



Imam Khomeini International University
Vol. 7, No. 2, Summer 2022



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

Research Paper

Mineral Potential Mapping Using Satellite Images of Sentinel-2, Landsat-8 and ASTER for Iron Ore at Esfordi 1: 100000 Sheet

Ahmadi F.¹, Aghajani H.^{2*}, Abedi M.³

- 1- Ph.D Student, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
2- Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
3- Assistant Professor, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 26 Oct. 2020

Accepted: 06 Mar. 2021

Abstract: The Esfordi 1:100,000 geological sheet is situated at the Bafgh-Posht-e-Badam district in the central Iran structural zone. Due to the high mineral potentials in this region, many studies have been dedicated to investigate geological phenomena and seek minerals such as iron, phosphorus, lead and zinc. The present study attempts to delimit and explore new mineral potential zones in the Esfordi area through several satellite imagery data. Whereby three types of satellite imagery data including, Sentinel-2, Landsat-8 and ASTER, have been incorporated in this analysis to provide more reliable and powerful outputs. The processing algorithms such as band ratio, false color composites, principal component analysis and directional filtering were used to extract geospatial ore-bearing indicators. Note that areas covered by iron oxides were identified from the band ratios of Sentinel-2 and Landsat-8 images. Based on the color composite images, the rock units that have more impact on mineralization zones were separated. To map alteration zones in association with iron oxides, selective hybrid principal component analysis of bands from ASTER sensor and sentinel-2 satellite data was utilized. By employing directional filtering on the Sentinel-2 images, lineaments were extracted. In addition, prediction-area (P-A) plot was used to determine the weight of each alteration layer and lineament in identifying mineralization zones. The results show that the argillic and propylitic alterations have the lowest association with the mineralization, meanwhile the phyllic alteration with the highest weight has played a significant role in introducing mineralized zones. Outputs show that the mineralization in the study area is mainly related to rhyolite, rhyodacite and carbonate rocks.

Keywords: Mineral potential map, satellite imagery, processing, alteration, prediction-area plot.

How to cite this article

Ahmadi, F., Aghajani, H., and Abedi, M. (2022). "Mineral potential mapping using satellite images of Sentinel-2, Landsat-8 and ASTER for iron ore at Esfordi 1: 100000 sheet". Journal of Mineral Resources Engineering, 7(2): 1-23.

DOI: 10.30479/JMRE.2021.14427.1458

*Corresponding Author Email: haghajani@shahroodut.ac.ir

COPYRIGHTS



©2022 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

Nowadays, the development of mineral exploration methods has spread across the world. The Bafgh-Posht-e-Badam district in the Yazd Province of Iran is situated at the central Iranian structural zone. This region is well-known as a favourable area in terms of mines and minerals, especially related to iron ores [1-3].

In the central Iranian structural zone, a lot of iron mines exist especially in the Bafgh region. As a part of the central Iranian domain, the Esfordi area includes several important iron ore mines, such as Chadormalu, Choghart, Sehchahun and Mishdvan [4,5].

Due to the vastness of the central Iran zone and since this region often has high potential of ore-bearing mineralization, remote sensing studies can be very effective in identifying alteration and new potential zones, which reduce the costs and the time of exploration program significantly [6,7].

The information required to identify different mines can be obtained using different satellite data and processing techniques [8,9].

Yousefi and Carranza have developed a prediction-area plot for weighting to indicator/evidence layers [10]. In this method, the logistic function is used to assign fuzzy membership value to continuous spatial evidence values. The logistic function transfers all data to a finite-range of [0-1]. The horizontal axis of the plot contains these values. The two vertical axes in the plot express the percentage of predicted anomalies in the study area and the percentage of the occupied area. The intersection point of this plot will indicate the weight of each layer. This means that the weight of layer will be the most if the intersection point be the highest.

The aim of this study is to identify zones with more favorability for iron ore mineralization in the Esfordi 1: 100,000 geological sheet using remote sensing techniques. Therefore, iron ore potential map is plotted. Areas with the higher potential of iron ore have been identified and introduced in three steps: 1- preparation of evidence layers. 2- computing the weight of each layer and 3- compilation of all evidence layers into a single iron potential map through the geometric mean method.

MATERIALS AND METHODS

In this research, the Band Ratio (BR), False Color Composite (FCC), Principal Component Analysis (PCA) and Spectral Angle Mapper (SAM) methods were used to process multisatellite imagery data. All evidence layers were weighted using prediction-area plot. Finally, different layers were combined through the geometric mean method and the mineral potential map was prepared.

Two Sentinel-2 image frames (T40SCA and T40RCV numbers on August 20, 2018 and July 31, 2018), one Landsat-8 image frame (161-038 number on July 24, 2019), and three ASTER image frames (two frames on August 10, 2001 and another on July 25, 2001) were downloaded from the U.S. Geological Survey (USGS). Atmospheric corrections were performed before any processing. FLAASH atmospheric correction was used in both Landsat-8 and ASTER data. Sentinel-2 images were corrected using the SNAP software.

FINDINGS AND ARGUMENT

In this study, six evidence layers were prepared which are 1) argillic alteration, 2) propylitic alteration, 3) phyllic alteration, 4) iron oxide alteration, 5) gossan zone and 6) lineaments. After processing satellite data and preparing all evidence layers, the threshold limit for each layer was determined using the value-area fractal method. All evidence layers were reclassified based on the obtained fractal plots. Then, prediction-area plots were prepared for each layer. The normalized density was calculated by dividing the prediction rate by the occupied area. Finally, the weight of each layer was obtained by natural logarithm of this value. The results are summarized in Table 1.

According to Table 1, the argillic and propylitic alteration layers have a weight of zero, so these layers were discarded from the integration process.

The values were transferred to a fuzzy interval (Figure 1A) and the integrated map was divided into six classes using fractal method (Figure 1B). The reclassified map was obtained based on the fractal plot (Figure 1C). Then the prediction-rate plot was prepared (Figure 1D). Based on the intersection point in Figure 1D,

Table 1. Evidence layers extracted from satellite imagery data and assigned weight based on the prediction-area plots

Data	Layer	Method	Prediction Rate	Area	Normalized Density	Weight
ASTER	Argillic	BR, PCA	50	50	1	0
	Propylitic	BR, PCA	50	50	1	0
	Phyllic	BR, PCA	70	30	2.33	0.846
Sentinel-2, Landsat-8	Iron Oxide	BR, PCA	58	42	1.38	0.323
Sentinel-2	Gossan	BR	64	36	1.78	0.575
	Lineaments	Directional Filter	60	40	1.5	0.4

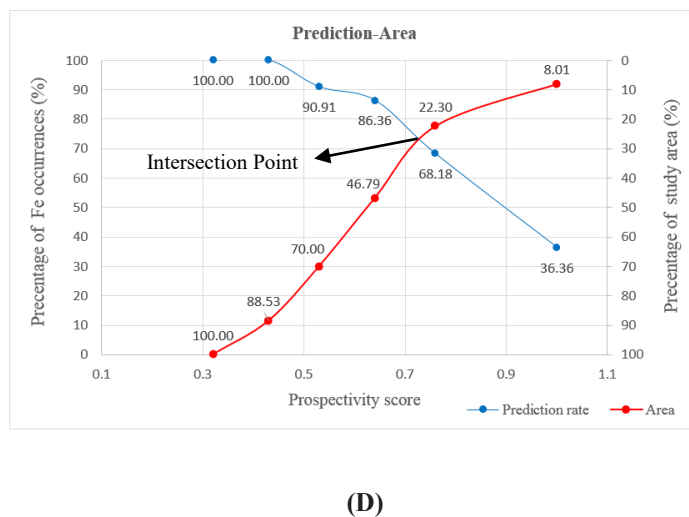
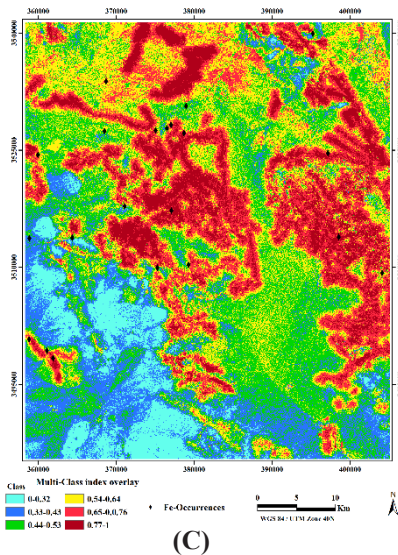
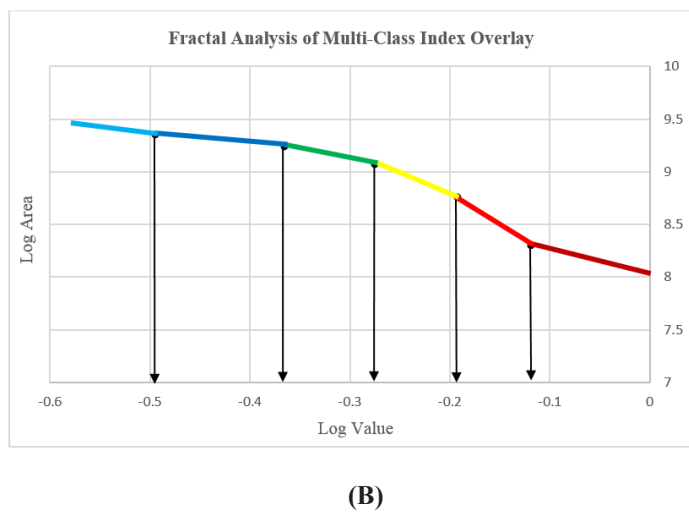
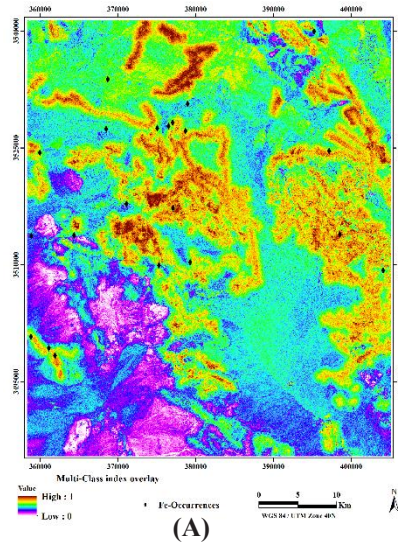


Figure 1. Integrated map of all evidence layers from remote sensing data **A:** fuzzy map, **B:** C-N log-log plot, **C:** reclassified fractal-based evidential map, and **D:** the P-A plot

the integrated map obtained from four evidence layers has occupied 27% of the study area as favorable zones by which 73% of the known Fe occurrences have been delineated. Therefore, the synthesized map has more weight than each single layer as well.

CONCLUSIONS

An integrated map was obtained from all evidence layers through the geometric mean method. According to the intersection point, this layer has occupied 27% of the study area with an ore prediction rate of 73%. According to this map, some regions can be introduced as favorable zone in association with iron mineralization. One of the most important zone among these regions is the SE part of the Esfordi sheet. In addition, in the center and south of the study area -at the edge of carbonate units- are areas with the highest mineral potential. Rhyolite, rhyodacite and calcareous dolomites are the utmost important units associated with the iron-bearing mineralization.

REFERENCES

- [1] Förster, H., and Jafarzadeh, A. (1994). “*The Bafq mining district in Central Iran - a highly mineralized Infracambrian volcanic field*”. *Economic Geology*, 89: 1697-1721.
- [2] Mohammad Torab, F. (2008). “*Geochemistry and metallogeny of magnetiteapatite deposits of the Bafq Mining District, Central Iran*”. Doctoral Thesis, Faculty of Energy and Economic Sciences Clausthal University of Technology, pp. 131.
- [3] Daliran, F., Stosch, H. G., and Williams, P. J. (2009). “*A review of the Early Cambrian magmatic and metasomatic events and their bearing on the genesis of the Fe oxide-REE-apatite deposits (IOA) of the Bafq district, Iran*”. In: Williams, P. (Ed.), *Smart Science for Exploration and Mining*, 10th SGA Biennial, Townsville, 623-625.
- [4] Sadeghi, B., Khalajmasoumi, M., Afzal, P., Moarefvand, P., Yasrebi, A. B., Wetherelt, A., and Ziazarifi, A (2013)). “*Using ETM+ and ASTER sensors to identify iron occurrences in the Esfordi 1: 100,000 mapping sheet of Central Iran*”. *Journal of African Earth Sciences*, 85: 103-114.
- [5] Ghorbani, M. (2013). “*Economic geology of Iran*”. Springer, Berlin, pp. 569.
- [6] Soe, M., Kyaw, T. A., and Takashima, I. (2005). “*Application of remote sensing techniques on iron oxide detection from ASTER and Landsat images of Tanintharyi coastal area, Myanmar*”. *Scientific and Technical Reports of Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University*, 26: 21-28.
- [7] Haihui, H., Yilin, W., Zhuan, Z., Guangli, R., and Min, Y. (2018). “*Extraction of Altered Mineral from Remote Sensing Data in Gold Exploration Based on the Nonlinear Analysis Technology*”. In 2018 10th IAPR Workshop on Pattern Recognition in Remote Sensing (PRRS), IEEE, 1-8.
- [8] Sabins, F. F. (1999). “*Remote sensing for mineral exploration*”. *Ore Geology Reviews*, 14(3-4): 157-183.
- [9] Bishop, C. A., Liu, J. G., and Mason, P. J. (2011). “*Hyperspectral remote sensing for mineral exploration in Pulang, Yunnan Province*”. *International Journal of Remote Sensing*, 32(9): 2409-2426.
- [10] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2015). “*Prediction–area (P–A) plot and C–A fractal analysis to classify and evaluate evidential maps for mineral prospectivity modeling*”. *Computers & Geosciences*, 79: 69-81.



