



Imam Khomeini International University
Vol. 9, No. 1, Spring 2024



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

Research Paper

Comparing the Performance of ASTER and LANDSAT 8 Satellite Images in Identifying Iron Oxide and Porphyry Copper Alterations in Zafarghand Region of Isfahan Province

Esmaelzadeh Kalkhoran S.¹, Ghannadpour S.S.^{2*}, Moeini Rad A.³, Jalili H.³

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

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

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

Received: 16 Oct. 2023

Accepted: 31 Oct. 2023

Abstract: Separation and mapping of alteration zones is of special importance in the exploration of porphyry copper types. In order to highlight these alteration zones, remote sensing techniques have been applied. Zafarghand region is located in the southeast of Ardestan and northeast of Isfahan. Based on the division of geological structural zones, it is located in the Central Iran zone and also in the middle part of Urmia-Dokhtar magmatic volcanic arc. In this area, there are different alteration halos, including phyllic, potassic, propylitic, argillic, and slightly siliceous. In this study, argillic, phyllic, propylitic, and clay alterations have been identified using ASTER sensor images. Moreover, LANDSAT 8 images have been employed to identify clay and iron oxide alterations. In this regard, after performing the necessary pre-processing, methods of False Color Combination (FCC), Band Ratio (BR), Least Squares-Fit (LS-Fit), Matched Filtering (MF), and Principal Component Analysis (PCA) were applied to reveal the zones containing these alterations. Among the applied methods, the LS-Fit and MF in Aster images, as well as the BR method in both images, and the PCA method in Landsat 8 have brought good results.

Keywords: Zafarghand, Remote sensing, Alteration, Iron oxide, ASTER and LANDSAT 8 sensor.

How to cite this article

Esmaelzadeh Kalkhoran, S., Ghannadpour, S. S., Moeini Rad, A., and Jalili, H. (2024). "Comparing the performance of ASTER and LANDSAT 8 satellite images in identifying iron oxide and porphyry copper alterations in Zafarghand region of Isfahan province". Journal of Mineral Resources Engineering, 9(1): 41-65.

DOI: [10.30479/JMRE.2023.19459.1669](https://doi.org/10.30479/JMRE.2023.19459.1669)

*Corresponding Author Email: s.ghannadpour@aut.ac.ir

COPYRIGHTS



©2024 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

Everything has a different and special reaction to radiant energy, which is determined by the way of different degrees of energy reflection. The ratio of reflected, absorbed, and transmitted energy in different phenomena for a wavelength is different and depends on the type of material and their conditions and status. These differences make it possible to identify different phenomena on the image. The ratio of energy in the three mentioned states for a given phenomenon also differs in different wavelengths [1]. The purpose of this article is to study and compare the efficiency of two sensors widely used in remote sensing (ASTER and OLI) in the prospecting area of Zafarghand (as an already known area) on which previous studies have been conducted and the existence of alterations has been confirmed by field studies.

CASE STUDY

The Zafarghand copper exploration area is located in 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 [2]. 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 [2].

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 and for comparing the performance of two different satellites in highlighting known alterations in the Zafarghand region, ASTER and Landsat 8 satellite images will be utilized. In this regard, after performing the necessary pre-processing, methods of False Color Combination (FCC), Band Ratio (BR), Least Squares-Fit (LS-Fit), Matched Filtering (MF), and Principal Combination Analysis (PCA) will be applied to reveal the zones containing these alterations. Figure 1 illustrates the steps of this study in the form of a flowchart.

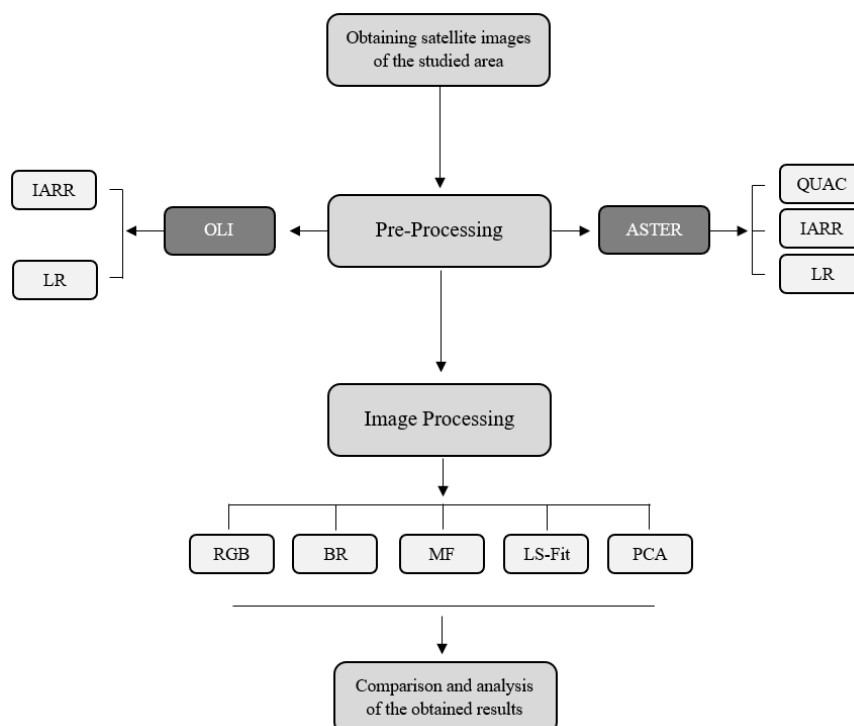


Figure 1. The flowchart of various stages and the process of the task execution

DISCUSSION AND CONCLUSION

Based on the results, it seems that due to the higher radiometric resolution in the OLI image, these images have a better use in highlighting the desired phenomena. Comparing the performance of ASTER and OLI sensors shows that ASTER has better spatial resolution and spectral resolution due to having 5 bands in the SWIR range compared to Landsat's 2 bands. It has a better ability to identify alterations, including the separation of phyllic from argillic alterations. In this study, Landsat 8 was used to separate iron oxides and ASTER data to determine hydrothermal alterations. Among the processes performed on the image of ASTER sensor, BR, MF, and PCA methods have highlighted the alterations in the area well and with high accuracy. The LS-Fit method in the ASTER image was only suitable for highlighting argillic alteration and did not perform well for phyllic and propylitic alteration, but the Landsat 8 image provided acceptable results for iron oxide and argillic alterations. The results of the above methods are in an acceptable agreement with the alteration map of the area. The output obtained for potassic alteration with the matched filtering method was also acceptable based on the absence of potassic alteration in the alteration map of Zafarghand area and there were no bright spots indicating the presence of potassic alteration in Zafarghand area. Other methods have not provided an acceptable performance in the case of phyllic alteration, and the PCA method was more suitable for characterizing propylitic alteration than other methods. Most of the methods applied to the images of the studied area have identified argillic alteration well. Finally, it could be acknowledged that Landsat 8 has been more successful in characterizing clay alterations than ASTER.

EFERENCES

- [1] Campbell, J. B., and Wynne, R. H. (2011). *"Introduction to Remote Sensing"*. Fifth Edition, Ukraine: Guilford Publications.
- [2] 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)



مقایسه عملکرد تصاویر ماهواره‌ای استر و لندست ۸ در بارزسازی اکسید آهن و دگرسانی‌های مس پورفیری در منطقه ظفرقند استان اصفهان

سمانه اسمعیل‌زاده کلخوران^۱، سید سعید قنادرپور^۲، امیر معینی راد^۳، هادی جلیلی^۳

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

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

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

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۹

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۴

چکیده

تفکیک و به نقشه در آوردن زون‌های دگرسانی در اکتشاف تیپ‌های مس پورفیری اهمیت ویژه‌ای دارد. برای بارزسازی این زون‌های دگرسانی از تکنیک‌های سنجش از دور استفاده شده است. منطقه ظفرقند، در جنوب‌شرق اردستان و شمال‌شرق اصفهان، واقع شده است. بر اساس تقسیم‌بندی زون‌های ساختاری زمین‌شناسی در زون ایران مرکزی و همچنین در بخش میانی کمان آتشفشانی ماگمایی ارومیه-دختر قرار دارد. در این منطقه، هاله‌های دگرسانی مختلفی وجود دارد که شامل فیلیک، پتاسیک، پروپیلیتیک، آرژیلیک و کمی سیلیسی است. در این مطالعه با استفاده از تصاویر سنجنده استر، به شناسایی دگرسانی‌های رسی، آرژیلیک، فیلیک، پروپیلیتیک پرداخته شده است. همچنین از تصاویر لندست ۸ برای شناسایی دگرسانی‌های رسی و اکسید آهن استفاده شده است. در این راستا، پس از انجام پیش‌پردازش‌های لازم، روش‌های ترکیب رنگی کاذب (FCC)، نسبت باندهای (BR)، کمترین مربعات رگرسیون شده (LS-Fit)، فیلترگذاری تطبیقی (MF) و آنالیز مولفه اصلی (PCA) جهت آشکارسازی زون‌های حاوی این دگرسانی به کار گرفته شدند. از روش‌های بهره‌گرفته شده روش کمترین مربعات رگرسیون شده، فیلترگذاری تطبیقی در تصاویر استر و همچنین روش نسبت باندهای در هر دو تصویر و روش آنالیز مولفه اصلی در لندست نتیجه مناسبی را به همراه داشته است.

کلمات کلیدی

ظفرقند، سنجش از دور، دگرسانی، اکسید آهن، سنجنده استر و لندست.

استناد به این مقاله

اسمعیل‌زاده کلخوران، س.، قنادرپور، س.، معینی راد، ا.، جلیلی، ه.، ۱۴۰۳؛ "مقایسه عملکرد تصاویر ماهواره‌ای استر و لندست ۸ در بارزسازی اکسید آهن و دگرسانی‌های مس پورفیری در منطقه ظفرقند استان اصفهان". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره نهم، شماره ۱، ص ۶۵-۴۱.

DOI: 10.30479/JMRE.2023.19459.1669



۱- مقدمه

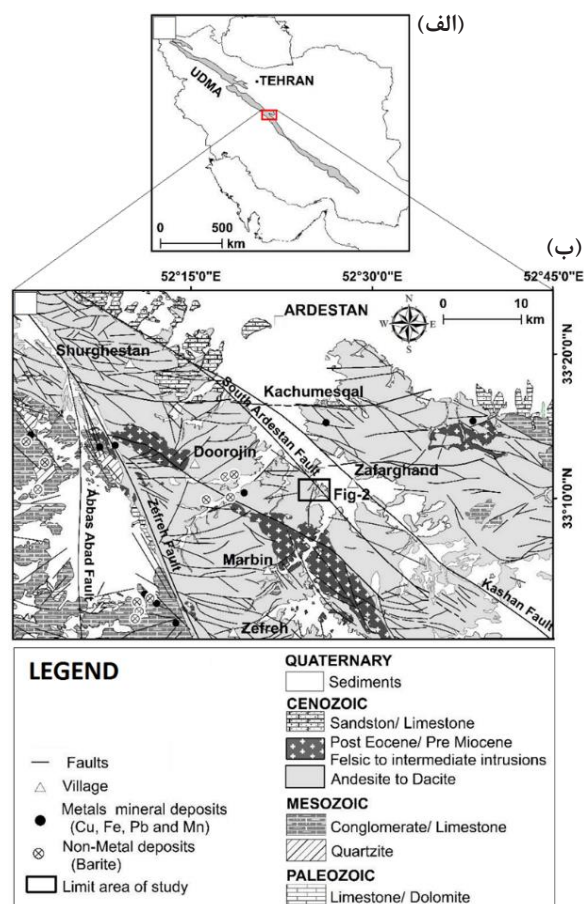
کارهای اکتشافی اولیه در منطقه به شکل تهیه نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ برداشت نمونه‌های سنگی و برداشت مقاطع زمین فیزیکی در منطقه بوده است [۲].

پس از آن مطالعات ژئوشیمیایی و پترولوژیکی متعددی چون [۱۱-۳] 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 پتروژنر توده گرانیتوئیدی ظفرقند توسط صادقین و قفاری بررسی و مطالعه شد [۱۲]. امین‌الرعیایی 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 توسط اعلامی نیا و همکاران در سال ۱۳۹۶ انجام شد [۱]. امین‌الرعیایی یمینی و همکاران همچنین در مطالعه دیگری به تشریح تحولات سیستم ماگمایی این کانسار نیز با در نظر گرفتن پلاژیوکلاز به عنوان شاهد، پرداختند [۱۴]. در پژوهش دیگری ارتباط کانی‌سازی با پهنه‌های دگرسانی با ساختارهای زمین‌ساختی به کمک مطالعات دورسنجی توسط محمدی و همکاران بررسی شد [۱۵]. در سال ۲۰۱۶ میلادی، کلریتی شدن بیوتیت برای بارزسازی پارامترهای فیزیکوشیمیایی کانی‌سازی و دگرسانی مرتبط در سیستم مس پورفیری ظفرقند مورد تحلیل شیمی کانی‌ها و ایزوتوپ پایدار قرار گرفت [۱۶].

شناسایی مناطق آلتزه شده با توجه به وسعت آنها به وسیله تکنیک سنجش از دور به راحتی میسر است و نمونه‌های موفق نیز تاکنون انجام شده است. اسدی هارونی در سال ۲۰۰۲ در بررسی مدل طلای زرشوران با ترکیب رنگی تصاویر حاصل از آنالیز مولفه اصلی، محدوده دگرسان گرمایی و محدوده اکسید آهن را شناسایی و تفکیک کرده است [۱۷]. وی در ادامه مطالعات با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته دورسنجی موفق به کشف دو محدوده مس-طلا دالی در استان مرکزی و محدوده مس-مولیبدن کهنک در شهر اردستان شده است. اصلانی و همکاران در سال ۱۳۷۸ تفکیک زون‌های آلتراسیون را در محدوده اندیس مس-طلا سربیشه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای Aster انجام داده‌اند [۱۸].

