۴۵-۲٫۱۸۵		
	۶	۲٫۱۸۵-۲٫۲۲۵		
	۷	۲٫۲۳۵-۲٫۲۸۵		
	۸	۲٫۲۹۵-۲٫۳۶۵		
TIR	۹	۲٫۳۶۰-۲٫۴۳۰	۹۰	۱۲ بیتی
	۱۰	۸٫۱۲۵-۸٫۴۷۵		
	۱۱	۸٫۴۷۵-۸٫۸۲۵		
	۱۲	۸٫۹۲۵-۹٫۲۷۵		
	۱۳	۱۰٫۲۵-۱۰٫۹۵		
	۱۴	۱۰٫۹۵-۱۱٫۶۵		

$\rho$ : بیانگر غلظت عنصر

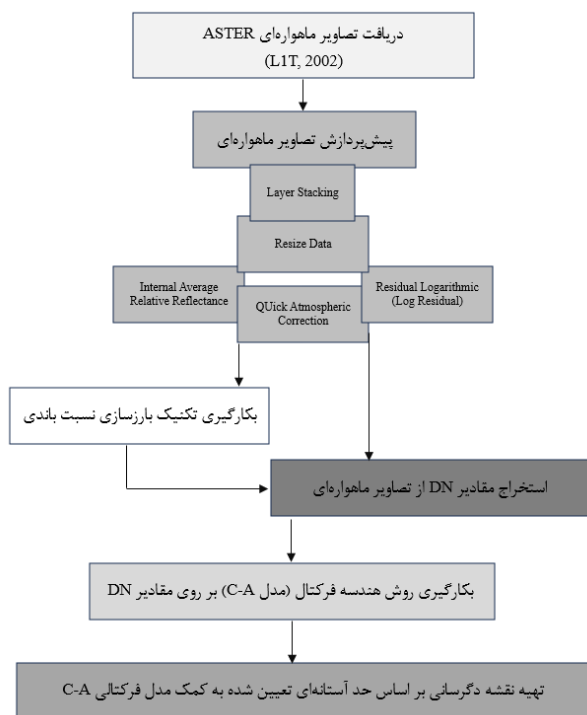
$A(\rho)$ : مساحت نواحی با غلظت  $\rho$

$v$ : مقادیر آستانه

$\alpha_1$  و  $\alpha_2$ : بعدهاهای فرکتالی هستند.

با ترسیم مساحت در برابر عیار، در نمودار تمام لگاریتمی، می‌توان بعد هر جامعه را از طریق خط برازش شده به آن محاسبه کرد [۳۹، ۳۸].

در ادامه و در بخش پردازش و نتایج، پس از انجام پیش‌پردازش‌های مورد نظر بر روی تصاویر ماهواره‌ای استر و آماده‌سازی داده‌ها، الگوریتم مدل فرکتالی C-A بر روی مقادیر روشنایی هر پیکسل با در نظر گرفتن مختصات آنها اعمال خواهد شد و در نهایت نیز برای بارسازی دگرسانی‌های مد نظر، از روش بارسازی نسبت‌باندی بهره گرفته خواهد شد. در شکل ۷ مراحل انجام این مطالعه در قالب یک فلوجارت نشان داده شده است.



شکل ۷: فلوجارت مراحل و روند انجام کار

از لحاظ رادیومتریکی، تصاویر مرئی و مادون قرمز بازتابی، به صورت ۸ بیتی و تصاویر مادون قرمز حرارتی، به صورت ۱۲ بیتی طراحی شده که امکان افزایش دقت رادیومتریکی و مکانی باندهای حرارتی آن را فراهم کرده است [۲۸]. داده‌های سنجنده استر برای شناسایی آلتراسیون‌ها، کانی‌ها و سنگ‌شناسی در مطالعات زمین‌شناسی به کار برده می‌شوند. داده‌های استر به تنهایی یا به صورت ترکیبی با سایر ماهواره‌های سنجنش از دور و داده‌های زمینی برای تولید نقشه‌های زمین‌شناسی استفاده می‌شوند [۲۹]. 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 تاکید شده است. بارزترین نمونه چنین ترکیبی در داده‌های لندست و استر دیده می‌شود.

تصاویر استفاده شده در این مطالعه؛ تصاویر LIT استر برای سال ۲۰۰۲، که علت انتخاب این تصاویر این بوده است که از سال ۲۰۰۸ میلادی، ۶ باند مادون قرمز طول موج کوتاه (SWIR) سنجنده استر به صورت کامل از کار افتاد و داده‌های آن از این سال، بدون باندهای یاد شده در سایت‌ها عرضه می‌شود.

استفاده از ۴ باند محدوده VNIR سنجنده لندست فلزات واسطه به ویژه آهن، عناصر نادرخاکی و جذب کلروفیل گیاهان مناسب است. در حالی که پوشش ۵ باندهای استر نسبت به ۲ باند پهن لندست در محدوده SWIR سبب شده است تا کانی‌های گروه هیدروکسیل، هیدرات، کربنات و مهم‌تر از همه کانی‌های شاخص زون‌های فیلیک، آرژیلیک، پروپیلیتیک از همدیگر قابل تفکیک باشند [۳۰].

### ۲-۳- مدل فرکتالی عیار- مساحت

روش فرکتالی عیار- مساحت (C-A)، یکی از مرسوم‌ترین روش‌های جدایش، برای تهیه و ترسیم نقشه‌های کنترولی هم عیار است که توسط چنگ و همکاران در سال ۱۹۹۴ معرفی شد [۳۱]. اگر مقدار هر کنتور  $\rho$  در نظر گرفته شود، یک رابطه توانی به شرح زیر ارایه می‌شود [۳۲-۳۷]:

$$A(\rho \leq v) \propto \rho^{-\alpha_1}; A(\rho \geq v) \propto \rho^{-\alpha_2} \quad (1)$$

که در آن:

## ۴- پردازش و نتایج

## ۴-۱- پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

در این قسمت قبل از اعمال روش ساختاری جدایش آنومالی از زمینه، به آماده‌سازی و پیش‌پردازش تصویر ماهواره‌ای 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 است. تصحیحات هندسی برای ژئورفرنس کردن تصویر و تصحیحات رادیومتریک شامل اعمالی برای حذف اثراتی چون عبور نور خورشید از ابر، ذرات معلق موجود در فضا، اکسیژن، نیتروژن و عناصر دیگر که ایجاد پارازیت کرده، است. به عبارت دیگر تصحیحات رادیومتریک عواملی که روی طیف‌های دریافتی تاثیر گذاشته‌اند را حذف و در تصاویر دریافتی ایجاد کنتراست می‌کند.