دوره هفتم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، صفحه ۵ تا ۲۳
Vol. 7, No. 2, Summer 2022, pp. 5-23



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

علمی-پژوهشی

تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲، لندست ۸ و استر برای کانسار آهن در برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی

فردین احمدی^۱، حمید آقاجانی^۲، میثم عابدی^۳

- ۱- دانشجوی دکترا، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
- ۲- دانشیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
- ۳- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۵

چکیده

برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی در زون ساختاری ایران مرکزی و ناحیه بافق- پشت بادام واقع است. به دلیل وجود پتانسیل‌های معدنی زیاد در این منطقه، پژوهش‌های بسیاری برای شناسایی پدیده‌های زمین‌شناسی و اکتشاف مواد معدنی مانند آهن، فسفر، سرب و روی انجام شده است. در این تحقیق با استفاده از داده‌های دورسنجی، نقشه پتانسیل مطلوب کانی‌زایی تهیه و مناطق جدید پتانسیل معدنی معرفی شده است. استفاده از سه نوع تصویر ماهواره‌ای سنتینل ۲، لندست ۸ و سنجنده استر ماهواره ترا سبب شده تا نتایج حاصل مستندتر و قابل اعتماد باشد. برای تهیه لایه‌های اطلاعاتی از روش‌های پردازشی نسبت بانندی، ترکیب رنگی کاذب، آنالیز مولفه‌های اصلی و فیلترگذاری جهت استفاده شد. مناطق حاوی اکسید آهن با استفاده از نسبت‌های بانندی تصاویر سنتینل ۲ و لندست ۸ بارز و بر اساس تصاویر ترکیب رنگی واحدهای سنگی موثر در کانی‌زایی تفکیک شد. برای شناسایی مناطق دگرسان شده اکسیدهای آهن از تحلیل مولفه‌های اصلی انتخابی باندهایی از سنجنده استر و سنتینل ۲ استفاده شد. با فیلترگذاری جهت بر روی داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۲ خطواره‌ها و گسل‌های احتمالی منطقه شناسایی شدند. برای تعیین وزن و نقش هر یک از لایه‌های دگرسانی آرژیلیتی، فیلیتی، پروپیلیتی، اکسیدهای آهن و خطواره‌ها در شناسایی مناطق کانه‌زایی از نمودارهای پیش‌بینی- مساحت استفاده شد. نتایج بررسی نشان می‌دهد که لایه‌های دگرسانی آرژیلیتی و پروپیلیتی با کمترین ضریب و دگرسانی فیلیتی با بیشترین وزن در معرفی مناطق کانی‌زایی نقش داشته‌اند. نتایج نشان می‌دهد، واحدهای مرتبط با کانی‌زایی در منطقه مورد بررسی، عمدتاً از جنس ریولیت، ریوداسیت و سنگ‌های کربناته‌اند.

کلمات کلیدی

نقشه پتانسیل معدنی، تصاویر ماهواره‌ای، پردازش، دگرسانی، نمودار پیش‌بینی- مساحت.

استناد به این مقاله

احمدی، ف.، آقاجانی، ح.، عابدی، م.؛ ۱۴۰۱؛ "تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲، لندست ۸ و استر برای کانسار آهن در برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هفتم، شماره ۲، ص ۲۳-۱.

DOI: 10.30479/JMRE.2021.14427.1458



حق مؤلف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

*نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: haghajani@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

روی داده‌های ماهواره‌ای با توجه به وسعت هاله‌های آلتراسیون در مناطق مختلف، نتایج مطلوبی به دست داده است. یوسفی و کارانزا [۱۵]، نمودار نرخ پیش‌بینی- مساحت (Prediction-Area) را برای وزن‌دهی به لایه‌های شاهد توسعه داده‌اند. در این روش از تابع لجستیک برای تخصیص امتیاز عضویت فازی به مقادیر پیوسته شواهد فضایی استفاده می‌شود. تابع لجستیکی کل داده‌ها را به یک دامنه محدود [۰-۱] انتقال می‌دهد [۱۷-۱۵]. مقادیر حاصل شده، محور افقی نمودار را شامل می‌شود. دو محور قائم در نمودار، درصد آنومالی‌های پیش‌بینی شده در منطقه و مساحت متناظر است. بر اساس این نمودار میزان درصد آنومالی موجود در منطقه با مساحت متناظر سنجیده می‌شود. محل تلاقی دو منحنی به عنوان نقطه تقاطع نمودار، بیانگر وزن لایه خواهد بود، بدین صورت که هرچه نقطه تقاطع، مقادیر بالاتری را شامل شود وزن نهایی لایه بیشتر می‌شود. به عبارتی با مساحت کمتر، مناطق آنومال بیشتری قابل پیش‌بینی است.

در این تحقیق با هدف شناسایی نواحی با پتانسیل بالا در محدوده برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی، با استفاده از پردازش داده‌های دورسنجی و تهیه لایه‌های مختلف، تعیین وزن هر لایه و در نهایت تلفیق لایه‌ها، مناطق با پتانسیل بالا شناسایی و معرفی شده است.

۲- زمین‌شناسی محدوده

ناحیه معدنی بافق در ایران مرکزی یکی از بزرگترین نواحی دارای ذخایر آهن کشور با ذخیره‌ای حدود ۷۵۰ میلیون تن است. این منطقه حدود ۱۰۰ سال است که مورد توجه زمین‌شناسان از اقصی نقاط دنیا قرار گرفته است، برای نخستین بار ویلیامز، مذاب ماگمایی را به عنوان منشأ کانسار چغارت پیشنهاد و با قرار دادن آن در ردیف کانسارهای نوع کاپرونا، برای اولین بار به حضور آپاتیت به عنوان کانی همراه ذخایر آهن اشاره کرد [۱۸].

کانه‌زایی‌های مختلف به ویژه آهن، سرب و روی در منطقه بافق با فعالیت‌های آتشفشانی قلیایی و زمین‌ساخت کشتی رخ داده در آن محیط مرتبط است. منطقه بافق، طی دوره‌ای از فعالیت‌های زمین‌ساختی همراه با فعالیت دوباره گسل‌های همزمان با رسوب‌گذاری، رسوبات آواری ناشی از فعالیت گسل‌ها، جایگزینی سنگ‌های آتشفشانی ریولیتی، فرونشست رسوبات کافتی و ته‌نشست سازند اسفوردی تشکیل شده است

امروزه با گسترش روش‌های اکتشافی، ذخایر معدنی در سراسر جهان گسترش یافته است. منطقه بافق تا پشت بادام در استان یزد و در زون ساختاری ایران مرکزی نیز یک منطقه فعال از لحاظ وجود معادن و نیز کانی‌زایی به ویژه برای سنگ آهن است [۳-۱]. پهنه فلززایی بافق- ساغند در مرکز پهنه زمین‌ساختی کاشمر- کرمان میان دو بلوک ساختاری یزد و طبس قرار گرفته است. در پرکامبرین پایانی- کامبرین آغازی، کانسارهای بسیاری از اکسید آهن آپاتیت‌دار نوع کاپرونا در ایران شناسایی و کشف شده است. این کانسارها در پهنه ایران مرکزی و در پهنه فلززایی ناحیه بافق در سنگ میزبان آتشفشانی- رسوبی کامبرین زیرین تشکیل شده‌اند [۴].

در ناحیه زمین‌شناسی ساختاری ایران مرکزی به ویژه در منطقه بافق معادن آهن زیادی وجود دارد. در منطقه بافق تا ساغند، بخش اسفوردی به لحاظ وجود معادن و اندیس‌های معدنی سنگ آهن غنی است و چندین معدن بزرگ آهن مانند چغارت، سه‌چاهون، میشدوان و چادرملو در این بخش وجود دارد [۵، ۶]. پیدایش ذخایر مگنتیت- آپاتیت در منطقه معدنی بافق- ساغند، همچنان یک موضوع چالشی در بین زمین‌شناسان است و مدل‌های ساختاری و ژنتیکی مختلفی برای کانی‌زایی در این منطقه ارائه شده است [۹، ۷-۹]. با توجه به گستردگی ناحیه ایران مرکزی و همچنین پتانسیل بالای این ناحیه در کانی‌زایی، بررسی‌های دورسنجی، نقش اساسی و زیربنایی در شناخت عوامل ژنزی و کنترل‌کننده کانی‌زایی، مانند دگرسانی، واحدهای سنگی، گسل‌ها و خطوط‌های خطی و حلقوی دارد و در شناخت پتانسیل‌های معدنی جدید بسیار کارآمد است و باعث کاهش چشمگیر هزینه و زمان اجرای عملیات اکتشافی می‌شود [۱۳-۱۰].

تصاویر ماهواره‌ای به دلیل پوشش وسیع منطقه‌ای، چند طیفی و تکرارپذیری در زمان‌های مختلف در شناسایی ایالت‌ها، کمربندها و نواحی مستعد کانه‌زایی مفیدند. می‌توان با استفاده از تصاویر سنجنده‌های مختلف و به کارگیری الگوریتم‌های خاص و پردازش تصاویر، اطلاعات مورد نیاز را برای شناسایی معادن مختلف بر روی زمین به دست آورد [۹، ۱۴]. استفاده بهینه از داده‌های ماهواره‌ای برای اکتشاف مواد معدنی، به ویژه در اکتشاف کانسارها، شناخت و نقشه‌برداری محدوده‌های دگرسانی مرتبط، به اکتشاف ذخایر معدنی کمک می‌کند. به همین دلیل روش‌های دورسنجی و انجام آنالیزهای مختلف بر

متعلق به کامبرین بالایی و پرکامبرین پایینی همراه با مقادیر کم ماسه‌سنگ در رسوبات قدیمی قرار دارند و از دو قسمت زیرین و فوقانی تشکیل شده‌اند. قسمت زیرین شامل دولومیت، سنگ آهک، شیل و ماسه‌سنگ، گدازه‌های اسیدی و شیل آهکی است و قسمت فوقانی اغلب کربنات‌ها را شامل می‌شود. معدن آپاتیت- مگنتیت اسفوردی در ۳۵ کیلومتری شمال شرقی شهر بافق واقع شده است. معدن فسفات اسفوردی در اوایل دهه ۱۹۷۰ به دلیل پتانسیل سنگ آهن موجود در آن مورد بررسی قرار گرفت اما به دلیل وجود درصد بالایی از ماده معدنی آپاتیت به عنوان پتانسیل فسفات مطرح و معروف است. نقشه تقسیم‌بندی ساختاری ایران بر اساس تقسیم‌بندی اشتوکلین، نقشه زمین‌شناسی باز تولید شده ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی به همراه محل معادن و آنومالی‌های موجود در برگه اسفوردی و مدل سه‌بعدی منطقه به وسیله ترکیب رنگی واقعی تصویر سنتینل ۲ در شکل ۱ ارائه شده است. در نقشه تقسیم‌بندی ساختاری ایران، بخش اسفوردی با مستطیل سیاه کوچک مشخص شده است و همان‌طور که مشخص است این منطقه در زون طبس- لوت قرار گرفته است. اسامی رخدادهای آهن در محدوده برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی در جدول ۱ ذکر شده است.

۳- مواد و روش‌ها

در راستای هدف اصلی در این تحقیق و برای بارزسازی دگرسانی‌های مختلف و کانی‌های شاخص و مهم در ارزیابی پتانسیل معدنی در منطقه مورد مطالعه، از سه سری داده ماهواره‌ای استفاده شد تا بهترین نتایج قابل دستیابی باشد. علاوه بر این برای صحت‌سنجی و وزن‌دهی به لایه‌ها از نمودارهای پیش‌بینی- مساحت استفاده و در نهایت به وسیله روش میانگین هندسی، نقشه تلفیقی از لایه‌های مختلف تهیه شد.

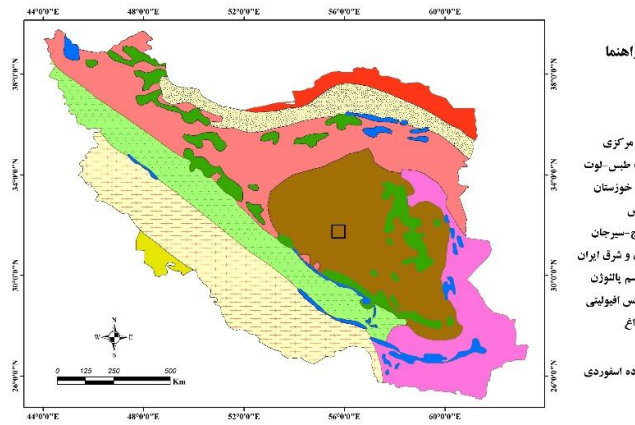
برای پردازش داده‌های ماهواره‌ای از روش‌های نسب باندی، ترکیبات رنگی کاذب، آنالیز مولفه‌های اصلی و نقشه بردار زاویه طیفی استفاده شده است. لایه‌های مختلف به وسیله نمودارهای پیش‌بینی- مساحت، وزن‌دهی و به روش میانگین هندسی تلفیق شده و در نهایت نقشه پتانسیل‌یابی معدنی در منطقه مورد نظر تهیه شد.

[۲۰، ۱۹]. بر اساس مطالعات دلیران و همکاران، کانسارهای آهن- آپاتیت منطقه بافق از نوع ماگمایی کایرونا و مرتبط با سنگ‌های اسیدی است، بنابراین در این ناحیه نیز کانی‌زایی آهن، آپاتیت و عناصر نادر خاکی همانند سایر کانسارهای مشابه دنیا منشأ گرمایی دارند [۲۱]. بررسی سنگ‌های آذرین و دگرگونی ناحیه‌ای ساغند و کاشمر- کرمان و همچنین گرانت‌های پی‌سنگ ایران مرکزی، نشان‌دهنده نبود رخداد کافت درون قاره‌ای در این منطقه و معرف موقعیت فعالیت ماگمایی کمانی از نوع آند است [۲۳، ۲۲].