در سنجش از دور مقدار و توزیع طیفی انرژی انعکاسی تبدیل می‌شود تا اینکه ماهیت اشیای منعکس شده شناسایی و استنتاج شود. فرض بر آن است که هرچیزی عکس‌العمل مختلف و ویژه‌ای در قبال انرژی تابشی دارد که به نحوه درجات

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 صورت گرفته که در ادامه به شرح مختصری از آنها پرداخته خواهد شد.



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

چشمگیری دارد [۲۱].

به طور خلاصه واحدهای سنگی در منطقه به شرح زیر است [۲۱]:

- سنگ‌های رسوبی از جمله سنگ‌های آهک و آهک دولومیتی، کنگلومرا، ماسه‌سنگ، شیل، مارن
- سنگ‌های آذرین که به دو دسته توده‌های ولکانیکی (ریولیت، آندزیت و بازالت) و توده‌های نفوذی (گرانیت، دیوریت، مونزودیوریت و گابرو) تقسیم می‌شوند.
- سنگ‌های آذرآواری شامل توف، ایگنمبریت، توف ریولیتی، توف ماسه‌ای و توف برشی
- از گسل‌های مهم در منطقه می‌توان به گسل اصلی میلاجرد- زفره و گسل‌های راندگی گچومثقال- گنجان و کوه دوشاخ اشاره کرد که روند کلی شمال باختری- جنوب خاوری و خاوری- باختری را دارند.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه اکتشافی مس ظفرقند در جنوب شرقی اردستان در ۱۱۰ کیلومتری شمال شرق اصفهان در ایران مرکزی واقع شده است. این کانسار در غرب ظفرقند به عنوان بخشی از برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان با جغرافیایی "۵۲°۲۳'۵۵" تا "۵۲°۲۶'۳۰" طول شرقی و "۳۳°۱۱'۵۲" تا "۳۳°۱۰'۳۰" عرض شمالی قرار دارد (شکل ۲) [۱]. برای دستیابی به منطقه می‌توان از راه‌های آسفالت اردستان- ناپین 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 است 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 رخنمون دارند که در ادامه به شرح واحدهای سنگی پرداخته می‌شود [۱].

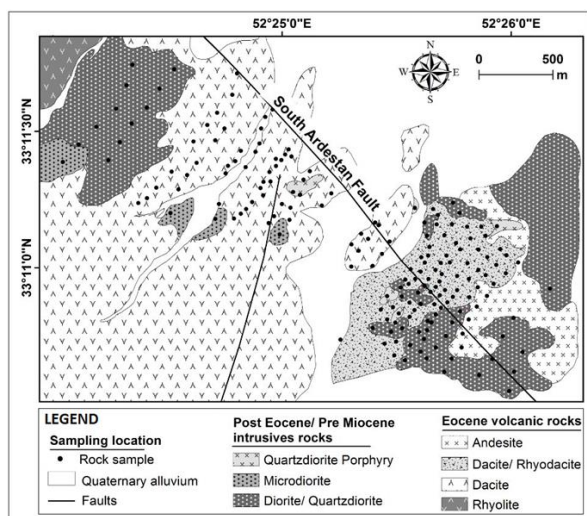
ریولیت در انتها الیه گوشه شمال غربی با رنگ خاکستری صورتی برون‌زد نسبتاً کوچکی در سطح دارد (شکل ۲). بافت این سنگ‌ها پورفیری با خمیره شیشه‌ای جریانی است. داسیت و ریوداسیت‌ها محدوده وسیعی از منطقه را با رنگ خاکستری

مختلف انعکاس انرژی مشخص می‌شود. نسبت انرژی منعکس شده، جذب شده و عبور یافته در مورد پدیده‌های مختلف برای یک طول موج تفاوت داشته و به نوع ماده و شرایط و وضعیت آنها بستگی دارد. این تفاوت‌ها، شناسایی پدیده‌های متفاوت بر روی تصویر را میسر می‌سازد. نسبت انرژی در سه حالت یاد شده برای یک پدیده معین نیز در طول موج‌های مختلف فرق می‌کند [۱۹]. هدف از این مقاله بررسی و مقایسه کارایی دو سنجنده پرکاربرد در علم سنجش از دور در منطقه اکتشافی ظفرقند (به عنوان منطقه‌ای شناخته شده از قبل) که مطالعات قبلی بر روی آن صورت گرفته و وجود دگرسانی‌ها به وسیله نمونه‌های زمینی تایید شده است.

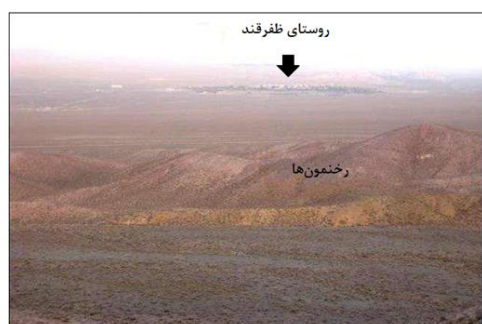
برای اعتبارسنجی نتایج حاصل، بهتر است از داده‌های زیر سطحی استفاده شود که در منطقه مورد مطالعه این داده‌ها در دسترس نبوده است.

۲- زمین‌شناسی منطقه اردستان

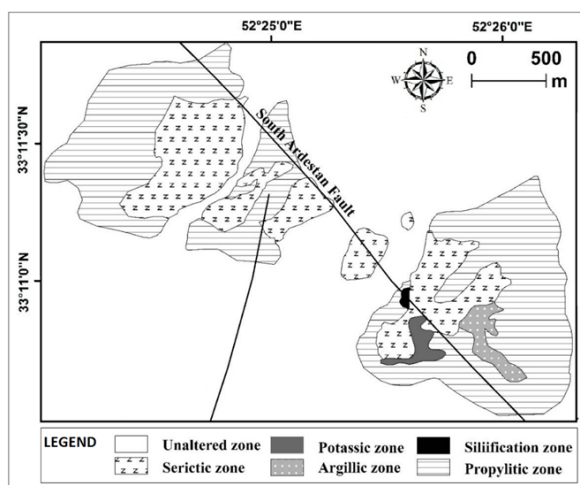
برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان در بخش جنوبی چهار گوش ۱:۲۵۰۰۰۰ کاشان در ۵۲° تا ۵۲° ۳۰' طول خاوری و ۳۳° تا ۳۳° ۳۰' عرض شمالی در شمال باختری استان اصفهان قرار گرفته است. بخش اعظم این ناحیه در زون ساختاری ارومیه- دختر واقع شده و محدوده‌ای در جنوب باختری این برکه، زون سندانج- سیرجان را شامل می‌شود. بیشتر رخنمون‌های ناحیه شامل سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری با ترکیب میانه تا بازیک مربوط به فعالیت آتشفشانی ائوسن میانی تا پسین است. سنگ‌های نفوذی این منطقه از نظر زمانی طیف گسترده‌ای داشته و مربوط به یک فاز نیمه ژرف با سن الیگوسن و الیگومیوسن و یک فاز کم ژرفا با سن پلیوسن است که ترکیب نیمه اسیدی و اسیدی دارند. توده‌های نفوذی در فازهای گوناگون سبب دگرسانی و کانی‌سازی فلزاتی از جمله مس، مولیبدن، طلا، سرب، روی، آهن و نظایر آنها در منطقه شده‌اند [۲۰]. ورقه یکصد هزارم اردستان در بخش‌هایی از زون‌های ایران مرکزی قرار دارد و عمدتاً از سنگ‌های آتشفشانی و آتشفشانی- رسوبی وابسته به آن تشکیل شده است، که این سنگ‌ها به طور عمده به ترشیری تعلق داشته و توده‌های نفوذی متعددی با ترکیب متوسط تا بازیک در داخل آنها نفوذ کرده‌اند. به طور کلی در این منطقه سنگ‌های رسوبی، آذرین و آذرآواری از پالئوزوئیک تا عهد حاضر برون‌زد داشته و در این میان فعالیت‌های آتشفشانی ائوسن گسترش



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه اکتشافی ظفرقند (پس از تغییرات از [۱])



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])

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 رخنمون نسبتاً بزرگی دارند (شکل ۲) و به رنگ خاکستری تیره دیده می‌شوند و به علت فراوانی درشت بلورها به شکل حفره‌ای هستند. توده‌های نفوذی دیوریت، کوارتز دیوریت و میکرو دیوریت در شمال غربی و جنوب شرقی منطقه با رنگ خاکستری تیره برون‌زد دارند. توده نیمه نفوذی کوارتز دیوریت پورفیری در جنوب شرقی منطقه، وسعت کوچکی را می‌پوشاند (شکل ۲).

کانسار مس کهنگ غربی، در استان اصفهان در حدود ۶۵ کیلومتری جنوب شهرستان اردستان و در ۲ کیلومتری بخش غربی آبادی کهنگ واقع شده است. این کانسار در قسمت میانی کمر بند ارومیه- دختر قرار گرفته است و توالی سنگ‌شناسی گستره‌ای از سنگ‌های آذرین فلسیک تا مافیک را در برمی‌گیرد. واحدهای سنگی به دلیل تاثیر محلول‌های گرمابی، دچار دگرسانی و تغییر در ترکیب و بافت شده‌اند. سنگ‌های آذرین بیرونی شامل سنگ‌های گدازه‌ای با ترکیب بازالتی، آندزیت بازالتی و آندزیتی و سنگ‌های آذرآواری دارای ترکیب آندزیتی، داسیتی و ریوداسیتی است. سنگ‌های آذرین درونی دارای ترکیب دیوریتی، گرانودیوریتی، داسیتی و دیابازی و به شکل توده‌های نفوذی عمیق، نیمه عمیق و دایک هستند [۲۳، ۲۲].

۲-۲- دگرسانی و کانی‌سازی

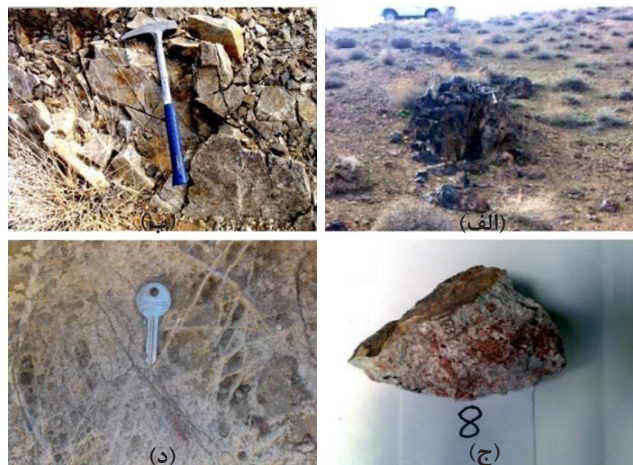
بخش عمده‌ای از واحدهای سنگی منطقه ظفرقند تحت تاثیر محلول‌های هیدروترمال به شدت دگرسان شده و محدوده دگرسانی به وجود آمده، وسعتی حدود ۷ کیلومتر مربع را شامل می‌شود که بخشی از آن به وسیله رسوبات پوشیده شده است. نمای دوری از دگرسانی‌های منطقه در شکل ۳ قابل مشاهده است [۲۴].

زون‌های دگرسانی از مرکز سیستم پورفیری به سمت حاشیه‌ها به ترتیب شامل فلیک، 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 میزبان در اطراف گسل جنوب اردستان دیده می‌شود [۱]. دگرسانی پتاسیک در منطقه جنوبی ظفرقند

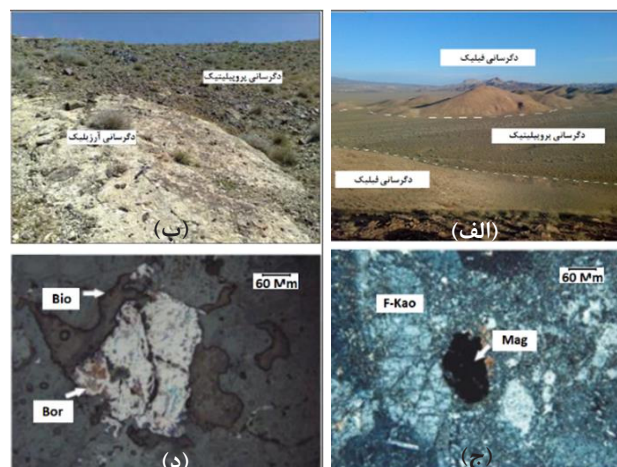
۲ سانتی‌متر قابل رویت است. شکل ۵-د استوک ورک‌های هماتیت-کوارتز موجود در دگرسانی فیلیک را نشان می‌دهد [۲۵،۲۴].

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). شکل ۶ قسمت‌های الف و ب نمایی از رخنمون دگرسانی‌های فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک را نشان می‌دهد.

