

## **Determination and mapping of hydrothermal alteration zones in exploration Marbin area (North of Zefreh) by remote sensing, field observations and petrology investigations**

**Masoumeh Mirzaei<sup>1</sup>, Hashem Bagheri<sup>1</sup> and Farimah Ayati<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup> Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

<sup>2</sup> Department of Geology, Payame Noor University, Iran

### **Abstract**

In this research, the altered and non-altered zones in Marbin exploration area has been determined by VNIR and SWIR wavelengths processing of ASTER satellite images and by False Color composite and band ratio methods. The Marbin exploration area lies in the Urumieh-Dokhtar magmatic belt. The Marbin index is located in the east of the Zefreh fault within the central part of the Zefreh pull apart basin. Rhyolite to dacite are the predominant rock types of the Eocene subvolcanic and volcanic units of the area under study. The spectral of sericite, epidote, calcite and chlorite minerals in this area have been recognized using the Spectral angle mapper (SAM). Finally, with combination of spectral of index minerals in phyllic and propylitic alteration zones with field observations, petrography and geochemical analysis, the alteration zones map in Marbin area have been prepared. As a result, the phyllic and the propylitic alterations as well as the silicification are index alterations in this area. Based on litho-geochemical analyses, the high Mo/Cu contents, the occurrence of hydrothermal alterations in combination with several other evidences, we concluded that the Marbin index can be introduced as a porphyry deposit with Mo anomaly. This could be indicative of the potential of this area for the molybdenum mineralization in detailed exploration phase.

**Key words:** hydrothermal alteration mapping, remote sensing, SAM method, Mo porphyry, Marbin index, Zefreh.

\* f.ayati@pnu.ac.ir

## شناسایی و نقشه‌برداری پهنه‌های دگرسانی گرمابی در محدوده اکتشافی ماربین (شمال زفره)، با به‌کارگیری روش دورسنجی، مشاهدات میدانی و بررسی‌های سنگ‌شناسی

معصومه میرزایی<sup>۱</sup>، هاشم باقری<sup>۱</sup> و فریماه آیتی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

<sup>۲</sup> گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام‌نور، ایران

### چکیده

در این پژوهش، با به‌کارگیری پردازش طول‌موج‌های VNIR و SWIR، تصویرهای ماهواره‌ای سنجنده ASTER و روش‌هایی مانند ترکیب رنگی دروغین و نسبت بانندی، پهنه‌های دگرسان‌شده از ناگرسان شناسایی شدند. منطقه اکتشافی ماربین در پهنه ماگمایی ارومیه-دختر جای دارد. از دیدگاه ویژگی‌های ساختاری، اندیس ماربین در خاور غسل زفره و بخش میانی پهنه کشتی زفره است. در این منطقه، سنگ‌های آذرین آتشفشانی و نیمه عمیق ائوسن ترکیب ریولیت تا داسیت دارند. با به‌کارگیری پهنه‌بندی زاویه طیفی (SAM)، طیف کانی‌های سریسیت، اپیدوت، کلسیت و کلریت در منطقه شناسایی شد. سرانجام با تلفیق طیف کانی‌های شاخص دگرسانی فیلک و پروپیلیتیک و یافته‌های به‌دست‌آمده از پیمایش‌های صحرایی، بررسی‌های سنگ‌شناسی و تجزیه زمین‌شیمیایی برای اعتبارسنجی این روش، نقشه پهنه‌های دگرسانی در محدوده اکتشافی ماربین تهیه شد. بر این پایه، دگرسانی‌های فیلک، پروپیلیتیک و سیلیسی شدن از دگرسانی‌های شاخص در منطقه‌اند. بر پایه داده‌های تجزیه زمین‌شیمیایی سنگی، مقادیر بالای مولیبدن نسبت به مس و رخداد دگرسانی‌های گرمابی گوناگون و دیگر شواهد موجود، اندیس ماربین نشانه‌ای از کانساری پورفیری با ناهنجاری مولیبدن به‌شمار می‌رود و چه‌بسا نشان‌دهنده پتانسیل بالقوه این محدوده برای حضور کانه‌سازی مولیبدن در مرحله اکتشاف‌های تکمیلی است.

واژه‌های کلیدی: نقشه‌برداری دگرسانی گرمابی، دورسنجی، روش SAM، مولیبدن پورفیری، اندیس ماربین، زفره

علم پویا در حال تکامل است و دورسنجی روشی

مقدمه

نوین در اکتشاف کانسارها و مواد معدنی ابزار

امروزه دانش اکتشاف مواد معدنی به صورت یک

\* f.ayati@pnu.ac.ir

Copyright©2019, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

همراه با تراورتن‌های پیرامون چشمه‌های آب‌گرم است، بررسی‌های دورسنجی بهترین وسیله در شناخت این نوع کانسارها به‌شمار می‌روند. در این راستا، بررسی‌های دورسنجی برای تهیه تصویر-نقشه‌های ماهواره‌ای، تهیه نقشه‌های خطواره‌ها، شناسایی ساختمان‌های گنبدی، تهیه نقشه‌های پهنه‌های دگرسانی و نقشه بخش‌های امیدبخش معدنی به‌کار می‌روند.

در کل، پهنه متالوژنیک ارومیه- دختر به‌علت ویژگی‌های زمین‌ساختی ویژه و زمین‌شناسی خود میزبان، از مهم‌ترین پهنه‌های کانسارهای مس (مولیبدن و طلا) پورفیری و دیگر کانسارهای فلزی با ارزش در جهان است؛ به‌گونه‌ای که امروزه از دیدگاه کانسارهای با ارزش اقتصادی، بخش‌های مرکزی این پهنه ماگمایی توانمند شناخته شده‌اند. پیدایش سیال‌های سرشار از آب، فلزها و بخار پیامد گسترده‌ی ماگمای حدواسط و اسیدی در این پهنه هستند. با نفوذ و ته‌نشینی این سیال‌ها در گسستگی‌های سنگ‌های در برگیرنده، دگرسانی و کانی‌سازی در آنها روی می‌دهد. از این‌رو، شناسایی و شناسایی پهنه‌های با پتانسیل معدنی (مانند: بررسی و آشکارسازی بخش‌های با هاله‌های دگرسانی گرمابی در کانسارهای پورفیری) از اهداف و کاربردهای سنجش از دور در زمینه اکتشاف کانسارها هستند. منطقه زفره نیز به‌علت جای‌داشتن در بخش مرکزی پهنه ارومیه- دختر و پهنه کششی زفره، از مناطق با ارزش برای اکتشاف کانسارهای اقتصادی به‌شمار می‌آید.

پژوهش‌های پیشین (Mirzaei, 2015) روی اندیس ماربین دربردارنده بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری و پیجویی زمین‌شیمیایی هستند. برپایه نتایج اکتشافات زمین‌شیمیایی نخستین از نمونه‌های سنگی برداشت‌شده از

توانمندی در این حوزه به‌شمار می‌رود؛ زیرا امروزه به‌کارنگرفتن فناوری‌های به‌روز در اکتشاف مواد معدنی، هدررفتن سرمایه‌های ملی و اتلاف زمان برای شناسایی و دستیابی به کانی‌سازی‌های جدید را به‌دنبال خواهد داشت. در کل، فنون دورسنجی از روش‌های استاندارد، با بازده بالا و کم‌هزینه است که اهمیت به‌سزایی در اکتشاف مقدماتی عنصرهای فلزی دارد. این روش از بهترین روش‌های پی‌جویی کانسارهاست؛ زیرا دارای:

۱. دید گسترده منطقه‌ای در مقیاس ناحیه‌ای؛
۲. پوشش یکپارچه تصویرها از بخش‌های معین با فاصله زمانی مشخص؛
۳. چندباندی بودن داده‌های ماهواره؛
۴. توانایی آشکارسازی و فراهم‌نمودن تصویرهای رنگی برای انجام مهم‌ترین کارهای صحرایی (مانند: تعیین موقعیت پهنه‌های دگرسانی و تعیین موقعیت قرارگیری و مسیریابی)؛
۵. توانایی ذخیره‌سازی داده‌های سنجش از دور به‌صورت یک لایه اطلاعاتی در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و آمیختن آن با لایه‌های اطلاعاتی دیگر برای الگوسازی و تهیه نقشه پتانسیل معدنی؛
۶. امکان نقشه‌برداری زمین‌ساختاری و سنگ‌شناسی؛
۷. تهیه نقشه‌های موضوعی مورد نیاز کاربران خاص و آسان‌شدن تهیه نقشه‌ها در زمینه‌های گوناگون (مانند: اکتشاف معادن، تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی) (Porter, 1998).

از آنجایی که جایگاه کانسارهای پورفیری بزرگ دنیا و اندوخته‌های طلای اپی‌ترمال، جزیره‌های کمانی و پهنه‌های فرورانش هستند و تمرکز آنها بیشتر در بخش‌های دگرسان‌شده گسترده و محل غسل‌های بزرگ در کناره دهانه‌های آتشفشانی

مانند کانسارسازی سامانه‌های پورفیری) دارند. در این پژوهش، با استخراج اطلاعات مورد نیاز از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده ASTER و آمیختن آنها با ویژگی‌های زمین‌شناسی صحرایی و یافته‌های سنگ‌نگاری و زمین‌شیمیایی، نقشه دگرسانی‌های گوناگون در منطقه ماربین تهیه شد و سرانجام بخش‌های مستعد کانی‌سازی برای پیشرفت نتایج در اکتشافات آینده معرفی شدند.

### زمین‌شناسی منطقه

منطقه اکتشافی ماربین در ۲۲ کیلومتری شمال‌خاوری روستای زفره در استان اصفهان و در عرض جغرافیایی شمالی  $33^{\circ} 09' 42''$  و طول جغرافیایی خاوری  $55^{\circ} 34' 52''$  جای دارد. این منطقه بخشی از ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان و ۱:۲۵۰۰۰۰ کاشان است (Amidi, 1998; Radfar, 1998; and Zahedi, 1983) (شکل ۱). از دیدگاه جایگاه زمین‌شناسی ناحیه‌ای، اندیس ماربین در بخش مرکزی پهنه زمین‌ساختی- ماگمایی ارومیه- دختر جای دارد. به باور بیشتر زمین‌شناسان این پهنه یک کمان ماگمایی از نوع آند است که در پی فرورانش سنگ‌کره اقیانوسی تئیس جوان به زیر ایران مرکزی و در پی کوهزایی آلپ پدید آمده است. در پی این رویداد، فرایندهای آذرین ائوسن- میوسن از بازیک تا اسیدی در این پهنه روی داده‌اند (Shahabpour, 2005). از دیدگاه زمین‌شیمیایی، سری‌های ماگمایی این پهنه ماگمایی در زمان ائوسن سرشت کالک‌آلکالن داشته‌اند؛ اما به‌سوی الیگوسن و میوسن میانی- بالایی، سرشت شوشونیتی (پتاسیم بالا) یافته‌اند (Aftabi and Atapour, 2000) و سرانجام آخرین فرایندهای ماگمایی (نئوژن بالایی) سرشت آلکالن بایمودال و آداکیتی پیدا کرده‌اند (Khodami,

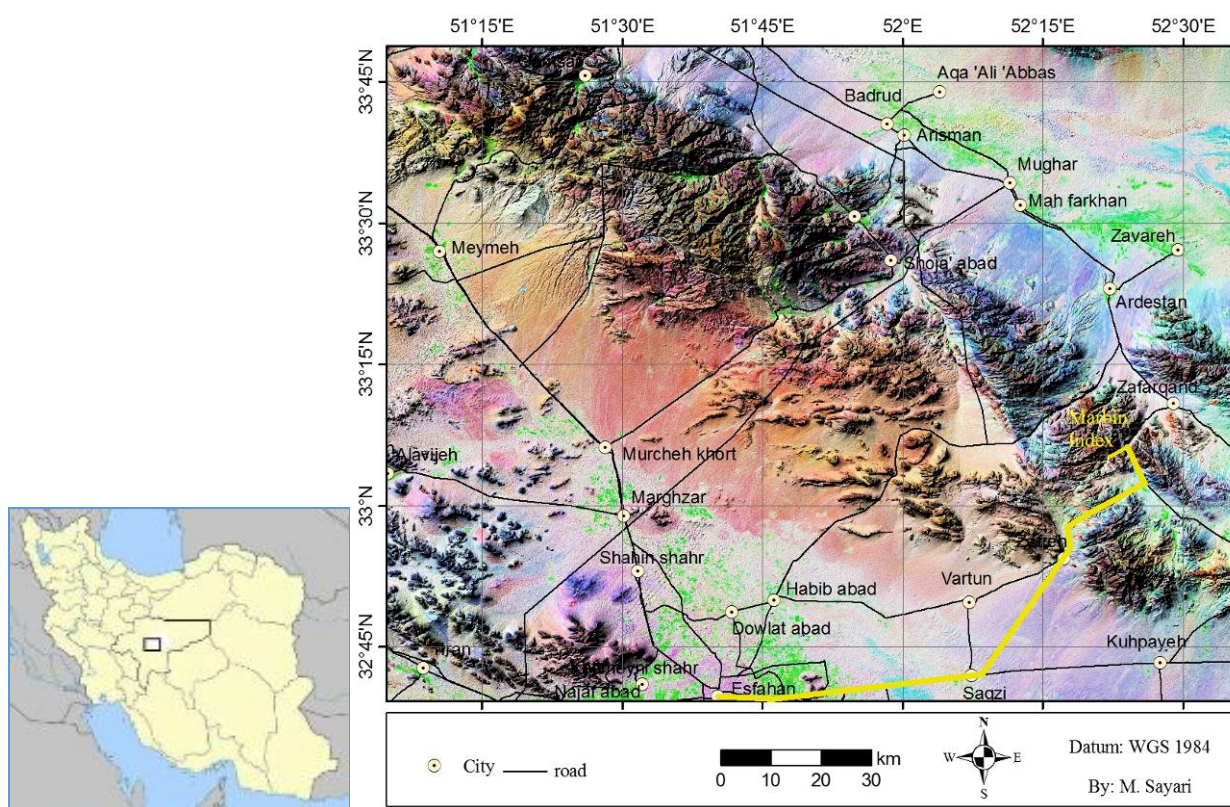
رخنمون‌های منطقه، این محدوده از دیدگاه ذخیره مولیبدن- قلع و همچنین، طلا، پتانسیل اقتصادی دارد. از این‌رو، محدوده ماربین یک اندیس با بی‌هنجاری مولیبدن، طلا و قلع با اهمیت کمابیش کم مس است که بیشترین تشابه را با کانسارهای مولیبدن نوع پورفیری نشان می‌دهد. از سوی دیگر، یافته‌های به‌دست‌آمده از سنگ‌نگاری سنگ میزبان و داماسنجی سیال‌های درگیر در کوارتزهای رگه- رگچه‌ای و توده‌ای در رخنمون محدوده اکتشافی ماربین گویای تشابه اندیس ماربین با کانسارهای مولیبدن پورفیری هستند (Mirzaei et al., 2016).

بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانی‌سازی و زمین‌شیمیایی در محدوده اکتشافی کهنک (زفره) از بررسی‌های پیشین انجام‌شده در بخش‌های پیرامون محدوده اکتشافی ماربین است. نتایج به‌دست‌آمده از این بررسی‌ها گویای کانسارسازی مس پورفیری در کهنک هستند (Asadi, 2007; Hatami, 2008; Farahani Farmahini, 2008; Moinifar, 2010; Harati, 2011). اندیس فلزی مس- مولیبدن پورفیری زفره را از دیدگاه بررسی‌های سنگ‌زمین‌شیمیایی سیستماتیک و بررسی‌های زمین‌فیزیکی بررسی کرده است. همچنین، با به‌کارگیری پردازش‌های سنجش از دور و بررسی‌های سنگ‌نگاری به شناسایی و تفکیک پهنه‌های دگرسانی در منطقه پرداخته است. برپایه تازه‌ترین بررسی‌های Khodadadi و Arfania (2017) و Hosseini و همکاران (2014) در منطقه زفره، وابستگی میان تراکم خطواره‌ها و مناطق دگرسان شده اثبات شده است؛ به گونه‌ای که بخش‌های با دگرسانی گرمایی با بخش‌های گسله و خطواره‌ها همخوانی نشان می‌دهند و پتانسیل بالای معدنی

از دیدگاه ساختمانی (در صورت برخورد ناهمزمان در راستای این پهنه) هستند (Mirnejad *et al.*, 2013; Ayati *et al.*, 2013; Aghazadeh *et al.*, 2012; Taghipour *et al.*, 2008; McInnes *et al.*, 2003). به‌باور Shafiei و همکاران (۲۰۰۹)، اصلی‌ترین ماگمازایی میزبان برای کانسارهای مس-مولیبدن پورفیری (سرچشمه و میدوک) در ایران، ماگماتیسم کالک‌آلکان در پی فرایندهای پس از برخورد (میوسن بالایی) در پهنه ارومیه-دختر است.

(2009; Sayari, 2015).

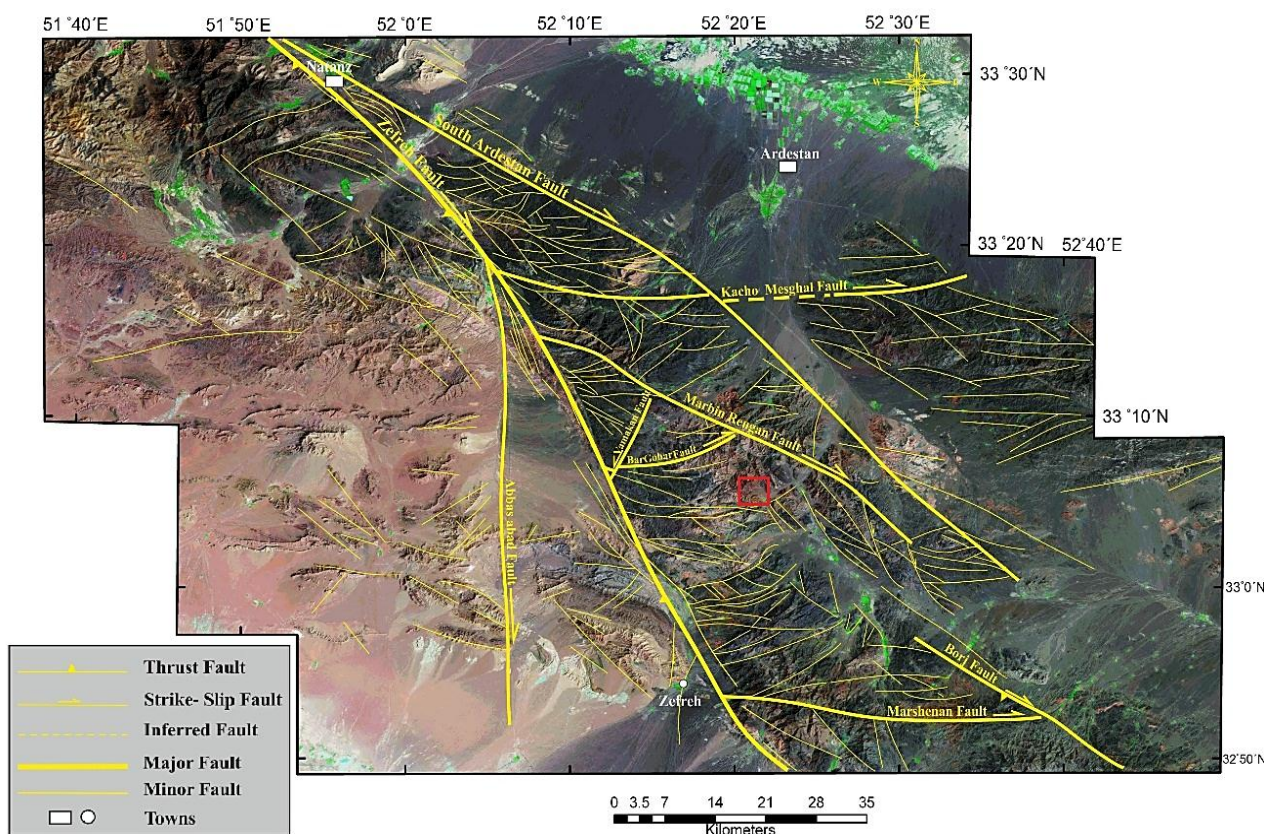
به‌باور Agard و همکاران (۲۰۰۵)، تغییر در ترکیب ماگماتیسم پهنه ارومیه-دختر گویای آغاز برخورد پایانی میان صفحه عربی و مرز ضخیم‌شده اوراسیاست. زمان این برخورد از کرتاسه پایانی تا ائوسن میانی برآورد شده است. از این‌رو، بررسی‌های سن‌سنجی انجام‌شده روی کانسارهای پورفیری در راستای پهنه ارومیه-دختر نشان‌دهنده یکسان‌نبودن پیدایش این کانسارها از دیدگاه زمانی و نامنظم بودن لبه صفحه عربی



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه ماریین و راه‌های دسترسی به آن روی تصویر ماهواره‌ای با ترکیب رنگی (Sayari, 2015) (RGB=321)

جای گرفته است. گسل‌های ماریین- رنگان و برگوهر با جابجایی راستالغز راستگرد از شاخه‌های فرعی گسل زفره به‌شمار می‌روند و در شمال منطقه ماریین جای دارند (شکل ۲).

از دیدگاه جایگاه زمین‌شناسی ساختمانی، اندیس ماریین در بخش مرکزی پهنه کشتی زفره و در خاور یک خطواره زمین‌ساختی دراز به نام گسل زفره با سازوکار راستالغز راستگرد و روند شمال‌باختری- جنوب‌خاوری



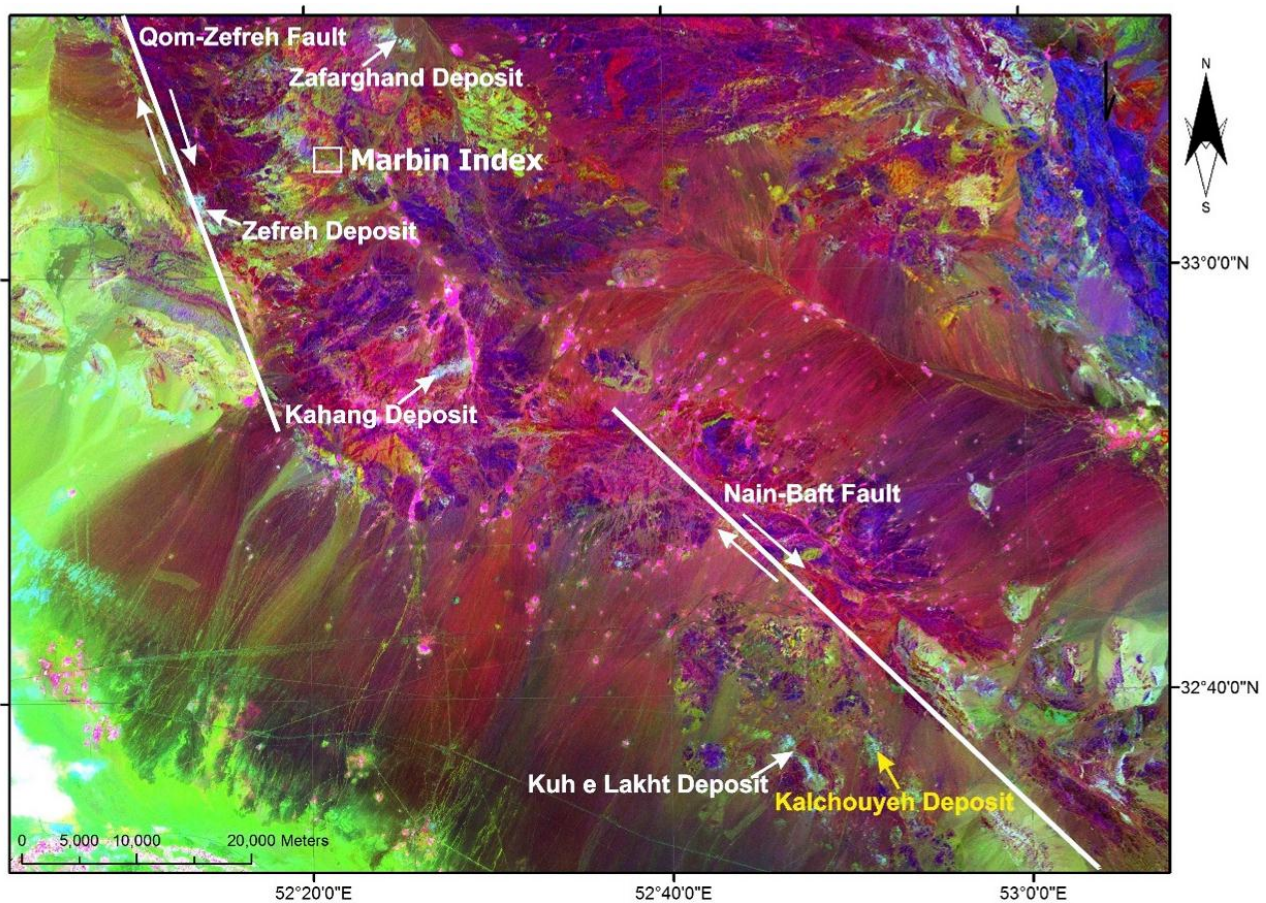
شکل ۲- سامانه گسلی قم- زفره و دیگر گسل‌های منطقه زفره به‌همراه موقعیت اندیس ماربین روی تصویر ETM+ (Beygi, 2013)

مرتبط با این دو خطواره زمین‌ساختی) دچار تمرکز زمانی- مکانی شده‌اند (شکل ۳). از این رو، برپایه بررسی‌های صحرایی Mirzaei (۲۰۱۵)، در محدوده اکتشافی ماربین، کهن‌ترین سنگ‌های رخنمون‌یافته این مجموعه، واحدهای نیمه‌ژرف و آتشفشانی فلسیک به سن ائوسن هستند. این سنگ‌ها به‌صورت چشمگیری با رخنمون‌هایی به بزرگی چندین هزار متر در منطقه دیده می‌شوند (شکل ۴). بیشتر این سنگ‌ها ترکیب داسیت و ریولیت- ریوداسیت پورفیری دارند و پس از پیدایش گسل‌های کوچک آنها را قطع کرده و سپس دستخوش دگرسانی‌های گرمایی شده‌اند. شیشه‌های آتشفشانی دانه‌ریز و برش‌های گرمایی ریولیتی نیز در این واحدها دیده می‌شوند. به‌سوی خاور،

