



Remote sensing study of the Tappeh-Morgaris area in the west of Yazd using ASTER images: Economic geology point of view

Aylin Torabi¹, Majid Ghaderi^{1*}, Hossein-Ali Tajeddin¹, Valiollah Ahmadi-Khounsaraki²

¹ Department of Economic Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Iran Mineral Production and Supply Company (IMPASCO), Tehran, Iran

Article Info	Abstract
Keywords: Remote sensing, ASTER, Enhancement, Tappeh-Morgaris, Urumieh-Dokhtar	The Tappeh Morgaris deposit is located in the west of Yazd province, approximately 30 kilometers southwest of Nodoushan. This area, situated in the central part of the Urumieh-Dokhtar magmatic arc, comprises Upper Permian limestone to dolomitic limestone, Eocene volcanic and sedimentary rocks (including tuff, lava flows, sandstone, siltstone, shale), and Quaternary deposits. The Permian and Eocene units are intruded by post-Eocene granitoid bodies. In this study, ASTER images were employed to investigate hydrothermal alteration and iron mineralization within the study area. The remote sensing workflow included preprocessing, false color composite, band ratioing, Spectral Angle Mapper (SAM) classification for mineral and alteration mapping, and structural enhancement using filtering techniques. The goal of this research is to conduct remote sensing investigations in the study area to examine mineralization and alterations, and to validate and verify these findings through field observations and laboratory analyses (including hand specimens and thin sections).

¹Corresponding author Majid Ghaderi,

Email: mghaderi@modares.ac.ir

<https://doi.org/10.48306/jgrs.2025.531643.1015>

Received August 2025; Accepted November 2025

©2025 Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. This is an open article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

Extended abstract

1. Introduction:

Due to the application of remote sensing knowledge in various fields and also in the geosciences, because of cost reduction, acceleration of tasks, and coverage of vast areas, this method is also important for enhancing features related to economic geology. Remote sensing data have high potential for identifying alteration zones associated with ore deposits and ultimately in mineral exploration. Preparing geological maps and identifying faults and fractures that control mineral deposits at regional

and local scales play a major role in recognizing prospective areas and focusing exploration operations on identified points. The goal of this research is to introduce areas with iron mineralization potential, investigate hydrothermal alterations in the study area, integrate these with field and laboratory studies, and assist in solving exploration issues of the region at a regional scale.

Geology: The Tappeh Morgaris deposit is located in the west of Yazd province, approximately 30 kilometers southwest of Nodoushan. This area, situated in the central part of the Urumieh-Dokhtar magmatic arc, comprises Upper Permian limestone to dolomitic limestone, Eocene volcanic and sedimentary rocks (including tuff, lava flows, sandstone, siltstone, shale), and Quaternary deposits. The Permian and Eocene units are intruded by post-Eocene granitoid bodies (Figures 1 and 2).

2. Results:

Discussion: The false color composition of bands (RGB: 468) is suitable for detecting alterations in the ore deposit area due to the absorption of key minerals of the phyllic–argillic zone (kaolinite, illite, and montmorillonite) in band 6 (Short-Wave Infrared, SWIR) and the absorption of index minerals of the propylitic alteration (chlorite and epidote) in band 8 (SWIR). Figure 3 shows the false color composition image (bands: 468), where green represents propylitic alteration, and purple-pink colors indicate argillic and phyllic alterations. Yellow color corresponds to carbonate units, and red color enhances the location of intrusive bodies. Based on the processed images, it is observed that the northeast part of the area shows argillic and phyllic alterations, while the yellow color zone indicates carbonate units. Propylitic alteration is visible in the eastern part of the area.

For mapping alteration zones in the study area, the Spectral Angle Mapper (SAM) method was used. At this processing stage, epidote and chlorite minerals (the index minerals of the propylitic alteration zone) as well as magnetite and hematite were selected from the USGS Spectral Library and mapped on the study area's ASTER image. Serpentine (index mineral of the Mg skarn zone), was also enhanced (Figure 4).

In this study, the band ratio $(7+9)/8$ was used to enhance the index minerals of the propylitic alteration zone (epidote, chlorite, and calcite), and the band ratio $(5+7)/6$ was applied to enhance the key minerals of the phyllic alteration zone (including muscovite-sericite, smectite, and illite). Furthermore, band ratio $(5/3) + (1/2)$ was used to identify the probable occurrence areas of magnetite mineralization (Figure 5).

To understand the structural element mechanisms and to determine the possible relationships between fractures and alteration zones in the area, the Directional filter was applied in two directions: N45E and N45W (Figure 6). As shown in Figure 6-b, the main structural trend is northwest-southeast, which corresponds with the trend of hydrothermal alterations in the study area. To demonstrate the type of the iron mineralization, field photographs, hand specimens, and thin sections were utilized (Figures 7 and 8).

3. Conclusion:

The correspondence between field and mineralogical evidence and the results of ASTER image processing indicates the acceptable accuracy of these methods in the preliminary exploration stages.

مطالعه سنجش از دور محدوده تپه مورگاریس در غرب یزد با استفاده از تصاویر سنجنده‌ی استر از دیدگاه زمین‌شناسی اقتصادی

آیلین ترابی^۱، مجید قادری^{۲*}، حسینعلی تاج‌الدین^۳، ولی‌اله احمدی خونسارکی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (aylin.torabi@modares.ac.ir)

^{۲*} استاد، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (mghaderi@modares.ac.ir)

^۳ استادیار، گروه زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (h.tajeddin@modares.ac.ir)

^۴ کارشناس ارشد اکتشاف، واحد اکتشاف، شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، تهران، ایران (vali.geo1371@gmail.com)

چکیده

کانسار تپه مورگاریس در غرب یزد و در فاصله ۳۰ کیلومتری جنوب‌غرب ندوشن واقع شده است. این محدوده که در بخش میانی کمان ماگمایی ارومیه- دختر قرار دارد، از سنگ‌های آهکی تا آهک دولومیتی منسوب به پرمین بالایی، سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی (شامل توف، گدازه، ماسه‌سنگ، سیلتستون و شیل) با سن ائوسن و نهشته‌های کواترنری تشکیل شده است. واحدهای سنگی پرمین و ائوسن توسط توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی پس از ائوسن قطع شده‌اند. در این پژوهش به منظور شناسایی دگرسانی‌های گرمایی و کانی‌سازی آهن در محدوده مورد مطالعه از تصاویر سنجنده استر استفاده شده است. عملیات سنجش از دور داده‌های محدوده شامل مراحل پیش‌پردازش، پردازش ترکیب رنگی کاذب، نسبت‌گیری بانندی، نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM) جهت بارزسازی کانی‌ها و دگرسانی‌ها، همچنین روش فیلترگذاری جهت بارزسازی ساختارها می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش انجام مطالعات سنجش از دور در محدوده مورد مطالعه جهت بررسی کانه‌زایی و دگرسانی‌ها، تطبیق و صحت‌سنجی این مطالعات با مشاهدات صحرایی و آزمایشگاهی (بررسی نمونه‌های دستی و مقاطع نازک) می‌باشد.

واژگان کلیدی: سنجش از دور، سنجنده‌ی استر، بارزسازی، تپه مورگاریس، ارومیه- دختر.

۱- مقدمه

سنجش از دور، علم شناسایی، مشاهده و اندازه‌گیری اشیاء بدون تماس مستقیم با آنها است. این فرایند شامل شناسایی و اندازه‌گیری تابش در طول موج‌های بازتابش یافته مختلف است که از اشیاء یا مواد دوردست، بازتاب یا منتشر شده‌اند که از این طریق می‌توان این اشیاء را شناسایی و دسته‌بندی کرد. این علم در علوم زمین به دلیل کاهش هزینه‌های اکتشاف و سرعت عمل بالا در پوشش مناطق وسیع، بسیار مورد توجه است. داده‌های سنجش از دور از پتانسیل بالایی برای شناسایی پهنه‌های دگرسانی مرتبط با کانسارها و در نتیجه، اکتشاف ذخایر معدنی برخوردار هستند. تهیه نقشه زمین‌شناسی و شناسایی گسل‌ها و شکستگی‌هایی که در مقیاس‌های ناحیه‌ای و محلی، نهشته‌های معدنی را کنترل می‌کنند، نقش عمده‌ای در شناخت مناطق مستعد و تمرکز عملیات اکتشافی در نقاط شناسایی شده دارند (Sabins, 1999).