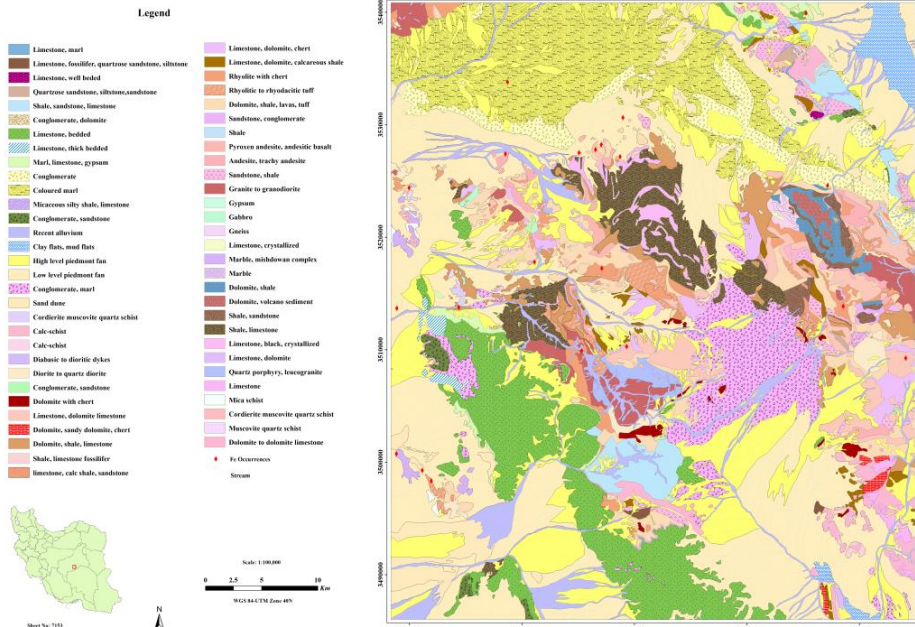
از لحاظ ساختاری، این منطقه جزو پهنه ایران مرکزی، زیر پهنه بافق- پشت بادام است. کهن‌ترین سنگ‌های این ناحیه مربوط به پرکامبرین است که مجموعه‌هایی از سنگ‌های دگرگونی شیست، گنایس، مرمر و آمفیبولیت را شامل می‌شود. رسوبات ترشیری و کواترنری بیشتر شامل مجموعه‌هایی از کنگلومرا، ماسه‌سنگ و آبرفت‌های جوان است. توده‌های نفوذی موجود در منطقه شامل گرانت‌های زیرگان، نارینگان، بهاباد و سینیت اسفوردی و مجموعه‌ای از دایک‌های دیوریتی و گابروبی است [۲۵، ۲۴].

این پهنه به وسیله گسل‌های بافق- پشت بادام، کلمرد، کاشمر و کوهبنان محدود شده است. ایالت فلززایی بافق- ساغند در مرکز این پهنه و میان دو گسل کوهبنان در شرق و بافق- پشت بادام در غرب واقع شده است. کانسارهای اکسید آهن- آپاتیت در پهنه بافق به شکل توده‌ای، جانشینی رگه‌ای و استوک‌ورک تشکیل شده‌اند. کانسنگ‌های آهن، توده‌های گنبدی شکل نامنظم تا منظمی را ایجاد کرده‌اند که بیشتر به‌صورت لنز و توده‌های بی‌شکل مگنتیت نمایان شده و با سنگ میزبانی با مجموعه‌ای از مگنتیت‌های برشی شده و افشان در برگرفته شده‌اند. در این معادن، مگنتیت فراوان‌ترین کانی آهن است که گاه مارتیتی شده است و پس از آن کانی‌های اکتینولیت و آپاتیت به وجود آمده‌اند. توده‌های مگنتیت در برخی از رخنمون‌ها به صورت استوک‌ورک‌های حاوی مگنتیت، آپاتیت و اکتینولیت دیده می‌شود. این توده‌ها، مرز تدریجی با سنگ میزبان دارند و مرزهای کاملاً مشخص کانسنگ و سنگ میزبان به وسیله کنترل‌کننده‌های ساختاری ایجاد شده است [۲۶].

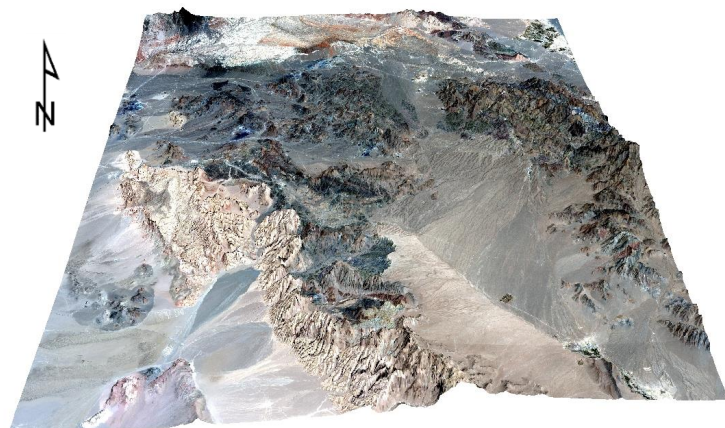
برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی در منطقه بافق- پشت بادام قرار گرفته است. قدیمی‌ترین واحدهای موجود در این منطقه سری ماسه‌سنگ‌های کوارتزی است. رسوبات این منطقه



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱: الف) موقعیت ورقه یکصد هزار زمین شناسی اسفوردی در تقسیم بندی ساختاری ایران (بر اساس تقسیم بندی اشتوکلین)، ب) نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ باز طراحی شده ورقه اسفوردی، ج) نمایش سه بعدی محدوده اسفوردی با ترکیب رنگی واقعی تصویر سنتینل ۲

جدول ۲: داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در تحقیق

T40RCV ۲۰۱۸-۰۷-۳۱	T40SCA ۲۰۱۸-۰۸-۲۰	تصویر سنتینل ۲
۲۰۱۹-۰۷-۲۴	ردیف- گذر ۱۶۱-۰۳۸	تصویر لندست ۸
فریم سوم ۲۰۰۱-۰۷-۲۵	فریم اول و دوم ۲۰۰۱-۰۸-۱۰	تصویر استر

در این ماهواره، امکان مطالعه پهناهای زراعی، معدنی، آب و خاک در سنجش از دور را فراهم ساخته است. در حال حاضر، سنتینل ۲ بیشترین دقت مکانی را در بین داده‌های ماهواره‌ای رایگان قابل دسترس دارد [۲۸،۲۷]. ماهواره سنتینل ۲، ۱۳ باند طیفی و توان‌های تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متری دارد. توان تفکیک زمانی، تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲، ۶۰ روز است. ماهواره سنتینل ۲ از دو ماهواره سنتینل ۲A و سنتینل ۲B تشکیل شده که تقارن تصویربرداری آن به افزایش توان تفکیک زمانی منجر شده است. از لحاظ رادیومتریکی نیز داده‌های این ماهواره با دقت ۱۲ بیتی تهیه شده که افزایش دقت در ثبت انرژی‌های رسیده به سنجنده را فراهم کرده است. ماهواره دیده‌بانی منابع طبیعی لندست ۸ (۲۰۱۳) هشتمین ماهواره از سری ماهواره‌های لندست و هفتمین ماهواره از این گروه است که با موفقیت در مدار قرار گرفت [۲۹]. لندست ۸ با استفاده از دو سنجنده تصویربردار عملیاتی زمین (OLI) و سنجنده مادون قرمز حرارتی (TIRS)، به طور مستمر از سطح زمین داده برداشت می‌کند و از داده‌های در دسترس سنجش از دور است. این دو سنجنده به ترتیب، اطلاعات تصویری نه باند موج کوتاه و دو باند حرارتی را اندازه‌گیری و ثبت و ضبط می‌کنند [۳۰]. هفت باند از نه باند سنجنده OLI با سنجنده‌های TM و ETM+ که بر روی ماهواره‌های لندست قبلی قرار داشتند؛ یکسان است، که این عمل علاوه بر سازگاری با داده‌های قدیمی لندست و تداوم آن‌ها، قابلیت‌های اندازه‌گیری را نیز بهبود داده است.

سنجنده استر یکی از پنج سنجنده‌ای است که بر روی ماهواره ترا نصب (دسامبر ۱۹۹۹) و تصویربرداری آن از مارس ۲۰۰۰ شروع شد. این سنجنده جزو سنجنده‌هایی است که در زمینه مشاهدات زمینی استفاده می‌شوند. از آنجایی که سنجنده ASTER بر مبنای نیازهای زمین‌شناسی طراحی شده است، از تصاویر این سنجنده می‌توان به عنوان ابزاری نیرومند در اکتشاف ذخایر معدنی در مراحل ابتدایی برای

جدول ۱: معادن و آنومالی‌های آهن موجود در برکه زمین‌شناسی اسفوردی [۶]

ردیف	نام معدن / آنومالی
۱	آنومالی X
۲	آنومالی II B
۳	آنومالی II C
۴	آنومالی IV
۵	آنومالی V B
۶	آنومالی V C
۷	آنومالی V III
۸	آنومالی XI
۹	آنومالی X IIA
۱۰	آنومالی X IIIA
۱۱	چشمه فیروز
۱۲	چغارت
۱۳	شرق بافق
۱۴	اسفوردی
۱۵	لکه سیاه
۱۶	مشیدوان
۱۷	مبارکه
۱۸	نارگون
۱۹	ناریگان
۲۰	شمال سه چانگی ۱
۲۱	شمال سه چانگی ۲
۲۲	سه چاهون

۳-۱- داده‌های تحقیق

با توجه به کارایی تصاویر ماهواره‌ای مختلف، در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲، لندست ۸ و سنجنده استر ماهواره ترا برای شناسایی مناطق دگرسان شده و با پتانسیل بالای کانی‌زایی استفاده شده است. تصاویر ماهواره‌ای پوشش‌دهنده مساحت حدود ۲۵۰۰ کیلومترمربعی برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی، با دانلود دو فریم تصویر سنتینل ۲، یک فریم تصویر لندست ۸ و سه فریم تصویر استر تهیه شد. این تصاویر به نحوی انتخاب شدند که پوشش ابر در آن‌ها صفر باشد تا مشکلات پردازشی به وجود نیاید. با توجه به موقعیت جغرافیایی برکه اسفوردی داده‌های ماهواره‌ای مربوط به بازه مرداد تا شهریور ماه انتخاب شده است (جدول ۲).

هدف اصلی از طراحی ماهواره چندطیفی سنتینل ۲ (۲۰۱۴ میلادی)، به کارگیری تصاویر آن در زمینه مطالعات کشاورزی است. توان تفکیک مکانی بالا و باندهای طیفی به کار برده شده

کانی‌شناسی مقدماتی و تهیه نقشه‌های دگرسانی، با هزینه کم و دقت بالا استفاده کرد [۳۱].

این تصاویر تفکیک طیفی خوبی در محدوده مادون قرمز دارند، محدوده‌ای که می‌توان بسیاری از کانی‌ها را از یکدیگر تفکیک کرد. استر تصاویر ماهواره‌ای از زمین را با قدرت تفکیک متوسط و در ۱۴ باند مختلف از طیف الکترومغناطیسی در بازه طیف مرئی تا فروسرخ حرارتی تهیه می‌کند. قدرت تفکیک تصاویر استر از ۱۵ تا ۹۰ متر است. مشخصات تصاویر سنتینل ۲، لندست ۸ و سنجنده استر در جدول ۳ آورده شده است.

کمترین تاثیر پراکنشی را دارد [۳۳،۳۲].

با توجه به سطوح پردازشی تصاویر (LIT) مورد استفاده در این تحقیق، برای تصحیح این تصاویر از تصحیحات اتمسفری برای پیش‌پردازش آن‌ها استفاده شد. از تصحیح اتمسفری FLAASH در تصاویر لندست ۸ و استر استفاده و تصاویر سنیتینل ۲ با استفاده از نرم‌افزار SNAP و افزونه Sen2cor تصحیح شد و بدین ترتیب سطح پردازشی همه تصاویر از سطح بالای جو (Top of Atmosphere) به سطح زمین- پایین‌تر از اتمسفر- (Bottom of Atmosphere) رسانده شد.

۳-۲- پیش پردازش تصاویر ماهواره‌ای

برای اخذ اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای لازم است قبل از استفاده از آن‌ها پردازش‌هایی به منظور تصحیح و بارز کردن تغییرات انجام گیرد. امواج الکترومغناطیس که به وسیله سنجنده‌ها دریافت می‌شوند، پس از عبور از جو به سنجنده‌ها می‌رسند. در اثر عبور امواج الکترومغناطیس از جو، فعل و انفعالاتی صورت می‌گیرد که باعث تغییر در میزان انرژی رسیده به سنجنده می‌شود. اتمسفر بر روی طول موج‌های کوتاه‌تر از ۰.۵ میکرومتر، بیشترین و طول موج‌های بلندتر،

۳-۳- ماسک پوشش گیاهی

وجود پوشش گیاهی در مناطقی که برای مطالعات اکتشافی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای انتخاب می‌شوند، به عنوان یک عامل مزاحم تلقی می‌گردد [۳۵،۳۴]. چرا که طیف‌های مشابهی مابین پوشش گیاهی و برخی کانی‌ها مانند کانی‌های کربناته و یا رسی وجود دارد، بنابراین حذف اثر این عامل به عنوان پارامتری اساسی قبل از انجام آنالیزهای دورسنجی مطرح است. با شناسایی این واحدها می‌توان محدوده‌های گیاهی را از تمامی باندهای داده ماهواره‌ای حذف کرد که این

جدول ۳: مشخصات تصاویر ماهواره‌های سنتینل ۲، لندست ۸ و استر [۲۹-۲۶]

استر		لندست ۸			سنتینل ۲			
تفکیک مکانی (متر)	طول موج (میکرومتر)	باند	تفکیک مکانی (متر)	طول موج (میکرومتر)	باند	تفکیک مکانی (متر)	میانگین طول موج (میکرومتر)	باند
۱۵	۰.۵۲۰-۰.۶۰۰	۱	۳۰	۰.۴۳۳-۰.۴۵۳	۱	۱۰	۰.۴۴۳	۱
	۰.۶۳۰-۰.۶۹۰	۲		۰.۴۵۰-۰.۵۱۵	۲		۰.۴۹۰	۲
	۰.۷۶۰-۰.۸۶۰	۳N		۰.۵۲۵-۰.۶۰۰	۳		۰.۵۶۰	۳
	۰.۷۶۰-۰.۸۶۰	۳B		۰.۶۳۰-۰.۶۸۰	۴		۰.۶۶۵	۴
۳۰	۱.۶۰۰-۱.۷۰۰	۴	۱۵	۰.۸۴۵-۰.۸۸۵	۵	۲۰	۰.۷۰۵	۵
	۲.۱۴۵-۲.۱۸۵	۵		۱.۵۶۰-۱.۶۶۰	۶		۰.۷۴۰	۶
	۲.۱۸۵-۲.۲۲۵	۶		۲.۱۰۰-۲.۳۰۰	۷		۰.۷۸۳	۷
	۲.۲۳۵-۲.۲۸۵	۷	۳۰	۰.۵۰۰-۰.۶۸۰	۸	۶۰	۰.۸۴۲	۸
	۲.۲۹۵-۲.۳۶۵	۸		۱.۳۶۰-۱.۳۹۰	۹		۰.۸۶۵	۸A
	۲.۳۶۰-۲.۴۳۰	۹					۰.۹۴۵	۹
۹۰	۸.۱۲۵-۸.۴۷۵	۱۰				۲۰	۱.۳۷۵	۱۰
	۸.۴۷۵-۸.۸۲۵	۱۱					۱.۶۱۰	۱۱
	۸.۹۲۵-۹.۲۷۵	۱۲					۲.۱۹۰	۱۲
	۱۰.۲۵-۱۰.۹۵	۱۳						
	۱۰.۹۵-۱۱.۶۵	۱۴						

مرحله با ماسک کردن اطلاعات باندى انجام مى‌گيرد.