در گرانودیوریت (شکل ۵-الف) و دیوریت‌ها (شکل ۵-ب) قرار گرفته و استوکورک‌های 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 (عمدتا هماتیت) در داسیت‌های پورفیری (شکل ۵-ج) و کوارتز دیوریت‌ها مشخص می‌شود. در این دگرسانی برخی رگچه‌های اکسید آهن و کوارتز تا ضخامت



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]



شکل ۶: تصاویر میکروسکوپی و صحرایی از سنگ‌های منطقه اکتشافی ظفرقند [۱۳، ۱]: الف) رخنمون دگرسانی‌های فیلیک و پروپیلیتیک، ب) رخنمون دگرسانی‌های آرژیلیک و پروپیلیتیک، ج) تصویر میکروسکوپی از داسیت‌های زون آرژیلیک 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

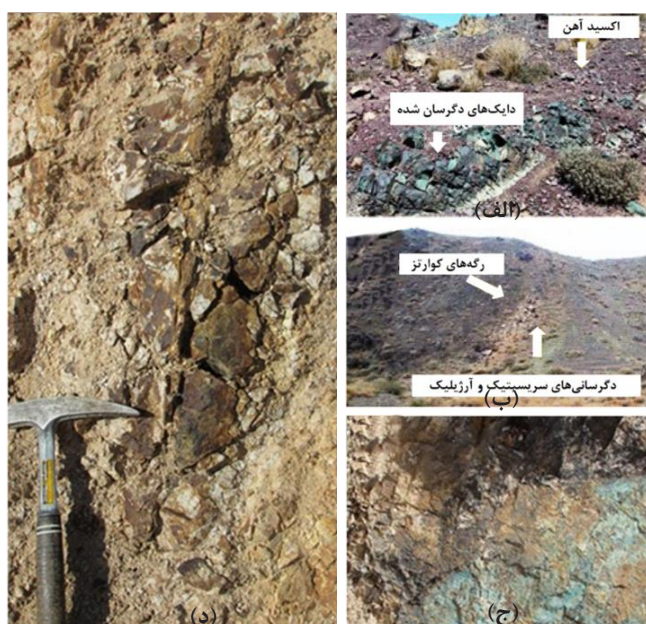
ثانویه بیوتیت، مگنتیت و همچنین فلدسپار آلکالن در اطراف پلاژیوکلازها مشخص می‌شود. دگرسانی فیلیک با مجموعه کانی‌های ثانویه سریسیت، کوارتز، کلریت و پیریت در درزه‌ها و شکستگی‌ها گسترش یافته است. در این پهنه کانی پلاژیوکلاز به سریسیت تجزیه و کانی‌های فرومنیزین مانند بیوتیت، پروکسن و هورنبلند به کلریت تبدیل شده و زمینه سنگ به طور پراکنده سریسیتی و سیلیسی شده است [۲۷]. کانی‌زایی سولفیدی اولیه به مقدار کم، به صورت افشان و استوکورک در این پهنه به چشم می‌خورد. این دگرسانی در سنگ‌های داسیتی و دیوریتی دیده می‌شود. دگرسانی سیلیسی با وجود کوارتز به صورت رگه، رگچه‌ای یا کمتر به صورت پراکنده در متن سنگ و به صورت جانیشینی بر روی کانی‌های اولیه دیده می‌شود. رگه‌ها به دو شکل موازی و استوکورک در منطقه مشخص می‌شوند. در برخی مقاطع رگچه‌های سیلیسی رگچه‌های بیوتیت ثانویه را قطع کرده‌اند [۲۷]. سولفیدها به ندرت در رگچه‌های سیلیسی حضور دارند. پهنه آرژیلیک توسعه کمی در منطقه دارد. این دگرسانی با حضور کانی‌های رسی مشخص می‌شود. به ندرت بافت اولیه سنگ‌ها در این پهنه از بین رفته است و معمولا به همراه اکسیدهای ثانویه آهن (هماتیت و لیمونیت) مشخص می‌شود. دگرسانی پروپیلیتیک یکی از گسترده‌ترین دگرسانی‌ها در منطقه است که به وسیله مجموعه

نمونه‌های دستی در دگرسانی آرژیلیک به رنگ سفید و عمدتا 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 آلپیت، 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 شیبی از آنها باقی مانده است. بیوتیت‌ها به کلریت و کانی‌های سولفید مس دگرسان شده‌اند (شکل ۶-د) [۱۳].

نمای دور و نزدیکی از پهنه‌های دارای اکسیدهای ثانویه آهن در مناطق کانی‌سازی مس، رگه‌های کوارتز-مگنتیت و استوکورک‌های نمایش دهنده کانی‌سازی مالاکیت و اکسید آهن/هیدروکسید و همچنین رگه‌های سیلیسی و دگرسانی‌های سریسیتی و آرژیلیک اطراف آن نیز در شکل ۷ آورده شده است [۱۵، ۲۶].

۲-۳- کانی‌زایی و زمین‌شناسی اقتصادی منطقه

دگرسانی پتاسیک با رخنمون بسیار محدود و با رگچه‌های



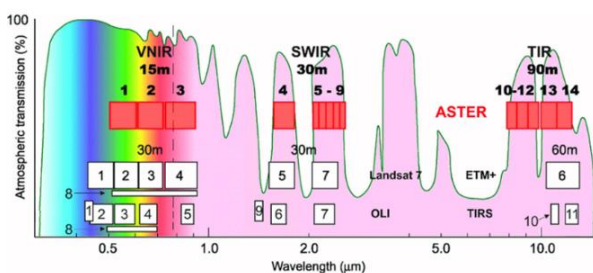
شکل ۷: الف) نمایش پهنه‌های دارای اکسیدهای ثانویه آهن در مناطق دارای کانی‌سازی مس، ب) نمایی از رگه‌های سیلیسی و دگرسانی‌های اطراف آن [۱۵] و ج و د) نمای نزدیک از رگه کوارتز-مگنتیت و استوکورک‌های نمایش دهنده کانی‌سازی مالاکیت و اکسید آهن/هیدروکسید [۲۶]

قسمت جنوب و جنوب باختری استان اصفهان مشاهده می‌شود و واحد سنگ‌های کربناته با مصارف مصالح ساختمانی است.

۳- مواد و روش‌ها

در راستای هدف اصلی در این مطالعه و برای بارزسازی دگرسانی‌های مختلف و کانی‌های شاخص و مهم در ارزیابی پتانسیل معدنی در منطقه مورد مطالعه، از دو سری داده ماهواره‌ای استفاده شده تا بهترین نتایج قابل دستیابی باشد. سنجنده استر (ASTER 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 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 (شکل ۸). 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 Si-O-H, Al-O-H, Mg-O-H را دربر گرفته و می‌توانند در شناسایی آنها موثر واقع شوند [۳۰]. ۶ باند SWIR قابلیت تشخیص CO₃, Mg-OH, Al-OH, Fe را دارند که مطالعات نشان داده دگرسانی هیدروترمال و کانی‌های آلونیت، کائولینیت، کلسیت، دولومیت، کلریت و تالک در باند SWIR قابل شناسایی‌اند. کانسار مس پورفیری معمولاً به وسیله دگرسانی هیدروترمال مشخص می‌شوند که هسته مرکزی با کوارتز و پتاسیم است و در اطراف آن تعدادی زون دگرسان دیگر وجود دارد [۳۱، ۳۲]. در این پژوهش دگرسانی‌های منطقه ظرفرند از طریق لندست ۸ برای

کانی‌های اپیدوت، کلریت، سربیسیت و کلسیت شناخته می‌شود. این دگرسانی حاصل تجزیه کانی‌های فرومنیزین به کلریت آهن منیزیم‌دار و کمتر سربیسیت است. رگچه‌های کلریتی و اپیدوتی معمولاً به وسیله رگچه‌های سیلیسی و سیلیسی-سولفیدی قطع شده‌اند [۱]. کانی‌سازی در حاشیه توده‌های دیوریت، کوارتز دیوریت و در سنگ دیواره داسیتی گسترش یافته است [۲]. کانی‌زایی به دو شکل (هایپوزن) و ثانویه (سوپرژن) و به شکل رگه‌ای، رگچه‌ای و افشان در سنگ میزبان وجود دارد. کانی‌های اولیه شامل پیریت، کالکوپیریت، کمتر گالن و مگنتیت هستند که به صورت مجزا یا همراه کوارتز در رگچه‌ها دیده می‌شوند و کانی‌های ثانویه به شکل مالاکیت، آزوریت، همتایت و لیمونیت هستند [۲۷]. کوارتز در رگه‌ها به صورت کانی باطله وجود دارد. پهنه اکسیدی و سوپرژن گسترده‌ترین بخش در محدوده ظرفرند است که با حضور فراوان اکسیدهای آهن ثانویه قابل تشخیص است. توده گرانیتوئیدی ظرفرند فاقد کانی‌زایی قابل توجه است و فقط در بعضی از مناطق، در توف‌های میزبان، به صورت موضعی می‌توان کانی‌های پیریت، کالکوپیریت، مالاکیت، آزوریت و اولیژیست را به همراه رگه‌های دندریتی منگنز و آثار کانه‌زایی روی مشاهده کرد. کانی‌سازی مس به صورت پراکنده درز و شکستگی‌ها در سطح تماس سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی منطقه و عمدتاً به شکل مالاکیت و آزوریت مشاهده می‌شود. بررسی‌های فابریک‌های مغناطیسی نیز غنی بودن توده نفوذی به ویژه بخش گابرویی و دیوریتی را از مواد معدنی به ویژه مگنتیت تایید می‌کند [۲۸]. چند معدن گرانیت (که در واقع سنگ‌های دیوریتی-گرانودیوریتی است) به صورت متروکه در منطقه یافت می‌شوند. شکستگی‌های زیاد، علت متروکه شدن این معادن بوده است [۲۹]. در مسیر جاده اردستان به ظرفرند، در غرب کوه شهریار، اندیسی از مالاکیت و آزوریت به صورت آغشتگی در سنگ‌های ولکانیکی ائوسن بالا با ترکیب اندزیت و اندزیت-بازالت دیده می‌شود که فاقد ارزش اقتصادی است. کمان ماگمایی ارومیه-دختر بخش وسیعی از استان اصفهان را متأثر کرده است. محصول این فعالیت وسیع ماگمایی و به تبع آن گرمایی، کانه‌زایی‌های فراوان پورفیری، مس و مس-طلا، اپی‌ترمال و پلی‌متال‌های مرتبط با سیستم پورفیری است. محصول دیگر فعالیت‌های گرمایی، آلتراسیون وسیع و در نتیجه تشکیل خاک‌های صنعتی و نیز چشمه‌های گرمایی و تشکیل تراورتن و مرمر است. از مهم‌ترین این کانسارها می‌توان به پورفیری کهنک و زفره و پلی‌متال‌های خونی و کالکافی و تراورتن‌های نطنز و کاشان اشاره کرد. زون زاگرس در



شکل ۸: موقعیت قرارگیری باندهای سنجنده‌های استر، OLI و ETM+ در بازه طول موج الکترومغناطیسی [۳۸]

در این زمینه لازم است تا به یک نکته مهم در ارتباط با انتخاب منطقه مورد مطالعه توجه شود. الگوریتم‌ها و تکنیک‌ها و پردازش‌های کانی‌شناسی به گونه‌ای است که برای مناطق خشک و بدون پوشش گیاهی کاربردی و قابل استفاده است. البته این حرف به معنای آن نیست که در سایر مناطق نمی‌شود کار کانی‌شناسی انجام داد. در حقیقت در مناطق مرطوب و مناطقی که پوشش گیاهی دارند، کار شناسایی کانی‌ها و مناطق آلتراسیونی با چالش‌های زیادی مواجه است و مشکلات بیشتری در روند انجام کار آن در مقایسه با مناطق خشک ایجاد می‌شود [۳۷].

در این مطالعه هدف، بررسی و شناسایی دگرسانی‌های مس پورفیری و اکسید آهن در دو سنجنده استر و OLI از لندست ۸ است. در شکل ۹ مراحل انجام این مطالعه نشان داده شده است.

تصاویر استفاده شده در این مطالعه؛ تصاویر LIT استر برای سال ۲۰۰۲، که علت انتخاب این تصویر این بوده است که از سال ۲۰۰۸ میلادی، ۶ باند مادون قرمز طول موج کوتاه (SWIR) سنجنده استر به صورت کامل از کار افتاد و داده‌های آن از این سال، بدون باندهای یاد شده در سایت‌ها عرضه می‌شود. همچنین تصاویر کالکشن ۲ سطح ۲ سال ۲۰۲۲ لندست ۸ نیز برای شناسایی اکسید آهن بررسی شده است.

استفاده از ۴ باند محدوده VNIR سنجنده لندست برای فلزات واسطه به ویژه آهن، عناصر نادر خاکی 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، آرزلیک، پروپیلیتیک از همدیگر قابل تفکیک باشند [۳۹].

۳-۱- پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

برای دریافت اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای لازم است پیش از استفاده از آنها پیش‌پردازش‌های رادیومتریک و هندسی بر روی تصاویر انجام گیرد. پیش‌پردازش شامل عملیاتی می‌شود که لازم است قبل از آنالیز اصلی داده‌ها و استخراج اطلاعات انجام 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

اکسیدهای آهن و از داده‌های استر برای دگرسانی‌های گرمایی مورد مطالعه قرار خواهند گرفت. ۶ باند طراحی شده در طول موج ۱٫۵ تا ۳ میکرومتر در میان باندهای مادون قرمز بازتابی استر، برای کاربردهای 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. 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 [۳۳]. داده‌های سنجنده استر برای شناسایی آلتراسیون‌ها، کانی‌ها و سنگ‌شناسی در مطالعات زمین‌شناسی به کار برده می‌شود. داده‌های استر به تنهایی یا به صورت ترکیبی با سایر ماهواره‌های سنجنش از دور و داده‌های زمینی برای تولید نقشه‌های زمین‌شناسی استفاده می‌شوند [۳۴]. استر قابلیت استفاده ترکیبی با سایر ماهواره‌های سنجنش از دور را نیز دارد. در واقع می‌توان با ترکیب داده‌های استر و سایر ماهواره‌ها و سنجنده‌ها، 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. سنجنده (Operational Land Imager) OLI بر روی ماهواره لندست ۸، در سال ۲۰۱۳ به فضا پرتاب شد. تصاویر این سنجنده ۹ باند دارد که متشکل از ۴ باند در محدوده مرئی (۰٫۴۳-۰٫۶۷ میکرومتر)، یک باند NIR (۰٫۸۸-۰٫۸۵ میکرومتر)، دو باند در محدوده SWIR (۲٫۱۳-۲٫۱۳ میکرومتر) و یک باند سیروس با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر و یک باند پن‌کروماتیک با توان تفکیک مکانی ۱۵ متر است. دو باند مادون قرمز حرارتی TIR نیز بر روی سنجنده TIRS قرار گرفته (شکل ۸) که توان تفکیک مکانی ۱۰۰ متر دارند. توان تفکیک رادیومتریک این تصاویر ۱۲ بیت است که تشخیص عوارض را با دقت بالاتری میسر می‌سازد. ابعاد یک سین تصویر OLI ۱۸۵*۱۸۵ کیلومتر است. به دلیل بهره‌گیری این سنجنده از طراحی Push broom و در نتیجه بهبود نسبت سیگنال به نویز، تصاویر حاصله قابلیت اعتماد و کارایی بالاتری نسبت به نسل‌های قدیمی‌تر لندست دارند [۳۶، ۳۵].