سنجنده رادیومتر بازتابی و گسیل گرمایی فضا برد پیشرفته (ASTER)، یک سنجنده تصویربرداری چندطیفی است که قادر به اندازه‌گیری تابش‌های الکترومغناطیسی بازتابی و گسیل شده از سطح زمین و جو در ۱۴ باند می‌باشد (Yamaguchi et al., 1999; Abrams, 2000). این ۱۴ باند شامل سه باند در محدوده مرئی و فروسرخ نزدیک (VNIR) با طول موج بین ۰.۵۲ تا

¹ Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)

² Visible and Near-Infrared (VNIR)

۰,۸۶ میکرومتر و قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر، شش باند در محدوده فروسرخ موج کوتاه (SWIR) از ۱,۶ تا ۲,۴۳ میکرومتر با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و پنج باند در محدوده فروسرخ حرارتی (TIR) در با طول موج ۸,۱۲۵ تا ۱۱,۶۵ میکرومتر و قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر است. امکان تشخیص و شناسایی کانی‌های مرتبط با دگرسانی هیدروترمال در محدوده SWIR فراهم می‌باشد (Abrams and Hook, 1995). همچنین امکان شناسایی از راه دور کانی‌های اکسید آهن در خاک سطحی، با داده‌های محدوده مرئی و فروسرخ نزدیک (VNIR) و فروسرخ حرارتی (TIR) میسر است (Bedell, 2001; Ninomiya, 2003; Rockwell and Hofstra, 2008).

کمان ماگمایی ارومیه- دختر که بخشی از کمربند کوهزایی آلپ- هیمالیا است، به دلیل فعالیت‌های زمین‌ساختی و ماگمایی گسترده، یکی از مستعدترین مناطق فلززایی و بااهمیت برای اکتشاف و استخراج فلزات پایه و سنگین از جمله آهن می‌باشد (Stöcklin, 1968). اوج فعالیت ماگمایی این کمان مربوط به ائوسن است (Alavi, 2004). بسیاری از زمین‌شناسان، ماهیت سنگ‌های ماگمایی ارومیه- دختر را به فرورانش نئوتتیس به زیر اوراسیا نسبت می‌دهند (Berberian and King, 1981; Mohajjel et al., 2003). این کمان به صورت کمپلکسی خطی و جدا میان زون سنندج- سیرجان و ایران مرکزی قرار گرفته است (Ghasemi and Talbot, 2006; Omrani et al., 2008).

کانسار آهن تپه مورگاریس، واقع در بخش مرکزی کمان ماگمایی ارومیه- دختر مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطالعات انجام شده در این محدوده، متمرکز بر زمین‌شناسی اقتصادی، پترولوژی و پتروژنز توده‌های نفوذی بوده است.

نقشه‌برداری از کانسارهای سطح زمین با استفاده از روش‌های سنجش از دور، فرصت‌های بیشتری را در مرحله اکتشافات مقدماتی فراهم می‌آورد (برای مثال: Rowan et al., 2003; Mars and Rowan, 2006; Gaber et al., 2010; Rajendran, 2017; Zhang, et al., 2018; Moradpour, 2020; Abubakar et al., 2024). همچنین در مطالعاتی همچون (Rowan et al., 2003; Mars and Rowan, 2006; Gaber et al., 2010; Rajendran, 2017; Zhang, et al., 2018; Moradpour, 2020; Abubakar et al., 2024) به بررسی‌های سنجش از دور در کانسارهای اسکارن آهن با استفاده از تصاویر سنجنده استر پرداخته شده و استفاده از این روش در مطالعه و اکتشاف کانسارهای این تیپ، کارآمد معرفی شده است. به همین دلیل، با توجه به قرارگیری کانسار آهن تپه مورگاریس در تیپ کانسارهای آهن اسکارنی و اهمیت مطالعات سنجش از دور در این کانسارها، این محدوده برای انجام مطالعات سنجش از دور به منظور تکمیل داده‌های اکتشافی محدوده انتخاب گردیده است.

در پژوهش حاضر به منظور شناسایی دگرسانی‌های گرمایی و کانی‌سازی آهن، از تصاویر سنجنده استر (ASTER) استفاده شده است. هدف اصلی از انجام این پژوهش، آشکارسازی و شناخت زون‌های دگرسانی کنترل‌کننده کانی‌سازی آهن و بارزسازی گسل‌های محدوده مورد مطالعه و تلفیق آن با مطالعات میدانی و آزمایشگاهی و کمک به حل مسائل اکتشافی محدوده در مقیاس ناحیه‌ای است.

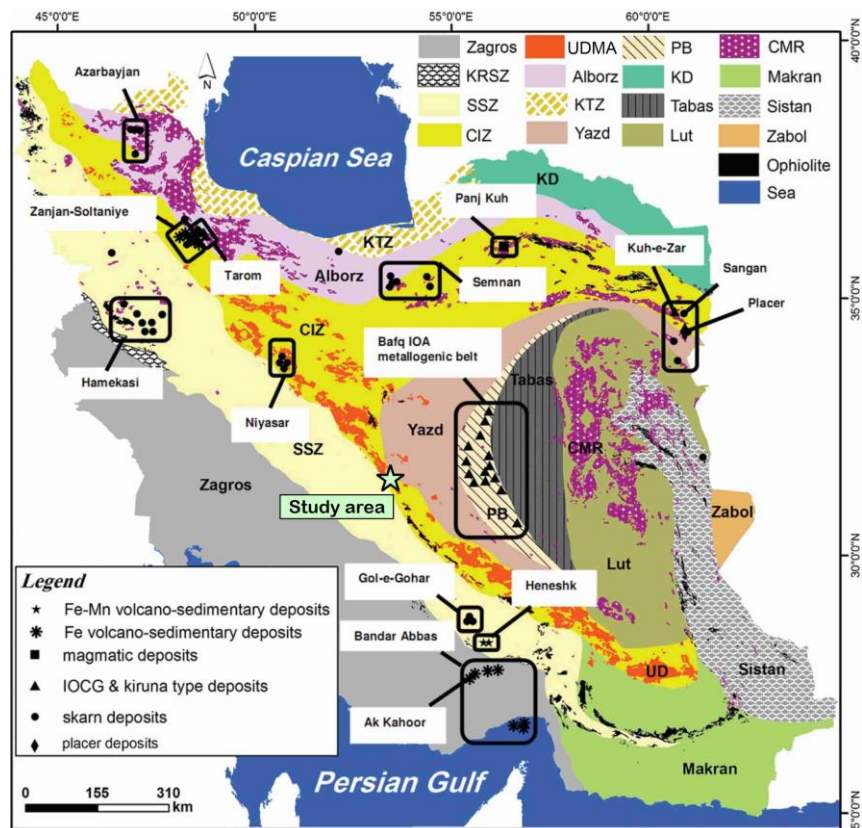
۲- محدوده مطالعاتی

محدوده اکتشافی تپه مورگاریس به وسعت حدود ۲۶/۵ کیلومتر مربع در فاصله ۳۰ کیلومتری جنوب غرب ندوشن در غرب یزد و در کمان ماگمایی ارومیه- دختر قرار دارد (شکل ۱). محدوده تپه مورگاریس در چهارگوش زمین‌شناسی ۱:۲۵۰,۰۰۰:۱:۲۵۰,۰۰۰ و ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰:۱:۱۰۰,۰۰۰ کفه طاقستان واقع شده است. واحدهای سنگی برونزدیافته در محدوده، از شیل و ماسه‌سنگ‌های سازند شمشک (به سن تریاس- ژوراسیک)، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و شیل‌های سازند سنگستان و سنگ‌آهک‌های سازند تفت (با سن کرتاسه)، گدازه و توفهای متعلق به ائوسن با ترکیب آندزیت تا داسیتی و نهشته‌های کواترنری تشکیل یافته است. در این

¹ Short-Wave Infrared (SWIR)

² Thermal Infrared (TIR)