ابتدا مناطق حاوى پوشش گياهى بارزسازى و سپس با استفاده از عمليات ماسک کردن در هر يك از تصاویر، مناطقی که دارای پوشش گیاهی‌اند به عنوان پیکسل‌های تیره در نظر گرفته شد و بدین ترتیب در پردازش‌ها (مانند نسبت‌های باندى) این پیکسل‌ها به صورت تیره نمایان خواهند شد و اثری بر نتایج نخواهند گذاشت.

۳-۴-۴- پردازش تصاویر ماهواره‌ای

برای پردازش داده‌های ماهواره‌ای از روش‌های نسبت باندى ترکیبات رنگی کاذب، آنالیز مولفه‌های اصلی و فیلترگذاری استفاده و لایه شاهد هر یک تهیه شد.

۳-۴-۱- نسبت باندى

تصاویر نسبتی یا نسبت‌های باندى از شیوه‌های بسیار مفید برای بارزسازى پدیده‌ها در تصاویر چند باندى محسوب مى‌شوند [۳۶]. از این روش برای کاهش تاثیر روشنایی خورشید، توپوگرافی و بارزسازى اطلاعات طیفی در تصاویر استفاده مى‌شود. مهم‌ترین مزیت کاربرد نسبت‌های باندى، تهیه تصویری است که كاملاً مستقل از شرایط روشنایی است [۳۱]. این روش در به نقشه درآوردن گیاهان، رس‌ها، برخی از سنگ‌ها و تشخیص زون‌های دگرسانی گرمایی استفاده مى‌شود [۳۷].

۳-۴-۲- ترکیبات رنگی کاذب

از آنجا که اغلب تصاویر ماهواره‌ای به شکل چند باندى در دسترس قرار دارند، تجزیه و تحلیل یک باند به تنهایی نمی‌تواند حداکثر اطلاعات را در اختیار قرار دهد. فهم روابط بین طول موج‌های متفاوت در تشخیص پدیده‌ها و نوع پوشش منطقه بسیار مهم است. این دیدگاه در به تصویر کشیدن بیش از یک باند بر روی سامانه‌های پردازش تصویر و تولید تصاویر چند باندى سودمند خواهد بود. استفاده از این شیوه در تهیه تصاویر رنگی مرکب متداول است که در آن سه باند متفاوت به سه رنگ سرخ، سبز و آبی نسبت داده مى‌شود [۳۸، ۳۹]. بر این اساس، ترکیبات رنگی متعددی که مى‌توان از یک تصویر چند باندى به دست آورد بسیار زیاد خواهد بود. در این حالت از شاخص بهینه ترکیبات رنگی استفاده مى‌شود و مناسب‌ترین ترکیب‌های رنگی که بیشترین تفکیک رنگی را برای واحدهای

سنگی ایجاد مى‌کند، استفاده شده است.

۳-۴-۳- آنالیز مولفه‌های اصلی

آنالیز مولفه اصلی یک روش آماری چند متغیره است که برای تقلیل حجم داده‌ها استفاده مى‌شود. اطلاعات باندهای مختلف تصاویر چند طیفی در سنجش از دور، غالباً همبستگی دارند. معمولاً همبستگی منفی مابین باندهای مرئی و مادون قرمز و مثبت بین باندهای مرئی بر روی پوشش‌های خاکی و سنگی وجود دارد. وجود همبستگی مابین تصاویر باندهای چند طیفی حکایت از وجود اطلاعات مشترک و یا به عبارت دیگر تکرار اطلاعات است. وجود اطلاعات مشترک در باندها به صورت همبستگی مابین آنها آشکار مى‌شود [۴۳-۴۰].

آنالیز مولفه‌های اصلی در اصل برای فشرده‌سازى داده‌ها به کار مى‌رود ولی در سنجش از دور برای حذف اطلاعات تکراری یا اضافی طیفی و متمرکز کردن اطلاعات چند باند که کم و بیش همبستگی دارند، در یک باند با واریانس بالا مورد استفاده قرار مى‌گیرد. از روش تحلیل مولفه‌های اصلی برای تفکیک و شناسایی برخی از کانی‌ها استفاده مى‌شود. آنالیز مولفه‌های اصلی برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای در مطالعات بسیاری از محققین دیده شده است [۴۶-۴۴]. این روش برای جداسازى مناطق دگرسان شده گرمایی بسیار موفقیت‌آمیز است و به طور گسترده برای آشکارسازى دگرسانی‌ها در ایالت‌ها و کمربندهای فلزایی استفاده شده است. این روش در حالت کلی به دو صورت آنالیز مولفه‌های اصلی استاندارد و آنالیز مولفه‌های اصلی انتخابی موسوم به کراستا (Crosta) به کار گرفته مى‌شود.

در حالت اول تمامی باندهای یک تصویر در آنالیز شرکت داده شده و در حالت دوم باندهای مهم و تاثیرگذار در یک مورد خاص انتخاب و در فرآیند تحلیل مولفه‌های اصلی استفاده مى‌شود که با این کار دقت عملیات بالاتر و حجم آن کاهش مى‌یابد.

۳-۴-۴- فیلترگذاری

فیلترهای مکانی یا فراوانی مکانی به تغییرات عددی در میزان روشنایی در واحد فاصله برای هر بخش خاص از یک تصویر گفته مى‌شود. فیلترها به وسیله تولید یک دسته از وزن‌ها به پیکسل‌های متناظر نسبت به پیکسل‌های مجاور تولید مى‌شوند [۴۷]. استخراج خطواره از روی تصاویر ماهواره‌ای،

$$G_A = (F_1, F_2, \dots, F_n) = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n F_i} = \sqrt[n]{F_1 F_2 \dots F_n} \quad (1)$$

که در آن:

G_A : میانگین هندسی مجموعه داده‌های اکتشافی

F_i : مقدار عددی وزن لایه شاهد i ام

n : تعداد لایه‌ها است.

در تهیه مدل پتانسیل معدنی، پارامترهای ارایه شده در رابطه ۱، برای یک سلول واحد و یا هر پیکسل اعمال می‌شود.

۴- بحث

برای تفکیک واحدهای سنگی، در بسیاری از تحقیقات از ترکیب رنگی RGB 741 در تصاویر لندست ۸ استفاده شده است [۵۴، ۵۳]. اگر به جای باند ۴ از باند ۵ استفاده شود، تفکیک بهتری حاصل می‌شود که در آن پوشش‌های گیاهی به رنگ سبز روشن، اکسیدهای آهن به رنگ زرد متمایل به قهوه‌ای و ماسه‌سنگ‌های قرمز به رنگ سبز تیره نمایان خواهند شد. ترکیب رنگی RGB 751 از تصویر لندست ۸ در شکل ۲ آورده شده است. در این شکل نقاط زرد رنگ، محل معادن فعال موجود در برکه اسفوردی را نشان می‌دهد.

ترکیب رنگی RGB 856 در تصاویر استر از ترکیبات پرکاربرد در شناسایی کربنات‌ها است [۵۵، ۴۷]. نتیجه آن، بارزسازی کربنات‌ها و مناطق آهنی به رنگ آبی روشن (فیروزه‌ای) است. نتیجه حاصل از این ترکیب رنگی در شکل ۳ آورده شده است. با توجه به این تصویر مناطق آهنی و کربنات‌ها به خوبی بارز شده و به رنگ آبی روشن نمایان است. این واحدها غالباً در غرب و جنوب‌غربی ورقه مشاهده می‌شوند. بر اساس محدوده جذب و بازتاب آهن، نسبت باندی ۴/۲ در تصاویر سنتینل ۲ و لندست ۸، مناطق حاوی اکسید آهن را بارزسازی می‌کند [۵۷، ۵۶، ۲۷]. نتیجه حاصل از این نسبت باندی در هر دو تصویر به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل‌های ۴ و ۵، پیکسل‌های روشن بیانگر مناطق حاوی اکسیدهای آهن در این تصاویر است. مناطق حاوی اکسید آهن غالباً در بخش شمالی منطقه به چشم می‌خورد جایی که واحدهایی همچون مارن و کنگلومرا در محدوده وجود دارد، بنابراین به نظر می‌رسد، این مناطق به دلیل وجود کانی‌های رسی آهن‌دار به این صورت ظاهر شده‌اند و از هدف اصلی کانی‌زایی آهن دور هستند. مناطق نشان‌دهنده اکسید آهن در هر دو تصویر تقریباً منطبق بر هم است و نتیجه حاصل از هر کدام دیگری را تایید می‌کند.

بسیار حایز اهمیت است، زیرا نسبت به عکس‌های هوایی ابعاد وسیع‌تر و تنوع طیفی بیشتری دارد. استخراج خطوط از روی تصاویر ماهواره‌ای به شیوه‌های مختلفی شامل روش‌های خودکار، دستی و نیمه‌خودکار انجام می‌گیرد [۴۹-۴۷]. در این تحقیق از شیوه نیمه‌خودکار برای استخراج خطوط استفاده شده است. از آنجا که در داده‌های ماهواره‌ای، خطوط‌های عمود بر راستای تابش خورشید به طرز بهتری نمایان می‌شوند، بنابراین استفاده از فیلترهای جهتی نتیجه بسیار مناسبی در بارزسازی خطوط‌ها و شکستگی‌ها خواهد داد.

۳-۵- نمودار پیش‌بینی - مساحت (P-A)

در تهیه مدل پتانسیل معدنی، مکان کانسارها و آنومالی‌های شناخته شده ممکن است برای ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی کننده استفاده شود. این امر با همپوشانی مکان‌های ذخایر معدنی در یک مدل هدفمند اکتشافی طبقه‌بندی شده به دست می‌آید [۵۱، ۵۰، ۱۵].

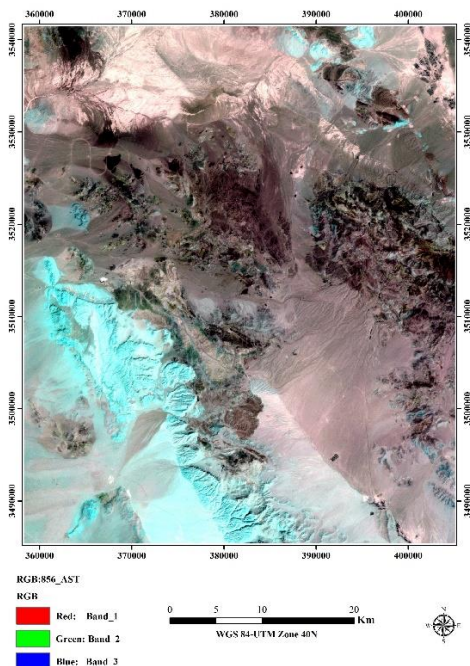
در یک نمودار پیش‌بینی - مساحت از یک لایه شاهد، دو منحنی وجود دارد. منحنی مربوط به نرخ پیش‌بینی کانی‌سازی‌های شناخته شده در منطقه و منحنی مربوط به درصد ناحیه اشغال شده به وسیله آنومالی‌های موجود است [۱۵]. در نمودار P-A برای یک لایه، اگر نمودار در نقطه تقاطع، مقدار محور عمودی بیشتری را برای منحنی چپ نشان دهد (نرخ پیش‌بینی بیشتری باشد)، پس دارای کمترین مقدار درصد مساحت در برگیرنده است و این لایه بیشترین وزن را خواهد داشت، زیرا مجموع مقدار نرخ پیش‌بینی و مساحت در برگیرنده در نقطه تلاقی برابر ۱۰۰ است. با ترسیم نمودار P-A، هر دو پارامتر نرخ پیش‌بینی و مساحت در برگیرنده از اهداف اکتشافی در ارزیابی مدل‌ها، دخالت داده می‌شوند و این باعث بالا رفتن دقت وزن‌های تخصیص یافته می‌شود. معمولاً از یک مدل فرکتال برای جداسازی جمعیت‌های مختلف در یک نقشه شاهد استفاده می‌شود. بر اساس این مدل، نقشه حاصل شده مجدداً کلاس‌بندی شده و بر اساس این نقشه کلاس‌بندی شده، نمودار پیش‌بینی - مساحت تهیه می‌شود.