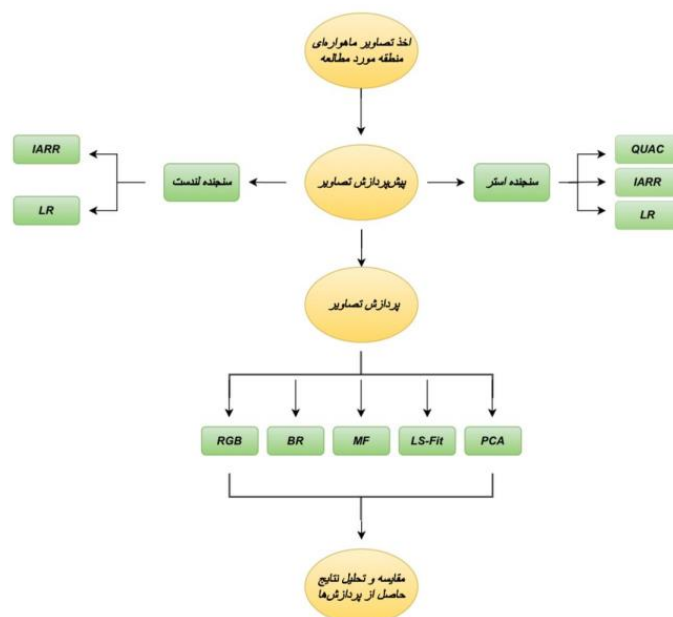
شناسایی آلتراسیون‌ها و کانی‌ها ممکن است در هر منطقه‌ای انجام شود، اما پیش از بررسی روش‌های مختلف

گیاهی اندک و به تبع میزان ناچیز بخار آب) نیز بهره گرفته شد. این روش برای منطقه‌ای که هیچ اندازه‌گیری خاص زمینی وجود نداشته نیز مفید خواهد بود [۴۴]. در نهایت نیز برای حذف اثر جذب و پخش امواج الکترومغناطیسی در تصاویر ماهواره استر از روش QUAC استفاده شده است. این روش یک روش تصحیح اتمسفری برای محدوده مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی است [۴۵]. روش یاد شده برای تصحیح اتمسفری تصاویر چندطیفی و ابرطیفی در بازه بین ۴۰۰ تا ۳۰۰۰ نانومتر کاربرد دارد. این الگوریتم برای تصحیح تصاویری مناسب است که در گذشته تهیه شده یا تصاویری که فاقد نمونه‌های اتمسفری و زمینی برای اعمال روش‌های مطلق هستند [۴۶].

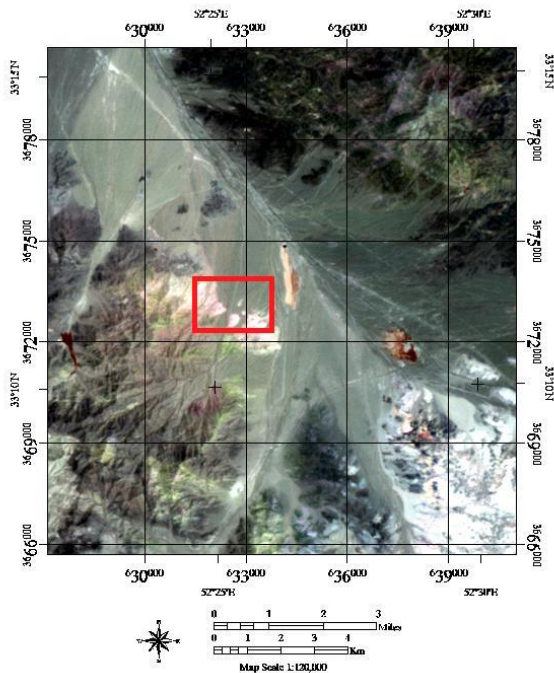
۳-۲- پردازش تصاویر ماهواره‌ای

برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای از روش‌های ترکیب رنگی کاذب، نسبت بانندی، فیلترگذاری تطبیقی، کمترین مربعات رگرسیون شده و آنالیز مولفه اصلی بهره گرفته خواهد شد. در مدل مس پورفیری شاخص، یک هسته کوارتزی و کانی‌های پتاسیم‌دار که عموماً شامل پتاسیم فلدسپات و بیوتیت است، به وسیله چندین زون آلتراسیونی آبدار احاطه شده‌اند [۴۷]. این زون‌های دگرسانی کانی‌های شاخصی دارند که شامل حداقل یک کانی در محدوده مرئی مادون قرمز و مادون قرمز

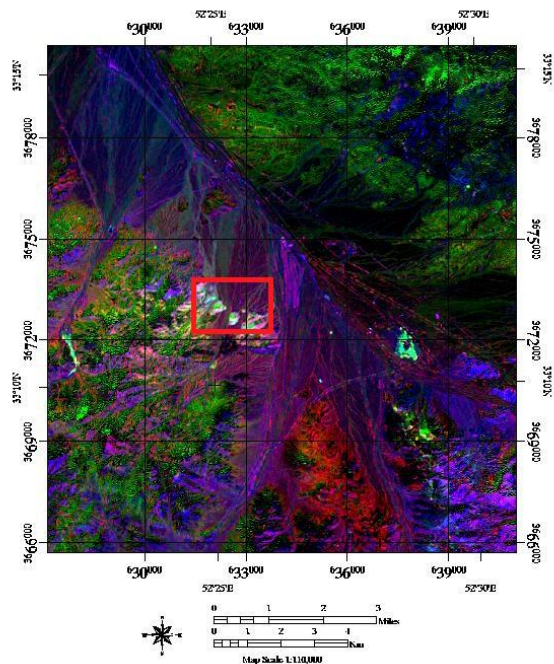
فضا، اکسیژن، نیتروژن و عناصر دیگر که ایجاد پارازیت کرده، است. به عبارت دیگر تصحیحات رادیومتریک عواملی که روی طیف‌های دریافتی تاثیر گذاشته‌اند را حذف و در تصاویر دریافتی ایجاد کنتراست می‌کنند [۴۰]. بر روی داده‌های استر مورد نظر تصحیح هندسی انجام شده و این داده‌ها زمین مرجع شده‌اند، بنابراین تنها لازم است که بر روی این داده‌ها تصحیح رادیومتریک انجام شود [۴۱-۴۳]. در مورد تصویر لندست ۸ انتخابی نیز، به دلیل اینکه تصویر کالکشن ۲ در سطح ۲ مورد استفاده قرار گرفته و بر روی این تصاویر تصحیحات هندسی و رادیومتریک اعمال شده است، نیاز نیست مجدداً تصحیحات انجام شود، اما بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، برای افزایش هرچه بیشتر راندمان در خروجی روش‌های پردازشی، شایسته است برای رفع هرگونه خطای موجود بر روی این تصاویر، تصحیحات رادیومتریک مجدداً بر این تصاویر اعمال شود، بنابراین بر روی تصاویر دو سنجنده، تصحیحات رادیومتریکی مانند تصحیح IARR (روش بازتاب متوسط نسبی داخلی)، LR (Log Residual) و QUAC (QUick Atmospheric Correction) استفاده خواهد شد. برای حذف تاثیرات مربوط به تابش خورشید، عبورپذیری جو و نیز خطای دستگاهی، تاثیرات توپوگرافی در تصاویر لندست و استر از روش Log Residual استفاده شده است [۴۴]. از روش بازتاب متوسط نسبی داخلی که برای نواحی خشک و نیمه‌خشک موثر است (به علت پوشش



شکل ۹: مراحل و روند انجام کار



شکل ۱۰: بارزسازی دگرسانی‌ها با $RGB=468$ در تصویر استر (قسمت‌های سبز تیره نمایان‌گر زون پروپیلیتیک، صورتی رنگ مربوط به آرژیلیک و قسمت‌های به رنگ قرمز تا قهوه‌ای مربوط به زون فیلیک است.)



شکل ۱۱: بارزسازی اکسید آهن و زون آرژیلیک در تصویر لندست با ترکیب $RGB=4,2,7,6,5$ (قسمت‌های بنفش مربوط به اکسید آهن و قسمت‌های سبز نمایان‌گر زون آرژیلیک است.)

طول موج کوتاه دارای خاصیت جذب است که شناخت آنها به وسیله طول موج و توان طیفی آنها اتفاق می‌افتد [۴۹-۴۷].

۲-۱- ترکیب رنگی کاذب (FCC)

یکی از راه‌های شناسایی پدیده‌های زمین‌شناسی استفاده از ترکیبات رنگی است. از آنجا که اغلب تصاویر ماهواره‌ای به شکل چند باندهای 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 بینش در به تصویر کشیدن بیش از یک باند بر روی سامانه‌های پردازش تصویر و تولید تصاویر چند باندهای سودمند خواهد بود. استفاده از این شیوه در تهیه تصاویر رنگی مرکب متداول است که در سه باند متفاوت به سه رنگ آبی، سبز و سرخ نسبت داده می‌شوند [۵۰]. نمایش همزمان سه باند تصویر در سه کانال قرمز، سبز، آبی (R,B,G) یا در سه کانال شدت رنگ و سیرشدگی (IHS)، سبب بارز شدن بسیاری از پدیده‌ها با رنگی ویژه خواهد شد. در ساخت ترکیب‌های رنگی کاذب بهتر است از باندهایی که همبستگی کمتری نسبت به هم دارند استفاده شود [۴۰، ۵۱].

استفاده از رنگ‌ها اطلاعات بصری و مفهومی بیشتری از تصویر را در اختیار ما قرار می‌دهند. آنالیزهای تجربی نشان داده‌اند که تصویری با ترکیب $RGB=468$ در تصاویر استر مناسب‌ترین ترکیب رنگی برای شناسایی دگرسانی در اغلب کانسارها به ویژه مس پورفیری و طلائی اپی‌ترمال است. در باند ۴ استر دارند. کلریت و اپیدوت نیز به دلیل وجود $Mg-OH$ و Fe جذب بالایی در باند ۸ (محدوده ۲۳۳-۲۳۵ میکرومتر) دارند [۵۲]. دگرسانی آرژیلیک با رنگ صورتی، دگرسانی پروپیلیتیک با رنگ سبز تیره و همچنین دگرسانی فیلیک با رنگ قرمز تا قهوه‌ای مشخص می‌شوند [۵۳] (شکل ۱۰). در تصویر حاصله مشاهده می‌شود که دگرسانی پروپیلیتیک و همچنین دگرسانی آرژیلیک با توجه به نقشه زمین‌شناسی منطقه طفرقند به وسیله روش ترکیب رنگی کاذب به خوبی بارز و دگرسانی فیلیک هم تا حدودی مشخص شده است. برای بارزسازی اکسید آهن از ترکیب ۶۵۳ و ۳۴۵ استفاده شد که نتیجه مطلوبی را به همراه نداشت. پس از آن نیز از ترکیب (۵، ۶، ۷، ۴، ۲) استفاده شد که با توجه به شکل ۱۱، اکسید آهن به رنگ بنفش تیره و کانی‌های رسی به رنگ سبز روشن نمایان شده‌اند.

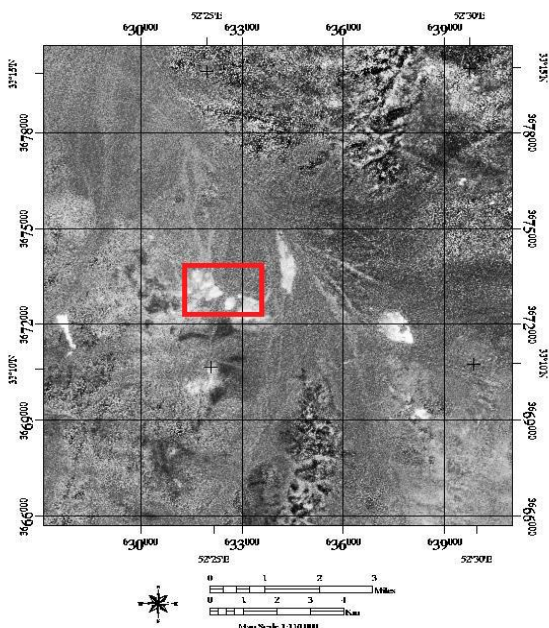
۳-۲-۲- نسبت بانندی (Band Ratio)

بانندی مرکب $۷,۵+۳,۴$ نیز استفاده می‌شود [۳۳]. مسکوویت، ایلیت، کائولینیت همچنین $Al-OH$ ، در محدوده $۱,۶۵-۲,۲۰$ میکرومتر (باند ۶ و ۷) بیشترین جذب و انعکاس را دارند، بنابراین از نسبت $۷,۶$ برای بارزسازی زون آرژیلیک استفاده شد [۵۹،۵۸]. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، دگرسانی آرژیلیک و پروپیلیتیک به خوبی نشان داده شده‌اند، اما دگرسانی فلیک در شکل ۱۴ با این روش شناسایی نشده است.

نسبت بانندی $۴,۲$ در تصویر لندست، مناطق سفید رنگ که نمایانگر دگرسانی آرژیلیک است را به خوبی نشان داده است. این روش در بارزسازی دگرسانی فلیک و پروپیلیتیک به اندازه‌ای که در دگرسانی آرژیلیک موفق بوده است (شکل ۱۵)، موثر واقع نشده است. در نهایت نیز می‌توان اذعان داشت که با نسبت بانندی $۱۷,۶$ اکسید آهن نیز شناسایی شده است (شکل ۱۶).