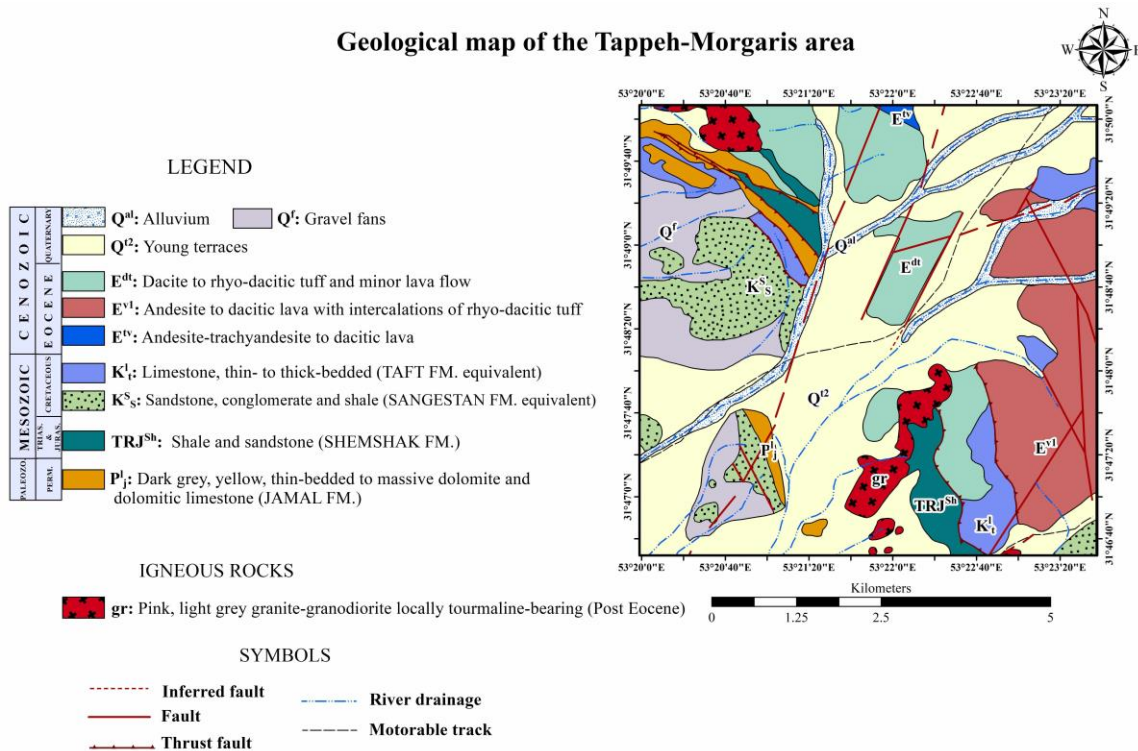
مجموعه، توده نفوذی با ترکیب گرانیت (تا گرانودیوریت) با سن پس از ائوسن تزریق شده است (شکل ۲). در محدوده مزبور، مجموعه‌ای از کانی‌سازی‌های فلزی (از جمله آهن، مس، طلا، سرب و روی) شکل گرفته که کانی‌سازی آهن تپه مورگاریس یکی از آنها است. کانی‌سازی آهن در این محدوده، بیشترین شباهت را با کانسارهای تیپ اسکارنی نشان می‌دهد. براساس نقشه ۱:۱۰۰,۰۰۰ (شکل ۲) واحدهای سنگی رخنمون یافته در محدوده از قدیم به جدید شامل واحدهای دولومیت و آهک دولومیتی ضخیم‌لایه و توده‌های گسلیده و به‌هم‌ریخته سازند جمال به رنگ‌های قهوه‌ای، زرد و خاکستری با میان‌لایه‌هایی از کوارتزآرنایت (واحد P_j^1)، شیل و ماسه‌سنگ سازند شمشک (واحد TRJ_j^{sh})، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و شیل نازک‌لایه معادل سازند سنگستان به رنگ خاکستری تیره، سبز و قهوه‌ای (واحد K_s^S)، آهک‌های اربیتولین‌دار معادل سازند تفت با رنگ خاکستری (واحد K_1^1)، آندزیت تا تراکی‌آندزیت‌های ائوسن (واحد E^{IV})، توف و گدازه‌های اسیدی به رنگ سبز و خاکستری روشن ائوسن (واحد E^{II})، توف‌های اسیدی (داسیتی تا ریوداسیتی) ائوسن (واحد E^{dt}) و نهشته‌های کواترنری می‌باشد. توده نفوذی گرانیتی نیز با سن پس از ائوسن رخنمون دارد و زمان احتمالی جایگیری این توده با توجه به قطع کردن واحدهای آتشفشانی ائوسن به احتمال زیاد الیگوسن-میوسن (طبق مطالعات قبلی احتمالاً الیگوسن زیرین (Shahsavari Alavijeh et al., 2019)) می‌باشد.



شکل ۱- پراکندگی کانسارهای آهن در زون‌های زمین‌شناسی-ساختاری ایران براساس تیپ‌های کانه‌زایی با تغییرات از (Nabatian et al., 2015). تقسیم‌بندی زون‌های ساختاری برگرفته از (Alavi, 1991; Aghanabati, 1998, 2005). محدوده مورد مطالعه با نشان ستاره مشخص گردیده است. ۱۳ زون ساختاری نشان داده شده در نقشه عبارتند از:

- (1) Zagros ranges (Zagros), (2) Kermanshah Radiolarites subzone (KRSZ), (3) Sanandaj-Sirjan magmatic-metamorphic zone (SSZ), (4) Urumieh-Dokhtar magmatic arc (UDMA), (5) Central Iranian microcontinent (CIM) (includes the Yazd, Posht-e-Badam block (PB), Tabas and Lut blocks), (6) Alborz ranges, western Alborz-Azərbayjan (Alborz), (7) Khazar-Talesh-Ziveh structural zone (KTZ), (8) Central Iranian zone (CIZ), (9) East Iran ranges (Sistan), (10) Makran zone (Makran), (11) Kopeh-Dagh ranges (KD), (12) Zabol area (Zabol), and (13) Cenozoic magmatic rocks (CMR).

Geological map of the Tappeh-Morgaris area



شکل ۲- محدوده مورد مطالعه در نقشه ۱:۱۰۰,۰۰۰ کفه طاقستان (با تغییرات از قلمقاش و محمدی‌ها، ۱۳۸۶).

۳- مواد و روش کار

این پژوهش با استفاده از مطالعات سنجش از دور، مطالعات صحرایی و مقایسه نتایج حاصل با یکدیگر در محدوده تپه مورگاریس، به عنوان بخشی از زون ساختاری ارومیه- دختر انجام گرفته است. عملیات سنجش از دور داده‌های استر شامل مراحل پیش‌پردازش، پردازش ترکیب رنگی کاذب، نقشه‌بردار زاویه طیفی^۱ (SAM) برای بارزسازی کانی‌ها و دگرسانی‌ها می‌باشد. تصویر استر تصویر انتخاب شده برای محدوده تپه مورگاریس، با اندازه پیکسل ۱۵ در ۱۵، شامل ۴۹۲۷ ردیف و ۵۵۸۱ ستون می‌باشد. این تصویر در محدوده VNIR طول موج بین ۰/۵۵۶ تا ۰/۸۰۷ میکرومتر دارد. تصویر در سال ۲۰۰۱ برداشت شده و کمتر از ده درصد پوشش ابری دارد و گستره‌ای با ابعاد ۲۰ در ۲۰ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد.

پیش‌پردازش‌های انجام شده شامل روش‌های روی هم انداختن لایه‌ها^۲، تغییر اندازه^۳ و تصحیحات اتمسفری (IAAR) است. در این پژوهش، جهت پردازش و تصویرسازی داده‌ها از نرم‌افزارهای ENVI 5.3 و ArcMap 10.8.1 استفاده شده است. به‌منظور پردازش تصویر از روش‌های ترکیب رنگی کاذب (FCC)، فیلترگذاری جهت^۴ و نقشه‌برداری زاویه طیفی (SAM) بهره‌گیری شده است. همچنین محاسبات نرم‌افزاری شامل عملیات محاسبات باندی و نسبت‌گیری باندی نیز اجرا شده است. در ادامه نیز خروجی مورد نظر تهیه شده و با مشاهدات صحرایی و مطالعات آزمایشگاهی (بررسی نمونه‌های دستی و مطالعات میکروسکوپی) تلفیق گردیده است.