بر روی داده‌های مورد نظر در این مطالعه، تصحیح هندسی انجام و این داده‌ها زمین مرجع شده‌اند و تنها نیاز است که بر روی این داده‌ها تصحیح رادیومتریک انجام شود [۴۲-۴۰]. برای حذف تاثیرات مربوط به تابش خورشید، عبورپذیری جو و نیز خطای دستگاهی، تاثیرات توپوگرافی در تصاویر استر از روش باقی‌مانده لگاریتمی (Log Residual) استفاده شده است [۴۳]. 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 موثر باشد [۴۳]. برای حذف اثر جذب و پخش امواج الکترومغناطیسی از روش QUAC (QUick Atmospheric Correction) استفاده شده است. این روش یک روش تصحیح اتمسفری برای محدوده مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی است [۴۴]. 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 [۴۵].

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

پس از اعمال روش‌های یاد شده برای پیش‌پردازش تصویر استر منطقه ظفرقند، جهت آماده‌سازی تصویر مورد نظر به منظور اعمال الگوریتم مدل فرکتالی C-A، در ابتدا تصویر استر منطقه مورد نظر با مختصات ارایه در قسمت زمین‌شناسی، به اصطلاح بریده شده (Resize) و باندهای ۴ تا ۹ محدوده SWIR برای استخراج مقادیر دیجیتال نامبر (DN) مربوط به هر پیکسل انتخاب شده‌اند. انتخاب باندهای یاد شده بر اساس مطالعات صورت گرفته برای کانسارهای مس پورفیری با داده‌های استر و جهت به کارگیری آنها در تکنیک بارزسازی نسبت باندی بوده است، زیرا باندهای یاد شده با توجه به ماهیت جذب و بازتاب، از جمله مهم‌ترین باندهای تصاویر ماهواره‌ای استر برای بارزسازی دگرسانی‌های کانسار مس پورفیری محسوب می‌شوند.

خروجی ریسایز شده باند شماره ۹ به عنوان یک نمونه در شکل ۸ 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 مدل فرکتالی C-A و نمایش هرچه بهتر تاثیر این روش‌ها بر روی داده (مقادیر DN هر پیکسل) است.



شکل ۸: تصویر ریسایز شده سنجنده ASTER برای محدوده SWIR در منطقه ظفرقند (باند ۹)

دگرسانی‌ها را بارز ساخت.

در این روش، بانندی که میزان انعکاس آن از هدف مورد نظر بیشتر باشد در صورت کسر و بانندی که میزان جذب برای همان هدف در آن بالاتر باشد در مخرج کسر قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه کانی‌های شاخص زون حاوی دگرسانی آرژیلیک دارای جذب حداکثری در باندهای ۵ و ۶ و انعکاس در باندهای

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 ۹ قابل مشاهده است.

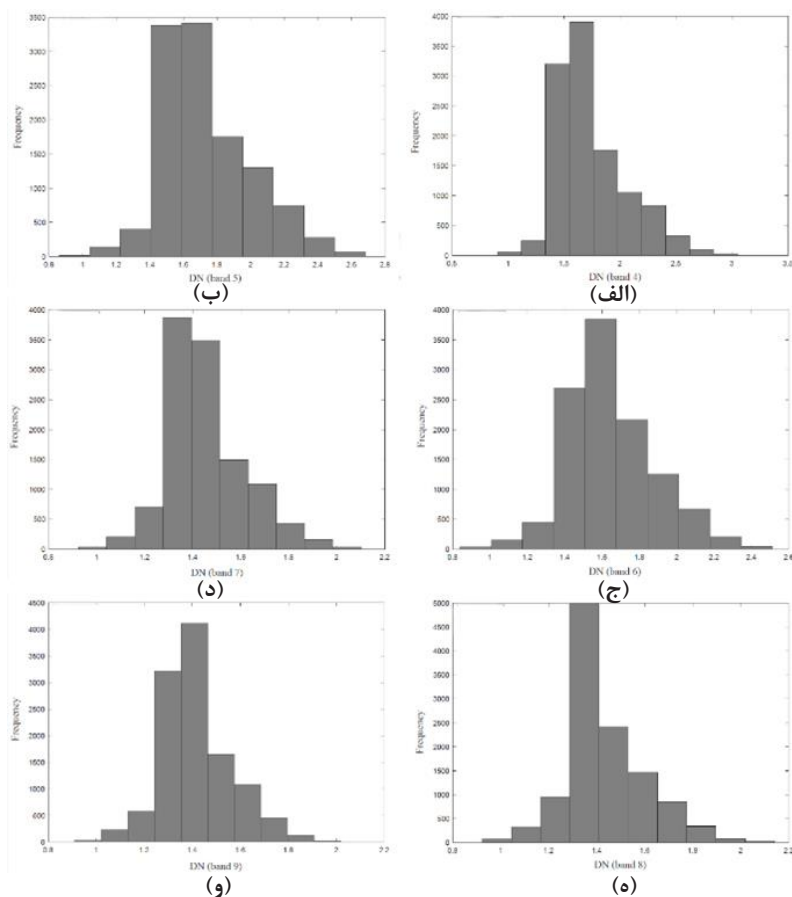
همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، مقادیر DN از توزیع نرمال پیروی می‌کنند، بنابراین در استفاده از روش‌های جدایش آنومال از زمینه که اکثراً پیش‌فرض نرمال بودن داده‌ها را شامل می‌شوند، محدودیتی وجود ندارد.