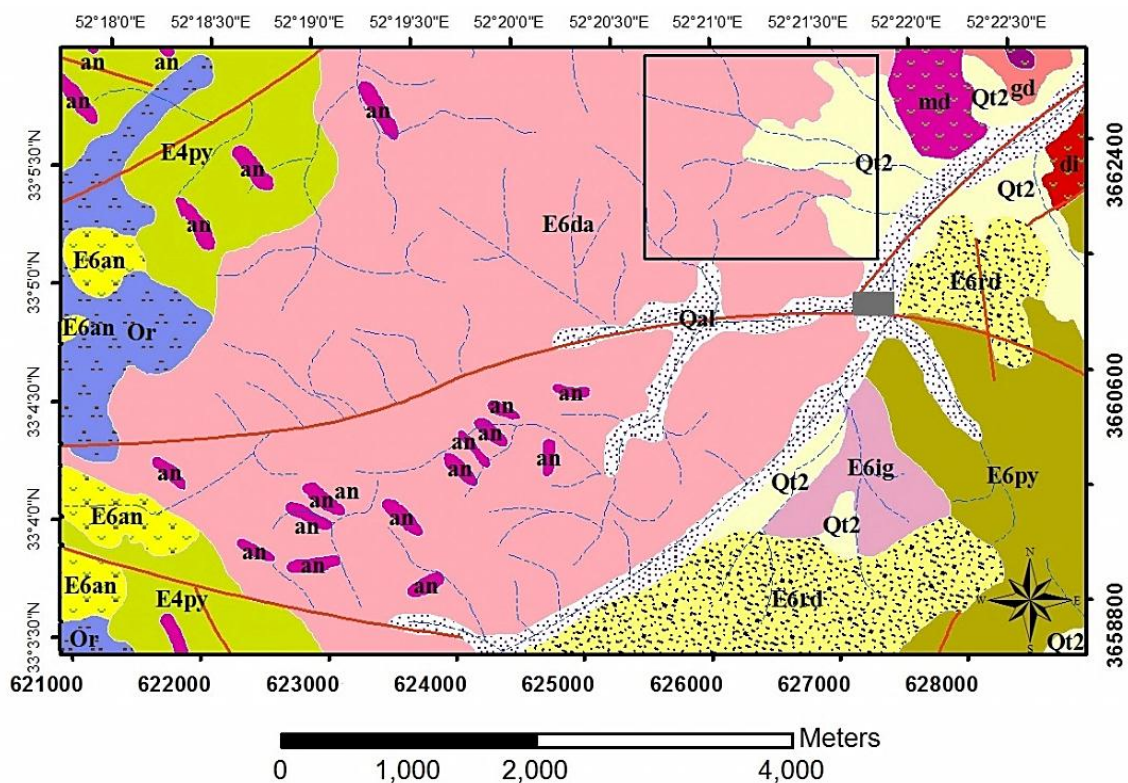
از دیدگاه زمین‌شناسی ناحیه‌ای، به‌دنبال همگرایی در راستای شمال-باختری- جنوب‌خاوری میان صفحه عربی و اوراسیا، شماری از سیستم‌های گسلی راستالغز راستگرد، همانند سیستم گسلی زفره در بخش مرکزی پهنه زمین‌ساختی- ماگمایی ارومیه- دختر و گسل نایین- بافت پدید آمده‌اند (Bagheri *et al.*, 2007). برپایه پیشنهاد Hosseini و همکاران (۲۰۱۴)، پیدایش پهنه کششی راستالغز در منطقه زفره به‌علت استرس تراکشی در میان دو خطواره زمین‌ساختی قم- زفره و نایین- بافت، افزون بر آسان‌شدن صعود و جایگزینی توده‌های نفوذی و پیدایش دایک‌ها به‌صورت گسترده، سیستم‌های گرمایی کانه‌زایی فراوانی (مانند کانسارهای پورفیری و اپی‌ترمال

این پهنه است. پیدایش اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن و منگنز به دنبال هوازدگی و شستشو در این منطقه، پهنه گوسان را پدید آورده است. دگرسانی آرژیلیک که با حضور کانی‌های رسی شناخته می‌شود، گسترش اندکی دارد و در نزدیکی رگه‌های کوارتز سولفیددار دیده می‌شود. این دگرسانی گاه با دگرسانی فیلک همپوشانی نشان می‌دهد و به صورت یک پهنه جداگانه در منطقه دیده نمی‌شود. سرانجام دگرسانی پروپیلیتیک که پیامد تجزیه کانی‌های فرومنیزین دار و پلاژیوکلاز در سنگ‌های داسیتی است در حاشیه بیرونی منطقه کانه‌زایی با رنگ سبز دیده می‌شود.

واحدهای متامورفودیوریت و به‌سوی جنوب، دایک‌های آندزیتی نیز دیده می‌شوند. رسوب‌های آبرفتی دوره عهد حاضر جوان‌ترین واحد سنگ هستند که به صورت رسوب‌های آبراهه‌ای پای ارتفاعات را پوشانده‌اند. در پی عملکرد محلول‌های گرمابی کانه‌زا در منطقه، دگرسانی‌های گرمابی گوناگونی از جمله فیلک، پروپیلیتیک و سیلیسی رخ داده‌اند. برپایه پیمایش‌های صحرایی، حضور دگرسانی‌های فیلک و سیلیسی شدن در مرکز منطقه و در واحدهای ریولیت-ریوداسیتی تایید شد. کانی‌سازی به صورت افشان، استوک‌ورک‌های سیلیسی و برش گرمابی از مهم‌ترین ویژگی‌های



شکل ۳- تصویر لندست ETM+ (R:4/3, G:5, B:5/1) پهنه کششی راستالغز زفره. اندیس ماربین و دیگر کانسارهای مهم با پیکسل‌های روشن و نام‌گذاری روی تصویر نشان داده شده‌اند (Hosseini *et al.*, 2014)



**Legend**

<b>EOCENE-OLIGOCENE</b>		Qal: Recent alluvium.
		Qt2: Young and low level traces.
		Or: Rhyolite- rhyodacite, tuff and ignimbrite.
		E6da: Mainly dacite, locally rhyodacite and rhyolitic tuff.
		E6ba: Dark grey basaltic lava.
		E6rd: Rhyodacite- dacite and locally rhyolitic tuff.
		E6py: tuff breccia, sandy tuff and locally andesitic lava.
		E6ig: Grey-brown ignimrite with some rhyolitic tuff.
		E6an: Dark grey andesite to andesitic basalt.
		E4py: lithic tuff sandy, tuff breccia and ignimbrite.

**Intrusive rocks**

<b>Post Eocene Pre Miocene</b>		gd: Granite- granodiorite.
		di: Diorite- monzodiorite.
		md: Meta monzodiorite.
		gb: Gabbro- locally diorite.
	an: Andesitic dyke.	
	Fault	
	Drainage	
	Village	
	Study area	

شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی منطقه و موقعیت اندیس ماربین روی آن (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ اردستان؛ Radfar، ۱۹۹۸)

**روش انجام پژوهش**

نخست نقشه‌های زمین‌شناسی و داده‌های ماهواره‌ای منطقه ماربین گردآوری شدند. در این پژوهش، داده‌های SWIR و VNIR-سنجنده ASTER برای شناسایی و تفکیک دگرسانی‌ها به کار برده شدند. اندیس ماربین در شماره گذر ۱۶۳ و

ردیف ۳۷ مسیر تصویربرداری ماهواره لندست ETM+ و سنجنده ASTER با شماره AST\_L1B\_003\_03022002072757\_05222002133950. پیش از تجزیه اصلی داده‌ها و استخراج اطلاعات، نخست تصحیحات Log Residuals روی تصویرهای ماهواره‌ای منطقه برای



در منطقه مشخص شوند؛ زیرا این مناطق با پهنه‌های دگرسانی تداخل دارند و خطا پدید می‌آورند. از این‌رو، ترکیب استاندارد RGB:7,4,1 در تصویرهای ETM+ برای آشکارسازی و شناسایی پوشش گیاهی از واحدهای سنگی به کار برده شد. رنگ سبز نشان‌دهنده پوشش گیاهی است (شکل ۵).

تجزیه‌های تجربی نشان داده‌اند که تصویری با ترکیب RGB:4,6,8 در ماهواره استر، بهترین ترکیب رنگی دروغین برای شناسایی پهنه‌های دگرسانی در کانسارهای پورفیری است (Tommaso and Rubinstein, 2007). تصویر به‌دست‌آمده برپایه ترکیب رنگی RGB:4,6,8 برای اندیس ماربین در شکل ۶ نشان داده است (اندیس ماربین با چهارگوش سرخ‌رنگ نشان شده است). در این تصویر، بخش‌های با دگرسانی پروپلیتیک به رنگ سبز و بخش‌های با دگرسانی فیلیک و رسی به رنگ صورتی دیده می‌شوند. این پدیده پیامد بازتابندگی بالای کانی‌های آلونیت، کائولینیت و مسکوویت در باند ۴ نسبت به باندهای ۶ و ۸ است.

برای شناسایی بخش‌های دربردارنده کانی‌های رسی و سربیسیت، اپیدوت، کلریت و کلسیت، نسبت باندهای ۴ به ۵ و ۴ به ۸ و ۴ به ۹ و نسبت‌دادن هر کدام از این نسبت‌ها به یکی از سه رنگ اصلی (به ترتیب: آبی، سبز و سرخ)، تصویر رنگی دروغینی برای شناسایی پهنه‌های دگرسان شده به‌دست آمد.

در این تصویر، بخش‌های با کانی‌های رسی و سربیسیت به رنگ سفید (دگرسانی فیلیک) و پهنه دگرسانی پروپلیتیک به رنگ سبز دیده می‌شوند (شکل ۷).

از میان بردن تأثیرات جوی و توپوگرافی انجام شد. در این پژوهش برای استخراج اطلاعات از تصویرهای ASTER روش‌های پردازشی (مانند: ترکیب رنگی دروغین، نسبت باندهای ترکیبی و پهنه‌بندی زاویه طیفی یا SAM) به کار رفته‌اند. همه فرایندها پردازش و تفسیر تصویرهای با نرم‌افزار ENVI 4.5 انجام شده است.

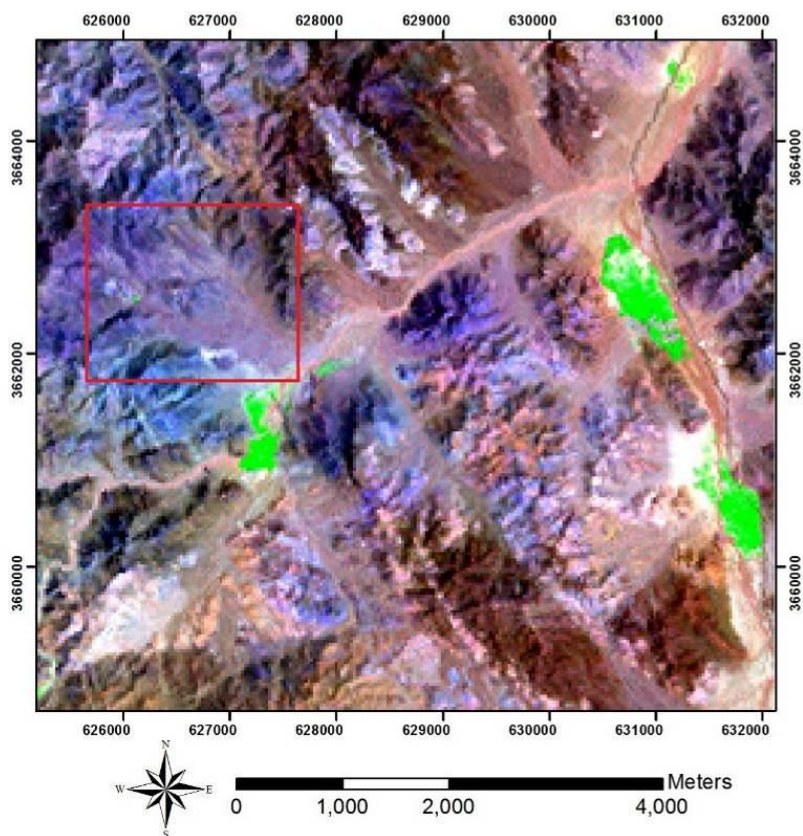
در ادامه، پس از پردازش داده‌های ماهواره‌ای، برای بررسی درستی یافته‌های به‌دست‌آمده از دورسنجی، بازدیدهای صحرایی انجام شد و در مناطق هدف و دگرسان تعیین شده به روش دورسنجی، نمونه‌برداری به صورت غیرسیستماتیک انجام شد. شمار ۱۳ مقطع نازک از نمونه‌های برداشت‌شده از پهنه‌های دگرسانی نشان‌شده با روش دورسنجی تهیه شد و بررسی شدند. تجزیه‌های زمین‌شیمیایی سنگی عنصرها (مانند: روش طیف‌سنجی پلاسما جفت‌شده القایی یا ICP-OES) در آزمایشگاه مواد معدنی زرازا و آنالیز جذب اتمی که در آزمایشگاه کیمیاپژوه البرز انجام شدند.