۳-۶- روش میانگین هندسی

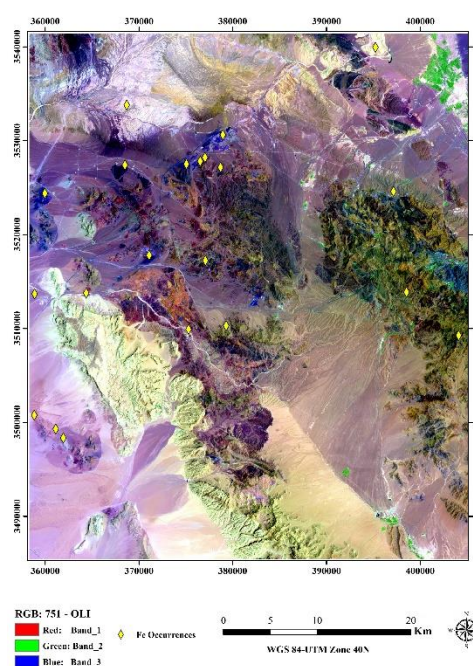
میانگین هندسی به صورت ریشه n ام از ضرب n مقدار تعریف می‌شود. رابطه میانگین هندسی برای تلفیق لایه‌های شاهد، به صورت زیر تعریف می‌شود [۵۳، ۵۲]:

برای بارزسازی مناطق گوسان نیز از نسبت باندهی ۱۱/۴ در تصویر سنتینل ۲ استفاده شد [۵۹،۵۸]. تصویر مربوطه در شکل ۶ نشان داده شده است. پیکسل‌های روشن مناطق

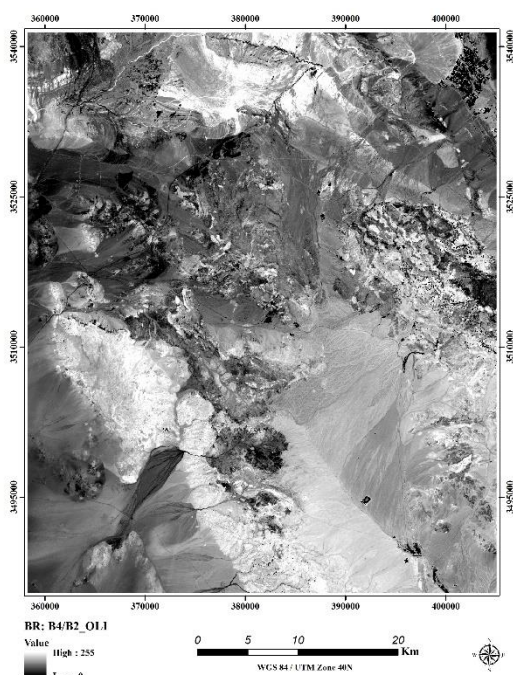
تشکیل زون گوسان را نشان می‌دهد. این مناطق ارتباط نزدیکی با وجود معادن فعال در محدوده دارد. در این تحقیق از شیوه ترکیبی انتخابی برای انجام آنالیز



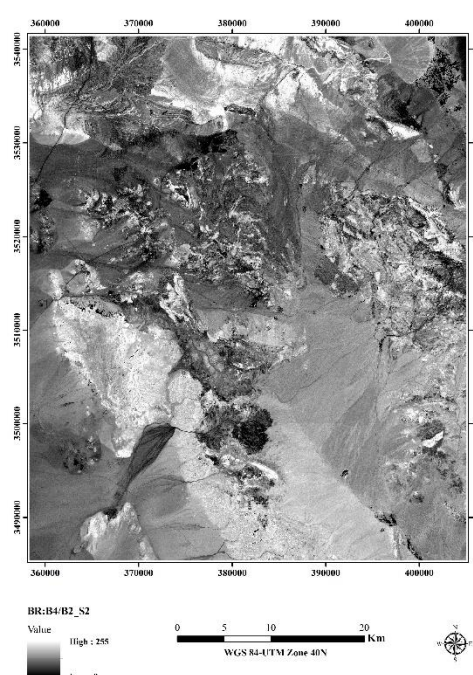
شکل ۳: ترکیب رنگی RGB ۸۵۶ در تصویر استر



شکل ۲: ترکیب رنگی RGB 751 در تصویر لندست ۸



شکل ۵: بارزسازی مناطق اکسید آهن در تصویر لندست ۸

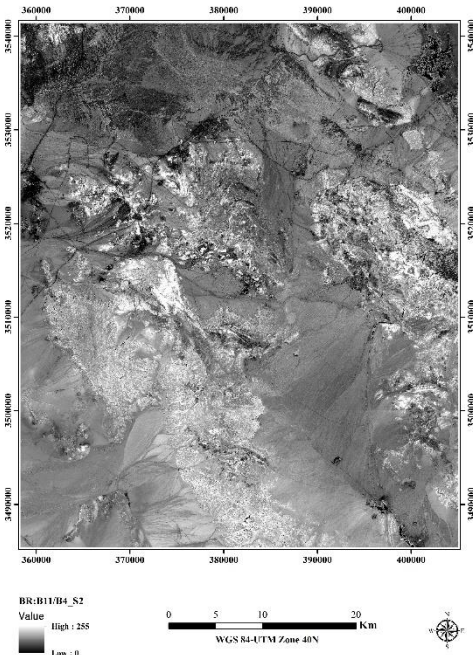


شکل ۴: بارزسازی مناطق اکسید آهن در تصویر سنتینل ۲

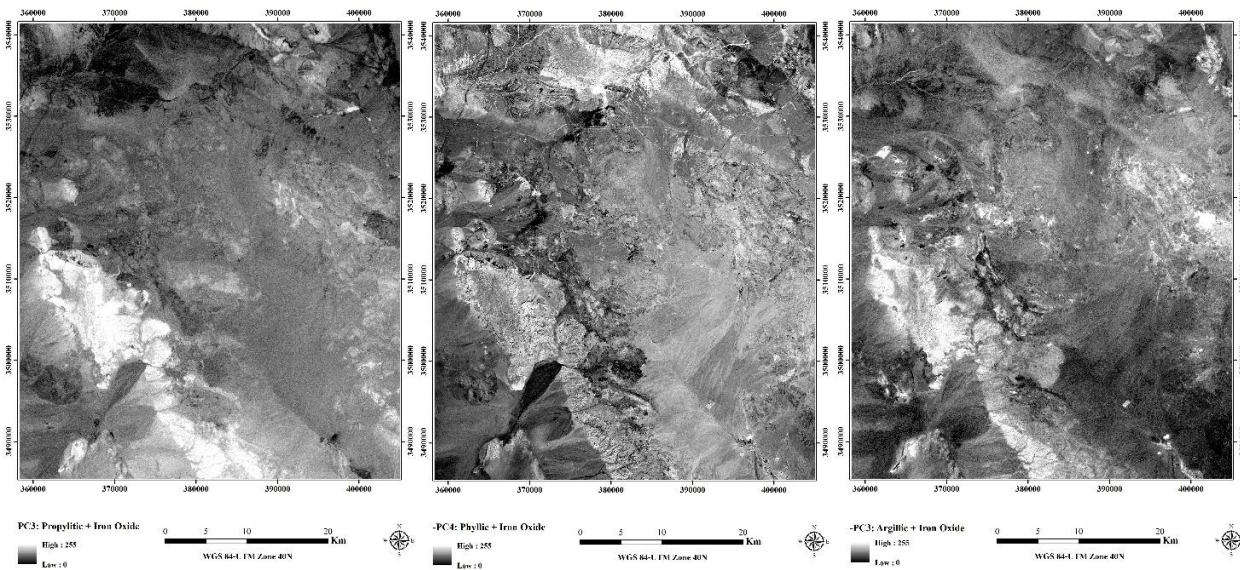
در بخش جنوب غربی ورقه اسفوردی، بیشترین تاثیر را در آن محدوده می توان مشاهده کرد. تصویر حاصل از مولفه سوم در شکل ۷-ج دیده می شود. نتایج مقادیر ویژه آنالیز مولفه های اصلی انتخابی ترکیبی در جدول ۴ آورده شده است. مولفه های

مولفه های اصلی بهره برده شده است. بدین صورت که با ترکیب باندهای شاخص هر دگرسانی از تصویر استر با باندهای ۲ و ۴ سنتینل ۲ (جذب و بازتاب آهن)، مناطق دگرسان شده آغشته به اکسید آهن شناسایی شد.

باندهای ۵ و ۴ از تصویر استر به عنوان باندهای جذب و بازتاب کانی های رسی با باند ۲ و ۴ از سنتینل ۲ ترکیب شده و آنالیز مولفه های اصلی انجام گرفت. با توجه به مقادیر ویژه حاصل، معکوس مولفه سوم مناطق دگرسانی آرژیلیتی به همراه اکسیدهای آهن را بارز می کند. تصویر حاصل از این آنالیز در شکل ۷-الف ارائه شده است. دگرسانی آرژیلیتی در غرب و جنوب شرقی محدوده مشاهده می شود. برای بارزسازی دگرسانی فیلیتی به همراه اکسید آهن از باندهای ۷ و ۵ تصویر استر به همراه باندهای ۲ و ۴ تصویر سنتینل ۲ استفاده شد. بر اساس مقادیر خروجی، معکوس مولفه چهارم دگرسانی فیلیتی آغشته به اکسیدهای آهن را بارز خواهد کرد. تصویر حاصل از این مولفه در شکل ۷-ب نیز ارائه شده است. غالب این نوع دگرسانی در بخش های شمالی و مرکزی منطقه دیده می شود. در بارزسازی دگرسانی پروپیلیتی به همراه اکسیدهای آهن، از باندهای ۸ و ۹ تصویر استر به عنوان جذب و بازتاب شاخص این دگرسانی به همراه باند ۲ و ۴ از ماهواره سنتینل ۲ استفاده شد. طبق مقادیر حاصل، مولفه سوم نتیجه مورد انتظار را ارائه می دهد. بنابر انتظار، با توجه به وجود واحدهای کربناته

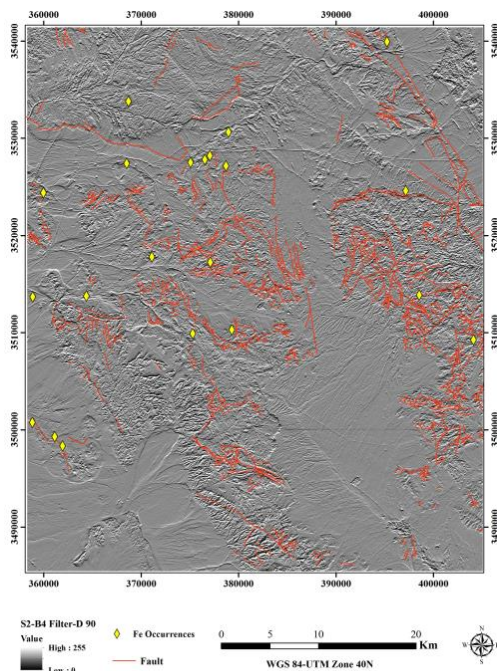


شکل ۶: بارزسازی زون گوسان در تصویر سنتینل ۲



شکل ۷: نتایج آنالیز مولفه های اصلی انتخابی ترکیبی؛ الف) معکوس مولفه سوم بارزکننده دگرسانی آرژیلیتی آغشته به اکسید آهن، ب) معکوس مولفه چهارم بارزکننده دگرسانی فیلیتی آغشته به اکسید آهن، ج) مولفه سوم بارزکننده دگرسانی پروپیلیتی آغشته به اکسید آهن

بر اساس نمودار مقدار- مساحت فرکتالی اکسید آهن (شکل ۱۲-الف)، این لایه شامل پنج کلاس است، بنابراین نقشه کلاس‌بندی آن در پنج کلاس تهیه شد (شکل ۱۲-ب). پس از آن با لحاظ کردن مکان‌های معادن فعال، نمودار پیش‌بینی- مساحت رسم شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نمودار پیش‌بینی- مساحت آن، نقطه تقاطعی در مقدار ۵۸، از منحنی نرخ پیش‌بینی دارد. بدین معنی که با ۴۲ درصد از مساحت می‌توان ۵۸ از آنومالی‌ها را توجیه کرد.



شکل ۸: ترسیم گسل‌های محدوده بر روی فیلتر تصویر سنتینل ۲

مربوطه برای نمایش هر دگرسانی با رنگ سبز مشخص شده‌اند. برای تهیه لایه خطواره‌های محدوده از باندهای ۱۰ متری تصویر سنتینل ۲ استفاده شد. همزمان از نقشه زمین‌شناسی محدوده نیز کمک گرفته شد. نتیجه حاصل از این بارزسازی بر روی باند قرمز تصویر فیلتر شده از سنتینل ۲ در شکل ۸ نشان داده شده است.

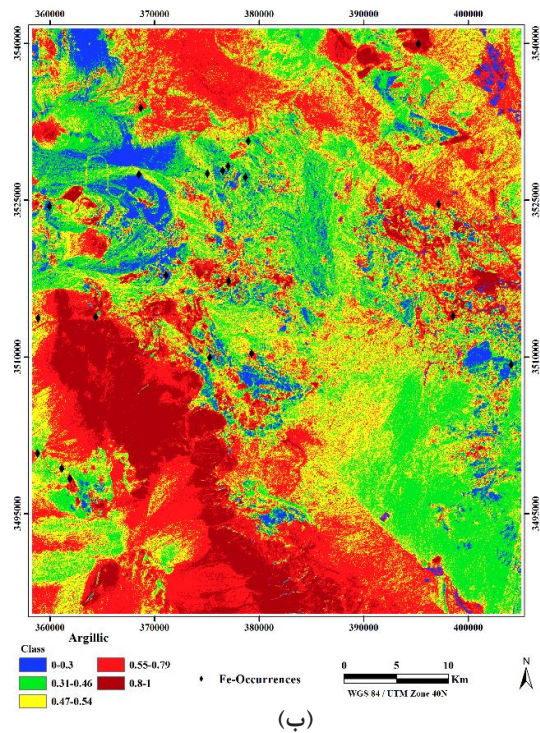
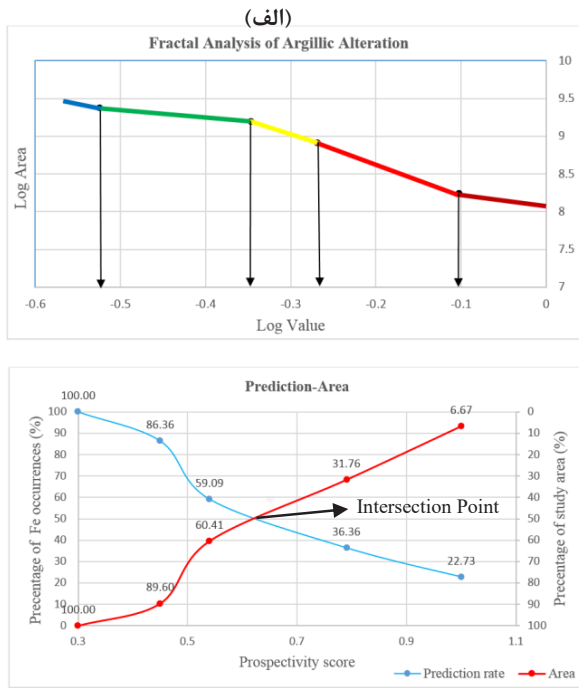
پس از انجام پردازش روی تصاویر ماهواره‌ای و تهیه لایه‌ها، با استفاده از روش فرکتال، حدود آستانه‌ای برای هر لایه با استفاده از روش مقدار- مساحت مشخص شد. بر اساس نمودارهای فرکتالی حاصل شده، لایه‌های مختلف مجدداً کلاس‌بندی و سپس با جانمایی محل معادن فعال و اندیس‌های شناخته شده در محدوده و تعیین مساحت در برگیرنده، نمودارهای پیش‌بینی- مساحت برای هر لایه تهیه شد.

به این ترتیب نقشه کلاس‌بندی شده پنج‌گانه دگرسانی آرژیلیتی بر اساس تقسیم‌بندی فراکتالی و نمودار مقدار مساحت تهیه شد (شکل ۹). پایین‌ترین کلاس به رنگ آبی و بالاترین کلاس به رنگ قهوه‌ای نشان داده شده است. بر اساس نمودار پیش‌بینی- مساحت، با ۵۰ درصد از مساحت، ۵۰ درصد از آنومالی‌ها قابل پیش‌بینی است. نقشه کلاس‌بندی دگرسانی فیلیتی شامل پنج کلاس است که نقطه تقاطع نمودار پیش‌بینی- مساحت نشان می‌دهد که با ۳۰ درصد از مساحت، ۷۰ درصد آنومالی‌ها قابل توجیه است (شکل ۱۰).