#### ۳-۴- تکنیک بارزسازی نسبت بانندی

روش نسبت بانندی یکی از تکنیک‌های رایج در پردازش تصاویر ماهواره‌ای است. از روش نسبت‌گیری باندها می‌توان برای بارزسازی اختلاف طیفی بین باندها استفاده کرد و همچنین اثرات سایه و اختلاف روشنایی زمین ناشی از توپوگرافی را از بین برد [۴۶]. با شناخت خواص انعکاسی پدیده‌ها از روی نمودار طیفی آنها، می‌توان به کمک روش یاد شده، پدیده‌های مختلفی همچون مرز واحدهای سنگی و

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

شماره	باند	میانگین	واریانس	انحراف معیار
۱	۴	۱,۷۱۹۳	۰,۰۹۸۸	۰,۳۱۴۳
۲	۵	۱,۷۱۶۴	۰,۰۷۰۸	۰,۲۶۶۰
۳	۶	۱,۶۳۷۸	۰,۰۵۵۱	۰,۲۳۴۸
۴	۷	۱,۴۴۵۴	۰,۰۲۵۶	۰,۱۶۰۱
۵	۸	۱,۴۳۱۴	۰,۰۲۷۹	۰,۱۶۷۱
۶	۹	۱,۴۱۲۶	۰,۰۲۱۹	۰,۱۴۸۱

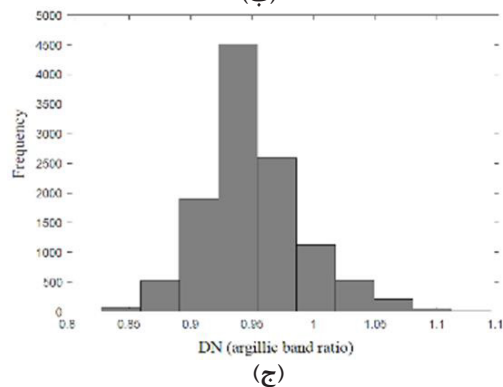
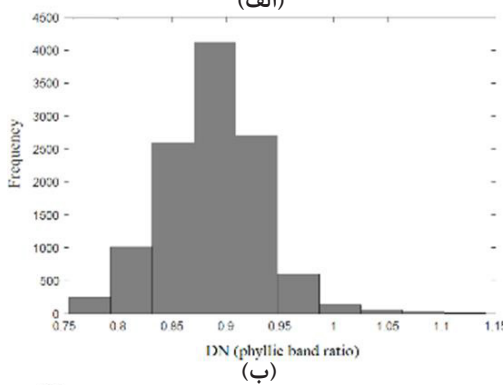
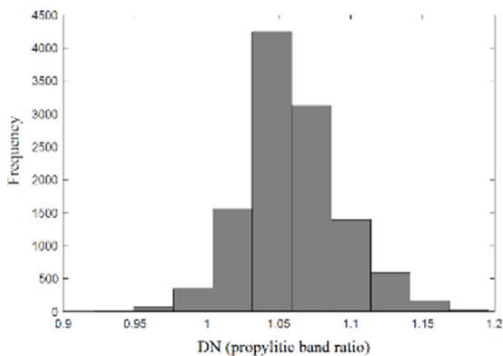


شکل ۹: هیستوگرام مقدار DN محاسبه شده برای محدوده SWIR

و روش‌های ساختاری با در نظر گرفتن موقعیت نمونه‌ها در شبکه‌های سیستماتیک، عملکرد قابل قبول‌تری را ارائه می‌دهند [۵۴-۵۶].

جدول ۴: مشخصات آماری مقادیر DN مربوط به نسبت باندهای جدول ۳

شماره	نوع دگرسانی	میانگین	واریانس	انحراف معیار
۱	پروپیلیتیک	۱٫۰۵۹۴	۰٫۰۰۱۱	۰٫۰۳۳۳
۲	فیلیک	۰٫۸۸۷۴	۰٫۰۰۲۱	۰٫۰۴۵۷
۳	آرژیلیک	۰٫۹۵۰۸	۰٫۰۰۱۶	۰٫۰۴۰۵



شکل ۱۰: هیستوگرام مقدار DN محاسبه شده برای نسبت‌های باندهای گزارش شده در جدول ۳

۴ و ۷ است، بنابراین از نسبت باندهای آرژیلیک استفاده کرده‌ایم. برای بارزسازی زون‌های حاوی دگرسانی فیلیک، با توجه به جذب حداکثری در باند ۶ و انعکاس حداکثری در باند ۷، جهت آشکارسازی فیلیک استفاده شد. در همین راستا، برای آشکارسازی زون‌های حاوی دگرسانی پروپیلیتیک نیز با توجه به ویژگی‌های جذبی شاخص در باندهای ۶ و ۹ و همچنین انعکاس شاخص در باندهای ۷ و ۸ از رابطه پروپیلیتیک بهره گرفته شد [۴۷-۵۰].

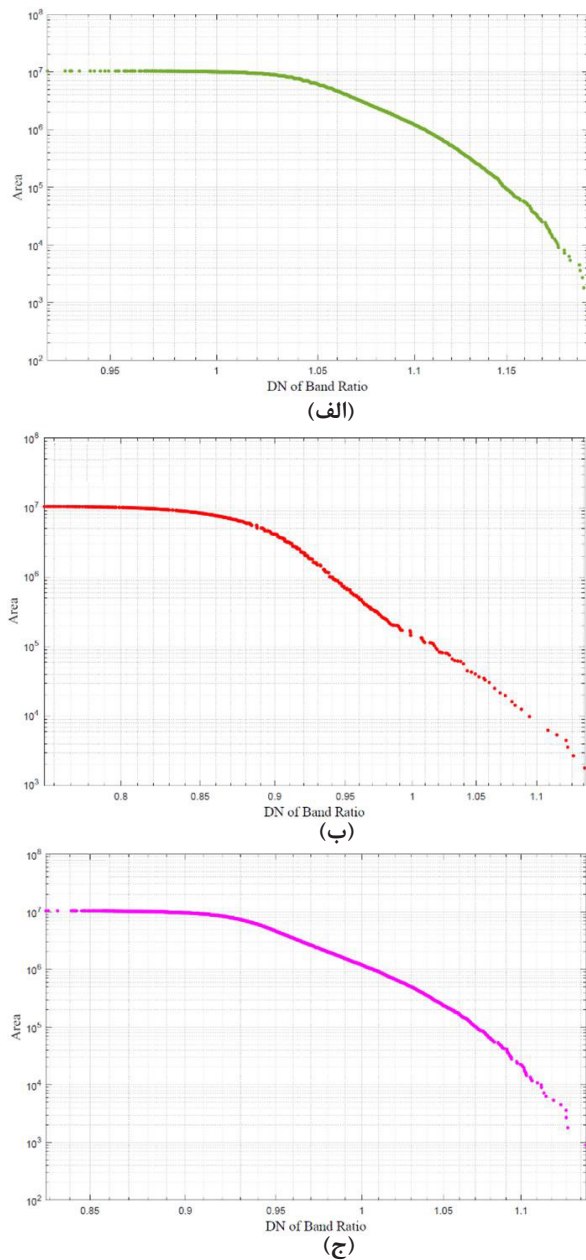
شایان ذکر است ترکیب نسبت باندهای انتخابی یاد شده بر اساس نسبت‌های گزارش شده در جدول ۳ برای تعیین دگرسانی‌های مربوط به کانی‌سازی هیدروترمال با نگاه ویژه به کانسارهای مس پورفیری، به کار گرفته خواهد شد [۵۱-۵۳]. مشخصات اولیه آماری نسبت‌های باندهای یاد شده به همراه نمودار فراوانی آنها به ترتیب در جدول ۴ و شکل ۱۰ قابل مشاهده هستند.