داده‌های به‌دست‌آمده از پردازش‌های دورسنجی با پیمایش‌های صحرایی و تجزیه‌های زمین‌شیمیایی تعبیر و تفسیر شدند. در پایان کار، از نرم‌افزار ARCGIS 10 برای تهیه نقشه دگرسانی بهره گرفته شد.

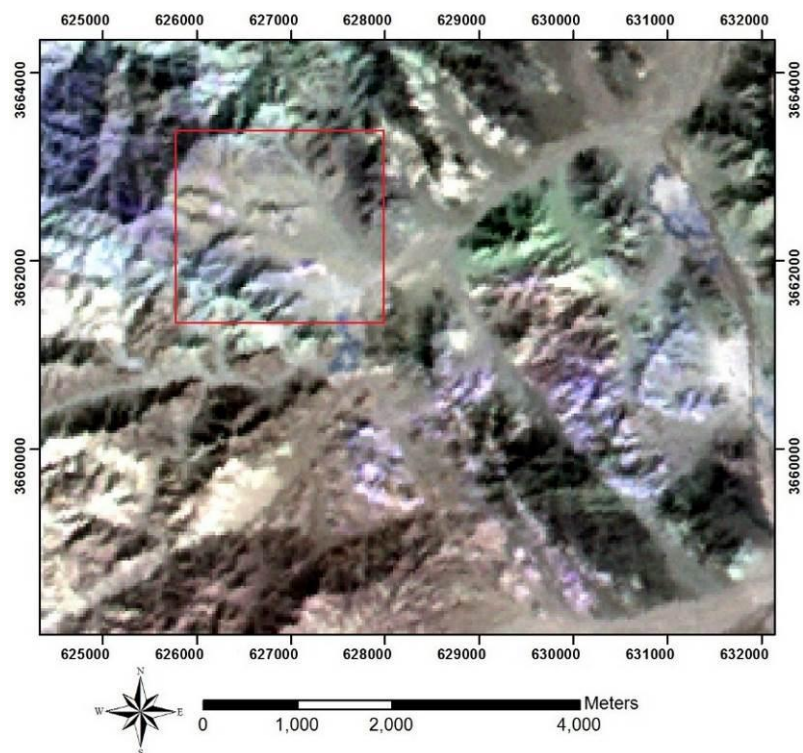
### روش‌های پردازش تصویرها

#### ۱- ترکیب رنگی دروغین (False Color Composite)

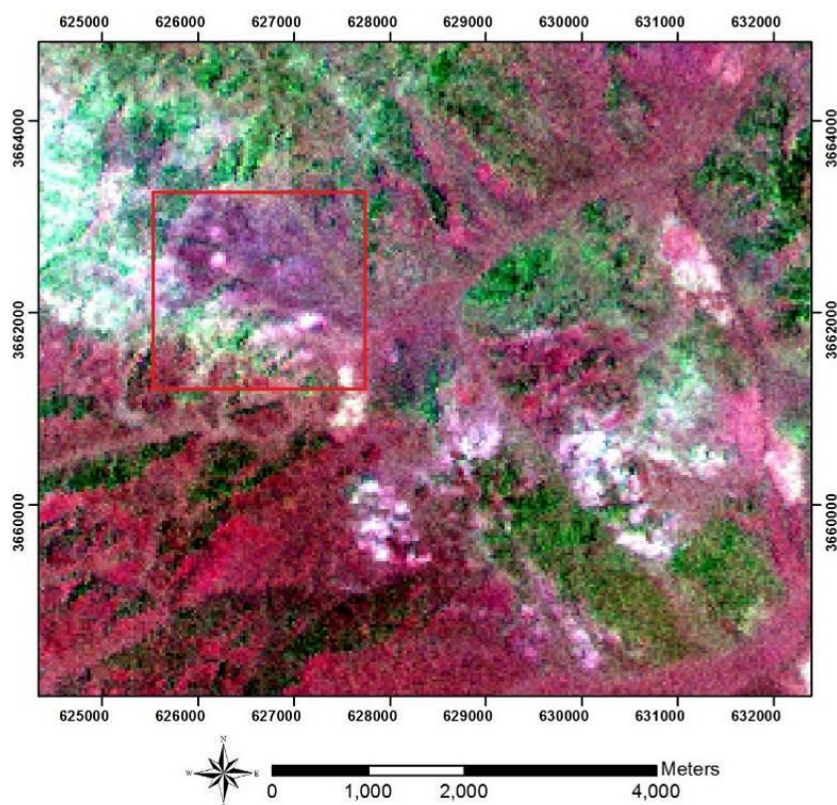
به کار بردن رنگ‌ها در دورسنجی، اطلاعات بصری و مفهومی بیشتری از تصویر در اختیار می‌گذارند. نخست باید مناطق با پوشش گیاهی



شکل ۵- ترکیب رنگی (RGB 741) داده‌های ETM<sup>+</sup> در منطقه ماربین برای جداسازی پوشش گیاهی از واحدهای سنگی



شکل ۶- ترکیب رنگی (RGB 468) داده‌های استر منطقه ماربین (سرپسیت و کانی‌های رسی به رنگ صورتی و کلریت و اپیدوت به رنگ سبز)

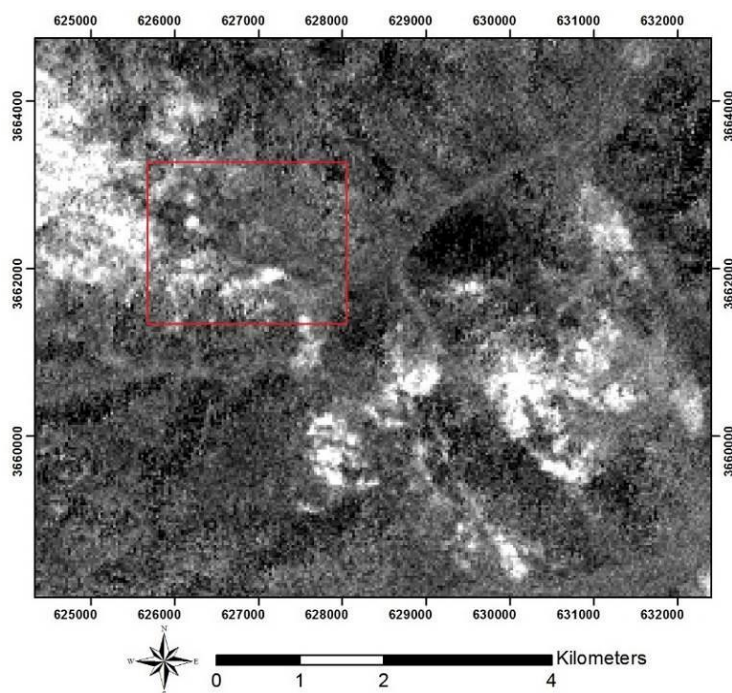


شکل ۷- ترکیب رنگی دروغین به دست آمده از ترکیب نسبت‌های بانندی (R:4/9, G:4/8, B:4/5) (کانی‌های رسی و سرسیت به رنگ سفید و پهنه دگرسانی پروپیلیتیک به رنگ سبز نسبت به بخش‌های نادگرسان آشکار شده‌اند)

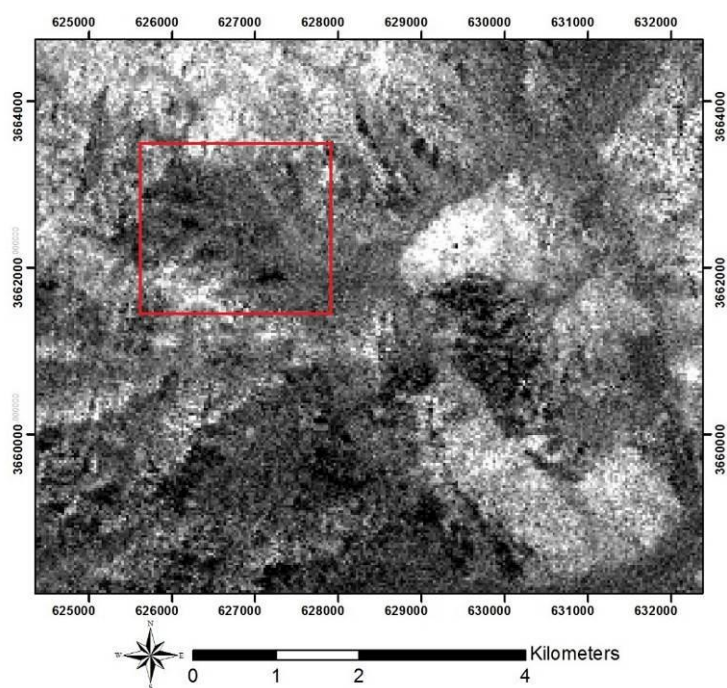
مخرج آن گذاشته می‌شود. از آنجایی که باند ۴ در داده‌های ماهواره‌ای استر بیشترین بازتاب و در باند ۶ بیشترین جذب را دارد، برای شناسایی پهنه‌های دگرسانی بر پایه ویژگی‌های طیفی کانی‌های شاخص در هر دگرسانی، نسبت بانندی 4/6 برای نمایش کانی سرسیت (کانی شاخص در دگرسانی فیلیک) در منطقه به کار برده شد (شکل ۸). در روش باند جذب نسبی، مخرج کسر بانندی است که نزدیک‌ترین موقعیت به کمترین جذب را دارد و صورت کسر مجموع باندهای بازتابی کنار آن است که از بهترین روش‌ها برای آشکارسازی و نمایش کانی‌های با Fe-Mg-O-H و Al-O- در پهنه‌های دگرسانی به شمار می‌رود. از روش نسبت بانندی ترکیبی (9+6/8) نیز برای تفکیک کلریت و اپیدوت‌های منطقه برای آشکارسازی بخش‌های معرف دگرسانی پروپیلیتیک بهره گرفته شد (شکل ۹).

#### نسبت بانندی (Band Ratio)

کانی‌های گوناگون در طول موج‌های متفاوت، ویژگی‌های طیف جذب و بازتابی متفاوت نشان می‌دهند. از این ویژگی برای آشکارسازی آنها بهره گرفته می‌شود. بنابراین با شناخت ویژگی‌های بازتابی پدیده‌های گوناگون، نسبت‌گیری بانندی روشی ساده و کارآمد در جدایش بخش‌های دگرسانی، شناسایی هاله‌های دگرسانی و بکر، شناسایی کانی‌های شاخص در هر نوع دگرسانی، شناسایی هاله‌های دگرسانی گرمابی و بررسی سنگ‌شناسی به شمار می‌رود (Rouskov *et al.*, 2005). از این روش، در این روش باندهای مناسب که بیشترین بازتاب و جذب را دارند، برگزیده می‌شوند. سپس بانندی که میزان تابش از هدف مورد نظر در آن بیشتر است در صورت کسر و بانندی که میزان جذب از آن هدف در آن بیشتر است در



شکل ۸- روش نسبت بانندی (Gray Scale 4/6) داده‌های استر منطقه (بخش‌های با کانی سریسیت به‌صورت پیکسل‌های روشن آشکارسازی شده‌اند)

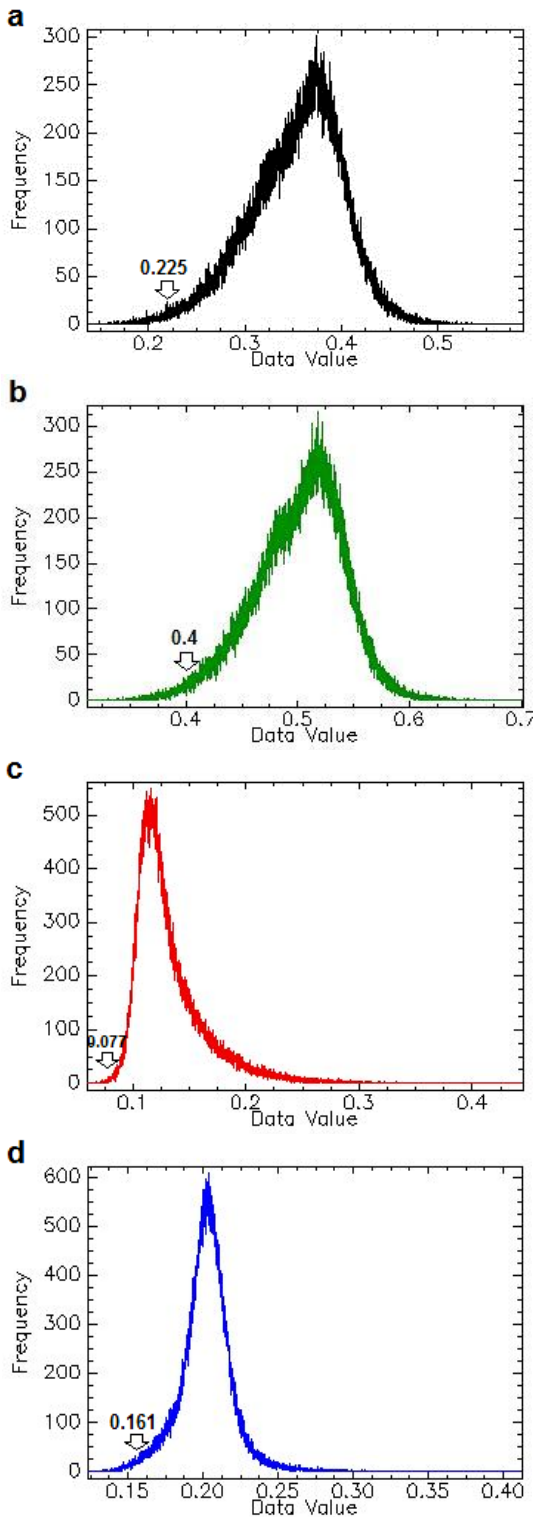


شکل ۹- روش نسبت بانندی ترکیبی (Gray Scale 9+6/8) (بخش‌های با کلریت و اپیدوت به‌صورت پیکسل‌های روشن آشکار شده‌اند)