۳-۲-۳- فیلترگذاری تطبیقی (Matched Filtering)

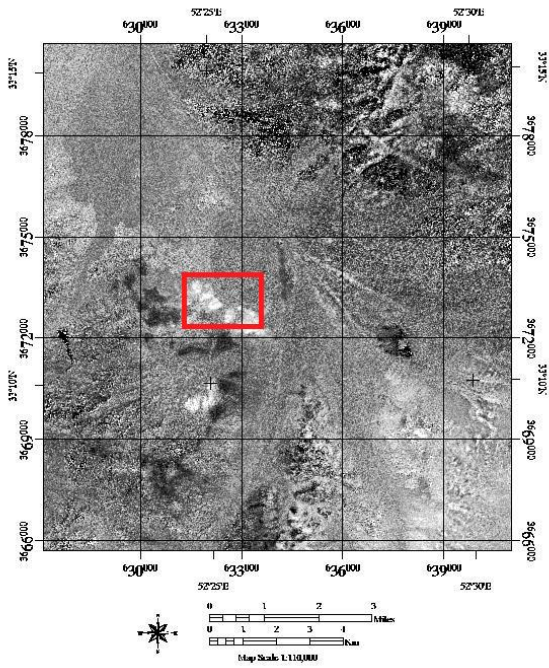
فیلترگذاری تطبیقی یک روش طیفی بدون تداخل و هدف آن مشخص کردن کلاس‌های طیفی مطلوب با حذف سایر طیف رنگ‌ها است. در روش فیلترگذاری تطبیقی استفاده از End memberهای تعریف شده توسط کاربر، پاسخ End memberهای معلوم را افزایش می‌دهد و مانع پاسخ زمینه می‌شود [۶۰].



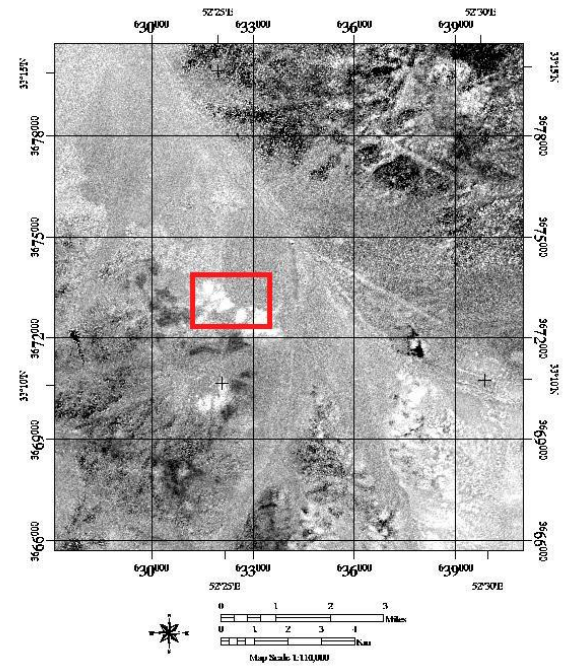
شکل ۱۲: نمایش نسبت بانندی $۷+۴,۶+۵$ در سنجنده استر (مناطق سفید رنگ نمایانگر دگرسانی آرژیلیک هستند).

تصاویر نسبتی یا نسبت‌های بانندی از شیوه‌های بسیار مفید برای بارزسازی پدیده‌ها در تصاویر چندبانندی محسوب می‌شوند [۵۴]. از این روش برای کاهش تاثیر روشنایی خورشید، توپوگرافی و بارزسازی اطلاعات طیفی در تصاویر استفاده می‌شود. مهم‌ترین مزیت کاربرد نسبت‌های بانندی، تهیه تصویری است که کاملاً مستقل از شرایط روشنایی است [۵۵]. این روش در به نقشه درآوردن گیاهان، رس‌ها، برخی از سنگ‌ها و تشخیص زون‌های گرمایی استفاده می‌شود [۵۶]. با شناخت خواص انعکاسی پدیده‌ها از روی نمودار طیفی آنها، می‌توان به کمک روش یاد شده پدیده‌های مختلفی همچون مرز واحدهای سنگی و دگرسانی‌ها را بارز ساخت [۵۷]. سنجنده استر در شناسایی دگرسانی‌های آرژیلیک، فلیک و پروپیلیتیک موفق‌تر از لندست ۸ ظاهر شده است، اما سنجنده ماهواره لندست ۸ به واسطه باندهای محدوده VNIR فقط در شناسایی کلید اکتشافی گوسان بهتر از رقیب خود بوده است و به علت پهن بودن باندهای محدوده SWIR قادر به تفکیک دگرسانی فلیک از آرژیلیک نیست و همچنین نمی‌تواند دگرسانی پروپیلیتیک را شناسایی کند. تنها وجه مشترک بین دو تصویر شناسایی خوب پوشش گیاهی است.

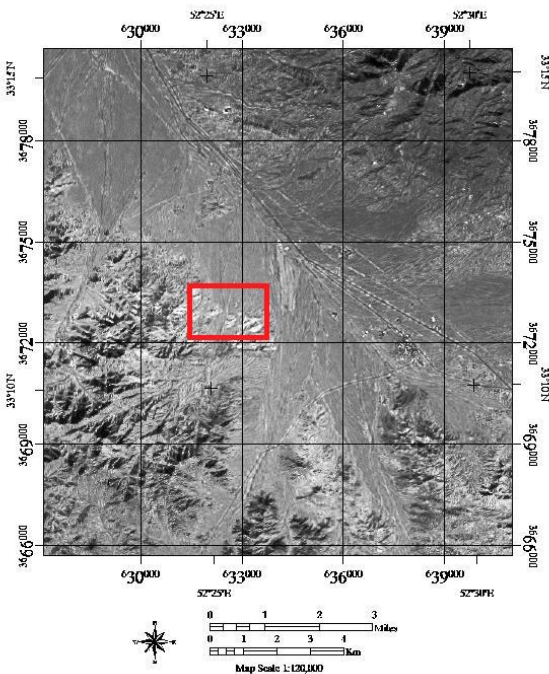
در این روش، بانندی که میزان انعکاس آن از هدف مورد نظر بیشتر باشد در صورت کسر و بانندی که میزان جذب برای همان هدف در آن بالاتر باشد در مخرج کسر قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه کانی‌های شاخص زون حاوی دگرسانی آرژیلیک در استر جذب حداکثری در باندهای ۵ و ۶ و انعکاس در باندهای ۴ و ۷ دارد، بنابراین نسبت بانندی $۷+۴,۶+۵$ برای آرژیلیک مورد استفاده قرار گرفت که با انطباق با نقشه زمین‌شناسی منطقه نتیجه مطلوبی را به همراه داشته است. برای بارزسازی زون‌های حاوی دگرسانی فلیک، با توجه به جذب حداکثری در باند ۶ و انعکاس حداکثری در باند ۷، نسبت بانندی $۷,۶$ برای آشکارسازی فلیک استفاده شد. در همین راستا، برای آشکارسازی زون‌های حاوی دگرسانی پروپیلیتیک نیز با توجه به ویژگی‌های جذبی شاخص در باندهای ۷ و ۸ و همچنین انعکاس شاخص در باندهای ۶ و ۹ از نسبت $۹+۶,۸+۷$ بهره گرفته شد [۵۸]. در سنجنده OLI از لندست که اکسید آهن در باند ۴ بیشترین انعکاس و در باند ۱ کمترین انعکاس و همچنین در باند ۲ بیشترین جذب را دارد، برای بارزسازی اکسید آهن از نسبت $۴,۲$ استفاده شد. برای بارزسازی آهن فرو از نسبت



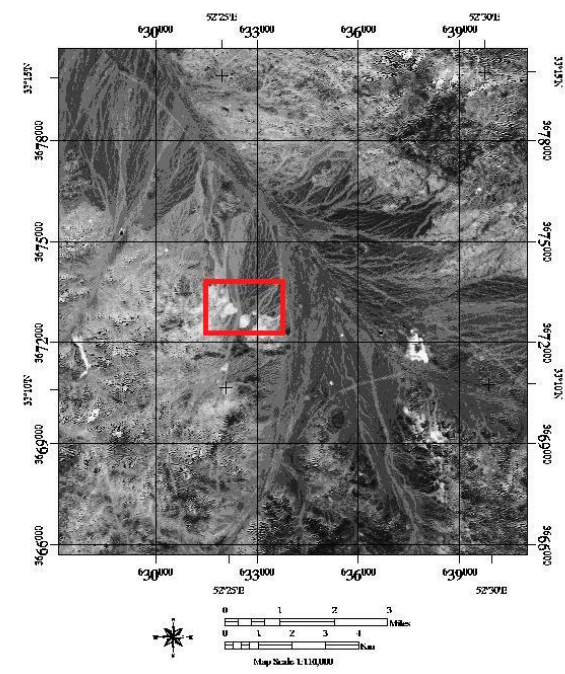
شکل ۱۴: بارزسازی دگرسانی فیلیک به رنگ سفید با نسبت باندی ۷،۶+۸/۹ در سنجنده استر



شکل ۱۳: نسبت باندی ۷+۸/۹+۶ در سنجنده استر (مناطق سفید رنگ مربوط به دگرسانی پروپیلیتیک هستند.)

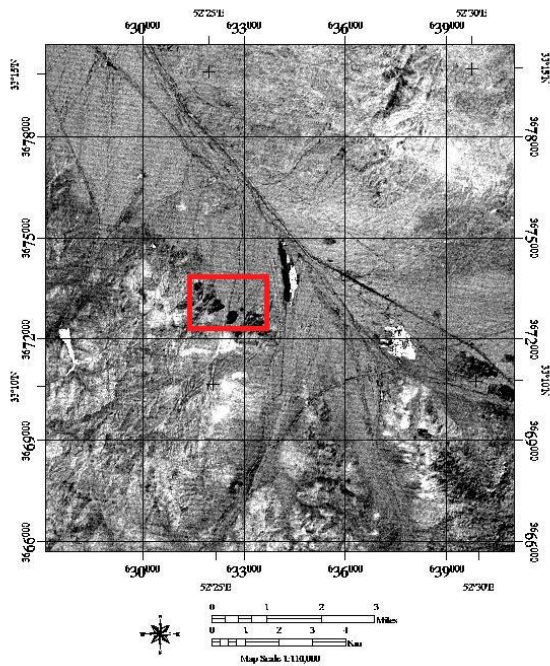


شکل ۱۶: نمایش نسبت باندی ۴،۲ در تصویر لندست ۸ (نقاط سفید رنگ مربوط به اکسید آهن هستند.)

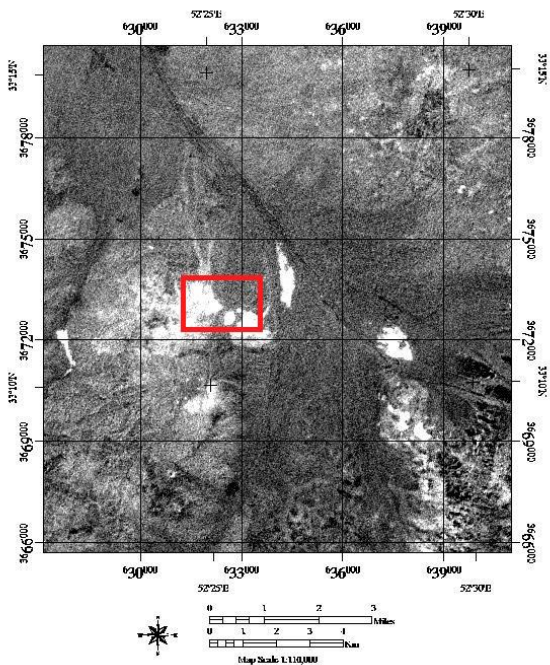


شکل ۱۵: نمایش نسبت باندی ۷،۶ در تصویر لندست ۸ برای بارزسازی دگرسانی آرژبلیک

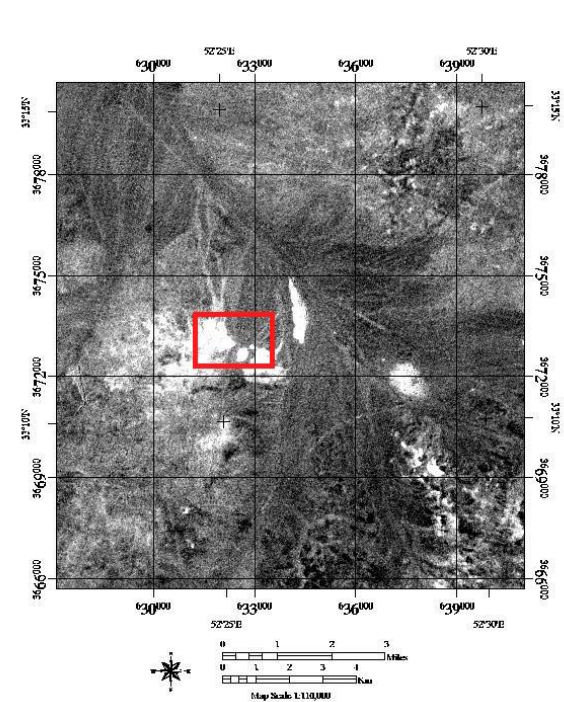
این روش وسیله‌ای برای شناسایی مواد خاص بر اساس تطبیق End member های منحنی بازتاب طیفی با تصویر و نیز روش مناسبی برای شناسایی دگرسانی‌های آرژیلیک، اکسید آهن، کربناتی و پروپیلیتیک است که در آن مکان‌های هدف به رنگ سفید دیده می‌شوند. این الگوریتم با هدف یافتن میزان فراوانی هر عضو تعریف شده در تصویر از تجزیه اختلاط طیفی به صورت ناقص با حفظ اصول و به کارگیری معادلات تجزیه اختلاط طیفی استفاده می‌کند [۶۱]. در این روش پیکسل‌هایی از داده‌ها که طیف آنها با طیف مرجع (کتابخانه طیفی USGS) انطباق نشان دهد، در نتیجه به طور مشخص بارز می‌گردند. کانی شاخص دگرسانی آرژیلیک کائولینیت، برای دگرسانی فلیک کانی مسکوویت و کانی‌های شاخص دگرسانی پروپیلیتیک کلریت و اپیدوت و همچنین کانی شاخص دگرسانی پتاسیک بیوتیت است. همچنین کانی‌های شاخص اکسید آهن، هماتیت، گوتیت و لیمونیت هستند. در شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ نتایج روش یاد شده بر روی سنجنده استر را می‌توان مشاهده کرد. نتایج حاصل شده برای دگرسانی فلیک مشابهتی به دگرسانی آرژیلیک دارد و این روش تا حدودی دگرسانی فلیک را نیز بارزسازی کرده است.