در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که توزیع مقادیر دیجیتال نامبر مربوط به نسبت باندهای مربوط به بارزسازی دگرسانی‌های کانی‌زایی منطقه مورد مطالعه نیز از توزیع نرمال پیروی می‌کنند و نیازی به نرمال‌سازی داده نیست، بنابراین می‌توان در مرحله بعد با کمک مدل فرکتالی عیار- مساحت به تشخیص حدود آستانه‌ای پرداخت.

انتخاب مدل فرکتالی عیار- مساحت با توجه به مساحت هر پیکسل 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، مساحت مورد نظر و دیجیتال نامبر مختص به آن مساحت (پیکسل) مورد نظر را برای مدل فرکتالی عیار- مساحت به عنوان یک روش جدایش ساختاری فراهم می‌کنند

جدول ۳: نسبت‌های باندهای مورد استفاده برای تعیین دگرسانی‌ها (مس پورفیری)

شماره	نوع دگرسانی	نسبت باندهای
۱	پروپیلیتیک	$\frac{\text{باند 9} + \text{باند 6}}{\text{باند 7} + \text{باند 8}}$
۲	فیلیک	$\frac{\text{باند 7}}{\text{باند 6}}$
۳	آرژیلیک	$\frac{\text{باند 4} + \text{باند 7}}{\text{باند 5} + \text{باند 6}}$



شکل ۱۱: مدل فرکتالی عیار- مساحت برای مقادیر DN محدوده SWIR؛ (الف) نسبت بانندی پروپیلیتیک، (ب) نسبت بانندی فیلیک و (ج) نسبت بانندی آرژیلیک

#### ۴-۴- به کارگیری الگوریتم مدل فرکتالی C-A بر مقادیر DN

در این قسمت برای به کارگیری مدل فرکتالی C-A، مقادیر دیجیتالی نامبر نسبت‌های بانندی معرفی شده در قسمت قبل، از محدوده SWIR منطقه اکتشافی ظفرقند به عنوان ورودی در اختیار الگوریتم مدل فرکتالی عیار- مساحت قرار می‌گیرد و در نهایت نمودار تمام لگاریتمی مقادیر غلظت (مقادیر DN تصاویر ماهواره‌ای) نسبت به مساحت مربوط به هر پیکسل (مساحت ۹۰۰ مترمربع که حاوی مقادیر DN هستند) رسم خواهد شد (شکل ۱۱).

با نگاهی دقیق‌تر و فنی‌تر به این نمودارها که بیانگر مدل فرکتالی عیار-مساحت هستند، می‌توان برای هر یک از مدل‌های مربوط به مقادیر DN هر نسبت، سه نقطه شکست و در حقیقت چهار جامعه متفاوت در نظر گرفت (شکل ۱۲). مشخصات مربوط به جوامع یاد شده نیز در جدول ۵ نشان داده شده است.

در نهایت نیز به کمک نرم‌افزار Surfer تصاویر مناطق امیدبخش منطقه ظفرقند بر اساس حدود آستانه‌ای تعیین شده به وسیله روش فرکتال عیار- مساحت، رسم شده‌اند (شکل ۱۳).

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، مناطق امیدبخش (محدوده‌های آنومال) مشخص شده با تعیین حدود آستانه‌ای (گزارش شده در جدول ۵) در روش فرکتالی عیار- مساحت برای نسبت بانندی بانندی‌های مربوط به دگرسانی‌های پروپیلیتیک، فیلیک و آرژیلیک، مطابقت مطلوبی با زون‌های کانی‌زایی و دگرسانی محدوده اکتشافی ظفرقند دارند (شکل ۴). به شکل جزئی‌تر می‌توان اذعان داشت که مناطق امیدبخش در شکل ۱۳-الف که مربوط به نسبت بانندی مرتبط با دگرسانی پروپیلیتیک است، مطابقت بسیار مناسبی را با دگرسانی‌های پروپیلیتیک نشان داده شده در شکل ۴ دارند. همچنین قابل ذکر است که مناطق هایلایت شده در شکل ۱۳-ب به عنوان

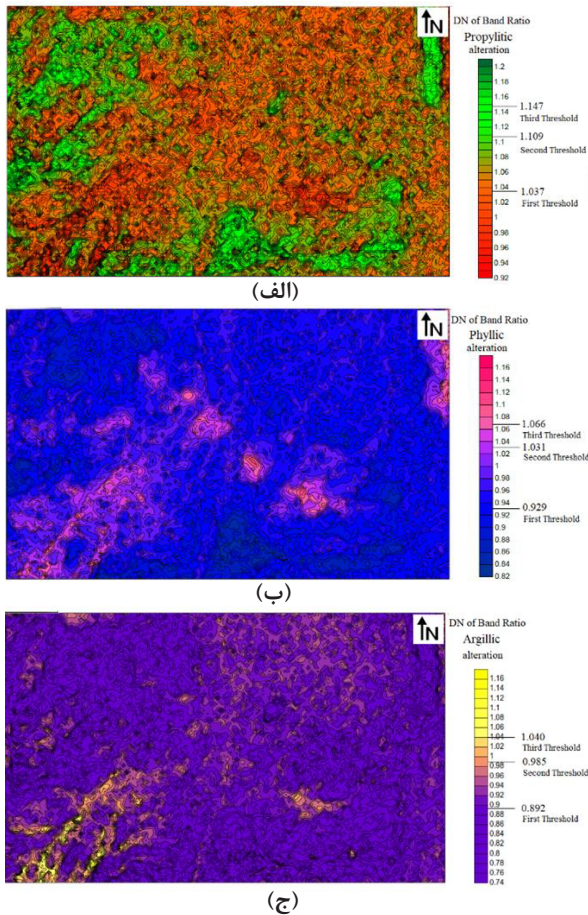
جدول ۵: بازه‌های DN مربوط به جوامع تفکیک شده مرتبط به دگرسانی‌های پروپیلیتیک، فیلیک و آرژیلیک