¹ Spectral Angle Mapper Classification (SAM)

² Layer stacking

³ Resize

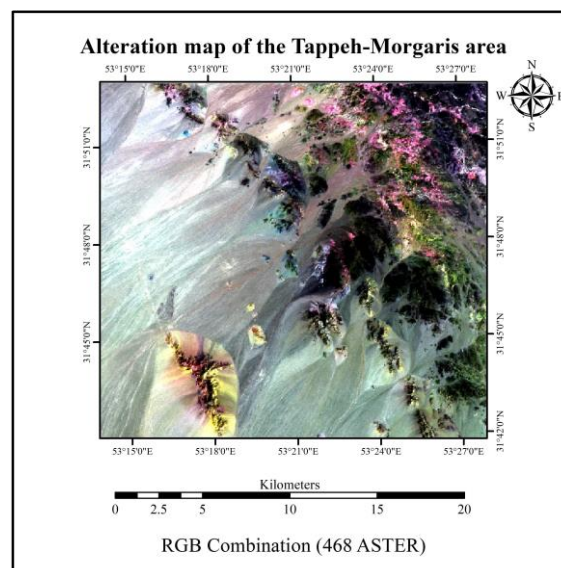
⁴ Directional

۴- بحث و نتایج

در مطالعات پیشین در محدوده مورد مطالعه، دگرسانی‌های گزارش شده در کانسار چندفلزی ندوشن (واقع در جنوب محدوده مورد مطالعه) به‌طور عمده شامل دگرسانی‌های سیلیسی-آرژیلیک، دولومیتی شدن، پروپیلیتیک، و اکسید و هیدروکسیدهای آهن می‌باشد (سپهری‌فر و همکاران، ۱۳۹۰؛ نوذری و همکاران، ۱۴۰۳). در این پژوهش، از تلفیق مطالعات صحرایی و پردازش تصویر سنجنده استر به جهت شناسایی و مطالعه دگرسانی و کانی‌سازی در محدوده کانسار آهن تپه مورگاریس استفاده شده است. به‌منظور شناسایی و تفکیک واحدهای سنگی و نیز زون‌های دگرسانی پروپیلیتیک و سرپانتینی از روش ترکیب رنگی کاذب (RGB:468) و برای نمایش پهناهای دگرسانی، از روش نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM) استفاده شده است.

۴-۱- ترکیب رنگی کاذب (FCC):

با استفاده از اعمال روش ترکیب رنگی کاذب، که با قرار دادن باندهای مناسب تصویر در کانال‌های قرمز، سبز و آبی انجام می‌شود، عوارض مورد نظر به رنگ‌های مختلف در تصویر نمایان می‌شوند تا عوارض مطلوب به آسانی از تصویر به‌دست آمده استخراج شود. ترکیب رنگی کاذب باندهای (RGB:468) به‌دلیل جذب کانی‌های شاخص زون فیلیک-آرژیلیک (کائولینیت، ایلیت و مونتورینونیت) در باند ۶ مادون قرمز کوتاه (SWIR) و جذب کانی‌های شاخص دگرسانی پروپیلیتیک (کلریت و اپیدوت) در باند ۸ مادون قرمز کوتاه، برای آشکارسازی دگرسانی‌ها در محدوده کانسار مناسب هستند (Di Tommaso and Rubinstein, 2007; Boloki and Poormirzaee, 2009; Azizi et al., 2010). در شکل ۳ تصویر ترکیب رنگی کاذب ۴۶۸ نشان داده شده است که رنگ سبز نشان‌دهنده دگرسانی پروپیلیتیک و رنگ‌های بنفش- صورتی نیز بیانگر دگرسانی‌های آرژیلیک و فیلیک می‌باشند. رنگ زرد نمایانگر واحدهای کربناته و رنگ قرمز نیز شاخص موقعیت وجود توده‌های نفوذی است. همانطور که مشاهده می‌گردد، شمال‌شرق محدوده دارای دگرسانی‌های آرژیلیک و فیلیک و در بخش زرد رنگ جنوب‌غرب، واحد کربناته قابل مشاهده است. در شرق محدوده نیز دگرسانی پروپیلیتیک دیده می‌شود که این تطابق در نقشه ۱:۱۰۰,۰۰۰ کفه طاقستان، در شمال‌شرق و جنوب‌غرب محدوده مورد مطالعه قابل مشاهده است (شکل ۳).



شکل ۳- ترکیب رنگی کاذب (RGB:468) سنجنده استر از محدوده تپه مورگاریس

۴-۲- روش نقشه بردار زاویه طیفی (SAM):

روش نقشه بردار زاویه طیفی (SAM) با مقایسه شباهت طیفی پیکسل‌های تصویر با نمونه‌های طیفی مرجع، توانایی شناسایی دقیق‌تر و تفکیک‌پذیری بالاتر ویژگی‌ها و پدیده‌ها را فراهم می‌آورد که جهت بارزسازی کانی‌ها از این روش برای نمایش رخداد دگرسانی استفاده شده است. تشکیل سرپانتین در مرحله دگرسانی پسروده از دگرسانی‌های اصلی اسکارن‌های منیزیم‌دار بوده و پس از تشکیل مگنتیت رخ می‌دهد (Shabynin, 1971; Einaudi et al., 1981). تشکیل کانی‌های اپیدوت و کلریت نیز مربوط به همین مرحله دگرسانی پسروده می‌باشد (Einaudi et al., 1981). بنابراین، طیف کانی‌های اپیدوت و کلریت (کانی‌های شاخص زون دگرسانی پروپیلیتیک)، سرپانتین و نیز کانی‌های مگنتیت و هماتیت از کتابخانه طیفی USGS انتخاب و با روش نقشه بردار زاویه طیفی روی تصویر استر بارزسازی شدند (شکل ۴). حضور دو کانی مگنتیت و سرپانتین در بخش مرکزی محدوده، که محل اصلی کانه‌زایی آهن است، بیشترین مقادیر بارزسازی را از خود نشان می‌دهد.

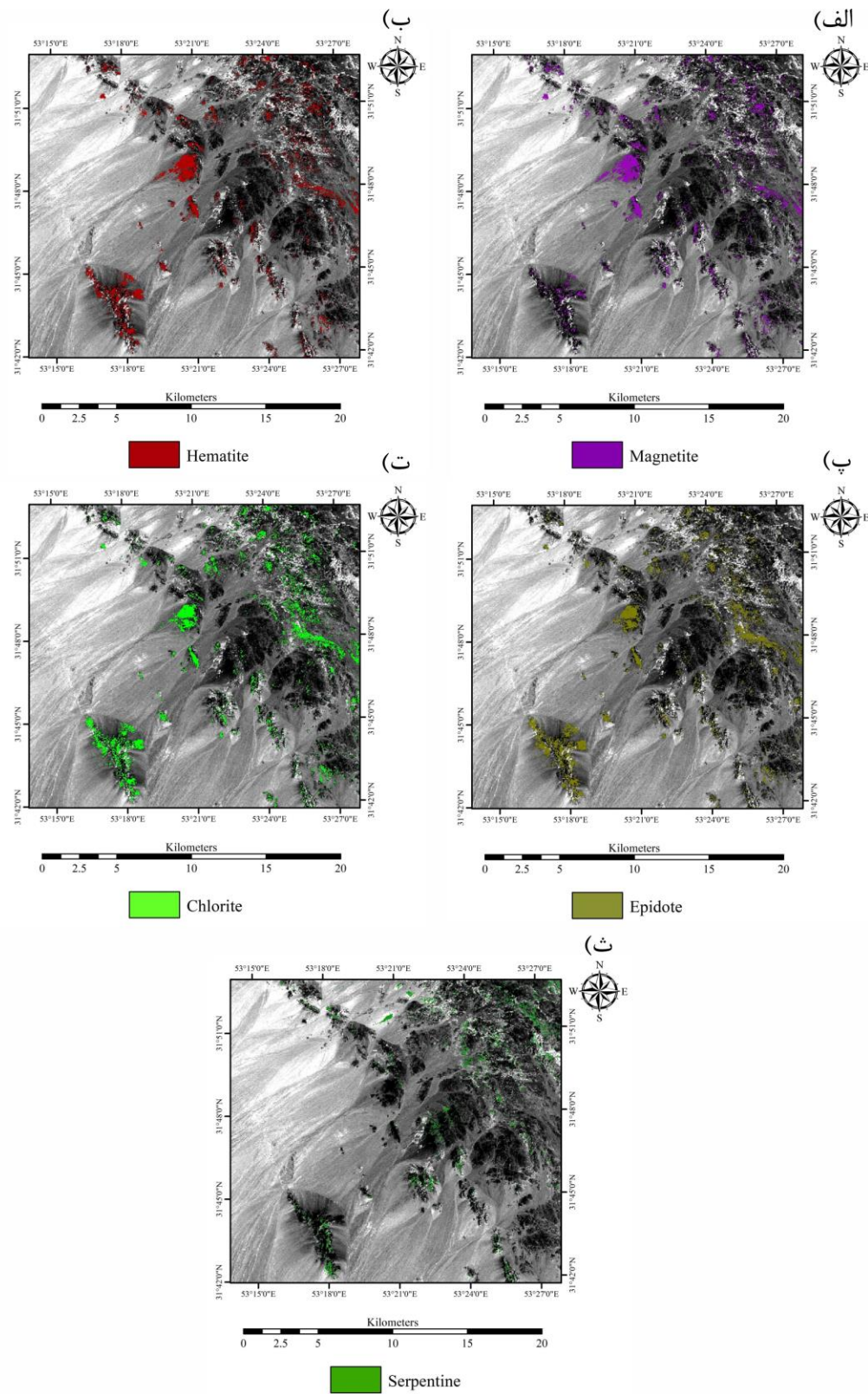
با این حال، باید توجه داشت که از دیدگاه طیفی، کانی‌های مگنتیت و هماتیت در محدوده باندهای سنجنده استر فاقد ویژگی‌های جذبی شاخص و متمایز هستند و در نتیجه، قابلیت شناسایی مستقیم آنها براساس امضای طیفی محدود است. در مقابل، کانی‌های سرپانتین، کلریت و اپیدوت به دلیل وجود جذب مشخص در باند ۸ سنجنده استر، رفتار طیفی نسبتاً مشابهی از خود نشان می‌دهند. این هم‌پوشانی طیفی می‌تواند موجب پاسخ‌های مشابه الگوریتم SAM و بارزسازی هم‌زمان این کانی‌ها در نواحی یکسان شود. بر این اساس، نواحی منتسب به کانی‌های مگنتیت و هماتیت در نتایج بارزسازی الزاماً بیانگر حضور قطعی این کانی‌ها نبوده و ممکن است تحت تأثیر محدودیت‌های طیفی سنجنده استر و هم‌پوشانی طیفی با سایر کانی‌ها قرار گرفته باشند. بنابراین، تفسیر این نتایج نیازمند احتیاط و تلفیق با داده‌های زمین‌شناسی، مطالعات میدانی و شواهد آزمایشگاهی است.