زمین‌شناختی را از راه ارزیابی میزان تشابه طیف‌های تصویر و مرجع انجام می‌دهد ( Rowan and Mars, 2003; Van Der Meer *et al.*, 1997). این فرایند از

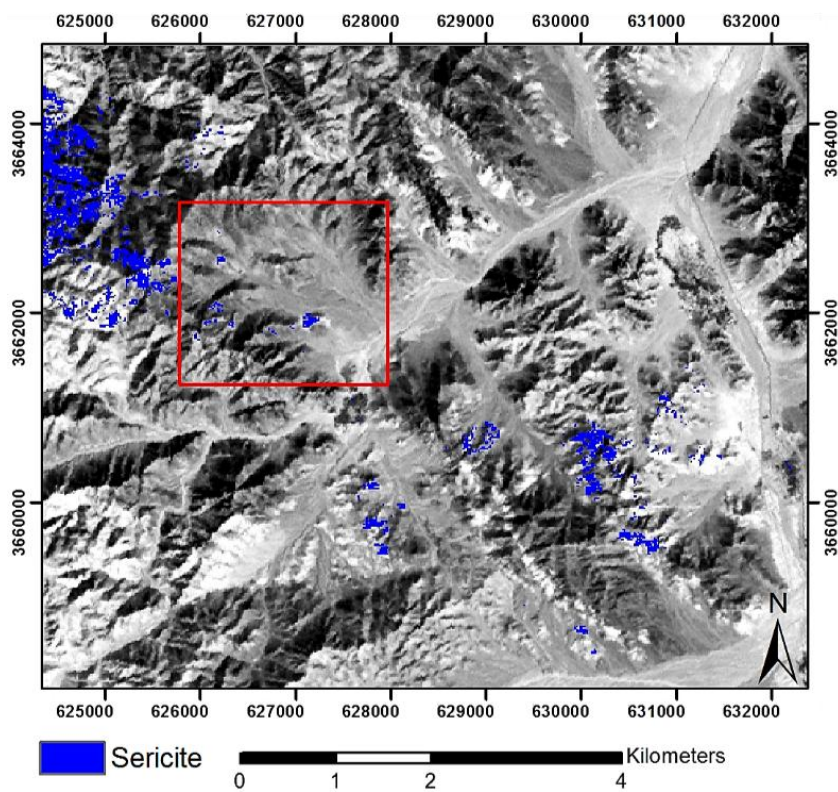
پهنه‌بندی زاویه طیفی (Spectral angle mapper) نقشه‌برداری زاویه طیفی (SAM) یک روش رده‌بندی سریع است که فرایند نقشه‌برداری واحدهای

SAM نسبت به دیگر روش‌های پردازشی (مانند: نسبت باندی و ترکیب رنگی دروغین) آشکار می‌شود.

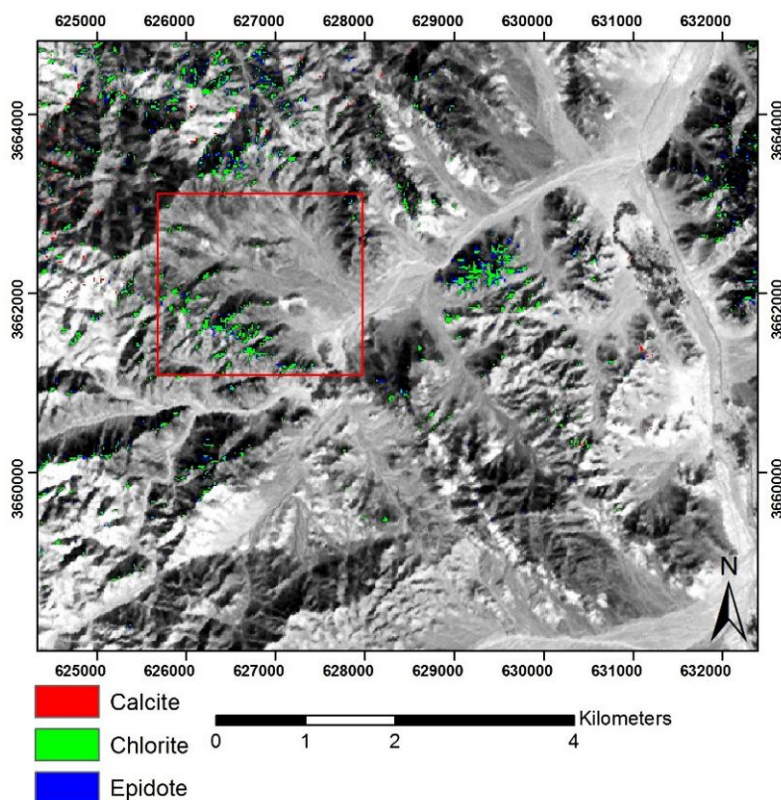


شکل ۱۰- حد آستانه‌ای طیف کانی‌های دگرسانی در منطقه ماربین. (a) کلریت؛ (b) اپیدوت؛ (c) کلسیت؛ (d) سریسیت

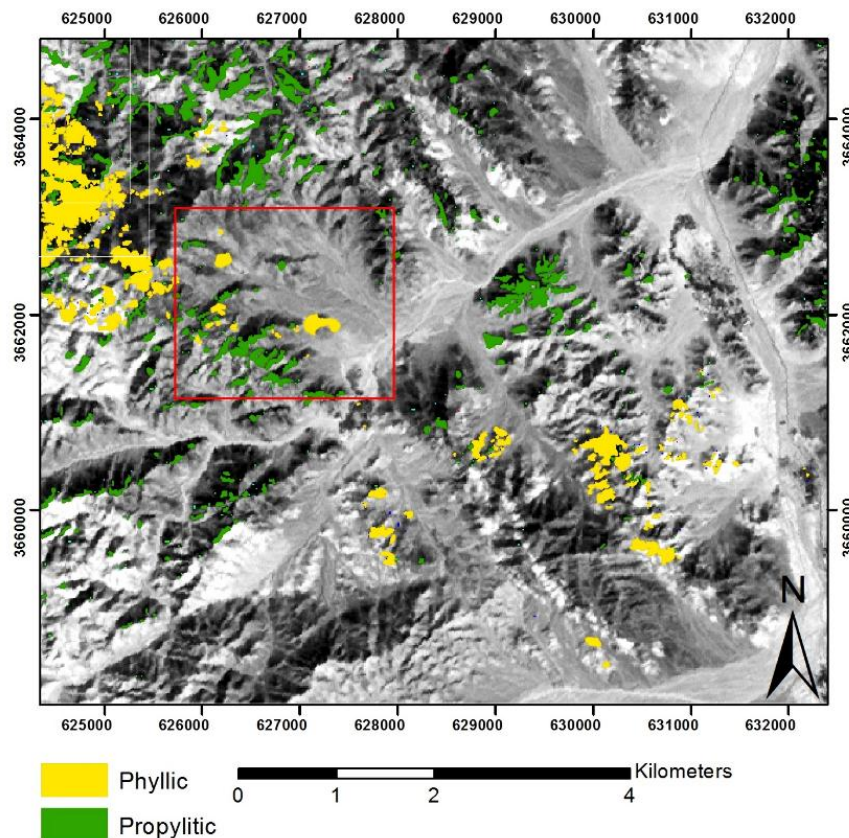
راه محاسبه زاویه طیفی میان طیف‌های تصویر و مرجع انجام می‌شود و خروجی‌های آن به صورت زاویه‌هایی میان صفر و یک است. هر اندازه این زاویه کوچک‌تر باشد، طیف هدف مورد نظر به طیف مرجع نزدیک‌تر و تشابه آنها بیشتر است (Kruse et al., 1993). همراه با خروجی‌های SAM تصویرهای Rule نیز تولید می‌شوند که فاصله زاویه‌ای واقعی (بر پایه رادیان) میان هر طیف تصویر و طیف مرجع را نشان می‌دهند. پیکسل‌های تیره‌تر در تصویرهای Rule کوچک‌ترین زاویه‌های طیفی را نشان داده و بیشترین شباهت را با طیف مرجع دارند (Kruse et al., 1993). برای نمایش پهنه‌های دگرسانی در این منطقه و بخش‌های پیرامون آن، از روش پهنه‌بندی زاویه طیفی، طیف کانی‌های سریسیت برای پهنه دگرسانی فلیک و کلریت، اپیدوت و کلسیت (که کانی‌های شاخص دگرسانی پروپیلیتیک هستند) از کتابخانه طیفی USGS (Spectral Library) (شکل ۱۰) انتخاب و روی تصویر استر منطقه نمایش داده شد. بر پایه آن، دگرسانی فلیک و کانی‌های رسی در بخش‌های مرکزی منطقه گسترش چشمگیری دارد؛ اما در جنوب منطقه به طور محدودتری آشکار می‌شود (شکل ۱۱). دگرسانی پروپیلیتیک آشکارا در ارتفاعات جنوبی منطقه به طور گسترده دیده می‌شود (شکل ۱۲). با بهره‌گیری از روش SAM، از کانی‌های کائولینیت و دیکیت برای آشکارسازی دگرسانی آرژیلیک بهره گرفته شد. البته نقشه دگرسانی آرژیلیک چندان گویا نیست و همه منطقه را دربر می‌گیرد. سرانجام با آمیختن نتایج به دست آمده از بررسی‌های میکروسکوپی و کنترل صحرایی نقشه دگرسانی اندیس ماربین و مناطق پیرامون آن به دست آمد (شکل ۱۳). بر پایه نتایج به دست آمده از فرایند SAM و مقایسه آن با روش‌های دیگر پردازش تصویرهای ماهواره‌ای، حساسیت و دقت بالا در روش



شکل ۱۱- نتایج حد آستانه‌ای طیف کانی سربیسیت بازتاب‌شده از تصویرهای ASTER در روش SAM



شکل ۱۲- نتایج حد آستانه‌ای طیف کانی‌های کلسیت، کلریت و اپیدوت بازتاب‌شده از تصویرهای ASTER در روش SAM



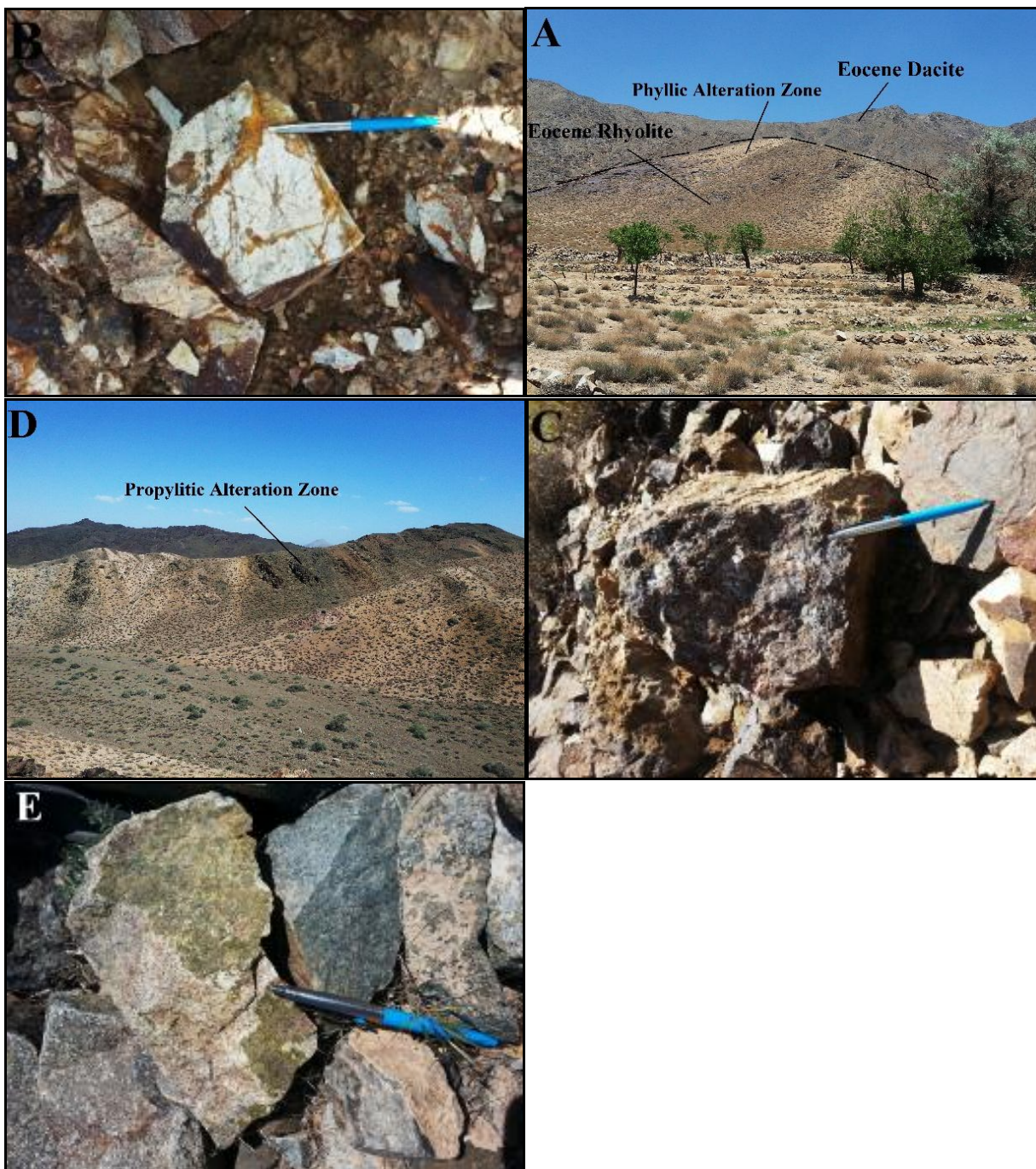
شکل ۱۳- نقشه برداری پهنه‌های دگرسانی با اجرای فرایند SAM روی تصویر ماهواره‌ای ASTER (بخش‌های دگرسان‌شده منطقه روی تصویر نشان داده شده‌اند)

هیدرواکسیدهای آهن و منگنز شناخته می‌شود که در پی عملکرد آب‌های جوی و فروروی روی کانی‌های سولفیدی پدید آمده‌اند (شکل ۱۴- B). برش‌های گرمابی نیز به رنگ‌های نارنجی و صورتی در این پهنه دیده می‌شوند که به ترتیب پیامد پیدایش اکسیدهای آهن و سربسیتی شدن در میان قطعه‌های خردشده سنگ ریولیت-ریوداسیتی هستند (شکل ۱۴- C).