جامعه	دگرسانی پروپیلیتیک	بعد فرکتال (پروپیلیتیک)	دگرسانی فیلیک	بعد فرکتال (فیلیک)	دگرسانی آرژیلیک	بعد فرکتال (آرژیلیک)
۱	< ۱,۰۳۷	۰,۰۱۱	< ۰,۸۹۲	۰,۰۱۸	< ۰,۹۲۹	۰,۰۱۴
۲	۱,۰۳۷-۱,۱۰۹	۰,۱۴۸	۰,۸۹۲-۰,۹۸۵	۰,۵۵۵	۰,۹۲۹-۱,۰۳۱	۰,۳۳۳
۳	۱,۱۰۹-۱,۱۴۷	۰,۵۴۱	۰,۹۸۵-۱,۰۴	۰,۶۴۱	۱,۰۳۱-۱,۰۶۶	۰,۷۹۷
۴	۱,۱۴۷-۱,۱۹۶	۱,۴۲۲	۱,۰۴-۱,۱۴۱	۱,۴۴	۱,۰۶۶-۱,۱۴۴	۱,۱۹۹

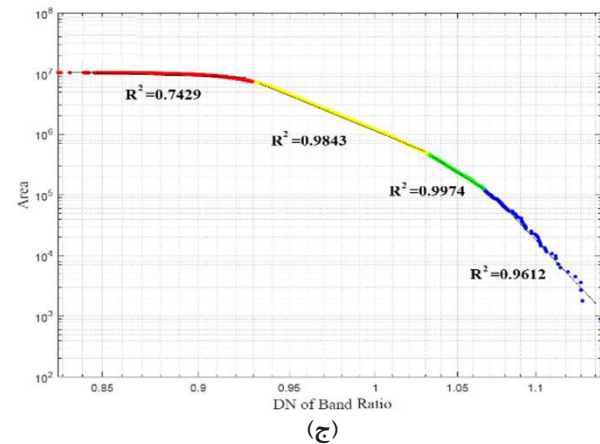
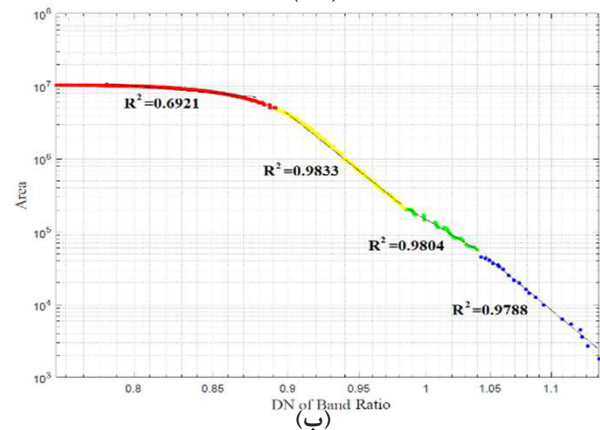
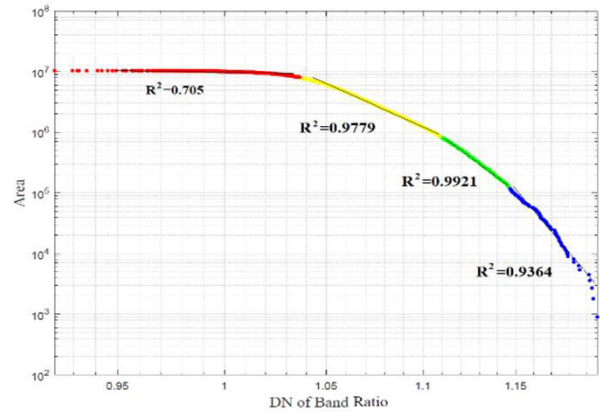
شکل ۴ تهیه شده و در شکل ۱۴ قابل مشاهده است (به ترتیب شکل‌های ۱۴-الف و ۱۴-ب).

البته شایان ذکر است که مقادیر DN مشخص شده در شمال شرقی و جنوب غربی تصاویر در شکل‌های ۱۳-الف و ۱۳-ب و عدم تطابق آنها با شکل ۴، ناشی از عدم نمونه‌برداری از مناطق شمال شرقی و جنوب غربی منطقه است، بنابراین با توجه به تهیه نقشه دگرسانی منطقه (شکل ۴) بر اساس نمونه‌برداری صورت گرفته، این عدم تطابق، منطقی به نظر می‌رسد. همچنین قابل ذکر است که عدم وجود مقادیر روشن در شکل ۱۳-ج به دلیل وسعت بسیار محدود دگرسانی آرژیلیک در منطقه اکتشافی ظرفرند است (همان‌طور که با نگاهی به شکل ۴ نیز این موضوع تایید می‌گردد). در نهایت نیز بر اساس دقت مشاهده شده در نتایج حاصله،

مقادیر DN مربوط به نسبت باندهی آلتراسیون فیلیک، ارتباط بسیار مناسبی با دگرسانی‌های سریسیتیکی مشخص شده در شکل ۴ دارند. برای درک هرچه بیشتر این موضوع، تصویر نهایی حاصل از دگرسانی‌های پروپیلیتیک و فیلیک (شکل‌های ۱۳-الف و ۱۳-ب) به صورت همپوشانی با نقشه دگرسانی



شکل ۱۴: تصویر مناطق امیدبخش محدوده ظرفرند به کمک روش فرکتال C-A؛ (الف) نسبت باندهی پروپیلیتیک، (ب) نسبت باندهی فیلیک و (ج) نسبت باندهی آرژیلیک