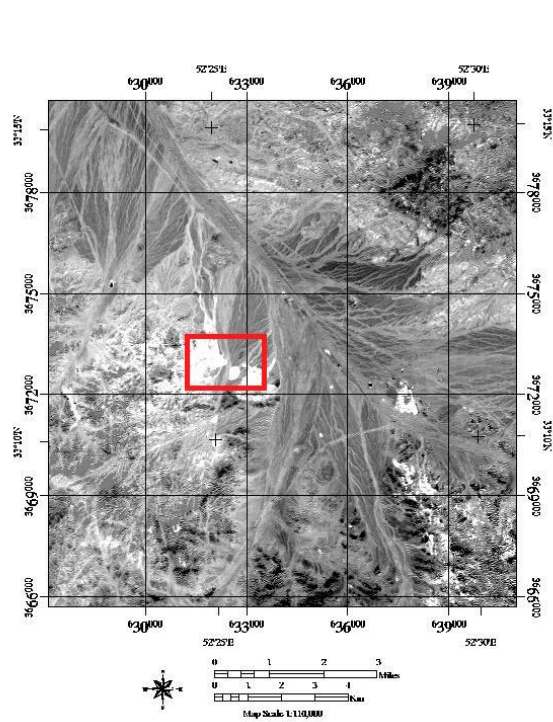
شکل ۱۸: نمایش دگرسانی پروپیلیتیک با کانی شاخص کلریت در تصویر استر به کمک روش فیلترگذاری تطبیقی (نقاط تیره)



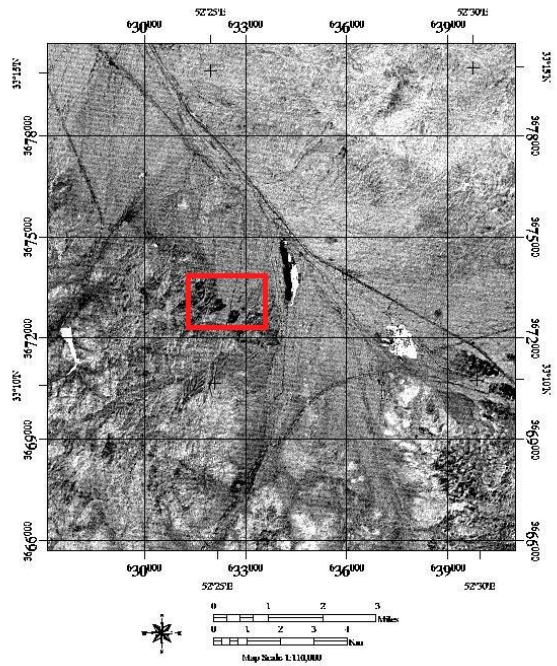
شکل ۱۹: نمایش دگرسانی فلیک با کانی شاخص مسکوویت در تصویر استر به کمک روش فیلترگذاری تطبیقی (نقاط روشن)



شکل ۱۷: تصویر حاصل شده از روش فیلترگذاری تطبیقی بر روی تصویر استر برای بارزسازی دگرسانی آرژیلیک با کانی شاخص کائولینیت



شکل ۲۱: نمایش دگرسانی آرژلیک با کانی شاخص کائولینیت بر اساس روش فیلترگذاری تطبیقی (لندست ۸)



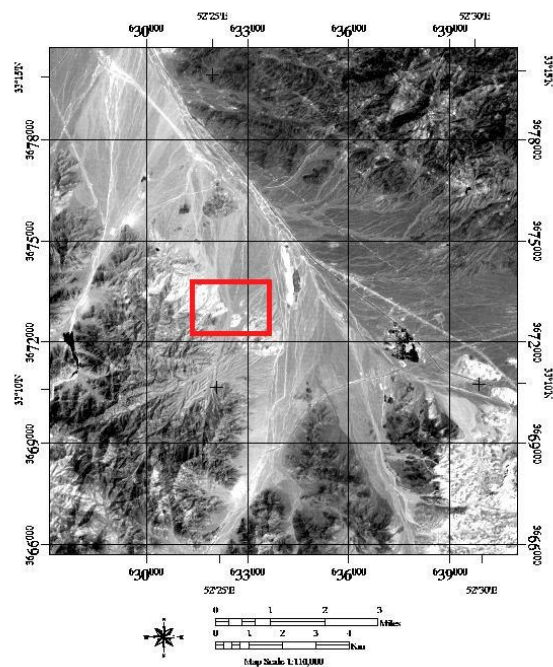
شکل ۲۰: تصویر حاصله از روش فیلترگذاری تطبیقی برای بارسازی دگرسانی پتاسیک با کانی شاخص بیوتیت (سنجنده استر)

از این روش می‌توان دگرسانی بیوتیتی را نیز تا حدودی شناسایی کرد، اما نتیجه حاصله از این روش برای دگرسانی پتاسیک مبنی بر عدم وجود چنین دگرسانی در محدوده ظفرقد است که این نتیجه بر اساس نقشه دگرسانی موجود از منطقه (شکل ۳) و عدم وجود این دگرسانی در نقشه، صحیح و منطقی به نظر می‌رسد.

البته در نواحی دیگری از این تصویر نقاط روشنی به وسیله این روش مشخص شده است که با توجه به عدم وجود نقشه دگرسانی در این نواحی، امکان صحت‌سنجی نقاط وجود نداشته و به نظر نمایش این نقاط به وسیله این روش صحیح نیست. بر اساس نتایج دیگر حاصله می‌توان مشاهده کرد که دگرسانی آرژلیک نیز به خوبی شناسایی شده است. در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نتیجه روش یاد شده بر روی تصاویر مربوط به ماهواره لندست ۸ آورده شده است که مشاهده می‌شود، این روش برای بارسازی اکسید آهن و دگرسانی آرژلیک موفق عمل کرده است.

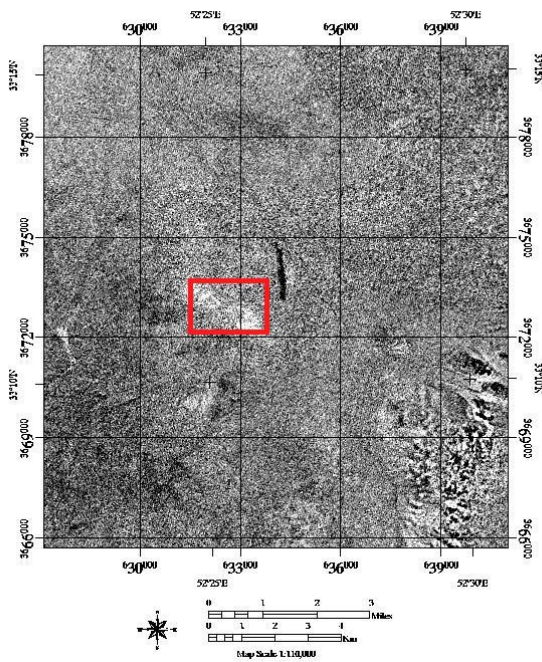
۳-۲-۴- کمترین مربعات رگرسیون شده (LS-Fit)

در این روش در واقع تخمین یک باند به نام باند تخمینی با استفاده از ترکیب خطی کمترین مربعات رگرسیون شده باندهای دیگر انجام می‌شود. در حقیقت چندین باند به

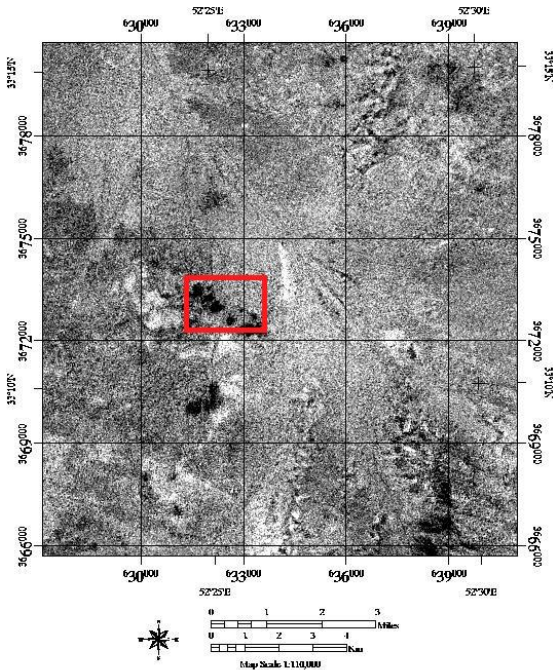


شکل ۲۲: بارسازی اکسید آهن با کانی شاخص هماتیت با روش فیلترگذاری تطبیقی در تصویر لندست ۸

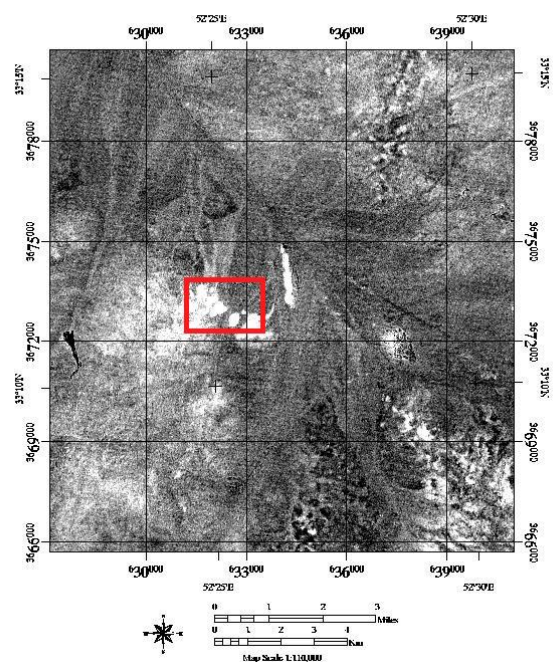
عنوان باندهای تخمین‌گر و یک باند به عنوان باند مدل در نظر گرفته می‌شود و در نهایت به پیش‌بینی یک باند براساس سایر باندها می‌پردازد (در واقع کانی‌هایی که نسبت به یک باند خاص حساس هستند و اختلاف خوبی از نظر شاخص جذب و انعکاس در آن باند خاص نشان می‌دهند). با اختلاف مشاهده شده بین باندهای تخمین‌گر و باند مدل‌شده، به عنوان یک تصویر خروجی محاسبه می‌شود [۶۲]. در تصاویر استر برای تعیین دگرسانی آرزلیک، باند ۴ بیشترین انعکاس و باند ۶ بیشترین جذب را دارد. در مورد دگرسانی پروپیلیتیک باند ۶ بیشترین انعکاس و باند ۸ بیشترین جذب و همچنین در رابطه با دگرسانی فیلیک باند ۷ بیشترین انعکاس و باند ۶ بیشترین جذب را دارد. در این روش پیکسل‌های روشن و سفید رنگ نشان‌دهنده باند انعکاس و پیکسل‌های تیره و سیاه‌رنگ نشان باند جذب هستند که در شکل ۲۳ پیکسل سفید رنگ دگرسانی آرزلیک را به نمایش گذاشته است که نتیجه قابل قبولی را به همراه داشته، اما در شکل‌های ۲۴ و ۲۵ مشاهده می‌شود که دگرسانی‌های پروپیلیتیک و فیلیک، نتیجه مطلوبی را به ارمغان نیاورده‌اند. در تصاویر لندست اکسید آهن در باند ۴ بیشترین انعکاس و در باند ۱ کمترین انعکاس و در باند ۲ بیش‌ترین جذب را دارد. به همین ترتیب، در این تصاویر



شکل ۲۴: نمایش دگرسانی فیلیک (نقاط روشن) با باند انتخابی ۷ در تصویر استر (روش LS-Fit)



شکل ۲۵: نقشه حاصل شده از روش کمترین مربعات رگرسیون شده برای دگرسانی پروپیلیتیک در تصویر استر



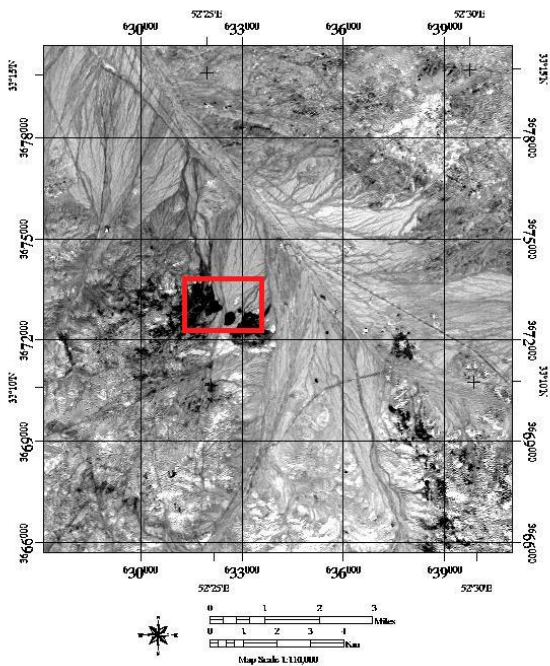
شکل ۲۳: نمایش دگرسانی آرزلیک (نقاط روشن) با باند انتخابی ۴ در تصویر استر (روش LS-Fit)

دگرسانی آرژیلیک در باند ۷ و ۵ به ترتیب بیشترین و کمترین انعکاس و در باند ۶ دارای بیشترین جذب است. این روش بر روی تصویر سنجنده لندست ۸ در بارزسازی اکسید آهن موفق تر از دگرسانی آرژیلیک عمل کرده است (شکل های ۲۶ و ۲۷).