۴-۳- نسبت‌گیری باندی:

نسبت‌گیری باندی در واقع یکی از روش‌های پردازش تصاویر چندطیفی است که شامل تقسیم پیکسل‌های یک تصویر یا یک باند طیفی به پیکسل‌های متناظر آن با تصویر یا باند دیگر است. روش نسبت‌گیری باندی می‌تواند برای بارزسازی اختلاف طیفی میان باندها مورد استفاده قرار گیرد (Sabins, 1999; Rowan and Mars, 2003).

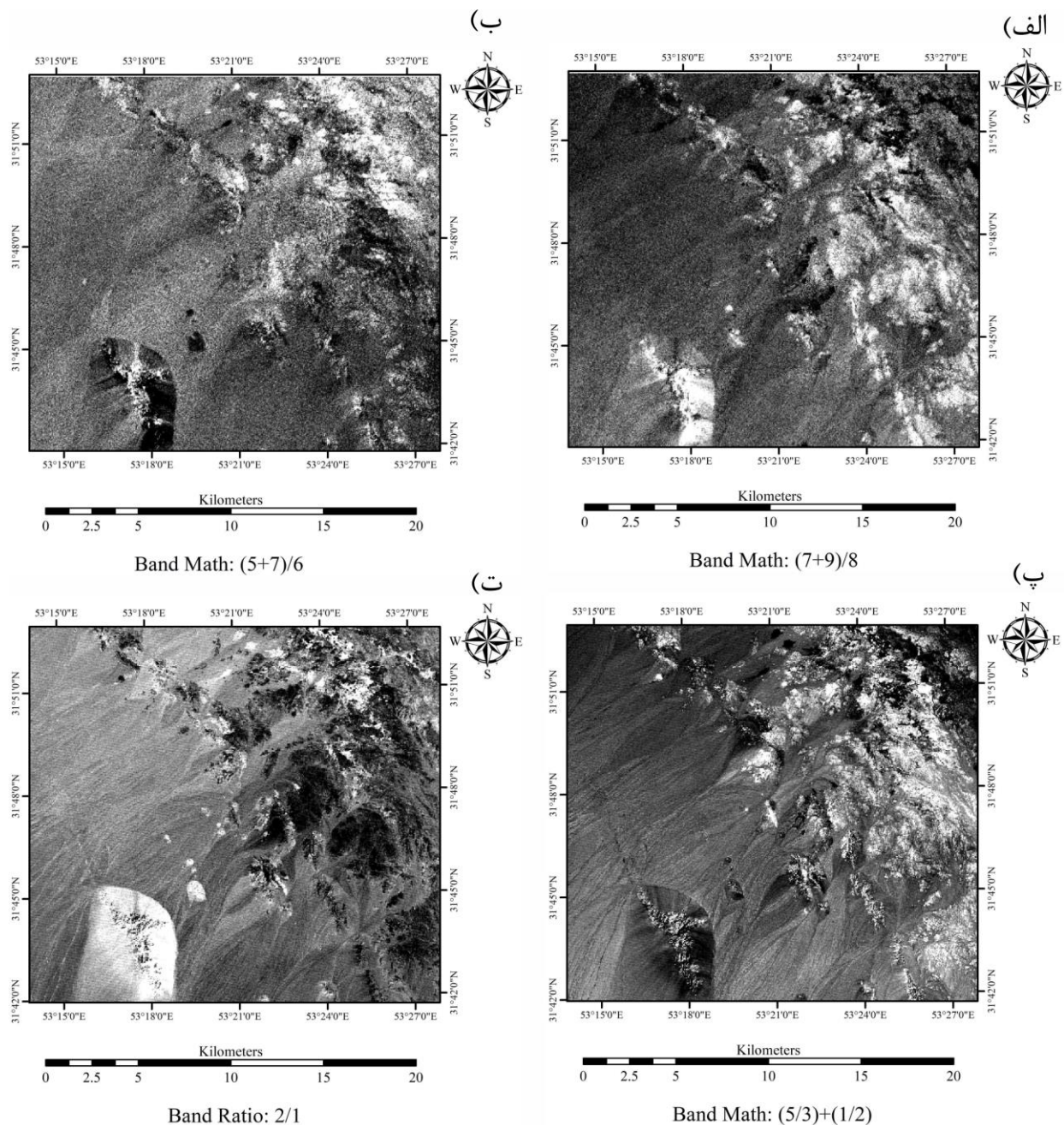
جهت بارزسازی زون دگرسانی پروپیلیتیک (اپیدوت، کلریت و کلسیت) از نسبت باندی $(7+9)/8$ و جهت بارزسازی کانی‌های شاخص زون دگرسانی فیلیک (مسکوویت-سریسیت، اسمکتیت و ایلیت) از نسبت باندی $(5+7)/6$ استفاده شده است، که این نسبت‌ها با توجه به نمودار استاندارد کانی‌های مربوط به این دگرسانی‌ها از کتابخانه طیفی USGS به دست آمده است. دگرسانی پروپیلیتیک با توجه به نقشه دگرسانی بارز شده در بخش‌های شرقی و جنوب شرقی بیشترین حضور را دارد که بخش مرکزی محدوده مرتبط با کانه‌زایی می‌باشد. دگرسانی فیلیک نیز در بخش‌های شمال شرق و مرکز، بیشترین بارزسازی را نشان می‌دهد (شکل ۵ الف و ب). با استفاده از نسبت باندی $4/5$ (به دلیل بازتاب در باند ۴ و جذب در باند ۵)، گستره زون دگرسانی آرژیلیک (کائولینیت، پیروفیلیت و آلونیت) مشخص گردید که شمال شرق محدوده بیشترین حضور برای این کانی‌ها پیش‌بینی می‌شود. با استفاده از راهنمای پردازش شاخص‌های کانی‌شناسی سنجنده استر^۱ برگرفته از (Kalinowski and Oliver, 2004)، ترکیب باندی $(1/2)+(5/3)$ برای کانی مگنتیت و نسبت باندی $2/1$ برای کانی هماتیت (به دلیل بازتاب در باند ۱ و جذب در باند ۲) استفاده شده (Prost, 2002; Soe et al., 2005) و گستره رخداد احتمالی کانی‌های اکسید آهن مشخص گردیده است (شکل ۵ پ و ت).