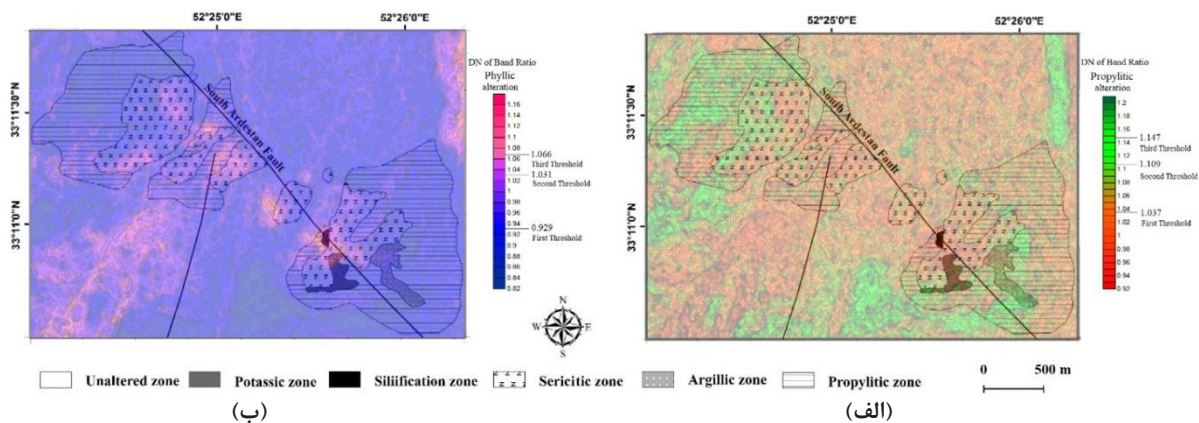
شکل ۱۵: برازش خطوط به مدل فرکتالی C-A برای نمایش جوامع ژئوشیمیایی؛ (الف) نسبت باندهی پروپیلیتیک، (ب) نسبت باندهی فیلیک و (ج) نسبت باندهی آرژیلیک

در واقع با یک مجموعه داده مشابه با داده‌های سیستماتیک روبه‌رو شدیم. نتایج حاصله نشان داد که بر اساس ماهیت ساختاری مدل فرکتالی C-A جهت جداسازی مقادیر آنومال، به کارگیری این روش در پردازش تصاویر ماهواره‌ای که دارای ماهیت رستری هستند، بسیار موثر واقع شده است. به طوری که در نتایج حاصله مشاهده گردید مقادیر DN مشخص شده به وسیله مدل فرکتالی C-A، در مجموعه ماتریس تصاویر به واسطه تصمیم‌گیری بر اساس ماهیت ساختاری این روش، از نظر مکانی همبستگی مناسبی را با یکدیگر دارند. همچنین مشاهده شد که نتایج روش بارزسازی نسبت بانندی بر پایه مدل فرکتالی C-A در مجموعه ماتریس تصاویر، با دگرسانی‌های منطقه مورد مطالعه به ویژه دگرسانی‌های پروپلیتیک و فیلیک مطابقت بسیار خوبی را نشان می‌دهد.

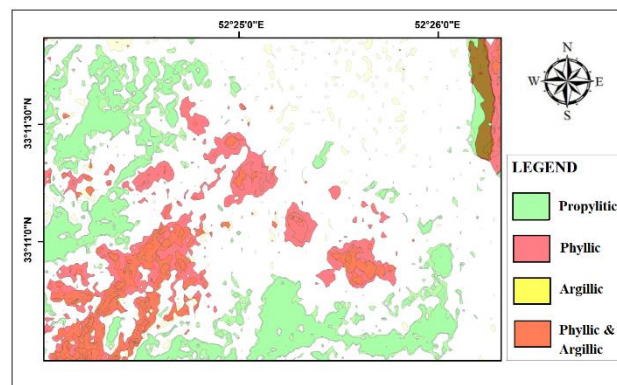
یک نقشه دگرسانی نهایی از مناطق امیدبخش منطقه ظفرقند در مورد دگرسانی‌های پروپلیتیک، فیلیک و آرژیلیک تهیه شده و در شکل ۱۵ قابل مشاهده است.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با به کارگیری روش هندسه فرکتال بر مبنای مدل فرکتالی C-A به عنوان یک روش ساختاری جدایش مقادیر آنومال از زمینه (در مورد داده‌های ژئوشیمیایی)، برای اولین بار به منظور پردازش تصاویر ماهواره‌ای (تصویر سنجنده استر) به بارزسازی دگرسانی مس پورفیری در منطقه اکتشافی ظفرقند در شمال شرق استان اصفهان پرداخته شد. با توجه به ماهیت رستری و رقومی تصاویر ماهواره‌ای و به تبع، وجود یک ماتریس منظم از مقادیر DN برای هر تصویر،



شکل ۱۴: نقشه مناطق امیدبخش تعیین شده به کمک روش فرکتال C-A و منطبق بر نقشه دگرسانی محدوده ظفرقند؛ الف) نسبت بانندی پروپلیتیک و ب) نسبت بانندی فیلیک



شکل ۱۵: نقشه مناطق امیدبخش تعیین شده به کمک مدل فرکتالی C-A در پردازش تصاویر سنجنده استر