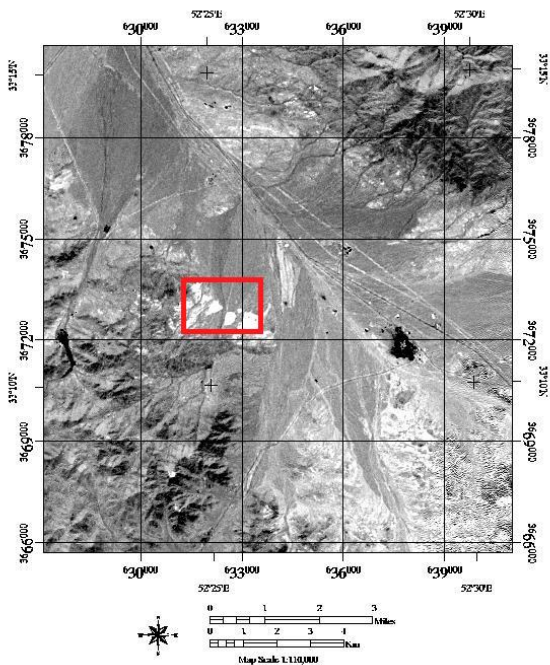
۳-۲-۵- آنالیز مولفه اصلی (PCA)

تجزیه و تحلیل مولفه اصلی یک فناوری مفید برای تجزیه همبستگی داده های چند متغیره است [۶۳-۶۶، ۵۷]. در صورتی که از روش تجزیه و تحلیل مولفه اصلی (PCA) با انتخاب باندهای مناسب استفاده شود، نتایج مناسب تری برای نمایش عوارض حاصل خواهد شد. در واقع PCA یک مجموعه داده اصلی (به عنوان مثال یک تصویر چند طیفی با چهار باند در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک) را به یک مجموعه محورهای غیرهمبسته منتقل می کند. نکته مهم در فرآیند PCA این است که اولین مولفه اصلی حامل حداکثر اطلاعات موجود در داده های اصلی است، در حالی که مولفه های بعدی اندک اطلاعات باقی مانده از مولفه های قبلی را دارد [۶۴، ۵۷].

از این روش برای فشرده سازی داده های مربوط به باندهای مختلف در تعداد کمتری باند و حذف اطلاعات اضافی استفاده می شود. تکنیک PCA در افزایش تمایز میان پدیده های مختلف و در نتیجه تهیه نقشه های دگرسانی و لیتولوژیکی کاربرد زیادی دارد [۶۵-۶۹]. در این مطالعه از ۴ باند که کمترین همبستگی را دارند، به عنوان ورودی استفاده شده است. این مجموعه، باندهایی را در بر می گیرد که حاوی حداکثر جذب و انعکاس مربوط به کانی های شاخص این دگرسانی ها باشد. در این راستا کائولینیت به عنوان کانی شاخص دگرسانی آرژیلیک، مسکوویت به عنوان کانی شاخص دگرسانی فیلیک و کلریت/ اپیدوت به عنوان کانی شاخص دگرسانی پروپیلیتیک در نظر گرفته شده اند. کائولینیت (به عنوان کانی شاخص دگرسانی آرژیلیک) در تصاویر استر، در محدوده باند ۶ دارای جذب بالا و در محدوده باند ۴ دارای انعکاس قوی است. مسکوویت به عنوان کانی شاخص دگرسانی فیلیک دارای جذب بالا در باند ۶ و به مقدار کم در باند ۸ است، همچنین در محدوده باند ۵ انعکاس بالا از خود نشان می دهد. کلریت و اپیدوت به عنوان کانی های شاخص دگرسانی پروپیلیتیک در محدوده باند ۸ جذب قوی و در محدوده باند ۵ انعکاس قوی دارند [۶۷، ۵۷]. نتیجه حاصل از این روش در مورد دگرسانی آرژیلیک در شکل ۲۸ قابل مشاهده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود،



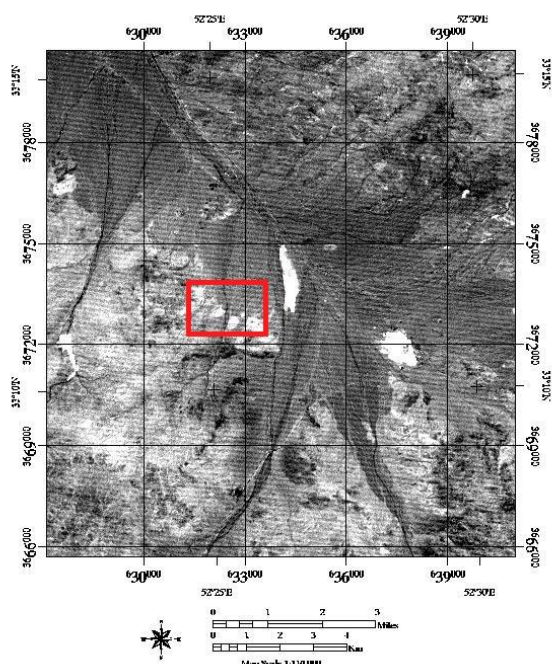
شکل ۲۶: نمایش دگرسانی آرژیلیک (نقاط تیره) با باند انتخابی ۷ در تصویر لندست (روش LS-Fit)



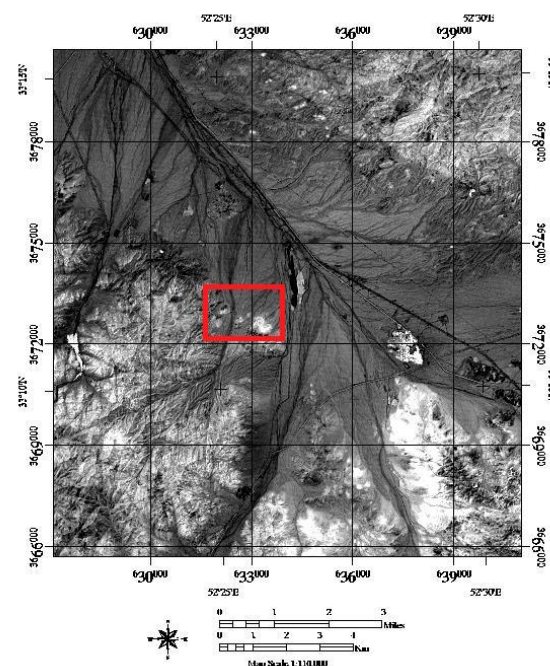
شکل ۲۷: نتیجه بارزسازی اکسید آهن در تصویر لندست ۸ برای باند ۴ (روش LS-Fit) (در این تصویر مناطق سفید رنگ مربوط به اکسید آهن هستند).

این روش توانسته دگرسانی آرژیلیک را با دقت خوبی مشخص کند. دگرسانی پروپیلیتیک به نسبت دیگر روش‌ها به وسیله این روش بهتر شناسایی شده است (شکل ۲۹)، اما در نتایج حاصله مشاهده شد که دگرسانی فیلیک نتیجه مطلوبی را به همراه نداشته است.

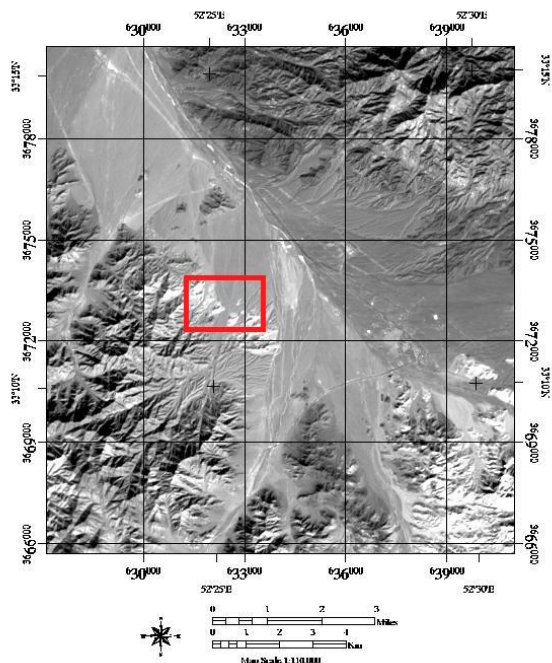
در تصویر لندست مجموعه باندهای انتخاب شده برای کانی‌های رسی به صورت ۳، ۵، ۶ و ۷ بوده است که در PC3 کانی‌های رسی دارای بیشترین جذب در باند ۷ و بیشترین بازتاب در باند ۵ هستند. باندهای انتخاب شده برای اکسید آهن نیز مجموعه باندهای ۲، ۳، ۴ و ۶ است که در PC3 اکسید آهن ویژگی جذب قوی در باند ۴ و بازتاب قوی در باند ۲ دارند [۷۰]. در شکل‌های ۳۰ و ۳۱ نتیجه حاصل شده از این روش بر روی تصاویر لندست ۸ قابل مشاهده است. این روش در بارزسازی اکسید آهن و دگرسانی آرژیلیک نتیجه مطلوبی را به ارمغان آورده است.



شکل ۲۹: نتیجه حاصل شده بر روی تصویر استر برای بارزسازی دگرسانی پروپیلیتیک به وسیله روش آنالیز مولفه اصلی



شکل ۲۸: نمایش PC4 برای آشکارسازی دگرسانی آرژیلیک در تصویر استر



شکل ۳۰: نمایش دگرسانی آرژیلیک (نقاط روشن) در تصویر لندست ۸ با تمرکز بر PC3

در میان پردازش‌های انجام شده بر روی تصویر سنجنده استر، روش‌های BR، MF و PCA به خوبی و با دقت بالایی دگرسانی‌های موجود در منطقه را بارزسازی کرده‌اند. روش LS-Fit در تصویر استر فقط برای بارزسازی دگرسانی آرژلیک مناسب بوده است و برای دگرسانی فلیک و پروپیلیتیک عملکرد مناسبی نداشته، اما تصویر لندست ۸ برای اکسید آهن و دگرسانی آرژلیک نتیجه قابل قبولی را به همراه داشته است. نتایج روش‌های یاد شده با نقشه دگرسانی منطقه تطابق قابل قبولی داشته‌اند. خروجی به دست آمده برای دگرسانی پتاسیک با روش فیلترگذاری تطبیقی نیز بر اساس عدم وجود دگرسانی پتاسیک در نقشه دگرسانی محدوده ظرفرند (نقشه ۳) قابل قبول بوده و در محدوده ظرفرند شامل نقاط روشن مبنی بر وجود دگرسانی پتاسیک نبوده است. روش‌های دیگر در مورد دگرسانی فلیک عملکرد قابل قبولی را ارائه ندادند و روش PCA برای بارزسازی دگرسانی پروپیلیتیک نسبت به دیگر روش‌ها مناسب‌تر بود.

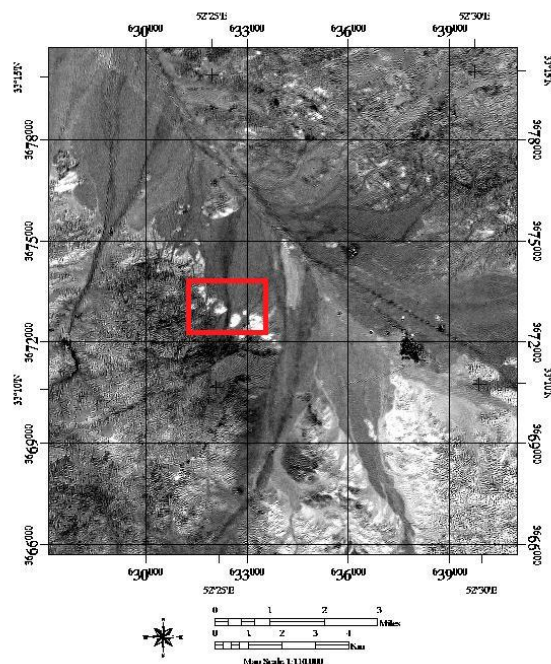
با استفاده از روش فیلترگذاری تطبیقی یا همان MF، دگرسانی پتاسیک در محدوده قابل شناسایی است. وجود دگرسانی آرژلیک، پتاسیک، پروپیلیتیک، از شواهدی است که امکان وجود ذخایر مس پورفیری را تقویت می‌کند و ممکن است در فواصل چندین کیلومتر از مرکز کانی‌سازی گسترش داشته باشند. در این راستا، آلتراسیون آرژلیک در سطح و اطراف ذخایر مس پورفیری گسترش دارند. غالب روش‌های اعمال شده بر تصویر منطقه مورد نظر این دگرسانی را به خوبی بارزسازی کرده‌اند. در نهایت نیز می‌توان اذعان داشت که لندست ۸ در بارزسازی دگرسانی‌های رسی موفق‌تر از استر عمل کرده است.

۶- مراجع

[۱] اعلی نیا، ز.، باقری، ه.، صالحی، م.؛ ۱۳۹۶؛ "بررسی‌های زمین‌شیمیایی، زمین‌فیزیکی و مطالعات سیالات درگیر در محدوده اکتشافی ظرفرند (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؛ "پلوتونیزم ترشیری منطقه اردستان". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.



شکل ۳۱: نمایش PC3 برای بارزسازی اکسید آهن مربوط به تصویر لندست ۸

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه داده‌های دو سنجنده استر و OLI مورد استفاده قرار گرفت. برای کاهش نویز، تصحیح اتمسفری بر روی این تصاویر اعمال شد. باندهای VNIR و SWIR در این دو تصویر برای بارزسازی اکسیدهای آهن، کربنات‌ها مجموعه کلریت- اپیدوت و دگرسانی‌های رسی به کار گرفته شدند. از روش‌های ترکیب‌های باندی مختلف در کنار تبدیل‌های نسبت باندی، کمترین مربعات رگرسیون شده، فیلترگذاری تطبیقی، آنالیز مولفه‌ها به عنوان روش‌های پردازشی بهره گرفته شد تا بتوان کارآمدی این تکنیک‌ها را در دو تصویر یاد شده مقایسه کرد. بر اساس نتایج حاصله به نظر می‌رسد با توجه به توان تفکیک رادیومتریکی بالاتر در تصویر OLI این تصاویر کاربرد بهتری در بارزسازی پدیده‌های مورد نظر دارند. مقایسه عملکرد دو سنجنده استر و OLI نشان می‌دهد که استر به واسطه قدرت تفکیک مکانی بهتر و همچنین قدرت تفکیک طیفی بهتر به واسطه داشتن ۵ باند در محدوده SWIR نسبت به ۲ باند لندست قابلیت بهتری در شناسایی دگرسانی‌ها از جمله تفکیک دگرسانی فلیک از آرژلیک را دارد.