¹ ASTER mineral index processing manual



شکل ۴- الف بارزسازی مناطق محتمل با روش SAM و طیف آزمایشگاه USGS (الف) مگنتیت، (ب) هماتیت، (پ) اپیدوت، (ت) کلریت، (ث) سرپانتین

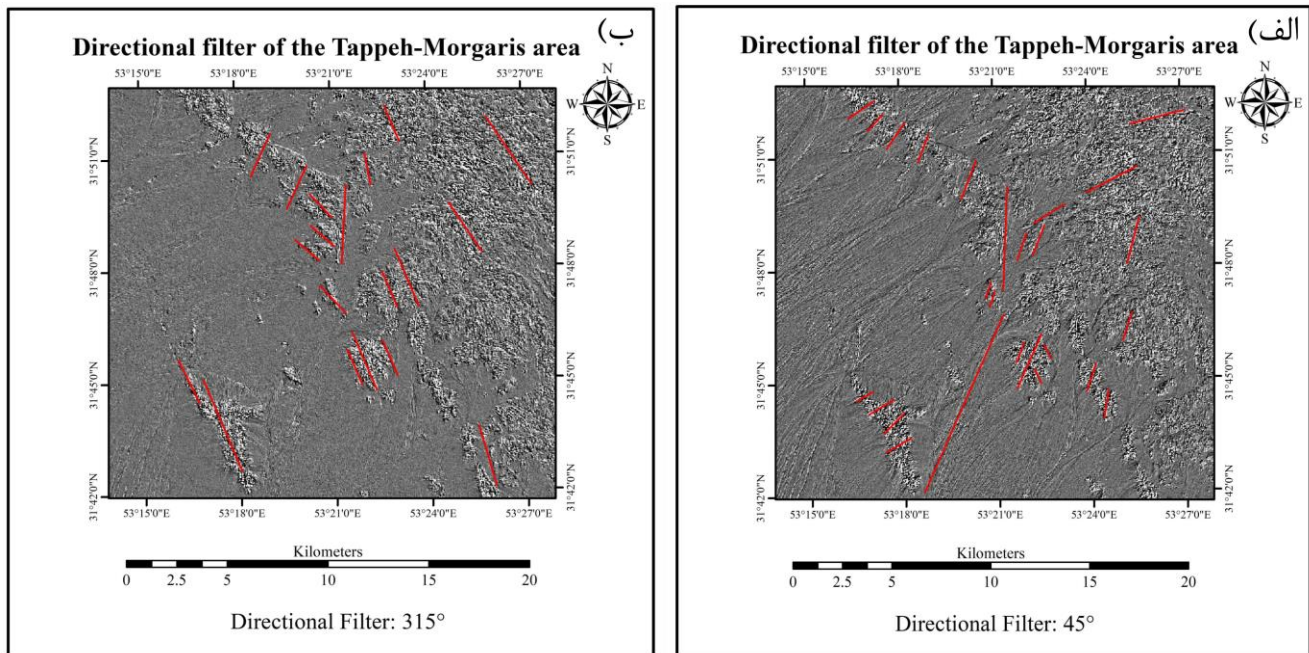
با مقایسه نواحی بارز شده برای کانه‌زایی مگنتیت در بارزسازی نقشه‌بردار زاویه طیفی و نسبت‌گیری باندی (شکل‌های ۴ الف و ۵ پ)، اینگونه برداشت می‌شود که در شکل ۴ الف، پردازش انجام شده با مشاهدات صحرایی انطباق دارد، در حالی که در شکل ۵ پ پراکندگی این بارزسازی برای کانه‌زایی مگنتیت بیشتر بوده و نقاط بارزسازی تمرکز ندارند. اما در همین بارزسازی پراکنده نیز طی مشاهدات صحرایی در بخش‌های کوچکی همخوانی نقاط مربوط به کانه‌زایی و نقشه بارزسازی شده یافت می‌شود.



شکل ۵- الف) ترکیب نسبت باندی $8/(7+9)$ جهت بارزسازی کانی‌های شاخص زون دگرسانی پروپیلیتیک (اپیدوت، کلریت و کلسیت)، ب) نسبت باندی $6/(5+7)$ جهت بارزسازی کانی‌های شاخص زون دگرسانی فیلیک (مسکوویت، سریسیت، اسمکتیت و ایلیت)، پ) ترکیب باندی $(1/2)+(5/3)$ جهت بارزسازی مناطق با حضور کانی مگنتیت، ت) استفاده از نسبت باندی $1/2$ جهت بارزسازی کانی هماتیت.

۴-۴- فیلترگذاری جهت‌دار (Directional):

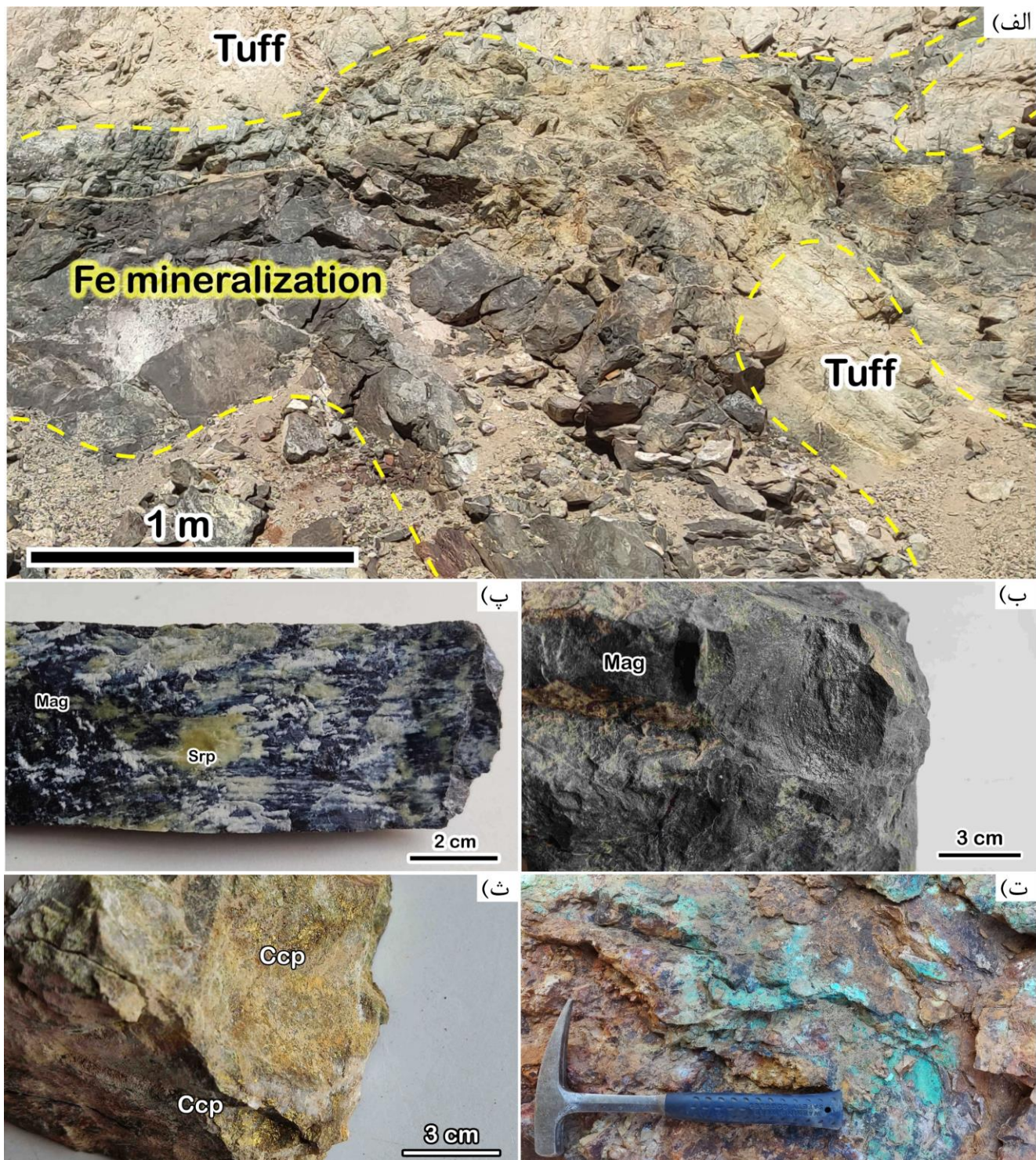
به منظور شناخت سازوکار عناصر ساختاری و تعیین ارتباط احتمالی میان شکستگی‌ها و پهنه‌های دگرسانی در محدوده، فیلتر Directional در دو جهت N45E و N45W اعمال شد. ساختارها نیز در دو روند اصلی شمال‌شرق- جنوب‌غرب و شمال‌غرب- جنوب‌شرق (همروند با گسل بزرگ دهشیر در شمال‌شرق محدوده) با نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ کفه طاقستان مقایسه گردید. در تصاویر نقشه‌های دگرسانی تهیه شده نیز غالب دگرسانی‌ها در محدوده از روند گسل بزرگ دهشیر پیروی می‌کنند (شکل ۶). با مقایسه ساختارهای نقشه زمین‌شناسی، مشاهدات صحرایی از روند کانه‌زایی و نقشه فیلترگذاری جهتی، می‌توان پی برد که روند ساختارهای شمال‌غرب- جنوب‌شرق، با راستای کانه‌زایی آهن و دگرسانی‌های گرمابی رخ داده در محدوده مطابقت دارد.