دگرسانی پروپیلیتیک گسترده‌ترین دگرسانی در این منطقه است. این دگرسانی بیشتر سنگ‌های آتشفشانی حاشیه منطقه (داسیت‌های سبز رنگ) را تحت تأثیر قرار داده و دگرسانی‌های دیگر را دربر گرفته است (شکل‌های ۱۴- D و ۱۴- E).

### سنگ‌نگاری سنگ‌های نیمه آتشفشانی (نیمه ژرف) و دگرسانی گرمابی

برای بررسی درستی داده‌های به دست آمده از پردازش تصویرهای ماهواره‌ای و همخوانی آنها با ویژگی‌های صحرایی، واحدهای سنگی و رخنمون اندیس مولیبدن پورفیری ماربین بازدید صحرایی شدند. سپس برای بررسی‌های دقیق‌تر، مقطع‌های نازک تهیه شدند. هنگام بازدیدهای انجام شده ریولیت‌های سفیدرنگ ائوسن در بخش‌های مرکزی منطقه دیده شدند که بسیار دچار دگرسانی فیلیک شده بودند (شکل ۱۴- A). دگرسانی فیلیک با رنگ کرم تا زرد روشن در منطقه رخنمون دارد و با کوارتزهای استوکورکی و توده‌ای و رگه-رگچه‌های اکسیدها و



شکل ۱۴- A) واحدهای نیمه‌آتشفشانی داسیتی و جایگاه تقریبی پهنه دگرسانی فیلیک در همجواری آبرفت‌های عهد حاضر (دید رو به باختر)؛ B) شبکه‌ای از بافت استوک‌ورک سیلیسی به‌همراه اکسیدهای آهن در پهنه دگرسانی فیلیک؛ C) برش‌های گرمایی با قطعه‌های خردشده سنگ ریولیت- ریوداسیتی که فضای میان قطعه‌ها با هماتیت و گوئیت پر شده است؛ D, E) دگرسانی پروپیلیتیک در واحدهای داسیتی (دید رو به خاور)

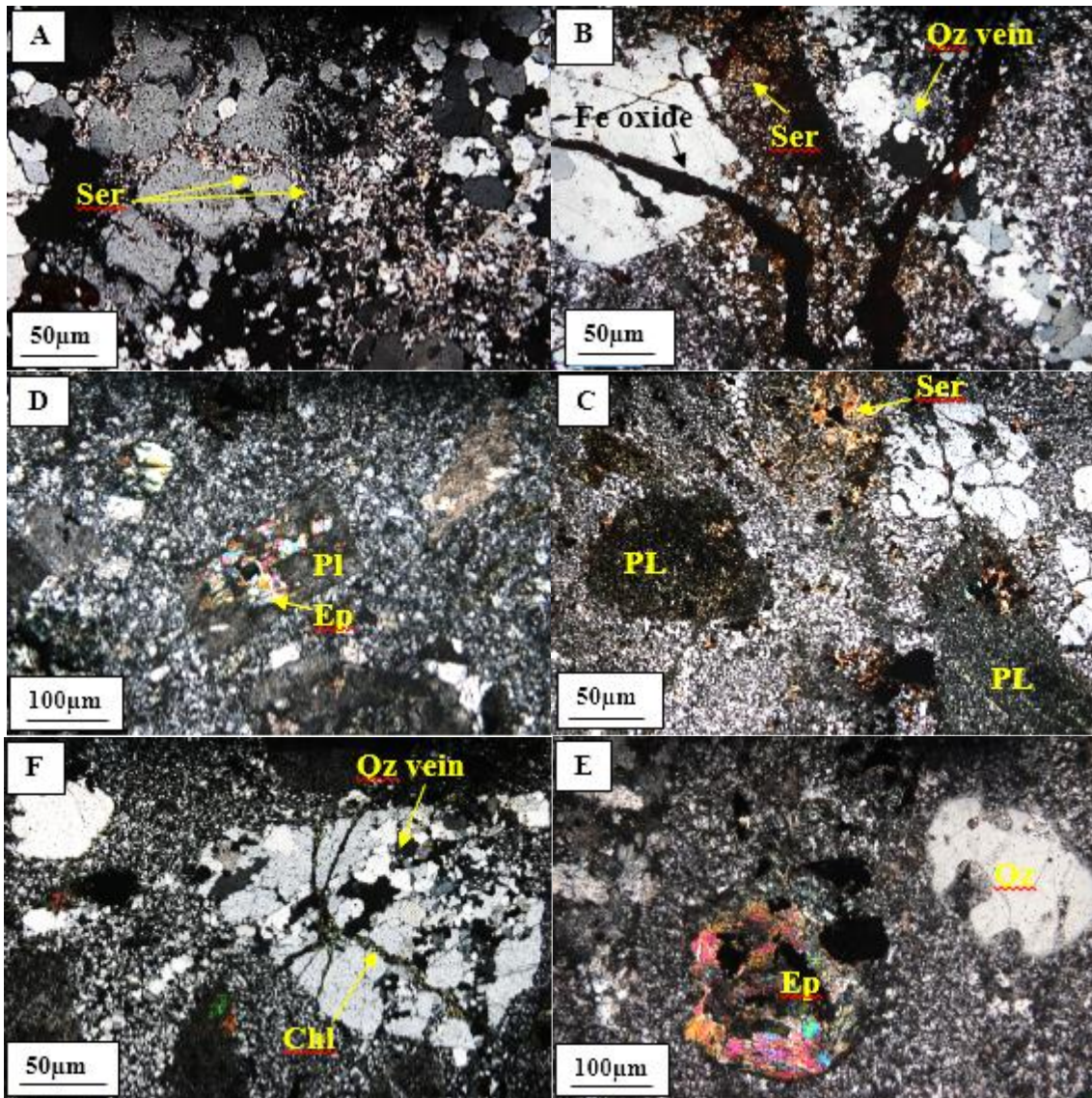
شده‌اند و به‌صورت پرکننده شکستگی‌های درشت‌بلورها و در زمینه سنگ دیده می‌شوند (شکل ۱۵- A). در برخی بخش‌ها، به‌دنبال هوازدگی

برپایه بررسی‌های سنگ‌نگاری و رفتار محلول‌های گرمایی، درشت‌بلورهای فلدسپار و پلاژیوکلاز با سریسیت (مسکوویت ریزدانه) جایگزین



پی افزایش شدت هیدرولیز در این پهنه، برخی پلاژیوکلازها و فلدسپارها آرژیلیتی و در ادامه، با کانی‌های رسی جایگزین شده‌اند (شکل ۱۵- C).

هماتیت و هیدروکسیدهای آهن، سرسیت‌ها و استوکورک‌های سیلیسی دچار آغشتگی و رنگ‌آمیزی شده و قطع شده‌اند (شکل ۱۵- B). در



شکل ۱۵- A) تصویر میکروسکوپی از دگرسانی کوارتز- سرسیتیک در سنگ ریولیت- ریوداسیت پورفیری اندیس ماربین که بافت آذرین پورفیری در آن هنوز دیده می‌شود (در XPL)؛ B) جانمایی کامل سرسیت‌های ریزدانه در زمینه سنگ به‌همراه رگه‌های سیلیسی و قطع شدن رگچه سیلیسی و زمینه با هیدرواکسیدهای آهن در گام‌های پایانی کانه‌زایی و رنگ‌آمیزی سطحی سرسیت‌های ریزدانه (در XPL)؛ C) سرسیت در کنار پلاژیوکلازهای رسی شده در حاشیه پهنه فیلیک (در XPL)؛ D) سنگ داسیتی و سوسوریتی شدن کانی پلاژیوکلاز از مرکز به سوی حاشیه و پیدایش میانبارهای اپیدوت در مرکز پلاژیوکلاز (در XPL)؛ E) تجزیه کامل کانی پلاژیوکلاز به اپیدوت به‌همراه فنوکریست کوارتز خلیجی (در XPL)؛ F) کوارتز رگچه‌ای که فنوکریست‌های کوارتز و زمینه سنگ را قطع کرده است و خود با رگچه کلریت قطع شده است (XPL) (نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از: Whitney و Evans (۲۰۱۰)؛ Ser: سرسیت؛ Chl: کلریت؛ Pl: پلاژیوکلاز؛ Qtz vein: رگه سیلیسی؛ Fe oxide: اکسید آهن؛ Ep: اپیدوت)

در مرحله اکتشاف اندیس معدنی ماربین، شمار ۱۱ نمونه سنگی با وزن ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ گرم (که متناسب با بزرگی بلورهای سنگ است) از سنگ‌های با کانه‌زایی استوکورکی و پراکنده در سنگ‌های دگرسان شده (متأثر از محلول‌های گرمایی) برداشت شدند. این نمونه‌برداری به صورت تصادفی در دو مرحله از نمونه‌های سنگی سطحی انجام شد. مختصات جغرافیایی هر نمونه به‌طور دقیق با GPS ثبت و روی نقشه زمین‌شناسی و دگرسانی با مقیاس ۱:۱۵۰۰۰ ثبت شد. شکل ۱۶ نقشه محل نمونه‌برداری‌ها برای پیجویی‌های زمین‌شیمیایی را رخنمون اندیس ماربین نشان می‌دهد. سپس برای به‌دست‌آوردن مقدار عنصرهای با بی‌هنجاری، نمونه‌ها به روش ICP-OES به آزمایشگاه مواد معدنی زرآما فرستاده شدند. شمار ۵ نمونه نیز برای تجزیه عنصر طلا به روش جذب اتمی به آزمایشگاه کیمیاپژوه البرز ارسال شدند.

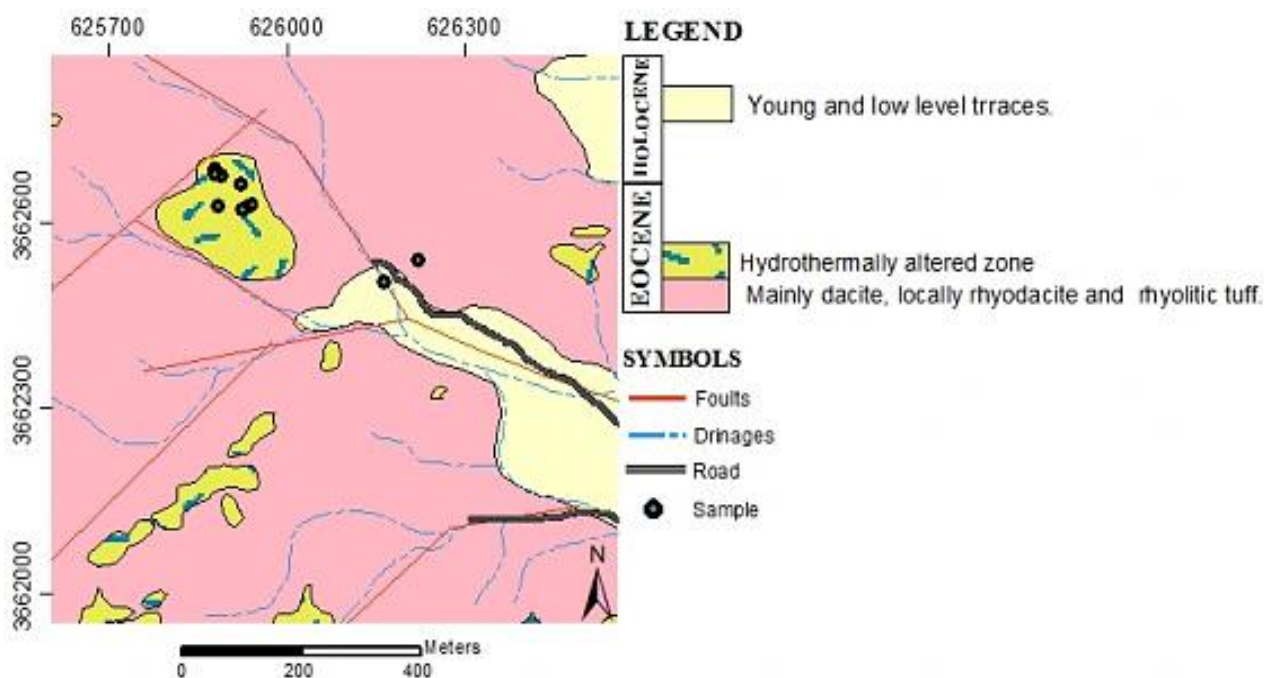
داده‌های زمین‌شیمیایی به‌دست‌آمده برای برخی از عنصرهای مهم در جدول ۱ آورده شده‌اند. برپایه این داده‌ها، شواهد ماهواره‌ای، زمین‌شناسی صحرایی و دگرسانی‌های گرمایی، مناطق امیدبخشی برای رخداد کانه‌زایی وجود دارد. این داده‌ها (جدول ۱) نشان‌دهنده بی‌هنجاری عنصرهای اصلی مولیبدن، مس، قلع و طلا هستند.