در این مطالعه لندست ۸ برای جداسازی اکسیدهای آهن و داده‌های استر برای تعیین دگرسانی‌های گرمایی استفاده شدند.

- [۴] محمدی، س.؛ ۱۳۷۴؛ "بررسی ولکانیسم ترشیری منطقه اردستان (ایران مرکزی)". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
- [۵] لطیفی، ر.؛ ۱۳۷۹؛ "بررسی زمین شناسی و پترولوژی و ژئوشیمی توده‌های نفوذی جنوب و شمال غرب ظفرقند". پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.
- [۶] بهرامیان، ص.؛ ۱۳۸۶؛ "مطالعه پترولوژیکی و ژئوشیمیایی توده نفوذی بغم، شمال شرق اصفهان". پایان نامه 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 ۹۵-۱۰۸.
- [۸] هنرمند، م.، مؤید، م.، جهانگیری، ا.، بهادران، ن.؛ ۱۳۸۹؛ "بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی مجموعه نفوذی نطنز شمال اصفهان". پترولوژی، دوره اول، شماره ۳، ص ۶۵-۸۸.
- [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 ۱۷-۳۰.
- [۱۰] یگانه فر، ه.، قربانی، م.؛ ۱۳۸۹؛ "ژئوشیمی و پتروژنز سنگ‌های بازیک جنوب اردستان". بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران.
- [11] Delavari, M., and Damghani, A. (2022). "Geochemical variations of the Eocene volcanic rocks from Kahak area (south of Qom): Evidence for different conditions of mantle melting in the Urumieh-Dokhtar magmatic arc". Iranian Journal of Petrology, (Articles in Press).
- [۱۲] صادقیان، م.، قفاری، م.؛ ۱۳۹۰؛ "پتروژنز توده گرانیتوبیدی ظفرقند (جنوب شرق اصفهان)". پترولوژی، دوره دوم، شماره ۶، ص ۴۷-۷۰.
- [۱۳] امین الراعیایی یمینی، م.، طوطی، ف.، احمدیان، ج.؛ ۱۳۹۵؛ "دگرسانی گرمایی کانسار مس پورفیری جنوب غرب ظفرقند با نگرشی بر تحولات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی منطقه". پژوهش‌های دانش زمین، دوره هفتم، شماره ۲۵، ص ۷۵-۹۰.
- [۱۴] امین الراعیایی یمینی، م.، طوطی، ف.، امین الراعیایی یمینی، م.، احمدیان، ج.؛ ۱۳۹۷؛ "پلاژیوکلاز به عنوان شاهدهی از تحولات سیستم ماگمایی کانسار مس پورفیری ظفرقند، شمال شرق اصفهان". زمین‌شناسی اقتصادی، دوره دهم، شماره ۱، ص ۶۱-۷۶.
- [۱۵] محمدی، س.، ندیمی، ع.، ر.، علمی نیا، ز.؛ ۱۳۹۷؛ "بررسی ارتباط کانی‌سازی و پهنه‌های دگرسانی با ساختارهای زمین‌ساختی با کمک مطالعات دورسنجی در منطقه جنوب اردستان (شمال شرق اصفهان)". زمین‌شناسی اقتصادی، دوره دهم، شماره ۱، ص ۶۱-۷۶.
- [۱۶] 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] Asadi Haroni, H. (2000). "The Zarshuran gold model applied in a mineral exploration GIS in Iran". PhD. Thesis, Delft University of Technology and ITC.
- [۱۸] اصلانی، س.، بحرودی، ع.، کرمی، ج.، خودرس حقیقی، ا.؛ ۱۳۸۷؛ "شناسایی و تفکیک زون‌های آلتراسیون در محدوده اندیس مس-طلا سربیشه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای ASTER". دانشکده فنی، دانشگاه تهران، دوره پنجم، ص ۶۱۵-۶۰۷.
- [۱۹] عاصی، م.؛ ۱۳۹۳؛ "مفاهیم سنجش از دور". انتشارات سیمای دانش، تهران، ویرایش اول.
- [۲۰] قربانی، م.؛ ۱۳۸۱؛ "دیبچه‌ای بر زمین‌شناسی اقتصادی ایران". انتشارات پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور.
- [۲۱] سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور؛ ۱۳۸۳؛ "گزارش اکتشاف ژئوشیمیایی سیستماتیک در برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان".
- [22] Afzal, P., Fadakar Alghalandis, Y., Moarefvand, P., Rashidnejad Omran, N., and Asadi Haroni, H. (2012). "Application of power-spectrum-volume fractal method for detecting hypogene, supergene enrichment, leached and barren zones in Kahang Cu porphyry deposit, Central Iran". Journal of Geochemical Exploration, 112: 131-138.
- [23] Aliyari, F., Afzal, P., Harati, H., and Zenggian, H. (2020). "Geology, mineralogy, ore fluid characteristics, and 40Ar/39Ar geochronology of the Kahang Cu-(Mo) porphyry deposit, Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc, Central Iran". Ore Geology Reviews, 116: 103238.
- [۲۴] شاهی، ج.؛ 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] Sabbaghi, H., Moradzadeh, A., and Asadi Haron, H. (2017). "ASTER Spectral Analysis for Host Rock Associated with Porphyry Copper-molybdenum Mineralization". Geologica Macedonica, 31(1): 49-65.

- F. H., and Kahle, A. B. (1977). "Mapping hydrothermal alteration in the Cuprite mining district, Nevada, using aircraft scanner images for the spectral region 0.46 to 2.36 μ m". *Geology*, 5(12): 713-718.
- [38] Gupta, R. P. (2003). "Remote sensing geology". Second Edition, Springer, pp. 655.
- [39] اسدی هارونی، ه.، فتحیان پور، ن.، امین احمدی، م. ه.؛ ۱۳۸۹؛ "پتانسیل یابی کانی سازی مس در کمربند متالوژنی کرمان با استفاده از تلفیق داده های اکتشافی در محیط GIS". دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- [40] Campbell, J. B., and Wynne, R. H. (2011). "Introduction to Remote Sensing". Fifth Edition, Ukraine: Guilford Publications.
- [41] 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.
- [42] 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_LIT)". Department of the Interior U.S Geological Survey, pp. 16.
- [43] Abubakar, A. J., Hashim, M., and Beiranvand Pour, A. (2019). "Remote Sensing satellite imagery for prospecting geothermal systems in an aseismic geologic setting: Yankari Park". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 80: 157-172.
- [44] 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.
- [45] پردل، ف.، ابراهیمی، ع.، عزیزی، ز.؛ ۱۳۹۸؛ "تأثیر روش های تصحیح جوی بر رابطه میان شاخص های گیاهی و تاج پوشش (مطالعه موردی: مرتع مرجن بروجن)". *نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، دوره هفتم، شماره ۲، ص ۱۵۳-۱۳۳*.
- [46] 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 Ultraspacectral Imagery XI*, 5806: 668-678.
- [47] John, D. A., Ayuso, R. A., Barton, M. D., Blakely, R. J., Bodnar, R. J., Dilles, J. H., Gray, F., Graybeal, F. T., Mars, J. C., McPhee, D. K., Seal, R. R., Taylor, [27] Whitney, D. L., and Evans, B. W. (2010). "Abbreviations for names of rock-forming mineral". *American Mineralogist*, 95(1): 185-187.
- [28] گوانجی، ن.؛ ۱۳۸۹؛ "بررسی مکانیسم جایگزینی توده گرانیتوئیدی جنوب ظفرقند (اردستان) به وسیله روش AMS". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، گروه زمین شناسی، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [29] غفاری، م.؛ ۱۳۸۹؛ "پترولوزی و ژئوشیمی توده گرانیتوئیدی ظفرقند (جنوب شرق اردستان)". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین-پترولوزی، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [30] 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.
- [31] 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 Image and Image Processing to Regional Problems and Geologic Mapping in Northern Arizona". *NASA/JPL Technical Reports 32-1597*, NASA: Pasadena, CA, USA.
- [32] Rowan, L. C., Hook, S. J., Abrams, M. J., and Mars, J. C. (2003). "Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system". *Economic Geology*, 98(5): 1019-1027.
- [33] 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.
- [34] Ramachandran, R., Justice, C. O., and Abrams, M. J. (2010). "Land Remote Sensing and Global Environmental Change: NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS". Eds., Springer: New York, NY, USA, Chapter 4, 483-508.
- [35] Va 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.
- [36] Beiranvand Pour, A., and Hashim, M. (2015). "Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran". *Journal of Taibah University for Science*, 9(2): 155-166.
- [37] Abrams, M. J., Ashley, R. P., Rowan, L. C., Goetz, A.

شناسایی و تفکیک مناطق حاوی دگرسانی هیدروترمالی در ورقه یکصد هزار ابهر، شمال‌باختر ایران". اولین همایش فناوری‌های نوین در انرژی و مواد.

- [58] Mia, B., and Fujimitsu, Y. (2012). "Mapping hydrothermal altered mineral deposits using Landsat 7 ETM+ image in and around Kuju volcano, Kyushu, Japan". *Journal of Earth System Science*, 121: 1049-1057.
- [59] Mather, P. M., and Koch, M. (2010). "Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction". John Wiley & Sons, Chichester, pp. 360.
- [60] Bedini, E. (2012). "Mapping alteration minerals at Malmbjerg molybdenum deposit, central East Greenland, by kohonen self-organizing map and matched filter analyses of HyMap data". *International Journal of Remote Sensing*, 33(4): 939- 961.
- [61] Harsanyi, J. C. (1993). "Detection and classification of subpixel spectral signatures in hyperspectral image sequences". University of Maryland Baltimore County, pp. 232.
- [۶۲] آلیانی، ف.، دادفر، ث.، معانی جو، م.؛ ۱۳۹۳؛ "آشکارسازی زون‌های دگرسانی آهن حاجی‌آباد، با استفاده از داده‌های (SWIR+VNIR) سنجنده ASTER". علوم زمین، دوره بیست و چهارم، شماره ۹۴ (زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست)، ص ۷۳-۸۰.
- [63] El-Desoky, H. M., Tende, A. W., Abdel-Rahman, A. M., Ene, A., Awad, H. M., Fahmy, W., El-Awny, H., and Zakaly, H. M. H. (2022). "Hydrothermal Alteration Mapping Using Landsat 8 and ASTER Data and Geochemical Characteristics of Precambrian Rocks in the Egyptian Shield; A Case Study from Abu Ghalaga, Southeastern Desert, Egypt". *Remote Sensing*, 14(14): 3456.
- [۶۴] حسنی، ح.، بهرامی، ی.؛ ۱۳۹۷؛ "سنجش از دور". انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- [65] Adiri, Z., El Harti, A., Jellouli, A., Maacha, L., and Bachaoui, E. M. (2016). "Lithological mapping using Landsat 8 OLI and Terra ASTER multispectral data in the Bas Drâa inlier, Moroccan Anti Atlas". *Journal of Applied Remote Sensing*, 10: 016005.
- [66] Crosta, A. P., De Souza Filho, C. R., Azevedo, F., and Brodie, C. (2003). "Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis". *International Journal of Remote Sensing*, 24(21): 4233-4240.
- [67] Moradi, R., and Boomeri, M. (2017). "Remote sensing detection of altered zones associated with Cu-Mo R. D., and Vikre, P. G. (2010). "Porphyry copper deposit model". chap. B of Mineral deposit models for resource assessment: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-B, pp. 169.
- [48] Corumluoglu, O., Vural, A., and Asri, I. (2015). "Determination of Kula basalts (geosite) in Turkey using remote sensing techniques". *Arabian Journal of Geosciences*, 8: 10105-10117.
- [49] Behbahani, B., Harati, H., Afzal, P., and Lotfi, M. (2023). "Determination of alteration zones applying fractal modeling and Spectral Feature Fitting (SFF) method in Saryazd porphyry copper system, central Iran". *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 172(172): 1-14. DOI: 10.19111/bulletinofmre.1264604.
- [50] Chaves, P. S., Sides, S. C., and Anderson, J. A. (1991). "Comparison of three different methods to merge multi resolutdata-Landsat TM and SPOT panchromatic". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(3): 265-303.
- [51] 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.
- [52] Mars, J. C., and Rowan, L. C. (2006). "Regional mapping of phyllic and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms". *Geosphere*, 2(3): 161-186.
- [53] Malekshahi, Sh., Rassa, I., Rashid Nejad Omran, N., and Lotfi, M. (2019). "Investigation of satellite image processing results for alteration with field evidences in Sarkouh porphyry copper deposit". *Iranian Remote Sensing & GIS*, 10(4): 1-26. (In Persian)
- [54] 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*, 115(4): 771-791.
- [55] 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.
- [56] Gupta, R. P. (2003). "Multispectral Imaging System". In: *Remote Sensing Geology*. Springer, Berlin, Heidelberg, 75-122. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-05283-9_5.
- [۵۷] بهرامی، ی.، حسنی، ح.، مقصودی، ع.؛ ۱۳۹۸؛ "به‌کارگیری داده‌های (SWIR+VNIR) سنجنده ASTER به منظور

- public domain satellite imagery for mineral exploration: A review of Landsat 8 and Sentinel 2 applications*". Ore Geology Reviews, 117: 103332.
- [70] Parcutela, N. E., Dimalanta, C. B., Armada, L. T., Austria, R. S., Gabo-Ratio, J. A., and Yumul Jr, G. P. (2022). "Band processing of Landsat 8-OLI multi-spectral images as a tool for delineating alteration zones associated with porphyry prospects: A case from Suyoc, Benguet, Philippines". IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1071: 012022.
- mineralization in North of Zahedan, SE Iran using Landsat-8 data*". Yerbilimleri, 38(3): 275-294.
- [68] Frutuoso, R., Lima, A., and Teodoro, A. C. (2021). "Application of remote sensing data in gold exploration: targeting hydrothermal alteration using Landsat 8 imagery in northern Portugal". Arabian Journal of Geosciences, 14: 459.
- [69] Adiri, Z., Lhissou, R., El Harti, A., Jellouli, A., and Chakouri, M. (2020). "Recent advances in the use of