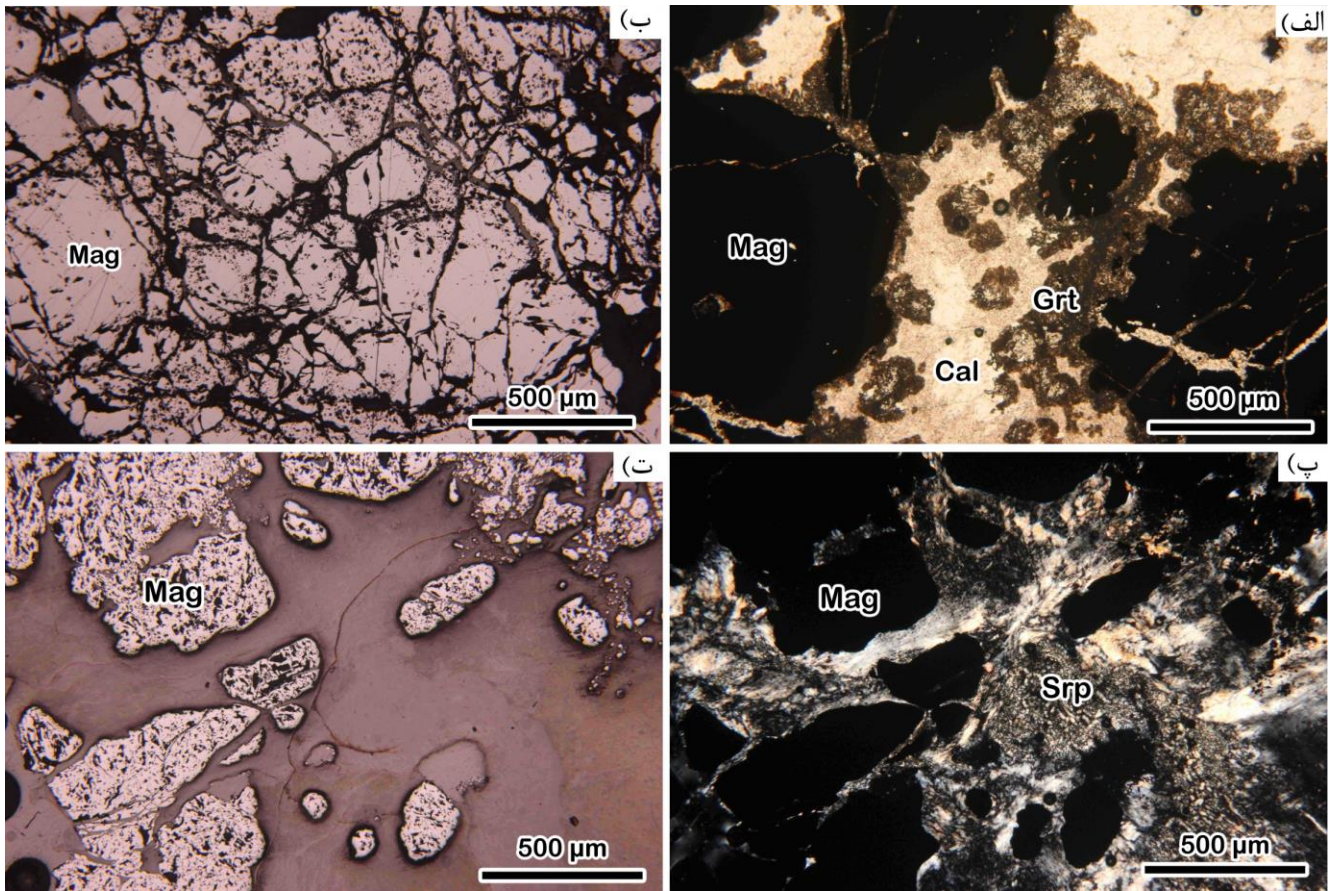
شکل ۶- تصاویر حاصل از اعمال فیلتر Directional و بارزسازی خطواره‌ها در دو راستای الف) ۴۵ درجه (N45E) و ب) ۳۱۵ درجه (N45W).

۴-۵- مطالعات صحرایی:

در پی انجام پردازش‌های طیفی بر روی تصاویر سنجنده استر، که به شناسایی کانی‌های دگرسانی در محدوده مورد مطالعه منجر شد، از محدوده تپه مورگاریس بازدید صورت گرفت و نمونه‌های مناسب جهت انجام مطالعات آزمایشگاهی برداشت شد. این بازدید به منظور تطابق و نیز تلفیق شواهد صحرایی- آزمایشگاهی و مطالعات سنجش از دور انجام شد. با توجه به مطالعات صحرایی، گزارشات اکتشافی و نقشه‌های زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه، کانی‌سازی آهن در محدوده تپه مورگاریس بیشترین شباهت به کانسارهای تیپ اسکارن را داشته و کانه‌زایی مگنتیت (کانه اصلی) همراه با مقادیر فرعی پیریت، کالکوپیریت و کانی‌های دگرسانی شاخص اسکارنی شدن از جمله اپیدوت، سرپانتین، گارنت و کلریت را شامل می‌شود. در این محدوده، بیشترین حجم کانی‌سازی در همبری توده‌های گرانیتوئیدی با سنگ میزبان رخ داده است (شکل‌های ۷ و ۸).



شکل ۷- الف) تصویری از رخنمون با کانی‌سازی مگنتیت با ساخت توده‌ای در سنگ میزبان توفی، ب) تصویر کانسنگ آهن با ساخت توده‌ای در مقیاس نمونه دستی، پ) تصویر کانسنگ آهن در مقیاس نمونه دستی که رخداد دگرسانی سرپانتینی شدن (با جلای چرب) را نشان می‌دهد (Mag: مگنتیت، Srp: سرپانتین)، ت) تصویر از رخنمون با رخداد کانی‌سازی مس (مالاکیت و آزوریت)، ث) تصویر نمونه دستی از کانی‌سازی مس (کالکوپیریت) به صورت دانه‌پراکنده تا رگه- رگچه‌ای (Ccp: کالکوپیریت).



شکل ۸- الف) تصویر میکروسکوپی (نور عبوری با نیکول‌های موازی (PPL) از همراهی مگنتیت و گارنت در کانسنگ مگنتیتی، ب) تصویر میکروسکوپی (نور انعکاسی) از کانه مگنتیت، پ) تصویر میکروسکوپی (نور عبوری با نیکول‌های متقاطع (XPL)) از رخداد دگرسانی سرپانتینی در مجاورت مگنتیت، ت) تصویر میکروسکوپی (نور انعکاسی) از کانه مگنتیت (Cal: کلسیت، Grt: گارنت، Mag: مگنتیت، Srp: سرپانتین).

۵- نتیجه‌گیری:

بارزسازی کانی سرپانتین با روش نقشه‌برداری زاویه طیفی (SAM) در محدوده مورد مطالعه، به پتانسیل حضور این کانی در کانسار تپه مورگاریس که یک کانسار تیپ اسکارن منیزیم‌دار می‌باشد، پی برده شد. همچنین زون‌های احتمالی کانه‌زایی آهن طی پردازش نقشه‌برداری زاویه طیفی (SAM) پیش‌بینی شد. با به‌کارگیری نسبت‌های باندی $(1/2) + (5/3)$ برای کانی مگنتیت و $1/2$ برای کانی هماتیت، کانی‌های اکسید آهن نیز در کانسار مورد مطالعه بارز شدند. با توجه به اینکه در نمونه‌های دستی، سرپانتین و اکسیدهای آهن (غالباً مگنتیت) همراه یکدیگر حضور دارند، استفاده از ترکیب این دو بارزسازی می‌تواند جهت اولویت‌بندی‌های نقاط اکتشافی مؤثر باشد. با استفاده از روش نسبت باندی $(7+9)/8$ به‌همراه بارزسازی کانی‌های اپیدوت و کلریت در روش نقشه‌برداری زاویه طیفی، بارزسازی زون دگرسانی پروپیلیتیک انجام گردید که این دگرسانی از دگرسانی‌های کانسار مورد مطالعه می‌باشد.