شکل ۱۷ مقادارهای بیشینه و میانگین به‌دست‌آمده برای عنصرهای با آنومالی در نمونه‌های برداشت‌شده از بخش‌های دگرسان شده و سنگ بستر در منطقه را نشان می‌دهند.

در مقطع‌های نازک ساخته‌شده از نمونه‌های برداشت‌شده، بخش‌های حاشیه‌ای و جنوبی منطقه، پلاژیوکلازها هنگام فرایند سوسوریتیزاسیون از مرکز و گاه کاملاً با اپیدوت جایگزین شده‌اند. این پدیده نشان‌دهنده تجزیه سازنده آنورتیتی پلاژیوکلازهای کلیسم‌دار در پی هجوم محلول‌های گرمایی است. همچنین، کوارتزهای با حاشیه خلیجی و خردشده از درشت‌بلورهای اصلی هستند. برپایه پیشنهاد Shelley (۱۹۹۳)، پیدایش کوارتزهای خلیجی در ماگما نشانه کاهش فشار هنگام فوران پرشتاب ماگما و یا پیامد نبود تعادل در پی آمیختگی و آرایش ماگماست (شکل‌های D-۱۵ و E-۱۵). در پی پیشرفت دگرسانی گرمایی، بیشتر کانی‌های مافیک (بیوتیت)، پلاژیوکلازها و فلدسپارها به‌طور کامل با اپیدوت و به مقدار کمتر کلریت جایگزین شده‌اند. همچنین، رگچه سیلیسی سنگ داسیت در پهنه دگرسانی پروپیلیتی را قطع کرده است (شکل F-۱۵). در این پهنه از فراوانی رگچه‌های سیلیسی گرمایی در زمینه سنگ کاسته می‌شود. گفتنی است برپایه پیمایش‌های صحرایی و بررسی‌های میکروسکوپی نشانه‌ای از پهنه دگرسانی پتاسیک در منطقه دیده نشد.

### بررسی داده‌های زمین‌شیمیایی

پس از بررسی سنگ‌شناسی و دگرسانی در مناطق تفکیک‌شده با روش دورسنجی، نمونه‌برداری سنگی انجام شد. برای بررسی‌های زمین‌شیمیایی



شکل ۱۶- موقعیت برداشت نمونه‌های سنگی در محدوده اکتشافی ماربین روی نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۱۵۰۰۰

جدول ۱- داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه برخی عنصرهای مهم در نمونه‌های سنگی اندیس ماربین به روش ICP-OES (عنصر طلا برپایه ppb و دیگر عنصرها برپایه ppm)

Element Code	Mo	Cu	Au	Sn	Bi	Th	Sb	As	Zn	Pb	Co	Y	Zr	Ag
Z1	45	140	137	3297	24.4	31	1.06	222	54	51	2	4.6	25.6	0.26
Z2	53.7	57.9	87.6	4520	19.2	74	1.12	133	2159	59	4	35	19	0.18
Z4	23.9	61	-	-	-	6.7	0.98	15.5	30	13	1	15	13	0.21
Z9	145	228	-	-	-	4.9	1.02	9.8	189	33	2	4	5	0.2
Z10	443.4	459	124	1775	15	18	1.03	204	230	19	3	5	126	0.2
Z11	681.2	607	57.2	9807	20.5	12	1.20	80	491	15	2	3	57.2	0.8
Z12	8.2	578	-	-	-	19.9	0.9	6.5	72	7	4	17	8	0.19
Z13	136.1	213	-	-	-	14.3	1.07	51.5	42	99	2	10	9	0.16
Z15	9.9	534	5	-	-	8.2	0.89	4.9	31	7	7	17	15	0.17
Z19	20.3	422	-	-	-	12.1	1.18	80.7	409	28	9	18	37	0.31
M1	911	334	-	7	16	4	13	1323	339	329	1	4	35	0.1

مولیبیدن، طلا، قلع، مس، سرب، روی و حتی آرسنیک بی‌هنجاری نشان می‌دهند. از آنجایی که مقدار عنصر مولیبیدن (میانگین: ۲۲۵ ppm) نسبت به مقادیر ناچیز مس (میانگین: ۳۳۰ ppm) و طلا (میانگین ۸۲ ppb) بالاست، همچنین، محدود بودن

برپایه شکل ۱۷، داده‌های به‌دست‌آمده به‌ترتیب زیر هستند:

Max: Sn > Zn > As > Mo > Cu > Pb > Au

Mean: Sn > Zn > Cu > Mo > As > Au > Pb

همان‌گونه که دیده می‌شود، عنصرهای

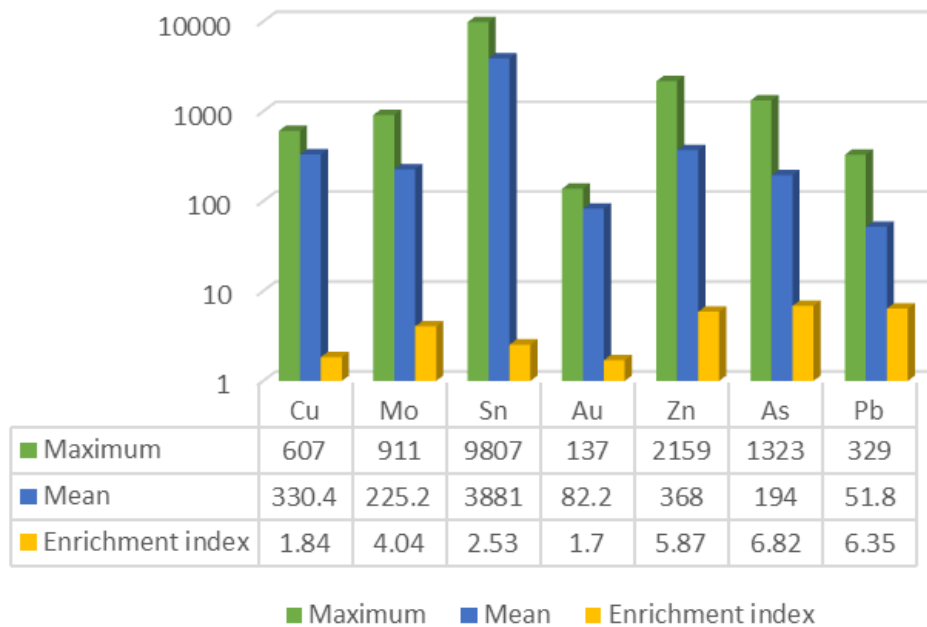
به ترتیب زیر است:

En. Index: As > Pb > Zn > Mo > Sn > Cu > Au

داده های غنی شدگی به دست آمده، برخلاف عنصر مس (میانگین: ۳۳۰ ppm)، گویای غنی شدگی بالای عنصرهای مولیبدن، طلا، قلع، سرب و حتی آرسنیک (که ردیاب طلاست) نسبت به کلارک خود در پوسته هستند. بی هنجاری در عنصرهای فرعی (مانند: عنصرهای فوق کانساری آرسنیک، سرب و روی) نشان دهنده کانی سازی مولیبدن پورفیری در اندیس ماربین است.

نمونه های سنگی برداشت شده با بی هنجاری قلع (میانگین: ۳۸۸۱ ppm)، نادرست بودن داده های به دست آمده از تجزیه زمین شیمیایی عنصر قلع در منطقه نشان می دهند کانسار کمابیش از مولیبدن، طلا و قلع سرشار است؛ اما اهمیت مس در اندیس ماربین به نسبت کم است.

بر پایه تقسیم کردن مقادیرهای بیشینه و میانگین عنصرهایی که آنومالی دارند بر یکدیگر، ضریب غنی شدگی هر عنصر به دست آورده می شود (شکل ۱۷). بر پایه آن، ضریب غنی شدگی عنصرها در اندیس ماربین



شکل ۱۷. نمودار ستونی مقادیرهای بیشینه، میانگین و ضریب غنی شدگی عنصرها در اندیس ماربین (عنصر طلا بر پایه ppm و دیگر عنصرها بر پایه ppm)

### بحث و برداشت

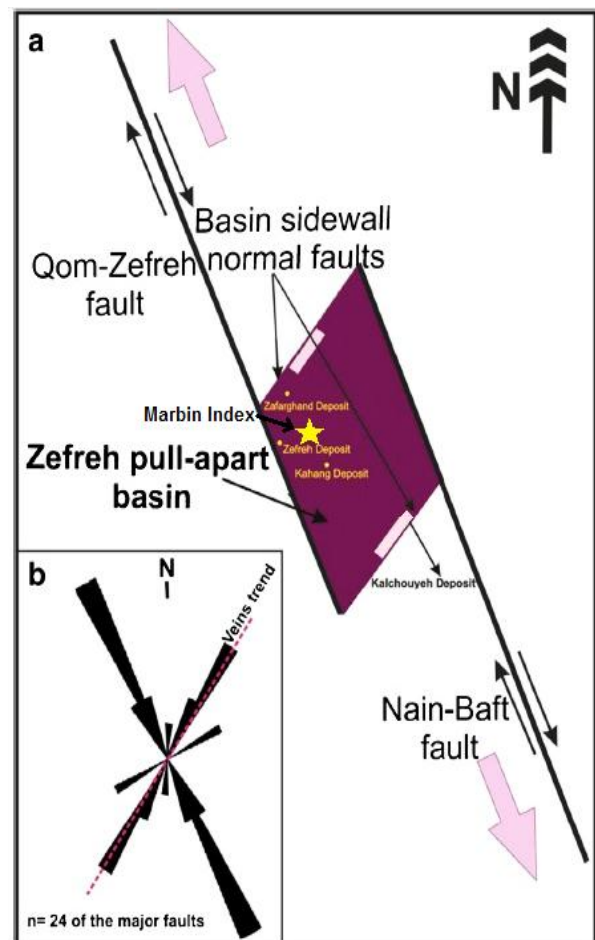
از دیدگاه جایگاه زمین ساختی و زمین ساختی، اندیس مولیبدن پورفیری ماربین با فرایندهای آتشفشانی کمان قاره ای ارومیه- دختر و بخش مرکزی پهنه کششی راستالغز زفره رابطه دارد. همچنین، با محیط پیدایش کانسار فلزهای پایه پورفیری، مانند مولیبدن پورفیری، همخوانی دارد.

از این رو، سازوکار جابجایی در سامانه های گسلی قم- زفره و نایین- بافت و رفتار تنش تراکشی در میان این دو بخش گسلی همپوشان، پهنه های کششی را پدید آورده است. به طور محلی، کشش پوسته ای در راستای این گسل های راستالغز راستگرد، پهنه کششی راستالغز زفره و در پی آن، سامانه های گرمایی کانه زا (مانند: زفره، کهنک،

مشخصی در میان گسل‌ها نشان می‌دهند. در این پژوهش، نقشه دگرسانی‌های اندیس ماریین با به‌کارگیری تحلیل تصویر ماهواره‌ای ASTER آشکار شد. تصویرهای ماهواره‌ای ASTER که سنجنده‌ای تخصصی- کاربردی در امور زمین‌شناسی و اکتشاف مواد معدنی است، در پیجویی کانسارهای پورفیری به کار برده می‌شوند. برای جدایش و منطقه‌بندی دگرسانی‌های گرمایی در اندیس پورفیری ماریین، روش‌هایی مانند ترکیب رنگی دروغین، نسبت بانندی و سرانجام طیف کانی‌های دگرسانی مورد نظر از کتابخانه طیفی سازمان زمین‌شناسی آمریکا در روش SAM به کار گرفته شدند. به باور Galvao و همکاران (۲۰۰۵)، این روش برپایه تشابه طیفی میان طیف سلول مرجع و طیف بازتابی به‌دست‌آمده از کانی‌های دگرسانی به کار برده می‌شود.