لایه مربوط به دگرسانی پروپیلیتی با چهار کلاس در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانند لایه آرژیلیتی، این لایه نیز نقطه تقاطعی در ۵۰ درصد دارد که به نوعی بیانگر وزن صفر این لایه‌ها در پتانسیل‌یابی نهایی خواهد بود.

جدول ۴: نتایج آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی ترکیبی برای سه دگرسانی آرژیلیتی، فیلیتی و پروپیلیتی به همراه اکسیدهای آهن

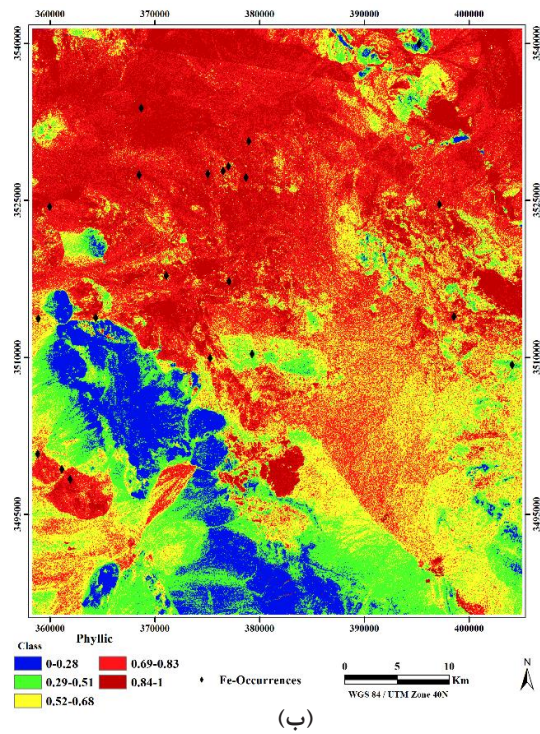
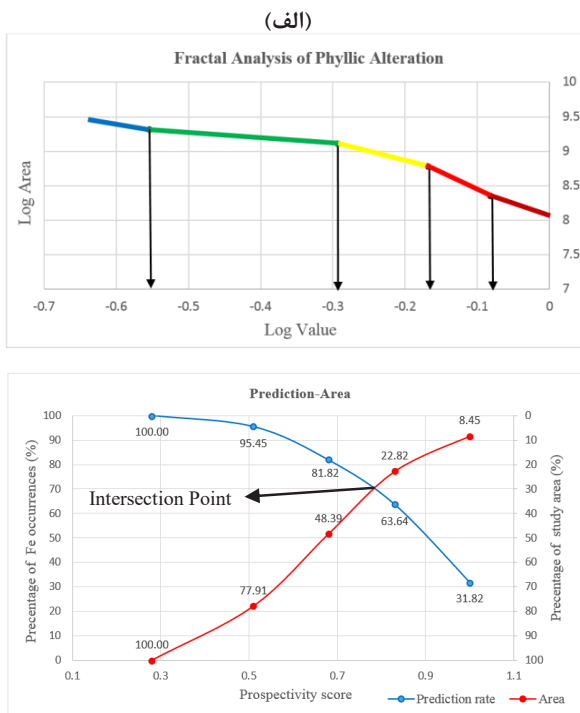
	پروپیلیتی + اکسید آهن				فیلیتی + اکسید آهن				آرژیلیتی + اکسید آهن			
	سنتینل ۲		استر		سنتینل ۲		استر		سنتینل ۲		استر	
	باند ۲	باند ۴	باند ۸	باند ۹	باند ۲	باند ۴	باند ۵	باند ۷	باند ۲	باند ۴	باند ۴	باند ۵
مؤلفه اول	-۰٫۲۷۳	-۰٫۵۵۶	-۰٫۵۲۷	-۰٫۵۸۲	۰٫۲۳۹	۰٫۴۹۱	۰٫۵۸۲	۰٫۶۰۲	-۰٫۲۰۹	-۰٫۴۳۸	-۰٫۶۸۲	-۰٫۵۴۸
مؤلفه دوم	-۰٫۴۵۵	-۰٫۶۴۱	۰٫۴۷۳	۰٫۳۹۸	۰٫۴۹۵	۰٫۶۸۰	-۰٫۳۷۰	-۰٫۳۹۳	-۰٫۵۱۶	-۰٫۷۰۸	۰٫۴۱۵	۰٫۲۴۶
مؤلفه سوم	-۰٫۲۶۱	۰٫۰۸۷	-۰٫۶۹۳	۰٫۶۶۶	۰٫۸۱۵	-۰٫۵۳۳	۰٫۲۰۸	-۰٫۰۹۱	۰٫۰۶۹	-۰٫۱۱۷	-۰٫۵۸۷	۰٫۷۹۸
مؤلفه چهارم	-۰٫۸۰۷	۰٫۵۲۲	۰٫۱۳۶	-۰٫۲۴۳	۰٫۱۸۱	-۰٫۱۱۱	-۰٫۶۹۳	۰٫۶۸۹	-۰٫۸۲۸	۰٫۵۴۲	-۰٫۱۳۶	۰٫۰۵۱



(ج)

(ب)

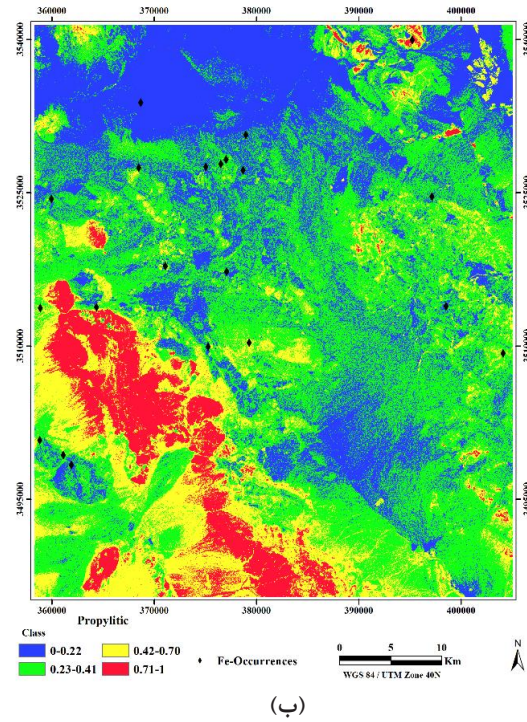
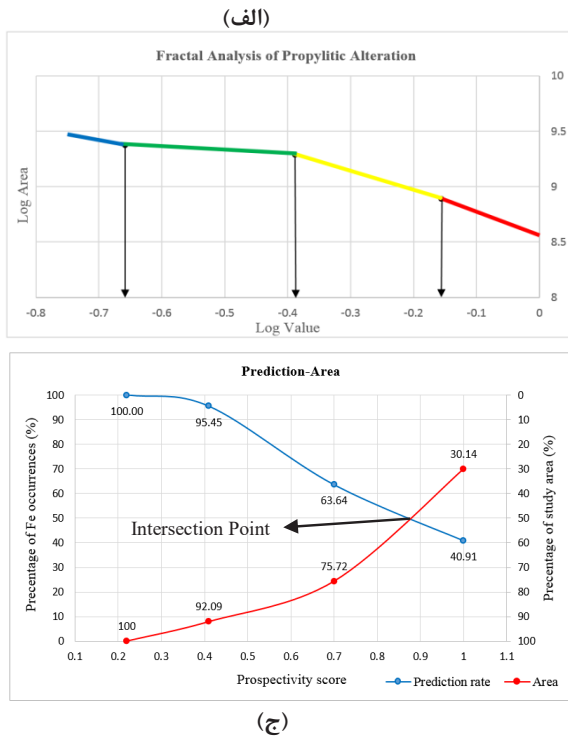
شکل ۹: نقشه کلاس بندی مجدد دگرسانی آرژیلیتی؛ (الف) نمودار تمام لگاریتمی مقدار - مساحت، (ب) نقشه شاهد دگرسانی آرژیلیتی بر اساس نمودار فرکتالی، (ج) نمودار پیش بینی - مساحت



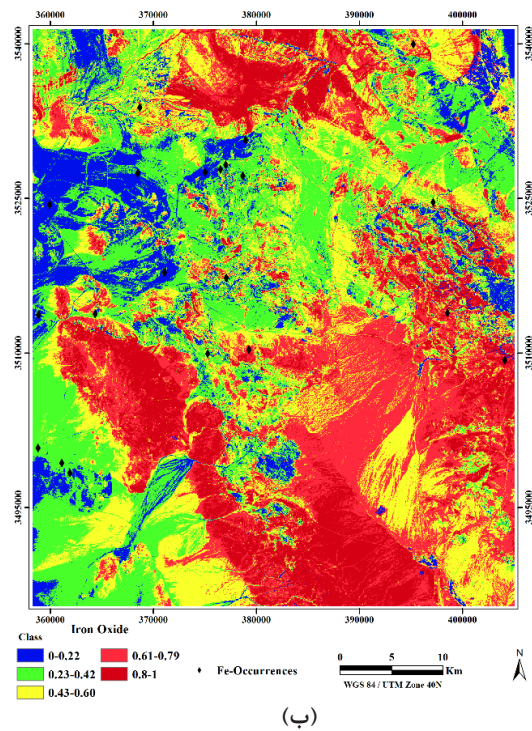
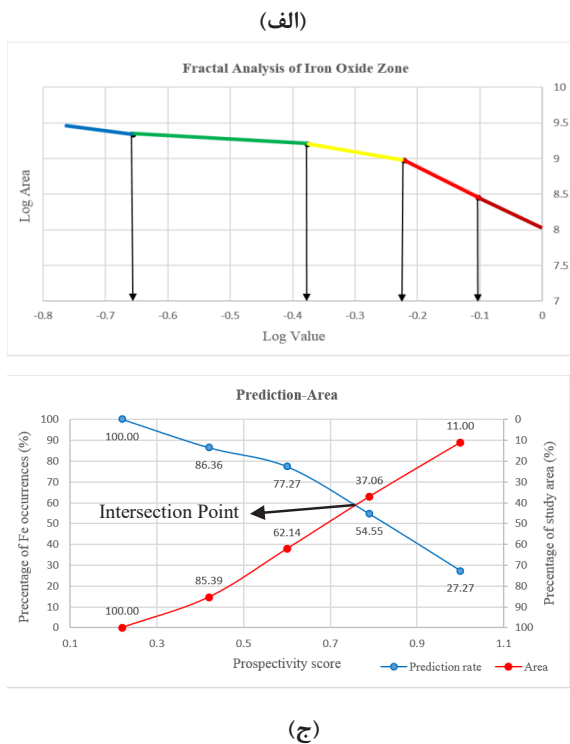
(ج)

(ب)

شکل ۱۰: نقشه کلاس بندی مجدد دگرسانی فیلیتی؛ (الف) نمودار تمام لگاریتمی مقدار - مساحت، (ب) نقشه شاهد دگرسانی فیلیتی بر اساس نمودار فرکتالی، (ج) نمودار پیش بینی - مساحت



شکل ۱۱: نقشه کلاس‌بندی مجدد دگرسانی پروپیلیتی؛ الف) نمودار تمام لگاریتمی مقدار- مساحت، ب) نقشه شاهد دگرسانی پروپیلیتی بر اساس نمودار فرکتالی، ج) نمودار پیش‌بینی- مساحت



شکل ۱۲: نقشه کلاس‌بندی مجدد اکسید آهن؛ الف) نمودار تمام لگاریتمی مقدار- مساحت، ب) نقشه شاهد اکسید آهن بر اساس نمودار فرکتالی، ج) نمودار پیش‌بینی- مساحت

مساحت محاسبه شد. با تقسیم مقدار نرخ پیش‌بینی بر مساحت در برگیرنده، چگالی نرمالایز شده به دست می‌آید و سپس با محاسبه مقدار لگاریتم چگالی، وزن لایه محاسبه می‌شود (جدول ۵).

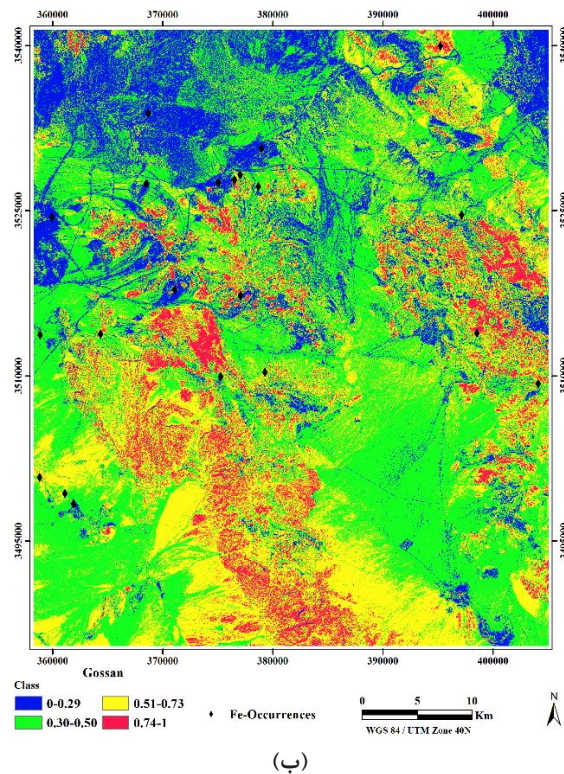
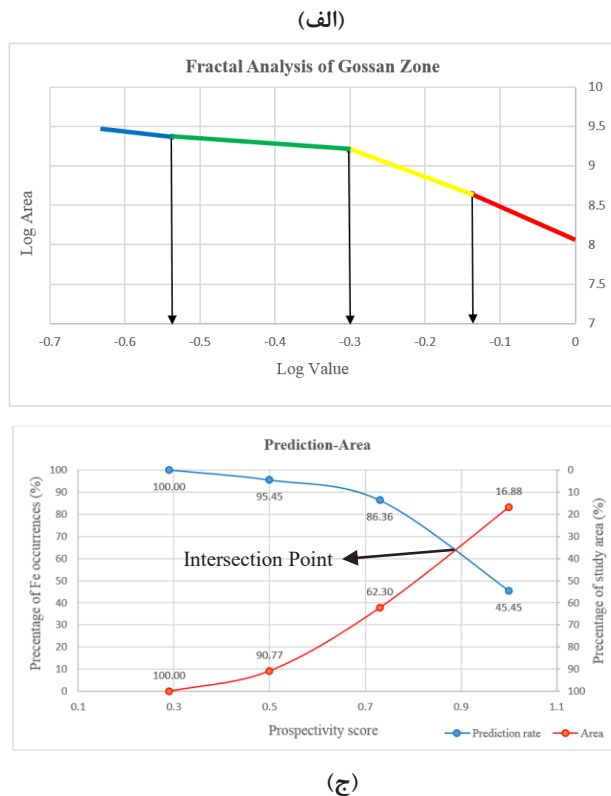
۴-۱- تلفیق لایه‌های شاهد

مطابق جدول ۵، لایه‌های دگرسانی آرژیلیتی و پروپیلیتی ضریب صفر دارند، بنابراین این دو لایه از فرآیند تلفیق حذف شده و لایه نهایی با تلفیق چهار لایه دگرسانی فیلیتی، اکسید آهن، زون گوسان و گسل‌ها با استفاده از روش میانگین هندسی تهیه می‌شود (شکل ۱۵). پس از فازی‌سازی نقشه به روش فرکتال، لایه نهایی به شش جامعه تفکیک می‌شود. بر اساس این نمودار نقشه کلاس‌بندی مجدد ترسیم و در نهایت نمودار پیش‌بینی - مساحت برای این لایه ترسیم می‌شود. طبق این نمودار با ۲۷ درصد از مساحت اشغال شده می‌توان ۷۳ درصد از آنومالی‌ها را توجیه کرد، بنابراین لایه نهایی وزن بیشتری از تک تک لایه‌ها دارد.