## ۶- مراجع

- [۱۳] امین الرعايایی يمینی، م.، طوطی، ف.، احمدیان، ج.؛ ۱۳۹۵؛ "دگرسانی گرمابی کانسار مس پورفیری جنوب غرب ظفرقند با نگرشی بر تحولات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی منطقه". پژوهش‌های دانش زمین، دوره هفتم، شماره ۲۵، ص ۹۰-۷۵.
- [۱۴] امین الرعايایی يمینی، م.، طوطی، ف.، امین الرعايایی يمینی، م. ر.، احمدیان، ج.؛ ۱۳۹۷؛ "پلاژیوکلاز به عنوان شاهدی از تحولات سیستم ماگمایی کانسار مس پورفیری ظفرقند، شمال شرق اصفهان". زمین‌شناسی اقتصادی، دوره دهم، شماره ۱، ص ۷۶-۶۱.
- [۱۵] محمدی، س.، ندیمی، ع. ر.، اعلمی نیا، ز.؛ ۱۳۹۷؛ "بررسی ارتباط کانی‌سازی و پهنه‌های دگرسانی با ساختارهای زمین‌ساختی با کمک مطالعات دورسنجی در منطقه جنوب اردستان (شمال شرق اصفهان)". زمین‌ساخت، دوره هفتم، ص ۴۷-۲۹.
- [16] Aminroayaei Yamini, M., Tutti, F., Aminroayaei Yamini, M. R., Ahmadian, J., and Wan, B. (2017). "Examination of chloritization of biotite as a tool for reconstructing the physicochemical parameters of mineralization and associated alteration in the Zafarghand porphyry copper system, Ardestan, Central Iran: mineral-chemistry and stable isotope analyses". *Mineralogy and Petrology*, 111: 747-759.
- [17] Aminroayaei Yamini, M., Tutti, F., Haschke, M., Ahmadian, J., and Murata, M. (2022). "Synorogenic copper mineralization during the Alpine-Himalayan orogeny in the Zafarghand copper exploration district, Central Iran: petrography, geochemistry and alteration thermometry". *Geological Journal*, 25(2): 263-281.
- [18] Sarjoughian, F., Lentz, D., Kananian, A., Ao, S., and Xiao, W. (2018). "Geochemical and isotopic constraints on the role of juvenile crust and magma mixing in the UDMA magmatism, Iran: evidence from mafic microgranular enclaves and cogenetic granitoids in the Zafarghand igneous complex". *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*, 107: 1127-1151.
- [19] Shahi, H., Ghavami, R., and 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.
- [20] Fakhari, S., Jafarirad, A., Afzal, P., and 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: 80-92.
- [21] Behbahani, B., Harati, H., Afzal, P., and Lotfi, M. (2023). "Determination of alteration zones applying fractal modeling and Spectral Feature Fitting (SFF) method in
- [۱] اعلمی نیا، ز.، باقری، ه.، صالحی، م.؛ ۱۳۹۶؛ "بررسی‌های زمین‌شیمیایی، زمین‌فیزیکی و مطالعات سیالات درگیر در محدوده اکتشافی ظفرقند (شمال خاور استان اصفهان، ایران)". زمین‌شناسی اقتصادی، دوره نهم، شماره ۲، ص ۳۱۲-۲۹۵.
- [2] ANJC (Alamut Naghsh-e-Jahan Company), (2011). "Initial exploration report of Zafarghand copper index, Isfahan, Iran". pp. 270. (In Persian)
- [۳] خلعتبری جعفری، م.؛ ۱۳۷۱؛ "پلوتونیسیم ترشیری منطقه اردستان". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
- [۴] محمدی، س.؛ ۱۳۷۴؛ "بررسی ولکانیسم ترشیری منطقه اردستان (ایران مرکزی)". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
- [۵] لطیفی، ر.؛ ۱۳۷۹؛ "بررسی زمین‌شناسی و پترولوژی و ژئوشیمی توده‌های نفوذی جنوب و شمال غرب ظفرقند". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.
- [۶] بهرامیان، ص.؛ ۱۳۸۶؛ "مطالعه پترولوژیکی و ژئوشیمیایی توده نفوذی بغم، شمال شرق اصفهان". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم طبیعی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تبریز، آذربایجان شرقی، ایران.
- [۷] نصر اصفهانی، ع.، وهابی مقدم، ب.؛ ۱۳۸۹؛ "موقعیت تکتونیکی و ماگمایی رخنمون‌های فلسیک الگوسن در جنوب اردستان (شمال شرق اصفهان)". پترولوژی، دانشگاه اصفهان، دوره اول، شماره ۲، ص ۱۰۸-۹۵.
- [۸] هنرمند، م.، مؤید، م.، جهانگیری، ا.، بهادران، ن.؛ ۱۳۸۹؛ "بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی مجموعه نفوذی نطنز شمال اصفهان". پترولوژی، دوره اول، شماره ۳، ص ۸۸-۶۵.
- [۹] جباری، ع.، قربانی، م.، کوپکه، ی.، ترابی، ق.، شیردشت زاده، ن.؛ ۱۳۸۹؛ "پتروگرافی و شیمی کانی‌های دایک‌های غرب برونی (جنوب شرق اردستان، ایران): شواهدی از اختلاط ماگمایی". پترولوژی، دوره اول، شماره ۲، ص ۳۰-۱۷.
- [۱۰] یگانه فر، ه.، قربانی، م. ر.؛ ۱۳۸۹؛ "ژئوشیمی و پتروژنز سنگ‌های بازیک جنوب اردستان". بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران.
- [11] Ghannadpour, S. S., Hasiri, M., Jalili, H., and Talebiesfandarani, S. (2024). "Satellite Image Processing: Application for Alteration Separation based on U-Statistic Method in Zafarghand Porphyry System (Iran)". *Journal of Mining and Environment*, 15(2): 667-681. DOI: 10.22044/jme.2023.13652.2525.
- [۱۲] صادقیان، م.، قفاری، م.؛ ۱۳۹۰؛ "پتروژنز توده گرانیتویدی ظفرقند