داده‌های به‌دست‌آمده از پردازش تصویرهای ASTER در منطقه ماریین نشان‌دهنده رویداد دگرسانی‌های فیلیک و پروپیلیتیک به‌صورت غالب هستند. به این ترتیب، برای تهیه نقشه دگرسانی با بهره‌گرفتن از روش SAM که روشی کارآمد و دقیق‌تر نسبت به دیگر روش‌های پردازشی است، برای پهنه دگرسانی فیلیک مقادارهای مربوط به کانی سیرسیت و برای آشکارسازی دگرسانی پروپیلیتیک، مقادارهای اپیدوت، کلریت و کلسیت به کار برده شدند. بازبینی‌های میدانی انجام‌شده و بررسی‌های سنگ‌نگاری (برای تایید درستی داده‌های به‌دست‌آمده از پردازش‌های دورسنجی در منطقه ماریین) نشان‌دهنده وجود واحدهای نیمه‌آتشفشانی ریولیت- ریوداسیتی در مرکز

کالچویه و ظفرقند) را پدید آورده است (شکل ۱۸)؛ به‌گونه‌ای که بیشتر خطواره‌های منطقه زفره، شکستگی‌های کششی هستند که با موقعیت جایگیری دایک‌ها، توده‌های نفوذی و رخداد پهنه‌های دگرسانی و کانی‌سازی گوناگون مرتبط با محلول‌های گرمایی همپوشانی دارند.



شکل ۱۸- (a) نمایی از پهنه کششی زفره و جایگاه اندیس ماریین در آن (حرکات راستالغز محض فرض شده‌اند)؛ (b) رزیدیاگرام جهت‌گیری گسل‌ها در منطقه زفره (Hosseini et al., 2014)

با دیدن موقعیت و پراکندگی اندیس ماریین و دیگر کانسارها در منطقه زفره، به وابستگی نزدیک میان این کانسارها پی برده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که نهشته‌ها روند کمابیش خاوری- باختری دارند و تمرکز مکانی

سیال‌های گرمایی دچار تغییر و تحول شده و دگرسانی‌های گرمایی رخداد داده‌اند. داده‌های به‌دست‌آمده از تجزیه زمین‌شیمیایی سنگی در مرحله پیجویی گویای بی‌هنجاری فلزهای کانسار سازی مانند عنصرهای مولیبدن، قلع، طلا و مس هستند. آرسنیک، سرب و روی از عنصرهای فوق‌کانساری هستند که مقدار بالایی دارند. با اثبات رخداد دگرسانی‌های گرمایی فیلیک، سیلیسی شدن و پروپیلیتیک و آرژیلیک به میزان کم برپایه کاربرد روش‌های دورسنجی و سنگ‌نگاری و همخوانی آنها با داده‌های زمین‌شیمیایی سطحی، انتظار می‌رود محدوده کانی‌سازی - دگرسانی ماربین سامانه مولیبدن پورفیری باشد که دچار فرسایش اندکی شده است. همچنین، یافته‌های پژوهش‌های پیشین (Mirzaei *et al.*, 2016) و دماسنجی بیشتر از ۱۰۰ سیال درگیر در کوارتزهای رگه- رگچه‌ای و توده‌ای در پهنه‌های دگرسانی محدوده اکتشافی ماربین نشان‌دهنده شوری بالا و دمای بالای همگن‌شدگی (بیشتر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد) است. این ویژگی‌ها تشابه کمابیش خوبی با کانی‌سازی مولیبدن پورفیری (احتمالاً از نوع کلیمکس) نشان می‌دهند.

سرانجام برپایه ویژگی‌های نوع سنگ میزبان ریولیت- ریوداسیتی و دگرسانی‌های آشکار شده در پردازش تصاویرهای ماهواره‌ای ASTER و ویژگی‌های صحرایی، داده‌های زمین‌شیمیایی و ناهنجاری مولیبدن و قلع و همچنین، دماسنجی سیال‌های درگیر (>۶۰۰ - ۲۵۰ درجه سانتیگراد) در اندیس ماربین، پیدایش سامانه مولیبدن پورفیری انتظار می‌رود. گفتنی است اثبات قطعی این نکته نیازمند برنامه‌ریزی‌های زمین‌شیمیایی اکتشافی دقیق‌تر و فشرده‌تر در گام‌های

منطقه هستند. این سنگ‌ها به‌شدت دچار دگرسانی فیلیک شده‌اند. حضور سربیسیت، کوارتز و اکسیدهای آهن (پدیدآمده از اکسایش سولفیدها) و منگنز در مقطع‌های نازک درستی این نکته را نشان می‌دهند. در پی تأثیر محلول‌های گرمایی، استوک‌ورک‌های سیلیسی، سیلیسی شدن و اکسیدهای آهن نیز در رخنمون آن به فراوانی دیده می‌شوند. برش‌های گرمایی نیز به‌گونه چشمگیری در پهنه دگرسانی فیلیک دیده می‌شوند. دگرسانی آرژیلیک که با رسی شدن بخش‌های دگرسان شده شناخته می‌شود، با گسترش اندک در کنار دگرسانی فیلیک دیده می‌شود. گمان می‌رود این دگرسانی در پی تأثیر عوامل جوی و شستشو فرسایش پیدا کرده باشد. در پیرامون پهنه دگرسانی فیلیک، دگرسانی پروپیلیتیک روی داده است. دگرسانی پروپیلیتیک با کانی‌های اپیدوت، کلریت و کلسیت شناخته می‌شود که به‌صورت ثانویه از دگرسانی کانی‌های پلاژیوکلاز و کانی‌های فرومنیزین پدید آمده‌اند. این دگرسانی سنگ‌های داسیتی در جنوب منطقه را به‌صورت کاملاً آشکار و فراگیر دربر گرفته و با رنگ سبز نمایان شده است.

برپایه بررسی‌های (Mirzaei ۲۰۱۵) گمان می‌رود رخنمون منطقه آپوفیزی نمایان شده از استوکی گرمایی ریولیت- ریوداسیتی باشد که از باتولیت فلسیک و کالک‌آلکان پورفیری در ژرفای زمین جدایش یافته است. جابجایی و نفوذ شاخه‌ای از این استوک پورفیری به‌سوی بخش‌های کم ژرفا و کم فشار پیامد سازوکار کشتی پوسته‌ای در منطقه بوده است. از این‌رو، از دیدگاه شرایط دمایی و فیزیکوشیمیایی،

بعدی اکتشاف برای اطمینان از کانی‌سازی مولیبدن در نگران‌گان این پژوهش از حمایت‌های مالی منطقه است. تحصیلات تکمیلی گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان سپاس‌گزاری می‌کنند.

## سپاس‌گزاری منابع

- Aftabi, A. and Atapour, H. (2000) Regional aspects of shoshonitic volcanism in Iran. *Episodes* 23(2): 119-125.
- Agard, P., Omrani J. J. and Moutherezu, F. (2005) Convergence history across Zagros (Iran): Constraints from collision; and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences* 94: 401-419.
- Aghazadeh, M., Hou, Z. and Badrzadeh, Z. (2012) Porphyry copper mineralization in Iran: main metallogenic belts and ore-forming episodes. *Proceeding of the 34<sup>th</sup> International Geological Congress, Brisbane, Australia.*
- Amidi, S. M. and Zahedi, M. (1983) Geological map of Iran (Kashan), Scale 1:250000. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran (in Persian).
- Asadi, H. (2007) Detailed exploration in Kahang porphyry Cu- Mo index. Dorsa pardazeh company, Isfahan, Report 3 (in Persian).
- Ayati, F., Yavuz, F., Asadi, H. H., Richards, J. P. and Jourdan, F. (2013) Petrology and geochemistry of calc-alkaline volcanic and subvolcanic rocks, Dalli porphyry copper-gold deposit, Markazi Province, Iran. *International Geology Review* 55: 158-184.
- Bagheri, H., Moore, F. and Alderton, D. H. M. (2007) Cu-Ni-Co-As (U) mineralization in the Anarak area of Central Iran. *Asian Journal of Earth Sciences* 29: 651-665.
- Beygi, S. (2013) Geometric analysis of faults in the central part of the Urumieh-Dokhtar magmatic arc and the relationship between mineralization and structural elements, northwest of Isfahan. M.Sc. thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran (in Persian).
- Farahani Farmahini, M. (2008) Geology, geochemistry and mineralogy investigations of Kahang index, Ph.D. thesis, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran (in Persian).
- Galvao, L. S., Almeida-Filho, R. and Vitorello, I. (2005) Spectral discrimination of hydrothermally altered Materials, Using ASTER short-wave infrared bands. *Applied Earth Observation and Geoinformation* 7: 107-114.
- Harati, H. (2011) Investigation of geology, alteration, mineralogy and geochemistry of Kahang Cu porphyry deposit (NE of Isfahan). PhD thesis, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran (in Persian).
- Hatami, S. (2008) Petrology of Kahang granitoids and volcanic rocks with emphasis on mineralization and alteration zones. M.Sc. thesis, Islamic Azad University Khorasgan Branch, Isfahan, Iran (in Persian).
- Hosseini, H., Bagheri, H. and Esmaeili, M. (2014) Mineralization and structural features of Kalchouyeh copper-gold deposit (west-central Iran). *Arabian Journal of Geosciences* 8(5): 3007-3018.
- Khodadadi, F. and Arfania, R. (2017) Alteration Mapping in Central Urumieh-Dokhtar Magmatic Assemblage of Iran Using ASTER and OLI Data. *Open Journal of Geology* 7: 1215-1226.

- Khodami, M. (2009) Petrology of Plio-Quaternary volcanic rocks in south-east and north-west of Isfahan. Ph.D. thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran (in Persian).
- Komeili, S. S. (2010) Petrology and geochemistry of the Kahang porphyry Cu-Mo index and related hydrothermal alteration zones. M.Sc. thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran (in Persian).
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B. Boardman, J. B. Heidebreicht, K. B. Shapiro, A. T. Barloon, P. J. and Goetz, A. F. H. (1993) The Spectral Image Processing System (SIPS)- interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment* 44: 145-163.
- McInnes, B. I. A., Evans, N. J., Belousova, E., Griffin, W. T. and Andrew, R. L. (2003) Timing of mineralization and exhumation processes at the Sar Cheshmeh and Meiduk porphyry Cu deposits, Kerman belt, Iran. In: *Mineral Exploration and Sustainable Development* (Ed. Eliopoulos, D. G.) 1197-1200. Proceedings of the Seventh Biennial SGA Meeting, Athens, Greece
- Mirnejad, H., Mathur, R. Hassanzadeh, J. Shafie, B. and Nourali, S. (2013) Linking Cu mineralization to host porphyry emplacement: Re- Os ages of molybdenites versus U-Pb ages of zircons and sulfur isotope compositions of pyrite and chalcopyrite from the Iju and Sarkuh porphyry deposits in southeast Iran. *Economic Geology* 108: 861-870.
- Mirzaei, M. (2015) Reconnaissance exploration and genesis investigation of Marbin Au- Cu Index (North of Zefreh), Isfahan province. M.Sc. thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran (in Persian).
- Mirzaei, M., Bagheri, H. and Ayati, F. (2016) Petrography and fluid inclusions study in Marbin porphyry Molybdenum (Sn) index (Northeast of Isfahan). *Iranian Journal of Petrology* 7(25): 1-18 (in Persian).
- Moinifar, S. (2011) Lithochemical studies, IP/RS geophysics and hydrothermal alteration separation with uses ASTER satellite data in Zefreh porphyry Cu index. M.Sc. thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran (in Persian).
- Porter, T. M. (1998) An overview of the world's porphyry and other hydrothermal copper and gold deposit and their distribution. In: *Porphyry and hydrothermal copper and gold deposit: A global perspective* (Ed. Porter, T. M.) 3-17. PGC Publishing, Adelaide.
- Radfar, J. (1998) Geological map of Iran (Ardestan), Scale 1:100000. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran (in Persian).
- Rouskov, K., Popve, Kstoykov, S. and Yamaguchi, Y. (2005) Some application of the remote sensing in geology by using aster image. Scientific Conference, Space, Ecology and Safety, Varna, Bulgaria.
- Rowan, L. C. and Mars, J. C. (2003) Lithologic mapping in the Mountain Pass, California, area using Advanced Spaceborne Emission and Reflection Radiometer (ASTER ) data. *Remote Sensing of Environment* 82: 350-366.
- Sayari, M. (2015) Petrogenesis and evolution of Oligocene-Pliocene volcanism in the central part of Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (Northeast of Isfahan). Ph.D. thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran (in Persian).
- Shafiei, B., Haschke, M. and Shahabpour, J. (2009) Recycling of orogenic arc crust triggers porphyry Cu mineralization in Kerman Cenozoic arc rocks, southeastern Iran. *Mineralium Deposita* 44: 265-283.



- Shahabpour, J. (2005) Tectonic evolution of the orogenic belt in the region located between Kerman and Neyriz. *Journal of Asian Earth Science* 240: 405-417.
- Shelley, D. (1993) *Igneous and metamorphic rocks under the microscope*. Chapman and Hall, London, UK.
- Taghipour, N., Aftabi, A. and Mathur, R. (2008) Geology and Re–Os geochronology of mineralization of the Miduk porphyry copper deposit, Iran. *Resource Geology* 58(2): 143-160.
- Tommaso, D. I. and Rubinstein, N. (2007) Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews* 32: 275-290.
- Van Der Meer, F., Vazquez-Torres, M. and Van Dijk, P. M. (1997) Spectral characterization of ophiolite lithologies in the Troodos Ophiolite complex of Cyprus and its potential in prospecting for massive sulphide deposits. *International Journal of Remote Sensing* 18(6): 1245-1257.
- Whitney, D. L. and Evans, B. W. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist* 95: 185-187.