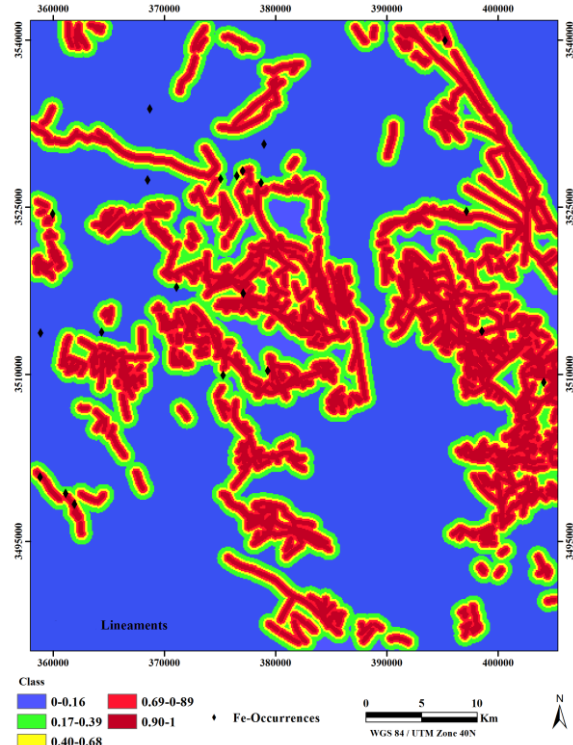
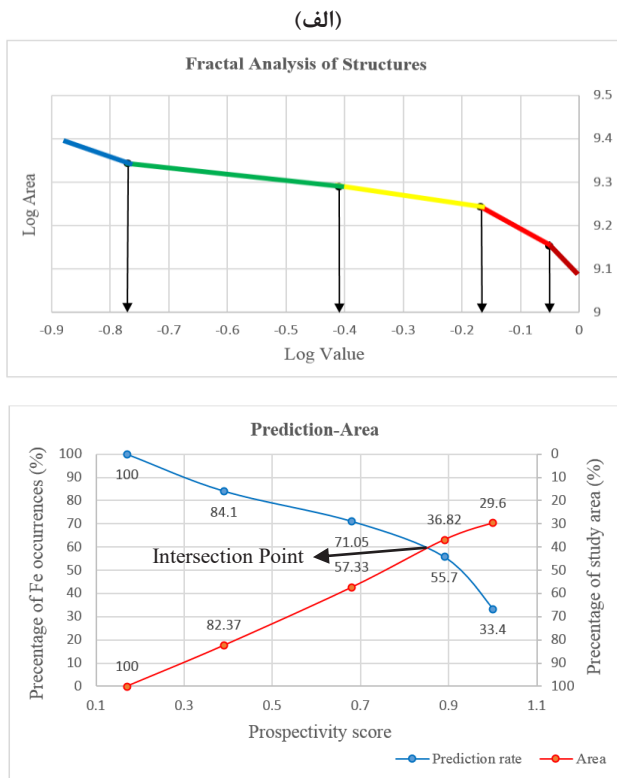
به همین ترتیب بر اساس نمودار فراکتالی لایه مناطق گوسانی (شکل ۱۳-الف)، نقشه کلاس‌بندی آن در چهار کلاس تهیه شد (شکل ۱۳-ب). مطابق این شکل، نمودار فرکتال چهار جامعه را بارز کرده است که پایین‌ترین کلاس به رنگ آبی و بالاترین کلاس به رنگ قرمز مشخص است. بر اساس داده‌های موجود نمودار پیش‌بینی - مساحت این لایه نیز رسم شد (شکل ۱۳-ج). نقطه تقاطع نمودار پیش‌بینی - مساحت آن، در نرخ پیش‌بینی ۶۴ درصد است که بیان می‌کند با ۳۶ درصد از مساحت می‌توان ۶۴ درصد آنومالی‌ها را توجیه کرد.

گسل‌های برگه اسفوردی به وسیله بافرهای ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ متری محدوده‌گذاری و سپس به کمک نمودار فرکتالی حاصل شده که پنج کلاس را نشان می‌دهد، نقشه کلاس‌بندی مجدد خطواره‌ها تهیه شد (شکل ۱۴). بر اساس نمودار پیش‌بینی - مساحت این لایه، ۶۰ درصد از آنومالی‌ها با ۴۰ درصد از مساحت اشغال شده قابل توجیه است.

با تهیه لایه گسل‌ها، شش لایه شاهد برای تلفیق نهایی آماده شده که وزن هر کدام از لایه‌ها به کمک نمودار پیش‌بینی -



شکل ۱۳: نقشه کلاس‌بندی مجدد زون گوسان؛ الف) نمودار تمام لگاریتمی مقدار - مساحت، ب) نقشه شاهد زون گوسان بر اساس نمودار فرکتالی، ج) نمودار پیش‌بینی - مساحت



شکل ۱۴: نقشه کلاس‌بندی مجدد گسل‌ها؛ (الف) نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت، (ب) نقشه شاهد گسل‌ها بر اساس نمودار فرکتالی، (ج) نمودار پیش‌بینی-مساحت

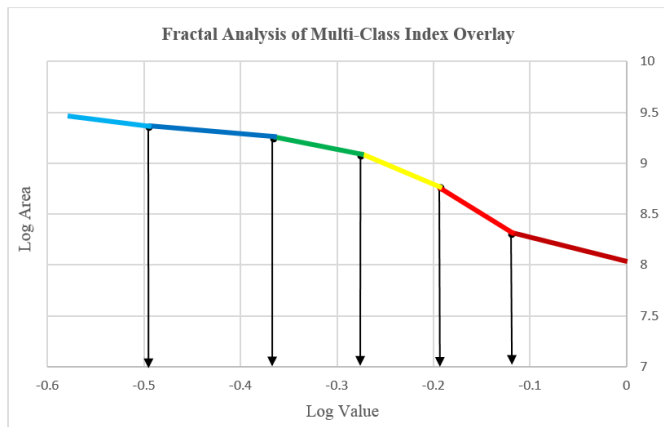
جدول ۵: لایه‌های شاهد تصاویر ماهواره‌ای و وزن تخصیص‌یافته بر اساس نمودار پیش‌بینی-مساحت

تصویر	لایه	روش	نرخ پیش‌بینی	مساحت	چگالی نرمالایز شده	وزن
استر	آرژبلیتی	نسبت باندی، آنالیز مولفه‌های اصلی	۵۰	۵۰	۱	۰
	پروپیلیتی	نسبت باندی، آنالیز مولفه‌های اصلی	۵۰	۵۰	۱	۰
	فیلیتی	نسبت باندی، آنالیز مولفه‌های اصلی	۷۰	۳۰	۲,۳۳	۰,۸۴۶
سنتینل ۲، لندست ۸	اکسید آهن	نسبت باندی، آنالیز مولفه‌های اصلی	۵۸	۴۲	۱,۳۸	۰,۳۲۳
	گوسان	نسبت باندی	۶۴	۳۶	۱,۷۸	۰,۵۷۵
سنتینل ۲	خطواره‌ها	فیلتر جهتی	۶۰	۴۰	۱,۵	۰,۴

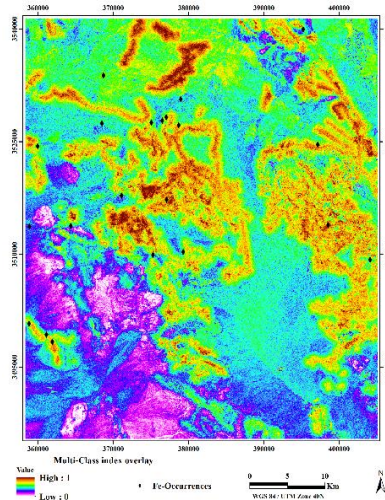
شناسایی شد. بر اساس داده‌های موجود از معادن فعال منطقه، اهمیت و تاثیر هر یک از لایه‌ها به عنوان نشانگر کانی‌زایی آهن در منطقه ارزیابی و وزن هر یک تهیه شد. جهت تعیین وزن لایه‌ها از نمودارهای پیش‌بینی-مساحت استفاده شد. لایه

۵- نتیجه‌گیری

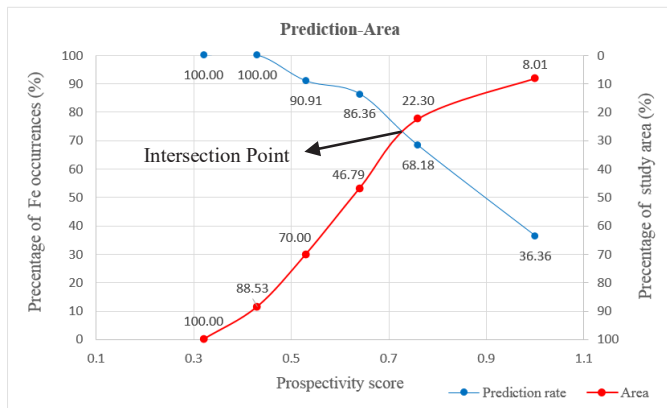
در این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲، استر و لندست ۸ محدوده برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی اسفوردی بررسی و مناطق با پتانسیل بالای این محدوده



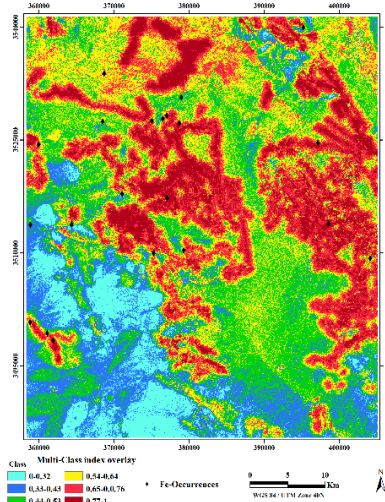
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۵: نقشه تلفیق شده همه لایه‌های شاهد؛ (الف) نقشه نهایی تلفیقی فازی شده، (ب) نمودار لگاریتمی فرکتال مقدار- مساحت لایه نهایی تلفیق شده، (ج) نقشه کلاس‌بندی مجدد لایه نهایی تلفیق شده، (د) نمودار پیش‌بینی- مساحت لایه نهایی تلفیق شده

دیگر با هم تلفیق شده و نتیجه نهایی به دست آمد. مطابق این شکل و با توجه به نقطه تلاقی دو نمودار برای این لایه می‌توان گفت ۲۷ درصد از مساحت موجود در این لایه ۷۳ درصد از آنومالی‌های را را در خود جای داده است، بنابراین همان‌طور که پیش‌بینی می‌شود نقش تلفیقی لایه‌ها نسبت به تک تک آنها مهم‌تر است و با مساحت کمتر، آنومالی‌های بیشتری توجیه می‌شوند.

با مقایسه نقشه تلفیقی حاصل و موقعیت معادن فعال و سایر اندیس‌های شناخته شده می‌توان گفت بخش‌های دیگری از منطقه مانند بخش جنوب‌شرقی ورقه به عنوان نواحی

شاهد دگرسانی فیلیتی با وزن ۰/۸۴۶، بیشترین وزن و نقش را در شناسایی مناطق آنومال و لایه‌های دگرسانی آرژیلیتی و پروپیلیتی با وزن صفر، کمترین وزن را دارا بودند. این بدان معنی است که لایه‌های دگرسانی آرژیلیتی و پروپیلیتی به عنوان یک نشانگر کانی‌زایی سنگ آهن در منطقه نمی‌توانند نقشی ایفا کنند. به این ترتیب با استفاده از نمودار پیش‌بینی- مساحت دو لایه برای تلفیق نهایی حذف شدند. این مورد ممکن است در تحقیقات و بررسی‌های آتی برای شرایط و کانی‌سازی مشابه مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از روش میانگین هندسی، لایه‌های چهارگانه

Abhandlungen, 37: pp. 248.

[8] Samani, B. A. (1988). "Metallogeny of the Precambrian in Iran". *Precambrian Research*, 39: 85-106.

[9] Mücke, A., and Younessi, R. (1994). "Magnetite-apatite deposits (Kiruna-type) along the Sanandaj-Sirjan zone and in the Bafq area, Iran, associated with ultramafic and calcalkaline rocks and carbonatites". *Mineralogy and Petrology*, 50: 219-244.

[10] Sabins, F. F. (1999). "Remote sensing for mineral exploration". *Ore Geology Reviews*, 14(3-4): 157-183.

[11] Soe, M., Kyaw, T. A., and Takashima, I. (2005). "Application of remote sensing techniques on iron oxide detection from ASTER and Landsat images of Tanintharyi coastal area, Myanmar". Scientific and Technical Reports of Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University, 26: 21-28.

[12] Haihui, H., Yilin, W., Zhuan, Z., Guangli, R., and Min, Y. (2018). "Extraction of Altered Mineral from Remote Sensing Data in Gold Exploration Based on the Nonlinear Analysis Technology". In 2018 10th IAPR Workshop on Pattern Recognition in Remote Sensing (PRRS), IEEE, 1-8.