- Geochemical Exploration, 51: 109- 130.
- [32] Afzal, P., Ahmadi, K., and Rahbar, K. (2017). "Application of fractal-wavelet analysis for separation of geochemical anomalies". African Journal of Earth Science, 128: 27-36.
- [33] Ahmadfaraj, M., Mirmohammadi, M., and Afzal, P. (2016). "Application of fractal modeling and PCA method for hydrothermal alteration mapping in the Saveh area (Central Iran) based on ASTER multispectral data". International Journal of Mining and Geo-Engineering, 50(1): 37-48.
- [34] Hassanpour, S., and Afzal, P. (2013). "Application of concentration-number (C-N) multifractal modeling for geochemical anomaly separation in Haftcheshmeh porphyry system, NW Iran". Arabian Journal of Geosciences, 6: 957-970.
- [35] Nazarpour, A., Omran, N. R., and Paydar, G. R. (2015). "Application of multifractal models to identify geochemical anomalies in Zarshuran Au deposit, NW Iran". Arabian Journal of Geosciences, 8: 877-889.
- [36] Momeni, S., Shahrokhi, S. V., Afzal, P., Sadeghi, B., Farhadinejad, T., and Nikzad, M. R. (2016). "Delineation of the Cr mineralization based on the stream sediment data utilizing fractal modeling and factor analysis in the Khoy 1:100,000 sheet, NW Iran". Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 152: 1-17.
- [37] Mandelbrot, B. B. (1983). "The fractal geometry of nature". W.H. Freeman and Company, San Francisco, New York, pp. 468.
- [38] Li, C., Ma, T., and Shi, J. (2003). "Application of a fractal method relating concentrations and distances for separation of geochemical anomalies from background". Journal of Geochemical Exploration, 77: 167-175.
- [39] هزارخانی، ا.، شکوه سلجوقی، ب.؛ ۱۳۹۵؛ "مدل‌سازی فرکتال و چندفرکتال داده‌های ژئوشیمیایی". انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، تهران.
- [40] Beiranvand Pour, A., and 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.
- [41] Oleson, R., and 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.
- [42] Abubakar, A. J., Hashim, M., and Beiranvand Pour, A. (2019). "Remote Sensing satellite imagery for Saryazd porphyry copper system, central Iran". Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 172: 1-14. DOI: 10.19111/bulletinofmre.1264604.
- [22] زمیاد، م.، افضل، پ.، پورکرمانی، م.، نوری، ر.، جعفری، م. ر.، ۱۴۰۰؛ "ترکیب روش‌های دورسنجی و فرکتالی جهت شناسایی دگرسانی‌ها در محدوده تیرکا، شمال شرقی ایران". فصلنامه علمی علوم زمین، دوره ۳۱، شماره ۱۲۲، ص ۶۸-۵۷.
- [23] Aliyari, F., Afzal, P., Harati, H., and Zenggian, H. (2020). "Geology, mineralogy, ore fluid characteristics, and  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  geochronology of the Kahang Cu-(Mo) porphyry deposit, Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc, Central Iran". Ore Geology Reviews, 116(2): 103238.
- [24] شاهی، ح.؛ ۱۳۹۴؛ "تعیین شاخص‌های جدید اکتشافی با استفاده از حوزه فرکانس داده‌های ژئوشیمیایی و مقایسه نتایج آن با نتایج حوزه مکان". رساله دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [25] Salehi, T., and Tangestani, M. H. (2020). "Evaluation of WorldView-3 VNIR and SWIR Data for Hydrothermal Alteration Mapping for Mineral Exploration: Case Study from Northeastern Isfahan, Iran". Natural Resources Research, 29: 3479-3503.
- [26] Biranvandpour, A., and Hashim, M. (2014). "ASTER, ALI and Hyperion sensors data for lithological mapping and ore minerals exploration". Springer Plus, 3: 130.
- [27] Li, Q., Zhang, B., Lu, L., and Lin, Q. (2014). "Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in Baogutu porphyry deposit, China, in: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing". IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 17: 012174.
- [28] Goetz, A. F. H., Billingsley, F. C., Gillespie, A. R., Abrams, M. J., Squires, R. L., Shoemaker, E. M., Lucchitta, I., and Elston, D. P. (1975). "Applications of ERTS and Image Processing to Regional Problems and Geologic Mapping in Northern Arizona". NASA/JPL Technical Reports 32-1597, NASA: Pasadena, CA, USA.
- [29] Ramachandran, R., Justice, C. O., and Abrams, M. J. (2011). "The practice of international policies in the ASTER collaboration, In Land Remote Sensing and Global Environmental Change". Eds., Springer: New York, NY, USA, Chapter 4, 483-508.
- [30] هنرمند، م.؛ ۱۳۹۰؛ "مدلسازی پتانسیل معدنی در کمربند فلزایی مس کرمان با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی". دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- [31] Cheng, Q., Agterberg, F. P., and Ballantyne, S. B. (1994). "The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods". Journal of

- [50] Vicente, L. E., and de Souza Filho, C. R. (2011). "Identification of mineral components in tropical soils using reflectance spectroscopy and advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data". *Remote Sensing of Environment*, 115(8): 1824-1836.
- [51] El-Qassas, R. A. Y., Abu-Donia, A. M., and Omar, A. E. A. (2023). "Delineation of hydrothermal alteration zones associated with mineral deposits, using remote sensing and airborne geophysics data. A case study: El-Bakriya area, Central Eastern Desert, Egypt". *Acta Geodaetica et Geophysica*, 5: 71-107.
- [52] Shahi, H., and Kamkar-Rouhami, A. (2014). "A GIS-based weights of evidence model for mineral potential mapping of hydrothermal gold deposits in Torbat-e-Heydarieh area". *Journal of Mining and Environment*, 5(2): 79-89.
- [53] Mhangara, P. (2005). "Testing the ability of ASTER (Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer) to tap hydrothermal alteration zones: a case study of the Haib Porphyry Copper-Molybdenum Deposit". Namibia, MSc Dissertation, Stellenbosch University.
- [54] Ghannadpour, S. S., and Hezarkhani, A. (2016). "Introducing 3D U-statistic method for separating anomaly from background in exploration geochemical data with associated software development". *Journal of Earth System Science*, 125: 387-401.
- [55] Ghannadpour, S. S., Hezarkhani, A., and Roodpeyma, T. (2017). "Combination of separation methods and data mining techniques for prediction of anomalous areas in Susanvar, Central Iran". *Journal of African Earth Sciences*, 134: 516-525.
- [56] Ghannadpour, S. S., and 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: 403-420.
- prospecting geothermal systems in an aseismic geologic setting: Yankari Park". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 80: 157-172.
- [43] Fereydooni, H., and 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.
- [۴۴] پردل، ف.، ابراهیمی، ع.، عزیز، ز.؛ ۱۳۹۸؛ "تأثیر روش‌های تصحیح جوی بر رابطه میان شاخص‌های گیاهی و تاج پوشش (مطالعه موردی: مرتع مرجن بروجن)". *علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی*، دوره هفتم، شماره ۲، ص ۱۵۳-۱۳۳.
- [45] Bernstein, L. S., Adler-Golden, S. M., Sundberg, R. L., Levine, R. Y., Perkins, C. T., Berk, A., Ratkowski, J. A., Felde, G., and Hoke, M. L. (2005). "Validation of the QUAC Atmospheric Correction (QUAC) algorithm for VNIR-SWIR multi- and hyperspectral imagery, SPIE Proceedings". *Algorithm and Technologies for Multispectral, Hyperspectral and Ultraspectral Imagery XI*, 5806: 668-678.
- [46] Hewson, R. D., Cudahy, T. J., Mizuhiko, S., Ueda, K., and Mauger, A. J. (2005). "Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill-Curnamona province of Australia". *Remote Sensing of Environment*, 99: 159-172.
- [47] Grove, C. I., Hook, S. J., and Paylor III, E. D. (1992). "Laboratory reflectance spectra of 160 Minerals, 0.4 to 2.5 micrometers". NTRS - NASA Technical Reports Server, Jet Propulsion Laboratory, Document ID: 20070030855.
- [48] Hunt, G. R., and Salisbury, J. W. (1971). "Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. II". *Carbonates Modern Geology*, 2: 23-30.
- [49] Salisbury, J. W., and D'Aria, D. M. (1992). "Emissivity of terrestrial materials in the 8-14 μm atmospheric window". *Remote Sensing of Environment*, 42(2): 83-106.