در مجموع، با استفاده از پردازش‌های انجام شده شامل: ترکیب رنگی کاذب (FCC)، فیلترگذاری جهتی (Directional)، روش نقشه‌برداری زاویه طیفی (SAM) و همچنین استفاده از نسبت‌گیری باندی برای بارزسازی دگرسانی‌ها و کانه‌زایی مشخص شد که دگرسانی اصلی در محدوده مورد مطالعه به‌طور کلی شامل دگرسانی پروپیلیتیک، فلیک و سرپانتینی بوده. طبق نتایج بدست

آمده تمرکز این دگرسانی‌ها در نواحی شمال شرقی و مرکزی بیشتر می‌باشد و کانی‌سازی اصلی در محدوده، اکسید آهن (غالباً مگنتیت) می‌باشد. در مطالعات نمونه‌های دستی تهیه شده از رخنمون کانه‌زایی و مقاطع نازک-صیقلی، این مطابقت شواهد کانی‌شناسی و صحرایی با نتایج پردازش تصاویر استر، نشان‌دهنده دقت قابل قبول این روش‌ها در مراحل اکتشاف مقدماتی است. بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور در تلفیق با مشاهدات میدانی می‌تواند در شناسایی زون‌های امیدبخش کمک‌کننده باشد.

۶- تقدیر و تشکر:

نویسندگان این مقاله از حمایت‌های معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس و همچنین شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران سپاسگزاری می‌نمایند. این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۴۰۲۲۸۲ انجام شده است.

منابع:

- آقانباتی، ع. (۱۳۸۳). زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۳۸ ص.
- سپهری‌فر، پ. (۱۳۹۰). بررسی ژنز کانسار پلی‌متال ندوشن یزد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پژوهشکده علوم زمین، ۱۷۹ ص.
- شرکت مهندسی مشاور زمین دانش پارس (۱۴۰۳). گزارش پایان عملیات اکتشاف محدوده تپه مورگاریس، شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران، ۴۳۹ ص.
- عمیدی، س. (۱۳۶۲). نقشه زمین‌شناسی آباده در مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- قلمقاش، ج.، محمدی‌ها، م. (۱۳۸۶). نقشه و گزارش ورقه ۱:۱۰۰,۰۰۰ کفه طاقستان، سری ۶۶۵۳، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- نوذری، ن.، قادری، م.، تاج‌الدین، ح. (۱۴۰۳). زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، و ساخت و بافت در کانسار سرب، مس و روی مورگاریس، جنوب‌غرب ندوشن، ایران، بیست و هفتمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Abrams, M. (2000). The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): Data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote Sensing* 21, 847–859.

Abrams, M., Hook, S.J. (1995). Simulated ASTER data for geologic studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33(3), 692–699.

Abubakar, J., Zhang, Z., Cheng, Z., Yao, F., Bio Sidi D. Bouko, A.A. (2024). Advancing skarn iron ore detection through multispectral image fusion and 3D Convolutional Neural Networks (3D-CNNs). *Remote Sensing* 16(17), 3250.

Aghanabati, A. (1998). Major sedimentary and structural units of Iran (map). *Geosciences* 7, Geological Survey of Iran.

Alavi, M. (1991). Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 103, 983–992.

Alavi, M. (2004). Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of Science* 304(1), 1–20.

Azizi, H., Tarverdi, M.A., Akbarpour, A. (2010). Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from east Zanjan, northern Iran. *Advances in Space Research* 46(1), 99–109.

Bedell, R.L. (2001). Geological mapping with ASTER satellite: New global satellite data that is a significant leap in remote sensing geologic and alteration mapping. *Special Publication Geology Society of Nevada* 33, 329–334.

- Berberian, M., King, G.C. (1981). Towards a paleogeography and tectonics evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210–265.
- Boloki, N., Poormirzaee, R. (2009). Using ASTER image processing for hydrothermal alteration and key alteration minerals mapping in Siyahrud, Iran. *International Journal of Geology* 2(3), 38–43.
- Di Tommaso, I., Rubinstein, N. (2007). Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews* 32(1-2), 275–290.
- Einaudi, M.T., Meinert, L.D., Newberry, R.J. (1981). Skarn deposits. *SEG Economic Geology 75th Anniversary Volume, Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado*, 317–339.
- Gabr, S., Ghulam, A., Kusky, T. (2010). Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data. *Ore Geology Reviews* 38, 59–69.
- Ghasemi, A., Talbot, C.J. (2006). A new scenario for the Sanandaj-Sirjan zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences* 26, 683–693.
- Kalinowski, A., Oliver, S. (2004). ASTER mineral index processing manual. *Remote Sensing Applications, Geoscience Australia* 37, 36.
- Mars, J.C., Rowan, L.C. (2006). Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms. *Geosphere* 2(3), 161–186.
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L., Sahandi, M.R. (2003). Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 21, 397–412.
- Moradpour, H., Rostami Paydar, G., Pour, A. B., Valizadeh Kamran, K., Feizizadeh, B., Muslim, A.M., Hossain, M. S. (2020). Landsat-7 and ASTER remote sensing satellite imagery for identification of iron skarn mineralization in metamorphic regions. *Geocarto International* 37(7), 1971–1998.
- Nabatian, G.H., Rastad, E., Neubauer, F., Honarmand, M., Ghaderi, M. (2015). Iron and Fe- Mn mineralization in Iran: Implications for Tethyan metallogeny. *Australian Journal of Earth Sciences* 62(2), 211–241.
- Ninomiya, Y. (2003). A stabilized vegetation index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR data. In: *Proceedings of the IEEE 2003 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'03)*, vol. 3, Toulouse, France, 21–25 July 2003, p. 1552–1554.
- Omrani, J., Agard, P., Whitechurch, H., Benoit, M., Prouteau, G., Jolivet, L. (2008). Arc magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: A new report of adakites and geodynamic consequences. *Lithos* 106, 380–398.
- Prost, G.L. (2002). *Remote Sensing for Geologists: A Guide to Image Interpretation*. Second edition, CRC Press, 456 p.
- Rajendran, S., Nasir, S. (2017). Characterization of ASTER spectral bands for mapping of alteration zones of volcanogenic massive sulphide deposits. *Ore Geology Reviews* 88, 317–335.
- Rockwell, B.W., Hofstra, A.H. (2008). Identification of quartz and carbonate minerals across northern Nevada using ASTER thermal infrared emissivity data Implications for geologic mapping and mineral resource investigations in well-studied and frontier areas. *Geosphere* 4(1), 218–246.
- Rowan, L.C., Mars, J.C. (2003). Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment* 84, 350–366.
- Rowan, L.C., Mars, J.C. (2003.) Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment* 84, 350–366.
- Seo, M., Aung Kyaw, T., Takashima, I. (2005). Application of remote sensing techniques on iron oxide detection from ASTER and Landsat images of Tanintharyi coastal area, Myanmar. *Akita University*, 26, 21–28.
- Shabynin, L.I. (1971). Deposition of magnetite ores, magmatic stage, in the magnesioskarnal ore-bearing formation. *International Geology Review* 13(12), 1798–1805.

- Shahsavari Alavijeh, B., Rashidnejad-Omran, N., Toksoy-Köksal, F., Xu, W., Ghalamghash, J. (2019). Oligocene subduction-related plutonism in the Nodoushan area, Urumieh-Dokhtar magmatic belt: Petrogenetic constraints from U-Pb zircon geochronology and isotope geochemistry. *Geoscience Frontiers* 10(2), 725–751.
- Stöcklin, J. (1968). Structural history and tectonics of Iran: A review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52(7), 1229–1258.
- Warr, L.N. (2021). IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine* 85(3), 291–320.
- Yamaguchi, Y.I., Fujisada, H., Kudoh, M., Kawakami, T., Tsu, H., Kahle, A.B., Pniel, M. (1999). ASTER instrument characterization and operation scenario. *Advanced Space Research* 23(8), 1415–1424.
- Zhang, S., Wang, H., Fan, Y., Hu, N., Liu, H., Yang, C., Liao, Y. (2018). Application of high-resolution remote sensing image in the exploration of skarn-type iron deposit in Hutouya area of East Kunlun. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 170, 022094.