[۱۳] اکبری، ز.، رسا، ا.، آدابی، م. ح.، محجل، م.؛ ۱۳۹۴؛ "نقشه برداری واحدهای سنگی منطقه آهنگران جنوب شرق ملایر بر پایه داده‌های ASTER". پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۲۴، ص ۳۸-۵۷

[14] Bishop, C. A., Liu, J. G., and Mason, P. J. (2011). "Hyperspectral remote sensing for mineral exploration in Pulang, Yunnan Province". *International Journal of Remote Sensing*, 32(9): 2409-2426.

[15] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2015). "Prediction-area (P-A) plot and C-A fractal analysis to classify and evaluate evidential maps for mineral prospectivity modeling". *Computers & Geosciences*, 79: 69-81.

[16] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2015). "Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping". *Computers & Geosciences*, 74: 97-109.

[17] Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A., and Carranza, E. J. M., (2014). "Application of staged factor analysis and logistic function to create a fuzzy stream sediment geochemical evidence layer for mineral prospectivity mapping". *Geochemistry: Exploration, Environmental, Analysis*, 14: 45- 58.

[18] Williams, P. J. (2010). "Classifying IOCG deposits". In: Corriveau, L., Mumin, H. (Eds.), "Exploring for iron-oxide copper- gold deposits". Canada and Global

پتانسیل‌دار و مهم در محدوده برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی اسفوردی وجود دارد، جایی که اثری از نقاط آنومال و یا معدن دیده نمی‌شود. علاوه بر این ناحیه، در مرکز و جنوب نقشه در حاشیه واحدهای کربناتی جز کلاس‌های بالای نقشه بوده و در این نواحی نیز مناطق آنومال قبلی مشاهده نمی‌شود، بنابراین به عنوان نواحی با پتانسیل بالا معرفی می‌شود و نیازمند بازدیدهای صحرائی است.

با مقایسه نقشه تلفیقی با اطلاعات زمین‌شناسی منطقه، می‌توان گفت که واحدهای سنگی ریولیتی، ریوداسیتی و سنگ‌های دولومیتی- آهکی به عنوان واحدهای میزبان کانی‌زایی در منطقه‌اند.

۶- مراجع

[1] Förster, H., and Jafarzadeh, A. (1994). "The Bafq mining district in Central Iran - a highly mineralized Infracambrian volcanic field". *Economic Geology*, 89: 1697-1721.

[2] Mohammad Torab, F. (2008). "Geochemistry and metallogeny of magnetiteapatite deposits of the Bafq Mining District, Central Iran". Doctoral Thesis, Faculty of Energy and Economic Sciences Clausthal University of Technology, pp. 131.

[3] Daliran, F., Stosch, H. G., and Williams, P. J. (2009). "A review of the Early Cambrian magmatic and metasomatic events and their bearing on the genesis of the Fe oxide-REE-apatite deposits (IOA) of the Bafq district, Iran". In: Williams, P. (Ed.), *Smart Science for Exploration and Mining*, 10th SGA Biennial, Townsville, 623-625.

[4] Ramezani, J., and Tucker, R. D. (2003). "The Saghand region, Central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics". *American Journal of Science*, 303: 622-665.

[5] Sadeghi, B., Khalajmasoumi, M., Afzal, P., Moarefvand, P., Yasrebi, A. B., Wetherelt, A., and Ziazarifi, A (2013). "Using ETM+ and ASTER sensors to identify iron occurrences in the Esfordi 1: 100,000 mapping sheet of Central Iran". *Journal of African Earth Sciences*, 85: 103-114.

[6] Ghorbani, M. (2013). "Economic geology of Iran". Springer, Berlin, pp. 569.

[7] Daliran, F. (1990). "The magnetite-apatite deposit of Mishdovan, East Central Iran. An alkali rhyolite hosted, "Kiruna type" occurrence in the Infracambrian Bafq metallotect (mineralogic, petrographic and geochemical study of the ores and the host rocks)". Ph.D. Thesis, Heidelberg, Heidelberger Geowissenschaftliche

- [29] Alvarez-Mendoza, C. I., Teodoro, A., Torres, N., Vivanco, V., and Ramirez-Cando, L. (2018). "Comparison of satellite remote sensing data in the retrieve of PM10 air pollutant over Quito, Ecuador". In Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments III, International Society for Optics and Photonics, 10793: pp. 1079301.
- [30] Trinh, R. C., Fichot, C. G., Gierach, M. M., Holt, B., Malakar, N. K., Hulley, G., and Smith, J. (2017). "Application of Landsat 8 for monitoring impacts of wastewater discharge on coastal water quality". *Frontiers in Marine Science*, 4: 329.
- [31] Gabr, S., Ghulam, A., and Kusky, T. (2010). "Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data". *Ore Geology Reviews*, 38(1-2): 59-69.
- [32] Janssen, M. A. (1994). "Atmospheric remote sensing by microwave radiometry". Available online: URI: <http://hdl.handle.net/2014/34527>, pp. 561.
- [33] Prost, G. L. (2001). "Remote Sensing for Geologists". 2nd Edn, New York: Gordon and Breach, ISBN 90-5702-629-5, pp. 374.
- [34] Siegal, B. S., and Goetz, A. F. (1977). "Effect of vegetation on rock and soil type discrimination". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43(2): 191-196.
- [35] Rouskov, K., Popov, K., Stoykov, S., and Yamaguchi, Y. (2005). "Some applications of the remote sensing in geology by using of ASTER images". In Scientific Conf. "SPACE, ECOLOGY, SAFETY" with Int. Participation, 167-173.
- [36] Wilkinson, J. J., Baker, M. J., Cooke, D. R., and Wilkinson, C. C. (2020). "Exploration targeting in porphyry Cu systems using propylitic mineral chemistry". A case study of the El Teniente deposit, Chile, *Economic Geology*, 4(115): 771-791.
- [37] Gupta, R. P. (2003). "Multispectral Imaging Systems". In *Remote Sensing Geology*, Springer Berlin Heidelberg, 75-122.
- [38] Aboelkhair, H., Ninomiya, Y., Watanabe, Y., and 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.
- [39] Mars, J. C. (2018). "Mineral and lithologic mapping capability of WorldView 3 data at Mountain Pass, California, using true-and false-color composite images, band ratios, and logical operator algorithms". *Economic Geology*, 113(7): 1587-1601.
- [40] Yan, H. P., and Yu, B. (2006). "The principal component analysis for RS image processing". *Resources Analogues: Geological Association, Canada Short Course Notes*, 20: 11-19.
- [19] Mazaheri, S. A., Andrew, A. S., and Chenhall, B. E. (1994). "Petrological studies of Sangan iron ore deposit". Center for Isotope Studies, Research Report, Sydney, Australia, 48-52.
- [20] Mohammad Torab, F., (2008). "Geochemistry and metallogeny of magnetite-apatite deposits of the Bafq Mining District, Central Iran". Doctoral Thesis, Faculty of Energy and Economic Sciences Clausthal University of Technology, pp. 131.
- [21] Daliran, F., Stosch, H. G., and Williams, P. (2007). "Multistage metasomatism and mineralization at hydrothermal Fe oxide-REE-apatite deposits and 'apatites' of the Bafq district, central-east Iran". In: Stanely, C. J. (Eds.), *Digging Deeper, Proceedings 9th Biennial SGA Meeting Dublin, Ireland*, 1501-1504.
- [22] Ramezani, J., and Tucker R. D. (2003). "The Saghand region, Central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics". *American Journal of Science*, 303: 622-665.
- [23] Hassanzadeh, J., Stockli, D. F., Horton, B. K., Axen, G. J., Stockli, L. D., Grove, M., Schmitt, A. K., and Walker, J. D. (2008). "U-Pb geochronology of late Neoproterozoic-Early Cambrian granitoids in Iran". Implications for Paleogeography, Magmatism, and Exhumation History of Iranian Basement, *Tectonophysics*, 451: 71-96.
- [24] Stosch, H. G., Romer, R. L., Daliran, F., and Rhede, D. (2011). "Uranium-lead ages of apatite from iron oxide ores of the Bafq District, East-Central Iran". *Miner Deposita*, 46: 9-21.
- [25] Torab, F. M., Lehmann, B. (2006). "Iron oxide-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran". An Overview from Geology to Mining, *World of Mining, Surface and Underground*, 58: 355-362.
- [۲۶] مجیدی، س. ا.، لطفی، م.، امامی، م.، نظافتی، ه.؛ ۱۳۹۴؛ ژنز کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت: بر پایه مطالعه آپاتیت‌های پهنه بافق-ساغند، ایران مرکزی". فصلنامه علمی-پژوهشی علوم زمین، دوره ۲۷، شماره ۱۰۵، ص ۲۳۳-۲۴۴.
- [27] Pahlevan, N., Sarkar, S., Franz, B. A., Balasubramanian, S. V., and He, J. (2017). "Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) data processing for aquatic science applications". *Demonstrations and Validations, Remote Sensing of Environment*, 201: 47-56.
- [28] Caballero, I., Fernández, R., Escalante, O. M., Mamán, L., and Navarro, G. (2020). "New capabilities of Sentinel-2A/B satellites combined with in situ data for monitoring small harmful algal blooms in complex coastal waters". *Scientific Reports*, 10(1): 1-14.

- [51] Nyka"nen, V., Lahti, I., Niiranen, T., and Korhonen, K. (2015). "Receiver operating characteristics (ROC) as validation tool for prospectivity models—a magmatic Ni–Cu case study from the Central Lapland Greenstone Belt, Northern Finland". *Ore Geology Reviews*, 71: 853-860.
- [52] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2015). "Geometric average of spatial evidence data layers: a GIS-based multi-criteria decision-making approach to mineral prospectivity mapping". *Computers & Geosciences*, 83: 72-79.
- [۵۳] قاسم زاده، س.، مقصودی، ع.، یوسفی، م.؛ ۱۳۹۷؛ "به کارگیری روش میانگین هندسی برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی مس پورفیری در ناحیه بافت کرمان". فصلنامه علمی-پژوهشی علوم زمین، دوره ۲۹، شماره ۱۱۳، ص ۱۳۰-۱۲۳.
- [54] Abdelmalik, K. W. (2019). "Landsat 8: Utilizing sensitive response bands concept for image processing and mapping of basalts". *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(3): 263-274. DOI:10.1016/j.ejrs.2019.04.004.
- [55] Kavak, K. S., and Cetin, H. (2007). "A detailed geologic lineament analysis using Landsat TM data of Göl̄marmara/Manisa region, Turkey". *Online Journal of Earth Sciences*, 1(3): 145-153.
- [56] Ourhzi, Z., Algouti, Ah., Algouti, Ab., and Hadach, F. (2019). "Lithological Mapping using Landsat 8 OLI and ASTER Multispectral Data in Imini-Ounilla District South high Atlas of Marrakech". *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, Volume XLII-2/W13, ISPRS Geospatial Week 2019, 10–14 June, Enschede, The Netherlands.
- [57] Van der Meer, F. D., Van der Werff, H. M. A., and Van Ruitenbeek, F. J. A. (2014). "Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications". *Remote Sensing of Environment*, 148: 124-133.
- [58] Van der Werff, H., and Van der Meer, F. (2015). "Sentinel-2 for mapping iron absorption feature parameters". *Remote Sensing*, 7(10): 12635-12653.
- [59] Van der Werff, H., and Van der Meer, F. (2016). "Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI provide data continuity for geological remote sensing". *Remote Sensing*, 8(11): 883.
- [60] Salehi, S., Mielke, C., Brogaard Pedersen, C., and Dalsenni Olsen, S. (2019). "Comparison of ASTER and Sentinel-2 spaceborne datasets for geological mapping". *A case study from North-East Greenland, Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, 43: e2019430205. DOI: <https://doi.org/10.34194/GEUSB-201943-02-05>.
- Environment & Engineering, 20(2): 168-170.
- [41] Zoran, M. A., Savastru, R. S., Savastru, D. M., Miclos, S. I., and Tautan, M. M. (2009). "Remote sensing techniques for mining waste characterization". In *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology IX*, International Society for Optics and Photonics, 7478: pp. 74780Q.
- [42] Coelho, P. A., Sandoval, C., Alvarez, J., Sanhueza, I., Godoy, C., Torres, S., Toro, C., and Sbarbaro, D. (2019). "Automatic near-infrared hyperspectral image analysis of copper concentrates". *IFAC-PapersOnLine*, 52(14): 94-98.
- [43] Shahrari, H., Ranjbar, H., and Honarmand, M. (2013). "Image segmentation for hydrothermal alteration mapping using PCA and concentration–area fractal model". *Natural Resources Research*, 22(3): 191-206.
- [44] Rajendran, S., Al-Khribash, S., Pracejus, B., Nasir, S., Al-Abri, A. H., Kusky, T. M., and Ghulam, A. (2012). "ASTER detection of chromite bearing mineralized zones in Semail Ophiolite Massifs of the northern Oman Mountains". *Exploration strategy. Ore geology reviews*, 44: 121-135.
- [45] Pazand, K., Sarvestani, J. F., and Ravasan, M. R. S. (2013). "Hydrothermal alteration mapping using ASTER data for reconnaissance porphyry copper mineralization in the Ahar area, NW Iran". *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 41(2): 379-389.
- [46] Khaleghi, M., Ranjbar, H., Shahabpour, J., and Honarmand, M. (2014). "Spectral angle mapping, spectral information divergence, and principal component analysis of the ASTER SWIR data for exploration of porphyry copper mineralization in the Sarduiyeh area, Kerman province, Iran". *Applied Geomatics*, 6(1): 49-58.
- [47] Jensen, J. R. (2005). "Introductory Digital Image processing". 3rd edition, Prentice Hall, pp. 526.
- [48] Amer, R., El Mezayen, A., and Hasanein, M. (2016). "ASTER spectral analysis for alteration minerals associated with gold mineralization". *Ore Geology Reviews*, 75: 239-251.
- [49] Rezaei, A., Hassani, H., Moarefvand, P., and Golmohammadi, A. (2020). "Lithological mapping in Sangan region in Northeast Iran using ASTER satellite data and image processing methods". *Geology, Ecology, and Landscapes*, 4(1): 59-70.
- [50] Carranza, E. J. M., and Laborte, A. G. (2016). "Data-driven predictive modeling of mineral prospectivity using random forests". *A case study in Catanduanes Island (Philippines)*, *Natural Resources Research*, 25: 35-50.